

学 位 論 文 題 名

形状記憶合金のアクチュエーター特性に関する基礎的研究 — 動作
温度・応力と超弾性・形状記憶効果に伴う散逸エネルギーの関係

(Fundamental aspects of shape memory actuator properties: Relationship
between actuation temperature/stress and the dissipation energy
associated with superelasticity/shape memory effect)

学位論文内容の要旨

外部信号を感知し変位を出力する機能性材料には、形状記憶合金、圧電素子、磁歪素子、水素吸蔵合金等がある。形状記憶合金の特徴は、出力および変位量が大いことである。温度センサー機能を有するアクチュエーターとして、比較的大きな力と変位を必要とする用途が適用例となる。従来の油圧、内燃機関、モーターの代替機構として、装置の省エネルギー化や小型軽量化のメリットだけでなく、巨大な自発的展開構造物（宇宙空間におけるパラボラアンテナ）から人工心臓、動脈瘤治療のカテーテル、マイクロロボットなど特定分野へ利用が開発途上にある。

実用上、形状記憶合金の超弾性が利用されることも多いことから、本研究は、形状記憶効果および超弾性の双方を対象としている。形状記憶効果と超弾性の発現機構については、結晶構造や微細組織に基づいた材料工学的見地において、今日まで多くの研究成果が得られており、大まかな理解に至っている。一方、これをアクチュエーター材料として実用化するためには、精密な制御技術が確立されなければならない。そのためには、これらの力学特性に影響をおよぼす材料の内部変数の全てを特定し、それらの関係を構成式として定式化する基礎的な知見が不可欠である。現状では、その動作を記述する弾塑性構成式および動作におけるエネルギー収支について厳密な定式化を行った基礎研究に乏しいのが現状である。本研究はこれらを目的とした実験および理論的研究である。

形状記憶効果および超弾性は、固体結晶構造変態のマルテンサイト変態に起因する。低温相のマルテンサイトと高温相のオーステナイト相の二相共存状態が特定の温度範囲で実現するのが熱的マルテンサイト変態であり、形状記憶効果を発現する。温度一定で特定の負荷応力の範囲内では超弾性が発現する。この二相共存状態の開始から終了までの温度および応力幅は、強磁性体の磁化曲線とのアナロジーでヒステリシスと呼ばれる。このヒステリシスにおける二相の体積変化を、材料の内部変数 { 内部応力, ひずみ, 温度 } の関数として記述するのがマルテンサイト変態の構成式である。

この構成式の一般的な表現を得ることは、本質的に難しい問題である。その第一の理由は、相変態における二相共存状態は内部変数に対して一価性を持たない（多価性）ことにある。そのため、内部変数の変化については特定の経路を指定することになる。本研究では、最も簡単な単純冷却あるいは単純加熱経路において形状記憶効果を考え、一定温度でひずみを一定速度で増加する経路において超弾性を取り扱うこととした。

構成式を得ることが困難な第二の理由は、ヒステリシスにおいてエネルギー散逸が起こ

ることである。エネルギー散逸の効果は、室温で予め引張ひずみを付与した試験片では、形状記憶効果で形状回復が起こる温度は、引張ひずみが大きくなるほど上昇することとして観察される。例えば、形状回復温度が 80 °C であるニッケル-チタン (NiTi) 形状記憶合金に 8% の引張ひずみを与えた場合、30 °C 程度上昇する。この場合、加熱を熱湯で行う設計では形状記憶効果が得られないことになり、問題となる。本研究は、この現象は要するに、引張ひずみによって形状回復するために必要な熱エネルギーが大きくなったことであることを指摘し、そのエネルギーの大きさを定式化し、所定の引張ひずみを与えた時の形状回復温度を予測する式を導いたことが研究成果である。この定式化を検証するために、数種の形状記憶合金を用いた形状回復試験と熱測定を行い、そのデータから妥当性を評価している。

一方、超弾性を利用したアクチュエーターにおいては、超弾性の発生応力が重要な設計パラメータである。この発生応力は、母相とマルテンサイト相を平衡状態に保つ応力と散逸エネルギーに起因する摩擦応力の和である。従来の研究は、このうち平衡応力のみについて熱力学的に相平衡を記述する Clausius-Clapeyron の関係式を適用している。ところが、摩擦力を含む超弾性の定式化はこれまで行われなかった。平衡応力および摩擦力を同時に扱うために、熱力学第二法則に基づいてエントロピー散逸を表現する Clausius-Duhem 不等式を初めて形状記憶合金の超弾性に適用したことが、本研究の成果である。

本論文は以下のように、全 6 章により構成されている。

第 1 章では、本論文の序論として、形状記憶合金アクチュエーターの研究背景を概説すると共に、動作温度や変形応力の定式化を図る意義を明確にした。

第 2 章では、形状記憶合金の連続体力学的取り扱いについて、先ず、従来の研究結果を概説した。さらに、アクチュエーターの動作設計を行うことを念頭に、散逸エネルギーが動作温度と変形応力に及ぼす影響について検討し、これらの間に成り立つ関係を定式化した。

第 3 章は、形状記憶効果において、負荷応力が小さい場合の形状回復温度と散逸エネルギーの関係を実験により測定した。それらの間に成り立つ関係を定量的に評価し、第 2 章で提示した構成式の妥当性を検証した。

第 4 章では、超弾性のアクチュエーター利用を想定した場合の、散逸エネルギーと超弾性の変形応力の関係を実験により測定した。この結果について、Clausius-Duhem 不等式から導出した摩擦応力を含む変形応力の定式化が適切であることを示した。

第 5 章では、形状記憶効果において負荷応力が大きい場合について検討した。この場合、形状記憶効果と超弾性の両方の特徴が現れる。アクチュエーター動作温度と引張ひずみおよび負荷応力との関係を熱膨張実験により測定した。動作温度は、散逸エネルギーおよび負荷応力のポテンシャルエネルギーに依存して変化することを示した。

第 6 章では、本研究を総括し、締め括った。

学位論文審査の要旨

主査	教授	佐々木	一彰
副査	教授	中村	孝
副査	教授	佐々木	克彦
副査	准教授	加藤	博之

学位論文題名

形状記憶合金のアクチュエーター特性に関する基礎的研究 — 動作温度・応力と超弾性・形状記憶効果に伴う散逸エネルギーの関係

(Fundamental aspects of shape memory actuator properties: Relationship between actuation temperature/stress and the dissipation energy associated with superelasticity/shape memory effect)

形状記憶合金は、固体相変態であるマルテンサイト変態を利用して変位および力を得る力学的な機能性材料である。強度と靱性に優れるため、センサーおよびアクチュエータ機能を有する構造材料として利用できることから、省力化を担う素子として着目され、今日、宇宙空間での巨大な展開構造物から航空機器、人工心臓、動脈瘤治療のカテーテル、マイクロロボットに至るまで広範な分野へ応用例が見られ、それとともにその機能を高精度に制御する技術の要求が益々高まっている。

マルテンサイト変態は二相共存状態を示す一次相変態であり、一般にヒステレシス現象を伴う。マルテンサイト変態では温度と応力についてヒステレシスが問題となる。形状記憶合金の工学的利用においては、このヒステレシスを考慮した制御技術の確立が不可欠である。しかしながら、ヒステレシス現象はエネルギー散逸を伴う不可逆過程であり、可逆系の熱力学をそのまま適用できない。実際、母相とマルテンサイト変態の二相共存状態は、温度、応力、ひずみといった熱力学的変数について経路依存を示し、変態の進行を構成式として一意的に記述できないという点で一般的な塑性論と同様、本質的に解決が難しい問題である。

形状記憶効果は形状記憶合金にあらかじめ変形を与え、これを逆マルテンサイト変態の温度（逆変態温度）へ加熱することで発現する。センサ・アクチュエータ素子としての利用では、この逆変態温度が素子の動作点であり、発生する応力が出力となる。動作点と出力はアクチュエータ素子において最も基本的な設計パラメータである。ところが上述のように、逆変態温度と発生力は、マルテンサイト変態のヒステレシス現象とそれに伴うエネルギー散逸に本質的に依存するため、それがいくつかの技術的問題点となっている。先ず、この変態温度と発生力が予め与えた変形量に依存して変化することが知られている。さらに、発生力は変態温度以上の加熱温度に強く依存し、温度が高いほど発生力は大きくなる。これらの値の変化は実験的に知られているが、これまでその原理の解明に至っておらず、諸量の定式化は形状記憶合金の実用化において未解決のまま残された課題の一つであった。

そこで本論文では、最も多く実用に供されているニッケル - チタニウム形状記憶合金を用いて、引張ひずみと形状回復温度の関係を実験で詳細に求め、熱測定から求めた熱物性

値を用いてその関係を予測する式を導出した。具体的には、形状回復温度の変化の原因は、マルテンサイト変態の二相平衡を与える温度の変化ではなく、ヒステレシスの変化であることを示し、それを引張り変形による外部仕事として試料が受けた塑性仕事の変態に伴う散逸エネルギーの増加とみなせば、回復温度の変化に関する実験結果を十分な精度で説明できることを見出した。これとともに、マルテンサイト変態を熱力学第二法則に基づく Clausius-Duhem 不等式によりエネルギー散逸過程として表現し、形状記憶合金の発生応力を温度および外力の関数として定式化した。この式は、形状記憶合金の主たる機能の一つである超弾性について、発現応力と温度の関係を熱物性値のみからの予測を可能とする関係式であり、工学的に有用である。

近年、形状記憶合金のアクチュエータ機能を応用して、形状を自発的に変化させることが可能な構造体(セルフモーフィング構造体)を実現しようとする研究が内外の研究機関で着手されている。その代表的な例は、形状記憶合金と金属、高分子材料などの母材を組み合わせた形状記憶合金複合はりであり、材料の内部応力を調整することで外形変化を生じる原理である。本論文では、前章で得られた動作温度および発生応力の予測式を利用する例として、この複合はりにそれらを適用し、はり内部にある形状記憶合金の収縮によるはりのたわみ変形を導出する関係式を導いた。それとともに、複合はりの内部に埋め込む形状記憶材料の大きさと配置等の材料設計に関する材料力学的指針を示している。

本論文は以下のように全 6 章で構成されている。

第 1 章は緒言であり、研究背景について概説し、形状記憶合金アクチュエータの動作温度と発生応力の定式化とその応用例に関する本研究の意義を述べている。

第 2 章では、形状記憶合金のマルテンサイト変態温度と変形応力について熱力学と連続体力学に基づいた従来の研究結果を整理し、それから本論文の取り扱う問題に即した変態温度と応力と変態ヒステレシスの関係について構成式を示している。

第 3 章では、変形された形状記憶合金の形状回復温度について散逸エネルギーとの関係を、詳細な実験により求めている。その結果について、第 2 章で提示した形状回復温度を求める構成式を適用し、理論の妥当性を示している。

第 4 章では、超弾性の変形応力について散逸エネルギーとの関係を実験により決定している。この結果により第 2 章で導出した変形応力の定式化が適切であることを示している。また、一定負荷を受ける形状記憶合金の形状回復を実験により測定し、その形状回復温度が散逸エネルギーと負荷応力に依存することを示している。

第 5 章では、形状記憶合金アクチュエータの応用として形状制御機能を有する形状記憶合金複合はりを取扱い、その材料設計の指針を示している。

第 6 章は結言であり、本研究で得られた結果を要約し、今後の展望について言及している。

これを要するに、著者は、形状記憶合金の形状回復温度および変形応力と散逸エネルギーの関係の定式化とその妥当性の検証を行い、新たな知見を得るなど、機械工学における材料力学および機械材料学分野、特に機能性材料である形状記憶合金の応用技術の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。