

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

FEM熱応力解析による鋳物の冷却過程における変形予測のための生型の構成方程式の実験的構築とバリデーション

Experimental construction and validation of constitutive models of green sand mold for predicting deformation of castings during cooling process by FEM thermal stress analysis

申請者

沖村 泰彦
Yasuhiko OKIMURA

総合機械工学専攻 輸送機器・エネルギー材料工学研究

2023年12月

第 1 章 社会的背景

砂型鋳造は、中空部分を有するような複雑な形状の機械部品を製造するために不可欠な方法であり、種々の輸送機器に搭載されるエンジンや車体の主要部品の製造において、広く用いられている。砂型鋳造の冷却過程において、鋳物に発生する変形により、その寸法が設計寸法に収まらないことが問題となっている。近年、FEM 熱応力解析により設計の段階で変形を予測し、鋳造方案や設計を適切に変更することで変形を未然に防ぐことが求められている。しかし、解析による変形予測は、実用上必要な予測精度を未だ実現していない状況にある。解析には、鋳物と鋳型それぞれの力学的特性を表す構成方程式が必要となる。本研究は、鋳型による鋳物の熱収縮の拘束が鋳物の変形に影響を及ぼすという従来の知見に着目し、鋳型の構成方程式の実験的な構築とバリデーションを行う。さらに、FEM 熱応力解析により、型拘束力や鋳物の変形の予測精度を検証する。砂型鋳造では、骨材やバインダーの異なる種々の砂型が用いられるが、本研究は、国内での鋳物の生産量のうち、合金別で最も多く製造される鉄系鋳物の鋳造において、主型としての需要が大きい生型を対象とする。

第 2 章 従来研究

本章では、以下の視点で従来研究の調査を行い、第 1 章で述べた課題に関して従来得られてきた知見を整理した。

(調査視点①) 砂型の拘束が鋳物の変形に及ぼす影響

解析および実験において、鋳型による鋳物の熱収縮の拘束が、鋳物の変形に影響を及ぼすことが明らかにされてきた。これらの研究は、型拘束を適切に考慮しなければ、解析は鋳物の変形を予測することができないことを示唆している。

(調査視点②) 砂型の拘束を考慮した FEM 熱応力解析による鋳物の変形予測

鋳物の変形予測のための FEM 熱応力解析において、砂型に適切な構成方程式を与えて拘束を考慮することで、鋳物の変形を精度よく予測できると報告されてきた。しかし、鋳物が受ける型拘束力については、予測精度が検証されていないか、検証されていても、実験値に対して数倍の誤差が生じていることが分かった。

(調査視点③) 砂型の力学的特性のモデルとして使用されてきた構成方程式

FEM 熱応力解析において砂型の拘束を考慮するため、従来砂型のモデルとして用いられてきた構成方程式を調査した。その結果、生型の構成方程式として、Saada ら (1996) が拡張 Cam-Clay (MCC) モデルを構築し、三軸圧縮試験の数値解析によってバリデーションを行っていることが分かった。

上記の調査結果を踏まえて、本研究は、MCCモデルの生型に対する実験的な構築とバリデーションを行い、同モデルをFEM熱応力解析に適用して、型拘束力と鋳物収縮量の予測精度を検証することを当初の目的とした。しかし、第4章で述べるように、MCCモデルには生型の構成方程式としては欠陥があることが分かった。よって、本研究はこの欠陥を取り除いた生型の新しい構成方程式を提案し、そのバリデーションを行った。

第3章 三軸圧縮試験および圧密試験による生型の修正 Cam-Clayモデルの実験的構築

MCCモデルの構築に必要な材料定数の値を決定するため、生型に対する三軸圧縮試験および圧密試験を行った。これらの試験のため、将来100°C以上の高温試験を実施可能な装置を開発した。この装置を用いた室温での三軸圧縮試験により、材料定数 M （臨界状態直線の傾き）の値を求めた。また、開発した装置による試験結果のベリフィケーションのため、従来室温での三軸圧縮試験に用いられてきた水圧式装置を用いて、同じ試験片に対して M の値を決定した。それらの値を比較したところ、開発した試験装置は、従来の水圧式装置による M 値を8%程度の相対誤差で再現した。本研究で開発した三軸圧縮試験装置は、生型試験片に対する高温試験において、最大主応力の真応力を測定可能な世界初の装置である。

第4章 三軸圧縮試験のFEM応力解析と実験の比較によるMCCモデルのバリデーションおよびFEM熱応力解析への適用

前章で構築したMCCモデルを三軸圧縮試験のFEM応力解析に適用し、実験と解析の応力-ひずみ曲線を比較することで、モデルのバリデーションを行った。その結果、以下の点において、MCCモデルは実験値を再現することができなかった。

(a) 実験による応力-ひずみ曲線は明確な降伏点を持たず、載荷直後から徐々に塑性変形が生じた。一方、MCCモデルによる解析は明確な降伏点を示した。

(b) 解析による応力-ひずみ曲線は、降伏点まで応力が上昇してピークを示した後、応力が減少した。この現象は、MCCモデルが備えるダイレイタンスーを再現する機能によるが、実験の曲線にはダイレイタンスーによるピークは見られなかった。

また、上記のように欠陥を有するMCCモデルを、フランジ付き鋳鉄鋳物の冷却過程におけるFEM熱応力解析に適用し、型拘束力と鋳物収縮量の予測を試みた。型拘束力の実験値と解析値を比較した結果、鋳物の共晶凝固膨張に対する拘束力が実験値に対して数倍過大に計算され、このときの鋳物の膨張量が実験値の半分程度に抑制されることが分かった。よって、次章において、MCCモデルの上記の欠陥を解決した新しい構成方程式を提案した。

第 5 章 生型の改良 Drucker-Prager モデルの提案および実験的構築とバリデーション

前章で述べた MCC モデルの各欠陥に対して、以下の手段により解決を試みた。

(a) 「下負荷面」の提案と導入

従来、滑らかな降伏を再現するため、既存の降伏曲面の下に新たに「下負荷面」が導入されてきた。本研究では、下負荷面の降伏関数を新たに提案した。

(b) 降伏関数の変更

ダイレイタンスーによるピークがない材料の場合、Drucker-Prager (DP) の降伏基準が用いられてきたことから、主たる降伏曲面は DP モデルのものをを用いた。

上記の改良を施した「改良 Drucker-Prager (RDP) モデル」の材料定数を、第 3 章で述べた三軸圧縮試験のデータより決定した。また、第 4 章と同様に、三軸圧縮試験の FEM 応力解析によってバリデーションを行ったところ、RDP モデルは応力-ひずみ曲線の実験値を概ね 15%以下の誤差で再現した。さらに、同モデルをフランジ付き鋳物の FEM 熱応力解析に適用した。その結果、依然として鋳物の共晶凝固膨張に対する反力は実験値に対して数倍過大に計算された。注湯直後、鋳物の近傍にて水分凝縮層が発生し、そこでは造型時よりも生型の強度が低下することが知られている。FEM 熱応力解析によって型拘束力を予測するためには、こうした温度に依存する生型の力学的特性を考慮する必要があることが示唆された。

第 6 章 生型の水分凝縮層に対する RDP モデルの実験的構築とバリデーション

本章では、前章で述べたように温度に依存する生型の力学的特性を FEM 熱応力解析に適用するため、生型の水分凝縮層の力学的特性を実験的に調査し、その RDP モデルの構築とバリデーションを行った。まず、第 3 章で使用した生型試験片に水蒸気を透過し、水分凝縮層を再現した。この試験片に対して三軸圧縮試験を行い、RDP モデルの構築に必要な材料定数の値を決定した。また、第 4 章と同様に、三軸圧縮試験の FEM 応力解析による応力-ひずみ曲線を実験値と比較し、水分凝縮層の構成方程式としての RDP モデルのバリデーションを行った。その結果、RDP モデルは、水分凝縮層の三軸圧縮試験の実験における応力-ひずみ曲線を精度よく再現した。FEM 熱応力解析において、温度依存の力学的特性を再現するためには、温度によって使用する構成方程式を切り替えることは困難であると考えられる。RDP モデルを用いれば、材料定数の値を温度の関数とするだけで、造型したままの生型と、水分凝縮層の両方を同一のモデルで再現可能であることが分かった。

第 7 章 結言

本研究は、造型時の生型と水分凝縮層のモデルとして有用な、RDP モデルを提案した。同モデルは、FEM 熱応力解析において生型の力学的特性の温度依存性を考慮することを可能とし、鋳物の変形の予測精度向上に資することが期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 沖村 泰彦

印

(2023年 2月 7日 現在)

種別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 査読付き 研究論文	<p>1) ○ Yasuhiko Okimura, Rei Imamura, Kohei Shimo, Takashi Hanai, Yusuke Kato, Kunihiro Hashimoto, Muhammad Khairi Faiz, Toshimitsu Okane, Tomoyuki Miyashita, Makoto Yoshida: Experimental construction and validation of revised Drucker-Prager model using finite element method for moisture condensation zone in bentonite-bonded silica sand, Journal of Materials Engineering and Performance (2024年1月17日 原稿受理).</p> <p>2) 中村侑未, 久野拓磨, 沖村泰彦, 神戸洋史, 岡根利光, 吉田誠: 凝固過程におけるAl-7%Si合金と金型間の接触状態及び離型剤が熱伝達係数に及ぼす影響, 鑄造工学, 95 (2023年10月), 552-560.</p> <p>3) ○ Yasuhiko Okimura, Yusuke Kato, Hiroyasu Makino, Kunihiro Hashimoto, Yasuhiro Maeda, Toshimitsu Okane, Muhammad Khairi Faiz, Hideo Komine, Tomoyuki Miyashita, Makoto Yoshida: Proposition of new yield criterion for green sand mold and its experimental validation by FEM stress analysis of triaxial compression test, Journal of Materials Processing Technology, 318 (September 2023), 118020.</p> <p>4) 平野椋己, 尾崎祥梧, 永田益大, 松下彬, 坂本敏夫, 折尾寛太, 沖村泰彦, 岡根利光, ムハマドハイリファイズ, 吉田誠: Al-2%Si合金の共晶凝固過程における力学特性に及ぼすSrの影響, 軽金属, 73 (2023年9月), 447-454.</p> <p>5) 土屋蒼, 永田益大, 熊木拓海, ムハマドハイリファイズ, 沖村泰彦, 岡根利光, 吉田誠: Al-Mg-Mn系ダイカスト合金におけるAE法を用いたSr添加時の凝固割れ感受性低減メカニズムの解明, 軽金属, 73 (2023年7月), 315-321.</p> <p>6) 中村侑未, 高木健輔, 寺山朗, 頃安貞利, 志賀英俊, 神戸洋史, 前田安郭, ムハマドハイリファイズ, 沖村泰彦, 永田益大, 岡根利光, 宮下朋之, 吉田誠: アルミニウム合金溶湯とフラン自硬性積層造形鑄型の接触状態によって変化する熱伝達係数の推定, 鑄造工学, 95 (2023年4月), 183-190.</p>
2. 査読付き 研究速報	<p>1) 今村怜, 沖村泰彦, 志茂康平, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 松浦誠, 前田安郭, 岡根利光, 宮下朋之, 吉田誠: 生型の水分凝縮層圧密試験における水分増加方法の違いによる応力ひずみ関係の比較, 鑄造工学, 95 (2023年1月), 30-33.</p>
3. 総説	<p>1) 沖村泰彦, 神戸洋史, 吉田誠: 弾塑性クリープ構成式を用いたFEM熱応力解析による鑄物の残留応力と変形予測シミュレーションおよび実験的検証, 素形材, 63 (2022年3月), 25-31.</p>
4. 講演	<p>1) ○ Yasuhiko Okimura, Kazuma Nakamura, Takashi Hanai, Yusuke Kato, Kunihiro Hashimoto, Toshimitsu Okane, Makoto Yoshida: Effect of forming pressure of a green sand mold on the contraction of casting and restraint force from the mold during the cooling process of flanged gray iron casting, Extended Abstract of the 16th Asian Foundry Congress (December 2023), 75-78.</p> <p>2) Naofumi Fukui, Rei Imamura, Yasuhiko Okimura, Takashi Hanai, Yusuke Kato, Kunihiro Hashimoto, Toshimitsu Okane, Yuichi Motoyama, Makoto Yoshida: Construction of the modified Cam-Clay model by triaxial compression and consolidation tests for a green sand mold with fused ceramic sand, Extended Abstract of the 16th Asian Foundry Congress (December 2023), 68-70.</p> <p>3) 小林海人, 中村胤馬, 沖村泰彦, 花井崇, 橋本邦弘, 加藤裕介, 本山雄一, 岡根利光, 吉田誠: 生型造形時のスクイズ圧が鑄鉄鑄物のフランジ部反り変形に及ぼす影響, 日本鑄造工学会全国講演大会, 181 (2023年6月), 19.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 沖村 泰彦 印

(2023年 2月 7日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	4) 福井尚文, 沖村泰彦, 今村怜, 花井崇, 加藤裕介, 橋本邦弘, 岡根利光, 本山雄一, 吉田誠: 溶融系人工砂を用いた生型に対する三軸圧縮・圧密試験による修正Cam-Clay構成式の構築, 日本鑄造工学会全国講演大会, 181 (2023年6月), 73.
	5) 沖村泰彦, 加藤裕介, 牧野泰育, 橋本邦弘, 岡根利光, 吉田誠: 三軸圧縮試験のFEM応力解析を用いた生型の修正Cam-Clay構成式の実験的バリデーションと新しい構成式の提案, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2023年4月), 68.
	6) 中村侑未, 高木健輔, 寺山朗, 頃安貞利, 志賀秀俊, 神戸洋史, 前田安郭, ムハマハイリファイズ, 沖村泰彦, 永田益大, 宮下朋之, 岡根利光, 吉田誠: 積層鑄型とアルミニウム合金溶湯の間の熱伝達係数算出方法とその課題, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2023年4月), 112.
	7) 小粥一郎, 中村胤馬, 沖村泰彦, 平方実, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 生砂型の拘束を考慮した鑄鉄鑄造時の冷却過程における重り載荷時の反り変形量の連続的測定, 日本鑄造工学会全国講演大会, 179 (2022年6月), 17.
	8) 今村怜, 沖村泰彦, 志茂康平, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 鑄造時の水分凝縮層を考慮した生砂型のCam-Clay構成式の構築とバリデーション, 日本鑄造工学会全国講演大会, 179 (2022年6月), 18.
	9) 西航平, 吉田秀喜, 奥村幸平, 沖村泰彦, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 静水圧依存性および温度依存性を考慮可能な生砂型のMohr-Coulomb構成式の構築, 日本鑄造工学会全国講演大会, 179 (2022年6月), 19.
	10) 沖村泰彦, 佐野友祐, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 焼結系人工砂による生型を用いた鑄鉄鑄造時の冷却過程における型拘束力と鑄物収縮量の連続的測定, 日本鑄造工学会全国講演大会, 178 (2021年4月), 37.
	11) 志茂康平, 沖村泰彦, 今村怜, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 宮下朋之, 吉田誠: 鑄造時の水分凝縮を考慮した生砂型のCam-Clay構成方程式の構築, 日本鑄造工学会全国講演大会, 178 (2022年4月), 38.
	12) 沖村泰彦, 豊田拓也, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 生砂型の拘束を考慮したFEM熱応力解析による鑄鉄鑄物の重り載荷時の反り変形の予測, 日本鑄造工学会全国講演大会, 177 (2021年10月), 60.
	13) 平方実, 中村胤馬, 沖村泰彦, 豊田拓也, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 生砂型の拘束を考慮した鑄鉄鑄造時の冷却過程における鑄物収縮量と型拘束力の連続的測定, 日本鑄造工学会全国講演大会, 177 (2021年10月), 61.
	14) 中村胤馬, 平方実, 沖村泰彦, 豊田拓也, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 生砂型に重りを載荷した際の鑄鉄鑄造時の冷却過程における鑄物収縮量と型拘束力の連続的測定, 日本鑄造工学会全国講演大会, 177 (2021年10月), 62.
	15) 沖村泰彦, 畑本麻斗, 牧野泰育, 橋本邦弘, 加藤裕介, 岡根利光, 吉田誠: 生砂型の力学特性取得のための三軸圧縮試験装置の開発と静水圧を考慮可能な構成式の構築, 日本鑄造工学会全国講演大会, 176 (2021年4月), 59.