

有限要素法を用いた鑄造凝固・熱変形

シミュレーションの研究

学位論文内容の要旨

近年の環境問題意識の高まりを受けて、自動車への軽量化・低燃費化への要求は強まっており、自動車部品の主要な製造手法である鑄造においても例外ではない。低コストでかつ高品質な鑄造部品を製造するための技術としての数値シミュレーションの取り組みは、1970年代に熱伝導方程式の数値解析技術を凝固解析として適用することで大きな発展を遂げ、1980年代には流体解析を湯流れシミュレーションとして取り入れることで、現在普及している鑄造シミュレーションの基礎となる技術が開発された。現在では湯流れ・凝固シミュレーションは、効率的な製品開発を行うために必要不可欠なツールとして幅広く普及する一方で、数値シミュレーションの信頼性が向上するにつれて、シミュレーションの基礎となる物理現象を正しく認識する事の重要性はますます高まっている。

本研究は、有限要素法 (FEM) を用いた凝固・熱変形連成シミュレーションの定式化、ならびにそれに基づくソフトウェア開発を行い、実験による検証を通じて従来の凝固シミュレーションでは十分に考慮されていない熱伝達モデルならびに熱力学的特性の重要性について検討したものである。本論文は、9章で構成されている。

1章は緒言であり、鑄造過程で起きている物理現象ならびに鑄造プロセスの数値シミュレーションに関する現状をまとめ、本研究で開発した凝固・熱変形連成シミュレーションの位置付けならびに本研究の意義について記述する。

2章では、FEMを用いた凝固解析の枠組み並びに定式化について述べる。凝固解析の特徴である潜熱の考慮手法として、等価比熱法ならびに仮想熱流法の定式化を行う。また、実用的な解析に求められる解析速度と解析精度のトレードオフを解決するための、解析精度をモニターした時間増分の選択手法の定式化を行う。また、鑄造不良の予測手法として温度分布ならびに凝固速度から計算されるクライテリアの手法を調査して、凝固シミュレーションコードへ実装するための定式化を行う。

3章では、FEMを用いた熱変形解析の枠組み並びに定式化について述べる。熱変形解析を行う枠組みとして、塑性加工の分野で実績がある静的陽解法弾塑性解析に熱弾塑性構成則を導入する。鑄造金属の熱変形を記述するためには、金属が溶融する温度から室温までの広いレンジでの材料の挙動を記述する必要がある。したがって、材料挙動を記述するための構成則として、熱弾塑性構成則の定式化を行う。この弾塑性構成則は、降伏応力の温度依存性を考慮することで固相線温度下の高温材料の流動性を表現するために重要であり、特に鑄型による変形拘束が生じた場合の接触反力の大きさや、室温冷却後の残留応力・ひずみの主要因である塑性ひずみの正確な評価のために重要である。

4章では、凝固・熱変形連成解析において鑄物と鑄型の間の接触状態を解析する手法について述べる。5章で述べる接触状態熱伝達モデルの導入のためには、数値解析における鑄物と鑄型の間の接触・非接触の判定と、接触状態での接触圧力の評価、並びに非接触状態でのエアギャップ量の測定が必要である。

5章では、凝固・熱変形連成解析によって取り扱いが可能となった接触状態依存の熱伝達モデル

と、接触状態の解析手法について述べる。鋳型内の溶湯金属と鋳型壁面の熱伝達係数は鋳造過程において時間変動することが知られており、熱伝達係数の変動要因として、エアギャップの生成や接触圧力の上昇、鋳型表面の塗型の影響などが重要であると言われている。そこで本章では、凝固・熱変形連成シミュレーションに導入するための接触状態依存熱伝達モデルの先行研究を調査し、接触時は接触圧力によって変動し、非接触時はエアギャップ量に依存して変化する局所熱伝達係数のモデル化を実施した。また、本モデルを先行研究の測定データと比較することで、依存性を適切に表していることを確認した。

6章では、接触状態依存熱伝達モデルの実証実験について述べる。本実験の目的は、鋳造時の熱伝達係数の変動ならびにエアギャップ量の測定を行うことで、5章に述べた接触状態依存の熱伝達モデルの妥当性を検証することである。そのために、中子を有する円筒状のアルミニウム合金の鋳造実験を実施する。鋳造金属表面と中子との接触界面には接触、鋳造金属と鋳型との接触界面には非接触の熱伝達が発生する状況を作り出し、鋳型内ならびに鋳物内の温度分布は熱電対で測定し、鋳物の熱変形を差動トランスに連結したロッドの変位として測定する。また、測定温度から熱伝達係数を推定する手法として、測定温度から温度プロファイルを多項式で近似する直接法と、2章で定式化した凝固解析を用いた逆解析法の両方を検討し、熱伝達係数の推定手法として逆解析手法が有効であることを示す。最終的に、実証実験の結果により接触状態依存熱伝達モデルが妥当であることを示す。

7章では、接触状態依存熱伝達モデルが数値解析に及ぼす影響について調査する。単純形状モデルにエアギャップ量依存性を導入することで、エアギャップ生成ならびに熱伝達係数変動の傾向が、鋳型の重力方向に対する向きの影響で大きく異なることを示し、従来の凝固シミュレーションと比べて予測精度が向上することを示す。また、エアギャップ依存モデルと接触圧力モデルのそれぞれの効果を確認するために、6章と同様の接触圧力作用面とギャップ生成面の分離したモデルを使用し、エアギャップ効果が温度履歴に大きく影響し、鋳造不良クライテリアに影響を与えることを示す。さらに、エアギャップ量ならびに接触圧力の評価に対して材料構成則の選択が重要であり、結果として温度履歴や鋳造不良クライテリアに大きく影響を与えることを示す。また、エアギャップ効果が予測結果に影響する例として、中央精機株式会社と共同でアルミニウムホイールに対する検討を行い、その影響を示す。

8章では、凝固・熱変形連成解析を用いた熱そり量の数値解析と実験結果の比較検証を行う。本実験の目的は、砂型鋳物の熱そり量と数値解析の比較検証を行い、熱変形解析に重要な役割を果たす材料構成則の高温下でのふるまいを検証することである。砂型でL字形薄肉の球状黒鉛鋳鉄鋳物を製造し、鋳造後の熱そりを3次元形状測定器で測定する。これにより、凝固・熱変形連成解析で得られたそり量と測定結果は定性的に良く一致することを示す。鋳造品が凝固する際の変形メカニズムは、板厚内の高温部ならびに低温部の冷却時間の差によって引き起こされる降伏応力の違いによって、高温部に永久ひずみが発生するためだと言われているが、それを定量的に示した事例はほとんど見当たらない。ここで、本研究にて開発した凝固・熱変形連成シミュレーションによって、降伏応力の温度依存性が引き起こす永久ひずみが鋳造時の熱そり解析で重要な要因であることを示す。

9章では、本研究の結論を述べる。本研究で開発した凝固・熱変形連成シミュレーションのための定式およびそれに基づくソフトウェアを用い、凝固シミュレーションにおいて熱伝達モデルならびに熱力学的特性を考慮することの重要性を明らかにした。これにより、鋳造プロセスにおける引け巣の発生やそりなどの鋳造不良の予測精度を向上させたことを結論する。

学位論文審査の要旨

主 査 客員教授 牧野内 昭 武
副 査 客員准教授 小 野 謙 二
副 査 教 授 佐々木 克 彦
副 査 教 授 成 田 吉 弘

学 位 論 文 題 名

有限要素法を用いた鑄造凝固・熱変形 シミュレーションの研究

鑄造は人類が金属を利用し始めてからずっと使われてきた長い歴史を持つ技術である。しかし、現在も機械部品など広い範囲の製造分野で重要な役割を果たしており、技術的には低コスト、高品質、軽量化、高生産性など技術革新に対する、絶えることのない強い要求がある。数値シミュレーションによる鑄造不良の予測は、このような課題に対処するための重要な技術であり、さらなる適用範囲の拡大と予測精度の向上が求められている。現在の鑄造シミュレーションの枠組みは、充填中の流動過程に起因する不具合を予測する「湯流れ解析」、充填後の鑄型内の凝固過程に起因する不具合を予測する「凝固解析」、凝固後の熱収縮過程に起因する不具合を予測する「熱変形解析」に分類されるが、本研究では、「凝固解析」と「熱変形解析」の連成シミュレーションを対象としている。

鑄造シミュレーションにおいて、湯流れ解析については多くの研究があり、技術として確立されつつあるが、凝固・熱変形の過程を固体力学を基礎として扱った研究は少なく、鑄物-鑄型間の熱伝達モデルや材料構成則が、引け巣やそりなどの不具合の形成に与える影響については、未だ十分に検討されていない。本研究は、凝固・熱変形連成シミュレーションによる鑄造不良の予測精度を向上させることを目的として、シミュレーションソフトウェアの開発、接触状態依存熱伝達モデルの検討を行い、それらを用いて鑄造不良予測に対する熱伝達モデルと材料構成則の影響を検討したものである。

凝固・熱変形連成シミュレーションにおいては、鑄物-鑄型接触界面における接触状態の時々刻々の変化、ならびに接触状態依存熱伝達モデルによる局所的な冷却条件の変化を考慮しながら、安定的に精度良く問題を解くことが重要である。そのため本研究では、変形解析には接触状態の時間変化を正確に扱うことのできる Updated Lagrangian 定式に基づく静的陽解法を用い、凝固解析の陰解法と連成させながら時間ステップを進める独自の定式を行っている。それを有限要素法ソフトウェアとして実装するに当たって、時間増分内の温度境界条件を固定し、変形解析の接触条件はサブステップ毎に更新される時間発展手法を用いている。これにより熱的な接触状態と力学的な接触状態の時間変化を追って凝固・熱変形連成問題をきわめて安定して解くことができるものとなっている。本連成シミュレーションソフトウェアは、理化学研究所 VCAD システム研究プログラムの成果の一部

として一般公開されている。

凝固・熱変形過程では、鋳物と鋳型の接触界面において、冷却が進展するにつれ接触面の圧力が増加していく部分と、隙間（エアギャップ）が発生する部分とが生じ、それにより熱伝達は著しく局所化される。本研究では、熱伝達モデルの接触状態依存性として特にエアギャップ量依存性に着目し、新しい熱伝達モデルの定式化を行っている。提案された熱伝達モデルは、接触界面の熱抵抗を、エアギャップによって生じる熱抵抗、鋳物表面の熱抵抗、鋳型表面の熱抵抗の直列結合としてモデル化したものである。また、そのモデルの妥当性を検証するために、軸対称の実験装置を設計・製作し、温度熱伝達係数とエアギャップ量を直接同時測定してその間の定量的な関係を求める実験を行っている。熱電対による温度測定データから時間依存熱伝達係数を計算する過程で、直接法では計算誤差の発生が顕著になるため、逆解法による計算手法を新しく提案し、高精度の係数を算出することに成功した。その結果、本研究で提案された熱伝達モデルが、熱伝達係数のエアギャップ量依存性をきわめて精度良く表していることが証検されている。

さらに、開発された連成シミュレーションソフトウェアを用いて、鋳造不良予測に対する接触状態依存熱伝達モデルならびに材料構成則の影響を検討している。引け巣不良に関しては、エアギャップ量依存熱伝達モデルが予測精度向上に大きく寄与することが、アルミニウムホイール製造企業と共同で実施したベンチマーク解析によって実証されている。また、そり不良については、砂型鋳造による球状黒鉛鋳鉄部品の製造過程の解析結果と、実験で求めた温度履歴、そり量との比較検証を行い、鋳物の凝固時に発生するそり不良が非線形温度依存弾塑性構成モデルを用いることにより良く予測出来ていることが示されている。

以上をまとめると、本研究の成果は、静的陽解法有限要素法を用いた、接触状態の変化を安定的に解析可能な凝固・熱変形連成シミュレーションの開発を行い、開発したシミュレーションソフトウェアを用いて、熱伝達モデルならびに材料構成則が引け巣やそりといった鋳造不良の予測結果に与える影響を検討することで、鋳造不良の予測精度を向上させた点にある。また、本研究の連成シミュレーションで用いたエアギャップ量依存熱伝達モデルは、物理的な考察に基づいて定式化、実証実験を行った、従来の連成シミュレーションにない独自の高精度なモデルである。したがって、本研究は鋳造シミュレーションの精度向上によって鋳造技術の高品質化に貢献するものであり、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。