

氏 名	木 下 勝 之
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エ ネ 博 第 17 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	形状記憶合金の熱・力学・磁氣的挙動とシミュレーションに関する研究

論文調査委員 (主 査) 教授 松本英治 教授 井上達雄 教授 柴田俊忍

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、TiNi および鉄系形状記憶合金 (SMA) の応力負荷、加熱、磁場印加などの条件下における挙動の実験的解析と、それらを表現する熱・力学・磁氣的なモデル化とシミュレーションに関する研究成果をまとめたもので、7章から成っている。

第1章の序論では、より高度な機能材料としてのスマートマテリアルの概念を説明し、それを実現するための有力なアプローチとしての機能複合材料の意義を述べている。さらに、そのような構成材料の一つとして SMA が優れた特性を持つ機能材料であることを示し、より精密な用途への応用のためにはその物性の定式化が必要であることを述べている。つぎに、SMA に関連する力学的な特性とその定式化に関する研究の現状を明らかにした。また、SMA の電磁氣的な特性、とくに電気抵抗やインピーダンス、磁気特性などの原理やその応用に言及し、最近の研究の動向を概括した。以上のような SMA に関する研究の現状と関連して、本研究の目的と構成について述べている。

第2章では TiNi SMA をインテリジェント機能材料として埋め込んだハイブリッド複合材ラミナについて、簡易モデルの誘導とこれに基づく減衰特性解析を行っている。TiNi SMA 繊維に対して、応用が容易である内部変数を用いた現象論によって、モデル化を行った。TiNi SMA ハイブリッド複合材への応用を念頭にして、単純な正方形ユニットセル法によるマイクロメカニクスモデルから TiNi SMA 繊維強化複合材のモデル化を誘導した。TiNi SMA 繊維強化ハイブリッド複合材のモデル化に対しては、Chamis と Sinclair の弾性ハイブリッド複合材モデル化の過程を誘導した。最後に提案したモデルを利用して TiNi SMA 繊維に関して、等温引張り－負荷 / 除荷過程での応力－ひずみ曲線をシミュレーションし、さらに減衰特性を評価するために散逸ひずみエネルギーと回復ひずみエネルギーの比で定義される SDC (Specific Damping Capacity) を計算した。TiNi SMA ハイブリッド複合材ラミナに関しては、等温引張負荷 / 除荷過程での応力－ひずみ曲線を解析し、計算から求めたヒステリシスに基づいて SDC を評価した。

第3章では、不均一な温度分布を持つ SMA フィルムのアクチュエータ挙動を表現し得るモデルを提案している。SMA フィルムは、従来から用いられている線材と比較して、冷却特性に優れているので、より高速応答のアクチュエータへの応用が期待されている。その反面、2次元的な変形や熱の分布により、その挙動の解析が困難であった。ここでは、定ひずみ型フィルムアクチュエータにおいて、膜厚が薄くせん断変形が小さいことから、フィルムを幅の狭い層の集合とみなすサブラーヤモデルを援用した。このモデルでは従来から妥当であると考えられている SMA の 1 次元構成式に、各層間や外界との伝熱の効果を考慮に入れている。このモデルに基づいて、応力誘起相変態中の潜熱による温度変化の影響を考慮に入れて、負荷－除荷過程における応力－ひずみ曲線の解析と実験との比較を行った。また、発生する潜熱と外界との熱伝達のバランスから、引張速度が大きいと SMA はより高温となり、応力－ひずみ線図の傾きが大きくなることを明らかにした。つぎに、両端を固定したフィルムに通電加熱を行うことによる変形挙動を解析し、温度分布の影響による相変態の不均一が定ひずみ型アクチュエータの応答に及ぼす影響について検討を行った。さらに、SMA フィルムの温度分布やアクチュエータの出力である断面合応力の時間的な変化を計算し、実験結果とよく一致することを検証した。

第4章ではTiNi系SMAの変態の局所化とその伝播のメカニズムについて議論している。まず、応力負荷の実験例にもとづいてTiNi系SMAにおいて変態伝播を考慮する必要性を示し、関連する過去の研究の問題点について述べた。そして、変態の局所化と伝播を生じるための応力-ひずみ曲線に対する条件と変態伝播を表現することのできるモデルについて言及した。

第5章では、まずTiNi系SMA線材の引張試験において応力誘起マルテンサイト変態が局所化して伝播していることを明らかにした。すなわち、変態潜熱による発熱あるいは吸熱領域の変化を赤外線サーモグラフィーにより可視化した。また、実験における線材の伸びと荷重から求められる見かけの巨視的な応力-ひずみ線図が、変態開始時のオーバーシュートや、変態終了時の応力低下などの特異な現象を示すことを明らかにした。つぎに、第4章で述べたモデルに基づいて有限要素法による変態伝播のシミュレーションを行い、変態の局所化が線材の保持部から伝播していることを検証した。さらに、上述の巨視的な応力-ひずみ線図における特異な現象をシミュレーションによって再現することにより、線材の保持部の力学的な条件が変態の局所化と伝播に及ぼす影響を考察した。

第6章では、磁場印加時の導体のインピーダンス変化、すなわちMI (Magnetic Impedance) を利用して酸化鉄皮膜を有するFe系SMAの応力を測定する可能性について検討している。最初に、Fe系SMAの形状記憶処理として行われる熱処理により、その表面に強磁性体である酸化鉄皮膜が生じることを示した。つぎにこのような酸化鉄皮膜を有するSMA線材のMIが負荷応力の符号や大きさによって大きく変化することを実験によって明らかにした。その原理を説明するために、高周波磁場に対する強磁性共鳴と同様の原理によって単磁区構造の薄膜のMIを求めた。また、多磁区構造の磁化過程における磁壁移動の効果を表わすために、外部磁場方向に自発磁化を持つ磁区の体積が最大となる確率密度関数を導入した。この確率密度が磁場や応力に依存することにより、軟強磁性体の磁場-磁化関係や、実験で得られたMIの応力依存性が記述できることを示した。

第7章においては、本研究において得られた成果を要約し、今後の展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、TiNiおよび鉄系形状記憶合金(SMA)の応力負荷、加熱、磁場印加などの条件下における挙動の実験的解析と、それらを表現する熱・力学・磁気的なモデル化と数値シミュレーションに関する研究成果をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. SMAを機能複合材料の構成材料として応用するための基礎的な研究として、TiNi系SMAのR相変態とマルテンサイト相変態挙動の両方を記述できる多軸構成式モデルを提案した。そのモデルに基づき、SMAハイブリッド複合材料の繊維方向の応力-ひずみ挙動を解析し、計算解析から求めたヒステリシスに基づいて減衰特性を評価した。

2. 大出力、高速応答が期待されているリボン形状のSMAアクチュエータの挙動を表現できるモデルを提案して、それによる解析結果の妥当性を通電加熱下のTiNiフィルムの応力や温度分布の測定によって検証した。薄膜は断面積に対する表面積の割合が大きいため、熱の散逸が迅速に行われ、冷却時の応答速度が改善される。一方、温度分布の影響によって変態が不均質に進行し、応力分布に現れる不均質の影響で、アクチュエータの応答には若干の非線形性が加わることを示した。このような、フィルム形状のSMAアクチュエータの挙動を表わすモデルとして、変態潜熱や各層間や外界との伝熱などを考慮に入れたサブレイヤモデルが有効であることを明らかにした。

3. 応力負荷によるTiNi系SMAの複雑な挙動を、加工軟化型のモデルに基づいた有限要素法によるシミュレーションによって解析し、SMA線材の引張試験によって検証した。TiNi系SMAの単軸引張試験における荷重-変位曲線において、変態の初期に現れるオーバーシュート現象、変態中の応力の断続的な増減、あるいは変態終了時の応力の急激な減少などが見られた。数値シミュレーションによってこれらの現象が再現できることにより、その原因が変態の局所化と局所化した変態領域の伝播にあることを明らかにした。また、測定されるマクロな荷重-変位曲線は、硬化係数などの材料特性以外に、試験片端部の力学的境界条件にも依存していることを示した。

4. 鉄系(FeMnSiCr)SMAの磁気特性の応力依存性に関する実験とその理論的な解析を行い、応力センサーとしての可能性について議論した。鉄系SMAは空気中での形状記憶処理時に強磁性体である酸化皮膜を生じることを見出した。強磁性体の透磁率や磁気的異方性が応力に依存することに着目して、酸化膜で覆われた鉄系SMA線材の磁場印加時のインピー

ダンス変化（磁気インピーダンス）を測定することにより、SMA に加わる応力を評価できることを明らかにした。また、磁気インピーダンスの磁場や応力依存性が、磁化の方位に関する確率密度関数を用いた統計的な処理により、単磁区構造に対する強磁性共鳴の原理を多磁区構造に拡張することによって説明できることを示した。

以上の研究は、形状記憶合金を用いたアクチュエータのより精密な制御や、その電磁物性を利用した応力センサーとしての応用の可能性を示しており、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論分は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 12 年 2 月 10 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。