

審査の結果の要旨

氏 名 李 宗 儻

形状記憶合金はスマート材料の一つとして様々な分野で利用されている。また近年では、形状記憶合金コイルばねをアクチュエータ素子として利用する機会が増えている。アクチュエータ素子としての高機能化、多機能化を念頭に、鉄系、ニッケル・マンガン・ガリウム系などの強磁性体形状記憶合金の開発も進められている。多くの可能性を有する形状記憶合金あるいは強磁性体形状記憶合金素子およびアクチュエータの設計・開発の効率化・合理化のためには、有限要素法などの計算技術による挙動予測が不可欠である。

形状記憶合金の構成方程式および有限要素解析への応用に関する従来の研究としては、Brinson による 1 次元構成式の定式化と有限要素解析への応用、多軸構成式および有限要素解析への応用については河井ら、Trochu と Qian、Auricchio と Taylor、Qidwai と Lagoudas による研究などが知られているが、Auricchio と Taylor の研究以外は引張挙動と圧縮挙動の非対称性（すなわち静水圧の影響）を考慮しておらず、アクチュエータとして利用される機会の多いコイルばねおよび板ばねの超弾性大変形挙動に対する実用的な有限要素解析法も確立していない。

本研究においてはまず、はり、コイルばねなど 1 次元的形状を有する形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動の有限要素解析法を提案している。すなわち、Brinson の 1 次元構成方程式を、非対称の引張・圧縮変形およびねじり変形を考慮できるように拡張し、層分割型線形チモシェンコはり要素による有限変形問題の増分形有限要素解析法に適用した。提案した計算ツールを利用し、形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動有限要素解析法の定量的信頼性を把握した。数値計算例として、ワシントン大学・知的材料システム研究センターにおいて実施された形状記憶合金コイルばねの引張実験に対応する計算を実施し、両者が良好に対応することを確認した。

また、商用プログラム (ANSYS/Emag) による磁場解析との連成を考慮することにより、磁気力により制御される強磁性体形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動解析に拡張している。提案した強磁性体形状記憶合金の磁場・超弾性連成解析の全体システムを、永久磁石および電磁石からの磁気力を受ける強磁性体形状記憶合金コイルばねの超

弾性大変形挙動の解析に適用し、本計算システムの有用性を示した。続いて、形状記憶合金を磁性体と組み合わせたハイブリッド型 (NiTi・Fe) アクチュエータの超弾性大変形挙動のシミュレーションを実施した。直線運動をするハイブリッド型コイルばねアクチュエータと回転運動をするハイブリッド型ロータリーアクチュエータの超弾性大変形挙動のシミュレーションを実施し、ワシントン大学における実験結果と良好に対応することを確認した。

さらに、1次元素子に対する構成式を板、シェルなどの2次元素子に適用できるように拡張し、増分形大変形有限要素定式化を行っている。すなわち、マルテンサイト変態体積率の発展方程式の判別式に Drucker-Prager 型の相当応力を用いることにより、垂直変形とせん断変形を連成させた。続いて、ミンドリン理論に基づく層分割シェル要素を利用し、ラグランジュ法による増分形大変形有限要素定式化を行った。提案した計算ツールを利用し、板、シェルなどの2次元形状を有する形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動の有限要素解析法の定性的信頼性を確認した。また、両端固定棒に対する曲げ大変形解析を行い、前述の1次元素子に対する有限要素解析計算ツールを利用した解析結果と比較し、この計算ツールの定量的信頼性を確認した。続いて、磁場解析との連成を考慮することにより、磁気力により制御される強磁性体形状記憶合金素子の超弾性大変形挙動解析に拡張した。数値計算例として、磁気力が働く単純支持板の磁場・超弾性連成解析を行い、本計算システムの有用性を示した。

以上を要するに、本論文は形状記憶合金アクチュエータの磁場・超弾性挙動に対する新しい計算モデリング手法を提案し、他の解析解および実験結果との比較により、その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。