

氏名	さくらぎ たくや 桜木 卓也
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）材料加工学専攻
学位論文題目	熔融金属の流れ解析の高精度化と鑄造欠陥予測への応用
指導教官	東北大学教授 新山 英輔
論文審査委員 主査	東北大学教授 新山 英輔 東北大学教授 菊池 淳
	東北大学教授 八木 順一郎 東北大学助教授 安斉 浩一

論文内容要旨

第1章 序論

鑄造プロセスにおける数値解析の適用は近年さかんに行われつつある。鑄造分野において数値解析が適用される問題には、溶湯の充満過程をはじめ、伝熱凝固過程、凝固遷移層（固液共存域）のモデル化、表面張力、流れ中の介在物の挙動、多孔質プリフォームへの溶湯充満、デンライトの成長過程等のミクロ的な解析モデルの確立、さらに各種鑄造欠陥予測のための解析及び欠陥予測パラメータの構築などが挙げられる。そしてこれらの解析のための各種の熱物性値のデータベースの構築も不可欠であり、実測の必要があるものから数学的モデルの考察にいたるまで幅の広い問題を含んでいる。

これらの解析には、いまだ研究段階にあるものや、湯流れ、伝熱凝固解析のように、層流、非圧縮性流体に限定すれば実用化に至っているものもある。熔融金属の鑄型内充満過程を模擬する湯流れの解析では、自由表面の移動という問題を扱う必要性が生じる。このような問題は移動境界問題と呼ばれている。また、金属の溶融・凝固を取り扱う場合には、熱の移動を同時に考慮する移動境界伝熱問題を取り扱うことになる。伝熱・凝固問題を解析する場合においても、正確な初期条件が必要となり充満過程の解析により得られた溶湯、鑄型の温度が必要となる場合がある。

移動境界問題では数理解析モデルとして与えられた微分方程式の解析対象領域を構成する境界の一部が未知でしかも時々刻々変化する。このような問題の特性から複雑な非線形性問題を扱うことになる。そして、通常の初期値・境界値問題を解く数値計算法のほか、移動境界を決定する計算法が必要となる。一般に、移動境界を扱う場合には次のような問題点がある。

- 1) 移動境界面の離散化の方法
- 2) 移動境界上での境界条件（特に応力条件）をどのように考慮するか。
- 3) 液滴などの孤立点をどのように扱うか。

さらに、複雑形状鑄物の溶湯充満過程の解析に必要なとなるのが異形メッシュなどを含む非直交格子による計算手法である。実用的な問題に対して定量的にも妥当な結果が得られる手法は、現在研究段階にありいくつかの方法が考えられているが、いまだ確立されていない。

本研究では、熔融金属の流れを中心に、ダイカストにおける空気の巻き込みや湯境い、連続鑄造における熱移動・凝固を含む鑄造欠陥の予測などに対して、問題となる現象とモデル形状に適応した計算方法を用いて解析を行い、現象の発生メカニズムを探索した。

第2章 直交格子を用いたダイカスト・シミュレーション

第2章では、簡便な解析モデルを用いてダイカストにおける空気の巻き込み現象の解析を試みた。モデルの形状を第ゼロ近似を用いて表現し、格子を細かくすることによって格子内の液相充満率から気相含有率を観察し、気液混相流を模擬する。ここでは、熔融金属の移流を正確に計算するために、数値流体力学の分野で近年開発されている代数近似を用いたCIP(Cubic Interpolated Propagation)法を適用し、自由表面の移動解析によく用いられるVOF(Volume of Fluid)法と組み合わせる。

一方、鑄型形状の第ゼロ近似が大きな圧力損失を引き起こす場合や直交格子でのモデル化が実際的に困難である場合、やはり非直交格子による解析に頼らざるを得ない。

第3章 非直交格子による自由表面解析

非直交格子を用いた解析手法の1つとして第3章では拡張型SOLA法にVOF法を採用し、境界適合座標系での非圧縮性流体の基礎方程式と移流方程式を解くことにより、固定された一般曲線座標系で自由表面流の計算を行った。次の計算を行うことにより、複数の障害物の影響を考慮することが可能であることがわかった。

- (1) 水槽内に4つのブロックを配置し、注入される水の充満過程の様子を計算した。水実験との比較より、実際の流れパターンを時系列的にほぼ再現出来ていることが確認された。実験結果と計算結果との差異は、1つには背圧の影響があること、さらに圧力差による流入条件や側壁の影響を考慮しなければならないことを示唆している。

この計算を通して、本アルゴリズムは凝固現象をとまなう湯流れ解析が可能であると思われる。次に、非直交要素を用いた計算の有効性と流量保存に対するSOLA法の優位性を調べるため以下の計算を行った。

- (2) U字管内の水が重力作用により、揺れ動く界面の挙動を計算した。界面の水位は理論値とほぼ一致していることが確認された。

第4章 ベルト・ホイール型連続鑄造の湯流れ解析

第4章では、3章で提案したアルゴリズムを3次元に拡張し、境界適合座標系を用いて非圧縮性流体の基礎方程式と移流方程式を解くことにより、固定されたEuler座標系でベルト・ホイール型連続鑄造の3次元流動凝固解析を行った。鑄造条件として、圧延加工で表面に割れが発生する条件を用い、鑄造欠陥を引き起こす場合の溶湯の流れと凝固状態を観察した。本計算を通して以下の事が確認された。

- (1) 溶湯は回転するベルトとホイールで構成された鑄型で囲まれ、両側から徐々に冷却されるが、鑄塊とベルトの間のエアギャップを仮定した場合、ベルト側より、伝熱係数が大きいホイール側の冷却性能が優れている。
- (2) 凝固界面の形状は凝固先端付近で円錐型を形成している。また、この円錐の頂点は、湯口から回転角 116° 付近まで到達していることがわかった。この結果は、熱電対による湯温の実測値と計算から求められる湯温との定量的な比較から裏付けられる。
- (3) 仮想粒子の軌跡により、固液界面の先端位置からやや上流の液相内部において横渦が形成されていることが確認された。固液界面の形状は上流から下流の界面先端に向かって徐々に狭まるが、湯口からの回転角が 111° 付近で不連続に収縮しているのが観察された。この不連続な固液界面の収縮は溶湯の横渦が引き起こす初期凝固層の再加熱が原因で発生する凝固進行速度のズレによって形成されるものと思われる。

連続鑄造のように溶湯の流れがおそくRe数が比較的小さい場合、風上差分とVOF法の組み合わせで非直交格子を用いた流動凝固解析は十分可能であることがわかった。

一方,Re数が高い流れ場では対流項が支配的となる.ダイカスト・シミュレーションではこのような強い非線形性に堪える安定したアルゴリズムの開発が望まれる.

第5章 非構造格子による湯流れ解析

第5章では,複雑形状な鋳型キャビティのダイカスト・シミュレーションに対応するため,非構造格子を採用した3次補間関数による代数的近似を用いた新しい解析手法を提案した.本計算方法では流れ計算に拡張型SOLA法を用い,自由表面の解析に3次補間関数による代数的近似法を非構造型格子に拡張した方法を用いている.この方法により風上差分による過大な人工拡散を排除することができる.また,Galerkin法による定式化を用いることにより,自由表面上の応力条件は隣接充満面の流速で簡易的に近似することなく自然に考慮される.さらに,界面形状の認識のために仮想セルを構築し移流計算の高精度化を行っている.

5章で提案した解析法は以下のような特徴をもっている.

- (1) 代数近似を用いているため,移流計算を比較的速く行うことができる.
- (2) 液体の充満率は1つの格子をいくつかの仮想セルに分割し,セル内の節点におけるF値を積分することにより得られるため,一般に差分法ほど細かい格子は必要ではないが,格子内を流体が出入りする量を考えるVOF法より細かい格子が必要であろう.
- (3) Galerkin法による定式化に従っているため非構造格子の適用に優れている.

この計算法を用いてスクイズ鋳造とダイカスト鋳造の湯流れ解析を行い,以下の結果が得られた.

1. スクイズ鋳造の計算を行い,水モデルによる実験並びに直接差分法(DFDM)による計算結果と比較してよい一致が見られた.
2. 複雑な形状をもつダイカスト製品内の湯流れ計算の例としてゲート及びオーバーフローを付加したディスクの鋳造シミュレーションを行い,マーカー法を用いた計算結果と定性的であるが,よく一致する結果が得られた.
3. ディスクのランナーの厚み及びゲート長を変えた4つのモデル形状について湯流れ解析を行なった.これらの解析結果より,溶湯がゲートの出口から製品部に流れ込んだ直後に流れが分岐するか,あるいはそのまま直進しディスク内を回流するかの違いはゲートの絞りの程度とゲート長に依存することがわかった.また,2方向に分岐する流れは,ゲートの絞りラインに沿って垂直に作用する大きな圧力勾配力によるものであることが解析で確認された.

一般に,鋳造の湯流れ解析では,非圧縮性流体の基礎方程式に立脚した解析が行われている.背圧を考慮する場合,ボイル・シャルルの法則等を用いた簡易的な計算が主体になっている.しかしながら,ガスの圧縮性を考慮する場合には,圧縮性流体の基礎方程式に立脚した解析を行う必要がある.

第6章 圧縮性を考慮した気液2流体の数値解法

第6章では気液2流体を圧縮性の基礎方程式に立脚して解く方法についての基礎的な研究成果を記述した.気相と液相を含む2種類の流体を含む系の運動の数値シミュレーションは,厳密には自由境界,圧縮性と非圧縮性流体の混合問題を扱わなければならない.

特に,鋳造の分野ではさらに凝固などによる固相も扱うことになり,複雑な物体形状のもとで独立して各々の流体の系毎に問題を扱うことは非常に困難をとまってくる.また,ダイカスト鋳造では圧縮性,非圧縮性の混合問題をRe数が高い内部流問題として扱うことになり,いくつかの困難な条件が重なる.

6章では,流れ場の全体的な動きのみに注目し,2流体を状態方程式を共有する1つの流体とみなし,圧縮性流体及び非圧縮性流体の両方を扱うことが可能と思われるCIP法を発展させ,2流体の数値シミュレーションについて記述した.この方法はエネルギー保存則に圧力を変数として用いている.その結果,圧力に対する拡散型方程式を陰に解くことになる.圧力を変数とした非保存型方程式を用いるこの方法では,物理量の不連続な箇所近傍でエネルギー保存則に全エネルギーを変数として用いる保存型の基礎方程式の解とは異なる一般解を近似することになり,本章ではそのための補正項を提案した.

本計算法に,密度関数を用いることにより2つの流体が占める領域を識別し,各々に物性値を与えることにより,気・液2流体の数値シミュレーションが可能であることがわかった.

今後,鑄造の分野におけるこのような圧縮性2流体問題の解析方法の実用化のために,離散系及び圧力方程式の解法に対する改良が望まれる.

審査結果の要旨

鑄造欠陥問題の解決には溶融金属の流れの正確な解析が必要であるが、移動境界面における離散化と境界条件の扱いに関連して現状の解析法では精度が不十分である。本論文はダイカスト、連続鑄造などの鑄造法における問題の解析に適した数値モデルと計算方法を検討し精度の向上を図ったものである。

第1章は序論である。第2章はダイカストにおける空気巻き込み問題に関する検討である。形状モデルの精度を高める対策として直交格子の数を極度に多くし、液体金属の移動計算の精度を高めるために CIP (Cubic Interpolation Propagation)法を採用し、また自由表面はVOF法で扱っている。最終充填位置、格子内の空気含有率および鑄型表面へ向かう流れベクトルなどによって計算結果を評価し、実製品の表面欠陥との対応を確認し、対処の方向を明らかにしている。

第3章では鑄型キャビティー形状を正確に近似するためにBFC(Boundary Fitted Coordinate)法を用いた非直交流れ解析法を開発し、水モデル実験結果とよい一致を得ている。また鑄型充填流れ解析で重要な流量保存について他の圧力解法を用いたアルゴリズムと比較して極めて精度が高いことを確認している。

第4章では第3章の方法を3次元に拡張し、エンタルピー法による伝熱凝固解析と組みあわせ、アルミニウムのベルトホイール型連続鑄造の問題に適用している。入口の樋の断面積によっては未凝固領域の一部に横渦が発生し、初期凝固層の再加熱と凝固進行の不連続が生じ、鑄片の表面欠陥の原因となる可能性を指摘している。

第5章は薄肉ダイカストを想定した非構造格子による流れ解析に関するものである。とくに表面応力条件及び圧力条件を正確に考慮し、また移流項の数値拡散の抑制に留意した。この方法による計算結果として、たとえば薄肉品に対する切線ゲートによって流れが切線方向からずれて法線方向に向かう現象が再現され、またその原因が法線方向の強い圧力勾配にあることが明らかにされている。

第6章では圧縮性を考慮した2流体の解析法の原理開発をおこなっている。鑄型内では溶融金属と空気などの気体とが共存して流れるが、従来気体は境界条件として扱われるに過ぎず、格子よりも小さい気泡の扱いなど精密な計算が不可能であった。これに対しBFC格子の上での陰解法による気液同時解法を提案している。界面位置、充填率、粘性係数などは密度の関数として自然に表現され、また溶融金属の移動を記述する移流方程式を解く必要がなくなった。一例として水面上の液滴落下の計算に成功し、鑄造問題への適用の見通しを得ている。

第7章は総括である。

以上要するに本研究は溶融金属の流れ解析法に新しい手法を導入して精度を高め、これを応用して鑄造欠陥を予測できることを示したもので、材料加工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。