

みやもと ゆ たか
氏 名 宮 本 諭 卓
授 与 学 位 博士 (工学)
学位授与年月日 平成31年3月27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 凝固時の膨張収縮挙動を考慮した球状黒鉛鑄鉄の引け巣予測
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 川崎 亮
東北大学教授 及川 勝成

論 文 内 容 要 旨

鑄造品は各種設備や機械部品に使用されているが、鉄鋼・素材産業は国内外ともに厳しい事業環境の中にあり、ユーザーから更なるコストダウンを強いられている。その中で鑄鋼材料から鑄鉄材料への代替は、有効なコストダウン方法の一つとして検討されることが少なくない。火力発電分野を例に挙げると、稼働中高温に晒されるケーシングやバルブなどの部品には耐熱鑄鋼材料が適用されているが、それ以外の部位には鑄鉄材料が適用される場合がある。

鑄鉄材料は鑄鋼材料よりも安価かつ短納期で製造可能であるが、いわゆる普通鑄鉄は、鑄鋼と比較して強度および韌性が著しく低いため、鑄鋼材料を代替するには球状化处理を施して鑄鋼と同等強度を有するようにした球状黒鉛鑄鉄を選択する必要がある。球状黒鉛鑄鉄はその名の通り黒鉛が球状に晶出する。この黒鉛形状により機械的性質が飛躍的に向上し信頼性を獲得したことで、国内の生産比率は他の鉄系素材とは対称的に右肩上がりに増加している。今後はこれまで検討されてこなかった部品においても、鑄鋼から鑄鉄への材質転換の検討が進むものと考えられる。

材質転換時の注意点として、鑄鉄材料は鑄鋼のようには溶接補修ができないため、引け巣欠陥が発生しないように製造していかなければならない。鑄鉄鑄物は凝固時の共晶黒鉛膨張を最大限に利用すると健全な鑄物が製造できるとされており、基本的に引け巣を気にする必要はないが、球状黒鉛鑄鉄は化学成分、鑄型、形状等の製造条件によって引け巣発生傾向が異なることが知られており、凝固シミュレーションを用いて引け巣欠陥の発生を予測し対策を施す必要がある。鑄鋼の引け巣欠陥予測に有効である修正温度勾配法は、固液共存領域内の溶湯補給の流れをダルシー流れで近似させることにより、引け巣欠陥を精度良く予測することが可能であるが、球状黒鉛鑄鉄においては、今日まで黒鉛の球状化機構や引け巣発生機構が解明されておらず、球状黒鉛鑄鉄専用の引け巣欠陥予測法は種々開発されているものの、有効な予測法はまだ開発されていない。また、引け巣予測の先行研究を整理すると他にも、実機鑄造品のように複雑形状や厚肉および大型品での現象は考慮されていないこと、引

け巢予測にて平衡状態の黒鉛晶出量や共晶密度を計算していること、実際の操業をイメージした条件での実験結果が示されていないことが予測法開発の課題として明らかになった。

そこで本研究では、膨張収縮の受け渡しを直接の要因として引け巢の発生を計算、非平衡（時間軸）の凝固過程を前提とした膨張収縮モデルの構築、実機铸造品もしくはそれに近いモデルでの検討、実操業条件（配合材料、フェーディング時間、鑄型強度等）での実験、既存の鑄造シミュレーションソフトをベースに球状黒鉛鑄鉄鑄物の凝固中の膨張収縮のタイミング、割合、量を算出しこれらの受け渡しを再現することで引け巢の発生を予測する手法を開発し、その中で鑄物モジュラスによる膨張収縮挙動の変化について検討し、鑄物の大きさによる凝固形態の変遷と引け巢発生傾向について明らかにした。また、実機铸造品への適用を試み、実用性を満足することを確認した。

本論文は6章からなる。第1章は序論である。第2章では、凝固時の膨張収縮挙動をモデル化し収縮量を引け巢指標とし評価する手法について検討した。第3章では、予測に適用する鑄物モジュラスの膨張収縮挙動の適用手法および見かけ上の膨張収縮挙動の考慮についての検討を行った。第4章では、予測法を実体モデルへ適用し実際の引け巢発生傾向との比較および従来の予測法との比較を行った。第5章では、本予測法を実機铸造品へ適用し引け巢予測精度の問題を解消し実機铸造品への適用可能レベルの予測精度が得られることを示した。第6章は総括である。

第1章では、世界情勢と関連した鑄造品の現状から研究の動機と目的を述べ、黒鉛球状化機構、引け巢生成条件、引け巢予測法に関する先行研究を整理し、膨張の原点である黒鉛生成・成長についての実証が少ないこと、実際の凝固のように時間軸をイメージした引け巢の予測手法が確立されていないことを問題点とし、凝固時の膨張収縮挙動を考慮した球状黒鉛鑄鉄鑄物の引け巢予測法を確立するための研究方針を述べた。

第2章では、凝固時の膨張収縮の挙動を基に引け巢を評価する手法を確立するために必要とされる挙動の算出と、既存のシミュレーションソフトにて膨張収縮挙動がイメージ通りに機能するための適用方法を検討した。また予測手法が的確であるかを各種鑄造方案の実験結果と比較することにより検証した。具体的には、従来の予測法の問題点であった凝固時の膨張収縮挙動は理論体積変化量を実験鑄造材の凝固冷却曲線から読み取った凝固ステップ毎に振り分けることで算出した。既存のシミュレーションソフトへの適用は凝固収縮による引け巢量の定量予測手法を応用し、凝固末期の引け巢発生量を流動限界固相率による判定から、収縮する未凝固部と接する膨張要素との収支による判定へと変更した。これらを採用することにより、より実際に近い引け巢予測が可能になり、膨張により引け巢が発生しないという予測も可能となった。各種鑄造方案の実験結果と解析結果の比較では、開発手法を用いると引け巢が発生する鑄造材、引け巢が発生しない鑄造材ともに予測が可能であることを確認した。

第3章では、前章で膨張収縮挙動を算出する手法として解析対象の鑄造材から凝固曲線を取得したのに対し、実用性を考慮し膨張収縮挙動を事前準備して解析対象に適用する手法を検討した。凝固時間で膨張収縮挙動を整

理するために凝固時間と相関関係にある鋳物モジュラスが異なる立方体鋳造材を鋳造しそこから凝固冷却曲線を取得し反応温度、凝固終了角度、凝固速度膨張収縮挙動を比較した。これらの結果から反応温度、凝固終了角度は鋳物モジュラス 3cm 以上では変化が緩やかになり数値的に変化が見られなくなる、膨張収縮挙動も同様に変化が見られなくなる、凝固速度は鋳物モジュラスが大きくなると小さくなっていくことを確認したため凝固形態が粥状凝固から準粥状凝固へ遷移していくことが考えられた。凝固形態が遷移すると鋳造材全体の見かけ上の膨張収縮挙動が変化すると考え、潜熱放出パターンを線形に設定することで膨張収縮挙動パラメータを変化させることなく、見かけ上の膨張収縮挙動を表現できることを見出した。これらの知見をもとにした予測結果と立方体鋳造材の実験結果を比較し、凝固速度が小さい鋳物モジュラス 3cm 以上の立方体にて予測が可能であることを確認した。これによって、本予測法は凝固速度が遅い準粥状凝固する鋳造品にも適用可能であることが明らかになった。

第4章では、第2章、第3章を受けて、本予測法が実際の凝固現象を表現できるかを実体モデルの実験結果と比較し検証した。球状黒鉛鋳鉄鋳物は鋼鋳物とは逆の特徴を有しており体積が大きい程引け巣発生量は少ない。実体モデルはその特徴を持つ大きさの異なる凸が側面に4つ配置された形状である。引け巣発生予測結果は実験結果と同様に凸部が大きくなると引け巣発生予測量が減少する傾向を示した。引け巣発生予測位置は解析上の最終凝固部よりも上方で、実体モデルと同様の位置に発生することを確認した。従来の予測法ではこれら2つの条件を同時に満たすことはできず引け巣予測精度が向上したことが明らかになった。本予測法で適用した膨張収縮挙動パラメータは鋳物モジュラス 2cm, 4cm, 10cm であり、実際の引け巣発生状況に最も近い結果は鋳物モジュラス 2cm を適用した場合であった。実体モデルの鋳物モジュラスは 5cm 前後であるため、鋳物モジュラスだけでなく形状的な要因等でみかけよりも小さなモジュラスを適用しなければならない場合があることが考察された。

第5章では、本予測法が実際の凝固現象を表現できるかを実機鋳造品の結果と比較し検証した。凝固収縮挙動を鋳造シミュレーションソフトに適用し引け巣予測結果を実験結果と比較させた。また実機へ本手法を適用させた結果、鋳造品に適切な膨張収縮挙動を適用するには、凝固殻が生成した時期での未凝固部の最高温度と固相線温度の差が近似するものを選択することで、従来の予測法と比べて実際の引け巣分布に最も近くなることを確認した。また、湯流れ - 凝固連携解析を行うことで、凝固解析のみの場合よりも引け巣発生分布が実際の結果に更に近くなることを確認した。

従来の予測法では、引け巣発生分布が分からない、健全部位にも引け巣予測が示されるという課題があったが、本予測法では実機鋳造品にて、引け巣発生部位にのみ引け巣が予測表示され、本解析及び膨張収縮挙動を実機に適用することで、従来の解析手法よりも引け巣予測精度が向上することが明らかになった。

第6章は、本論文の総括であり、各章の要点をまとめた。

本研究は、実現象に即した膨張収縮のやりとりをモデル化した計算プロセスを開発し、さらにそれを実機鋳造

品の引け巣予測に適用するための技術を明らかにするものである。本プロセスにより予測された膨張収縮量は、高品質が要求される球状黒鉛鋳鉄製造品に適用可能であることを示した。

今後の方向性として、湯流れ解析との組み合わせや専用のプログラムでの予測などに展開していき、更に精度の良い予測法を追及していく。

論文審査結果の要旨

ユーザからのコスト低減の要求に対し、鋳鋼鋳物を鋳鉄鋳物で代替することが考えられるが、鋳鉄では鋳鋼のように溶接補修ができないため引け巣欠陥の発生があってはならない。鋳鉄では、一般に液体収縮や凝固収縮以上の黒鉛の膨張があるため引け巣は発生しにくいとされているが、条件によっては引け巣欠陥が発生することが知られている。鋳鋼品を強度に優れた球状黒鉛鋳鉄品で代替するためには引け巣欠陥の発生を無くする技術の確立が不可欠である。鋳鋼に対しては、いわゆる凝固シミュレーションによって引け巣欠陥の発生を机上で予測できる技術（修正温度勾配法）が開発されているが、球状黒鉛鋳鉄に対しては、黒鉛が球状化する理由や引け巣欠陥が発生するメカニズムが未だに解明されておらず有効な引け巣欠陥発生予測法がない。本研究では、凝固中に晶出する各相の割合と各相の収縮・膨張量を見積もることで、既存の凝固シミュレーションソフトによって精度良く引け巣の発生を予測できる手法を提案し、実製品に適用することでその予測精度を評価することにした。

本論文は6章からなり、第1章は序論、第2章は膨張収縮モデルの検討、第3章は膨張収縮挙動の適用手法検討、第4章は引け巣予測法の実体モデルへの適用、第5章は引け巣予測法の実機鋳造品への適用、第6章は総括である。

第1章では、既出の黒鉛球状化モデルや球状黒鉛鋳鉄用凝固シミュレーションモデルについて述べ、球状黒鉛鋳鉄の引け巣欠陥発生予測に対する技術課題を挙げ、本研究の目的について述べた。

第2章では、実測より得られた冷却曲線から凝固時に晶出する各相の割合と収縮・膨張量の関係を推定する手法と得られた収縮・膨張パターンを既存の凝固シミュレーションソフトで考慮する手法の説明と提案手法の精度を確認するために行った鋳造実験結果について述べている。試験片のマクロ・ミクロ組織を調べたところ、従来法に比較し提案手法により精度良い引け巣予測ができることを確認した。

第3章では、冷却曲線の実測無しで凝固時に晶出する各相の割合と収縮・膨張量の関係を推定する手法を検討している。具体的には、凝固時間と相関のあるモジュラス（体積/表面積）が1, 2, 3, 4, 5である立方体形状の球状黒鉛鋳鉄の鋳造実験を行い測温することでモジュラス毎の凝固速度等を算出し、対応する収縮・膨張パターンを求めた。

第4章では、第3章で得られた収縮・膨張パターンとそれを利用した凝固シミュレーション法の有効性を評価するために行った鋳造実験結果について述べている。側面に厚さの異なる凸状部を有する底なし升形状鋳物に発生した引け巣欠陥を提案手法で評価したところ従来法に比較しより精度良く引け巣予測ができることを確認した。

第5章では、3つの実製品に対して提案手法を適用した結果について述べている。第4章の結果より、局所的なモジュラスを適用するよりは、鋳物表面部と鋳物内部との温度差を考慮した収縮・膨張パターンを用いるのが良いことが分かったので、3つの実製品の凝固問題に適用したところ引け巣欠陥の発生の有無を精度良く予測できることを確認した。

第6章では、本論文の総括について述べた。

以上、球状黒鉛鋳鉄の引け巣欠陥発生予測に有効な凝固シミュレーション手法を提案し、鋳造実験によりその有効性について検証した結果についてまとめたものである。本研究により得られた知見を元に実製品を鋳造したところ、健全な球状黒鉛鋳鉄鋳物を製造するための技術を確立することができており、金属フロンティア工学の発展に寄与するところが少なくない。

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。