



多相一多成分熱流動場の実用的数値予測手法に関する研究

田中, 正博

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2010-03-25

(Date of Publication)

2011-09-12

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4926

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004926>

※ 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。



氏 名 田中 正博
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 4926 号
学位授与の 要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付 平成 22 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

多相－多成分熱流動場の実用的数値予測手法に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 富山 明男
教 授 蔦原 道久
教 授 松山 秀人

(氏名：田中正博 NO.1)

気相、液相、固相が混在し、その界面を通して物質や熱の移動が起こる多相多成分熱流動場は、化学、製鉄、発電などの工業プラントにおける多くの工業設備内にみられる。これらの工業設備の設計・開発・改良の効率化には、多相多成分熱流動の実用的数値予測技術が必要不可欠である。数多くのケーススタディーや感度解析が不可欠となる装置設計の絞込み段階では集中定数モデルや一次元モデルのように計算速度に優れたモデルが使用されるが、これらの簡易モデルは通常多くの実験相関式に基づくため、その適用範囲の拡大や予測精度向上が困難であるという問題を有する。また、装置の全体構造設計のために三次元計算を行なう際には計算時間の制約から比較的粗い計算格子を使用せざるを得ないが、粗い格子では、構造物と流れの干渉、乱流、相間相互作用などを良好に予測できないという問題がある。本研究では、気泡塔型反応装置を一つの具体的な設備対象としてこれらの問題の解決を図り、適用範囲を容易に拡大できる実用的な簡易多相多成分計算手法、および粗い計算格子でも装置構造、乱流、相間相互干渉を良好に予測できる実用的な三次元多相多成分計算手法の開発を目的とした。さらに、簡易多相多成分計算手法の適用範囲拡大を容易にする機能には、三次元多相多成分計算手法の計算結果を効率的に取り込んで利用できる仕組みが備わっていることも目的とした。

本論文は6章より構成されている。

第1章は序論である。本研究の背景として、気泡塔の設計、スケールアップ、操業条件最適化における課題と、多相-多成分熱流動場の予測手法に関する従来の研究とその課題について述べ、本研究の目的および方法を記した。

第2章では、実用的な気泡塔設計用計算手法として、反応生成物の定量的評価が可能な混合モデルに基づく計算手法の構築を目的とした。実用的な計算手法には、実機規模の計算対象を扱え、かつ計算コストが低い混合モデルが適している。しかしながら、従来の混合モデルでは、気相体積率などの巨視的変数を、限られた実験データに基づく実験相関式を用いて評価するため、手法の適用範囲および予測精度に課題がある。また、実験データの整備が進められた際、実験相関式の適用性と精度を向上させるには、必然的に相関式の再構築が必要になるが容易ではない。そこで本章では、装置構造や反応物物性などの多数の独立変数の関数である巨視的変数を、相関式なしに出力する新しい手段として人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)を利用し、これを実験相関式の役割をする相関器(ANN 相関器)ととらえ、混合モデルに組み込んだ新しい手法を構築した。まず、ANN の予測精度検証用実験データを取得するために、水-空気系気泡塔の気相体積率を測定した。次に、ANN と混合モデルを組み合わせた本手法の有効性を検証するために、フィッシャー・トロプシュ合成反応を対象として一酸化炭素転換率の数値予測を実施した。そ

(氏名：田中正博 NO.2)

の結果、ANN 相関器により水-空気系気泡塔の気相体積率を良好に予測できること、ANN 相関器を組み込んだ混合モデルによりフィッシャー・トロプシュ合成反応における一酸化炭素転換率の各種パラメータ依存性を良好に予測できること、および ANN によれば新たなデータを用いた再学習により手法の適用範囲の拡大や予測精度向上を容易に達成できることを確認した。

以上より、従来の実験相関式を用いた手法が有する“限定された適用範囲とその範囲拡大の困難さ”という課題を解決した気泡塔設計用進化型計算手法の一つの雛型を開発できた。

第3章では、複雑な構造物を含む気泡塔内の気液混相流を予測するための、数値流体力学に基づく実用的計算手法を構築した。本手法は、富山と島田が提案した多流体モデルと界面追跡法を融合したハイブリッド法(N Plus 2 Field 法: NP2)に、埋め込み境界法(Immersed Boundary 法: IB)を融合した手法(以後、IB-NP2 法と呼ぶ)である。多流体モデルと界面追跡法の融合により、比較的粗い格子を用いても様々なスケールと相を含む混相流を効率的に計算できる。また埋め込み境界法により、複雑な格子の生成をしなくても複雑な流路幾何構造を取り扱える。本埋め込み境界法は、速度補間計算が不要であり、強制項にも様々なモデルを利用できる手法である。本章では、簡単な強制項モデルを組み込んで本手法の能力検証を行った。まず基本的な構造物周りの流れの予測精度を検証するために、円柱および角柱周りの単相流実験を行い液相流速分布を取得した。また同じ構造物周りの気泡流実験を行い気相体積率分布を取得した。次に、より複雑な構造物周りの流れの計算を行い、様々な形状に対する本手法の適用性を検証した。その結果、IB-NP2 法により、円柱や角柱などの基本的な構造物周りの単相流の流速分布および気泡流の気相体積率分布を良好に予測できること、複雑な構造物周りの気泡流を複雑な格子生成無しで容易に計算できること、および固体体積率の入力データを変更するだけで構造物の形状を容易に変更できることを実証した。

以上より、複雑な格子生成なしで複雑幾何形状を有する流路内の気泡流を粗い格子で計算できる手法の雛型を開発できた。

第4章では、第3章で構築した IB-NP2 法を、層流-遷移流-乱流の全ての領域の流れに適用できる手法へと拡張することを目的として、乱流および境界層の簡易取扱方法を検討した。本方法では、計算格子以下のスケールの渦の消散は数値粘性を利用した渦粘性モデルにより模擬し、また境界層厚みの変化をダルシー則のアナロジーで模擬した。本章では、幅広いレイノルズ数範囲の実験および理論解析データが整備されているという理由から、円柱および球周りの単相流れの計算により本方法の有効性を検証した。計算する流れのレイノルズ数範囲を1~10000とし、流れの遷移、および、抗力係数とストローハル数に

(氏名：田中正博 NO.3)

ついて、これまで報告されている実験および計算と比較した。その結果、本方法によりレイノルズ数が1~10000の二次元円柱周りの流れの抗力係数およびストローハル数をより詳細な計算手法であるカットセル法と同等かそれ以上の精度で予測できること、レイノルズ数に応じた適切な渦粘性が自動的に求められること、およびレイノルズ数範囲が1~10000の三次元球および三次元円柱周りの流れの抗力係数も良好に予測できることを確認した。

以上より、本章で構築した乱流計算機能により、粗い計算格子を用いた計算でも、層流から乱流にわたる広範囲のレイノルズ数の流れを良好に予測できることを実証した。

第5章では、前川らが検証および選定したLuoらの気泡分裂モデル、PrinceらおよびWangらの気泡合体モデルをIB-NP2法の中の多流体モデルに組み込み、構造・サイズ・気相空塔速度の異なる流れを対象として数値計算を行い、その妥当性を検証した。このため、低気相空塔速度条件における小型気泡塔内気泡流を対象とした実験を行い、妥当性検証用の気相体積率分布、気泡径分布のデータを取得した。さらに、高気相空塔速度条件における大型気泡塔内気泡流を対象とした実験も行い、気相体積率分布も取得した。その結果、合体・分裂が殆ど生じない気泡塔内多分散気泡流における気相体積率分布および気泡径分布の空間発展を良好に予測できること、および大型気泡塔内の高気相空塔速度条件での流れの気相体積率分布も良好に予測できることを確認した。

以上より、前川らが選定した合体・分裂モデルは、(a)合体が支配的な流れ、(b)分裂が支配的な流れ、(c)合体・分裂が同等に高頻度で生じる流れ、(d)合体・分裂が殆ど生じない流れの全てに適用可能であり、さらに、構造・サイズ、運転条件の異なる気泡塔内非均質気泡流動に対しても適用可能な汎用性を持つことを確認できた。

第6章は本研究の総括である。

以上より、工業設備の設計支援ツールに必要な機能、すなわち、(i)反応生成物を定量的に評価(生成物収率や生産効率など)できる、(ii)設備に設置されたセンサーで測定できる状態変数(温度など)を評価できる、(iii)大型で複雑な設備内の現象の予測ができる、(iv)計算精度と計算コストのバランスがとれている、(v)多くの実験条件に対応できる広い適用範囲をもつ、(vi)最新の実験結果を取り込み、予測精度を向上させることが容易である、を備えた実用的な多相-多成分熱流動場数値予測手法の一つの雛型を構築できた。

氏名	田中 正博		
論文題目	多相-多成分熱流動場の実用的数値予測手法に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富山 明男
	副査	教授	薦原 道久
	副査	教授	松山 秀人
	副査		

要旨

気相、液相、固相が混在し、その界面を通して物質や熱の移動が起こる多相多成分熱流動場は、化学、製鉄、発電などの工業プラントにおける多くの工業設備内にみられる。これらの工業設備の設計・開発・改良の効率化には、多相多成分熱流動の実用的数値予測技術が必要不可欠である。数多くのケーススタディや感度解析が不可欠となる装置設計の絞り込み段階では集中定数モデルや一次元モデルのように計算速度に優れるモデルが使用されるが、これらの簡易モデルは数多くの実験相関式に基づいたため、その適用範囲の拡大や予測精度向上が困難であるという問題を有する。また、装置の全体構造設計のために3次元計算を行なう際には計算時間の制約から比較的粗い計算格子を使用せざるを得ないが、粗い格子では、構造物と流れの干渉、乱流、相間相互作用などを良好に予測できないという問題がある。そこで本研究では、気泡塔型反応装置を一つの具体的な設備対象としてこれらの問題の解決を図り、適用範囲を容易に拡大できる簡易多相多成分計算手法、及び粗い計算格子でも装置構造、乱流、相間相互干渉を良好に予測できる実用的3次元多相多成分計算手法を開発している。

第1章では、本研究の背景、従来の研究と本研究の目的・方法が述べられている。

第2章は、反応生成物の定量的評価が可能な混合モデルに基づく気泡塔設計用簡易計算手法の構築を目的としている。混合モデルにおいては、気相体積率などの巨視的変数の値が、限られた実験データに基づく実験相関式を用いて評価されるため、その適用範囲の拡大及び予測精度の向上は困難である。また、実験データの整備が進められた際、実験相関式の適用性と精度を向上させるには、必然的に相関式の再構築が必要になる。この問題を解決するため、実験相関式の代わりに人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)を相関器(ANN相関器)として混合モデルに組み込む方法を提案している。まず、ANNの予測精度検証用実験データを取得するために、水-空気系気泡塔の気相体積率が測定されている。次に、ANNと混合モデルを組み合わせた手法の有効性を検証するために、フィッシャー・トロブシュ合成反応塔を対象として一酸化炭素転換率の数値予測が行なわれている。その結果、ANN相関器により水-空気系気泡塔の気相体積率を良好に予測できること、ANN相関器を組み込んだ混合モデルによりフィッシャー・トロブシュ合成反応における一酸化炭素転換率の各種パラメータ依存性を良好に予測できること、およびANNによれば新たなデータを用いた再学習により手法の適用範囲の拡大や予測精度向上を容易に達成できることが確認されている。以上より、従来の実験相関式を用いた手法が有する“限定された適用範囲とその範囲拡大の困難さ”という課題を解決した気泡塔設計用進化型計算手法の雛型が開発されている。

第3章では、複雑な構造物を含む気泡塔内気液混相流を粗い計算格子でも予測できる実用的計算手法が構築されている。本手法は多流体モデルと界面追跡法を融合したハイブリッド法と埋め込み境界法を融合した手法である。多流体モデルと界面追跡法の融合により、比較的粗い格子を用いても様々なスケールと相を含む混相流を効率的に計算可能としている。また埋め込み境界法により、粗い格子でも複雑な流路幾何構造を取り扱い可能としている。まず、基本的構造物周りの流れを対象として予測精度を検証している。このため、円柱及び角柱周りの液相流れの流速分布実験データを取得している。また同じ構造物周りの気泡流実験を行い気相体積率分布の実験データも取得している。次に、より複雑な構造物周りの流れの計算を行い、様々な形状に対する手法の適用性が検証されている。その結果、開発手法により、円柱や角柱などの基本的な構造物周りの流速分布及び気泡流の気相体積率分布を良好に予測できること、複雑な構造物周りの気泡流を複雑な格子生成無しに容易に計算できること、および固相体積率の入力データを変更するだけで構造物の形状を容易に変更できることが実証されている。

氏名	田中 正博
<p>第4章では、第3章で構築し手法を、層流-遷移流-乱流の全てに適用できる手法に拡張することを目的として、乱流及び境界層の簡易取扱い方法を考案している。本方法は、計算格子以下のスケールの渦の消散は数値粘性を利用した渦粘性モデルにより模擬し、また境界層厚みの変化をダルシー則のアナロジーで模擬する方法である。広範囲のレイノルズ数の実験及び詳細数値計算データが整備されているという理由から、円柱及び球周りの単相流れの計算により考案した方法の有効性が検証されている。流れの様相、抗力係数とストローハル数を比較検討し、本方法によりレイノルズ数が1~10000の二次元円柱周りの流れの抗力係数及びストローハル数をより詳細な計算手法であるカットセル法と同等かそれ以上の精度で予測できること、レイノルズ数に応じた適切な渦粘性が自動的に求められること、及びレイノルズ数範囲が1~10000の三次元球および三次元円柱周りの流れの抗力係数も良好に予測できることが確認されている。以上、考案した乱流計算機能により、層流から乱流にわたる広範囲のレイノルズ数の流れを粗い計算格子でも良好に予測できることが実証されている。</p> <p>第5章では、Luoらの気泡分裂モデル、Princeら及びWangらの気泡合体モデルを開発手法の中の多流体モデルに組み込み、構造・サイズ・気相空塔速度の異なる流れを対象として数値計算を行い、その妥当性を検証している。まず、低空塔速度の小型気泡塔内気泡流を対象とした実験を行い、妥当性検証用の気相体積率分布、気泡径分布のデータを取得している。また、高空空塔速度の大型気泡塔内気泡流を対象とした実験も行い、気相体積率分布を取得している。これらの実験データと計算結果の比較により、合体・分裂が殆ど生じない気泡塔内多分散気泡流における気相体積率分布と気泡径分布の空間発展を良好に予測できること、及び大型気泡塔内高空空塔速度の流れの気相体積率分布も良好に予測できることを確認している。</p> <p>以上より、前述の合体・分裂モデルは、合体が支配的な流れ、分裂が支配的な流れ、合体・分裂が同等に高頻度で生じる流れ、合体・分裂が殆ど生じない流れの全てに適用可能であり、さらに、構造・サイズ、運転条件の異なる気泡塔内非均質気泡流動に対しても適用可能な汎用性を持つことを確認している。</p> <p>以上、本研究は、多相多成分流れを利用する各種工業設備の設計支援ツールとして役立つ2種の実用的数値計算手法、すなわち、ケーススタディ用の簡易計算手法と装置構造設計用の詳細計算手法を開発したものであり、流体工学及び移動現象工学における価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の田中正博は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	