



非加熱系混相流のメゾ・マクロスケール現象予測モデルに関する研究

島田, 直樹

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2620

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002620>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【331】

氏名・(本籍) 島田 直樹 (高知県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博い第268号

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の日付 平成14年3月31日

【学位論文題目】

非加熱系混相流のメゾ・マクロスケール現象予測モデル
に関する研究

審査委員

主査 教授 藤井 照重

教授 蔦原 道久 教授 中山 昭彦

助教授 富山 明男

近年の計算機の飛躍的発展に伴い、混相流の数値解析的研究が精力的に進められており、平均化モデル、粒子(気泡)追跡モデル、界面追跡モデル、微視的モデルなど様々な数値計算モデルが開発されている。しかしながら、これら既存の計算モデルが取り扱える界面長さスケールには制限があり、様々な界面長さスケールの混在に起因する混相流の多様な特性を予測できる計算技術は確立されていない。

広範囲の界面スケールを取り扱える「マルチスケール混相流計算モデル」を構築すれば、種々の混相流問題に適用できる計算手法が実現できる。そこで本研究では、様々な界面スケールを有する分散性混相流に応用できる数値計算モデルの構築を目的とした。

第2章では、分散性混相流を予測するための基本数理モデルとして、 $(N+2)$ -Field Model (以下NP2モデルと略称する)を提示し、その数値解法を構築した。

はじめに、モデルの概念を提示した。相の場を N 種類の分散相と二種類の連続相に分け、この相の分類法により様々な分散性混相流を記述できることを確認した。次に、既存の二流体モデルのように体積率輸送方程式を基礎式の一つに採用すると、条件によっては非物理的解しか得られないことを思考実験を通して明らかにした。また、この問題の解決策として数密度方程式に基づく分散相体積率輸送計算手法を提示した。

相を分類した後、各分散相及び連続相の流れを記述する瞬時局所的基礎式を平均化してNP2モデルの基礎式を構築した。さらに、構築した基礎式と既存の混相流数理モデルとの関係を明らかにし、NP2モデルが界面追跡モデルと多流体モデルを補集合として内包しているハイブリッドモデルであることを明確にした。最後に、NP2モデルの基礎式を解くために必要となる構成式の基本形・数値解法・境界条件等を整理した。

第3章では、NP2モデルの基礎式を数学的に閉じた形とするために必要となる相関式を整理した。NP2モデルは平均化モデルの一種であるため、連続相の乱れ及び分散相界面に関する情報が欠落する。この欠落を補うために、分散相に作用する抗力、揚力、仮想質量力、乱流分散力、及び分散相誘起乱れに起因する渦粘性等に関する既存の相関式の中から最良のものを選定した。この際、二次元問題用の相関式、三次元問題用の相関式を明確に区別するとともに、固体粒子、液滴、気泡の各々に対して最も適切な相関式を選ぶように注意した。また、気液二相気泡流を対象として多流体乱流モデルを構築した。NP2モデルでは分散相間、及び分散相-連続相間の質量輸送を考慮できる。このため、質量輸送に関する素過程を明確にし、いくつかの過程について質量輸送モデルを提示した。

第2章、第3章で、NP2モデルに基づく数値計算モデル、すなわち基礎式・構成式・相関式・数値解法等を構築できた。そこで、本数値計算モデルに基づく二次元及び三次元流動解析プログラムを作成した。

第4章では、NP2モデルが保有する基本計算機能、すなわち(a)界面追跡機能、(b)数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能、(c)分散相の多群化機能の妥当性・有効性を調べた。

まず、界面追跡機能検証のため、三つの問題を計算した。はじめに、界面追跡モデルの典型的検証例題である水柱崩壊問題を計算し、水柱先端位置の時間変化を既存の実験結果と比較した。次に、三角形堰への崩壊水柱衝突問題に関して、計算結果と既存の実験結果を比較した。さらに、矩形容器内静止水中単一空気泡を計算した。その結果、以下の結論を得た。

- (1)NP2モデルの界面追跡機能は、水柱崩壊問題を精度良く予測できる。
- (2)堰による波の変形過程に関して実験と良好に一致する結果を与える。
- (3)既存の界面追跡モデルでは計算困難であった、高密度比条件下の気泡の計算を実行できる。

次に、数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能検証のため、管内流中を気泡が直列に並んで上昇する気泡流を対象に、数密度輸送方程式に基づく計算と体積率輸送方程式に基づく計算を実施し、以下の結論を得た。

- (4)二流体モデルのように体積率輸送方程式を基礎式の一つに採用した場合、分散相の長さスケール d が計算格子サイズ Δx よりも大きな条件下で計算すると、非物理的解となる。一方、数密度輸送方程式を基に分散相体積率を輸送した場合、物理的に正しい解が得られる。
- (5)数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送法において新たに導入した形状因子により、分散相の形状を考慮した計算が可能となる。

最後に、多群化機能の有効性を実証するため、三つの問題を計算した。まず、気泡径分布を有する円管内気泡流を計算し、既存の実験結果と比較した。次に、3種類の気泡流入ノズルを有する容器内気泡流、及び単一気泡流入ノズルを有する容器内気泡流に関する実験と計算を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (6)NP2モデルは気泡径分布を考慮できるため、単一気泡径しか扱えない既存の二流体モデルに比べ、不均質気泡流に対して良好な予測結果を与える。
- (7)単一気泡流入ノズルによって形成される気泡流においても、気泡径は分布することを確認した。このため、気泡径分布の考慮なしに精度の良い予測は望めない。

以上より、NP2モデルが保有する界面追跡機能が既存の界面追跡手法と同等以上の性能を有すること、及び数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能と多群化機能により既存の二流体モデルよりも良好な予測結果を与えることを確認できた。

第5章では、NP2モデルを用いてメソスケールからマクロスケールに及ぶ様々な混相流問題のうち、既存のモデルでは計算不能であった流れ場を対象に計算を実施した。

はじめに、メソスケール体系問題として「二次元体系における大きな単一気泡と小気泡群間

の相互干渉」, 「二次元体系における大きな単一気泡と小固体粒子群間の相互干渉」, 「三次元体系における大きな気泡と小固体粒子群間の相互干渉」の三つの問題を計算し, 以下の結論を得た.

- (8)NP2モデルは, 気泡・液滴などのサイズ d が格子サイズ Δx 以下ないしは同程度の場合にはこれらを分散相として, $d \gg \Delta x$ の場合は連続相として扱えるため, 様々なサイズの分散相が混在した流れ場を解析対象にできる.
- (9)上記特長により, メソスケール解析において「解析者が重要と考える分散相界面の変形挙動」が流れ場に及ぼす影響を考慮した計算を実行できる.

次に, 連続相から分散相への質量輸送が重要となる問題として, 「砕波による液滴発生を伴う水柱崩壊問題」, 「気泡スパージャーを有する容器への液流入」を取り上げた. その結果, 以下の結論を得た.

- (10)体積追跡スキームに基づく既存の界面追跡手法は, 界面厚さ δ が Δx 以下になると体積保存が困難となり正しい結果が得られないという問題を有している. 一方, NP2モデルでは $\delta < \Delta x$ となった連続相を分散相に移行できるため, 体積保存を満たした結果が得られる.
- (11)界面追跡モデルを用いて格子サイズよりも小さな液滴が生じる流れを計算すると, 液相よりも密度の軽い相として取り扱われるために, 重力による落下が正しく計算されない. しかしNP2モデルではこの相を分散相として計算できるので, 正確な密度で計算できる.
- (12)連続相-分散相間質量輸送機能により, 砕波による液滴生成, 自由表面上の連続気相への気泡の移行, 波面における気相巻き込みによる気泡形成などを模擬できる.

最後に, マクロスケール体系問題の一例として, 「自由表面の大変形を伴う塔内気泡流」を計算し, 以下の結論を得た.

- (13)NP2モデルは気泡流のみならず流れの過渡変化の過程で形成される層状気泡流や波状流などの数種の流動様式が混在する流れを予測できる.

第6章では, NP2モデルに基づく流動解析プログラムの精度検証と課題の抽出を目的として, 三種の容器内気泡流「二次元液相循環流を伴う矩形容器内気泡ブルーム」, 「三次元液相循環流を伴う矩形容器内気泡ブルーム」, 「実規模気泡塔内気泡流」に関する実験をおこない, 計算結果と比較・検討した. 実験では, 点電極プローブ法による体積率分布測定, レーザードップラー流速計による液相平均流速分布測定, 画像処理法に基づく気泡径分布及び気泡速度測定を実施した. その結果, 以下の結論を得た.

- (14)二次元・三次元気泡ブルームの体積率分布・液相速度分布・気泡上昇速度を定量的に良好に予測できる.

- (15)さらなる予測精度向上には, 各種相関式のうち特に乱流分散力に関するモデルの改良, 及び混相乱流モデルの高度化が急務であることを確認した.

- (16)クラスター形成などにより気泡径が広範囲に分布する非均質気泡流を対象とする場合は, 抗力モデルを再検討するべきである.

以上により, 本研究で構築したNP2モデルは以下の特徴を有することを実証した.

- (I)界面追跡モデル及び多流体モデルを補集合に持つため, これら既存のモデルで取り扱える問題に加え, 既存のモデルでは解析不能であった問題も取り扱える.
- (II)分散相スケール規模のメソスケール現象から気泡塔内流れ等のマクロスケール現象まで, 広範囲なスケールの混相流に適用できる.
- (III)各分散相及び連続相には様々な物性値を割り当てられるので, 信頼できる相関式さえ用意できれば, 気液二相気泡流のみならず, 固液二相流・固気液三相流・気液液三相流等の様々な混相流に適用できる.
- (IV)数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能により, 格子サイズ Δx と分散相スケール d の関係を任意に設定できる. また, 既存の平均化モデルでは無視されていた分散相の形状を考慮した計算が可能となる.

氏名	島田 直樹		
論文 題目	非加熱系混相流のメソ・マクロスケール現象予測モデルに関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	藤井 照重
	副 査	教授	薦原 道久
	副 査	教授	中山 昭彦
	副 査	助教授	富山 明男
要 旨			
<p>多流体モデル・気泡追跡モデル・界面追跡モデルなど各種混相流予測モデルが提案されているが、これら既存モデルが扱える界面長さスケールには制限があり、様々な界面スケールが混在する混相流を予測できるモデルは欠如している。そこで本論文では、気泡や液滴のように小さな界面長さスケールから自由表面のように大きな界面長さスケールまで扱える非加熱系混相流予測モデルの構築を目的としている。</p> <p>第2章では、N種類の分散相と2種類の連続相の流動を予測できれば様々な混相流現象を幅広い空間分解能で解析できるという点に着眼し、界面追跡モデルと多流体モデルを結合した(N+2)-Field Model (略称: NP2 モデル)を構築している。この際、既存の多流体モデルのように体積率輸送式を基礎的に採用すると条件によっては非物理的解しか得られないことを指摘し、この問題の解決策として数密度方程式に基づく分散相体積率輸送法を提示している。本手法によれば、非物理的体積率輸送が解除されるとともに多流体モデルという平均化手法の枠内で気泡形状を考慮した解析が可能であることが示されている。</p> <p>第3章では、NP2 モデルに必要な各種相関式が整理されている。この際、分散相に作用する抗力・揚力・仮想質量力・乱流分散力、及び分散相誘起乱れに起因する渦粘性等に関する既存の相関式の中から最良のものが調査・選定されている。また、気液二相気泡流を対象とする多流体乱流モデル、分散相間及び分散相-連続相間の質量輸送モデルが提案されている。</p> <p>第4章では、NP2 モデルに内包されている3種の基本計算機能: 界面追跡機能・数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能・分散相の多群化機能の有効性が検討されている。計算結果と実験結果との比較検討により、界面追跡機能が既存の界面追跡手法と同等以上の性能を有すること、及び数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送機能と分散相多群化機能により NP2 モデルが既存モデルよりも非均質気泡流を良好に予測できることが確認されている。</p> <p>第5章では、様々な混相流の中から既存モデルでは計算困難であった流れを取り上げ、NP2 モデルによる計算を実施している。メソスケール問題例として大気泡と小気泡群ないしは小固体粒子群間の相互干渉が解析され、NP2 モデルが高空間分解能計算において分散相を連続相として扱えること、及び連続相から分裂等によって生じる液滴・気泡等を分散相として扱えるという既存モデルにはない特徴を有することが例示されている。また、マクロスケール問題として自由表面の大変形過程を含む気泡塔内流れが解析され、流れの過渡変化過程で生起する様々な流動様式が混在する流れも予測できることが確認されている。</p> <p>第6章では、NP2 モデルの予測精度検証と課題抽出を目的として、各種容器内気泡流に関する実験と計算が行われている。実験と計算の比較より、気相体積率分布・液相速度分布を定量的に良好に予測できること、及び各種相関式のうち特に乱流分散力・混相乱流モデルの高度化が予測精度向上のために不可欠であることが確認されている。</p> <p>以上より、NP2 モデルが(1)界面追跡モデル及び多流体モデルを内包しているためこれら既存モデルで扱える問題に加え既存モデルでは解析不能であった問題も扱える、(2)分散相スケール規模のメソスケール現象から工業装置規模のマクロスケール現象にわたる様々な混相流問題に適用できる、(3)各分散相及び各連続相に様々な物性値を設定できるため、気泡流のみならず固液二相流・固気液三相流・気液液三相流等にも応用できる、(4)数密度輸送方程式に基づく分散相体積率輸送により格子サイズと分散相サイズの関係を任意に設定できるという混相流解析上有用な特徴を有するモデルであることが実証されている。</p> <p>以上、本研究は様々な混相流をメソからマクロスケールにわたる空間分解能で予測する数理モデルを構築したものであり、混相流工学・工業上有益なモデル及び数値予測技術を確立した研究として価値ある集積と認める。よって、学位申請者の島田直樹は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			