

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04179

研究課題名(和文) ノズル内気泡流に関する理論の構築と実験的検証

研究課題名(英文) Theory construction and experimental verification for a bubbly flow in a nozzle

研究代表者

江頭 竜 (Egashira, Ryu)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：60455102

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)：ノズル内の気泡流の流れの詳細を明らかにするべく、理論・数値計算と実験の両面から調査した。まず、理論・数値計算では、従来考慮されてこなかった気泡の気液界面での非平衡蒸発・凝縮を考慮し、さらに気泡の並進運動も考慮して、直円管内を運動する気泡とテーパ円管内を運動する気泡の気泡力学解析を実施した。また、実験においては、従来、正しく測定することができなかったノズル内のボイド率分布を、電極の形状をリング状としてノズル内に複数個組み込むことによって、定電流法により正しく測定できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気泡流は原子力発電所の冷却水の流れや、ノズルによるマイクロバブルの生成など、多くの産業分野で見られる。そのような流れを理論的、数値的に調べる際には、気泡の体積割合である「ボイド率」が最も重要なパラメータとなる。本研究により、そのボイド率の正確な測定が可能となった。また、まだ単一の気泡に関してではあるが、気泡の気液界面での非平衡蒸発、並進運動を厳密に考慮した理論により、高精度な数値計算が可能となった。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and experimental investigations for a bubbly flow in a nozzle were conducted so that the details of the flow can be revealed. In the theoretical investigation and the numerical calculation, both the nonequilibrium evaporation and condensation at the gas-liquid interface, which have never been taken into account so far, and the translational motion of a single bubble were incorporated. The bubble dynamics analysis was performed for the single bubble translating in a straight circular tube and a tapered circular one, and the results were compared. In the experimental investigation, the distribution of void fraction in the nozzle could be accurately measured by the constant current method with plural ring-shaped electrodes.

研究分野：流体力学

キーワード：気泡流 気泡 キャピテーション ボイド率 ノズル 非平衡蒸発

### 1. 研究開始当初の背景

ノズルは流体の持つ圧力エネルギーを運動エネルギーに変換する装置としてきわめて重要である。ノズル内流れは、空気のような気体単相に関しては「気体力学」の枠組みの中で理論が確立され、流れの詳細もわかっている。しかしながら、マイクロバブル生成に用いられているような液体中に多数の微細気泡を含む気液二相流体に対するノズル内の流れ、すなわちノズル内気泡流の詳細は未解明なままである。その理由として、以下の2点が挙げられる。まず、理論面では、気液二相流を記述する一般的な支配方程式が数学的に閉じた形で確立していないことである。これまでに二流体モデルをはじめいくつかの支配方程式が提案されているが、それらの数学的不適切性が指摘され、未解決の状態にある。支配方程式が数学的に不適切であれば、支配方程式の計算精度を上げるために空間分解能を高くすると、非物理的な高周波成分が顕在化して高精度な数値シミュレーションが不可能になる。よって、ノズル内気泡流に適用できる支配方程式が確立されておらず、このためにその高精度な大規模数値シミュレーションが行えないのが現状である。一方、実験面では、膨張・収縮する莫大な数の微細な気泡が液体とは異なる速度で並進運動していて、流れ場が複雑となり、信頼できる観測が難しい点である。世界的に見ても、ノズル内気泡流に関する詳細な実験的研究は筑波大の金子らのベンチュリ型ノズルによる気泡の崩壊、微細化に関する研究のみである。しかしながら、その研究においても、ボイド率は本来正の符号であるはずであるが、ノズル内のボイド率分布の一部が負の値として得られており、定性的には正しそうな思われるが定量的に正しいかどうかは疑問が残る。したがって、ノズル内の気泡流の特性は実験的にも十分に明らかにされたとは言い難い。

以上のことから、ノズル内気泡流に関する流れの詳細(例えば圧力分布、ボイド率分布など)、ノズル出口における衝撃波の発生条件、発生機構、構造、また、それによる気泡の微細化に関する体系的な研究は十分にはなされていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ノズル内の気泡流の流れの詳細を理論及び実験により解明することを目指して、ノズル内で並進運動を伴う気泡の運動を理論と数値計算で調査し、気泡流中での気泡の振る舞いを解析するとともに、ボイド率分布などを実験により調査することで、ノズル内気泡流の制御技術確立することである。

### 3. 研究の方法

【実験】図1の実験装置に計測システムを導入する。図1の実験装置では、ノズル出口の背圧を調整することにより、それがノズル内の圧力分布、マッハ数分布、ボイド率分布、衝撃波の形成に与える影響を調べることができるようになっている。ノズルは透明アクリル製のベンチュリ型ノズルである。噴射圧力は絶対圧 0.15~0.5MPa の間で変化させることができる。スロート部下流の背圧はノズル下流のバルブの開度により絶対圧 0.1~0.5MPa の範囲で制御できる。ノズルには流れ方向に一定間隔で測定孔を設ける。ノズル内の圧力分布を測定するにはこれらの測定孔に圧力センサーを取り付ける。ボイド率分布は定電流法(気相と液相の電気抵抗率の違いを利用してボイド率を計測する方法)を採用する。なお、ボイド率測定では上述の測定孔に定電流法のためのステンレス棒の電極を取り付けるか、あるいはリング状の電極を用いる。「研究開始当初の背景」で述べたように、従来の研究で、定電流法によるノズル内気泡流のボイド率測定がなされてはいるが、定性的には正しそうな結果が得られているものの、定量的には負のボイド率が得られる場合があり、十分な精度で測定できているとは言い難い。本研究では、従来の定電流法を改良した。ボイド率は気泡の膨張収縮の式から計算される気泡半径に関連付けられ、気液二

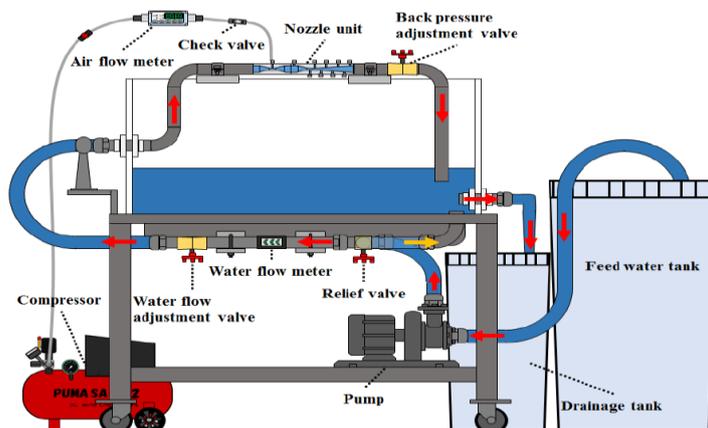


図1. ノズル内気泡流の実験装置

相流の分野では極めて重要な物理量である。例えば、気泡流中のボイド率が大きくなると音速が低下することは気液二相流の分野ではよく知られている（例えば、ボイド率 10%で音速約 30m/s）。この性質を利用して、コンプレッサを用いてノズル内への空気吸入量を増大させることで気泡流中の音速を低下させることができる。音速が低下すれば、ノズルスロート部の流速を音速に近づけることが比較的容易となり、スロート部下流が超音速となり、衝撃波が形成され、気泡流の場合に背圧が衝撃波の形成（形成位置、圧力の上昇幅）にどのような影響を及ぼすかを調べることができる。

【理論と数値シミュレーション】並進運動と非平衡蒸発を考慮してノズル内を通過する単一気泡の運動の数値シミュレーションを行う。研究代表者は、気泡の運動を扱う従来の理論を見直し、非平衡蒸発を考慮したキャピテーション初生理論を提示し、従来の初生理論に対する新しい初生理論の優位性を定量的に示した。そこでは、分子動力学法により定式化された気体論境界条件を用いて多原子分子蒸気に対して有効な ES-BGK Boltzmann 方程式に基づく水-水蒸気界面での境界条件を用いている。しかしながら、その研究も含め、これまでの初生の理論的研究はすべて静止水中か、あるいは気泡中心が静止した状態での初生を対象としており、流れている水中で気泡が並進運動する条件下での初生とは大きな隔たりがあった。したがって、流れている水中での初生機構や初生条件は解明されていない。本研究では、ノズル内での気泡流を想定し、テーパ状円管内の単一球状蒸気泡の並進・膨張・収縮を気泡力学に基づいて解析し、それを直円管内の解析結果と比較する。管内流れは定常な準一次元層流とし、気泡は管軸上を並進運動するものとする。気泡力学の Rayleigh-Plesset 方程式に多原子分子としての水-水蒸気系に対する気液境界条件に基づく非平衡蒸発速度の効果を組み入れ、気泡核の並進運動をラグランジュ的に追跡する。すなわち、非平衡蒸発、気泡の膨張・収縮運動、並進運動をすべて考慮して解析を行う。

#### 4. 研究成果

ボイド率測定の実験では、はじめ、定電流法でステンレス棒の電極を取り付けるようにしたが、定性的には正しそうなボイド率分布の結果が得られたものの、やはり定量的には負のボイド率が得られる場合があり、十分な精度で測定できなかった。従来の研究においても、前述したように、同じ手法で、本来正の値であるはずのボイド率が負の値をとる場合があるといった問題があり、その原因は不明のままであった。そこで本研究では、ノズル内のボイド率の値が負になる原因を、単一気泡を用いて調べた結果、ノズル内を通過する単一気泡がローター端子の片側に接触する場合、あるいは定電流源端子の片側と接触する場合、あるいはノズル断面を単一気泡が覆う場合に、電圧が水単相よりも低くなり、ボイド率が負になること、図2のようなボイド率測定法に関する調査のための装置を製作し、リング状の電極であればボイド率が負になることはないことを明らかにした。その後、ボイド率が負になる原因（棒状電極と気泡の接触）を排除するために、図3に示すような、8個のリング状の計測電極を組み込んだベンチュリノズルを製作し、これによるボイド率測定の有効性を検証した。特に、単一気泡と総体積が同じ分散した10個の気泡ではボイド率が1%しか変わらず、少なくとも10個までは正確にボイド率を計測できることを確認した。したがって、ベンチュリノズル内のスロート部下流で圧力回復により気泡が微細化される前までであれば、図3に示すようなリング状の計測電極でボイド率を精度よく計測できることがわかった。また、定電流法の計測領域の検証も行い、定電流を印加するための電極の領域もボイド率を算定する検査体積に含める必要があることがわかった。さらに、定電流法における電流値がボイド率に与える影響について調べ、定電流法による単一気泡の場合のボイド率測定で、印加電流がある値以上になればボイド率が電流値に影響を受けないこと、ボイド率が高いほど印加電流を大きくしなければならないことを明らかにした。その後、5.30%以下のボイド率であれば電流値を 1.0mA にすればよく、この範囲のボイド率のとき、定電流法で用いられてきた

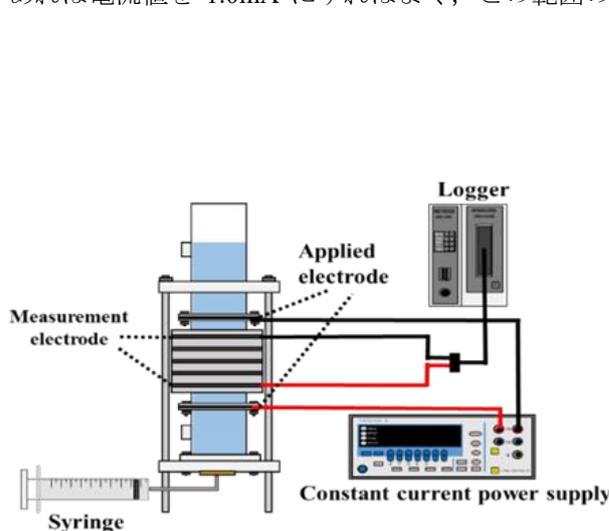


図2. 定電流法によるボイド率測定装置

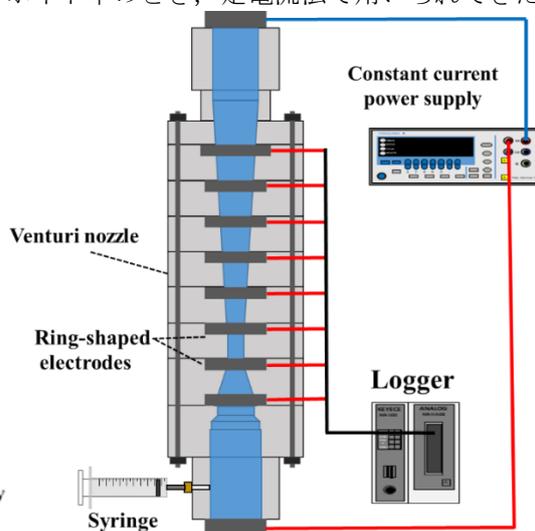


図3. リング状電極を用いた定電流法

従来のボイド率換算式で得られた値を定数倍しなければならないことがわかった。

次に、理論・数値解析の研究成果について述べる。数値解析ではまず、単一気泡が剥離点で形成され、剥離点における負圧でどのような膨張収縮挙動を示すかを調べるべく、まず気泡中心が静止した状態で、非平衡蒸発凝縮を考慮した膨張収縮運動の数値解析を行った。具体的には、剥離点に張力が生じることで気泡が発生し、しばらくの間負圧に保たれ、その後周囲液体の圧力が大気圧に回復した場合の数値計算を行い、気泡の膨張収縮運動に与える非平衡蒸発凝縮の影響を調べた。その過程で、気泡に膨張作用が働くか収縮作用が働くかの境となる圧力を臨界圧力として定義した。また、気泡内蒸気の圧力が飽和蒸気圧の半分になるときに気液界面を通しての質量流束が最大となること、気泡壁における蒸気の色度は気泡壁の色度から蒸気の色度速度を差し引いて求められ、これは気液平衡状態からのずれを表し、気泡壁での蒸気の色度が正の時には蒸気の色度が飽和蒸気圧から低下していくことなど、のちにノズル内を通過する気泡の数値計算結果を評価するうえで大変重要な知見が得られた。

さらに、ノズル内を液体とともに並進運動する気泡を理論的、数值的に扱うために、まず、テーパ状円管内の単一球状蒸気泡の並進・膨張・収縮を気泡力学に基づいて解析し、それを直円管内の解析結果と比較した。管内流れは定常な準一次元層流とし、気泡は管軸上を並進運動するものとした。気泡力学の Rayleigh-Plesset 方程式に多原子分子としての水-水蒸気系に対する気液境界条件に基づく非平衡蒸発速度の効果を組み入れ、気泡核の並進運動をラグランジュ的に追跡した。すなわち、非平衡蒸発、気泡の膨張・収縮運動、並進運動をすべて考慮して解析を行った。その結果、直円管の場合もテーパ円管の場合も、ある時刻で突然気泡の膨張速度が大きくなり、その後ほぼ一定速度で膨張を続けること、また、突然膨張速度が大きくなる時刻はテーパ円管の場合の方が直円管の場合よりも早くなることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 児玉哉太, 江頭 竜	4. 巻 2
2. 論文標題 気泡流のポイド率測定に対する定電流法適用の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 福岡工業大学総合研究機構研究所報	6. 最初と最後の頁 35-38
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 -
1. 著者名 藤川俊秀, 江頭 竜, 矢口久雄, 藤川重雄	4. 巻 47-2
2. 論文標題 有限時間持続する張力下とその後の大気圧下でのキャピテーション初生のパラメータ分類と予測法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 116-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.47.2_116	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 -
1. 著者名 Ryu Egashira, Toshihide Fujikawa, Hisao Yaguchi, Shigeo Fujikawa	4. 巻 51
2. 論文標題 Low Reynolds number flows in a microscopic and tapered tube with a permeability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 025504(26pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/aaed57	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 -
1. 著者名 藤川俊秀, 白岩寛之, 柳田佳輝, 東 利樹, 松岡常吉, 中村祐二, 江頭 竜	4. 巻 19-3
2. 論文標題 模型実験による競技用車両車体に働く抗力の測定と流れ場の可視化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本実験力学会誌	6. 最初と最後の頁 188-194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.19.188	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 -

1. 著者名 Ryu Egashira, Hisashi Masubuchi, Toshihide Fujikawa, Shigeo Fujikawa	4. 巻 52
2. 論文標題 Axisymmetric free jet of Re 0 from a round tube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 015507(22pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ab5c07	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 江頭竜, 藤川俊秀, 矢口久雄, 増淵寿, 藤川重雄
2. 発表標題 出口での圧力と速度の非一様性を考慮したストークス自由噴流理論
3. 学会等名 日本機械学会 第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉哉太
2. 発表標題 定電流法による管内気泡流のボイド率測定に与える電極の影響
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第73期 総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryu Egashira, Hisashi Masubuchi, Toshihide Fujikawa, Shigeo Fujikawa
2. 発表標題 Flows of a Free Jet with $Re < 0(1)$ from a Hole of Finite Radius: A Theoretical Methodology
3. 学会等名 16th Asian Congress of Fluid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中雅人, 江頭 竜, 藤川俊秀, 藤川重雄
2. 発表標題 大振幅振動圧力場で非平衡蒸発・凝縮を伴う水蒸気泡の膨張・収縮の気泡力学解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石坂 遥, 藤川俊秀, 白岩寛之, 松岡常吉, 中村祐二, 江頭 竜
2. 発表標題 模型実験による競技用車両車体の抗力低減と流れの可視化
3. 学会等名 日本実験力学会2019年度年次講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部真将, 藤川俊秀, 福田正和, 江頭 竜, 中村祐二, 藤川重雄
2. 発表標題 非循環型キャピテーションタンネルにおけるキャピテーション初生条件の検討
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大石 学, 江頭 竜
2. 発表標題 微細気泡を含む静止水中への超音波照射により生じる遅い波の伝播メカニズムに関する実験的研究
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増淵 寿, 藤川俊秀, 矢口久雄, 亀山義宗, 江頭 竜
2. 発表標題 微細テーバ管内の極低レイノルズ数流れの理論
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤川重雄, 藤川俊秀, 江頭 竜, 増淵 寿, 矢口久雄
2. 発表標題 出口での圧力と速度の非一様性を考慮したストークス自由噴流の理論とCFD検証
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江頭 竜, 藤川俊秀, 陣内 楓, 藤川重雄
2. 発表標題 有限時間持続する水の張力下におけるキャピテーション初生解析
3. 学会等名 キャピテーションに関するシンポジウム(第20回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陣内 楓, 江頭 竜, 藤川俊秀, 藤川重雄
2. 発表標題 テーバ円管内の定常流れにおける単一球形気泡の並進・膨張・収縮に関する気泡力学解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第75期総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 気液溶解装置	発明者 江頭竜, 平松義彦, 村山智紀, 大澤功平	権利者 学校法人福岡工 業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-83376	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 バッチ式マイクロバブル液生成装置および生成方法	発明者 江頭 竜, 飯野偉 裕, 吉村悠汰, 土居 ノ内遼	権利者 学校法人福岡工 業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-215467	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 ポイド率計測装置およびポイド率計測方法	発明者 河村良行, 江頭 竜, 松川夏樹, 佐藤 翔, 高曽 徹	権利者 学校法人福岡工 業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7072269号	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔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
---------	---------