



Title	高強度高導電性を有する銅合金の鋳造過程における数値解析によるミクロ組織および凝固割れ感受性の予測手法の構築
Author(s)	武藤, 有輝
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/101689">https://hdl.handle.net/11094/101689</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名（武藤有輝）	
論文題名	高強度高導電性を有する銅合金の鋳造過程における数値解析によるミクロ組織および凝固割れ感受性の予測手法の構築
論文内容の要旨	
<p>本論文は、高機能電子部品材料として用いられる銅合金であるコルソン (Cu-Ni-Si) 合金において、鋳造過程における凝固割れを抑制することを目的として、ミクロ組織シミュレーションを活用したコルソン合金の凝固割れ感受性の定量的予測手法を構築した研究について記したものであり、全5章で構築した。</p> <p>第一章では、情報化社会の中で促進される電子機器の小型化や高電流密度化に対応するために、高強度および高導電性を有するコルソン合金の重要性を説明した上で、その製造プロセスの最上流工程である溶解鋳造工程に関する課題をまとめた。特に、著しい歩留まり低下を生じる固液共存領域での凝固割れの抑制が喫緊の課題であることを述べた。本課題解決のために、Phase-Field (PF) 法によるミクロ組織の予測と凝固割れ感受性予測手法を構築し、溶解鋳造過程におけるインゴットの凝固割れの抑制を本研究の目的に設定した。関連する各研究分野の研究状況および課題を踏まえ、鋳造過程のコルソン合金に対して「ミクロ組織予測手法の確立」、「凝固割れ感受性（同割れの発生しやすさの指標）の実験的評価」ならびに「ミクロ組織予測手法を活用した凝固割れ感受性の定量的な予測手法の提案」が必要であることを示した。</p> <p>第二章では、コルソン合金の凝固組織に及ぼす冷却速度ならびに添加元素濃度の影響を実験的に評価した。一般的な鋳造過程における表面付近での冷却条件に近い条件で一方向凝固させたデンドライト組織を観察し、一次および二次デンドライトアームスペーシング (P-DAS, S-DAS) は、冷却速度と温度勾配の積もしくは冷却速度の累乗近似で表され、その近似に与える添加元素濃度の影響は軽微であることを明らかにした。加えて Scheil モデルを仮定した凝固シミュレーションを用いて、コアレッセンス固相率に与える <math>Ni_2Si</math> 晶出物の影響について明らかにした。</p> <p>第三章では、コルソン合金の凝固組織形成に関して PF 法を用いた数値シミュレーションを行った。各界面物性値を変化させた条件で PF 計算を行い、第二章で得られた S-DAS との差異が最小となる条件から、複数の組成のコルソン合金に対して実験を再現するために適切な界面物性値を明らかにした。また、最適化された界面物性値を用いた PF シミュレーションを行うことによって、複数の冷却条件におけるコルソン合金の鋳造過程におけるミクロ組織を予測することが可能であることを示した。</p> <p>第四章では、鋳造過程におけるコルソン合金の凝固割れ感受性および冷却速度の影響を実験的に評価した。鋳型温度によって制御された二条件の冷却速度に対して両端拘束試験を行うことで、コルソン合金の凝固割れ感受性を実験的に評価した結果、冷却速度が低下すると凝固割れの発生に必要な最小の拘束端距離が増大することを示した。また、最も広く知られた凝固割れ感受性の予測モデルである RDG モデルを用いてデンドライト間隙における液相の圧力降下量を計算し、凝固割れ発生可否のしきい値であるキャビテーション圧力降下量と比較した。これにより、隣接するデンドライト二次枝同士が結合し強度を発現する固相率であるコアレッセンス固相率について、実験結果を再現し得る範囲を推定可能とした。</p> <p>第五章では、PF 法を活用した凝固割れ感受性の予測手法について検討を行った。第三章で最適化した界面物性値と第四章で測定した両端拘束試験での冷却曲線を用いて、凝固過程における隣接したデンドライト二次枝に関するミクロ組織を二次元のシミュレーションで予測した。本計算結果と第四章の両端拘束試験結果を比較し、曲率および相の状態を示す秩序変数を指標として、二次元の PF 法を用いてコアレッセンス固相率の推定が可能であることを明らかにした。これにより、鋳造過程を模した任意の冷却速度におけるコルソン合金の凝固割れ感受性を、ミクロ組織シミュレーションを活用して定量的に予測可能であることを示した。加えて、コルソン合金の二条件の冷却速度に対するコアレッセンス固相率を推定した結果、冷却速度が小さい条件において同固相率は若干低い値を示すことを明らかにした。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 武藤有輝 )		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	倉敷 哲生
	副査 教授	上西 啓介
	副査 教授	平田 弘征

## 論文審査の結果の要旨

情報化社会の中で促進される電子機器の小型化や高電流密度化に対応するために、高強度および高導電性を有する銅合金であるコルソン (Cu-Ni-Si) 合金の重要性が増している。銅合金の製造プロセスにおいて最上流工程である溶解铸造工程に対しては様々な課題が挙げられるが、特に著しい歩留まり低下を生じる固液共存領域での凝固割れの抑制が喫緊の課題である。

本論文では、铸造過程におけるコルソン合金に対して、ミクロ組織の予測と凝固割れ感受性の定量的予測手法を構築し、コルソン合金の铸造過程における凝固割れの抑制を目的とした検討内容について記載されている。以下に成果を要約する。

(1) コルソン合金の凝固組織に及ぼす冷却速度ならびに添加元素濃度の影響を実験的に評価し、凝固組織形成に関して Phase-Field (PF) 法を用いた数値シミュレーションを行っている。一般的な铸造過程における表面付近での冷却条件に近い条件で一方向凝固させたデンドライト組織を観察し、ミクロ組織と冷却条件の関係および添加元素濃度の影響について明らかにしている。加えて各界面物性値を変化させた条件で PF 計算を行い、複数の組成のコルソン合金に対して実験を再現するために適切な界面物性値を明らかにすることで、複数の冷却条件におけるコルソン合金の铸造過程におけるミクロ組織の予測が可能であることを示している。

(2) 铸造過程におけるコルソン合金の凝固割れ感受性および冷却速度の影響を実験的に評価している。二条件の冷却速度に対して両端拘束試験を行うことで、コルソン合金の凝固割れ感受性を実験的に定量評価している。また、最も広く知られた凝固割れ感受性の予測モデルである RDG モデルを用いてデンドライト間隙における液相の圧力降下量を計算し、キャビテーション圧力降下量と比較している。これにより、隣接するデンドライト二次枝同士が結合し強度を発現する固相率であるコアレッセンス固相率について、実験結果を再現し得る範囲を推定できることを明らかにしている。

(3) PF 法を活用した凝固割れ感受性の予測手法について検討を行っている。両端拘束試験での凝固過程における隣接したデンドライト二次枝に関するミクロ組織を二次元のシミュレーションで予測し、曲率および相の状態を示す秩序変数を指標として、二次元の PF 法を用いてコアレッセンス固相率の推定が可能であることを明らかにしている。これにより、铸造過程を模した任意の冷却速度におけるコルソン合金の凝固割れ感受性を、ミクロ組織シミュレーションを活用して定量的に予測可能であることを示している。

以上のように、本論文は情報化社会の発展の中で重要な銅合金であるコルソン合金に対して、PF 法によるミクロ組織予測および実験的な凝固割れ感受性評価を行った初めての研究である。加えて従来手法と比較して、ミクロ組織シミュレーションを用いたコアレッセンス固相率の推定方法を明確化することで、実験的評価結果を定量的に再現し得る凝固割れ感受性予測手法を新たに構築したものである。本論文にて提案された手法は、他の計算手法と組み合わせることで、数値解析的に凝固割れを抑制し得る適切な铸造条件を予め選定可能とすることが期待される。これより本研究はコルソン合金の工場生産において、安定生産、歩留まり改善、新合金の铸造条件決定など、铸造過程における铸造性改善に寄与する核心となるものであり、工学的な観点からも極めて重要度が高い。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。