キャビテーションウォータージェットにおける衝突表面形状がクラウド崩壊挙動に及ぼす影響

Effects of Impingement Surface Geometry on Cloud Collapsing Behavior in Cavitating Water Jet

○学 吉久 耕平 (金工大院)

正 新井山 一樹 (金工大)

正 佐藤 恵一 (金工大)

Kouhei YOSHIHISA, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ogigaoka, Nonoichi, Ishikawa

Kazuki NIYAMA and Keichi SATO, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ogigaoka, Nonoichi, Ishikawa

Key Words: Cavitation, Erosion, Bubble Collapses, Cavitating Water Jet, Cavitation Cloud, Image Analysis

1. 緒言

キャビテーションクラウド(クラウドと略)を伴ったキャビテーションウォータージェット(Cav-WJ と略)が崩壊する際には強い衝撃を発生する。そのため産業分野では、このクラウド崩壊時の衝撃を利用して切削や掘削洗浄などに利用されている。既存の研究から、Cav-WJ が壁面に衝突するとリング状に壊食痕が形成される⁽¹⁾。キャビテーション壊食は壊食痕形成位置で気泡崩壊が起きることによって発生する⁽²⁾。これが繰り返して起きることによって壊食が進行すること⁽³⁾や気泡崩壊時の衝撃が壊食面上で集中すること⁽⁴⁾⁽⁵⁾が報告されているが、その複雑な干渉機構については十分には解明されていない。Cav-WJ の技術応用への更なる発展には、壊食生成機構の解明が重要である。

本研究では、壊食実験中のクラウド様相をレーザ光を用いて高速度観察した。様相観察結果に対して、壊食面上の壊食時間ごとのクラウド崩壊様相について着目し、画像解析を行うことで壊食痕と気泡崩壊の関係を評価した。特に、レーザ光を用いることで壁面近傍のクラウドの崩壊様相をより明瞭な形で可視化し、壊食の進行時における様相観察によって既存の壊食痕がクラウド崩壊に与える影響を明らかにすることを試みた。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置

実験装置の模式図を Fig. 1 に示す。本研究では、ノズルのど部径 $d = 0.4\text{mm}$ の収縮拡大ノズルを用いて実験を行った。試料水(水道水)は三連ブランジャーポンプによってノズル上流部圧力 $p_u = 10\text{MPa}$ に昇圧され、水槽中で水平方向に噴射された。ここで、Fig. 1(a)に示すように試験片面上の噴流衝突位置中央部を原点とし、噴流に対して反対方向を X 軸、これに垂直な方向を Y および Z 軸とした。そして、ノズルホルダ出口から試験片までの距離をスタンドオフ距離 $X = 20\text{mm}$ とした。実験の前後で、試料水の水温 T_w と溶存酸素量を溶存酸素計(HORIBA, OM-51)で計測した。

2・2 撮影方法

YZ 面の Cav-WJ 様相は Fig. 1(a)に示すように試験片の背面に高速度ビデオカメラ (Photron, Fastcam SA5) を設置して撮影した。光源には ION LASER (SOC, GLS33480B + GLG3482) によるレーザ光を出力 2W で使用した。レーザ光は円筒形レンズを通してシート状にし、壁面近傍の YZ 面に対して平行に照射した。ここで、レーザ光の中央部は $X = 0\text{--}2\text{mm}$ の間に設定した。実験時間 t は $t = 0\text{--}180\text{min}$ とした。Cav-WJ の高速度観察は 30 分ごとに行った。ここで、様相撮影は各実験時間で 30 秒間に 3 回行った(1 回の撮影時間は 64.23ms)。壊食の進行状況を確認するために各実験時間の撮影終了後、一端中断し、壊食面の正面にアルミニウム

(A1070)板をおき、壊食痕様相を撮影した。このとき、光源にはメタルハライドランプを使用した。壊食痕は光源を高速度ビデオカメラの横に配置し、フロントライト法で撮影された。

3. 画像解析方法

本研究では、壊食実験中の壁面上におけるクラウドの崩壊・消失率の評価を画像解析によって試みた。画像解析方法の手順を以下に示す。

まず、1 回の様相撮影にて得られた動画を各フレーム画像に対して平滑化処理を行い、各フレーム画像間の差分を取る。クラウドの崩壊・消失が画像内のグレイレベルの差分値 GL_i の正負によって判断される。 GL_i の正值および 0 値はクラウドの成長、移動と流入を示し、負値はクラウドの崩壊、消失と流出を示す。ここで、 GL_i の全ての負値を 2 進値 $GL_i' = 1$ とし、 GL_i の全ての正值および 0 値を $GL_i' = 0$ とした。

次に、クラウドの崩壊・消失のみを取り出すため、フィルタ (9×9 pixel) を用い、しきい値速度を約 30m/s (しきい値速度の上限は約 50m/s) として、クラウドの移動を除去することを試みた。ここで、様相観察よりクラウドの代表速

(a) Test section

(b) Details of laser sheet observation system

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

度は約 20m/s であった。これを撮影された画像すべてに対して行い、式(1)からクラウドの崩壊消失率（ここでは単に消失率 D と呼ぶ）を求めた。ここで、1 回の撮影あたりに得られる差分画像数は $n = 6422$ 枚である。

$$D = \left(\sum_{i=1}^n GL'_i \right) \times \frac{100}{n} [\%] \quad (1)$$

そして、Fig. 2(b)に示される画像解析結果は 3 回の様相撮影結果の平均値である。ここで、図中に示されるカラーバーは各実験時間 t における消失率 D の最大・最小値に基づきスケーリングした。

本画像解析方法は検討が必要な点がある。例えば、フィルタリング処理においてクラウドの移動は完全に除去することはできていない。現状の解析方法はあくまで近似的な評価方法として用いられている。

4. 実験結果

撮影速度 $Fs = 100,000\text{fps}$ で高速度ビデオカメラによる高速度様相観察を行った。また、Cav-WJ 様相はシートレーザを用いることで円柱状試験片の壁面近傍のみを撮影した。このとき、観察領域 YZ 面の解像度は 256×232 pixel (15.1×13.6 mm)である。

Fig. 2(a)に実験開始前から $t = 180\text{min}$ までの壊食痕様相を示す。Fig. 2(b)に $t = 0-180\text{min}$ までの様相観察結果に対する画像解析結果を示す。Fig. 3 は、Fig. 2(b)の原点より半径 r における周方向上の平均値、平均消失率 D_a を示す。ここで、 $r = 1-5\text{mm}$ の領域を 1mm 間隔で評価した。

Fig. 2(a)より、壁面上の壊食痕は実験時間 $t = 60\text{min}$ から見られ、時間経過と共に徐々に明瞭に見えてくる。 $t = 120, 180\text{min}$ で、半径方向に壊食痕はあまり進行せず、壁面中心領域が壊食し、その領域が大きくなる。壊食痕は $t = 60\text{min}$ で $r = 1-4\text{mm}$ の領域においてリング状の壊食痕を形成した。このとき、噴流衝突位置中心付近に壊食痕はあまり確認できない。

Fig. 2(b)より、Cav-WJ が壁面に衝突してから周囲に移動するとき、衝突周囲領域(Ex. $r = 2\text{mm}$)でのクラウド変化が比較的少ない。そのため、衝突周囲領域の消失率 D は領域周辺(Ex. $r = 4\text{mm}$)より低い。壊食の進行に対し、クラウドの消失率 D は $t = 0\text{min}$ 以降、壊食痕の形成された $r = 1-3\text{mm}$

$p_u=10\text{MPa}$, $p_d=0.1\text{MPa}$, $X=20\text{mm}$, $T_w=27^\circ\text{C}$, $Fs=100,000\text{fps}$
Fig. 2 Erosion distribution and cloud disappearance rate against exposure time on flat plate

の領域で増加する。

Fig. 3 より、平均消失率 D_a は壊食痕形成(Ex. $t = 60\text{min}$)とともに壊食面上(Ex. $r = 1-4\text{mm}$)で増加する傾向が確認される。 $t = 0-90\text{min}$ では平均消失率 D_a は常に増加している。特に、 $t = 0-30\text{min}$ での平均消失率 D_a の増加は他の実験時間帯に比べ大きい。 $t = 90\text{min}$ 以降、平均消失率 D_a は変化が乏しくほぼ一定となる。また、壊食痕が形成されなかった $r = 5\text{mm}$ の領域でも平均消失率 D_a は実験時間を通して変化がほぼなく、一定である。

このことから、壁面の壊食痕の状態はクラウドの崩壊・消失に影響を及ぼすことが考えられる。特に、壁面に壊食痕が形成されることによってクラウドの平均消失率 D_a は加速的に増加傾向を示すことがわかる。

5. 結言

壁面上の壊食の進行時における同時様相観察によって試験片の既存の壊食痕がクラウド崩壊に与える影響を明らかにするための研究を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) キャビテーションウォータージェット衝突周囲領域のクラウド消失率は初め、領域周辺より低い。しかし、時間経過とともに壁面上に壊食痕が形成され、その領域におけるクラウドの消失率が高まる傾向を示す。
- (2) クラウド消失率が高まる傾向は時間経過とともに噴流衝突部方向へと広がる。
- (3) 壊食痕未形成領域および十分発達した壊食領域では、クラウドの消失率は時間経過に対してほぼ一定値を取る。

参考文献

- (1) K. Sato, et al., *Proc. The 7th International Symposium on Cavitation CAV2009*, (2009), Paper No.66.
- (2) 佐藤・ほか 3 名, 機論, 64-622, B(1998), pp.1683-1688.
- (3) 山内・ほか 7 名, 機論, 59-557, B(1993), pp.16-22.
- (4) J. P. Dear and J. E. Field, *J. Appl. Phys.*, (1988), pp.1015-1021.
- (5) 山内・ほか 4 名, 機論, 60-571, B(1994), pp.736-743.

$p_u=10\text{MPa}$, $p_d=0.1\text{MPa}$, $X=20\text{mm}$, $T_w=27^\circ\text{C}$
Fig. 3 Averaged disappearance rate at several diameters against exposure time on flat plate