

平成22年6月21日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760120
 研究課題名（和文） 水中ウォータージェットの流れ場の定式化と数値解析法に関する研究
 研究課題名（英文） A study on formulation and numerical analysis of the flow field of a submerged water jet.
 研究代表者
 江頭 竜（RYU EGASHIRA）
 旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授
 研究者番号：60455102

研究成果の概要（和文）：水中ウォータージェットで発生するキャビテーションを取り扱うためには、流体の圧縮性が無視できないが、従来の二流体モデルに基づく平均化方程式系には液体非圧縮の付加慣性力の式が用いられてきた。本研究では最近報告された液体の圧縮性も考慮した付加慣性力の式を用い、線形の範囲内では液体の圧縮性が従来の解析結果に影響を及ぼさないことを確認した。また、気泡流の伝熱問題への取り組みに先行して、液体単相の伝熱問題の数値シミュレーションを行い、計算法と計算結果の妥当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：When we analyze the cavitation behavior in a submerged water jet, the compressibility of a liquid should not be omitted. However, an added inertia force equation which is absent from that compressibility has been used in the conventional averaged equations based on a two-fluid model. In this study, the added inertial force equation where the compressibility was considered was adopted, and then it was revealed that the compressibility does not affect the past analytical results in the range of linear problem. And furthermore, the numerical simulation of a heat transfer problem in the liquid single phase was performed, and the validities of the computation method and results were confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：混相流, キャビテーション

1. 研究開始当初の背景

(1)水中ウォータージェット装置

水中ウォータージェット（以下、「水中

WJ」）装置は静止水中に水のジェットを毎秒数10m～数100mの高速度で噴射する装置である。この装置は、機械加工物の洗浄やバリ

取り、有機化合物の分解、疲労強度の改善、原材料粒子の微粒化などに利用され、その利用範囲はますます拡大されつつある。

(2)水中 WJ の流れ場の主な特徴

- ①ジェット速度が高速である。
- ②ジェット内外に莫大な数の気泡が存在する。
- ③気泡が崩壊する際には気泡内と気泡近傍に局所的な超高压（数 100MPa 程度）・超高温（5000℃以上）の場が発生する。以下、この現象を「キャビテーション」と呼ぶ。水中 WJ 装置はキャビテーションを有効利用する装置である。

(3)流れ場の特徴から生じる問題点

- ①特徴②より、水中 WJ の流れ場の内部構造を可視化したり、局所的な物理量を測定することが難しいため、実験的研究は困難を極める。
- ②理論的・数値的にも、水中 WJ のような高速気泡流に対しては解くべき基礎式すら確立されていないのが現状であり、このような高速気泡流は学術的にも未解決の学問領域であるといえる。
- ③以上 2 点の問題点から、産業界では水中 WJ 装置の高性能化・能動的制御は試行錯誤的になされている。産業界からも、高速気泡流の流れ場の定式化とその数値シミュレーション法の確立が強く要請されている。

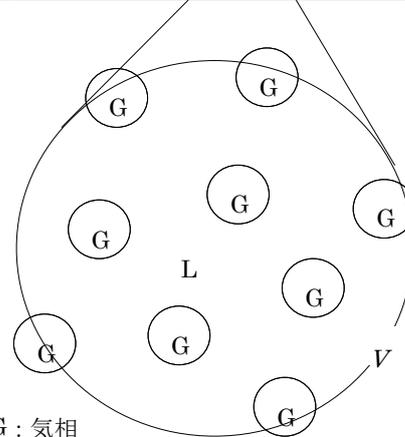
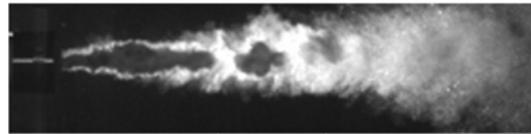
2. 研究の目的

- (1)水中 WJ のような高速気泡流の流れ場を定式化し、平均化モデルに基づく支配方程式系を導出する。
- (2)得られた平均化モデル方程式系の数学的適切性を検証する。
- (3)得られた平均化モデル方程式系の有効性を検証するため、簡単な伝熱問題の数値シミュレーションを行う。
- (4)得られた平均化モデル方程式系に基づく数値シミュレーション法を確立する。

3. 研究の方法

(1)平均化の方法

図 1 の上図に示すように、水中 WJ で生じる流れ場は、微細な気泡を無数に含み、雲のような様相を呈する（キャビテーションクラウド）。このような場合、平均化が意味をなす程度の大きさの平均化のための検査体積を図 1 下図のようにとり、平均化された物理量が支配される方程式系を導出する「平均化モデル」が有効である。本研究では、従来の



G : 気相
L : 液相

図 1. 液体中に分散した気泡と平均化体積 V

単相の流体力学の基礎方程式から出発し、それを数学的に厳密に平均化して導出する方法をとる。

(2)平均化方程式系導出のポイント

従来の単相の流体力学の基礎方程式を数学的に厳密に平均化すると、気相と液相それぞれの相の体積で平均化された体積平均量で表された項と、気液界面近傍での局所的な変数の（体積平均量で表されていない）表面積分の項が現れる。本研究で用いる平均化方程式は体積平均量が支配される方程式であるため、この気液界面近傍での局所的な変数の表面積分をいかにして体積平均量で記述するかが方程式系導出のポイントとなる。

研究代表者らは本研究課題に取り組む以前に、キャビテーションに特徴的な圧力波を捕えるため、圧力のみに着目し、圧力波の様々な伝播特性を調べることのできる平均化方程式系を導出し、成果をあげている。本研究課題でも、その手法を応用し、圧力のみに着目するため省略していただく項を可能な限り数学的に厳密に組み込む。

(3)数学的適切性の検証

キャビテーションのような気泡の激しい膨張・収縮を伴わない低速の気泡流に対して用いられてきた気液二相流の従来の平均化方程式系は、数学的に適切でないということが知られている。すなわち、微小な物理量の変動が際限なく増幅されていくといった非物理的な結果をもたらす方程式系ということである。その原因は、気液二相流を定式化する際に、物理的に妥当なモデル化がなされていないためであると報告されている。なお、

そのような方程式系をこれまで用いることができたのは、方程式系を数値的に解く際に導入される数値粘性によって増幅が抑えられていたためだとされている。

以上のことより、本研究課題で導出された支配方程式系の数学的適切性を検証することには大きな意味があり、従来の適切性を評価する手法を本研究で適用してみる。

(4) 伝熱問題の数値シミュレーション

本研究課題で導出される平均化方程式系にはエネルギー保存の式も含まれる。このエネルギー保存の式も含めた平均化方程式系の特性を知るため、簡単な伝熱問題の数値シミュレーションを行う。単相の流体であれば、従来の単相の流体力学の基礎方程式（質量保存の式、運動量保存の式、エネルギー保存の式）を解けば、伝熱シミュレーションが可能である。本研究で導出された平均化方程式系を用いた伝熱シミュレーションの結果を、単相の流体力学の基礎方程式を解いて得られた結果と比較することで、気泡群の有無による相違が明確となる。

解くべき伝熱問題は以下の通りである。図2に示すように、2次元問題で、多数の微細気泡を含む液体が初め四方を同じ温度の壁に囲まれて一様静止状態にあるものとし、この状態から、ある瞬間に三方の壁を常に T_l 一定に保ったまま、残る一方の壁の温度だけを $T_h(T_h > T_l)$ としたときの、領域内の流れ場の変化の様子を調べる。

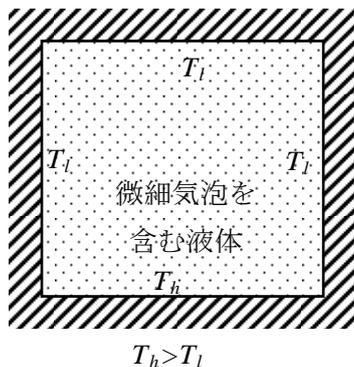


図2. 伝熱問題

(5) 水中 WJ の数値シミュレーション

本研究で導出された平均化方程式系を用いて、水中 WJ の流れ場の数値シミュレーションを行う。本研究で得られる平均化方程式系はこれまでに存在しなかった方程式系であるため、方程式に応じた数値解法の検討が必要となる。

4. 研究成果

(1) 付加慣性力の式の影響

キャビテーションでは、気泡が崩壊する際の気泡壁の速度は液体の音速に匹敵するほどの高速となるため、液体の圧縮性を無視することができない。従来の気液二相流の研究の対象は、多くが低速の気泡流であるか、キャビテーションのような気泡の激しい膨張収縮を伴わない流れであったため、気体の圧縮性は液体の圧縮性に比べて十分大きいとして液体の圧縮性を考慮せず、またそれが妥当な近似であった。しかしながら、キャビテーションを扱う上では、その近似は適切ではない。さらに、研究代表者らの従来の研究では液体の圧縮性を考慮したが、付加慣性力の式については、液体の圧縮性を考慮して導出された一般的な式が存在しなかったため、キャビテーションを扱った液体非圧縮の付加慣性力の式を用いていた。

このような状況の中、最近、液体の圧縮性を考慮した気泡の付加慣性力の式が導出された論文が発表されたため、本研究でもその式に置き換えた。そこで、本研究ではまず、これによって研究代表者らの従来の研究の成果が影響を受けるかを調べた結果、研究代表者らの従来の研究は物理量の微小変動を扱った線形領域に含まれており、新しく導入した付加慣性力の式を用いても、線形解析の結果はまったく影響を受けないということがわかった。

今後の研究においても、液体の圧縮性を考慮した気泡の付加慣性力の式を用いていくこととした。

(2) 数学的適切性の検討

研究の方法(3)で述べたように、従来の気液二相流の平均化方程式系は数学的に不適切だとされてきた。本研究課題に取り組む過程で、過去の論文を調査したところ、気液界面でのモデル化が物理的に妥当であれば、数学的不適切性が緩和されるとの報告があった。しかしながら、その数学的適切性を評価する手法に誤りがあり、その結果は妥当とは言えない。また、研究代表者らの従来の研究では、静止平衡状態に微小変動を与えた解析を行なっているが、水中 WJ の流れ場を考えると、流れのある中に微小変動を与えた場合の数学的適切性について検討しておく方が有用である。

そこで本研究では、気泡と液体が別々の一定の速度で一つの方向に運動している中に微小変動が与えられた場合について、研究代表者らの従来の平均化方程式系を線形化した。その数学的適切性を評価するには 6×6 の行列式を解く必要があるが、現在解いているところであり、結果が出次第、発表・論文投稿を行なう予定である。

(3) 伝熱問題の数値シミュレーション

気泡流における伝熱問題への取り組みに先行して、気泡を含まない液体単相での数値シミュレーションを行った。これは、従来の単相流に対する流体力学の基礎方程式を用いてすぐにも行えるうえ、気泡流に対するエネルギー保存の式を導出した後に実施する気泡流の伝熱シミュレーションの結果を液体単相の場合の結果と比較するからである。さらに、単相での数値シミュレーション法が気泡流の数値シミュレーションを行う際にも多くの指針を与えてくれると考えられるからである。

研究の方法(4)の図2に示した初期条件、境界条件のもとで、流体を液体単相として数値シミュレーションを行なった。数値計算には非圧縮性流体の数値解法で代表的なMAC法を用いた。図3は、ある時刻における温度分布を表し、下辺から上辺へ向かって温度が伝播していく様子がわかる。また、計算においては流速も計算されているが、すべての時刻において流れは静止したままであった。これらの結果は通常の液体に対する日常的な経験と一致し、液体単相については正しく計算されていると言える。

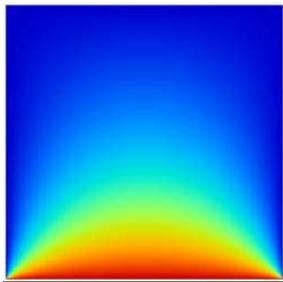


図3. 液体単相の場合の結果

(4) 水中 WJ の実験

本研究が対象とする水中 WJ に関連して、水中 WJ のノズル手前の配管系によってはキャビテーションの強さが大きく低下するという問題が生じることが判明し、その原因を調査した。なお、その成果は論文として掲載された。

具体的な内容は以下のとおりである。水中 WJ のノズル上流側にエルボを設置した場合 (elbow)、噴流キャビテーションによる壊食量が、噴射軸方向に直線的にノズルに導水する場合 (straight) に比して大幅に低下することを確認した。さらに、そのような場合でも、ノズルとエルボの間に複数の穴のあいた円板(キャビテーション安定器)を併設する (stabilizer) ことで壊食量を 30~70%回復させることができた。以上のデータを図4に示す。これらの結果より、水中ウォータージェットによってキャビテーションを効果的に発生させるためには、ノズルに流入する流

れを整流化することが不可欠であると言える。したがって、水中ウォータージェット装置の設計では、ノズル上流の配管要素も含めたトータルな設計が必要である。

しかしながら、以上の結果の物理的根拠は不明のままとなった。それを明らかにするためには、実験的手法では難しく、数値シミュレーションの援用が不可欠である。ここにも本研究の意義がある。

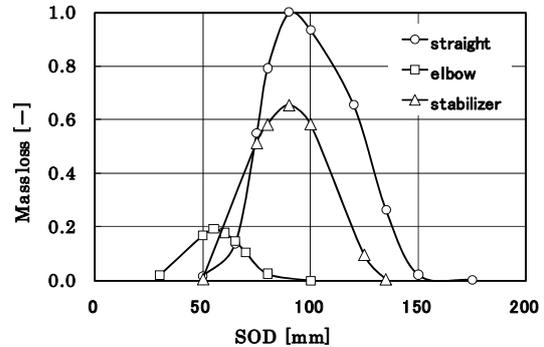


図4. キャビテーション壊食量に及ぼすノズル上流側配管要素の影響

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1件)

- ① 江頭 竜、寺 信行、高杉信秀、村椿良司、水中ウォータージェットのノズル上流側配管要素がキャビテーション壊食に及ぼす影響、噴流工学、査読有、Vol.25、No.3、2009、pp.13-18

[学会発表] (計1件)

- ① 高杉信秀、ノズル上流側配管要素が水中ウォータージェットの壊食量に及ぼす影響、2008年度日本ウォータージェット学会技術年次報告会、2009年1月24日、富山

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江頭 竜 (RYU EGASHIRA)

旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：60455102

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし