

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560177

研究課題名（和文） 高速キャビテーションジェットノズルの設計のためのCFD解法の確立

研究課題名（英文） Establishment of CFD method for the hydrodynamic design of high-speed cavitating water jet nozzle

研究代表者

彭 國義 (PENG GUOYI)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：90295527

研究成果の概要（和文）：本研究は、キャビテーションを伴う高速水中ウォータージェットの数値解析及びジェット噴射ノズルの設計を行うための実用的なCFD解法を確立することを目的としてなされたものである。（1）気泡キャビテーションモデルに基づく圧縮性混合流解法の確立，（2）キャビテーション気泡膨張・収縮の影響を考慮した渦粘性の修正，（3）水中ウォータージェット流れの数値シミュレーションと実験検証，（4）鞘付きオリフィス・ノズルの設計および性能評価を行い，所期の目的を達成した。

研究成果の概要（英文）： This work has been performed on purpose to establish a practical CFD method for the numerical simulation of high-speed submerged water jets as well as the hydrodynamic design of jet nozzles. The main results can be summarized as follows: (1) A compressible mixture flow method based a simplified estimation of bubble cavitation is established. (2) A modification on the eddy viscosity of cavitating flow is proposed considering the effect of bubble expanding and contracting. (3) Numerical simulation of turbulent activating jets issuing form submerged orifice nozzle were carried out and the reliability of present method has been verified experimentally. (4) A new sheathed orifice nozzle is developed and its property has been evaluated via visualization experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：気液混相流，ウォータージェット，キャビテーション，数値シミュレーション，可視化計測

## 1. 研究開始当初の背景

キャビテーション気泡は，圧縮を受けて急激に崩壊する際に気泡内部および気泡壁近傍の液体の圧力と温度が数千気圧，数千度に

達する．水中に高速で水のジェットを噴射する「水中ウォータージェット」は，気泡崩壊による圧力場を利用する技術として，現在，複雑な加工物の洗浄・バリ取り，材料の表面

改質などに利用されている。一方、気泡崩壊による高圧・高温の場を利用して水中有害物質の分解や汚水の殺菌・減菌を行う技術が注目を浴びている。通常、ジェットは数十 MPa（数百気圧）の高圧力で噴射されるが、経済性や騒音等の観点から、低圧（1 MPa 以下）噴射での利用が望まれている。しかし、低圧の場合はキャビテーションが発生し難く、発生しても実際の役に立たないのが現状である。水中ウォータージェットに発生するキャビテーションはジェット流れ構造に左右され、この問題の本質がノズルの形状にある。低圧のキャビテーションジェットを開発するために、ジェット流れの構造と噴流パラメータの影響を解明し、ジェット噴射ノズルの最適化が必要である。キャビテーション流れは数多くの気泡を含み、その内部を直接観察することは難しいため、数値流体力学 (CFD) 解析がこれらの解明に有効である。

キャビテーション流れでは、(1) 気相は多数の気泡からなり、個々の気泡が高速で膨張・収縮する、(2) 個々の気泡の膨張・収縮運動の代表時間と流れの代表時間は桁違いに異なる、等の特徴があり、産業におけるキャビテーション流れを扱うことは非常に難しい。キャビテーション流れの数値シミュレーションについて様々な立場から研究が行われ、主に模擬均質二相流モデルおよび二流体モデル解法が提案されたが、それぞれの制限があって激しいキャビテーションを伴う水中ジェット流れの解析には不向きである。

## 2. 研究の目的

本研究は、機械加工や材料表面改質のためにさまざまな産業分野で使われているキャビテーションを伴う高速水中ウォータージェットを低圧力条件下で水中有害物質の分解や汚水の殺菌・減菌に利用するために、

- (1) キャビテーション気泡流が予測可能な気泡流平均化方程式に基づく実用的数値解法の確立
- (2) 流れ場解析による激しいキャビテーションを引き起こせるジェット噴射ノズルの開発

を目的としてなされるものである。

## 3. 研究の方法

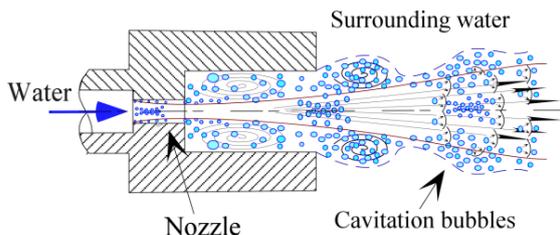


Fig.1 Scheme of submerged water jet accompanied by cavitation

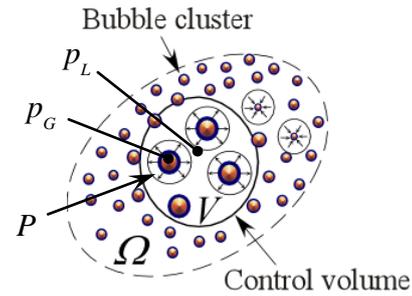


Fig.2 Two-fluid three-pressure bubble cavitation model

本研究では、高速キャビテーションジェットノズルの設計のための CFD 解法を確立するため、以下に示す方法で数値解析と実験の両面から高速水中ウォータージェット流れシミュレーションおよび実験検証を行った。

図 1 に示す高速水中キャビテーションジェットの実用的な数値解法を確立するため、(a) キャビテーション気泡の膨張・収縮を考慮した平均化方程式の定式化、(b) 圧縮性気泡・非圧縮性液体を同時に扱うことができる改良 CIP-CUP 法を用いて効率的な解析手順の確立、(c) キャビテーションの影響を考慮したジェット流れの乱流渦粘性のモデリングとの 3 点に重点を置いて、図 2 に示す三圧力気泡キャビテーションモデルを用いて圧縮性混合流気泡キャビテーションモデルの平均化方程式の定式化を行い、改良 CIP-CUP 法による数値解法を構築した。その上、キャビテーション噴流実験装置を用いて計算モデルの妥当性を実験的に検証し、水中ウォータージェットの実用的な CFD 解析コードを開発した。さらに、噴流パラメータとノズル幾何形状の影響を調べ、水中ウォータージェットの有効加工距離を確保することができる鞘付きノズルを開発し、ノズル性能の実験検証を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 圧縮性混合流キャビテーションモデル

気泡キャビテーションモデルに基づいて、その流れをキャビテーション気泡と液体の混合流体として取り扱い、混合流体の密度を気相と液相の割合によって次式で表す。

$$\rho_M = \rho_L \alpha_L + \rho_G \alpha_G \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\alpha$  は体積率、添え字  $G$  と  $L$  はそれぞれ気相と液相を示す。流れ場の圧力低下に伴って気泡が発生すると気相の体積率が増加して混合流体の密度が大きく変わる。キャビテーション流れの圧縮性について

て、式(1)を微分して気液混合流密度の変化を次式で表す。

$$\frac{d\rho_M}{dt} = \alpha_G \frac{d\rho_G}{dt} + \alpha_L \frac{d\rho_L}{dt} + (\rho_G - \rho_L) \frac{d\alpha_G}{dt} \quad (2)$$

さらに、キャビテーション気泡の分裂・合体を無視して混合流体に対する連続の式を考慮すると、式(2)は次のように表せる。

$$\frac{1}{\rho_M} \frac{d\rho_M}{dt} = \frac{\alpha_G}{\rho_G} \frac{d\rho_G}{dt} + \frac{\alpha_L}{\rho_L} \frac{d\rho_L}{dt} \quad (3)$$

圧縮性の定義にしたがって、液体および気体中音波の伝播速度  $c_L$  と  $c_G$  を用いて式(3)を次式に書き換える。

$$\frac{1}{\rho_M} \frac{d\rho_M}{dt} = \frac{\alpha_G}{\rho_G c_G^2} \frac{dp_G}{dt} + \frac{\alpha_L}{\rho_L c_L^2} \frac{dp_L}{dt} \quad (4)$$

ここで、 $p_L$  と  $p_G$  はそれぞれ液体と気泡に含まれた気体の圧力を示し、気泡界面において下記圧力釣り合いの式が成立する。

$$p_g + p_v = p_L + \frac{2S}{R_b} + \frac{4\mu_L}{R_b} \frac{dR_b}{dt} \quad (5)$$

ここで、 $S$  は界面張力、 $\mu_L$  は液体の粘度、 $R_b$  は気泡の平均半径を示す。液体圧力  $p_L$  の変化に伴って液体に含まれる気泡は高速で膨張・収縮し、気泡内部圧力  $p_G$  がまわりの液体圧力よりはるかに高い周波数で変化するが、その見積は複雑でとても時間がかかるので、本研究では、 $dp_G/dt \approx dp_L/dt$  との簡略を用いて式(4)を下記に整理する。

$$\frac{1}{\rho_M} \frac{d\rho_M}{dt} = \frac{1}{\rho_M c_M^2} \frac{dp_L}{dt} \quad (6)$$

ここで、 $c_M$  を気液混合流体中での平均音波伝播速度と呼び、次式で定義する。

$$\frac{1}{\rho_M c_M^2} \cong \frac{\alpha_G}{\rho_G c_G^2} + \frac{\alpha_L}{\rho_L c_L^2} \quad (7)$$

液体成分および気体成分の密度はともにバロトロピー的に変化すると仮定し、気泡に含まれる非凝縮性気体が理想気体として取り扱う。Tait の状態方程式を用いて液体及び気体の圧縮性を次式で表す。

$$\rho_k c_k^2 = n_k (p_k + B_k) \quad (8)$$

ここで、添え字  $k=G, L$  で気相または液相を示す。 $n$  は断熱指数で、 $n_G = 1.31$ ,  $n_L = 7.15$  である。 $B$  は定数のパラメータで、 $B_G = 0$ ,  $B_L = 3.049 \times 10^8 \text{ Pa}$  と与えられる。

キャビテーションを伴う気液混合流の支

配方程式について、混合流モデルに基づいてキャビテーション気泡とまわりの液体との速度スリップを無視し、圧縮性流体の質量保存および運動量保存の式を用いる。

## (2) キャビテーション乱流渦粘性の修正

高速キャビテーション流れにおいて気泡の膨張・収縮によって渦粘性が吸収され、キャビテーションの発達にしたがって局所的に渦粘性が低減することが報告された。高レイノルズ数水中ウォータージェット流れの渦粘性を見積もるために、本研究では実用的な RNG  $k-\varepsilon$  モデルを用い、レイノルズ応力の成分を次式で与える。

$$-\overline{\rho u_i u_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \mathbf{u} + \rho k) \delta_{ij} \quad (9)$$

ここで、 $\mu_t$  は乱流の渦粘度であり、乱流エネルギー  $k$  と乱流散逸率  $\varepsilon$  により次式で定義される。

$$\mu_t = \chi \rho_M C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (10)$$

ここで、 $C_\mu$  は乱流モデル係数である。 $\chi$  はキャビテーション気泡の影響を考慮した修正係数であり、気泡流ボイド率により、次式で定義される。

$$\chi = \frac{1 + (c_\rho - 1)(1 - a_G)^n}{a_G + c_\rho(1 - a_G)} \quad (11)$$

ここで、 $c_\rho = \rho_L / \rho_G$  であり、 $n$  はキャビテーション気泡伸縮の強さを表す経験係数であり、その値が 3~5 に与える。

## (3) キャビテーションを伴う高速水中ウォータージェットの振る舞い

圧縮性混合流キャビテーションモデルの簡略解法を用いて、オリフィス・ノズルによる水中ウォータージェットの数値シミュレーションを行い、図4に示すように、高レイノルズ数非定常キャビテーション噴流の振る舞いを調べた結果：(a) キャビテーション数の低減にしたがって、オリフィス入口壁面近傍のせん断層でキャビテーションが初生し、発達したキャビテーション気泡群がジェットせん断層に沿って周期的に下流へ放出することが分かった。(b) キャビテーション数が 0.1 から 0.02 まで低下した場合、局所キャビテーション強さを示す局所最大ボイド率はほぼ一定であるが、キャビテーションの平均強さを示すキャビテーション領域平均ボイド率は徐々に高くなり、ジェット噴射の質量流量係数がやや線形的に低減することが明らかになった。

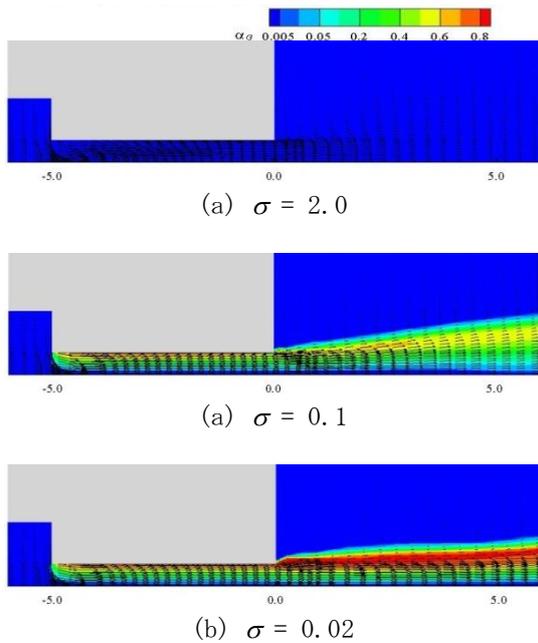


Fig. 4 Distribution of cavitating jets at different cavitation numbers

また、高速キャビテーション噴流実験装置にてオリフィス・ノズルによるキャビテーション噴流の可視化実験を行い、キャビテーション数が0.2から0.02まで変化させて、キャビテーション噴流の振る舞いを高速度ビデオカメラで観察し、ジェット噴射の質量流量係数の変化を測定し、数値解析の妥当性が検証できた。

#### (4) 鞘付きオリフィスノズルとその特性

水中ウォータージェット CFD 解析の結果に基づいてジェット噴射ノズルの最適化を行い、図5に示す鞘付きオリフィスノズルを開発した。そのノズルを用いて実験を行い、一例として図6には噴射圧力  $p_i = 1.0 \text{ MPa}$ 、キャビテーション数  $\sigma = 0.3$  場合、ノズルにおけるキャビテーションクラウドの周期分布を示す。高速ビデオカメラ観測実験の結果により、ノズルのど部長さ  $l = 5d$ 、鞘内径  $D = 3d$  にすることで鞘内キャビテーション領域大きさおよび平均ボイド率がある程度増加することが示された。

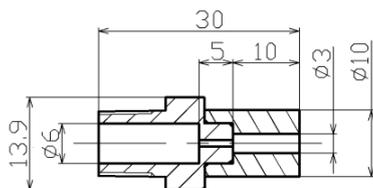


Fig. 5 Sheathed orifice nozzle

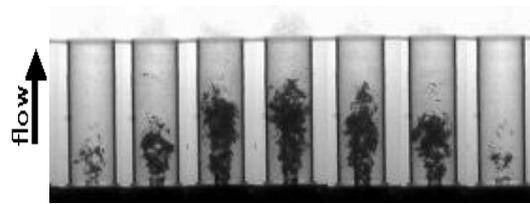


Fig. 6 Periodic cavitation cloud in sheathed nozzle when  $\sigma = 0.3$

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① G. Peng, S. Shimizu and S. Fujikawa, Numerical simulation of cavitating water jet by a compressible mixture flow method, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 6, No.4, (2011), pp.499-509. (査読有)
- ② 清水誠二, 佐久間正仁, 人見孔太, 秋山健太, 彭國義, アプレシブサスペンションジェットによる水中切断, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.77, No.775, (2011), pp.437-445. (査読有)
- ③ G. Peng, H. Ito and S. Shimizu, Numerical simulation of periodical turbulent shear vortices in a submerged water jet, *International proceedings of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 33, (2012), pp.72-77. (査読有)
- ④ 伊東秀人, 彭國義, 清水誠二: 気層被覆アプレシブサスペンションジェットによる水中切断, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.79, No.797, (2013), pp.61-70. (査読有)

[学会発表] (計10件)

- ① 彭國義, 清水誠二, 藤川重雄, 圧縮性混合流手法による高速キャビテーション噴流の数値シミュレーション, キャビテーションに関するシンポジウム (第15回), 2010.11.22-23 (堺市).
- ② G. Peng, S. Shimizu and S. Fujikawa, Numerical simulation of cavitating jet with a compressible mixture flow model, *Proceedings of 3rd International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Cincinnati, Ohio U.S.A., Sept. 27-30, 2010.
- ③ 彭國義, 清水誠二, 藤川重雄, キャビテーションを伴う水中ウォータージェットの数値シミュレーション, 2010年度ウオ

ータージェット技術年次報告会論文集,  
2011.1.21 (名古屋), pp.35-40.

- ④ G. Peng, H. Ito, S. Shimizu and S. Fujikawa, Numerical investigation on the structure of high-speed cavitating water jet issuing from an orifice nozzle, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*, Hamamatsu, Shizuoka, Japan, July 24-29, 2011, AJK2011-33023.
- ⑤ G. Peng, S. Shimizu and S. Fujikawa, Numerical simulation of cavitating water jet issuing from an Orifice nozzle, *Proceedings of WIMRC 3rd International Cavitation Forum*, Warwick, U.K., July 4-6, 2011, Paper IC-1.
- ⑥ 浜口沙月, 伊東秀人, 彭 國義, 清水誠二: 鞘付きノズル内部流れの数値解析, 2011年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp.17-24, 2012.2.24 (東京) .
- ⑦ G. Peng, H. Ito and S. Shimizu, Numerical simulation of high-speed cavitating water-jet issuing from a submerged nozzle, *Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Summer Meeting*, Puerto Rico, USA, July 8-12, 2012, FEDSM2012-72438.
- ⑧ 清水誠二, 彭 國義: アブレスシブサスペンションジェットによる水中切断, キャビテーションに関するシンポジウム (第16回), Paper No. S2-5, 2012.11.23 (金沢).
- ⑨ 増田宏祐, 彭 國義, 清水誠二: 鞘付きオリフィスノズルを用いたキャビテーション噴流の特性, 2012年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp.27-34, 2013.1.25 (仙台) .
- ⑩ G. Peng and S. Shimizu, Progress in numerical simulation of cavitating water jets”, *Proc. 10th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology*, Jeju, Korea, April 25-27, 2013, pp.175-182.

[その他]

ホームページ等

[http://www.mech.ce.nihon-u.ac.jp/fluidSystem\\_research.html](http://www.mech.ce.nihon-u.ac.jp/fluidSystem_research.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

彭 國義 (PENG GUOYI)  
日本大学・工学部・教授  
研究者番号: 90295527

### (2) 研究分担者

清水誠二 (SHIMIZU SEIJI)

日本大学・工学部・教授

研究者番号: 80154293

藤川 重雄 (FUJIKAWA SHIGEO)

北海道大学・大学院工学研究院・名誉教授

研究者番号: 70111937