

## 審査の結果の要旨

氏名 何 劼

最も魅力的な機能材料の一種である形状記憶合金（SMA）は、航空宇宙、医療などの産業分野で応用され、多くの新たな可能性を秘めている。これらの応用を進めるためには、SMA の材料特性に対する深い理解が必要であり、開発設計のためには、より高い精度と機能を有する計算ツールが求められている。1980年代以降、SMA の計算モデルは発展し続けてきたが、実験的に観察される複雑な挙動を表現するためには未だ単純であり、精密化が必要である。

このような要求に答えるため、本論文では既存の SMA モデルに様々な改良を加えている。応用される SMA の大部分はワイヤあるいはフィルム形状であるため、改良された計算モデルによる数値解析は SMA 平面骨組への応用を念頭に置く。すなわち、単純はり、ブレース付き骨組、さらにはより複雑なハニカム構造を対象とする。ハニカム構造は、スマート構造、アクチュエータなどへの応用において大きな可能性を有する軽量・高機能構造である。材料レベル、構造レベルの検証、および数値解析による新しい知見について詳細に論じている。

本論文の 1 章は序論である。まず、SMA の物理的性質を説明している。航空宇宙、医療分野における応用例の紹介に続いて、SMA の計算モデルのレビューを行う。ハニカム構造についても簡単に論ずる。最後に研究目的を述べている。

2 章では、SMA の計算モデルについて述べている。本研究のベースとなる Brinson および Toi らによる SMA モデルについて概説した後、改良点のそれぞれについて、検証も含め詳細に説明する。まず、相変態発展方程式に対するロジスティックシグモイド関数モデル、累積ひずみに依存する繰返し効果を導入する。続いて、双晶マルテンサイト相を考慮したモデリング、塑性を考慮した超弾性あるいは準塑性モデリング、形状記憶効果におけるより安定的な相変態アルゴリズムを導入した。最後に、層分割型 Bernoulli-Euler3 次はり要素を用いた有限変形 FEM 増分解析の定式化を示している。

3 章では、相変態に対するロジスティックシグモイド関数モデルの数値的検証を行っている。広く使われている Brinson モデルの枠組とロジスティックシグモイド型の相変態メカニズムを組み合わせる。既存モデルにおけるコサイン型の表現と比較して、新モデルは SMA の応力・ひずみ曲線の材料試験結果と非常に良好に対応することを確認した。また、SMA はりの 4 点曲げ解析結果を実験結果と対比することにより、構造レベルにおける妥当性も検証している。

4章では、新しい繰返し効果モデルの材料レベルの検証と構造解析への応用を行っている。まず、繰返し材料試験結果と比較して、妥当性を検証した。主な特徴は次の3点である。繰返しとともに、(1)最大残留ひずみが増加する。(2)変態開始および終了限界応力が低減する。(3)材料パラメータの変動が収束する。続いてこのモデルを SMA ブレース付き骨組のエネルギー吸収に関するシミュレーションに適用し、繰返し効果を考慮すると SMA ブレースのエネルギー吸収能が低下することを見出した。

標準ハニカム構造と低せん断剛性ハニカム構造は著しく異なった特性を有しており、後者は SMA を用いることにより、アクチュエータ、センサ、アダプティブ構造としての応用可能性が広がる。続く 3 つの章では、機能構造としての SMA ハニカム構造の力学挙動について論じている。

5章では、双晶および非双晶マルテンサイト相に異なる材料特性を仮定したモデルを、SMA ハニカム構造の面内引張挙動の解析に適用している。正のポアソン比を示す OX ハニカムと負のポアソン比を示す Auxetic ハニカムの単純引張挙動を解析し、Hassan らの実験結果と定性的に対応することを確認した。除荷を含むフルサイクル解析からは、OX ハニカムにおいて分岐挙動に起因する変形の局所化が起こることを見出した。荷重レベルが低い場合は起こらない。

6章では、OX ハニカムと Auxetic ハニカムの面内圧縮挙動を解析している。OX ハニカムに対する Michailidis らの実験結果との比較により定性的妥当性を確認した。続いて行った塑性と超弾性の連成を考慮した解析では、永久変形が観察された。他方、10%程度の形状初期不整を仮定した解析では、剛性低下は見られたものの、顕著な不安定性は観察されなかった。

7章では、Okabe らにより提案された低せん断剛性型の SMA ハニカムを利用したアクチュエータに対し、形状記憶効果におけるより安定的な相変態アルゴリズムを援用したシミュレーションを行っている。アクチュエーションは強制的なせん断変形と引き続く加熱過程より成る。各ハニカムセルの変形形状、作動変位の温度変化が実験結果と良好に対応した。また、応力分布、マルテンサイト相体積率分布などの詳細を把握することができ、SMA ハニカムコアアクチュエータに対する先駆的な計算ツールとしての有用性を検証している。

8章は結論である。本論文は、今後ますます広範な応用が期待される SMA に対する既存の現象論的モデルに対し、より信頼度の高いシミュレーションを可能とするために、様々な観点からの改良を加えており、より精確、柔軟かつ順応的な計算モデルを提供している。実験との対比などによるモデルの検証とともに、SMA ハニカム構造などに対する多彩な数値例により、いくつかの物理的知見も得ており、本提案モデルの工学的有用性を立証している。

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。