

フレーム間差分法によるキャビテーティングジェットにおける キャビテーションクラウドの壁面衝突挙動計測

Measurement of Cavitation Clouds in Cavitating Jet Impinging on Solid Wall Using Frame Difference Method

杉本康弘*, 大慈彌三郎**, 佐藤恵一*

Yasuhiro SUGIMOTO*, Saburo OOJIMI**, Keiichi SATO*

Abstract

In this study cavitating jet impinging on solid wall is visualized using an image analysis. Though high speed video observations give us some important visual information, the quantification of video images is one of important problems. Here, the behavior of cavitation clouds is investigated from side view and back view of the impinging wall simultaneously. A time series of cavitating appearances are visualized by an image analysis. Behaviors of cavitation clouds can be clearly visualized by the frame difference method. We try to estimate quantitatively the behavior of bubble collapse by the image analysis method. As a result, we propose a frame difference image analysis method in order to estimate high-speed behaviors of cavitation clouds taken by a high speed video camera. We show that the image analysis is useful to estimate bubble behaviors quantitatively. Using the image analysis method it is found that cavitation impacts are closely related with bubble deformation and collapse.

概要

本研究では画像解析を用いて壁面に衝突するキャビテーティングジェットの挙動解析を試みている。高速度ビデオ観察は視覚的には重要な情報を与えてくれるが、その映像の定量化が緊要な課題である。ここでは、壁面近傍の様相を明瞭に観察するため、流れ場に影響があるものあえて狭い流れ場を用いて実験を行った。フレーム間差分を用いた画像解析によりキャビテーションクラウドの挙動を明瞭に捉える手法を示し高速度ビデオ映像の定量的な評価を試みた。

その結果、高速度ビデオで捉えたキャビテーションクラウドに関する高速現象を定量的に捉えることができ、その手法を用いクラウド状気泡群崩壊・変形挙動と衝撃との密接な関連を定量的に明らかにした。

Key Words : *Water Jet, Cavitation Cloud, High Speed Video Observation, Image Analysis, Frame Difference Method*

1. 緒言

高速水中水噴流においては、その噴流まわりに発生するキャビテーションクラウド(以下気泡群とする)において非定常な挙動を示すことが知られており、カッティング、ショットレスピーニングおよび洗浄などにとどまらず微粒化技術や殺菌など幅広い分野で利用されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これらは非定常な気泡群の高衝撃性を利用しており、気泡群の非定常挙動および高衝撃性メ

カニズムに対して著者らの研究を含む多くの研究が行われてきている⁽⁴⁾⁻⁽¹²⁾。近年、気中においても工夫された装置でキャビテーションジェットが実現されており、このような気中キャビテーションジェットにおいても水中と同様の非定常な気泡群が発生していることが指摘されている⁽⁸⁾。このような高衝撃・壊食には気泡群の非定常性が密接に関係しており、作動条件によりその結果は大きく異なることが示されている。

上記のような気泡群の非定常な高速変形挙動のメカニズムを

原稿受付日：2007年12月6日

* 金沢工業大学 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

Kanazawa Institute of Technology (7-1 Oogigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-8501, Japan)

** 金沢工業大学大学院 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

Graduate school of Kanazawa Institute of Technology (7-1 Oogigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-8501, Japan)

明らかにするためには、高速度ビデオ観察は重要な手段である。しかしながらビデオ画像そのものは視覚的瞬間的な情報であり、その定量化手法の開発が緊要な課題である。ここでは、気泡群挙動の計測を行う。画像処理を用いたキャビテーション現象の計測に関して代表的なものとして、祖山らはレーザで可視化した気泡雲の挙動を時間的に積層しクラウドの非定常挙動を評価している⁽¹³⁾。Phamらは翼形に発生する気泡群の非定常挙動を捉えている⁽¹⁴⁾。また、小林らは、ウォータージェットの気泡群の存在領域を評価し、せん断層渦キャビテーションの挙動を示している⁽¹⁵⁾。そのほかにも画像処理を用いて時間平均的なキャビティ変動領域と壊食領域の評価が行われている⁽¹⁶⁾。しかし、これらは気泡群の存在領域の解析であり、動的な気泡群の高速変形挙動を明確な形で捉える手法の開発が待たれている。

著者らは気泡群の高速な現象の時間経過に対する動的な変化量を評価するためフレーム間差分⁽¹⁷⁾を用いて画像解析を行ってきた。フレーム間差分法は動画において2画像の変化量を捉え、物体の追跡になど用いられる手法⁽¹⁸⁾であり、本研究のような気泡群変化を対象とする映像を評価するために有効であると考えられる。筆者らはこのフレーム間差分手法を用いることでクラウドキャビテーションのリエントラント挙動や崩壊伝播挙動の定量的評価を試みてきた⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

以上のような背景のもと、本報告では、フレーム間差分に基づく画像解析の意味づけをするために、本手法を簡単なモデルに適用することによって気泡発生・崩壊・変形現象の物理的解釈に関して検討を行った。ついで、壁面近傍での複雑なキャビテーションジェット挙動の高速現象観察に適用し、詳細な気泡群挙動を定量的に捉えることが可能であることを示した。

2. 画像解析方法

物体の変形や移動を捉える画像解析手法として、背景差分やフレーム間差分⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾が挙げられる。背景差分は現在の画像とあらかじめ撮影された背景原画像との差をとることで原画像との変化を捉えることができる手法である。しかし、背景の状況が変化した場合は、観察対象物体のみを捉えることが困難である。フレーム間差分は時間の異なる2画像の差分をとることで観察すべき対象物の変化を得るものである。物体が静止している場合は解析できないが、常に背景を更新していることから2フレーム間の急速な物体の動作や変化を捉えることができる。

本研究では、フレーム間差分法を用いて気泡群の発生・変形・崩壊挙動を定量的に評価する。解析には高速度ビデオで撮影された画像を256階調のグレースケール化して用いる。実質上、本研究で撮影された画像のグレーレベル範囲はおおよそ20~250である。図1の模式図のように、256階調の2画像(t_1 : Image1, t_2 : Image2)において、各セルのグレーレベルを取り出し、フレームごとの差を求め濃淡変化領域を差分的に捉える。模式的に作成したモデルでの解析を図2に示す。二次元的に示

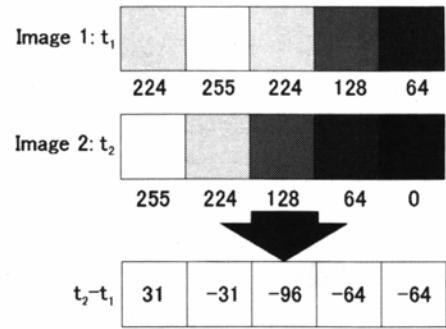


Fig.1 Image analysis method (Frame difference method).

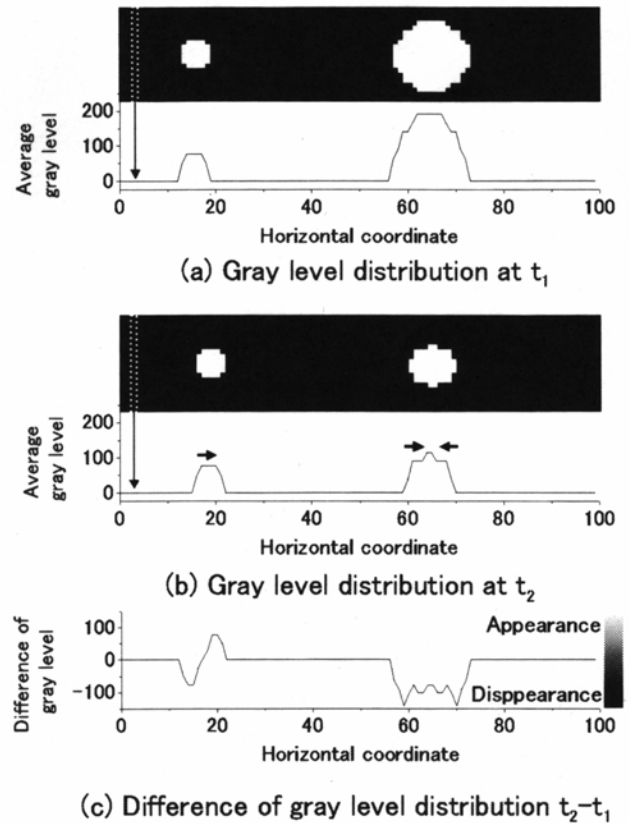


Fig.2 Example of image analysis (Frame difference method).

される模式図において縦方向に配列している各セルのグレーレベルの平均を求め、各画像の一次元的な平均グレーレベル分布を求める。この手法を各時間(高速度ビデオカメラのフレームに対応)における測定画像に適用し、色調の時系列的な変化を平均グレーレベル分布の形で図示する。

ここで撮影された本解析対象の一次画像では一般に気泡領域は白く(白の階調値は255)、気泡なし領域は黒く(黒の階調値は0)表示される。したがって白から黒への変化(グレーレベルにおいて、値の大きなほうから小さなほうへの変化)の差($G(t + \Delta t) - G(t)$)をとった場合、負値が気泡崩壊(あるいは消失)に対応し、正値が気泡の成長(あるいは気泡域の出現・拡大)を表すことになる。ここに差分を用いることでバックグラウンドの除去を行う必要がないこと、ある程度の不均一な照明

であっても解析可能であるという利点がある。本画像解析結果では気泡崩壊を示す負値を黒色で、気泡出現を示す正値を白色で表示する(バックライトにより可視化された場合は原画像の明暗(グレーレベルの階調)が反転して表示されるが、解析結果においては正負の符号を反転させ、気泡崩壊を示す部分を黒く示している)。

3. フレーム間差分手法の有効性に関する検討

上述の画像解析手法を気泡群に適用する前にモデル画像を用いて解析の有効性について検討を行う。壁面衝突型のキャピテーションジェットにおける気泡群の挙動に関して注目すべき点を挙げると以下ようになる。

- ①気泡群の移動
- ②気泡群の成長
- ③壁面へ衝突後、噴流中心から外側へ広がる挙動
- ④気泡群崩壊挙動
- ⑤リバウンド挙動

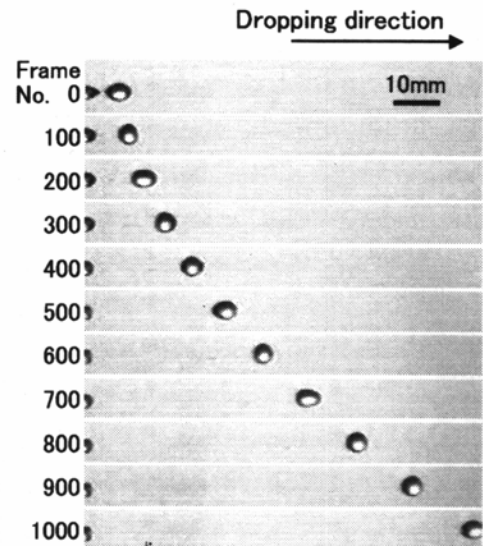
以上のような挙動を模擬的に捉え、本手法の有効性を確かめるために単純なモデルを用いて画像解析を行ってみた。その結果を以下に示す。

3.1 物体の移動に対する解析

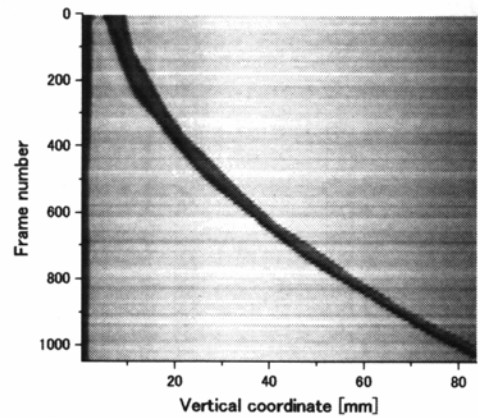
まず、気泡と同様に気液界面をもつ現象である水滴の運動を取り上げた。つまり、単純なモデルとして図3に示すような水滴がスポイト(出口径1 mm)から自由落下する挙動について、本画像解析法を適用した。

図3(a)は水滴の挙動を高速度ビデオカメラで9000 fpsで撮影した結果である。解析結果との一致のため画像を90度回転させており、画像右側が落下方向である。図3(b)に画像落下方向の挙動を捉えるため、落下方向に垂直な画像の縦方向へ投影した平均グレーレベルの時系列変化をコンター表示したものを示す。ここで平均グレーレベルの最大値を白、最小値を黒として50階調で表示している。画像サンプリング間隔 Δt は10 frameである。水滴を示す曲線が二次曲線状を示していることがわかる。また曲線の太さが変化していることから水滴径の変化を捉えていることがわかる。

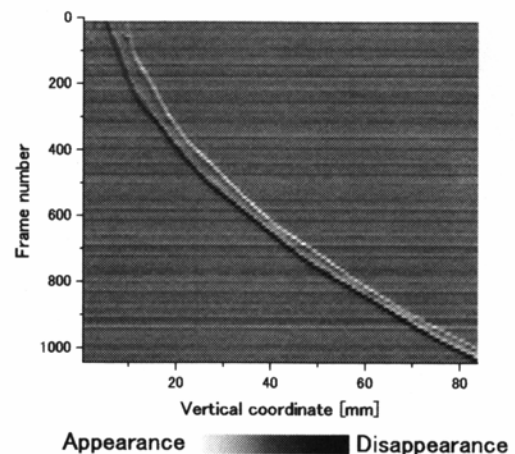
図3(c)に示すフレーム間差分法による解析結果においても水滴の移動に対応する曲線が得られている。原画像では背景が白で水滴の輪郭が黒で表されているが、フレーム間差分解析結果では階調を反転させ表示させている。水滴の移動方向側つまり水滴領域の落下側において白色軌跡、また上側で黒色軌跡が観察できる。落下側の白色域では明るい背景中に水滴域が現れたことを示し、反対に上側の黒色域では水滴域が消滅したことを意味している。これらの2線はほぼ平行であることから水滴が移動していると評価できる。なお、これらの線の時間軸に対する傾きは移動の速度を示している。このように物体の移動を2画面差分を用いて評価できることを示した。



(a) Behavior of droplet (Fs=9000fps)



(b) Gray level distribution of behavior of droplet



(c) Result of frame difference image analysis

Fig.3 Behavior of droplet and result of image analysis.

3.2 壁面近傍で崩壊する気泡群に対する解析

これまでの研究⁽¹¹⁾によれば、壁面に衝突する噴流に伴うキャピテーションクラウド(気泡群)は、壁面に衝突後リング状の気泡群を形成しながら周囲方向に広がり、その後崩壊する。さらに

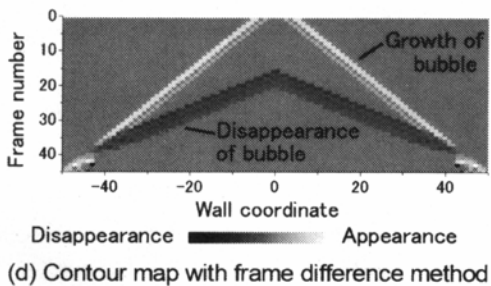
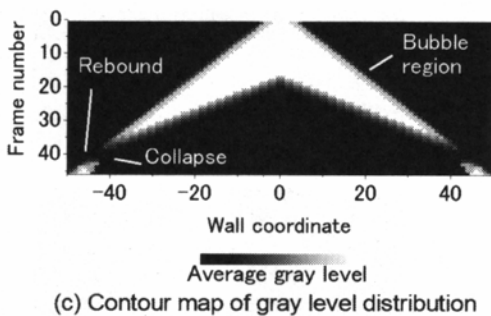
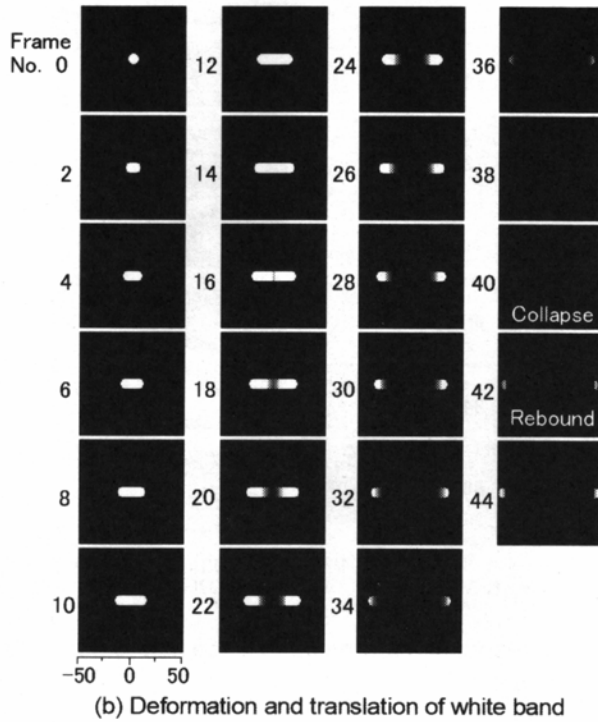
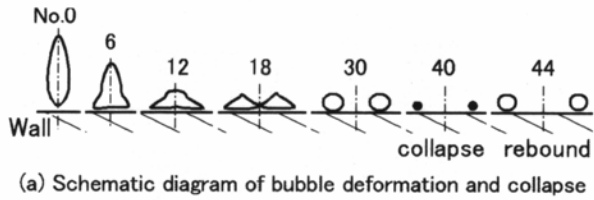


Fig. 4 Image analysis of collapsing behavior.

崩壊時には気泡群のおおよそ中央部から外側に向かって消滅していく様子も観察されている。その代表的な様相を模式的に表すと、キャビテーションクラウドの噴流軸断面における気泡群の変化は図4 (a) のようになる。

ついで、このような壁面近くでの気泡群変形挙動、特に壊食に

結びつく特徴的な挙動として注目されているリング状気泡群挙動を準二次元的に表すために図4 (b) に示すような丸(および長丸)を用いた模式画像を作成した。図4 (a) 中のNo.と図4 (b) 中のFrame No.とはおおよそ対応している。解析モデルにおいては細長の長丸形状が中央部から両外側に2ピクセル/フレームの速度で成長し、中央部から外側に向け4ピクセル/フレームの速度で消滅が広がっていくものとした。ここでは実際の現象に基づき成長速度よりも消滅速度のほうを大きくしてある。

図4 (c) に上記のモデルの平均グレーレベルの時間変化を示す。図4 (b) に示すように長丸で示される模擬気泡領域が一定の速度で両側に成長しており、図4 (c) の解析結果では気泡群領域を示す白色域が直線状に広がっている。Frame No.20付近より中央部から模擬気泡領域の消滅が始まり、白色域中央から黒色域が広がっていく。その後Frame No.40付近で気泡領域を示す白色域は一度消滅し、再膨張する挙動を捉えられている。ここで気泡崩壊に近づくにつれ、グレーレベルが低下している(白色域が不明瞭になっていく)が、本手法では平均グレーレベルで評価しているため模擬気泡領域の面積の低下に伴い、グレーレベルが低下する。実際には気泡崩壊の最終段階を評価することが重要であるため、解析領域やグレーレベルの評価方法および結果の表示方法など改善の余地がある。

図4 (d) にフレーム間差分法による解析結果を示す。模擬気泡の成長を示す白色域と消滅を示す黒色域が表示されている。成長速度と消滅速度が異なることから白色域と黒色域の傾きが異なっている。Frame No.20~35付近では黒色域と白色域が同時に存在することから模擬気泡の移動を示しているが、その間隔が狭くなることから気泡域は小さくなっていることがわかる。最終的にFrame No.40付近では黒色域のみとなり、消滅する領域であることが判断できる。また、実際の現象において気泡群は崩壊後、リバウンド挙動を呈する。本模式図においては外側への移動速度を一定と仮定し再膨張をモデル化した。図4 (d) における解析結果ではリバウンドを示す気泡域は気泡域の成長を示す白色域の延長線上に現れる。壁面近傍では外側に向かう流れがあることから実際の現象においても同様にリバウンド挙動を捉えられると考えられる。

4. キャビテーションジェットへの適用

4.1 気泡群観察実験

本研究では図5に示すような試験部を用いて実験を行った。ノズルはのど部径 $d = 1 \text{ mm}$ 、開口角 $\theta = 60^\circ$ のホーンノズルを用いた。噴流衝突面近傍での気泡崩壊挙動を断面的に観察するために、流れ場に影響があるが、あえてノズル下流部の流路幅 W を 15 mm に拘束した擬似的な二次元流路を用いた。透明アクリル樹脂壁面をノズル中心軸に垂直に設置し、そのアクリル樹脂壁面の背後には鏡をノズル中心軸に対して 45° 傾けて配置し、同時に2方向からの観察を行った。噴流衝突壁面はスタンドオ

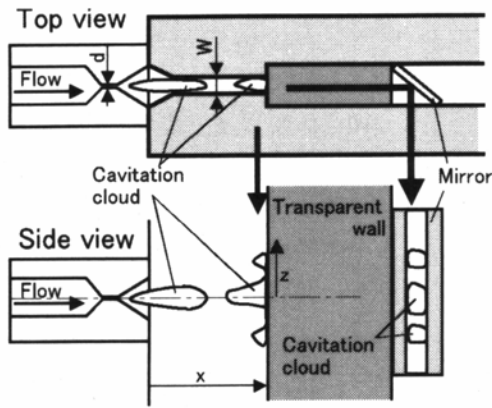


Fig.5 Schematic diagram of test section.

距離 $x/d = 40$ の位置に設置している。ここに、スタンドオフ距離 $x/d = 40$ では、拘束なしの流れ場においてあらかじめ行われた壊食試験において、リング状の壊食痕が発生することが確認されている。試料水は水道水を用い、高圧ポンプを介して噴射圧力 P_1 を 6 MPa に設定し、大気圧 P_2 下の水槽へ噴出した。ここに、ノズル中心軸上のノズル出口に原点をとり、ノズル中心軸方向に x 軸、ノズル中心軸に垂直方向に z 軸をとっている。

気泡群の挙動は高速度ビデオカメラ (KODAK, EKTAPRO HS4540) を用いて $F_s = 27000$ fps の撮影速度で観察した。加速度計は測定レンジの限界上、噴流軸中心から $z/d = 110$ の側壁面上に取り付けられており、衝撃伝達時間を考慮すると撮影速度 27000 fps の高速度ビデオカメラにおいてトリガフレームに対しておおよそ 1 フレーム程度遅れる。ここで Frame No. はトリガ信号入力時を Frame No. 0 とし、それ以前を負のフレーム数、以後を正のフレーム数で示している。試料水中の空気含有量は溶存酸素量 β の形で評価している。

4.2 壁面に衝突する気泡群の挙動

図6には高速度ビデオカメラを用いて 27000 fps で撮影したキャピテーションジェットの挙動を示す。ここでは衝突壁面をスタンドオフ距離 $x/d = 40$ に設置している。図6中 View A は噴流側面から、また右側 View B は衝突壁面背後から観察した様子である。図の左側 View A の Frame No. 60 付近で気泡群は壁面に衝突している。それに伴い View B においては Frame No. 60 ~ 70 付近に見られるように左右方向へ広がっていく気泡群の様相が確認できる。Frame No. 72 では広がったキャビティが中央部から分離し、Frame No. 76 付近で壁面近傍で崩壊している。その後 Frame No. 80 付近でキャビティのリバウンドが確認できる。

図6中の View B に示されるキャピテーション挙動を画像解析した結果を図7に示す。図7 (a) は気泡群存在領域の時間変化をコンター表示している。ここで解析は噴流横断面方向の状態を評価するため図中に示す領域 (128 × 30 pixel) の奥行き方向 (図では高さ方向) の平均値で評価している。図7 (b) はフレーム間差分を用いて解析を行った結果を示している。ここに解

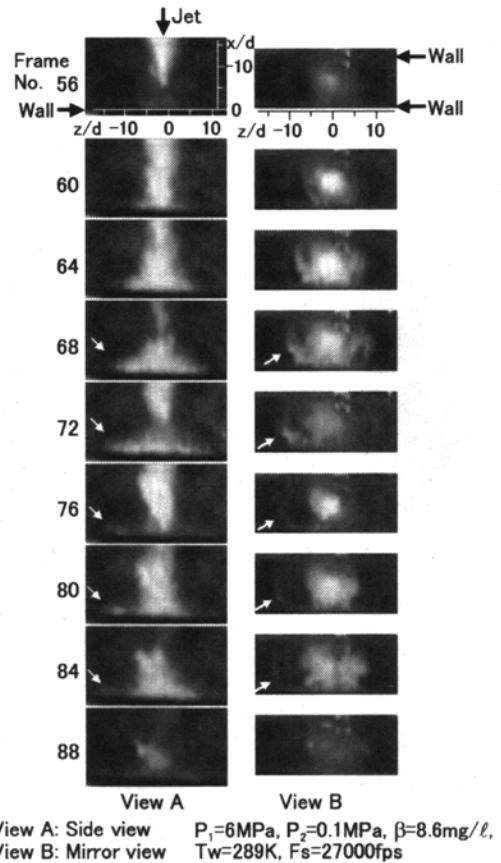


Fig.6 High-speed-video pictures of cavitating-jet impinging on wall.

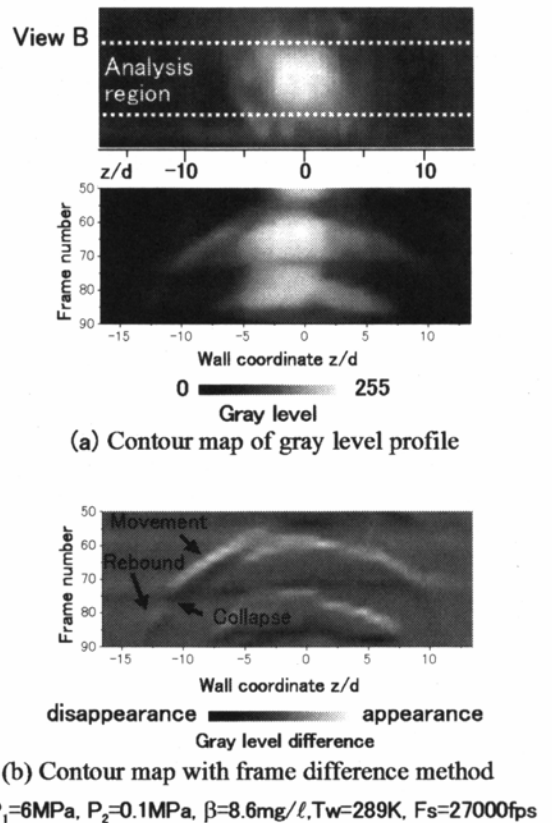
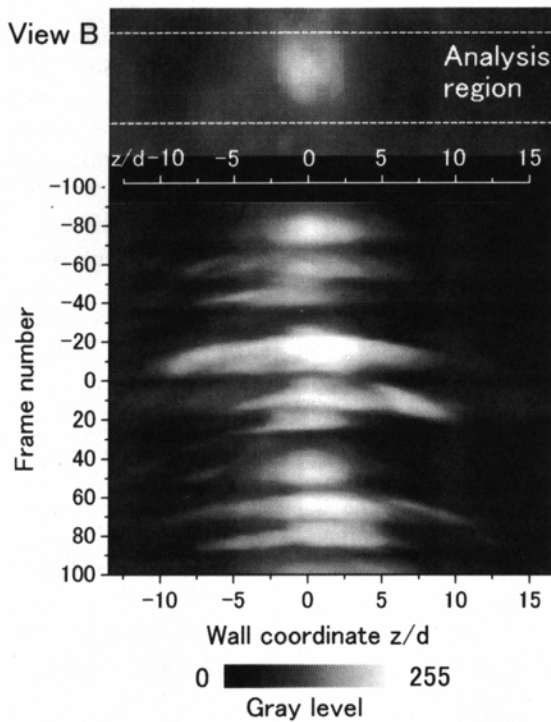
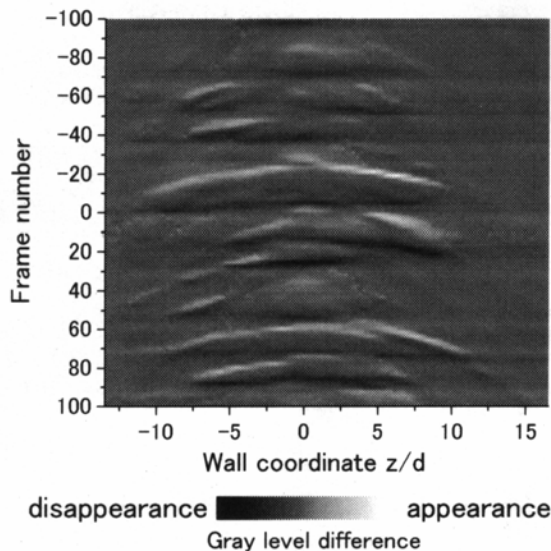


Fig.7 Behavior of cavitating-jet on solid wall with image analysis.



(a) Contour map of gray level profile

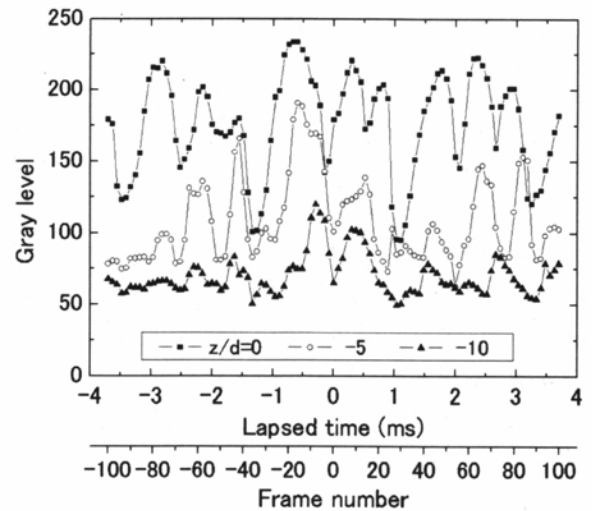


(b) Contour map with frame difference method

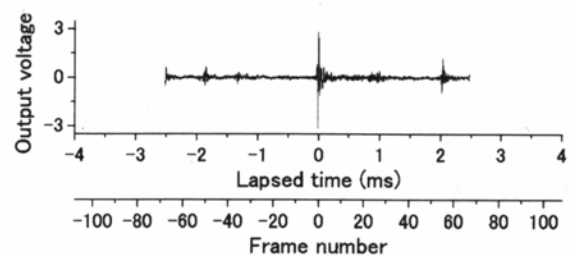
$P_1=6\text{MPa}$, $P_2=0.1\text{MPa}$, $\beta=8.6\text{mg/l}$, $T_w=289\text{K}$, $F_s=27000\text{fps}$

Fig.8 Behavior of cavitating-jet on solid wall with image analysis.

析間隔 Δt は2 Frameである。図中ではキャビティが出現する領域を白く、消滅する領域を黒く表示している。白色帯域はFrame No.55付近を始点として半径方向へ広がっている。このときの移動速度はおおよそ13 m/sであった。その後、Frame No.75付近では黒色域がほぼ水平に存在している。つまりほぼ同時刻に全体の気泡群が崩壊していることを示し、気泡群の成長に比べ崩壊速度は非常に大きいと評価できる。また、図中の矢印部(Frame No.60~100, $z/d=-10\sim-15$ 付近)において3.2節で示したようなリバウンド挙動も捉えることができた。



(a) Fluctuation of gray level



(b) Impulsive acceleration

$P_1=6\text{MPa}$, $P_2=0.1\text{MPa}$, $\beta=8.6\text{mg/l}$, $T_w=289\text{K}$, $F_s=27000\text{fps}$

Fig.9 Fluctuation of gray level and impulsive acceleration.

図8には比較的長時間の気泡群存在領域を解析した結果を示す。図8(a)は気泡群存在領域を示す平均グレーレベル分布を示す。白色域が時間経過とともに周期的に広がっていることから、ある程度の周期性をもって気泡群は壁面に衝突し、広がっていることがわかる。図8(b)に示すフレーム間差分解析結果を示す。白色域と黒色域が交互に現れることから周期的に崩壊していることがわかる。また、広がる速度に比べ崩壊の速度が大きいことがわかる。

図9は図8で示した気泡群存在領域の時間変化(図9(a))を同時に計測した加速度の変動(図9(b))とともに示している。ここに噴流中央部($z/d=0$)および周囲領域($z/d=-5, -10$)におけるグレーレベルの変化を示している。どの領域においても平均グレーレベルが時間経過に従い比較的周期性をもって変化している。Frame No. -20~0付近の変化に着目すると、噴流中心から離れるに従い気泡群出現領域を示す極大値が、またNo.0付近では気泡群崩壊を示す極小値が時間的に遅れていることが読み取れる。つまり、この時間に現れた気泡群が壁面に衝突後、中央から外側に向かい広がること、また崩壊時においても中央部から外側へ向かって崩壊していることを捉えられている。さらには、おおよそグレーレベルの減少領域と同時刻において図9(b)に示す加速度ピークが対応していることから、気泡群の消滅時に衝撃が発生していることが確認できる。

5. 結論

高速度ビデオカメラで撮影したキャビテーションジェットにおける気泡群(キャビテーションクラウド)映像を定量的に評価する方法として、フレーム間差分による画像解析手法を提示し、その有効性を明らかにした。

- 1) 本フレーム間差分法を用いることにより、高速度ビデオ映像に基づく気泡(あるいは水滴)および気泡群の移動、消滅、リバウンドなどの変形挙動を定量的に評価できることを示した。
- 2) 壁面近傍におけるキャビテーションクラウド挙動に対し本手法を適用することで、気泡群の存在領域、放出周期および変形・崩壊挙動を定量的に捉えた。
- 3) キャビテーションジェットの壁面衝突に伴う気泡群の映像(画像解析結果)と同時に計測した衝撃波形とを比較することによって、気泡群変形・崩壊挙動と壁面へのキャビテーション衝撃とが密接に関連していることを示した。

参考文献

- (1) 清水ほか2名, キャビテーションを伴う噴流の衝突による壊食(第2報: 噴流出口周りおよび衝突面形状の影響), 油圧と空気圧, 22-1, 57-62 (1991).
- (2) 祖山ほか5名, 高速水中水噴流まわりのキャビテーション気泡雲の高速写真観察, 機論, B編, 59-562, 1919-1924 (1993).
- (3) 加藤, ターボ機械と環境 キャビテーションを利用した環境保全技術, ターボ機械, 31-11, 648-654 (2003).
- (4) Sato, K., Nakamura, H., and Saito, Y., Observations of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, The 3rd International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow, Fukui, 203-210 (2001).
- (5) Knapp, R. T., *et al.*, Cavitation, McGraw-Hill, (1970).
- (6) Franc, J. P., and Michel, J. M., Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, (2004).
- (7) Arndt, R. E. A., *et al.*, Control of Cavitating Flows: A Perspective, JSME International Journal Series B, Vol.48, No.2, 334-341 (2005).
- (8) Soyama, H., High-Speed Observation of a Cavitating Jet in Air, Trans. ASME, J. Fluid Eng., Vol.127, 1095-1101 (2005).
- (9) 齊藤・佐藤, 水中ウォータージェットにおける壁面に衝突するキャビテーションクラウドの高速観察, 日本混相流学会年会講演会2006論文精選集 混相流研究の進展2, 47-53 (2007).
- (10) Sato, K., and Saito, Y., High-speed Video observation on Mechanism of Re-entrant motion and Cloud Shedding in Cloud Cavitation, The 5th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow, Macau, Vol.II, 1089-1093 (2006).
- (11) Saito, Y., and Sato, K., Instantaneous Behavior of Cavitation Clouds

at Impingement of Cavitating Water-Jet, Sixth International Symposium on Cavitation (CAV2006), Paper No.57 (2006).

- (12) Saito, Y., and Sato, K., Bubble Collapse Propagation and Pressure Wave at Periodic Cloud Cavitation, 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, Paper No.S7_Tue_C_24 (2007).
- (13) 祖山ほか2名, 画像の積層化立体表示による高速水中水噴流の非定常挙動の解明, 可視化情報, Vol.14, Suppl. No.1, 123-126 (1994).
- (14) Pham, T. M., *et al.*, Investigation of Unsteady Sheet Cavitation and Cloud Cavitation Mechanism, J. Fluid Eng., Trans. ASME, Vol.121, 298-296 (1999).
- (15) 小林ほか3名, 破断・放出にかかわるキャビテーションジェットのキャビティ界面の非定常挙動, 機論, B編, 71-703, 804-810 (2005).
- (16) Dular, M., *et al.*, Development of a cavitation erosion model, Wear, 261, 642-655 (2006).
- (17) デジタル画像処理編集委員会, デジタル画像処理, 画像情報教育振興協会 (2006).
- (18) 馬場ほか4名, HeadFinder: フレーム間差分をベースにした人物追跡, 画像センシングシンポジウム2000, 329-334 (2000).

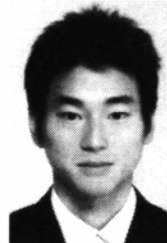
執筆者紹介



杉本康弘 Yasuhiro SUGIMOTO

金沢工業大学工学部機械系
〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1
TEL: 076-248-9182, FAX: 076-294-6704

専門分野: 流体工学, 混相流
金沢工業大学工学部機械工学科卒。同大学大学院工学研究科博士課程(機械工学)修了。日本建鉄株式会社入社。1999年本学助手就任, 講師を経て, 2007年准教授。



大慈彌三郎 Saburo OOJIMI

金沢工業大学大学院工学研究科機械工学専攻
〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1
TEL: 076-294-6702, FAX: 076-294-6704

専門分野: 流体工学
金沢工業大学工学部機械工学科卒。現大学院生。



佐藤恵一 Keiichi SATO

金沢工業大学工学部機械系
〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1
TEL: 076-294-6702, FAX: 076-294-6704

専門分野: 流体工学, キャビテーション, 混相流
東北大学工学部機械工学科卒。同大学大学院博士課程(機械工学)修了。1977年本学助教授就任, 1983年教授(2006年から教務部長)。