

氏名 さわだともき 澤田朋樹
授与学位 博士(工学)
学位授与年月日 平成21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) 金属フロンティア工学専攻
学位論文題目 チャンネル偏析シミュレーションに関する研究
指導教員 東北大学教授 安齋 浩一
論文審査委員 主査 東北大学教授 安齋 浩一 東北大学教授 石田 清仁
東北大学教授 藤田 文夫 東北大学准教授 及川 勝成

論文内容要旨

近年,大型鋳塊を半製品とするローターシャフトやタービンケーシングといったエネルギー産業を支える製品の使用環境は苛酷さを増し,製品の信頼性向上と品質の安定性が求められている。しかし,大型鋳塊に不可避で致命的な欠陥であるチャンネル偏析のために,信頼性の保証,品質およびその安定性の向上が非常に困難になっている。チャンネル偏析は後処理によって除去することが難しく,チャンネル偏析発生の抑制は大型鋳塊の高品質化の重要課題である。チャンネル偏析発生の抑制には,その生成機構に基づくプロセスの制御が必要だが,1920年代から今日まで,多くの研究がなされてきているものの,チャンネル偏析の生成機構の詳細はいまだ不明な点が多い。

本研究は,実用的な数値解析手法を確立し,数値的と実験的な調査の相補的な解釈によるチャンネル偏析の生成機構に対する理解の深化を目的として為されたものである。第1章は序論である。第2章はマクロ偏析シミュレーション法,第3章はチャンネル偏析の3次元解析,第4章はSn-Bi合金の横指向性凝固,第5章はチャンネル偏析の生成機構,第6章は総括である。

第1章では,これまでの研究をそ総括した。チャンネル偏析の抑制に有用な知見は得られているものの,生成機構の完全な理解には至っていない現状を述べ,重要課題としてチャンネル偏析の生成機構の解明を掲げた。従来の研究は実験的や解析的な研究が多く,こうした調査で得られる情報には制約が存在するため,数値解析を用いた研究の有効性を述べた。しかし,チャンネル偏析を直接シミュレーションすることが可能な計算手法が幾つか提案されているものの,モデルの精度と計算速度を両立させた手法がないこと,そして,縦一方向凝固に現れるフレックルが主な適用対象であったことを述べた。実用的なシミュレーション法の構築とチャンネル偏析への適用と調査の必要性を述べ,数値的と実験的な調査の相補的な解釈によるチャンネル偏析の生成機構に対する理解の深化を本研究の目的とした。

第2章では,マクロ偏析シミュレーション法の検討を行った。チャンネル偏析は主に流動,凝固,ミクロ偏析の複合的な物理現象である。まず,マクロ偏析問題における流動解析に SOLA 法を適用するにあたり,運動方程式中の液

相と固相の相互作用を表す Darcy 項の計算不安定性について述べた。そして、Darcy 項を陰的に離散化して圧力と流速の同時緩和を修正した安定化 SOLA 法を提案した。この安定化 SOLA 法は、Darcy 項を陽的に離散化した SOLA 法と同等の精度で、安定かつ高速な計算が可能であることを示した。

また、凝固時のマイクロ偏析について、チャンネル偏析の本質が捉えやすく物理的な解釈が容易なモデルの検討を行った。また、凝固時のマイクロ偏析に重要な液相線温度や分配係数などの熱力学的特性について、組成と温度依存性を高精度に考慮するための検討を行った。そして、Thermo-Calc により算出した結果から、事前に最小二乗法により近似関数を構成することによって、組成と温度の依存性を考慮した熱力学的特性を高速に計算することが可能になった。

この数値解析手法により、マクロ偏析問題を解析した。3 元系 Fe-Cr-Ti 合金平板の 2 次元マクロ偏析問題に適用したところ、軽元素である Ti が浮上し上部に濃化する様子が得られ、多元系における解析が非常に高速に解析できることを示した。また、製品の形状をそのままにサイズを変えた解析を行ったところ、マクロ偏析に特有のサイズ効果の発現を確認した。また、2 元系 Sn-Bi 合金の横指向性凝固問題を解析したところ、チャンネル偏析は発生しなかったが、過去の実験によく似た Bi 偏析分布が得られた。また、固相の算出に温度と組成の両方の影響を考慮した時間発展方程式を導き組成の影響項を跳躍条件により定式化したところ、過去の実験におけるチャンネル偏析と形状や発生する位置が非常によく似たチャンネル偏析を再現できることがわかった。このことにより、チャンネル偏析現象には固相の発展方程式において温度と組成の両方を考慮することの重要性を示した。

第3章では、これまで解析例がほとんど報告されていない横指向性凝固問題におけるチャンネル偏析の3次元解析を行った。そして、解析結果から生成過程と計算時間について検討した。解析結果では、実験的に知られているような円形断面を有する紐状のチャンネル偏析が再現でき、シミュレーションモデルの妥当性を確認することができた。そして、数値解析により得られた液相率と偏析比からチャンネル偏析の生成過程を検討した。その結果、チャンネル偏析は凝固前面で発生し、発生初期は組成が濃化した大きな凝固遅れ部が形成されることが示唆された。そして、時間進行に伴いバルク液相領域に口を開けたまま凝固遅れ部が収縮していくことで、ほぼ円形断面を有する紐状の高濃度の領域が形成されていく様子を確認した。また、3次元解析における計算時間と鑄塊サイズならびに格子幅の関係を推定するモデルを提案した。このモデルによれば、世界最大級の 800t 鑄塊のマクロ偏析問題を1か月で解析し得る可能性があることを示した。

第4章では、鑄造実験と数値解析による Sn-Bi 鑄塊の冷却条件に対する偏析挙動の調査を行った。鑄造実験では金型による横指向性凝固により Sn-20wt%Bi 合金の小型鑄塊を幾つかの冷却条件で作製した。この鑄塊を試料として、鑄塊の横断面のマクロ組織を観察し、観察された偏析帯の断面スポット状況から冷却条件とチャンネル偏析の生成挙動の関係を検討した。その結果、冷却体の温度が低いほど偏析スポット数が少なくなることがわかった。また、数値解析により幾つかの冷却体温度で横指向性凝固問題を解析したところ、Bi 偏析比分布から冷却体温度の

変化によって偏析挙動が変化することを確認した。しかし、これは定性的な比較にとどまるため、偏析比の全変動 (TV: Total Variation) による定量化を試みた。偏析比の TV と冷却体温度の間には、冷却体温度の低下に伴い TV が減少するという関係が認められた。そして、数値解析における偏析比の TV と実験におけるチャンネル偏析数には良い相関関係が認められ、TV による偏析評価の有用性を確認することができた。

また、鑄造実験では pour-out による凝固過程の観察も行った。この観察により、凝固の進行に伴い重元素 Bi が底部に偏析することで凝固界面が変化しオーバーハング形状を呈することを明らかにした。また、凝固前面の樹枝状晶は疎らであることやチャンネルと思われる空隙が観察され、凝固前面がチャンネル発生個所である可能性を確認した。

第5章では、数値解析と実験結果からチャンネル偏析の生成機構について検討を行った。まず、モデル水溶液の縦一方向凝固を解析し、過去に行われたフレッケルの可視化実験の生成機構と数値解析結果の整合性を検討した。本手法による数値解析でもフレッケルが再現され、その特徴は過去の実験結果と多くの一致が見られたものの、過去の研究で示された生成機構ではフレッケルの成長過程を十分説明できないことを指摘した。次いで、フレッケル形成に対する流れと溶質輸送の作用を合金の凝固において検討するために、小型平板の Pb-Sn 合金の縦一方向凝固の解析を行った。この解析で、本手法によって合金の凝固においてもフレッケルが再現可能であることを確認した。また、フレッケルの発生直前と直後に注目し、凝固前面で生じる濃化液相の供与・受容対 (Donor-Acceptor Couple) の存在を明らかにした。この供与・受容対機構を用い、フレッケル発生から成長までの生成機構について考察した。そして、横指向性凝固させた Sn-Bi 合金における沈降型チャンネル偏析についても濃化液相の供与・受容対を検討した。2次元の数値解析結果における流れ場の様子と濃度分布においても、受容対の凝固進行側隣接部に供与対が形成されている様子が確認された。そして、3次元解析における横断面の Bi 偏析比分布において周期的な帯状の供与・受容対の存在を確認した。また、第4章の金型を用いた横指向性凝固により作製した小型鋳塊を X線 CT によって撮像し、チャンネル偏析の3次元構造を調べた。その結果、紐状のチャンネルが蛇行しながら底面に降り注ぐ様子が観察された。そして、この X線 CT 撮像結果を画像処理することで定性的な3次元濃度分布像を作成した。この3次元濃度分布において、チャンネル偏析の凝固進行方向側の近傍に濃化液相の供与対と思われる濃度の減少している領域を確認することができた。さらに、第4章で行った pour-out 実験試料を熱処理して横断面を観察したところ、スポット同士が Bi 濃化部で連絡して幾つかの偏析スポット群を形成している様子が確認された。以上の結果を用いて、横指向性凝固における沈降型チャンネル偏析について供与・受容対機構と受容対が収斂することでチャンネル偏析が生成するモデルを考察した。このチャンネル偏析生成モデルは、これまでその理由が明らかにされていなかったチャンネル偏析の特異なマイクロ組織を説明可能にするものであることを示した。

第6章では、本研究で得られた一連の知見を総括した。

従来、チャンネル偏析は、固液共存域の中で樹枝状晶の間に濃化液相のプールが形成され、これが密度差に駆動

され流れ出して周囲の樹枝状晶を溶解してチャンネルを形成すると考えるものが少なくなかった。しかし、本研究で再現されたチャンネル偏析は、凝固前面で形成された大きな凝固遅れ部が丸い断面を持つ紐状帯に収斂していくことによって生じるという、従来の理解とは異なる生成過程であった。さらに、本研究で採用したシミュレーションモデルの物理的な意味の明瞭さにより、チャンネル偏析形成に本質的な働きをする因子を浮かび上げ、フレッケルおよびチャンネル偏析のどちらの生成機構についても説明可能なモデル、すなわち、凝固前面にて形成される濃化液相の供与・受容対形成機構を提案した。本研究により深められたチャンネル偏析に対する理解は、今後の実験的、数值的、解析的な研究にとっての重要な橋頭堡たるを確信する。

論文審査結果の要旨

近年、鋳造プロセスをコンピュータシミュレーションする技術は格段の発展を遂げ、鋳造工場では鋳造条件を最適化するためのソフトウェアパッケージが実製品の設計・製造に日常的に利用されている。しかし、伝熱問題に特化した凝固解析や液相のみの流動解析が主流であり、鋳造時に発生している複雑な連成問題は未だに基礎研究段階にある。中でも、大型鋳塊の致命的な鋳造欠陥として知られているチャンネル偏析は、鋳造時の複雑な相変化現象に伴い発生するマクロ偏析の一種であり、未だに実用的なシミュレーション技術が知られていない。本論文は、チャンネル偏析の生成を考慮できる凝固解析手法について検討を加えた結果ならびに試作プログラムを用いてチャンネル偏析の生成機構について考察した結果についてまとめたもので、全編6章から構成される。

第1章は序論で、過去になされてきたチャンネル偏析に関する実験的・理論的な研究について総括するとともに、本研究の目的とその意義について述べている。

第2章では、マクロ偏析の生成を考慮した凝固・流動解析手法について検討を加え、実用性に優れたアルゴリズムを提案し、二次元プログラムを試作した結果について述べている。Fe-Cr-Ti鋼のマクロ偏析問題ならびにSn-Bi合金のチャンネル偏析問題に試作プログラムを適用したところ、計算精度ならびに実用性に優れていることを確認した。

第3章では、2章の結果をふまえて三次元プログラムを試作した結果について述べている。試作プログラムを重いBiが沈降することで容易にチャンネル偏析が発生することが知られているSn-Bi合金の横指向性凝固問題に適用した。その結果、チャンネル偏析特有の丸い紐状の偏析帯が多数発生する様子が試作プログラムによって再現できることがわかった。また、本法の計算効率を見積もったところ、世界最大級の800t鋳塊の凝固問題でも実用的な時間で計算可能であることを示した。

第4章では、Si-Bi合金を用いた横指向性凝固実験結果について述べている。金型余熱温度を変化させて実験したところ、余熱温度が高いほどチャンネル偏析帯の数が多くなることが分かった。試作プログラムでシミュレーションしたところ、チャンネル偏析帯の発生が再現でき、Bi偏析比のTotal Variationを評価することで偏析の程度を定量的に見積もることが可能であることを示した。

第5章では、チャンネル偏析の生成機構について調べた結果について述べている。NH₄Cl-H₂O水溶液が凝固する際に発生するフレッケル（縦指向性凝固時に発生するチャンネル偏析）に関する過去の可視化実験結果において説明されているフレッケル生成機構と試作プログラムによる計算結果の整合性について調査した。試作プログラムによる解析の結果、フレッケルが安定に成長するためには濃化する溶質を供給する供与部と溶質が流れ込む受容部が隣接して存在すること（供与・受容対）が必要であることを見いだした。また、4章での横指向性凝固実験で発生したチャンネル偏析について再調査したところ同じような供与・受容対が存在することを確認した。さらに、定量的な評価をするために、4章の実験で得られたSn-Bi合金鋳塊をX線CTにて画像解析したところ、試作プログラムによる解析結果で予測されたような供与・受容対が存在することがわかった。さらに、凝固の途中でBiが濃化することで凝固が遅れる帯状の領域がまず発生し、凝固の進行とともに帯状領域が狭められていく過程で丸い紐状の偏析帯が形成されていくことが計算及び画像解析結果から示唆された。

第6章は、総括である。

以上要するに本論文は、鋳物の致命的な欠陥の一つであるチャンネル偏析の生成過程をコンピュータシミュレーションする手法について検討した結果ならびに試作プログラムによりチャンネル偏析の生成メカニズムについて考察した結果についてまとめたもので、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。