CIVA 法を用いたキャビテーションの数値解析*

Numerical Analysis of Cavitation Using CIVA

田 中 伸 厚**   坪 康 輔**   田 口 鷹 矢**
 TANAKA Nobuatsu   AKUTSU Kousuke   TAGUCHI Takaya

Abstract We have developed a numerical method to evaluate behaviors of the cavitating bubbles based on the recent CFD (computational fluid dynamics) techniques. The method employs a finite-volume method combined with the high order and flexible interpolation scheme, CIVA. Two kinds of fluid behaviors, liquid (incompressible) and gas (compressible), are simultaneously computed by the unified scheme, CUP, which can handle the large density ratio (especially in case of mercury) associated with cavitation. By combining it with a new numerical cavitation model, which takes into account of compressibility of gas, good numerical results of water and mercury can be obtained.

Keywords: Cavitation, Numerical analysis, Mercury, CIVA

1. 序 論

近年、スーパー・カミオカンデの光電子増倍管の大量破壊、原子炉の配管破損、HII ロケットの事故など、キャビテーションが原因であるとされる事象が多発している。従来工学分野では、キャビテーションに伴う流体機械の性能の低下、崩壊時に発生する衝撃波やマイクロジェットによる機器表面におけるエロージョン、その際に発生する振動・騒音などが問題視されているが、上記のトラブルは今までその対応が十分とはいえなかったことを示している。

一方、日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構が共同で開発を行っている大強度陽子加速器を用いた中性子散乱施設 J-PARK(Japan Accelerator Research Complex)では、中性子散乱施設で使用する液体水銀のキャビテーションによる固体金属容器のエロージョンが懸念されている[1][2]。ターゲットに水銀が用いられるのは、中性子収率に優れ、ターゲット自体を冷却材に兼用できるためであるが、水銀ターゲットに陽子パルスビームが入射すると、核破砕反応による中性

子の発生とともに、ターゲット容器内部では急激な発熱反応に伴う膨張波が発生する。膨張波は圧力波となって容器に向かって水銀中を音速で伝播し、衝撃的な荷重が容器壁面に負荷される。この衝撃圧が原因となり、容器壁面と水銀との界面ではキャビテーションの発生・崩壊に伴うピッチング損傷が生じ、金属容器の寿命を縮める。水銀のキャビテーション現象の解明において、実験によるアプローチには限界がある。水銀は不透明な液体であり、実験により内部の状態や流況を測定するのが困難なためである。そのため、このようなキャビテーション現象の予測や防止に流体数値計算(CFD)を利用することが期待されている。キャビテーション現象を数値解析するには、衝撃波を伴う圧縮性流体と非圧縮性流体の連成や相変化をモデル化する必要があり、従来の CFD 手法では対応が困難であった。井小萩らは、液体と気体の状態方程式を線形結合した一般化状態方程式を用いることにより均質化モデルでキャビテーションの数値解析を行っている[3][4]。我々は、CIVA 法[5]と呼ばれる柔軟な高精度補間法と

* 2005.11.18 受付

** 茨城大学工学部機械工学科 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

TEL: (0294)38-7029 FAX: (0294)38-7029 E-mail: ntanaka@mx.ibaraki.ac.jp

圧縮性流体と非圧縮性流体の統一解法であるCUP法の組み合わせにより、混相流の高精度な数値解析手法を開発してきた[6][7]。ここでは、その手法に、キャビテーションの解析を対象とした相変化モデルを導入し検証を行う。また、上記の水銀キャビテーションを対象とした数値解析を行い、実験結果との比較検討を行う。

2. 解析手法

2.1 基礎式と解析手法基礎式と解析手法

本研究で用いる解析コードの基本的アルゴリズムとしては、CUP(Combined Unified Procedure)法[8]を熱力学的な解釈を基に熱流動解析に適した形に再構築した手法であるTCUP(Thermo-CCUP)法[9]を用いる。TCUP法では、上記基礎式を特性時間に応じて、移流、拡散、音響フェーズに分けて評価する。CUP法の基本変数は $[\rho, u, p]$ であるが、TCUP法では $[T, u, p]$ となり、密度 ρ は必要に応じて状態方程式より求めることになる。基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{\Pi} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla e = \{\nabla \cdot \mathbf{\Pi}\} \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{q} + Q_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = \Gamma \quad (4)$$

$\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 $\mathbf{\Pi}$ は粘性応力テンソル、 e は内部エネルギー、 $\mathbf{q}$ は熱流束、 α はボイド率、 Γ は相変化による単位時間当たりのボイド率変化を表す。 Q_s は相変化による潜熱効果を表す。

数値解法としては、複雑形状問題への対応を考慮して、離散化は有限体積法、移流項の評価に非構造格子でも高精度解析が可能なCIVA法を用いている。CIVA法はCIP法を三角形や四面体といった非構造格子に拡張した手法であり、工学的な複雑体系への対応を可能とする。CIVA法を用いることにより、非構造格子などを用いた複雑体系問題においても、メッシュ内の物理量をコンパクトに三次補間できるため、界面などをシャープに捉えることが可能である。CIVA法では、例えば、二次元三角形メッシュ内の物理量 f の分布を面積座標 (L_1, L_2, L_3) を用いて以下のように表現する。

$$f(L_1, L_2, L_3) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i L_i + d \sum_{j,k=1(j \neq k)}^3 \beta_{jk} [L_j^2 L_k + c L_1 L_2 L_3] \quad (5)$$

ここで c および d は精度や安定性の調整パラメータで、 c は1/2が標準値である。 d は補間精度の調整パラメータであり、 $d=0$ ならば一次補間 $d=3$ ならば三次補間となる。式(5)の係数は、頂点上のデータより以下のように決まる。

$$\alpha_i = f_i, \quad \beta_{jk} = f_j - f_k + (x_k - x_j) f_j^{(x)} + (y_k - y_j) f_j^{(y)} \quad (6)$$

ここで、 f_i は頂点 i における物理量、 $f_j^{(x)}$ はその x 方向微係数を表す。

(a) Cartesian coordinates (b) Area coordinates

Fig. 1 Variable setting and area coordinates in CIVA

2.2 状態方程式とキャビテーション・モデル

TCUP法に導入する状態方程式について述べる。井小萩らによって提案された一般化状態方程式[3][4]では気相においては理想気体の状態方程式、液相にはTammann型の状態方程式を採用し、ボイド率でそれぞれを重み付けした

$$\rho = (1 - \alpha) \frac{p + p_c}{R_l(T + T_c)} + \alpha \frac{p}{R_g T} \quad (7)$$

を状態方程式とする。 p_c , R_l , R_g , T_c はそれぞれ圧力定数、液体定数、気体定数、温度定数とし、物性値より決定する。

キャビテーションは圧力降下による相変化であるから、まず、相変化を考慮せずに計算を行い、飽和圧よりも圧力の低い液体を含むセルでは、計算ステップの間の変化を等温と仮定し、相変化前後で、密度一定を維持したまま、圧力が飽和圧となるようにボイド率を変化させる。

$$\Gamma = \frac{p_v - p}{\Delta t} \frac{R_g T (1 - \alpha) + R_l (T + T_c) \alpha}{(p_c + p_v) R_g T - p_v R_l (T + T_c)} \quad (8)$$

ここで p_v は飽和圧、 Δt は時間刻みである。本手法は陰解法であり、CFL 条件の制限による時間刻みよりも大きな時間刻みで解析が可能であるが、そのため、この相変化量で計算を行うと、相変化量が過大評価され計算が不安定になる場合があるため、ここでは時定数 τ を導入し

$$\Gamma = \frac{p_v - p}{\tau \Delta t} \frac{R_g T (1 - \alpha) + R_l (T + T_c) \alpha}{(p_c + p_v) R_g T - p_v R_l (T + T_c)} \quad (8')$$

として解析を行った。時定数の最適化は、3.3 節の水を用いた解析により決定した。

井小萩らは熱状態の変化を考慮していないが、ここでは以下の式によりキャビテーションに伴う熱状態変化を考慮する。

$$Q_s = \rho \Gamma L \quad (9)$$

ここで L は潜熱である。

井小萩らの解析モデルは圧縮性方程式のオイラー解法に基づくものであり、CCUP 法や TCUP 法のような非圧縮的アルゴリズムには適用できない。その理由は、セル平均密度に対する質量保存式は相変化の影響を受けず、そのままではボイド率の変化による圧力回復を表現できないからである。その点に関して、Kunugi らは、膨張・収縮モデルとして等エントロピー仮定のもとにモデル化を行っている[10]。また、白川ら[11]は、気体・液体共に非圧縮と考えられる場合のモデルとして、

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \Gamma \quad (10)$$

を提案しているが、本研究で対象とする圧縮性問題には適応できない。そのため、ここでは以下のような新しいモデルを提案する。

上記の問題点の原因は、セル平均密度に対する質量保存式として式(1)を用いる点にあるため、ここでは、音響フェーズにおいて、相変化のあるセルでは以下の気相の質量保存式を代用してボアソン方程式を立てる。

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -\rho_g \nabla \cdot \mathbf{u} + \Omega \quad (11)$$

Ω は相変化の効果を表す。特に $\rho_l \gg \rho_g$ の場合、(4)式などより Ω に関し以下が得られる。

$$\Omega = \frac{\rho_l \Gamma}{\alpha + \Gamma \Delta t} \quad (12)$$

液体が大半を占めるようなボイド率の小さなセルでは、式(12)の分母が 0 に近くなり計算が破綻する可能性があるため、ここでは適当な下限値を設定している。

3. 数値解析結果

3.1 一次元衝撃波管問題の数値解析

上述のようにキャビテーションの数値解析のためには、気泡崩壊時に発生する衝撃波を正確に解析できる必要がある。そのため、ここでは代表的な衝撃波のベンチマーク問題である Sod の一次元衝撃波管問題[12]の解析を行う。体系の大きさは $1[\text{m}] \times 0.3[\text{m}] \times 0.3[\text{m}]$ とし、計算要素数を 900 個 ($100 \times 3 \times 3$) とした。高圧側に圧力 1.0、密度 1.0、速度 0.0、内部エネルギー 2.5、を与え、低圧側には圧力 0.1、密度 0.125、速度 0.0、内部エネルギー 2.0 を与えた。境界条件は両端をそれぞれの圧力で固定をし、その他の面は Slip 条件とした。時間刻みは 1.0×10^{-3} で 0.15 まで計算を行った。状態方程式には $p = (\gamma - 1)e/\rho$ を用い、 $\gamma = 1.4$ とした。解析結果を Fig. 2 ~ Fig. 5 に、理論解と共に示す。

理論解と本手法による解析結果を比較すると、衝撃波の伝播速度などもほぼ正しく表されていて、良好な一致が見られると思われる。しかし、内部エネルギー分布においてピーク値付近での不連続面が文献と比べやや鋭くなっている。これは、本解析は衝撃波捕獲のための特別な手法を導入しておらず、等間隔メッシュを用いているため、特に衝撃波付近で計算点数が十分でないことが主要因であると思われる。一方、本手法は非保存形の定式化を用いているにもかかわらず、人口粘性などを導入しなくとも妥当な解像度で衝撃波が解析できている。本手法では、TCUP 法を用いているため、密度を直接的に解かず、圧力と温度より状態方程式より求めているが、Fig. 2 に示すように、衝撃波を伴うような流れ場においても密度を含めたすべての物理量を妥当に評価できることがわかった。

Fig. 2 Density profile

Fig. 3 Pressure profile

Fig. 4 Velocity profile

Fig. 5 Internal Energy profile

3.2 単一気泡の上昇問題

水銀のキャビテーションを取り扱うためには、液体と気体の状態で 1000 倍以上密度差のある二相流問題を扱う必要がある。ここでは、密度差の

大きい液体・気体の二相流解析を行い、本計算手法の二相流問題への適用妥当性の検討を行う。対象としては、空気（圧縮性流体）と水（非圧縮性流体）が混在する、単一気泡の上昇の解析を行い実験結果と比較を行う。これは、静水中に直径 6 mm の空気の気泡を置き、その上昇の中の気泡挙動を解析するものであり、Clift らにより、気泡形状や上昇速度がマップの形でまとめられている [13]。ここでは、液体表面張力係数と粘性係数変えることにより Table 1 に示す 3 ケースの計算を行った。Case 1 は粘性が大きく、表面張力が強い場合であり、気泡の最終形状は Ellipsoidal となる。Case 2 は粘性が大きく、表面張力が弱い場合であり、気泡の最終形状は Skirted、あるいは、Dimpled ellipsoidal-cap となる。Case 3 は粘性、表面張力共に弱い場合であり、気泡の最終形状は Spherical-cap となる。解析体系の大きさを 20[mm] × 80[mm] とし、全ての境界条件を滑り壁条件とする。液相、気相の密度をそれぞれ 1000、1.226[kg/m³] とする。用いた三角形要素は 9600 である。時間刻みは $\Delta t = 5.0 \times 10^{-5}$ [s] とする。また、各 Case の $t = 0.3$ [s] における密度分布を Fig. 6 に示す。Grace の気泡の形状と比較すると、Case 1 の密度分布では、気泡の下部に少し冠球状の特徴が見られるが、形状は Ellipsoidal に近い。また、Case 2 は Ellipsoidal-cap、Case 3 は Spherical-cap となっており、いずれも気泡の形状は実験結果と対応する結果となっている。気泡周辺の速度分布を Fig. 7 に示す。Case 3 は粘性が低い条件のため気泡の影響がかなり下流域まで及んでいる。気泡の定常状態での上昇速度より計算された気泡レイノルズ数の実験と本解析結果の比較を Table 1 に示す。多少の誤差は確認されるが、気泡レイノルズ数も実験と良好に一致している。誤差の要因としては、本解析が二次元解析であることがあげられる。

Table 1 Computational conditions and computed Reynolds number

Case	Viscosity μ [Pa · s]	Surface tension σ [N/m]	Eotvos Number Eo	Morton Number Mo
1	9.0×10^{-2}	7.28×10^{-2}	4.8	1.67×10^{-3}
2	9.0×10^{-2}	1.76×10^{-3}	200	117
3	5.1×10^{-4}	3.52×10^{-3}	100	1.51×10^{-5}

Case	Bubble shape[11]	Reynolds number[13]	Present Reynolds number
1	Ellipsoidal	11	9.0
2	Ellipsoidal cap	11	6.7
3	Spherical cap	2100	1743

Fig. 6 Bubble shape at $t=0.3[s]$

Fig. 7 Velocity profile around bubble at $t=0.3[s]$

3.3 水のキャビテーションの数値解析

キャビテーション・モデルの検証のため、実験データや解析結果の豊富な水を対象としたキャビテーションの二次元解析を行った。比較対象としては、高比良らの論文[14]および奥田らの論文[3]で取り扱われている、衝撃波と単一気泡との干渉問題とした。これは、静止液体中で平衡状態にある円筒状（二次元）単一気泡に平面衝撃波を入射させ、気泡と衝撃波との干渉を数値解析するものである。

$7.8[mm] \times 7.8[mm]$ の体系内に液体状態の水を満たし、体系中心に半径 $1[mm]$ の蒸気気泡をおく。初期圧力を $0.1[MPa]$ とし、左壁から $100MPa$ の衝撃波を入射させる。その他、三方向の壁は自由境界とした。用いた計算要素数は 150×150 の等間隔格子とし、時間刻み $10^{-2}[\mu s]$ として $10[\mu s]$ まで計算を行った。

物性値は圧力 $0.1[MPa]$ 、温度 $373.15[K]$ の飽和状態の物性を与えた。水の状態方程式は、文献[3]を参考に、 $p_c=1.9 \times 10^3[MPa]$ 、 $T_c=3800[K]$ 、 $R_g=500[J/kgK]$ 、 $R_f=480[J/kgK]$ を用いた。飽和状態の水の密度は $\rho=960[kg/m^3]$ である。表面張力係数は $5.9 \times 10^{-2}[N/m]$ 、潜熱は $2260[kJ/kg]$ を与えた。

Fig. 8に気泡形状の時刻歴を示すボイド率の等値線図を、Fig. 9に圧力の等値線図、Fig. 10に速度ベクトル図を示す。なお、衝撃波が気泡に到達する時刻を $t=0$ と定めている。

時間経過とともに気泡体積は小さくなり、衝撃波の入射側にくぼみが生じ (Fig. 8), Fig. 10の(a)から(c)にかけてピーク速度が加速されていることから、マイクロジェットが発達していく様子がわかる。そのメカニズムは、Fig. 9とFig. 10の圧力変化と速度変化より説明できる。まず、衝撃波が気泡に衝突すると界面付近で音速が急激に低下するため、衝撃波は気泡の周囲を回り込むように進む(Fig. 9(b))。気泡内部は周囲液体に比べて圧力の低いまま取り残され、気泡周囲の流体が気泡中心へ向かって流れ込み、マイクロジェットが形成される(Fig. 10(b))。このジェットが高速(約 $760m/s$)で進行側の界面に衝突する際(Fig. 10(c))に衝撃圧力が発生し、急激な圧力上昇が起こる(Fig. 9(b))。この圧力上昇は衝突点を中心として周囲へ広がる圧力波を生み、このうち入射側へと伝播する圧力波はジェットにより二つに分裂した気泡をさらに圧縮し、崩壊を引き起こし、 $1GPa$ 近い高圧状態を発生させる(Fig. 9(c))。最終的には、二つの気泡と再び干渉した圧力波が強い衝撃波を形成しながら放射状に伝播し、リバウンドした分裂気泡は渦対を形成し下流側へと移動する(Fig. 9(d), Fig. 8(d))。

以上の解析結果は、時定数を種々に変えて行った解析のうち、最も妥当性があると思われる時定数 $\tau=500$ の場合のものである。その結果は、ボイド率分布、圧力分布、圧力ピーク値や速度ピーク値などを含め、高比良らの結果および奥田らの

結果とはほぼ一致しており、本キャビテーション・モデルの妥当性を裏付けている。

Fig. 8 Contours of volume fraction around initial bubble area

Fig. 9 Contours of pressure around initial bubble area

3.4 水銀のキャビテーションの数値解析

本解析手法のキャビテーション現象への解析適用性を確認するため、水銀のキャビテーション実験[1][2]を対象とした二次元解析を行った。水銀も水と同様に、気体と液体で1000倍以上の密度差があり、従来の数値解析手法では対応が困難な問題の一つである。ここでは、文献[1]の実験では、

Fig. 10 Velocity profiles

雰囲気圧力を調整することにより、キャビテーション気泡の成長、崩壊を計測している。本解析では、その実験を模擬するため、 $1.5[\text{mm}] \times 1.5[\text{mm}]$ の体系内に液体水銀を満たし、体系中心に半径 $0.1[\text{mm}]$ の水銀蒸気の気泡をおく。本来のキャビテーション気泡核の径は数十 μm 程度であるが、今回の解析ではメッシュ数の制限より初期の気泡半径は 0.1mm と設定している。実験[1]で観測された圧力変化を模擬し、Fig. 11に示すように初期雰囲気圧力を $0.21[\text{MPa}]$ とし、 $0 \sim 0.8[\text{ms}]$ の間は液相圧力を $0.09[\text{MPa}]$ に減圧し、 $0.8[\text{ms}]$ から計算終了の $1.05[\text{ms}]$ までは $0.42[\text{MPa}]$ に加圧する。

物性値は、 $0.21[\text{MPa}]$ 、温度 $673.2[\text{K}]$ の飽和状態の物性を与えた。水銀の状態方程式は、文献[15]を参考に、 $p_c=1.945 \times 10^9[\text{Pa}]$, $T_c=3837[\text{K}]$, $p_s=2.102 \times 10^5[\text{Pa}]$, $T_s=673.2[\text{K}]$, $R_g=20.85[\text{J/kgK}]$, $R_l=34.13[\text{J/kgK}]$ を用いた。飽和状態の水銀の密度は $\rho=12630[\text{kg/m}^3]$ である。表面張力係数は $0.449[\text{N/m}]$ 、潜熱は $296.5[\text{kJ/kg}]$ とした。境界条件は、加圧時には全面を固定とし、減圧時は上面を $0.42[\text{MPa}]$ で固定し、下面は壁、左右を自由境界条件とした。用いた計算格子は 150×150 で、時間刻みは $1.0 \times 10^{-4}[\text{ms}]$ で計算を行った。時定数は3.3節の解析と同様 $\tau=500$ としている。

Fig. 12にそれぞれボイド率分布の時間変化を示す。マイクロジェットが生成され、その影響で水銀気泡が分断される形で気泡崩壊が起こる様

子が確認できる。Fig. 13 が圧力分布図である。本解析では、加圧圧力 0.42MPa に対し気泡崩壊時に 8.8MPa の圧力が発生している。この圧力は、キャビテーションで発生する圧力としては小さい感があるが、キャビテーション崩壊は連鎖的に起こる（次の気泡崩壊の加圧圧力となる）ことを考えれば十分な値であろう。Fig. 14 には最高速度発生時 ($t=0.98[\text{ms}]$) の速度分布を示す。この図からもわかるように、マイクロジェットの数として 16m/s 程度の速度となった。この速度も加圧圧力が 0.42MPa を考慮すれば妥当なものである。最後に、気泡半径の時間変化を実験による結果[1]と比較する (Fig. 15)。参考のため、Rayleigh-Plesset の方程式[16]を用いた理論解析結果のデータも載せた。理論解析では、気泡内を飽和蒸気圧で一定、つまり、相変化が十分に速いものと仮定しているため、気泡の成長が過大評価されている。本手法の結果では、0.5ms までは成長速度が良好に一致しているが、それ以降実験値と差が生じている。この原因は実験条件の問題ではないかと考えている。また、気泡崩壊の速度は実験と比べて妥当であることも確認できる。

Fig. 11 Time history of forced pressure

Fig. 12 Contours of vapor volume fraction (0.05 intervals)

(a) $t=0.9\text{ms}(\text{max}=4.5\text{MPa})$ (b) $t=0.98\text{ms}(\text{max}=8.8\text{MPa})$

Fig. 13 Pressure contours

Fig. 14 Velocity profile at $t=0.98\text{ ms}$ ($\text{max}=15.7\text{m/s}$)

Fig. 15 Comparison of bubble growth and collapse speed

3.5 キャビテーションの三次元解析

最後に、三次元解析の一例として、3.3節の水のキャビテーション解析を三次元にて実施した結果を示す(Fig. 16)。解析条件は3.3節と同様とし、解析メッシュは $30 \times 30 \times 30$ の等間隔メッシュとした。メッシュが粗いため、定量的な検討は困難であるが、マイクロジェットが生成され、そのジェットが気泡を貫通する形で、気泡がリング

状に崩壊する様子が再現できている。

Fig. 16 Contour surface of vapor volume fraction at $t=6.0$ [μs]

4. 結論

本研究では、CIVA 法に基づく混相流解析アルゴリズムに、キャビテーションの解析を対象とした相変化モデルを導入した。Sod の一次元衝撃波管問題と単一気泡の上昇問題の解析により、キャビテーションの解析において重要となる衝撃波や二相問題の解析の検証を行った。次に、水のキャビテーションの数値解析を実施し、結果を過去の結果と比較して相変化の時定数の最適化を行った。最適な時定数を用いた場合、過去の解析結果と良好な一致を見た。最後に、小山により実施された水銀のキャビテーション実験を対象とする解析を実施した。本手法による解析結果は、実験で計測された気泡成長・崩壊の速度を良好に再現することが出来た。また、その解析結果より、発生圧力が 10MPa 程度、マイクロジェット速度が 10m/s 程度であることが予測された。最後に三次元解析の一例を示したが、今後は三次元解析により、より詳細で正確な解析を実施していく予定である。本モデルでは、従来の手法に比べ、モデル化パラメータは緩和時間 τ のみであり、検証解析によりその最適化を行うことにより、従来モデルに比べ、より機構論的にキャビテーション解析が可能であるという特長を持つ。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科研費 (No.17560740) の援助のもとに行われた。

参考文献

- [1] 小山, 水銀キャビテーションによる壊食と疲労強度劣化に関する研究, 茨城大学大学院修士論文 (2004).
- [2] M. Futakawa, et al. $\Rightarrow$ 全員明記, Pitting damage by pressure waves in a mercury target, J. Nucl. Materials, **343**, 70-80 (2005).
- [3] 奥田, 井小萩, 気泡雲の崩壊挙動シミュレーション, 機論(B), **62**-603, 3792-3797 (1996).
- [4] 大平, 他, ターボ機械, **28**-2, 101-110 (2000).
- [5] N. Tanaka, Development of a highly accurate interpolation method for mesh-free flow simulations, J. Numer. Methods Fluids, **30**-8, 957-976 (1999).
- [6] N. Tanaka, Multi-phase flow simulation of complicated geometry problems using CIVA method, Proc. 6th World Cong. on Comput. Mech., Beijing, China (2004).
- [7] N. Tanaka, T. Yamasaki and T. Taguchi, Accurate and robust fluid analysis method using CIVA on unstructured grid system, JSME Int. J, Series B, **47**-4, 672-680 (2004).
- [8] T. Yabe and P. Y. Wang, Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, J. Phys. Soc. Japan, **60**, 233-242 (1991).
- [9] 姫野, 渡辺, 低重力環境における熱流体管理に関する研究, 機論(B), **69**-678 頁欠落 (2003).
- [10] T. Kunugi, et al. $\Rightarrow$ 全員明記, Direct numerical simulation of pool and forced convective flow boiling phenomena, Proc. 20th Int. Heat Transfer Conf. 頁欠落 (2002).
- [11] 白川, 他, VOF 法による相変化を伴う熱流動の数値解法, 機論(B), **66**-649, 2405-2412 (2000).
- [12] G. A. Sod, A Survey of Several Finite Difference Methods for Systems of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws, J. Comput. Phys., **27**-1, 1-31 (1978).
- [13] R. Clift, J.R. Grace and M.E. Weber, Bubbles, Drops and Particles, Academic Press (1978).
- [14] 高比良, 増渕, 赤松, 機論(B), **60**-577 2976-2983 (1994).
- [15] N. B. Vargaftik, Handbook of physical properties of liquid and gases, Hemisphere Publishing (1983).
- [16] 加藤, 新版キャビテーション, 横書店(1999).