

## 審査の結果の要旨

氏 名 崔 大 坤

本論文は、「形状記憶合金素子の超弾性挙動および形状記憶効果の計算モデリングに関する研究」の成果を取りまとめたものであり、全 6 章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第 1 章では主として、本論文の背景と既存の研究について述べている。近年、アクチュエータやセンサーとして機能するスマート材料のひとつとして注目されている形状記憶合金に関し、多くの研究が行われているが、形状記憶合金の超弾性挙動および形状記憶効果に対する標準的な有限要素解析法は確立していない。加熱による形状記憶効果解析に適用可能な汎用コードも存在しない。また、形状記憶合金の動的挙動に対する解析手法は研究途上にあり、特に多孔質形状記憶合金についてはわずかな研究しか行われていない。

第 2 章では、三次元形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動解析法を構築している。まず、Toi らが提案した形状記憶合金素子の一次元構成式を拡張し、三次元解析に適用した。すなわち、Drucker-Prager の相当応力を導入して引張・圧縮挙動の非対称性を考慮した改良 Brinson モデルにおいて、変態臨界応力と温度の関係における勾配をすべて独立な材料定数とし、また垂直変形とせん断変形を連成させることにより、マルテンサイト相体積率の発展方程式および一次元構成式を多軸挙動に拡張した。さらに、ラグランジュ法に基づいて接線剛性法による増分形有限要素定式化を行った。この定式化の検証のため、一定温度下における形状記憶合金マイクロチューブおよび温度変化を考慮した形状記憶合金管の多軸挙動解析を行い、解析結果を実験結果と比較した。その結果、R 相変態の考慮など、定量的には若干の改善の余地があるものの、本解析手法は三次元形状記憶合金素子の多軸超弾性挙動に対する計算手法として、実用性を有することが確認された。

第 3 章では、三次元形状記憶合金素子の形状記憶効果に対する有限要素解析ツールを構築している。提案した計算モデリングの妥当性検証のため、いくつかの形状記憶合金素子の負荷・除荷および加熱による形状記憶効果挙動の解析を行った。まず、形状記憶合金柱の圧縮座屈・除荷後、オーステナイト変態終了温度より高い温度まで加

熱した場合の形状記憶効果挙動を解析し、座屈変形の回復が良好にシミュレートされた。続いて、形状記憶合金箔ハニカムコアの圧縮座屈・除荷、さらには加熱による形状記憶効果解析を行った。座屈変形過程におけるマルテンサイト相体積率の局所的増大、除荷後の加熱によるオーステナイト相への逆変態と座屈変形の回復が良好にシミュレートされており、実験結果ともほぼ対応した。本解析手法は、複雑な三次元形状を有する形状記憶合金素子の超弾性および形状記憶効果に対する一般的計算ツールとして、実用性を有すると判断される。

第4章では、ひずみ速度の影響を考慮した多孔質形状記憶合金の一次元構成方程式を構築している。まず、多孔質形状記憶合金の準静的および動的挙動に対する内部状態変数表示の構成方程式を定式化した。この構成式モデルを、様々なひずみ速度および温度条件下における多孔質形状記憶合金材料の準静的および動的単軸圧縮挙動のシミュレーションに適用し、計算結果を実験結果と比較した。応力・ひずみ曲線の形状には若干の相違もあるが、高速変形実験を厳密に一定速度で実施するのは困難であり、このことが計算と実験の相違の一因と考えられる。総体的にはほぼ良好に対応しており、本構成式モデルは、多孔質形状記憶合金の準静的および動的挙動予測に対する計算モデルとして、一定の実用性を有すると考えられる。

第5章では、三次元多孔質および粒子分散型ハイブリッド形状記憶合金素子の動的超弾性挙動解析法を構築している。すなわち、第4章で提案した多孔質形状記憶合金の一次元素子の構成方程式を多軸挙動に拡張した。さらに、Newmarkの $\beta$ 法による動的解析法に基づいて有限要素定式化を行い、多孔質形状記憶合金素子における動的超弾性挙動解析ツールを開発した。この定式化の実用性検証のため、多孔質および粒子分散型ハイブリッド形状記憶合金素子の衝撃超弾性挙動解析を行い、QidwaiとDeGiorgiのモデルによるメソスケール解析結果と比較した。本研究で提案した解析モデルは計算効率がよく、複雑な形状を有する構造体の有限要素解析へ適用でき、様々な分野への応用が可能である。

第6章は本論文のまとめであり、総括的な結論を述べている。すなわち、本論文で提案した解析手法は、三次元形状を有する形状記憶合金素子の静的および動的超弾性挙動解析のみならず、形状記憶効果解析も可能である。さらに、材料定数の入力を変えるだけで、密な形状記憶合金、多孔質およびハイブリッド形状記憶合金素子を含む三次元形状を有するシステムの設計および開発を支援できる。

以上を要するに、本論文では形状記憶合金素子の超弾性挙動および形状記憶効果の計算モデリング手法を提案し、実験結果、他の数値計算結果との比較により設計支援ツールとしての有用性を実証しており、高い工学的価値を有すると判断される。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。