

## 学位論文題名

## 鋼の casting 欠陥生成機構と制御に関する研究

## 学位論文内容の要旨

熔融金属を所定の形状に成形する casting・凝固プロセスにおいて、凝固過程は最も重要な過程であり、これを定量的に解析することは、 casting 材の品質を予測し制御するために極めて重要である。 casting 材の品質で問題となるのは、 casting 欠陥となる引巣(ザク巣、マイクロポロシティ、ガス欠陥)、偏析(マイクロ偏析、マクロ偏析、逆 V 偏析、V 偏析)、介在物、割れおよび凝固組織(結晶粒サイズ、デンドライト形態)など多種多様である。 casting 材に生成するこれらの casting 欠陥や凝固組織を制御するため、従来の実験的な手法に理論的な数値解析を組み合わせることで、これらの生成機構を検討することができれば非常に有効な手段となる。また伝熱凝固、成分偏析、凝固組織形態、液相流動など、多くの要因が複合的に関連する凝固現象への適用にあたっては、目的に応じて必要な精度のモデルを立てて解析する事が重要である。近年、凝固組織シミュレーション技術が発達し、Monte Carlo 法や Cellular Automaton 法をはじめとした結晶粒組織予測や、Phase Field 法によるデンドライト形態の予測技術が利用されてきている。またこれらを多元系合金に適用するため、熱力学データベースとの連成が検討されるなど、マクロからマイクロにわたる凝固現象に関して実用鋼への展開が強く望まれている。

本研究では、実用大型鋳鍛鋼品の内部に生成する引巣や偏析などの casting 欠陥を抑制するために、従来の実験および伝熱凝固解析によるマクロ的な凝固現象の検討に加えて、固液共存領域の凝固組織形態を考慮したミクロ的な凝固現象の解明に取り組んだ。そこで凝固現象の基礎的な研究分野で発展してきている凝固組織形成シミュレーション技術に着眼し、実用鋳鍛鋼品への適用にむけた手法を検討し、 casting 欠陥および凝固組織の生成機構と制御指針を明確化することを目的とした。

本論文は全 7 章から構成されており、以下に各章ごとに要旨をまとめる。

第 1 章は序論であり、工学的背景及び casting 欠陥の制御に関する現状とこれまでの取り組みについてまとめ、本研究の目的について述べた。

第 2 章では、大型鋼塊の引巣による casting 欠陥の抑制を検討するため、伝熱凝固解析を用いたマクロ的な凝固現象を評価し、角型鋼塊の casting 形状、押湯形状が引巣欠陥に及ぼす影響を評価した。さらに伝熱凝固解析に必要な熱物性値の評価として、押湯部に使用する保温材の熱物性に関する実験と評価を行った。

これにより、伝熱凝固解析に基づいた  $G/\sqrt{R}$  法により判定される引巣欠陥を定量的に評価することにより、各種 casting 条件が引巣欠陥の生成に及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。 casting 条件のなかでも、保温材は熱物性として発熱量を正確に評価して使用する必要があり、発熱特性を上げることで若干ながら引巣欠陥の改善効果が見られることが分かった。次に、押湯比が増加するほど、また鋼塊重量が減少するほど、引巣欠陥体積が低減することを定量的に示した。さらに生産性と歩留まりを確保し、押湯比と鋼塊重量を一定とした場合には、高径比  $L/D$  を小さくすることが有効であり、 $L/D$  を 1.15 まで小さくすると引巣欠陥体積はゼロとなり、引巣欠陥抑制に有効であることを示した。

第 3 章では、大型鋼塊のマクロ偏析の抑制条件を検討するため、溶質再分配を考慮したマクロ偏析の計算手法を確立し、溶鋼成分、 casting 条件がマクロ偏析に及ぼす影響を評価した。さらに特殊溶解法である VAR 法へも適用し、チタン合金 VAR 鋳塊のマクロ偏析計算として、Ti-10V-2Fe-3Al、T-6Al-4V の解析を行い、VAR の積み上げ式溶解をモデル化し、2 回繰り返し溶解時のマクロ偏析挙動を検討した。

これにより、熱力学データベースによる各合金元素の平衡分配係数を考慮した、溶質再分配による物質収支計算からなる成分偏析予測モデルの妥当性を検証した。大型鋼塊では 2.25Cr-1Mo 鋼 190t、3.5NiCrMoV 鋼 180t、3.0NiCrMoV 鋼 420t 鋼塊、VAR 鋳塊では Ti-10V-2Fe-3Al 合金、T-6Al-4V 合金を用いて検討し、多元系合金の熱力学データベースによる各合金元素の平衡分配係数を考慮し、洗浄限界固相率  $f_{scrit}=0.1\sim 0.2$ 、 $d/D=10\sim 100\text{sec/mm}$  とすることにより、合金種、鋳塊サイズ、対象元素、 casting 方法が異なっても、実験結果とほぼ一致し、本モデルは、工業的に妥当な計算法であることが確かめられた。さらに VAR の積み重ね溶解にも拡張し、マクロ的な合金成分の偏析予測が VAR の 1 次溶解から 2 次溶解の 2 回繰り返し溶解にも適用可能なことを示した。

第4章では、大型鋼塊の逆V偏析の抑制を検討するため、ラボ実験的に逆V偏析を再現する手法に加えて、デンドライト形態を予測するフェーズフィールド法を用いて固液共存領域の凝固組織形態を評価することにより、9Cr1Mo鋼の逆V偏析生成機構と制御条件を明らかにし、逆V偏析抑制のための指針を提示した。

9Cr1Mo鋼における逆V偏析生成条件を明らかにするため、20kgの溶鋼を用いて逆V偏析を実験的に再現し、組織観察と冷却速度 $\varepsilon$  (°C/min)と凝固速度R(mm/min)の熱履歴を用いて評価した結果、V添加鋼では $\varepsilon \leq 0.29R-1.1$ の関係を満たす場合に逆V偏析が生成することが明らかとなった。また合金成分添加の影響については、V,Mo,Wの順に逆V偏析の抑制効果があることが分かった。

さらに合金成分添加により逆V偏析が抑制される要因を検討するため、Fe-C-V,Fe-C-MoおよびFe-C-W合金のデンドライト形態についてフェーズフィールド法での予測を試みた結果、デンドライト側枝の発達傾向はV,Mo,Wの順に大きく、V添加材が他の成分系に比べて最も側枝が発達し易いことがわかった。従って、9Cr1Mo鋼で逆V偏析を抑制するにはV添加が有効であり、従来から知られていた溶鋼密度差の影響以外に、デンドライト形態を微細化させることにより固液共存の濃化液相流動が妨げられ、逆V偏析生成を抑制可能なことを明らかにした。これによりフェーズフィールド法で多元系合金のデンドライト形態を予測することで、逆V偏析抑制の制御指針が得られる可能性を示した。

第5章では、フェーズフィールド法によるデンドライト組織形態の予測技術を適用し、デンドライト形態に及ぼす凝固条件の影響を定量的に評価した。さらに引巣や偏析などの铸造欠陥の生成機構を考慮するために重要である、固液共存領域液相の透過率の理論的な検討を行った。

フェーズフィールド法で計算したデンドライト形態の結果を用いて、フラクタル次元と無次元周囲長の2つの指標によりデンドライト形態を定量的に評価した結果、両者ともデンドライト形態の複雑さを評価するのに有効な指標であることを示した。さらにフラクタル次元と無次元周囲長を活用し、Fe-0.15 mass%C二元系合金とFe-0.15 mass%C-0.5 mass%Mn三元系合金を対象として、デンドライト間の液相流動の透過率を評価した。また無次元周囲長をもとに算出した透過率の値は $1.1 \times 10^{-14}$ から $2.7 \times 10^{-13}$ であり、金属系合金において過去に報告されている実験値とほぼ同等であり、理論的に透過率を求める手法として妥当であることを明らかにした。従ってフェーズフィールド法を用いた理論的な手法により、実用合金においても実験的な測定を行わずに、さまざまな铸造条件下でデンドライト形態を予測することにより合金の透過率を定量的に求められることを示した。

第6章では、铸鋼品の結晶粒の微細化条件を検討するため、セルラーオートマトン法による凝固組織形成シミュレーション手法を適用し、高Mn铸鋼で凝固組織(柱状晶・等軸晶)の制御指針を明確化し、最適な铸造条件の検討を行った。

セルラーオートマトン法による凝固組織予測シミュレーション手法として、KGTモデルに基づくデンドライト成長理論から高Mn鋼の均一核生成パラメータを決定した。さらに铸造時に発生する核生成現象としてビッグバンモデルを採用し、铸造時の铸型壁からの核生成を铸造温度の関数として導入し、これらを考慮することで実機サイズの高Mn鋼铸塊の結晶粒形態を予測可能なことを示した。また高Mn鋼において微細な結晶粒を得るための铸造条件を評価した結果、柱状晶-等軸晶遷移(CET)温度が1648K以下であることを明らかにした。これにより、多元系合金の実用铸塊において結晶粒組織の制御条件を理論的に予測し可能なことを示した。

以上の各章で得られた研究成果は、多元系合金である実用大型铸鍛鋼品の内部に生成する引巣、偏析などの铸造欠陥および結晶粒組織を制御するための新たな指針を与えるものである。また固液共存領域の凝固組織形態や結晶粒形態の生成機構について、実験的な手法に加えて、理論的な凝固組織形成シミュレーション技術を実用鋼塊に適用し、フェーズフィールド法を用いたデンドライト形態の予測をもとに固液共存領域の透過率を定量的に評価する方法を提示するとともに、セルラーオートマトン法による実铸塊の結晶粒形態の予測方法についても提示した。これらは凝固組織形成シミュレーション技術を実用铸鍛鋼品の铸造欠陥と凝固組織の生成機構の解明と制御に応用する手法を示したものであり、工業的、学術的価値が高いと考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 大 笹 憲 一  
副 査 教 授 毛 利 哲 夫  
副 査 教 授 松 浦 清 隆  
副 査 准教授 大 参 達 也

## 学 位 論 文 題 名

### 鋼の casting 欠陥生成機構と制御に関する研究

casting・凝固プロセスにおいて、凝固過程は最も重要な過程であり、これを定量的に解析することは、極めて重要である。 casting材の品質で問題となる要因は引巣、偏析、介在物、割れなどの casting欠陥および凝固組織である。 casting材に生成するこれらの casting欠陥や凝固組織を制御するため、従来の実験的な手法に理論的な数値解析を組み合わせることにより、これらの生成機構を検討することができれば非常に有効な手段となる。

本研究では、実用大型 casting鋼品の内部に生成する引巣や偏析などの casting欠陥を抑制するために、従来の実験および伝熱凝固解析によるマクロ的な凝固現象の検討に加えて、近年凝固現象の基礎的な研究分野で発展してきている凝固組織形成シミュレーション技術に着眼し、実用 casting鋼品への適用にむけた手法を検討し、 casting欠陥および凝固組織の生成機構と制御指針を明確化することを目的とした。本論文は全7章から構成されており、概要は以下の通りである。

第1章は、序論であり、工学的背景及び casting欠陥の制御に関する現状とこれまでの取り組みについてまとめ、本研究の目的について述べた。

第2章では、大型鋼塊の引巣による casting欠陥の抑制を検討するため、伝熱凝固解析を用いてマクロ的な凝固現象を評価し、角型鋼塊の casting形状、押湯形状が引巣欠陥に及ぼす影響を評価した。さらに伝熱凝固解析に必要な熱物性値の評価として、押湯部に使用する保温材の熱物性に関する実験と評価を行った。これにより、伝熱凝固解析に基づいた  $G/\sqrt{R}$  法により判定される引巣欠陥を定量的に評価することにより、各種 casting条件が引巣欠陥の生成に及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。また、押湯比と鋼塊重量を一定とした場合には、高径比  $L/D$  を小さくすることが有効であり、 $L/D$  を 1.15 まで小さくすると引巣欠陥体積はゼロとなり、引巣欠陥抑制に有効であることを示した。

第3章では、大型鋼塊のマクロ偏析の抑制条件を検討するため、溶質再分配を考慮したマクロ偏析の計算手法を確立し、溶鋼成分、 casting条件がマクロ偏析に及ぼす影響を評価した。さらに特殊溶解法である VAR 法へも適用し、チタン合金 VAR casting塊のマクロ偏析計算として、Ti-10V-2Fe-3Al、T-6Al-4V の解析を行い、VAR の積み上げ式溶解をモデル化し、2 回繰り返し溶解時のマクロ偏析挙動を検討した。

第4章では、大型鋼塊の逆 V 偏析の抑制を検討するため、ラボ実験により逆 V 偏析を再現する手法に加えて、デンドライト形態を予測するフェーズフィールド法を用いて固液共存領域の凝固組

織形態を評価することにより、9Cr1Mo 鋼の逆 V 偏析生成機構と制御条件を明らかにし、逆 V 偏析抑制のための指針を提示した。フェーズフィールド計算によるとデンドライト側枝の発達傾向は V, Mo, W の順に大きく、9Cr1Mo 鋼で逆 V 偏析を抑制するには V 添加が有効であり、従来から知られていた溶鋼密度差の影響以外に、デンドライト形態を微細化させることにより固液共存の濃化液相流動が妨げられ、逆 V 偏析生成を抑制可能なことを明らかにした。

第 5 章では、フェーズフィールド法によるデンドライト組織形態の予測技術を適用し、デンドライト形態に及ぼす凝固条件の影響を定量的に評価した。フェーズフィールド法で計算したデンドライト形態を、フラクタル次元と無次元周囲長の 2 つの指標により定量的に評価した。得られた結果に基づいて固液共存領域液相の透過率の理論的な検討を行った。Fe-0.15 mass% C 二元系合金と Fe-0.15 mass% C-0.5 mass% Mn 三元系合金を対象として算出した透過率の値は金属系合金において過去に報告されている実験値とほぼ一致し、本手法による透過率の算出が妥当であることを明らかにした。

第 6 章では、鋳鋼品の結晶粒の微細化条件を検討するため、セルラーオートマトン法による凝固組織形成シミュレーション手法を適用した。鋳造時に発生する核生成現象としてビッグバンモデルを採用し、鋳造時の鋳型壁からの核生成を鋳造温度の関数として導入し、これらを考慮することで実機サイズの高 Mn 鋼鋳塊の結晶粒形態が予測可能なことを示した。これにより、多元系合金の実用鋳塊において結晶粒組織の制御条件を理論的に予測することが可能なことを示した。

第 7 章は本論文の総括である。

これを要するに、著者は実用大型鋳鍛鋼品に生成する欠陥や凝固組織の予測のために、実験的な手法に加えて、新たに数値シミュレーション技術を開発し、これらの手法が鋳造欠陥の生成機構の解明やその制御に有効であることを示したものである。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。