キャビテーションクラウド中の圧力波形成と伝播 (高速度ビデオ観察と画像解析)

Pressure Wave Formation and Its Propagation in Cavitation Clouds (High-Speed-Video Observation and Image Analysis)

○正 佐藤 恵一 (金沢工大) 正 杉本 康弘 (金沢工大)

Keiichi Sato, Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi-Machi, Ishikawa 921-8501
Yasuhiro Sugimoto, Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi-Machi, Ishikawa 921-8501
Key Words: Image Analysis, Cavitation Cloud, Pressure Wave Formation

1. 緒言

キャビテーション現象は、宇宙ロケットなどのメインエンジンを構成するターボポンプをはじめ種々の高速流体機械性能を左右する重要因子となるばかりでなく、その気泡崩壊時のエネルギー集中作用は医面用、生産加工面など多くの先端科学技術分野において注目されている。

近年の研究によれば(例えば文献^(1, 2))、このキャビテーション気泡崩壊現象は、単なる気泡崩壊に限らず、気泡群つまりクラウド崩壊として捉えるべきことが明らかになっている。クラウドは、その崩壊時に大きなエネルギー集中化・衝撃作用が生じ、その機構解明が待たれている。

本研究では、代表的な高衝撃性キャビテーションクラウドを呈するキャビテーションジェットを取り上げる。そのキャビテーションクラウド崩壊の高速度ビデオ観察例を下に、クラウド内での圧力波の形成そして伝播の過程を、単なる高速度ビデオ観察にとどまらず、適切な画像処理法(フレーム間差分法)により定量的に明らかに出来ることを示す。

2. 実験装置および方法

図1に、キャビテーションジェット用のホーン形ノズルおよびそのジェットキャビテーション観察用流路を示す。ジェット衝突面近傍の様相に焦点を絞り、観察ノズルと衝突面との間には敢えて流路を拘束し準2次元的な光学的観察(高速度ビデオ観察)を可能にした。通常の水道水が使用され高圧ポンプを経て、ノズル上流圧 $P_1 = 6 \text{ MPa}$ に設定され、大気圧 P_2 下に噴出された。衝突面はアクリル樹脂製であり、ノズル出口面とのスタンドオフは $30d$ に設定された。ここに $d = 1 \text{ mm}$ はノズルのど部径であり、座標系は図1に示すように x , y , z 軸が選ばれ、ジェット(ノズルのど部)中心軸

Fig.1 Water-jet test section and observation area

を x 軸、原点 O をノズル出口とした。

衝突噴流まわりのキャビテーションクラウドは高速度ビデオカメラ (Kodak; Model HS4540 および Photron; Fastcam SA1) により、主に 100,000fps のフレーム速度で撮影された。また、水中音圧をハイドロフォン (Muller; Platte needleprobe) により図1に示す位置で計測した。

3. キャビテーションクラウドにおける圧力波形成と可視化

キャビテーションによるエネルギー集中化作用の中心となるのは衝撃波の形成であるが、高速現象であり、現在の高速度ビデオカメラの場合、動画においてこそ存在を認識できるが、静止画像においては限界がある。その理由は現象の時間変化率の定量的把握が困難な点にある。

本研究では、白黒ビデオ画像をフレーム間差分法⁽³⁾を用いて画像解析をすることによる高速キャビテーション特性

Fig.2 Image analysis using frame difference method for cavitating flow

解析法の有効性を示す。図2において、その画像処理法を簡単に説明する。図2(a)および(b)に時間 t_1 , t_2 の連続するビデオ画像を示す。この場合、白色域がキャビテーションクラウドに対応する。その2つの画像のグレイレベル差(つまりクラウドの時間変化)をとり、その大きさに応じて再度色づけをすると、図2(c)上部に示す Difference level map を得る。この作業を観察時間全体に行うとキャビテーションクラウド変化に対応する画像解析結果を得る。

図3に具体的結果を示す。図3(a)は、図1に示す衝突面近傍の矩形観察領域内のキャビテーション様相であり(この場合、キャビテーションクラウドは黒色に撮影されており図2とは逆なので注意されたい)、ビデオ映像を静止画像列として並べたものである。画像内の3本の棒状物体は音圧測定用センサー(ハイドロフォン)である。この場合、計測経過時間 $t_p=1.25\text{ms}$ あたりでジェット中心軸付近のクラウドが崩壊し圧力波が生じ、 1.28ms 付近でセンサー R_0 , 1.32ms でセンサー R_1 に達している。このことは、図3(c)に示す音圧センサーの出力波形からも確かめられる。

この静止画像は比較的明瞭に明暗の動きが示されている例であるが、その圧力波の動きはフレーム間差分解析結果の図3(b)にはより明瞭な形で、ラインとして現れている。つまり、点Aから「ハの字」状に黒色の線が2方向に伸びているが、図中 R_0 , R_1 はセンサー位置に対応しており圧力ピーク時間が黒色の線の通過と一致している。つまり、この黒

線が圧力波の伝播ラインに対応していることがわかる。これは、 L_0 位置線と黒色ラインとの交差時間が図3(c)のピーク値とよく対応していることから確かめられる。ここに、フレーム間差分値の色づけにおいて、濃黒色系はクラウド領域の消失・崩壊側、淡灰色系は出現・発生側に対応しており、黒色の連続領域は気泡クラウドの消失・崩壊の伝播を表す。

さらに、図3(b)の点B, Cでは、やはり「ハの字」状黒線が周囲に伸びているが、この挙動は図3(a)での 1.31ms および 1.34ms 付近でのジェット周辺領域での壁面付着形のクラウド崩壊に対応する。クラウド崩壊に伴う2次の圧力波形成と伝播をも明確に捉えていることがわかる。

4. むすび

キャビテーション現象の高速度ビデオ観察において、気泡群崩壊に伴う画像濃度変化を利用することにより、キャビテーションクラウド崩壊に伴う圧力波形成と伝播現象を捉えることができることを示した。

終わりに臨み、本研究に関する大慈彌三郎氏(株・渋谷工業)の多大な貢献に深謝する。

参考文献 (1) Reisman, G.E., et al., J. Fluid Mech., 355(1998), 255-283. (2) Sato, K., et al., Proc. 7th Int Symp on Cavitation, Paper No.66, (2009). (3) Saito, Y. and Sato, K., Proc. 6th Int Conf on Multiphase Flow, No.S7-Tue-C-25, (2007).

Fig.3 Image analysis using frame difference method for cavitating flow