

氏 名	笹 川 知 和
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 10 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 52 年 3 月 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	ニアネットシェイプ成形の有限要素法による熱・変形解析
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 新山 英輔 東北大学教授 渡辺 龍三 東北大学教授 池田 圭介

論 文 内 容 要 旨

本研究の目的は、代表的なニアネットシェイプ成形法である鋳造および粉末成形に関して、成形体の熱・変形挙動を予測するための、有限要素法による効率的かつ高精度な解析手法を提案することにある。

ニアネットシェイプ成形においては、他の多くの製造プロセスと同様、高品質で低コストの製品を得るための成形条件を、試行錯誤を極力排除して最適化することが古くからの至上命題となっているが、このために計算機による解析を応用することは極めて有用と思われる。有限要素法は、その高い汎用性を考慮すれば、プロセス最適化の道具として最も有望な解法のひとつと考えられるが、本研究で対象とした鋳造（型鋳造）および粉末成形（CIP、HIPおよびプレス成形）に対しては、従来適用例が少なく、各種の解析上の問題点（主に計算効率や精度などに関する）や、解析結果をプロセス設計にどのように反映するかといった点が、あまり深く論議されていなかった。そこで、本研究では成形時の熱・変形挙動を有限要素法で解析する場合に、いかにして実用的な解を得るかということを中心課題に据えて、各種の検討を行った。本論文は、これらの研究経緯をまとめたものであり、全6章より成る。

第 1 章 序 論

本章では、ニアネット成形シェイプ成形の数値解析に関する従来の研究経過を概観し、本研究の目的と特徴について述べている。

第 2 章 鋳造品の凝固解析

有限要素法による凝固解析（相変化を考慮した非線形非定常熱伝導解析）の効率的な解法について述べた。従来有限要素法による凝固解析においては、陰解法と等価比熱法の組み合わせが多用されてきたが、この方法は時間刻み幅を大きくすると凝固時間が短くなるという精度上の問題があることを数値実験により指摘した。これに対して、本研究において考察した、1) エンタルピを未知変数として用いる陽解法、および2) 温度回復法と組合わせた陰解法は、両者とも精度が良いことが判った。とくに後者は、等価比熱法に較べてかなり大きな時間刻み幅を用いてほとんど精度が低下せず、かつ計算時間が短いという長所のあることが判った。

また、軽合金鋳物の凝固解析を行い、実際のひけ巣欠陥位置が等時間曲線法ないし固相率勾配法で実用上問題無い程度の精度で予測できることが判った。しかし、ひけ巣の定量的な予測（すなわち空孔率の予測）は、等時間曲線法でも固相率勾配法でも行えず、次章の課題となる。

第3章 凝固収縮流解析による定量的ひけ巣欠陥予測

第2章の課題として残ったひけ巣の定量的予測に関して、検討を行った。まず、ひけ巣欠陥予測のための凝固収縮流解析の基礎式を導くとともに、この基礎式の解析方法を示した。基礎式が定常熱伝導問題の基礎式と同形であることに着目して、従来の熱伝導解析プログラムを利用して凝固収縮にともなう圧力低下を数値解析により求めることができることを示した。また、この基礎式を1次元定常凝固問題に適用した場合の解析解を利用して、従来ひけ巣欠陥発生簡易的判定にしばしば用いられている $G\sqrt{R}$ 値から極めて簡単に圧力損失を求める簡易解析方法を考案した。

さらに、テーパ付き板状鋼鋳物の、数値解析と簡易解析を実施して、実験結果と対比した。この結果、欠陥発生位置と欠陥等級が、数値解析によって定量的に予測できることが確かめられた。また、簡易解析によれば、欠陥位置の特定はやや困難であるが、テーパの差異による欠陥等級の相違は予測できることが判った。

本章で示した解法は、直接凝固収縮に伴う圧力低下を求めるので、従来の温度勾配法や $G\sqrt{R}$ 法と比較して、欠陥判定基準がより明確で合理的である。

第4章 常温下での粉末圧縮成形の解析

常温下での乾式粉末圧縮成形時の粉体挙動を、圧縮性を考慮した塑性構成則を用いて弾塑性解析する方法について述べた。

本章で述べた解法の特徴は、応力増分の計算に完全陰解法を用いたことであり、数値実験を通じて、通常の陽解法に較べて、ひずみ増分の大きさにほとんど依存しない安定な解の得られること、および計算時間が短縮されることが判った。

また、構成則の中に現れる圧縮特性値および弾性定数を決定するための実験方法を提案し、アルミナ粉と鉄粉に関してデータを得た。特に、圧縮特性値を求める際には、金型と粉体の摩擦の影響を極力小さくして測定精度を上げるために、CIP装置を用いたことに特徴がある。

さらに、これらの材料データを用いてCIP成形とプレス成形における粉末圧縮過程の予測を行い、成形体の密度分布および最終形状が実際と良く一致することを確認した。段差を有する焼結部品のプレス成形解析を通じて、コーナ部に発生する欠陥（クラック）は、粉末の移動状況および発生応力から定性的に予測することが可能であることを示した。

第5章 焼 粉体のHIP成形過程の解析

高温下における粉末成形プロセスとしてHIP成形を採り上げ、その解析方法に関して検討を加えた。まず、粉末のHIP成形時の解析モデルとして、圧縮性を有する粘塑性連続体としての粉体の構成則を導き、この構成式に現れる圧縮特性値を単軸熱間圧縮試験により決定した。また、粘塑性解析用の有限要素解析プログラムを作成し、カプセルシール法によるHIP成形の解析を行った。その結果、HIP処理後の形状を非常に良い精度で予測できることが判った。

従来の研究では、HIP解析は弾塑性解析により行われていたが、高温下での粉体挙動をより合理的に近似する粘塑性モデルを用いることが適切であると思われる。また、計算時間を節約する意味でも本モデルは妥当と考えられる。

カプセルシール法によるHIP成形においては、周知のようにカプセルの変形抵抗および成形体内の温度不均一によって変形が相似とはならず、HIP終了後の形状を予測することは極めて困難であったが、ここで述べたような解析によって初めてこれが可能になったといえよう。従って、本解析は、ニアネット成形を行うためのカプセルの設計には、極めて有用と思われる。

第6章 総 括

本論文の研究経緯と成果を総括した。

審査結果の要旨

金属のニアネットシェイプ成形プロセスの最適設計を可能にするための基礎技術として成形時の熱・変形挙動を高精度・高能率で予測する手法が必要とされている。本論文はニアネットシェイプ成形の主流である鑄造と粉末成形をとりあげ、プロセス固有の諸現象を考慮し、かつ計算能率の高い有限要素解析法を開発することを目的としたものである。

第1章は序論である。各種解析法の中で有限要素法を用いることが適当である理由を明らかにしている。

第2章は鑄造品の凝固解析に関する検討である。計算能率の点から陰解法を採用し、凝固潜熱を精度よく取り扱うための方法を検討し、温度回復法と陰解法を組み合わせたアルゴリズムを開発している。また計算結果の主な利用目的である引け巣欠陥位置の予測に関し、評価基準として等時間曲線法および固相率勾配法を比較検討し、いずれによっても軽合金鑄物の欠陥位置を的確に予測できることを実験で確認している。

第3章ではより定量的に引け巣欠陥等級を予測するために凝固収縮流解析を利用する方法を研究している。凝固の熱解析に基づく収縮流の方程式は定常熱伝導の式と同一形式であることに着目し、熱伝導解析プログラムを利用して収縮にともなう圧力低下を計算し、これに基づいて欠陥の大小を推定する方法を開発している。これを鋼鑄物に関する実験と比較し欠陥等級をかなりの精度で予測できることを示している。

第4章は常温での粉末の圧縮成形挙動の計算法に関するものである。圧縮性を考慮した塑性構成方程式を用い、とくに応力増分の計算に完全陰解法を用いることで安定でしかも高速な計算を可能にしている。また構成則に現れる圧縮特性値及び弾性定数を決定する新しい実験方法を提案し、アルミナ粉と鉄粉の測定を行っている。この手法と測定値をCIPおよびプレス成形に適用し、たとえば鉄粉の成形後の形状、密度分布、割れ欠陥、などの予測が可能であることを実証している。

第5章は高温での粉末成形、とくにHIP成形に関するものである。圧縮性を考慮した粘塑性構成則を用いた陰解法を開発し、またここに現れる圧縮特性を単軸熱間圧縮試験で測定している。この手法をカプセルシール法によるHIP成形に適用し、たとえば耐熱合金粉末によるタービンディスク形状品の成形後の形状を精度よく予測できることを明らかにしている。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は金属の鑄造及び粉末成形を熱・変形プロセスとしてとらえ、その挙動を有限要素法で解析・評価する高精度・高能率な方法を明らかにしたもので、材料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。