

## 斜め衝突するキャビテーティングウォータージェットの二方向同時高速度観察

### Simultaneous High Speed Observations from Two Directions for Cavitating Water Jet Impinging Obliquely on Solid Wall

○改田 直人 (金沢工大・院) 杉本 康弘 (金沢工大) 佐藤 恵一 (金沢工大)

Naoto Kaida, Graduate School of Engineering, Kanazawa Institute of Technology

Yasuhiro Sugimoto, Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology

Keiichi Sato, ditto.

A high-speed water jet ejected into water forms a cavitating water jet accompanied with cavitation clouds. A powerful impulsive force can be caused when cavitation clouds collapse. A cavitating water jet produces severe cavitation erosion due to unsteady cavitation clouds. In the present study, the characteristics of a cavitating water jet impinging obliquely on a solid wall are experimentally investigated from a stand point of the direct relation between the cavitation clouds and the erosion. A cavitating water jet is examined using simultaneous high-speed observations from two directions using two ultra-high speed video cameras and from an image analysis using the frame difference method. As a result, it is pointed out that a chain reaction type of cavitation cloud collapses and pressure wave propagation is visualized. In addition, various types of cloud collapses are found out on the basis of the relation with the cloud behavior and erosion distribution.

*Key Words:* Cavitation Cloud, Cavitation Erosion, Simultaneous High Speed Observation, Pressure Wave Propagation, Chain-Reaction Collapses

#### 1. 緒言

液中ウォータージェットは、周囲液体とのせん断層において生じる渦構造により微細なキャビテーション群から成るキャビテーティングウォータージェット (以下, Cav-WJと略) 状態となる (例えば文献<sup>[1]</sup>参照). この微細な渦キャビテーション気泡群はいわゆるキャビテーションクラウド (以下, クラウドと略) 状態に相当する. クラウドから成るCav-WJの固体表面への衝突に伴い強い衝撃が生成される. Cav-WJは, そのようなクラウド崩壊時の衝撃力を利用して切削・堀削やバリ取り, ピーニング, 洗浄などの産業分野で広く使用されている.

クラウドは急速な崩壊が起こるとき, その内部状態に応じて圧力波あるいは衝撃波を形成する (例えば文献<sup>[2]</sup>参照). これまでの筆者らの一連の研究<sup>[3-6]</sup>によれば, Cav-WJが高速で固体壁面に衝突する時にクラウドが急速に変形, それに応じた圧力波の連鎖的な形成が生じ壁面近くで強い衝撃作用を引き起こす. そしてクラウド崩壊は気泡および気泡群の連続的な崩壊を生み出し, 衝撃による圧力波の複雑な場を形成することが知られている. また, 最近, 山本らもクラウド崩壊に伴う圧力波の形成現象について明らかにしている<sup>[7]</sup>.

本研究目的は, 産業的にも学問的視野からも重要な壁面壊食効果を生み出すCav-WJ衝撃機構の基本的なメカニズムを明らかにすることである. 特に, 本研究では衝突壁面近傍におけるクラウド崩壊挙動の詳細な観察に力点をおき, 斜め衝突するCav-WJの様相観察を行った. Cav-WJ及びクラウドの様相を噴流側面方向と衝突壁面(背面)方向の二方向から, 同期させた二台の高速度ビデオカメラを使用し, 同時に高速度撮影を行った. さらに撮影した映像の画像解析をフレーム間差分法に基づき行い, それにより衝突壁面近傍領域における連鎖的なクラウド崩壊による圧力波形成過程とともに圧力波伝播・クラウド崩壊などの過程を明らかにしている.

## 2. 実験装置及び方法

本研究では図1に示すような、のど部径  $d=1\text{mm}$ 、開口角  $60^\circ$ 、ホーン部長さ  $12\text{mm}$  のステンレス鋼製のホーンノズルを用いて実験を行った。図2 (a), (b) に試験部の模式図を示す。実験方法は試料水（水道水）をプランジャーポンプ（マルヤマエクセル, MW560X5.5KW-724）によりノズル上流部圧力  $P_1=8.5\text{MPa}$  に設定し、試料水中に噴射する。ここで試料水温は  $T$  で示し、空気含有量は溶存酸素量  $\beta$  の形で評価する。

本研究では噴流様相を噴流側面方向から明瞭に観察するために、クラウド様相と衝撃（壊食）形成との関係を優先し、流れ場に影響を与えるものの敢えて図2 (b) で示すような噴流幅  $10\text{mm}$  の拘束流路を使用した。座標系は、図2 (a) に示すようにホーン部出口を原点  $O$ 、ノズル中心軸方向を  $x$  軸、これに垂直な方向を  $y$  および  $z$  軸とした。また噴流が壁面に衝突後、壁面に沿って流れる方向を  $z_w$  軸とした。ノズルから衝突壁面までのスタンドオフ距離は  $x_s=x/d=30$  とした。図2 (a) に示す Cav-WJ 衝突壁面のジェット中心軸との傾斜角  $\theta$  は、 $\theta=45^\circ$  である。壊食実験ではアルミニウム (A1050) 製の壁面、様相観察の際は透明なアクリル樹脂製の壁面を用いた。様相観察は噴流側面 ( $xz$  面) および衝突壁面背面 ( $yz$  面) から二台の高速度ビデオカメラ (Photron, SA5, SA1.1) を同期させ撮影を行った。撮影速度  $F_s$  は二台とも  $100\,000\text{fps}$  に設定した。また撮影の際の光源としてメタルハライドライト (NPI, PCS-UMX350) を用いた。二方向からの同時撮影に当たりライトの当て方を検討した結果、装置構成上の制約もあり、噴流側面からの観察では面ライトを撮影方向と反対の方向から当てクラウドを黒色（シャドウ）撮影、衝突面背面からの観察では撮影方向に対し垂直下方向からライトを当てクラウドを白色撮影した。

図3に様相観察の際の試験部周辺の模式図を示す。本研究では、観察したクラウド様相を定量的に示すために、キャビテーション流れに対するフレーム間差分法<sup>[3-6]</sup>を使用し画像解析を行った。本画像解析方法は、時間変化の定量的評価や背景不要情報の除去などの利点があり、クラウドや微細気泡の挙動を通してクラウド崩壊や圧力波伝播のような急速な現象を捉えることが可能である。本画像解析では、まず撮影した静止映像を図4 (a), (b) に示すように連続した時間  $t_1, t_2$  において、画像各位置で画像縦方向にグレーレベルの平均値を求める。次に図4 (c) のように時間差  $\Delta t=t_2-t_1$  のグレーレベルの差を取る。このグレーレベルの（差分値）曲線に対し、図4 (d) に示す変換曲線を用いて再びグレー色付けを行う。ここに、クラウドの生成・消失近傍域を明瞭に示すために変換曲線に傾きを与えている。本解析の傾きは  $n=5$  程度を選んでいる。図4 (e) に再び色付けを行った結果 (Gray level map) を示す。クラウドの生成・出現は白色域、崩壊・消失は黒色域に対応する。以上の作業を観察対象時間全体に行い、時系列順に並べることで最終的な画像解析結果（後述の図8）を得る。

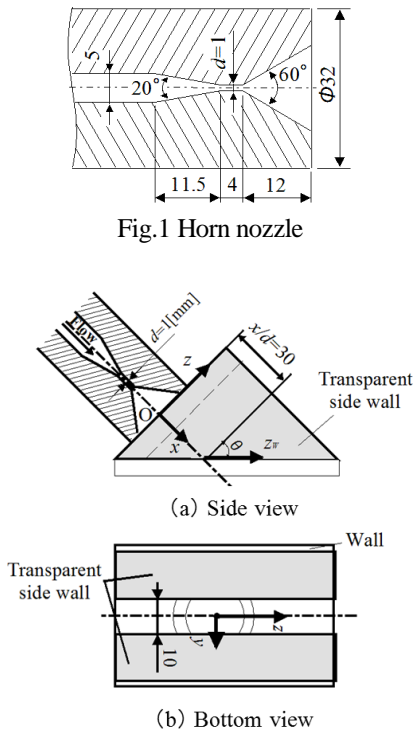


Fig.2 Schematic of test section

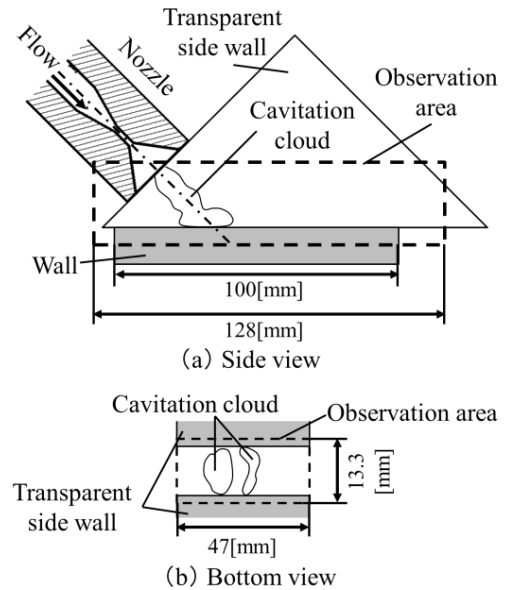


Fig.3 Schematic of test section for high speed observation

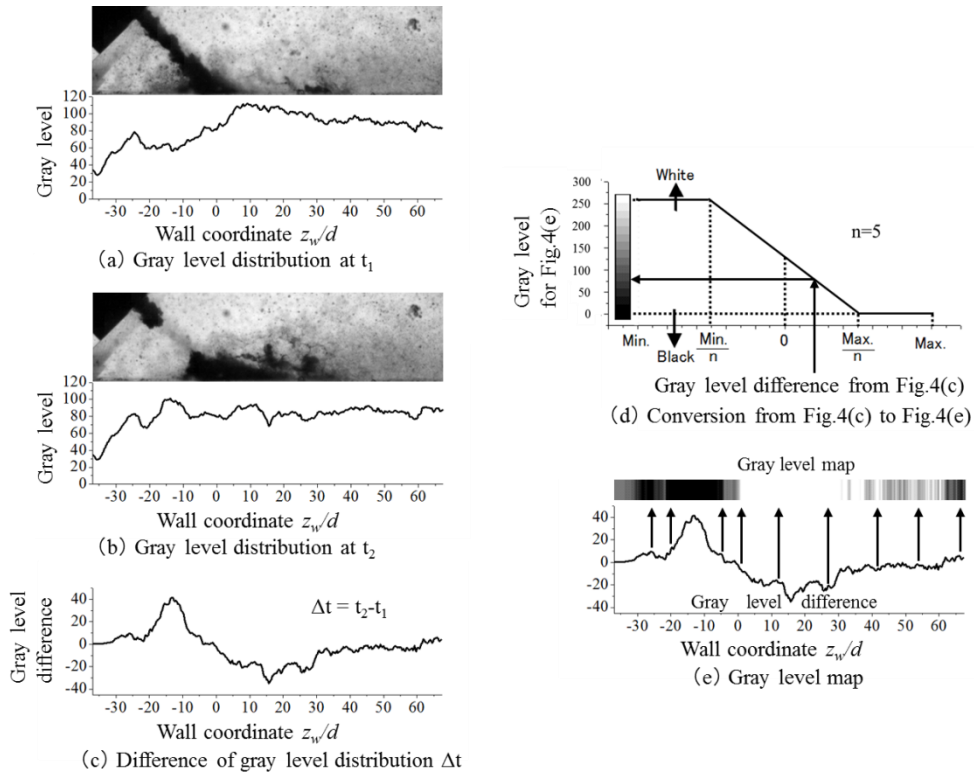
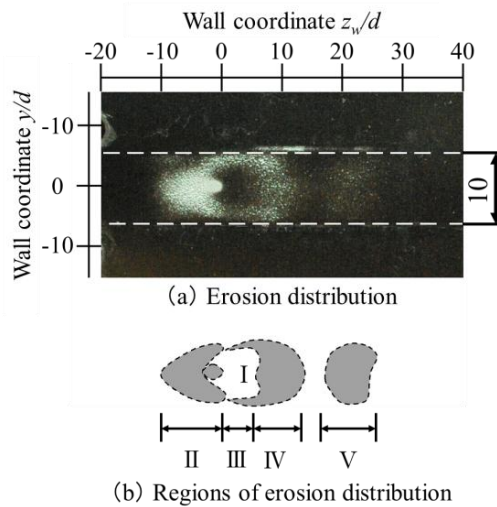


Fig.4 Image analysis based on frame difference method

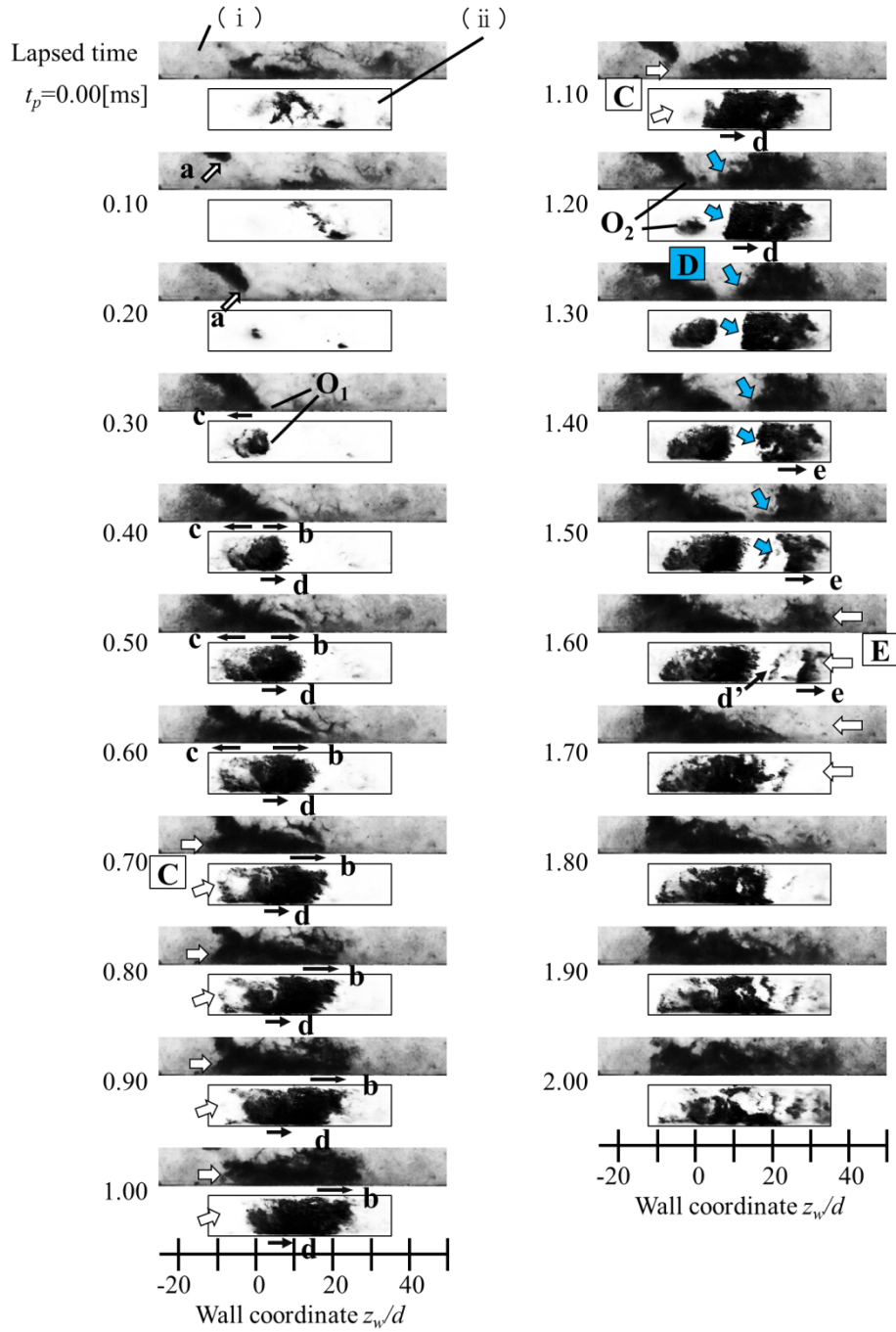
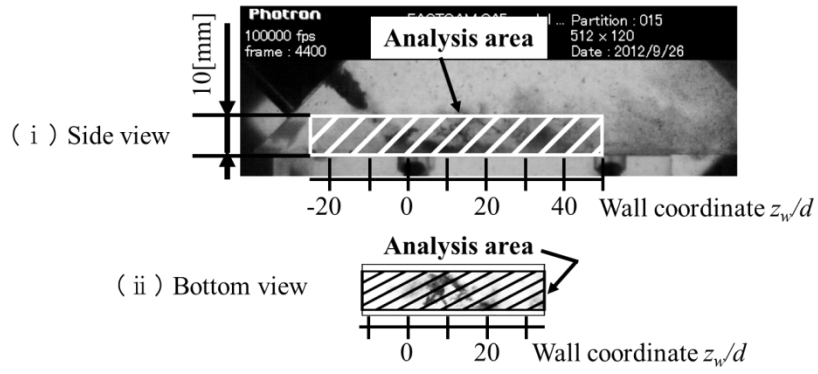
### 3. 実験結果

#### 3・1 壊食実験結果

図5に壊食実験の結果を示す。実験時間は $t=30\text{min}$ である。図5(a)は衝突壁面における壊食分布である。白色破線間は拘束流路を示す。図5(b)に壊食痕分布の模式図を示す。結果より壊食痕は大きく5つの領域に分けられる。領域Iは噴流中心軸領域に対応しウォータージェット自身の衝撃力により生じると推測される。領域II, IV, Vにおいて特徴的な壊食が確認できる。領域IIIは拘束壁面との境界領域の壊食である。



$P_1=8.5\text{MPa}$ ,  $T=294\text{K}$ ,  $\beta=4.21\text{mg/l}$ ,  $x_s=30$ ,  $t=30\text{min}$   
Fig.5 Erosion pit distribution on aluminum plate (A1050)



$P_f=8.5\text{MPa}$ ,  $T=298\text{K}$ ,  $\beta=6.58\text{mg/l}$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $F_s=100\,000\text{fps}$ ,  $x_s=30$

Fig.6 Behavior of cavitation clouds

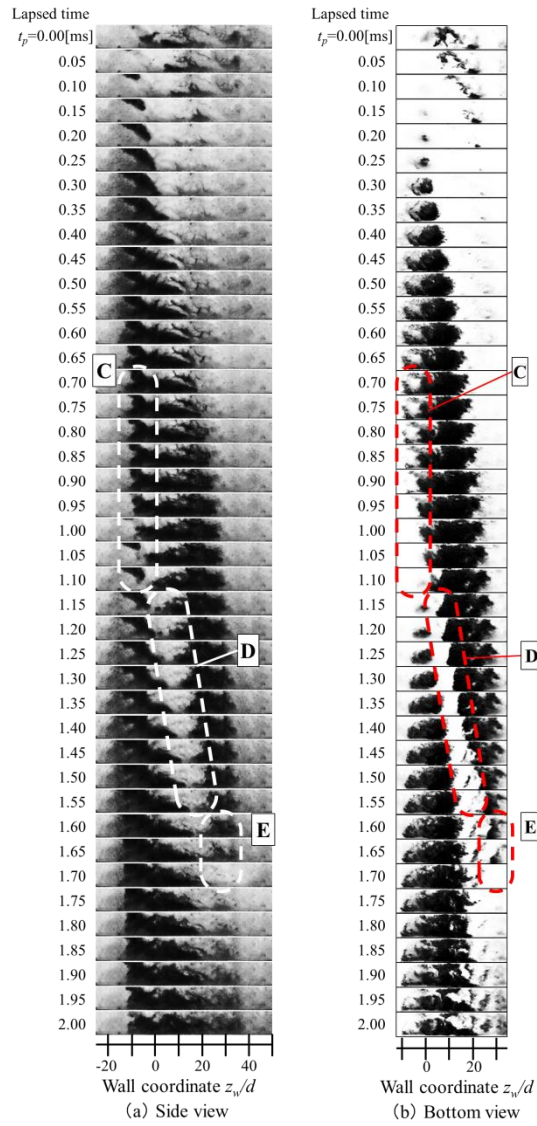


Fig.7 Still pictures in high speed observation

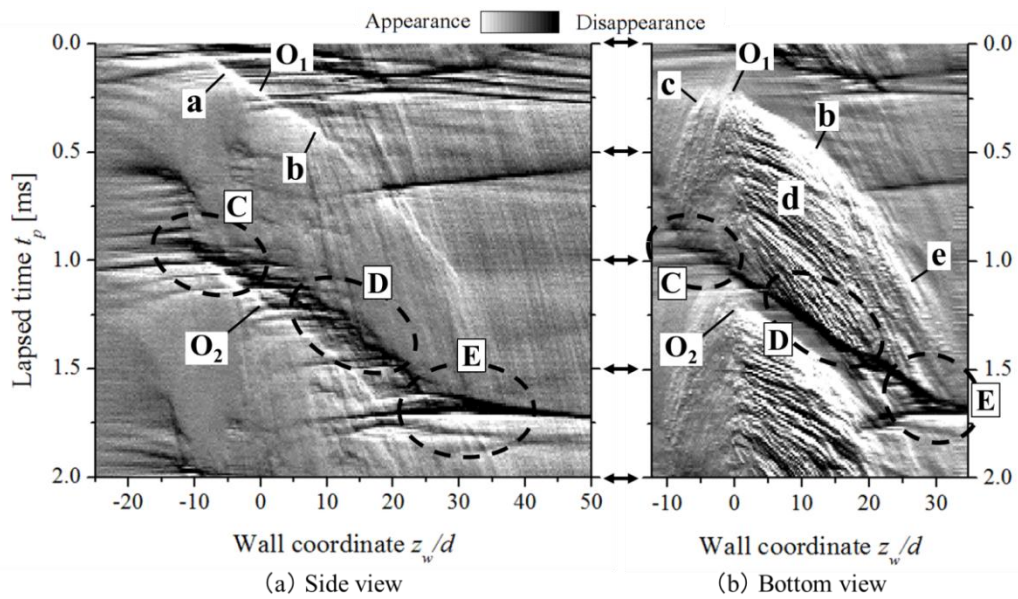


Fig.8 Image analysis result

### 3・2 二方向同時様相観察実験結果

図6にCav-WJのクラウド様相を示す。図上部に側面(i)および衝突面背面(ii)からの画像解析範囲を示す。側面観察では壁面近傍におけるクラウド挙動に着目し解析範囲を壁面から上10mmとした。また、衝突面背面からの観察結果では色調を反転させクラウドを黒色で統一した。画像は側面と衝突面背面の2枚組で、経過時間 $t_p$ ごとに示されている。ここに、各画像表示間隔は10frame(0.10ms)である。

図6より、ノズルから噴出されたクラウド(先端a)は点 $O_1$ (図5壊食領域Iに対応)で壁面に達し、その後、矢印b, cで示すように壁面上(壁面座標 $z_w/d$ )を2方向に広がる。ここに画像左方( $z_w/d$ が負)領域において矢印Cで示されるクラウド崩壊が確認できる。また、やや不明瞭ではあるが、衝突面近傍でクラウドの変形・移動(矢印d参照, 矢印bの壁面挙動に対応)が生じ、ついで矢印Dで示す崩壊領域が観察できる。この崩壊後、クラウドのリバウンド(矢印d'), さらには矢印eで示すようなクラウド先端領域の移動、そして矢印Eで示される崩壊が確認できる。

次に側面および背面からの観察結果を並べた連続写真を図7に示す。画像表示間隔は5frame(0.05ms)である。図7より壁面近傍におけるクラウドの崩壊様相(領域C, D, E)が図6との対応の下に確認できる。領域Cで示すように $z_w/d \approx -10 \sim 0$ (図5壊食領域II)においてクラウド崩壊様相, 領域DやEで示す $z_w/d \approx 5 \sim 20$ (図5壊食領域IV),  $z_w/d \approx 30$ 周辺(図5壊食領域V)においてクラウドの連鎖的崩壊様相が観られる。領域Eは先行崩壊クラウドのリバウンドと新しい衝突クラウドの合体により形成された先端渦キャビティに対応すると考えられるが、拘束流路のためか形成(そして崩壊)がやや弱い傾向(図5壊食領域V参照)を示している。

図8に、図6, 7に対応する画像のフレーム間差分法による解析結果を示す。解析結果は壁面座標(横軸)に対する経過時間(縦軸)を示す。解析結果中の白色領域はクラウドの生成・出現, 黒色領域は崩壊・消失を示す。図より噴流クラウドの壁面への到達に対応する白色領域(a,  $O_1$ ,  $O_2$ ), 壁面上のクラウドの成長・移動に対応する白色領域(b, c), 矢印dにおけるクラウド内部の変形や小クラウド移動に対応する白色及び黒色移動線状領域そして矢印eで示されるクラウド先端移動に対応する白色領域が確認できる。ここに、領域C, そしてD, Eにおいて時間軸に対し、ほぼ垂直(図上では水平)な黒色線そして比較的幅広い黒い帯状曲線のつながり(壁面クラウド領域の境界に対応)が確認でき、図6, 7の結果と合わせ、連続的な圧力波形成・伝播及びクラウド崩壊が生じていると判断できよう。

## 4. 結言

平板に斜め衝突するCav-WJ及びキャビテーションクラウドの様相を、噴流側面方向と衝突壁面(背面)方向から二方向同時高速度観察を行った。さらに観察画像をフレーム間差分法に基づく画像解析により検討した。

クラウドは、壁面に到達後、壁面上を成長・発達・変形・崩壊しながら移動する。クラウド内部や先端においては小クラウドの移動が起こるとともに激しい崩壊が生じ、圧力波が形成・伝播され、連鎖的なクラウド崩壊、圧力波形成・伝播が生じる。いくつかの領域に分けられる壁面壊食領域が指摘されているが、本研究により、それぞれに対応するクラウド挙動が確認・検討された。

## 参考文献

- [1] 山内由章, 祖山均, 佐藤一教, 井小萩利明, 大場利三郎, 日本機械学会論文集(B編), Vol.60, No.571(1994), pp.14-21. [2] Reisman, G. E., Wang, Y.-C. And Brennen, C., *J. Fluid Mechanics*, 355, (1998), 255-283. [3] Sato, K., Sugimoto, Y., and Ohjimi, S., *Proc. 7th Int. Symposium on Cavitation*, Paper No.66, (2009), 1-11. [4] Sato, K., Sugimoto, Y., and Ohjimi, S., *Proc. 9th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jetting Technology*, (2009), 1-9. [5] Sato, K., Sugimoto, Y., and Kaida, N., *Proc. 8th Int. Symposium on Cavitation*, Paper No.64, (2012), 1-6. [6] 佐藤恵一, 杉本康弘, 大慈彌三郎, 日本機械学会論文集(B編), Vol.77, No.784(2011), pp.68-76. [7] 山本勝弘, 吉田崇, 飯田浩貴, 吉田篤史, 日本機械学会論文集(B編), Vol.77, No.784(2011), pp.2295-2305.