

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06164

研究課題名(和文) 非定常気液混相流のための数値解法の開発とキャビテーション気泡の崩壊挙動の解明

研究課題名(英文) Numerical Method for the Unsteady Multiphase Flow and the Collapsing Behavior of Cavitation Bubble

研究代表者

申 炳録 (Shin, Byeongrog)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：30235767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮・非圧縮性混在の気液混相流の解析には前処理法による圧縮性流れの解法が計算上都合が良いが、時間微分項を修正することになり非定常挙動の解明には問題があった。本研究では、前処理を施す際に用いられる前処理行列が時間微分項には影響せず移流項に反映されその役割を十分発揮できる方法を提案することで、時間の整合性を保ち安定性、収束性とも改善された高解像度の非定常混相流のための数値解法を開発した。またこの数値解法を用い定常・非定常のいくつかの気液混相流を解析し、数値解法の妥当性を検証するとともに非定常性の強いキャビテーション流れ等の解析に有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビテーション気泡の崩壊挙動に関する研究やその崩壊圧、衝撃波による損傷の防止および有効活用に関する研究はその重要性のため精力的に行われている。しかし、数値的研究においては非定常計算の問題でその研究の推進に限界があった。本研究により、これらの問題が解決できる時間に対し整合性を保つ数値解法を提案することで、現状では捉えきれない気泡崩壊の詳細な挙動や諸非定常現象が良い精度で解析可能となり、また、キャビテーション気泡の特性を考慮すべき高速液体機械・衝撃波活用機器の先端設計・開発に大きく寄与すると期待する。

研究成果の概要(英文)：Preconditioned numerical method of compressible flow is advantageous in analyzing the gas-liquid multiphase flow with both compressible and incompressible flow nature. However, there are some difficulties to make clear the unsteady behavior because the time derivative term in the conventional preconditioning method is corrected. In this study, a time consistent numerical method for unsteady multiphase flow was developed. In this method, time and spatial accuracy, numerical stability and convergency are improved by proposing a method which the matrix used for precondition does not affect the unsteady term and can fully exert its role in the computation of the advection term. Through some numerical simulations for steady and unsteady gas-liquid multiphase flows, the validity of the developed method was verified, and the effectiveness and applicability to the problems with strong unsteadiness such as cavitating flow were confirmed.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 数値流体力学 気液混相流

## 1. 研究開始当初の背景

高速液流環境下で発生するキャビテーション流れではキャビテーション気泡の崩壊により衝撃圧を引き起こし液体機械・機器の表面材に致命的な損傷を与えるなど機械の性能に悪い影響を及ぼす。このようなキャビテーション気泡崩壊の超高速現象に関する研究は数値計算による研究が適している。しかし、気泡の挙動自体が膨張-凝縮-相互干渉で非定常性が強く、これらの現象を含む流れは広い範囲の密度と音速変化を伴う圧縮性-非圧縮性流れの性格が混在するため、単相流をベースとした圧縮性もしくは非圧縮性流れ単独の計算法ではその数値解析が非常に困難である。そこで、近年本研究者など幾つかの研究グループが圧縮性流れの基礎式に擬似音速を考慮した前処理法 (Preconditioning method) を導入する方法を提案することで、この種の流れの解析を可能とした。この前処理手法は、圧縮性流れの解法を用いマッハ数が非常に小さい極めて遅い流れを計算する際、音速を流速と同じオーダーに置き換え非圧縮性流れ特有の方程式系に変換する方法で、圧縮性-非圧縮性混在の流れの計算に都合がいい。ところが、この手法は非圧縮性流れが扱えるよう時間微分項に修正項を加えるため非定常挙動の解明が難しく非定常解を得るとしても非効率的であり、また前処理行列や流束関数の選び方によっては収束性の劣化や解に誤差が入る恐れもあるが、これらの問題を解決するための提案はまだ見当たらない。

## 2. 研究の目的

本研究では、上述の超高速現象を伴う混相流解析における問題点を解決するため、前処理を施す際に用いられる前処理行列、数値流束行列において、非定常低マッハ数流れに対するいわゆる stiff 問題を解決できる新たな方法を提案し、時間の整合性を保ち安定性、収束性とも改善された非定常気液混相流のための数値解法を開発する。この行列の構成には固有値、スペクトル数、物理時間と数値時間スケールの差による不安定性など、マッハ数に関わる問題に対し数学的な観点で検討し、広い範囲のマッハ数に対し特異性を持たないように考案する。またこの際、前処理行列と高解像度上流化でのヤコビ行列との結合で現れ得る不具合を避けるため、基本フレームである近似リーマン型上流差分において、安定化のための付加項や内挿関数の選び方について調べ安定性を確保する。すなわち上流化から来る付加拡散項の構成それぞれが解法の安定性に及ぼす影響を明らかにするとともに、上流差分と内挿関数の組み合わせがまた安定性に与える影響をいくつかの高次精度スキームを例にパラメトリック研究をとおして確認し、空間精度、安定性、収束性を保つ数値解析システムを構築する。提案したこれらの数値解法を気液混相流のいくつかの定常・非定常問題をとおして、その妥当性と有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究ではまず、新しい数値解法を提案するために従来の前処理法を再検討した。圧縮性-非圧縮性混在の気液混相流を精度よく計算するためには圧縮性流れの解法をベースとした前処理法を用いる方法が有利であるが、前述のとおり前処理行列がもたらした時間に対する整合性の問題や流束関数の選び方によって起こり得る安定性と収束性の劣化が大きな問題となったからである。そこで、再検討、調査により得られた知見をもとに、これらの問題点が改善される新しい数値解法の開発に取り掛かった。前処理行列が基礎方程式の時間積分にかかる限り、この前処理による解法は常に時間の整合性が問われるのは自明なことで、時間項に影響せず stiff 問題を解決する解法を工夫する必要がある。そこで、本研究では前処理型基礎方程式の導出において、前項で記した方法で考案した数値流束行列が移流項のみに働いても特性の理論に基づく解法を損なわず計算の安定化に寄与する方法を工夫し、時間、空間とも整合性を保つ非定常問題に適した新しい数値解法の提案のための研究を推進した。

次に、提案した数値解法を用い気液混相媒体の衝撃波管問題や翼列周りの低マッハ数流れの問題など定常・非定常問題をシミュレーションし、数値解法の妥当性を検証するとともに非定常気液混相流の問題に適用できるロバストな解法であることを確認した。

## 4. 研究成果

## (1) 非定常気液混相流のための数値解法の提案

気液混相流の非定常流れの解析のため、従来のような前処理ではなく、時間に対して整合性を保ち安定な非定常混相流の計算に適した数値解法を提案した。これまでに申請者らが開発してきた気液混相流のための特性の理論にもとづく圧縮性差分スキームを基本フレームにし、前述の方法で構成した前処理行列や数値流束行列を用い前処理型基礎方程式を導出した。これを一次元オイラー方程式で表すと以下の通りである。

$$\Gamma^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = 0 \quad \text{with } \mathbf{W} = [p, u, T, Y]^T \quad \text{and} \quad \Gamma^{-1} = \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{W}}$$

ここで、 $\mathbf{Q} = [\rho, \rho u, e, \rho Y]^T$ 、 $\mathbf{E} = [\rho u, \rho u^2 + p, (e + p)u, \rho u Y]^T$ で、 $Y$ は気相の質量分率である。前処理行列を導くため非定常項を非保存型変数で表したこの方程式は、近似リーマン解法を用

い解かれる。この際移流項の計算は、例えば Roe 型解法を考えると、数値流束 $E_{i+1/2}$ を以下のように提案する。

$$E_{i+1/2} = (1/2)\{E(Q_{i+1/2}^L) + E(Q_{i+1/2}^R) - \Gamma_p^{-1}(L_p|\Lambda|L_p^{-1})_{i+1/2}(W_{i+1/2}^R - W_{i+1/2}^L)\}$$

ここで、 $\Lambda$ と $L_p$ 、 $L_p^{-1}$ は $\Gamma_p \partial E / \partial W$ の固有値と固有ベクトル、 $\Gamma_p^{-1}$ は前処理行列である。

この数値流束中の数値粘性項は、解法の安定性のための修正項であるため前処理行列と流束ヤコビ行列との結合で不具合のないよう影響評価をとおして作成した。一方、前処理行列 $\Gamma_p^{-1}$ は行列 $\Gamma^{-1}$ に前処理を施して導かれるが、本研究では広範囲のマッハ数に対し特異性がないよう $[p, u, S, Y]^T$ 、 $[\rho, u, p, Y]^T$ などの未知変数ベクトル $W$ の選び方やこれらにより構成されるヤコビ行列の固有値、スペクトル数、時間スケールに対する安定性解析等の評価をとおして導いた。あとは Runge-Kutta 法などの時間積分で解が得られるが、このように解法を構築することで、前処理項が時間項に影響することなく低マッハ数流れに対する stiff 問題が解決でき、時間に対して整合性を持つ数値解法になる。

## (2) 数値解法の検証

提案した数値解法の検証は衝撃波管問題や翼列周りの低マッハ数流れなど混相流のいくつかの定常・非定常問題で行った。まずは単相流で非定常性を確認し、これを気液混相媒体に拡張した。図1に理想気体の衝撃波管問題の計算結果の例を示す。格子点数 100 を用い計算した本解法による非定常解が厳密解と同程度で得られていることが確認できる。

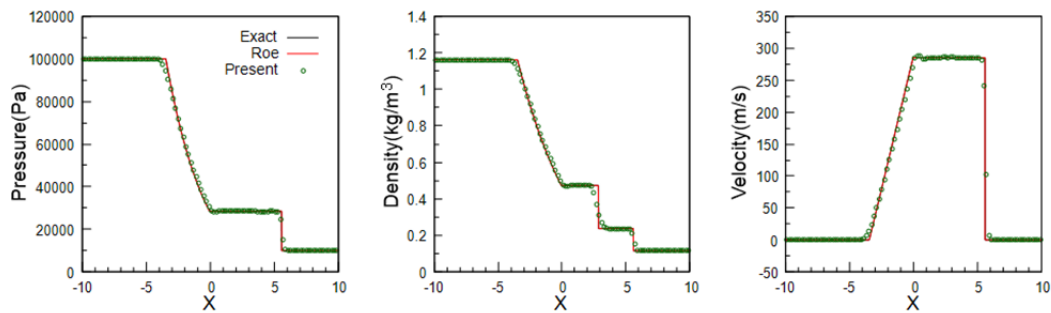


図1 理想気体の衝撃波管問題の計算結果 (Void 率=100%)

図2には気液混相媒体の衝撃波管問題の計算例を示す。初期 Void 率 50%の混相媒体に対する計算結果で、この場合は厳密解が存在しないため、格子点数 10000 に増やし前処理なしの Roe スキームを用い解が得られるように丁寧に計算した結果と、100 点を用いた本解法との比較である。混相媒体においても左右に伝播していく膨張波と衝撃波の様子やこれらにより誘起される Void 率の挙動が良くシミュレートされている。図3は初期 Void 率 0%の液体 (水) に対する衝撃波管問題の計算結果である。水に対する音速の影響で衝撃波のような膨張波が現れるこの流れ特有の現象が良く取られている。

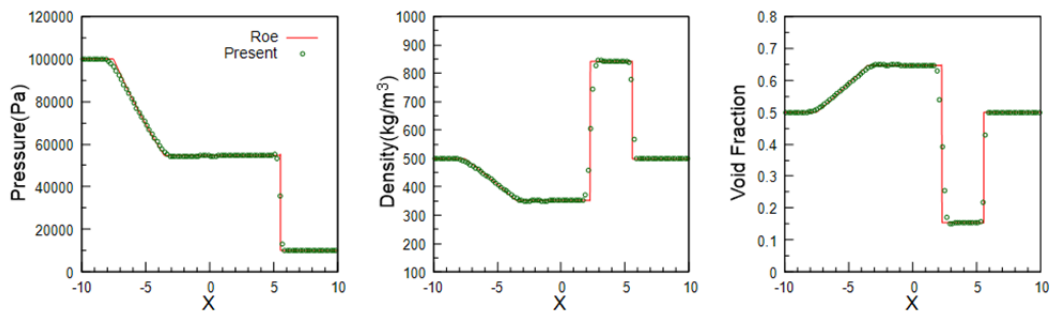


図2 混相媒体の衝撃波管問題の計算結果 (Void 率=50%)

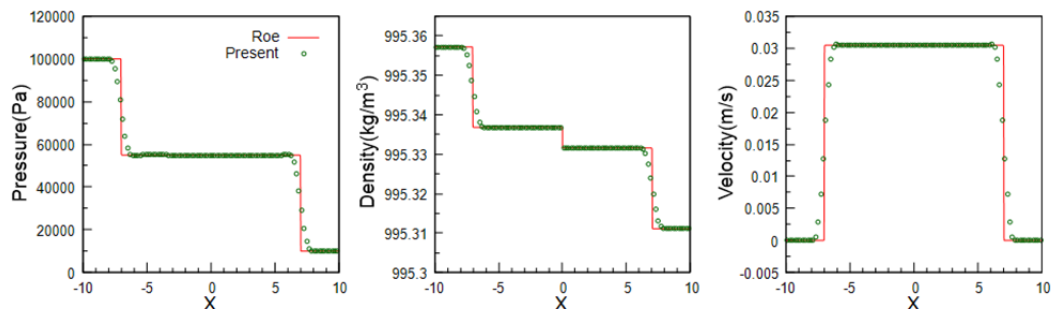


図3 液体の衝撃波管問題の計算結果 (Void 率=0%)

また、本解法は2次精度、3次精度、ENO、WENOスキームなどによる空間精度と安定性の関係が検討された。さらに、保存量、基本量、特性量等を内挿関数として選んだ場合、それぞれが解法の安定性に及ぼす影響等を調べるなど多角的な方法で本解法を検討した。

### (3) キャビテーション流れへの応用

幾つかのキャビテーション流れの数値シミュレーションにより本解法の応用性と有効性を確認した。その一例に図4は、インデューサ内の非キャビテーション流れの場合の性能曲線を示す。本解法を組み込んで計算した結果は実験データに非常に近い性能を予測していることが見て取れる。キャビテーション発生時の性能曲線は図5に示す。このキャビテーション流れの計算条件ではキャビテーション係数が0.02になるまでは吸込性能がほぼ一定であったが、これより低くなると急激に低下しブレイクダウン現象を示した。また、チップ側入口羽根角の変化では、角度の減少につれ静圧係数が上昇しキャビテーションが発生しにくくなる環境に移行していくことが予測できる。

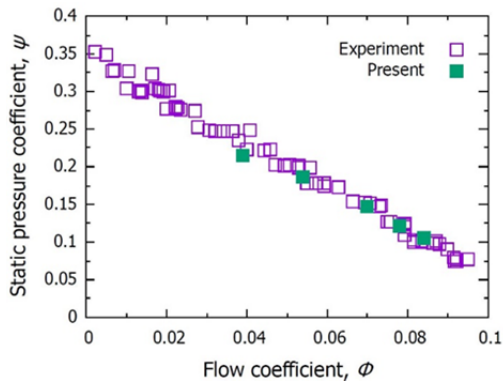


図4 非キャビテーション条件でのインデューサの性能曲線

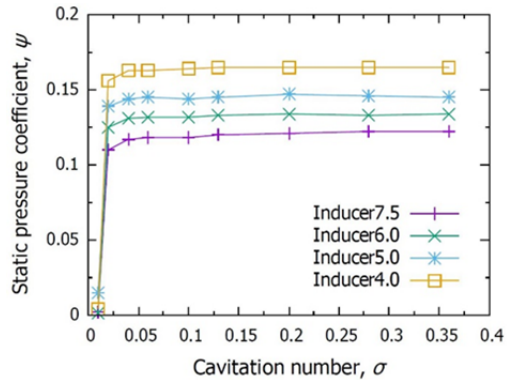


図5 キャビテーション条件でのインデューサの性能曲線

図6にインデューサ翼周りの蒸気の体積分率を子午面表示で示す。入口羽根角度の変化に対してキャビティの規模やキャビテーションの発生状態が予測できる。この調べでは、入口翼端側の羽根角の変化がキャビテーションの発生に大きく影響し、入口羽根角が小さいほど、キャビテーションを抑制できることを示した。入口流量、出口圧力など異なる流動条件下での流れのシミュレーションをとおして、キャビテーション抑制に関する知見を広めることができた。このように本解法は、インデューサの複雑なキャビテーション流れの非定常挙動とキャビテーション特性の解明に有効な手段になることを確認した。

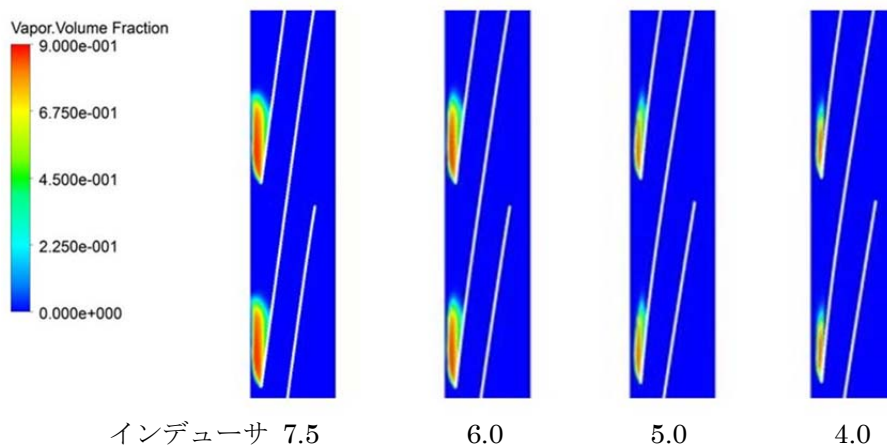


図6 インデューサ周りの蒸気の体積分率(子午面表示)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Yamaguchi and B. Shin	4. 巻 No.1431
2. 論文標題 A Time Consistent Preconditioning Method for Unsteady Gas-Liquid Two-Phase Flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 14th Int 'l Symp. on Numerical Analysis of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Z. Han and B. Shin	4. 巻 No.1422
2. 論文標題 Numerical Simulation of Cavitating Flow in an Inducer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 14th Int 'l Symp. on Numerical Analysis of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 B. Shin	4. 巻 45
2. 論文標題 Effect of Submergence and Flow Rate on Free Surface Vortices in a Pump Sump	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Mechanics Research	6. 最初と最後の頁 225-236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 B. Shin and S. Tashiro	4. 巻 491
2. 論文標題 Numerical Study on the Flow Characteristics of 2-D Free Jet at a Low Reynolds Number	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 4th International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 B. Shin	4. 巻 21
2. 論文標題 A Numerical Investigation of Surface Vortices in Pump Intake Sump (Part 2: Effect of Water Level)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances and Applications in Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 77-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 B. Shin	4. 巻 21
2. 論文標題 A Numerical Investigation of Surface Vortices in Pump Intake Sump (Part 1: Effect of Flow Rate)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances and Applications in Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 61-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田代周, B. シン
2. 発表標題 低Reynolds数自由噴流の数値解析
3. 学会等名 第22回 日本流体力学学会 中四国・九州支部講演会論文
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保侑大, A. マリキ, B. シン
2. 発表標題 並列2平板後流に及ぼすレイノルズ数の影響
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若松祐亮, 小園茂平, B. シン
2. 発表標題 ランダム位相法の吹き出し直後の乱流圧力場の観察
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soe Pyae Aung, B. Shin
2. 発表標題 CFD Analysis of Kaplan Turbine Runner for Micro-hydropower
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口智史, B. シン
2. 発表標題 圧縮性気液2相媒体中の高速流れ現象
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集, No.188-1, C12
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田代周, B. シン
2. 発表標題 SMAC 法による2次元自由噴流の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集, No.188-1, C13
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田 晨平, 徳丸 颯真, 荒武 大貴, 小園 茂平, B. シン
2. 発表標題 流れに垂直に置かれた並列2平板まわりの流れの可視化
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集, No.188-1, A41
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤 正崇, 小園 茂平, B. シン
2. 発表標題 流れに垂直に置かれた並列 2 平板後方の流れ特性
3. 学会等名 日本機械学会講演論文集, No.188-1, A42
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関