

# 学位論文要旨

## 亜鉛合金ダイカストにおける二重乗り欠陥の 数値シミュレーションによる予測

Prediction of Laminations in Zinc Alloy Die-Casting  
by Numerical Simulation

金沢大学大学院自然科学研究科

機械科学専攻

不破 大樹

## Abstract

This study was made to improve the surface quality of zinc alloy die-castings.

In the manufacturing process of zinc alloy die-casting, laminations are a serious problem because they cause blister and peeling defects on the surface of casting products. Thus, it is very important to analytically predict the risk of lamination formation before determining the mold design.

In this paper, I proposed a criterion for predicting the locations of laminations. The criterion was formulated on the basis of the generation mechanism of laminations. The criterion value is estimated from the result of a molten metal flow simulation and can indirectly predict the locations of laminations. As the analytic method in the mold-filling simulation, I adopted a gas-liquid two-phase flow model with a finite element method, and the Cahn-Hilliard equation was adopted to determine the interface between the gas and the liquid. I predicted the locations of laminations for three different types of practical gating system using the mold-filling simulation. The validity of the proposed criterion for laminations was confirmed by comparison of the results of the simulation and the observation of laminations after practical die-casting. It was confirmed that the gating system improved on the basis of the proposed criterion can prevent surface defects caused by laminations.

## 論文内容の要旨

本論文は、亜鉛合金ダイカストにおいて深刻な品質問題となる二重乗り欠陥について、欠陥位置を数値解析上で予測する手法を構築し、欠陥対策となるゲート方案を開発することを目的としたものである。

本論文は全5章で構成されている。

第1章では、研究対象とする二重乗り欠陥が、亜鉛合金ダイカストのめっき処理後のふくれ欠陥をはじめ、はがれ欠陥などの各種鑄造欠陥の起点となることを示し、さらに、ダイカストの湯流れに関する従来の研究をふまえて、二重乗り欠陥を予測する技術を開発することの重要性を述べた。

第2章では、鑄造欠陥予測の基盤となる湯流れシミュレーションの手法を述べた。本研究では、解析の高精度化と効率化を目的として、自由表面流解析手法である拡散界面モデルをダイカストの湯流れ問題へ適用した。Cahn-Hilliard方程式とNavier-Stokes方程式を同時に解くことで、複雑なアルゴリズムの追加なく、気液界面の移流が安定的に計算される。さらに、湯流れ問題の特徴であるエアイベントからの排気を解析で適切に考慮するため、境界条件を切替える手法を提案した。実際の金型開発の現場における活用を意識して、複雑な鑄物形状に対する解析モデルの形状再現性とメッシュ生成の容易さから、四面体要素を用いて有限要素法で解析した。この数値解析法の有用性を確認するため、まず、スクイズキャストの板状キャビティを例に湯流れを解析して、キャビティ内の充填状態と流速ベクトルを可視化した。その結果、本数値解析法でエアイベントの機能は適切に模擬され、気液二流体の挙動を安定的に計算できることを確認した。さらに、溶湯と金型との接触角が湯流れ時の湯先の位置に影響を与え、これを模擬できることを確認した。次に、実際の複雑なゲート方案を対象に、亜鉛合金ダイカストの湯流れシミュレーションと実際のダイカストを実施した。ここでは、ガスによる背圧の影響を検証するため、特にブローホール（気泡）の発生に着目した。湯流れシミュレーションから定性的に予測されたブローホールの位置は、実際の鑄造品とよく一致した。以上を通して、ダイカストの湯流れ問題に対する本数値解析法の有用性を確認できた。

第3章では、湯流れシミュレーション結果から、簡便且つ定量的に二重乗り欠陥を予測するため、欠陥の形成過程に基づく予測指標を提案した。まず、二重乗り欠陥の形成メカニズムを詳細に述べ、湯流れシミュレーションから得られる溶湯流れのせん断速度に着目した予測手法について、指標値の定式化を含めて論じた。この予測指標値の計算式を第2章で述べた解析コードに組み込み、指標値の空間分布を推定することで、二重乗り欠陥の予測位置が可視化できる。提案指標の妥当性を確認するため、実際の複雑なゲート方案を対象に、亜鉛合

金ダイカストの湯流れシミュレーションと実際のダイカストを実施した。実際に鋳造後、めっき処理した製品には二重乗り欠陥によってふくれが生じた。この欠陥の位置は、湯流れシミュレーションの提案指標から予測された位置とよく一致した。さらに、別の形状のゲート方案を用いた場合にも、欠陥の予測位置は実際の欠陥位置とよく一致した。このように、本研究で提案した予測指標の妥当性が示され、ゲート方案に依存する欠陥位置を適切に推定でき、様々なゲート方案に適用可能であることが確認できた。

第4章では、第3章で構築した二重乗り欠陥の予測技術を実用展開した。具体的に、欠陥予測技術を実際の金型開発に活用し、二重乗り欠陥を抑制するゲート方案の改良を提案した。まず、ゲート位置を適切に改良するため、湯流れシミュレーションを実施した。これに基づき改良されたゲート方案は、従来の試作用ゲート方案よりも二重乗り欠陥が抑制され、二重乗りが原因で生じるふくれ欠陥の発生率は0.1%程度と予測された。実際に、改良ゲート方案を用いたダイカストで、ふくれ欠陥率は0%となった。改良ゲート方案の採用で品質は大幅に改善して、二重乗り欠陥の予測技術が実際の金型開発環境下で有用であることが実証できた。

第5章では、各章の結果を総括し、結論を述べた。

製造業では部品の軽量化を目的とした薄肉化や、顧客要望の細分化による多品種化が進み、ダイカスト製の部品も形状が複雑化している。信頼できる製品を短時間で開発完了して競争力を得ていくため、今後、鋳造時の湯流れの把握はより重要になってくると考えられる。二重乗りによるふくれ欠陥は、ダイカスト直後には表面に現れにくく、研磨、めっき処理を経て現れる現象であり、予測が困難な現象の一つである。本研究では、二重乗り欠陥を対象に、数値解析上で欠陥位置を予測する手法を開発した。この手法により、二重乗りが原因となるめっき処理後のふくれ欠陥の客観的な定量予測を簡便に実施することが可能となり、今後の金型開発に非常に有効となる成果を得た。

## 学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

亜鉛合金ダイカストにおける二重乗り欠陥の数値シミュレーションによる予測

Prediction of Laminations in Zinc Alloy Die-Casting by Numerical Simulation

2. 論文提出者 (1) 所属 機械科学 専攻

(2) 氏名 不破 大樹

3. 審査結果の要旨（600～650字）

...当該学位論文に関し、令和元年8月1日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。令和元年8月2日に口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

...亜鉛合金ダイカストは、工業的に広く利用されているが、各種鑄造欠陥が問題となっており、特に二重乗り欠陥は、めっき処理後のふくれや、はがれ欠陥などの起点となり深刻な問題である。鑄物の表面品質を向上するため、二重乗り欠陥の発生を予測することは非常に重要である。

...本論文は、二重乗り欠陥を簡便且つ定量的に予測する指標値を提案し、実機を用いた実験によりその指標値の妥当性を検証した結果をまとめている。溶湯流れのせん断速度を用いて欠陥予測の指標値を定式化し、シミュレーションにより空間分布の推定を可能としている。湯流れシミュレーションに、Cahn-Hilliard 方程式を採用する拡散界面モデルを適用し、実際の複雑なダイカストのゲート方案を解析した結果、欠陥の予測位置は実際とよく一致して予測指標の妥当性を明確にしている。最終的には、その予測技術に基づきゲート方案を改良することで鑄造欠陥が大幅に改善できることを明らかにし、欠陥予測技術の有用性を実証している。

...以上より本論文は、ダイカストの欠陥予測と提案指標に基づいた欠陥発生の予防が可能な数値シミュレーションの技術を開発しており、学術的並びに工学的貢献度が高いと評価できる。よって本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）