

	いとう のぶあき
氏 名	伊 藤 信 明
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成22年9月8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) 金属フロンティア工学専攻
学位論文題目	マイクロ連続鋳造における凝固シミュレーション手法の研究
指 導 教 員	東北大学教授 安斎 浩一
論文審査委員	主査 東北大学教授 安斎 浩一 東北大学教授 藤田 文夫 東北大学教授 川崎 亮

論 文 内 容 要 旨

連続鋳造法は、一様な材質の材料を一定の断面形状で連続的に製造可能な、工業生産に適した鋳造手法であり、用途に応じて様々な形式の連続鋳造法および連続鋳造装置が実用に供されている。これら種々の連続鋳造法のうち、本研究では、単ロール鋳造法、双ロール鋳造法、EFG等で、特に、急冷を行うものを「マイクロ連続鋳造」と定義した。本研究の目的は、このマイクロ連続鋳造法に特有な、鋳造シミュレーション上の問題点を克服する数値解析手法を提案するとともに、高精度化した鋳造シミュレーションを用いて、新素材開発に適用されるマイクロ連続鋳造機的设计を効率化する手法の開発等の産業応用することである。本研究は全5章から構成される。

第1章 序論

本章では、研究対象の定義、問題設定、研究の目的、並びに、本研究における主張について論じた。

マイクロ連続鋳造は、成品代表厚が $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{m}$ であること、並びに、平均凝固速度が 10^{-3}m/s 以上であることを満たす鋳造法である。また、マイクロ連続鋳造に含まれる各鋳造法には、量産性への指向や、鋳造による材質・形状の造り込みへの指向等の共通する指向が存在する。さらに、凝固領域で温度等の状態量の勾配が大きいことや、互いに近接する自由界面・凝固界面の存在によって数値解析プロセスが本質的に不安定であるという数値解析上の課題もこれらの鋳造法では共有している。このため、マイクロ連続鋳造の解析においては、他の鋳造法でも未だ困難な、凝固組織の数値解析による直接予測はもとより、他の鋳造法では既に実用化されている、鋳造時の温度場・流れ場の鋳造シミュレーションに関しても未だ高精度化が困難であり、工業的に実用化できていない。従って、「マイクロ連続鋳造」という鋳造法の類別化には学術的および産業的な意義が存在するとともに、この鋳造法には、専用の鋳造シミュレーション手法の開発への強いニーズが存在する。

第2章 双ロール鋳造シミュレーションにおける予測精度向上

本章では、代表的なマイクロ連続鋳造の1つである、双ロール鋳造法について、鋳造シミュレーションの予測精度を向上させるための新手法、特に、不連続 Sharp 凝固界面 Multi-zone 凝固モデルの開発について論じた。

この凝固モデルは、凝固中の温度場および流れ場の輸送方程式系をより厳密に表現するものである。このモデルを用いることによって、双ロール鋳造において一般的に生じる、凝固中の固相変形や、凝固界面を通過する際の材料の密度変化に対して、定量的、かつ、高精度に温度場・流れ場を求められる。

具体的なモデル改良点に関しては、凝固界面上における輸送方程式の挙動を詳細に検討した結果、構成式から導かれる、凝固界面上での固相側および液相側の次の応力つり合い式（凝固界面垂直方向）

$$\sigma_{LB1B1} = -P_s + 2\mu_s \partial u_{s,B1} / \partial x_{B1} \approx -P_L \quad (\text{式 1})$$

から、凝固界面上において、液相側圧力 P_L と固相側圧力 P_s の間には、非零になり得る圧力差 $2\mu_s \partial u_{s,B1} / \partial x_{B1}$ が一般に存在することに本研究では着目した。ここで、 $\partial u_{s,B1} / \partial x_{B1}$ は、凝固界面垂直方向の速度勾配、 μ_s は、固相の粘性係数である。全ての相において同一の Navier-Stokes 型の運動方程式を解く、single-zone 凝固モデルを前提とした、従来の一般的な数値解析手法では、凝固界面に対応する特定の計算点において、必然的に単一の圧力 P を用いるため、上記の液相-固相間の圧力差を表現することができなかった。このため、この圧力差が卓越する鋳造条件、例えば、凝固中に固相変形の生じる場合等には、従来手法では大きなモデル誤差を生じる。同様に、従来手法では凝固時の密度変化に基づく凝固界面上での速度変化によって、同様の圧力誤差を生じることを本章では見出した。これらのモデル誤差は、多くの鋳造法の数値解析において現実に存在するが、マイクロ連続鋳造において特に顕著である。しかし、これらのモデル誤差は、従来、ほとんど顧みられることがなかった。

そこで、本研究ではこのモデル誤差を避けるために、固相・液相それぞれを別の輸送方程式系で解くとともに、凝固界面上で圧力 P および速度 u を固相側・液相側でそれぞれ独立に与える、不連続 Sharp 凝固界面 Multi-zone 凝固モデルを開発した。この手法によって、凝固界面上で発生しうる圧力・速度の不連続性を正確に取り扱えるので、マイクロ連続鋳造の鋳造シミュレーションでの計算精度を飛躍的に向上させられる。

また、今回凝固モデルで前提とする、凝固界面を sharp なものとみなす手法の妥当性について、過去の実験データ[山内ら(1988)]との比較によって検証した。その結果、マイクロ連続鋳造でのように、高速かつ大温度勾配での凝固時には、マッシー層（即ち、sharp ではない固液混相層）が生成したとしても、その層厚は十分薄く、実質的に sharp な凝固界面とみなせることが判明し、今回モデルの前提が妥当であることを実証できた。

第3章 単ロール鋳造シミュレーションにおける予測精度向上

本章では、他の代表的なマイクロ連続鋳造の1つである、単ロール鋳造法、特に、Planar Flow Casting (PFC) について、鋳造シミュレーションの予測精度を向上させるための、不連続 Sharp 凝固界面 multi-zone 凝固モデルをベースとした、温度場および流れ場に関する新たなモデル化手法について論じた。

従来の PFC の鋳造シミュレーションにおいて、single-zone 凝固モデルを適用したものでは、固相と液相を本

質的に同一の方程式系で取り扱うことに起因する種々のモデル誤差が避けられないことを本研究では示した。また、従来の multi-zone 凝固モデルを適用したのもでも、数値計算プロセスが不安定化し易いため、近似によって簡略化した輸送方程式系の下でしか解を得られず、シミュレーション精度が大きく制約されていた。

これに対して、本研究では凝固モデルに関して、第1の改良点として、PFCの凝固領域（パドル）を形成する各自由界面および凝固界面の位置を ALE 法等のロジックを用いて計算メッシュを変形させながら解く際に、従来法でのように各界面を直接に接続するのではなく、各界面間に干渉領域を設ける境界条件とする新たな界面接合方法を提案した。この手法は、自由表面および凝固界面位置探索計算時の計算安定化に大きく寄与する。また、第2の改良点として、multi-zone 凝固モデルの運動方程式を弱連成法で解く場合、液相側で凝固速度を計算するとともに固相側で凝固界面熱流束を求めるといった新たな凝固表現方法を開発した。この手法により、multi-zone 凝固モデルの固相-液相間弱連成計算の安定化に大きな効果を示す。さらに、第3の改良点として、固相である凝固シェル形状を算出する手法として、検討系を Stephan 問題化したうえで新提案の基底関数を用いたスペクトル法によって解く手法を開発した。この手法は、凝固界面形状を高速、かつ、安定に求める点に貢献する。これらの新モデルを適用することにより、PFC に対して、multi-zone 凝固モデルを用いて、近似のないフルの輸送方程式系を解くことに初めて成功し、従来のモデル誤差の大半を回避することができた。

本章で開発したモデルを検証するために、物性値および境界条件が精密に規定されている PFC 試験[佐藤、柴田(1995)]と、各種の鋳造シミュレーション結果との比較を行った。その結果、箔厚・パドル形状等の基本的な評価指標に関して、鋳造シミュレーション結果のうち、本章の手法によるもののみが試験結果の不確かさ範囲内に収まり、本手法の高い精度を実証できた。また、この計算において本手法では一切のモデル調整定数を用いていない。従って、本手法には未知の鋳造条件に対しても定量的なシミュレーションを実施できる可能性が在る。

第4章 マイクロ連続鋳造に適した、新素材開発時のプロセス設計手法の検討

本章では、マイクロ連続鋳造に適した材料探索手法の検討手法、特に、普遍パラメータによる凝固組織整理の概念を提案するとともに、第2、3章で述べた今回開発の高精度凝固モデルを応用して普遍パラメータを求めることによって開発の効率化を図る、新素材開発時の鋳造プロセス設計に関する新たな設計手法について論じた。

新素材開発では、初期の材料条件探索フェーズとそれ以降の鋳造プロセス条件探索フェーズの間では、目的が異なるために一般に異なる形式の鋳造機が用いられる。従来の設計手法では、開発フェーズの移行によって鋳造機形式が変更されると、新たな形式の鋳造機上で最適鋳造条件（特に、凝固組織の最適化）を、反復試験によって再度、探索せねばならず、また、多数回の鋳造機のスケールアップも必要とする、不効率なものであった。

今回の設計手法では、鋳造機形式によらず鋳造組織を支配する、普遍パラメータに着目し、これがマイクロ連続鋳造においては、凝固速度 v_m および温度勾配 G_m のみであることを示した。これらの普遍パラメータは、第2,3章で提示した、高精度の鋳造シミュレーションを実施することによって容易に求めることができる。従って、

特定成分の材料に関して鑄造試験を行い、ここで得られた凝固組織と、この試験を再現する高精度鑄造シミュレーションで求めた普遍パラメータの組み合わせを多数組求めることによって、鑄造機形式によらない、定量的な凝固組織マッピングが可能である。この凝固組織マップを作成・利用することによって、設計フェーズの移行によって鑄造機形式が変化した場合でも、前のフェーズでの鑄造機における最適鑄造条件を新しい鑄造機での鑄造条件に変換することができる。この結果、今回の設計手法では鑄造機のスケールアップ回数や鑄造試験回数を大幅に削減でき、新素材開発プロセスを効率化することができる。

今回設計手法の妥当性を検証するために、まず、具体的な計算例によって実施可能性を示した。また、同一の対象について、第 2,3 章で提示した高精度凝固モデルによる凝固組織マッピングと、従来の VOF 法によるものとを比較した結果、凝固組織マッピングのためには、高精度な凝固モデルが精度上必須であることも論証した。さらに、同一成分 (ANSI304) の材料に関する過去の各種の高速鑄造試験結果を凝固組織マップで整理した結果、図 1 に示すように、異なる鑄造法であっても v_m と G_m が一致すれば同一の凝固組織 (C: 柱状晶, D: 柱状デンドライト晶, E: 等軸晶) となることを示し、凝固組織マッピングの妥当性を定量的に検証した。

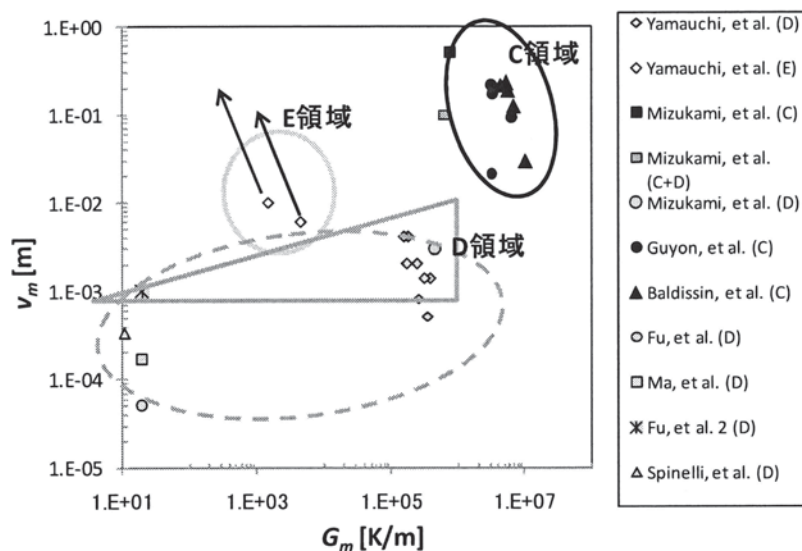


Fig. 1 Solidification structure map with estimated dominant parameters derived from conventional experimental data [ANSI 304].

第5章 結論

以上の議論から、本研究において掲げた、以下の2つの主張を証明できた。

- (1) マイクロ連続鑄造には事前に算出可能な普遍パラメータが存在し、これを高精度な鑄造シミュレーションで求めることにより、新素材探索用の設計工程を大幅に削減できる。
- (2) マイクロ連続鑄造の鑄造シミュレーションにおいては、本研究で開発された、Sharp 凝固界面 Multi-zone 凝固モデルとメッシュ変形法を組み合わせる手法を適用することが最適である。

論文審査結果の要旨

連続鋳造法は、一様な材質の材料を一定の断面形状で連続的に製造可能な鋳造手法であり、様々な形式の連続鋳造法および連続鋳造装置が実用に供されている。連続鋳造法のうち、特に、急冷を行うものを「マイクロ連続鋳造」と定義する。本論文は、マイクロ連続鋳造法に適した高精度凝固シミュレーション法について基礎的検討を行ったもので、全編5章よりなる。

第1章は序論で、マイクロ連続鋳造法ならびにマイクロ連続鋳造法のプロセスパラメータを最適化するための凝固シミュレーション法の現状と問題点について述べている。

第2章では、ロールの圧下による固相の変形が無視できない双ロール鋳造時の凝固シミュレーションを高精度に行うための計算モデルとして不連続 Sharp 凝固界面 multi-zone 凝固モデルを提案するとともに、過去の実験データと本モデルによる計算結果を比較することで、その予測精度が従来法に比較し格段に向上していることを確認した。

第3章では、単ロール鋳造法、特に、Planar Flow Casting (PFC)について、鋳造シミュレーションの予測精度を向上させるための、不連続 Sharp 凝固界面 multi-zone 凝固モデルをベースとした、温度場および流れ場に関する新たなモデル化手法について論じた。本モデルの有効性を検証するために、過去に行われた実験結果ならびに、各種の鋳造シミュレーション結果との比較を行った。その結果、箔厚・パドル形状等の基本的な評価指標に関して、本手法のみが合理的な解を出せることがわかった。

第4章では、マイクロ連続鋳造に適した材料探索手法として、普遍パラメータによる凝固組織整理の概念を提案するとともに、第2、3章で述べた今回開発の高精度凝固シミュレーションモデルを応用して、普遍パラメータを求めることによって開発の効率化を図るといふ、新素材開発時の鋳造プロセス設計に関する新たな設計手法について論じた。

第5章は総括である。

以上、要するに本論文は、マイクロ連続鋳造法に適した高精度凝固シミュレーション法について提案するとともに、計算結果と実験結果との比較により、その有用性を検証したもので、金属フロンティア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。