

法人番号	171002
プロジェクト番号	S1312006

研究プロジェクト名

南海トラフ超巨大災害に対する 実効性ある防災対策に関する研究

平成25年度～平成27年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」

研 究 成 果 報 告 書

平成28年1月21日

金沢工業大学オープンリサーチセンター

地域防災環境科学研究所

研究代表者 高 畠 秀 雄

研究テーマ 1. 過去の大災害で指摘されながら未解決な防災力の向上対策

課題 No.	内容	研究担当者
課題 1-1	超巨大災害発生直後における被害状況の迅速な把握対策	京都大学大学院 田村正行 教授
	目的：災害発生直後に、被害状況の全容を迅速に把握し、救援活動に役立てる方法を検討する。	
課題 1-2	巨大津波に対する港湾施設の防災対策	港湾空港技研 栗山善昭 研究主監
	目的：巨大津波に対する港湾施設及びその背後地等の防災対策を検討する。	
課題 1-3	巨大津波による火災対策	増田達男 教授
	目的：巨大津波により流出した大型貯蔵タンクによる大都市の火災を防止する対策を検討する。	
課題 1-4	長周期地震動による超高層ビルの横揺れ対策	高島秀雄 教授
	目的：長周期地震動に対する高層ビルの横揺れを防止する方法を検討する。	
課題 1-5	巨大地震による市街地の液化化対策	東京工業大学大学院 田村修次 准教授
	目的：巨大地震により発生する市街地の液化化を防止、復旧する方法を検討する。	
課題 1-6	巨大地震・巨大津波による建物被害の迅速な災害復興対策	山岸邦彰 准教授
	目的：巨大地震・巨大津波による災害発生以後の事業継続を迅速に行う為の方法を検討する。	
課題 1-7	巨大地震による既存木造住宅の耐震化対策	後藤正美 教授
	目的：巨大地震による既存木造住宅の耐震化を促進する対策を検討する。	
課題 1-8	巨大津波による大型石油タンクの防災対策	西村督 教授
	目的：海岸近くに設置される大型液体貯蔵タンク等が巨大津波に対して被災しない方法を検討する。	
課題 1-9	超巨大災害発生時の避難勧告・指示の効果的情報伝達対策	土田義郎 教授
	目的：巨大災害発生時に緊急避難が妥当に行われる伝達方法を検討する。	
課題 1-10	超巨大災害での地域行政と地域住民が連携した防災力の向上対策	木村定雄 教授
	目的：地域防災計画における行政と住民の合意形成を図り、減災、除災する仕組みを検討する。	

研究テーマ 2. 超巨大災害により新たに提起した防災力の向上対策

課題 No.	内容	研究担当者
課題 2-1	巨大津波に対する地下街及び地下鉄の防災対策	京都大学大学院 牧紀男 教授
	目的：地域の過去の巨大災害を反映した、地震・津波に対する都市の防災力の向上法を検討する。	
課題 2-2	巨大地震と巨大津波の連動作用における構造物の耐震対策	京都大学大学院 竹脇出 教授
	目的：地盤が液化化した構造物が巨大津波を受ける際の耐震性評価法と耐震向上法を検討する。	
課題 2-3	巨大地震・巨大津波による過大荷重を受けた社会資本施設の維持管理対策	宮里心一 教授
	目的：巨大地震・巨大津波が作用した社会資本施設の劣化対策を検討する。	
課題 2-4	救援・支援活動に使用する幹線道路の防災対策	川村國夫 教授
	目的：日本海側から被災地の太平洋側への救援・支援時に使用する幹線道路の防災対策を検討する。	
課題 2-5	超巨大災害時の自然エネルギー利用による地域の創電・節電対策	垂水弘夫 教授
	目的：巨大災害時における電力確保を自然エネルギーを用いて創電・節電する方法を検討する。	
課題 2-6	超長期滞在避難所及び仮設住宅での生活環境改善対策	円井基史 准教授
	目的：被災住民が避難所で長期滞在する際の生活環境を環境工学的に改善する方法を検討する。	

目 次

研究テーマ 1. 過去の大災害で指摘されながら未解決な防災力の向上対策

課題 1-1	超巨大災害発生直後における被害状況の迅速な把握対策	4
課題 1-2	巨大津波に対する港湾施設の防災対策	12
課題 1-3	巨大津波による火災対策	24
課題 1-4	長周期地震動による超高層ビルの横揺れ対策	40
課題 1-5	巨大地震による市街地の液状化対策	58
課題 1-6	巨大地震・巨大津波による建物被害の迅速な災害復興対策	74
課題 1-7	巨大地震による既存木造住宅の耐震化対策	96
課題 1-8	巨大津波による大型石油タンクの防災対策	108
課題 1-9	超巨大災害発生時の避難勧告・指示の効果的情報伝達対策	124
課題 1-10	超巨大災害での地域行政と地域住民が連携した防災力の向上対策	136

研究テーマ 2. 超巨大災害により新たに提起した防災力の向上対策

課題 2-1	巨大津波に対する地下街及び地下鉄の防災対策	148
課題 2-2	巨大地震と巨大津波の連動作用における構造物の耐震対策	162
課題 2-3	巨大地震・巨大津波による過大荷重を受けた社会資本施設の維持管理対策	174
課題 2-4	救援・支援活動に使用する幹線道路の防災対策	192
課題 2-5	超巨大災害時の自然エネルギー利用による地域の創電・節電対策	202
課題 2-6	超長期滞在避難所及び仮設住宅での生活環境改善対策	218

研究テーマ 1

課題 1-1

超巨大災害発生直後における被害状況の 迅速な把握対策

京都大学大学院 田村正行 教授

課題 1-1 研究課題 超巨大災害発生直後における被害状況の迅速な把握対策

京都大学

教授
田村正行

衛星リモートセンシング 光学センサ 合成開口レーダー
津波被害 液状化 地盤変動

1. 研究目的

大規模災害の発生時には、広域の被害状況を迅速に把握し、避難・救援を効果的に支援するために、航空機や衛星等に搭載したセンサを用いて撮影したリモートセンシング画像がしばしば用いられる。リモートセンシング用センサの種類は、可視光および赤外光を用いる光学センサと、マイクロ波を用いるレーダーに大別される。前者は画像判読が容易であるため、災害被害の状況把握に広く用いられてきた。一方、後者は光学センサに比べて画像判読が難しいが、マイクロ波は雲を透過するので悪天候あるいは夜間のために光学センサが使えない場合には代替の観測手段として利用できる。さらに、レーダーの位相情報は、地表面の変化に鋭敏であるので、建物の傾き、地盤の変形、小規模浸水など、光学センサでは検出が難しい現象でも検出できる可能性がある。

本研究では、大規模災害の発生時に、航空機や人工衛星に搭載されたセンサを用いて被害状況の全容を把握し、観測結果を地理情報システムに組み入れることにより、救援・復興活動に効果的に役立てるための方法を提案する。前段落で述べた二種類のセンサのうち、光学センサは観測技術としてはほぼ確立しているもので、主としてレーダーによる被害観測に重点を置いて研究を進めた。具体的な研究テーマは以下のとおりである。

- (1) 衛星搭載レーダーによる液状化の検出方法の開発¹⁾
- (2) 衛星搭載レーダーによる津波被害の検出方法の開発²⁾
- (3) 衛星搭載レーダーと電子基準点データを組み合わせて地盤変動を高精度に検出する方法の開発³⁾

2. 解決法

(1) 衛星搭載レーダーによる液状化の検出方法の開発

(a) レーダー画像間の相関

衛星搭載レーダーは、図 1 のように地表面を繰り返し観測しており、レーダーは自ら観測パルスを送信する能動的なセンサなので季節や観測時刻によらず同一の観測条件で繰り返し地表面の画像を取得することができる。

いま、図 2 のように地震を挟む 2 時期の画像間で相関をとると、液状化等によって地盤変動や建物損壊などの被害を受けた地点では相関が低下する (図 3 右)。一方、地震前の 2 時期の画像間の相関には変化が無い (図 3 左)。



図 1. 衛星搭載レーダーによる地球観測。

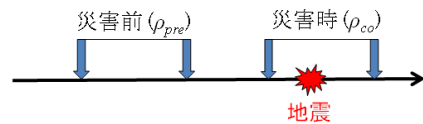


図 2. 災害前と災害時のレーダー画像相関。

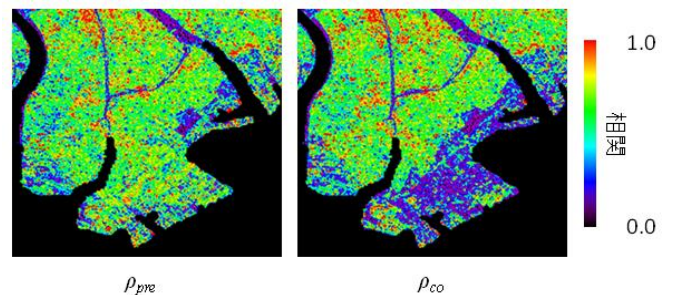


図 3. 千葉県浦安市における地震前 2 時期の相関係数画像 (左) と、地震を挟む 2 時期の相関係数画像 (右)

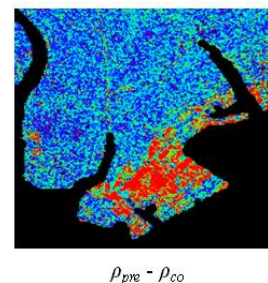


図 4. 地震前相関と地震時相関の差画像。赤の部分が大の差の大きい地点を表す。

したがって、地震前の 2 時期相関係数画像 (ρ_{pre}) から地震を挟む 2 時期相関係数画像 (ρ_{co}) を差し引き、

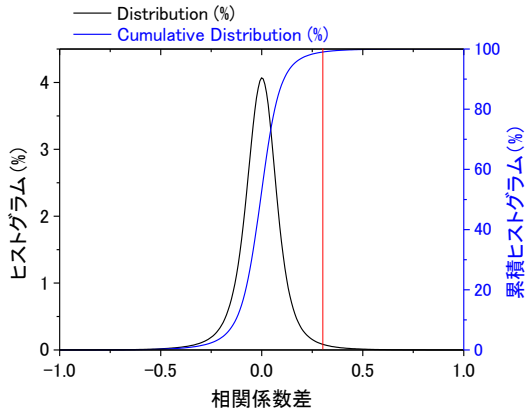


図 5. 浦安市における地震前の相関係数差のヒストグラムと累積ヒストグラム.

$$\Delta\rho_{pre-co} = \rho_{pre} - \rho_{co} \quad (1)$$

その差の大きい地点を抽出することにより、地表の変化を検出することができる(図 4)。千葉県浦安市のように地震による直接の建物被害が液状化に比べて軽微であった地域では、地表の変化はほぼ液状化によると考えられる。

(b) 被害領域検出のための閾値の決定

被害範囲を抽出するためには、相関係数の差に対して閾値を設定し、被害ピクセルと無被害ピクセルを判別することが必要である。通常、閾値の決定は、現地調査などの結果に基づき各クラス(例えば被害有と被害無)から代表サンプルを取ることにより行われる。しかし災害直後は現地調査データは利用できないのが普通である。また、被害の形態や程度は場所ごとに異なるため一様な被害母集団を仮定することは困難である。そこで、本研究では地震前の 2 枚の相関係数画像の差を用いて閾値を決定することにした。

対象を都市部とし、レーダー観測の前後に豪雨や降雪が無ければ、地震前の短期間(相関をとる 2 時期画像の観測間隔)で地表面は変化しないと見なすことができる。したがって、地震前の相関係数画像から、無被害の場合の母集団における相関係数差の統計値を推定することができる。図 5 は、都市部における地震前の相関係数差のヒストグラムと累積ヒストグラムである。この累積ヒストグラムに基づいて、特定の有意水準になるように相関係数差の閾値を定め、一定の誤検出率のもとで被害ピクセルを抽出する。具体的には、有意水準を 1%とし閾値 0.30 を得た。

(2) 衛星搭載レーダーによる津波被害の検出方法の開発

(a) 被害領域検出のための閾値

基本的には、前項で述べた液状化の検出と同じ方法で地表面の変化として津波被害を検出した。宮城県石巻市の津波被害に関して、地震前の 2 時期の相関係数画像と

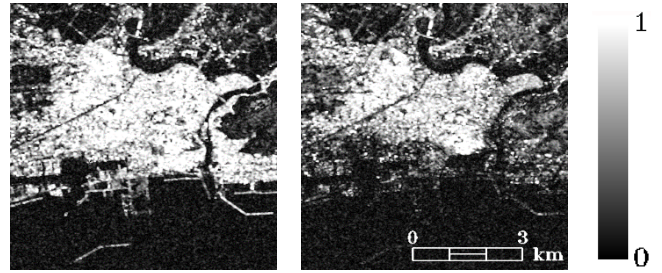


図 6. 宮城県石巻市における地震前 2 時期の相関係数画像(左)と地震を挟む 2 時期の相関係数画像(右).

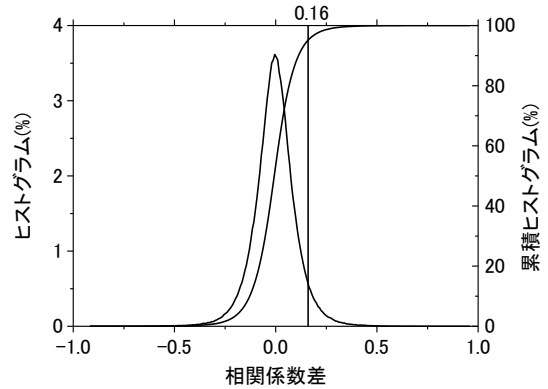


図 7. 石巻市の都市部における相関係数差のヒストグラムと累積ヒストグラム.

地震を挟む 2 時期の相関係数画像を図 6 に示す。図 7 は被害領域検出の閾値を決定するために用いた、地震前の 2 枚の相関係数画像の差のヒストグラムと累積ヒストグラムである。この累積ヒストグラムから、有意水準を 5%として閾値 0.16 を得た。

(b) 被害領域の検出精度の数値的検討

レーダー画像のピクセル値が平均値ゼロの複素ガウス分布に従うと仮定すると、画像間相関係数 ρ の確立密度関数は次のように表される⁴⁾。

$$p(\rho|V) = 2(L-1)(1-V^2)^L \rho(1-\rho^2)^{L-2} {}_2F_1(L, L; 1; V^2\rho^2) \quad (2)$$

ここで、 L はルック数、 V は相関係数の真値、 ${}_2F_1$ は超幾何関数である。上式より、2 枚の相関係数画像の差 $\Delta\rho$ に対する確率密度関数は次式で与えられる。

$$p_{\Delta\rho}(\Delta\rho|V_0, V_1) = \begin{cases} \int_{\Delta\rho}^1 p(\rho|V_0)p(\rho-\Delta\rho|V_1)d\rho, & \Delta\rho \geq 0 \\ \int_0^{1+\Delta\rho} p(\rho|V_0)p(\rho-\Delta\rho|V_1)d\rho, & \Delta\rho \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)を用いて、一定の誤検出率のもとでの被災領域の検出率を計算した。図 8 に、相関係数の真値が変化しなかった場合(災害前 $V_0=V_1=0.6$)と変化した場合(災害前 $V_0=0.6$, 災害時 $V_1=0.0$)について、相関係数差の確率密度関数を示す。ルック数は 16 とした。この場合、5%の誤検出率を許容すると被災領域検出の閾値は 0.26 となり、

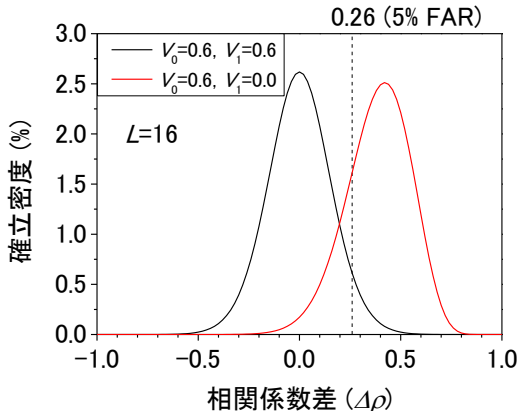


図 8. 地震前の 2 枚の相関係数画像 ($V_0=V_1=0.6$) の差に対する確率密度関数 (黒) と、地震前 ($V_0=0.6$) と地震時 ($V_1=0.0$) の相関係数画像の差に対する確率密度関数 (赤).

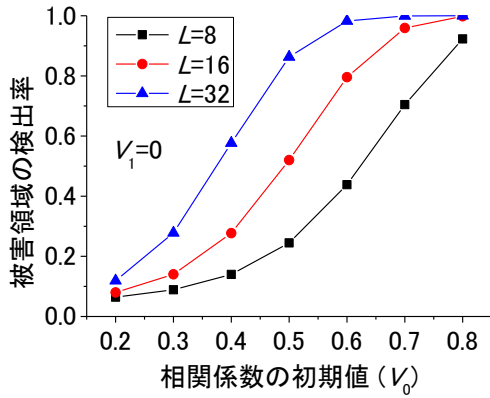


図 9. 被害領域の検出精度と相関係数初期値の関係.

地震前—地震時の確立密度関数 (赤色) においてこの閾値以上の部分の積分値が検出率を表す。

このような計算を災害前の相関係数真値が $V_0=0.2\sim 0.8$ の場合について行い、ルック数 $L=8, 16, 32$ をパラメータとして検出率をプロットしたのが図 9 である。ただし、誤検出率：5%、災害後の相関係数真値：0 とした。図から、 V_0 が低い場合には検出率も低い、 V_0 が高くなるにつれて検出率も増加することが分かる。また、ルック数を多くした方が同じ V_0 の値であっても高い検出率を見込める。とくに、 V_0 が 0.6 程度 (都市部の平均的な値) の場合、ルック数を 16 以上とすれば、80%以上の検出率が見込めることがわかる。

(3) 衛星搭載レーダーと電子基準点データを組み合わせて地盤変動を高精度に検出する方法の開発

(a) 2 時期レーダー画像の干渉位相

2 時期のレーダー画像を U_1, U_2 とするとその干渉画像は次の様に表される。

$$U_1 U_2^* = A \exp(\phi) \quad (4)$$

ここで、「*」は複素共役、 A は絶対値、 ϕ は位相を表す。

干渉画像の位相には、2 時期の間の地盤変動を表す成分が含まれており、その他の成分と合わせて以下のように表される。

$$\phi = \phi_{defo} + \phi_{topo} + \phi_{atm} + \phi_{ion} + \phi_{orb} + \varepsilon \quad (5)$$

ここで、 ϕ_{defo} は地盤変動項、 ϕ_{topo} は地形項、 ϕ_{atm} は大気遅延項、 ϕ_{ion} は電離層遅延項、 ϕ_{orb} は衛星軌道誤差項、 ε はそれ以外の雑音成分である。

本研究テーマでは、レーダー画像内と周辺の電子基準点データを用いてレーダー干渉位相から地盤変動項 ϕ_{defo}

以外の項を除去することにより、地盤変動を cm 以下の精度で求めることができることを示す。

(b) 処理フロー

図 10 にレーダー画像 (ALOS PALSAR) と電子基準点データ (GEONET) の処理フローを示す。以下、このフロー図に則ってデータ処理の手順を説明する。

[ステップ A] 2 時期のレーダー画像 (Master と Slave) を干渉させ、デジタル標高データ (SRTM-3) を用いて地形項 ϕ_{topo} を除去する。

[ステップ B] GEONET の RINEX データを用いて電子基準点の位置における大気遅延 ϕ_{atm} を計算する。

[ステップ C] ϕ_{topo} を除去後の位相 ϕ から大気遅延 ϕ_{atm}

を除去すると残差は $\phi - \phi_{topo} - \phi_{atm} = \phi_{defo} + \phi_{ion} + \phi_{orb} + \varepsilon$ となる。

[ステップ D] 電子基準点の位置におけるステップ C の結果 $\phi_{defo} + \phi_{ion} + \phi_{orb} + \varepsilon$ の値を求める。

[ステップ E] 電子基準点データを用いて、電子基準点の位置における地盤変動値をもとめる。

[ステップ F] 前段で求めた電子基準点位置における地盤変動値 (真値と仮定) をステップ D で求めた $\phi_{defo} + \phi_{ion} + \phi_{orb}$ から差し引くと、残差は電子基準点位置における $\phi_{ion} + \phi_{orb} + \varepsilon$ となる。

[ステップ G] 電離層遅延 ϕ_{ion} と衛星軌道誤差 ϕ_{orb} は 1 次平面で近似できると仮定し、近似平面を求める。

[ステップ H&I] 前段で得られた近似平面から画像全体の $\phi_{ion} + \phi_{orb}$ を計算する。

[ステップ J] ステップ C で求めた $\phi_{defo} + \phi_{ion} + \phi_{orb} + \varepsilon$ から前段で求めた $\phi_{ion} + \phi_{orb}$ を差し引くことにより、画像全

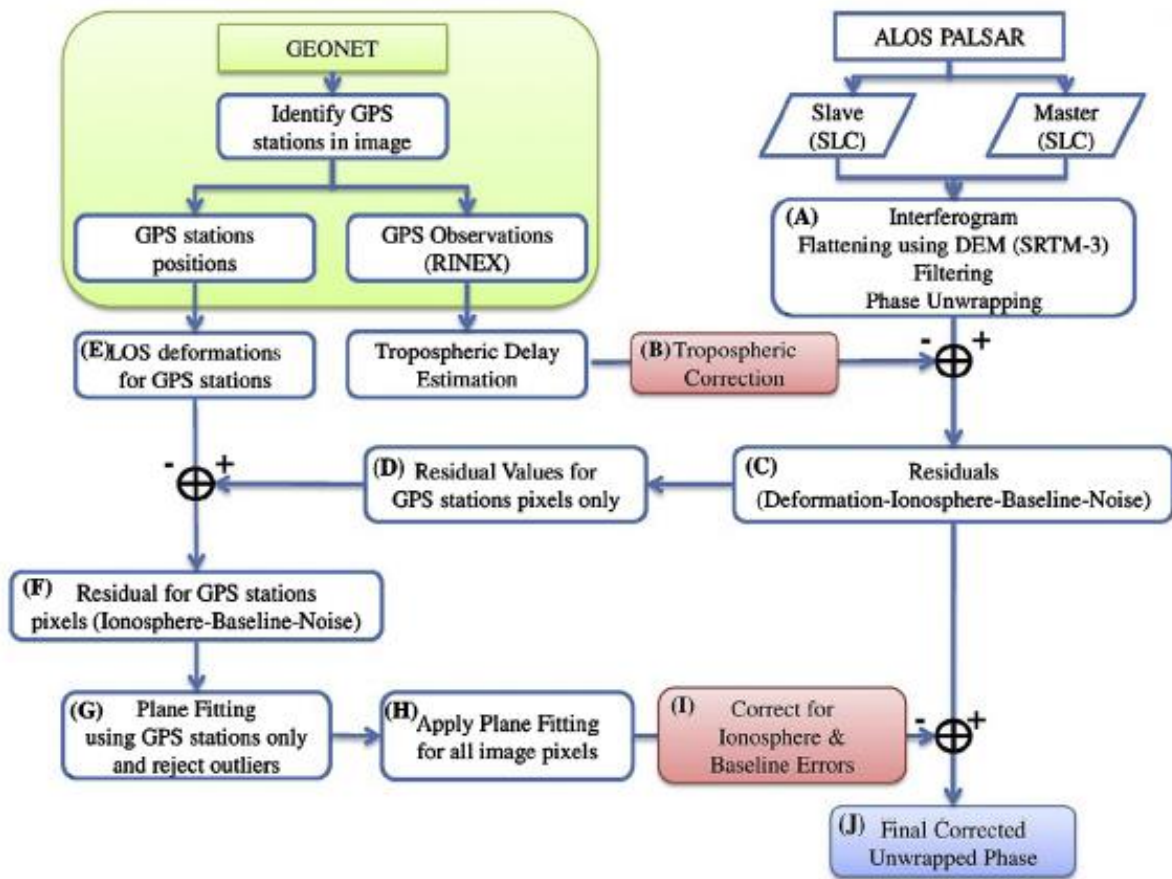


図 10. レーダー画像と電子基準点データの組み合わせによる高精度地盤変動検出フロー。

体の地盤変動値 ϕ_{defo} を得る。

3. 方法の検証

(1) 衛星搭載レーダーによる液状化の検出方法の開発

(a) 対象地域とデータ

対象地域の浦安市は東日本大震災時に液状化により大きな被害を受けた（図 11）。液状化の検出に用いたレーダー画像（ALOS-PALSAR）は地震前 4 シーン、地震後 1 シーンであり、これらから地震前 2 枚、地震時（地震を挟む期間）1 枚の相関係数画像を作成した（表 1）。図 12 にレーダー画像の撮影範囲を示す。

(b) 浦安市における液状化の検出結果

検誤検出率 1%のもとで検出した浦安市の液状化地点を図 13（左）に赤色で示す。図 13（右）は精度検証のために用いた国土交通省関東地方整備局と地盤工学会による現地調査結果⁹⁾であり、赤色が液状化、青色が非液状化地点を示す。両図の比較からレーダー画像による液状化の検出結果は現地調査結果と良く一致しており、提案方法の有効性が検証された。

(2) 衛星搭載レーダーによる津波被害の検出方法の開発

(a) 対象地域とデータ



図 11. 浦安市の液状化被害。

表 1. レーダー相関係数画像の仕様。

相関係数画像	観測日		垂直基線長 (m)
	Master	Slave	
地震前	2010/2/16	2010/4/3	945
	2011/1/4	2011/2/19	1845
地震時	2011/2/19	2011/4/6	396

対象地域の石巻市は東日本大震災の発生時に地震と津波により大きな被害を受けた（図 14）。図 15（左）の青い四角形は市の主要部、黒い四角形はレーダー画像の撮影範囲であり、図 15（右）は、市の主要部における被害程度を、現地調査に基づいて赤（流失・全壊）、青（半

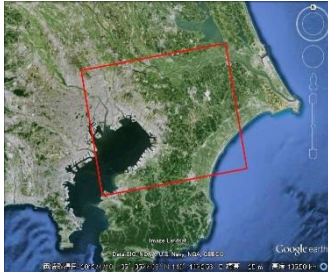


図 12. レーダー画像の撮影範囲.

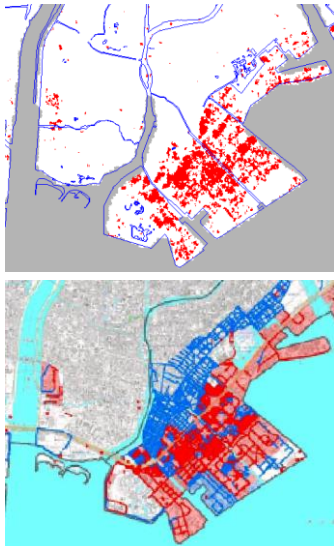


図 13. 誤検出率 1%のもとで検出した浦安市の液状化地点（左、赤色の部分）と国土交通省関東地方整備局及び地盤工学会による現地調査結果（右、赤：液状化、青：非液状化）.

壊）、緑（部分損壊）に区分した地図である⁹⁾。

用いたレーダー画像（ALOS-PALSAR）は地震前 4 枚、地震後 1 枚であり、これらから地震前 2 枚、地震時 1 枚の相関係数画像を作成した（表 2）。レーダー画像を 7（レンジ）×3（アジマス）の窓で平均化し、さらに相関係数の計算には 3×3 の窓を適用した。観測間隔の差による相関係数低下の違いを避けるために、観測間隔は 3 枚とも 138 日とした。また垂直基線の長さに大きな差は無いので、観測角の差による相関係数低下はほぼ等しいと見なすことができる。

(b) 石巻市における津波被害の検出結果

図 16（左）は、地震前（観測日：2010/7/5 と 2010/11/20）と地震時の相関係数差に、上記の閾値を適用することにより抽出した被害範囲を示す（黒色）。図 16（右）は、この抽出結果に被害地図を重ね両者を比較したものである。図 17 には、現地調査による 4 種類の被害クラス別に、被害ピクセルの分布（塗りつぶし）と被害の抽出率（斜線）を示す。

図 17 より、被害ピクセルの半数以上（54%）は流出・全壊クラスに含まれており、被害抽出率も流出・全壊ク



図 14. 石巻市における津波被害.

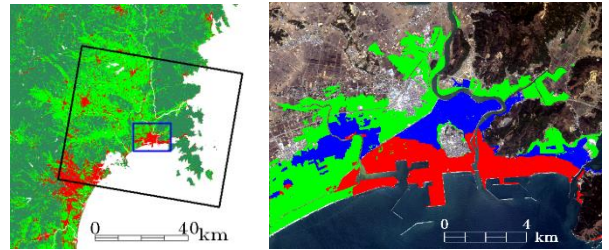


図 15. （左）対象地域とレーダー画像（ALOS-PALSAR）の撮影範囲。（右）復興支援アーカイブによる被害程度での分類。赤：流出・全壊、青：半壊、緑：部分損壊.

表 2. レーダー相関係数画像の仕様.

相関係数 画像	観測日		垂直基線 (m)	時間間隔 (day)
	Image1	Image2		
地震前	2010/5/20	2010/10/5	1059	138
	2010/7/5	2010/11/20	1093	138
地震時	2010/11/20	2011/4/7	1208	138

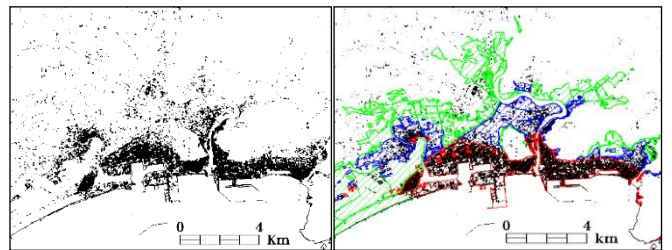


図 16. 検出された石巻市の津波被災地点（左、黒色）、および被害現地調査図と被災地点の重ね合わせ（右）.

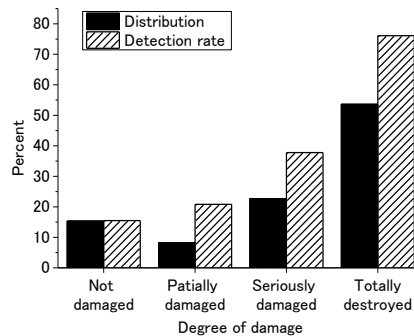


図 17. 被害ピクセルの分布（塗りつぶし）と被害の抽出率（斜線）.



図 18. レーダー画像 (ALOS-PALSAR) の撮影範囲と電子基準点および三角点の位置.

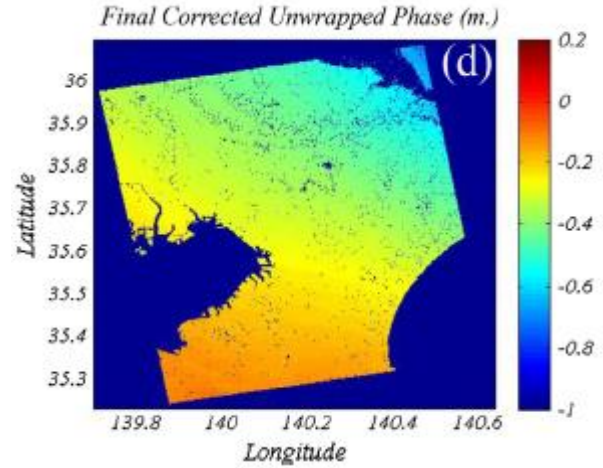


図 20. 電子基準点データとレーダー干渉位相から求められた地盤変動 (単位: m).

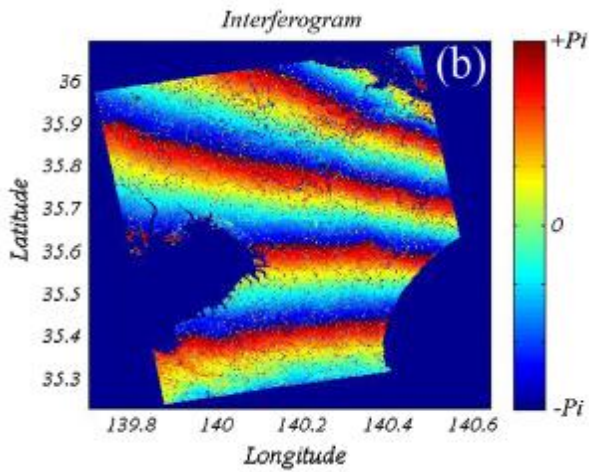


図 19. レーダー干渉画像.

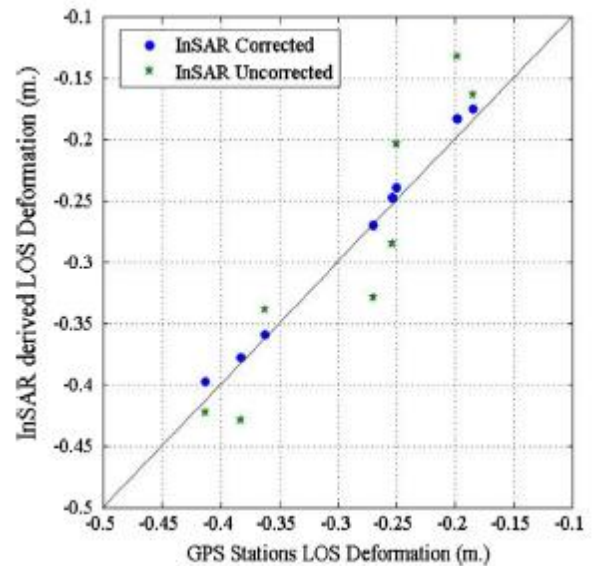


図 21. 本提案手法により求めた地盤変動と検証用電子基準点データとの比較.

ラスは高い (70%) ので、5%の有意水準の場合、抽出範囲は被害の大きい流出・全壊クラスに概ね対応していることが分かる。ただし、半壊、部分損壊、無被害とされた範囲にも被害ピクセルは分布している。この抽出結果には 5%の確率で誤判別の可能性はあるものの、被害地図は全ての地点を訪れて作成されたわけではないので、現地調査で半壊、部分損壊、無被害と判定された地域でも場所によっては大きな被害を受けた可能性がある。

(3) 衛星搭載レーダーと電子基準点データを組み合わせて地盤変動を高精度に検出する方法の開発

(a) 対象地域とデータ

対象地域は関東地方を選んだ。図 18 にレーダー画像の撮影範囲と使用した電子基準点および三角点の位置を示す。レーダー画像の観測日は 2011 年 2 月 19 日と 2011 年 4 月 6 日であった。

(b) 関東地方における地盤変動

図 19 に干渉位相を示す。図 18 の電子基準点データと図

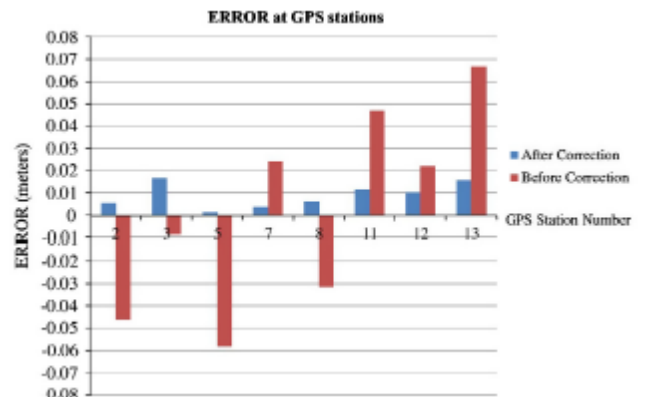


図 22. 検証用電子基準点データと比較した場合の誤差. 赤棒: 電子基準点による補正無し、青棒: 本提案手法.

19 の干渉位相を用いて、図 10 のデータ処理を行った結果、得られた地盤変動項 ϕ_{defo} を図 20 に示す。

図 21 に、得られた地盤変動量を検証用の電子基準点データと比較した結果を示す。図中の青点が本提案手法の結果、緑点は電子基準点データによる補正を行わなかった場合の結果である。本提案手法の結果は、電子基準点データによる補正を行わなかった場合に比べて、誤差が格段に減少しており、検証用電子基準点データと良く一致していることが分かる。図 22 には、検証用電子基準点データと比較した場合の誤差を示す。青棒は本提案手法の誤差、赤棒は電子基準点データを用いなかった場合の誤差である。本提案手法の場合、誤差は cm 程度あるいはそれ以下であることが分かる。

4. 実効性のある提言

大規模災害発生時における被害状況の把握には、光学センサに加えてレーダーの利用が有効である。その利点は次のとおり。

- ・ 全天候型で夜間観測も可能
- ・ 光学センサでは検出の難しい液状化や地盤変動などをレーダー位相情報を利用することにより検出できる

大規模災害に迅速に退場するには、現行の衛星の観測頻度では不十分であり（例えば 2014 年に JAXA により打ち上げられた ALOS-2 の場合、回帰日数は 14 日）、観測頻度を上げるために次のような観測態勢の整備が急務である。

- ・ 民間衛星や航空機も含めた観測態勢の整備
- ・ 情報衛星（光学 2 機、レーダー 2 機）のデータを緊急の場合には公開

参考文献

- 1) M. Tamura, Weiping Li, "Detection of soil liquefaction areas in the Kantou region using multi-temporal InSAR coherence", 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, TH3.R1.3, 2013.
- 2) M. Tamura, T. ElGharbawi, "Mapping urban damage of the 2011 East-Japan earthquake using multi-temporal PALSAR images", 2015 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, pp. 3576-3578, 2015.
- 3) Tamer ElGharbawi, M. Tamura, "Measuring deformations using SAR interferometry and GPS observables with geodetic accuracy: Application to Tokyo, Japan", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.88, pp.156-165, 2014.
- 4) R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, and P.W. Cachon, Coherence estimation for SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 37, no. 1, pp. 135-149, 1999.
- 5) 国土交通省関東地方整備局, 公益社団法人地盤工学会,

"東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書", 2011.

6) 国土交通省都市局, "復興支援調査アーカイブ (<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>)".

研究テーマ 1

課題 1-2

巨大津波に対する港湾施設の防災対策

(国研) 港湾空港技術研究所

栗山善昭 研究主監

課題 1-2 巨大津波に対する港湾施設の防災対策

(国研) 港湾空港技術研究所 研究主監
栗山善昭

津波 港湾施設 地形変化
数値シミュレーション 防波堤

1. 研究目的

港湾は、日本の経済を支える物流の中心であるとともに、重化学工業をはじめとする産業活動の場であり、さらに、災害時には緊急物資輸送の拠点となる。したがって、港湾区域の防災対策の強化は、非常に重要な課題である。

2011年3月11日の2011年東北地方太平洋沖地震では、大きいところで高さ15mを超える津波が沿岸部に来襲し、それにより甚大な人的・物的被害が発生するとともに、港湾区域においても防波堤をはじめ多くの施設が被害を受けた（例えば、高橋ら¹⁾）。

南海トラフ巨大津波では、高さ30m以上の津波、あるいは、5分で陸地に到達する高さ10mの津波の発生が予想されている²⁾。そのような津波の影響を受ける地域には、国際コンテナ戦略港湾である阪神港（神戸港・大阪港）や国際バルク戦略港湾である名古屋港、水島港・福山港、徳山下松港・宇部港など日本の経済活動の中枢を担う数多くの港湾が位置している。したがって、これらの港湾及びその背後地における津波被害を少しでも軽減することは、地域のみならず日本全体にとっても大きな課題と言える。

そこで、本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波による港湾区域での被害の実態を防波堤、洗掘・堆積、コンテナ・船舶などを対象として調査するとともに、防波堤については被災のメカニズムを検討した。さらに、防波堤、洗掘・堆積、漂流物を中心に港湾区域の津波対策を検討し、南海トラフ巨大津波に対する提言をまとめた。

2. 解決法

(1) 防波堤の津波対策

防波堤の変位を制御する方法の一つとして、ケーソンの港内側のマウンドをケーソンの高さの1/3程度にまで嵩上げする腹付工がある（図1）³⁾。本工法により、堤体の滑動抵抗力が増大すること、ならびに、洗掘に対しては防波堤が倒壊するマウンド断面形状よりも上方の石材が増えることにより防波堤倒壊までの時間が増大することが実験的に確認されている⁴⁾。

港内側の洗掘対策としては被覆ブロック等の被覆工を基礎マウンドや腹付工の表面に設置する方法があり³⁾、さらにブロックを連結することにより被覆工の安定性を

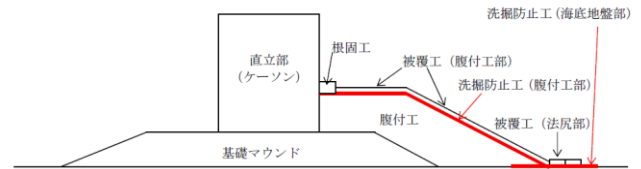


図1. 腹付工イメージ図³⁾

高める方法もある⁵⁾。

防波堤背後のマウンドの洗掘対策としては、上部工の形状を工夫する方法もある。ケーソンの港外側をパラペットなどによって高くすると、防波堤を越流した流れの水平速度が大きくなり、その結果、防波堤背後で水面に対してより浅い角度（水面に対してより水平な角度）で突入し、そのようにして突入した流れは、より遠方でマウンドに到達することが実験的に確認されている⁶⁾。上記の流れによって洗掘が生じたとしても、洗掘位置がケーソンから離れているために、パラペットなしの場合（上部工が水平な場合）よりも防波堤の安定性が高くなることが期待できる。なお、防波堤を越流した流れが背後水面への打ち込む時の位置、角度、流速の推定方法は、佐藤ら⁶⁾、宮田ら⁷⁾などによって提案されている。

上部工の工夫は、洗掘対策以外としても防波堤の安定性に寄与することが期待できる。ケーソンの港内側端の上部が静水面よりも下にあり、上部工の港内側が1:2よりも緩い勾配で港内側が低い場合、防波堤が転倒しにくくなるのが中村ら⁸⁾の数値計算結果によって示されている。

(2) 港内の洗掘・堆積対策

航路啓開の際に障害となり得る津波による航路内の土砂の堆積に対しては、構造物で対策を講ずるよりは、数値シミュレーションで津波による堆積量を推定し、浚渫方法などをあらかじめ検討し準備しておく方が現実的と考える。

ただし、そのためには、津波による港内の地形変化を精度良く推定するモデルを構築する必要がある。そこで、Kuriyamaら⁹⁾は、津波による地形変化を予測するために開発されたモデルを大洗港に適用し、その精度を検証した。その詳細は、3章で記述する。

(3) 漂流物対策

浸水深が比較的小さい領域では、杭とワイヤーロープとを組み合わせた津波漂流物対策施設が効果を発揮する。津波漂流物対策施設に関しては、設計のガイドラインが東日本大震災前に発行されており¹⁰⁾、東日本大震災後も、対策施設の効果のより詳細な検討が行われている(例えば、宇野・有川¹¹⁾、煤田ら¹²⁾、森・山本¹³⁾)。ただし、漂流物を捕捉するための構造物が破壊された場合には、それ自身が漂流物となり被害を助長することになる。したがって、漂流物捕捉構造物は、それ自身が漂流物とならない工夫が必要である。

津波来襲時に漂流物となり得る船舶の津波対応手順として国土交通省近畿運輸局¹⁴⁾は以下を示している：まずは、港外への移動を検討し、それが不可能な場合は係留強化による対応を検討し、それも不可能な場合には総員が退避する。

(4) 港湾区域における避難

港湾区域は、防護ラインの外側(海側)に位置している領域が広く、また、避難に適した高台が近くにないことが多いため、津波の被害を受けやすい区域であると言える。しかしながら、港湾区域では多くの就労者、利用者、来訪者が存在しており、その避難が大きな課題となっている。これに対し、国土交通省港湾局¹⁵⁾は、港湾の津波避難対策に関するガイドラインにおいて、港湾区域における避難対象地域の設定と避難困難地域の抽出、避難対象者数の把握、避難場所・施設・経路の設定などによる避難対策の策定方法を示すとともに、策定された避難対策の周知を求めている。なお、港湾における津波避難施設の設計に際しては、国土交通省港湾局のガイドライン¹⁶⁾が参考となる。

3. 方法の検証

本章では、まず、解決法検討の基となった2011年東北地方太平洋沖地震津波による港湾区域での被害及びそのメカニズムの検討結果を述べるとともに、港内の洗掘・埋没対策検討で用いる津波による港内地形変化推定数値シミュレーションモデルの概要を示す。

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震津波による港湾区域での被害

1) 防波堤の被害の実態とそのメカニズム

(a) 被害の実態

主要な港湾における防波堤の被害の実態は以下の通りである。

青森県八戸港(図2)では、高さ7~8mの津波によって、八太郎北防波堤(延長約3500km)の1450mにおいてケーソンが港内側に移動、転倒した^{11,17)}。また、中

央第1防波堤、第2防波堤においては、東端部のケーソンが移動した。

岩手県釜石港(図3)では、高さ12~13mの津波によって、湾口の北防波堤(延長990m)と南防波堤(延長670m)の多くのケーソンが移動した^{11,17)~19)}。北堤では歯抜け状態でケーソンが港内側に移動しており、44函のうち、18函が移動、19函が傾斜した。一方、南堤では、開口部側の半分は移動していないものの陸側の半分は港内側に移動しており、21函のうち、10函が移動、2函が傾斜した。

岩手県大船渡港(図4)では、釜石港同様に湾口に防波堤が建設されていたけれども、高さ10~11mの津波によって、そのほとんどのケーソンが港内側に倒壊した²⁰⁾。

宮城県女川港(図5)においても、高さ18mの津波によって、湾口の北防波堤(延長340m)と南防波堤(延長325m)のほとんどが倒壊した^{21),22)}。ただし、前述の二つの湾口防波堤のケーソンは港内側に移動したのに対して、女川港では港外側に移動した。

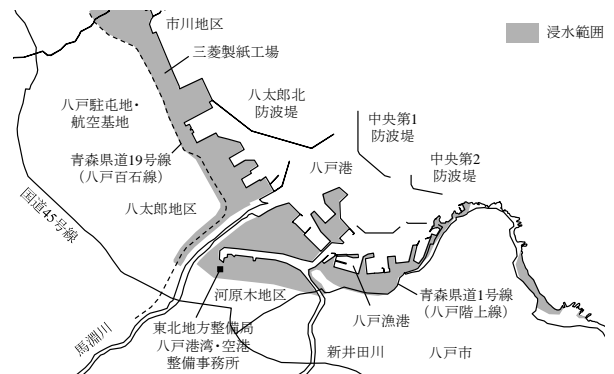


図2. 八戸港の防波堤位置と浸水範囲¹⁾

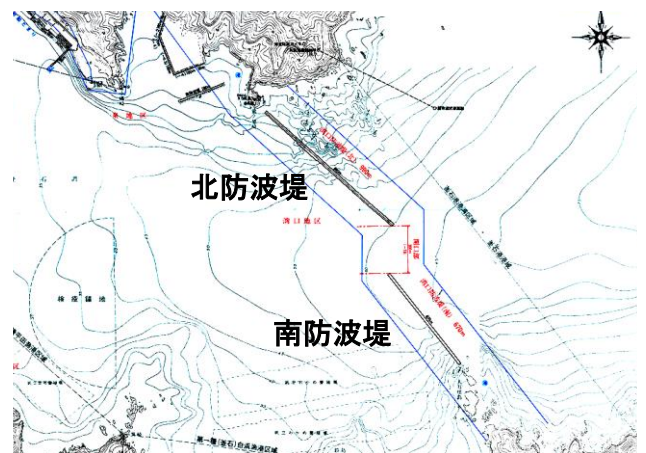


図3. 釜石港の防波堤位置¹⁾



図 4. 大船渡港の防波堤位置と津波痕跡高さ¹⁾

いず



図 6. 相馬港の防波堤位置と津波痕跡高さ¹⁾



図 5. 女川港の防波堤位置と津波痕跡高さ¹⁾

福島県相馬港（図 6）では、高さ 10～12m の津波によって、沖防波堤（延長約 2700m）のほとんどにおいてケーソンが滑動し、港内側に傾斜あるいはマウンドから転落した¹⁾。

(b) 被災のメカニズム

防波堤の破壊は、滑動、転倒、支持力破壊によって生ずる。釜石港の湾口防波堤は、押し波時におけるケーソン前後での水圧差によって滑動した可能性が高い。有川ら^{18), 19)}は、縮尺 1/20, 1/60 の模型実験を行い、津波が防波堤を越流する際、防波堤の港外側では水圧が静水圧よりも若干増加するのに対して、港内側では水圧が数%～10%低下することを明らかにした。一方、宮田ら⁷⁾は、縮尺 1/25 の同様の模型実験を行い、港外側の水圧は静水圧とほぼ同程度であること、港内側の水圧は、防波堤前後での水位差が大きく背後水位が低い場合には、静水圧より 20%以上低下すること、を示している。有川らの結果と宮田らの結果に定量的な違いはあるものの、

れも、水圧が防波堤の港内側で静水圧より低下しており、釜石港では、港内外で静水圧を仮定した場合には滑動の安全率が 1 を越えるにもかかわらず、実際には安全率が 1 以下となることにより防波堤が倒壊したと考えられる。

上記のように釜石港では防波堤前後の水圧差が湾口防波堤の滑動を引き起こしたのに対して、八戸港では防波堤の港内側のマウンドの洗掘が防波堤の支持力破壊あるいは転倒を引き起こしたと考えられる。有川ら^{4), 23)}は、縮尺 1/25 の模型実験を行い、実験で得られた波圧からは計算上、安定と考えられる防波堤が、洗掘の発生によって倒壊することを示した。

前述の釜石港の湾口防波堤や八戸港の防波堤では押し波時に防波堤のケーソンが移動したのに対して、女川港の湾口防波堤では引き波時にケーソンが港外側に移動した。八木ら²¹⁾の数値計算によると、押し波時には水位差が 4m、流速が 3m/s 以上であったのに対して、引き波時には水位差が 10m（構造物が未被災とした場合）、流速が 2m/s であり、ケーソンの滑動及び転倒は引き波時の水位差が 5m の時に発生した。これは、ビデオ記録の結果とも一致している。

上記の検討が主として波力に注目したものであるのに対して、マウンド内の浸透流に注目した検討も行われている。浸透流は、マウンドの拘束圧と剛性・強度を低下させるとともに、法尻方向への外力を生じさせることにもなる²⁴⁾。高橋ら²⁵⁾は、遠心载荷装置を用いた実験によって、浸透流がある場合には、無い場合に比べてケーソンが支持力破壊によって移動しやすくなることを示すと同時に、その現象が、浸透流で生じた揚圧力によってケーソンからマウンドへの軸加重が減少し、よってマウンドの拘束力が低下し支持力が低下するためと推察した。

また、有限要素法解析により、水位差が 10m の場合には、浸透力によって水平支持力が 17%低下することを示した。このことは、ケーソン破壊の原因や対策を考える場合には、波力のみならず浸透流も考慮に入れなければならないことを示している。

2) 港内の洗掘・堆積

津波が港内に入ると、防波堤などの構造物によって流れが複雑に変化し、流れの集中や渦などが生ずる。これらの作用によって、砂浜に建設された港では、防波堤沿いや防波堤先端での洗掘や航路・泊地における堆積などの地形変化が生ずる。構造物周辺の洗掘は構造物の安定に悪影響を与え、一方、堆積は航路啓開の際の障害となる。そこで、本節では、八戸港、茨城県日立港、茨城県大洗港に注目し、2011 年東北地方太平洋沖地震津波によって生じた航路・泊地の地形変化を検討する。

八戸港においては、図 7 に示す開口部あるいは防波堤などの構造物の端部で大きな洗掘が発生した。洗掘の悪影響は防波堤を含む近傍の構造物にはほとんど現れなかったものの、一部の岸壁で洗掘の影響と考えられる被害が生じた。

本洗掘の原因としては、開口部などの狭窄部における流れの集中、ならびに、構造物周辺での渦の発生が考えられる。数値シミュレーション結果によると、1 波目よりも 2 波目の流速が大きく、2 波目の押し波時から引き波時にかけての開口部及び港内で非常に大きな流速（数 m/s）が発生しており、八戸港における洗掘は、この時の流速場の影響を大きく受けた可能性が高い。

日立港の港内においては、東防波堤に沿って洗掘が生じており、特に南防波堤延長線上で洗掘が大きく、その大きさは約 7m であった（図 8）。また、南防波堤先端から東防波堤にかけての開口部では侵食のみが生じていた。堆積は開口部よりも港内よりで生じており、堆積厚さは 1m 未満であった。

日立港における地形変化は、藤井ら²⁶⁾の移動床模型実験の結果と良く一致している。藤井らの実験結果を基にすると、日立港における東防波堤沿いの洗掘は引き波の際の防波堤に沿う流れによるもの、港内の堆積は押し波時に形成された渦の中心に浮遊砂が堆積して生じたものと考えられる。東防波堤に沿った洗掘が南防波堤の延長線上で最大となった原因としては、最大洗掘が生じた領域近傍で押し波時の流れが開口部における縮流などの影響を受けて発達していることが考えられる。

大洗港では、南防波堤近傍及び西防砂堤近傍において大きいところで約 6m の洗掘が生じた（図 9）。一方、防波堤と防砂堤の間の航路及びそれより陸側の泊地では 2m 以上の堆積が生じた。航路を中心とした領域での侵食量、堆積量は、それぞれ約 95 万 m³、約 40 万 m³であ

った。

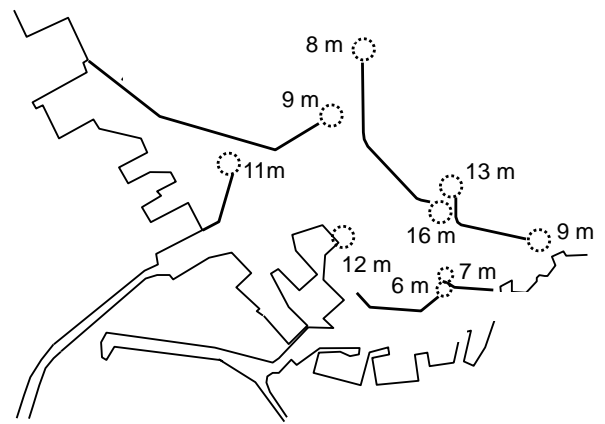


図 7. 八戸港における洗掘の発生位置（破線の丸印）および洗掘深の概略値（発生位置横の数字）

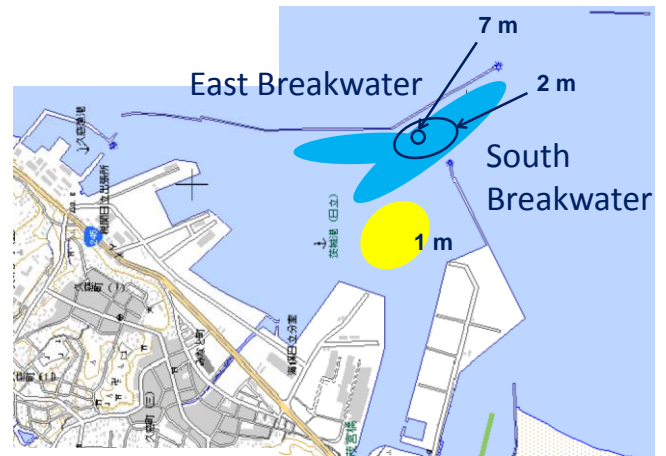


図 8. 日立港における地形変化の模式図（黒っぽい色が洗掘領域、白っぽい色が堆積領域を示す。背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。）

日立港では開口部で洗掘のみが生じていたのに対して、大洗港では開口部で堆積が生じた。その原因の一つとして、開口幅の違いが考えられる。日立港における開口幅が約 280m であるのに対して、大洗港では約 430m であった。開口幅が広いことにより、防波堤沿いの洗掘や防波堤先端の洗掘が連続しなかったことが考えられる。あるいは、開口部における地形変化の違いは港外における渦などの流れの違いによるものかもしれない。

以上の 3 港湾の港内の地形変化をふまえると、津波によって、港内では、主防波堤沿いおよび防波堤先端では洗掘が発生し、港内の中心では堆積が発生する可能性が高いと言えそうである。

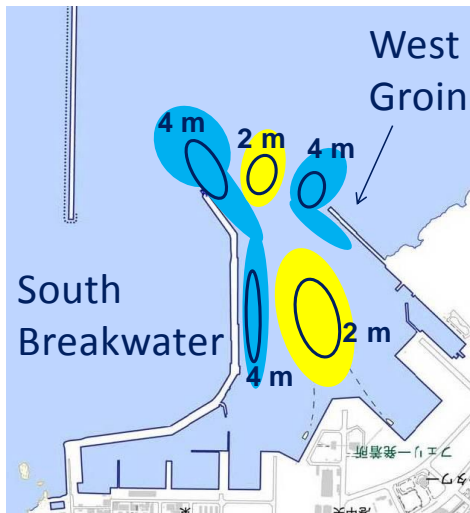


図 9. 大洗港における地形変化の模式図（黒っぽい色が洗掘領域，白っぽい色が堆積領域を示す．背景地図等データは，国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである．）

3) コンテナ・船舶

港湾区域及びその周辺における特徴的な被害として，コンテナや船舶の漂流及びそれら漂流物による被害がある．

太平洋に面する港湾では 8 港において計 3000 個のコンテナの港湾区域外へ流出した²⁷⁾．仙台・塩釜港では保管されていた 4300 個のコンテナのうち 1700 個が（図 10），八戸港では 1200 個のうち 700 個が，茨城県鹿島港では 800 個のうち 460 個のコンテナが流出した．Kumagai²⁷⁾によると，コンテナの流出率は浸水深と相関が高かった．



図 10. 仙台・塩釜港高砂埠頭におけるコンテナ散乱の様子（2011 年 3 月 17 日撮影）¹⁾

船舶に関しては，喫水が浸水深よりも浅い船舶は陸上部に乗り上がり，喫水が深い船舶は岸壁に衝突していた

ことが観察された²⁸⁾．宮城県石巻港や相馬港，福島県小名浜港では，20,000～100,000t の船が，各港において 1 隻ないし 2 隻，係船索の切断等による漂流，座礁などによって被害が生じていたことが確認されており，小型船に至っては 2,800 隻が被害を受けた²⁹⁾．鹿島港では，7 隻の大型船を含む約 10 隻の船舶が漂流していたとの報告もある³⁰⁾．

流出したコンテナや陸上部に打ち上げられた船舶は，タンクローリーや一般車などの車両などとともに，建物に衝突し，被害を増大させた（例えば，図 11）．



図 11. 仙台・塩釜港雷神埠頭背後の建物の被害の様子（2011 年 3 月 17 日撮影）¹⁾

一方，東北地方に比べて浸水深の小さかった北海道十勝港やえりも港では（浸水深は 1.2m 程度），津波により流出した漁船や漁具が津波漂流対策施設（鋼管杭のみの施設と鋼管杭とワイヤーロープとの組み合わせた施設）によって捕捉された³¹⁾．

4) 荷役施設

宮城県仙台塩釜港では，津波による浸水によってガントリークレーンの電源設備に損傷が生ずるとともに，津波によって漂流したコンテナなどによって脚部の装備品が損傷した^{32), 33)}．石巻港では，津波によって 3 機のニューマチックアンローダーのうちの 2 機が海中へ流出した³²⁾．

(2) 津波による港内地形変化推定数値シミュレーションモデル

—2011 年東北地方太平洋沖地震津波によって引き起こされた茨城県大洗港における港内地形変化の推定—

1) 港内地形変化（実測値）

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源から 285km 離れている大洗港では（図 12），約 5m の高さの津波が来襲

した。地震の7ヶ月前の2010年8月および地震の10日後の2011年3月20~22日に深浅測量結果を基にすると、南防波堤先端、南防波堤に沿った港内側、西突堤先端で洗掘が発生している(図13)。一方、港内の中心部および港口(南防波堤先端と西突堤先端の間)では堆積が生じている。解析領域における侵食量、堆積量は、それぞれ1,060,000m³および320,000m³である。なお、大洗港における地震による地盤沈下量は0.202mであり、前述の土量計算で考慮されている。

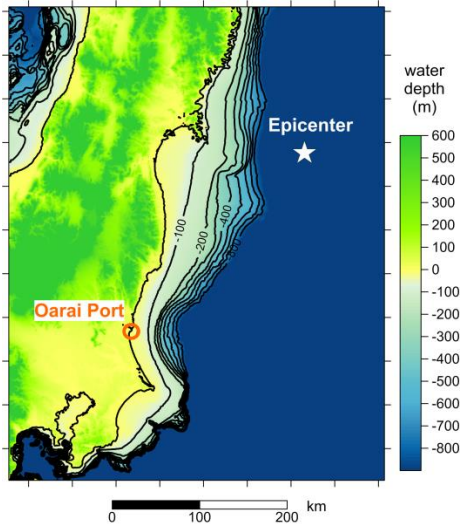


図12. 大洗港の位置

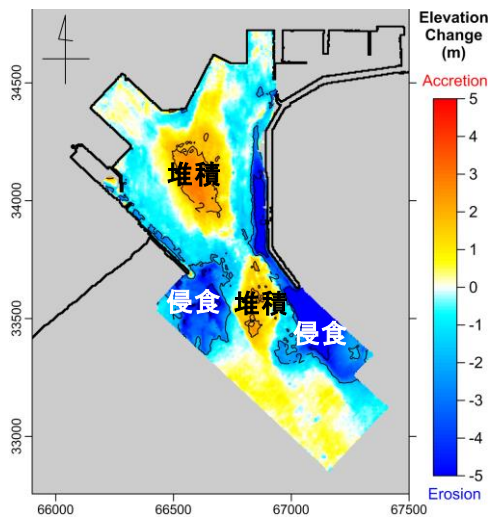


図13. 港内地形変化(実測値)

2) 港内地形変化数値シミュレーション

本シミュレーションでは、Kuriyamaら³⁴⁾と同様に、底質輸送・地形変化計算のサブモデルを付加した高潮津波シミュレーター(Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas, STOC)^{35), 36)}の単層静圧モデルを用いる。本モデルは、大洗港よりも55km南の波崎海岸における2011年の5mの津波による地形変化を再現したことがKuriyamaら³⁴⁾によって示されている。

地形変化の計算は以下の2つのステップで実施する。最初のステップでは、波源から大洗港までの津波伝搬計算を行う。津波水位としては、沖合の水位観測データから逆解析で求めたTakagawa・Tomita³⁷⁾の結果を用いた。計算格子は、ネスティングした7領域において、それぞれ、2592m, 864m, 288m, 96m, 48m, 12m, 4mとした。計算時間は地震発生から3時間、時間間隔は0.1sである。粒径は0.2mmとした。

次のステップでは、ネスティングした最後の領域の地形変化を底質輸送・地形変化計算のサブモデルを用いて計算する。ただし、Kuriyamaら³⁴⁾では、two-wayと呼ばれる方法、すなわち、各時間ステップで地形変化を計算し、その値を次のステップの津波伝搬計算に反映させる方法を採用しているのに対して、本計算では、one-way(初期地形を用いて計算時間終了までの津波伝搬計算を行い、その後、水位、流速の計算結果を用いて地形変化を計算する手法)を採用している。

地形変化は、浮遊する底質量、沈降する底質量、流入する掃流砂量、流出する掃流砂量の差から求める(式(1))。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (w_s C_b - P + \frac{\partial(Q_{b,v,x} + Q_{b,a,x})}{\partial x} + \frac{\partial(Q_{b,v,y} + Q_{b,a,y})}{\partial y}) \quad (1)$$

ここで、 z_b は地盤高さ、 t は時間、 i is the time, λ は空隙率、 w_s は底質の沈降速度、 C_b は底面における浮遊砂濃度、 P はピックアップ量である。変数 x, y は、それぞれ、南北、東西方向を示しており、北向き、東向きを正とする。変数 $Q_{b,v}, Q_{b,a}$ はそれぞれ、流速 u による掃流砂量(式(2))、加速度 a による掃流砂量(式(3))を示す。

$$Q_{b,v,x} = c_1 u^3 \sin \alpha, \quad Q_{b,v,y} = c_1 u^3 \cos \alpha \quad (2)$$

$$Q_{b,a,x} = c_2 (a - a_{cr}) \sin \alpha, \quad Q_{b,a,y} = c_2 (a - a_{cr}) \cos \alpha \quad (3)$$

ここで、 α は y 方向(東向き)に対して反時計回りを正とする流れの向き、 a_{cr} は移動限界加速度(0.2 m/s²と仮定)である。パラメーター c_1, c_2 はKuriyama³⁷⁾同様に、それぞれ、 2.78×10^{-4} (s²/m)、 9.84×10^{-4} (m s)とした。

ピックアップ量 P はNielsenの式³⁸⁾を基に、以下のように仮定した。

$$P = c_3 w_s (\theta - \theta_{cr})^{1.5}, \quad \theta = u_*^2 / sgd \quad (4)$$

ここで、 θ はシールズ数、 θ_{cr} は限界シールズ数(=0.05)、 u_* は摩擦速度、 s は底質の水中比重、 g は重力加速度、 d は粒径である。パラメーター c_3 はKuriyama³⁷⁾同様、0.0035とした。

摩擦速度は、流速の鉛直分布として対数則の仮定した以下の式から求めた。

$$u_* = \frac{h - z_s}{h(\ln(h/z_s) - 1) + z_s} \kappa u \quad (5)$$

ここで、 h は水深、 z_s は粗度高さ (0.0033m と仮定)、 κ はカルマン定数 (=0.4) である。

底面における浮遊砂濃度は、浮遊砂濃度の鉛直分布として指数関数を仮定し、以下の式から求めた。

$$C_b = \frac{w_s h \bar{C}}{\varepsilon_s (1 - \exp(-\frac{w_s}{\varepsilon_s} h))}, \quad \varepsilon_s = c_0 \kappa u_* h \quad (6)$$

ここで、 \bar{C} は断面平均の浮遊砂濃度、 ε_s は拡散係数、 c_0 は定数 (0.2) である。断面平均の浮遊砂濃度は、以下の移流式から求めた。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial(\bar{C} u \sin \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{C} u \cos \alpha)}{\partial y} + P - w_s C_b \quad (7)$$

(3) 計算結果と考察

・水位、流速

Station 1 (位置は図 14 参照) の水位変動からは、沖側境界において計算期間中に 2 つの津波が来襲したことがうかがえる (図 15)。ただし、港内では、4 つの水位の極大値が存在している。津波高さの計算値は 4m であり、それは実測の津波高さ (5m) よりも 1m ほど低い。

流速を見ると、南防波堤先端 (Station 2) において流速が最大 8m/s に達している (図 16)。また、水位が上昇している時、下降している時には、それぞれ、反時計回り、時計回りの渦が港内で形成されている (図 17)。

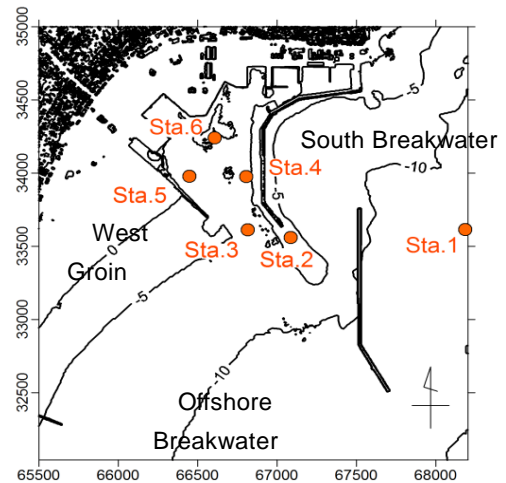


図 14. 計算結果出力地点の位置

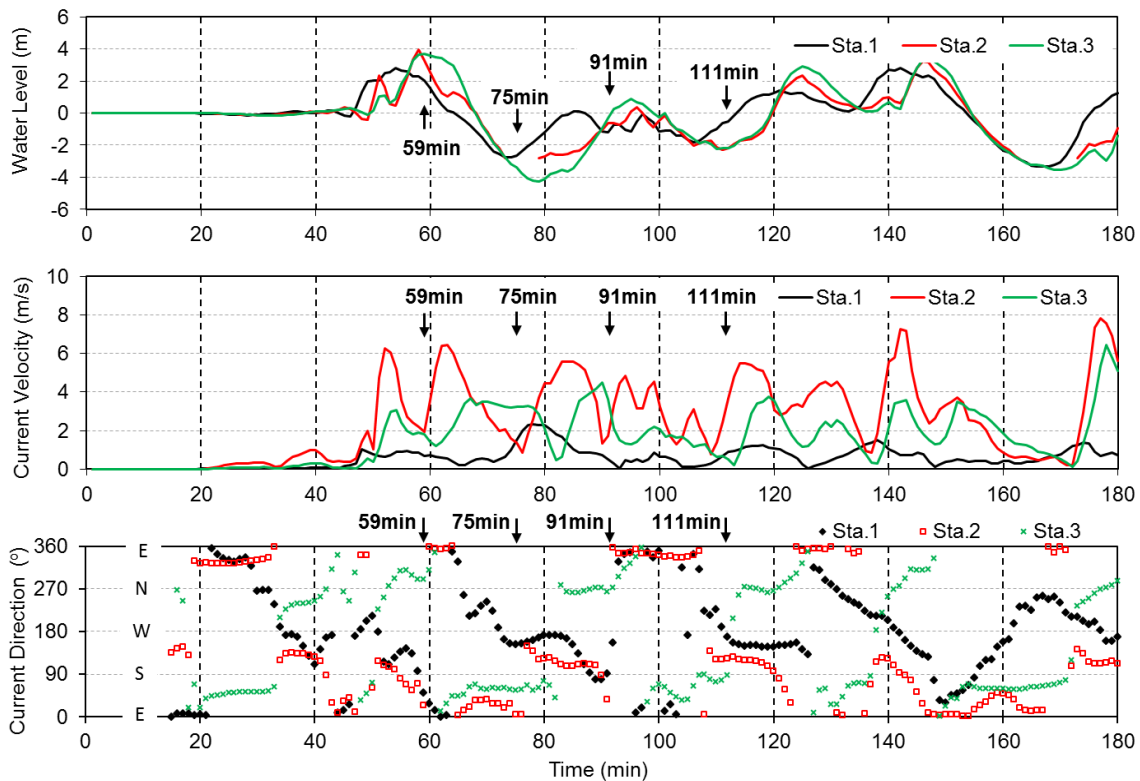


図 15. Station 1~3 における水位 (上段)、流速 (中段) および流向 (下段)

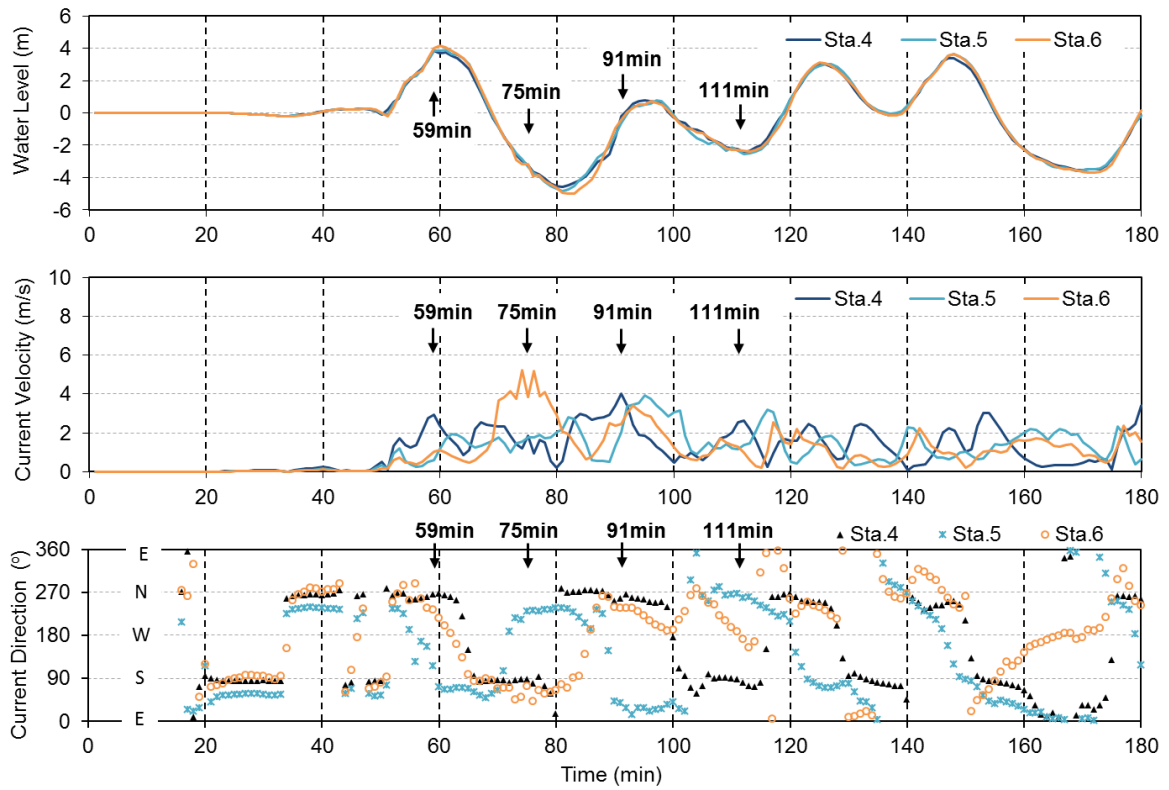


図 16. Station 4～6 における水位（上段），流速（中段）および流向（下段）

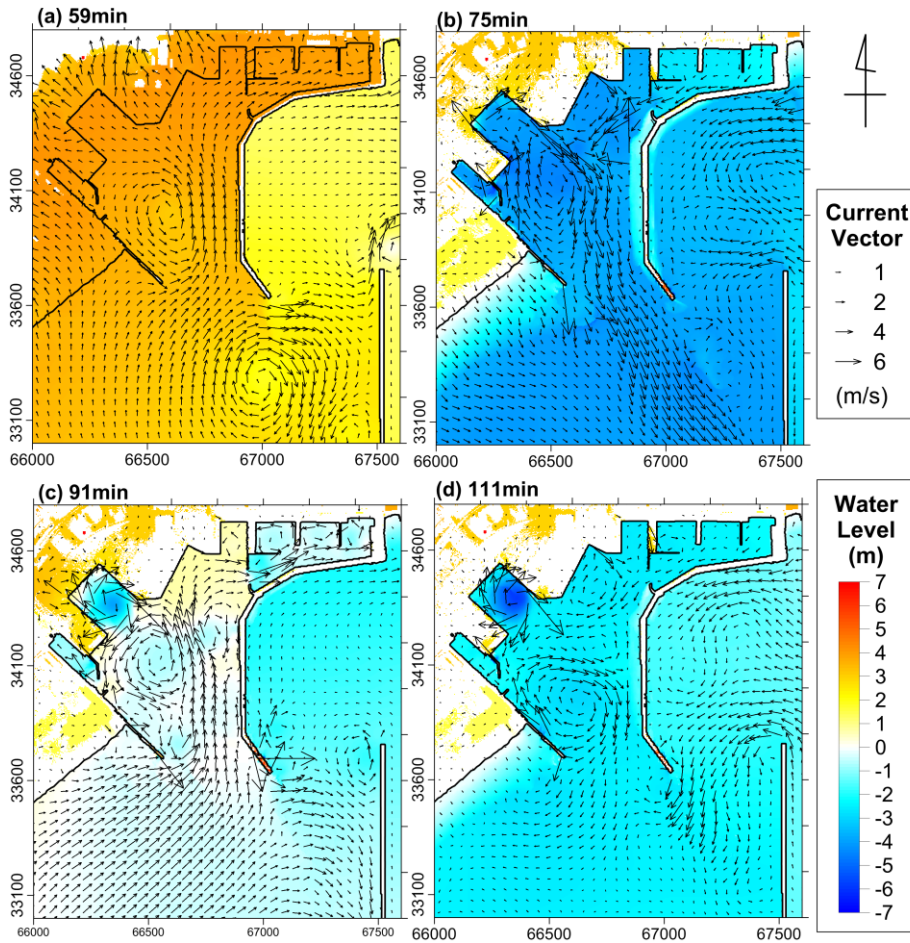


図 17. 押し波時（左側），引き波時（右側）の流速ベクトル

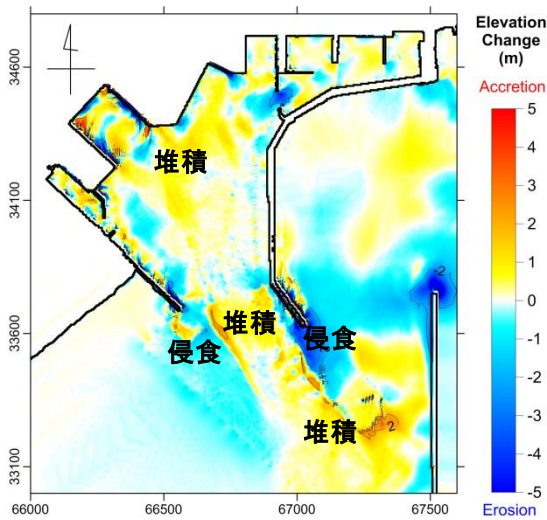


図 18. 港内地形変化 (推定値)

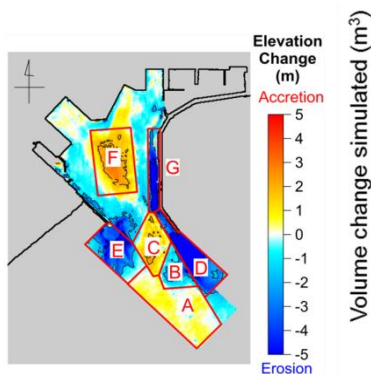


図 19. 港内の領域分け

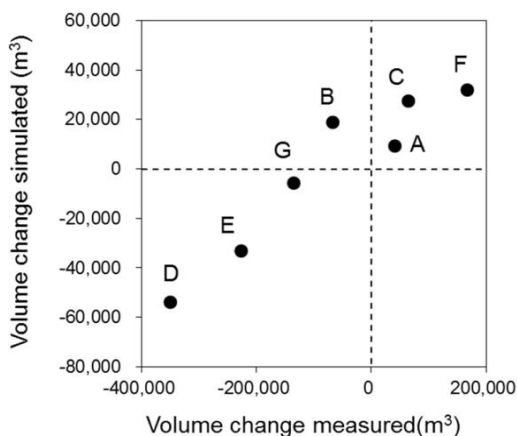


図 20. 各領域の地形変化量の実測値 (横軸) と推定値 (縦軸) との比較

・地形変化

モデルは、現地で観測された南防波堤先端の侵食と港口での堆積を再現している (図 18)。また、港内の堆積も再現しているけれども、計算の方が実測比べるとより広い領域の堆積となっている。

以上のように、モデルは津波による大洗港内の地形変

化を定量的には良く再現しているけれども、定量的には再現できていない。図 19 に示す 7 つの領域の土量変化の実測値と推定値とを比較したところ、両者の相関は非常に高かったけれども ($r = 0.96$)、推定値は実測値の 1/7 程度であった (図 20)。

この原因の一つとしては、推定の津波高さの低さがあげられる。現地では、津波高さが約 5m と考えられるのに対して、計算ではそれより 1m 低い 4m であった。

もう一つの原因としては、計算時間の短さが考えられる。波崎海岸では、最初の 2 波でほとんどの断面変化が生じていたことから³⁴⁾、大洗港の計算でも、最初の 2 波が計算できるように、計算時間を地震発生から 3 時間とした。しかしながら、水位変動や流速変動は計算時間の終了近くでも小さくなっておらず、また、地形変化も収まっていない。このことが、地形変化量の推定値が過小となった原因であると考えられる。

現在、津波の初期水位の変更ならびに計算時間の延長を行っており、良好な再現性を得ている。今後、結果をとりまとめて、国際ジャーナル等に発表する予定である。

4. 実効性のある提言

- ・防波堤の変位は、ケーソンの港内側のマウンドをケーソンの高さの 1/3 程度にまで嵩上げする腹付工などで制御する。

- ・津波による航路内の土砂の堆積に対しては、本研究で開発した数値シミュレーションモデル等で津波による堆積量を推定し、浚渫方法などをあらかじめ検討し準備しておく。

2 章で述べたように、それぞれの被害に対する対応方策は、ある程度明らかになっている。しかしながら、限られた予算の中、東日本大震災からの復興も果たしつつ、南海トラフ巨大津波に備えるのは非常に困難であると言える。各関係機関で連携を図りつつ、対策の効果が最大限発揮されるよう、対策の優先順位の適切な設定が強く求められると考える。

なお、本稿では、各施設の津波に対する防災・減殺方策について述べてきたけれども、港湾区域及びその背後地の経済活動、市民活動を維持と早期復旧を図るためには港湾における事業継続計画 (BCP, Business Continuity Plan) の策定が必要であることを最後に付記したい。

参考文献

- 1) 高橋重雄ほか 33 名 (2011) “2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報”, 港湾空港技術研究所資料 No.1231, 2011.
- 2) 内閣府 ”南海トラフの巨大地震による津波高・震度分布等”, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1_1.pdf, 2012.
- 3) 国土交通省港湾局 “防波堤の耐津波設計ガイドライン”, 2013.

- 4) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也 “津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果”, 港湾空港技術研究所資料 No.1269, 2013.
- 5) 東山和博 “東日本大震災からの復旧事業における粘り強い防波堤の検討”, 港湾, 2013.
- 6) 佐藤正勝, 米山治男, 長谷川巖, 稲垣茂樹 “一般防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策”, 土木学会論文集 B3, Vol.68, No.2, 2012.
- 7) 宮田正史, 小竹康夫, 竹信正寛, 中村友昭, 水谷法美, 浅井茂樹 “防波堤を越流する津波の水理特性に関する実験的研究”, 土木学会論文集 B3, Vol.70, No.2, 2014.
- 8) 中村友昭, 安藤康平, 水谷法美, 小竹康夫 “津波の越流による混成堤ケーソンの転倒防止策に関する研究”, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, 2013.
- 9) Kuriyama Y., Uno Y. and Honda K. “Hindcast of bathymetry change in Oarai Port, Japan, caused by the 2011 tsunami”, Proceedings of Coastal Sediments 2015, 2015.
- 10) 沿岸技術研究センター, 寒地港湾技術研究センター “津波漂流物対策施設設計ガイドライン (案)”, 2009.
- 11) 宇野勝哉, 有川太郎 “津波バリアを用いたコンテナ漂流物捕捉効果に関する実験的研究”, 土木学会論文集 B2, Vol. 69, No. 2, 2013.
- 12) 煤田真也, 斎藤武久, 古路裕子, 中口彰人, 石田啓 “透過型の津波対策防護柵による浸水低減効果と波力に関する実験的研究”, 土木学会論文集 B3, Vol.70, No.2, 2014.
- 13) 森 昌也, 山本泰司 “津波漂流物対策施設による漂流物捕捉特性に関する研究”, 国土交通省北海道開発局第 57 回 (平成 25 年度) 北海道開発技術研究発表会, 2014.
- 14) 国土交通省近畿運輸局 “船舶運行事業者における津波避難マニュアルの作成の手引き (大阪湾版)”, 2014.
- 15) 国土交通省港湾局 “港湾の津波避難対策に関するガイドライン”, 2013.
- 16) 国土交通省港湾局 “港湾の津波避難施設の設計ガイドライン”, 2013.
- 17) 富田孝史, 廉慶善, 鮎貝基和, 丹羽竜也 “東北地方太平洋沖地震時における防波堤による浸水低減効果検討”, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, 2012.
- 18) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉慶善, 高橋研也 “釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討 —水理特性を中心とした第一報—”, 港湾空港技術研究所資料 No.1251, 2012.
- 19) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 長谷川巖, 稲垣茂樹, 佐藤正勝, 下澤 治 “東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究”, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, 2012.
- 20) 細川真也, 宮田正史, 青木伸之, 鴨打浩一 “津波に対して粘り強い港湾構造物の設計手法に関する研究”, 国土技術研究会, 2012.
- 21) 八木宏, 杉松宏一, 中山哲巖, 西敬浩, 奥野正洋, 小池哲, 林健太郎, 五十嵐雄介 “東北地方太平洋沖地震津波による女川漁港の漁港施設における被災メカニズムの検討”, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, 2012.
- 22) 狩野淳一 “女川港湾口防波堤復旧事業について”, 「港湾」2013-3, 2013.
- 23) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 巖駿 “津波越流時における防波堤の安定性に関する研究”, 土木学会論文集 B2, Vol. 69, No. 2, 2013.
- 24) 高橋英紀 “混成防波堤の基礎マウンドと腹付工の耐力に関する検討”, 「港湾」2013-12, 2013.
- 25) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹 “津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究”, 港湾空港技術研究所報告, Vol.52, No.2, 2013.
- 26) 藤井直樹, 池野正明, 榊山 勉, 松山昌史, 高尾誠, 向原 健 “津波による港湾内の流況と地形変化に関する実験およびその数値計算”, 海岸工学論文集, 第 56 巻, 2009.
- 27) Kumagai K. “Tsunami-induced debris of freight containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, JSCE Disaster Fact Sheet, FS2013-T-0003, 2013.
- 28) 富田孝史, 廉慶善, 熊谷兼太郎, 高川智博, 鈴木高二朗, 渡邊祐二, 齊藤節文, 佐藤 正勝 “2011 年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害”, 土木学会論文集 B2, Vol. 68, No. 2, 2012.
- 29) PIANC “Tsunami disasters in ports due to the Great East Japan Earthquake”, Report No. 122, 2014.
- 30) 日本海難防止協会 (2012) : 海と安全 No.522 (46 巻, 春号), 2012.
- 31) 菅原健司, 鈴木孝信, 佐藤朱美 “津波漂流物対策施設の効果について —東日本大震災を経験して—”, 国土交通省北海道開発局第 55 回 (平成 23 年度) 北海道開発技術研究発表会, No.安 3, 2011.
- 32) 宮城県土木部 “東日本大震災 公共土木施設等復旧方針”, 2012.
- 33) 宮島正悟ほか 32 名 “平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告”, 国土技術総合研究所資料 No.798・港湾空港技術研究所資料 No.1291, 2015.
- 34) Kuriyama, Y., Takahashi, K., Yanagishima, S. and Tomita, T. “Beach profile change at Hasaki, Japan, caused by 5-m-high tsunami due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”, Marine Geology, 355, 234-243, 2014.
- 35) Tomita, T., Honda, K. and Kakinuma, T. “Application of

- three-dimensional tsunami simulator to estimation of tsunami behavior around structures”, Proceedings of 30th International Conference on Coastal Engineering, 2006.
- 36) Tomita, T. and Honda, K. “Tsunami estimation including effect of coastal structures and buildings by 3d model”, Proceedings of Coastal Structures 2007, 2007.
- 37) Takagawa, T. and Tomita, T. “Effects of rupture processes in an inverse analysis on the tsunami source of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, Proceedings of 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012.
- 38) Nielsen, P. “Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport”, 1992.

研究テーマ 1

課題 1-3

巨大津波による火災対策

金沢工業大学 増田達男 教授

課題 1-3 巨大津波による火災対策

金沢工業大学

教授

増田達男

津波火災
瓦礫

巨大津波
重油

火災対策
予測手法

1. 研究目的

東日本大震災で発生した火災の約半数は津波火災だった。本研究では気仙沼湾とその沿岸地域の津波火災に対する調査および実験から、予測手法を構築するとともに、南海トラフの巨大津波が想定される高知市を事例として、実効性ある津波火災対策を考究する。

2. 解決法

2-1. 気仙沼市における津波火災の経緯

はじめに

東日本大震災では、気仙沼市で見られたように、津波をきっかけとして発生した火災が原因となって内陸で延焼が広がった。今後、恐れられている南海トラフ地震においては、さらに巨大な津波が予測されている。巨大津波に伴う大規模火災の検討は、最も緊急を要する課題のひとつである。

本研究は、コンピュータによる市街地火災シミュレーションプログラムを用いて大規模火災を予測する研究の一環として行っている。巨大津波による大規模火災のメカニズムを知ることにより、シミュレーションによって今後の危険を予測するための手法の開発に役立てたいと考えている。

ここでは、研究の開始にあたって、最も津波火災の被

害が深刻であった気仙沼市について、その経緯の把握を試みている。資料としては、平成 24 年 8 月 29 日～平成 24 年 8 月 31 日と平成 24 年 10 月 21 日～平成 24 年 10 月 23 日に現地の気仙沼市を訪れた際の聞き取り等の調査結果を中心に、日本火災学会の調査報告書¹⁾、一般公開されている記録や動画等を用いている。

2-1-1. 宮城県気仙沼合同庁舎の聞き取り調査

以下は、伊藤亮二氏らの証言である (2012.10.22 14:00～15:00)。

6 m の津波警報があり、県合同庁舎へは、約 200 人が避難してきた。4 階の大会議室へ避難者を誘導した。携帯電話では 10m の津波だというので、身構えた。地震後 30 分ぐらいに津波が押し寄せた。津波が来る前に、海の底が見えた。大きな津波の白波が湾の入口に見えた。大津波は海が盛り上がり水位が上がり、周囲の鉄塔もタンクも流された。水位は、県合同庁舎の 2 階と 3 階の踊り場まで来た。海面から 10m 以上はあった。油タンクが油を撒き散らしながら流れてくるのを目撃していた。油の臭いがあったので、煙草やストーブを着けると揮発したガスに引火するのでは、と恐れ、煙草を禁止し、ストーブも着けなかった。薄暗くなり始めた頃、大島の方の海上で火災が発生し、それが県合同庁舎の方へ流されてきた。幸い海岸に高さ 1m ぐらいの防潮堤があったので、そこで火は止まった。公民館が火に巻かれているのが見えた。30 トンの船が黒こげになるのを見た。津波の満ち引きに応じて火の着いた海面が左右に動いていた。対岸では線状の海上火災が漂着し船舶火災も漂着して、林野が

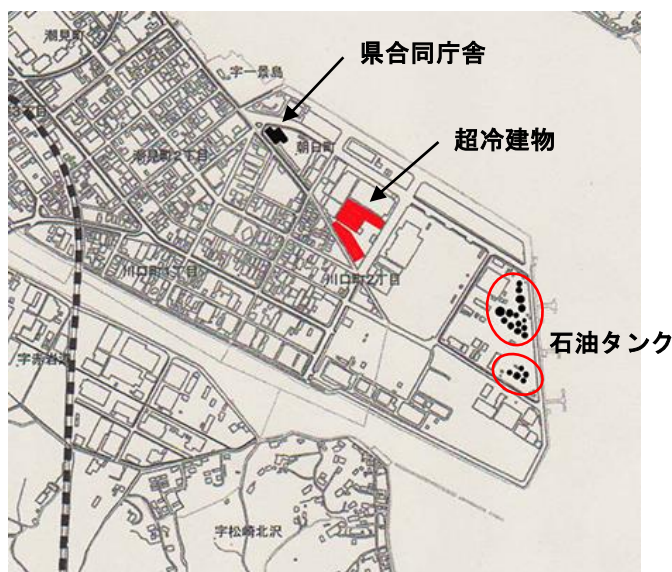


図1 朝日町付近の配置図 (国土地理院 1 : 10,000)
(石油タンクの位置情報は気仙沼消防本部提供)



図2 宮城県気仙沼合同庁舎の浸水深

延焼している状態を見ることができた。夜はぼんぼんと何かの破裂音が聞こえた。空気が震える衝撃波が窓ガラスにも伝わってきた。

翌朝、海上はくすぶっていた。県合同庁舎の周りはへどろが貯まっており、水深は道路の上ぐらいで、たいした高さではなかった。周囲を見ると瓦礫は皆流されていた。木造の建物はほとんど津波で流されていた。

2-1-2. 気仙沼中央公民館の聞き取り調査

以下は、吉田英夫氏の証言である（2012.10.22 10:00～10:20）。

第一波は 15:30 頃で、4.7m（2階天井まで）に達した。2階の窓から外を見て、津波のしぶきを目視して当初は2階の屋上へ避難した。その後、3階の調理室へ移った。油の臭いはしていた。夜には水深 2m 程度になった。17:40 頃に湾の入口で火の手が線路上に見えた。18:00 には公民館の近くに来て外壁を焦がした。瓦礫の中に大きな家も流れて燃えていた。

以上が「気仙沼中央公民館」における目撃情報である。

吉田氏が 3 月 13 日 10 時に撮影した中央公民館周辺の写真によれば、瓦礫の散乱状態が認められた。

2-1-3. 「ケアハウスみなみ」の聞き取り調査

以下は、施設長後藤久美氏の証言である（2012.10.21 16:00～17:30）。

3.11 当日、津波が来るとの放送があったので、入居高齢者を 3 階に避難させた。津波の浸水は 2 階と 3 階の間の踊り場まで来た。2 階の水深は立った状態で胸のあたり（約 120 cm）まで来た。その際は重油等の石油の浮遊は無かった。周辺の木造家屋はことごとく流されて、まともに建っているものは無かった。流された建物がケアハウスに漂着していた。火の手は 3 箇所から上がった。火災発生箇所は図 4 の①・②・③である。職員は見えていなかったが、入居者の証言を合わせた情報である。①は大型船の近くであり、③は歩道橋の手前である。①・②の火災は線路方向（西側）と北方向へ延焼した。③の火災は東方向と南方向へ延焼し、ケアハウスへも近づいて来た。ただし、ケアハウスの北側に建っている郵政宿舎の建物に遮られてケアハウスには達しなかった。夜になっても水は引かなかった。

後日発見したことだが、1階の厨房に流されてきた車両が 2 台入り込んで焼けていた。車両からの発火と思われる。RC造のため、この車両火災は建物に広がらなかった。大量の瓦礫が鹿折川の方角からケアハウスへ流れしてきた。

翌朝も周囲に水はあったが、瓦礫が堆積していて水深はよくわからなかった。ケアハウスの周囲に瓦礫が堆積し内側からドアを開けることができなかった。午後にな



図 3 気仙沼市鹿折地区の現況（2012. 10. 22 撮影）

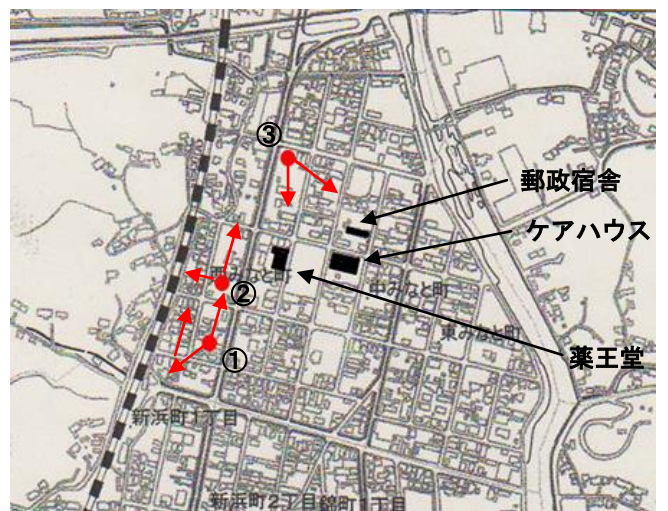


図 4 「ケアハウスみなみ」の聞き取り調査結果（国土地理院 1:10,000）



図 5 焼けた薬王堂の建物（鹿折地区）

って、34号線側から延焼し、ケアハウスの南側の薬王堂が焼け、発泡スチロール工場の発泡スチロールに引火して漂った。それが、ケアハウスの2階東側に漂着していた瓦礫に燃え移って3階の壁を炙り、北側の外壁へも一部回り込んだ。屋内まで火災は入り込まなかったが、3階室内の天井照明器具のプラスチックが放射熱で溶けるほどだった。

16 時頃に東京消防庁の救助隊が到着した。周辺道路は瓦礫で通行不可能だった。救助隊が瓦礫の上に畳を敷いてくれたので、はだしの状態で被災区域より脱出した。

以上が「ケアハウスみなみ」の後藤氏から聞き取ることができた津波火災の経緯である。

気仙沼消防本部の覚知情報では、15:40 に鹿折地区で 3 箇所から火災が発生している²⁾。動画においても 3 箇所の火災から煙が立ち昇っている状態をみることができる³⁾。

津波の当初は水面に石油類がまだ広がっていなかったようである。しかしその後には延焼している。木造家屋は流出して瓦礫化しているので、その状態での延焼は、油面が形成されたことを示唆していよう。なお、鹿折地区にも石油タンクは漂着している²⁾。

2-1-4. 気仙沼消防署の聞き取り調査

以下は伊藤大志氏・白川清樹氏の証言である

(2012.10.22、15:30～16:30)。

伊藤さんは日没 7 時過ぎに署に帰ったところ、鹿折へ行ける出動部隊が居なかったの、鹿折に出向くことになった。19:39 出動。19:56 到着。バイパスを經由して鹿折の北側に着いた。眼下に火の海が広がっていた。全体が燃えている、というような印象だった。歩道橋の上まで瓦礫が盛り上がり堆積していたので、海からこちらまですべて燃えているものだ、と思っていた。来る前に湾の中が火の海になっているのを目撃していた。離れた位置の小学校の水槽とプールからホースを引いた。放水開始は 20:24 であった。鹿折より北は建物がよく残っていたので、消火によって火をくい止めた。無風状態だったので、火より津波に気を使った。数回津波を退避した。津波は潮が引けば必ず上げて来る。「今度はいっぱいひいたぞー」と声をかける。その間に火がぶり返した。主に燃えたのは木材の瓦礫だった。発砲スチロールはどの浸水範囲でも見られた。ポンベが火を噴いているのも見た。夜通しの爆発音は車のガソリンとタイヤの破裂音だった。車の延焼は多く、火力が強かった。

2-1-5. 公開情報による知見

鹿折地区の北側に広がる市街地に住む漁労長の前田勝夫さん(72)は、「自宅 3 階の窓から見える一筋の白煙に気づいた。数分前に襲った津波で、壊れた家や車が 2 階の高さまで押し寄せた」⁴⁾と証言している。鹿折の西みなと町で、火の手が上がる瞬間を見た自治会長の熊谷民夫さん(62)は、津波直後の 11 日午後 4 時ごろ、数カ所のがれきから火が出たという。「何であそこがあんなに激しく燃えるのか、と思うような場所だった。後で見たら、津波で流された車 6～7 台が、住居とともに焼け焦げていた」⁵⁾という。



図 6 郵政宿舎の南面（鹿折地区）



図 7 郵政宿舎北側の焼けた倉庫



図 8 郵政宿舎北面の焦げ痕

鹿折住民の村上忠男さん(75)は、「押し流された建物が集まり、3 階ほどの高さに盛り上がった場所に火が移り、一気に燃え上がった」⁶⁾という。

夕方になって内湾に海上火災が広がり、それが回流している状態を見ることができる⁷⁾。

19 時 24 分気仙沼内湾の大浦・小々汐沿岸地区で火災が発生している¹⁾。

大浦の住民小野寺氏へのヒアリング(2012.08.30、8:35)で

は、この地域の第1波は油面形成前であって、高台の自宅が冠水したが油の汚れは無かったという。のちの津波（第2波？）によって油面の漂流物火災が押し寄せたと証言している。

「第一波によって（火災の前に）小々汐地区の家はずでに破壊されていた」との漁師の証言がある⁸⁾。

現在でも浸水地区では木造家屋等のコンクリート基礎が一部に残されている。津波が引く際に住宅の基礎や破壊を免れた建物等に瓦礫が引っかけたことが想像される。

考察とまとめ

既知の事実確認と新たに得られた知見をまとめると、

① 仮説として、津波を免れた市街地の木造家屋群に海上の油面・瓦礫火災が燃え移って拡大したと考えていた。

しかし、実際は津波によってことごとく木造家屋は押し流されて瓦礫化していた。この瓦礫から火災が発生し、後に油面が形成された海上火災に助長されて延焼が拡大したものと思われる。

ただし、鹿折では歩道橋の北側から夜を徹しての必死の消火活動によって延焼がくい止められた事実がある。したがって、前述の仮説のように、瓦礫火災から市街地火災に拡大する恐れは十分にあった。

② 朝日町では単体の建物火災が発生した程度であった。1) 県合同庁舎職員からも「瓦礫の堆積は少なかった」という証言が得られている。

公民館周辺の写真に見られたように弁天町付近では確かに瓦礫の堆積が確認される。しかし、鹿折地区ほどの大量の瓦礫の堆積ではない。

鹿折地区では歩道橋の高さを超える程の大量の瓦礫が堆積して最も広域にわたって延焼した。

以上のように、気仙沼市における津波火災を概観するならば、瓦礫の量と火災の規模が相関していることが認められる。

③ 第1波の先端では、大浦およびケアハウスにおいて証言が得られたように、油はまだ水面に浮いていなかった。

15:30における朝日町の「超冷建物」の火災1)は第1波の襲来から時間があまり経過していない。したがって、冠水面に油が広がっていたか、あるいは否であったかについては、微妙なところである。

朝日町には、屋外タンクの大部分が配置されていた点から、いち早く油面が形成されたのかもしれない。一方、超冷建物以外に火災が広がらなかった点においては、油面が形成されていなかったのかもしれない。付近は工場地帯で木造家屋が少なかったとも考えられるので、瓦礫の量が少なかった、と思われる。写真情報でも瓦礫の堆積がほとんど認められなかった¹⁾。

前述したように、県合同庁舎付近では瓦礫の堆積が少なかった。

④ 15:40の鹿折地区の火災発生2)は、はたして油面の形成と関わっていたのだろうか。前述のように、ケアハウスのヒアリングによれば、第1波により2階まで冠水した当初は、水面に油は浮いていなかった。しかしながら、朝日町の「超冷建物」の火災からは10分時間が経過しているので、15:40時点では、冠水面に油が広がっていた可能性もある。その後、延焼が広がり、夜には一面火の海になったわけであり、さすがにその状態では油面と瓦礫の混合状態であったことが推察される。

⑤ 公開された動画では、内湾の海上に帯状に連なった海上火災が映されている。県合同庁舎の4階からは、対岸の大浦・小々汐地区に海上火災が漂着して林野火災が発生している状況がよく見えた、という。これに対応して、小々汐の浦島小学校の尾形光三郎氏の証言（2012.10.23）では、19時頃に海上の瓦礫火災が漂着して林野火災が誘発されたことを確認することができた。

⑥ 鹿折では、3箇所火災発生が消防本部において覚知されている。公開動画においても、夕暮れ時に3箇所の火災と立ち昇る煙が映されている。ケアハウスのヒアリングにおいては、この3箇所の地点が具体的に位置づけられた。

⑦ 気仙沼市において多様で広域の津波火災が発生した主要因を上げるとするならば、限られた湾内に瓦礫を伴った油面が広がった点。これによる海上火災が、回流（海流）および風向によって海上火災が広がりつつ移動した点。市街地は瓦礫が堆積した冠水状態であった点等を上げることができよう。

2-2. 気仙沼湾とその沿岸地域の津波火災に関する瓦礫流動実験

はじめに

東北地方太平洋沖地震では、気仙沼湾とその沿岸地域において大規模な津波火災が発生した。昨年度に引き続き、金沢工業大学地域防災環境科学研究所の造波水槽（15m×5m×1m）を用いて津波の流況および瓦礫の動態実験を行った【図9】。ここでは、水槽内に気仙沼湾とその周辺地域の縮尺地形を作成し津波火災に関連した一連の現象を再現している。造波装置による人工津波の波高は孤立波で最大82mmが限界である。したがって、垂直方向の縮尺は1/100とした（大震災時の波高は8m以上であった。地形の範囲は海上火災の発生点（梶ヶ浦沖）と鹿折の延焼市街地を含めるため水平方向1/300の歪縮尺とした。図10がその範囲である。地震後の地形データを用いている。

これまではビデオカメラで撮影した動画によって流況

の把握を試みた。トレーサーとして直径 4mm のポリプロピレン球を用いたが、流況を正確に把握するには不十分だった。瓦礫はトレーサーに合わせて 4mm 角の木片を用いたが、同様に動態の把握は困難だった。ここでは、一眼レフカメラの動画撮影機能を用いて直上から撮影し、PC 上での自動トラッキング解析手法を適用した。この手法は、縮尺瓦礫等の動きを RGB の色彩別に自動的に認識し、かつ自動的に追跡することで、時々刻々の瓦礫分布状況やその移動過程を定量化することができる。木片が 4mm 角では小さすぎて自動トラッキング解析ではとらえにくい点と、具体的な形状で実験するため、新たに瓦礫模型 (30mm×2 mm×2 mm)、木造家屋模型 (60mm×45mm×45mm)、RC 建築模型 (90mm×60mm×60mm) を地形縮尺に合わせて作成し使用した。木造家屋が津波で流された跡にはコンクリートの布基礎だけが残留して抵抗となるので、これに見立てた柵目間隔 10cm のネットを選定して縮尺地形の地上部に張りつけた【図 11】。なお、ネットは柵目のより細かいもの (2.5 cm) も試みたが、人工津波の運動エネルギーに対して抵抗が強すぎて、水槽の南北半ばで人工津波は著しく減衰したので不採用とした【図 12】。

2-2-1. 自動トラッキング解析による実験結果

縮尺地形では、最初に朝日埠頭に人工津波が遡上する。

津波数値計算でも同様の遡上が確認された【図 13】。実際には埠頭の石油タンク基地に 23 基が設置されていたが、大部分の 22 基が流されており、この時点でいち早く流出したことになる【図 14】^{注1)}。この石油タンク基地の先にある宮城県合同庁舎において、「石油タンクが油をまき散らしながら流れてきた」という目撃証言が得られている^{注2)}。石油タンク重油の流出量は 7,530kl と報告されている^{注1)}。なお、鹿折地区の「ケアハウスみなみ」と「大浦」地区の居住者からは、第一波の際に「海面に重油は浮いていなかった」、との証言を得ているので、油面の拡散には時間の経過が必要だったと思われる^{注3)}。トラッキング解析結果では、朝日埠頭から北方向の市街地へと瓦礫模型および木造家屋模型を悉く押し流している【図 15・16】。この木造家屋模型がすべて流された状態は、くり返しになるが、大量の石油タンクが流された事実と符合するといえよう。瓦礫模型は人工津波の最先端で浮き上がるため、残留基礎 (ネット) にかかる瓦礫は少なく、かつ塊状に集まりつつ流れていく。

続いて、弁天町等の西岸市街地にあたる縮尺地形のトラッキング解析結果では、人工津波の最先端に同様に瓦礫模型が集まって流される【図 17・18】。なお、湾へ流れ落ちる西岸市街地の瓦礫はほとんど見られない。ただし、縮尺地形西端の反射波防止溝に瓦礫模型の大部分が流れ

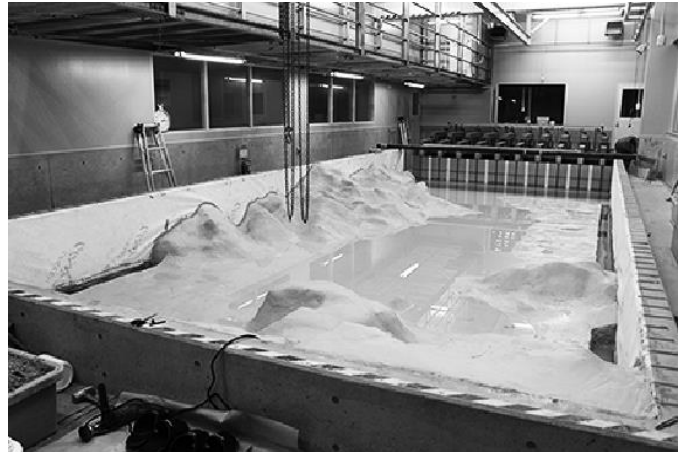


図 9 造波水槽

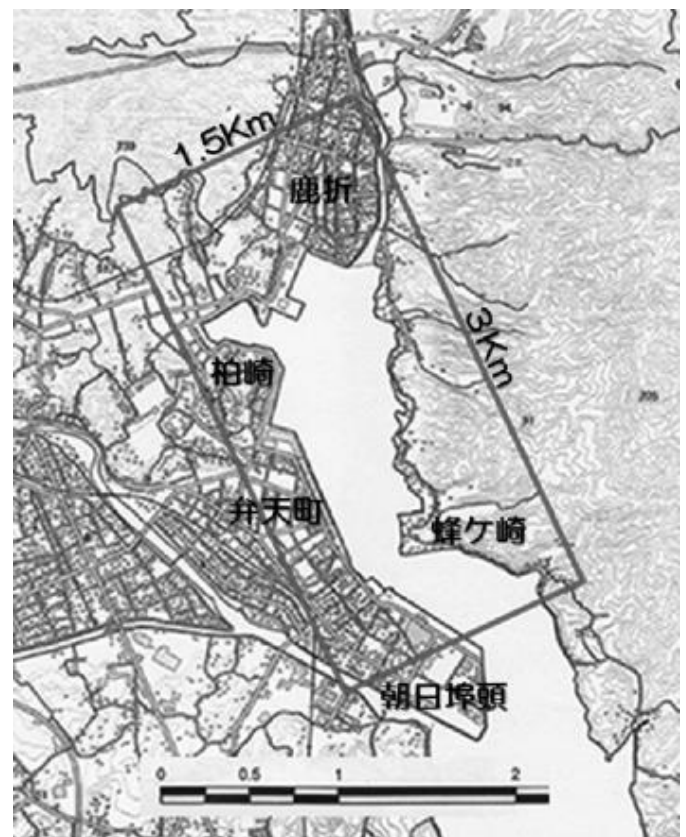


図 10 対象範囲
(国土地理院 1:10,000)

落ちる。実際には西岸市街地の奥部へと瓦礫を運んで行くことを意味している。津波数値計算でも沿岸平野部の西岸市街地全域に津波の遡上が確認できる【図 19】。敷衍すれば、反射波防止溝がなければ、瓦礫模型は引き波によって陸上に堆積するとともに一部は途中に残留し、残りは湾内に引き込まれて漂流することになる。木造家屋は完全には浮いていないため、残留基礎に引っかかって、多くは市街地で停止している。

また、人工津波の先端に模型瓦礫が集まりつつ流れる過程で、この塊が次第に北西へと傾斜して進むことにな



図 11 残留した布基

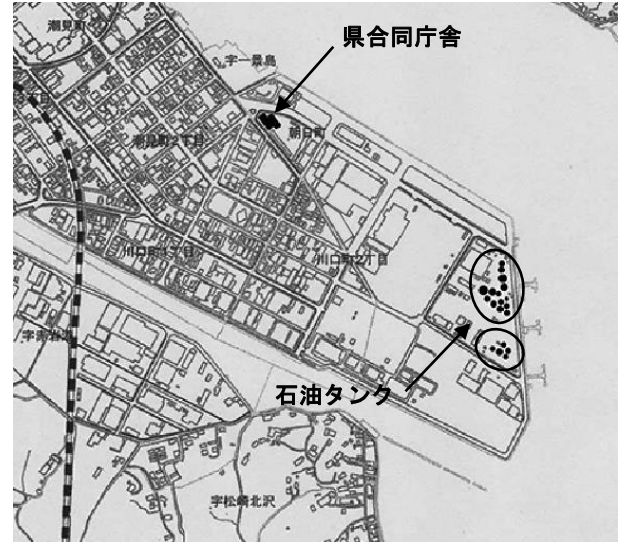


図 14 石油タンク配置図
(国土地理院 1:10,000)

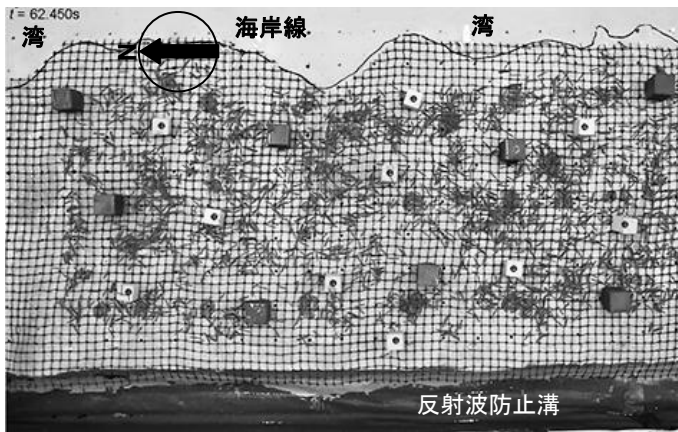


図 12 柵目 2.5 cm のネット

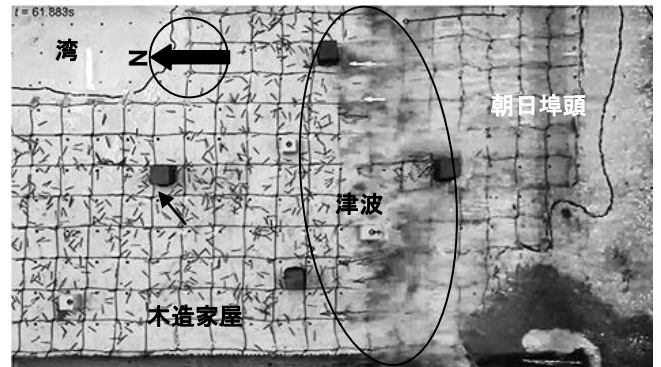


図 15 トラッキング解析結果 1-1



図 13 津波数値計算

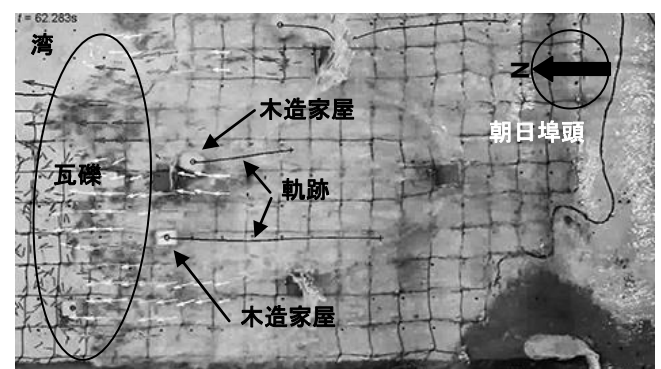


図 16 トラッキング解析結果 1-2

る。水深が大きい湾内の方が波の伝播が早く、一方で水深が小さい陸域の遡上部分では波の伝播は遅くなる。模型瓦礫があることで残留基礎（ネット）の抵抗を受けや

すく、陸域でより速度が抑えられている可能性もある。

さらに北へ続く市街地には東西にわたって柏崎の山稜が立ちはだかり、人工津波がこの斜面に乗り上げて停止する【図 20・21】。その後ただちに引き波となり、この人工津波の到達線上に瓦礫模型が堆積する。堆積を免れた瓦礫模型は一部を陸上部へ残しつつ湾内に引き込まれて漂流する。

湾の北側に位置する鹿折地区は、実際には対象地域の中で最も広域にわたって延焼した市街地である。人工津

波の勢いは減衰しており、瓦礫は市街地奥へと流されて堆積する【図 22】。しかし、引き波が弱いため、残りの瓦礫模型はすべて陸上に留まり、湾へ引き込まれる瓦礫模型はない。

要約

造波水槽実験結果に、公開情報・現地聞き取り調査結果・津波数値計算結果を参考とすることにより、以下のように津波火災の経緯を要約することができる。造波水

槽による人工津波は、当該地区でまず朝日埠頭に遡上する。すなわち実際の震災時で津波の第一波が遡上した際に 23 基の石油タンクのうちほとんどすべての 22 基が倒壊して流されたことになる。現地の聞き取りでは「第一波には重油は浮遊していなかった」との証言を 2ヶ所で得ている。したがって、その後海上に重油等が広がるにはやや時間の経過が必要であっただろうが、比較的早い段階で油面が広がったと推察される。実験では、人工津

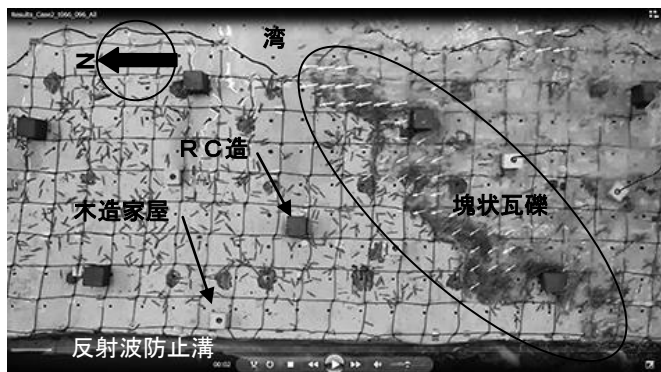


図 17 トラッキング解析結果 2-1

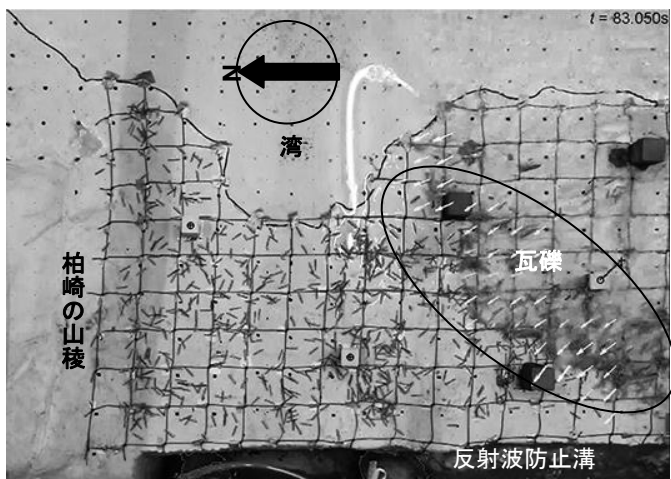


図 20 トラッキング解析結果 3-1

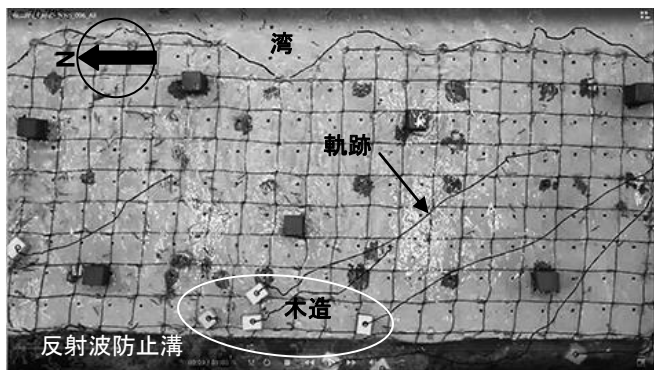


図 18 トラッキング解析結果 2-2

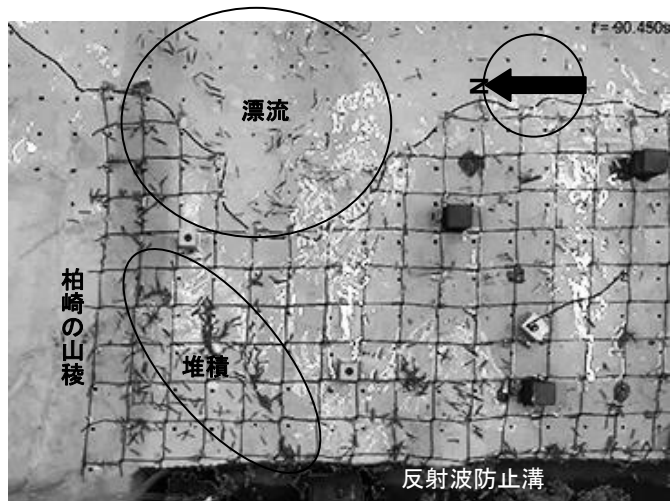


図 21 トラッキング解析結果 3-2

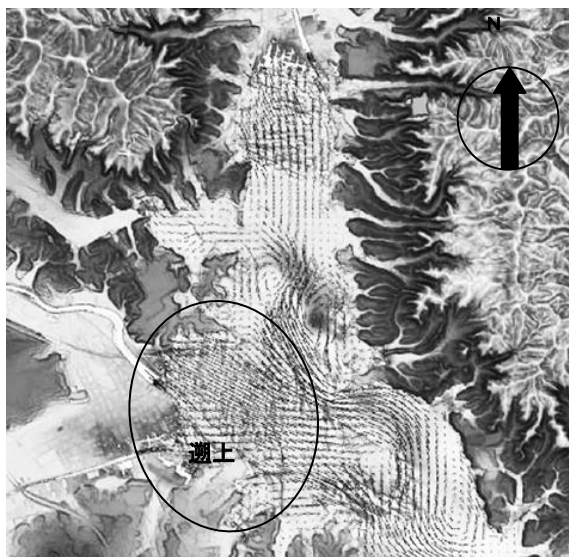


図 19 津波数値計算

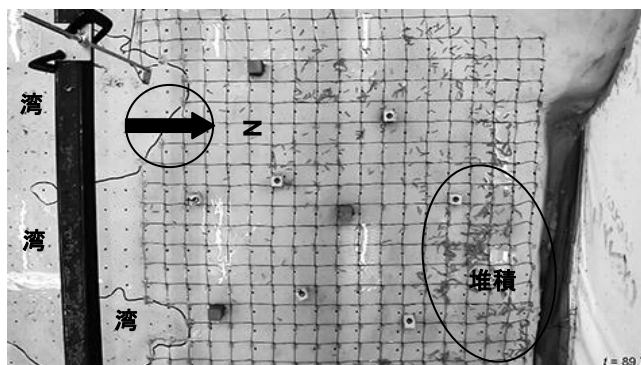


図 22 トラッキング解析結果 4

波は、市街地の瓦礫を浮遊させ押し流していく。その際に、津波の先端で瓦礫が集塊しつつ進んでいく。その結果、津波の到達線上で大量の瓦礫が堆積することになる。その後、実験では、引き波によって瓦礫の一部は市街地に残留するが、湾へ引き込まれる瓦礫も認められる。この漂流瓦礫が震災当日においてはやがて重油と混合して海上火災を発生させたことになる。火災は海面で広がり、冠水や第二波以降によって市街地へ押し寄せ、陸上に堆積した瓦礫に引火して火災を助長したことになる。

まとめ

本実験では造波装置を備えた大型水槽を用いているが、いくつかの制約条件がある。第一に、造波の規模、すなわち人工津波のエネルギーに限界がある。広範囲の地形を対象とするため、縮尺にも大きな制約がある。このような制約条件下において、実験装置の性能を最大限に引き出すように配慮した。

その結果、基本的な流動現象をすべて再現し、かつ公開情報・聞き取り調査結果・津波数値計算とも照合することができたことになる。

とくに、津波火災の主要因である木質系瓦礫の流動現象をつぶさにとらえることができた。すなわち、人工津波が遡上すると、その最先端で瓦礫が浮んで進行する。人工津波はさらに先へ進むため、新たな瓦礫が次々に浮遊することになり、瓦礫は集塊をなして、かつ拡大する。陸上での人工津波の到達線で運動エネルギーが一旦ゼロになるため停止し、塊状の瓦礫を置き去りにすることになる。大震災時においても、津波の到達線上で大量の瓦礫が堆積した理由をここで確認することができた。

ついで、人工津波は引き波となり、残りの瓦礫の一部を陸上へ留めるとともに、海上へ引き込んで漂流させる。

以上のように、津波の流況とともに瓦礫の流動・堆積・残留・漂流という一連の過程をとらえることができた。

2-3. 残留建築を配置した瓦礫流動実験

はじめに

東日本大震災における気仙沼湾沿岸地域では、鉄筋コンクリート造建築など津波に耐えて残留した建物が存在した。

したがって、ここでは、実際の状況に極力近づけるため、残留建築の縮尺模型を配置して、改めて瓦礫の流動実験を行った。

2-3-1. 実験結果と計測結果

その結果、遡上した津波は残留建築の影響を受けて進行方向を変え、かつ減衰して瓦礫の堆積を変化させた。



図 23 残留建築模型の配置範囲

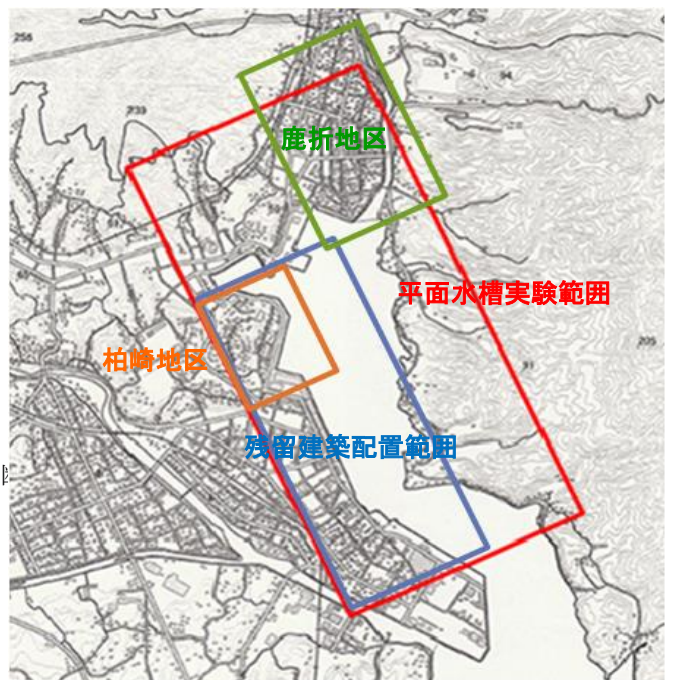


図 24 水槽実験範囲

瓦礫の堆積状況を被災当時の航空写真と比較すると、よく合致することが確認された。

瓦礫の堆積率等を測定すると、残留建築の無い場合は、津波の到達線上に 24.3% (217 個) が集塊して堆積し、引き波によって陸上に広がって残留する瓦礫率が 48.8% (435 個)、海に引き込まれて海上に浮遊漂流する瓦礫率が 26.9% (240 個) となった。

これに対し、残留建築を配置した場合には、津波の到達線上に 15.7% (119 個) が堆積し、引き波によって陸上に広がり残留する瓦礫率が 63.1% (478 個)、海に引き込まれて海上に浮遊漂流する瓦礫率が 21.1% (160 個) となった。結果として、海に引き込まれて漂流する瓦礫率とは津波の到達線上に堆積する割合が減少し、陸上に広がって残留する瓦礫の割合が増加した。

すなわち、残留建築の影響により、陸上での瓦礫はより拡散して堆積したことになる。

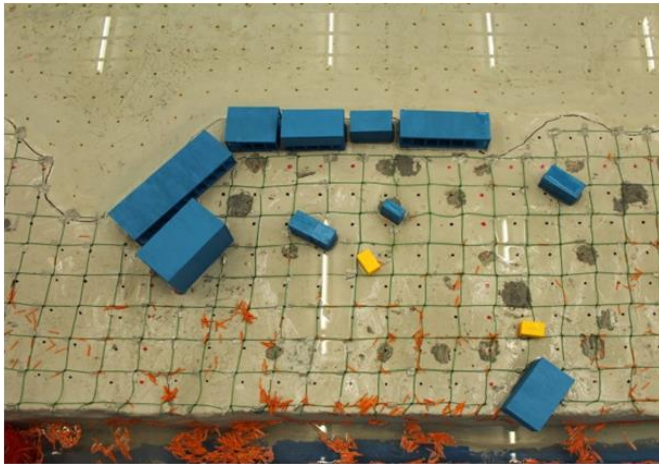


図 25 瓦礫の残留状況（柏崎地区）

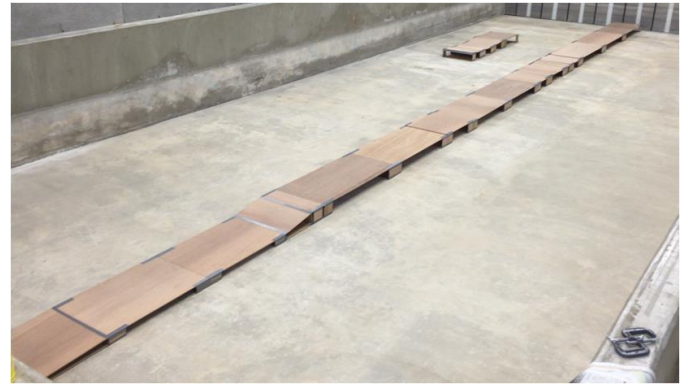


図 27 設置前の縮尺断面地形

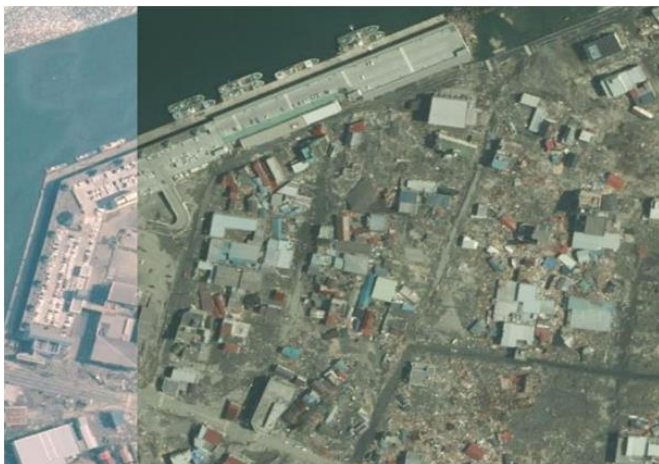


図 26 被災後の航空写真（柏崎地区）

表 1 断面水槽の実験結果

位置	海岸からの距離(mm)	長さ(mm)	高さ(mm)	がれき(個数)				
				1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
①	0-1000	1000	0-50	0	0	0	0	0
②	1000-1300	300	50-103	0	0	0	0	0
③	1300-1450	150	103	0	0	0	0	0
④	1450-3400	1950	101	0	0	0	0	0
⑤	3400-3950	550	107	0	1	0	0	0
⑥	3950-5750	1800	100	1	4	1	3	3
⑦	5750-6150	400	100-108	1	5	1	1	0
⑧	6150-6750	600	108-101	7	3	7	8	7
⑨	6750-7000	250	101	8	2	7	4	5
⑩	7000-7400	400	103	9	23	9	10	3
⑪	7400-9600	2200	111	128	53	90	107	126
⑫	9600-11700	1100	111-120	134	80	42	12	6



図 28 縮尺地形を設置した断面水槽

まとめ

残留建築の縮尺模型を配置することにより、より実際の状況に近い実験結果を得ることができた。

2-4. 断面水槽による瓦礫の堆積実験

はじめに

断面水槽（13m×1m×50cm）に 1/100 の地形断面を設置して瓦礫の流動および堆積実験を行った。

対象範囲は気仙沼湾沿岸の鹿折地区である。同地区は

気仙沼市における津波火災の中で、最も延焼範囲が広がった地区である。平野部であるため、地形断面の傾斜は海岸から 132m の距離で僅かに 2.44m である。

造波水槽（平面水槽）では、実験装置の限界により、人工津波の波力が減衰して、十分に瓦礫の流動・堆積状況を確認することができなかった。したがって、改めて断面水槽を使用して定量的に測定することとした。

なお、縮尺地形模型は合板を使用し、地形断面の形状に応じて傾斜を近似させた。実験断面の距離と高さを表 1 に示す。人工津波は、2m40cm のストロークで押出した波高 10cm の台形断面波である。

あらかじめ縮尺地形上に瓦礫に見立てた木片（30mm×2mm×2mm のマホガニー材）を均等に配置し、津波の遡

上および引き波後の堆積数を測定した。

表 2 実験ケース及び実施日時

2-4-1. 実験結果と測定結果

実験回数は5回である。1回目の実験で縮尺地形の数ヶ所で浮き上がりが生じたので、水槽壁に固定する措置を講じた。

表1に示すように、2回目から5回目までの測定結果によれば、位置⑪および位置⑫の瓦礫堆積数は120本程度とほぼ均等である。ただし、位置⑫の堆積数が2回目以降、80個、40個、12個、6個と減少している。実験の再現性の点で問題がある。

撮影動画で確認したところ、海岸付近の地形模型に浮き上がりが生じていることが明らかとなった。地形斜面の補強が不十分であった。実験回数を重ねるごとに、この海岸地形の浮き上がりが大となり、実験結果に差異が現れたものと判断される。この欠陥は、津波の波力に影響を与えているが、瓦礫の堆積位置からは外れている。津波の遡上浸水位置は実際の浸水範囲に合致しているので、再現性は別として、実験への根本的な影響は回避されている。

したがって、2回目の実験結果が最も信頼できることになる。これによれば、津波の到達点である⑫の位置で80個、ついで⑪の位置で53個、⑩の位置で22個と次第に少なくなる。この3つの位置で堆積瓦礫数の91.8%を占めることになる。

平面水槽の実験結果とは大きく異なり、陸上での堆積が津波の到達点とその近辺に集中し、海上への引き込み瓦礫は皆無であった。地形模型と断面水槽の壁の間に設けた14mmの反射波防止溝に流れ落ちてしまう瓦礫が多かったことが原因しているものとみなされる。

まとめ

津波の到達点とその近い位置で大量の瓦礫が堆積することが確認された。一方で堆積が津波の到達点付近に集中して陸上に分散せず、海上にも引き込まれなかった点に疑問を残している。

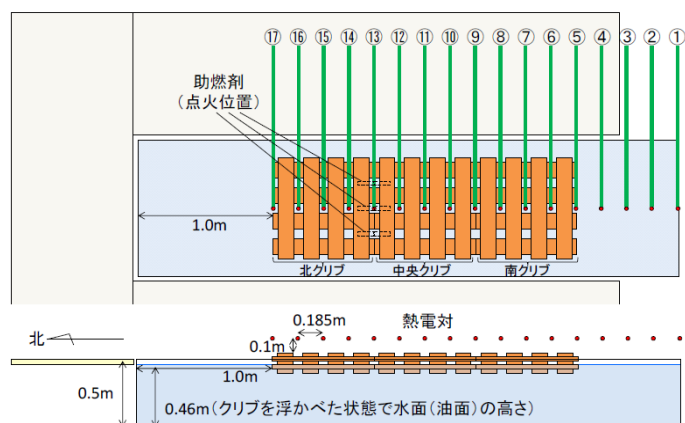
反射波防止溝の影響、地形模型の補強など、今後の課題が明らかとなった。

2-5. 津波被災時の海上瓦礫の燃焼性状に関する実験的検討

はじめに

2011年に発生した東日本大震災では、気仙沼湾において大規模な火災が発生し、沿岸地域に多大な危険と被害をもたらした。その原因の一つとして油タンクが津波により破損し、大量の重油等が海上に流出したことが指摘されている^{注4)}。

CASE番号	条件名	クリブ設置方法	風速[m/s]	実施(点火)日時
1	陸0	陸上	0.0	2015/3/12 10:24
2	陸2.5	陸上	2.4	2015/3/23 10:24
3	陸5	陸上	4.8	2015/3/6 15:36
4	水0	水上	0.0	2015/3/12 15:45
5	水5	水上	4.8	2015/3/18 11:01
6	油0	油膜	0.0	2015/3/13 11:07
7	油2.5	油膜	2.4	2015/3/19 11:00
8	油5	油膜	4.8	2015/3/17 11:29
9	浸油0	浸油	0.0	2015/3/20 11:00
10	浸油5	浸油	4.8	2015/3/18 15:13



※水槽上の気流を安定させるため水槽の北（風上）側及び東西（風横）側に0.9m幅ケイ酸カルシウム板により風除を設置した。

図 29 熱電対の設置位置(①～⑰は熱電対番号) (水上条件)



図 30 実験の様子 (南から北方向に撮影)

本稿では、海上に流出した瓦礫及び油の燃焼性状を明らかにすることを目的として、瓦礫に見立てた木材クリブの燃焼実験を行った結果について報告する。

2-5-1. 実験条件・計測内容

(1) 実験条件

実験は建築研究所火災風洞実験棟（茨城県つくば市）に長さ4.0m、幅1.0m、高さ0.5mの鋼板製水槽を長辺が風洞の送風方向に沿うように設置して実施した（送風方向は北から南であり、以下では方位で方向を記述する）。変化させるパラメータは、クリブ設置方法と設定風速であり、表2に示す10通りの実験ケースを設定した。

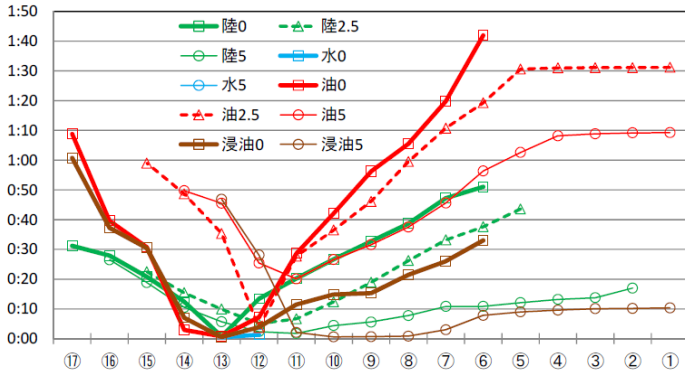


図 31 各熱電対が 200°C を超えた時刻 (点火時点を 0:00)

表 3 延焼速度

条件名	北側					南側				
	計測 始点	計測 終点	距離 [cm]	時間差	延焼速度 [cm/min]	計測 始点	計測 終点	距離 [cm]	時間差	延焼速度 [cm/min]
陸0	⑭	⑯	37.5	0:15:30	2.4	⑫	⑥	112.5	0:37:35	3.0
陸2.5	⑬	⑮	37.5	0:12:35	3.0	⑪	⑤	112.5	0:36:55	3.0
陸5	⑫	⑭	37.5	0:08:10	4.6	⑩	④	112.5	0:08:45	12.9
水0	-	-	0.0	-	0.0	⑫	⑫	0.0	0:00:00	0.0
水5	-	-	0.0	-	0.0	-	-	0.0	-	0.0
油0	⑭	⑯	37.5	0:36:40	1.0	⑫	⑥	112.5	1:34:40	1.2
油2.5	⑬	⑮	37.5	0:23:40	1.6	⑪	⑤	112.5	1:02:50	1.8
油5	⑫	⑭	37.5	0:24:20	1.5	⑩	④	112.5	0:41:35	2.7
浸油0	⑭	⑯	37.5	0:30:15	1.2	⑫	⑥	112.5	0:29:10	3.9
浸油5	⑫	⑬	18.75	0:18:45	1.0	⑩	④	112.5	0:09:00	12.5

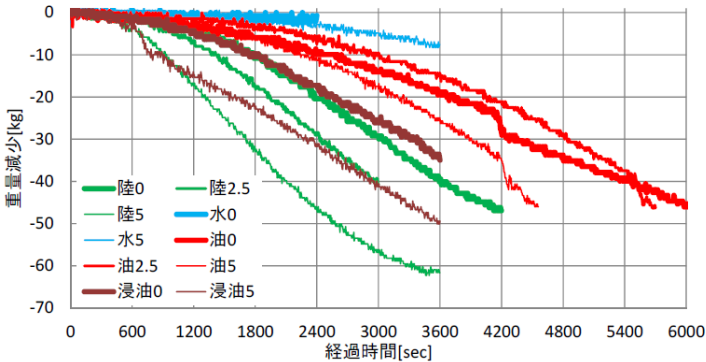


図 32 重量減少

- ・陸上条件は水槽上端に合わせてケイ酸カルシウム板で蓋をしてその上にクリブを設置した。
- ・水上条件は水槽に水を張り静かにクリブを浮かべた。
- ・油膜条件は水槽に水を張った上に A 重油 8.9L にて約 3mm^{注5)} の油膜を作成してクリブを静かに浮かべた。
- ・浸油条件は油膜条件と同様にクリブを静かに浮かべた後一旦油膜下にクリブを押し沈めて表面に水及び油が付着した状態とした。

クリブは長さ 75cm×幅 11.5cm×高さ 3cm の木材を 20 本用いて 5 段のクリブを作成した^{注6)}。使用した釘は 56 本 (140g) で釘を含むクリブの重量は約 20kg である。

実験においては図 29 のように、このクリブ 3 個を南北に直列に並べ、実験水槽北端から 1.0m、東西中央に配置

した。なお、クリブを設置した状態での水面又は油面位置 (陸上条件を除く) は、水槽上端から約 4.4cm 下方になるように設定した。ただし、水上 0 条件では水面はやや低く水槽上端から約 5.1cm 下方であった。

点火は北クリブと中央クリブの境界に、上から 2 段目の木材の間 3 カ所に市販の助燃剤 70g を設置し、強制着火した (図 29)。

(2) 計測内容

- ・火炎温度：クリブ上端から 0.1m の高さに、17 本のシース熱電対 (シース径 3.2mm、JIS1 級) を配置して計測した (図 30)。
- ・重量減少：実験水槽下部に設置したロードセル (東京測器 CLP-20KNB (20kN×4 台)) により計測した。
- ・熱流束：水槽の北、南、西側に各 1 本の熱流束計 (Hukseflux CHF-SBG03) を設置して計測した。
- ・風速：風洞内水槽北端から 9m 北側に風速計 (プリード PGWS-100) を設置し風洞内風速を計測した。
- ・各ケースの計測時間：目視によりクリブの南端への延焼の到達を確認するまで行うことを原則とした。ただし、水上条件では点火後助燃剤が燃え尽きた後は火炎を形成せずに燻焼状態となり延焼の進行が見られなかったため、水 0 では 40 分、水 5 では 60 分で計測を打ち切った。

2-5-2. 実験結果

(1) 延焼速度

図 31 は、各熱電対の計測値が 200°C を超えた時刻を表している。無風条件では点火位置直上である⑬の温度は点火直後に 200°C を超えている。⑬を中心に風下方向、風上方向で対称的にほぼ直線状のグラフとなっており、一定の速度で延焼が進行していることを示している。ただし、浸油 0 条件では南北の延焼速度に 3 倍程度の違いが見られ、クリブへの油の付着が均一でなかった可能性などが考えられる。

有風条件では、⑬よりも風下側の⑫や⑪の温度の方が先に 200°C を超えている。表 3 は、各熱電対が 200°C を超えた時刻から南北方向の延焼速度を求めたものである。陸上条件と油膜条件を比較すると、陸上条件の方が早い延焼速度を示す。浸油条件では、陸上条件に近い延焼速度となった。水上条件では延焼は見られなかった。

(2) 重量減少

図 32 は重量減少を示している。陸上条件の重量減少が早いことがわかる。浸油条件では 40% 程度 (クリブの比重 0.4 として) が水面下 (油面下) にあるため初期には燃焼しないが、延焼速度が速いため陸上条件に比較的近い量減少速度を示している。水上条件では延焼がほとんど発生せず重量減少は微少であり、油膜条件では延焼速

度が遅いため重量減少も遅い。

(3) 油の急激な燃焼

油膜・浸油条件では油面に急速に火炎が広がり猛烈な燃焼が確認された。この現象は多くの場合延焼がクリブの南北端に達して水平方向に噴出した火炎により油面が広く熱せられることで発生した。このとき周囲で計測された熱流束はそれ以前の 10 倍以上に急上昇した。

まとめ

海上に流出した瓦礫の燃焼が陸上の瓦礫の燃焼とどのように異なるか、さらに、油の流出によって燃焼がどのように促進されるのかについて火災実験を実施し条件の違いによる延焼速度及び重量減少速度の違いを明らかにした。また、実験時には油膜の急激な燃焼が発生し、油流出時の瓦礫火災の危険性の増大を確認した。

実験により津波被災時の海上瓦礫の火災性状に関する基礎的情報が得られた。今後実験結果の精査を行い、津波火災の危険性把握を進めることが課題である。

3. 方法の検証

3-1. 津波火災の予測手法

津波火災の予測手法としては、津波数値計算から木造家屋が破壊される範囲を抽出し、地理情報システムにより瓦礫量を算出した。前述の瓦礫流動実験結果から瓦礫の堆積分布を導いた。これによって「瓦礫火災シミュレーションプログラム」(図 34)により瓦礫火災を予測するとともに、津波を免れた市街地への延焼を「市街地火災シミュレーションプログラム」によって予測することが可能となった。海上火災については、津波数値計算による引き波と海上での瓦礫の流動状態に、前述の海上火災実験結果から得られた風速ごとの延焼速度を重ねることにより延焼状態を予測することが可能となった。

3-2. 南海トラフ津波火災の予測

津波数値計算によれば、高知市の浦戸湾では 3 m 未満の津波高となる。ハザードマップでは 2 m ~ 3 m と推定されている。

発生する瓦礫量は 337 千トン、海上への流出瓦礫は 178 千トン、陸上における堆積瓦礫量は 159 千トンと推測される。

石油基地のデータによれば、最大石油備蓄量 50,000kl となり、流出油面厚は 10mm と予測される。

瓦礫火災シミュレーションプログラムおよび市街地火災シミュレーションプログラムを活用して津波火災を予

気仙沼 鹿折地区

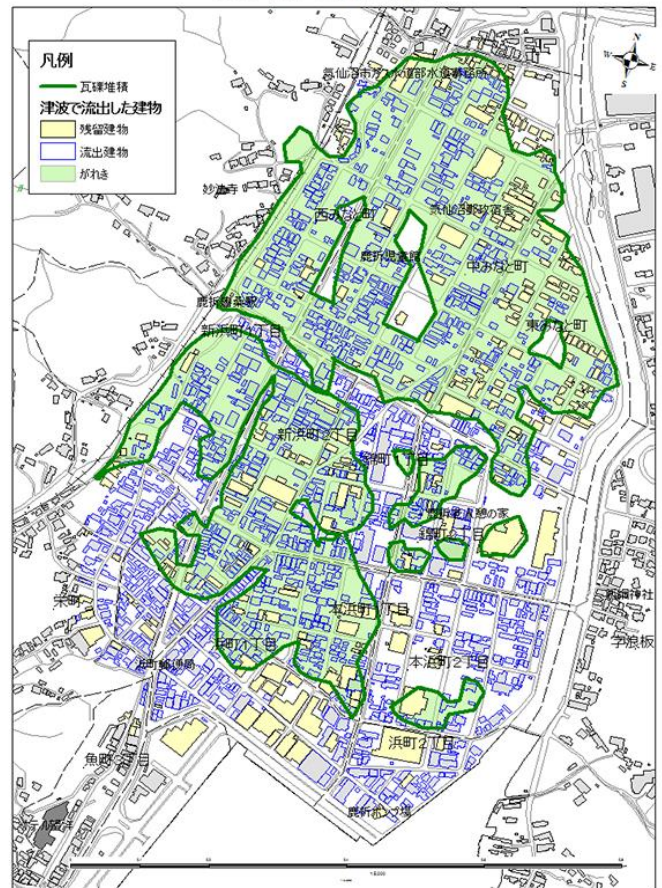


図 33 GIS による瓦礫発生量の算出

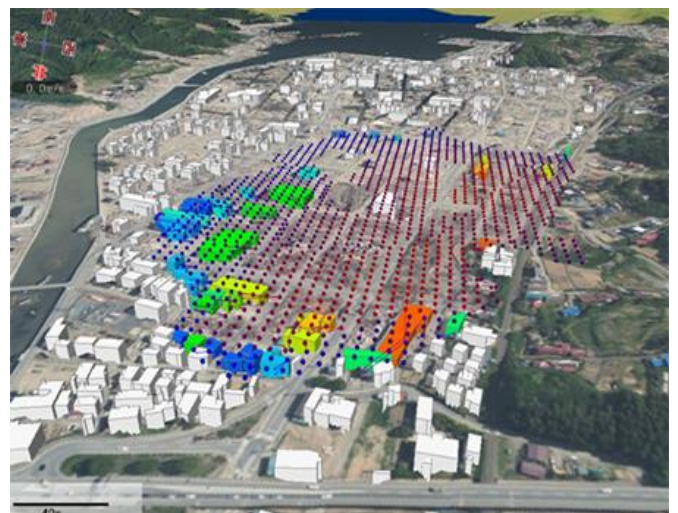


図 34 瓦礫火災シミュレーション

測することが可能となった。

4. 実効性のある提言

(1) 大型石油タンクからの重油の流出による津波火災が最も懸念される場所である。すでに石油コンビナートにおいては、防波堤・防潮堤・防止堤・防油堤・オイルフェンス・液状化対策・浮き蓋のスロッシング対策・フ

レキシブルチューブの採用・緊急自動遮断・漏えい検知装置・非常用電源の高所配置・大容量泡放水砲等の対策が講じられている。津波浸水深 3m以上が予測され対策が遅れている地域においては今後重点的に対策を進める必要がある。

現時点で未対策であるのは、船舶・貨物の漂流物の衝突による大型石油タンクの損壊である。これについては、津波を受け流して減衰させる樹林帯のような人工柵を大型石油タンクの周囲に設けて漂流物から護る対策を提案する。

また、防油堤内に瓦礫が流入すると流出油の規定容量が確保できなくなるため、これも前期の人工柵により食い止めることができる。

(2) 万一、大型石油タンクから重油が海上へ流出した場合の対策も講じる必要がある。重油だけでは燃えないため木質系の瓦礫を海上へ流出させないことが大切である。これにも前述の人工柵が有効である。

(3) 海上に重油が流出し、かつ木質系瓦礫と混合した場合には、発火させないことが重要である。漂流するガスボンベからの発火が記録されているが、自動遮断装置によって防ぐことができる。問題は漂流車両のガソリンと電気系統による発火である。リチウムイオンバッテリーは海水で電気火花が発生しないことが報告されている。オルターネータが海水につかると水素が発生し危険である。銅端子が海水につかると1時間程度で緑青をふき漏電する。以上、自動車メーカーによる電気系統の対策が必要である。

(4) 海上火災においては、初期消火が有効である。自動監視カメラ等の設置によって、いち早く火災を発見する必要がある。広い海上においても煙が立ち上るので発見は可能である。消防艇が活動するためにも、できるだけ瓦礫を海上に漂流させないことも大切である。

なお、消防艇の耐火性能を確保する必要がある。

(5) 海上では遠距離での消火が有効である。大型の消火弾を遠投する技術等の開発が望まれる。

(6) 陸上においても冠水状態で津波火災が発生する。とりわけ、津波の到達線上に大量の瓦礫が堆積する。この場合は集中的な消火活動が効率的である。

(7) 消防車両の耐火性能を確保する必要がある。瓦礫の上でも走行できるキャタピラー付の消防車両を配備する必要がある。

(8) 避難ビルの周囲に瓦礫が堆積した場合、車両からの発火で危険に陥る可能性がある。周囲に瓦礫を近づけない防護柵の設置が有効である。

注

1)石油タンクの配置および重油の流出量に関しては「気仙沼消防本部：危険物屋外タンク（100kl以上）の状況、平

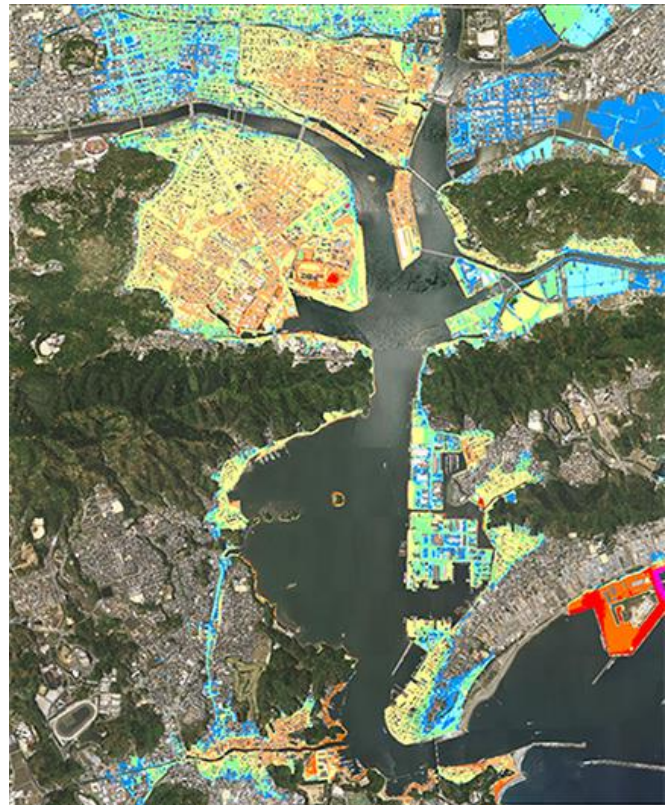


図 35 高知市の津波浸水範囲

表 4 瓦礫の堆積量・流出量

可燃物量

	棟数	平均階数	平均1階床面積 (m ²)	固定可燃物重量 (kg)
木質系建物	18717	2	67.1	263,741,247
耐火・準耐火建築物	倒壊しないと考える			

用途番号	区画用途区分	積載可燃物量[kg/m ²]	棟数	平均階数	平均1階床面積 (m ²)	積載可燃物量 (kg)
1	業務施設	22.3				0
2	商業施設	19.6	2301	2	79.9	7,206,916
3	宿泊施設	10.9				0
4	娯楽施設	19.6				0
5	遊戯施設	19.6				0
6	商業系用途複合施設	19.6				0
7	住宅	27.5	11515	2	52.6	33,312,895
8	共同住宅	27.5				0
9	店舗併用住宅	27.5				0
10	店舗併用共同住宅	27.5				0
11	作業所併用共同住宅	27.5				0
12	官公庁施設	22.3				0
13	文教厚生施設(A)	16.8				0
14	文教厚生施設(B)	16.8				0
15	運輸倉庫施設	64.8				0
16	重工業施設	35				0
17	軽工業施設	35				0
18	サービス工業施設	35	4901	2	95.5	32,763,185
19	家内工業施設	35				0
合計						73,282,996

発生瓦礫量 337千t
流出瓦礫量 178千t
残留瓦礫量 159千t

成 23年6月8日」を参照した。

2)「宮城県気仙沼合同庁舎」伊藤亮二氏（調査日時 2012.10.22 14:00）へ聞き取り調査を行った。

3)大浦地区居住者の小野寺氏（調査日時 2012.08.308:35）お

よび「ケアハウスみなみ」施設長後藤久美氏（調査日時 2012.10.21 16:00）へ聞き取り調査を行った。

4) 気仙沼市湾沿岸の石油基地における屋外タンクから 11,000 kL 程の重油等が流出した 1)。油層厚 3mm は、気

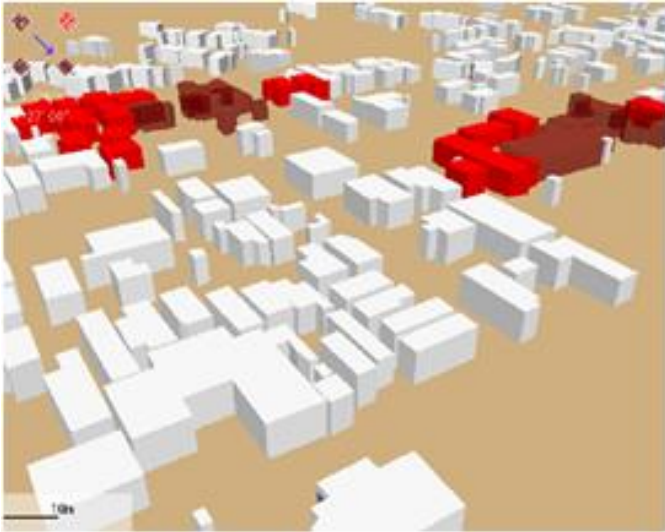


図 36 30 津波火災シミュレーション

仙沼湾（内湾）及びその周囲の浸水範囲の面積約 7km² のおよそ 1/2 に均一に広がった場合に相当する。

5) 含水率 10.9%、同一条件で作成したクリブの発熱量を酸素消費法により計測した結果 15.88MJ/kg であった。

6) 延焼速度算定においては、点火位置近辺は助燃剤の燃焼の影響が大きく、また、クリブ南北端は他と条件が異なることから、無風条件では⑰、⑬及び⑤以下は用いないこととし、有風条件では火炎の傾きを考慮して風速 2.5m/s では 1 つ風下側となる⑰、⑯、⑫及び④以下、風速 5m/s では 2 つ風下側となる⑮以上、⑪及び③以下をそれぞれ除外した。

参考文献

- 1) 2011 年度 東日本大震災・火災等調査報告書（速報版）、日本火災学会
- 2) 「東日本大震災消防活動の記録」気仙沼消防本部
- 3) 津波 気仙沼 鹿折 4
<http://www.youtube.com/watch?v=A-u3Xc9vQWs>
- 4) 証言 3・11:東日本大震災 宮城県気仙沼・鹿折地区 炎の猛威、陸と海から 毎日新聞 2011 年 09 月 25 日 東京朝刊
<http://mainichi.jp/feature/20110311/news/20110925ddm041040117000c.html>
- 5) 河北新報ニュース「その時 何が（3）炎に包まれる街（気仙沼・鹿折地区）」。
http://www.kahoku.co.jp/spe/spe_sys1072/20110516_04.htm
- 6) 猛火が天を焦がした 夜通し爆発音 気仙沼・鹿折
http://www.kahoku.co.jp/spe/spe_sys1062/20110323_14.htm

7) 津波にのまれた気仙沼中央公民館より 3

<http://www.youtube.com/watch?v=TmgnuyctD1k>

8) 消防研究センター

http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?Page=hpd_view&ac1=JNN2&ac2=&ac3=738

9) 気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部：東日本大震災消防活動の記録、2012.9

10) 林ほか：東北地方太平洋沖地震の津波に伴う海上燃焼瓦礫の火災性状、日本火災学会、平成 25 年度研究発表概要集、pp208～209、2013.6

研究組織

(1) 参加研究者

増田達男（MASUTA, Tatsuo）

金沢工業大学 環境・建築学部 教授

研究者番号：70125095

(2) 共同研究者

永野紳一郎（NAGANO, Shinichiro）

金沢工業大学 環境・建築学部 教授

研究者番号：40329371

(3) 共同研究者

林 吉彦（HAYASHI, Yoshihiko）

国土技術政策総合研究所 室長

研究者番号：70212175

(4) 共同研究者

岩見達也（IWAMI, Tatsuya）

国立研究開発法人建築研究所

住宅・都市研究グループ 主任研究員

研究者番号：20370744

(5) 共同研究者

都司嘉宣（TUJI, Yoshinobu）

公益財団法人深田地質研究所 研究員

研究者番号：30183479

(6) 共同研究者

今井健太郎（IMAI, Kentaro）

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地震津波海域観測研究開発センター 技術研究員

研究者番号：20554497

(7) 共同研究者

三戸部佑太（MITOBE, Yuta）

東北大学 工学（系）研究科（大学院） 助教

研究者番号：60700135

(8) 共同研究者

橋本隆司（HASHIMOTO, Takashi）

株式会社日本海コンサルタント 地理情報部

担当グループ長

研究テーマ 1

課題 1-4

長周期地震動による超高層ビルの 横揺れ対策

金沢工業大学 高畠秀雄 教授

課題 1-4 長周期地震動による超高層ビルの横揺れ対策

金沢工業大学

教授
高島秀雄

長周期地震動
横揺れ対策

簡易耐震診断・耐震補強
動的設計法

既存超高層ビル
オイルダンパー

1. 研究目的

遠隔地の海溝で発生した巨大地震は大都市の殆んどが立地する堆積平野を伝播する際、特定の長周期帯の揺れが増幅し長周期成分が卓越した地震動を形成する。この地震動は減衰が少なく、継続時間が長い。

超高層ビルは柔らかでしなやかな構造であり固有周期が長い。この長い固有周期は短周期の地震動に対して有利であるが、長周期成分が多く含まれる地震動に対しては共振現象を呈して、長時間に亘って大きな横揺れが発生する。この大きな横揺れは、最初は中間層等がくねくねする2次モードで振動し、入力地震動が終わる頃から超高層ビル全体が大きな1次モードで振動する。長時間に亘る大きな横揺れは超高層ビルに大きな損傷を発生させると共に、超高層ビルを利用している居住者や滞在者に大きな不安を与えることから、大きな横揺れを抑止する効果的な方法が要望されている。本研究課題はこの問題を解決する方法を提言する。

2. 解決法

① 既存（新設を含む）超高層ビルの長周期地震動による耐震性能を評価する簡易耐震診断法の提示。

既存超高層ビルの動的設計法では長周期地震動に対する検討が不足している場合が多い。長周期地震動に対して既存超高層ビルの耐震性能が、当該建物の設計クライテリアを満足しているかを検討する必要がある。この作業は当該超高層ビルを新規に設計する事と同じ作業となり、時間と費用が膨大となる。当該ビルの所有者は長周期地震動に対して当該ビルが安全かどうかを低コストで短時間に知りたい。この要望に対して、既存超高層ビルの長周期地震動に対する耐震性能の評価を簡易であるが高精度に実施出来る「簡易耐震診断法」を提示する。

長周期地震動による既存超高層ビルの耐震性能の評価法を極めて簡易に診断するには、等価1質点系による応答スペクトル法が便利であるが、耐震診断としては厳密性を欠き、また、耐震性能の不足がどの部分で発生しているかの情報量が不足である。

② 長周期地震動の横揺れ対策法の提示

長周期地震動により発生する大きな横揺れ対策としてオイルダンパーを設置する方法を提案する。

③ 内付オイルダンパーによる横揺れ対策

既存及び新設の超高層ビルに内付オイルダンパーを設

置する際のオイルダンパーの有効な減衰係数を適切に推定する必要がある。減衰係数を大きくすると応答変位は小さくなるが、層剪断力や転倒モーメントは大きくなる。オイルダンパーの適切な減衰係数を種々の地震動による応答結果から推定する。

④ 外付オイルダンパーによる横揺れ対策

既存超高層ビルでは内部にオイルダンパーを設置することは、使用し乍らでの施工、居住空間の使い勝手、機能等による制約から効果的な配置が出来ない場合がある。そこで、既存超高層ビルの外周に外付オイルダンパーを設置した場合の効果を検討する。外付オイルダンパーは、オイルダンパーが取り付く床面から下層の架構にはオイルダンパーで負担した力が流れず、外部に設置したオイルダンパーを通して直接基礎に流れるので効果的と考えられる。

3. 方法の検証

(1) 解析手法

超高層ビルの耐震性能を評価する簡易解析理論は、高島等により開発した棒材理論^{1~5)}を使用する。本理論は超高層ビルを等価剛性を有する棒材に置換し、軸変形、曲げ変形、剪断変形、更に、shear-lagを考慮出来る。

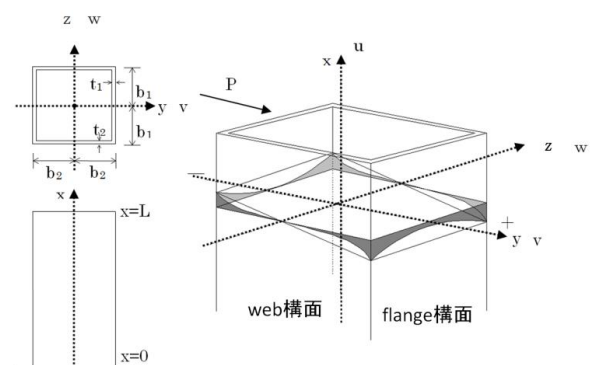


図1 2軸対称チューブ

図1の様な2軸対称チューブ構造に対する棒材理論による運動方程式は次式となる。

$$\delta u : \rho A \ddot{u} - (EAu')' - P_x + c_u \dot{u} = 0 \quad (1)$$

$$\delta v : \rho A \ddot{v} - \{ \kappa GA(v' + \phi) \}' - P_y + c_v \dot{v} = 0 \quad (2)$$

$$\delta\phi : \rho I \ddot{\phi} + \rho S^* \ddot{u}^* - \left(EI \phi' + ES^* u^{*'} \right)' + \kappa GA (v' + \phi) - m = 0 \quad (3)$$

$$\delta u^* : \rho I^* \ddot{u}^* + \rho S^* \ddot{\phi} - \left(EI^* u^{*'} + ES^* \phi' \right)' + \kappa GF^* u^* = 0 \quad (4)$$

境界条件式 ($x=0$ 及び $x=l$) は次式となる。

$$u = 0 \quad \text{or} \quad EAu' = 0 \quad (5)$$

$$v = 0 \quad \text{or} \quad \kappa GA(v' + \phi) = 0 \quad (6)$$

$$\phi = 0 \quad \text{or} \quad EI\phi' + ES^* u^{*'} = 0 \quad (7)$$

$$u^* = 0 \quad \text{or} \quad EI^* u^{*'} + ES^* \phi' = 0 \quad (8)$$

ここに、 A 及び I = 等価剛性の棒材の断面積及び断面 2 次モーメント； I^* 、 S^* 、 I^* = shear-lag に関する断面定数。(詳細は参考文献 1~9) を参照) 超高層ビルの柱脚がスウェイロッキング (S-R モデル) の取扱いは参考文献 9) を参照。

オイルダンパーが付加した超高層ビルを対象に棒材理論を拡張する。運動方程式 (1) をオイルダンパーを含んだ運動方程式に拡張すると次式となる。

$$m\ddot{v} + c_v \dot{v} + c_{oil} \dot{v} + \left[\kappa GA (v' + \phi) \right]' = -m\ddot{v}_0 \quad (9)$$

ここに、 m = 単位長さ当りの質量 ($m = \rho A$ (kg/m))； c_v = オイルダンパーを含まない建物の単位長さ当りの水平成分の減衰係数 (N/(m/s)/m)； \ddot{v}_0 = 地動加速度； c_{oil} = 単位長さ当りのオイルダンパーの減衰係数の水平成分 (N/(m/s)/m)。 c_{oil} はオイルダンパーが位置する部分のみ有効である。

動的解析法はモーダルアナリシスを用いる。変位 $v(x, t)$ は次式の様に座標軸 x と時間 t に変数分離する。

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^n \{ \bar{v}_i \} q_i \quad (10)$$

ここに、 $\{ \bar{v}_i \}$ = 水平変位の第 i 番目モードの固有関数； $q_i(t)$ = 第 i 番目の動的応答； n = 自由度。

固有関数の直交化を用いれば、式(9)は式(11)となる。

$$\ddot{q}_i + 2h_i \omega_i \dot{q}_i + c_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\beta_i \ddot{v}_0 \quad (11)$$

ここに、 h_i は i 次の構造物の減衰定数であり、建物の減衰係数 c_v と関係する。一方、オイルダンパーは任意の位置に設置されるので、建物の固有関数とは無関係となる。従って、固有関数を用いた直交化により得られた減衰マトリックス $[c]$ は対角項以外にも値を持つ。減衰マトリックス $[c]$ は次式で与えられる。

$$[c] = \frac{[\bar{v}]^T [C_D] [\bar{v}]}{[\bar{v}]^T [M] [\bar{v}]} \quad (12)$$

ここに、 $[C_D]$ はオイルダンパーの減衰マトリックスであり、単位長さ当りのオイルダンパーの減衰係数 c_{oil} よ

り構成する。

減衰マトリックス $[c]$ の非対角項を無視して近似的に直交化を仮定する。モードに非連続とした式(11)での c_i は直交化を仮定した減衰マトリックス $[c]$ の i 番目の対角項の値である。

オイルダンパーが負担する階当りの最大層剪断力 Q_{DAMP} は

$$Q_{DAMP} = C_e \dot{v}_{max} \quad (13)$$

で与えられる。ここに、 \dot{v}_{max} = その階の最大応答速度； C_e = 階当りのオイルダンパーの水平面当りの減衰係数。

内付及び外付オイルダンパーにより発生する周辺の梁の付加軸力 N_{BEAM} は、オイルダンパーを取付ける当該平面フレームの同一階に位置する総ての梁に均等に負担されると考えると、次式となる。

$$N_{BEAM} = \frac{Q_{DAMP}}{n} \kappa \quad (14)$$

ここに、 n = 当該平面フレームのオイルダンパーが設置される階の梁の総数。 κ は軸力の集中係数であり、 $\kappa = 1.5$ を採用すれば梁に発生する付加軸力を概算出来る。

また、オイルダンパーに接続する柱には当該オイルダンパーが負担する剪断力の垂直成分が付加軸力として作用する。柱の変動軸力 N_{COLUMN} は次式で求まる。

$$N_{COLUMN} = N_{BEAM} \tan \theta \quad (15)$$

(2) 既存超高層ビルの簡易耐震診断法及び簡易耐震補強法

棒材理論を用いて長周期地震動に対する既存超高層ビルの耐震性能を検討する手順を示す。

長周期地震動による既存超高層ビルの耐震性能の確認

① 簡易耐震診断法

棒材理論による応答結果が以下を満足する際耐震性があると判断する。

判定条件：

長周期地震動による応答 < 設計クライテリア

最大水平変位量 < 居住性の振幅制限

② 簡易耐震補強法

オイルダンパーによる耐震補強を採用した応答結果が以下を満足する際耐震性能があると判断する。

判定条件：

長周期地震動による応答 < 設計クライテリア

最大水平変位量 < 居住性の振幅制限

尚、当初の設計クライテリアは、概ね最大層間変形角と最大応答層剪断力に対して規定している。超高層ビルに対する一般的な耐震性能に対するクライテリアは以下

の様である。

○ **レベル1** に対して

- 最大層間変形角 < 1/200
- 最大応答層剪断力 < 1次設計用剪断力
- 塑性率 ≤ 1 (弾性設計)

○ **レベル2** に対して

- 最大層間変形角 < 1/100
- 最大応答層剪断力 < 保有水平耐力
- 塑性率 ≤ 1~2

上記のレベル2に対して居住者が不安を抱かないための最大水平変位(最大振幅)の制限が必要となる。

軟弱な地盤に建設された超高層ビルが長周期地震動の作用を受けると、地盤の変位と建物の相対変位との和である絶対変位が大きくなり、最上階の居住者に不安を抱かせることになる。これを防止するには、地盤の変位は改善出来ないので建物の相対変位を小さくし、かつ、絶対加速度を小さくすることが必要となる。超高層ビルの構造設計ではこの点に留意していないのが欠点となる。超高層ビルでは地階を設けて、軟弱な地盤の影響を受けない様に配慮することが必要となる。そのためには、地階部分では可能な限り表層地盤の影響を受けない様にして、表層部分の地動変位を少なくする対策が絶対変位を小さくするのに有効である。

(3) 計算モデル

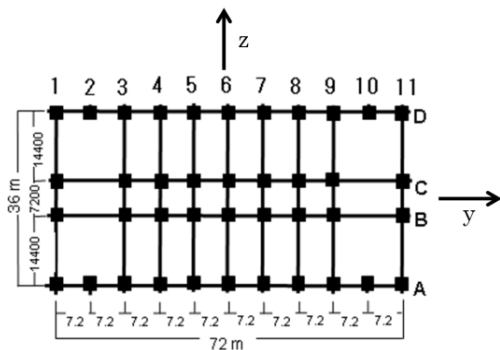


図2 構造平面

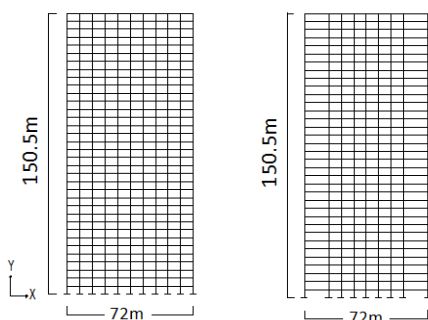


図3 AD軸組図、BC軸組図

既存の超高層ビルを参考に35階建ての超高層ビルを考える。図2は構造平面、図3は軸組図である。平面は桁行72m 張間36m、各階層高は4.3m、全建物高さは150.5mである。地下階は考慮せずに地上階について検討する。構造は鉄骨フレーム構造であり、柱及び梁の部材断面は表1に示す。各階の動的解析時の荷重は床面積当たり8kN/m²と仮定する。

表1 柱・梁部材断面

階	柱断面 (mm)
1~20F	■-800×800×40 (CFT)
21~25F	□-800×800×40
26~30F	□-800×800×32
31~35F	□-700×700×32

階	y 桁行方向梁断面	z 張間方向梁断面
1~10F	H-800×350×16×32	H-800×400×16×32
11~25F	H-800×300×16×32	H-800×350×16×32
26~35F	H-800×250×16×32	H-800×300×16×32

(4) 入力地震動

長周期地震動は2011年東日本大震災に於いて新宿及び浦安で観測された地震動を使用する。一方、観測波としてEL-CENTRO 1940 (ELと表記)及びJMA神戸(神戸と表記)の地震動を使用する。入力地震動の最大加速度及び最大速度を表2に、加速度時刻歴を図4~6に示す。

表2 入力地震動の最大加速度及び最大速度

地震波	方向	最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)
① EL	NS	5.11	0.50
② 神戸	NS	8.18	0.965
③ 新宿	NS	1.92	0.253
④ 浦安	NS	1.25	0.317

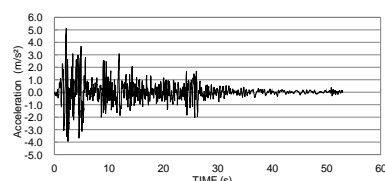


図4 加速度時刻歴 (EL- NS)

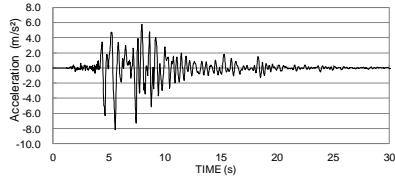


図5 加速度時刻歴 (神戸 NS)

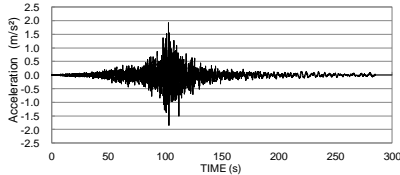


図6 加速度時刻歴 (新宿 NS)

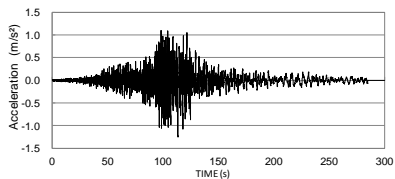


図7 加速度時刻歴 (浦安 NS)

入力地震動のフーリエスペクトルより求めた卓越周期数を表3に示す。

地震波	EL NS	神戸 NS	新宿 NS	浦安 NS
卓越周期 (s)	0.325	0.190	1.706	1.342

加速度応答スペクトルを図8及び図9に示す。

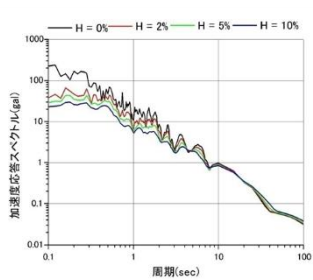


図8 加速度応答スペクトル (新宿 NS)

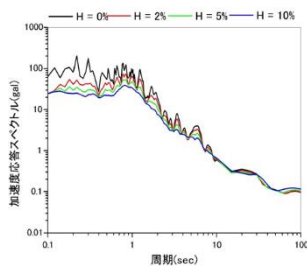


図9 加速度応答スペクトル (浦安 NS)

(5) 固有振動数

当該計算モデルの固有振動数を表4及び表5に示す。理論は棒材理論より得られた結果である。比較のため3次元フレーム解析を用いたSNAP及びNASTRANによる結果と比較すると、棒材理論は3次元フレーム解析結果と良好な一致を示す。()は理論値に対する比を示す。

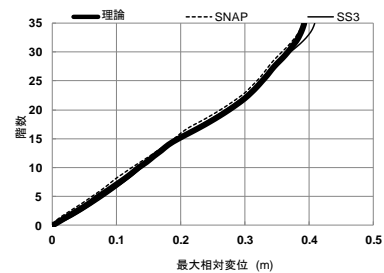
モード	理論	SNAP	NASTRAN
1	1.477	1.505 (1.02)	1.525 (1.03)
2	4.319	4.350 (1.01)	4.495 (1.04)
3	7.259	7.467 (1.03)	7.643 (1.05)
4	10.201	10.562 (1.04)	10.880 (1.07)
5	13.125	13.833 (1.05)	14.235 (1.08)

モード	理論	SNAP	NASTRAN
1	1.224	1.195 (0.98)	1.220 (1.00)
2	3.363	3.563 (1.06)	3.684 (1.09)
3	6.263	6.253 (0.99)	6.443 (1.03)
4	8.833	8.957 (1.01)	9.273 (1.05)
5	11.393	11.834 (1.04)	12.217 (1.07)

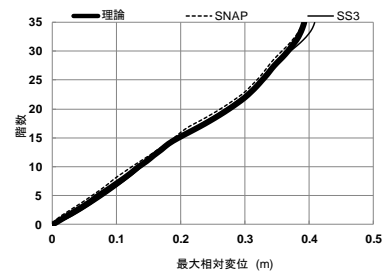
(6) 動的応答

構造物の減衰定数を1次モードに対して0.02として、上記地震動が解析モデルの超高層ビルに作用した場合の動的応答を以下に示す。

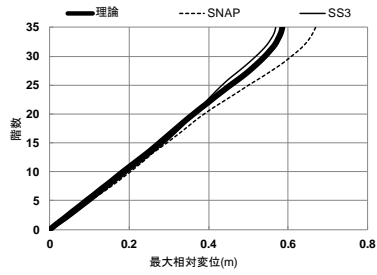
最大相対変位の分布を図10に示す。これらの図の縦軸は階を、横軸は変位を示す。各階の最大応答の相対変位をプロットしたものであり、各階の発生時刻は一致しない。



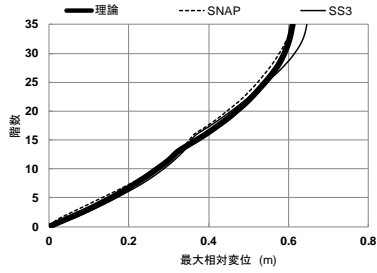
(a) EL-CENTRO-NS



(b) SHINJUKU-NS



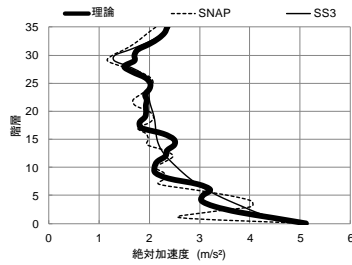
(c) URAYASU-NS



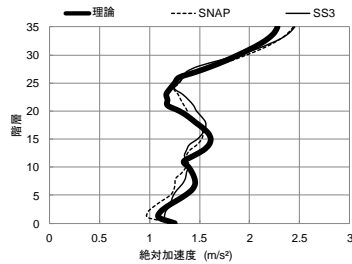
(d) KOBE-NS

図 10 最大相対変位の分布

最大加速度の分布を図 11 に示す。



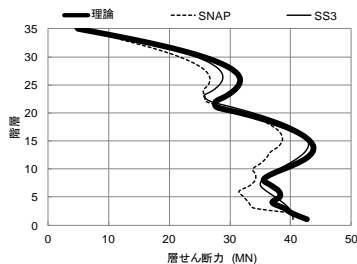
(a) EL-CENTRO-NS



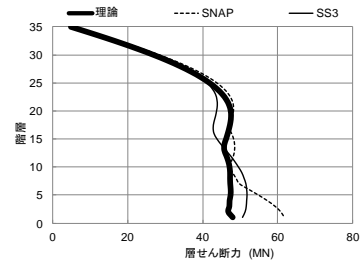
(b) URAYASU-NS

図 11 最大絶対加速度の分布

最大層剪断力の分布を図 12 に示す。



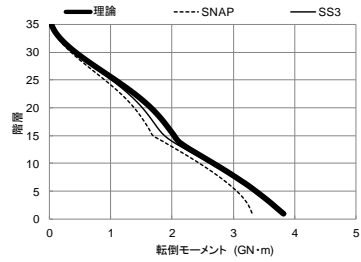
(a) EL-CENTRO-NS



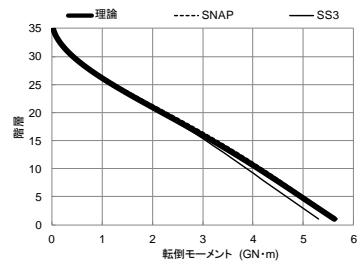
(b) URAYASU-NS

図 12 最大層剪断力の分布

最大転倒モーメントの分布を図 13 に示す。



(a) EL-CENTRO-NS



(b) URAYASU-NS

図 13 最大転倒モーメントの分布

以上の結果から、棒材理論は SNAP 及び SS3 と良好な一致を示していることがわかる。

(7) 簡易耐震診断法

各入力地震動に対して最大相対変位を比較すると図 14 となる。基準波となる EL-CENTRO-NS 地震動の応答に対して、SHINJUKU-NS の応答は少し大きい、URAYASU-NS の応答は約 1.6 倍の応答を示している。これは長周期地震動の作用により超高層ビルが大きな横揺れを発生している、横揺れを抑止する対策が必要であることを示唆している。

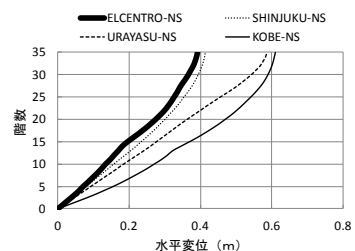


図 14 最大相対変位の比較

既存超高層ビルの長周期地震動に対する耐震性能の評価は、簡易耐震診断では、「長周期地震動により生じた動的最大応答値が設計時のクライテリアを越えれば、耐震性能が不足する」と判定する。判断とする最大動的応答は、水平変位（相対変位）、層剪断力、転倒モーメントが対象となる。長周期地震動による水平変位が基準波である EL-CENTRO-NS により発生した動的応答を超える横揺れが発生する場合は、耐震性が不足していると判定出来る。

(8) 内付オイルダンパーによる簡易耐震補強法

既存超高層ビルに対する耐震補強法としては、フレーム内に内付オイルダンパーを設ける方法が有効と考えられる。オイルダンパーを設置すると剛性も付与されるが、ダンパーによる減衰エネルギーが増加して、超高層ビルは揺れながら減衰するので、動的応答を小さく出来る。以後、説明を簡潔にするため、解析モデルの超高層ビルに地震動が桁行方向に作用する場合について示す。

① 内付オイルダンパーの適切な減衰係数

内付オイルダンパーを図 15 に示す様に B 通りと C 通りに配置する。各階に配置するオイルダンパーの数は問題ではなく、各階のオイルダンパーの減衰係数をどの程度にするかが設計上重要になる。オイルダンパーの減衰係数が大きすぎると、構造物の剛性が硬くなり過ぎて、相対変位は小さくなるが、逆に、加速度、剪断力、転倒モーメントは増大する。オイルダンパーの適切な減衰係数の大きさは、構造物の応答値を見て試行錯誤して見つけることになるので、簡易解析法は有効な設計法として利用出来る。オイルダンパーの減衰係数は速度と線形関係にあると仮定する。実際には、オイルダンパーの負荷力がある限度を越えれば減衰係数が低下するオイルダンパーもあるが、ここでは、オイルダンパーの初期の状態での応答変位を小さくすることを目標とするので、線形関係を使用する。

オイルダンパーはブレースと同様に、水平面と角度 θ を有するので、階当たりのオイルダンパーの水平面当りの減衰係数は水平成分の値をとる。また、棒材理論では構造物を 1 次元連続体に置換するので、オイルダンパーの減衰係数は単位長さ当りの量である。

内付オイルダンパーの減衰係数の高さ方向の分布形状を図 16 に示す様な、一様分布、三角形分布、逆三角形分布の 3 種類について検討する。三角形及び逆三角形分布は一様分布よりも半分のオイルダンパーの減衰係数で対応していることになる。

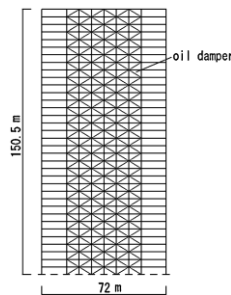


図 15 内付オイルダンパーの配置 (B,C フレーム)

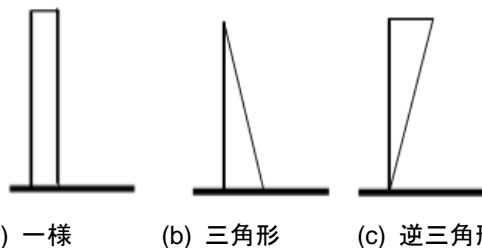
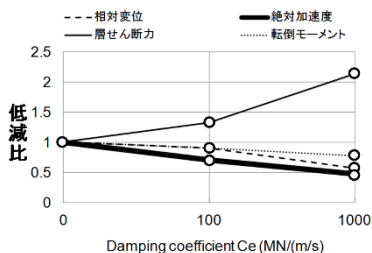
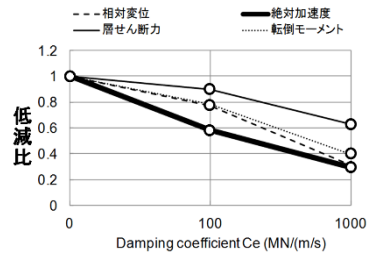


図 16 内付オイルダンパーの減衰係数の高さ方向分布



(a) EL-CENTRO-NS



(b) URAYASU-NS

図 17 一様分布のオイルダンパーの低減比

オイルダンパーの減衰係数が高さ方向に一様分布に配置した場合について、オイルダンパーの減衰係数の大きさと動的応答値の関係を図 17 に示す。これらの図における縦軸は、オイルダンパーを取付けた場合の応答値をオイルダンパーがない場合の応答値で割った比を示している。この比が 1 より小さい場合は、オイルダンパーの使用により応答値が小さくなり、オイルダンパーの設置が有効であることを示す。逆に、比が 1 より大きい場合はオイルダンパーの使用により応答値が大きくなり、オイルダンパーの設置が有効でないことを示す。これらの結果から、長周期地震動に対しては、オイルダンパーの減

衰係数が大きくなっても有効であるが、短周期地震動では減衰係数の小さいオイルダンパーが有効である。この傾向は、オイルダンパーの減衰係数が高さ方向に三角形分布及び逆三角形分布に配置した場合も、図 18 及び図 19 に示す様に同傾向を示す。なお、これらの図におけるオイルダンパーの減衰係数 C_e は階当りの水平成分を表し、100MN/(m/s)と 1000MN/(m/s)を用いる。

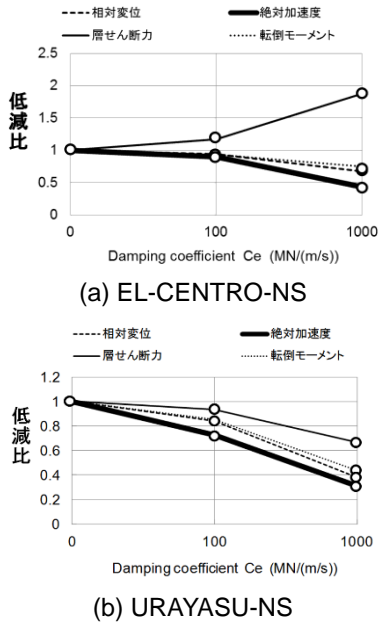


図 18 三角形分布のオイルダンパーの低減比

内付オイルダンパーに対する動的応答についても、棒材理論の結果は汎用ソフト SNAP 及び SS3 の解析結果と良好な一致を示すことが図 20 で分る。

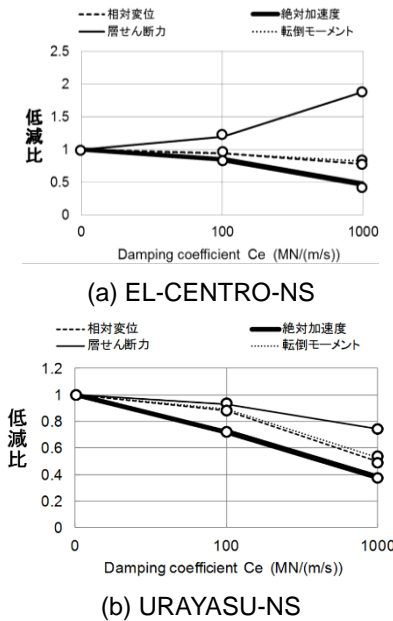


図 19 逆三角形分布のオイルダンパーの低減比

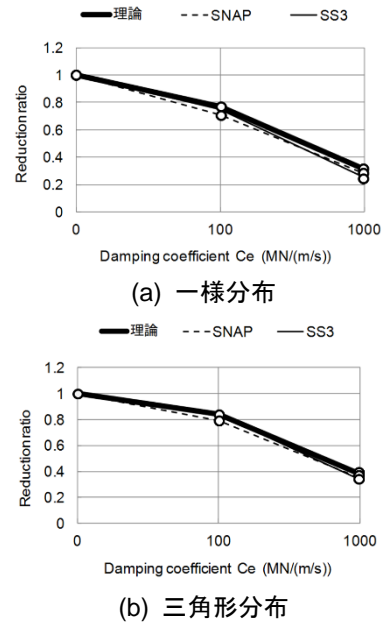
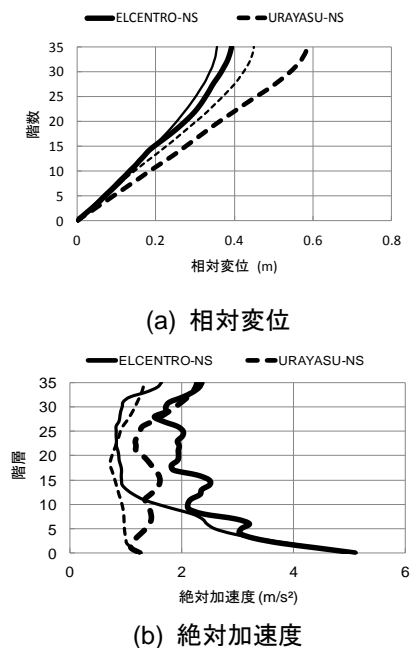
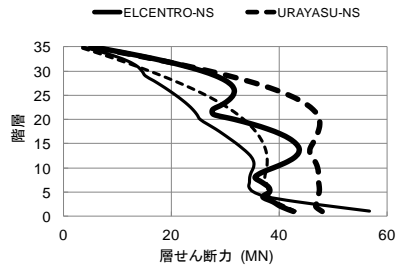


図 20 一様と三角形分布のオイルダンパーによる最大相対変位の比較

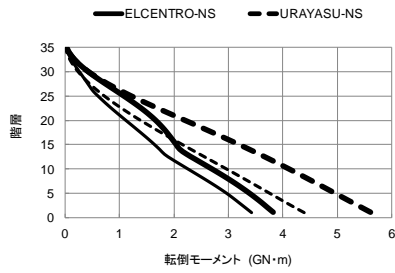
② 内付オイルダンパーの減衰係数の高さ方向分布と有効性

内付オイルダンパーの水平成分に対する減衰係数を各層当たり 100MN/(m/s)と仮定し、高さ方向の分布を一様分布、三角形分布、逆三角形分布とした 3 ケースの応答値を図 21～図 23 に示す。これらの図において、太線はオイルダンパーを設置していない場合の応答値であり、同じ線種の細線はオイルダンパーを設置した際の応答値を示す。以後、この表現を使用する。オイルダンパーの有効性は細線の応答値が同じ線種の太線より小さくなっている場合であり、両線の差が大きい程効果が大である。



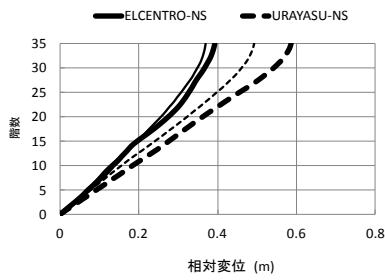


(c) 層剪断力

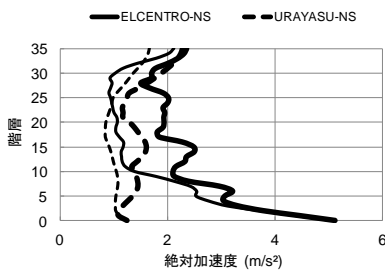


(d) 転倒モーメント

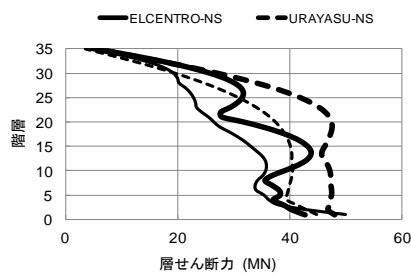
図 21 一様分布の減衰係数 100MN/(m/s)の効果



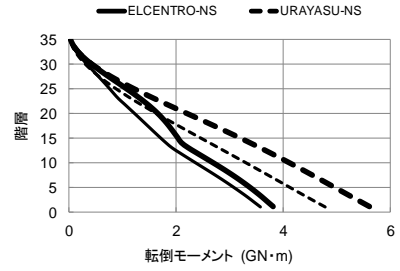
(a) 相対変位



(b) 絶対加速度

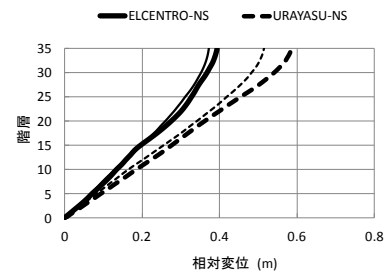


(c) 層剪断力

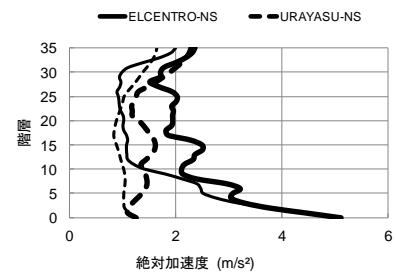


(d) 転倒モーメント

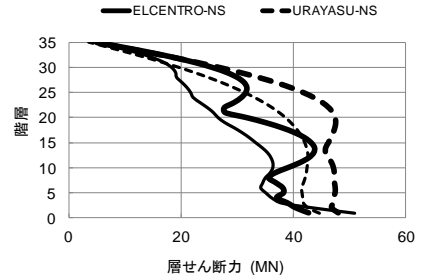
図 22 三角形分布の減衰係数 100MN/(m/s)の効果



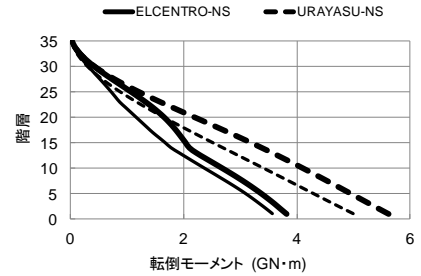
(a) 相対変位



(b) 絶対加速度



(c) 層剪断力



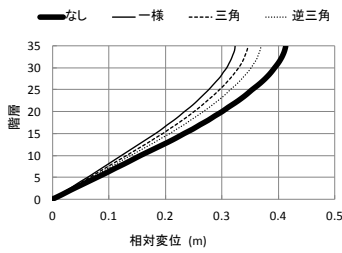
(d) 転倒モーメント

図 23 逆三角形分布の減衰係数 100MN/(m/s)の効果

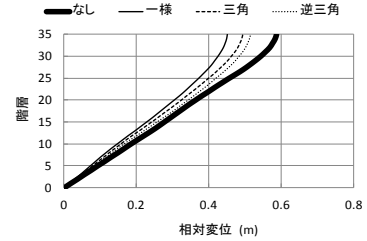
オイルダンパーの減衰係数が高さ方向に異なる 3 種類の場合について、応答変位の比較を図 24 に示す。応答変位は内付オイルダンパーを一様分布に設置した場合が

最も小さく出来ることが分る。

表 6 は内付オイルダンパーの有無による応答値の低減効果を示す。



(a) SHINJUKU-NS



(b) URAYASU-NS

図 24 オイルダンパーによる最大相対変位の減少

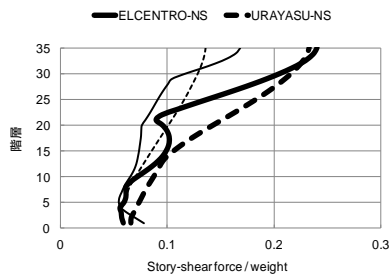
表 6 減衰係数 100MN/(m/s)の内付オイルダンパーによる最大応答の減少

	相対変位	絶対加速度	層剪断力	転倒モーメント
地震動	ELCENTRO-NS			
なし	0.393 m	2.358 m/s ²	42.680 MN	3.819 GN・m
一様	(0.903)	(0.698)	(1.328)	(0.897)
三角	(0.939)	(0.897)	(1.171)	(0.935)
逆三角	(0.947)	(0.848)	(1.193)	(0.935)
地震動	ELCENTRO-EW			
なし	0.767 m	2.624 m/s ²	87.500 MN	7.427 GN・m
一様	(0.952)	(0.771)	(0.910)	(0.959)
三角	(0.969)	(0.885)	(0.931)	(0.973)
逆三角	(0.977)	(0.872)	(0.931)	(0.984)
地震動	SHINJUKU-NS			
なし	0.413 m	1.027 m/s ²	41.310 MN	4.009 GN・m
一様	(0.782)	(0.671)	(0.791)	(0.785)
三角	(0.838)	(0.724)	(0.847)	(0.838)
逆三角	(0.896)	(0.769)	(0.892)	(0.896)
地震動	SHINJUKU-EW			
なし	0.446 m	1.248 m/s ²	43.240 MN	4.307 GN・m
一様	(0.715)	(0.588)	(0.770)	(0.723)
三角	(0.796)	(0.679)	(0.843)	(0.802)
逆三角	(0.865)	(0.728)	(0.903)	(0.872)
地震動	URAYASU-NS			
なし	0.586 m	2.282 m/s ²	48.030 MN	5.616 GN・m
一様	(0.768)	(0.584)	(0.896)	(0.781)
三角	(0.841)	(0.728)	(0.933)	(0.851)
逆三角	(0.879)	(0.721)	(0.928)	(0.890)
地震動	URAYASU-EW			
なし	0.533 m	2.232 m/s ²	48.640 MN	5.140 GN・m
一様	(0.760)	(0.546)	(0.872)	(0.761)
三角	(0.848)	(0.718)	(0.907)	(0.849)
逆三角	(0.889)	(0.705)	(0.932)	(0.888)
地震動	KOBE-NS			
なし	0.610 m	5.375 m/s ²	82.500 MN	5.872 GN・m
一様	(0.839)	(0.385)	(0.857)	(0.845)
三角	(0.902)	(0.462)	(0.883)	(0.906)
逆三角	(0.952)	(0.443)	(0.869)	(0.957)
地震動	KOBE-EW			
なし	0.537 m	5.152 m/s ²	69.150 MN	5.476 GN・m
一様	(0.804)	(0.340)	(0.934)	(0.770)
三角	(0.858)	(0.452)	(0.895)	(0.822)
逆三角	(0.864)	(0.424)	(0.893)	(0.825)

注) 比=(オイルダンパー有の最大応答値)/(オイルダンパー無の最大応答値)

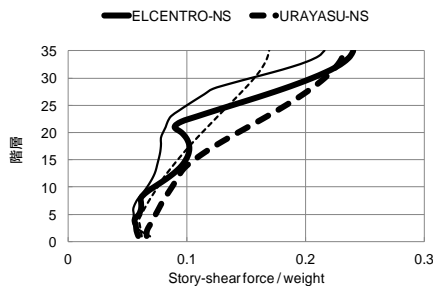
③ 内付オイルダンパーによる応答値の低減効果

各階の剪断力比は、各階の層剪断力を当該階の地震用重量（最上階から当該階までの重量の和）で割った値と定義する。内付オイルダンパーの減衰係数を一様分布及び三角分布に配置した場合について、各階の剪断力比の分布を図 25 と図 26 に各々示す。オイルダンパーの設置により層剪断力比は格段に小さく、その効果はオイルダンパーの減衰係数を高さ方向に一様分布に配置した場合が効果的である。ベースでの剪断力比（ベースシア係数）は同時に小さくなること分かる。



(a) NS waves

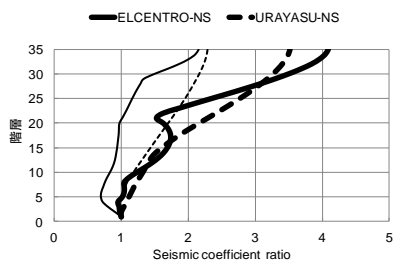
図 25 一様分布オイルダンパーの剪断力比の分布



(a) NS waves

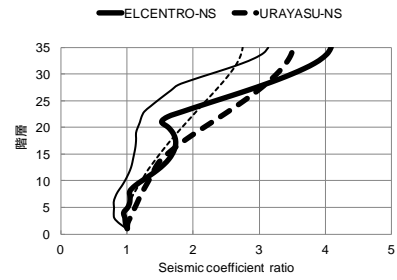
図 26 三角形分布オイルダンパーの剪断力比の分布

ベースでの層剪断力係数で各階の層剪断力係数を割ると、図 27 及び図 28 に示す様に、高さ方向の層剪断力係数の分布が得られる。最上階の剪断力係数比はオイルダンパーの設置前では 3.5~4 の値であるが、オイルダンパーの設置により半分以下に減少している。



(a) NS waves

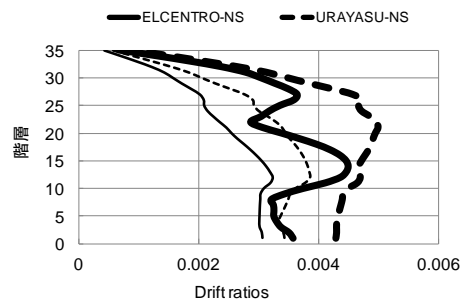
図 27 一様分布オイルダンパーの剪断力係数の分布



(a) NS waves

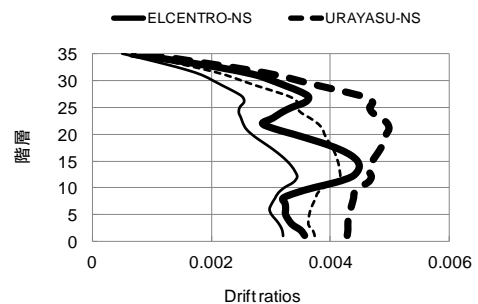
図 28 三角形分布オイルダンパーの剪断力係数の分布

オイルダンパーの設置により各階の層間変形角が低減出来ることを、図 29 及び図 30 に示す。長周期地震動である URAYASU-NS では層間変形角は 1 階から 25 階まで大きく、特に 20 階部分で最大となる。この中間層での大きな層間変形角が、中間層での損傷をもたらし、また、最上層の大きな横揺れの原因ともなっている。内付オイルダンパーの設置により、低層階から層間変形角が小さくなっている。これは、長周期地震動による挙動を押さえ、短周期での地震動と同傾向の最大層間変形角の分布となる。また直下型地震の KOBE-NS に対する層間変形角も極めて小さくなっている。



(a) NS waves

図 29 一様分布オイルダンパーの層間変形角の分布

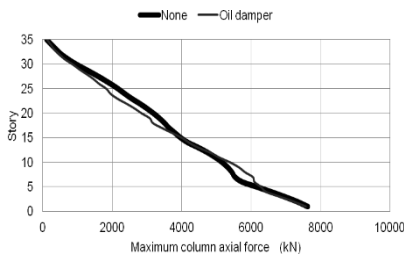


(a) NS waves

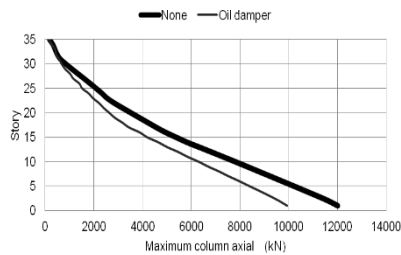
図 30 三角形分布オイルダンパーの層間変形角の分布

④ 内付オイルダンパーの周辺部材の軸力変動

内付オイルダンパーの設置により、ダンパーに取付く周辺の柱や梁に軸力変動が発生する。高さ方向に一律な減衰係数を持った内付オイルダンパーを取付けた場合、柱に発生する最大軸力の変動を図 31 に示す。オイルダンパーを取付けない前の周辺柱の軸力は、オイルダンパーを取付けてもほとんど変化がなく、逆に小さくなっている。これは、オイルダンパーの設置により、応答値が小さくなり、動的軸力が減少したためである。

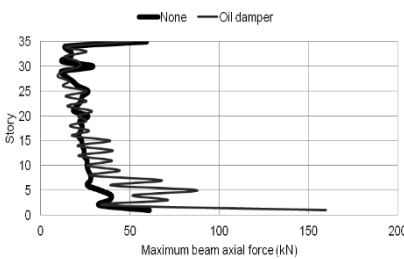


(a) EL-CENTRO-NS

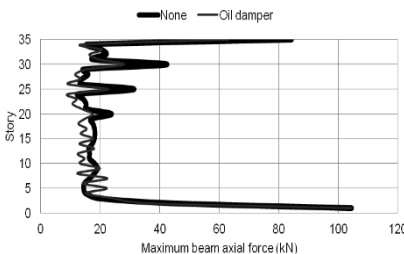


(b) URAYASU-NS

図 31 内付オイルダンパーによる柱の最大軸力分布



(a) EL-CENTRO-NS



(b) URAYASU-NS

図 32 内付オイルダンパーによる梁の最大軸力分布

内付オイルダンパーの設置により、周辺の梁に発生する軸力の分布を図 32 に示す。長周期地震動についてはオイ

ルダンパーの設置により動的応答値が小さくなるので減少しているが、短周期の地震動については増加している。表 7 は 2 階床梁の軸力変動を示す。EL-CENTRO の地震動では約 2 倍近い梁の軸力変動が発生している。梁には通常軸力が発生しないことから、beam-column としての検討が必要になる。通常的设计では、梁に発生した軸力は小さいことから許容応力以内に納まると考えられる。本例でも許容応力以内にある。

表 7 内付オイルダンパーの有無による 2 階床梁の軸力変動の比較 (単位 kN)

内付オイルダンパー	EL-CENTRO		SHINJUKU		URAYASU		KOBE	
	-NS	-EW	-NS	-EW	-NS	-EW	-NS	-EW
①ダンパー無 1F	83.69	168.43	80.49	93.73	128.88	127.05	142.68	131.18
②ダンパー有 100MN/(m/s)	160.20	154.53	67.70	58.96	104.24	99.47	232.88	207.07
比	1.91	0.92	0.84	0.63	0.81	0.78	1.63	1.58

注) 比=(内付オイルダンパー有の応答)/(オイルダンパー無の応答)

(9) 外付オイルダンパーによる簡易耐震補強法

外付オイルダンパーによる方法は建物を使用しながらの耐震補強を実施出来ることからメリットがある。超高層ビルのファサードにブレースを積極的に表現したデザインも見られるが、最大のポイントは施主がファサードの変化を許容するかである。意匠的配慮をすれば、外付オイルダンパーの設置は既存超高層ビルのファサードを逆に引き立たせる効果も期待出来る。耐震補強として、オイルダンパーを建物の外側に取付ける外付オイルダンパーを検討する。外付オイルダンパーが負担する剪断力はダンパーが取付位置から地盤へと流れ、途中の階には流れないことに長所がある。オイルダンパーの材長は長くなるので座屈に対する対策が必要となるが、この問題は比較的簡単に処理出来るので、座屈に対する検討はここでは考慮しない。

耐震改修方法として、図 33 に示す様に外付のオイルダンパーを検討する。オイルダンパーは 18 階の床面に取付ける。y 方向の地震動に対しては、A 通り及び D 通りのフレームの外側に 2 組ずつ合計 4 本を設置する。オイルダンパーは圧縮及び引張ともに同様に有効とし、減衰係数は一定であると仮定する。

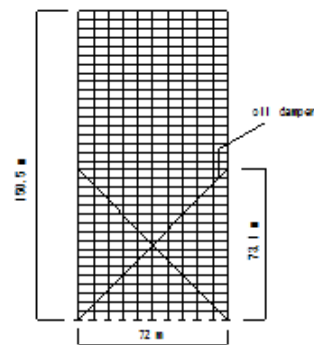


図 33 外付オイルダンパーの設置

① 外付オイルダンパーの適切な減衰係数

外付オイルダンパーの減衰係数の水平成分 C_e が各階当たり合計 $40\text{MN}/(\text{m}/\text{s})$ と $400\text{MN}/(\text{m}/\text{s})$ の 2 種類について、動的最大応答の性状を図 34 に比較する。

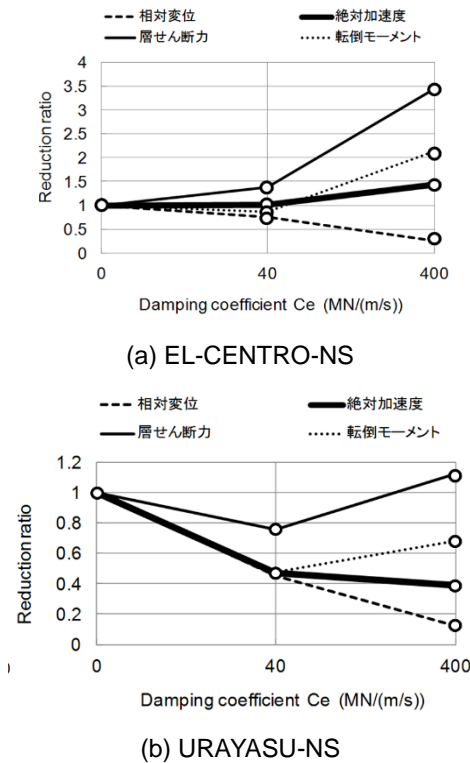


図 34 外付オイルダンパーの減衰係数と応答値

外付オイルダンパーの減衰係数が極めて大きい場合、最大相対変位は常に減少するが、振動しながら減衰して応答値を小さくする超高層ビルの長所を發揮出来ずに、逆に剛性が硬くなり過ぎて、変位以外の応答値が極めて大きくなる。外付オイルダンパーは減衰係数が小さなオイルダンパーを用いる方が効果的である。どの程度が効果的であるかは、予備設計段階で試行錯誤することが必要である。この様な試行錯誤に対して棒材理論は極めて有効である。

② 外付オイルダンパーの有効性

外付オイルダンパーの減衰係数（水平成分） C_e を階当たり $40\text{MN}/(\text{m}/\text{s})$ と仮定する。図 35 は外付オイルダンパーの有無による動的最大応答を比較する。これらの図の細線は外付オイルダンパーを設置した際の応答値を示す。一方、同じ線種の太線は外付オイルダンパーを設置しない場合の最大応答値の分布を示す。外付オイルダンパーによる最大応答値の低減比を表 8 に示す。外付オイルダンパーの設置は、長周期地震動を含めたすべての地震動に対して極めて効果的である。

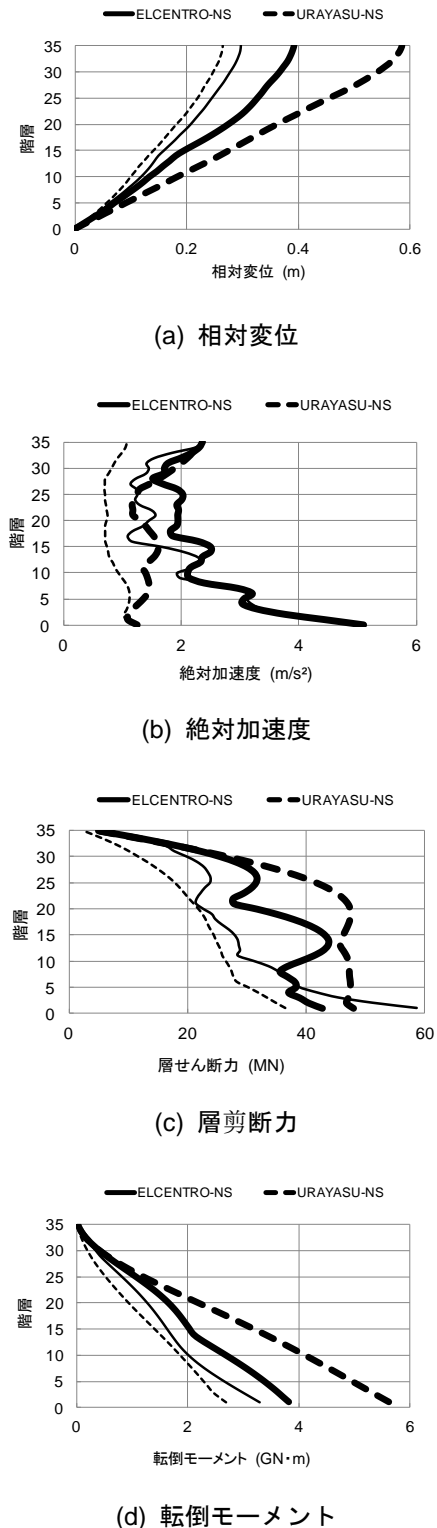


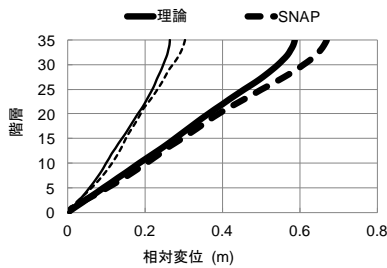
図 35 減衰係数 $40\text{MN}/(\text{m}/\text{s})$ の外付オイルダンパーの効果

外付オイルダンパーを設置した場合についても、棒材理論による簡易耐震補強法の有効性は、図 36 に示す様に、3次元骨組解析による SNAP の結果と良好な一致を示している。

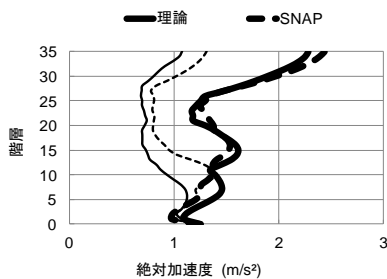
表 8 減衰係数 40MN/(m/s)の外付オイルダンパーによる最大応答の減少

	相対変位	絶対加速度	層せん断力	転倒モーメント
地震動	ELCENTRO-NS			
なし	0.393 m	2.358 m/s ²	42.680 MN	3.819 GN・m
外付オイルダンパー	(0.756)	(1.014)	(1.374)	(0.864)
地震動	ELCENTRO-EW			
なし	0.767 m	2.624 m/s ²	87.500 MN	7.427 GN・m
外付オイルダンパー	(0.819)	(0.651)	(0.857)	(0.860)
地震動	SHINJUKU-NS			
なし	0.413 m	1.027 m/s ²	41.310 MN	4.009 GN・m
外付オイルダンパー	(0.467)	(0.683)	(0.522)	(0.489)
地震動	SHINJUKU-EW			
なし	0.446 m	1.248 m/s ²	43.240 MN	4.307 GN・m
外付オイルダンパー	(0.363)	(0.543)	(0.447)	(0.378)
地震動	URAYASU-NS			
なし	0.586 m	2.282 m/s ²	48.030 MN	5.616 GN・m
外付オイルダンパー	(0.451)	(0.470)	(0.758)	(0.479)
地震動	URAYASU-EW			
なし	0.533 m	2.232 m/s ²	48.640 MN	5.140 GN・m
外付オイルダンパー	(0.552)	(0.583)	(0.683)	(0.564)
地震動	KOBE-NS			
なし	0.610 m	5.375 m/s ²	82.500 MN	5.872 GN・m
外付オイルダンパー	(0.644)	(0.639)	(1.091)	(0.690)
地震動	KOBE-EW			
なし	0.537 m	5.152 m/s ²	69.150 MN	5.476 GN・m
外付オイルダンパー	(0.706)	(0.609)	(1.154)	(0.674)

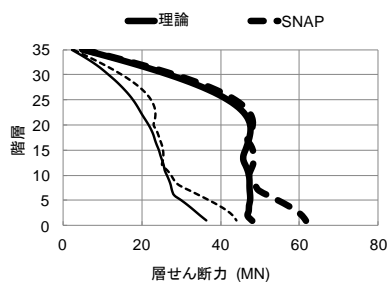
注) 比=(外付オイルダンパー有の応答)/(オイルダンパー無の応答)



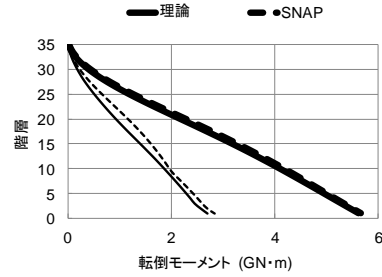
(a) 相対変位



(b) 絶対加速度



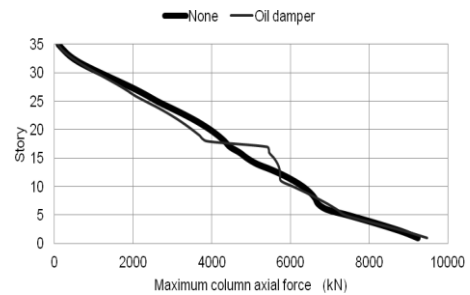
(c) 層剪断力



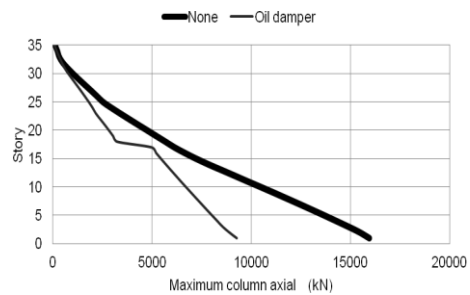
(d) 転倒モーメント

図 36 減衰係数 40MN/(m/s)の外付オイルダンパーによる URAYASU-NS 地震動の応答

上述の様に外付オイルダンパーの設置は耐震性能を高める上で効果的であることが判明した。外付オイルダンパーが負担する層剪断力は、それが取付く周辺の柱や梁に大きな軸力変動をもたらすと考えられる。柱の軸力は、図 37 に示す様に、ダンパーの設置により横揺れが減少するので小さくなる。これに反して、外付オイルダンパーが負担した水平力は梁に大きな軸力変動を発生する。図 38 は SNAP より求めた梁に発生した軸力変動力を外付オイルダンパーの有無について比較する。表 9 はオイルダンパーの有無により梁に発生する軸力変動を示すが、60~70 倍の大きさである。これに対処するには、既存の梁の外側に軸力変動に対処出来る部材を設置すれば対応出来る。

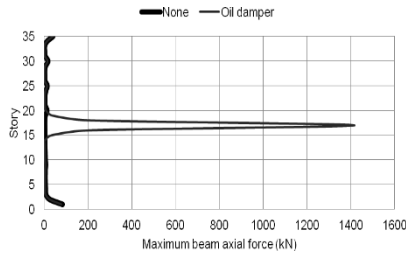


(a) EL-CENTRO-NS

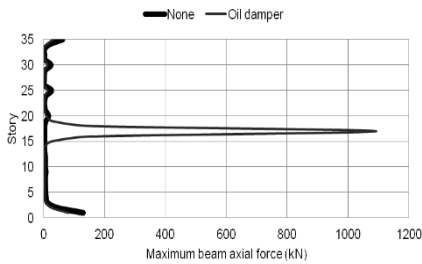


(b) URAYASU-NS

図 37 外付オイルダンパーによる柱の軸力分布



(a) EL-CENTRO-NS



(b) URAYASU-NS

図 38 外付オイルダンパーによる梁の軸力分布

表 9 外付オイルダンパーによる梁の軸力 17 階(単位 kN)

	EL-CENTRO-NS	SHINJUKU-NS	URAYASU-NS	KOBE-NS
①ダンパー無 17F	22.40	8.59	18.01	59.57
②ダンパー有 100MN/(m/s)	1417.20	640.95	1092.83	2976.94
比	63.26	74.63	60.67	49.97

注) 比=(外付オイルダンパー有の応答)/(オイルダンパー無の応答)

梁の軸力について式(14) で与えられる $\kappa=1$ として求めた棒材理論と SNAP との比を比較すると表 10 から、 $\kappa=1.08\sim 1.44$ であることが分る。よって、式(14) で $\kappa=1.5$ として求めれば、梁の軸力変動を簡易に求めることが出来る。

表 10 外付オイルダンパーによる梁の軸力の比較

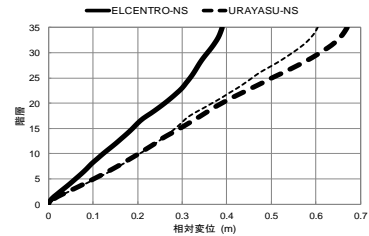
地震動波	17階での最大速度 (m/s)	棒材理論 (KN)	SNAP (KN)	比 ($\kappa=SNAP/理論$)
EL-CENTRO-NS	0.660	1308	1417	1.08
EL-CENTRO-EW	0.651	943	1394	1.48
SHINJUKU-NS	0.380	513	641	1.25
SHINJUKU-EW	0.401	367	468	1.28
URAYASU-NS	0.672	772	1093	1.42
URAYASU-EW	0.723	928	1143	1.23
KOBE-NS	1.239	2068	2977	1.44
KOBE-EW	1.126	1926	2469	1.28

(10) 弾塑性応答に対する検討

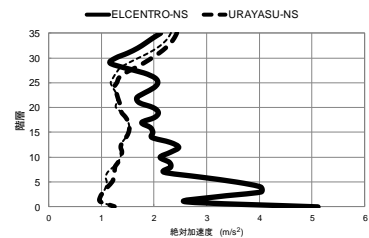
棒材理論による動的解析法では運動方程式をモーダルアナリシスを用いているので、その適用は弾性応答に限定される。モーダルアナリシスに代えて逐次積分法を用いて弾塑性応答問題に解析法を拡張することも可能であるが、弾塑性の復元力特性を予め求めなければならないことから、弾性応答について研究した。

弾性応答と弾塑性応答との相違点を検討する。SNAP を

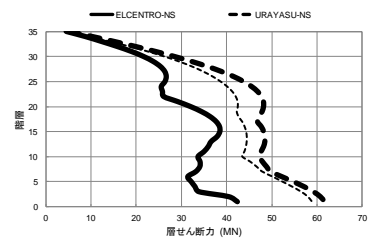
用いた 3 次元骨組解析による弾性応答解析と弾塑性応答解析との両者の違いを、オイルダンパーを付与していない超高層ビルについて比較すると、図 39 となる。同じ種線の太線は弾性応答解析であり、細線は弾塑性応答解析を示す。3 次元骨組解析の結果は、当該建物については差が少ない。



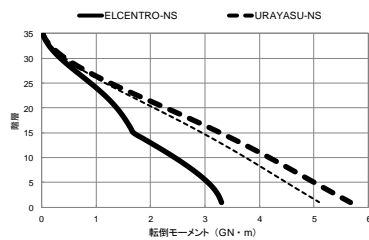
(a) 相対変位



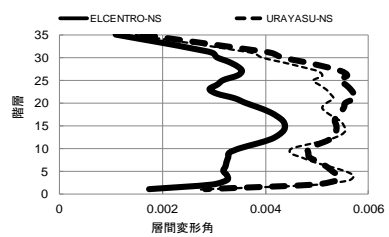
(b) 絶対加速度



(c) 層剪断力



(d) 転倒モーメント



(e) 層間変形角

図 39 弾性及び弾塑性応答の比較

弾塑性応答値を対応する弾性応答値で割った比を R と定義すると、 R の高さ方向の分布は図 40 となる。 R が 1 以下は弾塑性応答値が弾性応答値より小さいことを示す。最大相対変位に関する弾塑性比は EL-CENTRO-EW の地震動に対して中間階で 1 を超えているが、長周期地震動に対しては 1 を超えることはない。このことは既存超高層ビルの長周期地震動に対する耐震補強を弾性応答で検討しても差異がないことを示唆している。

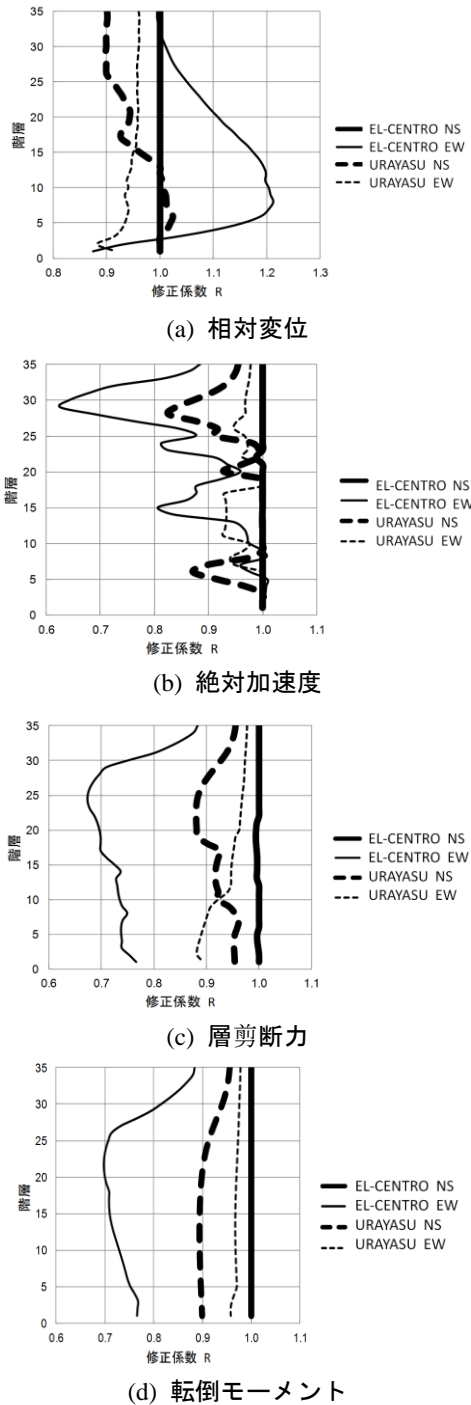
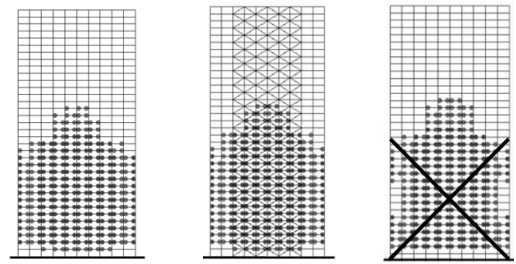


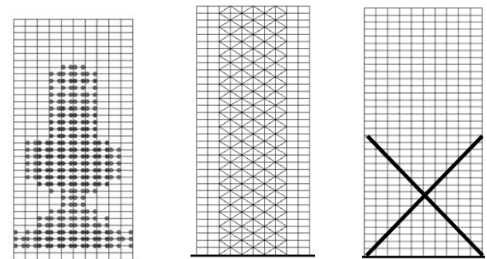
図 40 最大応答の弾塑性比 R の分布

ンパー及び外付オイルダンパー設置有について、地震動による塑性ヒンジの発生状況を示す。これらの図は SNAP による 3 次元骨組解析から得られた。耐震補強を実施していない場合、長周期地震動を含む URAYASU-NS の作用により、梁に塑性ヒンジが発生している。内付オイルダンパーまたは外付オイルダンパーを設置して耐震補強をした場合は、各部材は弾性領域内になり、塑性ヒンジは発生していない。巨大地震は連動して作用し、本震以後の多くの余震が発生することから、超高層ビルに塑性ヒンジを出来るだけ発生させないことが望ましい。



オイルダンパー無 内付オイルダンパー 外付オイルダンパー

図 41 地震動による EL-CENTRO-EW の塑性ヒンジの発生



オイルダンパー無 内付オイルダンパー 外付オイルダンパー

図 42 地震動による URAYASU-NS の塑性ヒンジの発生

4. 実効性のある提言

開発した簡易解析法を既存及び新設の超高層ビルの動的解析に用いることにより、長周期地震動及び短周期地震動に対する耐震診断及び耐震補強が簡易に診断できる。本提案理論を予備設計及び本設計で利用する事により、合理的な構造計画を達成出来る。実務技術者を対象に本理論を著書（ソフト付）に出版したので、このソフトを用いれば超高層ビルの動的応答計算が瞬時に得られる。

また、既存超高層ビルの長周期地震動による大きな横揺れの発生の有無の判定を容易にし、更に、その抑止法を提示した。尚、本理論は超高層ビルのみならず中高層ビルに対しても適用出来るので、今後長周期地震動に対する耐震診断の簡易診断法としても利用出来る事を付記する。

図 41 及び図 42 はオイルダンパー設置無、内付オイルダ

参考文献

- 1) H. Takabatake, H. Mukai, and T. Hirano: “Doubly Symmetric Tube Structures, I : Static Analysis”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119 (7), pp. 1981-2001, 1993.
- 2) H. Takabatake H. Mukai, and T. Hirano: “Doubly Symmetric Tube Structures, II : Dynamic Analysis”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119 (7), pp. 2002-2016, 1993.
- 3) H. Takabatake, R. Takesako, and M. Kobayashi: “A Simplified Analysis of Doubly Symmetric Tube Structures”, The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 4(2), pp. 137-135, 1995.
- 4) H. Takabatake: “A Simplified Analysis of Doubly Symmetric Tube Structures by the Finite Difference Method”, The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 5(2), pp. 111-128, 1996.
- 5) H. Takabatake and T. Nonaka: “Numerical study of Ashiyahama residential building damage in the Kobe Earthquake”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30(6), pp. 879-697, 2001.
- 6) H. Takabatake, T. Nonaka and T. Tanaki: “Numerical study of fracture propagating through column and brace of Ashiyahama residential building in Kobe Earthquake”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14(2), pp. 91-105, 2005.
- 7) H. Takabatake and T. Nonaka: “Earthquake damage identification of steel mega structures”, Tall Buildings: Design Advances for Construction, Saxe-Coburg Publications, Chapter 5, pp. 115-141, 2014.
- 8) H. Takabatake and T. Satoh: “A simplified analysis and vibration control to super-high-rise buildings”, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 15(4), pp. 363-390, 2006.
- 9) 高島秀雄, 北田幸彦, 竹脇 出, “超高層ビルの簡易動的設計法－簡易耐震診断法および簡易耐震補強法への適用－”, 鹿島出版会, 2016.

研究テーマ 1

課題 1-5

巨大地震による市街地の液状化対策

東京工業大学大学院 田村修次 准教授

課題 1-5 巨大地震による市街地の液状化対策

東京工業大学

准教授

田村 修次

液状化 戸建て住宅 液状化対策
柱状地盤改良 傾斜 沈下

1. 研究目的

大地震では、多くの市街地で液状化の発生が予想される。市街地で液状化が発生すると、多くの戸建て住宅が沈下・傾斜するとともに、水道・下水道などのライフラインが長期間にわたり止まるため、市民生活への影響が極めて大きい。本課題では主に戸建て住宅の液状化被害軽減方法について検討する。

2. 解決法

液状化の対策は以下の3タイプに分類できる。

- (a)液状化を発生させない。
- (b)液状化の発生を許容しても建物被害(沈下・傾斜)を軽減する。
- (c)液状化で建物が沈下・傾斜しても復旧を可能とする。

ここでは、(a)液状化を発生させないタイプとして地盤改良、(b)液状化の発生を許容しても建物被害(沈下・傾斜)を防ぐタイプとして、基礎の根入れ効果を考慮した杭基礎の応力評価モデル、杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の沈下・傾斜の軽減工法の提案を行う。なお、(c)液状化で建物が沈下・傾斜しても復旧を可能とするタイプは、高剛性基礎であり、近年の戸建て住宅では一般的に用いられている。東日本大震災で大規模な液状化が発生した浦安市等では、沈下・傾斜した多くの戸建て住宅が、ジャッキアップ等で復旧されている。ただし、復旧工事のコストが数百万円以上と高額であること、また、復旧までに要する期間も長く、今後、対策の(a), (b)が望まれている。

(1) 柱状地盤改良による液状化発生の防止および被害軽減の評価

固化式は、土とセメントミルクを攪拌することで、地盤改良する技術であり、図1のように分類できる。柱状地盤改良は、地盤に柱状の地盤改良体を造る工法であり、戸建て住宅で一般的に用いられている。柱状地盤改良による液状化の抑止効果および被害軽減効果について、東日本大震災における被害事例の分析および遠心載荷実験で検討する。

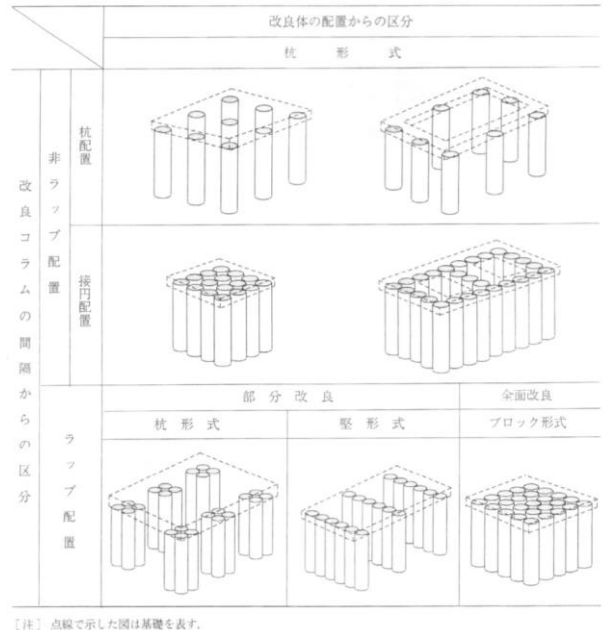


図1. 固化式改良の形式 (日本建築センター, 2002)

(2) 杭基礎による建物の沈下・傾斜の防止 —基礎根入れ効果の評価—

超軟弱地盤や液状化地盤では地盤変位が大きい。そのため、一般的に反力として杭に作用する地盤が、外力として杭に作用するケースがある(図2)。地盤変位が杭に作用する水平地盤反力については多くの研究が行われており、既往の応答変位法でその効果を評価することができる。しかし、基礎根入れ部(地下室やパイルキャップ)に作用する地震時土圧や側面摩擦力に関する研究例は少ない。本研究では、地震時土圧・側面摩擦力の評価法を応答変位法に組み込み、上部構造物と基礎部の慣性力、地盤変位の深度分布、杭条件等から、基礎部変位、土圧合力・側面摩擦力の大きさ、構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力の位相差を推定する手法を示すとともに、それらを考慮した杭応力評価法を提案する。さらに、地盤条件、杭剛性、上部構造物固有周期をパラメーターにした遠心載荷実験を行い、提案手法の妥当性を検討する。

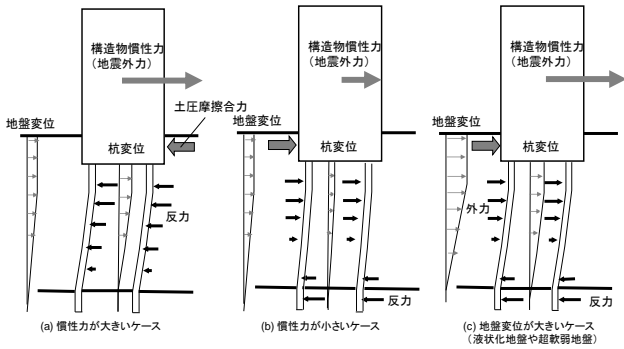


図 2. 短周期建物における杭の水平抵抗の概念図

(3) 杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の沈下・傾斜の防止

液状化層が厚い場合、従来の地盤改良や杭基礎で戸建て住宅の液状化対策をすることは難しい。浮き基礎と杭基礎を併用した提案手法の概念を図 3 に示す。戸建て住宅の重量は軽く、層厚 0.5m~1m 程度の地盤に相当する。そこで、建物の沈下の軽減を目的として、基礎直下の地盤を軽量土に置換し、浮き基礎とした。ただし、浮き基礎のみでは建物が傾斜する可能性もある。そこで、建物の傾斜軽減を目的として杭基礎を併用する。さらに、遠心載荷実験で、その有効性を検討する。

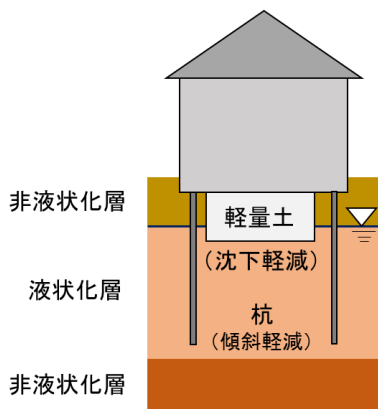


図 3. 杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の液状化対策工法の概念図

(4) 連結基礎による既存戸建て住宅の沈下・傾斜の防止

市街地における戸建て住宅の液状化被害（傾斜）の概念を図 4 (a)-(c) に示す。最も一般的な事例は Type A で「お辞儀モード」と呼ばれている。これは、地中応力が基礎間で重なるためである。それ以外の傾斜事例として、Type B や Type C がある。この要因として偏心、地盤の不均一性および噴砂による地盤の流失などが考えられる。いずれのケースにおいても隣合う建物の平均沈下が同程度の場合、2つの建物基礎は直線状にない。このことは、図 4 (d) に示すように基礎を連結することで、傾斜を軽減

できる可能性を示唆している。本研究では、戸建て住宅の基礎を連結することで不同沈下を軽減する工法を提案し、その妥当性を遠心載荷実験で検証した。

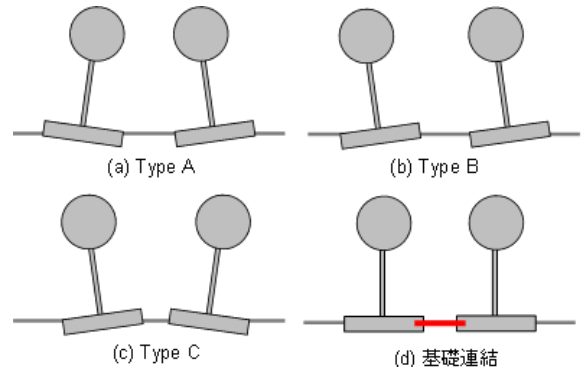


図 4. 基礎連結による戸建て住宅の液状化対策工法の概念図

3. 方法の検証

(1) 遠心載荷実験

遠心載荷装置とは、小型模型に遠心加速度をかけることで（図 5）、実地盤の応力状態を再現する装置である。遠心加速度をかけた状態で、振動台実験を行うことができる。地盤の剛性、強度は拘束圧に依存する。遠心載荷実験は、小型模型で実地盤の拘束圧を再現するものである。例えば、図 6 に示すように 1g 場での深度 10cm の乾燥砂の鉛直有効応力は 1.5~1.6kPa 程度であるが、50g 場では 75~80kPa 程度である。これは、1g 場における深さ 5m に相当する。すなわち、50g 場での深度 10cm は、1g 場における深さ 5m の地盤の挙動を再現できる。このように、遠心載荷実験は、小型模型で実地盤の挙動を模擬できる。

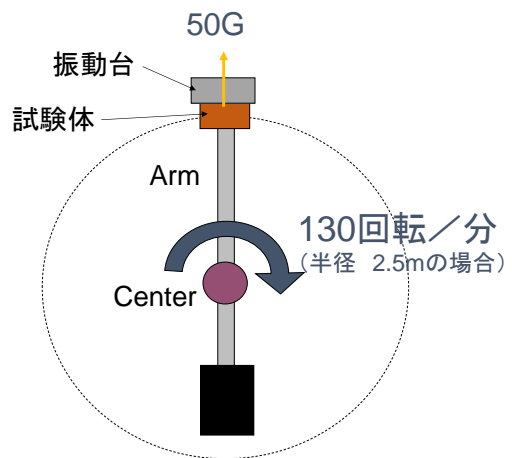


図 5. 遠心載荷実験の概念図

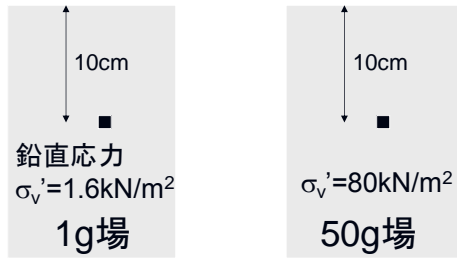


図 6. 1g 場および遠心場における地盤の鉛直有効応力

写真 1 は本研究で用いた京都大学防災研究所（半径 2.5m）の遠心載荷装置、写真 2 は UC Davis の小型遠心載荷実験装置（半径 1m）である。

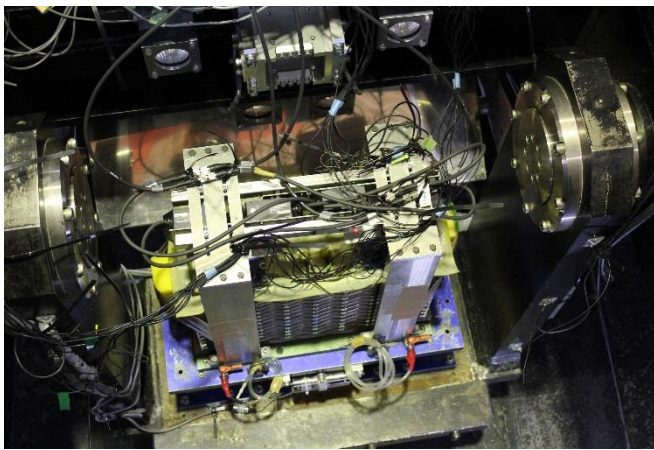


写真 1 京都大学防災研究所の遠心載荷実験装置



写真 2 UC Davis の小型遠心載荷実験装置

(2) 柱状地盤改良による液状化発生の防止および被害軽減の評価^{3),6),7)}

図 7 に東日本大震災における浦安市の戸建て住宅の液

状化による被害事例である。柱状地盤改良、杭基礎、無対策と被害の関係を示している。柱状地盤改良における傾斜大の割合は、無対策よりも大きい。一方、無被害の割合も無対策よりも大きい。すなわち、柱状地盤改良は、効果が無い（悪くなる）ケースと、効果があったケースに大別される。これは、この地域の埋め立て層厚が 8m 程度で、改良深さが 3m から 8m 程度であることから、地盤改良体が非液状化層に支持されていたか否が明暗を分けたと思われる。

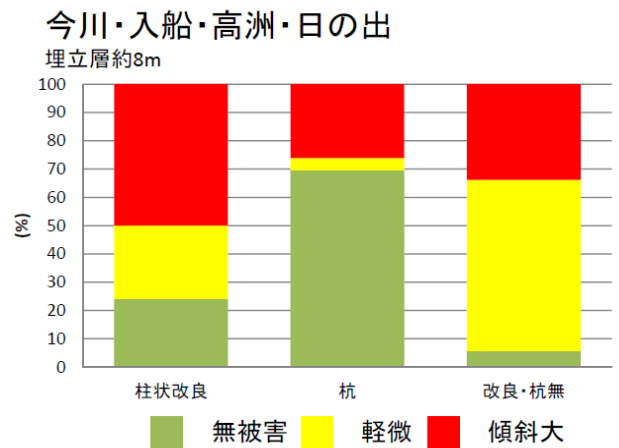


図 7. 浦安市における戸建て住宅の液状化による被害（改良深度と埋立層の関係）²⁾

UC Davis の小型遠心載荷装置で、柱状地盤改良が液状化に及ぼす影響を検討した。図 8 に実験ケースを示す。モデル 1 は緩い砂層と密な砂層からなる未改良地盤、モデル 2 はモデル 1 の地盤に柱状地盤改良（改良率 30%程度）したケースである。モデル 3 は基盤（モルタル地盤）と緩い砂層からなる地盤、モデル 4 はモデル 3 の地盤に柱状地盤改良したケースである。モデル 3 の柱状地盤改良体は、密な砂層上に設置してあるのに対し、モデル 4 の柱状地盤改良体は、基盤に埋め込まれている。

振動台加速度 1.3 m/s^2 程度における地盤加速度、地盤および改良体の沈下、過剰間隙水圧の時刻歴を、モデル 1, 2 について図 9, 10 に示す。柱状地盤改良によって過剰間隙水圧の上昇は軽減される。

振動台加速度 5 m/s^2 程度の大加振の時刻歴を、全てのモデルについて図 11~14 に示す。振動台加速度 5 m/s^2 程度の大加振では、柱状地盤改良の有無によらず液状化した。地盤改良体が密な砂層上にあるモデル 2 では、地盤改良体が 3cm 程度沈下した。一方、地盤改良体は基盤に埋め込まれたケースでは、地盤改良体の損傷は軽微であり、沈下しなかった。なお、地盤改良体があるケースでは、過剰間隙水圧の消散が早い。これは、地盤改良体と地盤の境界で透水係数が高くなるためと思われる。

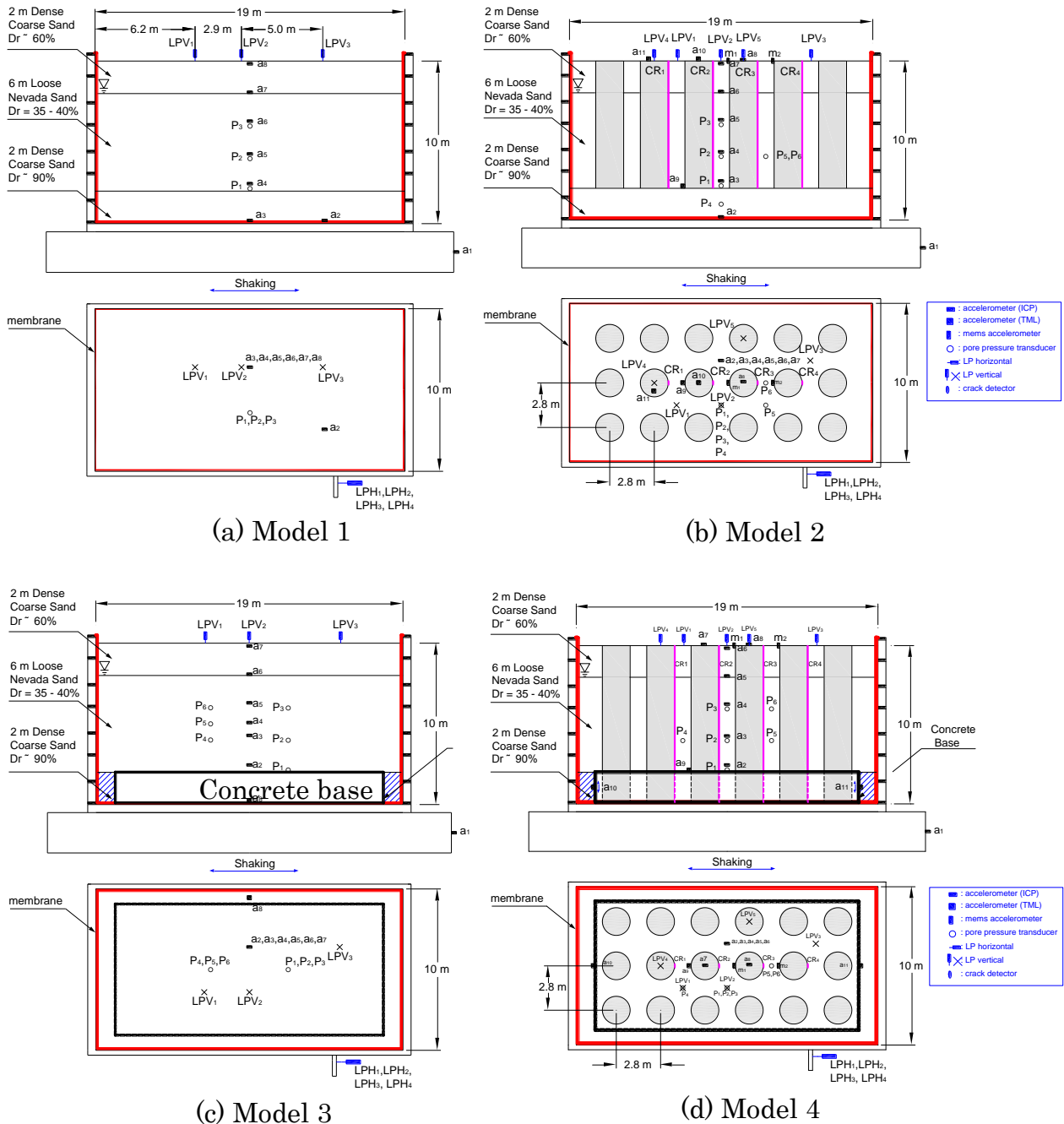


図 8. 実験モデル

地盤改良体の境界条件の影響を検討するため、振動台加速度 1.3m/s^2 程度における地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係を図 15, 16 に示す。地盤のせん断力、せん断ひずみは加速度データから算定した。モデル 1 とモデル 2 の地盤のせん断応力-ひずみ関係は、ほぼ同じである。一方、モデル 4 の地盤のせん断ひずみは、モデル 3 のそれよりも明らかに小さい。すなわち、モデル 4 では、柱状地盤改良体によって杭のせん断ひずみは小さくなるものの、モデル 3 では、その効果が小さい。モデル 3 では、柱状地盤改良体がロッキングをするためと考えられる。

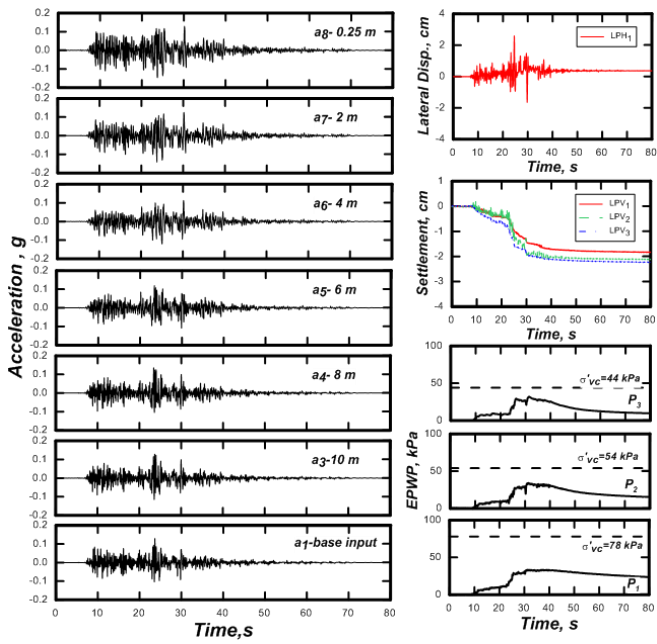


図 9. 1.3m/s^2 加振における地盤加速度、地盤の沈下、過剰間隙水圧 (Model 1)

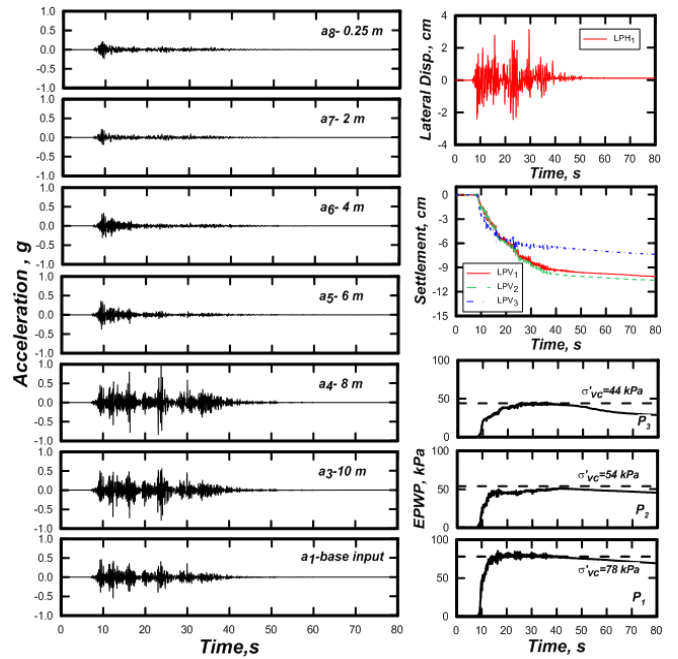


図 11. 5m/s^2 加振における地盤加速度、地盤の沈下、過剰間隙水圧 (Model 1)

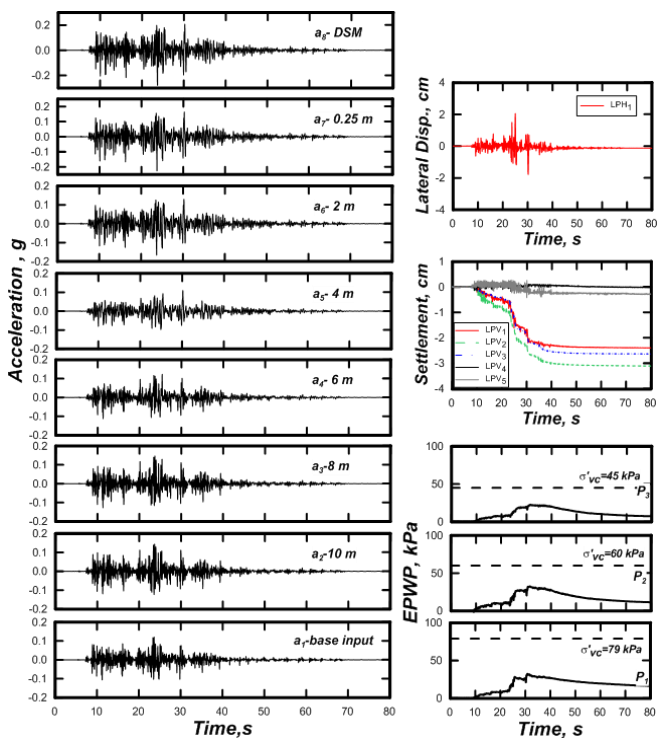


図 10. 1.3m/s^2 加振における地盤加速度、地盤および改良体の沈下、過剰間隙水圧 (Model 2)

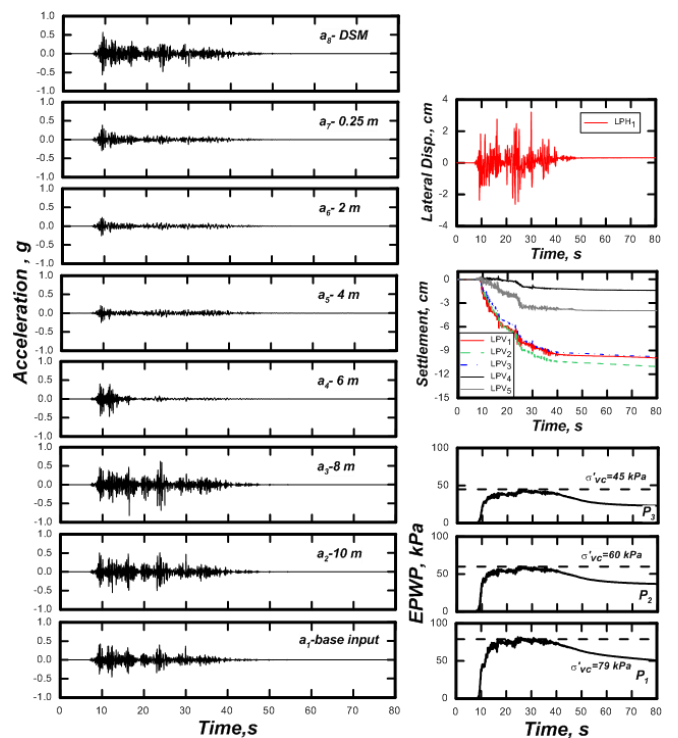


図 12. 5m/s^2 加振における地盤加速度、地盤および改良体の沈下、過剰間隙水圧 (Model 2)

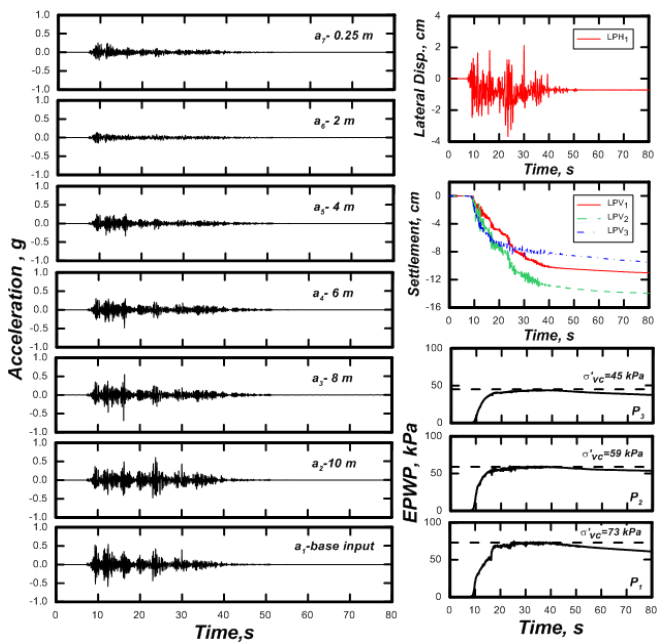


図 13. 5m/s^2 加振における地盤加速度、地盤の沈下、過剰間隙水圧 (Model 3)

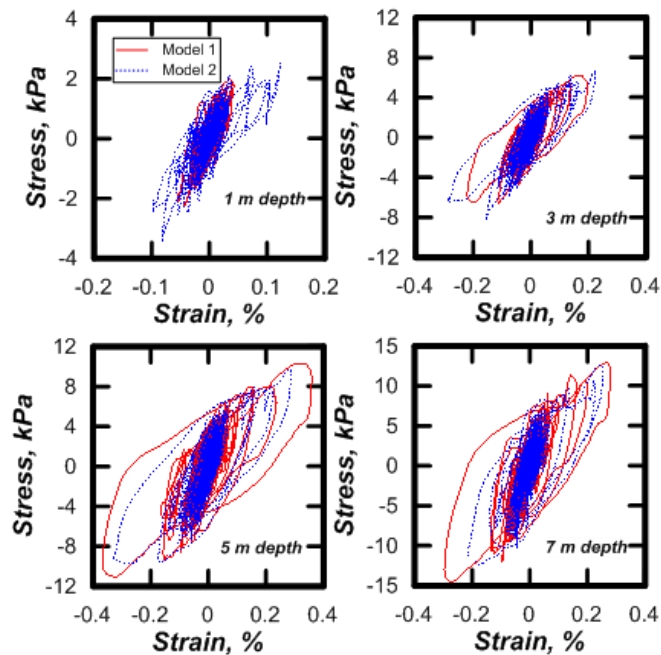


図 15. 1.3m/s^2 加振における地盤のせん断応力-せん断歪関係 (Model 1, 2)

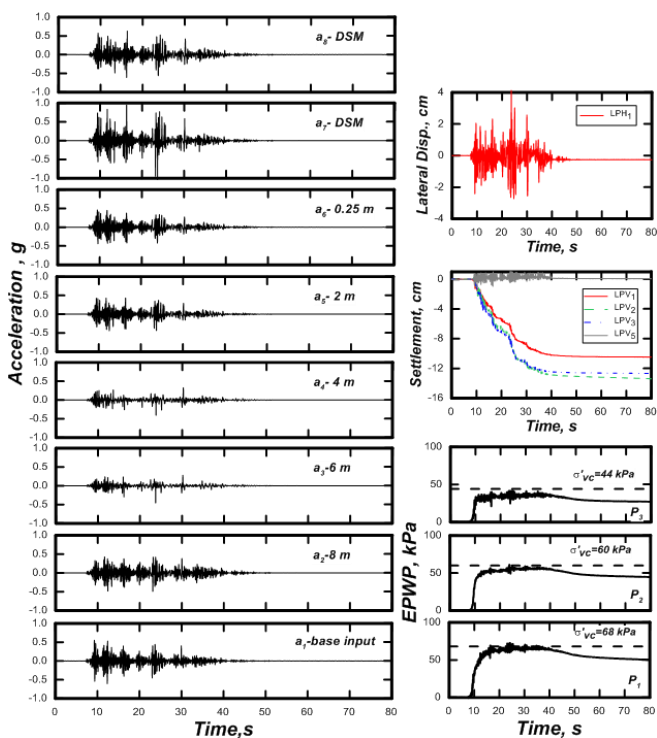


図 14. 5m/s^2 加振における地盤加速度、地盤および改良体の沈下、過剰間隙水圧 (Model 4)

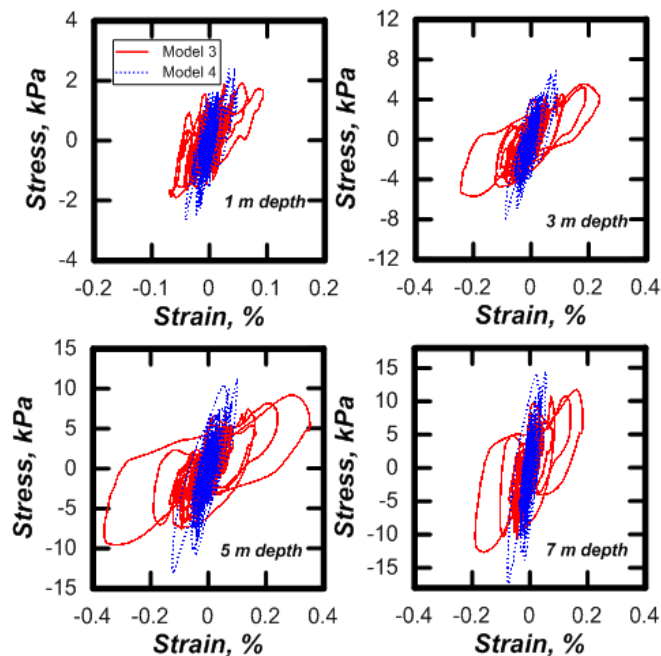


図 16. 1.3m/s^2 加振における地盤のせん断応力-せん断歪関係 (Model 3, 4)

(2) 杭基礎による建物の沈下・傾斜の防止 – 基礎根入れ効果の評価⁴⁾

実験は、京都大学防災研究所の遠心載荷装置を用いて 40g 場で行った。実験ケースを表 1 に、地盤-杭基礎模型および基礎部断面図を図 17 に示す。実験は、地盤の相対密度、杭の曲げ剛性および上部構造物の固有周期をパラメーターにした。地盤は豊浦砂を用い、Case 1~4 の相対密度は 30%、Case 5, 6 の相対密度は 80%である。豊浦乾燥砂を空中落下させた後、土槽を脱気槽に入れて脱気し、土槽下部から水の 40 倍の粘度を持つメトロース溶液を注入して飽和させることで、地盤モデルを作製した。水位は基礎部の直下 (GL.-54mm) である。

杭は全て直径 8mm、長さ 176mm である。杭モデルの諸元を表 2 に示す。2×2 の 4 本杭とし、杭頭および杭先端は剛接合とした。Case 1, 3, 5 は高剛性の杭 (ステンレス棒) で、曲げ剛性は $3.85 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ である。Case 2, 4, 6 は低剛性の杭 (アルミニウムパイプ) で、曲げ剛性は $0.841 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ である。基礎部の大きさは、長さ 90mm、幅 68mm、高さ 55mm で、基礎部の主働・受働面 (加振方向と直角な面) および側面 (加振方向と平行な面) に 2 軸ロードセルを設置し (図 17c,d)、受圧板を介して土圧と壁面摩擦力および側面摩擦力と側圧の計測を行った。基礎部の根入れ深さは 48mm である。なお、基礎部の各面には豊浦砂を塗布し、粗い表面とした。

Case 1, 2, 5, 6 は短周期の上部構造物モデルで、上部構造物を板パネで支持した。基礎固定時の固有周期は

0.0075s(実大スケールで 0.3s)である。Case 3, 4 は長周期の上部構造物モデルで、上部構造物の底面をローラーで支持し、基礎部に固定したパネルと上部構造物の間にゴム板を設置し反力とした。基礎固定時の固有周期は 0.125s(5.0s)である。基礎部の質量は 0.99kg、上部構造物の質量は 2.0kg である。計測は前述の基礎部に作用する土圧や側面摩擦力とともに、基礎部、上部構造物および地盤の加速度、地盤の過剰間隙水圧、杭のひずみについて行った。入力波は長周期成分を多く含む Hachinohe 1968 NS を用い、最大加速度を実大スケールで 300 cm/s^2 程度にした。以下、実験結果は全て実大スケールに換算して示す。

Case 1 (短周期モデル・高剛性杭) および Case 3 (長周期モデル・高剛性杭) における過剰間隙水圧比、上部構造物加速度、基礎部加速度、地表面加速度、入力加速度および地表面と基礎部の変位の時刻歴を図 18, 19 に示す。地表面と基礎部の変位は、加速度波形の 2 階積分で算定した。Case 1 と Case 3 の地表面加速度の波形は良く一致しており、地盤応答の再現性は高いことが分かる。両ケースともに、加振開始後 16 秒付近から過剰間隙水圧が上昇し、20 秒付近で液状化した。液状化とともに、地表面加速度は長周期化する。その卓越周期は 3 秒程度であり、Case 3 の上部構造物固有周期(5 秒)よりも短い。上部構造物の加速度は Case 1 と Case 3 で大きく異なる。Case 3 の上部構造物加速度は、Case 1 に比べて長周期成分が卓越し、かつ最大加速度も 95 cm/s^2 と小さい。両ケースともに地表面と基礎部の変位は、液状化の進行とともに急増する。地表面変位は基礎部変位よりも大きい。

表 1 実験ケース

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
杭タイプ	高剛性杭	低剛性杭	高剛性杭	低剛性杭	高剛性杭	低剛性杭
上部構造物固有周期	0.0075 s (実大スケール: 0.3s)		0.125 s (5.0 s)		0.0075 s (0.3s)	
地盤の相対密度	30%			80%		

表 2 杭の諸元

	高剛性杭	低剛性杭
材質	ステンレス棒	アルミ管
断面寸法 (実大スケール)	$\phi=8\text{mm}$ ($\phi=32\text{cm}$)	$\phi=8\text{mm}, t=0.8\text{mm}$ ($\phi=32\text{cm}, t=3.2\text{cm}$)
曲げ剛性 (実大スケール)	$3.85 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ ($9.86 \times 10^4 \text{ kNm}^2$)	$0.84 \times 10^5 \text{ Ncm}^2$ ($2.14 \times 10^4 \text{ kNm}^2$)

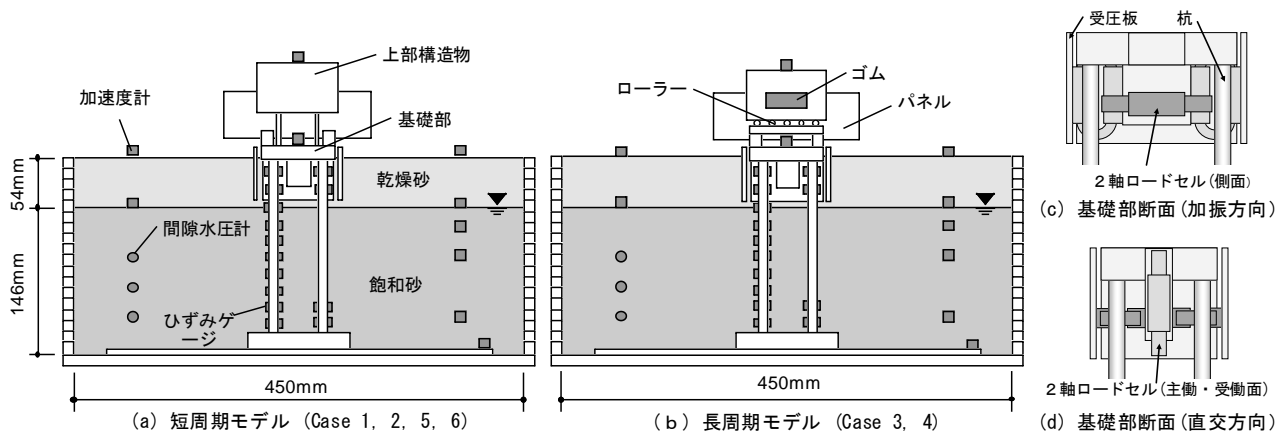


図17. 実験模型およびセンサー配置

Case 1 および Case 3 における構造物慣性力(上部構造物慣性力と基礎部慣性力の和), 土圧摩擦合力(基礎根入れ部に作用する土圧と側面摩擦力の和), 杭頭せん断力(各杭の和) および杭頭曲げモーメント(各杭の平均値)の時刻歴を図 20, 21 に示す。土圧および側面摩擦力は基礎部に設置したロードセルで直接計測した。Case 3 の構造物慣性力は極めて小さい。長周期モデルでは, 上部構造物慣性力と基礎部慣性力が逆位相になったためである。両ケースともに, 過剰間隙水圧の上昇に伴って, 土圧摩擦合力, 杭頭せん断力, 杭頭曲げモーメントの振幅が急激に大きくなる。Case 1 の杭頭せん断力は土圧摩擦合力よりも大きい。一方, Case 3 の杭頭せん断力は土圧摩擦合力とほぼ一

致する。これは, 構造物慣性力が極めて小さいためである。両ケースの杭頭せん断力および杭頭曲げモーメントの波形は, 構造物慣性力の波形と異なり, 土圧摩擦合力の波形と類似している。土圧摩擦合力が杭頭せん断力, 杭頭曲げモーメントに大きな影響を与えていることが分かる。

各ケースの杭頭曲げモーメント最大時における構造物慣性力と土圧摩擦合力の関係を図 22 に示す。第 1, 3 象限は構造物慣性力と土圧摩擦合力が同位相, 第 2, 4 象限はそれらが逆位相であることを示す。Case 1, 2 では構造物慣性力と土圧摩擦合力が同位相である。Case 3, 4 も構造物慣性力と土圧摩擦合力が同位相であるが, 構造物慣性力は

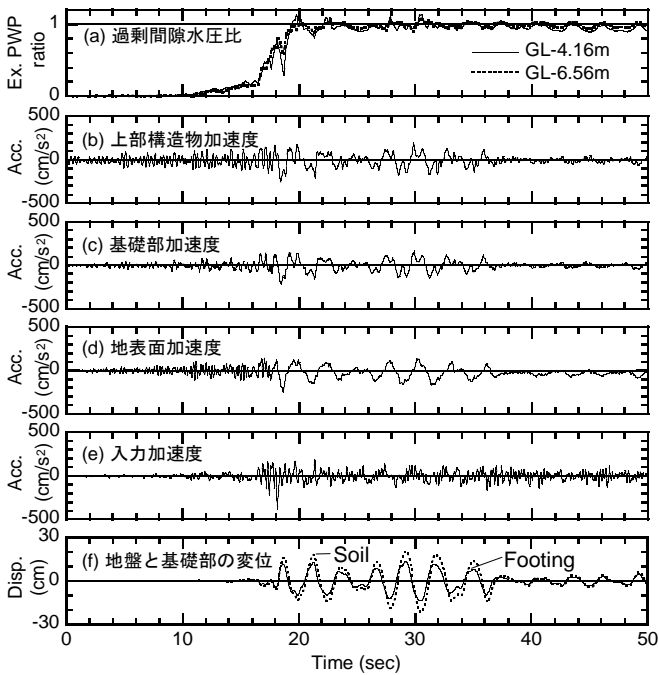


図18. 上部構造物, 基礎部および地盤の応答 (Case 1, 短周期モデル, 高剛性杭, $\Delta t=30\%$)

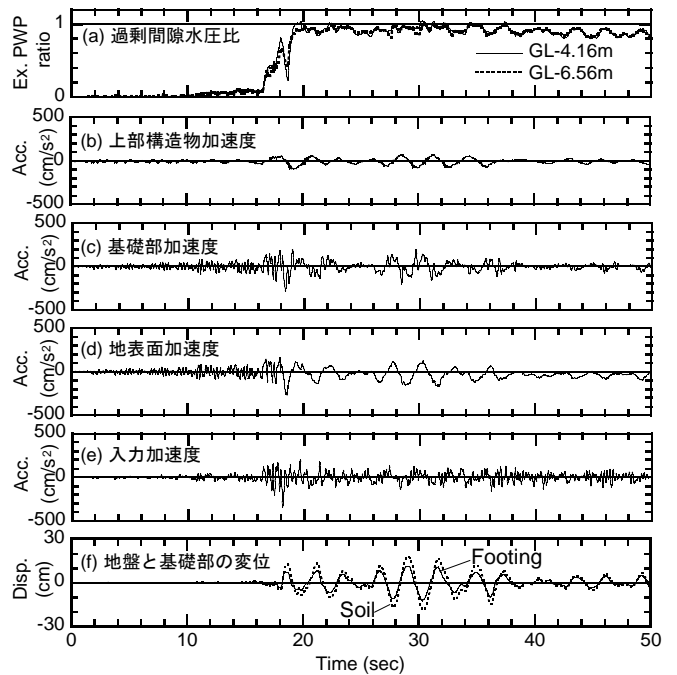


図19. 上部構造物, 基礎部および地盤の応答 (Case 3, 長周期モデル, 高剛性杭, $\Delta t=30\%$)

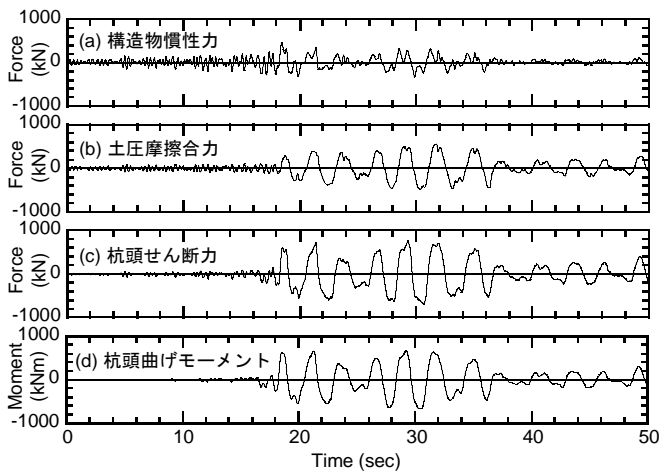


図20. 構造物慣性力, 土圧摩擦合力および杭の曲げモーメント (Case 1, 短周期モデル, 高剛性杭, $\Delta t=30\%$)

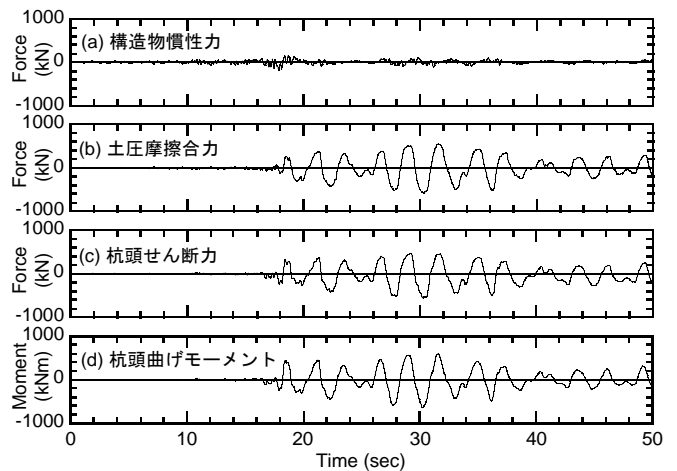


図21. 構造物慣性力, 土圧摩擦合力および杭の曲げモーメント (Case 3, 長周期モデル, 高剛性杭, $\Delta t=30\%$)

極めて小さい。Case 5, 6 では構造物慣性力と土圧摩擦合力が逆位相である。これは、上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも短く、地盤の相対密度が高く、地盤変位が基礎部変位よりも小さいためと考えられる。

基礎根入れ部に作用する土圧・側面摩擦力を考慮した応答変位法を模式図で図 23 に示す。杭頭固定度を考慮するため、基礎部と杭頭の間に回転バネを設置した。杭に作用する水平地盤反力は、杭と地盤の相対変位から基礎構造設計指針に基づいて非線形性を考慮して算定した。基礎根入れ部の主働・受働面に作用する土圧合力 P_E は、次式から算定する。

$$P_E = P_{Ep} - P_{Ea} = \frac{1}{2} \gamma H^2 B (K_{Ep} - K_{Ea}) \quad (1)$$

ここに、 P_{Ep} , P_{Ea} は受働側、主働側の土圧、 γ は地盤の単位体積重量、 H は基礎の根入れ深さ、 B は主働・受働面の基礎幅である。 K_{Ep} および K_{Ea} は受働側および主働側の土圧係数であり、Zhang et al.の地震時土圧理論⁵⁾で算定した。基礎根入れ部の側面（加振方向）に作用する側面摩擦力 P_F は、バイリニアモデルとし、次式から算定した。

$$P_F = \mu P_0 D_{re} / D_{max} \quad (D_{re} \leq D_{max}) \quad (2)$$

$$P_F = \mu P_0 \quad (D_{re} > D_{max}) \quad (3)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \gamma H^2 L K_0 \quad (4)$$

ここに、 μ は地盤と基礎の摩擦係数、 P_0 は静止土圧、 D_{re} は地盤と基礎部の相対変位、 D_{max} は側面摩擦力が最大になる相対変位、 L は加振方向の基礎幅、 K_0 は静止土圧係数で Jaky の式で算定した。摩擦係数は基礎部表面の粗いことから、砂のせん断強度を考慮し $\mu = \tan \phi$ とした。なお、土圧合力と側面摩擦力は同位相とした。

提案手法の妥当性を検討するため、(1)~(4)式で算定された相対変位と土圧摩擦合力、相対変位と土圧合力の関係を図 24 に示す。主働土圧および受働土圧に達する地盤と基礎部の相対変位は、砂の相対密度によって異なる。そこで、相対密度 30% および 80% における主働土圧に達する地盤と基礎部の相対変位は基礎根入れ高さの 0.5%、0.1% とし、受働土圧に達する相対変位を基礎根入れ高さの 4%、1% とした。地盤の水平震度は 0.2、砂の内部摩擦角 ϕ を相対密度 30% で 34° 、相対密度 80% で 42° 、壁面摩擦角を 0.5ϕ と仮定した。側面摩擦力が極限值に達する相対変位 D_{max} は、遠心載荷実験で得られた相対変位と側面摩擦力の関係から 0.3cm とした。地盤の相対密度によらず、土圧合力の理論値は実測値より小さい。一方、土圧摩擦合力の理論値は実測値と概ね対応する。以上から、土圧のみならず、側面摩擦力を考慮することで基礎の根入れ効果を説明できることが分かる。

図 25 は、土圧摩擦合力をゼロとしたときの最大曲げモーメントの実測値と理論値である。理論値は実測値と大きく異なることが分かる。一方、図 26 に示すように根入

れ効果を考慮した理論値は実測値と良く対応する。なお、図中の α 、 β は水平地盤反力係数の低減係数である。低減係数によって、土圧摩擦合力や杭頭曲げモーメントの大きさは変化するものの、低減係数 0.2 程度が実験値と対応している。以上のように、基礎の根入れ効果は、地盤条件、杭剛性、構造物慣性力の大きさによって異なるが、基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法で概ね評価可能である。

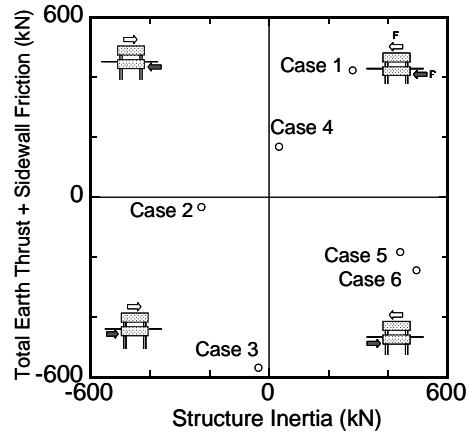


図22. 構造物慣性力と土圧摩擦合力の関係

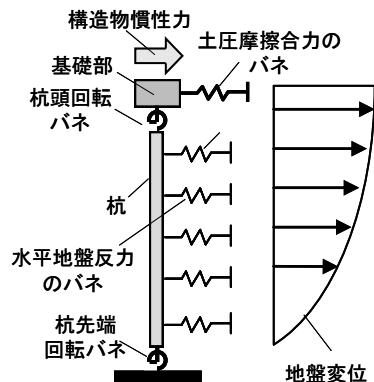


図23. 基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法（模式図）

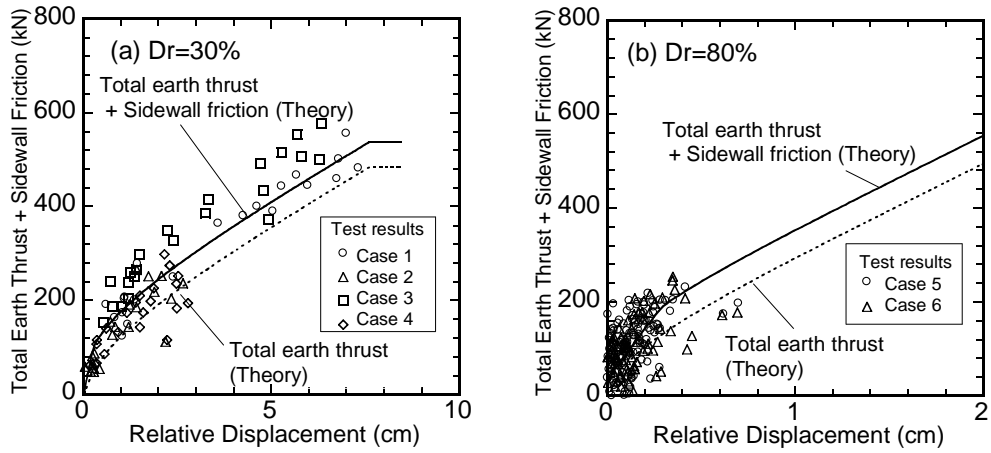


図24. 地盤と基礎部の相対変位と土圧摩擦合力

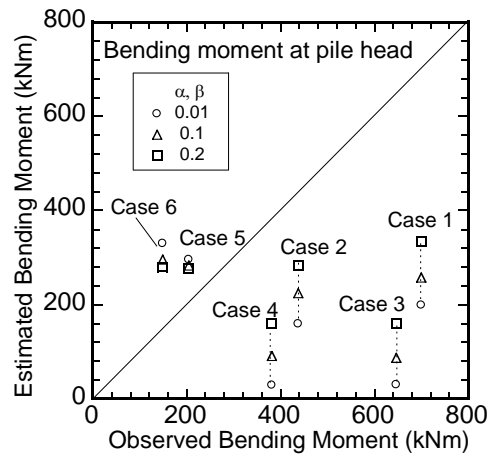


図25. 杭頭曲げモーメントの実測値と理論値 (土圧摩擦合力を無視)

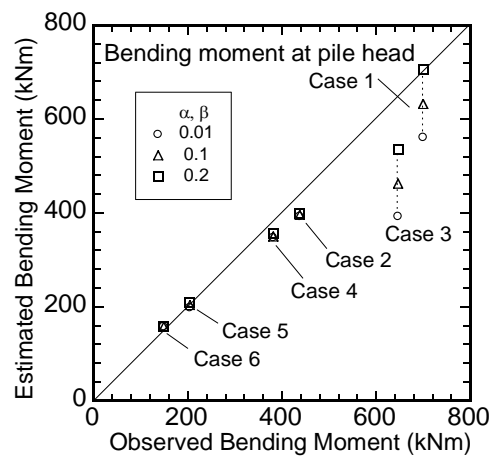


図26. 杭頭曲げモーメントの実測値と理論値 (土圧摩擦合力を考慮)

(3) 杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の沈下・傾斜の防止⁷⁾

実験は京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて 50g 場で行った。実験モデルを図 27 に示す。飽和砂層は $Dr=40\%$ の豊浦砂で層厚が 150~160mm、表層の乾燥層は $Dr=20\%$ 程度のケイ砂 8 号で層厚は 20mm である。地下水位は GL-20mm とした。戸建て住宅モデルは、対策有り・無しの 2 体である。基礎の幅が 9cm×9cm、基礎の片側には、傾斜しやすくするための偏心マス(質量 28g)を設置した。建物模型の総質量(偏心マス、レーザー変位計のターゲット含む。杭は含まず。)は 298g で、偏心マスを含めた平均接地圧は 18kPa(実大スケール)である。基礎固定時の上部構造物の固有周波数は 117Hz(実大スケールで 2.3Hz)である。対策有りの住宅モデルでは、基礎の下部の地盤を発泡スチロール(55mm×55mm×20mm)で置換した。排土重量は 88g 程度である。基礎は 5mm 程度根入れした。また、直径 4mm のアルミパイプ($t=1\text{mm}$)を基礎の左右に 5 本ずつ設置した。杭の長さは 100mm である。各上部構造物の左右の沈下量をレーザー変位計で計測した。以下、明記しない限り実大スケールである。

GL-5m 程度に設置した土被り圧は、対策有りの建物下で 110kPa、自由地盤で 100kPa、対策無しの場合建物下で 126kPa であった。浮き基礎によって建物から地盤に伝わる鉛直応力は軽減した。本震として、臨海波の最大加速度 4.1m/s^2 で加振を行った。主な加速度と間隙水圧(GL.5-m)の時刻歴を図 28、建物の平均沈下(左右の沈下量の平均)と傾斜の時刻歴を図 29 に示す。加振開始後 18 秒で液状化し、地表面と上部構造物の加速度が減少している。液状化とともに、建物は沈下し、偏心マスのある側に傾斜した。建物の平均沈下量(地盤沈下量含む)は、対策有りで 225mm、対策無しで 325mm であった。傾斜角は対策有りが 0.018rad、対策無しが 0.036rad であり、浮き基礎と杭基礎を併用することで、傾斜は 1/2 に軽減した。

本震から約 2 分後(模型スケール)に、本震の 1/2 の加速度振幅($a_{\text{max}}=1.86\text{m/s}^2$)の臨海波で加振した。加振直前の初期過剰間隙水圧は 7.3kPa であったが、加振前に時間的な変動は無く、地盤沈下に伴う地下水位の上昇または間隙水圧計の沈下によるものと考えられる。加速度と過剰間隙水圧の時刻歴を図 30、建物の平均沈下と傾斜を図 31 に示す。加振開始後 18 秒で液状化した。建物の平均沈下量(累積値)は、対策有りで 334mm、対策無しで 543mm であった。傾斜角は対策有りが 0.026rad、対策無しが 0.089rad であった。このように、提案手法によって、沈下・傾斜ともに大きく軽減した。特に余震による傾斜の増加分は、対策有りが 0.008rad、対策無しが 0.053rad であり、1/7 程度に軽減することができた。なお、この後、さらに同じ加振(余震)を行ったところ、対策無しの建

物は転倒した。

余震の加速度振幅は、本震の 1/2 程度であるにもかかわらず、対策無しの場合建物は、本震よりも大きく傾斜した。このような余震による液状化被害の拡大は、東日本大震災において浦安市等で発生している。前述のように本実験では、余震発生時には過剰間隙水圧は消散していたと考えられ、残留した過剰間隙水圧が余震による被害拡大の主要因とは考えにくい。実験後、模型を観察したところ、転倒した対策無しの模型では、基礎端部が表層乾燥砂を踏み抜いていた。一方、対策有りの模型は地表面から若干沈下しているものの、基礎は表層乾燥砂層にとどまっていた。これから、基礎底面から液状化層までの距離が、建物の沈下・傾斜に大きく影響したと考えられる。

本実験における余震による液状化被害拡大のメカニズムを図 32 に示す。まず、本震時の液状化における地盤沈下(地下水位の上昇)と建物の沈下で基礎直下における非液状化層の層厚が減少した。さらに余震では、建物の転倒モーメントによる基礎端部の接地圧の増加で基礎が表層乾燥砂層を踏み抜き、大きな沈下・傾斜が生じたと考えられる。

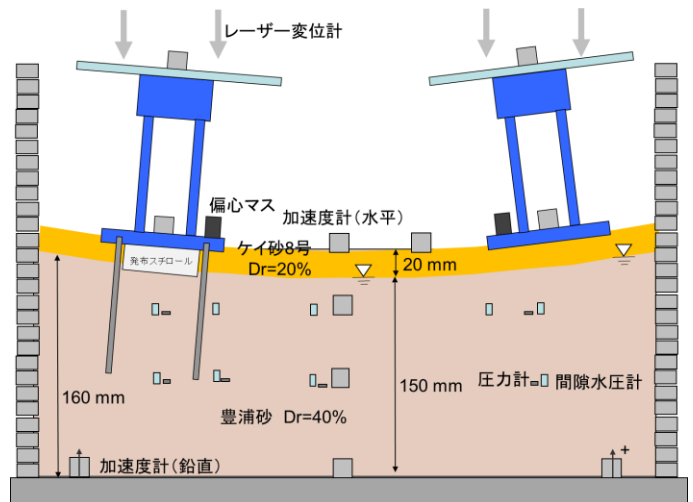


図 27. 実験モデル

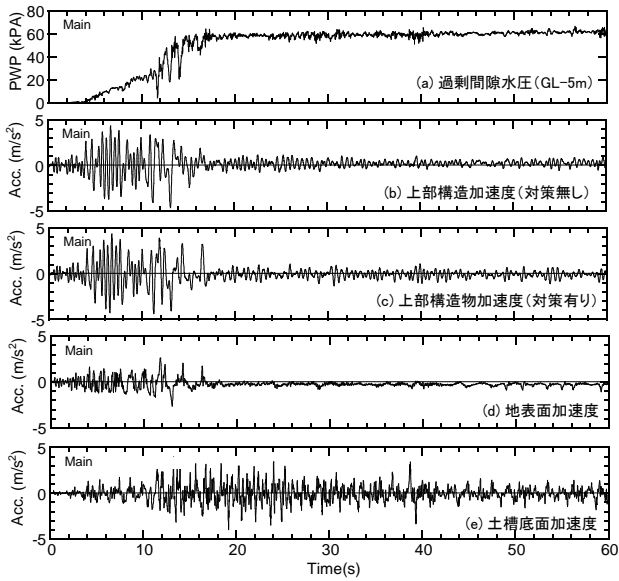


図28 加速度および過剰間隙水圧の時刻歴（本震）

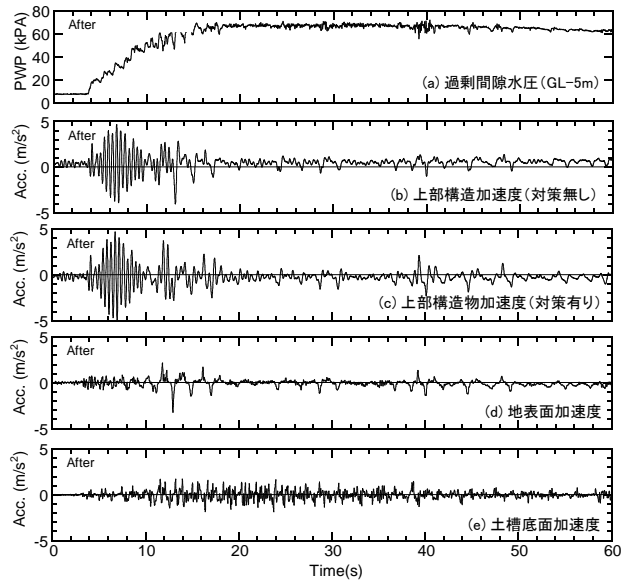


図30. 加速度および過剰間隙水圧の時刻歴（余震）

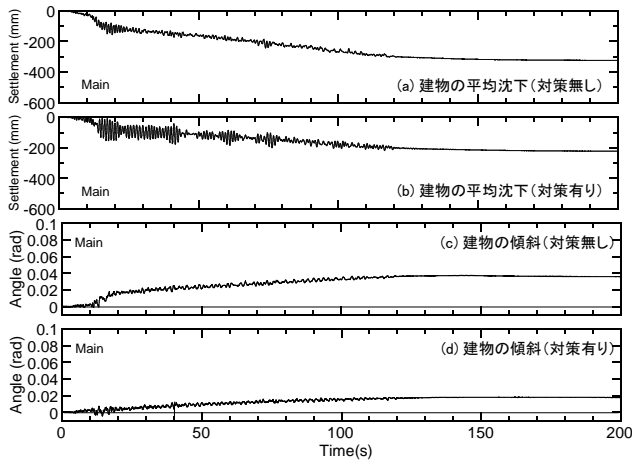


図29 建物の沈下および傾斜（本震）

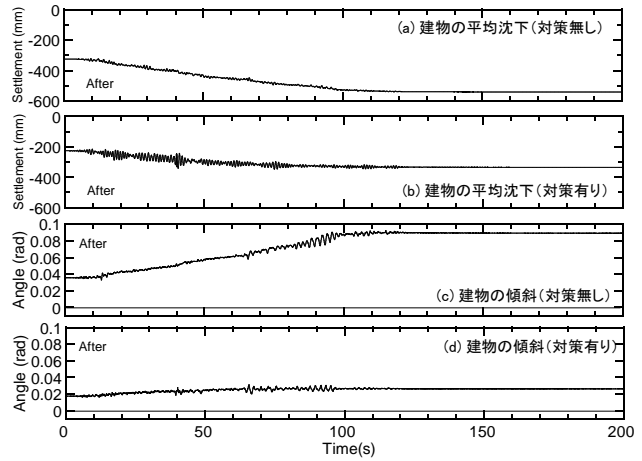


図31. 建物の沈下および傾斜（余震）

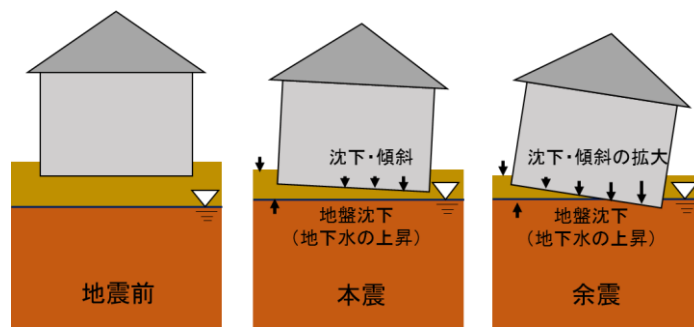


図32. 余震による液状化被害拡大のメカニズム

(4) 連結基礎による既存戸建て住宅の沈下・傾斜の防止

連結基礎の効果を検討するため、京都大学防災研究所で動的遠心载荷実験を 50g 場で行った。連結基礎を用いた実験モデルを図 33 に示す。無対策の実験モデルは、2つの基礎を結ぶ連結部が無いこと以外は、連結基礎モデルと同じである。飽和砂層は $Dr=40\%$ の豊浦砂で層厚が 170~180mm、地下水位は GL-20mm とした。間隙水は 50cst のメトロース水溶液である。戸建て住宅モデルの基礎幅は 9cm×9cm であり、傾斜しやすくするため基礎左側に偏心マス(質量 28.2g)を設置した。基礎は 5mm 根入れした。建物模型の総質量(偏心マス、レーザー変位計のターゲット含む)は 354g で平均接地圧は 21kPa(実大スケール)である。基礎固定時の上部構造物の固有周波数は 117Hz(2.3Hz)である。連結部は幅 10mm、高さ 4mm、長さ 120mm のジュラルミン板で、曲げ剛性は 3.75Nm² である。連結部は2つの基礎(間隔 80mm)をネジで固定した。入力波は最大加速度 5m/s² 程度の臨海波である。各上部構造物の左右の沈下量をレーザー変位計で計測した。以下、明記しない限り実大スケールで示す

図 34 は、各モデルにおける土槽底面と上部構造物の加速度、過剰間隙水圧(GL-2.5m)、建物の平均沈下と傾斜である。平均沈下と傾斜は、建物上面左右の鉛直変位をレーザー変位計で計測することで評価した。地盤は 13 秒付近で液状化した。液状化とともに上部構造物の加速度は激減し、建物モデルは沈下する。無対策モデルと連結基礎モデルの沈下量は同程度であり、連結基礎による沈下軽減効果は無い。連結基礎モデルの傾斜は、無対策モデルの 1/6~1/4 程度に軽減された。図 35 は、上部構造物の平均沈下と傾斜の関係を示している。無対策モデルでは、左側の建物は沈下 10cm 以上で、右側の建物は加振直後か

ら偏心マスの方向(反時計回り)に傾斜が単調増加する。これは、地盤反力が極めて小さく、かつ偏心効果に P-Δ 効果に加わったためと思われる。一方、連結基礎モデルでは、沈下 30cm 程度まで、左側モデルが時計回り、右側モデルが反時計回りに若干傾斜し、沈下のみ進行する。

戸建て住宅の沈下と傾斜を検討するため、t=45-55s における無対策建物の沈下と傾斜を図 36 に示す。図 36(c)の建物左右の沈下量は、図 36(a),(b)の点線の時間におけるもので、横軸は左端の沈下観測点(LD1)からの距離である。無対策の場合、図 36(d)の模式図のように2つの建物は偏心マスの方向に同じように傾斜し、沈下していく。傾斜が減少に転ずるときもあるが、その角度は小さい。図 37 は連結基礎における建物の沈下・傾斜である。連結基礎では、隣合う建物の傾斜の波形は類似しており、沈下は逆位相(凹凸の向きが異なる)の傾向を示す。模式図に示すように右側建物が沈下する時(t=46.59s-47.35s)、左側の建物は若干浮き上がって時計回りに傾斜する。その後(t=47.35s-48.25s)、左側の建物は沈下し、右側の建物が浮上がり、反時計回りに傾斜する。このように連結基礎では、隣合う建物が連結部を介して影響しあうことで傾斜を軽減する。なお、本震後に行った余震では、無対策の建物が転倒したのに対し、連結基礎の建物における傾斜増分は 1/100rad 以下であった。

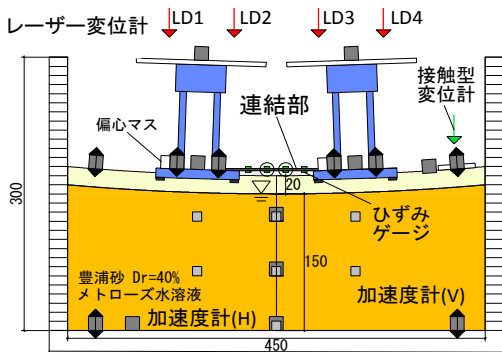
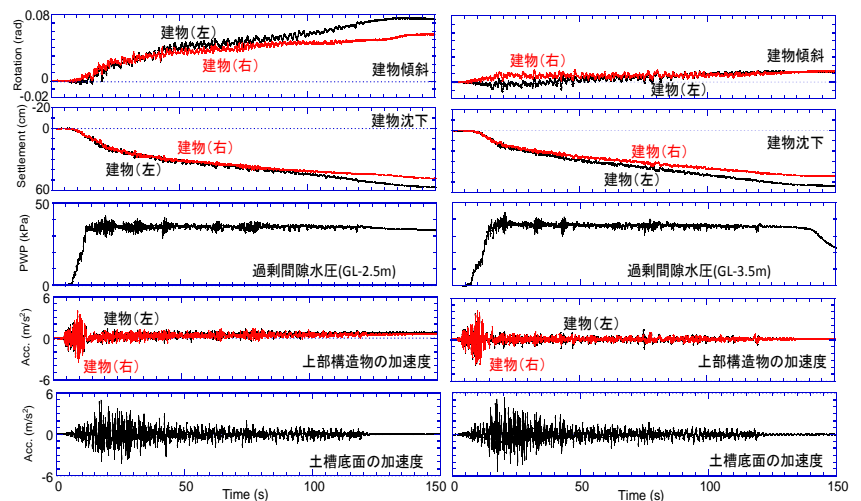


図33. 実験モデル(連結基礎モデル)



(a) 無対策 (b) 連結基礎

図34. 主な時刻歴

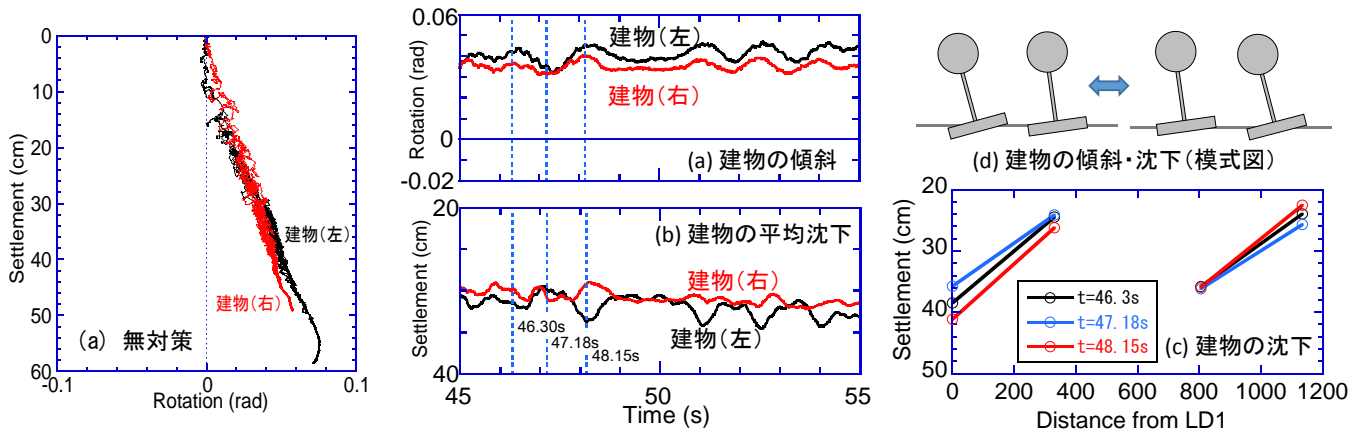


図36. 建物の傾斜と沈下（無対策）

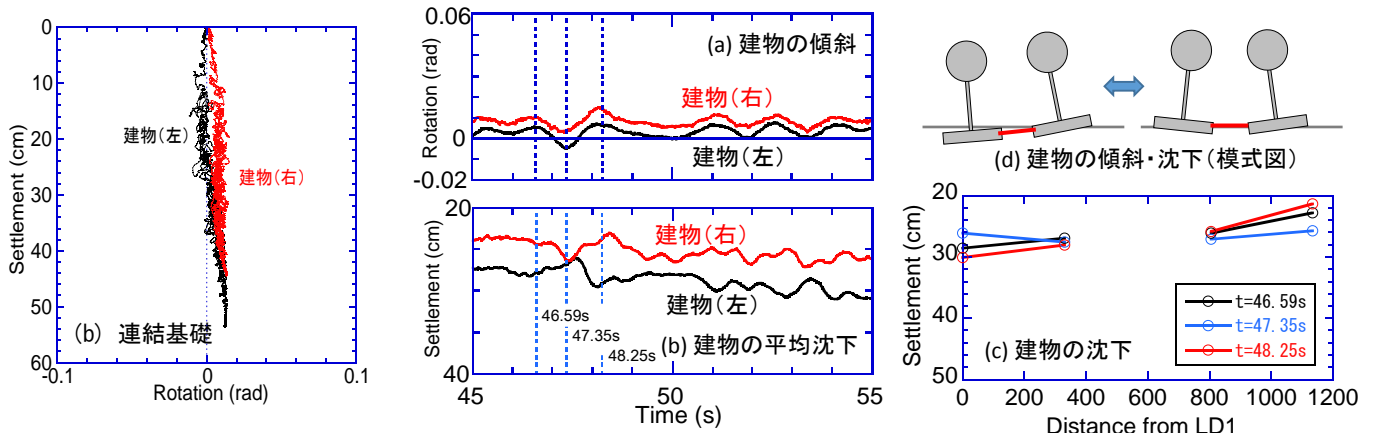


図35. 建物の傾斜と平均沈下の関係

図37. 建物の傾斜と沈下（連結基礎）

4. 実効性のある提言

本研究では、多くの市街地における建物および戸建て住宅の液状化被害軽減方法について検討した。それに基づいた提言を下記に記す。

(1) 柱状地盤改良による液状化発生の防止および被害軽減の評価

液状化が予想される地盤条件で柱状地盤改良を行う場合、地盤改良体を液状化層の下部の非液状化層に十分根入れさせることが重要である。大地震で液状化した場合でも、地盤改良体下端が非液状化層に十分根入れされていれば、建物の支持力は十分にあり、沈下・傾斜の大幅な軽減が期待できる。一方、地盤改良体下端が液状化層にとどまっている場合、地盤改良体がロッキングするため、地盤変形の抑制効果は期待できない。また、大地震で液状化すると、地盤改良体も沈下するため、建物の沈下・傾斜の軽減効果は低い。

(2) 杭基礎による建物の沈下・傾斜の防止 — 基礎根入れ効果の評価 —

基礎根入れ部に作用する地震時土圧・側面摩擦力は、杭応力に大きな影響をもつ。特に液状化した場合、地盤変位は大きくなり、根入れによって地震時土圧が外力として基礎根入れ部に作用し、杭応力が大きくなる。この効果を考慮するためには、提案手法のように基礎根入れ部に作用する土圧・側面摩擦力を応答変位法に組み込む必要がある。

(3) 杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の沈下・傾斜の防止

液状化層が厚いケースにおける戸建て住宅の対策として、浮き基礎と杭基礎を併用した工法を提案した。提案手法で建物の沈下・傾斜を軽減することができた。対策無しの建物では、特に余震で沈下・傾斜ともに激しく進行した。これは、本震の液状化における地盤沈下（地下水水位の上昇）と建物の沈下で基礎直下における非液状化層の層厚が減少し、余震時に建物の基礎端部が非液状化層を踏み抜いたため、大きな傾斜が生じたと考えられる。

(4) 連結基礎による既存戸建て住宅の沈下・傾斜の防止

戸建て住宅の基礎を連結することで不同沈下を軽減する工法を提案し、その妥当性を遠心載荷実験で検証した。その結果、基礎の連結により戸建て住宅の傾斜は無対策のそのの1/6～1/4程度まで軽減することができた。

参考文献

- 1) 日本建築センター：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 2002.
- 2) 浦安市第IV編 建築物の被害・液状化対策：
https://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/.../lasthoukoku04-1.pdf
- 3) Rayamajhi, D., Tamura, S., Khosravi, M., Boulanger, R., Wilson, D., Ashford, S., and Olgun, C.: "Dynamic Centrifuge Tests to Evaluate Reinforcing Mechanisms of Soil-Cement Columns in Liquefiable Sand", "Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.141, No.6, 04015015-1-9, 2015, 6.
- 4) Tamura, S. and Hida, T.; "Pile Stress Estimation Based on Seismic Deformation Method with Embedment Effects on Pile Caps", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 140, No. 9, pp. 04014049-1-12, 2014, 9.
- 5) Zhang, J.-M., Shamoto, Y., and Tokimatsu, K.: "Seismic earth pressure theory for retaining walls under any lateral displacement." Soils & Found., 38(2), 143-163, 1998..
- 6) 田村修次 (分担)：東日本大震災合同調査報告 建築編5 建築基礎構造、日本建築学会, 278 頁 (カラー) +DVD (422 頁) , 2015
- 7) Tamura, S. (分担)："Studies on the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake" , pp.137-155, Springer, 2014.
- 8) 田村修次：“杭と浮き基礎を併用した戸建て住宅の液状化対策”，No. 710, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014. 7.
- 9) 日野和也、田村修次、時松孝次：“連結基礎による戸建住宅の液状化対策に関する検討”，第 50 回地盤工学研究発表会, 2015. 9.

研究テーマ 1

課題 1-6

巨大津波による建物被害の迅速な 災害復興対策

金沢工業大学 山岸邦彰 准教授

課題 1-6 巨大津波による建物被害の迅速な災害復興対策

金沢工業大学

准教授

山岸 邦彰

南海トラフ地震 事業継続
2011 年東北地方太平洋沖地震

目標復旧時間
自然災害リスク

1.1. 研究目的

数十年後にその再来が危惧されている南海トラフ沿いの地震は、これまでの災害経験から広域災害となることは自明である。1946 年南海地震を最後に南海トラフで大・巨大地震は発生していないが、この地震空白期と相俟って戦後の経済成長の原動力は皮肉にも南海トラフに面した京浜、中京、阪神の各地区で生じている。すなわち、経済成長後では初めて南海トラフ沿いの地震を経験することになる。2011 年東北地方太平洋沖地震(M9.0)は津波による未曾有の災害をもたらしたが、震動による建造物の被害は限定的であった。これは震源域が遠い海側にあり、地震動が減衰したことが理由と考えられる。しかし、南海トラフ沿いの地震の震源域の一部は陸域の直下にあり、その地理的条件は 1999 年集集地震(台湾)のそれと類似している。さらに堆積盆地上に主要な社会資本が存在するわが国の各都市は、災害の観点から台湾よりさらに悪条件にあると考えられる。年を経るにしたがって南海トラフ沿いの地震の発生確率が上昇する中(今後 30 年の発生確率 60~70%¹⁾)、関東、東海、近畿の各圏の経済成長率は他の地域と比較して相対的に高い傾向が続くと予想されている²⁾。このような状況が続けば、南海トラフ沿いの地震による災害リスクの増加は必定である。

このような危機感を反映して、1981 年 5 月着工のいわゆる旧耐震建築物の耐震診断および改修が進められている。しかし、その進捗は危機感に反して遅く、改修などの追加的投資の恩恵が見込まれない民間建築物において難渋している。耐震化率の上昇は好ましいことではあるが、現行の建築基準法では生命、財産等の保護を図ると言いつつも、災害後の機能維持について保証していない。建築物が倒壊しないことを生命、財産等を保護することと同一視していると考えられるが、倒壊を免れた建築物であっても生命、財産等が失われた例は少なくない。これからは生命の保護は当然とした上で、財産等を保全し、地震などの災害後も早期に建築物の機能を発揮できるようにすることが求められている。

近年、自然災害やテロ等の人為災害の増加を契機として、企業の事業継続に対する関心が高まっている³⁾。事業継続とは、災害等事業を中断する因子が生じて、核心的な事業を早期に立ち上げられる状態にしておくことを言う。躯体の耐震性を向上させていてもその用途に応じた建築物としての機能が維持されていなければ事業継続

を行うことはできない。すなわち、建造物のみならず非建造物の堅牢性、冗長性が求められる。このように地震を対象として種々の対策を講じることも事業継続の一部ではあるが、事業継続は事業中断事象をすべて扱う。すなわち、ある想定された事象(例えばこの土地に震度 6 強の地震が発生するなど)に対する対策を考えるのは DR(disaster recovery)の分野であり、DR では事業継続を完遂することはできないと言われ始めている。今、事業継続で最も重要な戦略の一つに代替戦略がある。これはある事業所が毀損した場合に、同社の他の事業所で代替して生産・サービスをしたり、第三者に生産・サービスを移譲したりする戦略である。従来の DR では災害の想定が前提となっているため、例えば当該事業所は震度 6 弱には耐えられるが震度 6 強には耐えられない、という考え方が存在する。しかし、事業継続ではその事業所が完全に滅失した場合を考えるため、震度の大小は無関係となる。さらに災害を特定する必要はなく、津波、洪水、土砂災害であってもよい。これまでの事業継続計画は「代替戦略」まで取り入れたものは少なかったが、2011 年東北地方太平洋沖地震、2011 年タイ洪水など、巨額の損失を伴った災害の頻発を受けて、代替戦略が重要視されている。

以上述べたように、与えられた課題「巨大津波による建物被害の迅速な災害復興対策」を考案するにあたり、被害を受けた建築物を元の通りに復旧することがすべてではなく、復興を目的とするならば事業継続に視座した復興対策が重要であると考えられる。これを建築というハードウェアのフィルターに通すと、非構造の耐震性能と立地が有する災害リスクの評価が重要であり、これらを評価して種々の対策を講じる必要があると考える。さらに事業継続の対策の良否を決定する復旧時間の評価が必要になる。事業継続は重要業務をコミットした復旧時間(目標復旧時間)以内に稼働させることを基本としている。また、ビジネスインパクト分析の結果を反映した目標復旧時間の設定が重要になる。しかし、代替戦略ではない現地の事業所を復旧する戦略を採用する場合には、目標復旧時間が数量で表される以上、ハザードの大きさに対する復旧時間を定量的に見積もる必要がある。すなわち、復旧時間の予測が必要になる。しかし、現状の事業継続計画では復旧時間の予測精度は低いと言わざるを得ない。また、目標復旧時間を信じて取引している

第三者にとって、復旧時間の予測精度に対する関心が低い。復旧時間の予測方法の確立は事業継続の普及には不可欠であると考え、確立された予測方法が存在していないことは、事業継続を骨抜きにしかねない。

以上のことから、本課題の実効性を高めるために、以下の点を明らかにすることが極めて重要であると考え。

- (1) 建築物の非構造材（特に天井）に対する Fragility 曲線の計算方法
- (2) 復旧曲線のプロトタイプ（基準化復旧曲線）の提案
- (3) 2011 年東北地方太平洋沖地震における事業中断要因の抽出
- (4) 地震、風、洪水に対するリスク計算方法の提案
- (5) 事業環境リスクの計算方法の提案

非構造の中で天井は地震時に落下の可能性のある部位である。天井の落下は執務者に怪我をさせる可能性がある。執務者は事業継続の主要な資源であり、執務者の怪我は事業継続の達成を困難にする要因である。また、事業の運営に不可欠な資機材やデータを毀損する可能性がある。天井は事業継続に大きな影響を及ぼす部位と考え、天井の Fragility を定量化することにより、被害程度を予測することが可能であると考え（項目(1)）。

しかし、このような Fragility を考慮して予測された復旧時間は計算仮定に従って得られたものであり、信憑性が低い。そこで、既往の災害統計から得られた復旧時間の平均像は、予測した復旧時間の蓋然性の判断に資すると考えられる。そこでプロトタイプとしての復旧曲線を提案することが必要である（項目(2)）。

また、災害後の迅速な復興を考えると、事業を営む器となる建築の重要性だけでなく、事業を支える設備、インフラの重要性も高い。2011 年東北地方太平洋沖地震は、わが国に事業継続が紹介・導入されてから初めての大規模災害であるが故に、事業継続の視点から当該事業が中断した理由を整理することは大変重要である（項目(3)）。

最後に、事業継続の代替戦略を考える上で、代替地のリスクを考えることは必然である。しかし、REIT の発端となった「資産の流動化に関する法律」以降、投資家への開示情報として地震リスクの計算方法は確立されてきているが、他の災害リスクに関する研究は少ない。また、事業のリスクは自然災害のみならず、人口動態、インフラの強弱なども影響する。ここではその端緒として、風、洪水に対するリスク評価方法の試案を示す。しかし、自然災害リスクを回避するためだけに事業者は事業所を移転しない。むしろ、その他の事業環境リスクを考慮・重視する傾向にある。そこで、本課題では事業環境の中で生産原価に直結する物流リスクと、人口増加に伴う事業拡張が困難となるリスク（以下、宅地化リスクと呼ぶ）の計算方法を提案し、各事業者の事業継続戦略に資する情報を提示する（項目(4),(5)）。

2. 解決法

2.1 地震被害調査に基づく天井の被害関数の提案

予測復旧時間は、ある部位の復旧時間にその被害確率を乗じた確率量として算出することができる。そのため、復旧時間の予測において被害確率に関する資料は極めて重要である。しかし、それら資料の多くが躯体に関するものであり⁴⁾、近年の地震被害において被害が多く見られる非構造材に関する資料はほとんどない。非構造材の被害は、2000 年鳥取県西部地震や 2001 年芸予地震が発生した頃より注目されるようになり、2011 年東北地方太平洋沖地震においても非構造材の被害が多く見られ、中でも天井に至っては落下による死亡者が発生した⁵⁾。また、日本科学未来館や空港ターミナルビル内においても天井が落下し^{6), 7)}、その後の業務に支障をきたした。このように事業の継続性や人命確保の観点から躯体の耐震性のみならず、非構造材の耐震性の確保も重要となる。しかし、復旧時間を確率量として捉える場合、地震動強さと被害率の関係を表す被害関数が必要になるが、この部分の確率は少ない。中でも前述したように業務への影響が大きい天井の被害関数に関する研究は、佐藤ほか⁸⁾を除けばほとんどない。本課題では地震被害調査に基づく天井の被害関数を提案する。

2.2 基準化復旧関数および復旧関数の提案

本研究では時間に対する実際の操業率の変化を表現したものを復旧曲線、時間に対する操業率の変化をモデル化したものを復旧関数と定義する。また、災害発生時から操業率が 1.0(100%)となるまでの時間を 1.0 として時間軸を基準化した復旧関数を基準化復旧関数と定義する。基準化復旧関数および復旧関数を提案することにより、事業者は主要事業の操業度と時間の関係の平均像を把握することができると考えられる。本課題では、復旧調査のデータを用いたこれらの関数を提案する。

2.3 生産施設の事業中断因子の抽出

近年、大地震や暴風、豪雨などの自然災害の増大により事業を中断する企業の増加、サプライチェーンの高度化を背景として、事業継続に対する関心が高まっている。事業継続(Business Continuity)とは、企業が災害や事故で被害を受けても取引先等の利害関係者から重要業務を中断させず、中断しても可能な限り短時間で事業を再開させることである。事業継続を指向した事業復旧に関する既往の研究は多くない。例えば、山岸・仙名⁹⁾は、多くの重要要素がある場合や復旧要員の変化に対応した復旧時間の予測法を提案し、一般的な工場を模擬した生産施設を対象に復旧要因が復旧時間に及ぼす影響を評価している。しかし、このような理論的な研究はあるが、事業継続の実態を分析した研究や報告は著しく不足している。

以上のことから、本研究では 2011 年東北地方太平洋沖地震における企業のアンケート結果を基に、事業が中断

してから再開するまでを復旧時間と定義し、復旧時間の長さに寄与する事業中断因子の抽出とその影響度を定量的に把握する。

2.4 地震・風・洪水に対するリスク計算方法の提案

近年、自然災害に対する意識、関心が急速に高まっている。日本では、1995年兵庫県南部地震を契機に地震リスクマネジメントの重要性が認識され始めた。2011年東北地方太平洋沖地震で、地震と津波による甚大な被害を受け、地震への対策を再認識することとなった。自然災害は地震の他にも、地球温暖化が原因と考えられる集中豪雨に伴う洪水被害や土砂災害の発生、台風や竜巻等の強風被害は増加傾向にある。自然災害の特徴とリスク対応から、自然災害による死亡リスクは減少傾向にある一方で¹⁰⁾、自然災害の発生と災害による経済損失は増加傾向にある。このように自然災害に対するリスクへの関心が高まる中、既往の研究が多い地震リスクだけでなく、建築物に生じる様々なリスクを定量化することが求められている。しかし、集中豪雨や強風等のリスクに関する研究、複合的な災害リスクに関する研究は少ない。本課題では、建築物に生じ得る自然災害リスクを総合的に評価することを目的として、自然災害の中でその影響が大きい地震、洪水、風に対するリスク評価方法を提案する。

2.5 事業環境に関連したリスクの評価方法の提案

自然災害の他にも重要なシステムの障害発生や風評被害、国内外におけるテロなど、企業経営に影響を与える災害や事故が多発している¹¹⁾。これらを背景として近年策定が進められている事業継続計画において、事業拠点を変更する代替戦略が注目されている。しかし、代替拠点を決定する場合にはリスク分散を基本とするが、地震リスク以外の災害リスク評価に関する既往の研究は少ない。また、事業拠点の選定にあたり立地、雇用などの災害リスク以外の要因も大きく影響する。以上より、主に生産施設を有する事業所を対象として、立地に関わる様々なリスクを総合的に評価することを目的として、本課題では地震時の物流リスク、および宅地化リスクの評価方法を提案する。

3. 方法の検証

3.1 地震被害調査に基づく天井の被害関数の提案

3.1.1 天井の被害関数の計算方法

(1)解析モデル

本研究では、図1に示すような軽量鉄骨下地を使用した一般的な吊り天井¹²⁾を解析対象とする。このような天井に対して、既往の研究^{例えば、13)、14)}から天井の崩落・落下パターンを整理し、その原因となりうる構成部材（吊りボルト、ハンガー、野縁受け、クリップ）を抽出し、それらの剛性、耐力の評価を行った。部材剛性から図2に示す質点系モデルを構築する。解析では、ばねに生じる

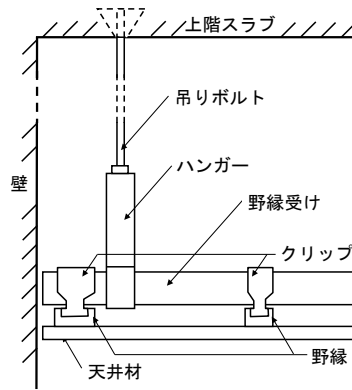


図1. 吊り天井の模式図

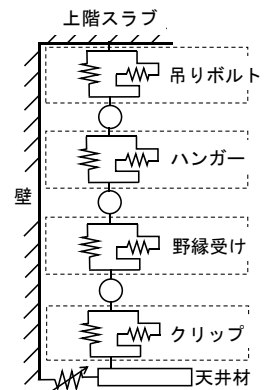


図2. 解析モデル

応力が当該部材耐力を上回った場合に天井が損傷すると考え、全ての部材を線形ばねとした。ただし、天井材と壁との衝突による被害事例が多く報告されていることから¹⁵⁾、天井材と壁の間に衝突後に硬化する非線形弾性ばねを挿入した。(2)各部材の剛性評価

解析モデルの各ばねの剛性は、単位面積当たりの剛性とし、式(1)により与えられる。

$$K_j = \frac{n_j k_{sj}}{A} \quad (1)$$

ここに、

K_j : 部材 j のばね剛性[N/m]

n_j : 天井面積 A 内の部材 j の個数

k_{sj} : 部材 j の1個当たりの剛性[N/m]

A : 天井面積[m²]

(3)各部材の耐力評価

損傷を評価する場合に必要な各部材の耐力は、式(2)により与えられる。

$$P_j = n_j p_{sj} \quad (2)$$

ここに、

P_j : モデルにおける部材 j の耐力[N]

p_{sj} : 各部材単体の各種耐力[N]

(4)被害関数の算定方法

図2に示す解析モデルに対して地表面最大速度(PGV)を基準化した観測地震波50波の入力地震動とする応答値を入力し、被害関数を計算する。ここでは、応答値が耐力を上回った場合に損傷すると仮定した。被害率はこの50波に対する損傷数の比率から計算し、得られた被害率をガンマ分布で回帰することにより被害関数を算出した。被害関数は一般的に対数正規分布を適用する例が多いが⁴⁾、対数正規分布では適用しない場合もあるため、本研究ではガンマ分布を使用した。式(3)にガンマ分布の確率密度関数の定義式を示す。

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (0 < x < +\infty) \quad (3)$$

ここに、

$\Gamma(\alpha)$: ガンマ関数

表 1. 解析パラメータ一覧

項目	詳細		数値
建物	階数[階]		1, 2, 3
	周期[s]	水平	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
		上下	0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20
部材	天井材の厚さ[m]	1 枚貼り	0.012
		2 枚貼り	P:0.0095, R:0.012
	ボルト長さ[m]		0.5, 1.0, 1.5
	クリアランス[m]		0.00, 0.01, 0.02, 0.05, 0.10
解析方向			野縁方向, 野縁受け方向

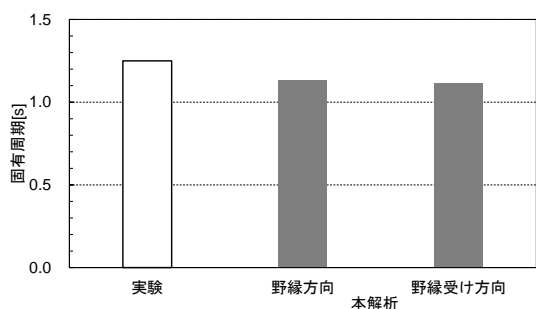


図 3. 実験と本解析による天井の 1 次固有周期の比較

α, β : ガンマ分布のパラメータ
 x : 確率変数

3.1.2 解析概要

(1)解析パラメータ

様々な条件下における天井の被害関数を算出するために表 1 に示すパラメータスタディを行った。解析パラメータは、天井に被害を及ぼす要因であると考えられる建物の階数および周期（上下、水平）、天井材の厚さ（以下、天井材の構成）、吊りボルトの長さ（以下、ボルト長さ）、天井-壁間のクリアランスおよび解析方向の 6 項目である。表 1 に各パラメータの数値等を示す。天井材は JASS 26¹⁶⁾に準じて、せっこうボード(P)とロックウール化粧吸音板(R)を使用し、1 枚貼りではロックウール化粧吸音板のみを、2 枚貼りではせっこうボードとロックウール化粧吸音板の貼り合わせとした。なお、2 枚貼りにおいて両者は完全に定着していると仮定する。解析方向において、天井が野縁に対して平行に揺れる方向を野縁方向、野縁受けに対して平行に揺れる方向を野縁受け方向とした。

(2)入力地震動

天井の被害関数を得るためには、天井が接続されているスラブの応答（フロアレスポンス）を得る必要がある。本研究では、事業継続に関心の高い工場を対象にしていることから、3 階建て以下の低層建物におけるフロアレスポンスを算出した。なお、低層建物の固有周期を網羅するため、水平・上下ともに表 1 に示す値とした。

フロアレスポンスの計算に使用した地震動は、K-net および KiK-net で観測された地震動の PGV を基準化したものである。Gutenberg-Richter の関係¹⁷⁾からマグニチュードと頻度の関係性と地域性を考慮して、比較的大きな加

表 2. 解析ケース一覧

ケース	階数[階]	周期[s] 水平(上下)	揺れの方向	天井材の構成	ボルト長さ[m]	クリアランス [m]
flp1Mm1L111	1	0.1(0.04)	野縁	1 枚	0.1	0.00
f2p1Mm1L111	2					
f3p1Mm1L111	3					
flp1Mm1L111	1	0.1(0.04)	野縁	1 枚	0.1	0.00
flp2Mm1L111		0.2(0.08)				
flp3Mm1L111		0.3(0.12)				
flp4Mm1L111		0.4(0.16)				
flp5Mm1L111		0.5(0.20)				
flp1Mm1L111	1	0.1	野縁	1 枚	0.1	0.00
flp1Cm1L111			野縁受け			
flp1Mm1L111	1	0.1	野縁	1 枚	0.1	0.00
flp1Mm2L111				2 枚		
flp1Mm1L111	1	0.1	野縁	1 枚	0.5	0.00
flp1Mm1L211					1.0	
flp1Mm1L311					1.5	
flp1Mm1L110	1	0.1	野縁	1 枚	0.1	0.00
flp1Mm1L111						0.01
flp1Mm1L112						0.02
flp1Mm1L113						0.05
flp1Mm1L114						0.10

速度を記録した地震動を偏りなく 50 波選定した。

3.1.3 解析結果

(1)解析モデルの妥当性の検証

本解析モデルの妥当性を確認するために、既往の研究¹⁸⁾（以下、実験）における天井の 1 次固有周期との比較を行った。図 3 に実験と本解析による天井の 1 次固有周期の比較を示す。実験に使用された天井の仕様に不明な点があり振動方向も不明であるが、両者はほぼ一致していることから解析モデルは概ね妥当であると判断した。

(2)被害関数

前述した解析パラメータから表 2 に示す解析ケースを設定し、各条件下における被害関数の差異を確認する。全解析ケースに共通する解析条件として、各部材の剛性を天井面積 1m² 当たりのもとし、森田ほか¹⁸⁾を参考に減衰定数をボルト長さが 0.5m では 0.010, 1.0, 1.5m では 0.005 を各部材に与えた。なお、以下の図 4~7 に示される被害関数は天井面積が 1m² 当たりのものである。

以下に、建物階数、天井材の構成、ボルト長さ、クリアランスの 4 ケースにおける被害関数について詳述する。

(1)建物階数

図 4 に 2, 3 階建て建物の各階における被害関数をそれぞれ示す。3 階建てで、階が高くなるにしたがい、被害率が増加する傾向が見られたが、2 階建てでは、2 階よりも 1 階の方で被害率が高くなる傾向が見られた。

(2)天井材の構成

図 5 に天井材の構成の違いによる被害関数を示す。水平動においては、2 枚貼りの被害率が 1 枚貼りに比べて低くなった。他方、上下動においては、1 枚貼りに比べて 2 枚貼りの被害率が増加した。前者は、2 枚貼りにより天

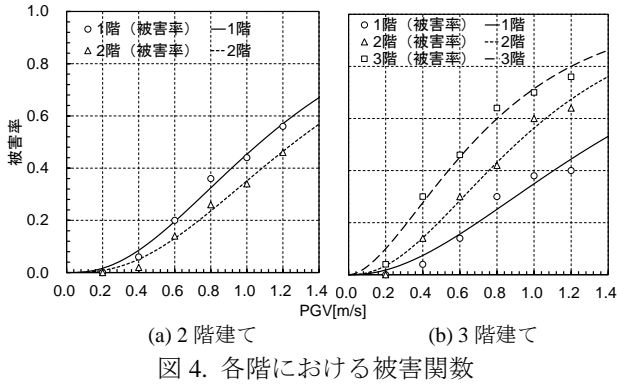


図 4. 各階における被害関数

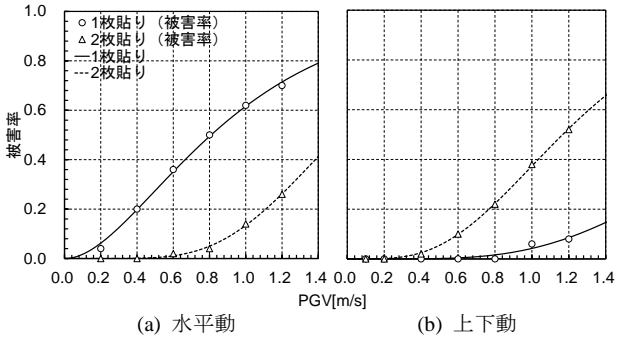


図 5. 天井材の構成の違いによる被害関数

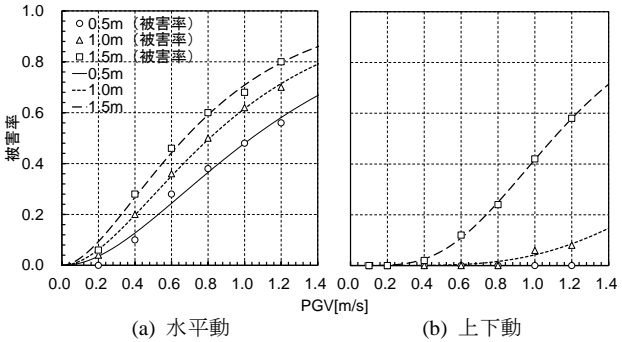


図 6. ボルト長さの違いによる被害関数

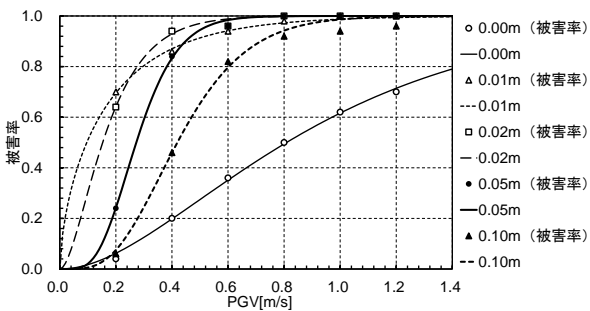


図 7. クリアランスの違いによる被害関数 (水平動)

天井材の曲げ剛性が増加し、天井材の座屈耐力が増加したことにより起る。後者は、2 枚貼りにより天井重量が増加し、吊りボルトに作用する軸力が増加したためである。

(3)ボルト長さ

図 6 にボルト長さの違いによる被害関数を示す。水平・上下動ともに、ボルトが長くなるにしたがい被害率が増加する傾向が見られた。これは、ボルトが長くなる

ことによりボルトの座屈耐力が低下し、ボルトの天井面に対する面外の拘束効果が低減するためである。この効果は國崎ほか¹⁹⁾や岡本ほか²⁰⁾においても確認されており、ボルト長さが天井面の耐力に影響を及ぼすことが分かる。

(4)クリアランス

図 7 にクリアランスの違いによる被害関数 (水平動) を示す。クリアランス 0m において被害率が最も低く、0.02m の場合に最も高い被害率を示すものの、さらにクリアランスが広くなるにしたがい被害率が減少する傾向が見られた。天井材と壁との衝突は、天井の被害率を増加させる要因となることが分かる。

3.1.4 既往の被害関数との比較

本解析により得られた被害関数 (以下、本被害関数) と復旧調査において被害データから算出された被害関数 (以下、調査被害関数) を比較する。復旧調査においては、一部損傷と多く損傷の 2 種類の被害関数が算出されている。本解析における被害率の算出方法が損傷の有無のみで判定しているため、ここではほぼ被害の有無で被害率を算出している一部損傷 (全体の 5%未満の被害) の被害関数を比較対象とした。本被害関数は、表 5 に示した解析ケースにおいて算出したすべての水平動の被害関数の平均値である。

図 8 に本被害関数と調査被害関数の比較したものを示す。本被害関数は調査被害関数と概ね調和的である。ただし、PGV が小さい範囲では本被害関数の被害率が調査被害関数を上回り、PGV が大きい範囲では調査被害関数の被害率が本被害関数を上回った。

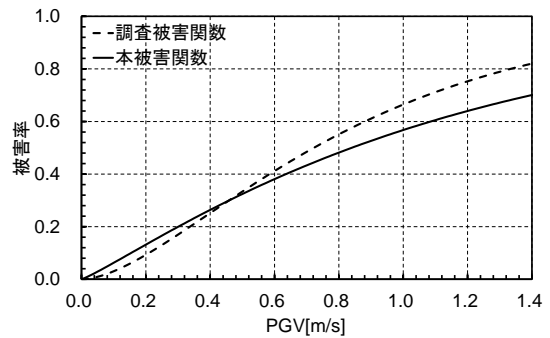


図 8. 本被害関数と調査被害関数との比較

3.2 基準化復旧関数および復旧関数の提案

3.2.1 アンケートの調査概要

表 3 に復旧調査で実施したアンケート調査の実施概要を示す。本調査では、事業継続に対する認識が高いこと、総資産に対する固定資産の比率が高く震災の影響が大きいことなどの理由から、製造業をアンケートの対象とした。アンケートの配布先は、沿岸地域を除く 8 県に所在する事業所のうち、当該地域における気象庁震度が 5 弱以上と推定²¹⁾される事業所である。

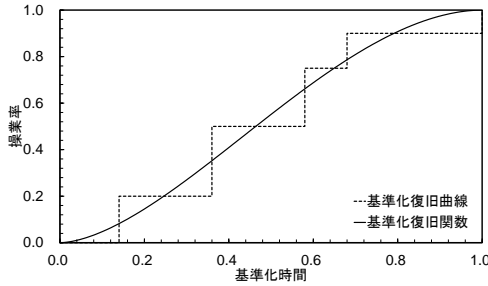


図 9. 基準化復旧関数および基準化復旧曲線の説明図

表 3. アンケート調査概要

項目	詳細
目的	2011年東北地方太平洋沖地震における生産施設の被害と復旧状況の把握
アンケート形式	無記名方式（選択および記述式）
回答期間	2011年9月1日～9月30日
配布対象	震度5弱以上と推定される地域にある事業所（沿岸地域を除く）
配布数	2,150
回答率（回答数）	12.4%（267社）

3.2.2 基準化復旧関数の算定方法

復旧調査では横軸を時間、縦軸を操業率とした各事業所の復旧状況（復旧曲線）を記載してもらい（図 10）、これらの結果を図 11 に示すフローに従い基準化復旧関数の算出を行った。回答のあった復旧曲線のうち、2011年東北地方太平洋沖地震により操業率が一時 0%まで低下し、アンケートを記入した時点で操業率が 100%になっているもののみを選別した（図 11(1)）。すなわち、図 12 に示すようにアンケート回答日まで操業率が 100%に回復していないもの(A)、地震発生直後も一定の操業率が確保されたもの(B)、地震後も全く操業が低下していないもの(C)、および地震発生後に操業率が 100%を越えるもの(D)を、標本から除外した。これらの措置は、後述するように復旧関数等をベータ分布で回帰させるために定義域と値域を[0, 1]で保証させるために行った。なお、図 12 の(D)に関して、本来の事業継続の考え方では操業率が 100%を超える状態はあり得ることであり、むしろ好ましい状態ではあるが、本研究では除外対象としていることを付記する。次に、時間軸の基準化を行う（図 11 (2)）。図 9 の点線に示すように、地震発生から操業率が 100%になった時点の時間を 1.0 として基準化する。次に復旧曲線に対して定義域が [0,1]のベータ分布で回帰し、回帰パラメータ α 、 β を決定する（図 11 (3)）。復旧曲線のほとんどはこのようなステップ状や区分線形関数のような復旧曲線となっていた。式 (4)にベータ分布の確率密度関数の定義式を示す。

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (4)$$

ここに、

- $B(\alpha, \beta)$: ベータ関数
- α, β : ベータ分布のパラメータ
- x : 確率変数

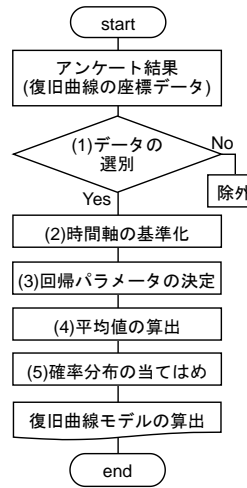


図 11. 基準化復旧関数の算出フロー

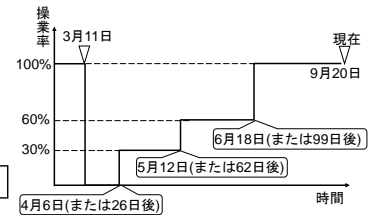


図 10. 復旧状況の回答方法

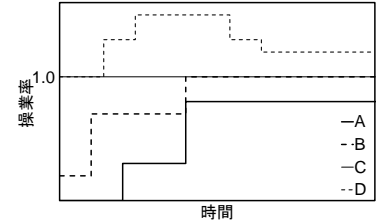


図 12. 除外した復旧曲線回答

選別されたすべての復旧曲線に対してベータ分布のパラメータ α_i 、 β_i を決定し、各事業所の復旧曲線を回帰したベータ分布 $Be_i(\alpha_i, \beta_i)$ をそれぞれ算定する。 n 個の事業所数に対して得られたベータ分布関数の平均値 $Be_{ave}(\hat{t})$ を計算する（図 11 (4)）。なお、 \hat{t} は前述した基準化された時間を表す。

$$Be_{ave}(\hat{t}) = \frac{1}{n} \sum_i Be_i(\hat{t}, \alpha_i, \beta_i) \quad (5)$$

式(5)で得られた $Be_{ave}(x)$ に対してさらにベータ分布で回帰し、パラメータ α_s 、 β_s を決定する（図 11 (5)）。以上のプロセスを経て得られた分布関数が基準化復旧関数 Fr_s である。すなわち、復旧曲線から統計処理によって得られた関数が基準化復旧関数である。この基準化復旧関数をアンケート結果の範疇ごとに算定することにより、範疇間の傾向について論じることができる。

3.2.3 復旧関数の算定方法

復旧関数 Fr は 3.2.2 項に示したカテゴリ毎に得られる基準化復旧関数の確率変数を各事業所の 100%復旧時間 T_{ri} で除して得られる確率分布関数として算定される（式(6)）。

$$Fr(t) = Fr_s \left(\frac{t}{T_{ri}}, \alpha_s, \beta_s \right) \quad (6)$$

ここに、 t は実時間を表す。

また、複数の事業所の平均復旧関数は式(7)で表される。 t/T_{ri} が 1.0 を超える場合は操業率を 1.0 として計算を行う。

$$Fr_{ave}(t) = \frac{1}{n} \sum_i \begin{cases} Fr_s \left(\frac{t}{T_{ri}}, \alpha_s, \beta_s \right) & (0 \leq t \leq T_{ri}) \\ 1.0 & (T_{ri} < t) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)は基準化復旧関数 Fr_s を利用して計算されるが、各事業所の操業率 100%になるまでの復旧時間 T_{ri} が分かれば計算されるため、各事業所の復旧曲線の状況が不明であっても全復旧時間 T_{ri} を適切に設定することにより復旧関数を推定することが可能となる。なお、本関数は事業継続計画を立案する段階で利用されることを想定しており、

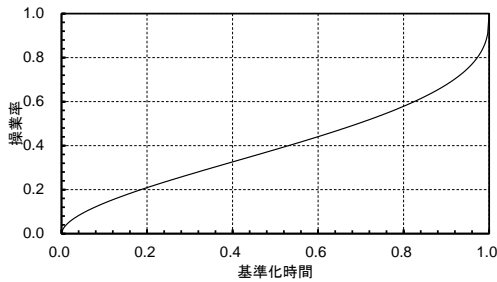


図 13. 全データに対する基準化復旧関数

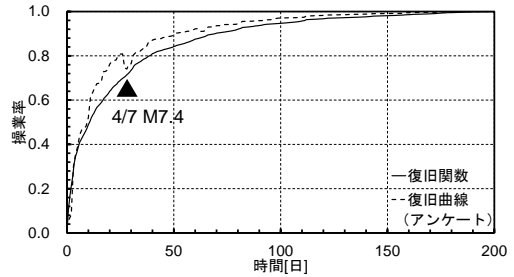


図 14. 全データに対する復旧関数および復旧曲線（実測）

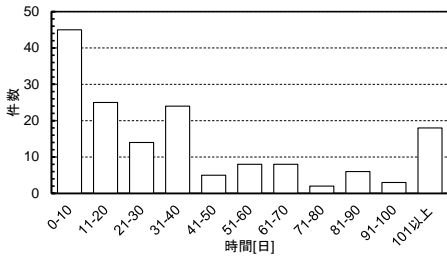


図 15. 復旧時間のヒストグラム

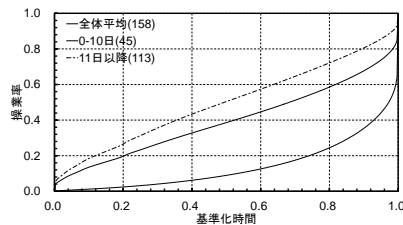


図 16. 復旧時間別の基準化復旧関数

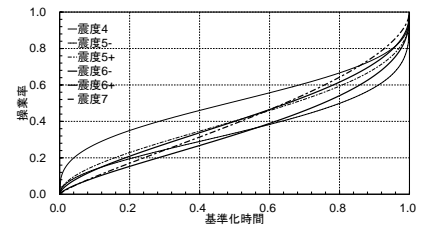


図 17. 震度別の基準化復旧曲線

表 4. 震度別の標本数とパラメータ

震度	標本数	α	β
4	7	0.33	0.34
5-	26	0.48	0.26
5+	44	0.51	0.26
6-	44	0.61	0.43
6+	29	0.71	0.38
7	5	0.81	0.56

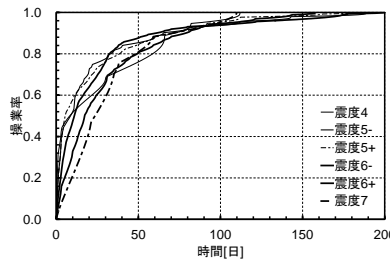


図 18. 震度別の復旧関数

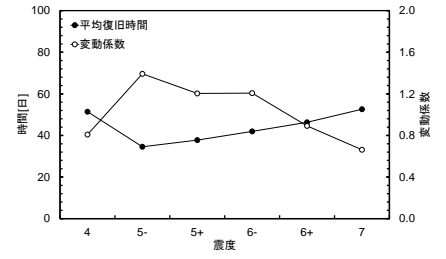


図 19. 震度別の平均復旧日数と変動係数

復旧時間 T_{ri} の予測精度を向上させることが今後の課題である。

3.2.4 算定された基準化復旧関数と復旧関数

(1)全データに対する基準化復旧関数等

図 13 に選別された全ての復旧曲線から算定した基準化復旧関数を示す。なお、本関数を得るのに使用した標本数は 158、ベータ分布のパラメータは $\alpha=0.55$ 、 $\beta=0.60$ である。初期はやや立ち上がりがあるものの、後半に急速に回復する曲線が得られた。操業率が 50%に回復する基準化時間は約 0.7 である。図 14 に選別した復旧曲線についてそのまま平均化した実測値（点線）と、式(7)を用いて算出した復旧関数の平均値（実線）とをそれぞれ示す。実測値（点線）において 27 日付近で操業率が一時的に低下するが、これは 2011 年 4 月 7 日に発生した余震(M7.4)の影響によるものである。この余震の最大震度は 6 強であり、この余震により再び操業率が低下した事業所は標本数の約 10%あった。この結果を得るのに使用した全復旧時間 T_{ri} のヒストグラムを図 15 に示す。 T_{ri} の最頻値は 0～10 日の 45 件であり、平均値は 41.0 日、変動係数は 1.12 であった。図 14 に示すように 10 日程度までは復旧関数と復旧曲線は概ね一致しているが、それ以降の操業率は復旧関数の平均値（実線）の方がやや低下している。その原因を以下に考察する。図 16 に 10 日以内に操業率

が 100%になった事業所の復旧曲線を回帰したベータ分布関数の平均値（式(5)）と 11 日以降のそれを、全体の平均と比較したものを示す。凡例の括弧内は標本数を表す。復旧時間が 10 日以内の操業率の分布は、全体平均と比べて全ての基準化時間に対して大きく下回っている分布となっている。他方、復旧時間が 11 日以降の分布は、前者とは逆に全体平均と比べて上回っている分布となっている。すなわち 11 日以降では、全体平均を基に構築された基準化復旧関数を上回る復旧曲線となった事業所が多いため、実測した復旧曲線の方が復旧関数を上回る結果となった。

(2)震度別の基準化復旧関数等

震度の違いによる復旧状況の差異を確認するために、震度別の基準化復旧関数を図 17 に示す。震度 4 では操業率の立ち上がり早く、それ以外の震度では最後の立ち上がりが顕著となる傾向が確認される。また、震度が大きくなるにしたがい、基準化復旧関数の初期における傾きが若干緩やかになる傾向が確認される。ただし、ある時刻における操業率の高低と震度との関係は明確な傾向は確認されない。アンケート結果の復旧曲線を見ると、震度 5 弱と震度 6 強の場合に復旧曲線が段階的に回復せず、Step 関数のように基準化時間が 1.0 になると操業率が 100%になる回答が相対的に多く見られた。すなわち、他

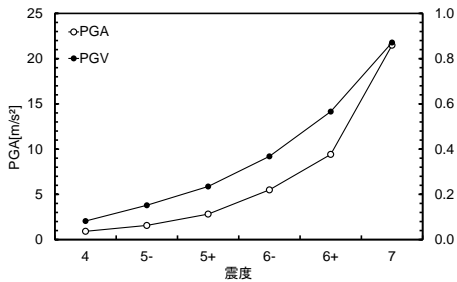


図 20. 震度と PGA・PGV の関係

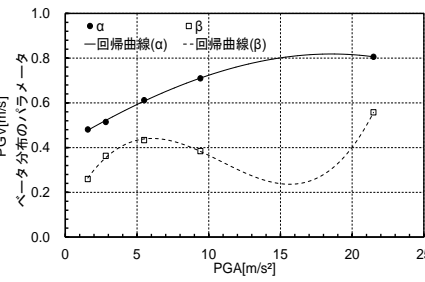


図 21. ベータ分布のパラメータと PGA

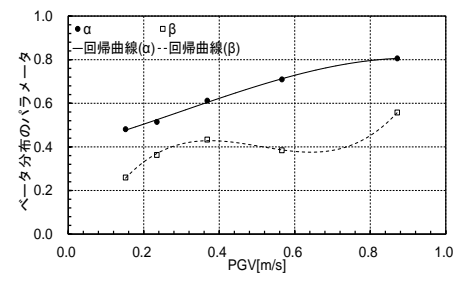


図 22. ベータ分布のパラメータと PGA

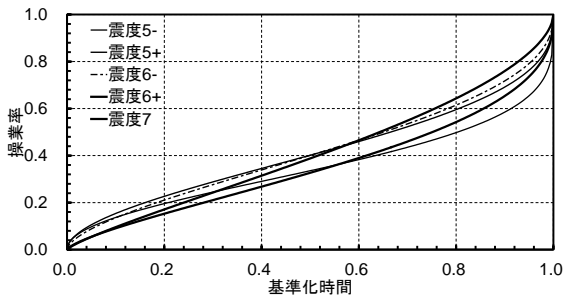


図 23. PGA を換算した震度別の標準化復旧曲線

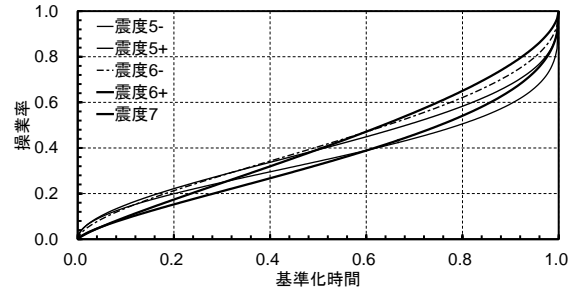


図 24. PGV を換算した震度別の標準化復旧曲線

表 5. 3 次多項式の係数と決定係数

回帰式の係数等	PGA		PGV	
	α	β	α	β
x^3 の係数	-1.37E-5	4.65E-4	-0.536	5.513
x^2 の係数	-6.50E-4	-1.51E-2	0.486	-8.417
x の係数	3.83E-2	1.32E-1	0.450	3.989
定数項	4.19E-1	9.22E-2	0.399	0.174
決定係数	0.999	0.998	0.997	0.998

の震度の場合に比べて単調増加する指数関数のような形状をした標準化復旧関数の標本数の多寡が影響していると考えられる。表 4 に震度別の標本数とベータ分布のパラメータをそれぞれ示す。なお、震度 3 以下および震度が無回答の事業所があるため、表 2 の標本数と全事業所数は一致していない。図 18 に震度別の復旧関数を示す。震度 4 を除くと震度が大きくなるにしたがい、時間に対する復旧関数の傾きが緩やかになっていることが分かる。なお、震度 4 のみ傾向が異なっているのは全復旧時間 T_{ri} の平均値が他の震度のものと比較して長くなっていることが原因である (図 19)。その理由はサプライチェーンの停止などにより T_{ri} の長い事業所が含まれていたためである。なお、業種、従業員数、前年度売上高および事業継続計画の有無の範疇による標準化復旧関数等も算出したが、範疇ごとの顕著な傾向を確認することができなかった。

3.2.5 地震動強さに依存するベータ分布パラメータ

(1)PGA, PGV を指標とする標準化復旧関数

3.5(2)項で述べたように、震度に対して標準化復旧関数の傾きが変化する傾向が確認された。ここでは地震動強さの影響を考慮した標準化復旧関数の提案を試みる。しかし、地震動強さの指標である震度は連続する物理量で

はなく、また地震動強さと被害割合の関係を表す被害率曲線に関する既往の研究では、地震動強さとして地表面最大加速度(PGA)や地表面最大速度(PGV)を利用している場合が多い⁴⁾。これらのことから、本研究で得られた結果を復旧時間の予測に利用することを鑑み、以下では PGA や PGV を用いた標準化復旧関数の推定式の導出を試みる。すなわち、式(8)に示すベータ分布の確率密度関数による標準化復旧関数を定式化する。

$$f(\hat{t}, s_i) = \frac{1}{B\{\alpha_i(s_i), \beta_i(s_i)\}} \hat{t}^{\alpha_i(s_i)} (1 - \hat{t})^{\beta_i(s_i)} \quad (0 \leq \hat{t} \leq 1) \quad (8)$$

ここに、 s_i は地震動強さである PGA または PGV を表し、 α_i および β_i は s_i の関数として表現される。

(2)震度と PGA, PGV の関係

はじめに震度と PGA, PGV の関係を得る必要がある。実施したアンケートは無記名式であり、個人・法人が特定されないように実施された。そのためアンケートには被災震度を記入する項目があるが所在地は不明であり、PGA, PGV を推測する必要がある。そこで、各地域ともアンケート配布先から同一の確率で回答があったと仮定し、所在地付近にある K-net, KiK-net の本震記録から計算した震度と PGA, PGV の平均値との関係を得た。このようにして得られた震度と PGA, PGV の関係を図 19 に示す。震度に対して PGA, PGV とともに指数関数のような形状となっている。図 19 の結果を元に、アンケートに記載のあった震度と PGA, PGV を関連付けた。

(3)ベータ分布のパラメータ

表 4 に示した震度とベータ分布パラメータ α, β との関係、PGA, PGV との関係に変換したものを図 21, 22

表 6. アンケート調査の実施概要

項目	内容
目的	2011年東北地方太平洋沖地震における生産施設の被害と復旧状況の把握
実施期間	2011年9月1～9月30日
対象	震度5弱と推定される地域にある生産事業所
配布先	岩手県、宮城県、福島県、栃木県、群馬県、茨城県、千葉県、埼玉県
配布数	2,150通
回答数	267通 (回答率: 12.4%)
形式	無記名方式 (選択・記述)
調査実施者	金沢工業大学 地域防災環境科学研究所 山岸邦彰研究室

表 8. 事業所外の操業停止または操業度低下理由

電気供給の停止
ガス供給の停止
水道供給の停止
交通網の遮断
サプライチェーン企業の事業中断または操業度低下
その他

表 7. 事業所内の操業停止または操業度低下理由

事業継続計画により一時中断することになっている
従業員の方々の安否が確認されていない
従業員の方々が出社できない
生産設備(機械)の損傷
生産設備(貯蔵)の損傷
事業所内にある材料、仕掛品などの損傷
事業所内にあるインフラ(電気)の損傷
事業所内にあるインフラ(水道・給水・消火)の損傷
事業所内にあるインフラ(ガス)の損傷
事業所内にあるインフラ(空気)の損傷
事業所内にあるインフラ(原料・粉体など)の損傷
事業所内にあるインフラ(油)の損傷
事業所内にあるインフラ(蒸気)の損傷
事業所内にあるインフラ(薬液)の損傷
事業所内にあるインフラ(排水・廃液)の損傷
建築物(構造躯体)の損傷
建築設備(電気、衛生、空調など)の損傷
建築仕上げ(間仕切り壁、天井、建具など)の損傷
その他

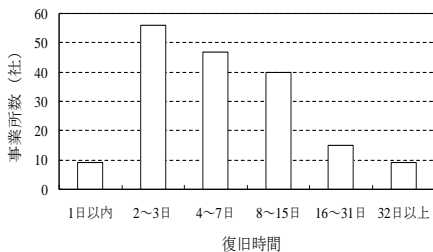


図 25. 復旧時間に対する事業所数

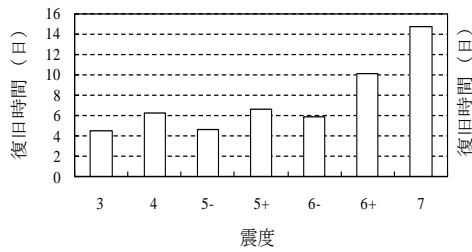


図 26. 震度に対する復旧時間

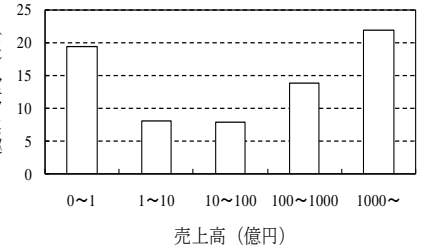


図 27. 売上高に対する復旧時間

にそれぞれプロットする。 α, β とも PGA, PGV に対して滑らかに変化する傾向がある。次に、パラメータ α, β を PGA, PGV の関数として回帰することを考える。回帰式には地震動強さに対する α, β の変化を説明できる 3 次多項式を用いた。表 5 に回帰分析によって得られた各種係数等を、図 21, 図 22 これらの係数を用いた α, β の回帰曲線をそれぞれ示す。PGA, PGV とともに回帰式とほぼ一致している。

表 5 に示した回帰曲線を用いて得られる PGA, PGV に対する基準化復旧関数を図 23, 図 24 にそれぞれ示す。なお、これらの図は図 20 に示したように PGA, PGV を震度に換算して得た基準化復旧関数である。これらの基準化復旧関数を利用することにより、平均的な復旧曲線を得ることができると考えられる。

3.3 生産施設の事業中断因子の抽出

3.3.1 復旧時間と各種要素の関係

(1) アンケート調査の概要

本研究では、北林・藤原²²⁾のアンケート調査結果を基に事業所の復旧時間を分析した。表 6 にアンケート調査の実施概要を示す。本調査では、災害の影響が大きく、事業継続に対する意識が高い生産施設を対象としている。アンケートの配布先は、沿岸地域を除く 8 県に所在する事業所のうち、当該地域における気象庁震度が 5 弱以上と推定される事業所である。事業所の所在地は、インターネットの公開情報を用いた。

アンケート調査では震災に関連した様々な質問をしているが、操業率の時間変化を図化してもらったことが本調査の特徴である。また、23 個の「操業中断または操業度低下理由」から選択してもらったと同時に、それらの原因が除去されるまでの時間を記載してもらった。本研究では、これらの回答を基に分析を行った。表 7, 8 に事業所内外における操業中断または操業度低下理由を示す。

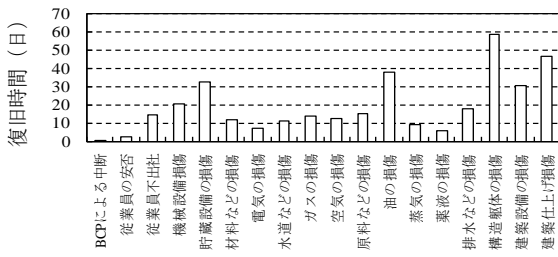
(2) 復旧時間の算出

各事業所の復旧時間を調べるため、震災後、操業度が 0% に落ちてから操業度が回復し始めるまでの時間を算出した。図 25 に復旧時間のヒストグラムを示す。アンケートの総回答数 267 のうち、復旧時間を算出することができたのは 176 であった。2~3 日の事業所数が 56 社となり最も多く、続いて 4~7 日の事業所数が 47 社となっている。また、全事業所の平均日数は 10.1 日、標準偏差は 17.1 日、最大日数は 184 日となり、各事業所の復旧時間には大きな差があることが分かる。

(3) 復旧時間と各要素の関係

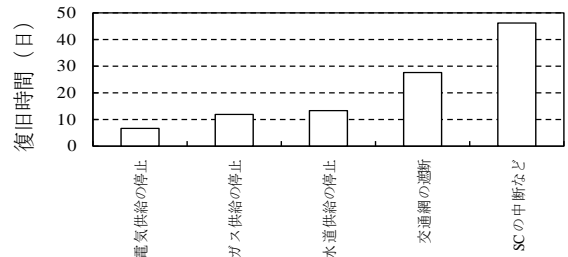
復旧時間と各要素の影響を把握するために、要素別の平均復旧時間を算出する。ここでは、復旧時間との関係が明確に見られた、事業所の震度、売上高、事業所内外の操業停止理由を要素として取り上げる。

図 26 に震度に対する復旧時間の平均値を示す。震度の「-」は弱、「+」は強を表している。震度が大きくなると復旧時間も長くなる傾向にある。震度が大きくなると生



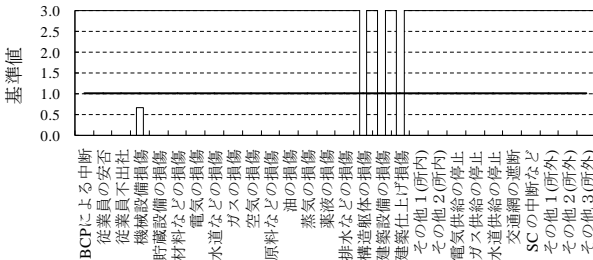
事業所内の操業停止理由

図 28. 事業所内の操業停止理由に対する復旧時間



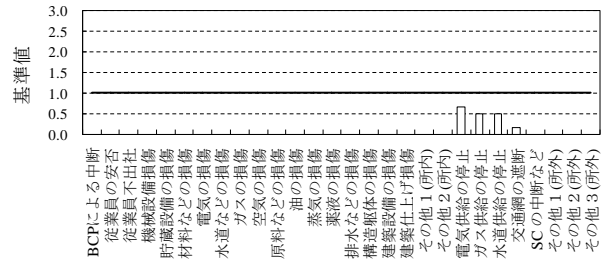
事業所外の操業停止理由

図 29. 事業所外の操業停止理由に対する復旧時間



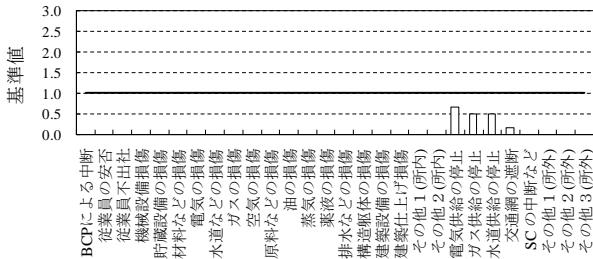
操業中断または操業度低下理由

図 30. 事業中断要素の基準化復旧時間の例 1



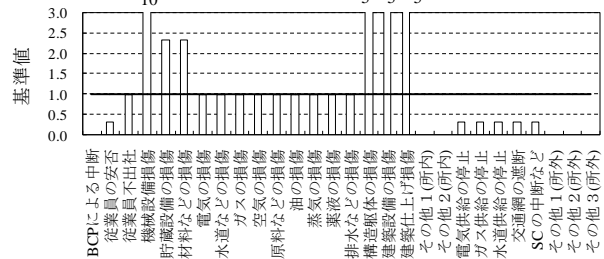
操業中断または操業度低下理由

図 31. 事業中断要素の基準化復旧時間の例 2



操業中断または操業度低下理由

図 32. 事業中断要素の基準化復旧時間の例 3



操業中断または操業度低下理由

図 33. 事業中断要素の基準化復旧時間の例 4

産設備、建築物等の被害が増加し、復旧に時間が掛かるものと推測される。

図 27 に売上高に対する復旧時間の平均値を示す。1 億円未満の企業は復旧時間が長いですが、1 億円以上になると売上高が大きくなるにしたがい復旧時間が長くなる傾向が確認される。売上高と事業規模は一定の相関があることから、事業規模が大きくなるにしたがい復旧時間が長くなる傾向があることが分かる。図 28 に事業所内の操業停止理由に対する復旧時間の平均値を示す。構造躯体の損傷によるものが最も復旧時間が長く、続いて建築仕上げの損傷となっている。すなわち、建築関連の損傷は復旧時間に与える影響が大きいと考えられる。次に油（インフラ）の損傷となっているが、回答数が少ないため復旧時間に対する影響の信頼性は低い。図 29 に事業所外の操業停止理由に対する復旧時間の平均値を示す。サプライチェーン(SC)の復旧時間が最も長く、次に交通網の遮断の復旧時間が長い。サプライチェーンが中断することにより、生産や調達などの体制が整わず、事業再開への影響が大きいと考えられる。サプライチェーンが高度化した現在、この維持が事業継続に不可欠であることが分かる。

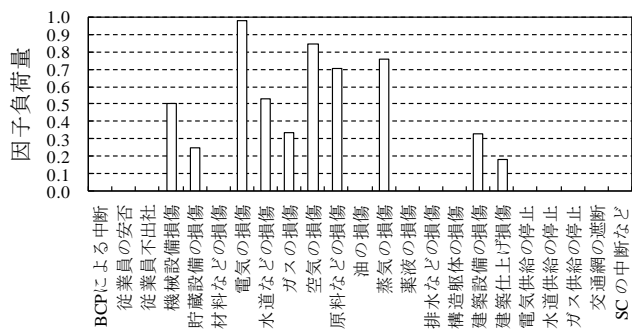
3.3.2 各事業所における事業中断要素の影響

(1) 事業中断要素の分析概要

「操業中断または操業度低下理由」を事業中断要素とし、各事業所におけるこれらの要素の回復時間と復旧時間の関係を把握する。各事業中断要素の回復時間を復旧時間で除することにより、両者の関係を見る。

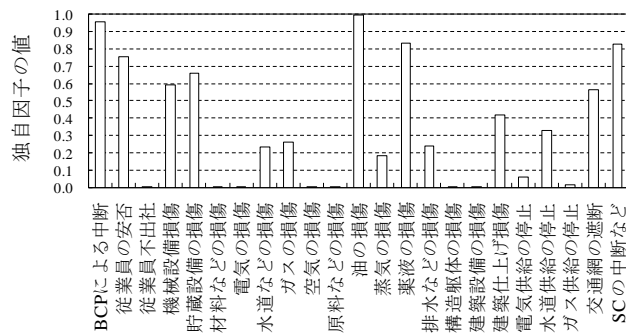
(2) 分析結果

各事業所の復旧時間に対する事業中断要素の回復時間の比を算出することができたのは、176 社中 129 社であった。ここではこれらの比のうち、代表的な事業所の例を図 30～図 33 に示す。棒グラフは事業中断要素の基準化された回復時間であり、縦軸の 1.0 は基準化された復旧時間を表す。図 30 では、建築躯体、建築設備、および建築仕上げの損傷が主な事業中断要素であることが分かる。これらの要素が完全に回復する前に事業が再開されている。図 31 では、機械設備、所内インフラ、建築設備の損傷が主な事業中断要素となっている。本事例では従業員の不出社により事業が再開されている特徴がある。図 32 では、所外インフラの供給停止が事業中断要素となっている。事業の再開が、所外インフラの回復直後ではなくやや遅れている。図 33 では、様々な施設・設備の損傷が事業中断要素になっているだけでなく、従業員の不出社や所



操作が中断または操業度が低下した理由

図 34. 共通因子に対する各要素の因子負荷量



操作が中断または操業度が低下した理由

図 36. 事業中断要素に対する独自因子の値

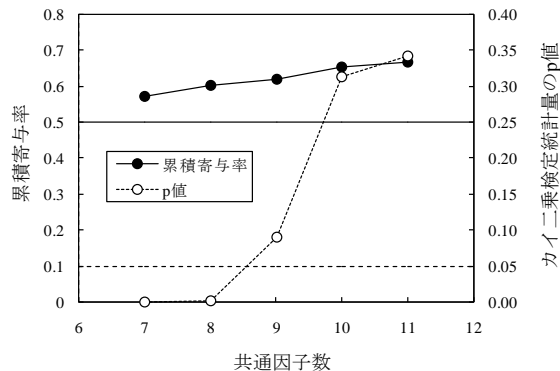


図 35. 共通因子数に対する累積寄与率と p 値

表 9. 事業中断因子

因子	因子名	主な因子内要素
Factor 1	生産インフラ	電気, 空気, 蒸気配管等の損傷
Factor 2	所外インフラ	ガス, 電気, 水道供給の停止
Factor 3	建築物	構造躯体, 建築仕上げの損傷
Factor 4	排水・水道	排水, 水道配管の損傷
Factor 5	従業員不出社	従業員不出社
Factor 6	ガス	ガス配管の損傷
Factor 7	建築設備	建築設備の損傷
Factor 8	材料	材料等の損傷
Factor 9	その他インフラ	薬液等の損傷
Factor 10	貯蔵設備	貯蔵設備の損傷

外インフラの損傷も事業中断に影響している。本事例も図 31 と同様に従業員の不出社により事業が再開されている特徴がある。

以上のように、事業所により事業中断要素が変化するだけではなく、建築の損傷のように要素によってはその事由が完全に回復する前に事業が再開されるものもある。これらの分析結果から事業復旧と事業中断要素の回復には何らかの相関があり、復旧時間に影響を及ぼす共通因子の存在が予測される。

3.3.3 事業中断因子に関する分析

(1)分析概要

ここでは、これらの共通因子と復旧時間の関係を把握するため、因子分析を適用して事業中断因子を抽出する。因子分析(Factor analysis)とは、多くの変数により記述された量的データの統計分析方法であり、変数間の相関関係から共通因子を求めることにより、多くの変数を少数個の共通因子にまとめて説明することが目的である。因子分析では、観測データにおける変数(観測変数)の間の関連成分をまとめたものを共通因子(common factor)と呼び、他の変数と関係がなく、その変数のみ持っている成分を独自因子(unique factor)と呼ぶ。因子分析には統計分析ソフト R を使用し、因子軸の回転には Varimax 回転を適用した。共通因子数は、カイ二乗検定統計量の p 値が 0.05 以上(帰無仮説)、累積寄与率が 0.5 以上となる最小の因子数とし、各因子の命名は因子負荷量が 0.5 以上となる要

素から想像される単語を使用した。因子負荷量(Factor loading)とは、各要素と共通因子との関連度の高さを意味し、その絶対値は 0~1 の値となる。絶対値が 1 に近づくほど関連度が高い要素であるといえる。

ある共通因子に対する各要素の因子負荷量を図 34 に示す。この図から、電気、空気、蒸気等の損傷に関する要素の因子負荷量が 0.5 を超えている。これらの要素は生産に関わるインフラに関わる要素であるため、「生産インフラ」と命名する。以下では、このように共通因子を抽出し、命名を行う。

(2)分析結果

図 35 に共通因子数に対する累積寄与率とカイ二乗検定統計量の p 値の関係を示す。共通因子数が増加するにしたがい両者は増加するが、因子数が 8 を超えると p 値は顕著に増加する。p 値が 0.05 を超えると統計的に有意であるとみなされる。また、共通因子数が 10 以上になると累積寄与率が 0.6 を超える。累積寄与率は 0.5 以上である場合に一般的に有意とみなされる。以上より共通因子数は 10 以上が良いと考えられるが、同数が 11 以上の場合に因子負荷量の小さい因子が多く現れた共通因子が発生した。このような共通因子に対して命名することは困難であるため、以下では共通因子数を 10 における分析結果を示す。なお、この場合の p 値は 0.314、累積寄与率は 0.657 である。

図 36 に事業中断要素の独自因子の値を示す。23 種中 8 種の要素が 0.5 を超える独自因子の値になっている。これ

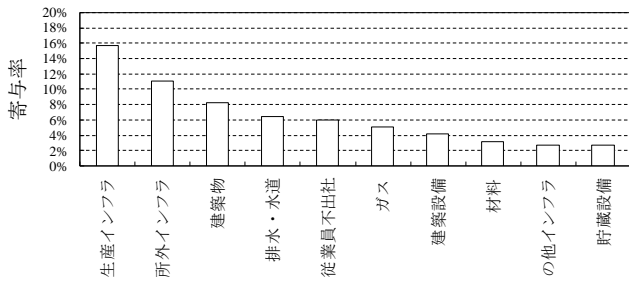
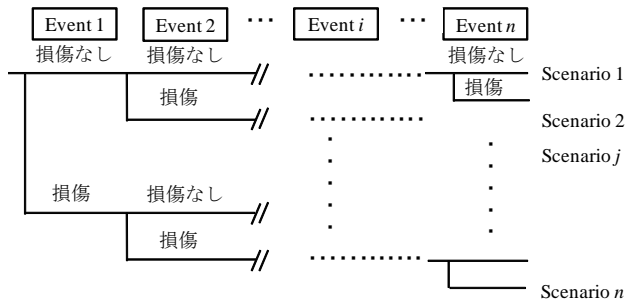


図 37. 事業中断因子に対する寄与率



$$\text{外力レベル } \mu_s \text{ での損失額 } D_s = \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \prod_{t=1}^i f_{j,t}(\mu_s) \right\} \cdot C_j \right]$$

図 39. E/T 解析における損失率の算出

種の要素が 0.5 を超える独自因子の値になっている。これらの要素は独自性が強く、他の要素との関連性があまりないことが分かる。

表 9 に抽出された事業中断因子を示す。主な因子内要素は、因子負荷量の値が高い順に記述した。Factor 9, 10 の因子名は、因子負荷量が 0.5 を超える数値が得られなかったため、数値の高い要素から想像される単語を使用し、命名した。

図 37 に事業中断因子の名称とそれぞれの寄与率を示す。生産インフラ、所外インフラ、建築物の順に寄与率が高く、これらの因子が事業継続において重要な因子であるといえる。すなわち、生産に関わる設備は直接的に重要であることは容易に理解できるが、建築物の耐震性も重要な要素であることが分かる。

3.4 地震・風・洪水に対するリスク計算方法の提案

3.4.1 自然災害リスク評価方法の概要

災害による損傷確率とその修復コストを災害発生確率で乗じた損失額の確率量をリスクとする。自然災害リスクの評価フローを図 39 に示す。自然災害リスクの評価手順は、(1)リスク評価の対象となる建築部位の抽出、(2)各自然気象の Hazard 曲線の算定、(3)各 Event の Fragility 曲線の算定、(4) Event Tree(E/T)解析による建築部位の再調達コストの算出、(5)自然災害リスク評価の順である。(1)は災害によって被害を受ける建築部位の決定を行う。本研究では一次災害によって建築物に生じる被害のみを考え、二次災害や人的被害等は考慮しない。(2)は既往の Hazard

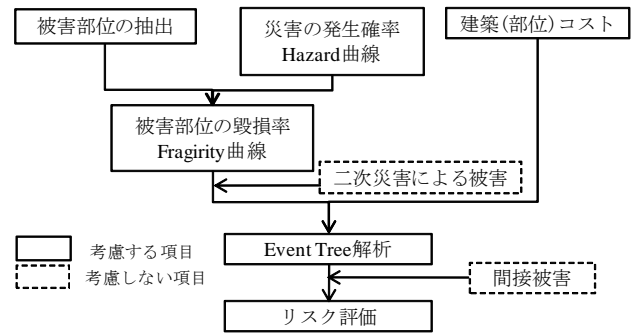


図 38. 自然災害リスクの評価フロー

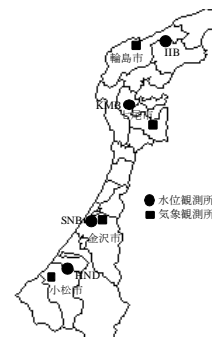


図 40. リスク評価対象地点

曲線がある場合にはその曲線を、ない場合には各気象に関係する過去のデータを用いて、自然科学や災害分野で多用される Gumbel 分布による極値統計に基づく Hazard 曲線をそれぞれ適用する。(3)は事象の強度例えば、地動最大速度(PGV)、浸水高、風速に対する建築各部位の被害率を表す Fragility 曲線を推定する。(4)は被害発生状況を整理しやすく、従属 Event の設定が容易な E/T 解析である(図 40)。リスク評価の対象となる建築物の各部位の再調達価格を推定し、(3)で表された被害率に建築部位構成比を乗じることで建物の損失率を計算する。再調達価格は、JBCI²⁷⁾に基づいている。(5)は(4)から算出された各災害の損失率と(2)の Hazard 曲線からリスク評価する。以上が自然災害リスク評価手順の概要であるが、具体的な計算は次章以降に記述する。

3.4.2 リスク評価例

(1)リスク評価対象地点

図 40 にリスク評価の対象地点を示す。対象地点は石川県内の 4 地点であり、洪水 Hazard を適切に反映させるために河川水位観測点を対象地点に選定した(金沢市犀川沿い示野橋(SNB)、小松市梯川沿い埴田(HND)、七尾市熊木川沿い加茂橋(KMB)、輪島市町野川沿い石井橋(IIB))。また、これらの地点における過去の風速データは存在しないため、これらの地点に最寄りの気象観測所の風速データを使用して風 Hazard を計算する。図 40 に最寄りの気象観測所の位置を示す。なお、地震 Hazard は地震ハザードステーション(以下、J-SHIS、防災科学技術研究所)の

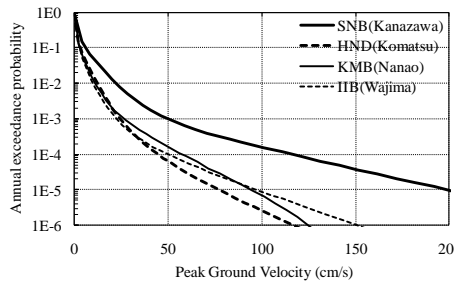


図 41. PGV の Hazard 曲線

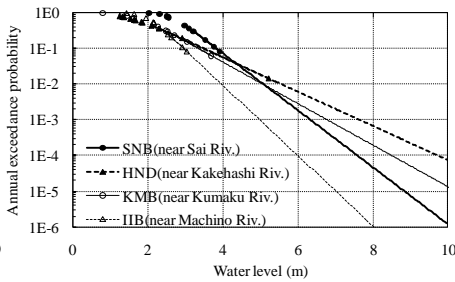


図 42. 河川水位の Hazard 曲線

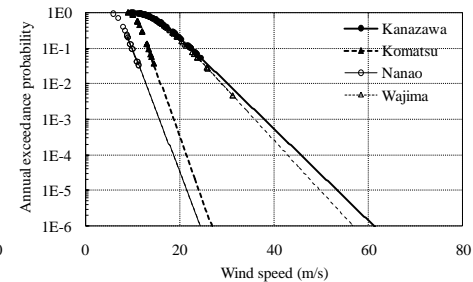


図 43. 最大風速の Hazard 曲線

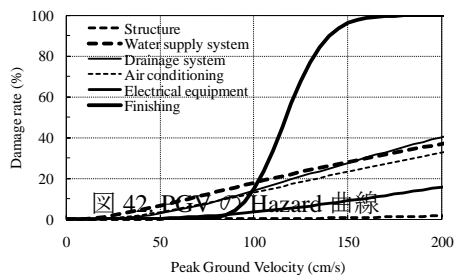


図 44. 地震による建築部位被害率

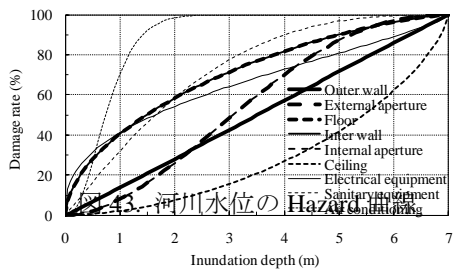


図 45. 洪水による建築部位被害率

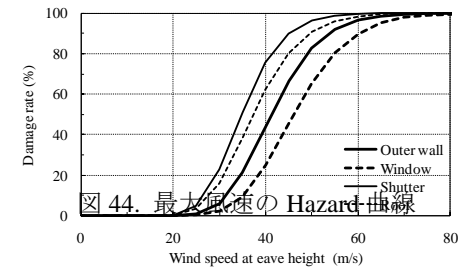


図 46. 強風による建築部位被害率

データを使用するため、当該地点の地表 Hazard を適用する。

(2) リスク対象部位の抽出

各自然災害リスク評価の対象となる部位の抽出を行う。地震リスク評価における対象部位は、建築を構成するすべての部位が対象になると考えられる。これらの部位を細分化すると計算が煩雑になるため、躯体、設備、仕上を対象部位とする。設備については給水、排水、空調、電気の各設備に分化し、合計 6 部位を対象とする。なお、地震に伴い発生する津波被害、インフラや人的被害等の二次被害は考慮しない。洪水リスク評価における対象部位は、大きな被害を受けると考えられる仕上、電気設備、衛生設備、空調設備とする。さらに、仕上は外壁、外部開口部、内部床、内壁、内部開口部、内部天井に分け、合計 9 部位を対象とし、浸水による躯体の被害はないものとする。なお、洪水に伴い発生する土砂災害、復旧日数や人的被害等は考慮しない。風リスク評価における対象部位は、被害事例の多い外壁、窓ガラス、屋根、シャッターの 4 部位とし、風による躯体への被害はないものとする。なお、風による外装材被害は、開口部が破損すると内圧の変化により建物内にも被害が及び波及的に被害が増加する可能性があるが、今回は内圧の変化は考えないものとする。

(3) 地象・気象の Hazard 曲線の算定

地象・気象の Hazard 曲線は、各事象の過去のデータを用いて、Gumbel 分布による極値統計に基づき作成することを基本とする。ただし、地震 Hazard 曲線は J-SHIS から得る。図 41 に評価地点の PGV の Hazard 曲線を示す。横軸を地象・気象の強度、縦軸を年超過確率で表現する。

以降すべての Hazard 曲線に対してこの座標軸を適用する。これらの 4 地点では SNB の Hazard が有意に高く、年超過確率 0.001 の場合に他の地域と比べて PGV が約 2 倍となっている。なお、J-SHIS のデータは BPT モデルに基づく再生過程を用いているため年超過確率を計算することはできない。しかし、今後 T 年間の発生確率が p である地震動強さの年超過確率を、 T 年間でならした式(9)によって評価する。

$$p_a = 1 - (1 - p)^{1/T} \quad (9)$$

図 42 に河川水位の Hazard 曲線を示す。プロットは石川県土木河川課の水位観測所における河川水位の年最大値から Gumbel 分布を適用したものであり、片対数軸上で直線状に並ぶプロットを回帰して Hazard 曲線を得た。常の集中豪雨による梯川の洪水は本 Hazard によると $p_a \approx 0.01$ に相当する。図 43 に最大風速の Hazard 曲線を示す。プロットは図 40 に示す気象観測所で得られたデータを使用している。金沢と輪島の Hazard が高く、続いて小松、七尾となっている。前 2 者は後 2 者のほぼ 2 倍大きい。

(4) 建築部位の Fragility 曲線の算定

自然災害によって被害を受ける抽出した建築各部位の Fragility 曲線を推定する。ここでは、2 階建 RC 造の一般事務所を対象とする。地震リスクを計算するための Fragility 曲線は構造躯体を宮腰ほか²³⁾、非構造部材、建築設備を岡村ほか²⁴⁾、北林ほか²²⁾とする。各数値を用いて各部位の Fragility 曲線を図 44 に示す。横軸を地象・気象の強度、縦軸は被害率で表現する。以降全ての Fragility 曲線に対してこの座標軸を適用する。仕上げ以外は同様の形状をしているが、仕上げはばらつきの少ない曲線とな

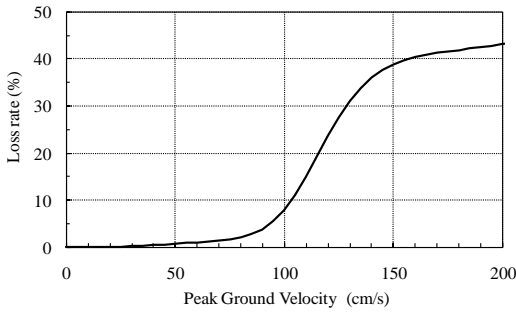


図 47. PGV に対する損失率曲線

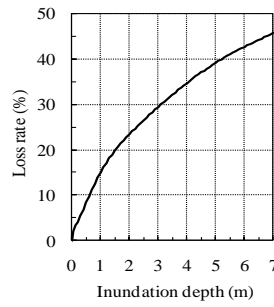


図 48. 浸水深に対する損失率曲線

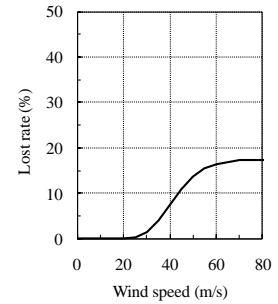


図 49. 強風に対する損失率曲線

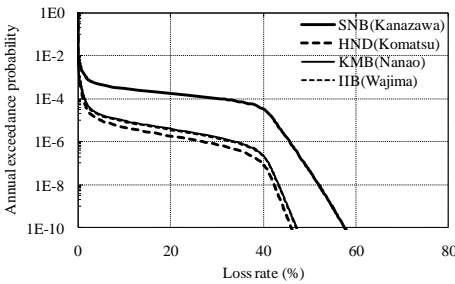


図 50. 地震リスク曲線

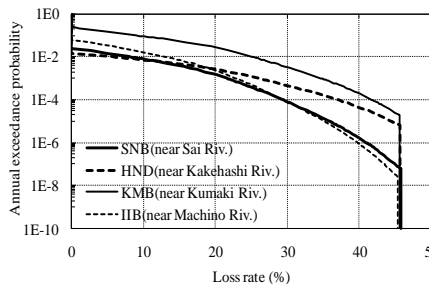


図 51. 洪水リスク曲線

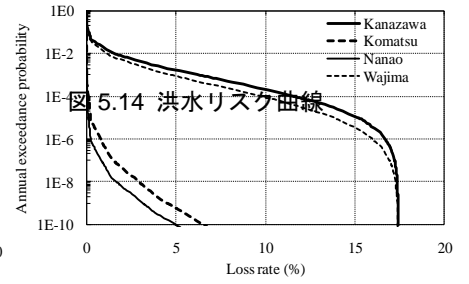


図 52. 強風リスク曲線

っている。躯体は RC 造のため被害を受けにくい。浸水による被害率は、浸水高に伴う建築各部位の被害率を想定し、治水経済調査マニュアル²⁵⁾に基づく住家の洪水被害率とをキャリブレーションすることにより、中高層建築物に対しても適用可能な Fragility 曲線を推定した。各部位の Fragility 曲線を図 45 に示す。各部位の割合が 1F 部分に多いと考えられ、多くの部位が 2F まで浸水する前に被害は 6 割以上になる。

強風の被害率は、部材耐力と最大荷重の確率分布から計算する。本研究では、このようにして研究された佐々木ら²⁶⁾の研究を引用する。各部位の Fragility 曲線を図 46 に示す。被害率はシャッター、屋根、外壁、窓ガラスの順で高い。シャッターや屋根は他の建築部位より設計風荷重が小さく、耐力が小さくなるため被害率は高くなる。

(5) E/T 解析による損失率の算出

E/T 解析では、各災害のリスク評価対象となる各部位の再調達価格を JBCI²⁷⁾に基づき推定し、各部位の被害率に建築部位構成比を乗じて損失率を計算する。ここでは各災害ですべての部位が被害を受けた場合とする。図 47 に PGV に対する損失率曲線を示す。横軸を地象・気象の強度、縦軸は損失率で表現する。以降全ての損失率曲線に対してこの座標軸を適用する。PGV に対する損失率は PGV が 100cm/s 以降で損失率が高くなる、図 44 から分かるように仕上の被害率が影響している。また、仕上の構成比は建物全体の約 3 割を占めているため損失率が高くなる。図 48 に浸水に対する損失率曲線を示す。建物全体が浸水した場合でも躯体への被害がないため損失率は 5 割弱となる。図 49 に風速に対する損失率曲線を示す。風による被害は外装材にのみ発生するため、損失率は風速 80m/s の場合でも建物全体の 2 割弱の損失である。

(6) 各自然災害リスク評価

各災害のリスク曲線は、E/T 解析により算出された損失率と Hazard 曲線の関係から作成する。図 50 に評価地点の地震リスク曲線を示す。横軸を損失率、縦軸を年超過確率で表現する。以降全てのリスク曲線に対してこの座標軸を適用する。これらの 4 地点では、SNB は Hazard が高いためリスクが高く、他の 3 地点では大きな差はない。洪水リスクは、堤防の破堤による洪水ではなく堤防の溢流による洪水を考えているため、浸水深さを河川水位か

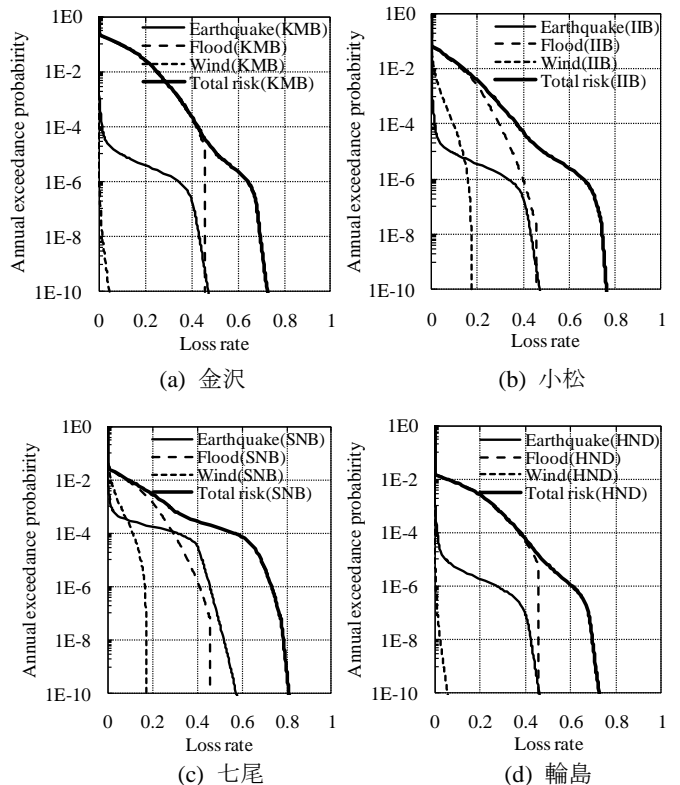


図 53 自然災害リスク評価

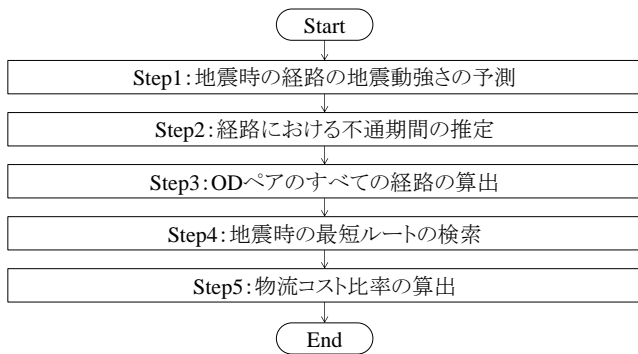


図 54. 物流リスクの評価フロー



図 55. 南海トラフ地震の予想震度

ら氾濫危険水位を引いて求める。図 51 に評価地点の洪水リスク曲線を示す。KMB のリスクが高いが、これは氾濫危険水位が低いことが原因である。他の 3 地点は年超過確率で低いほど HND の損失率は高くなる。図 52 に評価地点の強風リスク曲線を示す。金沢市、輪島市、小松市、七尾市の順にリスクが高く、前 2 者は Hazard が高いため、後 2 者とリスクに大きな差がある。リスクも高くなる。

(7)自然災害リスク評価

図 54 に各自然災害が独立に発生すると仮定し、これらのリスクを確率和したトータルの自然災害リスクを示す。これらの結果、七尾市、輪島市のリスクが高い。これは、七尾市は洪水リスクが高く、輪島市は風リスクが高いためである。年超過確率が 4×10^{-3} 以下では金沢市が最もリスクが高くなる。金沢市のリスクが高い理由は、他の地域に比べて地震リスクが高いためである。

3.5 事業環境に関連したリスクの評価方法の提案

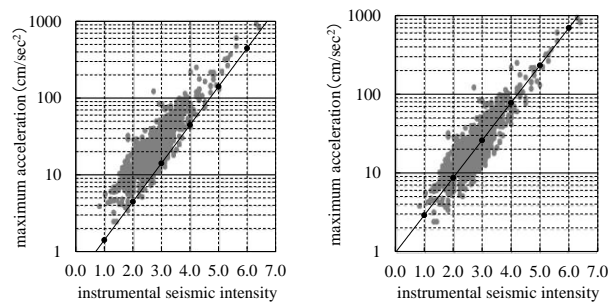
3.5.1 地震時の物流リスクの評価手法

(1)評価の手順

物流リスクとは災害時における物流コストの増加による利益損失リスクを表す。ここでは常時に対する震災時の物流コストの比を計算し、物流コストの増加率（以下、物流コスト比率）を計算する。震災時の物流リスク評価の流れを図 54 に示す。初めに経路の地震動強さを推定する(Step1)。次に地震動強さと経路の不通期間の関係を得る(Step2)。次に OD ペアの全ての経路を探索する(Step3)。次に地震後に通行可能な最短ルートの検索を行う(Step4)。最後に物流コスト比率の算出を行う(Step5)。物流コストは OD 間の到達時間に比例するものと考え、常時の物流コストは最短の到達時間で表現される。なお、本論で考える経路は国内の高速道路のみとし、走行速度は不通時を 0km/h、開通時を高速道路の通行車両の平均時速である 76.9km/h とする²⁸⁾。

(2)経路の地震動強さの予測

経路の不通期間を予測するために経路に生じる地震動強さを予測する必要がある。ここでは地震動強さの例として、内閣府の南海トラフ地震推定震度²⁹⁾を用いる。市区



(a) $a=$ 式(11)

(b) $a=$ 式(12)

図 56. 最大加速度と震度の関係

町村別に得られた予測震度を図化したものを図 55 に示す。濃淡で震度の大小を示し太平洋側の自治体で濃度が高くなっている。一般的に地震動強さを震度で表現しているものが多いが、震度は物理量（加速度など）との比較が困難であるため、ここでは震度を地表面最大加速度(PGA)に変換する。震度と PGA の換算式として河角式³⁰⁾ (式(10))が有名であるが、河角式は旧震度との関係式であり、現在適用されている計測震度との関係式を再構築する必要がある。図 56(a)に 1988~1994 年及び 1995 年兵庫県南部地震の記録の計測震度³¹⁾と PGA の関係を示す。片対数軸上で計測震度と PGA は比例関係にある。同図に式(10)を重ねて表示する。式(10)は散布図の下側に表示され、適切に回帰しているとは言い難い。そこで、式(10)の係数を修正して回帰式を再構築する。図 56(b)に式(10)の係数を変更したものを示す。式(11)を式(12)に変更することにより図 56 (b)のように式(10)が良好に回帰している様子わかる。以上のことから本論では、式(12)を用いた式(10)により予測震度から PGA を推定する。

$$I = 2 \log(a) + 0.7 \quad (10)$$

$$a = 10^{\frac{I-0.7}{2}} \quad (11)$$

$$a = 10^{\frac{I-0.03}{2.1}} \quad (12)$$

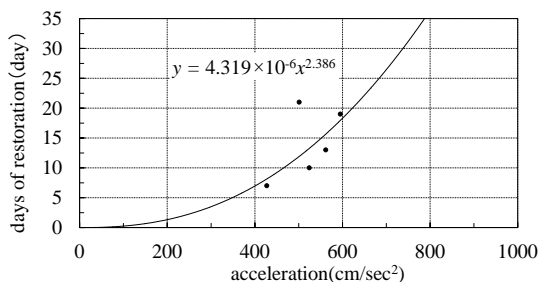


図 57. 最大加速度に対する復旧日数

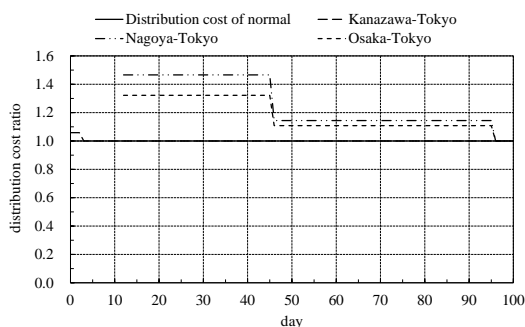


図 58. 物流コスト比率

(3)不通期間の推定

2011 年東北地方太平洋沖地震による高速道路の復旧状況³²⁾をもとに、PGA に対する高速道路の復旧曲線を作成する。はじめに、式(13)によりある道路区間の平均加速度を計算する。ここで、 l_i は市区町村の行政界で区切られる高速道路の道のり、 a_i は同市区町村の 2011 年東北地方太平洋沖地震における震度である。文献 31)と式(13)で得られる平均 PGA \bar{a} の関係を図化すると図 57 になる。文献 32)から 5 地点プロットすることができた。さらに、これらのプロットの回帰曲線を得る (式(14))。式(14)を使用することにより、高速道路が地震被害を受けた場合の、復旧日数を推定することができる。

$$\bar{a} = \frac{l_1 a_1 + \dots + l_i a_i}{\sum_i l_i} \quad (13)$$

$$y = 4.319 \times 10^{-6} x^{2.386} \quad (14)$$

(4)物流コスト比率の算出

常時の場合の物流経路は、すべての経路のうち最短で目的地に到着できる経路とする。また、災害時の物流経路は、通行可能な経路のうち最短で目的地に到着できる経路とする。

南海トラフ地震が発生した場合の、物流コスト比率の結果を図 58 に示す。ここでは金沢-東京間、名古屋-東京間、大阪-東京間の 3 つの OD ペアの比較を行う。横軸は地震発生時を 0 日とした時間軸、縦軸は常時の物流コストを 1 とした物流コスト比率である。金沢-東京間は地震発生から 2 日間は 1.059 倍の物流コストが発生するが、地

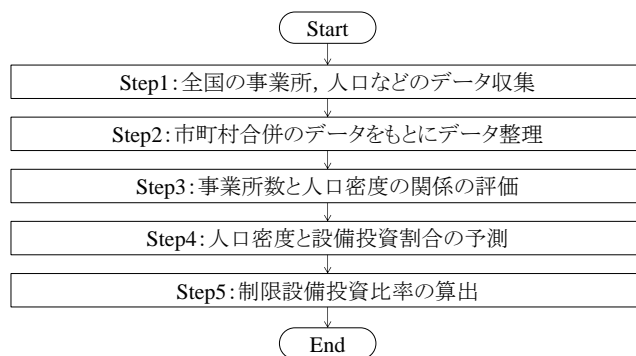


図 59. 宅地化リスクの評価フロー

表 10. 使用したデータ

データ名	収集データの期間
事業所数	1979～2007 年
人口	1995～2014 年
市町村合併	1999～2014 年
面積	2013 年 10 月 1 日時点

震発生 3 日目以降は常時の物流経路の通行が可能となり物流コスト比率が 1 となった。南海トラフ地震が発生した場合、名古屋-東京間、大阪-東京間は最小でも震度 6 弱の影響を受ける。そのため、12 日以前は物流が停止するという結果になった。地震発生 13 日目～100 日目までの常時の物流コスト比率を 1 としたとき名古屋-東京間は 1.257 倍、大阪-東京間は 1.182 倍という結果になり、大阪-東京間よりも名古屋-東京間のほうが物流コストは大きくなることが分かった。このことから、名古屋-東京間は金沢-東京間、大阪-東京間に比べ、物流リスクが高いという結果になった。この理由としては、名古屋-東京間の最短経路である東名高速道路、新東名高速道路が大きな地震被害を受けることが原因であると考えられる。この 2 本の高速道路が寸断されることにより、迂回路として使用される経路が遠回りとなるからである。以上のことを考慮すると、名古屋、大阪に事業立地をすることに比べ、金沢で事業立地をすることにより南海トラフ地震が発生した場合の物流リスクを大幅に軽減できる結果になった。

3.5.2 宅地化リスクの評価手法

(1)評価の手順

事業所周辺が宅地化されることにより、敷地拡張の困難や、周辺からの制約が厳しくなるなどのリスクは事業所に多大な災害を及ぼす。そこで、本研究では事業所周辺で宅地化が進展すると、その事業所は設備投資ができないと仮定し、今後設備投資ができない状況をリスクとして評価する。ここでは宅地化により事業拡張できない期間の設備投資率の積分値を制限設備投資比率と呼ぶ。制限設備投資率が大きい程、事業立地に向いていないと

言える。

宅地化リスク評価の流れを図 59 に示す。初めに、全国の事業所数、人口、面積、市町村合併、設備投資率のデータを収集する(Step1)。次に、Step1 で収集した市町村合併のデータをもとに、事業所数、人口のデータを整理する(Step2)。次に、Step2 で整理したデータから事業所数と人口密度の関係性を読み取り、事業所数の変化量が増加から減少に変化する際の人口密度を算出する(Step3)。次に、将来の事業所数と人口密度の予測を行う(Step4)。最後に、今後 50 年間の制限設備投資比率を求める(Step5)。

(2)宅地化関連データの整理

事業所数³³⁾、人口³⁴⁾、市町村合併³⁵⁾、面積のデータ³⁶⁾の収集した期間を表 10 に示す。本研究では各データの共通する 1999~2007 年の期間のデータを使用することとする。時々刻々と変化する自治体の同じ地点を評価するため、市町村合併のデータを使用し 2007 年の市区町村名を基準にデータ整理を行う。

(3)事業所数と人口密度の関係

全国の事業所数と人口密度の関係を図 60(a)、各自治体の事業所数と人口密度の関係を図 60(b)~(e)に示す。ここでは、例として横浜市、名古屋市、大阪市、福岡市の結果を示す。第 1 縦軸を事業所数、第 2 縦軸を人口密度とする。ここで、宅地化による事業所数の増減を評価するため、景気の影響に左右されないよう、1999 年の事業所数を 1 とし、各年の事業所数の比率を乗じ事業所数を補正した。

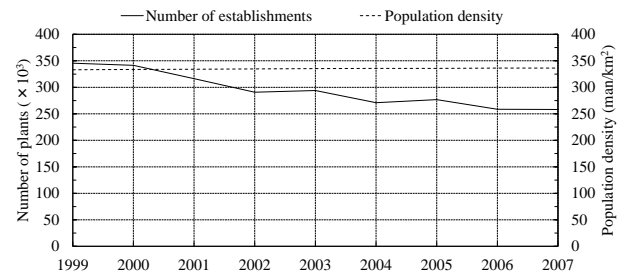
図 60(a)を見ると、人口密度の変化は小さいが、事業所数は減少傾向にある。また、横浜市、名古屋市、大阪市、福岡市の人口密度は微量な増加傾向にあり、事業所数は減少傾向にある。

ここで、事業所数が増加傾向から減少傾向に変化する際の人口密度を算出する。縦軸に各自治体の 1999 年から 2007 年までの事業所数の変化率、縦軸に各自治体の 1999 年から 2007 年の平均の人口密度をプロットしたグラフを図 61 に示す。図 61 より、人口密度が大きくなるに従い、事業所数は減少する傾向にあることがわかる。重回帰分析の結果から、図 61 のプロットを直線回帰し、 x 軸との交点を求めると 5621.6 人/km^2 になった。このことから、人口密度が 5621.6 人/km^2 を超えると事業所数は増加傾向から減少傾向に変化すると考える。

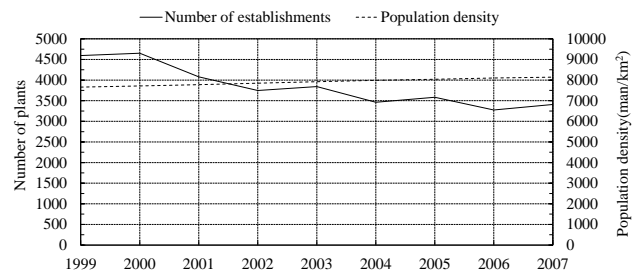
(4)今後 50 年間の制限設備投資率

今後 50 年間の人口密度、設備投資率³⁷⁾を予測し、人口密度が 3.5.2(3)で述べた 5621.6 人/km^2 を上回ると設備投資ができないと評価し、制限設備投資比率を算出する。

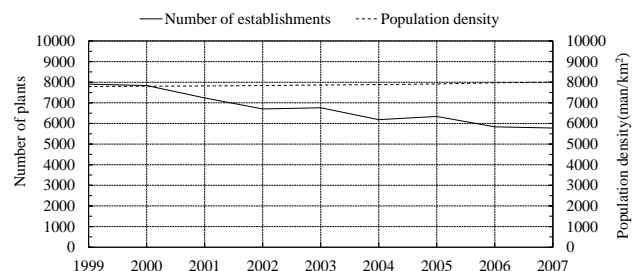
まず、人口密度の予測は 1999 年から 2007 年までの人口密度をプロットし直線回帰する。算出された回帰線の関数から将来の人口を推測する。しかし、この推測方法では予測に誤差が生じる。そのため、人口問題研究所の



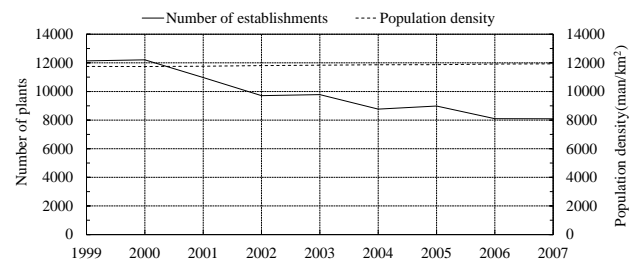
(a) 全国



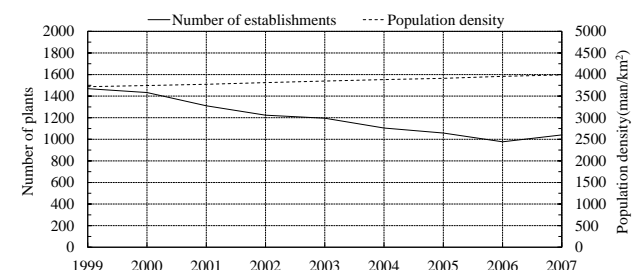
(b) 横浜市



(c) 名古屋市



(d) 大阪市



(e) 福岡市

図 60. 事業所数と人口密度の動態

人口予測³⁸⁾で割戻し、予測の精度を上げる。設備投資率に関しても同じ予測方法を使用し、将来の設備投資比率

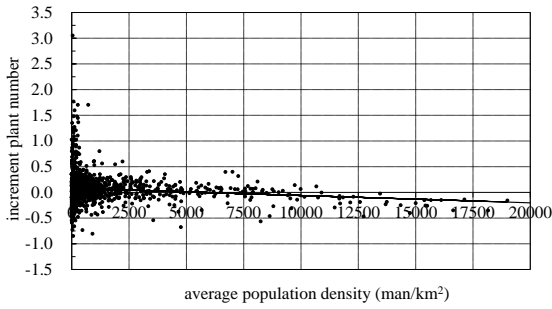
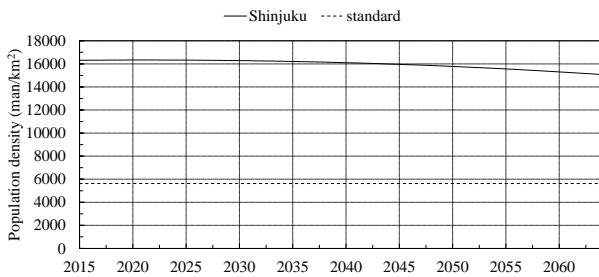
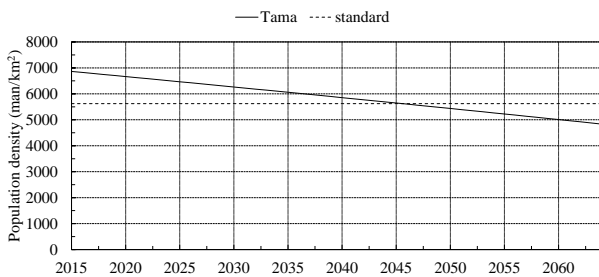


図 61. 人口密度と事業所数の増加数の関係

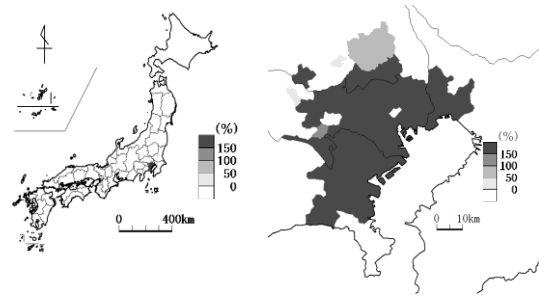


(a) 新宿区



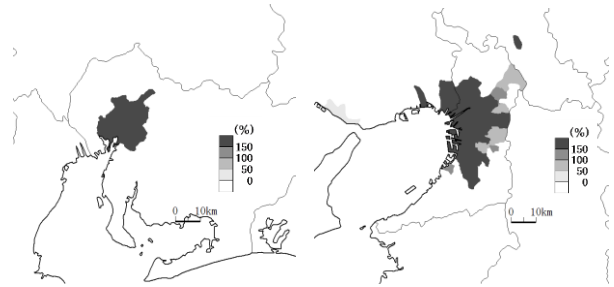
(b) 多摩市

図 62. 人口密度予測



(a) 全国

(b) 首都圏



(c) 愛知県

(d) 大阪府



(e) 福岡県

(f) 沖縄県

図 63. 制限設備投資比率

を予測する。人口密度の予測結果を図 62 に示す。例として、新宿区と多摩市を挙げる。新宿区では 50 年間すべてで 5621.6 人/km² を上回っている。多摩市では 2015 年から 2045 年までは人口密度が 5621.6 人/km² を上回り、それ以降は下回っている。これらの結果から新宿区の今後 50 年間の制限設備投資比率は 200.8%，多摩市のそれは 123.9% となる。今後 50 年間の制限設備投資比率をマップ化したものを図 63 に示す。制限設備投資比率が高い地域は人口が集まりやすい首都圏、名古屋市、大阪市を中心とした地域となった。今後 50 年間すべてで 5621.6 人/km² を上回っている地域でも、人口密度は減少傾向にある地域が多いため、宅地化リスクは今後、減少するものと考えられる。

4. 実効性のある提言

本課題である、巨大津波による建物被害の迅速な災害復興対策を考案するにあたり、1 章で述べた背景を元に事業継続の観点から災害復興の実効性を高める以下の 5

項目について提言する。

(1) 非構造材の Fragility 曲線の提案

事業継続計画を立案する上で最も重要なことの一つに目標復旧時間の設定がある。目標復旧時間を設定するためには、現状の施設・設備の脆弱性を定量的に捕捉し、災害レベルに対応する現状の復旧時間を精度良く予測することが不可欠である。蓋然性の低い災害に対して一意に復旧時間を予測することは不可能であるため、復旧時間を確率量として予測計算することが望ましい。確率計算をする場合には事物の脆弱性を把握する必要がある。これを Fragility 曲線と呼んだ。地震リスクの計算の開発・発展に応じて躯体の Fragility 曲線の精度は高まったが、躯体以外のその曲線に関する研究は少ない。本課題で提案した非構造体、特に天井の Fragility 曲線を提案することにより、事業所の実況に対応した復旧時間を予測することが可能になり、適確な事業継続戦略の立案に寄与することができる。と考える。

(2)復旧曲線のプロトタイプの提案

前項の提言技術を用いることにより事業リソースに対応した復旧時間を予測できる。しかし、実際の事業所の復旧時間との整合性は確認できていない。2011年東北地方太平洋沖地震はわが国で事業継続が普及を始めてから最初の大規模災害であった。そこで、本震災における事業所の復旧時間の統計値から、復旧時間の平均像を抽出することが重要になる。本課題では操業率の時間変化を復旧関数、実時間を操業率が100%となるまでの時間で除した基準化時間に対する操業率の時間変化を基準化復旧関数と定義し、震度別の各関数の統計値を提示した。これらの関数を利用することにより、平均的な操業率の時間変化を想定することが可能になる。これまで極めて観念的、主観的であった復旧時間の予測に数量的な根拠を示すことができる。事業所のリスク対策の程度により当該事業所の復旧時間はこれらの平均像から前後することになるが、復旧曲線の基準を提示できたことは意義が大きい。ただし、これらの曲線は1災害の統計結果であり、今後の災害を踏まえこれらの関数の精度を高めていく必要があることは言うまでもない。

(3)2011年東北地方太平洋沖地震の事業中断要因

2011年東北地方太平洋沖地震における企業のアンケート結果から計算される復旧時間に着目し、事業中断要素と復旧時間の関係を図化し、また因子分析によって復旧時間に関係する事業中断因子を抽出した。因子分析の結果、事業中断因子が10個抽出され、復旧時間に対する寄与率が高い順に生産インフラ、所外インフラ、建築物となっていることが分かった。このことから復興に必要なリソースが明確化され、これらの災害対策を基本とすることが効果的な対策になる。

(4)地震、風、洪水に対するリスク計算方法の提案

地震以外の災害を対象とした災害リスク計算を行うことにより、立地に起因する自然災害リスクを評価することができるようになる。これまでは自治体のハザードマップ等を参考にしてリスクを定性的に捉えることは広く行われているが、リスクという被害額の確率量で表現することにより同一基準でリスクの高低を評価することが可能になる。ただし、強風リスクについては外装材が毀損した場合の雨水浸入による損失リスクが反映されていないこと、洪水については地盤の高低差による浸水高さの違いが反映されていないこと、等の方法論に改良の余地があるが、3個の自然災害に対するトータルリスクを提示できたことについては意義があると考えられる。

(5)事業環境リスクの計算方法の提案

事業立地選定のために必要となる事業環境リスク、ここでは特に物流リスクと宅地化リスクの計算方法を提案し、各都市・地域の各リスクの計算を行った。事業環境リスクについては他にも電気、上水（地下水を含む）、

排水などインフラのリスクを計算する必要があるが、事業継続計画を立案する上で重要な結論が得られたと考えている。事業環境リスクの低い立地を選定し、事業展開をすることにより、各事業所のリスクは低減され、ひいてはわが国全体のリスクが低減される。今後は残されたリスク評価の提案を早急に実施し、これを広く公知させ、わが国の事業継続力を高めるよう微力を尽くしたい。

謝辞

本研究において、公益社団法人日本河川教会の雨量・流量年表データベース、地震ハザードステーション（防災科学技術研究所）、東北大学（災害科学国際研究所津波工学研究分野）および原子力安全基盤機構（現原子力規制庁）の津波痕跡データベース、国土交通省の構造別・階数別分析のデータを使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。また、地震後の対応でご多忙な中、アンケート調査にご協力頂いた事業所の方々に深く感謝いたします。

また、入力地震動の作成の際は防災科学技術研究所のK-net、KiK-netの強震記録を使用させて頂きました。また、石川県土木河川課の水位データと気象庁過去の降水・強風データ、J-SHIS地震ハザードステーションを使用させて頂きました。さらに、擬似速度応答スペクトルの計算には独立行政法人建築研究所の鹿嶋俊英氏が開発した強震記録の解析プログラムViewWaveを使用させて頂きました。最後に、当時金沢工業大学建築学科学学生であったの中井雄也氏、梅田祐生氏、林彰人氏、および浅岡文章氏の多大な協力を賜りました。併せてここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：2020年度までの都道府県別成長率予測2013.5,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm (2014年3月アクセス).
- 2) 桑島滋：2020年度までの都道府県別成長率予測～拡大する東京と縮小する地方圏、ニッセイ基礎研究所、No.2011-05, 2011.12.
- 3) 中村孝明, 遠藤透：BCPへの貢献を目的とした建物の機能性確保に関する研究, 日本建築学会総合論文誌, No.7, pp.87-92, 2009.1.
- 4) 佐藤一郎, 矢代晴実, 太田孝平, 福島誠一郎：既往の被害率曲線のまとめ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.359-360, 2006.9.
- 5) 日経アーキテクチュア：天井大全, 日経BP社, 2012.9.
- 6) 川口健一, 中楚洋介, 萩芳郎, 大場康史：日本科学未来館における天井落下被害と膜天井による復旧, 生産研究, Vol.63, No.6, pp.78-81, 2011.

- 7) 大場康史, 川口健一: 2011 年東北地方太平洋沖地震による空港ターミナルビル内天井落下に関する調査速報その 1: 被害概要と考察, 日本建築学会大会梗概集, B-1 分冊, pp.759-760, 2011.8.
- 8) 佐藤恭章, 元結正次郎, グレゴリー・マックレイ: モンテカルロシミュレーションを用いた鋼製下地在来工法天井の損傷評価, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.527-531, 2012.3.
- 9) 山岸邦彰, 仙名修二: 生産施設を対象とした事業継続管理における復旧時間の簡易予測方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 675 号, pp.783-790, 2012.2.
- 10) 佐藤一郎(2013): 自然災害の特徴とリスク対応, 品質 Vol.43, No.2, pp.185-191, 2013.4.
- 11) 内閣府: 事業継続ガイドライン 第一版 一わが国企業の減災と災害対応の向上のために一 解説書, 企業等の事業継続・防災評価検討委員会, pp.1-27, 2007.10.
- 12) 日本建築学会: 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 2003.1.
- 13) 小林俊夫, 由利隆行, 荒井智一: 鋼製天井下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 630 号, pp.1295-1302, 2008.8.
- 14) 佐々木晴夫, 高井賢, 松本譽明: 天井落下・崩落の要因分析, 日本建築学会大会梗概集, A-1 分冊, pp.1283-1284, 2012.9.
- 15) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災調査報告 共通編-5 非構造部材 材料・施工, 2000.5.
- 16) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 26 内装工事, 2006.2.
- 17) 柴田明德: 最新耐震構造解析 第 2 版, 森北出版株式会社, 2003.5.
- 18) 森田佑輔, 元結正次郎, 中川祐介: 天井の動的特性およびすべり発生条件 (小規模天井試験体による鋼製下地在来工法天井の鋼製下地在来工法天井の動的実験 その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.865-866, 2007.8.
- 19) 国崎洋, 元結正次郎, 中西敦士: 野縁方向における天井面の圧縮性能の吊りボルトが与える影響 (鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究 その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.883-884, 2012.9.
- 20) 岡本肇, 富岡雄一, 高橋拓, 山本正人, 嶺脇重雄, 鴨下直登: 在来天井の耐震性向上に関する研究 その 2 複合要素試験体の静的載荷試験, 日本建築学会大会梗概集, A-1 分冊, pp.1105-1106, 2013.8.
- 21) 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査研究 (速報), 国土技術政策総合研究所資料, 建築研究資料 国総研資料 第 636 号, 建築研究所資料 第 132 号, 2011.5.
- 22) 北林昂祐, 藤原孝: 2011 年東北地方太平洋沖地震における生産施設の地震被害と事業継続の現状, 金沢工業大学プロジェクトデザインⅢ, 2012.2.
- 23) 宮腰淳一, 神原浩, 福和伸夫, 山口司: 構造的な被災度判定基準に基づく被害率曲線, 日本建築学会大会学術講演梗概, B-2 分冊, pp. 25-26, 2013.7.
- 24) 岡村大樹, 横山健志(2011): 生産施設の休業期間予測に関する研究, 金沢工業大学プロジェクトデザインⅢ, 2011.2
- 25) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル, 2005.4.
- 26) 佐々木亮治, 野田博, 作田美知子, 山岸邦彰: 外装材の部材耐力に基づいた強風災害リスク評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.229-232, 2013.8
- 27) 建設物価調査会: ジャパン・ビルディング・コスト・インフレーション JBCI 2013, 2013.
- 28) 国土交通省: 平成 22 年度全国道路・街路交通情勢調査 (道路交通センサス), 2010.
- 29) 内閣府: 南海トラフ巨大地震対策 報道発表資料, 2001
- 30) 河角広: 震度と震度階 (続), 地震, 第 15 巻, 第 8 号, pp5-12, 1943.8.
- 31) 国土交通省気象庁, 総務省消防庁: 震度に関する検討会報告書, pp.1-18, 2009.3.
- 32) 東日本高速道路株式会社: 交通の支障となる障害を受けた路線・区間の道路状況, 2013.3.
- 33) 経済産業省経済産業政策局: 工業統計アーカイブス, <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/archives/index.html>, (アクセス 2014.9.14)
- 34) 総務省統計局: 他の年月の統計表一覧, http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020102.do?_toGL08020102_&classID=000001028704&cycleCode=7&requestSender=estat&statCode=000001039591, (アクセス 2014.9.15)
- 35) 総務省自治行政局: 市町村合併資料集, <http://www.soumu.go.jp/gapei/gapei.html>, (アクセス 2014.9.16)
- 36) 国土地理院: 平成 25 年全国都道府県市区町村別面積調, <http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/201310/opening.htm>, (アクセス 2014.9.15)
- 37) 総務省統計局: 平成 25 年度結果の概要, <http://www.stat.go.jp/data/kojinke/sokuhou/nendo/pdf/gaiyou.pdf>, (アクセス 2014.9.20)
- 38) 人口問題研究所: 日本の将来推計人口 (平成 24 年 1 月推計), <http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/sh2401top.html>, (アクセス 2015.12.22)

研究テーマ 1

課題 1-7

巨大地震による既存木造住宅の 耐震化対策

金沢工業大学 後藤正美 教授

課題 1-7 巨大地震による既存木造住宅の耐震化対策

金沢工業大学

教授
後藤 正美

南海トラフ 防災対策 巨大地震
木造住宅 耐震補強

1. 研究目的

近年、大きな被害を伴う地震が多発しており、木造住宅の耐震性を確保するための補強が求められている。しかし、現行基準を満足するように既存の木造住宅の耐震性を補強することは、経済的に大きな負担となる。

ここでは、被災時に人命を確保することができることを目的として、補強することで経済的な負担を軽減する方法について検討する。

2. 解決法

2.1 既存の木造住宅の耐震性

建物プランの分類

既存の木造建物 167 棟を対称に図面調査を実施した。分類種類選定方法として、建物プランを A~D の 4 種類に分類し、その後立面にて 2 階建ての建物を①~③に分

屋」、「その他」として分類する。

既存の木造建物の耐震性能を設計図面から壁量計算し、その充足率を明らかにした。各分類の棟数を図 2 に示す。

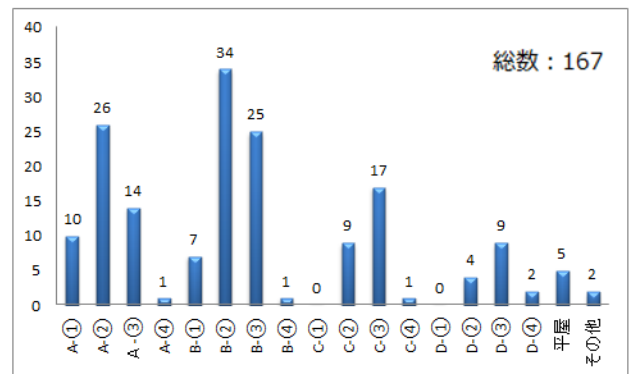


図 2 各分類の棟数

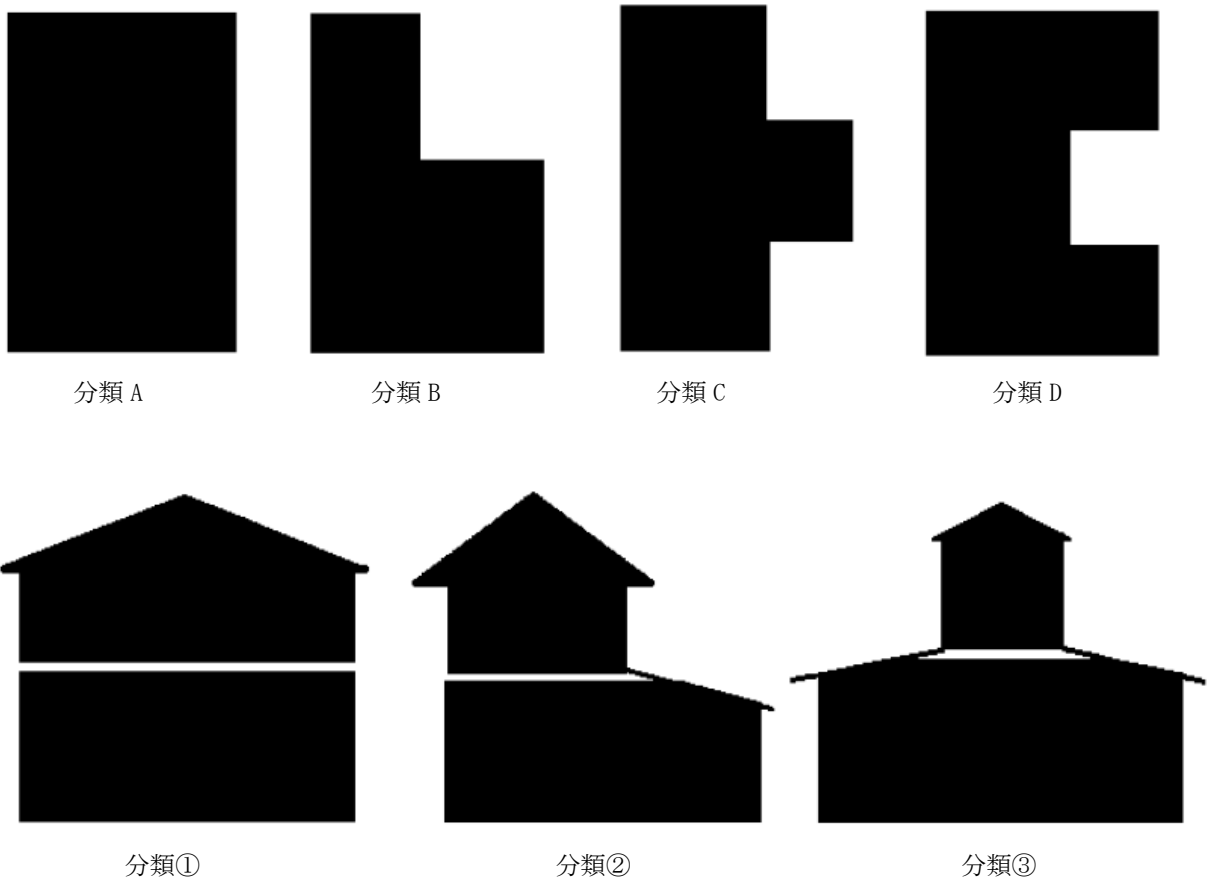


図 1 建物形状の分類

類した。平屋や、車庫・店舗が付属している建物は「平

建物を 12 項目に分類し、1 階の充足率の計算を行った。

分類ごとに散布図に表した。比較的棟数の多い 5 つの分類の充足率を図 5-6 に示す。

簡易的な診断ではあるが、半数以上建物の充足率が 1.0 を下回っており、早急の耐震対策が必要である。

既存の木造の耐震補強法の提案と断熱性能を兼ね備えた壁の提案を行う。

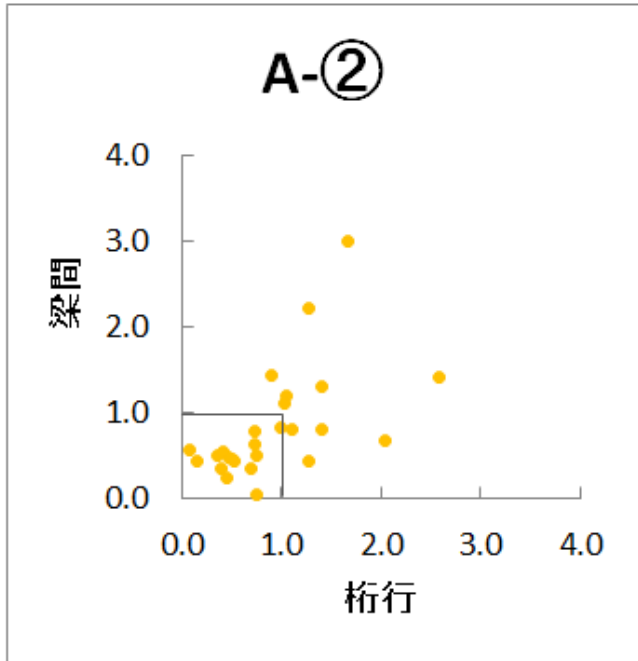


図 3 A-②分類の充足率

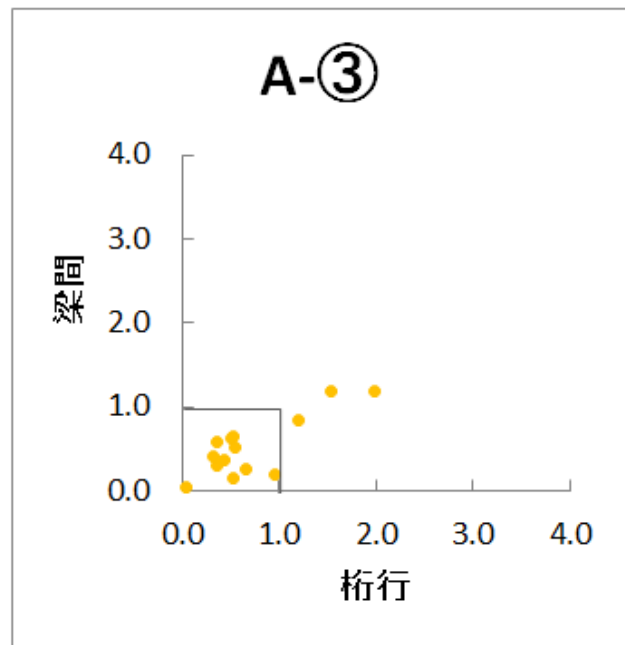


図 4 A-③分類の充足率

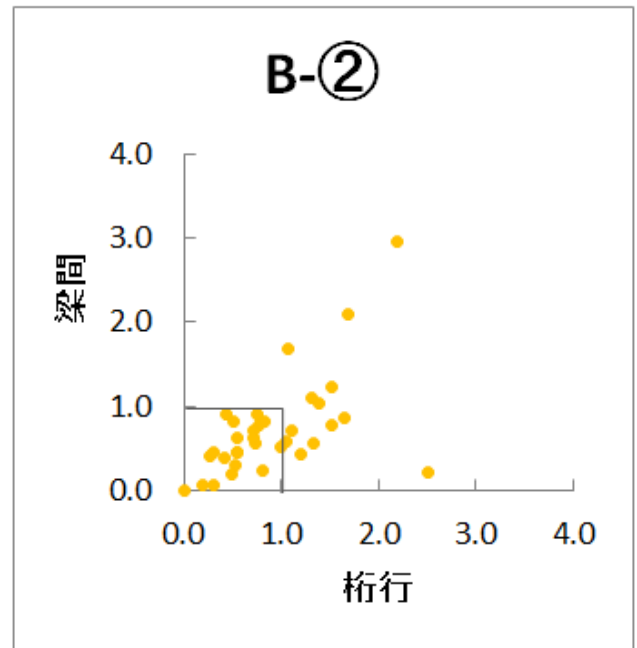


図 5 B-②分類の充足率

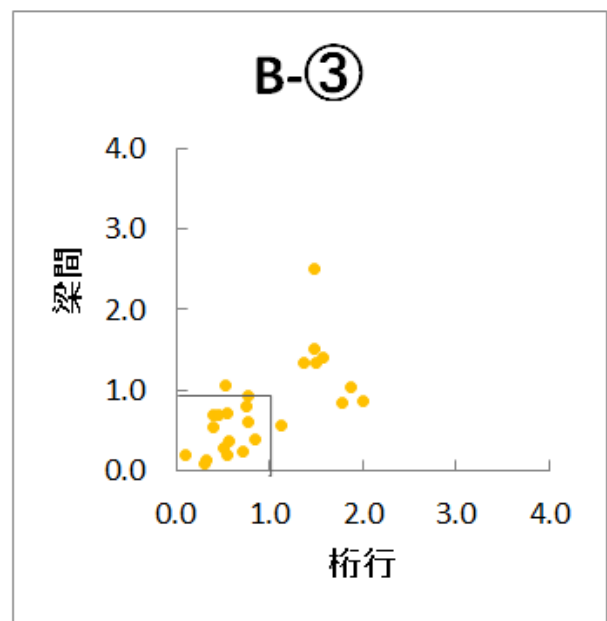


図 6 B-③分類の充足率

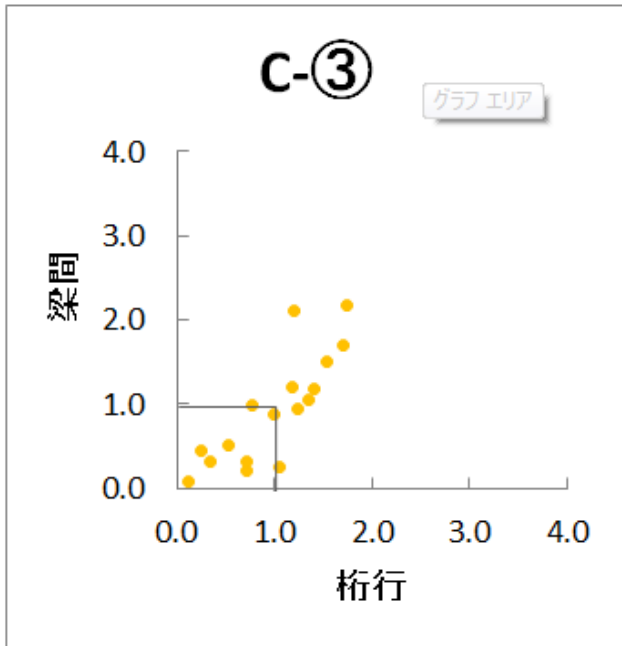


図7 C-③分類の充足率

2.2.2.1 既存の木造建物の補強法の提案

既存の木造建築物は地域ごとに使用されている材種や軸組の構造、土壁の仕様が異なり、耐震性能評価を正当に行うためには現地での詳細調査を行う必要がある。岐阜県高山市上二之町、上三之町、大新町の伝統的木造建造物群保存地区に指定されている既存の木造住宅 12 棟を対象に構造詳細調査を実施した。

伝統的な土壁を対象に、板壁の補強法を検討する。



写真1 併用壁の実例

壁の板壁部分は化粧板であり、土壁部分は裏返しなしであったため高い耐震性能が期待出来ない。そこで板壁部分の補強を行い、耐震性能を向上せることを目的とし、板壁部分の補強法を提案・検討する。

土壁と板壁を併用した壁の耐震性能を評価するととも

に、今後の設計法を構築するために、板壁、土壁、土壁と板壁の併用壁の 3 種類の試験体を対象に実験を行い、それぞれの力学的性能を明らかにする。土壁と板壁の実験結果を足し合わせ、板壁の軸組の特性を引き算することで、併用壁の復元力特性を推定する。

板壁は木材のめり込み抵抗に期待しているもので、補強として使用するときには、木材の緊結度が耐震性能に大きく影響する。

ここでは、既存の壁を補強することが目的であるので、後施工が可能な構法を提案する。



写真2 板壁受け材

実験概要

反力フレームに試験体の土台をアンカーボルトで固定、梁は面外方向へふれ止めで固定し、各柱に 10kN の鉛直荷重を載荷し、静的水平正負 3 回繰り返し加力実験を行う。試験体の設置状況を図 2、写真 5 に示す。加力スケジュールは木造軸工法軸組住宅の構造設計に基づいて、 $1/450 \sim 1/50$ [rad]までを行い、それ以上の変形では構面のせん断変形角が $1/30$ 、 $1/15$ 、 $1/10$ 、 $1/7$ [rad]に正負繰り返し履歴を追加した。 $1/30$ [rad]以降では各試験体に顕著な破壊が見られた場合、その変形角で実験を終了している。

計測は以下の①～④の点を基本とする。

①柱脚・柱頭の抜け ②頂部水平変位 ③土台の水平変位 ④貫の水平変位 試験体A～Dの計測は上記の基本に加え、以下の点を計測の対象とする。

(1) 枠材へのめり込み (2) 板のずれ (3) 貫の回転角 (4) ほぞのめり込み (5) 板のせん断変形

試験体 K～N にあたっては試験体 A～D で計測した箇所、試験体 E～J で計測した箇所の双方を加えて計測する。

図 8～11 に各試験体の履歴曲線を示す。



写真 3 実験の概要

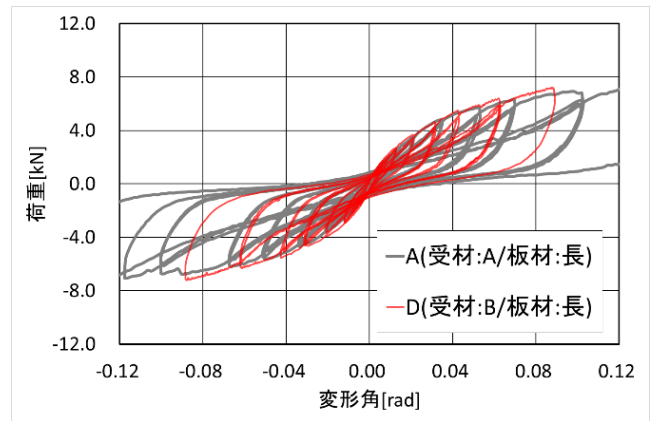


図 10 試験体 I, J の頂部水平荷重と変形角関係

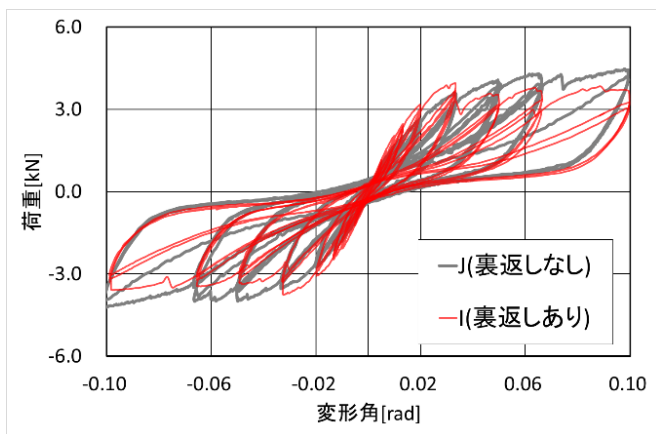


図 8 試験体 A, D の頂部水平荷重と変形角関係

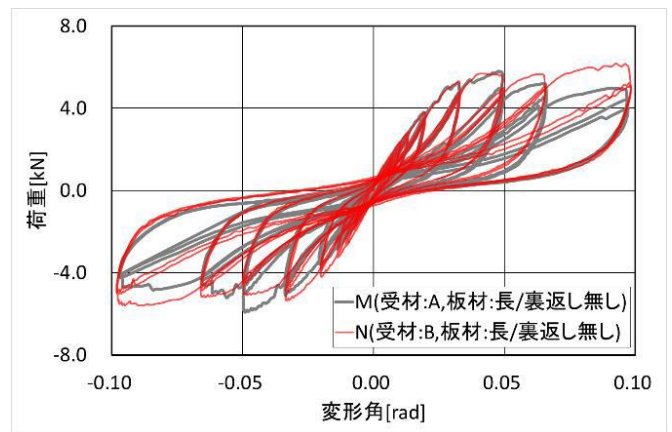


図 11 試験体 M, N の頂部水平荷重と変形角関係

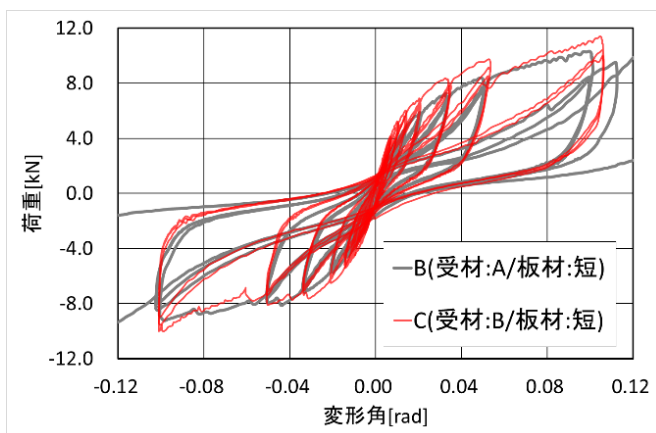


図 9 試験体 B, C の頂部水平荷重と変形角関係

図 4、5 より板壁の受材の仕様の違いによる差はみられなかった。実験は変形角 $1/7$ [rad]までを行ったが、各試験体で破壊による値の下降は見られなかった。また試験体 A～D の板壁試験体では、 $1/30$ [rad]から板壁の受材の柱へのめり込みが発生した。 $1/7$ [rad]で釘の板材へのめり込み、浮き上がりが発生した。図 6 より、試験体試験体 J は変形角 $1/50$ [rad]で表面に木骨に沿って亀裂が生じ、試験体 I は $1/10$ [rad]で表面に大きな亀裂が生じた。

3. 方法の検証

発泡材を用いた木造住宅用の耐力壁を開発することを目的に、発泡材の加工方法および取り付け方法を提案し、静的加力実験によって力学的なメカニズムを明らかにする。

試験体

基本となる軸組は、柱—梁で構成され、寸法は、柱間を 1820 mm、高さを 2730 mm、柱断面 105 mm 角、桁断面 105 × 180 mm、土台断面 105 mm 角とし、材料はすべてスギとした。基本の軸組に発泡材を取り付けて耐力壁とし、発泡材の加工方法および取り付け方法をパラメータとして実験を行った。表 1 に試験体の概要を示し、図 12～17 に代表的な試験体図、全体写真を示す。

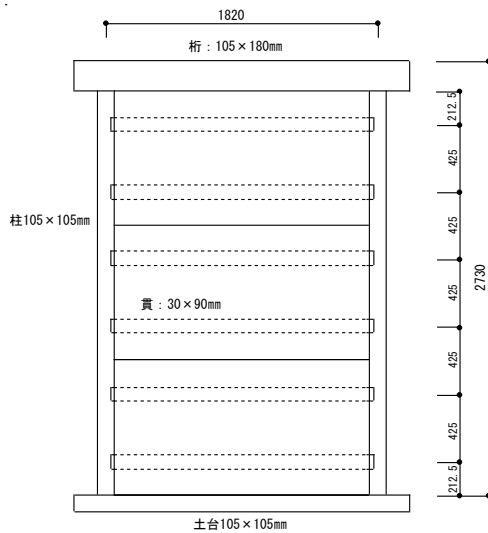


図 12 3_01 試験体の立面図および全景

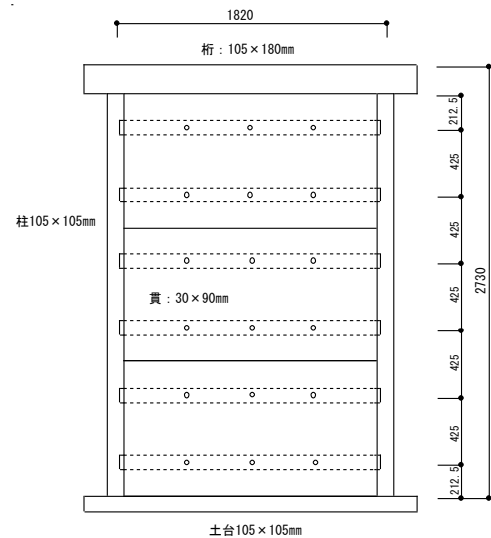


図 13 t3_02 試験体の立面図および全景

表 1 試験体の一覧

予備実験 6/6~6/13	pr_01	真壁とし、発泡材を軸組にビス留めしたもの
	pr_02	真壁とし、発泡材の面外へのズレを金物で押さえたもの
	pr_03	真壁とし、発泡材を軸組にビス斜め留めしたもの
	pr_04	大壁とし、発泡材を軸組にビス留めしたもの
	pr_05	大壁とし、発泡材の面外へのズレを金物で押さえたもの
	pr_06	大壁とし、発泡材を軸組にビス斜め打ち留めしたもの
第1期 8/7~8/27	t1_01	貫工法による真壁とし、発泡材同士をボルト留めしたもの
	t1_02	貫工法による片寄せ真壁とし、発泡材同士をボルト留めしたもの
	t1_03	貫工法による片寄せ真壁とし、発泡材同士を接着したもの
	t1_04	貫工法による片寄せ真壁とし、発泡材を軸組にビス留めしたもの
	t1_05	片寄せ真壁とし、発泡材の外側を木ずりで留めたもの
	t1_06	貫工法による片寄せ真壁とし、スタイロフォーム同士をボルト留めしたもの
第2期 9/17~9/20	t2_01	基本の軸組みのみとしたもの
	t2_02	発泡材と貫をユニット化して取り付けしたもの (貫は1本)
	t2_03	発泡材と貫をユニット化して取り付けしたもの (貫は2本)
第3期 10/9~10/15	t3_01	ユニット化した発泡材の壁厚を厚くしたもの
	t3_02	ユニット化した発泡材の壁厚を薄く、外側に木ずりで留めたもの
	t3_03	ユニット化した発泡材(厚い)で貫と発泡材をビス留めしたもの
	t3_04	片寄せ真壁とし、発泡材の外側を木ずりで留めたもの
	t3_05	片寄せ真壁とし、発泡材(厚い)の外側を片面は縦材、もう一方を横材で留めたもの
	t3_06	片寄せ真壁とし、発泡材の外側を縦の木ずりで留めたもの

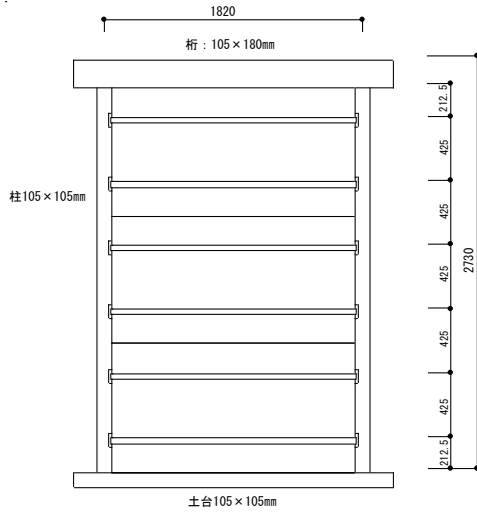


図 15 t3_04 試験体の立面図および全景



図 14 t3_03 試験体の立面図および全景

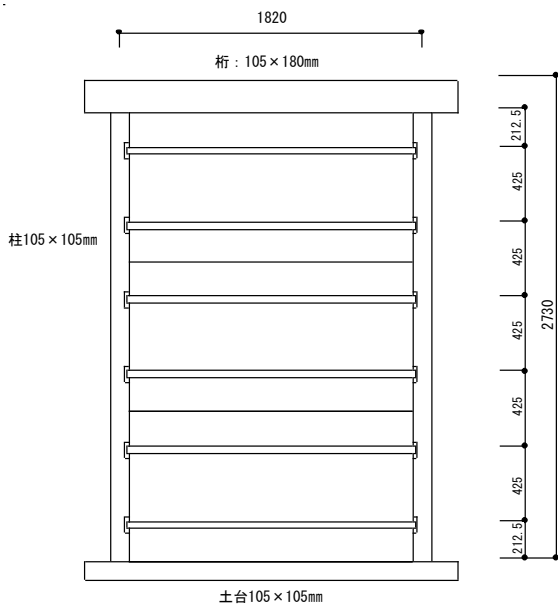
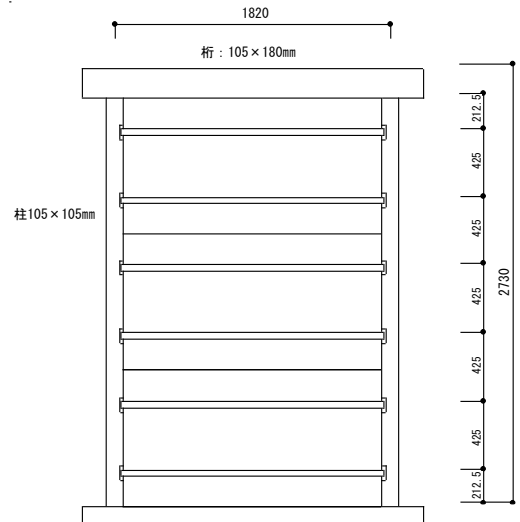


図 16 t3_05 試験体の立面図および全景

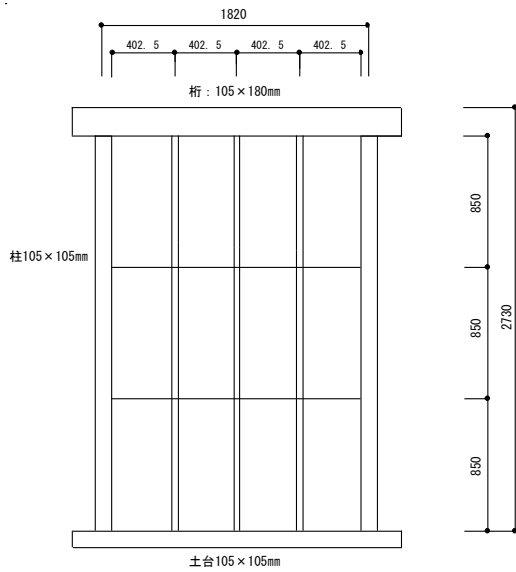


図 17 t3_06 試験体の立面図および全景

実験方法

試験体の設置は、柱脚部のホールダウン金物で反力フレームの溝型鋼へ固定し、桁にアクチュエータとロードセルを設置した。計測はアクチュエータ先端に取り付けた変位計による桁および土台の水平変位、柱頭、柱脚部の引き抜け量とした。写真 4 に試験体の設置状況を示す。加力方法は目標変形角を、 $1/450$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/75$ 、 $1/50$ 、 $1/30$ 、 $1/20\text{rad}$ として、正負交番加力を行った。載荷速度は、概ね 1mm/s とした。 $1/20\text{rad}$ の繰返し終了後、 $1/15\text{rad}$ を超えるか、あるいは顕著な耐力低下が確認出来るまで一方向に単調載荷した。



写真 4 試験体の設置状況

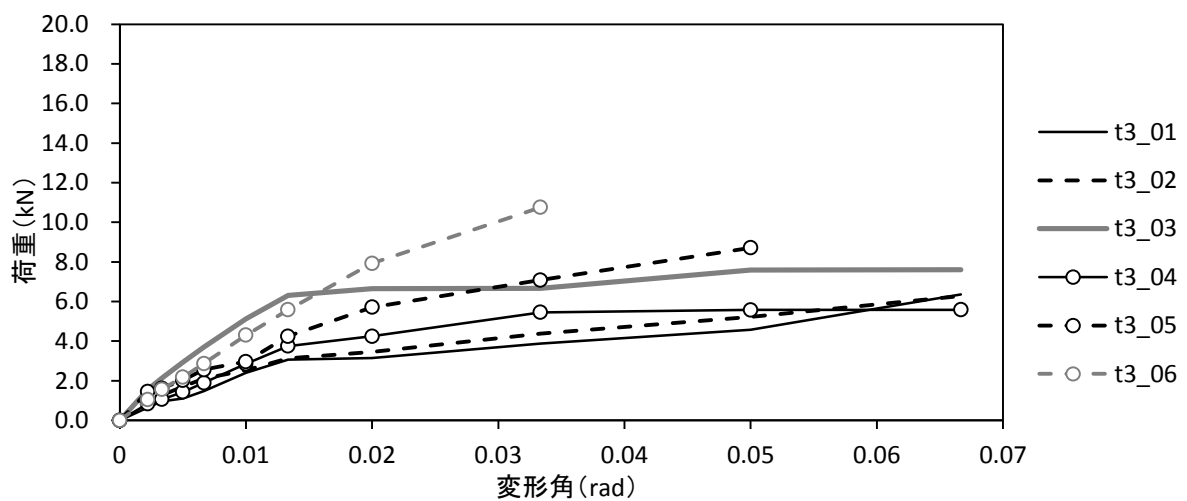


図 18 試験体 (t3_01~06) の荷重変形角関係

実験結果

実験から得られた荷重および各部の変位から試験体の荷重－変位関係を整理し、特定変形角における荷重を算出し包絡線を求めた。その際、3体の試験体の平均値を当該試験体の実験値として算出した。実験から得られた特定変形角における荷重－変形角関係を図18に示す。

荷重－変形角関係から木造軸組耐力壁の評価方法に従って、完全弾塑性にモデル化して壁倍率を算定した。壁倍率の算定結果および完全弾塑性にモデル化する際に求めた降伏耐力、終局耐力、最大耐力、塑性率を表2に示し、図19に壁倍率、図20に特定変形角における耐力を試験体ごとに示す。

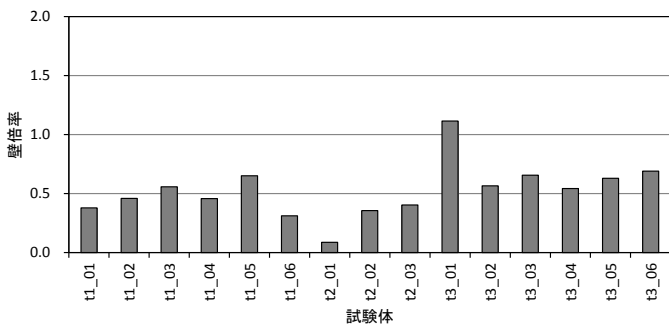


図19 各試験体の壁倍率

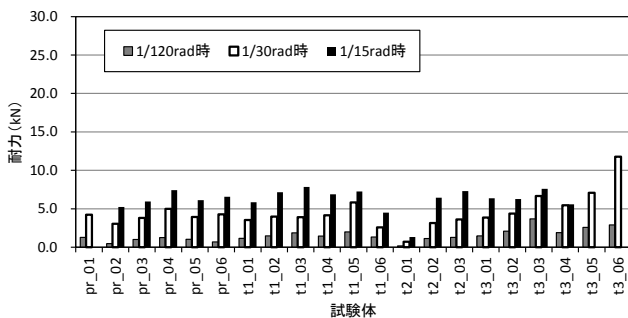


図20 各試験体の特定変形角の耐力特性

損傷状況

各試験体の損傷状況として、本加力実験における最大変形角時の全景を写真5に示す。何れの試験体についても発泡材のずれ、隅角部のめり込み、面外へのはらみ等が顕著である。また数体の試験体で貫や柱のほぞの抜けも確認し、最終的には軸組と発泡材の間に大きな隙間が生じて、発泡材が軸組から脱落することも確認した。

まとめ

発泡材を用いた木造住宅用の耐力壁について静的加力実験を実施した。実験から算定した壁倍率は概ね0.3から1.1倍程度であり、ほとんどの試験体は1.0未満であった。その原因として、発泡壁が軸組にめり込むことにより水平力に抵抗するが、軸組の変形に伴って発泡壁が面外にはらみ出す傾向が顕著であり、耐力が大きくなる。その対策として壁厚を厚くすることや、外側に木ずり設けること、発泡同士を接着することなどを実験的に試行した。その結果、発泡材の壁厚を厚くして、発泡同士を接着することで、面外のはらみ出しを抑制し、他の試験体と比べて耐力の向上が確認できた。具体的な取り付け方法や大地震を想定した大変形時の損傷については改善する必要があるが、木造用耐力壁として有用性はあると思われる。



写真5 t3_04の大変形時の損傷状況

表2 試験体の特性値

	t3_01	t3_02	t3_03	t3_04	t3_05	t3_06
降伏耐力 (Py)	3.14	5.27	6.42	4.30	3.23	5.65
終局耐力 (Pu)	4.19	4.65	7.03	6.08	6.70	6.88
最大耐力 (Pmax)	6.37	8.46	7.61	5.58	6.28	10.76
塑性率 (μ)	3.66	3.42	4.50	1.81	2.18	2.03
Py	3.14	5.27	6.42	4.30	3.23	5.65
$Pu \times 0.2\sqrt{2\mu - 1}$	2.11	2.46	3.98	2.02	2.25	2.34
$Pmax^{2/3}$	4.24	5.64	5.08	3.72	4.19	7.17
P1/120	1.94	3.01	4.35	2.38	2.26	3.58
壁倍率	0.54	0.69	1.12	0.57	0.63	0.66

提案した壁補強法の施行事例

伝統的な壁に採用されている土塗り壁や板壁を基本として、要求性能を可能な限り満足できる新しい壁パネル（特に冬場の寒さ対策として断熱性能の確保も可能）を提案した。その壁パネルの施工性や断熱性能を評価するために、試験棟に施工した。基礎は、鉄骨架台で作成し、その下に荷重計を設置し、冬期間における積雪荷重の計測も実施した。

建設中の状況を写真 6～10 に示す。

今回提案した断熱性能も兼ねた壁パネルは、施工性に優れており、今回の実大の試験棟に設置するのに要した時間は、計 3 時間弱であった。

また、冬期間の積雪の状況や建物に作用する鉛直荷重の計測も実施している。

建物の有する断熱性能に関しても計測を実施しており、現在、データの整理・分析中であるが、その効果に大いに期待できる状況である。



写真 8 壁パネルの設置状況



写真 6 試験体基礎の鉄骨



写真 9 1階壁面の完成（所用時間約 1 時間）



写真 7 床下に取り付けた荷重計



写真 10 2階壁面の完成（所用時間約 1 時間半）

4. 実効性のある提言

写真 11～15 にモデルハウスに強化断熱パネルを採用して内見会を実施した（展示期間は 2014 年 11 月～2015 年 10 月の一年間である）。

高山の厳しい冬期間でも、非常に暖かく講評であることと、地産地消で地元の木材を利用した軸組構法の建物にもなじむ構造であり、消費者からは好評であった。

現在、国土交通大臣の認定を取得するために申請中であるが、既存の木造住宅における耐震補強方としても有効である。



写真 13 モデルハウス前掲
(白い壁部分が今回開発した壁である)



写真 11 モデルハウス前掲
(白い壁部分が今回開発した壁である)



写真 14 モデルハウス前掲
(白い壁部分が今回開発した壁である)



写真 12 モデルハウス前掲
(白い壁部分が今回開発した壁である)



写真 15 モデルハウス前掲
(白い壁部分が今回開発した壁である)

研究テーマ 1

課題 1-8

巨大津波による大型石油タンク の防災対策

金沢工業大学 西村督 教授

課題 1-8 巨大津波による大型石油タンクの防災対策

金沢工業大学

教授
西村督

津波
浮き上がり

大型石油タンク
滑動

限界状態
補強設計

1. 研究目的

平成23年東北地方太平洋沖地震では、津波により臨海部の大型液体貯蔵タンクの浮き上がり・転倒（写真1, 2¹⁾）やタンクの基礎の洗掘などの構造被害が発生し、その原因を究明するための報告がなされている。漂流物によるタンクの被害シナリオの研究もなされており、例えば藤井と今井は、屋外タンクに関して過去の被災事例と津波波力特性から表1に示す9タイプの被災モードと被災シナリオを設定している²⁾。

消防庁、経済産業省で調査された危険物施設 211,877 の内、被害原因が津波と特定されている施設は 0.86% の 1,821 件である³⁾。屋外タンク貯蔵所に限れば 26,572 の内、841 施設で被害が発生した³⁾。被害施設の約 85% は火災や流出を伴わない破損等であるが、石油コンビナート等特別防災地区内では、多種多様な危険物施設が存在する為、1 箇所の火災から延焼、そして大規模な火災へと拡大する危険性がある。製油所の機能停止は、緊急時の物流・人的移動のマヒを引き起こす。津波を受け、大型貯蔵タンク自身が破壊し、引火する内容物が流出する事を抑止する事は広域防災の見地からも最重要課題である。

過去の津波被害例が文献 4) にまとめられている（表 2）。特徴的な被害の様相として、1964 年アラスカ地震津波と 2004 年スマトラ沖地震津波の被害が挙げられる。1964 年アラスカ地震津波では、アラスカ州 Whittier で 10m を超える波高が観測され、沿岸部にあるタンク 11 基が津波によって、数メートル滑動し、衝突によって損傷している。その後、タンクは延焼し、油は燃えながら陸上や湾内にも流された。2004 年スマトラ沖地震津波では、10m を超え、場所によって 20m を超える波高も観測されている。可燃性液体を貯蔵しているタンク 3 基が 100m 漂流した。数回の津波を受けて 1km 漂流したタンクもある。また同一規模のタンクでも津波発生時に内容量が多いタンクは移動していなかった。これらの被害は波高の高い津波を受けて、1) タンク自身は波力で破壊しないが、長い距離タンクが移動し、場合によってタンク同士が衝突して破壊に至る、2) タンクの内容量の多少で移動の有無が異なる例である。

東日本大震災の被災調査を受けて平成 24 年 12 月、中央防災会議防災対策推進検討会議において、コンビナート湾港における地震・津波対策の基本的な考え方³⁾が以下



写真 1. タンクの浮き上がり¹⁾



写真 2. タンクの転倒¹⁾

表 1. 屋外タンクの被災シナリオ²⁾

被災モード	被災の進展	被災原因
屋外タンクの浮き上がり	→滑り・転倒→本体破損・配管破損→漏洩	空タンクの場合、0.2～0.5mの浸水で浮き上がる。
屋外タンクの滑動	→配管破損→漏洩	滑動限界を超える水平波力と鉛直波力の作用
屋外タンクの転倒	→本体破損・配管破損→漏洩	転倒限界を超える水平波力と鉛直波力の作用
屋外タンク側板の座屈	→本体破損→漏洩	水平波力による降伏応力を超える部材応力の発生
屋外タンクの傾斜	→溶接部の破壊・側板の座屈→破損→漏洩	側壁下部へ過大な水平力や揚圧力によりタンクが傾斜 引張側：溶接部の破壊 圧縮側：側板の座屈
配管の破損	→漏洩	津波による配管の破損 屋外タンクの移動
構造物周辺の洗掘	→滑り・転倒→本体破損・配管破損→漏洩	屋外タンクの基礎部が洗掘
漂流物の衝突	→本体破損→漏洩	木材や船舶等の漂流物の衝突
防液堤の破壊	→流出→波力増加→破損→漏洩	防液堤の滑動、転倒

のように要約されている。

表 2. 石油タンクの津波被害事例⁴⁾

津波名称	被害の種類	石油タンクの津波被害の概要
1944年東南海地震津波	漂流	高さ7mの津波で重油タンクが300m以上流された。
1946年南海地震津波	滑動	引き波で重油タンクが4m移動した。
1960年チリ地震津波	浮き上がり	痕跡高3.8mでタンクが押し出されて傾いた。
1964年アラスカ地震津波	浮き上がり、漏洩、火災	10～13mの津波でタンクが傾き、油が流出し、さらに火災となった。
1964年新潟地震津波	漏洩、火災	タンクから流出したガソリンが津波で拡散し、さらに火災となった。
1968年十勝沖地震津波	漏洩	重油の流出
1983年日本海中部地震津波	漂流、漏洩	130klの軽油タンクが19m移動し、軽油が48kl流出
2004年スマトラ沖地震津波	漂流、座屈	<ul style="list-style-type: none"> ・タンクが数百m滑動 ・移動したタンクによる防油堤の破壊 ・容量2,000t満液タンクが沖側へ3km滑動 ・容量1,500t空タンクで側板上部がへこみで留まる

表 3. 津波に対する貯蔵施設の防災対策³⁾

	これまでの対策	今後の取り組み	実施上の問題点
高圧ガス設備	津波の波力を想定した構造計算等は求めている。ただし、液化ガス貯槽の配管が破損した場合の漏洩を止める緊急遮断弁の設置を義務づけている。	<ul style="list-style-type: none"> ・津波の波力等の影響を評価する手法の開発(H24年度から検討) ・高圧ガス設備の安全な停止等及び配管が破損した場合のガス漏洩防止の技術基準の制定(H24年度から検討) 	高圧ガス容器、ローリーの流出を完全に防止することは困難。
屋外タンク	消防法令上、津波の波力を想定した構造計算は求めているが、地震及び風圧を設計外力として、これらの外力に耐える構造が求められている。	<ul style="list-style-type: none"> ・津波浸水深がタンク下端から3m以上と想定される特定屋外タンク貯蔵所は、タンク付属配管が破損する恐れに対して、配管からの危険物流出防止措置の予防規定。 ・津波浸水深5～7m以上でタンクが滑動する可能性有り。消防庁が提供している津波被害シミュレーションを活用した被害想定などを踏まえて、各事業所の実態に応じた津波対策を講じる。 	タンクの滑動を防止する有効な方策は現時点で存在しない。滑動可能性の津波は、概ね10m(津波浸水深5～7m)を超えるもの。

- (a) コンビナート湾港の大規模石油タンク等について、液化化対策も含めた耐震対策は概ね完了し、既知の地震動による石油等の大規模な流出の危険性は極めて低い。
- (b) 今後は耐震対策が未了の施設の早期改修と津波対策を推進する必要がある。

この考え方にに基づき、経済産業省と消防庁は津波に対する貯蔵施設の今後の取り組み、実施上の課題を表3に示すようにまとめている。表3より、平成23年度まで高圧ガス、屋外タンクの貯蔵施設は津波に対する構造安全性の検討は要求されていなかった³⁾。また文献2)の被災シナリオと文献3)で指摘されている今後の取り組むべき課題から、危険物を貯蔵する屋外タンクに関して、配管の破損時に対する危険物流出防止装置が完備されれば、5mを超える津波浸水深に対して、タンクの移動(浮き上が

り・滑動・転倒)の防止が設計基本方針と考えられる。

この方針に基づいた詳細な解析が幾つか報告されている。例えば管付らは容量500klの小型タンクを対象として3次元津波解析を行い、タンク内の液体の量、アンカーボルトの有無による浮き上がりの発生を考察している⁵⁾。また消防庁より東海・東南海・南海の3連動地震による三重県中部・南部沿岸、高知県中部沿岸の津波モデル、明治三陸地震再来による岩手県中部沿岸の津波モデルを対象に、容量1,000kl、10,000klのタンクに関してあと施工アンカーによる滑動防止策の照査結果が示されている⁶⁾。

文献5)では特定の小規模のタンクを対象とした定性的結果が述べられている。文献6)ではタンクが空の状態、タンク底部での中立軸が底板中心を通ると仮定してアンカーボルトの応力が計算されており、内液比率の影響が

示されていない。現段階では容量が 5,000kl を超える規模のタンクに対して、内液比率の影響を考慮した津波に対する補強設計は十分に検討されていない。

文献 6)の検討の基礎となる被害発生の予測はタンクの浮き上がり、滑動、転倒、側板座屈が発生するための評価式⁷⁾である。各被害発生予測式を以下に記す。

浮き上がり条件

次式で定義される浮き上がり安全率 F_{Sa} が1.0以上のとき、浮き上がりが生じる。

$$F_{Sa} = \frac{W_T + W_L}{F_V} \geq 1.0 \quad (1)$$

W_T : タンク本体の重量

W_L : タンク内溶液の重量

F_V : タンクに作用する鉛直波力 (後述する(11)式)

滑動条件

次式で定義する滑動安全率 F_{Sb} が1.0以上のとき、滑動が生じる。

$$F_{Sb} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_V)}{F_H} \geq 1.0 \quad (2)$$

μ : タンク基礎とタンク本体の摩擦係数

F_H : タンクに作用する水平波力 (後述する(7)式)

転倒条件

次式で定義する転倒安全率 F_{Sc} が1.0以上のとき、転倒が生じる。

$$F_{Sc} = \frac{M_W - M_V}{M_H} \geq 1.0 \quad (3)$$

M_W : 津波に対する抵抗モーメント

$$M_W = (W_T + W_L)R \quad (4)$$

M_V : 鉛直波力モーメント (後述する(14)式)

M_H : 水平波力モーメント (後述する(10)式)

R : タンク底面の半径

側板座屈条件

津波浸水深 η_{max} が次式を満たすとき、タンク側板が座屈する。

$$\eta_{max} \geq \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

ここに

$$A = \frac{\rho g}{2} \frac{RL^2}{\pi^2 D}, B = \left(\frac{\rho_1 g}{2} \frac{RL^2}{\pi^2 D} H_1 + 0.3168\sqrt{Z} \right) \quad (6a,b)$$

$$C = -1.152L\sqrt{Z}, D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}, Z = \frac{L^2\sqrt{1-\nu^2}}{RH} \quad (6c-e)$$

ρ_1, ρ : 内容液の比重、津波水の比重

L, H : タンクの高さ、側板厚

H_1 : タンク内溶液の高さ

Z, ν, E : 形状係数、ポアソン比、ヤング係数

消防庁は被害発生予測式である(1)~(6)式を用いて、被害予測を報告している。例えば大阪湾沿岸部の堺・泉北

臨海地区特別防災区域内の屋外タンクの被害予想⁸⁾として、[1-1] 3m以上の津波浸水を受ける想定10,000kl未満の特定屋外タンク及び準特定屋外タンクでは、被災時の貯蔵率が高いほど、大量の危険物が配管を通じて流出する危険性が高い。

また、容量1,000klおよび10,000klの仮定タンクを対象に、8つのモデル津波(静岡県、三重県、和歌山県、高知県、北海道、岩手県)に対する被害予想⁸⁾として、以下の事項を指摘している。

[1-2] 小規模仮定タンク及び中規模仮定タンクがモデル津波を受けた場合の浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈の発生可能性を予想した結果、最大浸水深が0.7m以下のモデル津波では、内容液量にかかわらず、小規模仮定タンクにも中規模仮定タンクにも、これらの被害のいずれも発生しない。しかし、最大浸水深が1.2m以上となるモデル津波では、内容液量により、浮き上がり、滑動、転倒、側板座屈が発生する可能性がある。

[1-3] 最大浸水深が1.2mとなるモデル津波を1,000kl級タンクが受ける場合では、タンク容量の10%以上の量の内容液がタンクに貯蔵されていれば、これらの被害は発生しない。また、最大浸水深4.4mのモデル津波を1,000kl級タンクが受ける場合は、タンク容量の64%以上の量の内容液がタンクに貯蔵されていれば、これらの被害は発生しない。ほぼ同様のモデル津波を10,000kl級タンクが受ける場合では、タンク容量の22%以上の量の内容液がタンクに貯蔵されていれば、これらの被害は発生しない。

文献8)における被害対策の基本的考えとして、

[1-4] 屋外貯蔵タンクが津波を受けて滑動したとすると、その滑動量が大きいと、タンクと配管等との接続部等が切断し、その結果、危険物が流出するおそれが生じることが考えられる。こうしたことから、屋外タンク貯蔵所の津波被害予防・軽減対策は、屋外貯蔵タンクの滑動を防止することを目標としたものとするのが適当と考えられる。

(1)~(3)式の浮き上がり、滑動、転倒の予測式は、タンクは基礎に固定されていない剛体モデルとして導出されている。畑山はこのモデルによる被害発生予測結果と実際の被害発生状況を照合しており、(1)、(2)式の浮き上がりと滑動に関する予測結果と被害状況はよい一致が確認されている⁹⁾。

本研究では、巨大津波により臨海部に設置される大型石油タンクが損傷・破壊することを防止するための設計方針を提案する。また設計方針を具体化するための応力解析法を提示し、想定浸水深に対するタンクの必要補強量を算定できる補強設計用アルゴリズムを提案する。各項目の概要を以下に記す。

(1) 津波に対する大型石油タンクの被災防止方針の提示

設計方針は浸水深 5m を超える津波に対して容量が 5,000kl を超える大型タンクの移動の防止である。そのためにタンクおよび基礎を補強する (図 1)。基礎は洗掘が生じないように剛なべた基礎とする。タンクは剛な基礎と緊結するためにコンクリート製のリブとアンカーボルトで構成する補強要素を設ける。

(2) 大型石油タンクの限界状態解析法の提示

補強された大型液体貯蔵タンクを対象として、タンクの形状寸法が設定されれば、内液比率に対してタンクが移動する最大浸水深を得るための限界状態解析法を提示し、解析結果を考察する。

(3) 津波に対する大型石油タンクの補強量算定アルゴリズムの提案

内液比率と想定浸水深に対してタンクの移動を防止する必要補強量を算定するためのアルゴリズムを提案し、補強設計用チャートを提示する。

2. 解決法

上記の課題(2), (3)の大型石油タンクの限界状態解析法と補強量算定アルゴリズムを示す。

2.1 津波外力に対する液体貯蔵タンクの限界状態解析

解析モデル¹⁰⁾を図 1 に示す。 H_T はタンクの高さ、 R はタンクの外半径、 t はタンク側板厚である。タンクの形状は $2R/H_T=1.0\sim 4.0$ とする。タンクは鋼製円筒タンクとし、地盤上に敷かれたコンクリートべた基礎に置かれ、アンカーボルトを介して基礎と補強要素が固定されている。補強要素はコンクリート製の底板付きリブと鋼製アンカーボルトで構成されており、基礎からの反力としてリブ底面で圧縮、アンカーボルトは引張とせん断に抵抗する。またタンクに付けられた鋼製補強材と補強要素はリブの側面アンカーにより緊結されているとする。タンクに作用するモーメント外力が大きくなる場合、タンクを固定する部材が剛でない場合、平面保持の仮定が成り立たない場合があるため^{11,12)}、リブは十分に剛な部材とする。

2.1.1 津波外力の評価とタンク、内液の重量

津波浸水深に対応した適切な設計用外力を設定するために、津波外力の評価に関する既往の研究¹³⁾を次に示す。

津波は、1)波長が数 km から数十 km に及ぶ、2)周期が数分から数十分と非常に長い、3)伝播速度は水深の平方根に比例する、という性質がある。3)の性質から、岸に近い場所では速度の速い後続の波との相互作用で波高が増幅する。

これらの性質を持つ津波は、主に防潮堤や護岸を対象とした土木構造物の設計で扱われている。陸上に遡上する津波に関しては、「原子力発電所の津波評価技術」で述べられている。津波による外力として、1)波圧・波力、

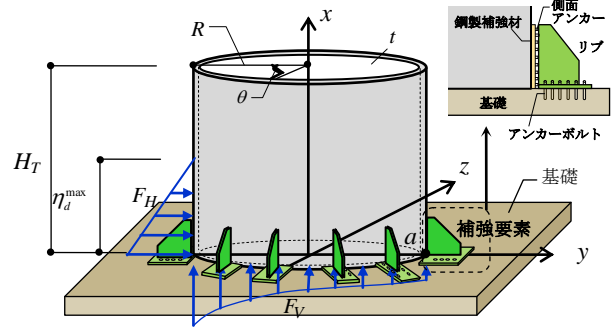


図 1. 補強されたタンクの解析モデル¹⁰⁾

表 4. 波圧・波力の算定式¹⁴⁾

算定式	特徴
朝倉等のソリトン分裂しない陸上浸水津波の波圧	浸水深の一次関数 津波による最大遡上水深の 3 倍の静水圧で波圧が最も大きい (図 2)
朝倉等のソリトン分裂を伴う陸上浸水津波の波圧	浸水深の一次関数
池野等のソリトン分裂しない砕波段波津波の波圧	浸水深の一次関数 (図 3)
大森等の陸上浸水津波の水平波力	抗力+慣性力+衝撃力+動水勾配力
飯塚等の家屋に作用する津波反乱流による水平抗力	流速の 2 乗と浸水深の積の関数

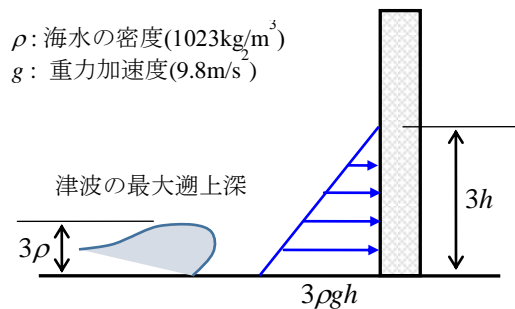


図 2. 朝倉等による津波波圧分布¹⁴⁾

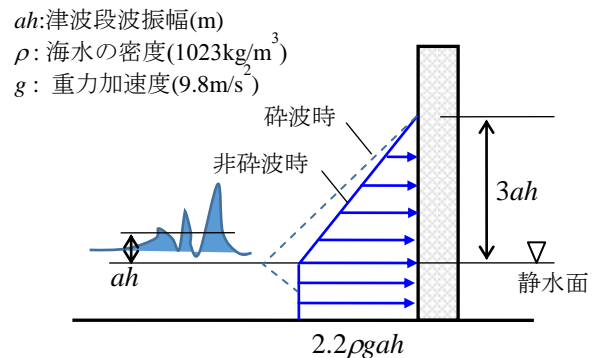


図 3. 池野等による津波波圧分布¹⁴⁾

2)掃流、3)洗掘、4)揚圧力、5)浮力、6)衝突力が挙げられている。

支配的な外力である波圧・波力の評価式を表 4 に示す。評価式の多くは、浸水深の一次関数であり、上層で小さく下層で大きくなる三角形分布である（例えば図 2、図 3）。中でも図 2 に示す朝倉らのソリトン分裂しない陸上浸水津波に対する波圧が最も大きな値となる。この評価式は、津波被害が予想される沿岸域での津波避難ビルの構造設計に用いられている。

表4に示した各種評価式は、防潮堤や護岸といった平面歪状態の構造物の設計で用いられてきた。研究対象としている石油タンクの多くは薄肉円筒シェル構造であり、津波外力を受けた際は、タンクは平面歪状態ではない。円筒形タンクが陸域に遡上した津波から受ける波力、波圧を解明するための実験が実施されている。佐野は、中央防災会議が想定した津波を対象に、大型造波水路での水理模型実験を実施し、燃料タンクに作用する津波の波力、波圧を調査した¹⁵⁾。実験はタンク単体とタンクの集合体の2種類を実施している。単体の実験パラメータはタンクの直径、タンク直径と護岸からの距離、タンクを囲う防油堤の有無である。タンクの集合体では、実構造物の条件で防油堤に囲まれたタンクに作用する波圧を測定した。防油堤の有無によるタンク単体実験の結果から、以下の事項が得られている。

[2-1] 水平方向の波力は、防油堤が無い場合、津波の水位に対応して一方向に作用する。一方、防油堤が有る場合は防油堤内での反射があり振動する。波力の最大値は、防油堤が無い場合は、有る場合の約2倍である。

[2-2] 鉛直方向の波力は、防油堤が無い場合には、遡上波の最大水位でピークを示すが、防油堤が有る場合には堤内に水が貯留されるため大きくなり、浮力として作用し続ける。波力の最大値は、防油堤が無い場合は、有る場合の約0.8倍である。

[2-3] 波力のオーダーは、水平方向に対して鉛直方向が約10倍となる。

[2-4] 波圧分布は防油堤が有る場合、円周方向では津波の進行方向を軸としてほぼ対称となる。タンク下層部は円周方向で、ほぼ均一な正圧分布を示す。1/2の高さを超えると、波圧分布は津波の進行方向と直交する軸に対して対称性を失い、上層部では上流側に対して下流側の波圧が下がる。

[2-5] 中央防災会議が想定した津波に対して、実在タンクは内容物が無い場合、浮き上がる。

また水理実験で計測された波力・波圧分布を用いた座屈解析から

[2-6] 波圧の大きいタンク下層部の上流側で局部的な座屈変形が生じる。

という結果が得られた。

藤井、大森、池谷、稲垣は、1/100の水理模型実験を実施し、タンク前面と底面の波圧分布、タンク周方向の波圧分布を以下のように示した¹⁶⁾。

[2-7] 前面の波圧分布は、タンクが無い状態での最大遡上水位の1.8倍の高さに対する三角形分布で、壁上構造物の値3.0よりは小さくなる。

[2-8] 底面の波圧分布は、ほぼ一様分布で背面がわずかに小さくなる。

[2-9] 単体の波圧分布は前面で大きく、側面はほとんど生じていない。単体で防油堤がある場合は前面が相対的に小さいがほぼ一様、千鳥配置後列のタンクは縮流効果で単体と比較してわずかに大きくなる。

[2-10] タンク前面から背面へ余弦曲線的に変化しており、円周方向の波圧分布はフーリエ関数で近似できる。

また、津波波力の算定方法に基づき、タンク径と遡上水深から石油タンクの被害（滑動、浮き上がり、転倒、内外水圧差による側板座屈）を簡便に評価できる被害判定図を作成している¹⁶⁾。

消防庁はこれらの結果を「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書」¹⁷⁾で評価式として以下のようまとめている。

水平波力

文献17)ではタンク各部の波圧分布を水理実験¹⁸⁾で確認し、最大水平波力は波圧分布を静水圧分布（三角形分布）で近似した結果とよく対応することが示されている。よって

$$F_H = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^2 R \cos \theta d\theta \quad (7)$$

ここに h_x^{\max} は水平波力が最大となる時点でのタンク周囲津波水位である。 θ は図 1 に示す津波進行方向（y 軸）とのなす角でありタンク前面を 0° 、タンク背面を $\pm\pi$ とする。水理実験の結果から h_x^{\max} は θ を用いて次式の 3 次までのフーリエ級数で近似できることが示されている。

$$h_x^{\max}(\theta) = \alpha n_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta \quad (8)$$

$$p_0 = 0.680, p_1 = 0.340, p_2 = 0.015, p_3 = -0.035 \quad (9a-d)$$

(8)式中の α はタンク水平波力に係る浸水係数と呼ぶ。

水平波力モーメント

水平波力によりタンクに生じるモーメントは、水平波力に三角形波圧分布の重心からタンク底部の距離 $h_x/3$ を乗じて求める。よって

$$M_H = F_H \frac{h_x(\theta)}{3} = \frac{1}{3} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^3 R \cos \theta d\theta \quad (10)$$

鉛直波力

鉛直波圧は津波が基礎とタンク底板の間に入り込み、鉛直上向きの波圧によりタンクを押し上げる作用とする。

タンク底部の波圧分布を仮定し受圧面積を乗ずると

$$F_V = 2 \int_0^\pi \rho g h_V^{\max}(\theta) R^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (11)$$

ここに h_V^{\max} は鉛直波力が最大となる時点でのタンク周囲津波水位である。

$$h_V^{\max}(\theta) = \beta \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 q_m \cos m\theta \quad (12)$$

$$q_0 = 0.720, q_1 = 0.308, q_2 = 0.014, q_3 = -0.042 \quad (13a-d)$$

(12)式中の β はタンク鉛直波力に係る浸水係数と呼ぶ。

鉛直波力モーメント

鉛直波力によりタンクに生じるモーメントは、鉛直波力作用位置から回転中心までの距離を乗じて求める。タンクが基礎と固定されていないとすると、回転中心は津波水下のタンク底部(図1のa点)となる。このときの鉛直波力モーメントは

$$M_{V0} = F_V R(1 + \cos\theta) = 2 \int_0^\pi \rho g h_V^{\max}(\theta) R^3 \cos^2 \theta (1 + \cos\theta) d\theta \quad (14)$$

一方、タンクが図1に示すように補強され基礎に固定されている場合、回転中心はタンク底部の中心となる。このときの鉛直波力モーメントは図1に示す鉛直波圧がz軸回りになすモーメントであり

$$M_V = F_V R \cos\theta = 2 \int_0^\pi \rho_0 g h_V^{\max}(\theta) (R \cos\theta)^3 d\theta \quad (15)$$

と書ける。無補強の場合のモーメント評価式(14)式に対する補強された場合の評価式(15)式の比は $0.233(M_V / M_{V0} = 0.233)$ であり、補強によるモーメント作用の低減効果が期待できる。

更に流速の効果を考慮して津波波力を再評価する場合、(8)、(12)式中の浸水深係数 α, β をフルード数

$$F_r = \frac{V_{\max}}{\sqrt{g \eta_{\max}}} \quad (16)$$

に対して

$$\alpha = \begin{cases} 1.8 & F_r \geq 1.3 \\ 2.0F_r - 0.8 & 1.3 \geq F_r \geq 0.9 \\ 1.0 & 0.9 \geq F_r \end{cases} \quad (17)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.2 & F_r \geq 1.3 \\ 0.5F_r + 0.55 & 1.3 \geq F_r \geq 0.9 \\ 1.0 & 0.9 \geq F_r \end{cases} \quad (18)$$

本論では(7)、(10)、(11)、(15)式に定数を代入して波力とモーメントを算定している¹⁰⁾。その結果は

$$\text{水平波力} \quad F_H = 11913.2 (c_1 H_1) \eta_{\max}^2 \quad (19)$$

$$\text{水平波力モーメント} \quad M_H = 7778.34 (c_1 H_1) \eta_{\max}^3 \quad (20)$$

$$\text{鉛直波力} \quad F_V = 6869.22 (c_1 H_1)^2 \eta_{\max} \quad (21)$$

$$\text{鉛直波力モーメント} \quad M_V = 1041.72 (c_1 H_1)^3 \eta_{\max} \quad (22)$$

ここに η_{\max} はタンクが無い場合の最大浸水深、 $c_1 = 2R/H_T$ である。図1の η_d^{\max} はタンク前面の最大浸水深で文献17)よ

り $1.8\eta_{\max}$ として(19)~(22)式を算定した。文献17)では流速による波力への影響をフルード数で評価する方法が提示されている。津波のタンク衝突時の流速は防油堤の有無に依存するため、確定的に設定し難く、波圧分布に乗じる浸水深係数は最大値を採用した。その結果、タンク前面の最大浸水深を $1.8\eta_{\max}$ と設定している。

タンクの重量 W_T および内容物の重量 W_L はそれぞれ次式で示される。

$$W_T = \rho_T g H_T \{R^2 - (R-t)^2\} \pi, W_L = \rho_L g (c_2 H_T) (R-t)^2 \pi \quad (23a,b)$$

ここに $c_2 = H_L/H_T$ である。(23)式中の ρ_T, ρ_L, H_L はタンクの密度、内液の密度、内液の水位である。以上から形状パラメータは c_1 、外力パラメータは最大浸水深 η_{\max} と内液比率を表わす c_2 となる。

2.1.2 解析基礎式

仮定 タンク底部での断面力の評価式を導出するときの仮定を以下に記す。

- [A-1] 津波は繰り返し受ける波の最大波を対象とする。
- [A-2] 水理実験では水平波力と鉛直波力は同時に最大となることはないことが確認されている¹⁷⁾が、外力評価としては安全側に水平、鉛直各方向の波力が同時に最大となるとして解析する。
- [A-3] 津波がタンクに衝突した際、タンク内の液体からタンクへの衝撃力を無視する。ここでいう衝撃力とは津波がタンクに衝突した際、タンク内の液体動揺によるタンクへの作用を意味する。
- [B-1] タンクの水平耐力、基礎・地盤の強度特性は不確定性を有するため津波に対する的確な終局状態を設定することは困難である。そこで構造体、基礎・地盤の応力を許容応力度範囲内とする使用限界状態に対する設計とする。
- [B-2] タンクと基礎の変形は微小とし、タンク底部のy-z平面で平面保持が成り立つとする。
- [B-3] タンク側板は降伏、座屈しないように図1中の鋼製補強材等で補強されているとする。
- [B-4] タンク底板は基礎上に固定されずに置かれており、平面保持が成り立つとすると、津波外力に対する抵抗経路はタンク側板・底板→補強要素→基礎である。このとき、タンク側板から底板へ応力の伝達が少ないと考えられるので底板の降伏は考慮しない。
- [B-5] 水平波力に対しては補強要素のアンカーボルトのせん断で抵抗するとしてタンク底板と基礎上面との摩擦抵抗は考慮しない。
- [B-6] 補強要素に生じる力は応力の積分は行わず、単純に合力として評価する。図4に示す $(y_1, 0)$ 、 $(-y_1, 0)$ は合力位置の座標を意味する。

歪の分布 [B-1]の平面保持の仮定より垂直歪の分布は(24)式に示す一次式で表すことができる。

$$\varepsilon(y) = ay + b \quad (24)$$

歪は引張を正とする。 $y = y_1, y = -y_1$ の補強要素での歪を $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ とすると

$$\varepsilon_1 = \varepsilon(y_1) = ay_1 + b, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon(-y_1) = -ay_1 + b \quad (25a, b)$$

(25)式を係数 a, b に関して解き、(24)式に代入すると

$$\varepsilon(y) = c(y)\varepsilon \quad (26)$$

$$c(y) = [y/y_1 + 1/2 \quad -y/y_1 + 1/2] \quad \varepsilon = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2\}^T \quad (27a, b)$$

応力度-歪関係 i 番目の補強要素の垂直応力度 σ - 垂直歪 ε 関係は弾性範囲では

$$\sigma_i(y) = E_i \varepsilon_i(y) \quad (28)$$

と書ける。ここに E_i は材料定数 (ヤング係数) である。リブは圧縮時、アンカーは引張時のみ抵抗するため、図 5 の実線に示す片側応力の材料構成則となる。

断面力 補強要素が図 4 に示すように点在して配置されている場合、断面力は次式で示される。

$$N = T - C = \int_A \sigma dA = \sum_i \sigma_i a_i \quad (29)$$

$$M = - \int_A \sigma y dA = - \sum_i \sigma_i a_i y_i \quad (30)$$

$$Q = \int_A \tau dA = \sum_i \tau_i a_i \quad (31)$$

ここに N, M, Q はそれぞれ軸力、曲げモーメント (反時計回りを正)、せん断力である。 T は引張応力度の合力、 C は圧縮応力度の合力である。 τ はせん断応力度、 a_i は補強要素の抵抗断面積である。リブ底面は大きさを有し、アンカーも要素内に複数あるが合力位置に断面積が集中していると単純化したモデルとする。コンクリートリブの断面積は、コンクリート側でせん断破壊を生じないように許容せん断耐力がアンカーの β 倍以上になるように次式で設定している。

$$\beta \sum_i a_i \cdot s \cdot f_s \leq c \cdot a \cdot c \cdot f_s \quad \therefore c \cdot a \geq \beta \sum_i a_i \cdot s \cdot f_s / c \cdot f_s \quad (32)$$

ここに $s, a_i, c, a, f_s, c \cdot f_s$ はそれぞれアンカーボルト1本当たりの断面積、コンクリートリブの底面積、アンカーボルトの短期許容せん断応力度、コンクリートの短期許容せん断応力度である。本論では $\beta = 1.5$ とした。

(26)~(28)式を(29), (30)式に代入すると次式の断面力 s と一般化歪 ε の関係が得られる。

$$s = D\varepsilon \quad (33)$$

ここに

$$s = \{N \quad M\}^T, \quad D = \sum_i E_i a_i \begin{bmatrix} \frac{y_i}{y_1} + \frac{1}{2} & -\frac{y_i}{y_1} + \frac{1}{2} \\ -\left(\frac{y_i}{y_1} + \frac{1}{2}\right)y_i & -\left(-\frac{y_i}{y_1} + \frac{1}{2}\right)y_i \end{bmatrix} \quad (34a, b)$$

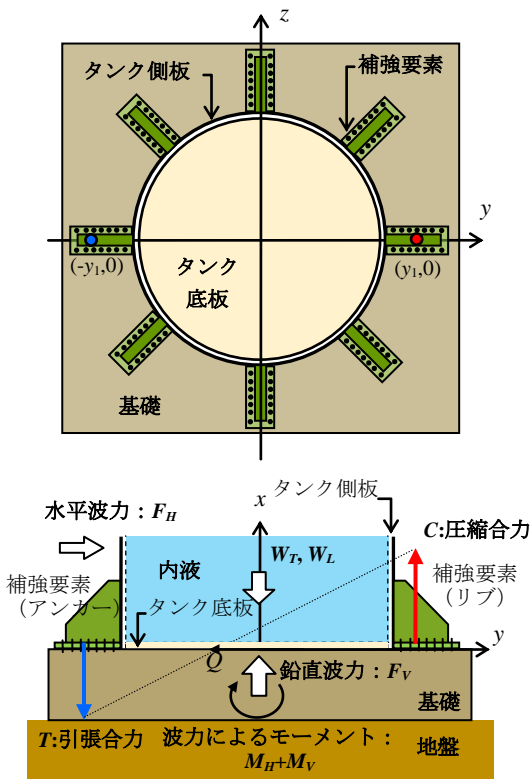


図 4. タンク底部の応力分布

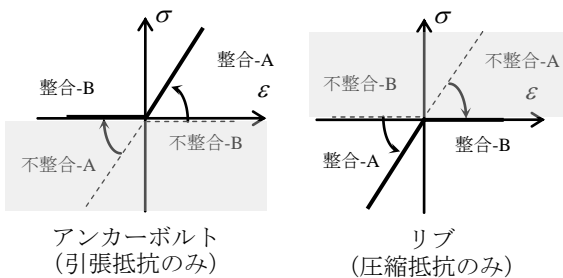


図 5. 補強要素の応力度-歪関係

注意点として補強要素の位置を任意に指定した場合、中立軸が陽に表現できない。その結果、(34b)式を計算する際に設定する各補強位置の応力状態（引張、圧縮の別）が不確定である。本論では各補強要素の歪状態を仮定して材料定数を設定し、後述する(38)式を解き、歪値が不整合（図5の破線）の場合は材料定数 E_i を修正し、再度(38)式を解き、全ての補強要素の材料構成則が整合するまで繰り返す。アンカー、リブがそれぞれ引張、圧縮状態と仮定（図5の整合-A領域）して、歪が圧縮歪、引張歪（図5の不整合-A領域）の場合、(34b)式の補強要素の材料定数を零（図5の整合-B領域）とする。逆にアンカー、リブが抵抗していない（材料定数 E_i が零、図5の整合-B領域）と仮定して、(38)式を解いた結果、それぞれ引張歪、圧縮歪（図5の不整合-B領域）の場合、材料定数を材料のヤング係数に変更（図5の整合-A領域）する。

外力と断面力の釣合 図4よりタンク底部で津波外力と断面力が釣合う条件は

$$F_V - W_T - W_L - N = 0 \quad (35)$$

$$M_H + M_V - M = 0 \quad (36)$$

$$F_H - Q = 0 \quad (37)$$

である。

軸力と曲げに関する(35), (36)式に(33)式を代入すると次式の釣合式が得られる。

$$f = D\varepsilon \quad (38)$$

ここに f は外力ベクトルで

$$f = \{F_V - W_T - W_L \quad M_H + M_V\}^T \quad (39)$$

なお鉛直波力 F_V がタンク重力 W_T と内液の重量 W_L の和以下のとき、つまり $F_V - W_T - W_L \leq 0$ であれば正味の浮き上がり力は生じない。このとき(39)式の外力ベクトルは

$$f = \{0 \quad M_H + M_V\}^T \quad (40)$$

とする。せん断に関しては(37)式に(31)式を代入してせん断応力度に関して解くとアンカーのせん断応力度が次式で得られる。

$$\tau_i = F_H / \sum_i a_i \quad (41)$$

2.1.3 限界状態の条件

仮定[B-1]より使用限界状態に対する設計を行う。本論では「使用限界」を、津波を受けてもタンクおよび補強要素が損傷しない限界と定義する。このとき、使用限界を材料の短期許容応力度として設定する。仮定[B-3], [B-4]よりタンク本体は設計対象外とし、補強要素を設計対象とする。補強要素のリブを鉄筋コンクリート構造、アンカーを鋼材とすると使用限界状態の条件は

$$(\text{リブ}) \quad \sigma_c \leq f_c \quad (42)$$

$$(\text{アンカー}) \quad \sigma^2 + 3\tau^2 \leq f_t^2 \quad (43)$$

と書ける。 f_c はコンクリートの短期許容圧縮応力度、 f_t は鋼材の短期許容引張応力度である。

解析パラメータを外力パラメータである最大浸水深 η_{\max}

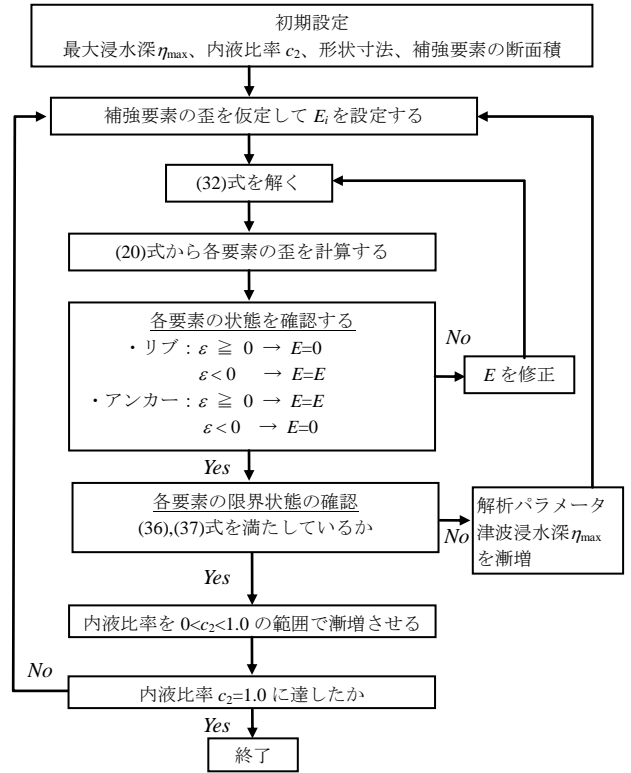


図6 限界状態解析のフロー

と内液比率 C_2 としたときの限界状態解析のフローを図6に示す。

2.1.4 限界曲線の解法

(38)式を解いて得られる一般化歪を(42), (43)式に代入すると外力パラメータに関する限界状態の条件式

$$(\text{リブ}) \quad F_1(c_2) + F_2(\eta_{\max}) \leq f_c \quad (44)$$

$$(\text{アンカー}) \quad G_1(c_2) + G_2(\eta_{\max}) \leq f_t^2 \quad (45)$$

が得られる。 F_1, G_1 は内液比率 c_2 に関してそれぞれ1次、2次の多項式、 F_2, G_2 はタンクが無い場合の最大浸水深 η_{\max} に関してそれぞれ3次、6次の多項式となる。限界状態解析では上の2式を満たすパラメータの最小値を求める。最小値を計算する最適化アルゴリズムを用いることもできるが本論では増分解析で求める。

限界状態(44), (45)式の等号条件

$$(\text{リブ}) \quad F_1(c_2) + F_2(\eta_{\max}) = f_c \quad (46)$$

$$(\text{アンカー}) \quad G_1(c_2) + G_2(\eta_{\max}) = f_t^2 \quad (47)$$

を表す曲線を限界曲線と呼ぶ。増分解析は内液比率 $c_2=0$ の最大浸水深 η_{\max} を求めた後、増加させた内液比率 c_2 に対して(46), (47)式を満たす η_{\max} を増分解析で求める。解析基礎式は(46), (47)式の増分式

$$(\text{リブ}) \quad \frac{\partial F_1}{\partial c_2} \Delta c_2 + \frac{\partial F_2}{\partial \eta_{\max}} \Delta \eta_{\max} = 0 \quad (48)$$

$$(\text{アンカー}) \quad \frac{\partial G_1}{\partial c_2} \Delta c_2 + \frac{\partial G_2}{\partial \eta_{\max}} \Delta \eta_{\max} = 0 \quad (49)$$

である。内液比率増分 Δc_2 を与え、(48), (49)式からそれぞれ

れ得られる $\Delta\eta_{\max}$ の小さい解を採用する。この解法のアルゴリズムは3. 方法の検証で示すが、解析パラメータを微増させながら限界状態解を求める方法と比較して検証もしている。

なおこの解法はある限界状態点から近傍に別の限界状態点が存在すると仮定した局所探索法である。近傍から離れた外力状態に限界状態点が存在する場合は、例えば大域的最適解を探索するアルゴリズムが必要となる。

2.1.5 解析例

解析の緒元を表5に示す。タンクは容積が5,000kl以上となるように形状寸法を設定した。

表5 解析の緒元

	H_T (m)	R (m)	t (mm)	E_s (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
T1	20	10	19	2.06×10^5	1.37×10^4
T2		15			
T3		20			

- E_s : タンクのヤング係数
- E_c : コンクリートのヤング係数 $=E_s/15$
- ρ_0 : 海水の密度 1023 kg/m³
- ρ_T : タンクの密度 7850 kg/m³
- ρ_L : 内容物の密度 850 kg/m³
- 補強要素 アンカー: SNR400B, M24 リブ: Fc24
- f_t : アンカーの短期許容引張応力度 235 N/mm²
- f_c : コンクリートの短期許容圧縮応力度 16 N/mm²
- f_s : アンカーの短期許容せん断応力度 135 N/mm²
- f_c : コンクリートの短期許容せん断応力度 1.10 N/mm²
- 補強要素の数: 20 各補強要素のアンカーの本数: 24 本
- 引張、圧縮合力の位置: タンク側板から1.0m外側
- リブの底面積を示す(16)式の $\beta=1.5$

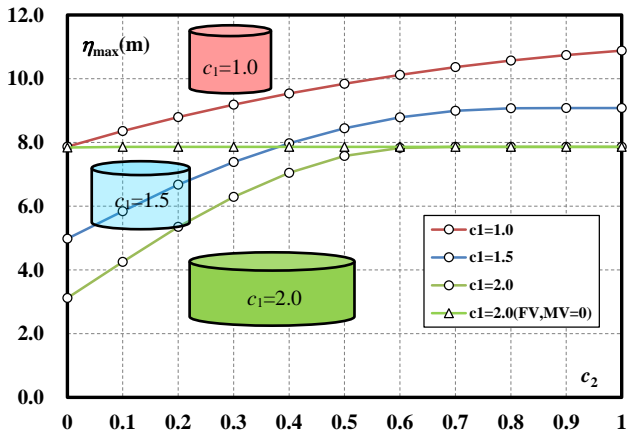


図7 最大浸水深 η_{\max} －内液比率 c_2

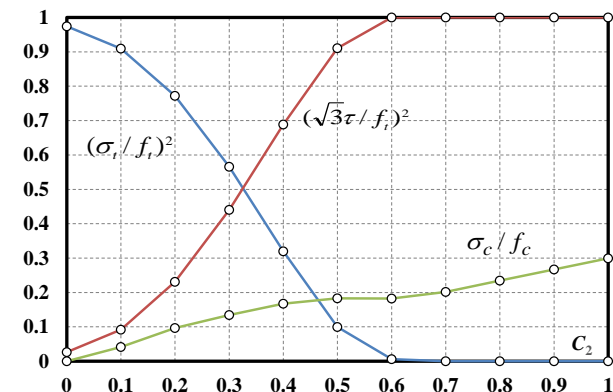


図8 限界状態時での応力比($c_1=2.0$)

図7は形状が異なるタンクに対する最大浸水深 η_{\max} と内液比率 c_2 との関係である。タンクの径が相対的に小さい $c_1=1.0$ では内液量が零($c_2=0$)の場合、設定した補強要素では $\eta_{\max}=8m$ までは損傷を受けない。内液量が増加するにつれて η_{\max} は増加する。この理由は内液量の重量がタンクの浮き上がりを抑制し、アンカーの引張応力度を小さくするためである。タンクの径が大きくなってもこの傾向は同じである。タンクの径が大きくなるにつれて最大浸水深は小さくなる。この結果は補強要素の限界状態条件(42), (43)式に影響する外力は最大浸水深より、タンクの径 c_1H_T が大きく影響していること意味し、(19)～(22)式の c_1H_T の累乗項からも鉛直波力と鉛直波力モーメントが支配的な外力と考えられる。

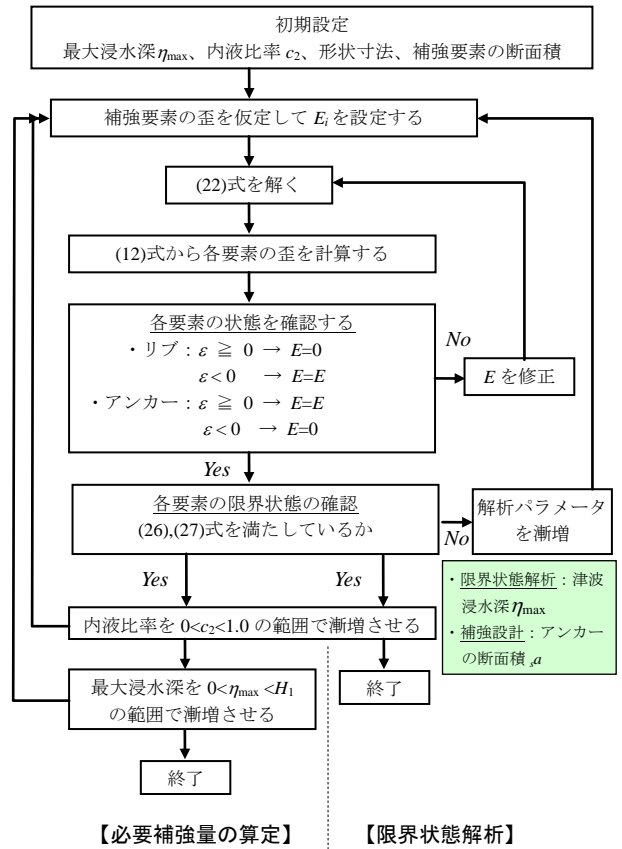


図9 限界状態解析と必要補強量の算定フロー

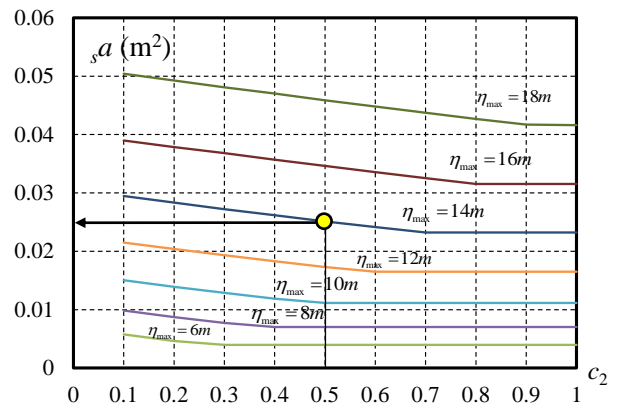


図10 アンカーボルトの必要補強断面積($c_1=1.0$)

図 7 より内液比がある大きさ以上になると最大浸水深が飽和する傾向にある。タンクの形状が $c_1=1.5$ では内液量比 $c_2=0.8$ 以上、 $c_1=2.0$ で $c_2=0.6$ 以上である。図 7 の△はタンクの形状が $c_1=2.0$ で F_V, M_V を零とした場合の結果である。限界状態時の最大浸水深は内液比率に関わらず $c_2 \geq 0.6$ の最大浸水深と同じである。図 8 は $c_1=2.0$ の径が大きいタンクの限界状態時の応力比である。内液の少ない $c_2 < 0.3$ の範囲では垂直応力度が支配的であり、 $c_2 > 0.4$ ではせん断応力度が支配的となる。 $c_2 \geq 0.6$ では補強要素の垂直応力度は零でせん断応力度のみが生じる。よって図 7 で内液比率が高く最大浸水深が飽和する範囲では、アンカーのせん断応力のみで限界状態に達している。基礎が洗掘されると津波はタンク底部に回り込み、タンクを押し上げる鉛直波圧が作用する。タンクの底部に水が入り込まない対策は、特にタンクの内液比率が低い場合、移動防止効果が高い。

なお内液量が多いとコンクリートの応力比も大きくなるが、今回の条件では(43)式のアンカーの条件で限界状態が決定した。

2.2 限界状態解析による必要補強量の算定

2.1 で提示した限界状態解析を用いてタンクの移動を防止するための必要補強量を算定する。算定フローを図 9 に示す。釣合式(38)式と限界状態の条件(44), (45)式を制約条件として限界状態解析では浸水深を、必要補強量の算定ではアンカーの断面積を最大化する非線形計画問題となる。

図 10 に $c_1=1.0$ の形状のタンクに対する補強要素（アンカーボルト）の必要断面積を示す。例えば内液比率 0.5 で浸水深 14m の場合、アンカーボルトの必要断面積は図 7 の縦軸の数値を読み取ると 0.0252m^2 で M30 のアンカーボルトで 30 本相当である。津波浸水深 η_{\max} が増すにつれて必要補強断面積は増加する。内液比率が上がると内液重量による鉛直波力の打消し作用により必要補強断面積は低下し、内液比率がある限界を超えるとせん断応力度で限界状態に達するため、補強要素の必要断面積が一定となる。

2.3 まとめ

本章では津波を受けて大型液体貯蔵タンクが移動しない限界を使用限界と定義し、補強要素の限界状態解析を実施し、解析結果から以下の事項が考察された。

- [1] 円筒形タンクに対する津波外力の大きさは最大浸水深よりタンクの径が大きく影響し、鉛直波力と鉛直波力モーメントが支配的な外力と考えられる。
- [2] 限界状態に達する津波の最大浸水深は、内液比率が低い場合は補強要素のアンカーボルトの垂直応力度で、内液比率が高い場合はアンカーボルトのせん断応力度によって定まる。
- [3] 基礎の洗掘を防止しタンク底部に水が入り込まないよ

うすることは、支配的外力の基となる鉛直波圧を低減しタンクの移動防止策として、特に内液比率が低い場合有効である。

また内液比率と想定浸水深に対してタンクが移動しないための必要補強量（アンカーボルトの必要断面積）を算定するためのフローと補強設計用チャートを提示した。補強設計用チャートから以下の事項を考察した。

- [4] 津波浸水深が増すにつれてアンカーボルトの必要断面積は増加する。内液比率が上がると内液重量による鉛直波力の打消し作用により必要断面積は低下し、内液比率がある限界を超えるとせん断応力度で限界状態に達するため、補強要素の必要断面積が一定となる。

3. 方法の検証

本章ではタンクにおける限界状態解析の考え方と解法の妥当性を検証する。

3.1 限界曲線の数値解析法²⁰⁾

2.1.4 で限界曲線の求め方の基礎式を示した。複合荷重を受ける構造物の耐力は、独立の荷重パラメータを座標軸とする多次元空間に曲面（崩壊曲面）として描くことができる。その作用荷重が 2 つの場合は曲線となり、限界曲線と呼ばれている²¹⁾。限界曲線は載荷経路に依存せず、構造体に固有である²²⁾。限界曲線内部の点は塑性崩壊が生じない荷重の組み合わせを表し、設計荷重分布に対する安全率が把握できる。

本論で使用した数値解析は使用限界状態を設計基準とする弾性解析である。降伏条件を満たしながら荷重パラメータの軌跡を追跡する限界曲線解析と制約条件は異なるが求解のアルゴリズムは共通である。

図 11 に示す限界曲線の凹凸は、設計上重要である。原点位置から限界曲線を見て凸（図 11 の太実線）であれば、各荷重に対する耐力和（図 11 の実線）で安全性を確認すれば安全側の評価となる。逆に凹（図 1 の破線）であ

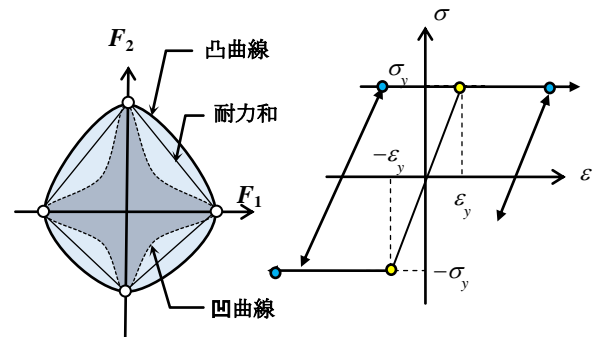


図 11 限界曲線の凹凸

図 12 完全弾塑性型
応力 - ひずみ関係

うば、独立荷重に対する耐力和は危険側の評価となる。

本節では、限界状態解析で用いた限界曲線の数値解析

を拡張した弾塑性構造物の限界曲線の解析法を示す。対象とする構造は微小変形と座屈が生じない条件下で、材料特性が図 12 に示す完全弾塑性体のトラス構造である。

3.1.1 限界曲線解析の条件式

限界曲線の解析基礎式は次の 3 条件である。

1) 釣合条件

複合荷重 \mathbf{f} を受ける系の増分型釣合式は

$$\mathbf{f} \Delta \mathbf{F} = \sum_{i=1}^m \Delta F_i \mathbf{f}_i = \mathbf{K} \Delta \mathbf{U} \quad (50)$$

ここに \mathbf{f} , $\Delta \mathbf{F}$, \mathbf{K} , $\Delta \mathbf{U}$, m は、それぞれ荷重分布ベクトル \mathbf{f}_i を列ベクトルとする行列、荷重係数 ΔF_i を成分とするベクトル、接線剛性行列、増分変位、独立な荷重ベクトルの数である。接線剛性行列の固有ベクトル ϕ_i を列ベクトルとするモード行列 Φ で(50)式を対角化すると

$$\mathbf{g} \Delta \mathbf{F} = \sum_{i=1}^m g_i \Delta F_i = \mathbf{A} \Delta \mathbf{u} \quad (51)$$

ここに

$$\mathbf{g} = \Phi^T \mathbf{f}, \Delta \mathbf{u} = \Phi^T \Delta \mathbf{U} \quad (52a,b)$$

$$\mathbf{A} = \Phi^T \mathbf{K} \Phi = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (53)$$

λ_i は接線剛性行列 \mathbf{K} の固有値である。

2) 崩壊条件

構造物が塑性崩壊するとき、崩壊荷重に対して釣合状態が唯一定まらず、接線剛性行列が特異となる。このとき、接線剛性行列の行列式が零、もしくは固有値が一つ以上零となる。

$$\det(\mathbf{K}) = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = 0 \quad (54)$$

3) 応力状態の制約条件

微小変形問題では、剛性変化は材料定数の変化に起因する。鋼構造部材に代表される完全弾塑性特性の場合、部材が降伏すると、その部材の材料定数がヤング係数 $206,000\text{N/m}^2$ から、0 へ不連続に低下する。崩壊はこの剛性低下で決まるが、崩壊を決定する部材の応力状態点は、次式で示す必ず降伏点となる。

$$|\epsilon| = \epsilon_y, |\sigma| = \sigma_y \quad (55)$$

崩壊を決める部材 i は降伏点に止まらなければならないから、その部材の増分歪は零である。つまり

$$\Delta \epsilon_i = 0 \quad (56)$$

歪 - 変位関係式

$$\Delta \epsilon = \mathbf{B} \Delta \mathbf{U} = \mathbf{B} \Phi \Delta \mathbf{u} \quad (57)$$

を用いて(57)式を書き換えると

$$\Delta \epsilon_i = \mathbf{H} \Delta \epsilon = \mathbf{H} \mathbf{B} \Phi \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (58)$$

3.1.2 限界曲線解析の流れ

解析手順を、図 13 を用いて以下に示す。

① 無荷重時 (図 13 の O 点) から構造体が崩壊するまで、一つの荷重パラメータのみを増加させる。例えば(50)式中で荷重数 m を 2、増分パラメータを ΔF_1 、最初の崩壊点を A とする。

② 崩壊点 A において、(51)式で 1 次モードの固有値 $\lambda_1=0$ 、その他の固有値を $\lambda_i \neq 0$ とすると

$$0 \cdot \Delta u_1 = g_{11} \Delta F_1 + g_{12} \Delta F_2 \quad (59)$$

$$\lambda_i \cdot \Delta u_i = g_{i1} \Delta F_1 + g_{i2} \Delta F_2 \quad (60)$$

崩壊点 A から ΔF_1 と異なる荷重パラメータ ΔF_2 を増分パラメータとして、(59), (60)式を解くと

$$\Delta F_1 = -\frac{g_{12}}{g_{11}} \Delta F_2, \Delta u_i = \frac{(g_{11} g_{i2} - g_{12} g_{i1})}{\lambda_i g_{11}} \Delta F_2 \quad (61)$$

③ ②までは釣合のみの条件から得られた結果であり、(59)式の Δu_1 は不定である。(54)式の崩壊条件と応力状態の制約条件(58)式を満足するように Δu_1 を定め、A 点近傍の崩壊点 (図 13 中の B 点) へ移行する。

④ ②→③の手順を繰り返して逐次、限界曲線を追跡する。

なお、崩壊モードは接線剛性行列の固有ベクトルの中で零固有値に対する固有ベクトルである。この崩壊モードは、限界曲線に対して法線方向に向いており、限界曲線と崩壊モードベクトルとは直交する法線則が成り立つ。

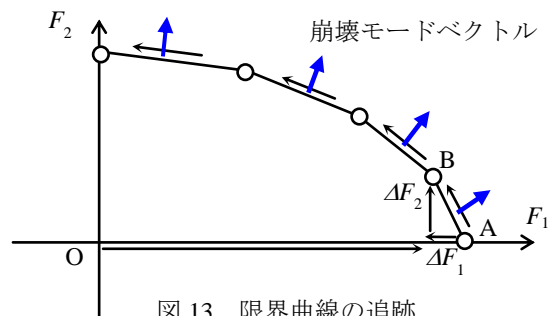


図 13 限界曲線の追跡

3.1.3 解析例

図 14 に 3 部材トラスのモデル²¹⁾を示す。図 15 は限界曲線の解析結果である。座標軸は荷重 F_1, F_2 を降伏軸力 $N_y (= \sigma_y A)$ で無次元化している。図 15 から限界曲線は外側に凸の形状である。

鉛直荷重 $F_2=0$ の条件で水平荷重 F_1 を増加させ、崩壊点 A から(51), (54), (58)式を満足する崩壊状態を求め、限界曲線を追跡する。

■ A-B 間 弾性時の接線剛性行列は

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{E_A A_A + E_C A_C}{2\sqrt{2}L} & \frac{E_A A_A - E_C A_C}{2\sqrt{2}L} \\ \frac{E_A A_A - E_C A_C}{2\sqrt{2}L} & \frac{E_A A_A + E_C A_C}{2\sqrt{2}L} + \frac{E_B E_A}{L} \end{bmatrix} \quad (62)$$

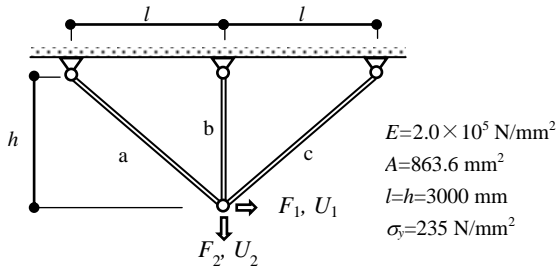


図 14 解析モデル

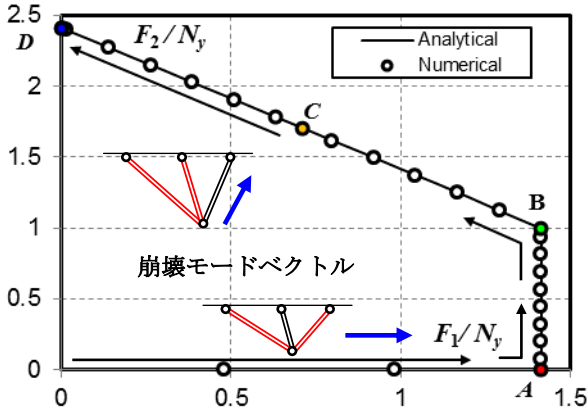


図 15 限界曲線の解析

と表される。点 A で部材 a, c が降伏し、接線剛性行列 \mathbf{K} は次式で示される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{E_B A_B}{L} \end{bmatrix} \quad (63)$$

\mathbf{K} の固有値と固有ベクトルは

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \frac{E_B A_B}{L} \neq 0, \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \phi_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (64a-d)$$

である。零固有値があり、崩壊条件(54)式を満たす。(64)式を(59), (60)式に代入すると

$$0 \cdot \Delta u_1 = 1 \cdot \Delta F_1 + 0 \cdot \Delta F_2 \quad (65)$$

$$\frac{E_B A_B}{L} \cdot \Delta u_2 = 0 \cdot \Delta F_1 + 1 \cdot \Delta F_2 \quad (66)$$

(65), (66)式を解くと

$$\Delta F_1 = 0 \quad (67)$$

$$\Delta u_2 = \frac{L}{E_B A_B} \Delta F_2 \quad (68)$$

を得る。(67)式から水平荷重 F_1 は一定となる。

部材 c が降伏して崩壊すると、(58)式は

$$\Delta \varepsilon_c = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2L} & \frac{1}{2L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (69)$$

(68), (69)式より

$$\Delta u_1 = \Delta u_2 = \frac{L}{E_B A_B} \Delta F_2 \quad (70)$$

以上の結果から、 ΔF_2 を増分パラメータとして、釣合条件、崩壊条件、応力状態の条件を満たし、全ての独立変

数が得られる。

A-B 間の限界曲線は

$$\frac{F_1}{N_y} = \sqrt{2} \quad (71)$$

であり、その接線ベクトルは

$$\frac{dF_2}{dF_1} = \{0, 1\}^T \quad (72)$$

である。崩壊モード ϕ_1 は(64c)式より $\{1, 0\}^T$ であり、

$$\frac{dF_2}{dF_1} \perp \phi_1 \quad (73)$$

から法線則が成り立つ。

■B-C間 点 B で部材 a,b,c が降伏する。この時の接線剛性行列 \mathbf{K} は次式で示される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (74)$$

\mathbf{K} の固有値と固有ベクトルは

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{Bmatrix}, \phi_2 = \begin{Bmatrix} -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{Bmatrix} \quad (75a-d)$$

である。零の重複固有値であり、崩壊条件(54)式を満足する。

B 点近傍で部材 a,b のみ降伏し、c は弾性状態とすると接線剛性行列は

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{E_C A_C}{2\sqrt{2}L} & -\frac{E_C A_C}{2\sqrt{2}L} \\ -\frac{E_C A_C}{2\sqrt{2}L} & \frac{E_C A_C}{2\sqrt{2}L} \end{bmatrix} \quad (76)$$

\mathbf{K} の固有値と固有ベクトルは

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \frac{E_C A_C}{\sqrt{2}L}, \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{Bmatrix}, \phi_2 = \begin{Bmatrix} -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{Bmatrix} \quad (77a-d)$$

(77)式を(59), (60)式に代入すると

$$0 \cdot \Delta u_1 = 1/\sqrt{2} \cdot \Delta F_1 + 1/\sqrt{2} \cdot \Delta F_2 \quad (78)$$

$$\frac{E_C A_C}{\sqrt{2}L} \cdot \Delta u_2 = -1/\sqrt{2} \cdot \Delta F_1 + 1/\sqrt{2} \cdot \Delta F_2 \quad (79)$$

(78), (79)式を解くと

$$\Delta F_1 = -\Delta F_2 \quad (80)$$

$$\Delta u_2 = \frac{E_C A_C}{L} \Delta F_2 \quad (81)$$

部材 b が降伏して崩壊すると、(58)式は

$$\Delta \varepsilon_b = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (82)$$

と書ける。(81), (82)式より

$$\Delta u_1 = -\Delta u_2 = -\frac{E_C A_C}{L} \Delta F_2 \quad (83)$$

■C-D間 点 C で部材 a,b が降伏する。この時の接線剛性行列 \mathbf{K} は(76)式、固有値と固有ベクトルは(77)式で示される。B-C 間と異なる事項は、崩壊を決める降伏部材が部材 a となる。このとき、(52)式は

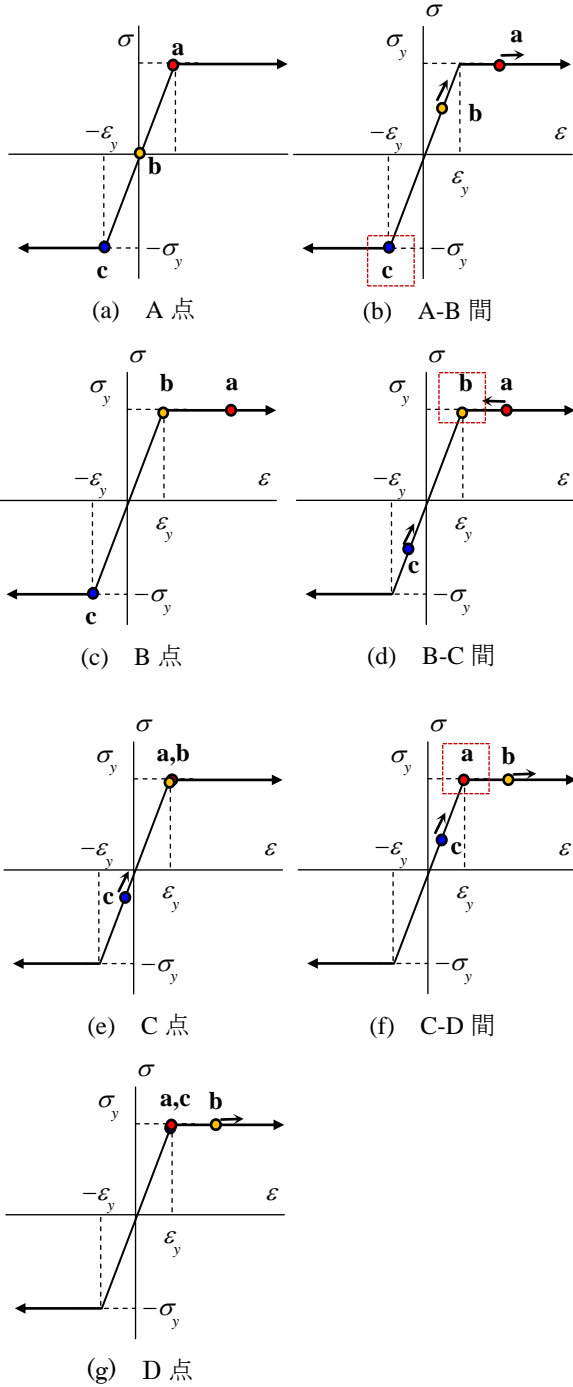


図 16 限界曲線上での各部材の応力状態

$$\Delta \varepsilon_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (84)$$

と書ける。(78)式より

$$\Delta u_1 = 0 \quad (85)$$

B-D 間の限界曲線は

$$\frac{F_2}{N_y} = -\frac{F_1}{N_y} + 1 + \sqrt{2} \quad (86)$$

であり、その接線ベクトルは

$$\frac{dF_2}{dF_1} = \{1, -1\}^T \quad (87)$$

崩壊モード ϕ_1 は(77c)式より $\{1, 1\}^T$ であり、A-B 間と同様で法線則

$$\frac{dF_2}{dF_1} \perp \phi_1 \quad (88)$$

が成立する。

崩壊時の応力状態

A~D 点において、各部材の応力状態を図 6 に示す。図 16(b), (d), (f) の破線四角で囲った部材の応力と歪の値を拘束している。B-C 間の図 16(d) で部材 a が降伏し、降伏棚を逆行し、塑性法則に矛盾しているように見える。注意すべき点は、図 16 は荷重パラメータの変化に伴う崩壊時の応力点の軌跡であり、塑性法則を遵守しつつ応力履歴を追跡する通常の弾塑性解析とは異なる。

以上の解析過程を踏まえて、図 15 より○で示す数値解析結果は、実線の解析解とよく対応し、精度良く限界曲線が得られている。

3.1.4 まとめ

本節では限界曲線の追跡で用いた解析法を示した。微小変形と座屈が生じない条件下で、材料特性が完全弾塑性体であるトラス構造の限界曲線の解析手法を述べた。提示した手法は、釣合式、崩壊条件、応力状態の拘束条件を基礎式とし、3つの条件を全て満たす荷重パラメータの組を増分解析で求める手法である。解析解が得られている3部材トラスの限界曲線解析を通して得られて事項を以下に記す。

- [2-1] 崩壊モードベクトルと限界曲線との法線則が成立することを確認した。
- [2-2] 得られた限界曲線の形状は外側に凸である。
- [2-3] 数値解は解析解と良く対応しており、提示した手法の妥当性を検証した。

4. 実効性のある提言

本研究では以下に示す巨大津波を受ける大型石油タンクの防災対策を提言した。

【1】津波に対する大型石油タンクの被災防止方針

大型石油タンクの津波に対する設計方針は、5m を超える想定浸水深に対してタンクの移動（浮き上がり・滑動・転倒）を防止する使用限界状態設計とする。また被災防止のための基礎とタンクに対する構造補強モデルを提示した。

【2】津波に対する大型石油タンクの限界状態に対する設計上の留意点

津波に対する大型石油タンクの限界状態解析法を弾塑性構造物の限界曲線解析を基に開発した。その解析結果から得られた有益な設計上の留意点として、津波外力の大きさは最大浸水深よりタンクの径が大きく影響し、鉛直波力と鉛直波力モーメントが支配的な外力で

ある。限界状態に達する津波の最大浸水深は、内液比率が低い場合は補強要素のアンカーボルトの垂直応力度で、内液比率が高い場合はアンカーボルトのせん断応力度によって定まる。基礎の洗掘を防止しタンク底部に水が入り込まないようにすることは、支配的外力の基となる鉛直波圧を低減しタンクの移動防止策として、特に内液比率が低い場合有効である。

【3】想定浸水深に対する大型石油タンクの必要補強量

想定浸水深に対するタンクの必要補強量を算定できる補強設計用アルゴリズムを提案した。そのアルゴリズムにより、タンクの形状、内液比率、津波浸水深を設定すれば、限界状態に達しないための補強要素の必要補強量が得られる設計チャートを提示した。

補強設計用チャートから、津波浸水深が増すにつれてアンカーボルトの必要断面積は増加すること、内液比率が上がると内液重量による鉛直波力の打消し作用により必要断面積は低下し、内液比率がある限界を超えるとせん断応力度で限界状態に達するため、補強要素の必要断面積が一定となることを明らかにした。

また、本研究成果の副次的効果として、タンクと補強要素との接合方法を衝撃力および交番振動を吸収する仕様へと展開できれば、津波に対する補強設計が耐震補強としても有効となる可能性を有する。

本研究を発展させるための研究方針を述べる。地震動を受け、津波が到来するまで大型石油タンク基礎・地盤がどれだけ損傷・破壊するかによって、津波を受けたときの初期条件が異なる。また第1波を受けた後の第2波や引き波に対しても同様である。この初期条件は不確定性を有し、津波外力評価とタンクの終局耐力に大きく影響するため、今回、ある仮定下で使用限界状態に対して補強設計を提案した。巨大津波に対する安全性の保証をより強固にするために、タンク終局耐力を考慮した補強設計へと展開する必要がある。また、耐力に基づく補強設計と併せて津波外力を受けた際、タンクと内容物の動きを考慮して限界状態を把握する研究が望まれる。

参考文献

- 1) 消防庁消防研究センター “平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書 (第 1 報) 第 3 編 危険物施設”, 消防研究技術資料第 82 号, pp.274-352, 2011.12.
- 2) 藤井直樹, 今井文彦 “津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案”, 自然災害科学, J. JSNDS, 28-4, pp.371-385, 2010.
- 3) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ “石油コンビナート等の防災

対策”, 総務省消防庁予防課危険物保安室特殊災害室 経済産業省保安課高圧ガス保安室, 2012.12.

- 4) 総務省消防庁 “危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 2.1 津波による被害事例調査”, pp.12-36, 2009.3.
- 5) 菅付紘一 “原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 馬越一也: 貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法”, 土木学会論文集 B2 (海洋工学), Vol.69, No.2, I_826-I_830, 2013.
- 6) 総務省消防庁 “危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 5.5 アンカーによる屋外貯蔵タンクの滑動防止対策に関する検討”, pp.199-219, 2009.3.
- 7) 総務省消防庁 “危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 3.3 防油堤・屋外貯蔵タンクの津波被害予測手法 (2)屋外貯蔵タンクの被害形態発生可能性の評価方法”, pp.87-92, 2009.3.
- 8) 青野雅也 “屋外タンク貯蔵所の津波対策について～地域性に応じた被害軽減・防止策～”, Safety & Tomorrow, No.151, pp.30-38, 2013.9.
- 9) 畑山健 “石油タンクの津波被害について 特集 I 東日本大震災(6)～危険物施設等の地震・津波被害～”, 消防科学と情報, No.19, 2012 夏号
- 10) 西村督 “大型液体貯蔵タンクの津波外力に対する限界状態解析と補強設計”, 第 38 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 (論文), 2015.12.
- 11) 飯田福司, 山岸邦彰, 西村督, 後藤正美 “加振実験による木製水槽の地震時挙動に関する研究”, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 2 号, pp.2-10, 2015.
- 12) 飯田福司, 山岸邦彰, 西村督, 後藤正美 “強振動実験による木製水槽の地震時挙動に関する実験的研究”, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.251-256, 2015.
- 13) 加納修平, 中野時衛 “波外力による RC 造・S 造建物への被害想定”, NTT Building Technology Institute, pp.1-5, 2005.
- 14) (社)土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会 “原子力発電所の津波評価技術”, 2002.2.
- 15) 佐野正和 “津波遡上時の燃料タンクの健全性評価”, 中部電力・技術開発 ニュース”, No.130, pp.19-20, 2008.4.
- 16) 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 稲垣聡 “石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法”, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.271-275, 2006.
- 17) 総務省消防庁 “危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 3.2 防油堤・屋外タンクに作用する津波波力の算定方法 (2) 屋外タンクに作用する津波波力の算定方法”, pp.70-78, 2009.3.
- 18) 総務省消防庁 “危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 資料-3 屋外貯蔵タンクに作用する津波波力に関する検討 2. タンク本体に作用する津波波力に関する水理模型実験の概要”, pp.308-325, 2009.3.

- 19) 例えば西村督, 山中郁美 “擬似焼きなまし法を用いた膜曲面の極小曲面探索法”, 第 37 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 (論文), pp.85-90, 2014.12.
- 20) 西村督 “完全弾塑性トラス構造の限界曲線解析”, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 57 号, pp.137-140, 2014.
- 21) 北川浩 “塑性力学の基礎”, 日刊工業新聞社, 1979.3
- 22) 例えば中村恒善 “建築骨組の最適設計”, 丸善, p.39, 1980.1

研究テーマ 1

課題 1-9

超巨大災害発生時の避難勧告 ・ 指示の効果的情報伝達対策

金沢工業大学 土田義郎 教授

課題 1-9 超巨大災害発生時の避難勧告・指示の効果的情報伝達対策

金沢工業大学

教授

土田 義郎

防災放送 正常性バイアス 避難行動
訓練システム 情報伝達

1. 研究目的

2011年3月に発生した東日本大震災は未だ生々しい記憶である。このような大きな災害が起きた時には様々なチャンネルで津波への避難が呼びかけられる。防災放送もその一つである。テレビやラジオなどの色々な情報伝達の方法もあるが、特に農村、漁村など、情報機器を保持せずに作業を行っているような場合に、直接的に呼びかけられる情報伝達手段として、防災放送は未だに意味を持っている。

その放送音声は、所によってはやまびこなどのロングパスエコーが生じ、時期によっては降雨音などによりマスクングされることで聞き取りにくくなっている。それにより、情報伝達機能を十分に果たしていないことがあるのは大きな問題である。また、聞こえたとしても「意味を理解できない」という状況も実際に生じており、行動に移さない住民や的確な判断ができない住民が存在することが明らかになっている¹⁾。これは、放送した内容がスピーカを通してどのように住民に聞こえているのか、もしくはどのように判断されるかを、放送する側が理解できていないことが原因だと考えられる。その他にも、マニュアルの説明を具体的な状況に置き換えずに、不適切な放送をしてしまっていた事例も報告されている(図1)。

また、茨城県大洗町の東日本大震災での事例では4メートルの津波に遭いながらも死者は1人もでなかった。これは、防災放送をマニュアル通りに内容を読み上げるのではなく、普段使わない命令調の表現や内容を差し替えるなどの対応により、住民は強く危機感を感じ取って避難したためだと考えられている。町長と消防が連携してアナウンスに工夫をしていたため、大きな災害に遭いながらも人的被害を阻止できたと考えられる²⁾。

災害発生時、命を守るためには避難勧告・指示といった情報が確実に聞こえ、意味を理解し、避難行動につながる必要がある。超巨大災害が発生し、どのように避難情報が伝達されるかは、行政システムという点やハードウェアの問題としては認識されているが、防災放送に限った場合、その音響的側面については未だ課題が多く残っている。典型的な問題が「正常性バイアス」である(図2)。正常性バイアスとは、避難しなくてはならない状況においても、滅多なことは起きるはずがないと思ひこみ、実際に避難する行動が遅れるというものであ

る。人間の認知と行動のよく知られた効果である。

本課題では、まず音声による避難情報の伝達経路について示し、確実な情報伝達のための基礎条件を明らかにした。次いで正常性バイアスの事例を示し、それを回避できた事例についても示した。偶然回避できた結果を生かすべく、それを訓練システムとして構築する必要性を示した。また、実際にアナウンスをシミュレートしたうえでいくつかの実験を行い、避難意識を高めるアナウンスについて明らかにする。さらに防災放送を聴取した時の避難意識を高めるためのアナウンスを実現するため、音のシミュレーションを含む実用的な訓練システムの開発を目的としている。



図1 不適切な放送



図2 正常性バイアス

2. 伝搬シミュレーション装置の試作

本格的な訓練システム構築の前に、簡易的な方法で音の伝搬シミュレーション装置を試作した。防災放送の聴取状況が災害時とほぼ同じになるように工夫しているが、機器の制限により限定的な条件だけが実施できる。反射音は時間差が一定間隔という制約があるため、経路差の分布が500mずつと想定した(図3,4)。

このシミュレーション装置を活用し、録音した音声を評価者に心理的な尺度で評価してもらう。

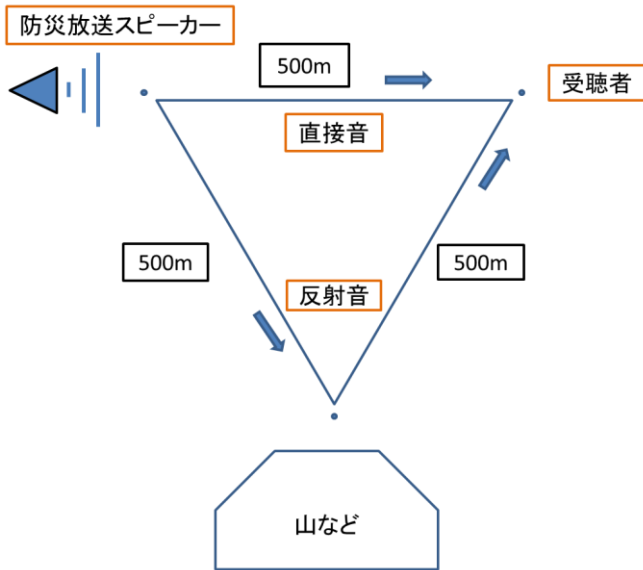


図3 伝搬のシミュレーションで想定した反射音の状況

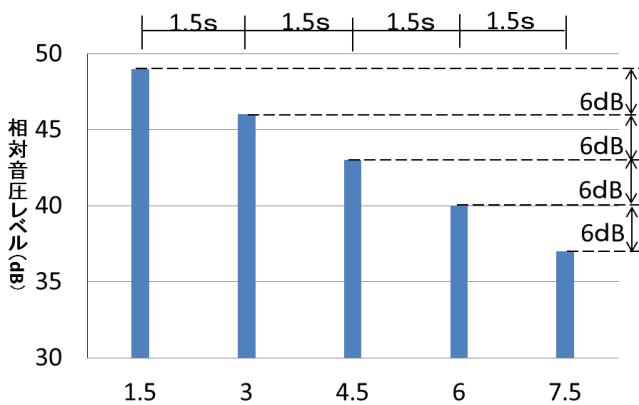


図4 伝搬シミュレーション装置におけるエコータイムパターン

3. アナウンスの聴取実験

3.1 実験目的

防災放送の際、間の取り方や話者の緊迫感によって印象が異なる。どのような声の表情、話し方で放送すると避難をしようと感じるのか。防災放送に適した話し方はどのようなものであるかを明らかにすることを目的とした。また、それを受けてアナウンスの訓練システムを構

築するが、そのプロトタイプにもなるような実験としてデザインしている。

3.2 想定する状況

2008年に石川県で集中豪雨が発生し、金沢市浅野川の堤防が決壊・氾濫した。この事例を参考にして状況を想定し、放送文を作成した。避難指示が出た地域を北間町、避難場所を浅野川小学校と想定した。浅野川小学校周辺の地図を図5に示す。



図5 浅野川小学校周辺の地図

3.3 放送の内容について

表1に放送パターンを示し、表2に文体の別と実際の放送内容を示す。アナウンスの声は男声と女声を用いる。文体は敬体・常体・命令の3つを使用する。間の取り方は具体的に何秒とは指示せず、話者に任せている。また、読みあげ方として緊迫感をつけているか、いないかという組み合わせを考慮した。これらの全24パターンの放送音声で検証実験を行う。

表1 放送音声の収録パターン

性別	文体	間	緊迫感
男声・女声	敬体	有・無	有・無
	常体		
	命令		

表2 放送の文体とその内容

敬体	ただ今、北間町近辺の堤防が決壊しました。とても危険な状態です。北間町の住民は浅野川小学校へ避難してください。時間がなれば、安全な建物に避難してください。
常体	ただ今、北間町近辺の堤防が決壊した。とても危険な状態である。北間町の住民は浅野川小学校へ直ちに避難せよ。
命令	北間町近辺の堤防が決壊した。北間町の住民は直ちに避難せよ。

3.4 実験手順

金沢工業大学八東穂キャンパスの 69・222 室（一般ゼミ室）を使用した。防災放送の音声（試験刺激）と環境騒音（雨音）は独立に再生した。どちらも A 特性音圧レベルは 48~49dB に収まるように設定した。試験刺激は、それぞれ音圧レベルが異なるため、アテネーターを使用して雨音と同じ音圧レベルに調整した。実験のシステム図を図 6 に示す。

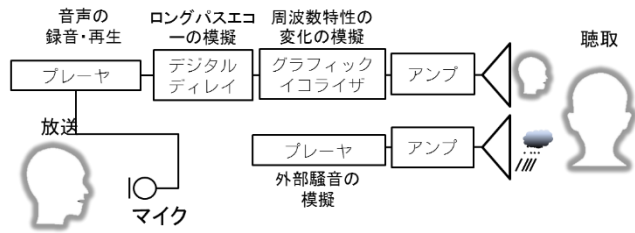


図 6 システム図

試験刺激を再生するスピーカは、屋外側に向けて音を窓ガラスで反射させて、あたかも外から聞こえているような状況にした。実験機材やスピーカが被験者に見えると外から聞こえているように認識できなくなる恐れがあるため、被験者とスピーカの間には移動式のホワイトボードを設置し、機材を見えないようにした（図 7,8）。実験中は、コントロールできない雑音源である空調は停止した。

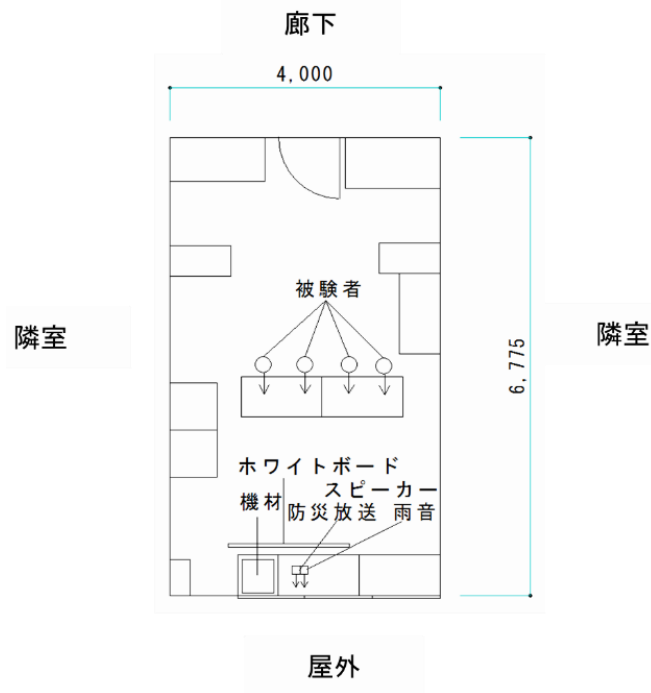


図 7 実験環境（平面図）

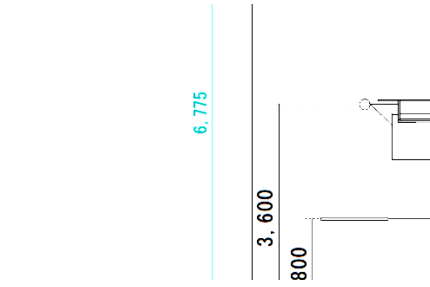


図 8 実験環境（断面図）

上記のような実験環境において、被験者に試験刺激を試聴させた。その音声について、緊迫感・聞き取りやすさ・違和感・避難行動の誘起について SD 法で評価させた。評価項目はそれぞれ 7 段階の尺度とした（図 7）。

実験の進行とともに、放送を聞いているうちに徐々に内容が分かるようになって、前半の評価のみが悪いものとなってしまう。実験計画として、提示順序はランダムにしているが、ばらつきをなるべく抑えるように実験前にアナウンスの内容を下記の 2 点についてあらかじめ伝えている。

- (1)北間町近辺の堤防が決壊したこと
- (2)浅野川小学校へ避難指示が出ていること。

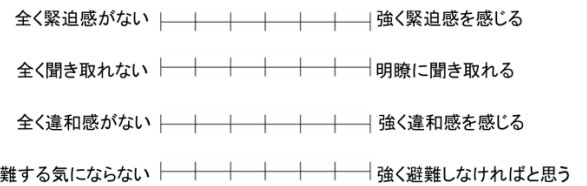


図 7 評価項目

3.5 考察

まず、それぞれの条件の主効果を検討した。その後、条件間の交互作用を確かめるために分散分析を行った。

3.5.1 文体

(1) 緊迫感

緊迫感と文体の平均はほとんど変化が見られなかった。全体的に 3 を少し上回る数値となった。

(2) 聞き取りやすさ

聞き取りやすさと文体の関係は敬体が最も数値が高く、常体の数値が最も低いが、ほとんど差がなかった。

(3) 違和感

どの文体であってもほぼ同じ結果になった。全体的に他の評価尺度（緊迫感・聞き取りやすさ・避難）の値と比べるとやや高い数値となった。

(4) 避難

どの文体も 3 を上回る結果となったが、文体によって避難を意識するような違いはあまり見られない。

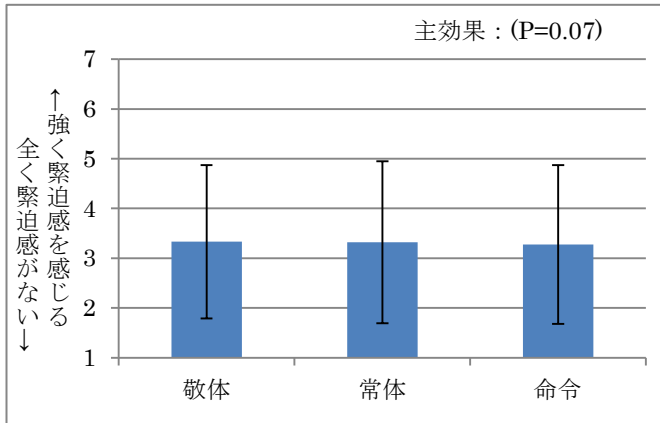


図8 緊迫感・文体

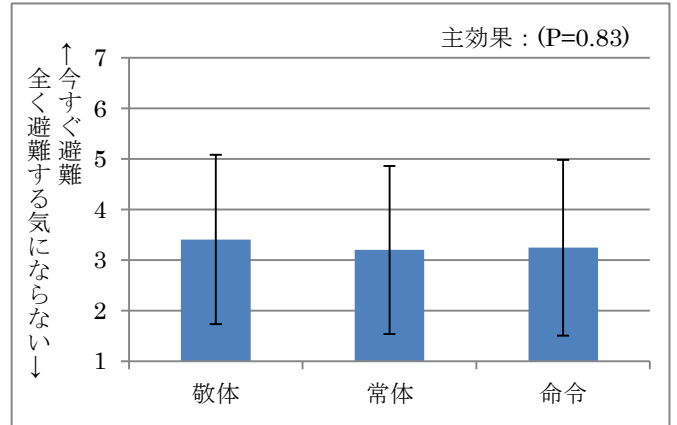


図11 避難・文体

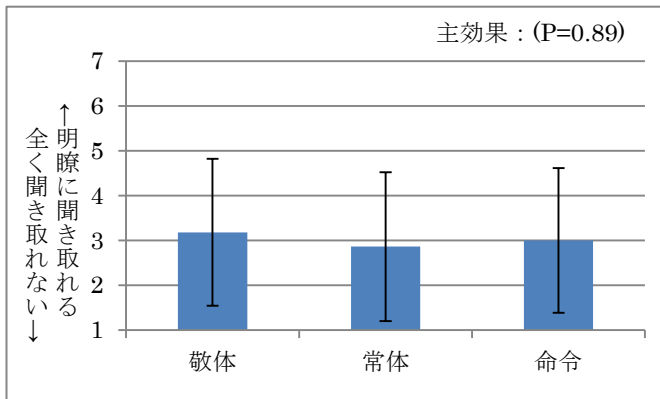


図9 聞き取りやすさ・文体

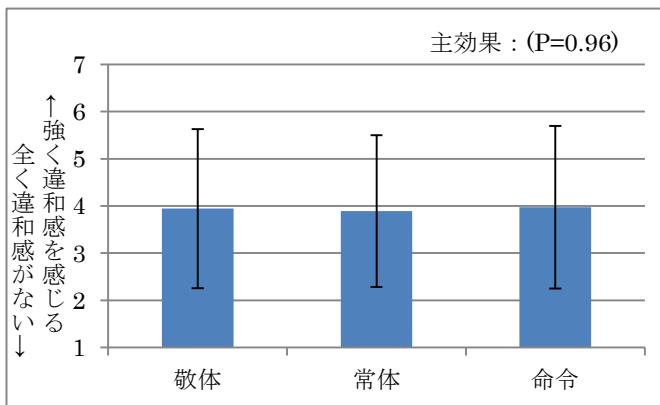


図10 違和感・文体

3.5.2 間の有無

(1) 緊迫感

間を取らない時の方が少し高い数値となった。また、有意な差が見られた。

(2) 聞き取りやすさ

どちらもあまり差はなく3程度の値となった。

(3) 違和感

違和感に関しては、他の間の有無についての3つのグラフより大きい数値となった。しかし、違和感と間の有無に関して差はほとんど見られなかった。

(4) 避難

避難と間の有無の関係は、間が無い時の方が高い数値となった。また、5%以下となり有意差が見られた。

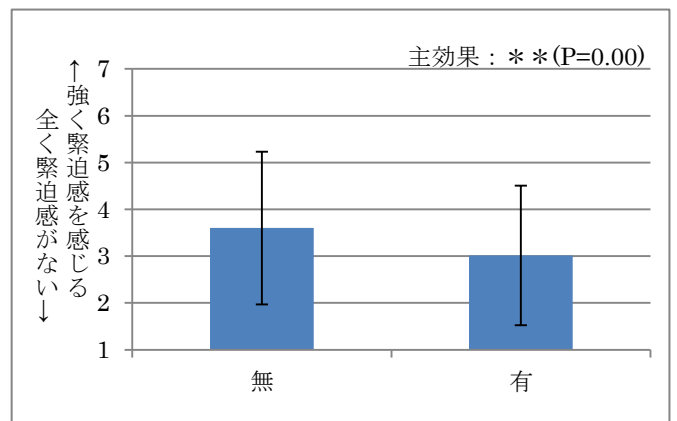


図12 緊迫感・間の有無

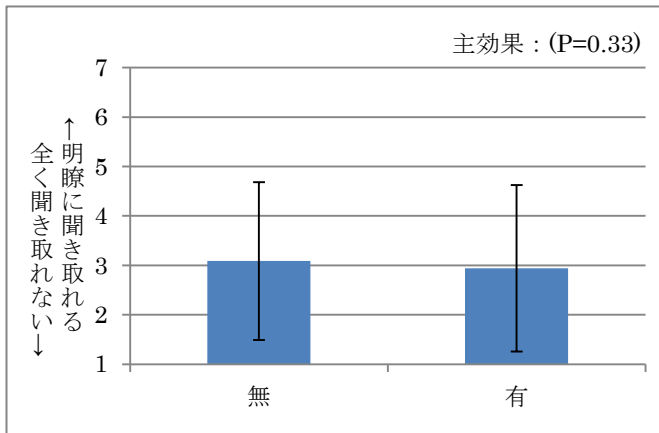


図 13 聞き取りやすさ・間の有無

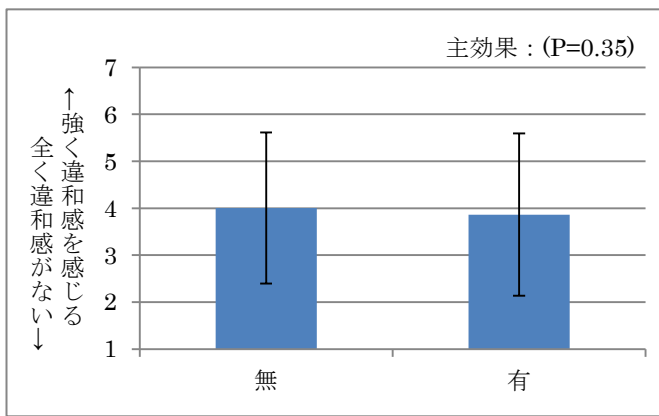


図 14 違和感・間の有無

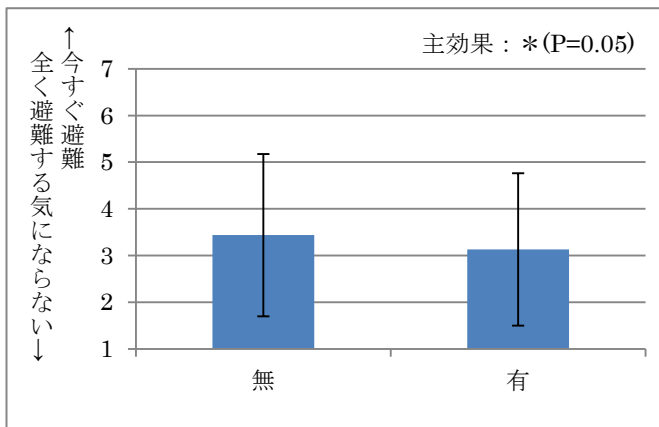


図 15 避難・間の有無

3.5.3 緊迫感の有無

(1) 緊迫感

緊迫感を付けた場合に主効果の有意差が 0.1%以下となった。

(2) 聞き取りやすさ

緊迫感がない方が聞き取りやすい結果となった。どの

評価尺度よりも最も低い数値となった。

(3) 違和感

結果にあまり差が見られなかったが、緊迫感有りの方が大きな数値となった。

(4) 避難

結果にあまり差が見られなかった。数値として、3 を少し超えるぐらいの値となった。

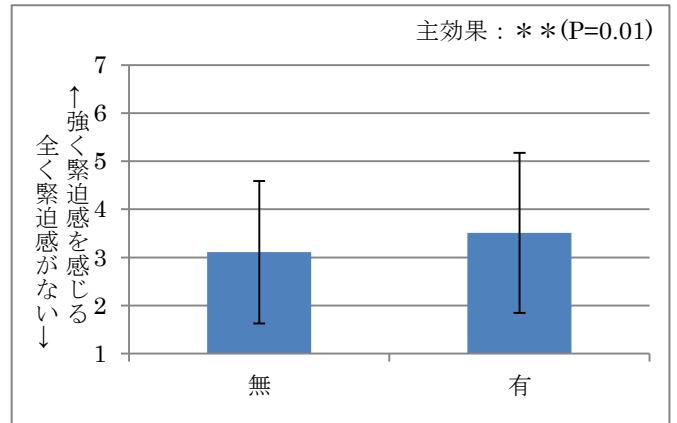


図 16 緊迫感・緊迫感の有無

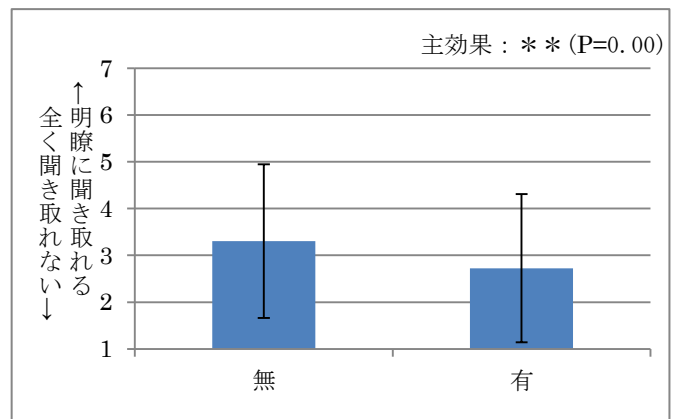


図 17 聞き取りやすさ・緊迫感の有無

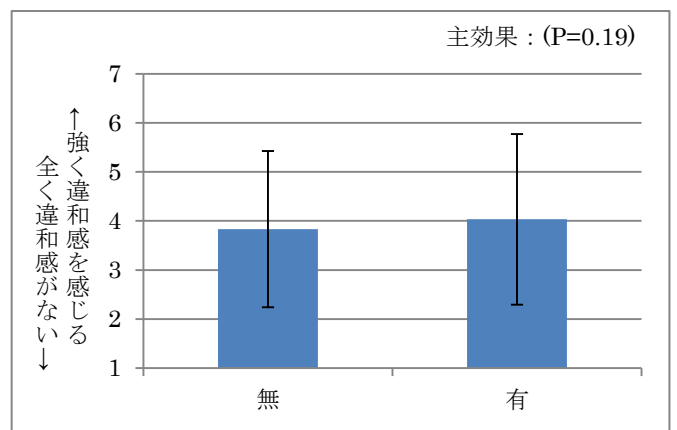


図 18 違和感・緊迫感の有無

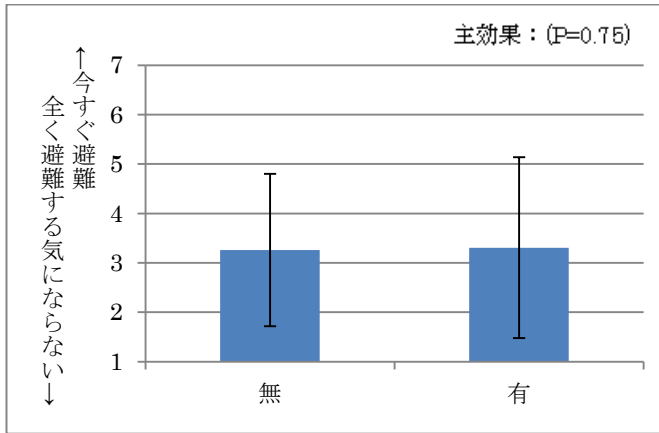


図 19 避難・緊迫感の有無

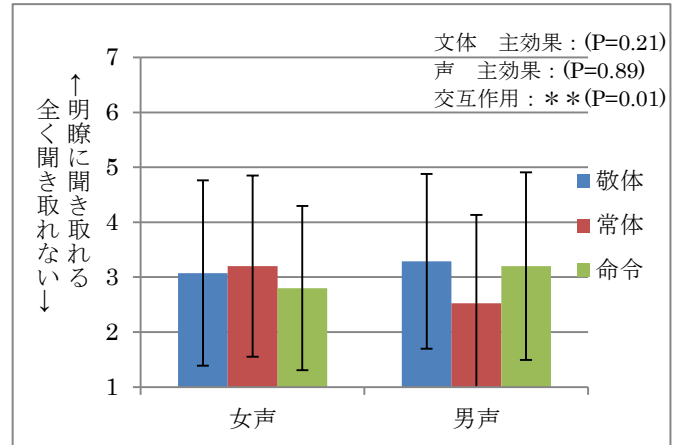


図 21 聞き取りやすさ・声・文体

3.5.4 文体・声の交互作用

(1) 緊迫感

女声の常体と男声の常体の試験刺激では女声の方が大きくなった。これは、男性の声よりも女性の声の方が高いため、緊迫感が伝わってきたのではないかと考えられる。また、想定していた結果では、命令の方が緊迫感を伝えると考えていたが、女声に関しては常体が一番緊迫感を感じられた。

(2) 聞き取りやすさ

男声の常体が一番低い結果となった。男声の常体の時は、声がこもる・ポップノイズがかかるなどの問題が多かったことから低い結果になったと考えられる。

(3) 違和感

想定していた結果としては、命令が最も違和感を生じやすいだろうと考えたが、実際の結果では全てほぼ同じような結果となった。

(4) 避難

聞き取りやすさや緊迫感のグラフと似た形のグラフとなり交互作用もほぼ同じとなった。このことから、避難にはこの2つの要素が関係していると思われる。

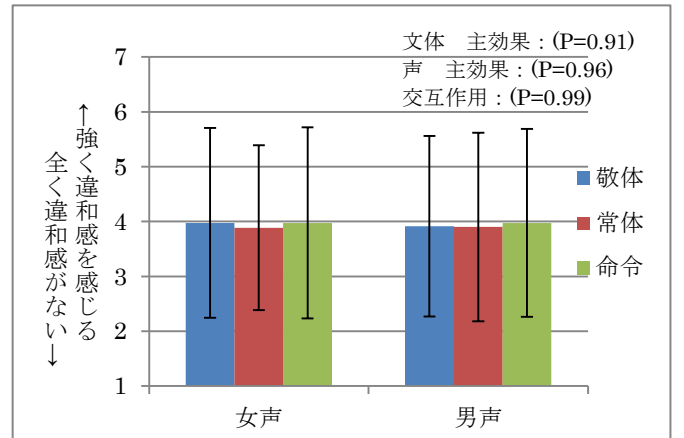


図 22 違和感・声・文体

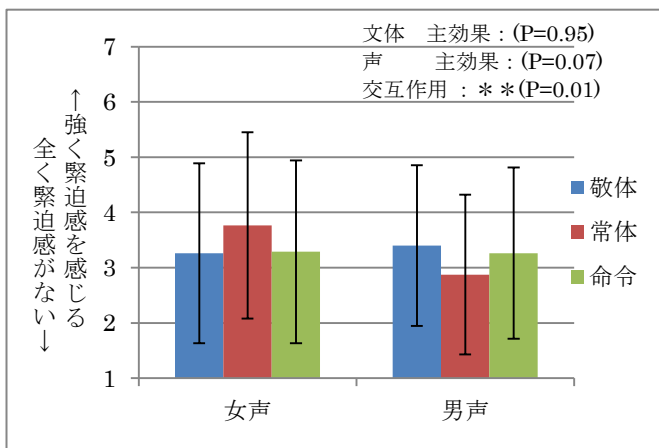


図 20 緊迫感・声・文体

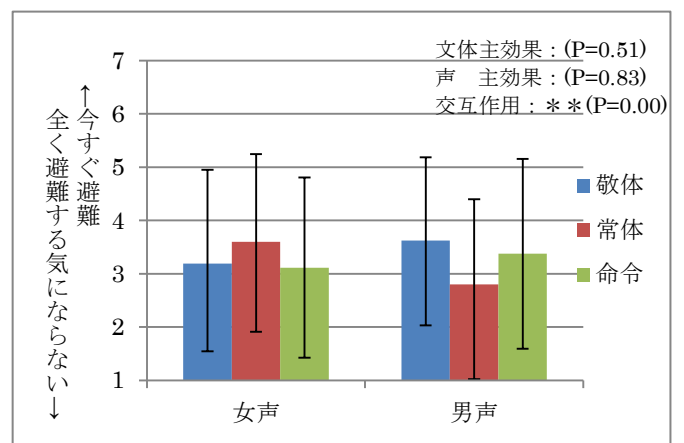


図 23 避難・声・文体

3.5.5 声・間の有無

(1) 緊迫感

男声女声共に間の有無に主効果があった。どちらに関しても間が無い時の方が緊迫感を感じている。

(2) 聞き取りやすさ

背景音によって全体的に聞き取りづらく感じたと考えられる。聞き取りやすさに間の有無は関係ないという傾向がみられていることになる。

(3) 違和感

全体的に大きい数値となっている。これは間の有無だけに関わらずに違和感があることがわかる。

(4) 避難

女声男声共に間がない時の方が避難する気になる結果となった。

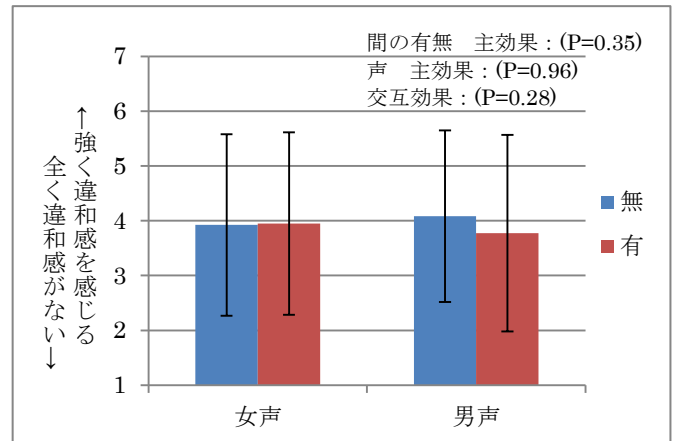


図 26 違和感・声・間の有無

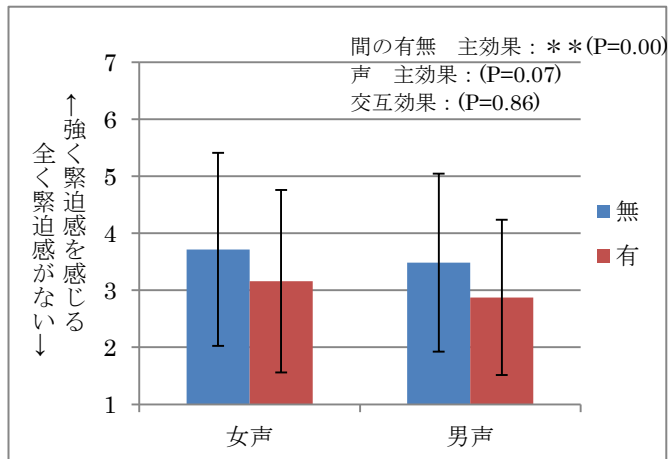


図 24 緊迫感・声・間の有無

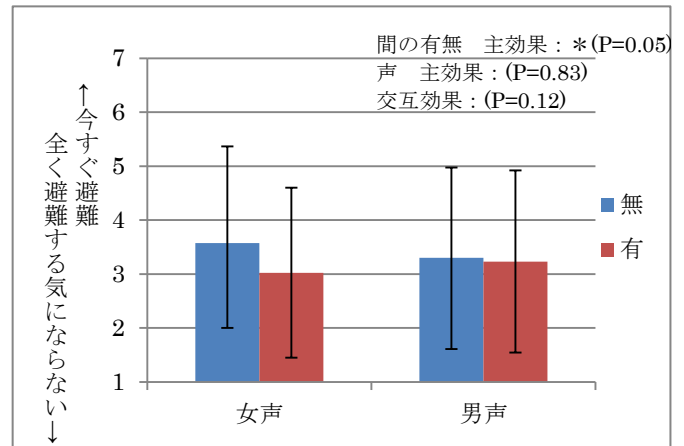


図 27 避難・声・間の有無

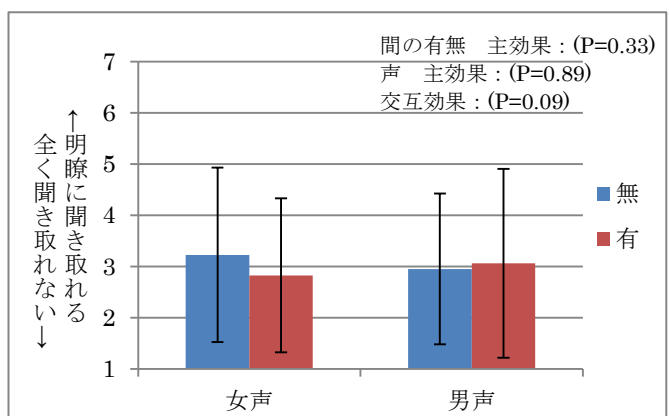


図 25 聞き取りやすさ・声・間の有無

3.5.6 声・緊迫感の有無

(1) 緊迫感

女声の緊迫感を付けた時が最も緊迫感を感じられる結果となった。女声は声が高いことから男声と同じように緊迫感を付けてもより強く緊迫感を感じたと考えられる。

(2) 聞き取りやすさ

緊迫感を付けないときの方が聞き取りやすい。男声の場合は緊迫感を付けるときに少し滑舌が悪く、それも聞き取りやすさに関係していたと考えられる。

(3) 違和感

どの条件を比較しても全体的に値が大きい。これは間の有無だけに関わらず、この防災放送自体に違和感があることがわかる。

(4) 避難

男声に関しては緊迫感を付けない時の方が避難する気になり、女声に関しては緊迫感を付けた時の方が避難する気になる評価となった。緊迫感の有無と避難の関係についても緊迫感と聞き取りやすさの項目が関係していることがわかる。

緊迫感を付けた時に標準偏差が大きいのは緊迫感を付けると避難をする気になるが、アナウンスが聞き取りにくくなり低い評価と高い評価に分かれたと考えられる。

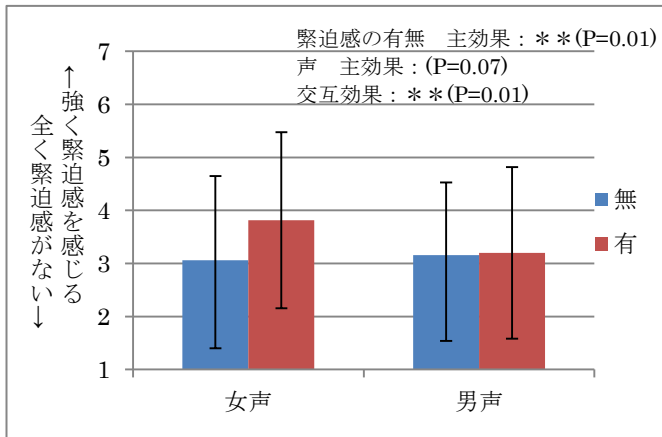


図 28 緊迫感・声・緊迫感の有無

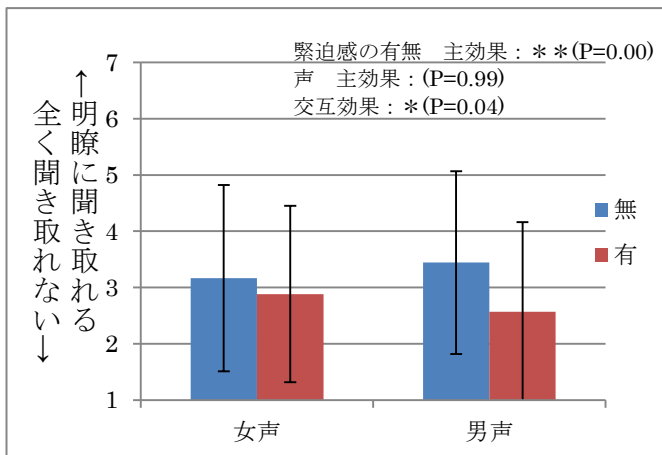


図 29 聞き取りやすさ・声・緊迫感の有無

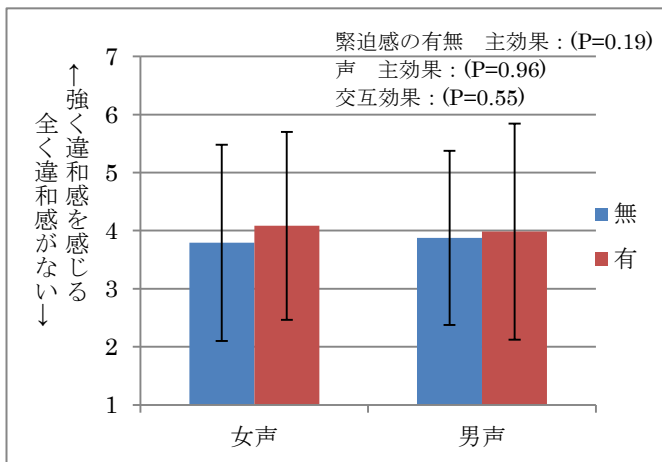


図 30 違和感・声・緊迫感の有無

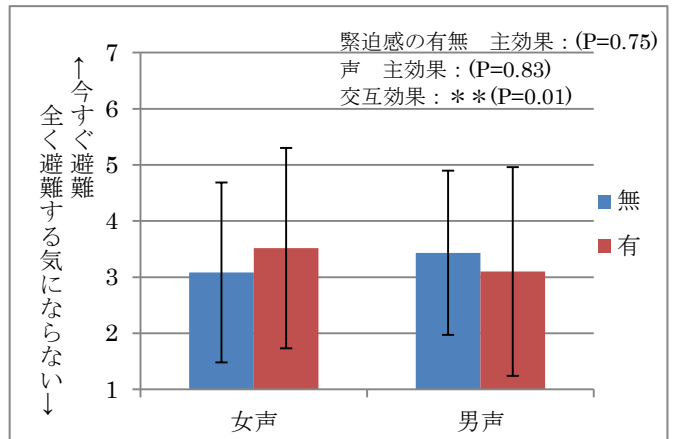


図 31 避難・声・緊迫感の有無

3.6 まとめ

男声では、常体が一番低い値で敬体と命令がほぼ同じ値になったことから、常体を使用しない文体でアナウンスをすることが良いという結果になった。また、男声は緊迫感と間を付けずに敬体のアナウンスを行い、女声は緊迫感を付け、間を取らずに常体でアナウンスをすると避難する気になることがわかった。

女声では、違和感以外に関して常体の評価が高く、違和感は全てほぼ同じ結果である。このことから、女声は常体の文体を使用したアナウンスをすることが良いということになる。

この結果から男性と女性では異なるアナウンスをしなければならないことがわかる。

また、違和感の評価についてはどれも差が見られなかったため、今回の検証実験から「違和感の有無」の評価は訓練システムにおける適切さ評価には不要な項目であると考えられる。

4. 実用的な防災放送訓練システムの構築

3章に示したように、防災放送は話し方によって受ける印象に差異が生じる。その放送の影響で何十人、何百人の命が左右されることを考えると、話す側には相応の責任がかかってくる。しかし、実際の場面で放送を担当するのは、決して放送になれているものばかりとは限らない。むしろ、慣れていないものの方が多いのではないかと考えられる。

効果的な話し方ができるように、ある程度の訓練を何度かは実施していただくことが望まれるものと考えられる。しかし、実機を使って放送をすることはむずかしい。そこで、自分の音声を聞き返すことで放送の訓練ができる訓練システムを作成することとした(図 32)。その際には、音声のひずみやエコーの影響など実際に受聴者が聞いているものをシミュレートすることとした。

3章の実験において使用した音の伝搬シミュレータは、2章に示すようにディレイマシンやイコライザなどの複数

の機器を使用して作成した簡易的なものであった。本課題の目的達成には、より現実に即したシミュレーションを行うことができ、操作の容易なものが望まれる。そこで PC の中ですべての処理を行うことのできるものを作ることとした。

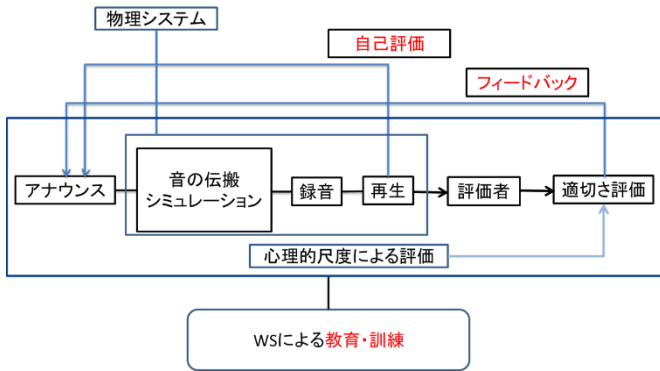


図 32 災害時アナウンスの訓練システムの概念図

4.1 要求仕様

本システムの基本的構成は図 33 のようになる。各種の条件を入力して、受聴者の聞いている音を再現するものとするが、長距離伝搬の完全なシミュレートは難しく、反射物や音質の変化については、ある程度一般的な傾向から代表的な特性を模擬するものにならざるを得ない。

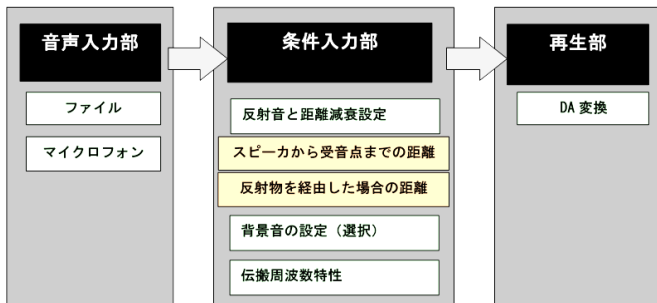


図 33 システムの基本構成

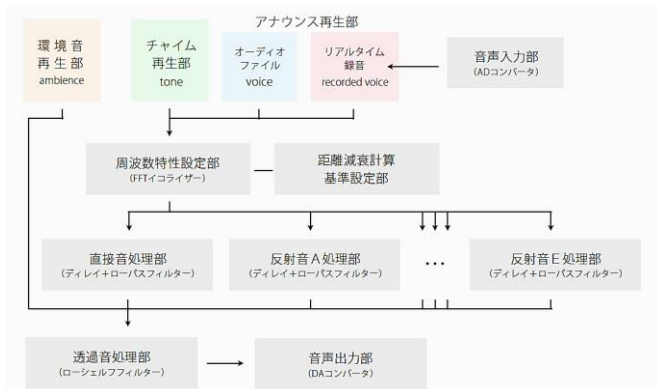


図 34 システム構成図

まず、プロトタイプとしてフリーウェアである PureData を用いてシステムを構築する。その後、これに基づいたより操作性の良いものを Max7 という市販ソフトを用いて構築する。完成したソフトは、ランタイムモジュールを用いることでどんな OS の下でも稼働可能である。

4.2 音声入力部

図 35 のパッチはアナウンスと背景音の設定のパネルである。上の bang ボタン (○) はそれぞれデモアナウンス音や録音、背景音と分けられている。その bang ボタンを押すとファイルが開かれ、音を選択することで音をアレイに格納できるシステムがアナウンス音と背景音の設定のパネルである。

図 35 の中央の棒状のインジケータは VU メータとなっている。リアルタイムで音の大きさを dB で表示することができる。右側にある「図を開く」の bang ボタンを押すと、距離減衰の状況設定の図が表示される。「録音」ボタンを押すことで 10 秒間の音を録音することができる。プログラムを変更することで任意の時間を録音することができ、再生や停止もできる。

アナウンス音には、あらかじめ録音した音声とリアルタイムで録音する音声を使用できる。録音済みの音声は 3 つ保存することができる。背景音には、雨の音や工事の音や交通音などあらゆる状況を想定した音を選択でき、より現実的なシミュレーションを行うことができる。

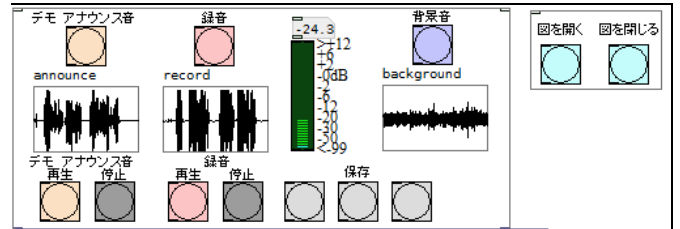


図 35 アナウンス音と背景音の設定のパネル

4.4 条件入力部

図 36 のパッチは反射音設定のパネルである。距離減衰の状況設定で示したように直接音の大きさや防災スピーカから受聴者までの距離、防災スピーカから反射物に反射しての受聴者までの距離をそれぞれキーボード入力またはスライダで設定することができる。周辺状況によって反射物の数も変わり、それに応じて、設定するスライダの数も変わってくる。最後に右上の bang ボタンを押すことで各反射音の時間遅れと距離減衰量を算出し、出力することができる。

図 37 に示すイコライザのパッチでは出力レベルの周波数特性の調整ができる。スピーカ特性、伝搬途上の減衰を総合的に再現し、アナウンスや背景音の周波数特性を変化させ、より現実的な音を模擬できるようにした。

反射音の状況については、簡単な補足説明の図を必要に応じて示すことができる。スライダの値に応じて変わ

るわけではなく、イメージを伝えるという意図のもと示している。



図 36 反射音設定のパネル

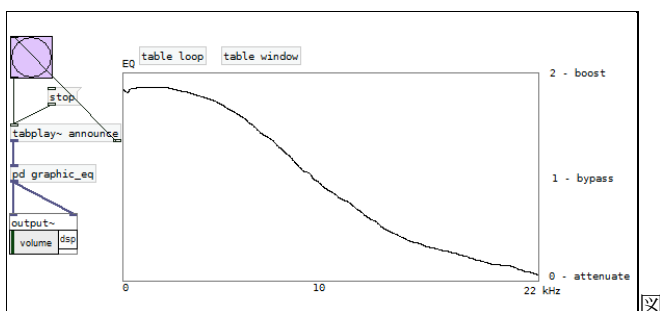


図 37 伝搬音の周波数特性の変更用イコライザ

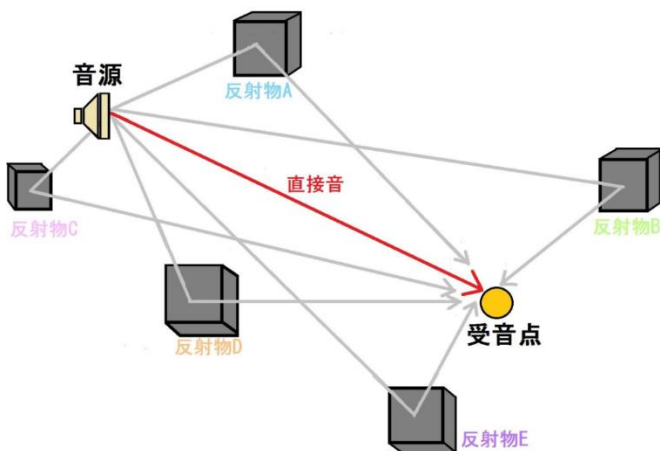


図 38 反射音の補足説明図

4.5 再生部

再生部では設定した音を DA 変換して出力する。図 39 は再生設定のパネルである。左上の toggle ボタンを×にすれば繰り返し再生ができるリピート効果がある。また、黄色と紫色の bang ボタンでアナウンス音と背景音、録音と背景音をそれぞれ組み合わせて同時に再生や停止することができる。



図 39 再生設定のパネル

最終的にプロトタイプとして完成したシステムは、最近の通常のスペックを有するものであれば、問題なく駆動可能である。

周辺機器としては、PC 本体に加えて、アクティブスピーカーがしっかりと再生するためには必要である。マイクロホンは本体備え付けのものでもよいが、外付けのマイクロホンがあるとよい。



図 40 実際のシステムの様子

さらに現在 Max7 で開発している実用版 (図 41) では、屋外モードと屋内モードを備え、受聴場所のバラエティが増えた。また、アナウンス前にサイレンやチャイムを付加することもできる。本システムはランタイム・モジュールをダウンロードしておけば、どのパソコンでも制限なく使うことができる。

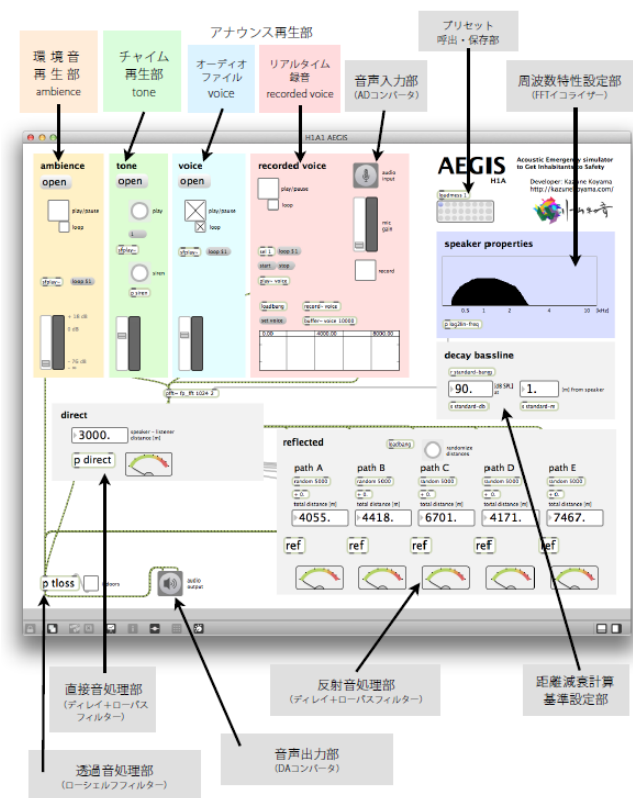


図 41 Max 7 によるシステム開発

5 実効性のある提言

本研究で開発されたシステムは、災害時のアナウンスのみならず、公共的空間の通常での情報伝達に対するシミュレーションにも適用できる。まずは、自治体などでの実際への活用を図るため、今後、シンポジウムや学会誌での公開などを通じて普及を図る。

本研究における成果と今後の展開

この課題では、実用的な防災放送訓練システムを研究成果としている。ある県議会の興味を引き、研究所には視察に来られた。当面市販予定はないが、今後自治体に向けては web に情報公開することで利用を訴えてゆく。

また自治体職員らの訓練だけでなく、一般市民に対するワークショップを実施することで、防災意識を向上する効果があることも見込まれる。来年以降に独自のワークショップを開催することを予定している。

謝辞

本研究の実施に当たり、本学卒研生の笠松尚矢氏、針田智氏、上坂恭平氏、裏野剛史氏、中西大貴氏による協力を得ましたことを感謝いたします。また、Max7でのプログラミングにあたっては小山和音氏に業務委託をいたしました。

本研究は下記の補助を一部受けて実施されました。

- ・平成 23 年度採択 科学研究費助成金基盤研究(C)「次世代の音環境の創造に向けて 環境の質のデザインとマネジメント手法 (研究代表者：土田義郎) (23611047)」
- ・平成 25 年度採択 文部科学省『戦略的研究基盤形成支援事業』「南海トラフ超巨大地震に対する実効性ある防災対策に関する研究 (研究代表者：高島秀雄)」
- ・平成 27 年度採択 科学研究費助成金基盤研究(C)「バリアフリー社会における音環境デザインに関する総合的研究 (研究代表者：土田義郎) (15K00700)」

参考文献

- 1)吉井博明、避難勧告・指示と住民の避難行動-水害の被災現場から学ぶこと-、日本災害情報学会誌 No.4、2006
- 2)井上祐之、大洗町はなぜ避難せよと呼びかけたのか http://www.nhk.or.jp/bunken/summary/research/report/2011_09/20110903.pdf 命令調を使った津波避難の呼びかけ~大地震で防災無線に使われた事例と、その後の導入検討の試み~、2012年9月21日、確認
- 3)YAHOO 地図、<http://maps.loco.yahoo.co.jp/> 2012年12月12日、確認
- 4)第3章 災害応急対応計画、金沢市、<http://www4.city.kanazawa.lg.jp/data/open/cnt/3/14047/1/24j.pdf>, 2013年02月01日、確認
- 5)土田義郎：「巨大災害時の避難に対する防災対策 避難行動を促す効果的な防災放送にむけて」、東日本大震災の教訓に基づく地域防災シンポジウム (地域防災環境科学研究会主催) , pp. 141-142, 2012.

研究テーマ 1

課題 1-10

超巨大災害での地域行政と地域住民
が連携した防災力の向上対策

金沢工業大学 木村定雄 教授

課題 1-10 超巨大災害での地域行政と地域住民が連携した防災力の向上対策

金沢工業大学

教授

木村 定雄

地域防災計画

リスクコミュニケーション

アカウンタビリティの正統性

カタストロフリスク

社会的実践研究

-

1. 研究目的

全国市町村の地域における防災活動を考えるとき、地域特性に基づく個別性が存在する。当然、その個別性は地域の防災力に大きく影響する。ここで、個別性とは、人口・年齢構成、産業活動等に代表される社会活動特性、自然ハザード強度(地震、台風、火山等)、地形・地象、公共整備状況に代表される自然ハザード対応特性、ならびに、行政組織の規模・財政、防災資機材整備、避難情報伝達施設等に代表される防災特性などである。したがって、防災対策基本法に基づいて市町村が実効性のある地域防災計画を策定するためには、全国に共通する基本的な計画事項とともに、個別性をも十分に把握し考慮する必要がある。

また、防災力とは、地域行政、地域住民、防災関係機関などの個々の地域コミュニティが災害時に行動する

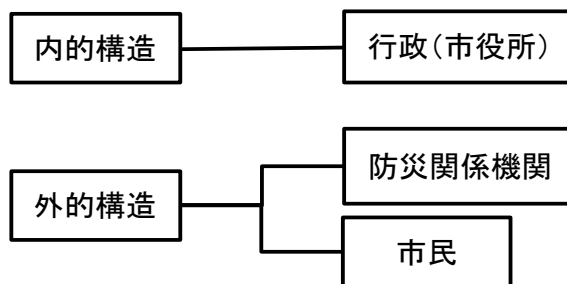


図1 アカウンタビリティが要求される対象

べき事項の事前の認識力と行動力とする。すなわち、本研究における防災力とは、地域防災・減災活動において、地域組織に内在する災害時の人的対応基礎力を意味する。また、地域防災計画に示される事項について、個々の立場のコミュニティー(以下、Actors)の①計画に基づく役

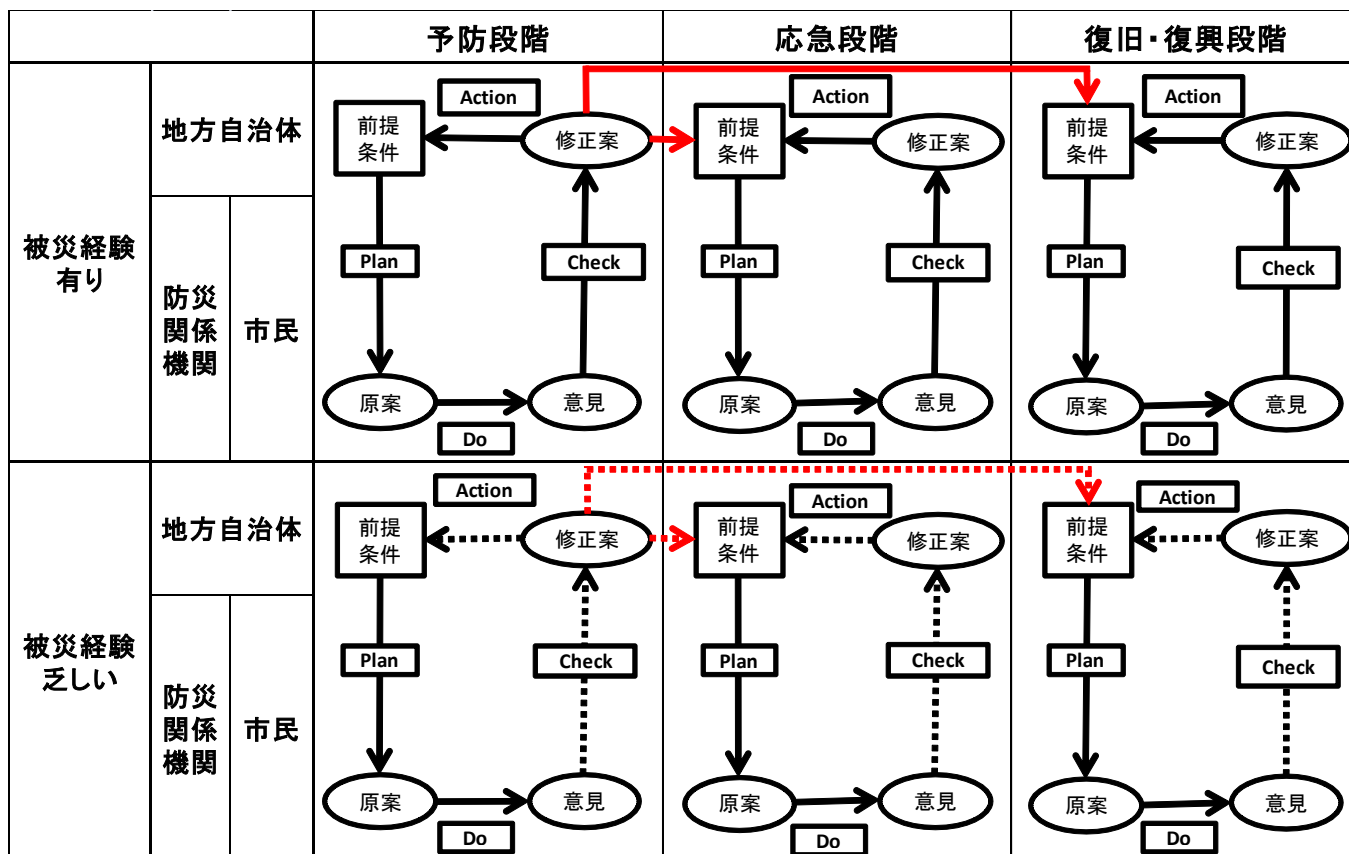


図2 リスクコミュニケーション PDCA サイクルの概念

割を取得する能力(役割認識能力), ②役割を実行する能力(行動プロセス認識能力)の2つの指標によって, 防災力を表わすものとする。

本研究では, 社会的実践研究¹⁾として主に地域行政組織の防災力を測定・評価する手法を構築することを目的とする。この防災力の評価は地域防災計画の実行における脆弱性をより具体的に明らかにすることができることから, 予防段階などの防災・減災活動における行政組織の継続的改善を図るうえで重要な意味をもつ。

2. 解決法

(1) 行政行為のアカウンタビリティの意義とその分析

公的機関の行政行為におけるアカウンタビリティは重要な意味を持つ²⁾。地域防災計画を例にとると, そのアカウンタビリティに要求される対象構造は図1に示す内的構造と外的構造に分けられる。内的構造には行為主体となる行政内の個々の組織や人の役割認識が, また, 防災関係機関および市民から成る外的構造には行政の意思(地域防災計画)の理解と個々の役割の認識が要求される。このアカウンタビリティは, 防災行為において重要となる。すなわち, 大地震や津波といった災害など, カタストロフ性を有するリスク³⁾の対策行為では, 科学技術のみならず, リスクコミュニケーションの仕組みを組み込んだ社会的受容(リスクコミュニケーション PDCA の行為と相互理解)を可能にする地域活動が極めて重要となる。したがって, 地域防災計画に基づく防災・減災活動では, 行政のアカウンタビリティは地域を形成するすべての人々

(Actors)を主体とした防災力の継続的改善(PDCA サイクル)を機能させるために不可欠である。他方, 防災・減災活動においては, 被災経験の有無が Actors の役割認識の強弱に影響する。図2に防災行為における PDCA サイクルのあり方を示す。図2の矢印の実線は, 既に行政活動として実施されている行為例⁴⁾を示し, 破線は不十分と考えられる行為を示す。被災経験のある自治体においては, 予防, 応急, 復旧・復興の各々の段階を経験することによって防災・減災活動が適宜改善されると考えられる。一方, 被災経験が乏しい地域では実効的な PDCA サイクルが機能せず, 予防段階における応急段階や復旧・復興段階の学習も十分であるとは言い難い。すなわち, 地域防災計画に基づく行政行為のアカウンタビリティが地域に受け入れられ難い可能性がある。予防段階における Actors の役割認識を深める適切な PDCA サイクルの実施は, 災害発生前に, 応急段階や復旧・復興段階の実効的な学習に繋がり, その結果として, 活動主体の役割認識を高め, 災害発生時の人的リスクを大きく改善する。

そこで, とくに巨大災害発生時の応急段階に着目して地域防災計画にかかわる行政組織のアカウンタビリティの正統性を分析する。

地域行政と地域組織が行う防災行為は, 地域防災計画に基づくことが基本となる。なかでも, 地域防災計画の存在とその中に記される各コミュニティ, すなわち, 行政, 地域住民, 自主防災組織, 防災関係機関等の個々の役割は, 個々に確実に周知させることが行政の重要な役割であり, 情報公開とその説明が行政には求められる。このような行政行為の説明責任(アカウンタビリティ)に

表1 行政行為のアカウンタビリティの正統性の評価の視点

アカウンタビリティの構造と評価視点			満たすべき要件
正統性の構造	実用的正統性		行為が人々の利益に繋がるか
	道徳的正統性	行為の結果に対する評価	不利益者へのミティゲーションはなされているか
		行為の手続きに関する評価	適切なルールで行なわれ, その過程の透明性が確保されているか
		行為主体に対する評価	評価者の能力や立場が適切か
	認識的正統性	理解可能性	行為の結果は予測可能か 行為の内容と結果が分かりやすいか
		当然性	行為がもたらす結果について十分に議論や検討がなされ, 社会的に当然のこととして受け入れられる程度に成熟したか
		専門的知識の正統性	技術的判断の厳密性を重視するか, 利害関係者から見た妥当性を受け入れるか

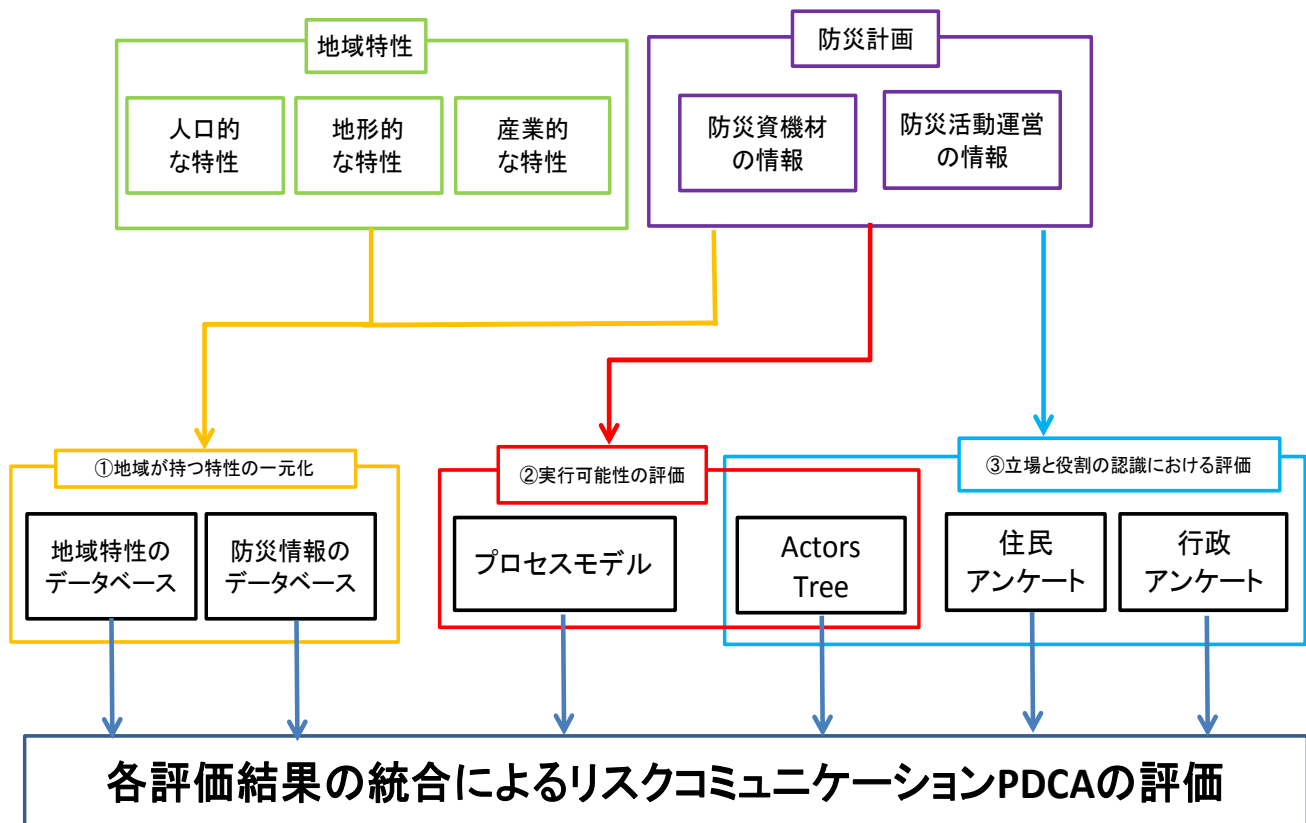


図3 地域防災力の評価モデルの概要

はその正統性を確保する必要がある。表1は、行政行為のアカウンタビリティーの正統性の評価の視点を示したものである^{2),5)}。行政行為のアカウンタビリティーの正統性は、実用的正統性、道徳的正統性、認識的正統性がある。行政が行う防災行為においては、とくに認識的正統性のうち、理解可能性が課題となると考えられる。すなわち、地域防災計画の内容を、予防段階において地域住民や自主防災組織等が理解可能な形で説明を果たす必要がある。そのためにも、まずは、防災・減災活動における行政組織内において、各部署や各個人が果たすべき役割を熟知することが要請される。

(2) 地域防災力の評価モデル

従前の行政が実施してきた地域防災計画に基づく防災・減災活動では、リスクコミュニケーションPDCAのあり方が明確ではない。むしろ、行政を主体、また住民を客体として、主体から客体に伝えられる単方向コミュニケーション⁶⁾となっているケースが多いと考えられる。このため、住民からなる客体は主体の意思の理解および自らの役割認識を改善することが難しい仕組みとなっている。リスクコミュニケーションPDCAとは、防災・減災活動に関わるすべてのActorsを主体として、各々の役割認識能力と行動プロセス認識能力を互いに共有化し高めるための行為である。地域防災計画の実行におけるリスクコミュニケーションPDCAでは、地域に属するすべ

表2 地域情報データベースの基本構成

要因	項目
社会生活要因	人口 (市町村別、人口密度等)
	交通量 (平日交通量、休日交通量等)
	公共施設・構造物 (道路、ライフライン等)
地域特性要因	観光 (自然、文化等)
	土地利用 (市街化区域、土地利用動向等)
経済活動要因	物流 (輸送拠点等)
	生産 (工業地域等)
	金融 (公的金融機関等)
広域ネットワーク要因	輸送 (陸運、海運等)
	情報 (インターネット、無線等)
防災要因	法指定区域 (土砂災害危険箇所、洪水ハザードマップ等)
	防災計画 (地域防災計画等)
	既往災害 (土砂災害、地震災害等)
自然環境要因	気象 (気象観測所等)
	公害 (総量削減基本指針等)

ての人々を主体として双方向コミュニケーション^{6,7)}を目指すことが求められる。

このような地域に属するActorsのリスクコミュニケーションPDCA活動の道具となるのが、地域防災力の評価モデルである。図3は地域防災力の評価モデルの概要を示したものである⁸⁾。地域防災力の評価は、主に以下に示す①～③によって行う。

- ① 地域特性の一元化情報の整備とその共有化
- ② 地域防災計画に基づく災害時行動プロセスの可視化
- ③ 各コミュニティー(Actors)の役割認識能力・行動プ

①は、GISを活用して表2に示す地域の基本情報を一元化し共有化するものである⁹⁾。②の災害時行動プロセスモデルの可視化は、地域防災計画に明文化されている予防段階、応急対応段階、復旧段階での各Actorsの役割と行動の連携をアローとボックスを用いて可視化するものである。地域防災計画は行政文書であり、その内容の理解は住民には困難な場合が多い。また、災害の規模は地域の特性にも大きく依存するが、それに対する行動規範を具体的に文章化することは難しい。このため、各Actorsの役割と行動を可視化することが行政と住民などの相互理解に役立つものとなる。図4は以降に記す石川県珠洲市の地域防災計画から作成した災害時行動プロセス(行政内

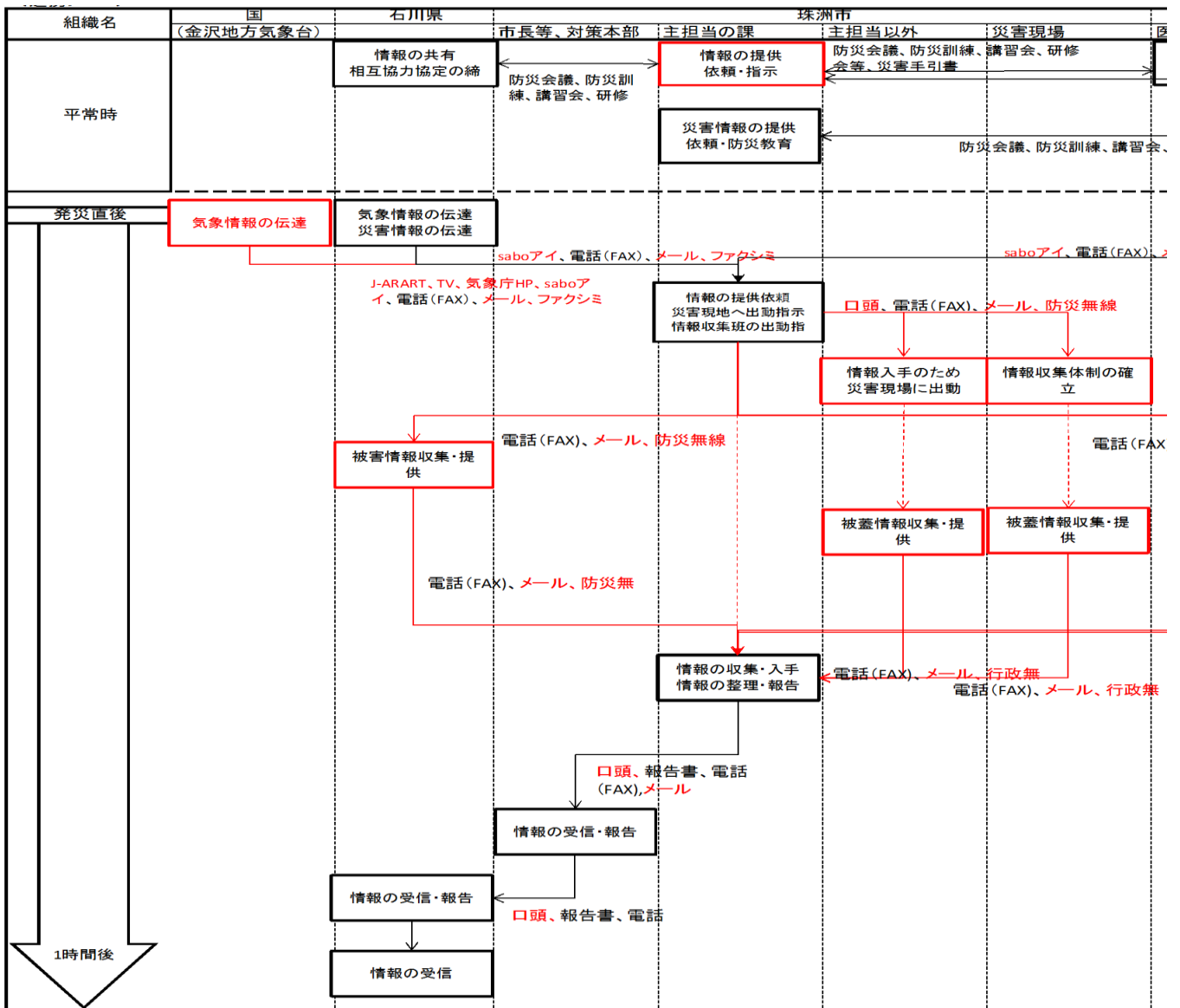


図4 災害時行動プロセスの可視化例(行政内の応急段階)

プロセス認識能力の測定

の応急段階)の基本的流れを示したものである。また、図5は災害時行動プロセスの可視化の作成手順を示したものの

である。③は②で作成した災害時行動プロセスを基本として、各 Actors の役割認識能力と行動プロセス認識能力をアンケートによって、測定し評価するものである。この結果が本研究で定義する防災力を意味するものとなる。

3. 方法の検証

(1) 地域行政内の防災力の評価

全国の市町村のような自治体では例外なく高齢化が進んでいる。また、自治体規模が小さい場合、防災・減災に係わる財政も厳しい状況にある。このような地域では、身の丈にあった防災・減災活動のあり方を模索しており、地域の行政、自主防災組織および住民からなる各コミュニティの日頃の関係性がとくに重要となる。すなわち、地域行政が策定する地域防災計画は策定した行政の規模、財政力および地域環境・特性に応じた個性がある。さらに、地域ごとの被災履歴によって、地域ごとの行政・住民の災害ハザードに対する認識は様々であることなどから、地域防災計画を策定したとしてもその実行可能性は不確定である。また、行政主体はその内部組織に存在する脆弱性の実態を公開すること否定的である場合が少なくない。本研究では災害ハザードが比較的小さい石川県珠洲市と南海トラフ地震が想定され災害ハザードが大きいとされる高知県東洋町から協力を得て行政内の防災力を測定し評価する。

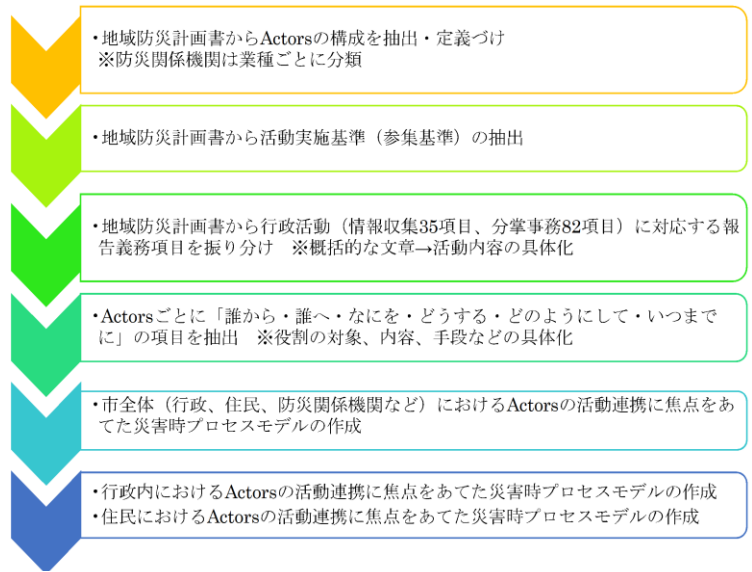


図5 災害時行動プロセスの可視化の作成手順

(2) 行政内の防災力を評価する地域の概要

石川県珠洲市は能登半島の先端に位置し、人口16,279人の中小規模の都市である。能登沖地震(1993年)および能登半島地震(2007年)の2度の被災を経験している地域である。人口構成は全体の約4割が65歳以上の後期高齢者であり、居住形式は多くが木造一戸建てである。防災上考慮される災害リスクは、地震、津波、火災、水害、雪害、土砂災害、台風、高潮が挙げられる。珠洲市の行政構造は職員約

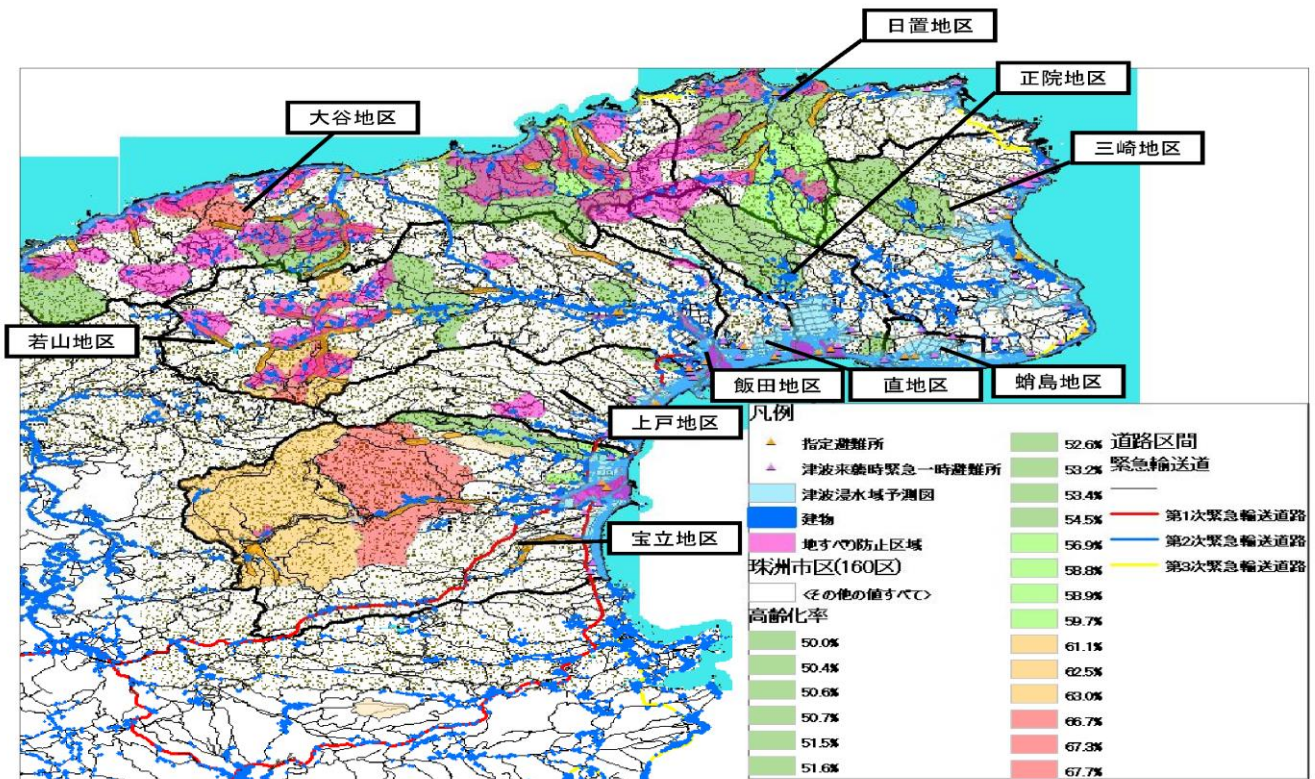


図6 地域特性マップの例（珠洲市）

156名が在籍し、約12の課・室・委員会が組織され、平成22年6月11日改訂版珠洲市地域防災計画(一般対策編、震災対策資料編)を適用して防災・減災活動を展開している。図6は一元化した珠洲市の地域特性マップの一例を示したものである。

一方、近年緊張感が高まる南海トラフ巨大地震の発生が想定される高知県東洋町は、高知県の最も東に位置し、図7に示すように町役場等の行政機能や病院、学校、商店等の町機能の多くが浸水範囲内に存在する。また、ほぼ全数の住居も浸水範囲内に位置する地域である。東洋町中心部に位置する生見(いくみ)海岸は全国有数のサーフィンのメッカであり、一年を通して多くの観光客で賑わいをみせている場所であることから、地域住民のみならず外部から訪れる者の避難についても配慮が必要な地域である。南海トラフ地震による津波高は30cm(避難困難となる高さ)が予想され、津波到達時間はおよそ5~20分であるため、有事の際は住民や行政の迅速な行動が求められる。東洋町の人口は約3,390人、そのうち65歳以上の割合は60%程度であり、過疎化ならびに高齢化が進んでいる。

珠洲市と東洋町の災害時の行政組織の構造は、表3に示すとおりであり、職員数は市町の規模によって異なるが、行政組織と各地域防災計画に記される業務担当班は基本的に同じである。なお、東洋町では、町職員とは別に広域消防が町行政と一緒に消防部を構成している。

(3) 行政アンケートの回収状況

前述のとおり、防災力の評価は、行政組織内の職員が、災害時に自身の行動プロセスを認識・理解しているか否かをアンケートによって確認するものである。アンケートの基本的な設問事項を表4に示す。以下にはその回収状況を示す。

a) 珠洲市の回収状況

表5は珠洲市の行政アンケートの回収状況を示したものである。表中の回答者は、行政内組織を示したものである。アンケート実施期間が人事異動時期と重複していたため、回答すべき所属が曖昧な職員が生じ、平均回収率が46.8%と低い傾向がある。

b) 東洋町の回収状況

表6は東洋町の行政アンケートの回収状況を示したものである。東洋町は珠洲市と比較して、平均回収率が68.1%と高く、行政職員の防災に関する認識が高い傾向にある。

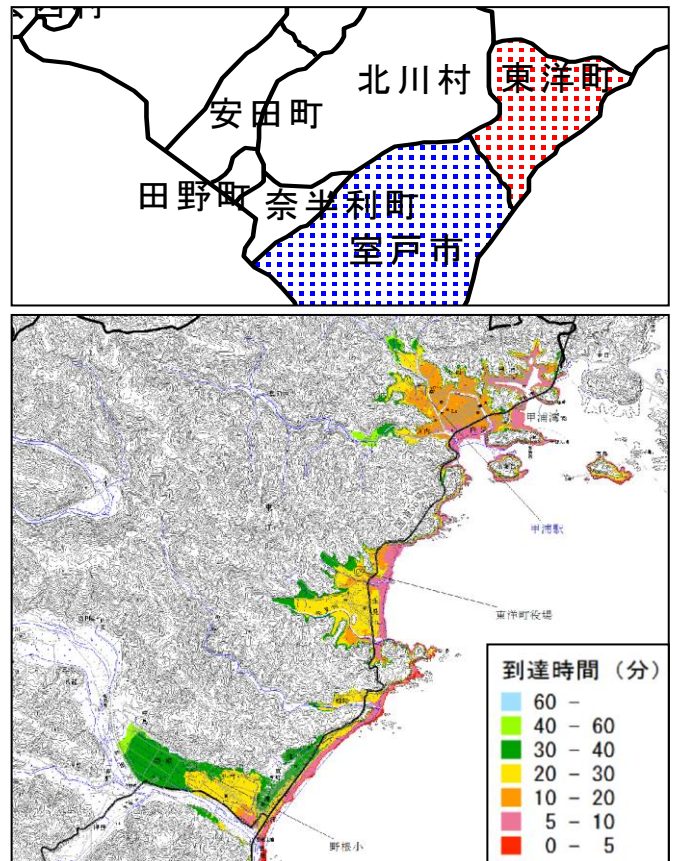


図7 東洋町の津波予測¹⁰⁾

表3 珠洲市と東洋町の行政組織の例(地域防災計画書による)

市町名	珠洲市	東洋町
職員数	156名	42名(町職員でない消防部は除く)
災害本部長	市長	町長
災害時 班編成	総務班	情報部
	企画財政班	住民部
	調査班	建設産業部
	建設班	教育部
	⋮	⋮

表4 行政アンケートの設問の構成

属性調査(多肢択一回答)
回答者の所属調査
回答者の防災上の役割調査
共通設問①(多肢択一回答)
震災対策(地震)における参集に対する知識調査・行動認識調査
震災対策(津波)における参集に対する知識調査・行動認識調査
一般対策(水害)における参集に対する知識調査・行動認識調査
共通設問②(多肢択一回答)
概括的役割分担に対する知識・認識調査(予防段階)
概括的役割分担に対する知識・認識調査(応急段階)
概括的役割分担に対する知識・認識調査(復旧段階)
各課設問(自由記述)
情報収集とその伝達に関する詳細項目の記述調査
事務手続き・指示・調整などの事務分掌に関する詳細項目の記述調査
要望調査(自由記述)
現在までに行われた行政内防災教育・情報公開に関しての自由記述
今後行って欲しい行政内防災教育・情報公開に関しての自由記述
現在までに行われた住民向け防災教育・情報公開に関して自由記述
今度行なっていく住民向け防災教育・情報公開に関して自由記述
今回のアンケート自体に対する自由記述

表 5 行政アンケートの回収状況(珠洲市)

回答者	配布部数(部)	回収部数(部)	回収率(%)
総務課	22	11	50.0
企画財政課	11	5	45.5
市民課	12	8	66.7
出納室	4	0	0.0
税務課	14	7	50.0
福祉課	18	6	33.3
建設課	11	7	63.6
産業振興課	15	6	40.0
観光交流課	8	8	100.0
生活環境課	20	10	50.0
教育委員会	13	5	38.5
その他 (市長、関係機関など)	8	0	0.0
合計	156	73	46.8

表 6 行政アンケートの回収状況(東洋町)

回答者	配布部数(部)	回収部数(部)	回収率(%)
情報部	17	17	100.0
住民部	14	12	85.7
産業建設部	7	5	71.4
教育部	4	4	100.0
消防部 (消防団、近隣の室戸 市消防職員で構成)	30	12	40.0
合計	72	50	68.1

(4) 行政組織の防災力の評価結果

行政組織の防災力の評価結果は、各人の行動プロセスの役割認識能力および行動プロセス認識能力から評価する。すなわち、地域防災計画から策定した行動プロセスモデルを基本に、災害発生時の各行政職員の役割認識能力と行動認識能力を行動プロセスの信頼性と定義して防災力を評価する。図8は主幹的な行動プロセスの信頼性評価モデルを示したものであり、式1は行動プロセス実行可能性を生起確率として表した信頼性の評価式である。

したがって、式(1)による算定結果は、行政職員となる個々のActorsが情報を受信して自身の行動に移る、または、自身の判断により行動として発信する等の役割・行為を

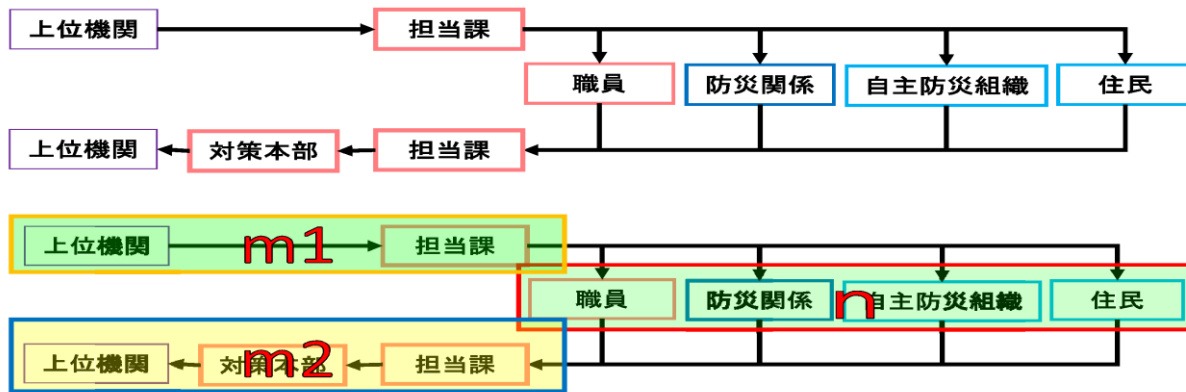


図 8 行動プロセスの信頼性評価モデル

$$R = \prod_{i=1}^{m1} (1 - \lambda_i) * \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n [1 - (1 - \lambda_j)] \right\} * \prod_{k=1}^{m2} (1 - \lambda_k)$$

$$= \prod_{i=1}^{m1} r_i * \left\{ 1 - \prod_{j=1}^n (1 - r_j) \right\} * \prod_{k=1}^{m2} r_k \quad \dots \dots (1)$$

R：信頼度(プロセス全体における防災機能の実行確率。以下、実行確率)

λ：要素の故障率(任意のActorsの役割不実行確率。以下、役割不実行確率)

r：要素の信頼度(任意のActorsの役割実行確率。以下、役割実行確率)

r_i：行政内の役割実行確率(行政外から情報受信し、行政外へ情報発信するまでの項数 m1)

r_j：行政内の役割実行確率(行政外から情報受信し、行政外へ情報発信するまで項数 m2)

r_k：プロセスにおける行政外の役割実行確率(行政から情報受信し、行政へ情報発信するまでの項数 n)

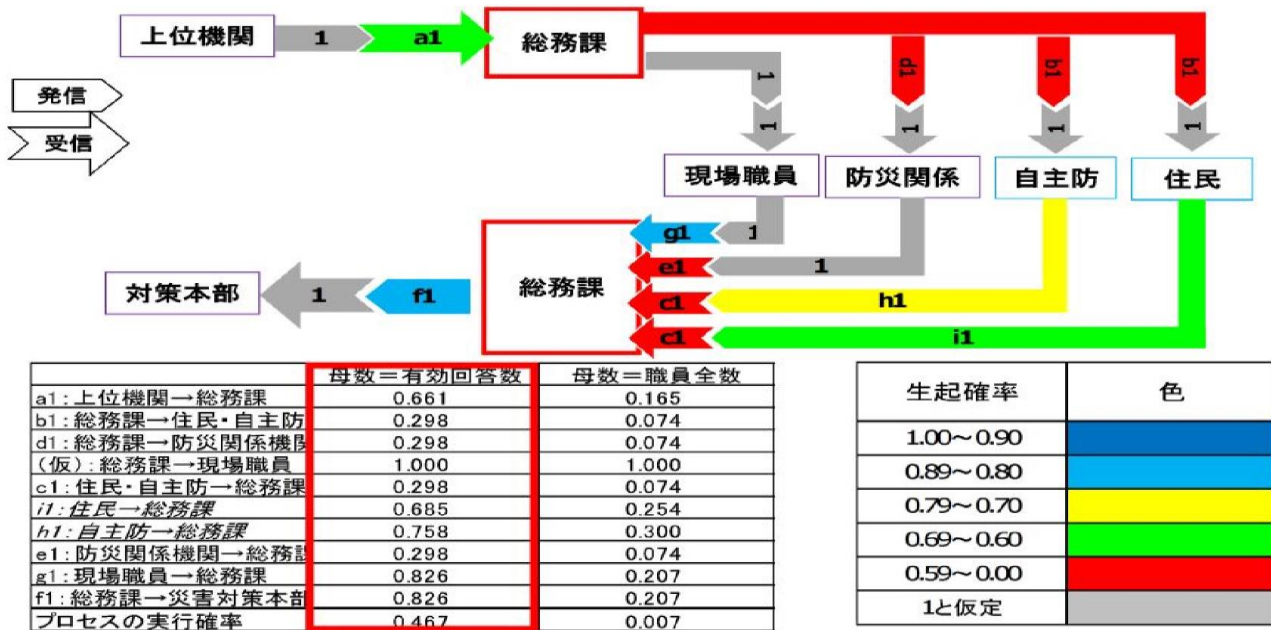


図9 情報収集・発信の実行確率の例(珠州市・総務課)

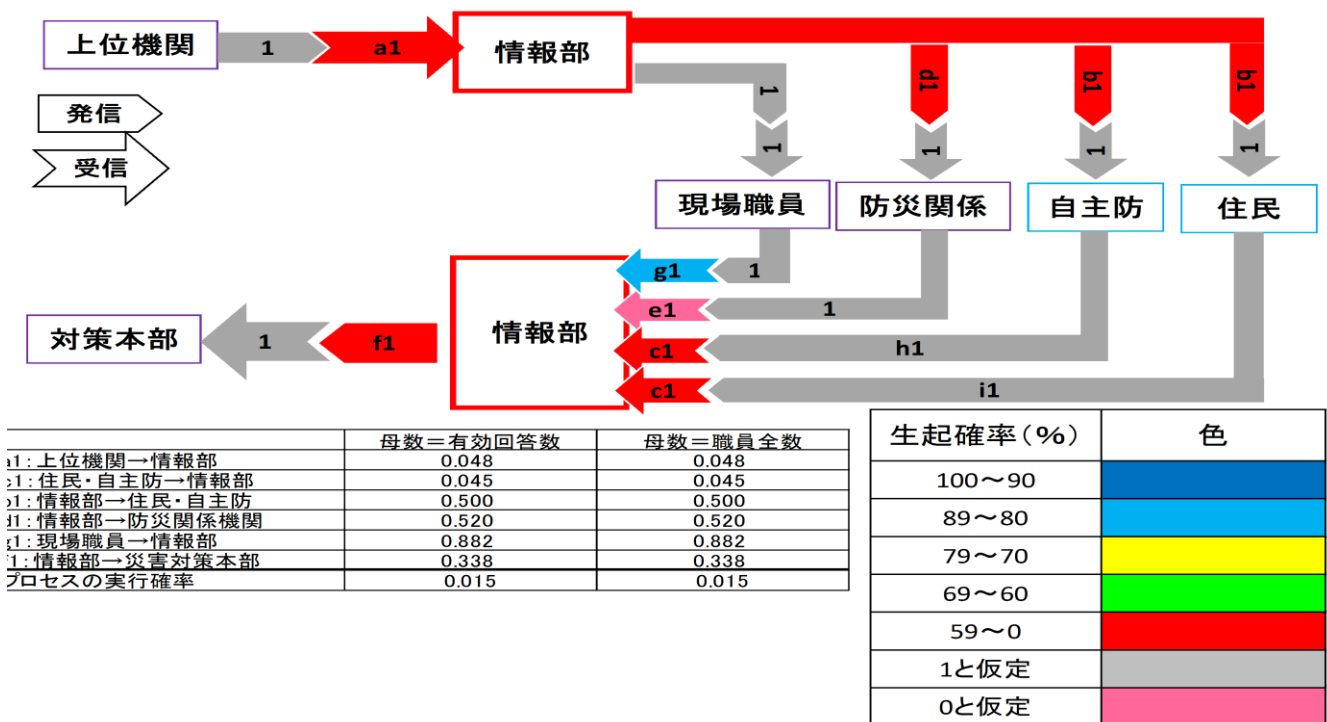


図10 情報収集・発信の実行確率の例(東洋町・情報部)

行動プロセスの中で完結する可能性の実行確率を表す。

このような災害時の行動の実行確率を算定した結果の例(珠州市・総務課)を図9に示す。図9は災害時に情報収集・発信の総括的役割を担う総務課の結果であり、図中下の表の左側に記した事項が災害時の行動プロセスから定まる役割であり、赤枠で囲んだ数値がアンケートの有効回答を母数とした各情報収集・発信過程の実行確率である。

他方、図10は東洋町の情報部の情報収集・発信の実行

確率を算定した結果である。東洋町の情報部は、珠州市の総務課と同じ機能をもつ部署である。

図9では、アンケート回収の母数を職員全数とすると、実行確率は相当に小さくなる。アンケートに対応する人の意識は、解答可能なアンケートには対応するが、解答不可能な場合には、回答しない意識も働くケースが見受けられる。したがって、図9と図10を比較する場合、行政職員のアンケート対応にかかわる意識が大きく影響することが考えられる。また、図11は珠州市と東洋町の情

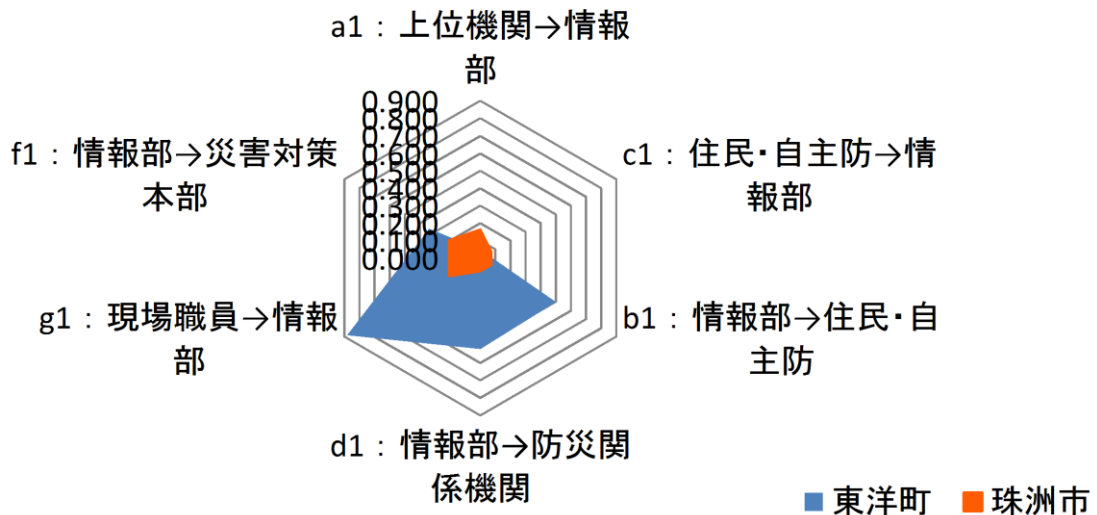


図 11 情報収集・伝達にかかわる実行確率の比較例

報・伝達にかかわる役割認識能力と行動プロセス認識能力とを比較した例である。ここで、珠洲市の実行確率の算定では母数を部署の職員全数としている。この比較結果が行政組織の防災力のすべてを評価するものではないが、地域防災計画の実行において、どのような役割・行動が弱点となっているかが明確になる。例えば、図11中のc1(住民・自主防→情報部)をみると、珠洲市および東洋町ともに、住民や自主防災組織からの情報をどのようにして収集するかについて、その手段が具体的に考えられていないことがわかる。本報告では、災害発生・応急対応時の行政職員の一部の役割認識能力と行動プロセス認識能力を示したが、地域防災計画に基づいて行政が組織する各部署(Actors)の脆弱性が明確になる。

このように、災害時の行政職員の役割認識能力および行動プロセス認識能力から防災力を向上させようとする場合、まずは、各人の防災にかかわる立場とより具体的な役割認識を深める活動が重要となる。

したがって、毎年行われる防災訓練などでは、とくに課題となる脆弱事項を明確にしてこれを確認することで、コミュニケーションPDCAの習慣が定着するものと考えられる。また、災害は、いつ・ここで・どのような状況の時に発生するかが不確定であり、行政職員も被災者となる場合もある。このため、日頃から自身の行動規範を反復学習することがとくに肝要となるものと考えられる。

4. 実効性のある提言

本研究では、「超巨大災害での地域行政と地域住民が連携した防災力の向上対策」を目的として、まずは、地域

防災計画に基づく行政職員の役割と行動について、その状態測定と評価法を提案し、その活用法を示した。その成果は、各地方行政の日頃の防災訓練に活用され、地域のコミュニティーの防災・減災活動の脆弱性を改善する実践行為に役立つものと考えられる。

他方、災害応急対策計画における行政職員の役割認識を測定するためのアンケート調査を実施する行為そのものが、行政職員の地域防災計画の内容の学習となることも明らかとなった。

今後、他の自治体の調査を行い、地域防災計画の実行可能性を分析し、地域防災にかかわる具体的な脆弱性要素を明らかにするとともにその改善を促す必要がある。

全国の市町村では例外なく高齢化が進んでいる。また、自治体規模が小さい場合、防災に係わる財政も厳しい状況にある。このような地域では、身の丈にあった防災活動のあり方を模索しており、地域の行政、自主防災組織および住民の各コミュニティーの日頃の関係性がとくに重要となることは前述したとおりである。この関係性では地域の人々の主観と客観が混在し、全国の地域ごとの自治体を対象とすると、一般性と個別性とを惜別する壁が存在する。本研究はそれをより論理的に分別することを目指しており、さらに、行政組織の住民に対するアカウンタビリティーの正統性のあり方をもあわせて検討対象としている。この種の研究は社会的実践研究であり、社会変化に対応して継続的に実施する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 小林潔司 “土木工学における実践的研究：課題と方法”，土木学会土木技術者実践論文集，Vol.1, pp.143-155, 2010.3.
- 2) 例えば，越水一雄，羽鳥剛史，小林潔司 “アカウントビリティの構造と機能”，土木学会論文集 Vol. 62, No. 3 pp.304-323,2006.
- 3) 例えば，高木朗義 他 “防災の経済分析 リスクマネジメント”，勁草書房，2005.
- 4) 例えば，片田敏孝 “想定を超える災害にどう備えるか”，青木村防災講演会資料，2011.11.
- 5) Mark C. Suchman : Managing legitimacy “Strategic and institutional approaches”, 1995.
- 6) ドナルド・A・ショーン “省察的实践とは何か”，鳳書房,2009.
- 7) 木村定雄，他 ”大学シリーズ5 教育する大学 何が求められているか”，岩波書店，pp.103-122，2013.11. (防災を含む土木技術者のもつべき資質について執筆)
- 8) 笹川康雄，木村定雄，野村貢 “地域防災計画の実践におけるリスクコミュニケーション PDCA”，土木学会第67回年次学術講演会概要集，IV-012，2012.9.
- 9) 米山良平，木村定雄 “地域防災計画を考慮した地域防災情報プラットフォームの構築”，土木学会第20回中部支部研究発表会，IV-59，2012.3.
- 10) 高知県版第2弾，南海トラフ巨大地震による震度・津波浸水予測（平成24年12月10日）

研究テーマ 2

課題 2-1

巨大津波に対する地下街及び地下鉄 の防災対策

京都大学防災研究所 牧紀男 教授

課題 2-1 巨大津波に対する地下街及び地下鉄の防災対策

京都大学防災研究所

教授

牧 紀男

南海トラフ地震 地下街 避難
大阪市 ハリケーン・サンディー -

1. 研究目的¹⁾

東日本大震災の反省を踏まえ、想定される最大クラスの津波についての被害想定が行われるようになってきている。大阪府でも津波の浸水想定の見直しが行われ、最悪、日本最大規模の地下街が存在する梅田も津波による浸水被害が予想されることとなった。また、2012年10月にはハリケーン・サンディーによりニューヨークで高潮被害が発生し、地下鉄への浸水被害が発生した。幸いにもハリケーンの上陸に備え、地下鉄の運休・列車の高台への移動等の対策が講じられていたため大きな混乱・人的被害は発生しなかったが長期にわたって運休する区間も発生した。地下街の浸水対策の重要性は、これまでも指摘されてきたことであるが、南海トラフ地震の被害想定の見直し、さらにニューヨークの事例を踏まえ、喫緊の防災課題として捉えられるようになってきている。

大阪府の津波浸水想定は、内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」が公表した11ケースから、大阪府域に最も大きな影響を与え、考えられる4ケースを選択して、防潮堤の沈降、防潮施設の開閉状況に応じて3つのシミュレーションの最悪条件を重ねあわせ浸水範囲、浸水深の公表を行った(図1)。その結果、大規模な地下街が存在する梅田にまで浸水地域が拡大することが明らかになった。

大阪府の場合、1mの津波が到達するまでに、南部の岬町で54分、大阪市内に影響を与えると考えられる大和川河口、木津川水門にまで到達するまでには地震の発生から100分以上の時間があり、安全な場所に避難するために十分な時間が存在する。

この結果から大きな地下街が広がる梅田近隣の地域には堤防沈下により地震発生直後に浸水する地域は存在しないことが分かり、十分に避難は可能であるということが分かる。しかし、津波による浸水被害が想定されており適切な避難行動をとらないと人的被害が発生する可能性はあり、以下、梅田地下街の浸水対策の現状について現地調査に基づき報告する

本原稿は地下街の防災対策について、防災対策を進める上での最重要課題である「命を守る」という観点から、1)現状の防災対策の取り組み、2)地下街に対流する人々の避難に対する認識、について現地調査にもとづき、地下街における「命を守る」ための防災対策のあり方について

ての検討することを目的とする。

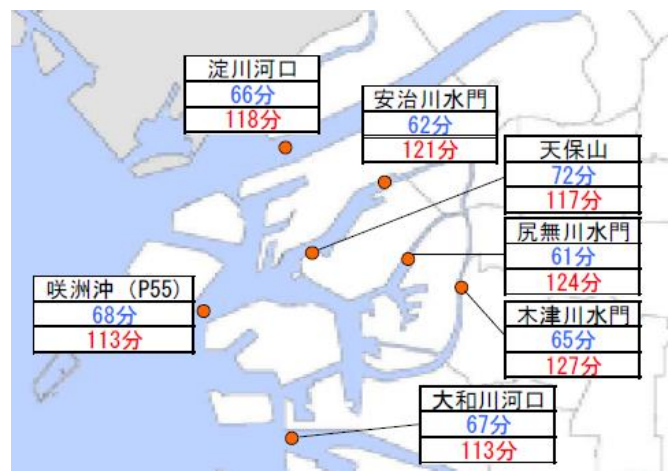
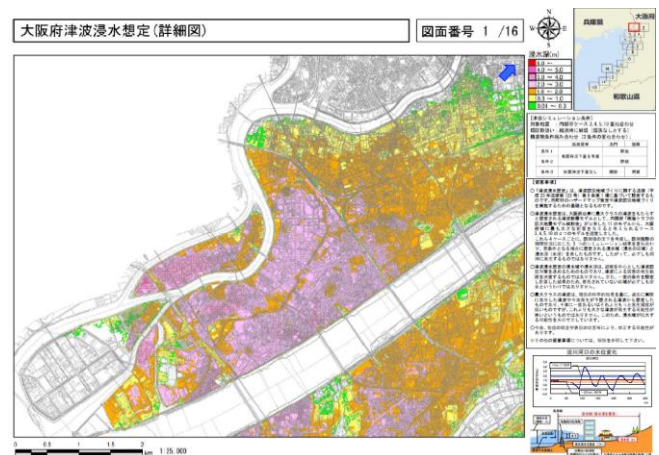


図1 大阪の新津波浸水想定 (出典:大阪府²⁾)

大阪府の津波浸水範囲が拡大した要因は想定される津波水位の上昇(平成15年南海・東南海地震の想定でもT.P.3-4m)よりも、地震動により堤防が沈下し、さらに越流された場合には破堤する、という条件で検討を行った影響が大きい。大阪市には海面よりも低い0m地帯が多く存在し、満潮時には堤防が沈下すると津波が到達しなくても直後から海水の流入が始まる。大阪府の想定では防潮堤の沈下に伴う浸水区域についての検討も行っている(図2)。

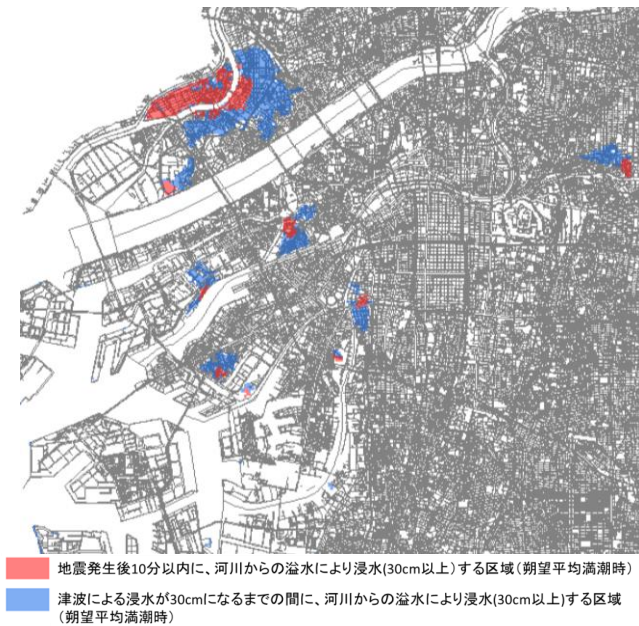


図2 津波が到達するまでに防潮堤の沈下等により浸水する区域(出典:大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会³⁾)

2. 解決法

(1) 止水板による浸水防止

梅田地下街、ディアモールともに、止水装置が設置されていない出入口が半数近くある。津波や高潮に備えての浸水防止対策は、従来通り「土嚢」を積む計画となっているが、どのようにして人手を確保するかが課題となる。また、ディアモールの止水装置は、角落としとなっており、さらに地下に止水板が収納されていることから、夜間や休業時に37カ所の止水装置をどのようにして設置するのが課題となる。堂島地下街に堂島川に一番近いことから、浸水対策の意識が高く、角落としが半数弱あるが、主要な階段には、自動化した止水装置が設置され、さらに内部に防水扉を設置されている。また、堂島地下街の管理事務所は隣接のビルの上階に設けられている。もっとも浸水対策が充実しているのは、国道2号沿いの歩道階段でエレベーターを含む全ての出入口に止水装置が設置されている。今後、止水措置の充実が求められる。

(2) 地下街滞在者の避難意識の向上

地下街が津波や洪水で浸水するかもしれない、と思っている人は83%という高さであり、止水版と防水扉等の浸水防止装置の設置場所を知っている人は43%と、ほぼ半数近い人が浸水への危険を意識していることがわかる。

しかし、災害が起きた際の対処方法を考えているかという問いに対し、常に非常口を確認しているのは、男性8%、女性4%、水害避難ビルに行くことを決めているの

は、男性4%、女性4%、特に何も考えていないのは、男性88%、女性92%であった。また、避難誘導の標識の設置を確認している人は平均6%、水害避難ビルのあることを知っている人は4%しかない。

また、地下街に居るときに浸水が起こった時の対策を考えているかどうかを確認したところ、男女共に88%以上の人が何も考えていないという結果になり、年代別に見ても20歳代では100%、30歳代で75%、40~60歳代でも90%以上の人が何も考えていないという結果になった。

大きな揺れを感じたら地上に避難するという意識付けをおこなうことが重要であることが明らかになった。

(3) 地下街のテナントの防災意識の向上

地下街テナント従業員の南海トラフの認知度について、52.4%が聞いたことはあるがよくわからないと答えていて、南海トラフ巨大地震については知っているが、どのような被害が起こるのかまで理解できていないと思われる。また、23.8%が知らないと回答しており地震災害に関する知識が不足していることがうかがえる。

しかし、南海トラフ巨大地震が発生した場合、規模によっては梅田地区まで津波の被害が発生すること知っているについては、津波被害が梅田地区まで来るとは知っていないが57.1%と半数を超え、前段の南海トラフ巨大地震についてよく知らないけれども、津波が来るということは認識している。

地震等が発生した場合に備えて、店舗にいるお客様の避難誘導方法を決めているについては、作成していないが、61.9%となり半数以上で地震等が発生した場合の避難誘導方法を決めていないことがわかった。現在作成中が14.3%、防火対策としては作成しているが23.8%となった。

地下出入口等の一部に設置されている防水扉や止水板など浸水防止対策の認知度について、聞いたことはあるがよくわからないが42.9%、知らないが42.9%で知っているのは、わずか14.3%という結果であった。

また、ホワイティーうめだを管理する大阪地下街株式会社にてインタビューしたところ、平成15年度に『梅田地下空間避難確保計画』を作成し、浸水時における東梅田地区の地下街利用者の安全を確保するため、発災時の情報収集・伝達体制、避難誘導体制、止水対策のマニュアル、防災教育・訓練計画を策定している。

地下街滞在者の避難の意識が低いことから、現在は低い水準にあるテナント従業員の意識の向上を行うことが求められる。

3. 方法の検証

(1) 対策の前提の検証

東日本大震災の反省を踏まえた防災対策の見直しは、

様々な場所で進められている。対策の見直しを適切に行うためには「東日本大震災の課題は何か？」ということ を正しく把握する必要がある。戦後日本が経験したもう 一つの大災害である阪神・淡路大震災と東日本大震災を 比較すると、東日本大震災の特徴が明確になってくる。 表 1 は東日本大震災と阪神・淡路大震災の被害を示した ものである。2 つの災害を比べて分かることは、1) 東日 本大震災の死者は阪神・淡路大震災の 3 倍にのぼる、2) 災害から生活再建をしないとイケない世帯（全半壊世帯 数）は阪神・淡路大震災の方が多く、3) 災害で壊れた モノの量（災害廃棄物）は阪神・淡路大震災の方が多く。 しかしながら、この被害統計には様々な問題も存在する。 例えば、全半壊建物数について、消防庁は「棟」、首相官 邸は「戸」という単位でデータを公表している。1 棟 200 戸のマンションということを考えれば分かるが、棟と戸 では全く意味が異なる。そのため、阪神・淡路大震災で は、建物の被害「棟数」に加えて、被災世帯数も公表さ れた。東日本大震災の場合、仙台市では1棟 200 戸のマン ションが被災するという事例もあるが、ほとんどは1 棟 1 戸の一戸建て住宅の被害であり、棟と戸の集計でそ れほど大きな変化は無いと考える。また、経済被害額が 大きければ、復興予算額も大きくなることから経済被害 額を大きく見積られる傾向がある。財産への被害量であ る災害廃棄物の量からすると、農林水産業に対する被害 （東日本 1.9 兆円、阪神 1 千億）、1995 年から 2011 年 の間の物価の変動、を考慮しても、阪神・淡路大震災と比 べると、東日本大震災の被害総額は過剰評価であると思 えられる。

表 1 東日本大震災と阪神・淡路大震災

	東日本大震災	阪神・淡路大震災3
地震の規模	M9 (Mw)	M7.3 (JMA)
死者	15,883人	6434人
建物被害	399,079戸	241,980棟
被災世帯(全半壊)	—	460,356世帯
がれき量1	2,758万トン	2,000万トン
災害廃棄物	1,807万トン	—
津波堆積物	956万トン	—
経済被害額2	16兆9千億円	9兆9千億円(兵庫県)
	2013/11/26現在	
1. 東日本大震災のがれき量については、環境省廃棄物・リサイクル対策部、被災3県沿岸市町村の災害廃棄物処理の進捗状況、平成24年9月7日 2. 東日本大震災の経済被害額については、内閣府(防災)、2011年6月発表資料 3. 阪神・淡路大震災については、兵庫県データによる。		

いずれにしても、東日本大震災の最大の課題は、津波により 2 万人近い人々の命が失われたことにあり、津波 災害による人的被害をいかにして軽減するのか、がポイントであり、被災した人の生活再建、財産への被害（災 害廃棄物への量）という観点から見ると、阪神・淡路大 震災の方が大きな災害であった、というのが正しい認識 である。東日本大震災については、人口減少社会での復

興・被害地域の広域性、という問題はあるが、被災者の 生活再建、地域の再建という課題は、阪神・淡路大震災 以来の課題であって東日本大震災に特徴的な課題ではな い。

先進国日本で津波警報が出されていたのにも関わらず、なぜ 2 万人もの人々が命を失ったのか、ということが、 東日本大震災が突きつけた課題である。明らかになった 課題は「全く想定外の津波が宮城県を襲った」というこ とであり、宮城県の死者数は岩手県の 2 倍に及ぶ。図 3 は宮城県名取市の災害前に配布されていた津波ハザード マップと、実際の浸水エリアを示したものである。この 図から分かるように、宮城県名取市では全く想定されて いない地域にまで津波が浸入している。図 4 は岩手県陸 前高田市の津波ハザードマップである。陸前高田では多 くの人々が亡くなっており、想定範囲を超えて浸水が発 生しているが、名取市と比較すると想定外の浸水範囲は 小さい。宮城県では学校に居た子供たちが津波で命を失 う、という事態が発生し、問題となっているが、岩手県 では学校管理下で命を失った児童・生徒はいない。事前 の津波浸水想定と実際にきた津波の浸水エリアが、それ ほど大きく違わなかったことが、上手く避難することが できた背景にあると考えられる。

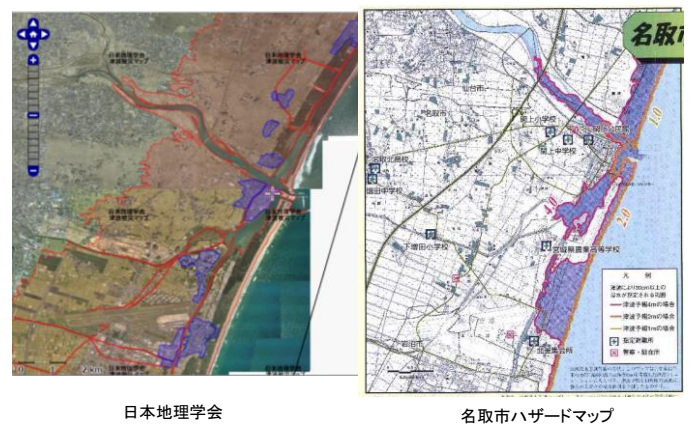


図 3 名取市（宮城県）のハザードマップと浸水範囲

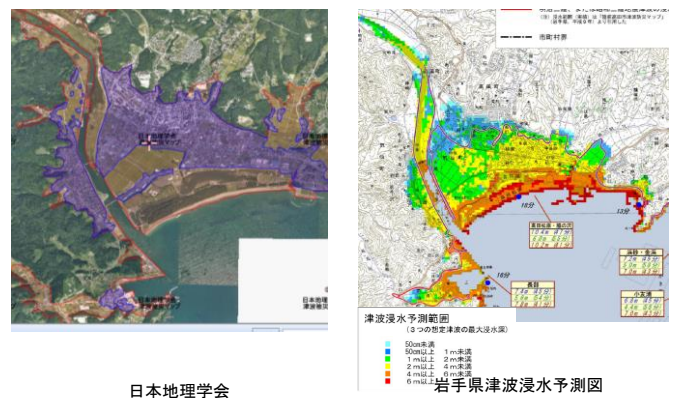


図 4 陸前高田市（岩手県）のハザードマップと浸水範囲

困

津波の来襲が予想され、避難勧告・指示が出されたのに避難率は 10%であった、といったことがよく報道される。我々人間は、危機を危機として認識しない、という性質を持った生き物である。避難勧告・指示が発令されても避難しないのに「津波が来ない」とされていた地域に住んでいた人々が避難するはずがない。阪神・淡路大震災では、建物の倒壊により人が亡くなったことから、木造住宅の耐震改修が重点課題となった。東日本大震災では、想定外の津波浸水区域を無くすことが、先ず取り組むべき課題である。こういった背景を踏まえて行われたのが南海トラフで発生するマグニチュード 9 という考えられる最大クラスの地震・津波の被害想定である。「命を守る」という観点から、津波シミュレーション結果に基づき、考えられる最大範囲の津波浸水エリアが示され、浸水区域に居る人が避難しない場合には 32 万人の人が命を失う、という想定が行われた。

東日本大震災を踏まえて取り組むべき課題、課題は、みんなが、浸水エリアに居る場合は、浸水エリア外に避難をする・できる、ようにする、ということである。想定していない事態に備えることは不可能であり、人的被害に加えて、建物被害棟数や経済被害も想定されているが、被害想定の見直しの本来の目的は、津波による死者を減らすことにあるということに対する認識が重要であり、今回の検討について津波避難という観点から行うことが妥当であるということが検証された。

(2) 止水版設置状況と地下街への浸水

M9 クラスの津波想定で浸水が予想される梅田の地下街を対象に、現状調査を行った。調査対象地域は、①ホワイトィ、泉の広場、プチシャンゼリゼ、地下鉄梅田駅周辺（大阪地下街(株)管理区域）、②ディアモール（大阪市街地開発(株)管理区域）、③堂島地下街、地下鉄西梅田駅周辺（堂島地下街(株)管理区域）、④ハービス大阪、⑤国道 2 号歩道<JR線以北の地域は、すべてが民間事業所による商業施設であることから、調査が困難なため、調査対象から除外した。調査日程は平成 25 年月 12 月 1 日～平成 26 年 2 月 28 日であり、エクスプラス災害研究所に委託をして現地調査を実施した。調査方法は以下の通りである。

1)調査対象地下街出入口（階段・エレベーターの場所を地図上で確認）ただし、道路や歩道に面しているビルの外部から直接地下に降りる階段と、歩道上の独立の地下出入口や、地下駐車場等の地下への進入口を対象とし、路面上のビルの入口を経由してからの地下への階段は対象外とした。また、地下街から隣接のビルに進入できる通路も除外した。

2) 地上における地下進入口の計測

①間口の横幅、②止水装置の設置の有無、③止水装置のある場合は、止水高さ（角落しの場合はその横溝の高さ）、④止水装置の操作方法（角落し、自動、スイング、起伏式等）、⑥入口に止水装置のない場合の代替防水対策（防水扉等）、⑦現状の写真撮影 図 5 に調査対象地域の概要、図 5、6、7 に詳細な調査実施箇所を示す。

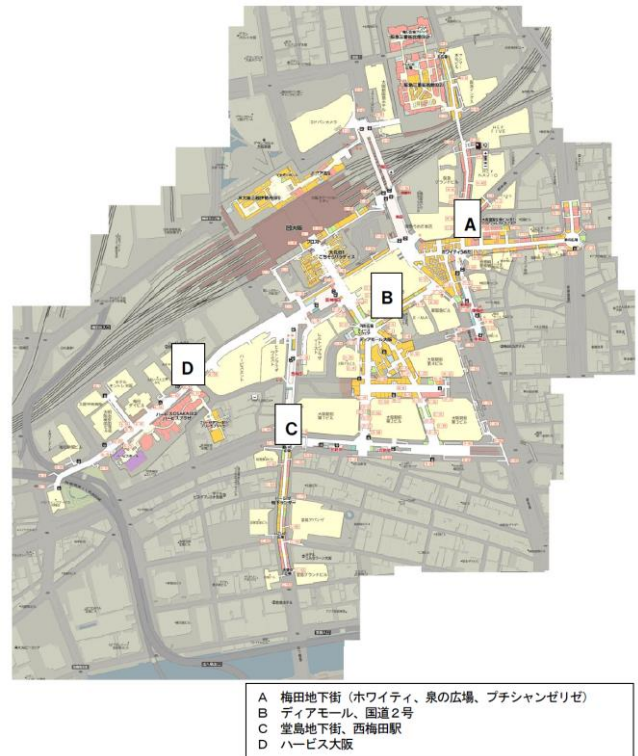


図 5 調査対象地区

梅田地下街（ホワイトィ、泉の広場、プチシャンゼリゼ）の合計では 27 カ所に止水装置が設置されているが、設置率は出入口の 44%弱である。阪急百貨店側には 5 カ所の防水扉があるものの、大阪駅前の海拔は 0.51mということから、最も面積の広いホワイトィの浸水対策は急務ではあると考える。図 9、10 に梅田地下街の出入口の止水対策の現状を例示する。

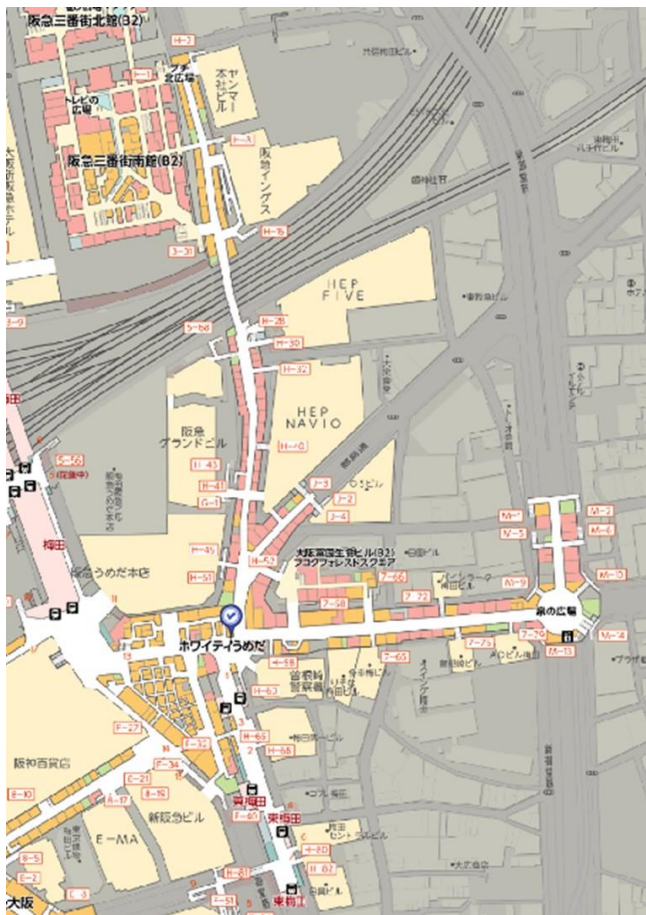


図6 調査実施出入口（梅田地下街：泉の広場・ホワイトィ・プチャンゼリゼ）



図7 調査実施出入口（ディアモール、国道2号）



図8 調査実施出入口（堂島地下街、ハービス大阪）

出入口NO	H (高さ)	W (幅)	種類	写真
H-51	600	2680	角落し	
H-49	580	2720	角落し	
H-52		1800	なし	
G-1		2700	なし	
H-41	720	1600	角落し	
H-43			ビル内直結	

図9 梅田地下街の出入口の止水装置（ホワイトィー）

出入口NO	H (高さ)	W (幅)	種類	写真
7-65	ビル内直結			
7-75		2140	なし	
7-79	ビル内直結			
M-13	380	2140	スイング	
M-13-02	380	2140	スイング	
M-14	380	2640	スイング	
M-14-02	380	2640	スイング	

出入口NO	H (高さ)	W (幅)	種類	写真
D-14		2000	なし	
D-13		2000	なし	
C-30		2300	なし	
D-21		1780	なし	
D-21-02		2320	なし	
D-23	900	2020	角落し	

図 10 梅田地下街止水装置（泉のひろば、プチシャンゼリゼ）

ディアモールの出入口に関しては、路面から全体的にマウンドアップされているが、止水装置のほとんどが 1m 未満という高さであり、起伏式の操作が簡単な 1 か所を除く、残り全てが角落しである。また、落とし板の収納場所が地下に設けられていた。図 11 にディアモール出入口の止水装置の現状を示す。

出入口NO	H (高さ)	W (幅)	種類	写真
D-31	1080	2000	角落し	
D-33	840	2000	角落し	
D-39	840	2030	角落し	
D-41	840	2010	角落し	
8-5	810	2000	角落し	

図 11 ディアモール止水装置

堂島地下街も同様に角落としが半数弱あり、さらに主要な階段には、自動化した止水装置の設置と、途中で頑丈な防水扉を設置されている。また、堂島地下街の管理事務所は隣接のビルの上階に設けられ、浸水の危険もないことを含めて、堂島川に一番近く、浸水対策には意識が高い。

出入り口NO	H (高さ)	W (幅)	種類	写真
C-92	1230	2640	角落し	
C-93	1160	1720	角落し	
C-83		2610	なし	
C-84	2100	4000	防水扉	
C-80	1250	2180	自動	

図 11 堂島・ハービス周辺止水装置

浸水対策を充実させているのは、国道 2 号沿いの歩道階段で、国土交通省の直轄管理ということもあるのか、エレベーターを含む全ての出入口に止水装置を設置されている。図 12 に国道 2 号沿い止水装置の例を示す。

梅田地下街、ディアモールともに、止水装置が設置されていない出入口が半数近くある。従って、津波や高潮に備えての浸水防止対策は、従来通り「土嚢」を積む計画となっているが、どのようにして人手を確保するかが課題となる。また、ディアモールの止水装置は、角落としとなっており、さらに地下に止水板が収納されていることから、夜間や休業時に 37 カ所の止水装置をどのようにして設置するのが課題となる。

また、大阪地下街株式会社は、平成 15 年度に『梅田地下空間避難確保計画』を作成し、浸水時における東梅田地区の地下街利用者の安全を確保するため、発災時の情報収集・伝達体制、避難誘導体制、止水対策のマニュアル、防災教育・訓練計画を策定している。その目的は、浸水時における地下街利用者の安全確保であり、想定としては、外水氾濫については H14.6 国交省公表の淀川浸

水想定区域、内水氾濫 1 時間に 100mm~150mm 降雨時の地下街浸水を想定事象としている。対応の方針としては淀川に堤防決壊による外水氾濫に対しては、地下街利用者の円滑かつ迅速な避難の確保を中心し、何をおいても避難誘導を最優先させるための外水氾濫対策計画を策定することとし、集中豪雨による内水浸水に対しては避難の確保をはじめ止水対策等に資するための内水氾濫対策計画を策定している。

C-84	2100	4000	防水扉	
C-80	1250	2180	自動	
C-80-02	1300	2340	自動	
C-80-03	2200	2100	防水扉	
C-72	1720	3160	自動 (電動)	
C-69	990	1660	角落し	

図 12 国道 2 号沿い止水装置

各地下街の浸水防止のための装置の設置状況を表 2 に示すとおりである。今回の現状調査は、J R 東海道本線以南の地下街を対象として、路面から直接地下に進入できる出入口 151 カ所についての現状調査である。なお、ビルの内部から地下への階段については、調査から除外している。本調査結果によると、これらの出入口に対して、何らかの浸水防止対策を設備している場所は、82 カ所であり、その設置率は 54.3% である。

止水板が設置されていない入口が多いことから津波浸水発生時には地下街への浸水が発生することは避けられず、浸水することを前提とした地下街の避難対策が求められることが検証された。

表2 梅田における止水板の設置状況

出入口数	浸水防止装置						ビル内に直結	備考	
	設置箇所数	種類				不設置箇所			
		角落し	自動	高さ	防水扉				
梅田地下街ホワイトィ									
20	8	8	0	1m未満	6	0	11	1	ホワイトィでは入り口階段の58%に止水装置が設置されていない。
				1m以上	2				
				1.5m以上	0				
				2m以上	0				
梅田地下街泉の広場									
14	4	0	スイング4	1m未満	0	5	0	5	ビルの地下から直接進入できる階段が多く、特に富国生命ビルは、避難者を受け入れる「水害避難ビル」の表示をしている。
				1m以上	0				
				1.5m以上	0				
				2m以上	4				
阪急ブチチャンゼリゼ									
27	15	9	起伏式1	1m未満	9	2	13 内防水扉2が ダメー	2	梅田地下街からJRの高架下を經由した阪急の地下街へと続くので、阪急の施設内に入れることもあって、地上部分での止水装置の設置は少ない。
				1m以上	1				
				1.5m以上	0				
				2m以上	5				
ディアモール									
53	38	37	起伏式1	1m未満	38	0	14 内閉鎖 3	1	梅田周辺でも比較的新しい地下街で、地上の出入口階段は、路面よりマウンドアップされてはいるが、止水板はほぼ全てが1m未満である。隣接ビルへの直接入口が多い。工事閉鎖中3か所。
				1m以上	0				
				1.5m以上	0				
				2m以上	0				
国道2号									
9	9	7	スライド2	1m未満	1	0	0	0	国道2号線沿いの歩道にある地下進入口は、エレベーターを含めて、全て止水装置が設置されている。
				1m以上	8				
				1.5m以上	0				
				2m以上	0				
堂島地下街									
15	11	5	3	1m未満	1	3	4	0	全ての入り口階段は1m以上の高さの角落しを装備。ビルの入りローか所が電動式の止水板を設置。止水板のない2か所は階段途中の踊り場に防水扉を設置。
				1m以上	6				
				1.5m以上	1				
				2m以上	3				
ハービス大阪									
14	0	0	0	1m未満	0	0	14	0	最も新しく開発された地域で、全体的に建物は路面からマウンドアップしている。
				1m以上	0				
				1.5m以上	0				
				2m以上	0				

(3) 避難意識に関する調査

1) 調査の概要

止水板が設置されていない箇所が多くあり、津波が梅田の地下街に浸水可能は高く、南海トラフ地震発生時には適切な避難行動を行うことが不可欠であり、地下街の滞留者に対してインタビュー調査を実施した。インタビューの概要は以下の通りである。

調査内容は、1) 地下街利用者の浸水対策意識、2) 地下街テナントの浸水対策意識であり、梅田地区地下街及びテナントでの調査員による聞き取り調査をエクスプレス災害研究所が、平成 27 年 1 月 15 日から 1 月 31 日 午前 8 時から午後 5 時にかけて実施した。調査数は、地下街利用者の浸水対策意識調査：有効回答数 181 件、地下街テナントの浸水対策意識調査：有効回答数 21 件である。

2) 地下街利用者意識調査

a) 避難誘導標識についての認識

避難誘導灯などの標識についての意識を確認するため、地下街利用時及び地下通路通行時に避難誘導標識や非常口の標識などを確認しているか、梅田地区の地下街に設置位置されている避難誘導灯や標識の例（図 13）を提示して、4 項目の選択肢で、確認した。



図 13 梅田地区地下街における避難誘導標識例

今回の調査結果から、この避難誘導標識を毎回、確認できているのは、わずか 5.5%しかなく、標識があることは知っていても、どこにあるか確認したことはないが 85.0%、標識があることを知らない人は 2.2%となった。避難誘導標識の認知度はあるが、実際にどこにあるか確認する人は、低い結果となった。

b) 津波リスクの認識

南海トラフによる地震が発生した場合に梅田地区の地下街が津波によって浸水被害についての認識についての質問を行った。

南海トラフによる地震が発生した場合、梅田地区の地下街が津波によって浸水すると思う人が 74.0%となり、多くの人が津波による浸水被害を認識していると伺えた。

浸水すると思う	134	74.0%
浸水すると思わない	16	8.8%
わからない	31	17.1%

津波被害の認知度について、回答者の属性別にクロス集計を行ったが、性別、年代別による差異は特に見られず、多くの人が浸水すると思っていることがわかる。利用形態別にみると買い物客で若干「浸水すると思わない」

回答が若干多い。利用頻度別にみると週に 1 回程度の利用者に「浸水すると思わない」回答が若干多い。避難誘導標識の認知度と津波被害の認識の関係性を見たところ、「避難誘導標識などを毎回確認する」と回答した人は、全員浸水すると認識していることがわかった。また、「避難誘導標識を知っているが、確認したことはない」と回答した人のうち、10%程度の人が、浸水しないと認識していることが見えた。一方で「浸水すると思う」と回答した人の 84.6%が、「避難誘導標識を知っているが確認したことはない」と回答している。梅田地区の地下街が、浸水すると思うが、利用時に避難場所や避難誘導標識を確認することは少ないという結果となった。

c) 浸水防止装置の設置の認知度

出入口や階段の途中に設置されている防水扉や止水板の認知度を確認するため、5 項目の選択肢を挙げて質問した。設問にあたっては、梅田地区の地下街や地下通路の一部に設置されている防水扉や止水板の写真（図 14）を提示した。



図 14 防水扉・止水板の設置例

回答のうち、45.9%がどちらも知らない、どちらも知らないは 21.5%であった。防水扉は知っているが、24.3%、止水板は知っているが 5.0%で、どちらかだけでも知っているのは 29.3%となった。止水板は、普段わかりづらく、出入口にそのような浸水対策が行われていることは、多くの市民に知られていないことがうかがえた。

梅田地区地下への出入口の一部に写真のような浸水防止対策があるのを知っていますか。

どちらも知っている	39	21.5%
防水扉は知っている	44	24.3%
止水板は知っている	9	5.0%
どちらも知らない	83	45.9%
わからない	6	3.3%

防水扉・止水板の認知度を回答者の属性別にクロス集計を行った。性別にみると男性で 40.7%、女性で 52.8%の人がどちらも知らないとなり、性別による差異は特に見られない。年代別にみると、60 代では 44.4%が防水扉、止水板どちらも知っていると回答しており、他の年代に比べて多い。「防水扉を知っている」が、30 代で他に比べ

若干多い利用形態別にみると通勤利用でも「どちらも知らない」が最も多くなった。利用頻度別では、大きな差異はなかった。浸水すると思っけていても、浸水対策について知らないという結果であった。

d) 津波避難ビルについての認識

梅田地区の地下街に面した富国生命ビルが大阪市北区役所と協定を締結した津波避難ビルであるが、認知度はどの程度であるか確認を行った。知っているのは、3.3%と低い結果となり、ビル名を富国生命ビルと回答できたのはそのうち半数であった。21.5%はあることは知っているが、どこか知らないと回答しており、知らないが71.3%と非常に多い結果となった。

津波避難ビルの認知度について回答者の属性別にクロス集計を行った。性別、年代別、利用形態別、利用頻度別において、特に目立った差異は見られなかった。

地下街の浸水被害の認識と避難ビルの認知度についてクロス集計したところ、浸水すると思っけている人の一部に津波避難ビルが認知されていることがわかるが、それでも多くの人々が津波避難ビルを知らないという結果であった。

梅田地区まで津波の被害が発生すること知っているか確認を行った結果、津波被害が梅田地区まで来るかもしれないと知っているが 57.1%と半数を超え、前段の南海トラフ巨大地震についてよく知らないけれども、津波が来るということは認識しているようである。

南海トラフによる地震が発生した場合、規模によっては梅田地区まで津波の被害が発生することを知っていますか。

	回答数	比率
知っている	12	57.1%
知らない	8	38.1%
わからない	1	4.8%

地震や津波に備えた店舗の対策作成状況を確認した。作成していないが 85.7%と大半を占め、作成しているという回答が 1 店舗、現在作成中が 1 店舗と非常に低い回答となった。

地震や津波に備えた店舗等の対策を作成していますか。

	回答数	比率
作成している	1	4.8%
現在作成中である	1	4.8%
作成していない	18	85.7%
その他	1	4.8%

地震や津波が発生した場合に備えて、店舗の従業員の避難について対策を作成しているか確認した。71.4%が作成しておらず、作成しているという回答は 0 であった。現在作成中である店舗が 1 つあり、防火対策としては作成しているが 23.8%という結果であった。

地震や津波などが発生した場合に備えて、店舗の従業員の避難について対策を作成していますか。

	回答数	比率
作成している	0	0.0%
現在作成中である	1	4.8%
作成していない	15	71.4%
防火対策としては作成している	5	23.8%

地震や津波が発生した場合に備えて、お客様の避難や安全管理について対策を作成しているか確認した。71.4%が作成していないという結果であった。現在作成中が 9.5%あり、防火対策としては作成しているが 19.0%であった。

地震や津波などが発生した場合に備えて、店舗にいるお客様の避難や安全管理について対策を作成していますか。



図 15 富国生命地下入口に表示されている津波避難ビルのマーク

3) 地下街テナント意識調査

ホワイティーうめだ、ディアモール、堂島地下街において、店舗を訪問して聞き取り調査を実施し、有効回答数は 21 件であった。回答した店舗の業種は、物品販売が 7 店舗、飲食店が 8 店舗、その他のサービス業として理容、美容等 6 店舗である。

南海トラフの認知度について 52.4%が聞いたことはあるがよくわからないと答えていて、南海トラフ巨大地震については知っているが、どのような被害が起こるのかまで理解できていないと思われる。また、23.8%が知らないと回答しており地震災害に関する知識が不足していることがうかがえる。

南海トラフ巨大地震が発生した場合、規模によっては

	回答数	比率
作成している	0	0.0%
現在作成中である	2	9.5%
作成していない	15	71.4%
防火対策としては作成している	4	19.0%

地震等が発生した場合に備えて、店舗にいるお客様の避難誘導方法を決めている確認した。作成していないが、61.9%となり半数以上で地震等が発生した場合の避難誘導方法を決めていないことがわかった。現在作成中が 14.3%、防火対策としては作成しているが 23.8%となった。

地震などが発生した場合に備えて、店舗にいるお客様の避難誘導方法を決めていますか。(あてはまるもの1つ)

	回答数	比率
作成している	0	0.0%
現在作成中である	3	14.3%
作成していない	13	61.9%
防火対策としては作成している	5	23.8%

地震等を想定した避難訓練を定期的に行っているか確認するため 5 項目の選択肢で確認した。一度も行ったことがないが 57.1%と半数を超え、定期的に行っているところはなかった。火災訓練については、33.3%が行っている。

地震などが発生した場合を想定して、避難訓練を定期的に行っていますか。

	回答数	比率
年に数回行っている	0	0.0%
年に1回行っている	0	0.0%
定期的には行っていない	2	9.5%
一度も行ったことはない	12	57.1%
火災訓練を行っている	7	33.3%

従業員が店舗に一番近い非常口を把握しているか、確認した。全員が把握できているが 57.1%と半数を超えた。一部の従業員が把握できているが 38.1%あり、時間帯によっては把握していない従業員しか店舗にいない場合も考えられる。非常口の確認については、全ての従業員にしっかり把握してもらう必要がある。

店舗に一番近い非常口を従業員は把握していますか。

	回答数	比率
全員把握できている	12	57.1%
一部の従業員が把握できている	8	38.1%
ほとんど把握できていない	1	4.8%
誰も把握できていない	0	0.0%

図 38 非常口の把握

地下出入り口等の一部に設置されている防水扉や止水板など浸水防止対策の認知度について確認した。聞いたことはあるがよくわからないが 42.9%、知らないが 42.9%で知っているは、わずか 14.3%という結果であった。

梅田地区地下の出入り口の一部に防水扉や止水板などの浸水防止対策があるのを知っていますか。

	回答数	比率
知っている	3	14.3%
聞いたことはあるがよくわからない	9	42.9%
知らない	9	42.9%

今回の調査において、回答者から自由に地下街の防災に対する意見を伺った。内容は以下のとおりである。

- ・駅ビルは古い建物なので大地震が来た時にどうなるかととても不安。どの程度の耐震性があるのか調べてほしい
- ・いつも同じ従来の火災訓練では、この先起こりうる災害に対処できない。複合災害に対応した色々なパターンの訓練をしていただく事が出来れば、参加者のモチベーションも上がる
- ・あまり防災に対して理解できていないので勉強していきたい

(4) 避難行動についての意識

先に実施した大阪市の梅田地区周辺地下街利用者に対する地震津波災害への意識踏査の追加として、「災害発生時の対処方法を考えているか」についての聞き取り調査を実施した。調査の概要は以下の通りである。地下街利用者の浸水対策意識調査：利用者の性別と年代を聞き、「災害が起きた際の対処方法」についての聞き取り調査を実施。調査対象大阪市梅田地区地下街を通行する人。調査方法：梅田地区地下街での調査員による聞き取り調査、調査時期：平成 27 年 3 月 20 日から 3 月 24 日 午前 8 時から午後 2 時、調査数：調査人数 78 人、有効回答者数 51 人。

今回の追加調査は、5 日間の調査のため、目標を 50 人として、前回同様通行人への聞き取り調査を実施した。回答者は、51 人となり、男性 25 人、女性 26 人とほぼ同数で、年代別では、50 歳代以上 16%、40 歳代 27%、30 歳代 24%、20 歳代 22%と、10 歳代 11%、前回よりやや若い世代の回答が多くなった。

「災害が起きた際の対処方法を考えているか」という質問について、①常に非常口を確認しているのは、男性 8%、女性 4%、②水害避難ビルに行くことを決めているのは、男性 4%、女性 4%、③特に何も考えていないのは、男性 88%、女性 92%

自発的に率先して避難などの安全対策をとる人は少ないということが分かり、いわゆる正常化の偏見なのだろう

うか、地下街を通行中に津波や洪水の発生があっても、被害を受けるという意識を持っておらず、緊急時の館内放送等で避難の呼びかけなどがあれば避難できているのだろうか。不特定多数の利用者が緊急事態に整然と安全な避難行動をとってもらうためには、個々の意識を高めることはもちろんのことながら、地下街管理者としての的確な情報を伝える方法と、テナントを含む従業員の避難誘導の役割を強化することが望まれる。

4. 実効性のある提言

梅田の地下街における実態調査、調査結果の分析から以下のような対策が重要であることが明らかになった。

1. 地下街の滞在者に大地震発生時には地上へ避難し、さらに内陸へ移動することを周知する。
2. テナント等に対して今後、2 時間をいう時間を考慮した地下街からの避難のあり方について検討を要請する。
3. 避難を判断するのに必要なトリガー情報を充実させる
4. ハリケーン・サンディーの事例と参考に、地下街、地下鉄の災害対応計画を作成する。

参考文献

- 1) 本報告の内容は、以下の論文を元に加筆を行ったものである。牧紀男、伊永勉、地下街からの水害時の避難に関する基礎的考察-梅田地下街におけるアンケート調査から-、地域安全学会工学集、No.36、pp.161-164、2015
- 2) 大阪府、津波浸水想定について、2013
- 3) 大阪府南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会、大阪府域の被害想定について（人的被害・建物被害）、南海トラフ巨大地震災害対策等検討部会第 4 回会議資料- 1、p22、2013

研究テーマ 2

課題 2-2

巨大地震と巨大津波の連動作用 における構造物の耐震対策

京都大学大学院 竹脇出 教授

課題 2-2 巨大地震と巨大津波の連動作用における構造物の耐震対策

京都大学

教授

竹脇 出

巨大地震
地震・津波連動

巨大津波

地盤液状化

1. 研究目的

巨大地震と巨大津波の連動作用に対して如何に対応すべきかを提言すること。

- (1) 地盤液状化時の杭の損傷評価法の提案
- (2) 巨大地震による地盤液状化と津波の連動作用が建物や杭基礎に及ぼす影響の評価
- (3) 衝撃的な（パルス状）地震動に対する構造物の弾塑性応答評価法の展開とその津波に対する応答評価法への拡張



図 1. 1995 年の兵庫県南部地震における杭基礎の被害例



図 2. 2011 年の東北地方太平洋沖地震における地盤の液状化と巨大津波の連動作用によると推測される被害例
(出典：日本建築学会調査速報, 2011,7)

1964 年の新潟地震では地盤の液状化現象が建築構造物の耐震設計上極めて重要な課題であることが明らかとなり、1995 年の兵庫県南部地震では、それに起因する杭基礎の被害が多数報告された (図 1)。さらに、2011 年の東北地方太平洋沖地震では、東京湾岸や大阪湾岸などにおいて長周期地震動による地盤の液状化や地盤と超高層建物との共振現象など、これまで十分には認識されていなかった現象が多く観測された。また、一部の地域では、巨大地震による地盤の液状化と巨大津波の連動作用によると推測される被害も報告されている (図 2)。このような状況下では、構造物と地盤との動的相互作用や、杭と地盤との動的相互作用を考慮した耐震設計法の構築が喫緊の課題となっている。

杭の地震時応答は、慣性の相互作用効果と運動学的相互作用効果の 2 つに分類される。現状の杭の耐震設計では、この 2 つの効果を経静的な方法で評価し、それを単純和や 2 乗和平方根法により重ね合わせる方法が採用されているが、共振領域などをはじめとしてその精度・信頼性は十分明らかとなっているとは言い難い。

本研究の目的は、表層地盤の非線形増幅特性と杭周辺地盤の非線形特性を考慮した上で、工学的基盤面で定義される設計用地震動に対する杭応答最大値の簡易予測法を提案することである。また、この評価法を地盤の液状化を考慮した場合に拡張する。さらに、巨大地震による地盤液状化と津波の連動作用の評価法の提案や、衝撃的な（パルス状）地震動に対する構造物の弾塑性評価法の展開とその津波に対する応答評価法への拡張についても言及する。

2. 解決法

2.1 液状化地盤での杭の地震時挙動の簡易評価法

応答スペクトル法（地盤非液状化、液状化）と p-multiplier 法を用いた杭の応答評価法を提案する。また、多点入力モデルとの比較により、精度を検証する。

2.2 地震動により地盤が液状化した直後に津波荷重を受けた場合の解析

汎用解析プログラムでも、近似的な応答評価が可能であることを実証する。

2.3 深い地盤構造の不確定性への対応

実地盤のデータを用いた解析により、深い地盤構造が長周期地震動を受ける超高層建物の応答に重要な役割を果たすことを実証する。

2.4 パルス性地震に対する弾塑性応答簡易評価法の津波に対する応答評価への適用

インパルスによる提案法が実際の衝撃的な地震動に対する応答の良好な近似評価法であることを実証する。

3. 方法の検証

3.1 液状化地盤での杭の地震時挙動の簡易評価法^{11, 12)}

液状化地盤のもとでの杭の挙動とその後に発生する津波による杭の挙動は全く特性の異なるものであり、独立に取り扱う必要がある。ここではまず、液状化地盤のも

とでの杭の地震時挙動の簡易評価法について説明する。その準備として、非液状化時の評価法の概要について説明する。

●運動学的相互作用効果の評価

上部構造の慣性力が作用していない、自由地盤の変形による運動学的相互作用に対する杭頭曲げモーメントの応答は、上部構造及び基礎の質量が 0 であるとして評価される。この慣性の相互作用による応答の解析においては、竹脇らによって開発された「有限要素モデルに対する応答スペクトル法」を用いる。

●慣性の相互作用効果（応答）の評価

実務設計での杭の地震時応答の評価において、慣性の相互作用効果は、基礎固定等の境界条件のもとで得られた上部構造のベースシアを杭頭に作用させる静的な方法が採用される場合が多いが、この方法の精度、信頼性は定かではない。また、工学的基盤面や杭先端位置で設定される地震動に対して直接応答を評価していることにはなっていない。

ここでは慣性の相互作用効果を total な応答と、剛な自由地盤のモデルを用いて評価する方法を提案する。

剛な自由地盤のモデル（図 3 中央）の杭頭最大せん断力 Q^{rigid} と曲げモーメント M^{rigid} を、竹脇らによる応答スペクトル法を用いて求める。ここで、慣性の相互作用による曲げモーメントとせん断力の最大値の比は、剛な自由地盤のモデルのものと等しいと想定する。 $Q^{(K)} \equiv 0$, $Q^{total} \equiv Q^{(I)}$ であるから、慣性の相互作用による最大杭頭曲げモーメントは次式で評価することができる。

$$M^{(I)} = M^{rigid} (Q^{total} / Q^{rigid}) \quad (1)$$

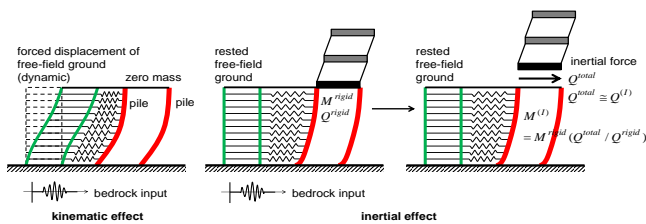


図 3. 運動学的相互作用と慣性の相互作用の杭頭曲げモーメントの評価

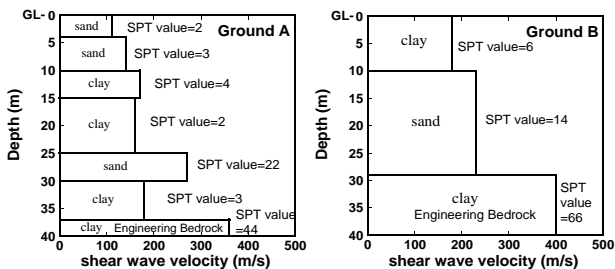


図 4. 地盤モデル（左：Ground A, 右：Ground B）
地盤としては Ground A, B の 2 つの地盤を考える（図 4）。

ここでは、逸散減衰と履歴減衰の和として相互作用ばねの減衰を考える。上部構造として 2, 6, 10, 16, 20 層モデルを考え、そのときの表層地盤と上部構造の 1 次固有周期の関係と対応する減衰定数を図 5 に示す。ここでは損傷限界を考え、表層地盤の 1 次固有周期は Ground A で 1.0s、Ground B で 0.6s である。杭径は 1.5m とする。

図 6 には、上部構造 2, 10 層の損傷限界時の運動学的相互作用、慣性の相互作用と全応答の最大曲げモーメントとせん断力の深さ方向分布を示す。

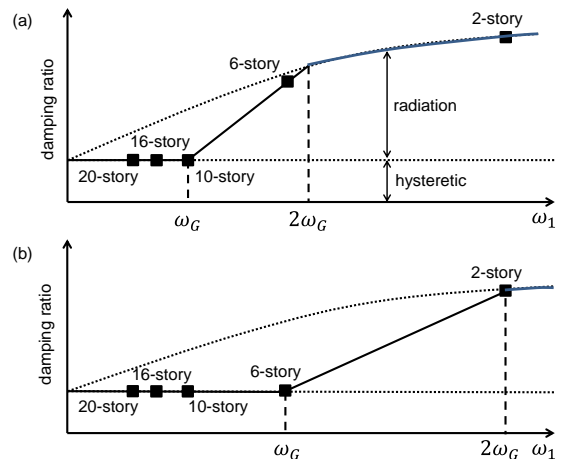


図 5. 表層地盤と上部構造の 1 次固有周期の関係と減衰
(a) Ground model A, (b) Ground model B

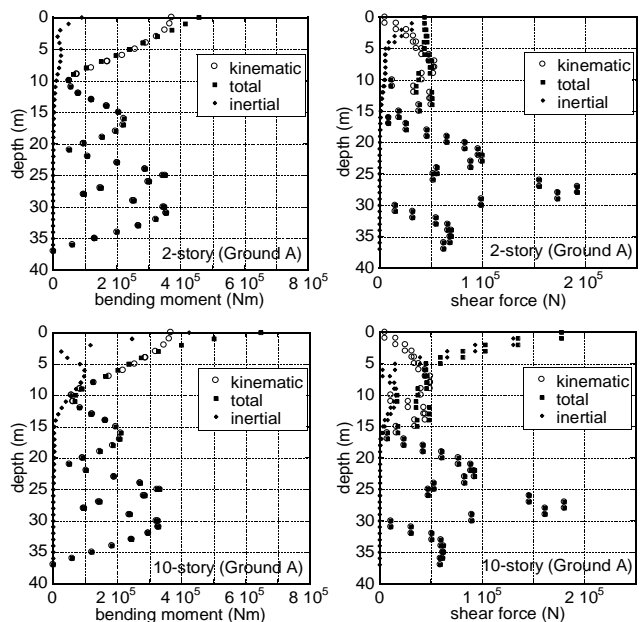


図 6. 損傷限界時の運動学的相互作用、慣性の相互作用と全応答の最大曲げモーメントとせん断力の深さ方向分布

●杭の慣性の相互作用効果と運動学的相互作用効果

図 7, 8 には、杭頭曲げモーメントの損傷限界時の運動学的相互作用効果、慣性の相互作用効果の割合とそれらの組み合わせ方法の妥当性を示す。また、図 9, 10 には、安

全限界時のものを示す。これまでの研究で、ある程度特性は明らかとなっているものの、上部構造と地盤との共振域での特性や工学的基盤で設定される地震動に対する解析的な応答の評価方法については十分とはいえない。

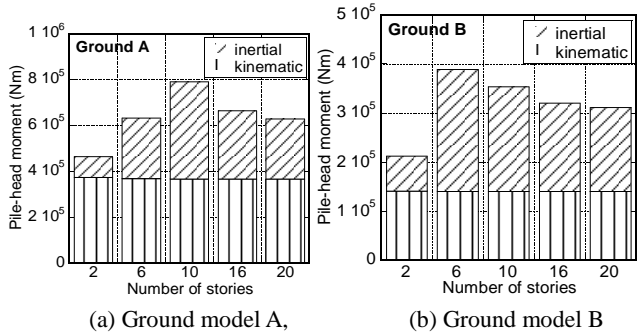


図 7. 損傷限界時の運動学的相互作用と慣性の相互作用による最大杭頭曲げモーメント

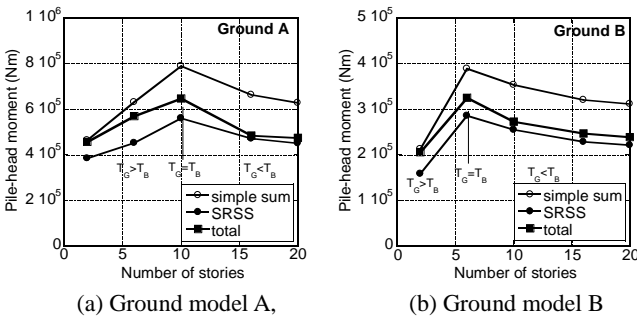


図 8. 損傷限界時最大杭頭曲げモーメントの運動学的相互作用と慣性の相互作用の単純和、SRSS と全応答値の比較

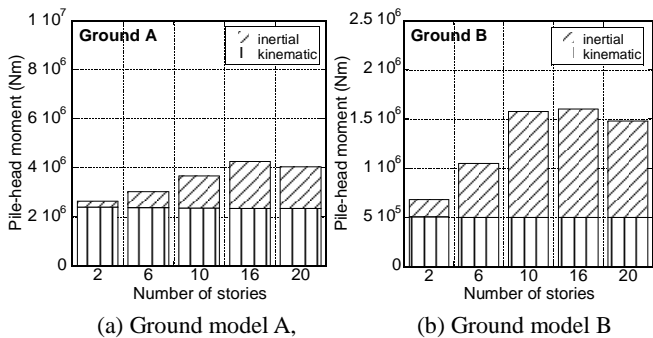


図 9. 安全限界時の運動学的相互作用と慣性の相互作用による最大杭頭曲げモーメント

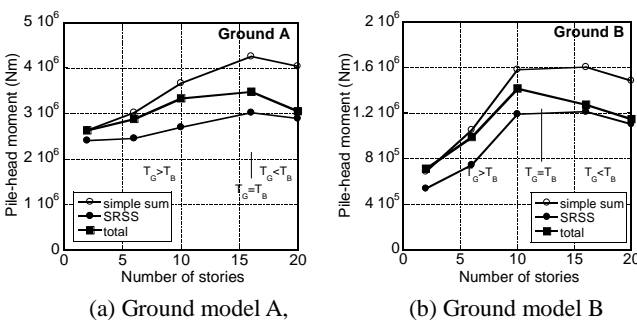


図 10. 安全限界時の最大杭頭曲げモーメントの運動学的相互作用と慣性の相互作用の単純和、SRSS と全応答値の比較 (T_g : 1.6s for Ground A, 1.2s for Ground B)

次に液状化を考慮した場合の評価法について述べる。上記の応答スペクトル法において、液状化地盤の剛性を p -multiplier 法を用いて低減させる。提案応答スペクトル法と液状化層の剛性低下を評価するための p -multiplier 法を組み合わせた単純かつ有効な方法を提案する。図 11 に示す Model 1, 2 を考える。Ground A について液状化を考慮した場合のせん断波速度の分布を図 12 に示す。

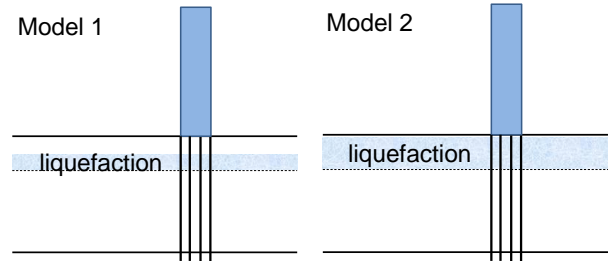


図 11. 2つの液状化モデル

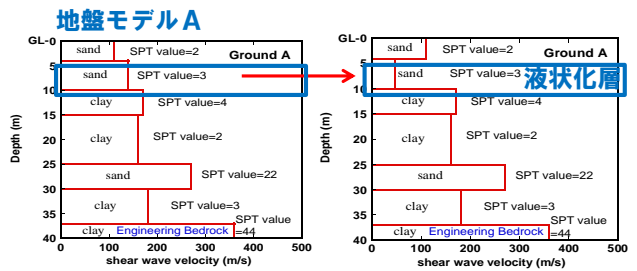


図 12. 液状化を考慮した場合の Ground A のせん断波速度の分布

2層建物と10層建物について解析した結果（慣性の相互作用効果、運動学的相互作用効果、および全体としての杭曲げモーメント分布）を液状化モデル1と2について、それぞれ図13と図14に示す。非液状化モデルとの比較から、液状化した場合には、慣性の相互作用効果よりも運動学的相互作用効果が顕著となる。また、液状化モデル1よりも液状化モデル2の方が慣性の相互作用による効果が大きいことがわかる。

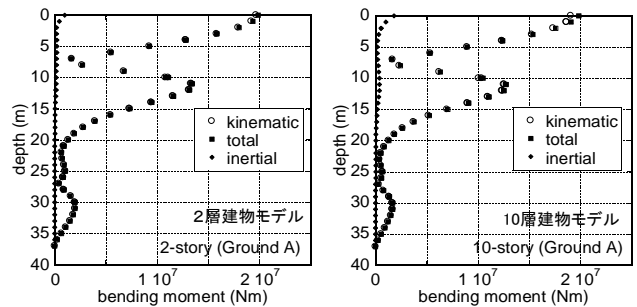


図 13. 杭曲げモーメント(Liquefaction model 1)

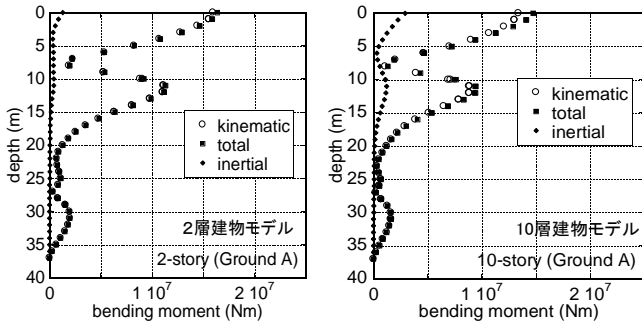


図 14. 杭曲げモーメント(Liquefaction model 2)

図 15 には、2 層建物について、液状化モデル 1 と 2 および非液状化モデルに対する杭の最大曲げモーメント分布を示す。液状化モデル 1, 2 ともに非液状化モデルよりも数倍程度大きくなっている。また、液状化モデル 1 の方が液状化モデル 2 よりも若干曲げモーメントの値が大きくなっている。

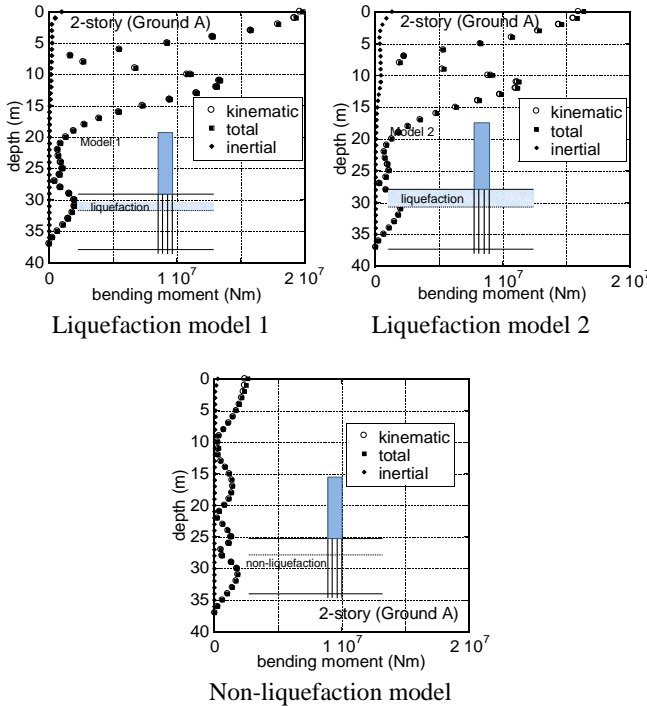


図 15. 杭の最大曲げモーメント

図 16 には、2 層建物について、液状化モデル 1 と 2 および非液状化モデルに対する杭の最大せん断力分布を示す。せん断力においては、液状化層の下端付近において最大値をとっていることがわかる。これは液状化が発生した場合には運動学的相互作用が支配的となって杭頭のせん断力はほぼ 0 となり、杭頭付近で最大値が発生しないことに起因している。

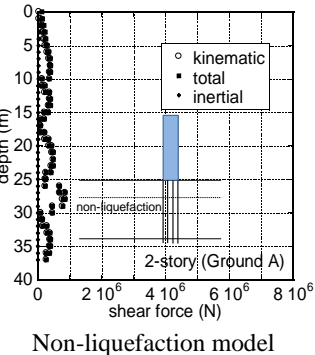
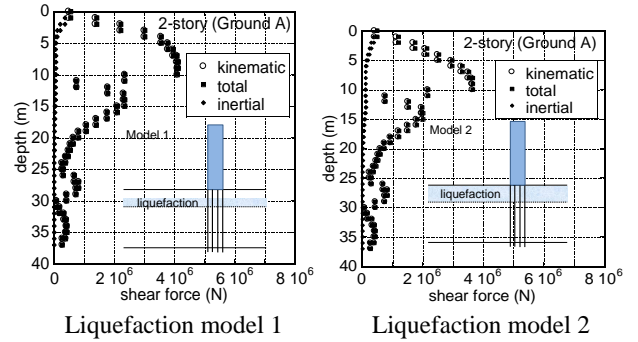


図 16. 杭の最大せん断力

●地盤ばねの弾塑性特性を考慮した多点入力によるモデルとの比較^{10, 12)}

地盤の等価線形化に基づく応答スペクトル法の液状化層を含むモデルへの適用性を検討するために、地盤ばねの弾塑性特性を考慮した多点入力によるモデル (図 17) との比較を行う。多点入力モデルの自由地盤において、液状化層の剛性は初期剛性を約 1/10 に減じて用いている (p-multiplier method および日本建築学会基礎構造設計指針等参照)。また、相互作用ばねの剛性も液状化層では初期剛性を約 1/10 に減じている。

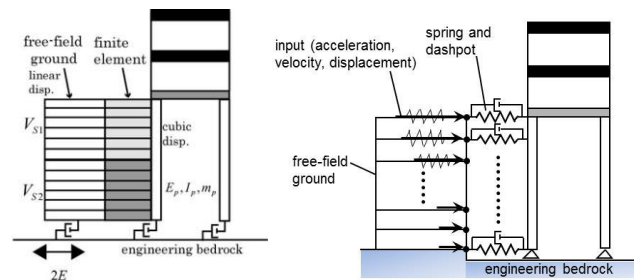


図 17. (a)単一点入力モデル (b) 多点入力モデル

ここでは液状化モデル 1 を扱う。図 18 に杭の最大曲げモーメント分布を、図 19 に杭の最大せん断力分布を示す。液状化による影響を純粹に検討するため、杭は弾性としている。中間部において少し差が見られるものの、杭頭などの最大値は精度よく予測できていると判断される。

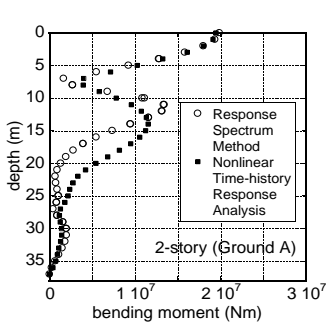


図 18. 多点入力モデルとの比較（曲げモーメント）

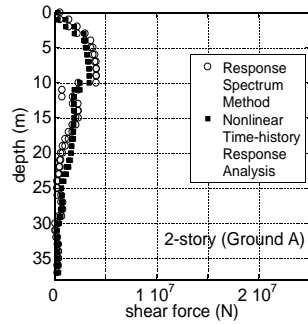


図 19. 多点入力モデルとの比較（せん断力）

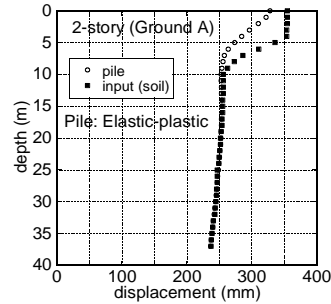
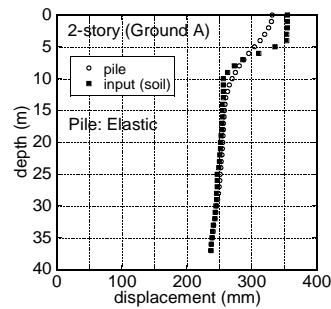


図21. 杭と地盤の最大変位（液状化時）

●地盤ばねの弾塑性特性を考慮した多点入力モデルを用いた液状化時応答特性¹⁰⁾

多点入力モデルにより、液状化が発生した時（液状化モデル 1）の地盤および杭の応答を検討する。

図 20 には、非液状化時の杭と自由地盤の最大変位を示す。杭は弾性と弾塑性を仮定している。一方、図 21 には、液状化時の杭と地盤の最大変位を示す。杭は弾性と弾塑性を仮定している。杭の塑性化を考慮した場合には、液状化層（GL-5～-10m）の下端より少し上の位置まで杭は自由地盤とほぼ同じ変位を生じ、その位置で急激に折れ曲がりが生じていることがわかる。

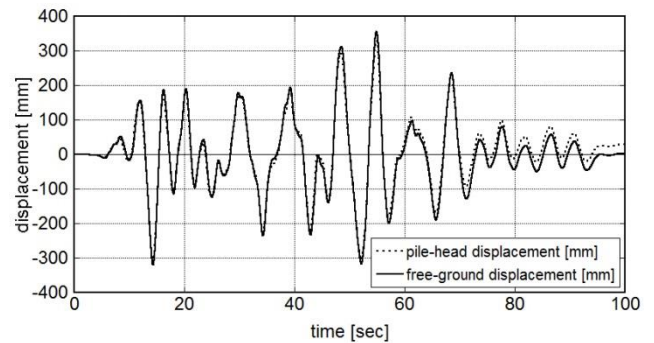


図 22. 杭頭と自由地表面の変位（液状化時，杭弾塑性）

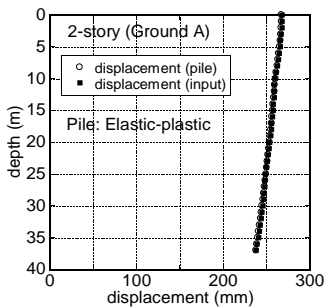
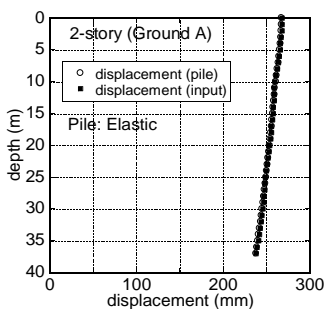


図20. 杭と地盤の最大変位（非液状化時）

図 22 には、液状化時の杭を弾塑性と仮定したときの杭頭と自由地表面の変位を示す。杭の塑性化に伴い杭頭変位には残留変位が生じている。

3.2 地震動により地盤が液状化した直後に津波荷重を受けた場合の解析¹⁰⁾

2 層建物と 10 層建物について、液状化の後に、津波荷重（2 層建物では設計用浸水深=2.7m、10 層建物では設計用浸水深=5.3m）が作用した解析を実施する。前述の通り、ここでは、汎用解析プログラムでもこのような解析が実行できることを示すために SNAP（構造システム）を用いる。

津波荷重は津波波圧に基づき算定するものとし、構造設計用の進行方向の津波波圧は下式により算定する。

$$q_x = \rho g 3 h$$

q_x ：構造設計の進行方向の津波波圧 (kN/m²)

ρ ：水の単位体積質量 (ton/m³)

g ：重力加速度 (m/s²)

h : 設計用浸水深 (m)

z : 当該部分の地盤面からの高さ (m)

図 23, 24 には 2 層および 10 層の建物モデルを、図 25 にはモデル化された津波荷重の時刻歴を示す。また、図 26 には地震動を受けて地盤が液状化した直後に津波荷重を受けた場合のシナリオを示す。

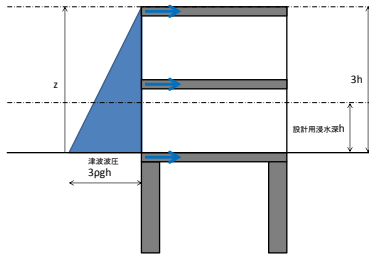


図 23. 2 層建物モデルと津波荷重

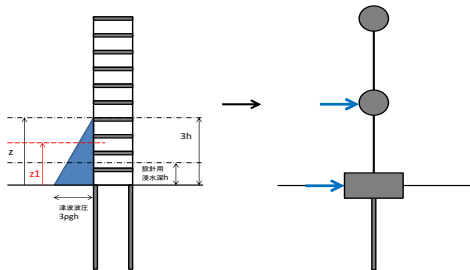


図 24. 10 層建物モデルと津波荷重

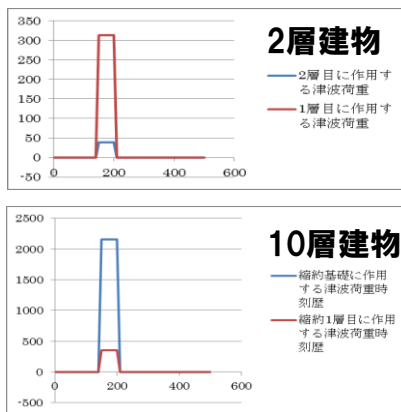


図 25. 津波荷重のモデル化

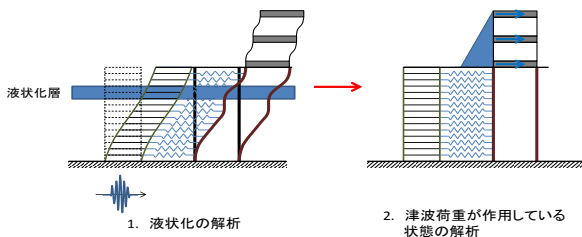


図 26. 地震動を受けて地盤が液状化した直後に津波荷重を受ける場合のシナリオ

図 27 は杭頭曲げモーメントの時刻歴を、図 28 には杭頭相対回転角の時刻歴を示す。2 層建物では液状化による影響が大きく、津波荷重はそれを上回ることはなかった。

図 29 は液状化のみが発生した場合と液状化に続いて津波荷重が作用した場合の杭の最大曲げモーメントの比較を示す。津波荷重が作用すると杭の曲げモーメントが大きくなるのがわかる。

地盤特性には大きなばらつきが存在するため、それを適切に考慮した評価法を展開することは重要である⁵⁾。図 30 には、地盤液状化を考慮しない場合のばらつき解析の一例を示す⁶⁾。地盤剛性と減衰のばらつきに伴い、杭の曲げモーメントには少なからぬ影響があることが理解される。今後、液状化を考慮した場合などにも拡張することが考えられる。

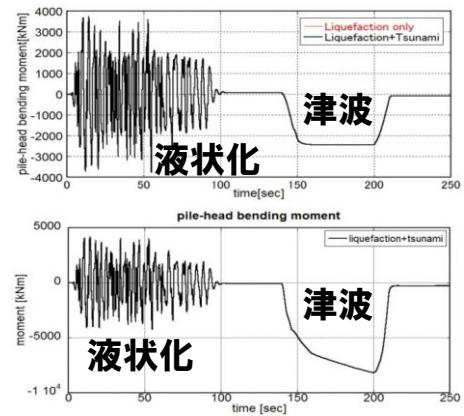


図 27. 杭頭曲げモーメント

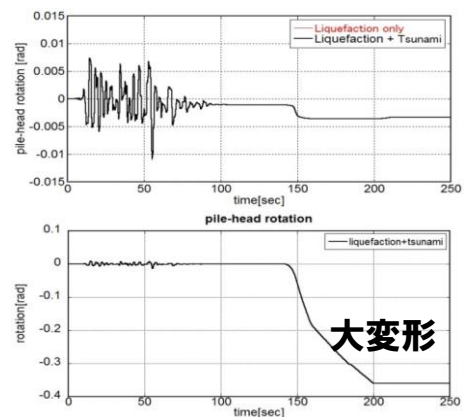


図 28. 杭頭相対回転角

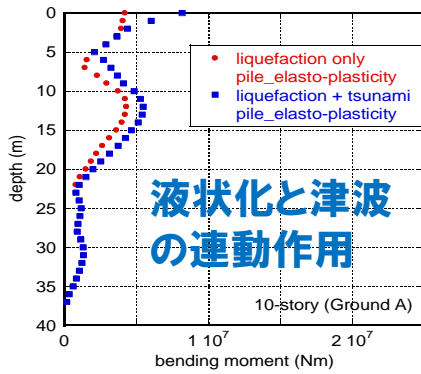


図 29. 杭曲げモーメント分布

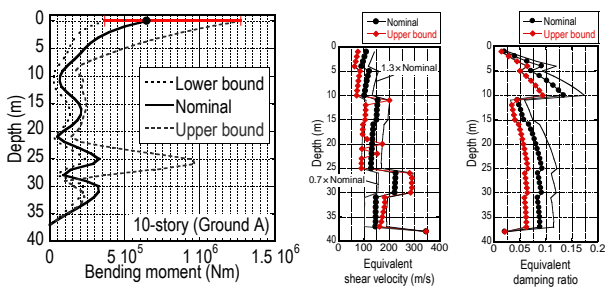


図 30. ばらつき解析

3.3 深い地盤構造の不確実性への対応^{7,8)}

2011年の東北地方太平洋沖地震では、震源から800km以上も離れた大阪湾岸などにおいて、長周期地震動による地盤と超高層建物との共振現象など、これまで十分には認識されていなかった現象が多く観測された。そこで明らかとなった教訓は、長周期地震動を受ける超高層建物の振動増幅は、深い地盤構造を考慮しなければ説明不可能であるという点である。そこで、浅い地盤構造・深い地盤構造の特性の不確実性を考慮した解析の必要性が指摘されている。

図 31 に、地震動の生成メカニズムを考慮した入力エネルギー解析の概要を示す。また、図 32 には、大阪南港に存在する超高層建物を簡易モデルにモデル化し、Boore(1983)による地震基盤面地震動モデルを採用した場合の建物への地震入力エネルギーの解析結果を示す。赤線は種々のばらつき組み合わせに対する実現値を表し、青線は提案された方法に基づく上限値を表す。この敷地での深い地盤構造を考慮したときに現れる6-8秒程度の長周期における地震入力エネルギーの増幅が、2011年の東北地方太平洋沖地震における被害（非構造物）と対応する結果となっていることがわかる。この敷地では、南海トラフ地震において、液状化と津波の連動作用が生じることが予想されるため、さらに詳細な検討がなされる必要がある。

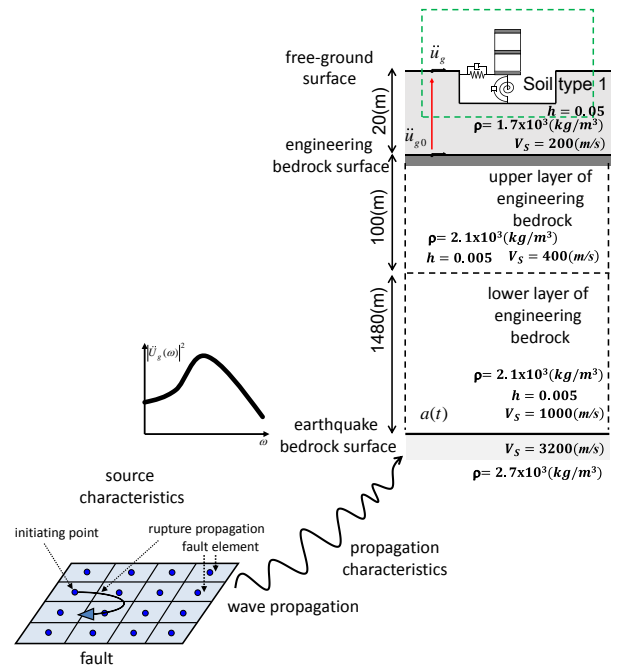


図 31. 地震動の生成メカニズムを考慮した入力エネルギー解析

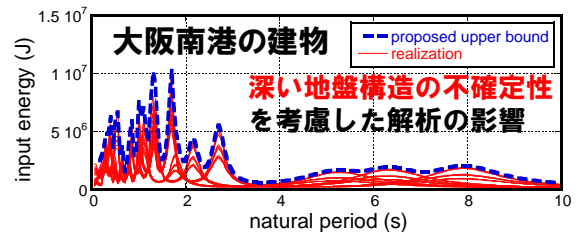


図 32. 地震入力エネルギーの上限値

3.4 パルス性地震に対する弾塑性応答簡易評価法の津波に対する応答評価への適用^{1,2,4)}

津波解析では、浸水深を考慮した静的な荷重として津波荷重を扱うことが一般的であるが、最近では、静的な成分と動的な成分の両方を考慮することも行われつつある。ここでは、衝撃的な（パルス状）地震動に対する構造物の弾塑性応答評価法の展開と、その津波に対する応答評価法への拡張について言及する。

衝撃的な（パルス状）地震動の代表例は、断層近傍における地震動である。1994年のノースリッジ地震、1995年の兵庫県南部地震、1999年の台湾集々地震などにおいてこのような地震動が発生している。そのような地震動の簡易的なモデルとして、図 33 のような1サイクル正弦波や変形型の1.5サイクル正弦波などが提案されている。小島と竹脇^{1,2)}は、これらを図 33 のようなダブルインパルス列とトリプルインパルス列でモデル化する新しい方法を提案している。ダブルインパルスが作用したときの1自由度系の変形の概要を図 34 に示す。

インパルス間隔を変動させた場合の極限的なダブルインパルス（応答を最大化するもの）が作用したときの1自由度系の変形状態と、それに対応するインパルスの関係を図35に示す。入力がインパルスになると、インパルス間では自由振動としての取り扱いが可能となり、エネルギー平衡の考え方をを用いて閉形表現で最大応答を求めることが可能となる。提案手法は、1960年頃から展開されてきたCaugheyやIwanらによる等価線形化の考え方とは全く発想の異なるものであり、構造物の等価線形化などは行わずに弾塑性モデルそのものを扱い、入力地震動をフーリエ振幅スペクトルの最大値の調整などによりモデル化している。すなわち、これまでの弾塑性応答評価の概念を根底から覆す斬新な方法であるといえる。

図36のように実験等に基づき、構造物の1自由度完全弾塑性モデルへの置換を行う。ここでは、一例として、1次固有周期=1.0秒、降伏変位=10cm、質量=100ton、剛性=4×10⁶(N/m)のモデルを考える。このときV_y=0.63(m/s)となる。パルス速度をV=200kineとすると、V/V_y=3.2となり、図37から塑性率は6程度と評価される。建築基準法の安全限界にほぼ対応するV=50kineの場合には塑性率は2程度となる。

図38には、ダブルインパルス列とトリプルインパルス列に対する極限応答を、対応する弾性モデルとともに示す。トリプルインパルス列に対する極限応答は、多くの入力レベルにおいてダブルインパルス列に対する極限応答を上回っていることがわかる。

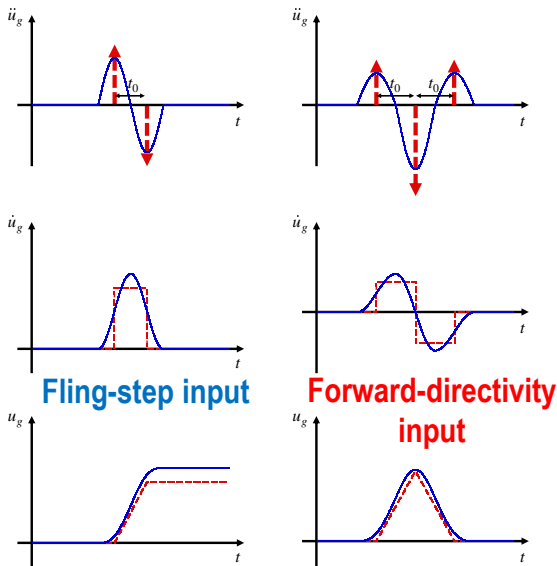


図33. 断層近傍地震動の簡易モデル化（断層平行方向のFling-step入力と断層直交方向のForward-directivity入力）

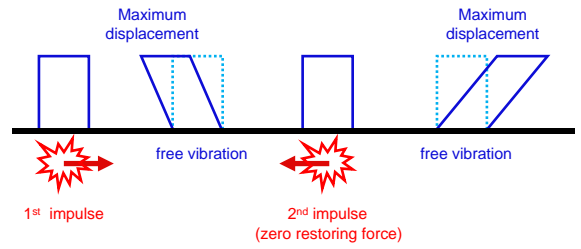


図34. 住宅のパルス性地震に対する弾塑性応答を手計算で評価可能

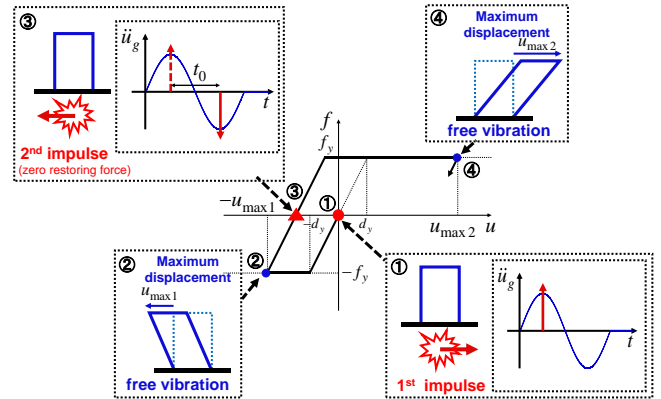


図35. エネルギー平衡：津波荷重のインパルスによる近似評価の可能性

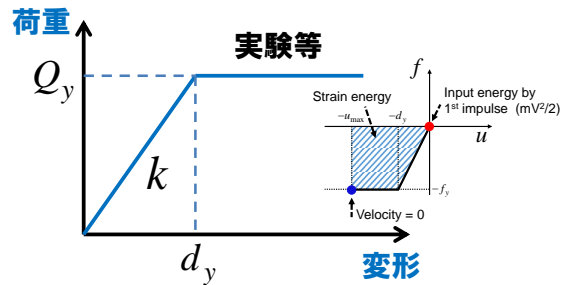


図36. 構造物の1自由度完全弾塑性モデルへの置換

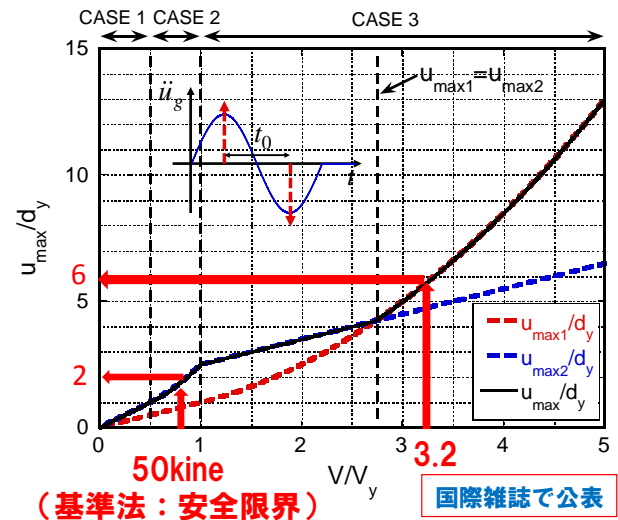


図 37. 津波荷重のインパルスによる近似評価の可能性
(住宅・ビル建物の津波に対する安全性の簡易評価を実現)

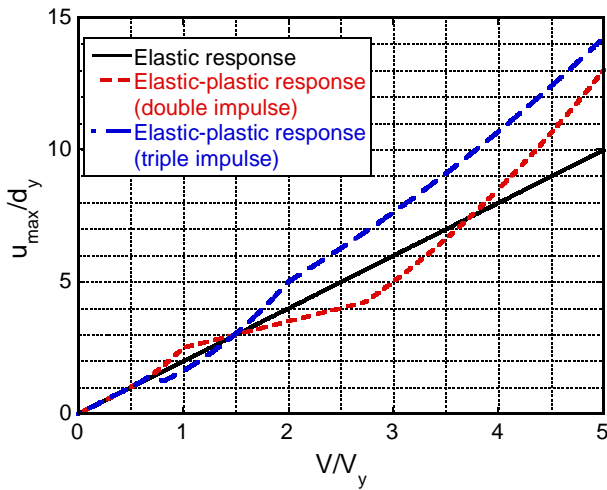


図 38. ダブルインパルス (Fling-step 入力) とトリプルインパルス (Forward-directivity 入力) を受ける 1 自由度完全弾塑性モデルの最大応答と弾性モデルの最大応答との比較

図 39 には、代表的な断層近傍地震動である Rinaldi Fault-Normal 成分 (1994 年 Northridge 地震) と神戸大学波 NS 成分 (1995 年兵庫県南部地震) の加速度波形とその一部を 1 サイクル正弦波で近似した図を示す。また、図 40 には、それらの記録地震波に対する正負両振幅極限応答とダブルインパルスに対する極限応答の比較を示す。ここでは、記録地震波は固定し、構造物の 1 次固有振動数あるいは降伏変位を変動させることにより横軸のパラメータを変動させている。以前に提案された Newmark らによる弾塑性応答スペクトルと同様の考え方に基くと考えることも可能である。これらの図より、良好な精度で対応することがわかる。

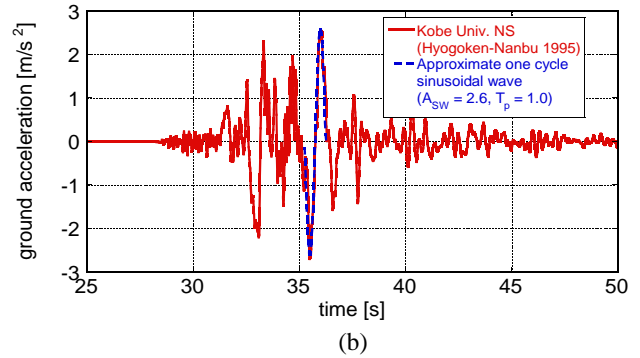
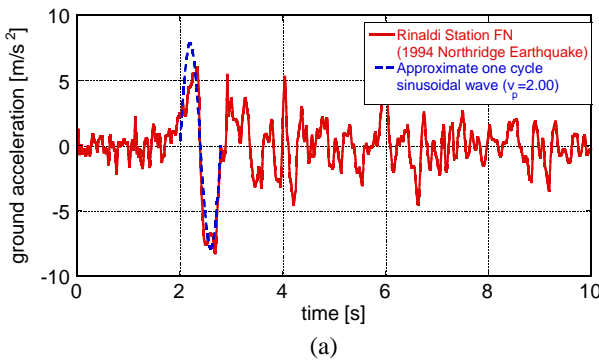


図 39. 代表的な断層近傍地震動である Rinaldi Fault-Normal 成分 (1994 年 Northridge 地震) と神戸大学波 NS 成分 (1995 年兵庫県南部地震) の加速度波形とその一部を 1 サイクル正弦波で近似した図

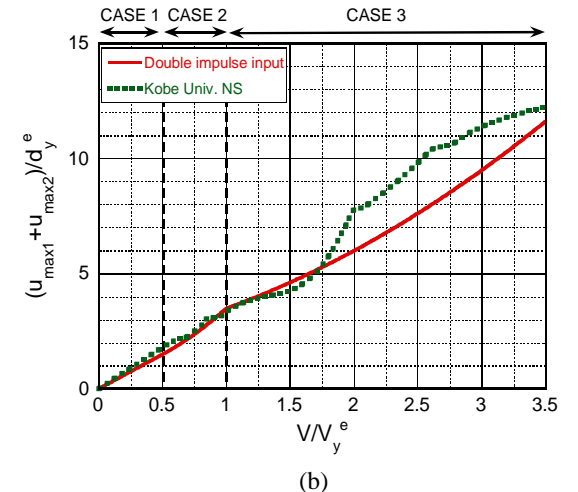
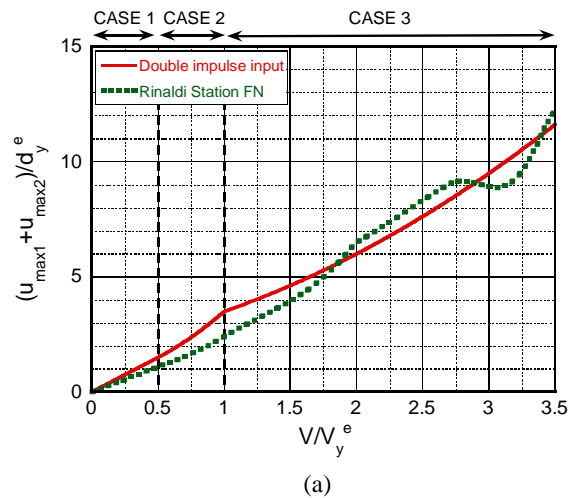


図 40. Rinaldi Fault-Normal 成分 (1994 年 Northridge 地震) と神戸大学波 NS 成分 (1995 年兵庫県南部地震) に対する正負両振幅極限応答とダブルインパルスに対する極限応答の比較

4. 実効性のある提言

以下の提言を行う。

- (1) 2層建物と10層建物について、液状化の後に津波荷重(2層建物では設計用浸水深=2.7m、10層建物では設計用浸水深=5.3m)が作用した解析を実施した。2層建物では液状化による影響が大きく、津波荷重はそれを上回ることにはなかったが、10層建物では浸水深が増加したこともあり、液状化による応答を大きく上回る結果が得られた。建物層数が増えると避難にとっては好都合であるが、浸水深が増加した場合に大きな力が杭に作用することになるため、それに対する安全性に十分注意する必要がある。すなわち、想定外の浸水深の増加による杭径の検討を行う必要がある。
- (2) 軟弱地盤に建設される超高層建物においては、南海トラフ地震などが発生した場合に、地盤液状化による杭の作用曲げモーメントの増大を考慮する必要があるが、同時に深い地盤構造の不確定性に起因する上部建物との共振の可能性などについて十分注意する必要がある。
- (3) パルス性地震に対する弾塑性応答簡易評価法の津波に対する応答評価への適用性については、さらなる検討が必要である。この適用可能性が示されると、簡易的な方法で津波の建物への荷重効果などを簡易的に評価することが可能となり、複雑な計算を行わずにリスク評価を行うことが可能となる。

参考文献

- 1) K.Kojima and I.Takewaki, Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 1: Fling-step input), *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 1, Article 12, 2015.
- 2) K.Kojima and I.Takewaki, Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 2: Forward-directivity input), *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 1, Article 13, 2015.
- 3) K.Kojima and I.Takewaki, Critical input and response of elastic-plastic structures under long-duration earthquake ground motions, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 1, Article 15, 2015.
- 4) 小島紘太郎, 竹脇 出, 地盤との動的相互作用を考慮した弾塑性構造物の断層近傍地震動に対する極限応答の閉形表現, 2015年度日本地震工学会大会, 2015. 11.
- 5) 岡田達矢, 小島紘太郎, 藤田皓平, 竹脇 出, 地盤の不確定性を考慮した建物の地震時杭応力のロバスト性評価法, 鋼構造年次論文報告集, 第23巻, pp305-310, 2015. 11.
- 6) K.Fujita, K.Kojima and I.Takewaki, "Prediction of worst combination of variable soil properties in seismic pile response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.77, pp369-372, 2015.
- 7) M.Taniguchi and I.Takewaki, "Bound of earthquake input energy to building structure considering shallow and deep ground uncertainties", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.77, pp267-273, 2015.
- 8) K.Kojima, K.Sakaguchi and I.Takewaki, "Mechanism and bounding of earthquake energy input to building structure on surface ground subjected to engineering bedrock motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.70, pp93-103, 2015.
- 9) S.Kamagata & I.Takewaki, "Analysis of liquefaction behavior during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake", *Proc. of the 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 14th IACMAG, September 22-25, 2014, Kyoto, pp821-826.
- 10) K.Kojima, K.Fujita & I.Takewaki, "Simple and practical analysis of effect of soil liquefaction on response of structure-pile system", *Proc. of the 14th Int. Conf. of the Int. Assoc. for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 14th IACMAG, September 22-25, 2014, Kyoto, pp815-820.
- 11) K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, "Simplified analysis of the effect of soil liquefaction on the earthquake pile response", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol.8, Issue 3, pp289-301, 2014.
- 12) K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, "Unified analysis of kinematic and inertial earthquake pile responses via single-input response spectrum method". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.63, pp36-55, 2014

研究テーマ 2

課題 2-3

巨大地震・巨大津波による過大荷重を受けた社会資本施設の維持管理対策

金沢工業大学 宮里心一 教授

課題 2-3 巨大地震・巨大津波による過大荷重を受けた社会資本施設の維持管理対策

金沢工業大学

教授

宮里心一

鉄筋コンクリート構造物 ひび割れ 局部腐食
脆性破壊 デジタル画像相関法 けい酸塩系含浸工法

1. 研究目的

巨大地震及び巨大津波により想定荷重を大きく超えた外力が作用した道路橋等の社会資本設備の残存性能を、合理的に評価・診断・対策する方法を開発する。特に、巨大地震・巨大津波によりひび割れたコンクリート構造物に対する実効性ある策を開発する。

- (1) 想定を超えた荷重を受けた部材の残存性能の評価法の提案
- (2) 想定を超えた荷重を受けた部材の耐久性判断法の提案
- (3) 耐久性が不足する部材の補修方法の提案

2. 解決法

ここでは、前述 1.の(1)想定を超えた荷重を受けた部材の残存性能の評価法の提案、(2)想定を超えた荷重を受けた部材の耐久性判断法の提案、および(3)耐久性が不足する部材の補修方法の提案、に区分して記述する。

(1) 想定を超えた荷重を受けた部材の残存性能の評価法

近年、社会資本施設の調査において、非破壊試験が実用・開発されている¹⁾。そのひとつとして、画像解析による計測方法があり、電子スペックル干渉法²⁾、デジタル画像相関法^{3), 4)}、格子法⁵⁾が用いられている。ここで、電子スペックル干渉法では、計測装置としてレーザー等の特殊な光源を必要とする。したがって、大気ゆらぎや振動に弱い。また、格子法では、予め対象物の表面に格子状の標点を配置する必要がある。そのため、既設構造物へは不適である。そこで本研究では、実構造物に対しても適用が可能と考えられ、特別な装置を必要としない、デジタル画像相関法に着目した。

ところで、デジタル画像相関法を含む画像解析を用いた既往の研究では、破壊性状の可視化や評価⁶⁾、あるいはひび割れの分類⁷⁾に関しては検討されている。しかしながら、巨大地震や巨大津波による過大荷重を受けた鉄筋コンクリートを対象に検討した事例はない。

本研究では、鉄筋コンクリート梁に発生するひび割れを目視で確認できる以前に検出する方法を開発し、ひび割れの発生しているあるいは発生する可能性の高い、残留ひずみが生じている箇所を特定する解決法を提案する。

具体的な検出方法を説明する。ここでは、検出に際し

て、鉄筋コンクリート梁に作用外力が生じたとき、表面のひずみが増加することに着目した。すなわち、載荷前（変形前）のコンクリートに対する撮影画像を基準画像として、載荷により変形した後のコンクリート表面に対する撮影画像を比較画像とする。これらを照合することにより、コンクリート表面に生じた変位およびひずみを算出する。デジタル画像相関法の解析手順を図 1 に示す。はじめに、撮影された画像を加工する。次に、変形前の基準画像と、変形後の比較画像を照合して、変位量を算出する。さらに、変位量からひずみを算出する。最後に、閾値を超えるひずみが生じている位置を特定して、ひび割れの発生位置を予測する。

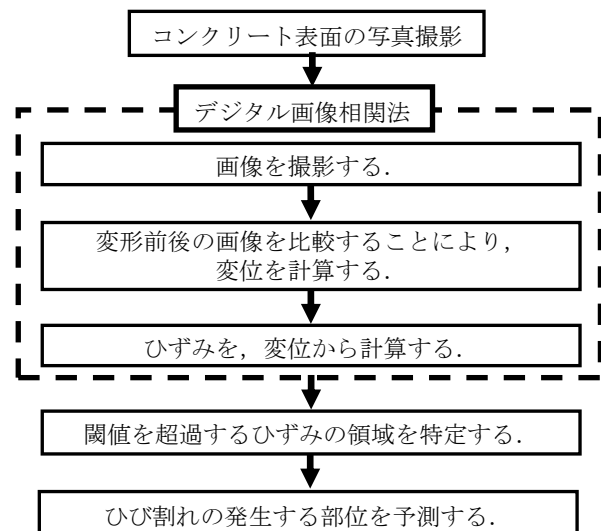


図 1. 解析手順

具体的には第 1 ステップとして、撮影画像を加工する。すなわち、測定点周辺のひずみ値を平均し、その値を測定点のひずみ値として置き換える平均化処理⁸⁾により、撮影画像の中心と端部での歪みを補正した。また計測対象物の三次元形状の剛体変形に伴う Z 軸方向のひずみの処理を、既往の研究⁹⁾により補正した。

次に第 2 ステップとして、画像を照合した。すなわち、表 1 にて、解析に関連する用語を説明する。本研究における画像の照合方法としては、残差二乗と相関を用いた。図 2 に、変形前の基準画像と変形後の比較画像を示す。これらは、上記の加工後における撮影画像の一部を画素（1 pixel の大きさ）が確認できるレベルまで拡大したものである。はじめに、基準画像（図 2 の左図）について説明する。任意の測定点 $N_0(x, y)$ を中心として、一辺が S

pixel となる正方形の微小領域を設定する。ここで、当該正方領域を「サブセット領域」、その一辺の長さ S を「サブセットサイズ」と定義する。さらに、画像の横方向を X 軸、縦方向を Y 軸と定義する。点 $N_0(x, y)$ を中心とするサブセット領域内の輝度値を $A(x, y)$ 、同様に $N_0(x, y)$ から右へ m_x pixel、上へ m_y pixel 移動した比較画像 (Fig. 2 の右図) で、 $N_{dm}(x+m_x, y+m_y)$ を中心とするサブセット領域内の輝度値を $A_{dm}(x+m_x, y+m_y)$ とすると、残差二乗和による相関値 $r(x+m_x, y+m_y)$ は式(1)により算出される。

$$r(x+m_x, y+m_y) = \frac{\sum_{\alpha=-(S-1)/2}^{(S-1)/2} \sum_{\beta=-(S-1)/2}^{(S-1)/2} (A(x+\alpha, y+\beta) - A_{dm}(x+\alpha+m_x, y+\beta+m_y))^2}{\sum_{\alpha=-(S-1)/2}^{(S-1)/2} \sum_{\beta=-(S-1)/2}^{(S-1)/2} 1} \quad (1)$$

表 1. 画像解析に関する用語

用語	説明
残差二乗和 相関	「変形前の画像の輝度値」と「変形後の画像の輝度値」の差の二乗和によって計算され、「両者の画像の差」を意味する。したがって、相関関係が0であるときに、最も高い値となる。
輝度値	各々のピクセルの色が、数値によって表示される。例えば、白は65535として、一方黒は0として表される。
サブピクセル 処理	標準的な画像処理は、1ピクセル単位で行う。一方、サブピクセル処理は、0.1ピクセル単位で行う。
応答曲面法	数値解析分野における最適化手法の1つであり、最小二乗法により計算される。

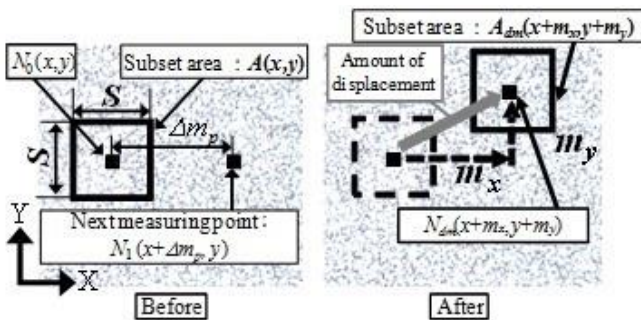


図 2. デジタル画像相関法による変位解析の概要

また、相関値 $r(x+m_x, y+m_y)$ が最小となるとき、相関は最も強いことを表している。画像照合の概要を図 3 に示す。同図中の数値は画像輝度値のサンプルを示すものである。このように、変形前のサブセット領域の輝度値の分布と変形後のサブセット領域の輝度値の分布が最も類似している画素位置を、比較画像から求める。加えて、本研究では応答曲面法によるサブピクセル処理によって計測精度の向上も図っている。

さらに第 3 ステップとして、変位量を算出する。すなわち、上記に示した通り、図 2 の m_x, m_y のように各軸方向に比較画像中のサブセット領域を移動 (スキャン) して、サブセット領域の輝度値 $A(x, y)$ と $A_{dm}(x+m_x, y+m_y)$ との相関値 $r(x+m_x, y+m_y)$ を算出する。この相関値 $r(x+m_x, y+m_y)$ が最小となる点が、測定点 $N_0(x, y)$ の移動位置となり、その座標の差が変位量となる。

1 つの測定点での移動量を算出後は、スキャンステップ間隔 Δm_p で次の測定点へ移動し、同様に変位量を算出する。この処理を、撮影した画像全体で行うことで、基準画像と比較画像における全ての対応点における変位量を算出し、変位分布を求める。

最後に第 4 ステップとして、ひずみを算出する。すなわち上記に示した変位分布から、ひずみを算出する。本研究では図 4 に示すように 1 つのひずみ測定点 $N_0(x, y)$ に対して、それを含む 4 つの測定点 $N_k(k:0\sim 3)$ の変位を用いて算出した。したがって、測定点 N_k で計測される変位を (u_k, v_k) とするとき、 $N_k(k:0\sim 3)$ の中心点における X 軸ひずみ ε_x と Y 軸ひずみ ε_y は、式(2)にて算出される。

$$\varepsilon_x = \frac{(u_1 + u_2) - (u_0 + u_3)}{2\Delta m_p}, \quad \varepsilon_y = \frac{(v_1 + v_2) - (v_0 + v_3)}{2\Delta m_p} \quad (2)$$

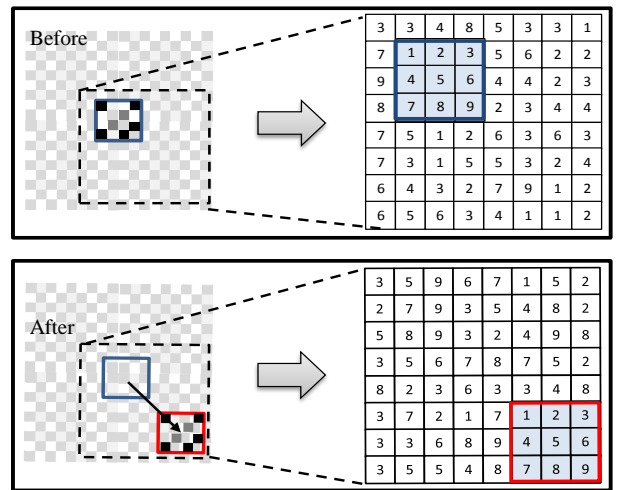


図 3. 画像照合の概要

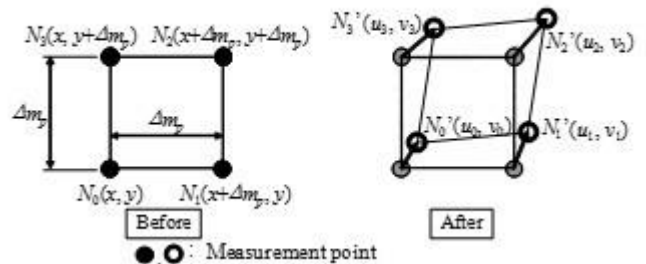


図 4. ひずみ算出の概要

(2) 想定を超えた荷重を受けた部材の耐久性判断法

本研究では、塩害により劣化したモルタル梁供試体を用い、巨大地震による過大荷重を受けてひび割れが生じ、その後に巨大津波により塩分が供給されて鉄筋腐食が進行した場合を想定して、腐食形態(局部腐食, 全面腐食)および腐食量が部材の曲げ性状に及ぼす影響を明らかにした。そのため、はじめに、腐食領域と腐食量に相違を設けた鉄筋を用い、鉄筋単体の引張試験により力学性能を実験的に検討した。その後、腐食形態と腐食量に相違を設けたモルタル梁供試体を用い、曲げ試験により力学性能を実験的に検討した。

(3) 耐久性が不足する部材の補修方法

コンクリート構造物に対する予防保全工法の一つとして、腐食要因物質の侵入を抑制する効果があり、かつ無色透明で対策後の目視観察が可能な表面含浸材に注目が集まっている。この表面含浸材の一つであるけい酸塩系表面含浸材は、C-S-H ゲルの形成によりコンクリート表層部を緻密化、あるいは微細ひび割れを閉塞させ、発錆要因物質の侵入を抑制する。

本研究では、けい酸塩系表面含浸材の塗布が、微細ひび割れ部の補修効果に及ぼす影響を実験的に評価した。特に、ひび割れ内部に多くの成分を含浸させるための塗布方法として、高い吸水性の布に予め表面含浸材を含ませ、それをひび割れ開口面に当て、けい酸塩を供試体内部へ含浸させた。その後、ビッカース硬さ、透水係数、および塩化物イオン浸透深さを測定すると共に、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。その結果を、無塗布の結果と比較した。

3. 方法の検証

ここでも、前述 1.の(1)~(3)に区分して記述する。

(1) 想定を超えた荷重を受けた部材の残存性能の評価法

1) 実験手順

① 供試体

供試体概要を図 5 に示す。供試体の寸法は 80 × 140 × 1460 mm とした。また、主鉄筋をかぶり 20 mm に埋設した。ここで、主鉄筋の定着部およびせん断補強筋の腐食を防ぐため、主鉄筋の支間長 1260 mm 以外とせん断補強筋の全周にブチルゴムテープを被覆した。さらに、コンクリートの計画配合を表 2 に示す。

② 劣化促進手法

鉄筋の腐食を短期間で再現でき、腐食量の制御が可能な電食により、供試体の劣化を促進することで、巨大津波により塩害が生じた部材を模擬した。電食の概要を図 6 に示す。濃度 3.0% の NaCl 水溶液を供試体の半分の高さまで満たし、鉄筋を陽極側に、銅板を陰極側に接続し、直流安定化電源から 0.6 A の電流を印加した¹⁰⁾。また、異

なる腐食減量とすべく、表 3 に示す 3 水準の通電時間を設けた。なお、この表 3 に示す主鉄筋の平均腐食減量は、実験後の供試体から主鉄筋を取り出し測定した。

③ 測定機器

測定機器の設置状況を図 7 に示す。また、測定機器の詳細を表 4 に示す。したがって、1 pixel の大きさは 0.149 mm である。なお、画像照合においては、既往の研究⁹⁾に基づき、サブセットサイズ S は 151 pixel, スキャンステップ間隔 Δm_p は 10 pixel とした。

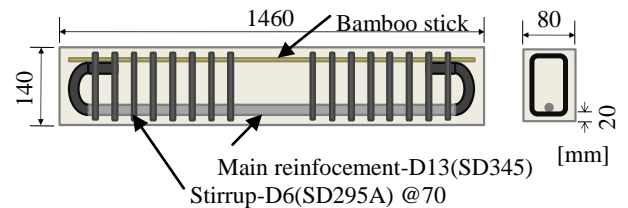


図 5. 供試体概要

表 2. コンクリートの計画配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]			
		W	C	S	G
57.5	43.3	167	290	773	1040

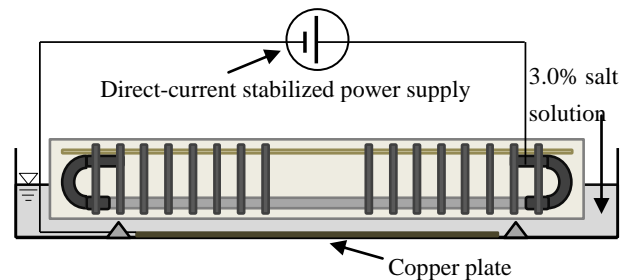


図 6. 電食の概要

表 3. 実験ケース

No	1	2	3
通電時間 (時)	384	576	768
鋼材の平均腐食減量 (g/cm ²)	0.01	0.03	0.04

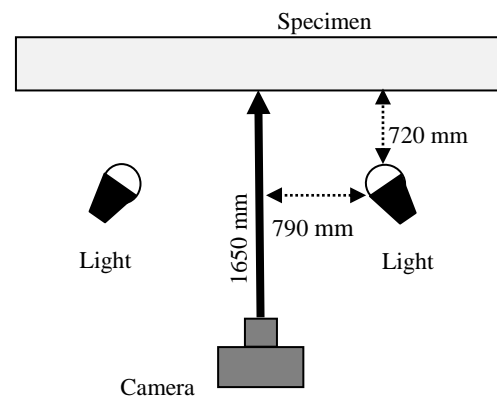


図 7. 測定機器の設置状況

表 4. 測定機器の仕様

デジタルカメラ	
Pixel	1020M
Image pickup device	23.6 mm × 15.8 mm size
Number of recording pixels	3200 × 1200 pixel
Shutter speed	1/5 s
カメラレンズ	
Angle view	39.40°
Lens configuration	Group-Sheet : 7-8
ライト (照明)	
Voltage	100 V
Power	500 W
Irradiation angle	80°

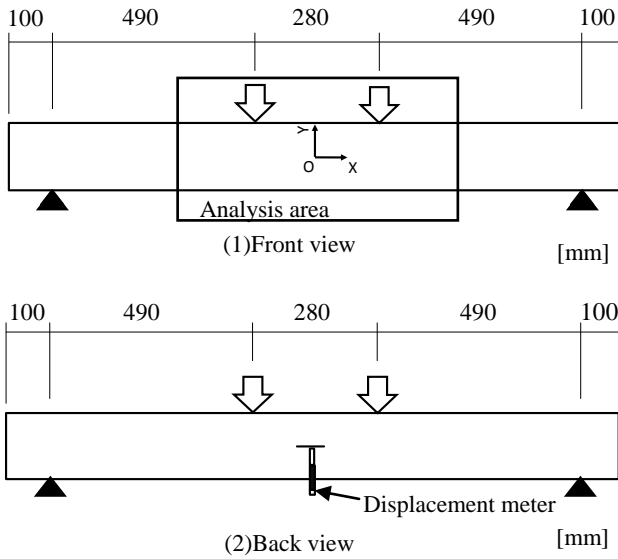


図8. 載荷・測定方法

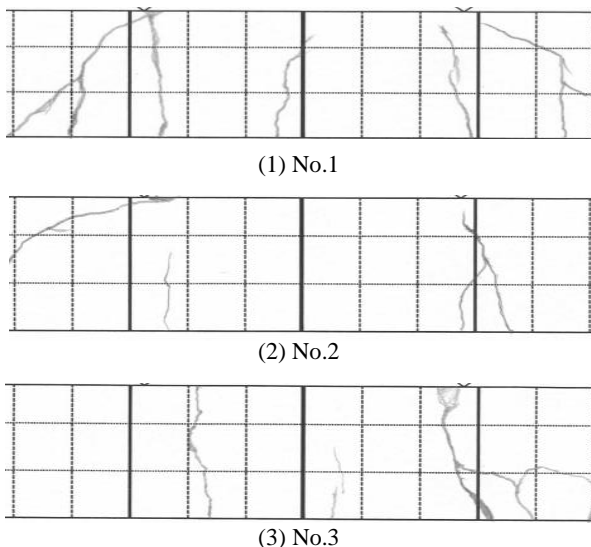


図 9. 終局状態でのひび割れ発生状況

表5. 目視でひび割れ発生を確認できた荷重

ケース	荷重 [kN]
No.1	14.8
No.2	14.5
No.3	13.8

④ 載荷・測定方法

載荷・測定方法を図 8 に示す. 支間長が 1260 mm で, 等曲げ区間が 280 mm の 4 点曲げ載荷とし, 中央変位を測定した. また, 載荷前および載荷中の 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 kN の荷重において, デジタルカメラを用いて供試体の表面中央部を撮影した. ここで, デジタル画像相関法における分布図の原点は, 図 8 (1)に示す位置とした.

2) 結果

① ひび割れの発生状況

終局時のひび割れ状況を図 9 に示す. また, 目視でひび割れの発生を確認できた載荷荷重を表 5 に示す. この表 5 を踏まえて, 5.0 kN の荷重時の状態を以降における検討対象とした.

② 変位分布

全ての実験ケースにおける, デジタル画像相関法によって得られた 5.0 kN の荷重時での鉛直方向の変位分布を図 10 に, 水平方向の変位分布を図 11 に示す. また, 変位計による実測およびデジタル画像相関法の解析によって得られた荷重-中央変位曲線を図 12 に示す. これによれば, 全ての実験ケースにおいて, 変位計で得られた値 (実線) とデジタル画像相関法で得られた値 (プロット) は, 同等であることが認められた.

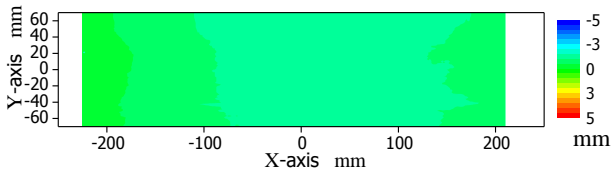
③ ひずみ分布

すべての実験ケースにおける, 5.0 kN での水平方向のひずみ分布を図 13 に示す.

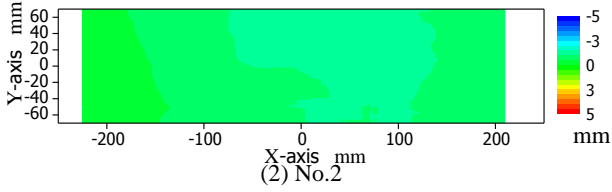
3) ひび割れの予測方法の提案と検証

① ひび割れの発生位置を予測する方法

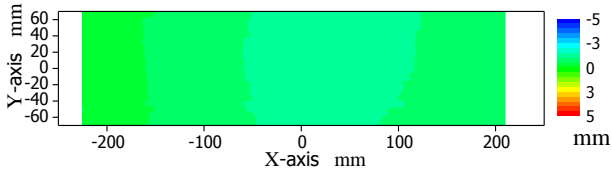
鉄筋コンクリートの載荷荷重の増大に伴い, 梁下面の引張ひずみは増加する. さらに破壊力学に基づけば¹¹⁾, コンクリートの引張ひずみ限界を超えると, 曲げひび割れが発生する. この限界値についての文献を調査した結果, コンクリートが標準の場合におけるひび割れが発生するひずみは 650~800 μ とされている¹²⁾. ここで, もし数百 μ のひずみが生じている位置を未だひび割れが生じる以前に特定できれば, さらに荷重が加わると, そこにひび割れが発生すると予測できる. したがって本章では, 100~600 μ の閾値を設定し, ひび割れ発生の兆候を検出できるかを評価する. ひび割れの発生位置を予測する方法の具体例を図 14 に示す. すなわち, (1)に示す閾値以上のひずみ分布の形状から, (2)に示すひび割れが発生すると予測される位置を特定した. なお, (1)の細線の丸枠で囲む, 下面から連続していないひずみは除外した.



(1) No.1

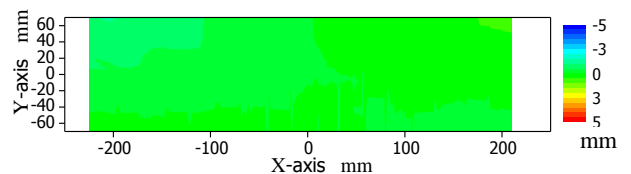


(2) No.2

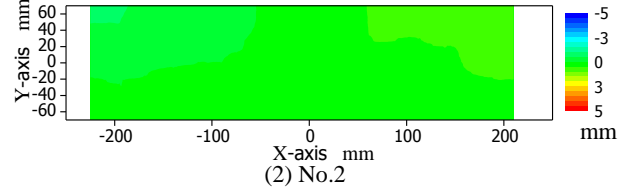


(3) No.3

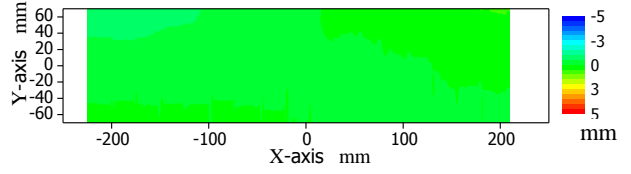
図 10. 5.0kN 時の水平方向の変位分布



(1) No.1

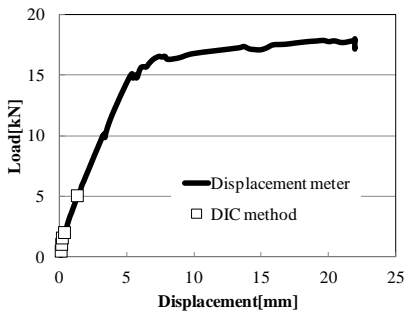


(2) No.2

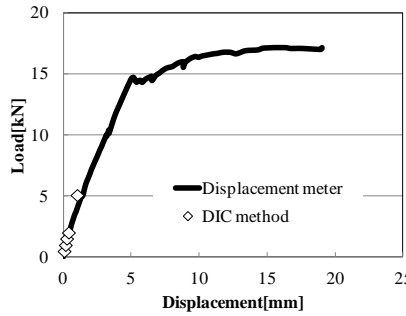


(3) No.3

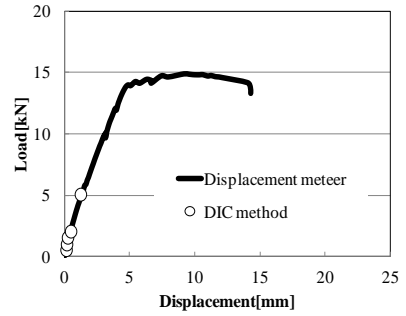
図 11. 5.0kN 時の鉛直方向の変位分布



(1) No.1

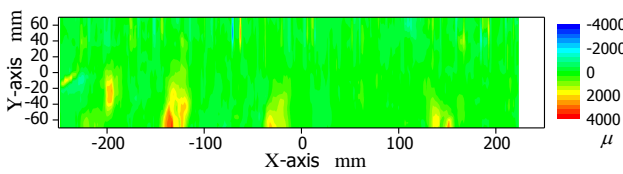


(2) No.2

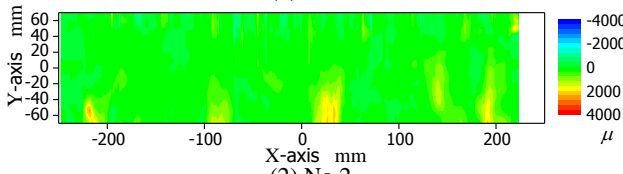


(3) No.3

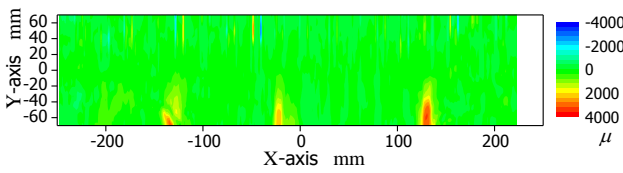
図 12. 荷重変位曲線



(1) No.1

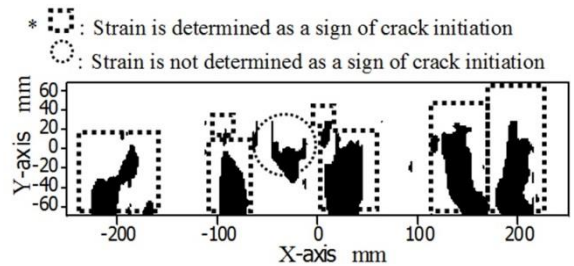


(2) No.2

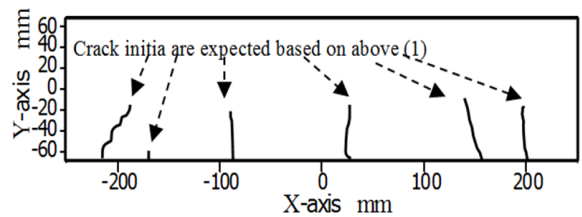


(3) No.3

図 13. 5.0kN 時の水平方向のひずみ分布



(1) 閾以上のひずみ箇所



(2) ひび割れ検出の推定位置

図 14. ひび割れ検出の概要

② No.1 における閾値の評価

No.1 における 5.0 kN の載荷時の 100~600 μ 以上のひずみ分布を図 15 に示す. その結果, 100~200 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 7 本以上のひび割れが発生すると予測される. しかしながら, 図 9 によれば, 実際に生じたひび割れ本数は, 終局時でさえも 6 本程度であった. したがって, 100~200 μ を閾値として設定した場合には, ひび割れ発生 の兆候として検出された位置は過多であると判断した. 次に, 300~500 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 下面から連続していないひずみが確認された. そのため, 300~500 μ を閾値として設定した場合には, 不明確なひび割れ発生が検出されると判断した. 一方, 600 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 4 本のひび割れが発生すると予測される. これは, 終局時に確認されたひび割れの本数および位置と, 概ね一致している. したがって, 閾値は 600 μ が適切であると評価した.

③ No.2 における閾値の評価

No.2 における 5.0 kN の載荷時の 100~600 μ 以上のひずみ分布を図 16 に示す. その結果, 100~400 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 6 本以上のひび割れが発生すると予測される. しかしながら, 図 9 によれば, 実際に生じたひび割れ本数は, 終局時でさえも 4 本程度であった. したがって, 100~400 μ を閾値として設定した場合には, ひび割れ発生 の兆候として検出された位置は過多であると判断した. 次に, 500 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 下面から連続していないひずみが確認された. そのため, 500 μ を閾値として設定した場合には, 不明確なひび割れ発生が検出されると判断した. 一方, 600 μ 以上のひずみが生じた位置からは 5 本のひび割れが発生すると予測される. これは, 終局時に確認されたひび割れの本数および位置と, 概ね一致している. したがって, 閾値は 600 μ が適切であると評価した.

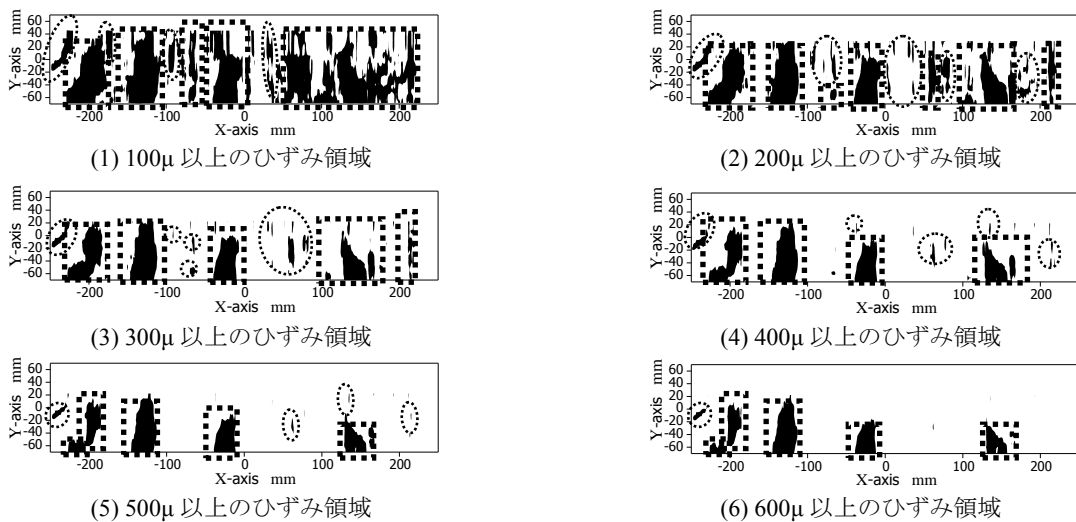


図 15. No. 1 における 5.0kN 時点で 100~600 μ 以上のひずみ領域

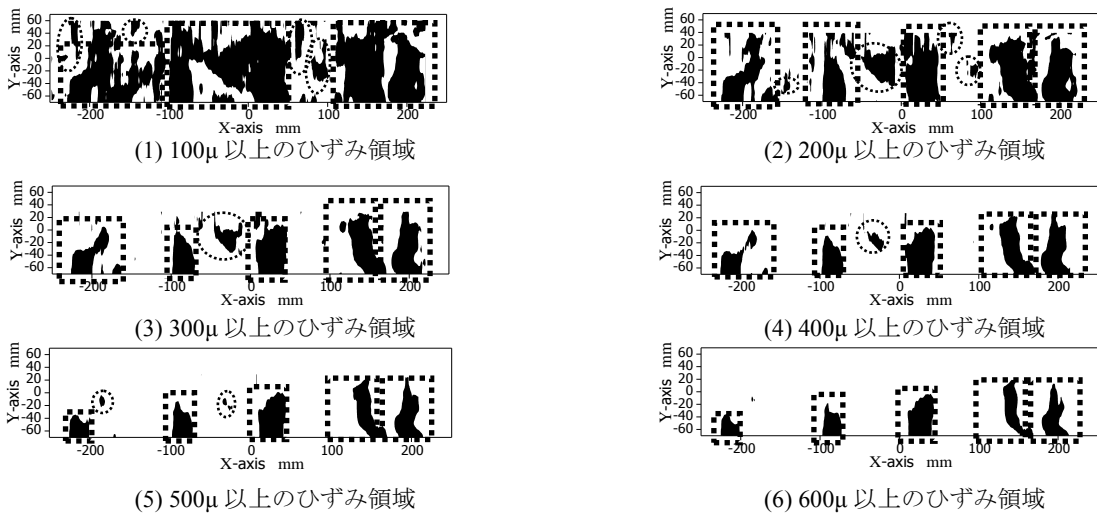


図 16. No. 2 における 5.0kN 時点で 100~600 μ 以上のひずみ領域

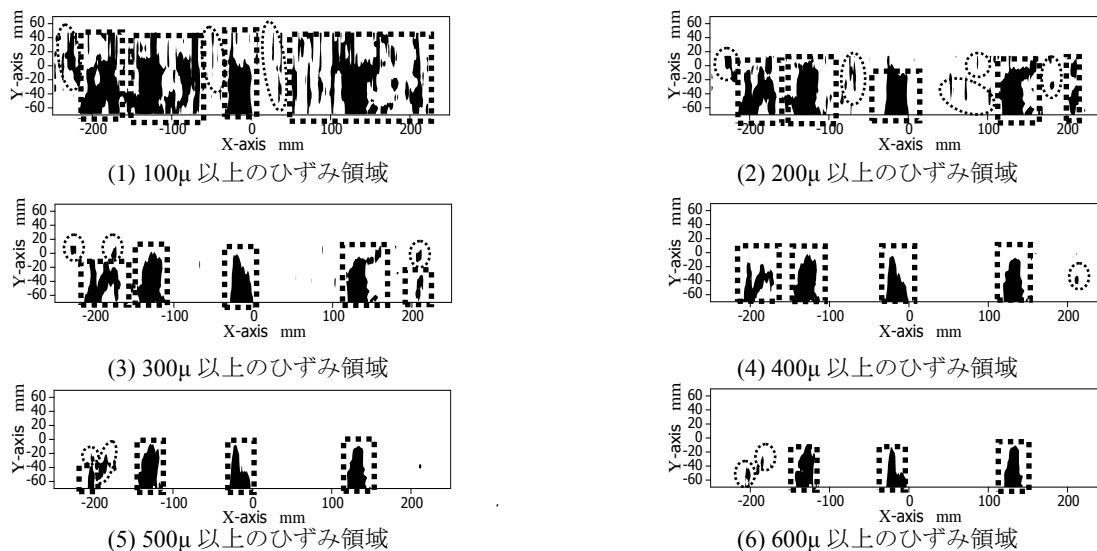


図 17. No. 3 における 5.0kN 時点で 100~600 μ 以上のひずみ領域

表 6. ひずみの閾値とひび割れ検出可能性の関係

ケース \ 閾値(μ)	100	200	300	400	500	600
No.1			△	△	△	○
No.2					△	○
No.3				△	△	○

* ○ ひび割れの検出が可能な閾値. △ 不明確な閾値.

④ No.3 における閾値の評価

No.3 における 5.0 kN の載荷時の 100~600 μ 以上のひずみ分布を図 17 に示す. これによれば, 100~300 μ 以上のひずみが生じた位置は, 5 本以上のひび割れが発生すると予測される. しかしながら, 図 9 によれば, 実際に生じたひび割れ本数は, 終局時でさえも 3 本程度であった. したがって, 100~300 μ を閾値として設定した場合には, ひび割れ発生兆候として検出された位置は過多であると判断した. 次に, 400~500 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 下面から連続していないひずみが確認された. そのため, 400~500 μ を閾値として設定した場合には, 不明確なひび割れ発生が検出されると判断した. 一方, 600 μ 以上のひずみが生じた位置からは, 3 本のひび割れが発生すると予測される. これは, 終局時に確認されたひび割れの本数および位置と, 概ね一致している. したがって, 閾値は 600 μ が適切であると評価した.

⑤ 閾値の設定に関する総合評価

上記②~④の結果を統合して, ひび割れの事前検出が可能な閾値を表 6 にて整理する. その結果, 全ての実験ケースにおいて満足できる閾値は 600 μ であることが認められる.

⑥ ひび割れの目視観察結果との比較

5.0 kN の載荷時において撮影された画像を図 18 に示す. これによれば, ひび割れは発見できない. ここで, これらの写真は目視で調査された場合と仮定できる. したがって, 目視ではひび割れ発見が困難な場合においても, デジタル画像相関法におけるひずみ分布図の閾値の範囲を 600 μ とすることにより, ひび割れ発生兆候を検出できると考えられる.

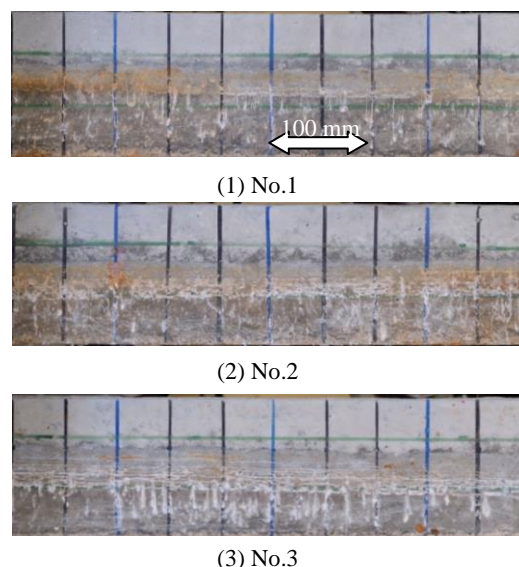


図 18. 5.0kN 時点の外観

(2) 想定を超えた荷重を受けた部材の耐久性判断法

1) 鉄筋のみの引張に対する実験的検討

① 供試体概要

図19に示す、4種類の供試体を用いた。すなわち、局部腐食を模擬したType A供試体とType C供試体、全面腐食を模擬したType B供試体とType D供試体を用いた。ここで、Type A供試体およびType B供試体は、丸鋼鉄筋(黒皮なしのミガキ棒鋼，降伏点：320N/mm²，ヤング係数：199kN/mm²，引張強さ：450N/mm²)のみを塩害環境下に暴露した。一方、Type C供試体とType D供試体は、異形棒鋼(黒皮なしのミガキ棒鋼，降伏点：330N/mm²，ヤング係数：200kN/mm²，引張強さ：550N/mm²)が埋設されたモルタルを図20に示す方法で暴露した。その後、内部の鉄筋を取り出してから、引張試験に供した。

ここで、鉄筋腐食はコンクリートのひび割れやコールドジョイントなどが存在する場合には、腐食要因物質は欠陥部より局部的に侵入する。この場合、塩化物イオン濃度が高い領域、すなわち欠陥部で、アノード反応が起こり局部腐食となる。一方、かぶり不足などがあつた場合では、腐食要因物質はコンクリート中に全面的に浸透する。この場合、アノード反応は全面的に起こり全面腐食となる。したがって本研究では、鉄筋軸方向の腐食分布が局所化している場合を局部腐食、全面的な場合を全面腐食と定義した。図21に供試体の腐食状況の写真とそれを図化したものを示す。これによると、Type A供試体およびType C供試体では局部腐食が生じ、Type B供試体およびType D供試体では全面腐食が生じた。

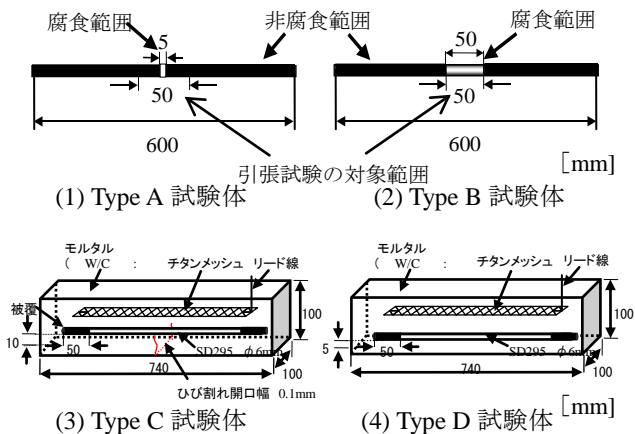


図 19. 供試体概要

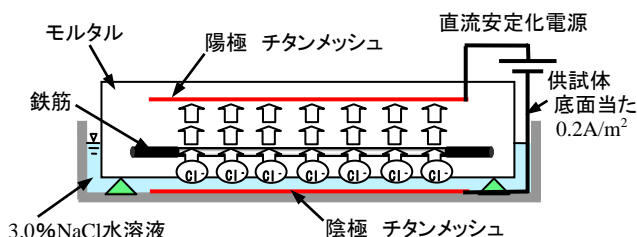


図 20. Type C・D 試験体の暴露状況

a) Type A供試体

鉄筋は、直径が6mmで、長さが600mmの丸鋼(SR295)を使用した。また、ひび割れ部やコールドジョイント部などにおいて局部的に生じるマクロセル腐食を模擬するため、中央の5mmの区間を腐食させた。そのため、後述の乾湿繰返し環境に暴露した。すなわち、湿潤環境として、中央の5mm区間にティッシュペーパーを巻いた上で、スポイトにて10mlの塩水(3.0%)を注入し、6時間に亘り相対湿度が90%の湿潤環境下に放置させた。さらに乾燥環境として、ティッシュペーパーを除去した後に、18時間に亘り相対湿度が60%の乾燥環境下に放置させた。なお、腐食を促進させるため、室温は50℃とし4ヶ月間の暴露を行った。

b) Type B供試体

鉄筋は、Type A供試体と同様である。また、かぶり不足などにより全面的に生じるマイクロセル腐食を模擬するため、中央の50mmの区間を腐食させた。そのため、50mmの区間以外をゴムテープで被覆した後に、6時間の塩水浸漬と、18時間の乾燥(相対湿度:60%)が繰り返される環境下に暴露した。なお、室温は50℃とした。



(1) Type A 供試体



(2) Type B 供試体



(3) Type C 供試体



(4) Type D 供試体

/// : 顕著な腐食箇所

図 21. 供試体の腐食状況

c) Type C供試体

鉄筋は、公称直径が6.35mmで、長さが700mmの異形棒鋼(SD295 A)を使用した。なお、鉄筋の両端50mmの範囲は

ゴムテープにて被覆した。本研究で用いたモルタルの使用材料を表7に示す。また、モルタルの配合とフレッシュ性状を表8に示す。28日間の初期養生後、3点曲げ載荷により残留開口幅が0.1mmのひび割れを導入した。その後、図20に示す方法で、供試体内部に塩分を浸透させた。すなわち、図20に示すとおりNaCl水溶液中の塩化物イオン(Cl⁻)は、陰イオンであるため、陽極側に強制的に引き寄せられる。また、通電期間を0.5日、7日、14日とし、鉄筋位置の塩化物イオン量を変化させることにより、腐食程度を変化させた。なお、この方法では鉄筋外部に電極を設けて直流電流を流すため、鉄筋自身の分極程度は少ないと考えられ、電食とは異なり実構造物における塩害による腐食と同様な腐食が生じていると思われる。

d) Type D供試体

鉄筋、モルタルおよび養生・暴露方法はType C供試体と同様である。ただし、かぶりを浅くし、またひび割れを導入しなかった。さらに、通電期間は1日および14日とした。

ここで図21に示すようにType C供試体およびType D供試体では、鉄筋下面の断面減少が支配的であることが確認された。なお、既往の研究^{13), 14)}においても鉄筋下面の断面減少が支配的となることが指摘されている。

表7. 使用材料

	種類	主な性質
セメント	OPC	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3270cm ² /g
水	水道水	—
細骨材	陸砂	密度：2.59g/cm ³ F.M.：2.58 吸水率：2.83%

表8. モルタルの配合とフレッシュ性状

W/C	S/C	フロー値	空気量
0.60	2.50	170	2.5%

② 測定概要

所定の量まで腐食を進行させた鉄筋は、錆を除去した後、腐食減量を計測し、引張試験を行った。引張試験では、ロードセルと伸び計(50mmの範囲が対象)を用いて、降伏点、引張強さおよびヤング係数を算出した。なお、腐食前の鉄筋断面積で除した応力を用いた場合を「見掛けの値」とし、一方腐食後の鉄筋断面積で除した応力を用いた場合を「真の値」とした。ここで腐食後の鉄筋断面積は、最も腐食していた箇所をノギスで測定した値を用い算出した。なお、ノギスによる測定は、鉄筋のふしおよびリブにおいてそれぞれ10箇所ずつ測定を行い、その後20個の測定データの平均値を腐食後の鉄筋の直径とし

た。

③ 腐食量の指標

「腐食減量」を指標として、鉄筋の腐食量を評価した。腐食減量は、腐食対象範囲における試験前の質量 M_1 (g)と腐食生成物除去後の質量 M_2 (g)を測定し、式(3)より求めた。

$$\text{腐食減量 (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

ここで、腐食対象範囲の設定は、鉄筋の引張試験における標点間距離50mmに対して、その1/10のみを腐食させたものを局部腐食とした。一方、標点間距離50mmを一様に腐食させたものを全面腐食として定義した。すなわち、局部腐食供試体(Type A, Type C)の場合に5mmの領域、全面腐食供試体(Type B, Type D)の場合には50mmの領域を腐食対象範囲とした。

④ 実験ケース

各供試体の暴露期間を変化させることにより、腐食量に相違を設けた。実験ケースを表9に示す。

表9. 鉄筋腐食試験の実験ケース

局部腐食試験体		全面腐食試験体	
No.	腐食減量 (%)	No.	腐食減量 (%)
A-1	0	B-1	0
A-2	0	B-2	0
A-3	0	B-3	0
A-4	1	B-4	10
A-5	1	B-5	11
A-6	4	B-6	15
A-7	5	B-7	18
A-8	5	B-8	24
A-9	5	—	—
A-10	9	—	—
A-11	14	—	—
C-1	0	D-1	0
C-2	0	D-2	0
C-3	0	D-3	0
C-4	0	D-4	0
C-5	1	D-5	0
C-6	1	D-6	0
C-7	20	D-7	10
C-8	24	D-8	13
C-9	25	—	—
C-10	27	—	—
C-11	29	—	—
C-12	32	—	—

⑤ 実験結果

a) 応力-ひずみ曲線の例

図22に、供試体No.A-10および供試体No.B-4における、見掛けの応力とひずみの関係を示す。両供試体の腐食減量はともに、約10%である。これによれば、腐食形態に拘らず、腐食した鉄筋は健全時に比べ力学性能(降伏点, ヤング係数, 引張強さ)が低下している。これは、腐食の進行に伴い断面が欠損し、終局に至るまでの破壊荷重が減少したためと考えられる。さらに、腐食した鉄筋は最大ひずみが減少していることが認められる。これは、既往の研究^{14), 15)}においても腐食量の増加に伴い鉄筋の破断伸びが低下することが報告されており、本研究の結果はこ

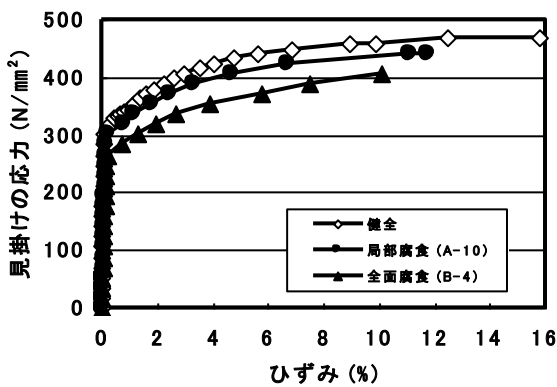


図 22. 応力-ひずみ曲線の例

れらと一致しているものと考えられる。

b) 腐食した鉄筋の力学性能

ここでは、全ての供試体における、腐食減量と健全時に対する力学性能残存率の関係を整理する。図23は腐食減量と真の降伏点残存率の関係を、また図24は腐食減量と真のヤング係数残存率の関係を、さらに図25は腐食減量と真の引張強さ残存率の関係を示す。これらによれば、腐食形態や腐食減量に拘らず、降伏点, ヤング係数および引張強さは同等であること認められる。これは、これらの図に示している応力が前述②に示した真の値, すなわち腐食後の鉄筋断面積で算定しているためと考えられる。これらの結果は、おおむね岩波ら¹⁶⁾の研究成果と一致

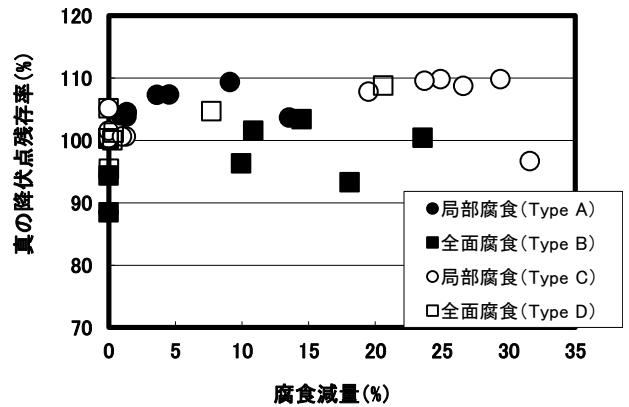


図 23. 腐食減量と真の降伏点残存率の関係

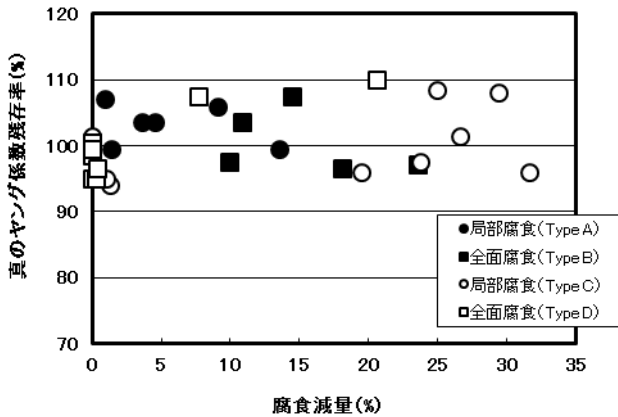


図 24. 腐食減量と真のヤング係数残存率の関係

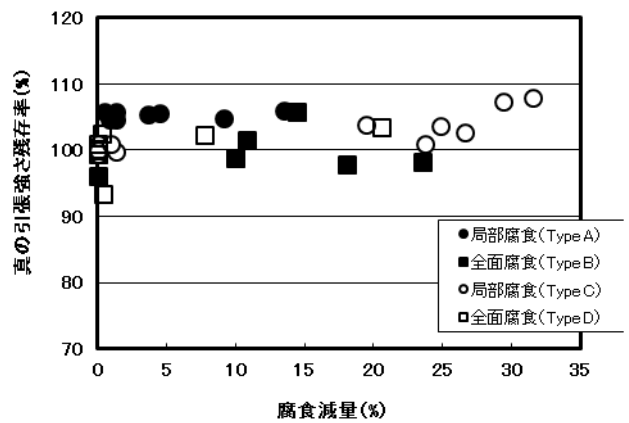


図 25. 腐食減量と真の引張強さ残存率の関係

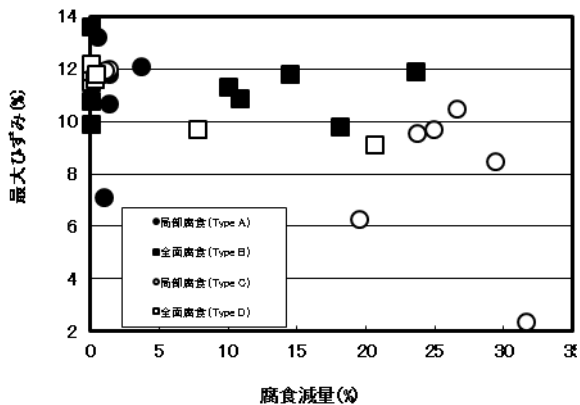


図 26. 腐食減量と最大ひずみの関係

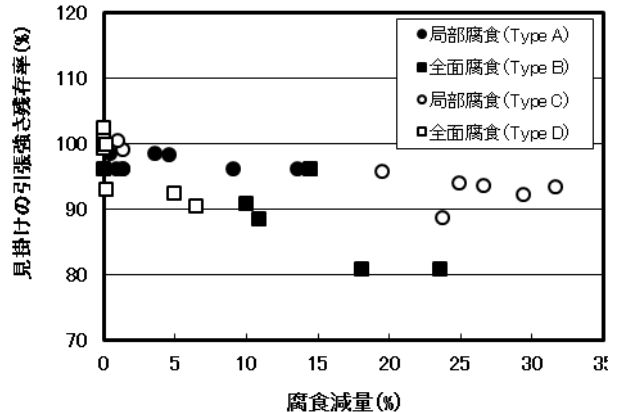


図 27. 腐食減量と見掛けの引張強さ残存率の関係

している。一方、図26は腐食減量と最大ひずみの関係を示す。これによれば、腐食形態に拘らず、腐食減量の増加に伴い、最大ひずみは減少することが認められる。これは、a)に上述したとおり、腐食の進行に伴い断面が欠損し、終局に至るまでの破壊荷重が減少したためと考えられる。

なお、もし応力を腐食前の断面積で除した場合、例えば腐食減量と見掛けの引張強さは図27に示すとおりとなる。すなわち、腐食減量の増加に伴い、引張強さは減少することが認められる。したがって、図25と図27を比較すれば、腐食の進行に伴い断面欠損が生じることにより、鉄筋の力学性能は低下すると考えられる。

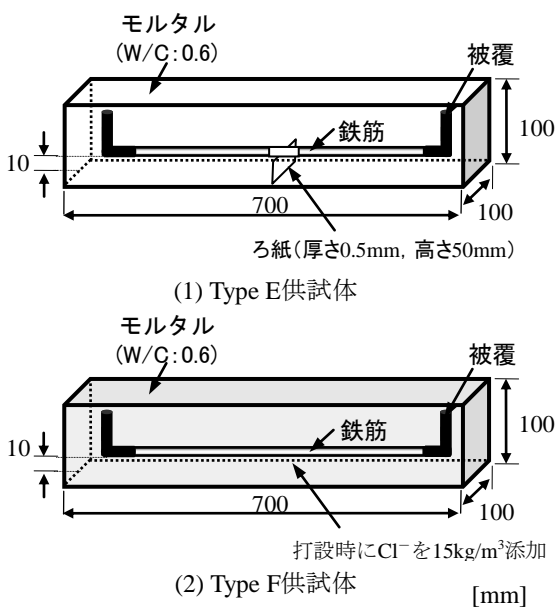


図28. 供試体概要

2) 梁の曲げに対する実験的検討

① 供試体概要

供試体は、前章のType C供試体およびType D供試体において鉄筋端部に90°フックを設けた。また、モルタル梁供試体に加え、図28に示すType E供試体およびType F供試体を用いた。使用材料および配合等は、表7および表8と同様である。ただし、Type E供試体およびType F供試体には、鉄筋として丸鋼SR295 (降伏点: 320N/mm², ヤング係数: 199kN/mm², 引張強さ: 450N/mm²)を用いた。ここで、既往の研究¹⁷⁾によれば、鉄筋が腐食したコンクリート部材の曲げ耐力の低下には、フックによる定着の影響が大きいことが明らかとなっている。したがって、腐食に伴う鉄筋とモルタルの定着の影響を無視できるように全ての供試体の内部鉄筋には、両端部で90°フックを設けた。また、本研究では鉄筋の断面減少と部材耐力の低下傾向を顕著にみるため、釣合鉄筋比5.8%に対して鉄筋比を0.36%とした。腐食形態の種類は、局部腐食と全面腐食の2水準とし

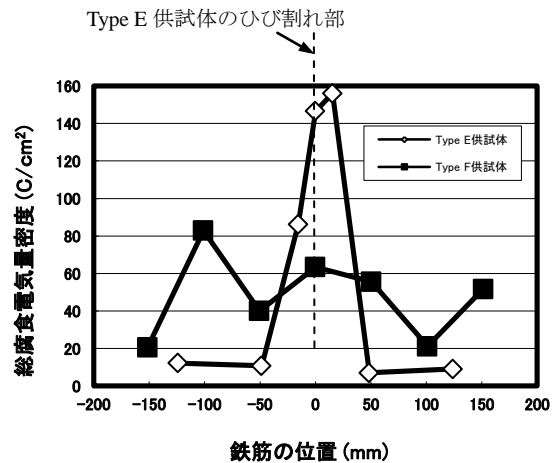


図29. 供試体の腐食箇所

た。そのため、Type E供試体では、中央に厚さ0.5mm、高さ50mmのろ紙を挿入し、さらにその近傍20mmの範囲では鉄筋にろ紙を巻き、肌離れ¹⁸⁾も考慮して曲げひび割れを模擬した。一方、Type F供試体では、練混ぜ水にモルタル中で15kg/m³相当の塩化物イオンを、NaClとして添加した。

なお、後述の暴露試験84日間の腐食電流量密度分布を、既往の研究¹⁹⁾を参考にして、同様の手順で作製された分割鉄筋を埋設した供試体を用い測定した。結果を図29に示す。これによれば、Type E供試体では、中央部のみにおいて局部腐食が進行していることが確認された。一方、Type F供試体では、中央部のみならず、鉄筋全体に渡り全面腐食が進行していることが確認された。また、既往の研究²⁰⁾により図29の総腐食電流量密度と鉄筋の腐食減量は良い相関性があることが明らかとなっており、Type E供試体では中央部で鉄筋の断面減少が著しく進行し、Type F供試体では鉄筋全体に渡り鉄筋の断面減少が進行しているものと考えられる。

② 塩害劣化の促進方法

脱型後全ての供試体は水中(温度20°C)にて28日間の初期養生を行った。

その後、Type C供試体およびType D供試体では、図20と同様の方法で暴露を行った。なお、腐食量に相違を設けるため、局部腐食の場合(Type C供試体)の暴露期間は、0.5日間、7日間および14日間とした。一方全面腐食の場合(Type D供試体)の暴露期間は、1日間および14日間とした。

また、Type E供試体およびType F供試体に対しては、次の2種の方法で塩害劣化させた。

a) 暴露試験

塩水浸漬(温度50°C, NaClaq3%) 2日間と乾燥(温度50°C, 湿度60%) 5日間を1サイクルとし、暴露試験を行った。また、腐食量に相違を設けるため、暴露期間は、腐食形態に拘らず、70日間、140日間および336日間とした。

表 10. 曲げ試験の実験ケース

暴露方法	腐食形態			
	局部腐食		全面腐食	
	No.	腐食減量 (%)	No.	腐食減量 (%)
通電暴露 (図 20 参照)	C-1	0	D-1	0
	C-2	0	D-2	0
	C-3	1	D-3	0
	C-4	1	D-4	1
	C-5	9	D-5	7
	C-6	11	D-6	8
	C-7	25	—	—
	C-8	28	—	—
暴露試験 (乾湿 繰返し)	E-1	0	F-1	0
	E-2	0	F-2	0
	E-3	14	F-3	16
	E-4	23	F-4	20
	E-5	38	F-5	54
	E-6	40	F-6	58
電食試験	E-7	0	F-7	0
	E-8	0	F-8	0
	E-9	5	F-9	5
	E-10	8	F-10	9
	E-11	10	F-11	12
	E-12	15	F-12	12
	E-13	30	F-13	14
	E-14	40	F-14	20

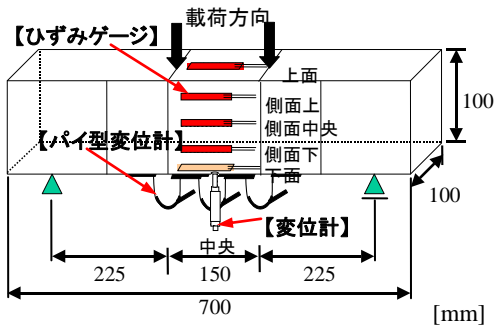


図 30. 曲げ試験の概要

b) 電食試験

3%の食塩水中にモルタル供試体を浸漬させた。さらに、モルタル中の鉄筋を陽極、食塩水中に配置した銅板を陰極とし、直流安定化電源を用いて約13.5mAの電流を通電させた。また、腐食量に相違を設けるため、電食期間を次に示すとおりとした。すなわち、局部腐食(Type E供試体)の場合、3日間、5日間、9日間とした。一方、全面腐食(Type F供試体)の場合、12日間、20日間、28日間とした。

③ 実験ケース

実験ケースを表10に示す。すなわち、腐食形態は供試体中央部で著しく腐食が進行する局部腐食の場合と、部材全体に渡り腐食が進行する全面腐食の場合の2水準を設け、腐食減量を0~58%に変化させた。

④ 曲げ試験方法

曲げ試験は、図30に示すとおり、支点間隔600mmの2点単純支持の条件下で、載荷点間隔150mmの対称2点載荷を行った。また、ロードセル、変位計、5つのひずみゲージ、および3つのパイ型変位計を用いて、変形性状と破壊状況を確認した。さらに、各荷重段階におけるひび割れ発生状況も観察した。試験後には、腐食対象領域における腐食減量を測定した。すなわち、局部腐食供試体ではひび割れ部15mmの範囲の鉄筋を採取し、局部腐食による腐食減量を測定した。一方全面腐食供試体では、等モーメント区間150mmの範囲の鉄筋を採取し、全面腐食による腐食減量を測定した。

⑤ 曲げ剛性の定義

図31に曲げモーメントと曲率の関係の例を示す。ここで、曲率は次式により求めた。

$$\phi = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{X} \quad (4)$$

ここで、 ϵ_1 ：上面のひずみ、 ϵ_2 ：側面あるいは下面のひずみ、 X ：上面から ϵ_2 までの高さ(mm)。

これによると、ひび割れ発生前の $M-\phi$ 関係は、全断面が有効な曲げ剛性 EI_g を勾配とする直線で表される。一方、ひび割れ発生後の $M-\phi$ 関係は、荷重の増加とともに、曲げ剛性も小さくなり、ひび割れ断面の曲げ剛性 EI_{cr} を勾配とする $M-\phi$ 関係に漸近していく。すなわち図31に示すとおり、ひび割れ断面における曲げモーメントと曲率の勾配を計

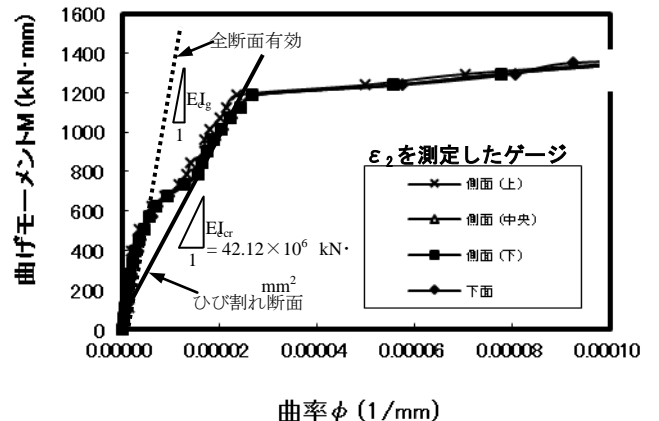
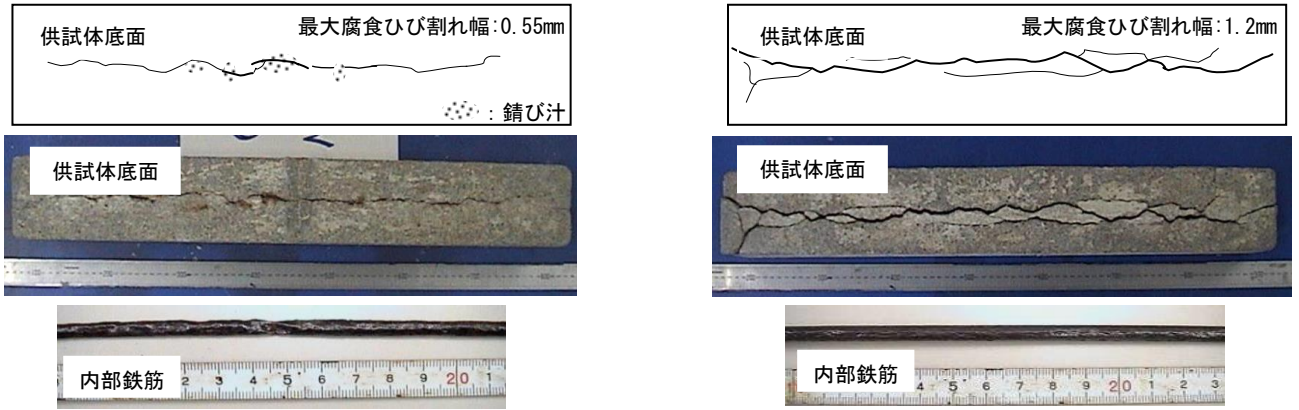


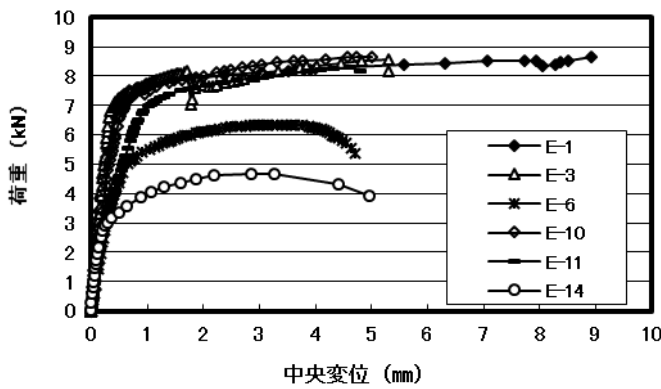
図 31. 曲げモーメントと曲率の関係の例



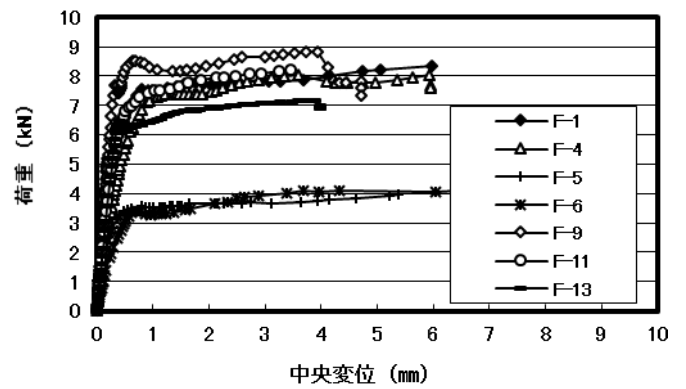
(a) 局部腐食供試体 (No.E-6)

(b) 全面腐食供試体 (No.F-5)

図 32. 腐食状況の例

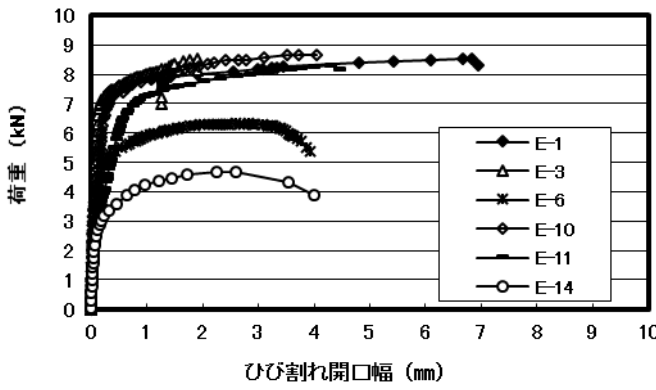


(a) 局部腐食供試体 (Type E)

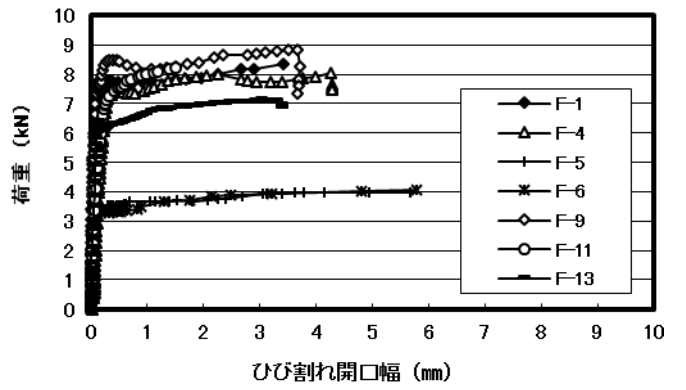


(b) 全面腐食供試体 (Type F)

図 33. 荷重-変位曲線の例



(a) 局部腐食供試体 (Type E)



(b) 全面腐食供試体 (Type F)

図 34. 荷重 - ひび割れ開口幅曲線の例

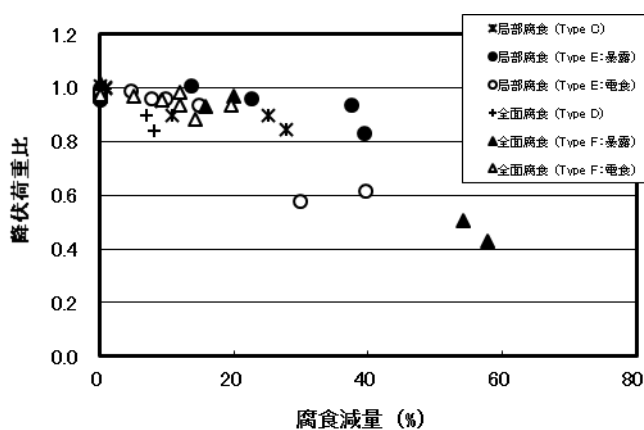


図 35. 腐食減量と降伏荷重比の関係

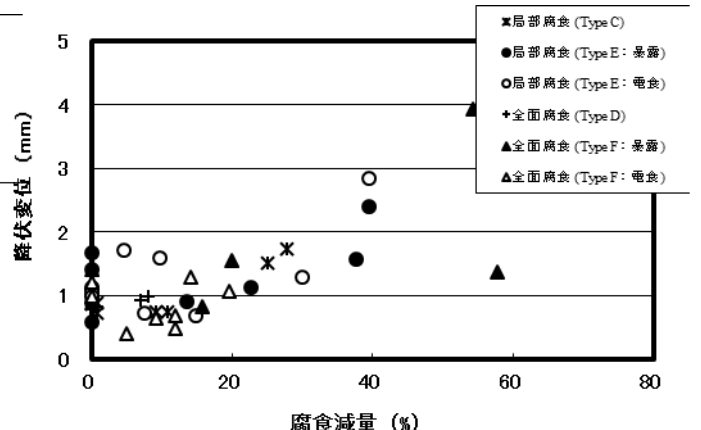


図 36. 腐食減量と降伏変位の関係

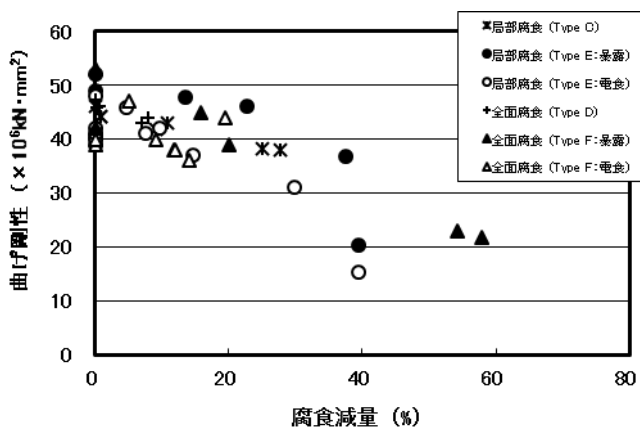


図 37. 腐食減量と曲げ剛性の関係

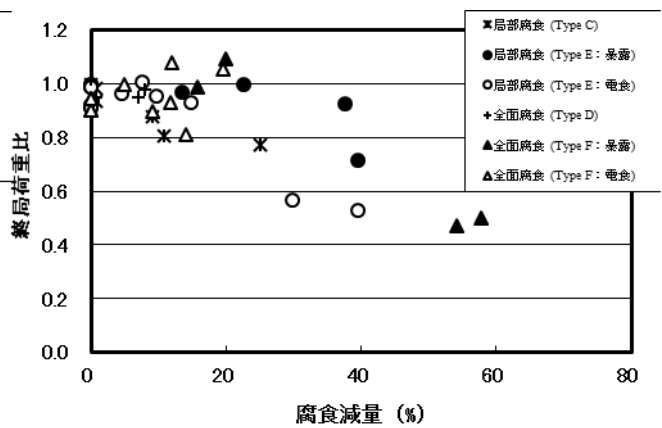


図 38. 腐食減量と終局荷重比の関係

り曲げ剛性を求めた。なお、中央変位が急激に増加しはじめた段階を梁の降伏とし、曲げ剛性は降伏時の値を算出した。

⑥ 実験結果

a) 鉄筋の腐食状況と梁の力学特性

図32に腐食状況の例を示す。これによると供試体の種類に拘らず、腐食減量が30%以上になると鉄筋軸方向に腐食ひび割れが発生していることが認められる。また、局部腐食供試体では供試体中央部で錆び汁の滲出が多くみられ、腐食ひび割れ幅も供試体中央部で最も大きかった。一方全面腐食供試体では、供試体全体に渡り大きなひび割れが発生しており、かぶりコンクリートの浮きもみられた。ここで図33に荷重-変位曲線の例を、図34に荷重-ひび割れ開口幅曲線の例を示す。これらによれば、鉄筋が腐食した場合、腐食形態に拘らず、曲げ破壊荷重は低下している。また、腐食減量が30%以上(No.E-6, No.E-14, No.F-5, No.F-6)では、曲げ破壊荷重の低下が著しく、同一荷重におけるひび割れ開口幅が広いことが認められる。

b) 梁の降伏時の状態

図35に腐食減量と降伏荷重比(健全時に対する腐食時の降伏荷重の割合、なぜならば、Type C・D供試体とType E・F供試体に用いた鉄筋の降伏点が異なるため)の関係、また図36に腐食減量と降伏変位の関係を、さらに図37に腐食減量と曲げ剛性の関係を示す。これらによると、腐食減量の増加に伴い、降伏荷重および曲げ剛性が低下し、降伏変位が増加することが認められる。特に腐食減量が20%以上の場合には、曲げ剛性が著しく低下し、変形量も大きい。すなわち、同一荷重が作用した場合、健全時のものに比べ、鉄筋が腐食したものは変形量が大きくなる。これらは、前章の結果より、腐食により鉄筋の断面積が減少し、内部鉄筋の降伏点およびヤング係数が低下したためと考えられる。なお、全面腐食あるいは実構造部材

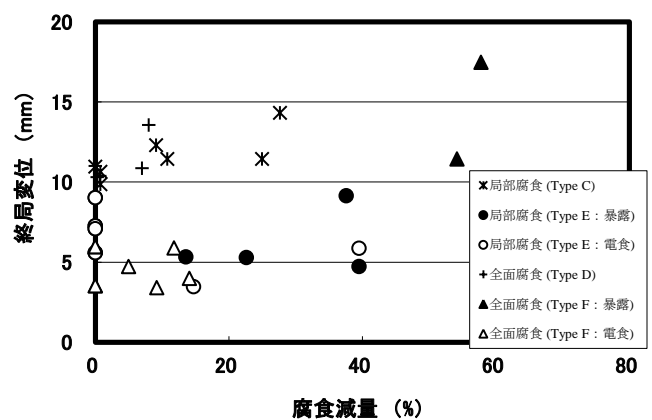


図 39. 腐食減量と終局変位の関係

を対象とした研究^{21),22)}においても同様な傾向が示されている。

以上のことから、鉄筋が腐食した梁の降伏時において、腐食量が増加すると、曲げ剛性が低下し、変形量が増加した。すなわち、曲げ変形が容易になることが明らかとなった。しかしながら、腐食形態の相違が梁部材の降伏荷重および曲げ剛性に及ぼす影響については明瞭な差は確認されなかった。

c) 梁の終局時の状態

終局時の破壊モードは、全ての供試体において鉄筋の降伏が先行する曲げ引張破壊であり、鉄筋の破断あるいは破断直前まで荷重を行った。図38に腐食減量と終局荷重比(健全時に対する腐食時の終局荷重の割合、なぜならば、Type C・D供試体とType E・F供試体に用いた鉄筋の引張強さが異なるため)の関係、図39に腐食減量と終局変位の関係を、図40に荷重によるひび割れ性状の例を示す。これらによると、腐食形態に拘らず、腐食量の増加に伴い終局荷重が低下し、終局変位が大きくなることが認められる。さらに、ひび割れ性状はひび割れ本数が少なくなり、局部腐食の場合にはスパン中央に1本のひび割れが発生し、全面腐食の場合にはひび割れ間隔が狭くなる結

果となった。特に局部腐食の場合には腐食箇所に応力が集中するためひび割れが分散しなかったものと考えられる。

特に図33(a)に示すとおり、局部腐食で腐食減量が約40%の場合(No.E-6, No.E-14)には、終局時において急激な破壊が生じた。一方図33(b)に示すとおり、全面腐食で腐食減量が約60%の場合(No.F-5, F-6)には、終局荷重は低下したものの、終局時においても急激な破壊は生じずに、最大荷重を保持することが認められる。これは、腐食が全面的であったため、鉄筋全体で応力に抵抗したものと考えられる。

ここで、終局変位がType C・D供試体とType E・F供試体に差が生じている理由は、前述のとおり鉄筋の引張強さが異なる(Type C・D供試体では 550N/mm^2 ，Type E・F供試体では 450N/mm^2)こと、さらにType C・D供試体には異形鉄筋を用い、一方Type E・F供試体では丸鋼を用いたためと考えられる。すなわち、前者は后者よりもモルタルと鉄筋間の付着力が大きいため、終局変位が増加したとなったと考えられる。

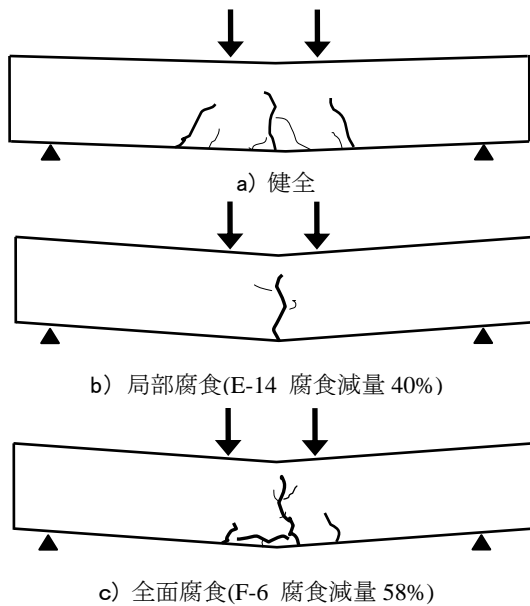


図 40. 载荷によるひび割れ性状の例

以上のことから、鉄筋が腐食した梁部材では腐食量が増加すると終局耐力が低下することが明らかとなった。すなわち、腐食減量が40%以上になると、終局荷重の低下が著しく、終局変位も大きい。局部腐食では腐食減量が約40%の場合、一方全面腐食では腐食減量が約60%の場合、それぞれ終局荷重が健全時の約50%に低下した。特に局部腐食のような鉄筋に局所的な断面減少が生じる場合には、脆性的な破壊となり、極めて危険な状態になることが示唆された。

3) 耐久性能が不足する部材の補修方法

① 供試体概要

供試体を図41に示す。JSCE-K-572に準拠した、微細なひび割れ(平均開口幅0.1mm)を有するW/C55%のモルタル供試体を用いた。また、けい酸ナトリウム・カリウム系表面含浸材を、塗布面が湿潤状態にて塗布した。塗布後は、定期的に散水しながら28日間に亘り湿潤養生を行った。

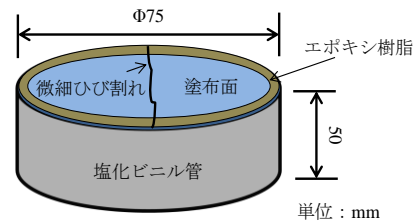


図 41. 供試体概要

② 実験ケース

実験ケースは、表面含浸材を塗布していないケース(以後「BL」とする)、刷毛で表面含浸材を塗布したケース(以後「A」とする)、および湿布で表面含浸材を塗布したケース(以後「B」とする)の計3水準とした。ここで、Bの塗布方法を説明する。はじめに、高い吸水性の布を $\phi 75\text{mm}$ に切出し、そこへ表面含浸材を含ませた。これを塗布面に貼り付け、24時間に亘り静置した。その結果、塗布前後の質量差から算定された塗布量は、 0.63kg/m^2 であった。また、Aの塗布量は、 0.12kg/m^2 とした。

③ 測定方法

ビッカース硬さ試験は、JIS-Z-2244に準拠した。表面含浸材により改質された深さを推定するため、供試体をひび割れと垂直に切断し、切断面の深さ10mmまで露出し、ビッカース硬さを測定した。ビッカース硬さ試験と同様に前処理し、切断面の深さ10mmまでを露出し、走査型電子顕微鏡(SEM)によりひび割れ近傍を観察した。透水試験は、JSCE-K-572に準拠した。供試体塗布面に漏斗を設置し、2週間に亘り透水量を測定した後、透水係数を算出した。塩化物イオン浸透試験は、JSCE-K-572に準拠した。供試体を濃度3.0%のNaCl水溶液中に28日間に亘り暴露した。その後、供試体をひび割れと垂直に切断し、切断面に 0.1mol/L の硝酸銀水溶液を噴霧し、切断面の塩化物イオン浸透深さを測定した。同様に、ひび割れ面で割裂し、ひび割れ面の塩化物イオン浸透深さを測定した。

2) 実験結果および考察

図42にビッカース硬さ分布を示す。これによれば、BLに比べAでは、7mm以浅のビッカース硬さが高く、一方7mm以深においては同等になることが確認できる。このことから、Aの改質深さは6mm程度であると推定される。

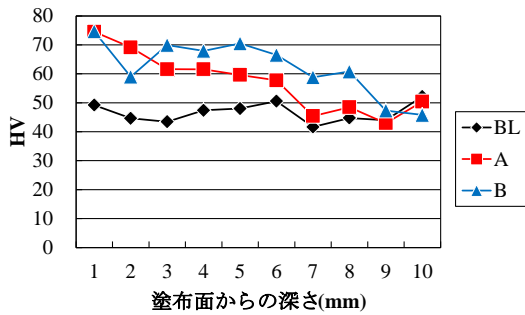


図 42. ビッカース硬さ分布

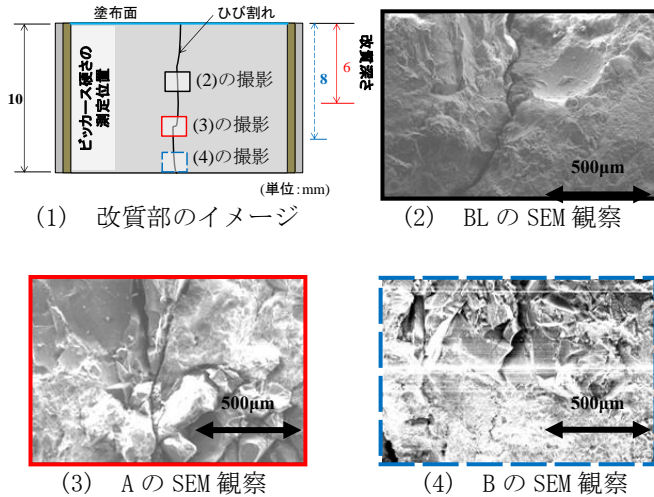


図 43. 改質部のイメージと SEM 観察

改質深さは深まったと考える。

ビッカース硬さにより得られた考察の裏付けとして、ひび割れ部の SEM 観察を行った。図43(1)は、ひび割れと垂直に深さ10mm まで切り出した供試体のイメージを示す。図中の赤線はAの改質部を、青破線はBの改質部を示す。また、図43(2)はBLのSEM 観察を、図43(3)はAのSEM 観察を、図43(4)はBのSEM 観察を示す。これによれば、図43(2)に比べ図43(3)および図43(4)では、C-S-Hゲルの形成により表面が滑らかになっており、ひび割れ近傍では無ひび割れ部で改質された位置より深部でも、緻密化されていることが確認された。

図44 に透水係数を示す。これによれば、BLに比べAでは、透水性を40%程度に抑制することが確認された。また、BLに比べBでは、透水性を15%程度に抑制することが確認された。したがって、表面含浸材を塗布することで、遮水性が向上した。さらに、湿布で塗布することで、刷毛での塗布に比べ、改質効果が高まったため、遮水性は向上したと考える。

図45 に塩化物イオン浸透深さを示す。これによれば、切断面およびひび割れ面において、BLに比べAでは、塩化物イオン浸透深さを50%および35%程度に抑制することが確認された。一方Bでは、0%および14%程度に抑制することが確認された。したがって、湿布で塗布することで、刷毛での塗布に比べ、改質効果が高まったため、遮塩性は向上したと考える。

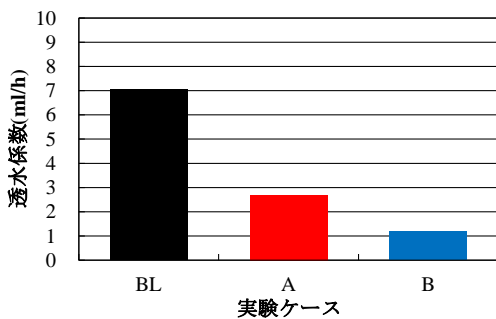


図 44. 透水係数

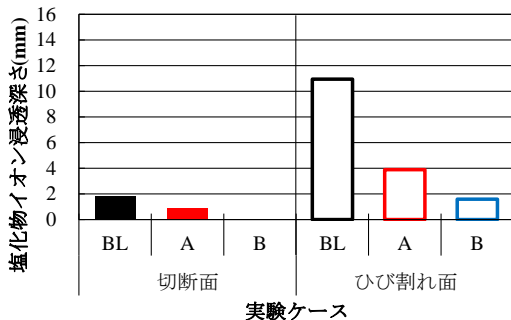


図 45. 塩化物イオン浸透深さ

同様に、B の改質深さは、8mm 程度であると推定される。したがって、湿布で塗布することで、刷毛での塗布に比べ、

4. 実効性のある提言

- 1) 想定を超えた外力を受けた部材の残存性能を評価するため、デジタル画像相関法を用いて、巨大津波により塩害が進行した鉄筋コンクリート梁を対象に、曲げ荷重に伴い発生するひび割れを、目視で確認できる以前に検出する方法を提案できた。すなわち、巨大地震による過大荷重を受けたことで、ひび割れが生じる可能性の高い位置を特定する方法を構築できた。
- 2) 想定を超えた荷重を受けた部材の耐久性を判断するため、腐食量を変化させたモルタル梁供試体を用いて、腐食形態(局部腐食、全面腐食)が部材の曲げ性状(荷重-変位曲線、降伏荷重、降伏変位、曲げ剛性、終局荷重、終局変位)に及ぼす影響を、実験的に明らかにした。その結果、①腐食量が増加すると、梁の降伏荷重、曲げ剛性、および終局荷重が低下し、変形が容易になること、②局部腐食では腐食減量が約 40%の場合、一方全面腐食では腐食減量が約 60%の場合、それぞれ終局荷重が健全時の約 50%に低下、全面腐食と比較して局部腐食では、終局時に急激な破壊に至り、極めて危険な状態になること、③腐食減量が約 30%以上になると、腐食形態に拘らず、使用状態において降伏荷重および曲げ剛性が著しく低下し、変形量が増加すること、が

明らかになった。したがって、巨大地震によりひび割れが発生した後に巨大津波で局部腐食が進行した鉄筋コンクリートは極めて安全性が損なわれると推察できる。

- 3) 耐久性能が不足する部材の実効性ある補修方法として、微細ひび割れ内部へけい酸塩系表面含浸材を塗布する方法を提案できた。特に吸水性の高い布に予め表面含浸材を含ませ、それをひび割れ開口面に当ててけい酸塩を供試体内部へ含浸させる策は、発災後の現場においても簡易に補修できる方法として実効性が高い。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会（339 委員会）（第Ⅱ期）報告書ならびにシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 100，2012。
- 2) 浜岡広，松田浩，山下務，中島朋史：光学的全視野計測法による RC はりのひび割れ発生・進展の可視化，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.781-786，2006。
- 3) 出水亨，松田浩，中島朋史，浜岡広：非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.473-478，2006。
- 4) Chin-Hung Chiang, Jiunnren Lai, Yi-Wen Chen, and Yi-Fong Huang : Measurements of structural vertical displacement using digital image correlation methods”, Proceedings of the ASEA-SEC-1, pp.627-632, 2012.
- 5) 渡辺健，東広憲，三木朋広，二羽淳一郎：コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp.94-106，2010。
- 6) 野間康隆，渡辺健，二羽淳一郎：画像解析による高強度コンクリートの圧縮破壊性状の可視化ならびに評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp.68-79，2010。
- 7) 藤田悠介，中村秀明，浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ幅の分類，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1792-1797，2012。
- 8) 畝田道雄，奥畑峻，石川憲一：デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定のパフォーマンス評価研究，日本機械学会論文集(C 編)，76 巻，763 号，pp.587-594，2010。
- 9) 畝田道雄，戸島幹夫，佃善彦，宮里心一，石川憲一：ステレオ方式三次元形状計測法を併用したデジタル画像相関法による鉄筋コンクリート構造物のひび割れ発生検知手法の研究，日本機械学会論文集(C 編)，78 巻，794 号，pp.3483-3494，2012。
- 10) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988。
- 11) 土木学会：コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，コンクリートライブラリー 69，pp.96-97，1991。
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，2006。
- 13) 審良善和，濱田秀則，山路徹，野中松二：鉄筋とコンクリート界面の空隙が鉄筋腐食に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 5 巻，pp.1-6，2005。
- 14) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，守分敦郎：塩害を受けた栈橋上部工の劣化状況のばらつきに関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.911-916，2006。
- 15) 小林孝一：塩害により劣化した RC 部材の耐震性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.2，pp.49-59，2005。
- 16) 岩波光保，横田弘，佐藤文則：鉄筋腐食が RC はりの耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1501-1506，2002。
- 17) 李翰承，友澤史紀，野口貴文：鉄筋腐食が RC 単鉄筋梁の耐力性能低下に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.732-737，1995。
- 18) 神山一：コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食，セメント技術年報，No.26，pp.638-644，1972。
- 19) 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.83-93，2001。
- 20) 宮里心一：モルタル中に埋設した分割鉄筋の腐食電流と腐食減量の関係および分割鉄筋を用いた実験例，第 33 回セメントコンクリート研究討論会論文報告集，pp.23-28，2004。
- 21) 小林孝一：塩害劣化した RC はり部材の耐荷性能に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 6 巻，pp.231-236，2006。
- 22) 渡邊真史，横田弘，岩波光保，下村匠：塩害を受けた RC 栈橋上部工の構造性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1603-1608，2006。

研究テーマ 2

課題 2-4

救援・支援活動に使用する幹線道路 の防災対策

金沢工業大学 川村國夫 教授

課題 2-4 救援・支援活動に使用する幹線道路の防災対策

金沢工業大学

教授

川村國夫

南海トラフ地震
道路ネットワーク

救援・支援
耐震信頼度

緊急輸送道路
整備優先度

1. 研究目的

日本海側から南海トラフ巨大地震被災地の太平洋側へ救援・支援する幹線道路、特に、北陸地方の緊急輸送道路の主要機能確保のため、その道路構造物の耐震性能や道路ネットワークの健全度を以下について検討する。

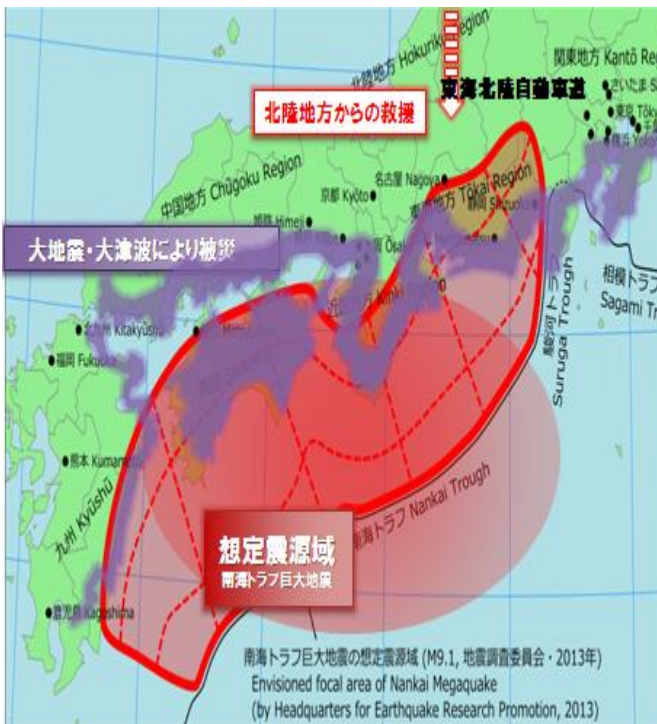


図1 北陸地方から救援支援は期待される東海北陸自動車道

- (1) 地震時における緊急輸送道路の耐震健全度とそのネットワーク機能の確保および耐震化優先度の決定ロジックに関する提案
- (2) 南海トラフ巨大地震に対して救援支援活動を担う東海北陸自動車道の現況耐震健全度(小矢部JCT～白川郷IC区間)と今度の耐震整備区間優先度の決定

2. 解決法

2.1 耐震整備優先度設定の基本方針

2007年3月能登半島地震や2011年3月東日本大震災では、緊急車両などが通行可能となる緊急輸送道路の早期啓開の重要性が認識され、道路の耐震化整備が図られてきた^{1) - 12)}。

石川県が管理する緊急輸送道路の整備に当たり、その延長約1,000km(管理道路総延長2,400km)を一度に一律に耐震化性能を達成することはできない。限られた予算の中で効果的な耐震化整備計画、つまり、道路構造物や区間の耐震化優先度設定を客観的手法から進めたい。

現行の石川県「地域防災計画」¹³⁾では、計画的な緊急輸送道路ネットワーク整備を重視しており、ここではネットワーク全体の耐震化健全度を指標として整備計画を検討した。

周知のように、実務版規準「道路震災対策便覧(震前対策編)平成18年度改訂版」¹⁴⁾でも、ネットワークの耐震性として多重性、代替性の確保が記述された。特に、対象の奥能登地域がもつ多くの断層¹³⁾の存在に対しては、リダンダンシー確保により道路機能の低下を招かないよう特記している。このネットワーク全体で健全度評価することは正鵠を射ていると言ってよい。

具体的には、健全度評価と耐震化整備優先度の決定は、「未整備の既存道路構造物や区間を耐震化することで、道路ネットワーク全体の耐震化信頼度が最も向上する整備を最優先とする」と定める。ネットワーク健全度は後述の道路構造物や区間の耐震化によって高まる信頼度のネットワーク連結信頼度から評価した。また、緊急輸送道路では一次、二次などの次数、その機能と交通量などから「ネットワーク中のリンク(区間)や路線の重要度」を優先度重みと設定した耐震化整備優先度についても検討する。

2.2 道路ネットワークの連結信頼度の感度分析手順

2つの地点(例えば、図2のOD間)でつながるネットワーク連結信頼度はその移動可能な全ルート(全ODペア間)とそれを構成する各ノード間のリンク信頼度から算定する。リンク信頼度は通行可能の確率で指標化し、このOD間をネットワーク全体の各ノード間に適用してやれば、道路ネットワークの連結信頼度が定義できる¹⁵⁾。

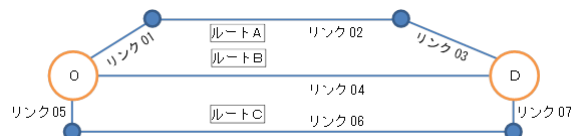


図2 道路構造物の耐震整備優先度設定フロー

ネットワーク上のどの構造物やリンクを耐震化することで、ネットワーク連結信頼度がどれ程増加するかを図 3 の以下の手順で感度分析して、耐震化の整備優先度を決定する。

- ①次節で述べる道路構造物の震度階別不通率を用いて、耐震化による通行信頼性の指標として道路構造物の連結信頼度を計算する。
- ②一つのリンクは複数の道路構造物の直列システムであるとみなし、リンク上にある道路構造物群の連結信頼度からリンクの連結信頼度を計算する。
- ③複数のリンクで構成されるネットワークの連結信頼度を計算する。
- ④各道路構造物を耐震化整備（耐震化の信頼度 100 パーセント）した条件で、②から③を繰り返し、それぞれのネットワーク連結信頼度を計算する。
- ⑤耐震化した構造物の中で道路ネットワーク連結信頼度を最も向上させる耐震化整備を最優先順位とする。以下、次順位、次々順位を決定する。

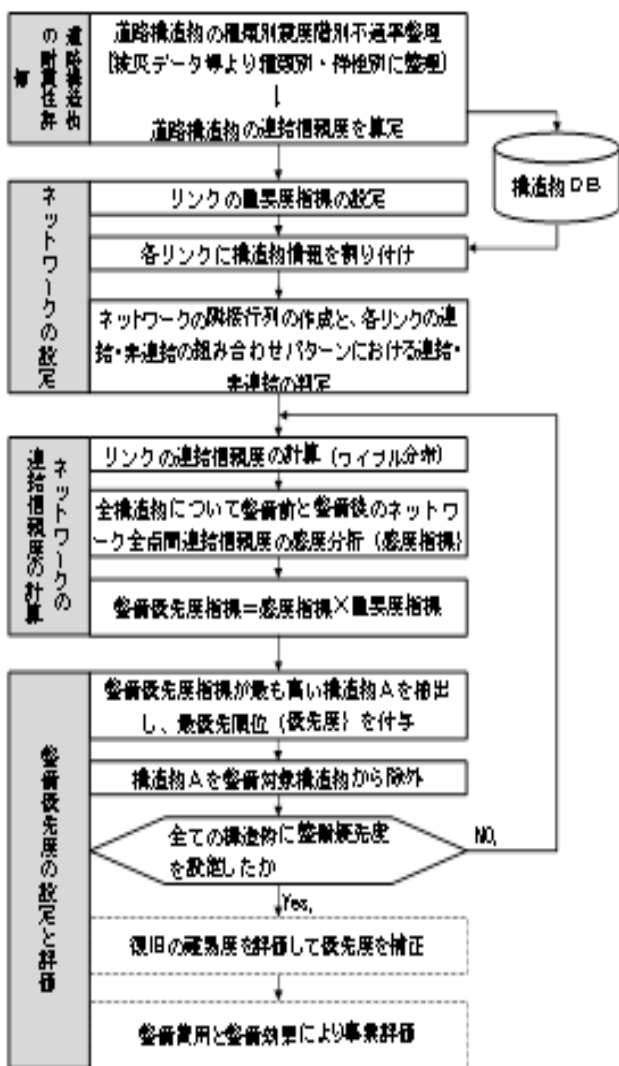


図 3 道路構造物の耐震化整備優先度設定フロー

なお、以上の手順に関して、リンク（区間）単位で耐震化を考慮して、ネットワーク連結信頼度を算定すれば区間の整備優先度が求まる。

さらに、対象ネットワーク範囲を行政課題に対応させれば、その課題に即した整備計画が得られる。例えば、主要拠点間として輪島～珠洲（飯田）の通行所要時間制約を入れてネットワークを組み、そこで検討すれば、拠点病院搬送や拠点消防応援などに関する耐震化整備優先度が決定できる。

2.3 道路構造物の震度階別不通率

地震時に被災した道路構造物による道路閉鎖を示す震度階別不通率、つまり、既存構造物の耐震性能は、構造物の構造特性や地盤条件等から整理されるべきものである。しかし、現時点では橋梁や盛土など個々の構造物についての耐震化性能の研究や実績は行われているが、それら構造物全体を同レベル上で安定評価した手法ははまだ確定されていない。

そこで、本報告では、平成 19 年 3 月に発生した能登半島地震の発生震度分布図を用いて、発生震度域内の道路構造物の被災箇所数を精査して、その構造物の母数から震度階別の被災構造物による道路不通率を求めた（図 7）。その地域が実際に被災した実績を基に道路不通率を計上した。

図 4 の結果から、石川県奥能登総合土木事務所管内の緊急輸送道路では、道路構造物 18,793 箇所の内、116 箇所が被災した（軽微な被災は除く）。これを構造物別、また、一部示方書改訂に準じて、①橋梁（1996 年以前施工）、②橋梁（1997 年以降施工）、③トンネル・シェッド、④自然斜面・切土、⑤盛土、の 5 種類に注目し、実際の震度 5 弱から 6 強までの各構造物の震度階別不通率を表 1 でまとめた。

表 1 から、能登半島地震の被災は 1996 年以前の橋梁および斜面・切土や盛土など土構造物に多く発生し、1997 年以降の橋梁やトンネル本体は被害を受けていない。注目すべきは、損害保険料算出機構が 1995 年兵庫県南部地震による震度別各構造物被災による道路不通率を算定し、それを幾つかの都道府県が採用した結果 16) と比較してみると、表 1 の能登半島地震の斜面・切土および盛土の不通率がやや低い値を示した。機構の算定被災率が上回ったことは、対象とした地震規模が大きく、被災が都市密集地域に集中したこと、さらには損害保険料に関わる算定であること、などが理由に挙げられるが、表 1 の不通率に有意な差は認められず、ここでの採用に到った。

なお、震度 7 の不通率は、能登半島地震では発生しなかったので表 1 に示していないが、例えば、生産工程の製品故障などの確率で用いるワイブル分布から外挿して予測できる。当然ながら、道路構造物の耐震化の信頼度は（1－不通率）として計算する。

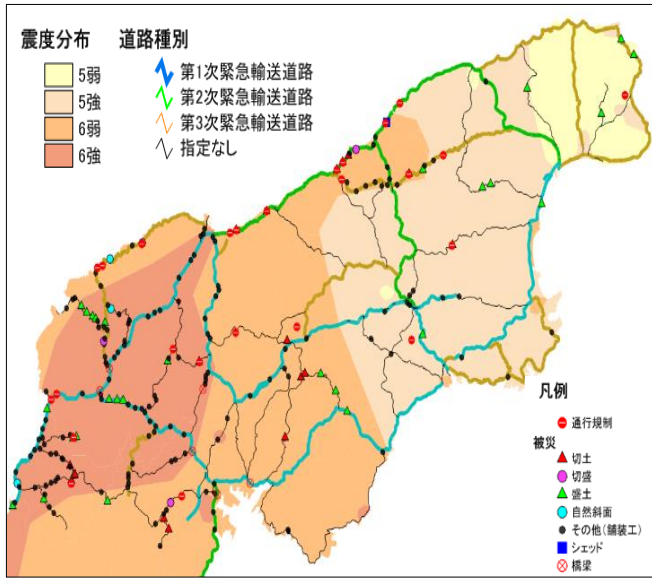


図4 能登半島地震の震度分布と道路構造物の被災箇所

表1 能登半島地震における道路構造物の不通箇所数

構造物 種別	橋 梁		トンネル ・ シェッド	斜 面 ・ 切 土	盛 土
	1996 以前	1997 以降			
震度5 弱	0/39 (0.00)	0/3 (0.00)	0/1 (0.00)	0/34.6 (0.0000)	2/35.4 (0.0565)
震度5 強	0/199 (0.00)	0/26 (0.00)	0/12 (0.00)	2/161.2 (0.0124)	12/169.7 (0.0707)
震度6 弱	2/379 (0.53)	0/58 (0.00)	0/35 (0.00)	39/311.9 (0.1250)	41/336.3 (0.1219)
震度6 強	5/519 (0.96)	0/66 (0.00)	0/42 (0.00)	54/404.9 (0.1334)	57/448.4 (0.1271)

※1 上段：橋梁・トンネル 被災箇所数/施設箇所数、斜面切土・盛土 被災箇所数/施設延長(km)

※2 下段：(不通率)

2.4 リンクの連結信頼度

図2に示す一つのリンクには様々な道路構造物が複数存在している。リンク内のどれか一つの構造物が損傷しても、リンクが通行止めとなり道路機能を失う。したがって、リンクの連結信頼度は、そのリンク内の道路構造物による直列システムと捉え、式(1)から各道路構造物の信頼度で算定する¹⁷⁾。

$$\begin{aligned}
 \text{リンクの連結信頼度 } R &= X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_i \\
 &= \prod_i X_i \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに X_i : リンク内の道路構造物の連結信頼度

2.5 道路ネットワークの連結信頼度

図2で記したように、ネットワーク上の全ノードを経由する各リンクの通行確保がネットワーク全体の健全性を示す。このため、任意のノードから他の全てのノードに到達できる条件をネットワーク上の全ノードへ適用し、ネットワークが通行可能リンクで連結している状態の信頼度で表わす。

ネットワーク信頼度の計算方法については、若林、飯田¹⁸⁾は、ミニマルパス、カットを用いた信頼度の厳密解法ではブール演算を伴うことからネットワーク規模により膨大な計算量が必要となることに対し、一部のミニマルパス・カットの計算を用いて信頼度の上下限值とその交点を近似解として求める方法(交点法)を示した。さらに、若林ら¹⁹⁾は、従来用いられている直接的なサンプリングによる直接モンテカルロ法は計算精度を上げるためには試行回数が増大することから、サンプリング領域を信頼度の上下限值に限定することで推定信頼度の分散を減少でき効率が良い限定サンプリングによるモンテカルロ法の適用を検証し、シミュレーション精度は交点法より優れ実用的であるが、ネットワークの拡大にともなって作業時間が膨大化することを指摘している。

筆者らは、一つの道路構造物の耐震化整備が道路ネットワーク全体の信頼性に与える影響度合いを指標にすることとした。そのため、あるリンクの連結信頼度を微小に変更して近似解で解析した場合、変更の影響なのか、計算誤差の変動範囲なのか分からない可能性があることから厳密解により算出することとした。表2に厳密解による計算手順を示す。

そこでは、各ノードの連結状態を隣接行列を用いて記述し、各リンク間の連結・非連結の組み合わせを全て発生させ、その中で、連結している場合を判定し、その発生確率を集計することで、ネットワークの連結信頼度を算定する。

全ノード間リンクの連結・非連結の判定で、対角要素を1にした判定行列を $n-1$ (n : ノード数) 乗にした行列値の中で値が1ならば連結していると判定する²⁰⁾。全ノード間に関して連結と判定されたリンク連結信頼度の組み合わせ合計値が「全ノード間連結信頼度」となり、これをネットワークの連結信頼度と見做す。つまり、表2の全点間で連結と判定された組み合わせパターンが発生確率の合計値「全点間連結信頼度」をネットワークの全体信頼度とする。

全ノード間リンクの連結・非連結の判定で、対角要素を1にした判定行列を $n-1$ (n : ノード数) 乗にした行列値の中で値が1ならば連結していると判定する²⁰⁾。全ノード間に関して連結と判定されたリンク連結信頼度の組み合わせ合計値が「全ノード間連結信頼度」となり、これをネットワークの連結信頼度と見做す。つまり、表2の全点間で連結と判定された組み合わせパターンが発生確率の合計値「全点間連結信頼度」をネットワークの全体信頼度とする。

2.6 リンクの重要度

緊急輸送道路の中でも、その路線や区間によって重要度は異なる。対象地域で第一次緊急輸送道路から第三次緊急輸送道路まで区別されていることは、その社会性、経済性、緊急性など多機能の重みに関わっている。

したがって、当然、公共としての緊急輸送道路整備はその重要性を考慮して計画することになる。

ここでは、緊急輸送道路の重み付けを試み、それに基づく耐震化整備優先度を検討し、その重みに対する感度

表 2 全点間の連結・非連結判定の手順

① 隣接行列の作成

隣接行列(A)は、各ノードの接続状態を示す行列であり、ノードが連結している場合を1、非連結の場合を0と表記する(下記参照)。

$$A = \begin{pmatrix} N1 & N2 & N3 & N4 \\ N1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ N2 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ N3 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ N4 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Ni : i 番目のノード
 Lm : m 番目のリンク
 Pm : m 番目のリンクの連結確率 (通行止めが発生しない確率)

② 各リンクの連結・非連結の組み合わせパターンにおける連結・非連結の判定

各リンクの連結・非連結の組み合わせにおいて、隣接行列 A の対角を 1 と置き換えた判定行列 H を作成し、 H^{n-1} において 0 の項がある場合、全点間は「非連結」と判定する²⁾⁰。

$$A = \begin{pmatrix} (N1 & N2 & \dots & Nn) \\ N1 & 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ N2 & a_{21} & 0 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ Nn & a_{n1} & a_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

隣接行列Aの対角を1と置き換えた判定行列Hを作成

$$H = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

H^{n-1} を計算

$$H^{n-1} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{nn} \end{pmatrix}$$

$H_{11} \sim H_{nn}$ の全ての項において、0の項がある場合、全点間において非連結とする

③ 全点間連結信頼度の算定

全点間が連結と判定された組み合わせパターンの発生確率を合計する。

$C1$ $R1 = P1 \times P2 \times P3 \times P4$
 $C2$ $R2 = (1-P1) \times P2 \times P3 \times P4$

全点間が連結している場合の合計を全点間連結信頼性とする。

Ck	リンク(Lm)				
	L1	L2	L3	L4	L5
C1	1	1	1	1	1
C2	0	1	1	1	1
C3	1	0	1	1	1
C4	0	0	1	1	1
C5	1	1	0	1	1
C6	0	1	0	1	1
C7	1	0	0	1	1
C8	0	0	0	1	1
C9	1	1	1	0	1
C10	0	1	1	0	1
C11	1	0	1	0	1
...

Wi : 重み係数 (表 3)

表 3 リンクの重要度の重み係数

重要度指標	重み	具体的な項目	項目別重み係数 Wi	適用	
路線	60	緊急輸送道路	30	緊急輸送道路(1次)	30
				緊急輸送道路(2次)	20
				緊急輸送道路(3次)	10
	広域ネットワーク路線	15	ダブルラダー道路	15	
			地域連携道路	10	
			観光周遊道路	5	
国道・主要地方道・県道の別	15	国道・主要地方道	15		
		県道	10		
交通量	40	日交通量	40	20,000 台以上/日	40
				4,000 台以上 20,000 台未満/日	30
				1,500 台以上 4,000 台未満/日	25
				1,500 台未満/日	20
合計			100		

3. 方法の検証

3.1 石川県奥能登地域緊急輸送道路ネットワークのリンクとノードの設定

石川県土木部奥能登土木総合事務所管内の緊急輸送道路ネットワークを対象にして(図5)、既存の道路および



図 5 石川県奥能登地域緊急輸送道路ネットワークのリンクとノードの設定

などについても言及する。

取上げた重み付けは、石川県橋梁長寿命化計画で採用した橋梁の重要度係数²¹⁾との整合を基本に、また、道路交通網に対する通行の影響度合いを加味して、式(2)のようなリンク重要度指標 LPI で提案した。結果を表 3 でまとめた。

$$LPI = \frac{\sum (pi \times Wi)}{\sum Wi} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに pi : 各項目について、該当する場合 1.0、該当しない場合 0.0

構造物情報から表 2 を用いて、この地域全体の震度 6 強に対するネットワークの各リンク連結信頼度を図 6 のように計算した。なお、震度 6 の設定は 2007 年能登半島地震で一部地域がすでに経験しており、加えて 2013 年改訂の石川県「地域防災計画」津波災害対策編には能登半島周辺の津波震源地震が日本海東縁部地震 (M7.99)、能

登半島東方沖地震 (M7.58), 能登半島北方沖地震(M7.66)などを想定して作成された。これらの地震規模は震度 6 の発生が十分に予想できるため、この設定に到った。

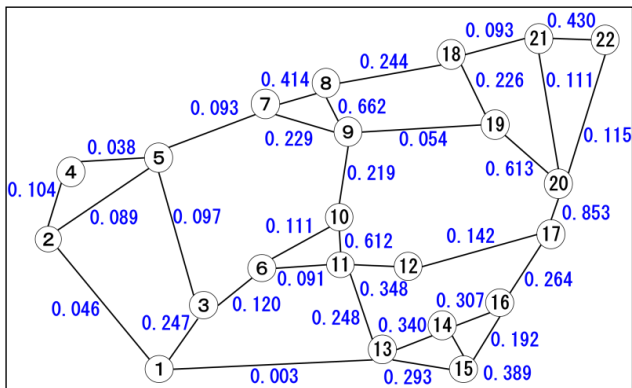


図6 ネットワーク各リンクの連結信頼度

ネットワーク上の既設構造物は、橋梁、トンネル、シェッド、盛土、斜面および切土で、総数 8,739ヶ所になる。このときの構造物耐震化整備前の各リンクの連結信頼度は 0.003 (リンク 8) ~0.853 (リンク 26) で、対象ネットワーク全点間連結信頼度は 1.93201×10^{-9} であった。

3.2 耐震化整備優先度の結果と評価

構造物の整備優先順位は、表 3 の重要度を考慮せずに、ネットワーク全点間連結信頼度で順位決定した場合と、路線の特性を反映させてその重要度を考慮した場合との 2 ケースについて、それぞれ優先度 1 位から 500 位までの耐震化優先構造物位置の結果を図 7、図 8 にそれぞれ表示した。

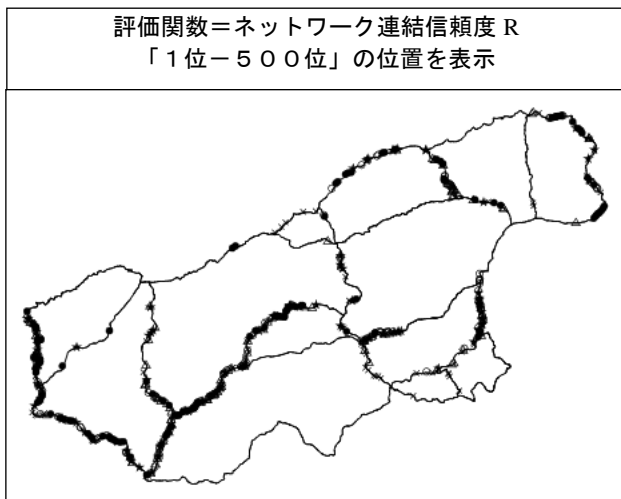


図7 構造物耐震化整備優先度結果(重要度考慮なし)

(1) 道路の重要度を考慮しない優先度

図 7 から、整備優先構造物が集中しているリンクは、そのリンクが切断した場合に代替路線の迂回距離が長い

リンクである傾向が伺え、整備優先度 1 位から 500 位までの耐震化する構造物は対象エリア全体に分布している。また、距離が短いリンクにある構造物の優先度が高くなる傾向をもつが、これはリンク内の構造物総数が少ないことから、耐震化による構造物の信頼度向上がネットワーク全体の連結信頼度に高く感応することに起因する。

(2) 道路の重要度を考慮した場合

図 8 に示すように、道路の重要度の影響が強く反映され、1 位から 500 位までの整備優先構造物の位置は全て第 1 次緊急輸送道路に集中した。

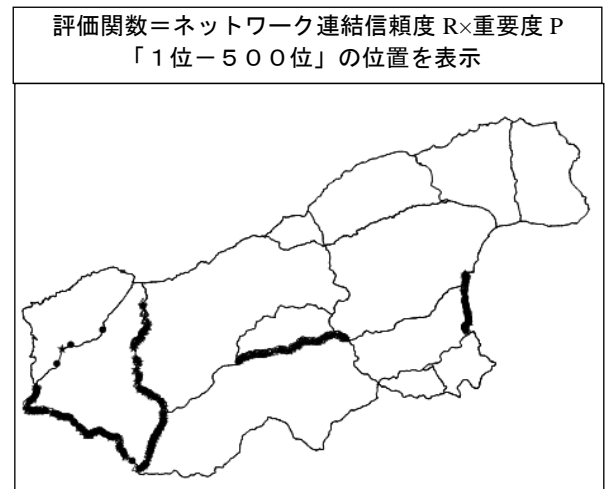


図8 構造物耐震整備優先度計算結果(重要度考慮)

注目すべきは、リンク 1、リンク 2 およびリンク 23 にある構造物の整備優先度が重要度の考慮あり、なしに拘わらず高いことが示された。このことは、これらの区間の構造物を優先的に耐震化整備すべきことを表している。また、これら優先度の高い構造物は主に盛土や斜面・切土など土構造物に集中した。表 1 に示す土構造物の震度不通率は高く、これらの耐震化がネットワークの連結信頼度向上に強く影響するためである。

ちなみに、リンク 1 とリンク 2 は穴水と輪島を、また、リンク 23 は穴水と珠洲飯田を結ぶ幹線道路であり、今まで道路線形の改修や拡幅が行われ、現在も道路改良中の区間である。行政のこれまでの経験と実態に基づく整備優先度が、今回の道路管理システムから立ち上げたネットワーク連結信頼度による整備優先度とほぼ同じ結果を得たことになる。つまり、これまでの行政施策の客観性を示したに他ならない。

(3) ネットワーク連結信頼度の向上

道路構造物の整備過程で、ネットワーク連結信頼度が向上していく状態を図 9 に示す。

道路の重要度を考慮しない場合の整備優先度 1 位はリンク 30 の斜面・切土の耐震化整備で、ネットワーク連結

信頼度は整備前から 1.38173×10^{-10} だけ向上して 2.07019×10^{-9} になる。優先 500 箇所耐震化整備後のネットワーク連結信頼度は 5.85858×10^{-5} に向上した。

一方、道路の重要度を考慮した場合の整備優先度 1 位はリンク 2 の斜面・切土で、この整備によりネットワーク信頼度は 9.59782×10^{-11} だけ向上して 2.02799×10^{-9} になり、優先 500 箇所整備後のネットワーク連結信頼度は 1.51843×10^{-6} の向上に留まる。何故なら、道路の重要度を考慮した場合には、優先順位が重要度に強く影響され、ネットワークの連結信頼度を最大向上させる箇所や区間ではなく、道路の重要度の高い箇所や区間の構造物が選択されるからである。ただし、仮に、優先順位 500 箇所までの整備計画であれば、道路の重要度に応じた便益や損出が加わるため、費用便益からは合目的な結果を得ることは言うまでもない。

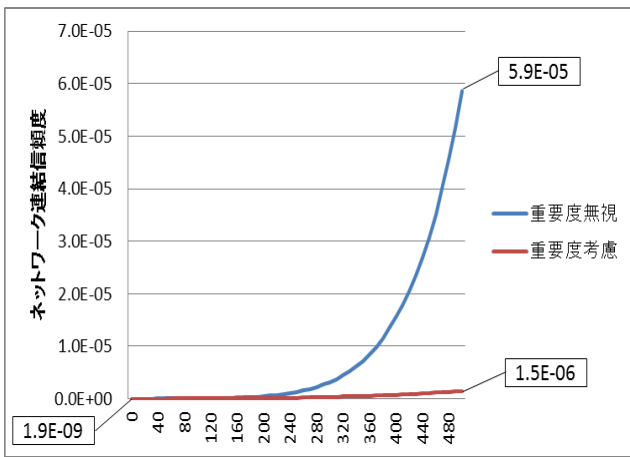


図 9 道路構造物耐震整備と連結信頼度の向上

(4) 整備優先の決定要素とこれまでの行政実績との検証

これまでの検討から、耐震化整備優先順位の決定は以下の 5 要素が考えられる。

- ① リンクの接続：起終点ノードの接続リンク数が多いリンクを切断するとネットワーク連結信頼度を大きく低下させることから、このリンクの整備が優先される。
- ② 構造物の種類：構造物の種類別の感度は、斜面・切土（震度 6 に対して信頼度 0.8666）、盛土（0.8729）、橋梁（0.9904：1996 以前）の順番になることから、信頼度の低い構造物の耐震化が優先される。
- ③ 土構造物（斜面切土、盛土）の延長：斜面切土や盛土の延長が長い方が一箇所当たりの信頼度が低くなるため、これらの耐震化整備でネットワークの連結信頼度の向上感度が高くなり、整備優先度は上位になる。
- ④ リンク内の構造物量：斜面・切土や盛土の総延長

が短いリンクや橋梁数が少ないリンクは、構造物 1 箇所の耐震化整備によりリンクの連結信頼度が大きく向上するので整備優先度が高くなりやすい。

- ⑤ リンクの重要度：リンクの重要度を考慮すると、ネットワーク連結信頼度の向上感度より重要度の高いリンク感度が反映され、そこでの整備が優先的に決定される。

2007 年 3 月能登半島地震発生時にその地域の緊急輸送道路は機能を十分果たせず、大きな反省と課題を残した^{24)~26)}。本検討では、この事実を教訓にして、緊急輸送道路の「最大活用」、「長寿命化」および「維持管理の高度化・効率化」を図るため、地震時および災害時の緊急輸送道路機能を確保する道路管理マネジメントとして、特に、橋梁、トンネル、土構造物などの道路構造物で構成される緊急輸送道路ネットワークの耐震化信頼度および耐震化優先度の決定法について提案した^{22) 23)}。

以上の成果を、現在、奥能登地域にて実施された、または実施されている道路管理の実状と比較すれば、

- ① 実務上の道路管理業務にて蓄積された保守点検結果（構造物のクラック発生など）や履歴状態を持つ構造物の危険度察知や評価と一致した。なお、事故や火災に対しても通行規制箇所や迂回区間などの指定が、現場業務の支援機能と合致している。
- ② 関係市町発信の各種自然災害ハザードマップや緊急時に対する通行車両の避難経路や避難所などに関して、本報告の成果はそれらの妥当性を示す結果であり、災害時の予防計画や応急計画でも支援できることが判明した。
- ③ 耐震化整備優先度計画を提案した。特に、緊急輸送道路ネットワーク信頼度評価に不可欠な各種道路構造物の震度別被災率が能登半島地震の膨大な被害実態から整理でき、この整備計画対象とした石川県奥能登地域の道路耐震化や冗長性の活用に関して、行政のこれまでの経験と実態に基づく整備優先度とほぼ同じ結果を得た。つまり、これまでの行政施策の妥当性と客観性を示したおとなる。
- ④ また、この耐震化整備優先度計画は、これまで行政の経験と意思から決められてきたが、本報告の成果から、今後、より客観的指標の提示と論理的な意思決定を可能にした。特に、地域住民への説明責任が果たせ、決定根拠理由として有効になると考えられる。
- ⑤ 石川県奥能登地域の緊急輸送道路ネットワークに関する耐震化整備優先度の妥当性を受け、次章では、本報告の大きなミッションである南海トラフ巨大地震時に救援・支援が強く期待される「東海北陸自動車道」の現状の耐震化信頼度および耐震化に向けての優先区間や優先箇所への適用を図る。

4. 実効性のある提言

前述した2章、3章の緊急輸送道路の耐震化信頼度の算定および耐震化優先度決定の成果を、本目的のひとつである東海北陸自動車道に適用した。

周知のように、太平洋岸が南海トラフ巨大地震にて甚大な被害を受けた際、北陸地方からの救援、支援がもつとも期待される緊急輸送道路としては、この東海北陸自動車道となるからである。

図10は、東海北陸自動車道の北陸地方区間、南から順に白川郷IC、五箇山IC、福光ICそして終点小矢部JCTを対象に、本自動車道の各種道路構造物の現状を示した。



図10 東海北陸自動車道白川郷IC～小矢部JCT区間の道路構造物

いま、南海トラフ巨大地震マグニチュード9クラスの発生は、この北陸地方までの距離や中部山岳地帯に分布する堅固な飛騨片麻岩地帯の存在から、最大で震度5強クラス程度の影響を受けることになる。

図11、図12は、この震度影響下における白川郷IC～五箇山IC間および福光IC～小矢部JCT区間、それぞれの各種道路構造物の位置と、区間の耐震化信頼度を示した。この信頼度の算定は、前述2章の能登半島地震の被災実績に基づく結果である。例えば、図11の白川郷IC～五箇山IC間では山岳地帯の線形を反映して、トンネル5箇所、橋梁20箇所、切土および斜面と盛土それぞれ数十箇所の道路構造物があり、震度5に対して耐震信頼度



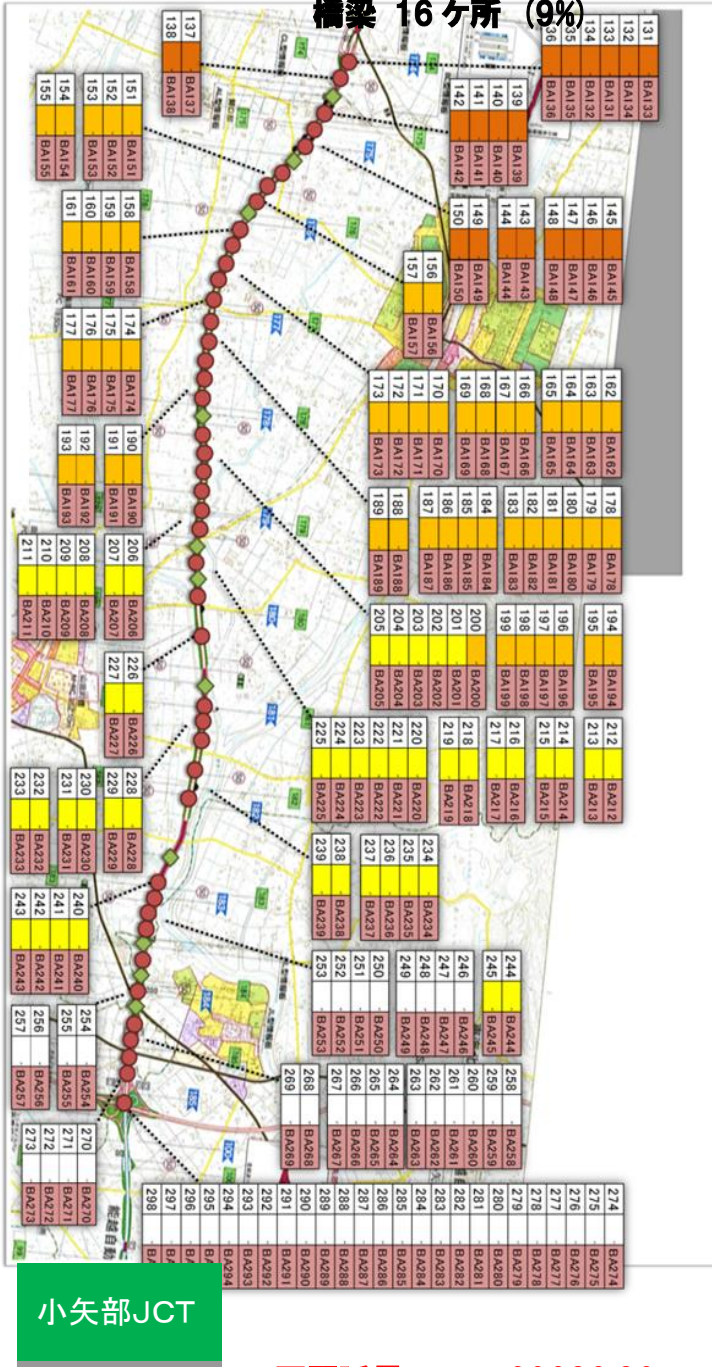
図11 白川郷IC～五箇山IC間の耐震化信頼度と構造物耐震化優先度

8. 0×10^{-3} の値を得た。一方、図12から、福光IC～小矢部JCT間はほとんどで平野地帯を通過する。このことから、盛土を中心とした道路構造物となり、この区間の信頼度は 4.5×10^{-6} に止まる。この信頼度の低さは第2章で示した盛土の地震時損傷度がトンネルや橋梁などに比して大きく、しかも、このそれらが直列に存在するためである。

福光IC

盛土 168ヶ所(91%)

橋梁 16ヶ所 (9%)



区間延長 : 23282.80m

*耐震整備優先度は

図 11 を参照

耐震化信頼度 : 4.5×10^{-6}

図 12 福光 IC から小矢部 JCT 区間の耐震化信頼度と
構造物耐震化優先度

さらに、図 11、図 12 それぞれには白川郷 IC から小矢部 JCT まで区間全体に対する各道路構造物の耐震化優先度 1 位から 500 位までが記されている。その順位は

図 11 下の凡例に示した。それらの決定結果から、以下に述べる実効性ある提案が可能となった。

- ① 耐震化優先度順位の高い構造物のほとんどが白川郷 IC～五箇山 IC 間に集中した。いま、全区間を IC 間の区間ごとで整理すれば、この白川郷 IC から五箇山 IC 間が耐震化優先度の最も高い区間と判明した。このことは、この IC 区間にあるトンネルや橋梁がほとんど南海トラフ巨大地震に対して（震度 5 強に対して）安定を保つと考えられ、この IC 区間の盛土や切土など土構造物の耐震化が東海北陸自動車道（北陸地方区間）全体の耐震化信頼度を大きく押し上げることに起因している。
 - ② 一方、福光 IC～小矢部 JCT 間では、盛土構造物の直列区間であり、それらのほとんどは東海北陸自動車道全体に対する耐震化優先度の順位が低い。つまり、この IC 区間の盛土構造物を中心とした耐震化を図っても、本自動車道全体の耐震化信頼度の向上に強く反映しない結果となった。
 - ③ 図には示さなかった五箇山 IC～福光 IC 間の構造物耐震化優先度も考慮しての結論は、この救援、支援が期待される東海北陸自動車白川郷 IC～小矢部 JCT 区間から見た道路構造物の耐震化優先順位が、最優先区間に白川郷 IC～五箇山 IC 間、次に五箇山 IC～福光 IC 間、そして、最後に福光 IC～小矢部 JCT 間となり、帰しくも本自動車道の南から北への IC 区間順で優先的となることが判明した。
 - ④ 実務的には、現在、NEXCO 中日本が東海北陸自動車道の一宮 JCT から白川郷 IC 南に位置する清見 IC（高山 IC）までが既に 4 車線化を完成している。この道路 4 車線化事業は、地震時に機能確保でき、最も有効な耐震化性事業と言って過言ではない。写真 1、2 でも示すように、このことは最近の地震に対しての実績からも実証できる。地震時直後の 4 車線をもつ緊急輸送道路では、緊急車両や工事車両の通行止めはほとんどなく、あってもきわめて短期間であった事実が示すとおりである。したがって、ここでは、清見 IC から先の白川郷 IC への 4 車線化を迅速に進めることこそが、南海トラフ巨大地震に対する東海北陸自動車道の耐震化信頼度を向上させるきわめて有効な事業となり、強く期待できる。本報告で得た耐震化信頼度および道路構造物の耐震化優先度の成果が、実務面からの 4 車線化事業の工程と全く一致したことは興味深い。そのため、救援、支援活動が期待される緊急輸送道路としての東海北陸自動車道は現状暫定 2 車線区間を南から北へ速やかに 4 車線化を図ることを強く提案したい。
- 以上のように、本報告の大きな成果は、実際の道路現場に即した耐震化に向けて、緊急輸送道路の行政管理シ

システムを構築できたことになり²⁷⁾、緊急輸送道路の重要性が問われている現在、本報告の成果の活用を強く望みたい。

謝辞

本報告の検討に際しては、石川県土木部より能登半島地震被災データおよび道路管理情報の提供を頂きました。関係各位にはここに深甚なる謝意を表します。なお、本報告が平成 25 - 27 年度金沢工業大学私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に拠ることを付しておきます。

参考文献

- 1) 石川県 “平成 19 年能登半島地震災害記録誌” , 2009. 3.
- 2) 川村國夫、他 “能登半島地震から学ぶ「地域防災計画」”, 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol. 59, No. 2, pp. 12-15, 2011. 2 .
- 3) 為重誠, 川村國夫, 他 “能登半島地震による能登有料道路の被災と復旧—盛土の被害と対策工事について—”, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No. 4, pp. 289-305, 2009.
- 4) 古畑貴志, 吉澤憲治, 小野孝司, 寺田守正, 吉田和正, 矢野高一, 中村喜輝, 佐野嘉紀, 井上 明, 金田重郎 “Web-GIS を用いた道路管理システム“京都道守くんの開発”, 情報処理学会第 69 回全国大会 3ZA-9, pp. 4-599-600, 2007.
- 5) 東京都 “震災時等における道路の被害情報共有システムについて”, 道路行政セミナー, 2013. 2.
- 6) 富山県 “道路施設維持管理システムの構築について”, 道路行政セミナー, 2012. 6.
- 7) 能島暢呂 “ネットワーク信頼性解析に基づく道路網の地震防災戦略について”, 第 24 回地震工学研究発表会, pp. 1293-1296, 1997. 7.
- 8) 能島暢呂, 山中敏裕 “道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価”, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, No. J-12, pp. 3205-3210, 1998. 11.
- 9) 大山達雄, 諸星穂積 “路線数え上げによるネットワークシステムの連結性の定量的評価とわが国道路網への応用, 都市の交通および施設配置に関する総合的研究”, 平成 14 年度~平成 16 年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp. 279-285, 2005. 2.
- 10) 関谷浩孝, 上坂克己, 小林正憲 “道路ネットワークの連結信頼性を考慮した道路構造物の補修優先順位付け”, 第 28 回日本道路会議 20001, 2009.
- 11) 喜多敏春, 近田康夫 “道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定におけるゲーム理論の適用”, 構造工学論文集 Vol. 59A, pp. 244-251, 2013.
- 12) 独立行政法人 人口問題・社会保障研究所報告 2008.
- 13) 石川県防災会議 “石川県地域防災計画 地震災害対策編”, 石川県ホームページ, 2014.
- 14) 公益社団法人 日本道路協会 “道路震災対策便覧(震前対策編)”, 平成 18 年度改訂版, 2006.
- 15) 中山昌一郎, 朝倉康夫 “道路交通の信頼性評価”, コロナ社, 2014.
- 16) 損害保険率算出機構 “国・自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査(平成 25 年度調査) 報告書”, 地震保険研究 27, 2014.
- 2011.
- 18) 若林拓史, 飯田恭敬 “交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論適用の考え方”, 土木計画学研究・講演集 NO. 10, pp. 125-132, 1987.
- 19) 若林拓史, 飯田恭敬, 福島 博 “道路網の信頼性解析に対するモンテカルロ法の適用”, 土木計画学研究・講演集 NO. 11, pp. 259-266, 1988.
- 20) 田村重四郎, 川上英二 “モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法”, 土木学会論文報告集第 311 号, pp. 37-48, 1981.
- 21) 石川県 “石川県橋梁長寿命化修繕計画”, 2013.
- 22) 西野尚志, 川村國夫, 他 “2008.7 浅野川豪雨災害に基づく斜面崩壊ハザードマップと今後の防災課題に関する提案”, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No. 2, pp. 311-328, 地盤工学会, 2013. 5
- 23) 宮本義浩, 川村國夫 “前例を生かし水抜きボーリングを駆使して未固結砂質地山を掘る”, トンネルと地下, Vol. 44 , No5, pp. 17-25, 日本トンネル技術協会誌, 2013. 5
- 24) K. Kawamura and T. Muroi “Cause and restoration of damage in road embankment by Noto”, Proc. on 14th Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 1, 2011. 3, Singapore
- 25) 川村國夫 “能登半島地震による能登有料道路の被災と復旧”, 第 55 回地盤工学シンポジウム論文集, 2010. 11, 地盤工学会
- 26) 森本励, 川村國夫, 他 “能登半島地震による「のと里山海道(旧能登有料道路)」崩壊盛土の特徴と盛土内地下水水位の推定に関する提案—山岳・丘陵部道路盛土の地震時安定—”, 地盤工学ジャーナル, 地盤工学会 (登載決定)
- 27) 松田洋一郎, 川村國夫, 他 “緊急輸送道路の最適管理に向けた道路構造物情報の統合化と耐震整備への適用—能登半島地震に基づく石川県奥能登地域の道路管理総合システム構築に向けて—”, 交通工学会論文集, 交通工学会 (登載決定)

研究テーマ 2

課題 2-5

超巨大災害時の自然エネルギー利用 による地域の創電・節電対策

金沢工業大学 垂水弘夫 教授

課題 2-5 超巨大災害時の自然エネルギー利用による地域の創電・節電対策

金沢工業大学

教授

垂水弘夫

超巨大災害
創電・節電

避難施設
太陽光発電

自然エネルギー利用
コージェネレーション設備

1. 研究目的

超巨大災害時には電力の復旧には長時間を要するため、被災地で確保できる電力は当面の間、自然エネルギーに限定される。直接電力の得られる太陽光発電を中心としたローカルエネルギー群である。一方、避難施設において最低限必要とされる電力は、食事に必要な加熱・給湯・冷蔵用、冬期であれば暖房用、夏期であれば熱中症を防ぐための扇風器・エアコンの運転用、給水・シャワーを使用するためのポンプ動力用、状況把握や外部との情報のやりとり、自治活動を行うためのTV・パソコン・プリンタ用などである。

本研究では、巨大災害時に避難施設となる学校建築を対象に、避難者の最低限の生活に必要なエネルギー需要に対し、太陽光発電と不足分を補う小型コージェネレーション設備等の適用を検討することで、避難機能を有効に発揮できる学校建築のエネルギー設備機器・整備指針を提示することを目的とする。

2. 避難所施設に関する調査

(1) 検討対象地域の選定

本研究を進めるにあたっては、現実の様々な制約条件を反映させるべく、具体的な地域を選定してモデル化と検討を行うこととした。選定した地域は、兵庫県洲本市である。政府は平成 26 年 3 月に、「南海トラフ地震防災対策推進地域」に 707 の市町村を指定した。中でも沿岸部の地域のうち津波による影響を受け易いと判断された 139 市町村が、「津波避難対策特別強化地域」にも指定され、洲本市はこれに該当する地域の一つである。淡路島は 3 つの市から成っており、何れも沿岸部を有しているが、南部の洲本市と南あわじ市が同特別強化地域に指定されており、明石海峡大橋のある北部の淡路市は指定されていない。太平洋から大阪湾に繋がる地域では、和歌山県、徳島県を含め、両県以南の沿岸部の市町村は全て同特別強化地域に指定されているが、大阪府、兵庫県の沿岸部市町村の中で、同特別強化地域に指定されているのは洲本市と南淡路市の 2 自治体のみである。本研究では、そうした立地条件にある洲本市を具体的なモデル化適用対象地域に取り上げ、上記の検討を進める。

洲本市長に文書で調査への協力依頼を行い、快諾を得たのが平成 26 年 1 月、市役所を訪問し避難所となる学校施設の図面や現有設備のデータを入手したのが平成 26 年

電力の復旧には時間を要するため電力を得るには
避難所敷地内で確保できる太陽光発電による
自然エネルギー利用を図る必要がある

被災地において最低限必要とされる電力は、

食事の準備に必要な
加熱用や
食事の**保存用**

生活に必要な
照明や**暖冷房**

外部との連絡
に必要な**情報**
通信用

本研究目的

避難所となる学校建築に最大限の太陽光発電を適用し

1) 避難・復旧施設のエネルギー充足レベル評価

2) 必要なエネルギー供給設備の設置容量を解析・提示

図 1 目的と背景のフロー図

選定した地域は、兵庫県洲本市

洲本市は、政府の定める

「南海トラフ地震防災対策推進地域」かつ

「津波避難対策特別強化地域」に指定されている。



図 2 検討対象地域とした洲本市

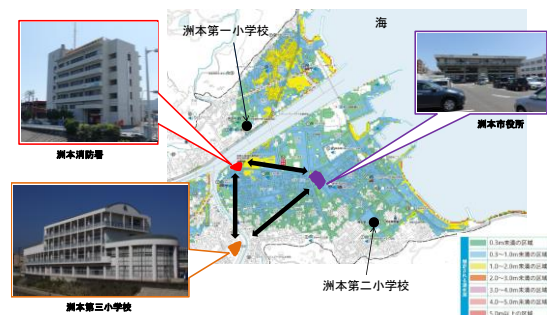


図 3 被災予想マップと防災関連主要施設

4月、大学院生とともに現地の小学校施設等の現地調査を行ったのが平成26年7月であった。図1に研究目的と背景のフロー図を、図2に検討対象地域として選定した洲本市の位置を示す。人口は約45,000人である。図3は洲本市役所から提供を受けた被災予想マップに、調査対象とした洲本市立第三小学校の他、洲本市役所と消防署を含めて表示し、海との位置関係を明示したものである。旧市内には第一から第三まで3つの小学校があるが、第三小学校が最も海から遠く、海拔も高いため、ここを検討対象施設とした。

(2) 洲本市立第三小学校

図4のうち1)と2)は、調査に歩いた第一および第二小学校の外観写真である。3)～6)が校長先生および教頭先生に内部をご案内頂いた第三小学校の外観および教室・廊下・体育館である。体育館は天井が張られておらず、屋根面からの輻射熱を直接人体が受けるため、7月末の調査当日は数分間の滞在が限度と云うくらいの高温暑熱の温熱環境であった。発災時期が夏や冬のケースでは、避難スペースとして教室あるいは広々と設計されている廊下部分を使用する必要があると判断された。



1) 洲本第一小学校



2) 洲本第二小学校



3) 洲本第三小学校



4) 洲本第三小学校 (廊下)



5) 洲本第三小学校 (教室)



6) 洲本第二小学校 (体育館)

図4 洲本市内実地調査 (平成26年7月撮影)

各面における太陽光パネルの設置可能面積の算出

*図の赤く囲まれた部分を表面積として計算し設置可能面積を算出
*现阶段では施工面調査不足のため、設置可能面積を各表面積の約2/3としている。



①屋根面設置可能面積

校舎: $(32 \times 13.5 + 41.5 \times 13.5 + 9.8 \times 31.3) \times 2/3 = 866.0 \text{ [m}^2\text{]}$
体育館: $40 \times 21 \times 2/3 = 560.0 \text{ [m}^2\text{]}$

図5 太陽光パネル水平面設置可能面積の検討

(3) 太陽光パネル設置可能面積と発電出力

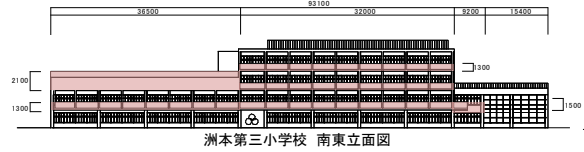
入手した配置図・平面図・立面図等を元に太陽光パネルを設置可能な面積を、水平面および鉛直面について検討した。図5および図6にその概算結果を示す。屋根面および窓を除く外壁面のうち着色した部分のさらに3分の2を設置可能面積としたところ、約1795m²となった。太陽光パネルにおける出力を平方メートル当たり150Wと見込むと、洲本第三小学校の太陽光発電出力は約270kWと推計される。

3. 屋根面及び鉛直面における太陽光発電量の解析

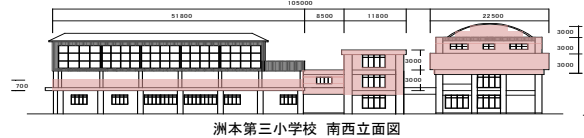
わが国の気象観測における日射量の観測地点は思いの外少なく、洲本市に最も近い観測点は四国の高松気象台となる。それも全天日射量が観測されているだけなので、屋根面や外壁面に太陽光パネルを適用した場合の発電量を推定するためには、提案されている日射の直散分離の式などを用いる必要がある。そこで本研究では、方位別や傾斜角別に観測を実施している金沢工業大学の観測データと、日射観測地点としては最も近い福井気象台の全天日射データの直散分離結果を突き合わせ、その推定精度を確認した上で、高松気象台の日射観測データを洲本第三小学校に適用することにした。

(1) 金沢工業大学における日射及び太陽光発電観測

鉛直面日射・太陽光発電観測システムの外観を図8に示す。図には、8方位(S、SW、W、NW、N、NE、E、SE)の鉛直面に設置した日射計(以下、鉛直面日射計)の一部が見られるほか、観測に用いた全天日射計についても提示した。5階建の屋上に設置しており地上からの



②南東方向の壁面設置可能面積(校舎のみ)
 $(3.4 \times 36.5 + 1.3 \times 32 \times 3 + 1.5 \times 9.2) \times 2/3 = 175.1 \text{ [m}^2\text{]}$



③南西方向の壁面設置可能面積
校舎: $(6 \times 22.5 + 3 \times 22.5 \div 2 + 6 \times 11.8 + 3 \times 8.5) \times 2/3 = 176.7 \text{ [m}^2\text{]}$
体育館: $(0.7 \times 51.8) \times 2/3 = 24.2 \text{ [m}^2\text{]}$

図6 太陽光パネル壁面設置可能面積の検討

洲本第三小学校における太陽光パネルの設置可能面積			
	校舎	体育館	合計
屋根	866.0m ²	560.0m ²	1420.0m ²
壁面	南東	—	175.1m ²
	南西	24.2m ²	200.9m ²

出力の算定
太陽光モジュールにおける定格出力は150[W/m²]として算出
最大出力約270kW

図7 太陽光発電による電力供給サイドの検討



(a) 鉛直面日射



(b) 全天日射計

図8 鉛直面日射・太陽光発電観測システムと各日射計

表1 観測機器の型番等

使用機器	製造会社	型番	測定間隔
鉛直面日射計	Kipp&Zonen	CMP-11	1分
全天日射計	Kipp&Zonen	CMP-11F	10秒
太陽光発電パネル	三菱電機株式会社	PV-MG185GX	1分



図9 30°南傾斜面に設置した日射計と太陽光発電パネル

表 2 日射及び発電量観測における月別有効日数

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
日射量 [日]	2010年 31	28	31	30	26	30	31	31	30	31	30	31
発電量 [日]	2010年 19	0	31	28	21	0	10	22	25	29	25	22
	2011年 21	10	14	26	5	16	31	31	0	25	25	18

日射計の高さは 22.5m で、周囲にこれよりも高い建物は無い。敷地は石川県ソフトリサーチパークの一角で、その周囲には水田が広がっている。日射計 (Kipp&Zonen 製) 及び太陽光発電パネル (三菱電機製) の型番と測定時間間隔を表 1 に整理した。また、図 9 には、鉛直面で得られる日射量及び発電量との比較に用いる 30° 南傾斜面に設置した日射計と太陽光発電パネルの様子を示す。同一建屋の南方向に 30m 離れた 4 階屋上に設置しており、日射計の仕様及び測定時間間隔は鉛直面日射計と同様である。表 2 は、日射量と太陽光発電量の観測データについて 2 年間の月別有効日数(データ欠損の無い日数)を整理したものである。月別の数値を算定する場合、2 年間の有効データを用いて該当月の日平均値を求め、それに月日数を乗じている。

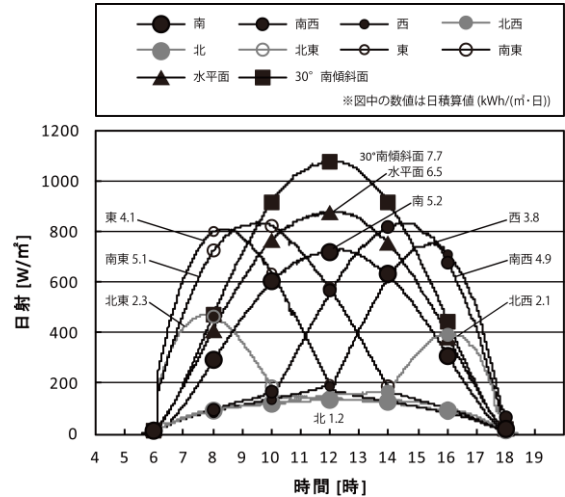
(2) 快晴日における日射観測データ

日射観測データについて、春分・夏至・秋分・冬至の近くの快晴日を対象にグラフを作成した。図 10 に、上述の鉛直面 8 方位と水平面、30° 南傾斜面における時系列データを示す。(1) の春分近くの快晴日における日射量の特徴をまとめると次のようになる。

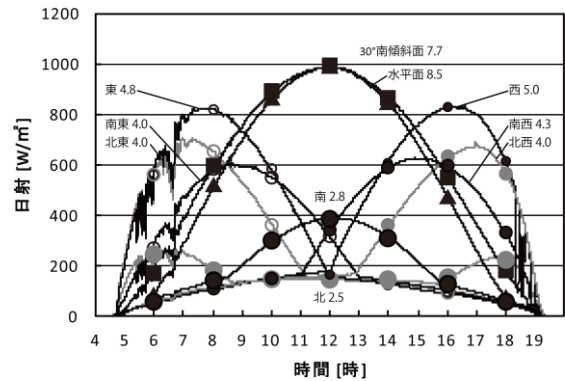
- 1) 観測データのうち 30° 南傾斜面の日積算日射量が約 7.7kWh/(m²・日) と最も大きく、これに水平面の約 6.5 kWh/(m²・日)、南鉛直面の約 5.2 kWh/(m²・日) と続く。
- 2) 南東鉛直面が約 5.1 kWh/(m²・日)、南西鉛直面が約 4.9 kWh/(m²・日) で、この時期、南鉛直面の値とほぼ同等レベルにあり、水平面の 8 割程度の値である。
- 3) 東鉛直面の約 4.1 kWh/(m²・日)、西鉛直面の約 3.8 kWh/(m²・日) は、水平面のおよそ 3 分の 2 の値である。
- 4) 北東鉛直面の約 2.3 kWh/(m²・日)、北西鉛直面の 2.1kWh/(m²・日) は、水平面のおよそ 3 分の 1 の値である。
- 5) 北鉛直面は約 1.2 kWh/(m²・日) で、水平面のおよそ 5 分の 1 の値である。

次に、(2) の夏至近くの快晴日における日射量の特徴をまとめると次のとおりである。

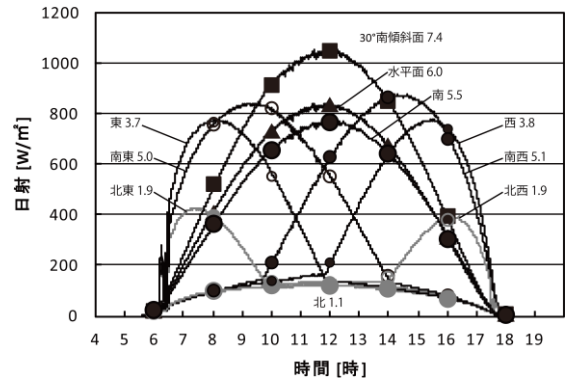
- 1) 観測データのうち水平面の日積算日射量が約 8.5 kWh/(m²・日) と最も大きく、これに 30° 南傾斜面の約 7.7kWh/(m²・日) が続く。南鉛直面は約 2.8 kWh/(m²・日) まで小さくなっている。
- 2) 南東鉛直面が約 4.0 kWh/(m²・日)、南西鉛直面が約 4.3 kWh/(m²・日) で、水平面の半分程度となっている。



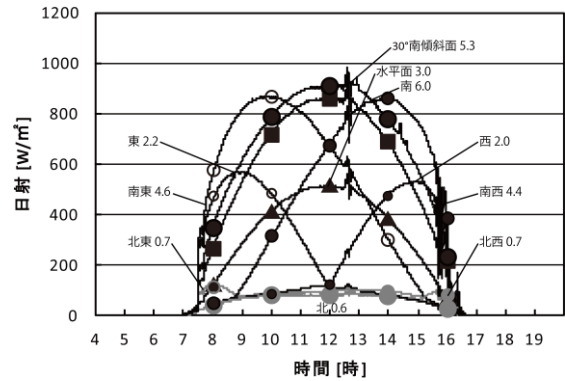
(1) 春分近くの快晴日



(2) 夏至近くの快晴日



(3) 秋分近くの快晴日



(4) 冬至近くの快晴日

図 10 鉛直面等の日射観測データ

3) 東鉛直面の約 4.8 kWh/(m²・日)、西鉛直面の約 5.0 kWh/(m²・日)は、水平面の 6 割弱程度の値である。夏至近くの快晴日の日射量は、南東及び南西鉛直面よりも、東及び西鉛直面の方が大きい。

4) 北東鉛直面及び北西鉛直面ともに 4.0kWh/(m²・日)となっており、これは水平面のおよそ半分程度の値で、南東及び南西鉛直面に近い値を呈している。

5) 北鉛直面は約 2.5 kWh/(m²・日)で、水平面のおよそ 4 分の 1 の値である。他の時期と異なり、北鉛直面でも 6 時や 18 時をピークに直達日射を受ける時間帯があるため、春分や秋分のおよそ 2 倍の値となる。

(3) の秋分近くの快晴日における日射の特徴は、(1) の春分の日近くのデータとほぼ同様であるため、ここでは割愛する。(4) の冬至近くの快晴日における日射量の特徴をまとめると次のとおり。

1) 観測データのうち南鉛直面の日積算日射量が約 6.0 kWh/(m²・日)と最大で、これに 30° 南傾斜面の約 5.3kWh/(m²・日)が続く。水平面は約 3.0 kWh/(m²・日)まで小さくなっている。

2) 南東鉛直面が約 4.6 kWh/(m²・日)、南西鉛直面が約 4.4 kWh/(m²・日)で、水平面の 1.5 倍前後の値になっている。

3) 東鉛直面の約 2.2 kWh/(m²・日)、西鉛直面の約 2.0 kWh/(m²・日)は、水平面の 7 割弱程度の値である。冬至近くの快晴日の日射量は、東及び西鉛直面と比較して、南東及び南西鉛直面の値が約 2 倍となっている。

4) 北東鉛直面及び北西鉛直面ともに 0.7kWh/(m²・日)で、北鉛直面の約 0.6 kWh/(m²・日)とともに、他の面と比べても小さな数値となっている。

(3) 日積算日射量に関する解析

表 3 に、日積算日射量の月及び年平均値を鉛直面 8 方位、水平面及び 30° 南傾斜面について整理した。表中の網掛けを施したセルは、30° 南傾斜面の年平均値 3.92 kWh/(m²・日)の 50%以上の日射量が得られる部分を表している。年平均値がこれに該当する方位等は、数値の大きいものから順に、水平面 (3.62)、南鉛直面 (2.53)、南西鉛直面 (2.49)、南東鉛直面 (2.46)、西鉛直面 (2.11)、東鉛直面 (2.08)であった。また、月平均値についてみると、網掛けの月数が多い方位等において年平均値も大きくなる傾向が読み取れる。鉛直面 8 方位の比較では、最大となる南鉛直面の 2.53 kWh/(m²・日)に対して、最小は北鉛直面の 1.17 kWh/(m²・日)で、これは南鉛直面の 46%に相当している。

図 11 は月間と年間の日射量を表している。月間値の上位 2 ヶ月 (差が 1kWh/(m²・日)以内の場合は 3 ヶ月まで)に丸印、下位 2 ヶ月に四角印を付した。30° 南傾斜面及び水平面については、上位 2 ヶ月が 8 月と 7 月、下

表 3 鉛直面 8 方位等の日積算日射量の月平均及び年平均

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
南	1.99	2.74	2.44	2.43	2.42	2.32	2.33	3.15	3.29	3.18	2.69	1.44	2.53
南西	1.65	2.29	2.23	2.58	2.78	2.75	2.85	3.53	3.23	2.73	2.10	1.19	2.49
西	1.08	1.56	1.77	2.35	2.77	2.90	2.99	3.34	2.65	1.89	1.25	0.76	2.11
北西	0.76	0.98	1.21	1.69	2.17	2.44	2.38	2.36	1.67	1.09	0.69	0.51	1.50
北	0.72	0.86	0.99	1.26	1.67	1.94	1.77	1.64	1.17	0.87	0.61	0.48	1.17
北東	0.75	1.02	1.26	1.68	2.25	2.46	2.40	2.43	1.68	1.10	0.69	0.51	1.52
東	1.11	1.66	1.84	2.23	2.74	2.81	2.85	3.23	2.55	1.88	1.32	0.75	2.08
南東	1.69	2.40	2.30	2.46	2.70	2.64	2.69	3.39	3.11	2.73	2.22	1.19	2.46
水平面	1.64	2.53	3.10	3.98	4.91	5.32	5.33	5.77	4.40	3.12	2.06	1.24	3.62
30°南傾斜面	2.09	3.19	3.51	4.20	4.81	4.96	5.03	5.86	4.96	3.95	2.90	1.60	3.92

(30° 南傾斜面における年平均値の50%以上に網掛け)

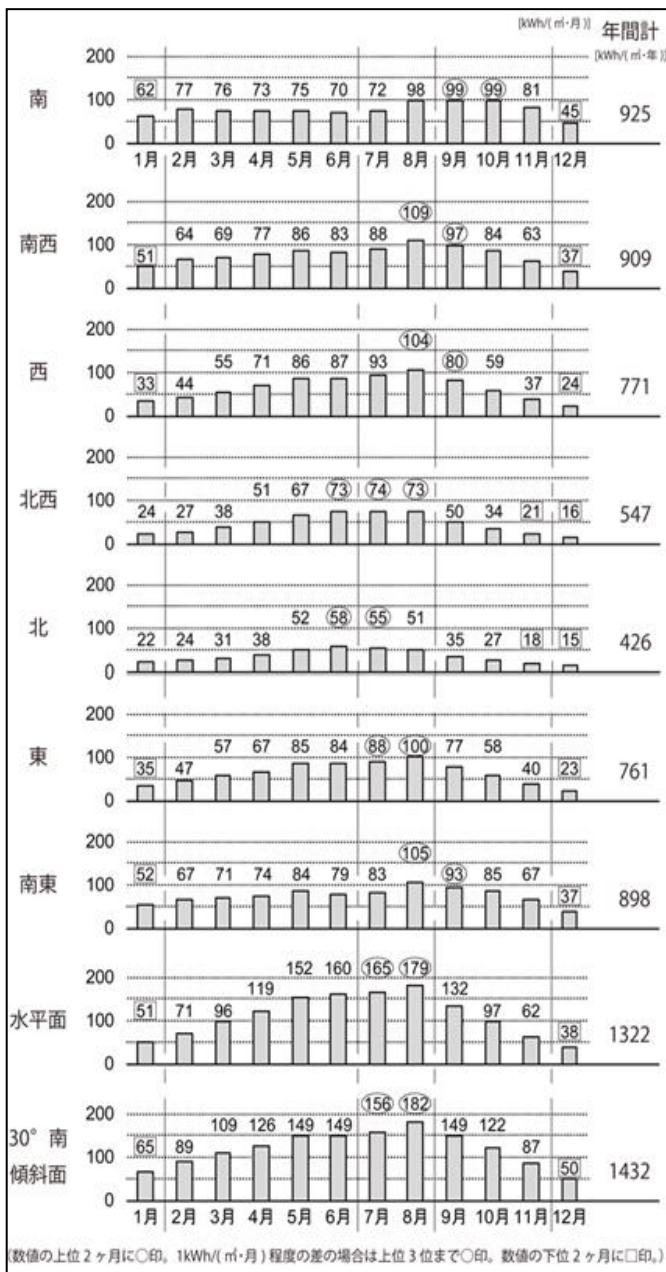


図 11 鉛直面 8 方位の月別・年間日射量

表 4 水平面と 30° 南傾斜面に対する各鉛直面の日射

	南	南西	西	北西	北	北東	東	南東
鉛直面日射量 [kWh/(m ² ・年)]	925	909	771	547	426	556	761	898
(鉛直面) [%]	0.70	0.69	0.58	0.41	0.32	0.42	0.58	0.68
(水平面) [%]	0.65	0.63	0.54	0.38	0.30	0.39	0.53	0.63
(30° 南傾斜面) [%]	0.65	0.63	0.54	0.38	0.30	0.39	0.53	0.63

水平面日射量: 1322kWh/(m²・年)
30° 南傾斜面日射量: 1432kWh/(m²・年)

位 2 ヶ月が 12 月と 1 月に集中している。これに対して鉛直面では、これらの月に上位・下位の数値が現れる場合が多いものの、北西・北・北東の鉛直面では 6 月にも上位の数値が見られること、南西・南東の鉛直面では 9 月に、南鉛直面ではさらに 10 月にも上位の値が出現するなどの特徴がある。太陽高度の他に、地域の天候条件が影響した結果である。

年間の日射量は、30° 南傾斜面で 1,432 kWh / (m²・年)、水平面で 1,322 kWh / (m²・年) であった。気象庁が全日射量を観測している気象台のうち、本サイト（石川県白山市）に最も近いのは福井である。公表されている福井の日積算全日射量の年平均値は 1,276 kWh / (m²・年) であり、本サイトとの観測値の差は 3% 台とごく僅かであった。

鉛直面 8 方位の年間日射量は、南の 925 kWh / (m²・年) から順に、南西 909、南東 898、西 771、東 761、北東 556、北西 547、北 426 kWh / (m²・年) となっており、これらは各々、30° 南傾斜面の 65% (南)、63% (南西)、63% (南東)、54% (西)、53% (東)、39% (北東)、38% (北西)、30% (北) に相当する数値である (表 4)。南東、南、南西の各鉛直面で、30° 南傾斜面のおよそ 63~65% の年間日射量が得られることが、通年実測結果から明らかとなった。

(4) 日射量と太陽光発電量との対応関係

図 12 及び図 13 に、単位面積当たりの年間日射量と年間発電量について、鉛直面方位別レーダーチャートを提示する。それぞれ 3 ヶ月ごとに区切った春夏秋冬の内訳と年間値を表示している。日射量における南鉛直面の季節別内訳は、秋 278、夏 240、春 223、冬 183 kWh / (m²・年) で、その構成割合は、秋が 30%、夏が 26%、春が 24%、冬が 20% となっている。このときソーラーパネルの年間発電量 104 kWh / (m²・年) について、南鉛直面の季節別内訳をみると、秋 31、春 27、夏 25、冬 22 kWh / (m²・年) の順で、構成割合は秋が 30%、春が 25%、夏が 24%、冬が 21% となっている。日射量と太陽光発電量の季節別内訳の検討から、日射量では夏が春を上回るものの、発電量では春が夏を上回っており、これはソーラーパネルの発電特性（高温時に低下）が影響した結果と考察される。南西鉛直面と南東鉛直面でも、同様の傾向がみられる。

鉛直面 8 方位の年間太陽光発電量は、南の 104 kWh / (m²・年) から順に、南東 100、南西 100、東 86、西 83、北東 63、北西 59、北 51 kWh / (m²・年) となっている。東西で比較すると、日射量の割に東側の方が、僅かではあるが高い数値になっていることが分かる。東側は外気温度が低い午前中に発電を行うためと考えられる。また、30° 南傾斜面に対する鉛直面の発電割合を知るために表 5

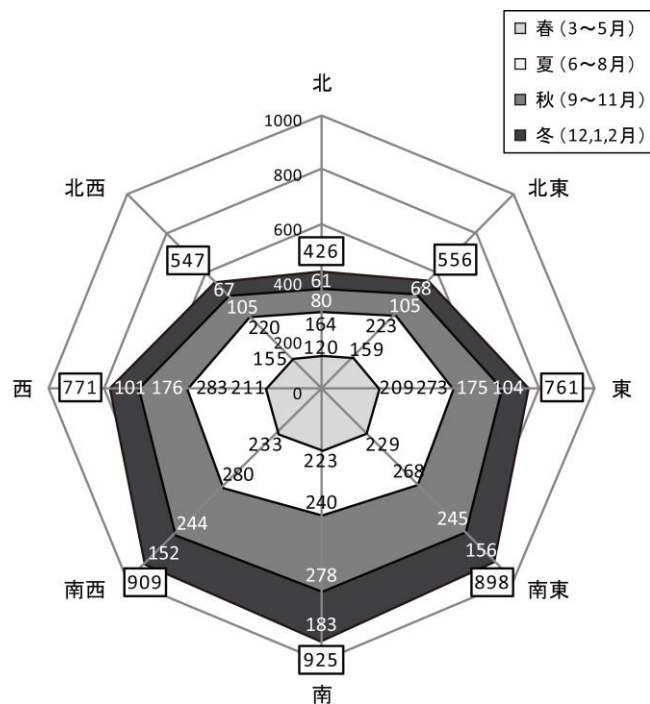


図 12 鉛直面 8 方位の年間日射量 [kWh/(m²・年)]

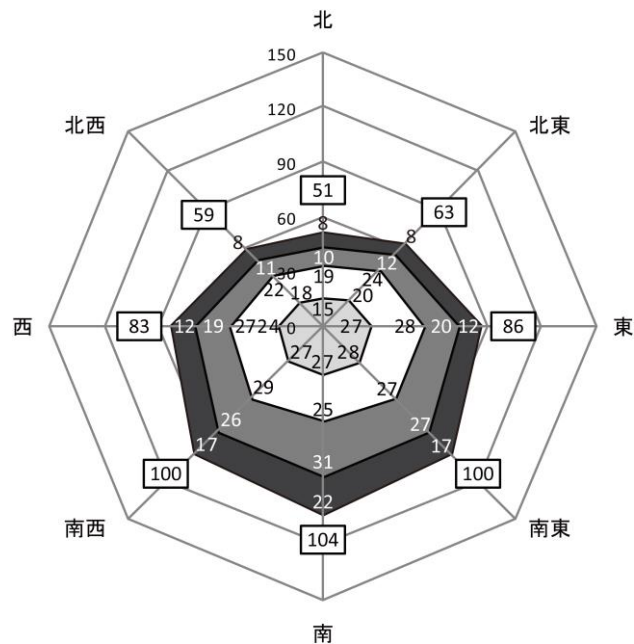


図 13 鉛直面 8 方位の年間発電量 [kWh/(m²・年)]

表 5 30° 南傾斜面に対する各鉛直面の発電量の割合

	南	南西	西	北西	北	北東	東	南東
鉛直面発電量 [kWh/(m ² ・年)]	104	100	83	59	51	63	86	100
(鉛直面) (30°南傾斜面) [%]	0.72	0.69	0.58	0.41	0.35	0.44	0.60	0.69

30°南傾斜面発電量144kWh/(m²・年)

を作成した。30° 南傾斜面の年間の太陽光発電量は、144 kWh / (m²・年) であった。これに対する各鉛直面の値は、各々、72% (南)、69% (南東)、69% (南西)、60% (東)、58% (西)、44% (北東)、41% (北西)、35% (北) となっている。南東、南、南西の各鉛直面で、30° 南傾斜面のおよそ 69~72% の年間発電量となる実測

結果が得られた。この値が前節の末尾に記した日射量に関する 63~65%という数値と比較して大きくなっているのは、30° 南傾斜面における発電効率が約 10% (144/1432×100) と、各鉛直面の 11%程度 (例えば南鉛直面で 104/925×100) に比較して小さくなった影響である。現状のソーラーパネルでは、日射量が大きくなるように設置するほど日射熱によってパネル自体が高温化し、発電効率が低下するという実態が反映されたものと思われる。

以上、これまで一般的に行われている屋上の 30° 南傾斜面に設置するケースと比較して、南東~南~南西向きの鉛直面に設置するケースで、70%前後の発電量が得られることが明らかになった。

4. 避難時における電力需要量推定

発災時初期に 400 人が避難する想定となっている洲本第三小学校における電力需要量は、表 6 のように推定した。情報通信機器については、ノートパソコン 4 台、インクジェットプリンター 2 台、42 型液晶テレビ 12 台、携帯電話 (充電) 30 台の使用を見込んだ。照明については、1 人当たり 3.3 平方メートル (通路部分含む) の所用面積に対し、5W/m² (平常時の半分程度) で 12 時間点灯するものとした。冷暖房設備は、扇風機が 4 人に 1 台ずつの使用 (50W)、冷房時が 100 W/m²、暖房時が 50 W/m² の電力消費を見込んだ。かなり低目の数値であり、例えば猛暑日には冷房設定温度 28℃に保つのは通常の学校建築の熱性能では難しいレベルである。衛生設備については、洗濯機・乾燥機を 5 台ずつ、掃除機 5 台、簡易シャワー 5 台、給湯器、給水ポンプなどを見込んだ。シャワー利用は 2 日に 1 回で、15℃の水を 50℃まで加熱し、配管ロスにより実際には 42℃で 30L 供給する電力を想定した。

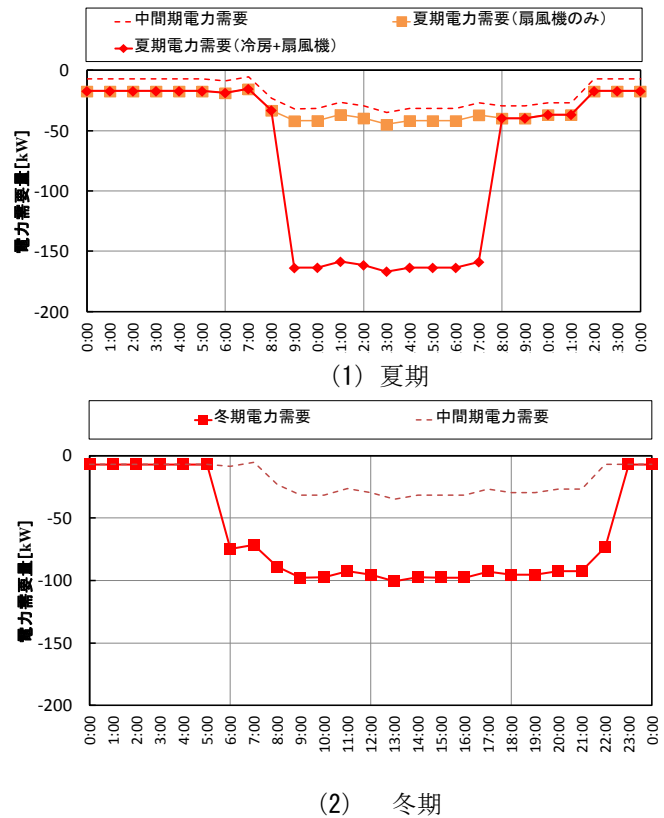


図 14 電力需要時系列変化

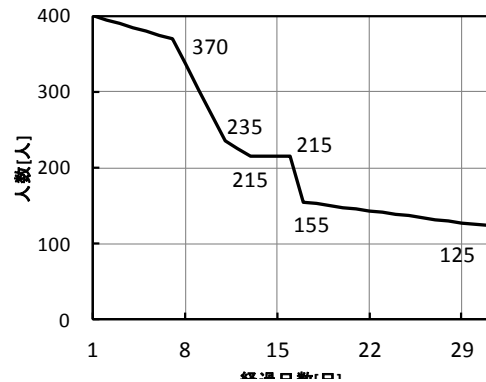


図 15 避難施設内生活者の推移

表 6 避難時における電力需要想定値

電気機器(台数)	台数	消費電力量	避難所の使用状況	計算式	日積算電力需要量
情報通信機器					
ノートパソコン	4台	50[W]	昼間3時間使用(使用しない時は消す)	4[台]×50[W]×3[h]	0.6[kWh/日]
インクジェットプリンター	2台	20[W]	印刷時起動する(1日30分程度)	2[台]×20[W]×0.5[h]	0.02[kWh/日]
42型液晶テレビ	12台	120[W]	6:00~21:00 (消灯は22:00)	12[台]×120[W]×15[h]	2.16[kWh/日]
携帯電話(充電時)	30台	15[W]	朝・昼・晩に10台ずつ充電する。(1回の充電40分)	30[台]×15[W]×0.6[h]	0.27[kWh/日]
照明					
蛍光灯	-	5[W/m ²]	夜間の12時間運転、必要数は平常時の半分(3.3㎡/人とする)	5[W/m ²]×400[人]×3.3[㎡/人]×12[h]	79.2[kWh/日]
冷暖房設備					
扇風機	100台	50[W]	真夏は24時間運転とする。(4人で1台使用)	100[台]×50[W]×24[h]	120[kWh/日]
エアコン(冷房)	-	100[W/m ²]	真夏は昼間9時間運転とする。 (真夏でなければ、昼間扇風機のみ使用。昼間扇風機と併用あり)	100[W/m ²]×1320[㎡]×9[h]	1188[kWh/日]
エアコン(暖房)	-	50[W/m ²]	真冬は15時間運転とする。(夜間停止)	50[W/m ²]×1320[㎡]×15[h]	990[kWh/日]
衛生設備					
洗濯機・乾燥機	5台	1300[W]	8:00~17:00	5[台]×1300[W]×9[h]	58.5[kWh/日]
掃除機	5台	1000[W]	9:00~11:00、13:00~17:00(昼食時2時間を除く)	5[台]×1000[W]×6[h]	30[kWh/日]
簡易シャワー	5台	50[W]	1人10分利用水量30L	50[W]×400[人]×0.16[h]	3.2[kWh/日]
給湯器	-	-	シャワー一時は42℃のお湯を1人30L使用 (シャワーは2日に1回、供給時のロスを考え50℃まで温める)	35[℃]×6000[L]×1[kWh/kcal]=860 [kWh]	245[kWh/日]
給水ポンプ	1台	350[W]	1日15時間稼働(1分間に180L給水可能)	350[W]×15[h]	5.25[kWh/日]
調理器具					
電気ポット	4台	1000[W]	朝・晩に味噌汁200ccを提供する。	1000[W/5人]×400[人]×2[回]	2.8[kWh/日]
1升炊き炊飯器	4台	250[W/回]	炊飯は0.5[食/毎食・人]とする。	250[W/回]×20[回]×3[食]	15[kWh/日]
冷蔵庫	10台	0.63[kWh/日]	450Lの一般的な冷蔵庫を10台としたとき	10[台]×0.63[kWh/日]	6.3[kWh/日]

調理関係では、電気ポット 4 台、1 升炊き炊飯器 4 台、冷蔵庫 10 台を見込んだ。表 6 の右欄に、各機器使用による日積算電力需要量を記した。最も数値が大きいのは、8 月発災などで使用する冷房用電力の 1188kWh/日であり、これに冬期の発災で必要となる暖房用電力の 990 kWh/日が続く。電力需要で 3 番目に多いのがシャワー給湯の 245 kWh/日で、扇風機使用の 120 kWh/日、照明の 79.2 kWh/日、洗濯機・乾燥機使用の 58.5 kWh/日などと続いている。炊飯や TV 等の情報通信機器関係の電力消費はかなり小さい。何と云っても目立つのは冷暖房用の電力消費であり、夏期や冬期に発災した場合は、厳しいエネルギー需給になると考えられる。

以上の電力消費機器の運転時間帯から、避難所における 24 時間の電力需要パターンを求めた結果が図 14 である。冬期暖房時よりも、夏期冷房時の方が日中の電力需要の値が大きくなることが示されている。

5. 発災時期による電力需給評価

(1) 発災時期による時間帯別電力需給

これまで示してきたように、太陽光発電による電力供給サイドだけでなく、避難者の生活を支える電力需要サイドにおいても、夏期・冬期・中間期でその数値は大きく異なる。

そこで、図 15 に示す東日本大震災の折の避難所施設内生活者数の推移を織り込んだ、洲本第三小学校における時間帯別電力需給グラフを発災時期（夏期 8 月、中間期 10 月、冬期 1 月）ごとに作成した。図 16 は太陽光発電とコージェネレーション設備、蓄電池の連携システムと設定条件を示している。図 17 が夏期 8 月、図 18 が中間期 10 月、図 19 が冬期 1 月発災の、各月 1 日から 31 日までの電力需給データである。緑線が毎時の太陽光発電量、赤線が電力需要量、ベージュ色の線が蓄電量を表わしている。

8 月発災では、最初の 10 日間くらいは太陽光発電量が電力需要量に追いつかない様子が明確であるが、11 日以降の晴天日には、避難所の生活者数自体が減少傾向となるため、日中は需要を満たせる日が多くなることが示されている。

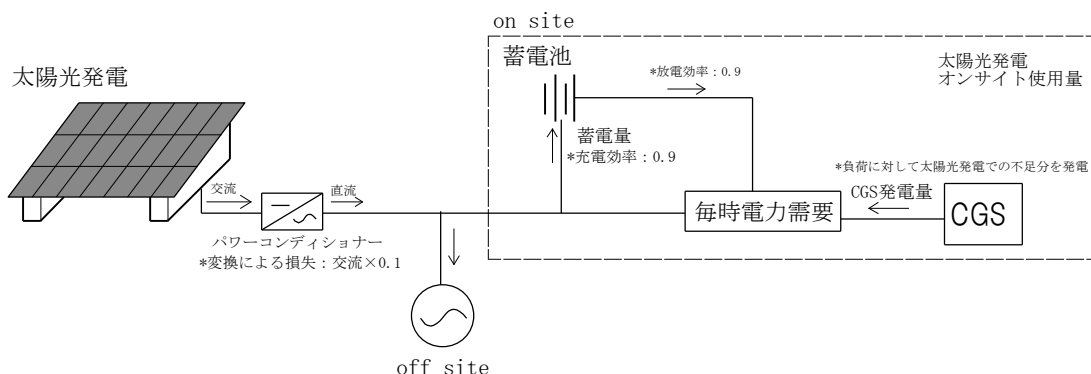
10 月発災のケースでは、冷暖房の必要がなく、電力需要自体が小さいため、ほぼ自然エネルギー利用の太陽光発電のみで需要をカバーできている。

洲本市の 1 月発災では、冬期に晴天が続き日中は太陽光発電で需要を満たしているが、夕方以降、蓄電池に蓄えた蓄電量が急激に減少して、コージェネレーション設備の運転が必要になることが示されている。

(2) 太陽光発電・コージェネレーション設備・蓄電池の能力別電力供給内訳

太陽光発電、コージェネレーション設備、蓄電池の 3 者の組合せを対象に、発電出力や蓄電池容量を数段階に設定した場合の電力供給について、自然エネルギー利用による割合を把握し、電力供給全体に占める自然エネルギー利用を高めるための各設備の性能設定について明確にするために解析を行った。

その算定結果の冬期 1 月発災の例を表 9 に示す。太陽光発電出力は 270kW、180 kW、90 kW の 3 段階、コージェネレーション設備の発電出力は 180 kW、120 kW、60 kW の 3 段階、蓄電池容量は 180 kWh、120 kWh、60 kWh、ゼロの 4 段階で、計 36 通りの性能設定に対応した消費電力の内訳を示している。月間の電力需要を全て賄える性能設定には編み掛けを施した。(太陽光発電出力 270 kW + コージェネレーション設備出力 120 kW + 蓄電池容量 180 kWh) のとき、電力需要の 62%を太陽光発電で賄え、他の組合せケースと比べて最も高い自然エネルギー利用割合となることが示されたものである。



- ①太陽光パネルの変換効率は17%として算出している。
- ②パワーコンディショナーによる直流から交流へ変換時に生じる電力損失は10%とする。
- ③余剰分は蓄電池に蓄電される。ここでは、充電効率を0.9として計算している。
- ④蓄電池に蓄電される電力は熱エネルギーに変換され常に損失する。ここでは1時間当たりの損失を蓄電量の1%とした。
- ⑤太陽光発電における電力供給が不足している場合、不足分は蓄電池より供給される。その時の放電効率を0.9とした。

図 16 太陽光発電・蓄電池・コージェネレーションの連携システム

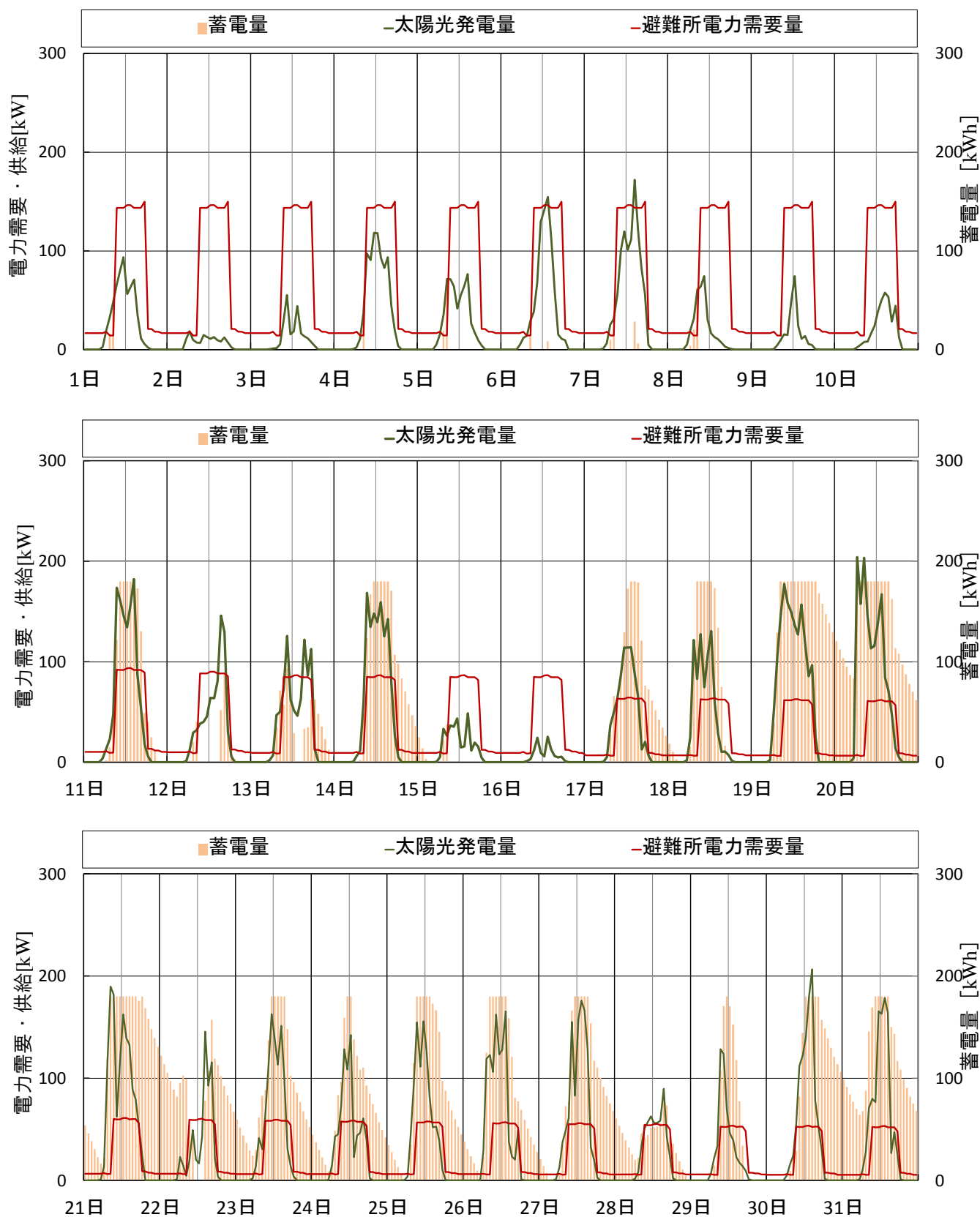


図 17 夏期（8月）における太陽光発電の発電量と蓄電量推定

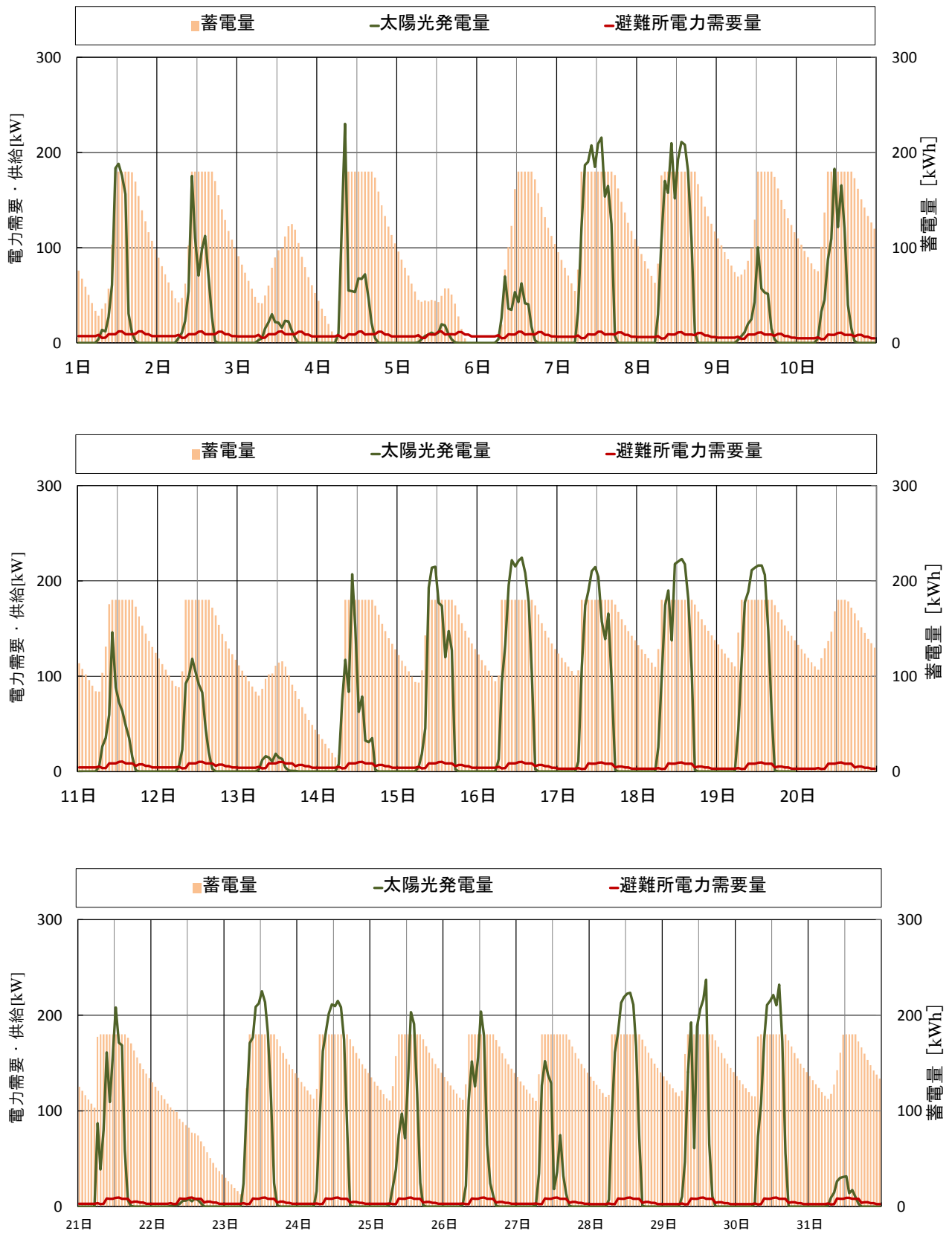


図 18 中間期（10月）における太陽光発電の発電量と蓄電量推定

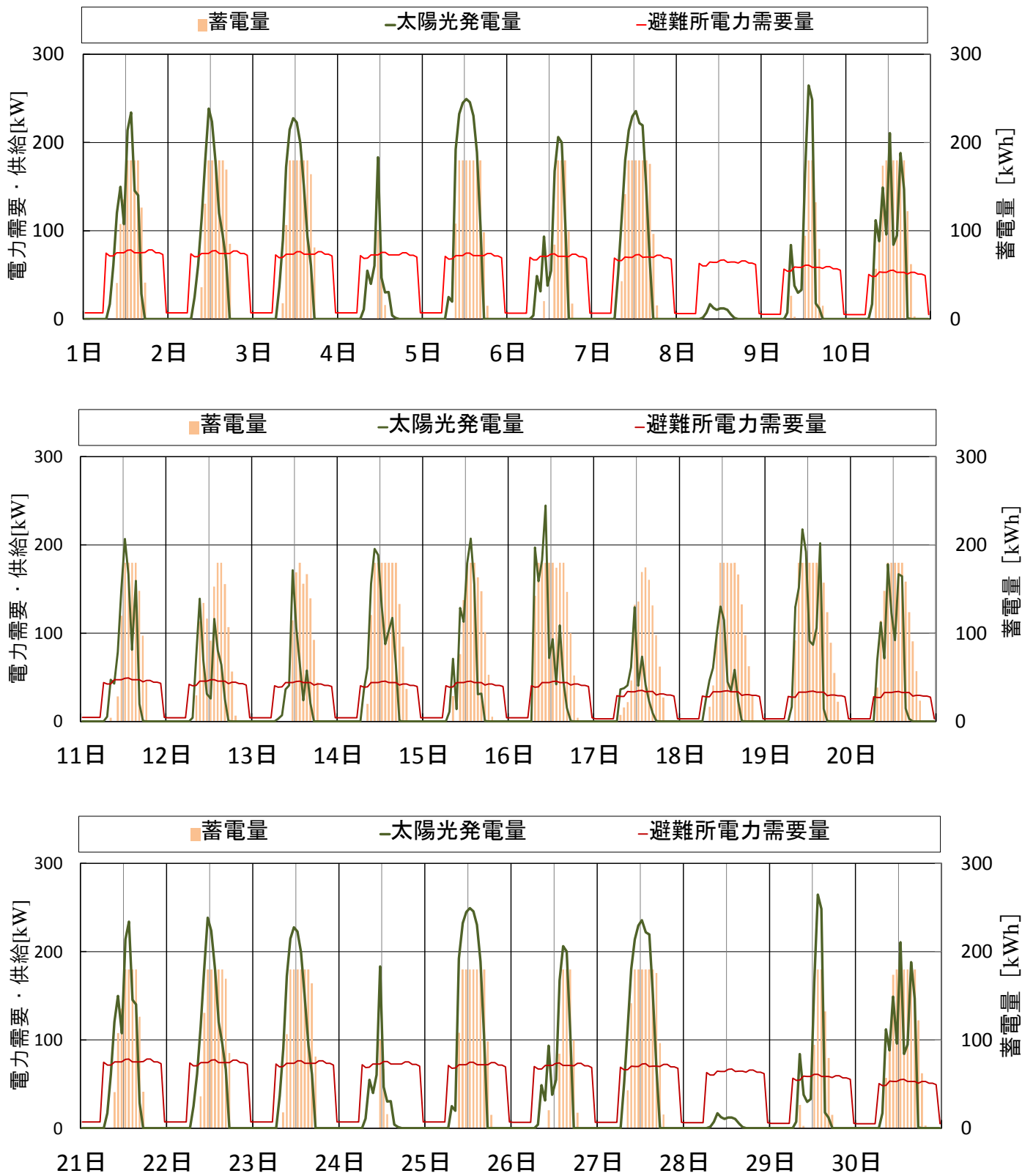


図 19 冬期（1月）における太陽光発電の発電量と蓄電量推定

表 9 1月発災時における太陽光発電・CGS・蓄電池容量の能力別電力供給内訳

		太陽光 270kW				太陽光 180kW				太陽光 90kW			
太陽光発電量(kWh/月)		32673				21782				10891			
蓄電池容量		180kWh	120kWh	60kWh	0kWh	180kWh	120kWh	60kWh	0kWh	180kWh	120kWh	60kWh	0kWh
CGS 180kW	太陽光発電オンサイト消費量(kWh/月) : P1	15106	13582	11960	10026	13453	12234	10819	9049	8262	7932	7480	6554
	蓄電量(kWh/月) : P2	5516	3832	2069	0	4747	3410	1883	0	1829	1463	975	0
	コージェネ発電量(kWh/月) : P3	9166	10690	12312	14245	10819	12038	13453	15223	16010	16340	16792	17718
	(P1/P0)×100	62%	56%	49%	41%	55%	50%	45%	37%	34%	33%	31%	27%
	(P3/P0)×100	38%	44%	51%	59%	45%	50%	55%	63%	66%	67%	69%	73%
	((P1+P3)/P0)×100	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CGS 120kW	太陽光発電オンサイト消費量(kWh/月) : P1	15106	13582	11960	10026	13453	12234	10819	9049	8262	7932	7480	6554
	蓄電量(kWh/月) : P2	5516	3832	2069	0	4747	3410	1883	0	1829	1463	975	0
	コージェネ発電量(kWh/月) : P3	9166	10690	12312	14245	10819	12038	13453	15223	16010	16340	16792	17718
	(P1/P0)×100	62%	56%	49%	41%	55%	50%	45%	37%	34%	33%	31%	27%
	(P3/P0)×100	38%	44%	51%	59%	45%	50%	55%	63%	66%	67%	69%	73%
	((P1+P3)/P0)×100	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CGS 60kW	太陽光発電オンサイト消費量(kWh/月) : P1	15106	13582	11960	10026	13453	12234	10819	9049	8262	7932	7480	6554
	蓄電量(kWh/月) : P2	5516	3832	2069	0	4747	3410	1883	0	1829	1463	975	0
	コージェネ発電量(kWh/月) : P3	8282	9723	11215	13042	9853	10978	12284	13976	14634	14963	15416	16341
	(P1/P0)×100	62%	56%	49%	41%	55%	50%	45%	37%	34%	33%	31%	27%
	(P3/P0)×100	34%	40%	46%	54%	41%	45%	51%	58%	60%	62%	64%	67%
	((P1+P3)/P0)×100	96%	96%	95%	95%	96%	96%	95%	95%	94%	94%	94%	94%

月間電力需要量 P0: 24271 (kWh/月)
 (月間電力需要量を太陽光+CGSで100%賄えた設定能力に網掛け)

図 20 では、8月発災における各設備の能力・容量組合せケースごとに、太陽光発電で賄える割合を表示した。
 (太陽光発電出力 270 kW+コージェネレーション設備出力 120 kW+蓄電池容量 180 kWh) のときに、電力需要を太陽光発電で賄える割合は 53%となっており、1月発災に比較して 9 ポイントほど低下している。冷房運転による電力需要の大きさを、太陽光発電でカバーし切れていない状況を反映した結果と考察される。

6. まとめ

研究目的に対応した解決法、方法の検証、実効性ある提言をまとめると次のとおり。

(1) 解決法

避難時のエネルギー需要と自然エネルギー（太陽光発電）供給のバランスを評価するエネルギー需給モデルを開発し、避難者数の経時変化、発災時期想定など、実際に近い条件設定の下に学校建築に必要な太陽光発電・蓄電池・コージェネレーション設備の容量を提示する。

(2) 方法の検証

電力需要側では避難者の季節による生活行為・スケジュールを反映させた時刻別エネルギー需要量を、また電力供給側では季節・天候・太陽の運行を反映した時刻別エネルギー供給量を用い、開発したエネルギー需給モデルにおける算定結果の精度を確保した。

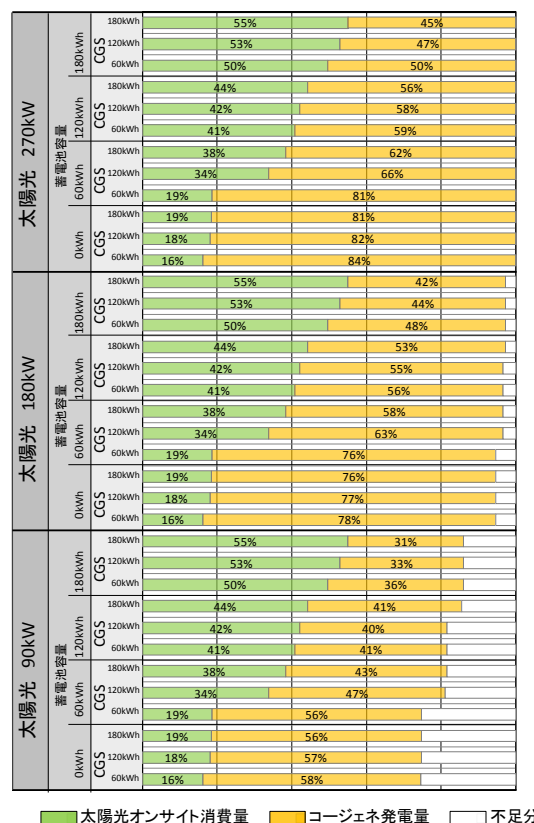


図 20 8月発災時における太陽光発電・CGS・蓄電池容量の能力別電力供給特性

(3) 実効性ある提言

防災時に避難施設なる学校建築について、避難者の最低限の生活を保障するエネルギー供給設備の設置能力及び設置容量を提示した。南海トラフ地震防災対策推進地域で津波避難対策特別強化地域にも指定されている洲本市において、400人の避難者を収容する場合、1月発災で電力需要の60%以上を自然エネルギー利用とするためには、(太陽光発電出力270kW+コージェネレーション設備出力120kW+蓄電池容量180kWh)のエネルギー供給設備を設置する必要があることなどが明確となった。

本研究により、学校建築への設置が進められている10kW程度の太陽光発電では、避難者数400人を想定している多くの小学校等において、そのエネルギー供給能力が全く不足することを示すとともに、必要な太陽光発電・蓄電池・コージェネレーション設備の各設置容量を提示できた。避難所機能を備える新たな学校建築について、自然エネルギー(太陽光)の利用割合を判断指標として、エネルギー供給設備の構成を決定できる研究成果を提供したものである。

参考・引用文献

1) 太陽光発電ネットワーク

<http://www.greenenergy.jp/solar/index.html>

2) 小西正暉・鈴木竜宏・谷昌生:「太陽電池システムがわかる本」、工業調査会、2008年、pp28、pp40

3) 「図解 最新太陽光発電のすべて」 監修: 桑野幸徳・近藤道雄, 発行: 工業調査会, 2009年7月10日

4) 日本建築学会・日本環境管理学会共編:「建築の次世代エネルギー源」2002年12月20日

5) 藤井修二、垂水弘夫、湯浅和博: コージェネレーションシステムの建築への適用に関する研究、建物用途及び運転条件を考慮した評価、日本建築学会計画系論文報告集、第387号、昭和67年8月

6) 日本太陽光エネルギー学会:「新太陽光エネルギー利用ハンドブック」、2001年

7) 一般社団法人 日本太陽光エネルギー学会:「新太陽光エネルギー利用ハンドブック 第V編」、2003年12月25日

8) 垂水弘夫、山口翔太:鉛直8方位における日射及び太陽光パネル発電データの解析、建築物ZEB化のための北陸の外壁面太陽光発電に関する研究、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、2013年6月

3年間の研究成果

論文

1. 地下水利用・天井放射空調システムのPMV制御に関する実験的研究、放射・対流空調及び連続・間欠運転条件における温熱環境とエネルギー消費、垂水弘夫、坂本泰邦、

神田奈々江、西澤淳、桑原亮一、岩瀬和夫、日本建築学会、技術報告集、第21巻第48号、pp.703-707、2015.6

2. フィールド試験棟を用いた排湿外壁構造の排湿効果に関する実験的検討、垂水弘夫、坂本剛、日本建築学会、環境系論文集、第80巻第712号、pp.527-534、2015.6

3. 地下水利用・天井放射空調システムに関する実験的研究、地下水汲上げ量及びシステム循環水量のPMV制御、垂水弘夫、坂本泰邦、桑原亮一、西澤淳、岩瀬和夫、日本建築学会、技術報告集、第20巻第44号、pp.191-195、2014.2

4. 鉛直面8方位における日射及び太陽光パネル発電データの解析、建築物ZEB化のための北陸の外壁面太陽光発電に関する研究、垂水弘夫、山口翔太、日本建築学会、技術報告集、第19巻第42号、pp.635-638、2013.6

5. 地下水利用・天井放射空調システムに関する実験的研究、PMV制御の導入による夏季室内温熱環境の改善効果を中心として、垂水弘夫、小林泰典、桑原亮一、岩瀬和夫、岡崎俊春、日本建築学会、技術報告集、第19巻第42号、pp.639-644、2013.6

著書

1. 厚生労働大臣登録 統括管理者講習会テキスト(第2版)、垂水弘夫ほか3名、日本建築衛生管理教育センター、pp.29-117、2014.7

2. 改定 建築物の環境衛生管理(上下巻、第2版)、垂水弘夫ほか、日本建築衛生管理教育センター、pp.145-148、2014.3

3. [再読]実務に役立つ建築環境工学+建築設備、垂水弘夫ほか3名、井上書院、pp.13-53、2013.4

口頭発表

1. 地下水利用放射空調システムに関する研究VI、一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その22-、日本建築学会、大会学術講演梗概集、環境工学I、2015.9、神田奈々江、垂水弘夫、西澤淳、桑原亮一、岩瀬和夫

2. 災害時避難施設等のエネルギー供給に関する検討、一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その23-、日本建築学会、大会学術講演梗概集、環境工学I、2015.9、飯田太朗、垂水弘夫

3. 地下水利用放射空調システムにおける性能評価に関する研究、室内発熱負荷等に対応するPMV制御の検討、日本建築学会、北陸支部研究報告集、第58号、2015.7、神田奈々江、垂水弘夫、西澤淳、桑原亮一、岩瀬和夫

4. サービスエリア施設の防災拠点化のための太陽光発電の適用に関する研究、日本建築学会、北陸支部研究報告集、第58号、2015.7、飯田太朗、垂水弘夫

5. 地下水利用放射空調システムに関する研究V、一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その19-、日本建築学会、大会学術講演梗概集、環境工学I、pp.779-780、2014.9、坂本泰邦、垂水弘夫、桑原亮一、岩瀬和夫

6. 調湿建材を用いた排湿外壁構造の開発Ⅶ, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その20一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.781-782, 2014.9, 坂本剛, 垂水弘夫, 前田雅喜
7. ルーフポンドによる屋上スラブ貫流熱低減効果に関する研究, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その21一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.783-784, 2014.9, 飯田太朗, 垂水弘夫
8. 自然エネルギー活用に関する北陸の事例研究 その1, 地下水を熱源とする天井放射空調システムのPMV制御に関する研究, 空気調和・衛生工学会, 学術講演会講演論文集, pp.353-356, 2014.9, 坂本泰邦, 垂水弘夫, 桑原亮一, 西澤淳, 岩瀬和夫
9. 自然エネルギー活用に関する北陸の事例研究 その2, フィールド試験棟を用いた排湿外壁構造の排湿量推定に関する研究, 空気調和・衛生工学会, 学術講演会講演論文集, pp.357-360, 2014.9, 坂本剛, 垂水弘夫
10. 自然エネルギー活用に関する北陸の事例研究 その3, ルーフポンド設置による貫流熱低減効果に関する実測調査研究」空気調和・衛生工学会, 学術講演会講演論文集, pp.361-364, 2014.9, 飯田太朗, 垂水弘夫
11. 地下水を熱源とする天井放射空調システムのPMV制御に関する研究, 放射・対流空調及び連続・間欠運転間の比較検討, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第57号, pp.270-273, 2014.7, 坂本泰邦, 垂水弘夫, 桑原亮一, 西澤淳, 岩瀬和夫
12. フィールド試験棟を用いた排湿外壁構造の排湿量推定に関する研究, 従来の排湿量推定手法の検証と改善, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第57号, pp.262-265, 2014.7, 坂本剛, 垂水弘夫, 前田雅喜
13. ルーフポンド設置による貫流熱低減効果に関する実測調査研究, コンクリートスラブ面・土壌緑化面等との比較を含めて」, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第57号, pp.188-191, 2014.7, 飯田太朗, 垂水弘夫
14. Experimental Study on Effects of Indoor Moisture Discharge through a Moisture Expulsion Exterior Wall Structure, Experiments using a test house installed in a climate chamber, Hiroo Tarumi and Tsuyoshi Sakamoto; 11th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, pp.29-34, 2013.12, Taipei
15. Experimental Research pertaining to Groundwater-using Radiant Ceiling Cooling/heating Systems, With a central focus on the results of improvements to the summer indoor thermal environment through PMV control, Hiroo Tarumi and Yasukuni Sakamoto; 11th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, pp.35-40, 2013.12, Taipei
16. An Analysis of Solar Radiation and Photovoltaic Panel Power Generation Data on a Vertical Plane in Eight Directions, Research on photovoltaic power generation on outer walls for net-zero energy building construction, Hiroo Tarumi and Keisuke Yanaba; 11th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, pp.41-46, 2013.12, Taipei
17. 地下水利用放射空調システムに関する研究Ⅳ, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その15一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.745-746, 2013.8, 坂本泰邦, 垂水弘夫, 桑原亮一, 岩瀬和夫
18. 調湿建材を用いた排湿外壁構造の開発Ⅴ, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その16一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.747-748, 2013.8, 坂本剛, 山口翔太, 垂水弘夫, 前田雅喜
19. 調湿建材を用いた排湿外壁構造の開発Ⅵ, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その17一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.749-750, 2013.8, 山口翔太, 坂本剛, 垂水弘夫, 前田雅喜
20. オーニング設置効果に関する室内温熱環境実測, 一地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その18一, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.751-752, 2013.8, 築場圭佑, 垂水弘夫
21. 人工気象室を用いた排湿外壁構造実用化のための実験研究, 夏期における湿気流入量の把握と遮湿戸の有効性評価, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第56号, pp.207-210, 2013.5, 坂本剛, 垂水弘夫, 前田雅喜
22. いしかわエコハウスにおけるオーニング設置効果に関する調査研究, オーニングの張出し・収納に伴う室内温熱環境の変化の把握, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第56号, pp.211-214, 2013.5, 築場圭佑, 垂水弘夫
23. 地下水を熱源とする天井放射空調システムに関する実験研究, 地下水汲上げ量及びシステム循環水量のPMV制御, 日本建築学会, 北陸支部研究報告集, 第56号, pp.231-234, 2013.5, 坂本泰邦, 垂水弘夫, 岩瀬和夫, 桑原亮一

講演

1. 災害発生時避難所施設のための建築・設備の技術, 金沢工業大学 地域防災環境科学研究所 IDES 公開セミナー, 2015.11.6
2. 南海トラフ巨大災害の実効性ある防災対策」, 研究報告会, 名古屋国際会議場, 2015.8.27
3. 南海トラフ巨大災害の実効性ある防災対策, 研究報告会, 大阪国際会議場, 2015.8.26
4. ゼロエネルギー建築の技術で生き残りを 一Net-Zero Energy Building and House一, 金沢工業大学 地域防災環境科学研究所 IDES 公開セミナー, 2015.3.9
5. 超巨大災害時の自然エネルギー利用による地域の創電・節電対策, 金沢工業大学 地域防災環境科学研究所

南海トラフ巨大地震の防災対策について シンポジウム，
2014.9.27

6. 「Z E Hの時代を迎えて」，北陸電力リビングサービス・セミナー，基調講演，2014.5.27

7. 住宅へのオーニング設置による冷暖房負荷削減効果に関する研究報告，日本オーニング協会 シミュレーション研究発表会，2014.4.8

8. ヒート&クールチューブの事例と効果，石川県設備設計監理協会 平成 25 年度技術研修会，2013.11.15

9. 建築物Z E B化のための北陸の外壁面太陽光発電に関する実測調査研究，電気関係学会北陸支部連合大会（金沢大学），招待講演，2013.9.21

10. 地下水利用・天井放射空調システムの PMV 制御 室内温熱環境とエネルギー消費の実測結果，石川建築設備研究会 技術講習会（空気調和・衛生工学会主催），2013.8.27

11. 建築外皮を利用した太陽光発電 ZEB 化及び災害発生時対応の主役，金沢工業大学・地域防災環境科学研究所，IDES 公開セミナー，2013.6.10

特許

1. 住宅換気システム（付設温室アースチューブ住宅換気システム），特許第 5483051 号，出願人：学校法人金沢工業大学，発明者：垂水弘夫，2014.1 特許査定

TV報道

1. シリーズ金沢ブランド 産廃から屋上緑化，北陸朝日放送，H A Bスーパー Jチャンネル，2014.5.21

新聞

1. エコハウスの研究，北國新聞，2015.3.1

2. 天井放射空調など学ぶ」，建設工業新聞，2013.8.28

研究テーマ 2

課題 2-6

超長期滞在避難所及び仮設住宅での 生活環境改善対策

金沢工業大学 円井基史 准教授

課題 2-6 超長期滞在避難所及び仮設住宅での生活環境改善対策

金沢工業大学 准教授
円井基史

避難所 温熱環境	応急仮設住宅 アンケート調査	生活環境 屋外熱環境実測
-------------	-------------------	-----------------

1. 研究目的

1-1. 研究の背景

地震発生後の被災者の避難所（収容避難場所）での滞在における生活環境に関わる諸問題は、これまで阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震、1995年1月）、新潟県中越地震（2004年10月）、新潟県中越沖地震（2007年7月）、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震、2011年3月）等を経て指摘されている¹⁻⁵⁾。冬季においては、厳しい寒さ（防寒）の問題が大きく、それに付随して感染症等の健康問題が挙げられる。夏季では暑さ、熱中症に加え、食中毒、ハエ・臭い等の衛生問題が指摘される。またトイレ、着替え、プライバシーに関わる不満・ストレスも大きい。被災者は避難所から応急仮設住宅へ移るケースも多いが、仮設住宅の生活環境も、必ずしも良いとはいえない⁶⁻¹⁰⁾。南海トラフ巨大地震及び巨大津波により生じる超巨大災害では、これまで経験したスケールを遥かに超えることから、超長期間の避難生活を過ごすことになり、新たな対応が必要となる。

1-2. 研究の目的

本研究課題では、長期滞在避難所および応急仮設住宅における生活環境の実態を把握することと、その改善について提言することを目的とする。具体的には以下の内容を行う。1) まず、巨大地震発生後の被災者の生活環境実態について、既往調査を整理する。ここでは主に環境工学、特に温熱環境の視点よりアプローチし、今後予想される南海トラフ地震における避難所と仮設住宅のあり方を提言するに資する指針を得る事に重点を置き調査を進める。また同時に東日本大震災で被災した地域の応急仮設住宅の概観調査と被災地の現状視察を行い、本研究での調査対象地を選定する。2) 次に、避難所における長期滞在被災者の生活環境を調査すると共に、その不快な環境の改善策を検討する。ここでは、居住・生活における温熱環境および不快感・ストレス、またそれに関する避難所運営と温熱環境改善策に着目する。さらに、仮設住宅での生活環境調査も並行して進め、課題抽出とその改善策の検討を行う。具体的には東日本大震災での応急仮設住宅の建設数が最大級である宮城県石巻市の仮設開成・大橋団地の2団地を対象に、住民へのアンケート調査を行う。3) これらの調査分析を踏まえ、東日本大震災・石巻での避難所および応急仮設住宅における生活環境の実態を整理し、その改善指針を提示する。特に仮設

開成・大橋団地における、最も一般的といえる平屋・長屋・軽量鉄骨プレハブ型の応急仮設住宅の集合体（団地）における屋外熱環境の実測とアンケート調査を通して、立地と配置の観点より温熱環境改善について課題と改善策を提示する。

1-3. 関連する既往の調査結果・取組みの整理

(1) 被災者の住まいの移行（避難所と仮設住宅の位置付け）

大規模災害が発生し被災者が安全に住める住宅を失った場合、多くは図1に示すように、まずは体育館等で避難生活を送るケースが多く、次に仮設住宅（みなし仮設を含む）へ移り住み、その後、災害公営住宅または自立再建住宅にて被災前に近い生活に戻ることになる。東日本大震災において、避難者数はピーク時で40万人超とされる。内閣府作成による東日本大震災の避難所生活者数および避難所数の推移¹¹⁾を図2、表1に示す。国土交通省住宅局は、着工・完成した仮設住宅の推移グラフ¹²⁾を図3のように作成し、2013年4月時点で53,537戸と発表している¹³⁾。なお、内閣府中央防災会議は、想定される南海トラフ巨大地震の被害について、避難所避難者数の最大を、約240~500万人（地震発生1週間後）と推定している¹⁴⁾。

被災者の生活環境の問題や愁訴について、既往調査より主要なものを図1中に示した。避難所については、地震発生直後（地震後72時間）では、主にトイレや食糧の問題が顕在化し、その後は入浴、保健・衛生、プライバシー、スペースの狭さなど、居住権とも言える内容が目立ちだす。このあたりは内閣府の阪神・淡路大震災教訓情報資料集¹⁵⁻¹⁷⁾に詳しい。仮設住宅については大きく、供給数、立地、居住性能の問題が挙げられる。生活環境について、高齢者や身体障害者に関わるバリアフリー、外部環境（建物外皮、屋外空間）、コミュニティ等に係る課題も指摘されている。2014年、プリツカー賞を受賞した坂ら¹⁸⁾は、国内外の被災地において、仮設住宅の建設や避難所の間仕切り等の提供に取り組んでいることで知られる。宮城県女川町では輸送用コンテナを利用した多層型の仮設住宅を建設している。

東日本大震災における最後の避難所は、埼玉県加須市の旧騎西高校の福島県双葉町の避難所であり、発災後2年9か月経ち、2013年12月に閉鎖された¹⁹⁾。仮設住宅の貸与期間は基本的には2年以内と定められているが、

2014年3月、震災から3年経った時点で、約26万人の被災者が仮設住宅（みなし仮設住宅を含む）に住んでいるとされる（表2）。避難所から仮設住宅、仮設住宅から災害公営住宅への環境移行について、避難者のストレスや生活の質の一時的な低下なども指摘されている²⁰。

(2) 避難所

(a) 収容避難場所の位置付けと課題

避難所とは、収容避難場所のことを言う。収容避難場所は、災害によって避難生活を余儀なくされた場合に一定期間の避難生活を行う施設のことで、地域の学校の体育館が指定されている場合が多い。なお、一時避難場所は、災害時の危険を回避するために一時的に避難、または帰宅困難者が一時的に待機する場所のことで、公園等が指定される場合が多い。広域避難場所は、「地震などによる火災が延焼拡大して地域全体が危険になったときに避難する場所」のことを指し、大規模な広場（オープンスペース）が指定される。避難生活をする場所としての位置づけは、収容避難場所（避難所）となる。

都市部のような人口密集地域においては、避難所（収容避難場所）の収容人数は限りがある。先述したように内閣府中央防災会議は、南海トラフ巨大地震の被害想定

について、避難所生活者数の最大を約240～500万人（地震発生1週間後）としている¹⁴。阪神・淡路大震災では、収容避難場所以外に、企業等が提供した避難場所、テント、一時的な宿泊施設、旅客船などの事例がみられた。収容人数の観点において今後想定される巨大地震に向けた課題としては、震災時に有効に機能する避難所を確保するため、既存避難所の耐震化と機能確保・向上が挙げられる。また、応急仮設住宅の早期供給、既存の住宅の

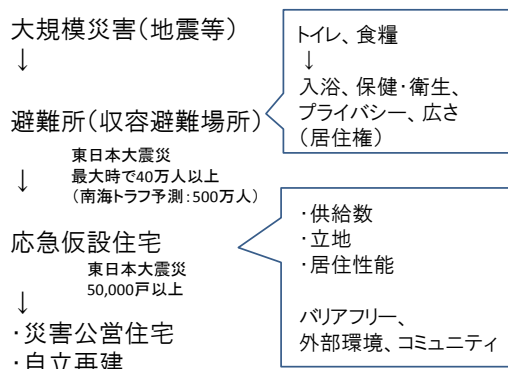
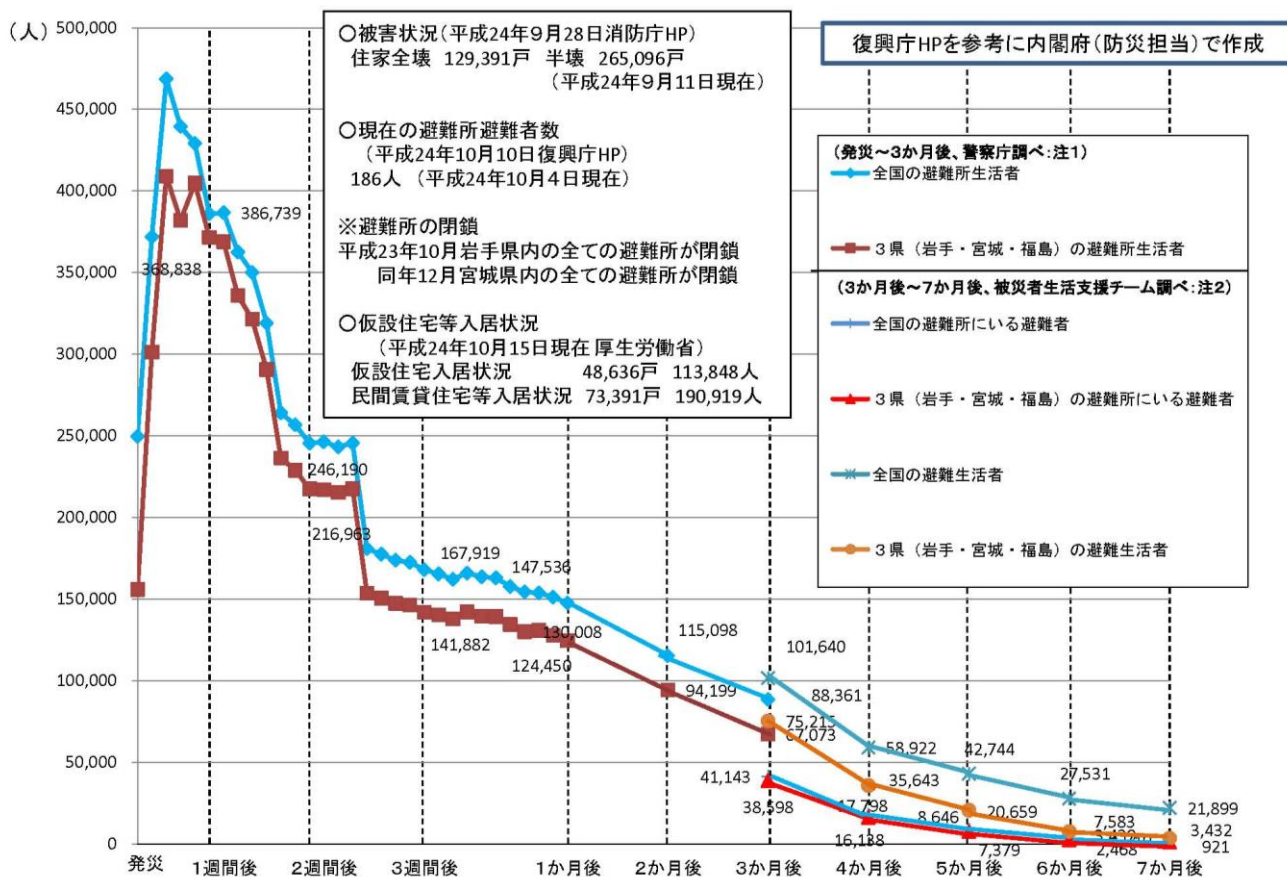


図1 被災者の住まいの移行と主な課題



注1 警察庁調べ:「公民館・学校等の公共施設」及び「旅館・ホテル」への避難者を中心に集計。
注2 被災者生活支援チーム(現復興庁)調べ:①避難所(公民館・学校等)、②旅館・ホテル及び③その他(親族・知人宅等)を集計。

図2 東日本大震災の避難所生活者数の推移（発災より7か月後まで）¹¹

耐震化、ライフラインの耐震化なども課題とされる。

(b) 既往の調査および取組み

避難所の生活環境、温熱環境に関する既往調査は、仮設住宅のそれと比べるとそれほど多くない。生活環境について、例えば内閣府資料¹⁾によると、地震発生時のトイレ不足、入浴、食事、更衣室や授乳室の設置、保健・衛生環境に関する課題を挙げている。また特別な配慮が必要な人として、高齢者、障害者、妊産婦、乳幼児、病弱者等としている。内閣府の阪神・淡路大震災教訓情報資料集^{15~17)}では、地震発生後初期72時間、4日~3週間、4週間~6ヶ月と時期を分けて課題が報告されており、そのうち生活環境に関わるものを表3にまとめた。

永幡ら³⁾は、新潟県中越地震(2004年10月)の際の避難所の生活環境について、山古志村の仮設住宅に在宅の95人(有効回答87名)を対象にアンケートとインタビューの調査を行っている。その調査結果の一部を表4に示す。ここでは体育館(大空間)と校舎・教室といった小型施設に分けて集計されている。体育館における避難生活者の愁訴としては、生活空間の広さ(73.5%)、音(60.0%)、プライバシーの確保(59.3%)、避難所の温度(58.0%)、トイレ(57.1%)、風呂(55.1%)が高く、半数以上の人が問題を指摘している。体育館のような大空間と教室等の小型施設において愁訴の差がついたものには、トイレ、その他設備、プライバシーの確保であり、いずれも小型施設の方が、愁訴率が低かった。羽賀ら²⁾は、同じく新潟県中越地震における避難所の使われ方の実態について、旧長岡市の指定避難所を事例に、聞

き取りとアンケートより調査している。今後の避難所の計画における改善点と課題として、地震直後のトイレ対応(事前に水の獲得手段を確保、水の必要がない簡易トイレを備蓄)、プライバシーの問題(間仕切りなどで大空間を仕切る、空き教室を積極利用、町内会単位、家族単位で室の利用)、寒さの問題(室温調整しやすい室に、要介護者の優先利用)を提言している。

新潟県中越沖地震(2007年7月16日)では、夏場に避難所生活を送ることになり、暑さ対策が大きな課題とされた。国立教育政策研究所の資料²¹⁾によると、新潟県中越沖地震の避難所の暑さ対策について、米軍からエアコンの寄付(日中はほとんど効果なし)、氷柱(気温低下はあまりない。涼感。飲み物の冷却)、冷却ジェルシート・飲料の配布、日除けカーテンの設置などが報告されている。また、プライバシー用の間仕切りは風が通らなくなるので使用できないとの教訓も示された。

厚生労働省は報道資料として東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)の翌日、報道資料²²⁾として避難所の長期化が見込まれる場合の対策を示している。そこでは①

表1 避難所数の推移(東日本大震災、阪神・淡路大震災、新潟県中越沖地震)¹¹⁾

	1週目区	1ヶ月区	4ヶ月区	1年以上区
東日本大震災 (2011年3月)	2,182	2,344	536	73
阪神・淡路大震災 (1995年1月)	1,138	961	500	0
新潟県中越沖地震 (2004年10月)	527	94	0	0

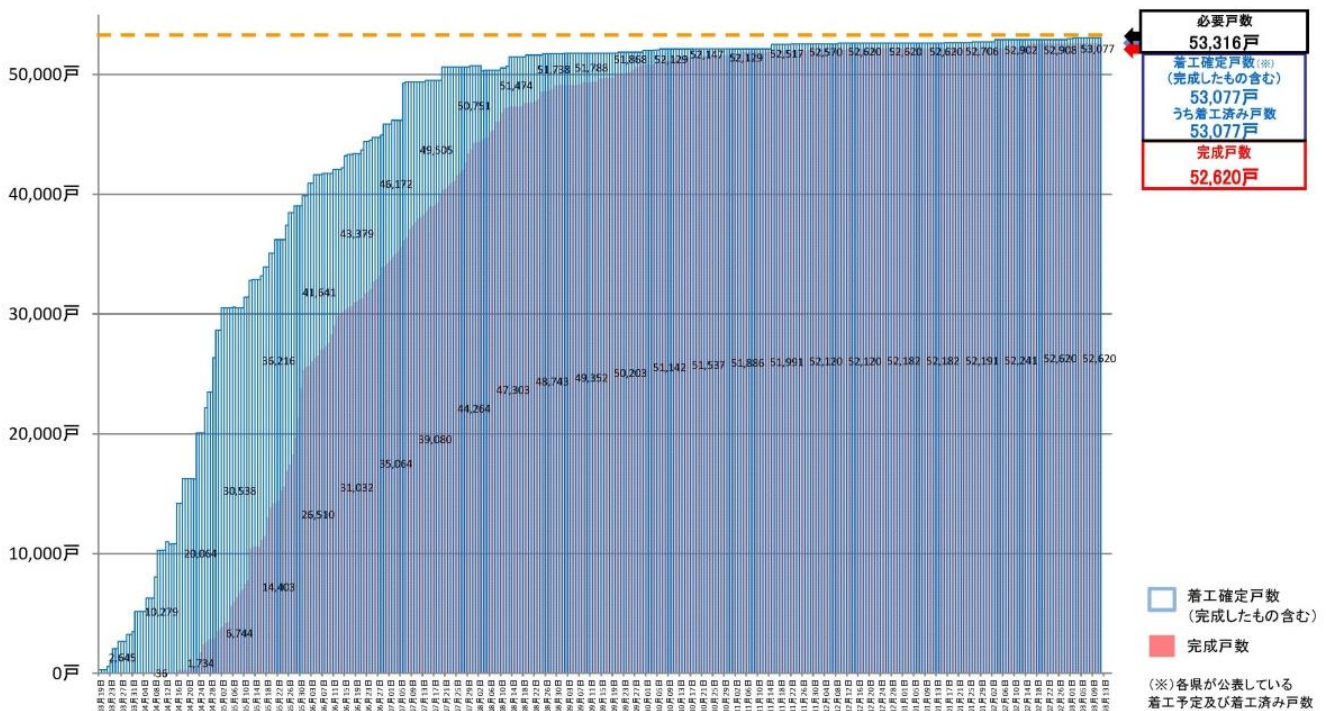


図3 東日本大震災の応急仮設住宅着工・完成戸数の推移(2011年3月19日~2012年3月19日)¹²⁾

畳・マット・カーペット等の整備、②間仕切り用パーティションの設置、③冷暖房機器の設置、④仮設洗濯場・簡易シャワー・仮設風呂等の設置、⑤仮設トイレの設置（高齢者、障害者等が使いやすい洋式トイレ）の5点が示されている。

避難所運営を考えるための一つの手法として、静岡県西部危機管理局が2007年度に開発した避難所運営を模擬体験するゲーム「避難所 HUG」^{23,24)} (HUGは、Hinanzyo 避難所 Unei 運営 Game ゲームの頭文字)が存在する(図4)。避難所運営の大きなテーマの一つに、害時要援護者

の対策が挙げられ、この HUG でも乳幼児、高齢者、障害者、病人などが登場する。森ら²⁵⁾は、避難所として使われる体育館の赤外線放射カメラの熱画像等とこの HUG を用いて、厳冬期における避難所の運営手法について考察している。

(2) 応急仮設住宅

(a) 東日本大震災における応急仮設住宅の供給・入居

仮設住宅とは、地震や自然災害によって住宅が全壊などの被害を受け、自力では住居を確保できない被災者に対して、行政が貸与する仮の住宅をいう。「応急仮設住宅」

表2 東日本大震災3年経過時点での避難者数、仮設住宅入居者戸数などの概算(2014年3月10日朝日新聞等のデータより作成)

	岩手県	宮城県	福島県	全国
避難者数[人]	34,847	89,882	85,589	267,419
仮設住宅入居戸数[戸](※みなし仮設住宅も含む)	15,038	37,283	37,696	104,050
災害公営住宅完成戸数[戸]	587	1,403	357	
自立再建者向け宅地完成数[戸]	291	698	399	

表3 阪神・淡路大震災における避難所の生活環境に関する教訓情報(内閣府阪神・淡路大震災教訓情報資料集^{15~17)}より抜粋)

地震発生後【初期72時間】
・避難者が殺到し、1人当たりのスペースが1畳に満たない場合もあり、横になることもできないほど
・高齢者や要介護者に配慮されず、むしろ厳しい環境に置かれたケースがあった
地震発生後【4日~3週間】
・火災の恐れや電気容量の問題から暖房器具が使えなかった
・高齢者は、寒さによる肺炎
・プライバシーによるストレス、照明の問題、空気汚染
・仮設トイレ、仮設シャワー、洗濯機の設置
地震発生後【4週間~6ヶ月】
・被災者の生活の場としての環境確保、リフレッシュ対策、プライバシー確保の対策
・寒さ対策にわかり、梅雨・暑さ対策が必要に

表4 新潟県中越地震における体育館避難者と小型施設避難者における生活環境要素に対する愁訴率(対象:山古志村の仮設住宅に在宅の95人)³⁾

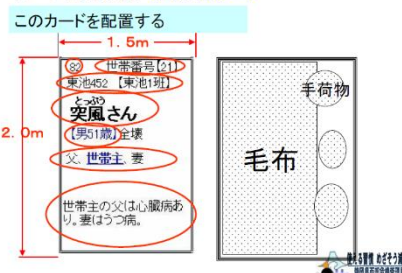
生活環境要素	愁訴者数 (人, () 内は%)		χ^2 検定
	体育館避難者	小型施設避難者	
生活空間の広さ	36 (73.5)	20 (57.1)	n. s.
避難所の温度	29 (58.0)	12 (34.3)	p<0.05
明るさ	10 (20.0)	5 (14.3)	n. s.
音	30 (60.0)	10 (28.6)	p<0.01
におい	16 (32.0)	4 (10.3)	p<0.05
風呂	27 (55.1)	15 (42.9)	n. s.
トイレ	28 (57.1)	12 (34.3)	p<0.05
その他の設備	17 (35.4)	6 (16.8)	n. s.
プライバシーの確保	32 (59.3)	9 (26.5)	p<0.01

避難所の光景(阪神淡路大震災)



こちらは、阪神淡路大震災の時の避難所の写真です。都市部の人口が多いところの大地震ということもありますが、小学校の体育館が避難者で一杯になっていますね。このあたりに、少し通路らしきものが見えます。

ゲームのしかた 避難者カード



お手元のカードです。避難者カードです。このカードを縦2m、横1.5mの3㎡とします。



これが、大地震発生後の避難所周辺のイメージです。これは避難所になる小学校ですが、校舎、プール、体育館、校庭、などがあります。(クリック) 避難者が集まってきました。(クリック) 続々とやってきます。

図4 避難所 HUG の説明の抜粋(静岡県西部危機管理局)^{23,24)}

とも呼ぶ。災害救助法に基づく被災者支援策の一つとして、都道府県が建設する。原則として、災害発生日から20日以内に着工され、貸与期間は2年以内と定められているが、災害の状況によって延長される場合がある。応急仮設住宅等の供給フレーム²⁶⁾を図5、東日本大震災における応急仮設住宅等の供給・入居の状況²⁶⁾(2012年3月資料)を図6に示す。

前述したように、東日本大震災では発生から3年経った2014年3月で約26万人が民間賃貸住宅借上げによる仮設住宅(みなし仮設住宅)を含む仮設住宅で生活しているとされる。約4年経つ2015年2月末時点で、岩手、宮城、福島3県において、発表されたデータを統計すると応急仮設住宅(建設分)の入居戸数は約38,000戸で、約80,000人が生活している。

(b) 生活環境に関する既往の調査や取組み

仮設住宅およびその生活環境に関する既往調査は、避難所のそれと比べると多い。以下に一部を紹介する。2000年2月号の建築雑誌(日本建築学会発行)では、「仮設住宅の生活」という特集が組まれている。その中で牧²⁷⁾は仮設住宅の変遷について、1791年(寛政3年)~1999年(平成11年)の年表を示している。ト部²⁸⁾は1年間の仮設生活を実際に経験した中での仮設住宅の暮らし方を紹介している。仮設住宅の生活と問題点について、坂本、塩崎、重村、内藤、中林らによる座談会の内容⁶⁾も掲載されている。また伊村、石川²⁹⁾は研究では、災害の特性を生かした応急仮設住宅のあり方についてアンケートにより自治体の考え方を調査している。自治体が重視する項目として、仮設住宅の計画については「建設用地」「入居後のケア」「入居選考」の回答数が多い。地域性を考慮

した仮設住宅の供給計画については「高齢者対策」「気候」「地域の住環境」の回答割合が多かった。

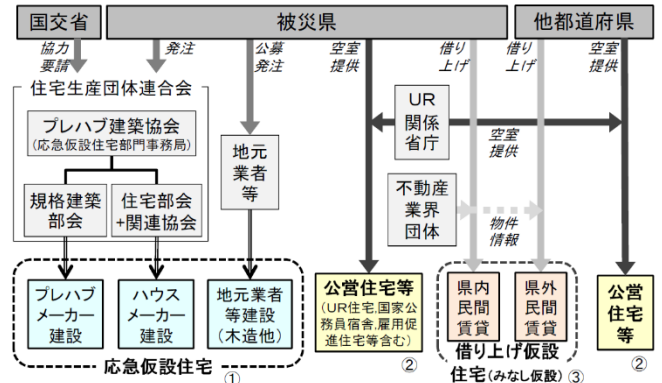


図5 応急仮設住宅等の供給のフレーム²⁶⁾

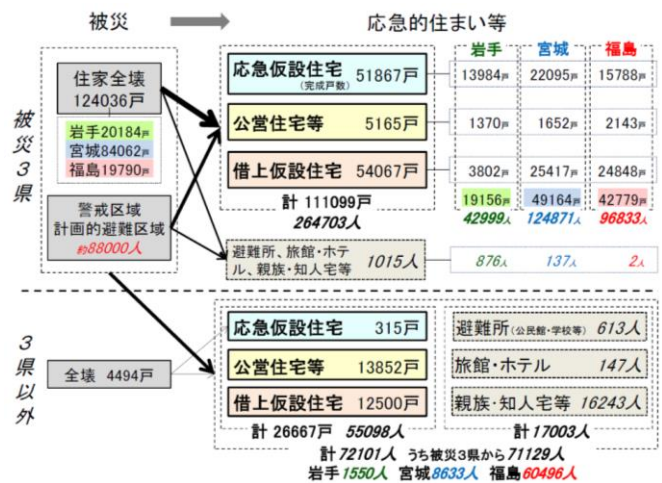


図6 応急仮設住宅等の供給・入居の状況(2012年)²⁶⁾

表5 陸前高田市と住田町に建設された応急仮設住宅の事業者タイプ別の比較³⁰⁾

事業者タイプ	プレハブ建築協会				公募選定事業者				住田町	
	規格建築部会		住宅部会		木造・長屋		木造・戸建 *3			
建築構造・形式	プレハブ・長屋		プレハブ・長屋		木造・長屋		木造・戸建 *3		木造・戸建	
敷地	公共用地		2		2		2		3	
*1	民有地		14		16		0		0	
1	1団地の平均戸数		78		24		23		54	
着工日 *2	8日後		49日後		64日後		64日後		11日後	
建設日数	最短		13日		25日		38日		48日	
	平均		31日		40日		49日		62日	
2DKの間取り *4	並列型		並列型	直列型	独立型	並列型		直列型	並列型	
居室窓のタイプ	腰高窓		掃き出し窓		腰高窓	掃き出し窓	腰高窓		腰高窓	
住宅団地数 *1	16		3	12	1	3	13	2	2	
供給戸数	合計		1,246		382		412		108	
	1DK		305		0		0		0	
	2DK *4		637		76	278	28	51	319	42
	3K		304		0		0		0	

* *1 工期単位の敷地数もしくは住宅団地数 *2 竣工が最も早かった団地の着工日 *3 オートキャンプ場に建設した2事業者の一方が住田町
 * *4 2DKの中には、図面を見ると2Kや1LDKの間取りに見える住戸が見られるが、ここでは行政資料の分類に基づく。

田村、山本らは、東日本大震災後の陸前高田市を対象に研究を進めている。一連の研究より、応急仮設住宅の供給事業者タイプ別の比較（表 5）³⁰⁾、間取りタイプ（図 7）³¹⁾、住宅性能に関する居住者評価（図 8,9）³²⁾を示す。近年仮設住宅を供給する主体はプレハブ建築協会であるが、ここにも示されているように、東日本大震災の仮設住宅において、早期に着工、地場木材の使用、被災地での雇用確保等で注目されたのが住田町の木造戸建住宅である。陸前高田市と住田町で行われたアンケート調査によると、住田型（木造/戸建）の仮設住宅は、他の仮設住宅（プレハブ建築協会の企画建築部会・住宅部会、公募の木造/長屋）に比べ、満足度、居住性、安心感、快適性、子育て環境、子どもの暮らし、高齢者の暮らしの全項目において評価が高かった（図 8）。ただし住田型は腰高窓のため、採光・通風・避難に関する評価は低かった。なお、東日本大震災で建設された仮設住宅における木造の割合は、林野庁の平成 23 年度森林・林業白書³³⁾によると、岩手県で 26.7%、宮城県で 13.0%、福島県で 42.6%、全国平均で 25.6%とされている。

東日本大震災の仮設住宅における生活環境、温熱環境に関する主な既往調査や取組みを以下に示す。株式会社日建設のボランティアチームが中心に手掛ける「ソクセキ断熱/納涼プロジェクト」³⁵⁾は、簡単、ローコスト、実用的で効果的な仮設住宅環境改善のアイデアをフリーペーパーにまとめている。その取組みは日本建築学会大会でも発表されている例えば³⁵⁾。岩佐（新潟大）らは、新潟中越地震の際の仮設住宅における住みこなしをまとめ、「仮設のトリセツ ―もし、仮設住宅で暮らすことになったら」（主婦の友社）³³⁾の出版や、「仮説のトリセツ - 仮設住宅を住みこなすための方法 -」（<http://kasetsukaizou.jimdo.com>）³⁴⁾というウェブサイトを立ち上げ、資料を公開している。趙、西出ら³⁶⁾は、応急仮設住宅団地内の外部（共用）空間における使われ方の変化について調査・考察している。他にも、南側窓周辺の活用（窓の分類、踏み台、活用方法）、舗装状況、植栽設置、外部空間への働きかけといった類似の研究も見られる。これ以外にも、室内実測（冬季、夏季）、数値シミュレーション（気温、湿度、空気質等）の研究が行われている。

2. 解決法

避難所および仮設住宅の生活環境改善に向けて、1) 東日本大震災の被災地の現地視察および仮設住宅の概観調査、2) アンケート調査による避難所生活の実態把握、3) プレハブ長屋型仮設住宅の温熱環境調査の方法について、以下に記す。特に、石巻市仮設開成・大橋団地を対象としたプレハブ長屋型仮設住宅の温熱環境改善について、夏季夜間の冷気流および川風による屋外熱環境改善に着

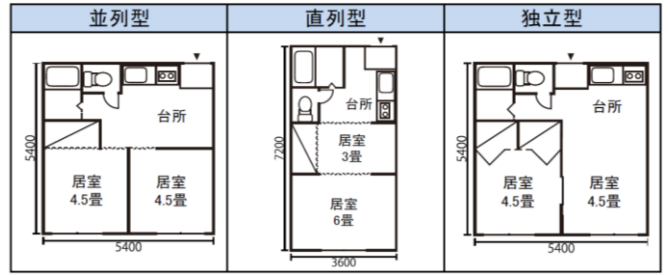


図 7 仮設住宅の 2DK の間取りタイプ³⁰⁾

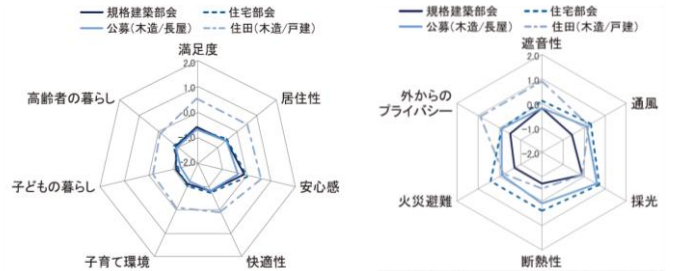


図 8 応急仮設住宅における居住全般に関する評価³¹⁾

図 9 供給主体別にみる仮設住宅の性能評価³¹⁾

目する。

2-1. 東日本大震災の被災地の現地視察および仮設住宅の概観調査

東日本大震災から 2 年半ほど経過した 2013 年 8 月と 12 月に、被災地である宮城県石巻市から岩手県宮古市の沿岸部を中心に現地視察および仮設住宅の概観調査を行なった。さらに 2015 年 2 月に宮城県女川町、2015 年 3 月に福島県郡山市、川内村、広野町、いわき市、南相馬市、2015 年 8 月に岩手県陸前高田市小友町の仮設住宅の視察を行なった（図 11）。

(1) 石巻～陸前高田（2013 年 8 月）

2013 年 8 月に視察した仮設住宅および仮設団地について、主要なものを視察順に説明する。海岸より 2km ほど離れた石巻市の市街地のほとんどは更地や瓦礫ではなく、通常の市街地のようにはみられた。ただし、街なかの空き地や社有地、運動公園などに仮設住宅の団地（仮設団地）を見ることができた。図 12 は大橋地区（県合同庁舎用地を含む）の仮設団地で、市内最大級の大きさで、戸数は 500 戸以上、2013 年 10 月時点の入居者数は 1000 人を超えていた。石巻の仮設住宅の多くはプレハブで規格化された同様のものが多く、折半屋根が多く見受けられた。また風除室も多く見られた（図 13）。玄関先の植木鉢等も確認できる。

南三陸町は石巻市と違い、被災の爪痕がまだ大きく感じられた。津波の被害を受けた町の中心部はほとんどが更地であった（図 14）。建物はほとんどなく、壊滅的被害を受けながらも残された RC 造か鉄骨造の建物が確認でき



2013年8月:[石巻・南三陸・気仙沼・陸前高田]
 2013年12月:[大船渡・住田・釜石・大槌・山田・宮古・田老]
 2015年2月:[女川]
 2015年3月:[郡山・川内・いわき・南相馬]
 2015年8月:[陸前高田小友]

図11 被災地および応急仮設住宅の視察調査

た。町の中心部に人の生活はなく、瓦礫集積所に大型のダンプや機械が動き、道路を大型のダンプやトラックが行き交うのが目立った。沿岸から山間に少し入ると、仮設の商店街が現れる(図15)。さらに山間に進むと津波の被害を受けていない集落となる。災害公営住宅建設のための高台の開発も進んでいた(図16)。

気仙沼は、高台の被害は少ないように見えたが、低地では津波の被害が大きく、鹿折地区では港から750m内陸まで津波で流された大型漁船「第18共徳丸」も確認できた(図17)(ただし、2013年12月に現地に入ったときには、その漁船は解体され姿はなかった)。

陸前高田も、低地の沿岸部の津波の被害が大きく、建物が流された跡の更地が広がっていた。標高が少し高い位置の小学校の校庭などに仮設住宅が建設されていた。市役所の庁舎も応急的なプレハブであった。底に特徴のある仮設住宅を図18に示す。ここまで視察した仮設住宅は規格的なプレハブがほとんどであった。

(2) 気仙沼～宮古(2013年12月)

次に2013年12月に視察した被災地と仮設住宅の様子を説明する。まずバス移動中に撮影した陸前高田市の集合住宅を図19に示す。5階建てのうち4階までのベランダとガラス戸が破壊されており、津波の高さとその威力が見て取れる。大船渡市の高台の小学校の校庭に建てられた仮設住宅を図20に示す。8月に視察した石巻～陸前高田では見られなかった木造・切妻屋根である。既往調査でもいわれているが、仮設住宅が建てられるのは小中学校の校庭や公園などが多いことが、今回の視察でも確認できた。図21は先述の既往研究での取り上げた住田型の仮設住宅(木造・戸建)である。太陽熱温水器が屋根に設置されているのも特徴の一つである。

岩手県では外壁に特徴のある仮設住宅もいくつか見られた。図22は外壁パネルが貼られた事例で、8月に石巻～陸前高田で視察した仮設住宅とは意匠的に異なる。図



図12 石巻市大橋地区の応急仮設住宅団地(市内最大級の仮設団地。2013年10月時点で500戸以上、入居者数は1000人超)



図13 石巻トゥモロービジネスタウンの応急仮設住宅団地(折半屋根、風除室、玄関先の植木鉢などが確認できる)(2013年8月撮影)



図14 建物がほとんど残っておらず更地が広がる南三陸町(左(南)に400mほど行くと海)(2013年8月撮影)



図15 南三陸の中心には人の営みはないが、1.5kmほど山側に進むと仮設商店街(南三陸さんさん商店街)が現れる(2013年8月撮影)



図16 沿岸部の山沿いでは災害公営住宅の建設に向けた宅地開発が進んでいる(南三陸)(2013年8月撮影)



図17 港から750m内陸まで流された漁船「第18共徳丸」(気仙沼)(2013年8月撮影)(2013年12月の視察時には解体され姿はなかった)



図18 仮設住宅の底(陸前高田)(2013年8月撮影)



図 19 津波の被害を受けた集合住宅（4階までのベランダとガラス戸が破壊。津波の高さと威力が見て取れる）（陸前高田）（2013年12月撮影）



図 20 大船渡市立盛小学校校庭に建てられた仮設住宅（石巻～陸前高田では見られなかった木造・切妻屋根）（2013年12月撮影）



図 21 住田町の木造・戸建の仮設住宅（屋根に太陽熱温水器）（2013年12月撮影）



図 23 外壁が緑色の仮設住宅（宮古市）（2013年12月撮影）



図 22 外壁パネルが貼られた仮設住宅の例（山田町）（2013年12月撮影）



図 24 海面より10mの高さがある防潮堤も津波により破壊（写真奥）（宮古市田老）（2013年12月撮影）



図 25 震災遺構として保存されるたろう観光ホテル（宮古市田老）（2013年12月撮影）



図 26 同一団地内で複数の種類の仮設住宅が建設された事例（いわき市）（2015年3月撮影）



図 27 福島県沿岸部の避難指示区域（国道6号線付近）（2015年3月撮影）



図 28 2,3階建ての仮設住宅（左：郡山、右：女川）³⁷⁾

23 は写真では見にくいですが、外壁が濃い緑色に塗られている。2013年12月の視察の最後である田老では、防潮堤と「たろう観光ホテル」を視察した（図24,25）。

(3) 女川、郡山、いわき、南相馬、陸前高田（2015年）

福島県の応急仮設住宅、また福島第一原子力発電所による避難指示区域を視察した。さらに東日本大震災の特徴の一つとされる仮設住宅の種類のバリエーションとして、女川の貨物用コンテナを用いた3階建ての仮設住宅、陸前高田のオートキャンプ場に建てられた戸建て仮設住宅（住田型）について視察した（アンケート調査も行なった）。概観写真の一部を図26,27に示す。例えば郡山の若宮前、いわきの鬼越の団地は、一つの団地内に構造や形式の異なる複数種類の仮設住宅が建設されている点も特徴である。

(4) 東日本大震災における応急仮設住宅の特徴

東日本大震災における応急仮設住宅の種類と特徴を大

きく分類³⁷⁾すると次のようになる。(1) (社) プレハブ建築協会傘下のプレハブメーカーが建設、(2) (社) プレハブ建築協会傘下のハウスメーカーが建設、(3) 地元業者を活用した木造住宅（岩手県住田町のいわゆる住田型等）、(4) 2～3階建て（郡山のプレキャストコンクリートパネルによる2階建て、女川の輸送用コンテナによる2,3階建て）（図28）、さらに(5) 寒さ暑さ対策等の追加対応（風除室、断熱壁、二重サッシの増築等）。

2-2. アンケート調査による避難所生活の実態把握

東日本大震災での避難所生活の実態把握のため、宮城県石巻市の仮設開成・大橋団地における仮設住宅に住まう方々を対象にアンケート調査を行った。なお本アンケートは、開成・大橋団地の仮設住宅の屋外熱環境実測および温熱環境に関するアンケート調査と合わせて実施した。仮設住宅の居住者は、避難所生活を経て仮設住宅に移り住むケースがほとんどであり、避難所および仮設住

宅での居住快適性の変化を調査するためでもある。

アンケートは仮設住宅の生活環境調査と合わせて、2014年11月に実施した。質問項目は、基本属性として性別・年代・避難先施設・滞在期間等、そして避難（被災）直後と数週間後経過後の変化、暑さ・寒さ等の温熱環境、就寝スペース、体調、プライバシー（人目）などに関するものとした。具体的内容を聞きだすため、自由記述で回答をもらう設問を多く設定した。アンケート用紙は仮設住宅に関する質問と合わせてA3用紙両面2枚である。切手を貼った返信用封筒とボールペンを同封し、開成・大橋団地の玄関ポストに計1000部配布した。調査結果は「3. 方法の検証」の部分で述べる。

2-3. プレハブ長屋型仮設住宅の温熱環境調査

応急仮設住宅の生活環境、特に温熱環境の実態を把握し、その改善に向け問題点を抽出し、提言を行うため、石巻市仮設開成・大橋団地において、アンケート調査と屋外熱環境実測を行う。仮設開成・大橋団地は、プレハブ建築協会傘下のプレハブメーカーおよびハウスメーカーが建設したプレハブ長屋型で、最も一般的な仮設住宅タイプといえる。なお、このアンケートは、先述した避難所生活に関するアンケートと同時に進められた。

(1) 仮設開成・大橋団地の概要

開成・大橋団地の概要を図35,36に示す。石巻市は宮城県の中で最も応急仮設住宅の着工戸数が多く、その石巻市の中で開成団地群（第1～14団地）と大橋団地は最も着工戸数が多い団地の一つである。ともにおよそ東西に長い長屋の平屋プレハブで、メーカーは開成がD社、大橋はS社である。間取りはともに北側に玄関・台所、南側に居間であるが、開成は南側に2室で腰高窓、大橋は南側に1室で掃き出し窓となっている。建設後しばらくして断熱改修、風除室の増築などが行われた。

周辺環境として、開成団地は北東・北西に比高約170mの丘陵、大橋団地は北側に河川（旧北上川）に面している。これらが本団地の選定理由の一つである。つまり並行して行った夏季夜間実測で、開成では斜面緑地に近い部分で冷気流、大橋では河川に近い部分で川風による冷却効果が確認された。それらの影響をアンケートで確認するのも、本調査の目的の一つである。

(2) アンケート調査の方法

応急仮設住宅の生活環境、中でも温熱環境の現状把握に向け、質問項目を設定した。基本属性として性別、年代、被災前の住居形態、仮設住宅の入居時期、そして、「被災前の住居」「避難所」「仮設住宅入居当初」「現在」における温熱環境（快適性）について質問した。仮設住宅の入居当初と現在を聞くのは、「仮設のトリセツ」^{33,34)}にあるような増築やカスタマイズ、住みこなしの影響を調査するためである。さらに、夏期・中間期・冬期、立地・周辺環境（山や川）、仮設住宅の改善事項について質

問を用意した。具体的内容を聞きだすため、選択式設問の後に、その理由や工夫したことを記述する欄を設けた。

アンケート用紙は、切手を貼った返信用封筒と合わせて、2014年8月に120戸、11月に1000戸の計1120（開成660、大橋460）戸の玄関ポストに配布した。1戸につき、8月は2部、11月は1部を配ったので、アンケートの配布部数の合計は1240部となる。11月については、避難所に関するアンケートも合わせて進められた。返信用封筒にはIDを記し、団地の差異、立地、周辺環境に関する分析を行う。

(3) 屋外熱環境実測の方法

測定項目・方法を表20、図40に、測定日時を表40に示す。室内外の気温変動および冷気流や川風の影響を把握するため、2014年8月11～21日の間、仮設住宅の空き住戸の室内外に温度計を設置し、室温・外気温を測定した。団地内の暑熱環境および冷気流や川風の影響を把握するため、既往研究と過去の石巻の風向データを参考に、自転車を用いた移動実測（気温、風向風速）を、基本的に晴天日の午前0,2,4時、午後12,16時に行なった。

3. 方法の検証

3-1. 避難所生活の実態に関するアンケート調査結果

アンケート調査概要を表6に示す。回収数は166部（人）で回収率は16.6%であった。回答者の年齢層の分布と男女の内訳を図29に示す。50代が33人、60代が38人、70代が43人で、50～70代が回答者全体の約7割であった。避難先の施設は、学校等の体育館、体育館以外の学校施設（教室等）、公民館、幼稚園、会社、温泉療養施設、親族・知人宅などがみられた。公民館にしばらく滞在し、その後体育館に移ったなど、複数の施設で避難生活を送った人も確認された。学校施設（体育館・教室等）、学校以外の施設（公民館、幼稚園、会社等）、親族・知人宅の3つに分類し、そこでの滞在期間の内訳を示したものが図30である。延べ人数で、学校施設に85人、学校以外の施設に62人、親族・知人宅に46人であった（ただし21人が避難先無記入）。

(1) 時間経過に伴う生活の変化

地震直後の混乱の中にある避難所と、数週間経った避難所では生活にどのような変化があったか、また温熱環境の快適性は変化したか、についての質問を行なった。避難直後～3日、4日～3週間、4週間以降の分け方は、内閣府^{15～17)}の調査を参考にした。生活の変化に関する自由記述の一部を表7に示す。食糧や飲み物の不足についてのコメントが目立つ。数日～数週間物資が届きだすという回答と、しばらく物資の不足が改善されなかったという回答の両方が見られ、避難場所による差異がみられる。

(2) 温熱環境（快適・不快）、寒さの状況と対策

表6 避難所アンケート調査の概要(石巻市)

発災・調査時期	発災:2011年3月、アンケート:2014年11~12月
質問内容のキーワード	滞在期間(避難直後~3日、4日~3週間、4週間以降)、温熱環境(暑い、寒い)、就寝スペース、体調の変化、プライバシー(人目)、一番困ったこと、事前準備・対策
対象者	宮城県石巻市仮設開成・大橋団地の仮設住宅住民(1000部配布)
回収率・回答数	16.6%、166人(男:74人 女:86人 未回答:6人)
年齢層	60代以上:94人 40代~50代:51人 20代~30代:15人 無記入:6人
避難場所	・体育館など学校施設:54人 ・学校以外の施設(公民館:18人 幼稚園・保育園:2人 会社:2人 その他:11人):33人 ・知人宅:26人 ・これらの複数に滞在:35人 ・無記入:21人
避難期間	3日以内:21人、4日~3週間:38人、4週間以上:76人、無記入:31人

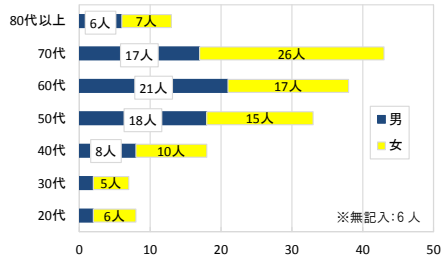


図29 アンケート回答者の年齢層と性別

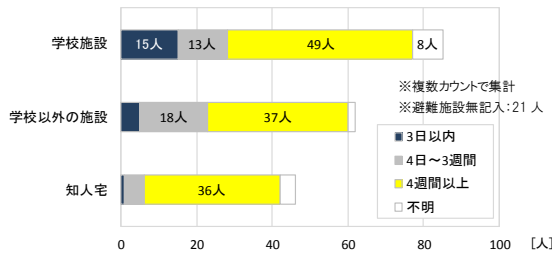


図30 避難施設別の滞在期間の内訳

表7 時間経過に伴う避難生活の変化(自由記述の抜粋)

物資支給	・食べ物 直後 から 2日目 は何もないに等しかったが 3日目 以降は支援物資が届き人数に合わせたようになった。 1週間目 以降と 4週間 以降はあまり変わらない。(男性、40代、中学校、4ヶ月) ・公民館だったので顔見知りの人との生活でした。 3日 までは食事の都合のため速く体育館へ移動した。その後 3週間 くらいまではボランティアの方が食事を提供してくれた。 4週間 以降は市の方が弁当を届けてくれるようになった。(女性、70代、公民館、6ヶ月) ・変化はあった。震災直後 4日 後から食べ物と水が届き始めた。その後は食事のルール、掃除のルール、トイレの使用方法等避難所での決まりができた。各教室でルールを決めて、その時にお世話になった人とは今でもつながりがある。(男性、70代、教室・体育館、2ヶ月) ・ 4週間 以降くらい物資が届き始め、気持ちが楽になった。また、ストーブなども入り寒さは日が経つごとにやわらきました。炊き出しなどで温かい食べ物も口にできるようになりました。(女性、40代、体育館、7ヶ月)
人間関係	・近所の人と親しくなっていくにつれて生活の変化があった。毛布などを周りから借りられるようになっていった。(男性、80代以上、学校・施設・知人宅、3ヶ月・一年半・3ヶ月)
人数増加	・当初は人が少なかったのが 3週間 位で体育館がいっぱいになり混雑していました。そのような状況で地元の方々をまとめたのが良かった。(男性、50代、体育館、6ヶ月)
ガソリン不足	・直後の期間は食糧不足に困りました。 4週間 以降は精神的に安定してきました。全ての期間で問題だったのはガソリン不足であり、長期間それが続きました。(男性、70代、体育館、5ヶ月)
復旧は3ヶ月後	・風呂、ハイライン、電気、水道、電話、メディア、医療、布団が回復し始めるのは 3ヶ月 後くらいでストレスがたまってくる。(女性、50代、施設、3ヶ月)
変化なし(不足)	・水もない、食べる物もないで長時間大変だった。唯一変わったのは教室内の人数。(男性、50代、学校、5ヶ月) ・変化はない、通して物が無い、交通手段もない、不自由な事だらけ。そもそも肌身に着ていたものしか持ち合わせていないので不満は言えない。(女性、50代、駐車場・避難所、5日・1ヶ月) ・どの期間でも食べ物、水、衣類が足りない状態で寒かった。(女性、60代、高校のトレーニング室、5ヶ月) ・学校側や市の対応がダメで、どの期間でも食料が回ってこなかった。(女性、20代、中学校、5ヶ月) ・食べ物足りなかった。全ての期間でその状態が続いた。(女性、70代、公民館・知人宅、2ヵ月・4ヶ月)
絶望	・体育館に避難直後 ~3日間 は寒さと空腹、その後は様々なうさで頭がおかしくなりそうだった。誰も連絡が取れず、絶望的だった。(女性、40代、体育館・会社・実家、3日・5日・15日)

一連の研究では温熱環境を一つの軸にしている。学校、学校以外、知人宅に分類した上での時間経過別における温熱環境(快適・不快)の5段階評価結果を図31に示す。また学校・体育館において、その理由や状況を訊ねた自

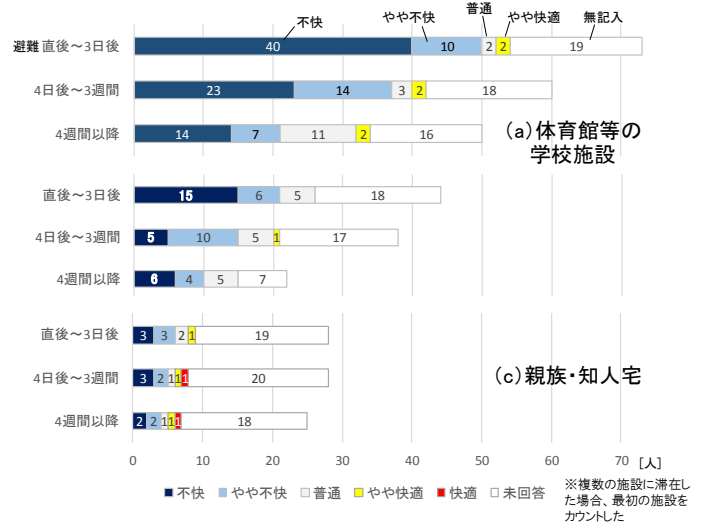


図31 避難施設・滞在期間別の温熱環境(快適・不快)評価結果

表8 温熱環境の理由や状況(自由記述・学校施設)

(a) 避難直後~3日間	<p>やや快適</p> <ul style="list-style-type: none"> ・毛布が配給されたので快適だった。また、他の避難所とは違ってごはんを口にできたので空腹になることもなかった。(女性、50代、体育館、5ヶ月) <p>不快</p> <ul style="list-style-type: none"> ・体育館にブルーシートを敷いていたが、当初は寒さや痛い等は何も感じなかった。感覚がマヒしていた。(男性、50代、体育館、6ヶ月) ・首まで海水に浸かってしまい、ずぶ濡れのまま過ごしていた。着替えの服もなかったため風邪をひいてしまった。(女性、70代、小学校・公民館、3ヶ月・4ヶ月) ・津波で衣服が濡れているにも関わらず、着替えがなくとにかく寒かった。たき火で暖をとった。(男性、40代、中学校、9ヶ月) ・寒さで具合が悪化した。食べ物、飲み物がわずかしかないので辛かった。着るものがない。(女性、70代、学校・知人宅、15日・1ヵ月)
(b) 4日~3週間	<p>やや快適</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気が復旧したので届いたストーブが使用可能になり、少し快適になった。(男性、40代、中学校、4ヶ月) <p>不快</p> <ul style="list-style-type: none"> ・引き続き毛布等の配給がなくて寒かった。(男性、70代、体育館・知人宅、15日・6ヶ月) ・直後~3日後と同じ環境で、暖房設備の不足と水・食料不足、毛布が不足していた(男性、70代、体育館、5ヶ月) ・第一はトイレで寒さ問題は二の次だった。(女性、60代、小学校・親戚の借家、10日・7ヶ月)
(c) 4週間以降	<p>やや快適</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ダンボールが本格的に届いたりしてきたので、それを敷いた。まだ不快(女性、60代、中学校、6ヶ月) <p>不快</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この期間に教室から体育館に移動したが、こっちの方がやや寒かった(暖房器具があるのに)そして風邪をひいてしまいました。避難所から仮設住宅に移動する間の期間に自宅(ほぼ全壊)の2階部分で何とか生活していた。(男性、70代、高校、40日) ・厚さ2~3cmの畳が一枚ずつ支給されたものを利用した。他にダンボールを使って寒さをしのいだ。(女性、60代、学校・体育館、7ヶ月・6ヶ月)
(d) 寒さの状況や対策	<ul style="list-style-type: none"> ・とにかく外からの風を食い止めるのが大変だった。ダンボールを使って通風口を塞いだ(男性、50代、体育館、6ヶ月) ・体育館でどの場所でも寒かった。工夫できることはなかった。(女性、40代、体育館・会社・実家、3日・5日・15日) ・支援の毛布にくるまって寝たが寒かった。津波で濡れてしまった人が低体温で亡くなるケースもあり対策が必要だと感じました。(男性、70代、教室・体育館、合わせて2ヶ月) ・教室はさほど寒くなかったが、体育館は寒かった。(女性、70代、学校、7ヶ月) ・カーテンを外し、4人~6人で包まって寝た。時間が経ってからは2人で1枚の毛布が配られたが寒かった。(女性、60代、高校・トレーニング室、5ヶ月)

由記述内容の抜粋を表8に示す。

避難場所は回答したが、温熱環境の快・不快を回答していない人も多い。それでも体育館を含む学校施設で、「不快」「やや不快」と答えた人の割合は大きい。知人宅

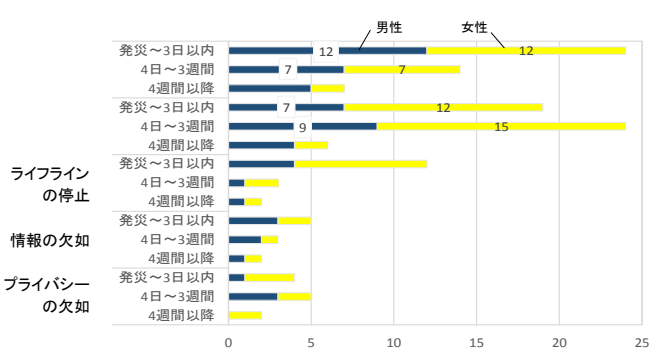


図 32 寒さ以外による不快な事項 (自由記述内容を確認し期間ごとに集計)

表 9 就寝スペースに関する回答の抜粋

- ・2日目までは、座って寝たが3日目からは十分に寝るスペースができた。(男性、40代 中学校、4ヶ月)
- ・人がいっぱい座る場所を確保するので精一杯だった。寝るスペースははっきり言ってなかった。(男性、70代、体育館、15日)
- ・横になるスペースなんてなかった。各々が体を細め、これ以上教室内の人数が増えないことを祈るばかりであった。(男性、60代、学校、5日)
- ・座ったまま仮眠をとっていた。横になるスペースはなかった。(男性、60代、学校・親戚の家、2週間・3ヶ月)

表 10 体調の変化に関する回答の抜粋

- ・寒い時期だったので、しもやけやエコノミー症候群になり大変でした。毛布で暖めたり、こまめに手足の曲げ伸ばしをしていました。(男性、50代、学校、5ヶ月)
- ・部屋が狭くあまり動くことがなかった為、足が悪くなってリウマチになった。後に杖を使用する原因になった(男性、60代、体育館、6ヶ月)
- ・体調を悪くしてぜんそく、また栄養失調になり3カ月入院した。(男性、70代、教室・体育館、2ヶ月)
- ・夏季はとにかく暑くて風邪をひいた。水分を多くとり、近くの大型モール店(冷房がきいている)に通っていた。(女性、50代、体育館、5ヶ月)
- ・病気がちな娘がストレスで体調を崩し、仮設に入ってからその状態が続いた。26年7月に亡くなりました。(女性、60代、学校・避難所、3ヶ月・2ヶ月)

表 11 プライバシー(人目)に関する回答の抜粋

項目	抜粋内容
トイレ	・仕切りがない場所で用を足さなければならない時に、すぐ横でやらなければいけません。工夫する方法はなかった。(女性、40代、体育館・会社・実家、3日・5日・15日) ・新聞紙で用を足しているが詰まってしまう為、バケツに新聞紙を捨てていた。匂いが酷かったし恥ずかかった。(男性、70代、施設・知人宅、1ヵ月・2ヶ月)
着替え	・大いにあり、ダンボールで囲ったが着替えてとにかく人目が気になった。(女性、50代、施設、3ヶ月) ・着替えをする場所がなかった。とにかくいつも誰かに見られている気がした。(女性、40代、体育館・知人宅、3ヶ月・4ヶ月)
不衛生	・皆お風呂に入れないので汚い、不衛生な感じ。洗濯もできず大変だった。プライバシーがないので人目を気にする余裕もなかった。(男性、80代、学校・施設、3ヶ月・一年半) ・着の身着のまま避難してきたので自分の匂いが気になった。(女性、60代、民間アパート、5ヵ月半)
子供	・小さい子供が騒ぐので周りに迷惑をかけていないか気になった。(女性、40代、体育館、7ヶ月) ・赤ちゃんがお腹の中にいて、周りに迷惑はかけられないので隠していた。(女性、20代、小学校、2日)
食糧	・仕切る壁もなかったし人目は気になった。その中で食料の分量は特に気になった。周りの人と差がないように支給時に確認が行われた。(男性、60代、中学校、3ヶ月) ・食事には気を遣った。皆と同じ物だけならまだしも、他に持ってきた物を食べているときは特に。(男性、50代、中学校、2日)
余裕なし	・人目が気になる余裕もない。(男性、20代、学校、2週間) ・人目を気にする余裕もなかった。命が助かっただけよかった。(女性、60代、高校のトレーニング室、5ヶ月)

に避難した人について、ここでの快・不快を回答した人は少ないが、「快適」「やや快適」と答えた人の割合は、

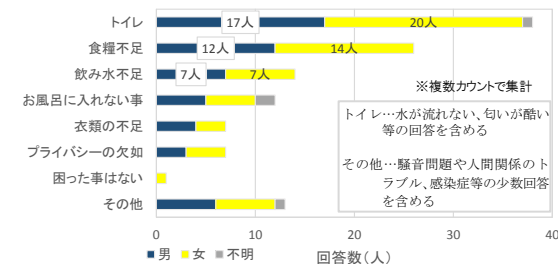


図 33 避難生活で最も困った事項 (自由記述回答より作成)

表 7 今後の事前準備や現場での対策に関する回答の抜粋

- ・リーダーを決めること、周りの人が協力的であることが避難所運営では重要だと思います。またルールを作ってそれを守ることも重要。(女性、50代、施設、3ヶ月半)
- ・避難所ではリーダーの存在が大きい。(女性、70代、知人宅・避難所、50日・1ヵ月)
- ・避難所だけではなく自宅にいた人も多かったため、平等に支援物資が配布できるようにマニュアルがあるといいと思う。また、食糧についても公平な配分が必要。やはり日常の訓練が大事であり、思いやりの気持ちがあれば助け合えると思います。地域レベルではリーダーシップを発揮できる存在が大きい。(男性、50代、知人宅、2ヶ月)
- ・管理者、指示者の避難時に関する知識向上のためにも行政側は普段からの訓練・マニュアル作りを徹底すべき。(男性、60代、学校、5日)

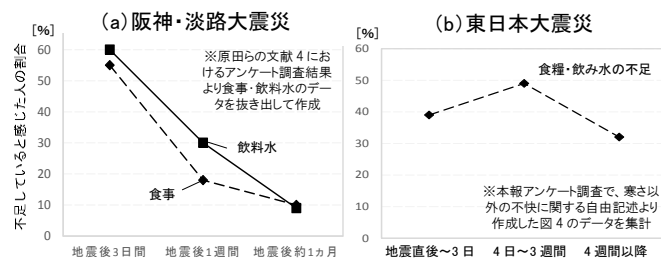


図 34 阪神・淡路大震災と東日本大震災における食糧・水不足の比較

表 13 ヒアリング結果概要(新潟県中越沖時地震、柏崎)

発災・調査時期	発災:2007年7月、ヒアリング:2014年12月
対象者	当時の町内会長(70代男性)とその妻(70代女性)の2名
避難場所・期間	体育館・10日間
避難者の様子	・避難直後～3日後では約300人、滞り4日後～では約100人(仮設住宅に移る人)がいた。 ・60代、70代以上の高齢者が多かった。 ・男女は同じくらいいた。 ・避難所では起床時間は自由だが、就寝時間は21時30分だった。 ・電気は3日後には復旧したが、ガス、水道の復旧には1ヵ月かかった。
時間経過による変化	発災4日後～ ・避難者の数が減り、落ち着いた。市の体制がではじめ、仮設のトイレ・風呂の物資が届いてきた。 ・生活に慣れて余裕がでてきた。 ・体育館内に通路ができた。
暑さの変化	発災直後～3日後 ・クーラーはないが数日後に扇風機(通路に扇風機を置いた)が10台ほどきた。それでも暑すぎて汗がすごかった。 ・アルカリ飲料水、氷柱、熱さまシート、団扇が配布されたので熱中症対策はできていたと思う。 4日後～ ・人数が減ってきたので涼しくなった。 ・海岸に近かったため体育館より外の方が涼しかったので暑いときは外に出た。
体育館内の場所と暑さ	・窓際のほうが涼しかった。体育館の真中は非常に暑かった。 ・避難所に避難してきた直後はこの場所は暑いとは言えないため、お年寄りや妊婦でも体育館の真中で過ごしていた。3日後には通路が確保されたため、お年寄りや妊婦をできるだけ窓際で過ごす配慮があった。 ・プライバシーのために間仕切りがあったが、そのせいで風通しが悪くて、暑かった。
就寝スペース	・避難直後～3日間は人が多すぎて、横たわることが困難で寝ることができなかった。 ・間仕切りが邪魔だった。
物資	・食事で避難直後はパンが多かった。数日後にはおにぎりや炊き出しなどが出た。避難所にいないが、食事だけもらいにくる人がいて食事に関しては足りなかった。 ・出入りが激しく、人数の把握はできなかった。朝屋晩に物資を配布する人数は確認した。(帯同した市職員の発言) ・日用品では歯ブラシや水やタオルや懐中電灯などが全員分あった。日用品に関しては3日後にはだいたいあった。 ・市の役員に任せっきりにするのではなく、地域の一人一人が協力することが大事。 ・避難所運営のマニュアルを市は作り、それを地域の人が知った方が避難所生活でも困らない。

他の施設より高い。

(3) 温熱環境(寒さ)以外の不快な事項

先の自由記述欄では温熱環境以外の不快な事項の記述も目立った。温熱環境（寒さ）以外の不快な事項について、自由記述欄よりその内容を確認し、期間ごとに集計したものを図 32 に示す。トイレ問題を含む不衛生な状況、食糧・飲み水の不足などの数が多く確認された。食糧・飲み水については、避難直後より、4 日後～3 週間の方が、コメント数が多い結果となった。

(4) 就寝スペース

就寝スペースについて自由記述式で質問した。不満の有無で分類したところ、有効な記述があった 62 人中 53 人が、不満があったと答えた。自由記述の一部を表 9 に示す。避難者数が多く、横になるスペースが無かったという記述が多い。

(5) 体調の変化

体調の変化について自由記述式で質問した。有効な記述は 52 人で、35 人が体調の変化があったと回答した。その内訳の上位は、風邪 13 人、体の痛み 5 人、血圧上昇 4 人、何らかの重い症状 4 人であった。自由記述の一部を表 10 に示す。

(6) プライバシー（人目）

避難生活で人目が気になったかを自由記述形式で質問した。回答記入のあった男女別では、男性は 16 人中 14 人が、女性では 22 人中 21 人が、人目が気になったと答えた。自由記述の一部を表 11 に示す。

(7) 最も困った事項

避難生活で一番困ったことについて自由記述形式で質問した。内容を複数カウントで分類したものを図 33 に示す。トイレ、食糧、飲み水の回答が多い。自由記述にあった対策の工夫としては、トイレの水や生活用水について、プールの水を使った、雪をとかしたなどの記述があった。

(8) 今後の対策

今後の対策について自由記述形式で質問した。複数カウントで集計すると、備蓄の準備に類する回答が、記述した 84 人中約半数の 40 人と、群を抜いて多い結果となった。さらに備蓄と答えた人の内容を見ると、水（27 人）、食糧（24 人）が上位であった。自由記述では避難所の運営に関するコメントが目立った。その抜粋を表 12 に示す。

3-2. プレハブ長屋型仮設住宅の温熱環境調査結果

(1) 仮設住宅の温熱環境に関するアンケート調査結果

アンケート調査概要を表 14 に示す。回答があったのは 188 人（部）で、回収率は 15%であった。回答者の年齢層は、27%が 70 代、22%が 60 代、20%が 50 代であった。

(a) 住まいの変化と温熱環境（快適・不快）

被災前の住居、避難所、仮設住宅の入居当初、仮設住宅の現在、の 4 つについて、それぞれ温熱環境（暑さ・寒さ、快適性）を 5 段階で評価してもらい、またその様子を自由記述で答えてもらった。5 段階評価の結果を図

37、仮設住宅の入居当初と現在についての自由記述の抜粋を表 15 に示す。なお避難所における生活環境については、別途の報告に具体的に記載している。

5 段階評価の平均値としては、被災前の住居は「やや快適」、避難所は「やや不快」、仮設住宅の入居当初と現在（アンケート回答時）はほぼ同じで「普通」と「やや不快」の中間という結果になった（図 37）。自由記述をみると、仮設住宅の入居当初は避難所に比べて快適という意見、現在について、断熱材、二重サッシ、風除室の増設で快適になったという意見もみられる。5 段階評価結果については、避難所から仮設住宅への移行前後の相対的な評価も影響していると推察される。

(b) 夏期・中間期・冬期における温熱環境（快適・不快）

夏期・中間期（春や秋）・冬期別に生活・温熱環境を 5 段階で評価してもらい、その理由や工夫したことを自由記述で答えてもらった。団地別の結果を図 38(a)、自由記述の一部を表 16 に示す。中間期に比べて夏と冬の評価が



図 35 仮設開成団地と仮設大橋団地の概要



図 36 仮設開成・大橋団地の様子（写真は 2014 年撮影）

表 14 アンケート調査の概要

発災・調査時期	発災:2011年3月、アンケート:2014年8月、11月
質問内容のキーワード	基本属性(性別、年代、被災前の住居形態、仮設住宅の入居時期)、「被災前の住居」「避難所」「仮設住宅(入居当初・現在)」における温熱環境(快適性)、夏季・中間期・冬季の生活環境、立地・周辺環境(山や川)の影響、仮設住宅の改善点
アンケート用紙	A3両面1枚
対象	宮城県石巻市仮設開成・大橋団地の応急仮設住宅
配布・回収方法	切手を貼った返信用封筒と合わせて玄関ポストに配布(※11月は、避難所生活に関するアンケート用紙も合わせて配布した)
配布数	8月に120戸(1戸に2部)、11月に1000戸(1戸に1部)。計1120(開成660、大橋460)戸、1240部
回収率	開成:19.8%、大橋:12.4%
回答者数	188人(男性84人、女性93人、性別無記入11人)
年齢層	60代以上:106人、40代~50代:58人、20代~30代:13人、年齢無記入:11人

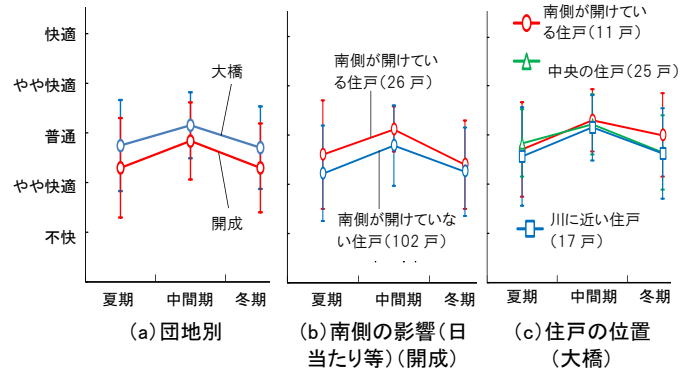


図 38 季節別の温熱環境評価

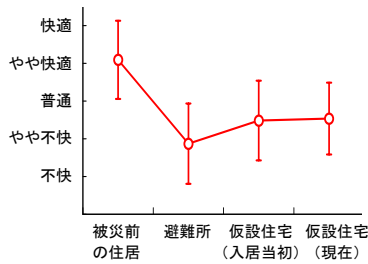


図 37 被災前・避難所・仮設住宅における温熱環境(快適性)評価

表 15 仮設住宅入居当初と現在の温熱環境(抜粋)

(a) 入居当初	
不快	・風徐室がなかったため、外気が直接部屋に入り冷える。(開成) ・結露がひどく、毎朝天井からシャベットが落ちてくる。(開成、南が開けている) ・床がカーペットだけだったので寒かった。(開成、北が駐車場)
温熱以外(快適)	・避難所の雑魚寝に比べると、とても快適。(開成、角部屋) ・やっと一人の生活に戻れてほっとした。(開成、角部屋) ・避難所に比べたらマシ。(開成、角部屋)
温熱以外(不快)	・ハエが飛びまわり環境が非常に悪かった。精神的にきつかった。(開成) ・四方に囲まれているので生活音が出せずノイロゼ。ストレスが溜まり入院した。(開成) ・入居当初は隣人がいなかったが、入居者が来てからは足音とか鳴き声とかを気を付けるようになって親も子供もストレスでイライラしていた。(大橋、南が駐車場)
(b) その後(現在)	
快適	・二重サッシと断熱材をいれてから部屋の暑さ、寒さがまるで違った。(開成、角部屋、東が大通り) ・天井に断熱材、窓に二重サッシ、風徐室を設けエアコンが入ったことでだいぶ良くなった。(開成、角部屋、山に隣接) ・畳、窓も二重になり、風徐室もついてかなり改善された。(開成) ・みんなの要望で直してもらったところ:①玄関の戸を2重に。②窓ガラスを2重に。③天井裏と側面に断熱材を入れてもらう。④風呂に追い炊き装置を取り付け。⑤エアコンを取り付け。⑥畳を敷いてもらう。(開成、北が駐車場)
不快	・住家を与えてもらったことには感謝しているが、床続きのため隣の床を踏む音が気になる。棟が狭くあまり日当たりが良くない。南北には風が通らない。(開成) ・暑さ寒さで生命の危機を感じることもある。(開成) ・冬はいいが、夏は特にひどく、外気温に影響される。(開成) ・入居当初と変わらない。(開成)
温熱以外(快適)	・今では支援無料バスが来て買い物も少し楽になった。(開成、南が駐車場) ・畑をかり、生きがいとなっている。(開成) ・隣同士も仲良くなり行事などにも参加し、快適に過ごしている。(開成) ・精神的に落ち着き、今は普通に生活している。(開成、南が開けている)
温熱以外(不快)	・狭い。物を置く場所が少ない。買い物も不便。(開成)

表 16 季節別の温熱環境(自由記述の抜粋)

(a) 夏季	
快適	・エアコンがあるため十分に過ごせる。(大橋) ・川が近くにあり涼しい。(大橋、川に近い)
不快	・エアコンが一部屋にしかなく、娘が部屋にいて熱中症になった。(開成) ・夕方帰宅すると室内温度が35℃以上になっている。冷房つけても気温高すぎて涼しさを感じない。【工夫】→外に水を撒く(開成) ・屋根からの熱が天井に伝わり、天井が熱くなる。【工夫】→グリーンカーテン(プランター)とすだれの設置。換気ファンを24時間回す。(大橋) ・風が通らず、屋根も低く暑かった。【工夫】→エアコン、換気扇の使用 ・狭い部屋と窓が少ないため熱がこもりやすい。窓を開けても意味なし。(大橋、南が駐車場)
温熱以外(不快)	・虫、ねずみ、ナメクジの浸入。【工夫】→薬をまく。とにかく取る。(開成、角部屋、南が開けている、大通りに隣接) ・一カ月間留守にしていたらカビが生えた。(開成、北が開けている)
(b) 中間期	
快適	・前が広く日も風もよく入る。(大橋、南が駐車場) ・温度差がなければ住みやすい。【工夫】→換気扇を一日中回してお
(c) 冬季	
不快	・四方が囲まれていることで暖かく感じる。(開成) ・部屋が狭いのですぐに暖まる。【工夫】→壁と窓に断熱シートを張った。(開成、角部屋、東が大通り) ・気密性が高くなって快適。(大橋、南が駐車場) ・あまりの寒さに夜中目を覚ますことがある。底冷えがすごい。【工夫】→絨毯の下に新聞紙、マットを敷く。(開成) ・前の棟の日陰になり日光が入らない。(開成、角部屋) ・窓際が寒く結露がひどい。カーテンにすぐカビが生える。【工夫】→窓際の寒さ、結露対策に断熱材を置いたら3~5℃室温が上がり、カーテン二重サッシでも簡易的な物なので寒い。(大橋)

表 17 立地や周辺環境が温熱環境に与える影響(自由記述の抜粋)

(a) 開成団地	
山(良い)	・すぐ西に山があるためガスが発生しやすい。自然環境が良い。(開成)
山(虫)	・周りが山に囲まれて環境は良い(開成)
山(強風)	・山と山に囲まれているため、北風が強風になり寒い。(開成、北が開けている)
住棟間隔(日光)	・冬季は建物の間隔が狭いために、部屋に日が当たらない時間が増えてきた。(開成)
建物密度(弱風)	・建物が密集しているため風が入らない。(開成)
立地(強風)	・角の家なので風がすごい。(開成、角部屋、北が開けている)
強風	・外の風通しが良すぎて洗濯物を干せない事がある。(開成、北が駐車場) ・海からの風と山からの吹き下ろしの風があるので、風が強い。(開成、南が駐車場)
(b) 大橋団地	
川	・北上川があり自然環境が良い。(大橋、川に近い) ・近くに川があるため夏は涼しいが冬は寒さが厳しい。(大橋、川に近い) ・川を背にしているため風が冷たい。(大橋、川に近い)
川・山(眺望)	・北には川、山があり眺めは快適。(大橋)
立地(日光)	・一番前にある棟なので明るく洗濯物もよく乾く。(大橋、南が駐車場)

低いのは共通だが、すべての期間で開成の評価が低い結果となった。一つの理由として、メーカーの違いが挙げ

られる。自由記述にもあるように、開成団地の仮設住宅は気密性が低いと考えられる。これは実際に筆者が室内

を視察したことと、自由記述にあるように虫が室内に入ってくる等からある程度裏付けられよう。また並行して

表 18 仮設住宅の改善点に関する自由記述 (抜粋)

(a)開成団地	
満足	・仮設住宅の生活が楽しく、現状で満足している。(開成) ・設計に関しては今のままでよい。(開成)
防音	・壁を厚くして隣の音が聞こえないようにしてほしい。(開成) ・暑さ寒さよりも防音対策が必要。(開成、南が駐車場)
住棟間隔	・棟と棟の間が狭く圧迫感がある。(開成、角部屋、山に隣接)
収納	・収納スペースを増やしてほしい。(開成、角部屋、南が開けている)
窓(採光)	・窓が少なく暗いため昼間でも電気をつけている。(開成、角部屋)
街灯	・周辺の街灯が少ない。(開成、角部屋)
その他	・防音、収納、窓にひさしをつけてほしい。(開成) ・プレハブではなく木造の方がいいと思う。(開成) ・出来れば一戸建てが良い。壁を厚くしてほしい。(開成) ・防犯のためドアの開けっ放しができない。(開成)
(b)大橋団地	
防音	・近隣からの音を少しでも軽減する工夫が必要。それだけでかなり落ち着いて生活できる。(大橋) ・雨音が小さくなるように。(大橋、角部屋)
住棟間隔	・仮設住宅の間をもう少し開けるといいと思う。風通しがわるい。(大橋、北が開けている)
子供	・隣同士がお互いに気を遣わなくてもよい環境が一番いい。例えば子持ちの家族は同じ棟などにする。(うちの棟は自分のところだけ子持ちなため気を遣う)(大橋、南が駐車場)
コミュニ ティ	・前に住んでいた地域同士の人たちが集合した方がよい。(大橋)

表 19 その他の自由意見 (抜粋)

メーカーによる 差	・仮設住宅は建物によって差がありすぎると思う。選んで入居できるわけではないので一定であってほしい。(大橋) ・仮設住宅のメーカーによって間取りや材質に大きな差がありすぎる。短期間のことなら仕方ないと思うが、3年以上生活している今現在では部屋の広さや収納がほしいと思っている。(大橋、角部屋、南が開けている、大通りに隣接) ・ハウスメーカーやプレハブ協会により格差があります。施工には一定の基準を設けるべきである。仮設団地内の主要道路は道路交通法の基準が満たせるような形にして、二次災害時にスムーズに避難できるようにする。(大橋、南が駐車場)
造り	・大橋団地の風呂はつくりが悪い。台所の流し台がせまくメーカーによって善し悪しが変わってくる。また、震災後に気管を悪くして咳が止まらなかった。今も空気が悪くてその症状が続いている。(大橋) ・やはり仮設住宅だけあって造りが雑すぎます。長期間暮らす仮設住宅なので、もう少し住む人の気持ちになって立ててほしかったです。(開成、南が駐車場)
先が見えない ストレス	・仮設は隣のトイレのドアが開まる音も聞こえるしプライバシーがない。仮設住宅に住み始めてからまもなく3年半が経ちますが他にいくところがありません。何もかもが嫌になることが多々ありますが、まだ仕事の方に集中することで気を紛らわせることができます。(大橋、角部屋) ・我慢も時期が長くなるトラブル、ストレスの原因になります。公営住宅の見通しも見えてこないのでお先真っ暗。(開成、南が駐車場)
ペット	・今回の震災では多くのペットも犠牲になりました。私の知り合いはペットを連れて避難所まで行きましたが「外に置いていけ」と言われ、津波にのまれて亡くなりました。今後はとてあえず犬も中に入れて、落ち着いたらペット専用の部屋を確保したいと思います。予測される南海トラフ地震の時は決してこのようなことがないようにしてください。(開成、角部屋)

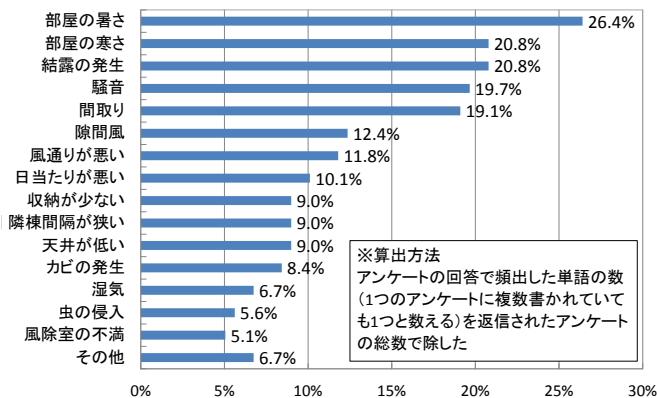


図 39 自由記述欄より導出した仮設住宅生活での不満点の頻出割合

行っている実測では、天井部分の断熱がうまくなされていない部分も確認している。

(c) 立地、周辺環境

先の夏期・中間期・冬期の温熱環境の結果について、南側が駐車場等で開けているか(日当たり等)、大橋団地の場合は、川に近い(川風の影響等)に着目して分析した。結果を図 38(b,c)に示す。また立地、周辺環境による温熱環境に関する自由記述回答の一部を表 17 に示す。

開成団地において、南側が開けている住戸はすべての地域で評価が高い。特に夏期と中間期で顕著である。大橋では、夏期と中間期において、南側が開けている住戸、川に近い住戸、どちらでもない(中央にある)住戸の評価はほとんど差がない。冬期では、南側が開けている住戸の評価が高い。冬期について、大橋団地の南側が開けている住戸の評価が高いのは、住棟(長屋)が開成に比べて東西に連続して長く、南側が開けていない住戸の日当たりがより悪いためだと考えられる。

表 20 測定項目・方法

(a) 定点気温測定(空き住戸の室内外)		
測定項目	測定装置	測定方法・備考
気温	データロガー付き温度計(T&D社製、TR51S、測定精度:±0.3℃)	冷気流と川風の影響を把握するため、開成は空家2戸室内・室外4ヶ所、大橋は空家2戸室内外2ヶ所に設置。日射の当たる場所では日射遮蔽。測定間隔は2分。
(b) 移動実測(屋外の気温、風向風速の分布)		
測定項目	測定装置	測定方法・備考
気温	データロガー付き温度計(T&D社製、TR52、測定精度:±0.3℃)	自転車に取り付けた通風管にセンサーを入れ測定。測定間隔は5秒。気温移動実測の所要時間は、大橋で10分、開成で20分程度。
位置情報	GPS(GARMIN社製、eTrex、測定精度:10mRMS未満)	測定間隔は5秒。
風速	風速計(KANOMAX社製、6004、測定精度:±(指示値の5%±0.1)m/s)	各測定地点(開成15ヶ所、大橋13ヶ所)で30秒毎に瞬時値を3回記録
風向	細く裂いたビニールひも、コンパス(方位磁石)	風向は16方位で判別。風速と同地点で30秒毎に3回記録。
(c) 短期集中的な測定(WBGT、表面温度分布)		
測定項目	測定装置	測定方法・備考
湿球黒球温度(WBGT)	熱中症指標計(京都電子工業社製、203B、測定精度:WBGT±2℃、気温1℃、相対湿度±5%、黒球温度±2℃)	周辺環境に慣らした後、各測定点でWBGT、気温、相対湿度、黒球温度を記録(手動)。
表面温度分布	赤外線放射カメラ(日本アビオニクス社製、G100m、測定精度:±2℃)	仮設住宅の壁面・屋根面、地表面の温度分布を撮影(手動)



図 40 移動実測の様子

表 21 測定を行なった日時

日付	天気	最低気温	最高気温	移動実測時刻(夜間)	移動実測時刻(日中)	その他
8月12日	曇・雨	20.6℃	26.6℃	0-1時、2-3時		
8月13日	晴・曇	20.7℃	27.7℃	0-1時、2-3時、4-5時	12-13時、16-17時	14-15時:WBGT(大橋)
8月19日	晴・曇	21.9℃	26.9℃		12-13時、16-17時	
8月20日	晴	22.9℃	30.6℃	0-1時、2-3時、4-5時	12-13時、16-17時	14-15時:WBGT(開成第12団地、大橋)
8月21日	晴・曇	23.7℃	31.7℃	0-1時、2-3時、4-5時		

※定点気温測定は8月11日15:30~21日14:20で行なった。赤外線カメラ撮影は適宜行なった。

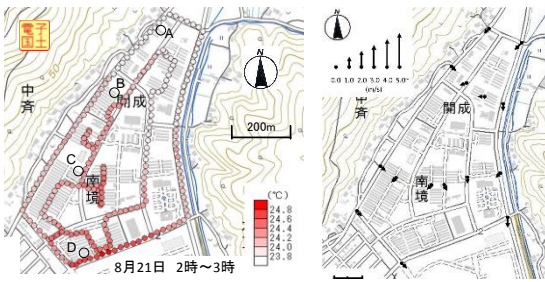


図 41 夏季夜間の移動実測による気温分布と風向風速（開成団地）

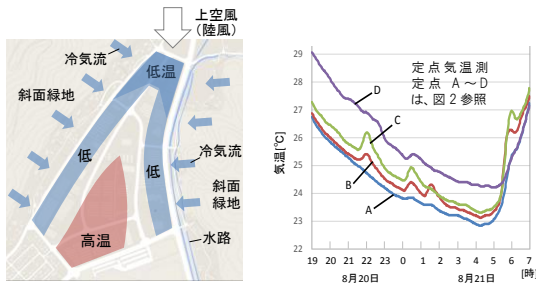


図 43 夜間における冷氣流の影響の概念図と定点気温データ（開成）



図 44 夜間の川風の影響の概念図（大橋）

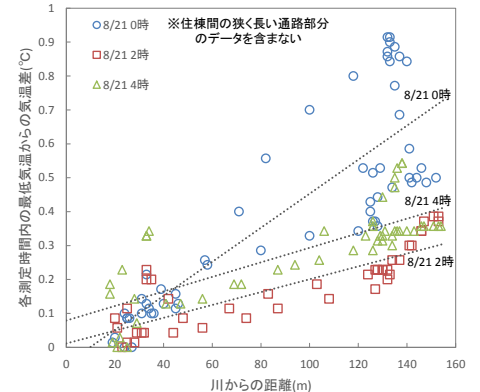


図 45 河川からの距離と気温との関係分析（大橋・夜間）

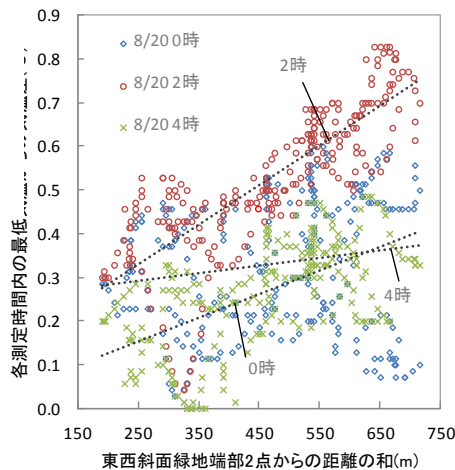


図 46 斜面緑地端部からの距離と気温との関係（開成・夜間）

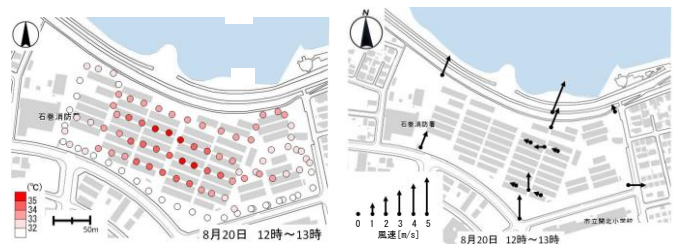


図 47 日中の移動実測による気温分布と風向風速（大橋）



図 48 住棟間通路の様子とそこでの暑熱環境の概念図（大橋）

自由記述では、開成は風が強いというコメントが目立った。角部屋や南または北が開いている住戸は、プライバシーや日当たりの点で良いが、強風の影響を受けやすいことが考えられる。

(d) 仮設住宅の改善点、不満の頻出割合など

仮設住宅の改善点（もし自分が設計するとしたら）についての回答の抜粋を表 18 に示す。また、その他の要望について表 19 にまとめた。さらに、アンケートの自由記述欄すべてを対象に、仮設住宅での生活の不満に関するキーワードを抽出し、頻出の割合を求めたものを図 39 に示す。

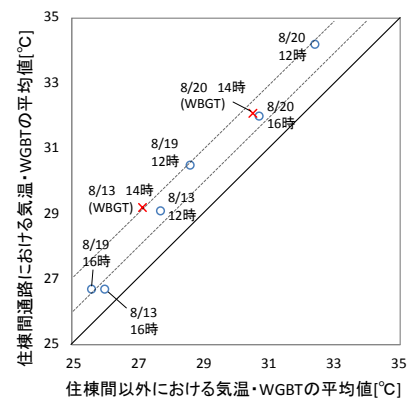


図 49 住棟間通路とそれ以外での気温差（大橋・日中）

これまでの回答結果やここで指摘された改善点において、住棟間隔が狭いという意見がいくつか見られる。別途行なった夏季実測において、狭く長い通路部分では、風が弱く、その他の部分に比べて夏季日中の気温が2℃ほど高いことが確認されている。これは、設計時点ではなかった風除室を建設後に増築したため、住棟間の通路幅（住棟間隔）がより狭くなったものと考えられる。今後の仮設住宅群を設計する際に考慮すべき点である。その他、遮音やメーカーによる居住性能の差異に対する不満、そして、災害公営住宅の建設が遅れ、先が見えないストレス等の心理状況が示されている。

自由記述欄における不満点の頻出割合（図 39）について、本アンケートは温熱環境を中心に質問しており、暑さ寒さが頻出するのは当然といえる。温熱環境以外で挙げられた騒音（遮音性能が乏しい）、間取り（狭さ等）に関しては、有意な不満であり、今後の大きな改善事項といえる。

またアンケート配布中に一部の住民に、現地視察の中で気になっていたことを聞くことができた。例えば玄関先や南面外部に植木鉢等の植栽がみられる住戸も多かったが、これは暑熱環境の緩和が目的でなく、園芸が趣味だとか、緑に癒されるという回答であった。畑が生きがいの記述もアンケート内に確認されている。

(2) 仮設住宅の屋外熱環境実測結果

移動実測（気温、風向風速）について、夜間に11回、日中は6回行なった。開成団地の夜間実測結果の一例を図41、大橋団地の夜間・日中の実測結果例を図42,47に示す。なお、日中は南からの海風が卓越し、対して夜間は風が弱く、若干北風（陸風）が多い傾向にあった。実測結果より、長屋間の狭く長い通路では風が弱く、気温が高い傾向が把握できた。また夜間では、斜面緑地および河川近くの気温が低い傾向が見られた。その概念図を図43,44に示す。これを裏付けるため、斜面緑地または河川からの距離と気温との関係、住棟間とそれ以外での気温について分析した。結果の一部を図45,46,49に示す。

大橋団地における長屋間の通路の気温は、他の場所と比べて、日中で1~2℃、夜間で0.3℃ほど高いことが明らかとなった。東西に長い住棟の間隔（通路幅）は建設当初4mであったが、その後風除室等の増築により通路幅は2.3m程度に狭くなっている。室外機からの排熱や通路内を風が通らないことが原因と考えられる。この住棟間隔の狭さは、冬季では日当たりの悪さの要因となることも別途確認しており、計画段階からの見直し改善が必要であると考えられる。

周辺環境の影響、具体的には夜間の川風と冷気流について、大橋団地では狭い通路間を除いて河川に近いほど気温が低く、160m離れると0.2~0.9℃程度の気温差が認められた。これは川からの冷風によるものと考えられる。

開成団地では、冷気流の影響として、緑地に近いほど気温が低い傾向にあり、緑地付近と緑地から離れた団地中央では約0.5℃の気温差を確認した。定点の気温では、団地の南北600~800m間で、1~2℃の気温差が生じていた。ただし、これらの夏季夜間の川風と冷気流の気温低減効果は、仮設住宅の長屋の住棟が密集している部分では限定的であり、住棟間通路は気温が比較的高い状況が続いていた。

4. 実効性のある提言

本研究では、東日本大震災での応急仮設住宅の建設数が最大級である宮城県石巻市の仮設開成・大橋団地の2団地を対象に、住民を対象としたアンケートにより避難所と仮設住宅の生活環境を調査し、また同時に屋外熱環境実測により、仮設住宅（プレハブ平屋長屋タイプ）の主に温熱環境の課題を抽出した。そこから見出せる実効性のある提言についてまとめると以下のようになる。

4-1. 避難所生活について

避難所生活に関するアンケートについて、1000部配布し、166の回答を得た。避難場所・時間経過による温熱環境の違い、就寝スペース、体調変化、プライバシー等について、当時の状況を把握し、被災者の具体的なコメントを得ることができた。

(1) 物資（水、食糧）

今回石巻で行なったアンケート調査では、一番困った事項の上位に食糧・飲料水不足、また事前対策では備蓄がトップで、具体的にはやはり水と食糧であった。図32では、食糧・水不足は発災直後より、4日~3週間の期間区分でコメント数が多かった。このことについて、阪神・淡路大震災での調査結果⁴⁾と比較したのが図34である。

阪神・淡路大震災での神戸市における避難所58ヶ所を対象に行われたアンケート⁴⁾によると、地震後1週間経つと、食事または飲料水が不足と答えた人の割合は2~3割となっている。対して、本研究の調査結果では、食糧・飲み水不足について、4日~3週間の期間区分が最も不足と答えた人が多く、回答記述した人の中での割合は約5割であった。これは、東日本大震災が太平洋沿岸部で広域（長距離）に渡り被災し、ガソリン不足によりトラックが被災地に入れない等もあり、発災後4日~3週間の期間でも、外部からの支援物資が十分に届かなかったためだと推測される。

(2) 温熱環境

東日本大震災でのアンケートによると、低体温症による重篤な症状が一部あったが、全体的には温熱環境（3,4月の寒さ）よりも物資不足などがより大きな問題として挙げられる傾向にあった。

一方で、避難所における夏季の暑さに関する課題や改

善については、石巻の今回の調査では、データとして不十分であった。参考までに、別途、夏季に発生した新潟県中越沖地震で最も被害が大きかった柏崎市において、避難所でリーダー的立場であった当時の町内会長（男性）とその妻にヒアリングしており、その結果の概要を表 13 に示す。夏季の暑さについて、アルカリ飲料水、氷柱、冷却シート、団扇の配布や、間仕切りが通風を阻害することは、既往調査でも確認されている。夏季の体育館で、中央部分が暑く、窓際が涼しいという内容は、既往調査ではあまり指摘されていない点である。

(3) 物資不足への備え

今回のアンケートで、避難場所・時間経過による温熱環境の違い、就寝スペース、体調変化、プライバシー等について具体的な内容（愁訴）や課題を把握できた。しかし、その解決法は多岐にわたる。中でも、東日本大震災で最も顕在化した問題は、食糧、飲み水を中心とした物資不足が、過去の災害に比べて長期間続いたことである。これは物資を輸送するトラックが、被災地のガソリン不足により現地に入れなかったことが大きいと指摘されている。南海トラフ地震でも同様のことは十分に起こりえる。巨大災害時、ガソリンの輸送体制を確保する手法は難しく、そのため、収容避難場所（避難所）だけでなく、個人や家族、企業の単位で、必要とされる備蓄を用意しておくことが最も確実な方法であろう。

本調査では既往の調査と比べて新しい知見は少ないが、ひとりひとりが、本調査で得られた避難所生活での実体験や問題等を見聞きし、日頃からその備えをしておくことに尽きるといえる。

4-2. 応急仮設住宅の温熱環境について

アンケート調査と実測の結果を踏まえ、仮設開成・大橋団地のプレハブ長屋型仮設住宅での生活環境（主に温熱環境）に関する課題の抽出と、その改善に資する実効性のある提言について、以下に述べる。

(1) 2年を大きく超える入居期間とそこでの問題

仮設住宅の入居当初と居住して3年後の生活環境の変化について、アンケート結果の差はほとんど見られず、平均値は「普通」と「やや不快」の間であった。入居直後の変化に着いて、自由記述では、断熱材、二重サッシ、風除室の増設で快適になったという意見もみられた。本来仮設住宅の居住期間は2年間であり、震災より4年以上が経過してもまだ6〜7割の人が仮設住宅で生活を続けている。仮設住宅の経年劣化も指摘されだしている。行政による災害公営住宅の建設あるいは災害公営住宅への転居が遅れているため、先が見えないストレスを訴える人もおり、早急な対策が望まれる。

(2) 仮設住宅の種類（メーカー）の差

夏期・中間期・冬期のすべてにおいて、アンケートによる大橋団地の温熱環境（快適性）評価が開成団地に比

べて高い結果となった。これは仮設住宅の建設メーカーの違いが考えられる。開成団地では、虫やネズミが侵入するというコメントもあり、気密性が低いと考えられる。他の地域の仮設住宅においても、仮設住宅の種類（メーカー）による不公平感が指摘されている。仮設住宅の供給を考えると簡単ではないが、地域性を考慮した上で、一定の居住性能を担保した仮設住宅が提供される体制づくりが望まれる。

なお、アンケートの自由記述欄における不満の頻出割合では、温熱環境以外で、騒音（遮音性能が乏しい）、間取り（狭さ等）、結露が上位に来ている。特に隣の音が聞こえる、防音対策をしてほしい、というコメントは多い。温熱環境への愁訴は大きいですが、それと同時に、他の仮設住宅における調査でも聞かれる遮音性能、部屋の広さへの不満は、今後の仮設住宅の供給に際し、配慮すべき点といえる。

(3) 立地条件（住戸の位置および周辺の自然環境を含めて）の考慮

アンケート調査により、南側が駐車場等で開けている住戸は、季節別で、開成団地では全期間、大橋団地では夏期以外で温熱環境評価が高い結果となった。この理由として、東西に長い長屋形式で住棟間隔が狭いため、中央の住戸だと、日当たりが悪い、空気がよどむなどが自由記述からも推察できる。これは実測でも裏付けられている。

周辺の自然環境（山や川）の影響として、夏季夜間、川風や冷気流による気温低減効果を団地内の実測で確認した。具体的には、大橋団地の南北160mの間で0.2〜0.9℃、開成団地の南北約800mで約2℃の気温差（川風や冷気流の冷却効果）が確認された。ただし、仮設住宅の長屋の住棟が密集している部分では、その効果は限定的であった。

室内環境に影響を与える屋外熱環境の観点で、周辺の自然環境の影響、および住戸の位置を含む立地条件を考慮することは重要であり、今後の仮設住宅団地の配置計画で検討すべき点である。

(4) 狭い住棟間隔の見直し

上述したように、開成および大橋団地の東西に長い住棟の間隔（通路幅）は建設当初4mであったが、その後風除室等の増築により通路幅は2.3m程度に狭くなっている。夏季日中、通路内の気温は、他の場所に比べて1〜2℃高い傾向にあった。このことはアンケート調査でも意見が見られる。これは室外機からの排熱や通路内を風が通らないことが原因と考えられる。夏季夜間でも、比較的低温の川風および冷気流による気温低減効果は、その狭く長い住棟間隔ではみられない。この住棟間隔の狭さは、冬季では日当たりの悪さの要因となる。これは太陽高度およびアンケート結果より裏付けられている。

限られた仮設住宅の建設用地により多くの仮設住宅を建て、より多くの被災者を受け入れる意図であると考えられるが、今回、当初計画になかった風除室を増築したこと、そしてそれが冬季の日照、夏季の暑熱環境の観点から、さらに4年以上の長期に渡って居住することを考えれば、住棟の間隔（通路幅）は見直すべきであろう。建設の前段階から、風除室、配置計画、日照・通風計画、温熱環境を考慮して、見直し改善が必要である。具体的な数値を挙げるなら、東西に長い長屋平屋形式であれば、冬至で4時間の日照を確保する観点より、南北の住棟間隔は最低でも6mは空けるべきである。

4-3. 今後の展望

本研究助成期間内においては、東日本大震災での応急仮設住宅の建設数が最大級である宮城県石巻市の仮設開成・大橋団地の2団地を対象に、住民へのアンケート調査および夏季・冬季の熱環境実測を通して、立地と配置の観点より仮設住宅の生活環境改善について分析と提言を行なった。今回の研究対象は、最も一般的といえる長屋形式の平屋・鉄骨プレハブ造の仮設住宅群であるが、東日本大震災では、2章で述べたように木造戸建てや、プレキャストコンクリートパネルによる2階建て、貨物用コンテナによる3階建てなど、いくつかの種類の仮設住宅が建設された。異なった構造や形式の仮設住宅における生活環境に関する分析は今後取り掛かる予定である。

また、福島第一原子力発電所事故による避難の問題（避難所、応急仮設住宅）は、地震・津波といった自然災害による避難とは性質が異なる部分があり、同列に議論することが難しい。原発事故に係る避難所、仮設住宅での生活について、真摯に向き合うことが必要と考えられ、この部分も今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 内閣府：地震発生後の被災者の生活環境対策（概要）、地方都市等における地震防災のあり方に関する専門調査会（第6回）（2011年3月）配布資料、<http://www.bousai.go.jp/jishin/chihou/bousai/6/pdf/3.pdf>（2015年12月8日参照）
- 2) 羽賀義之、金俊豪、三橋伸夫：新潟県中越地震における地域施設の指定避難所としての使われ方の実態と傾向 - 旧長岡市の指定避難所を事例に -、日本建築学会計画系論文、73（624）、pp.349-355、2008.2
- 3) 永幡幸司、金子信也、福島哲仁：避難所における生活環境の問題とストレスとの関係について、http://www.sss.fukushima-u.ac.jp/~nagahata/research-j/earthquake/temporary_shelter_j.pdf（2015年12月8日参照）
- 4) 原田哲也、室崎益輝、大西一嘉、小林正美、牧紀男：阪神・淡路大震災における避難生活に関する研究 - その1 神戸市の避難所生活者へのアンケート調査を通じて -、日

- 本建築学会学術講演梗概集、F-1、pp.365-366、1995.7
- 5) 高市圭、細尾 敦、神田亮：地震災害時に避難所となる建物の住環境と耐震性能の関連性に関する研究 - その1 住環境評価に基づく分析 -、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.249-250、2009.7
 - 6) 坂本菜子、塩崎賢明、重村力、内藤廣、中林一樹、有村桂子、牧紀男：座談会 各地の仮設住宅の生活と問題点、建築雑誌（2000年2月号）、日本建築学会、pp.13-21、2000.2-
 - 7) 木村悟隆：仮設住宅の居住性、長岡技術科学大学 新潟県中越地震被害報告書、2006.4、<http://coastal.nagaokaut.ac.jp/~jisin/report/index.shtml>（2015年12月8日参照）
 - 8) 松本知佳、柳澤亮太、高木直樹、矢野裕吾：2011年長野県北部地震における応急仮設住宅の居住環境に関する研究、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、pp.715-718、2013.6
 - 9) 佐藤豊、郡公子、石野久彌：仮設住宅の熱環境に関する研究 実測及びシミュレーションツール BEST による仮設住宅の冬季熱環境の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、平成24年(2)、pp.2051-2054、2012.8
 - 10) 亀井一得、大村信望、鈴木篤、藤賀雅人、田村誠邦、山本俊哉：応急仮設住宅居住者の住宅に関するストレス要因 - 陸前高田市における住宅再建に関する研究(6) -、日本建築学会大会学術講演会梗概集、pp.213-214、2013.8
 - 11) 内閣府：避難所における良好な生活環境の確保に関する検討会（第1回）資料8、http://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/h24_kentoukai/1/index.html（2015年12月8日参照）
 - 12) 国土交通省住宅局：応急仮設住宅 着工・完成戸数の推移（平成24年3月11日10時00分現在）、<http://www.mlit.go.jp/common/000143900.pdf>（2015年12月8日参照）
 - 13) 国土交通省住宅局：応急仮設住宅着工・完成状況一覧表（平成25年4月1日10時00分現在）、<http://www.mlit.go.jp/common/000140307.pdf>（2015年12月8日参照）
 - 14) 内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）（平成25年3月18日）、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo2_1.pdf（2015年12月8日参照）
 - 15) 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集 1.第1期・初動対応（初動72時間を中心として）【02】避難所の開設、http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/download/pdf/1-3-2.pdf（2015年12月8日参照）

- 16) 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集 2.第 2 期・被災地応急対応（地震発生後 4 日～3 週間）【02】避難所の生活環境、
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/download/pdf/2-1-2.pdf（2015 年 12 月 8 日参照）
- 17) 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集 3.第 3 期・本格的復旧・復興始動期（地震発生後 4 週間～6 ヶ月）【01】避難所の長期化、
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/download/pdf/3-1-1.pdf（2015 年 12 月 8 日参照）
- 18) 坂茂建築設計 SHIGERU BAN ARCHITECTS、
<http://www.shigerubanarchitects.com>（2015 年 12 月 8 日参照）
- 19) NHK：NHK スペシャル シリーズ東日本大震災 最後の避難所～原発事故の町 住民たちの歳月～、2013 年 12 月 27 日放送、
<http://www6.nhk.or.jp/special/detail/index.html?aid=20131227>
 （2015 年 12 月 8 日参照）
- 20) 岩佐明彦、落合一真：仮設住宅からの環境移行、東日本大震災 3 周年シンポジウム、日本建築学会、pp.141-146、2014.3
- 21) 国立教育政策研究所、
<http://www.nier.go.jp/shisetsu/pdf/chuetsuokihinan.pdf>（2015 年 12 月 8 日参照）
- 22) 厚生労働省報道資料（平成 23 年 3 月 12 日）、
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000014tr1-img/2r98520000015aqf.pdf>（2015 年 12 月 8 日参照）
- 23) 倉野康彦：避難所 HUG（ハグ）東日本大震災で役立つ、消防科学と情報（111）、pp.43-46、2013
- 24) 倉野康彦：避難所運営を模擬体験 震災でも効果防災ゲーム『避難所HUG』、47NEWS（2013 年 6 月 10 日）、
<http://www.47news.jp/47gj/latestnews/2013/06/1461623.html>
 （2015 年 12 月 8 日参照）
- 25) 森太郎、南慎一、竹内慎一、定池祐季：厳冬期被災を想定した避難所運営手法に関する研究 その 1 防災訓練時の温熱環境の比較と避難所運営手法（HUG）の実施結果、日本建築学会北海道支部研究報告集(85)、pp.289-292、2012.6
- 26) 米野史健、被災者に対する住宅供給の現状と課、BRI（独立行政法人建築研究所）-H23 講演会テキスト、2011、
http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h23/pdf/bri20120309_txt03.pdf（2015 年 12 月 8 日参照）
- 27) 牧紀男、仮設住宅年表、建築雑誌、2000 年 2 月号、115（1450）、pp.33-35、2000.2
- 28) 卜部兼慎：仮設住宅の暮らし方 一年間の仮設生活（阪神・淡路大震災における住まい方の記）建築雑誌、2000 年 2 月号、115（1450）、pp.30-32、2000.2
- 29) 伊村則子、石川孝重：災害の特性を生かした応急仮設住宅のあり方 その 2 アンケート調査による自治体の考え方、日本建築学会関東支部研究報告集、68、pp.481-484、1998.2
- 30) 鈴木篤、大村信望、亀井一得、藤賀雅人、山本俊哉、田村誠邦：気仙地域の地元事業者が建設した応急仮設住宅の実態と特質 -陸前高田市における住宅再建に関する研究（4）-、日本建築学会大会学術講演梗概、pp.209-210、2013.8
- 31) 大村信望、亀井一得、鈴木篤、藤賀雅人、田村誠邦、山本俊哉：事業者タイプ別に見た応急仮設住宅の住宅性能に関する居住者評価 -陸前高田市における住宅再建に関する研究（5）-、日本建築学会大会学術講演梗概、pp.211-212、2013.8
- 32) 林野庁：平成 23 年度森林・林業白書（平成 24 年 4 月 27 日公表）、
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/23hakusyo/>
 （2015 年 12 月 10 日参照）
- 33) 岩佐明彦：仮設のトリセツ もし、仮設住宅で暮らすことになったら、主婦の友社、2012.2
- 34) 新潟大学工学部岩佐研究室：仮設のトリセツ -仮設住宅を住みこなすための方法-、
<http://kasetsukaizou.jimdo.com>（2015 年 12 月 10 日参照）
- 35) ソクセキ断熱/納涼プロジェクト、
<https://sites.google.com/site/hukkouns/home>（2015 年 12 月 8 日参照）
- 36) 若林可奈、田端康宏、片岡えり：東北地方における仮設住宅の住環境改善に向けた断熱補強実践の報告「ソクセキ断熱プロジェクト」でのニーズ把握及び住民の住みこなしに基づいたアイデア提供手法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1373-1374、2012.9
- 37) 趙晟恩、西出和彦、大月敏雄、齊藤慶伸、朴晟源、深井祐紘、生山翼、金敏、篠本快、富安亮輔：応急仮設住宅団地内の共用空間における使われ方の変化に関する考察 仮設住宅団地における外部空間活用に関する研究（その 1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.13-16、2013.8