

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 9 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560103

研究課題名(和文)多方向動作形状記憶複合材料の開発と長期機能特性評価の研究

研究課題名(英文)Development of Multiway-Actuation Shape Memory Composite and Evaluation of Long Term Functional Property

研究代表者

戸伏 壽昭(Tobushi, Hisaaki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70103231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：2種類の形状記憶合金テープおよび形状記憶ポリマーフィルムを積層した形状記憶複合複合ベルトでは、加熱と冷却で3方向の曲げ変形特性が現れる。形状記憶合金ワイヤーに窒素イオンを注入すると、曲げ疲労寿命が長くなる。応力制御のサブループ負荷を受ける形状記憶合金では、クリープとクリープ回復、および応力緩和と応力回復が現れる。形状記憶合金テープのねじり疲労寿命曲線はべき関数で表される。形状記憶合金テープによるドアの自動開閉モデルと自動開閉するブラインドモデルの2種類の小型アクチュエータを開発した。

研究成果の概要(英文)：In the shape-memory composite belt laminated with two kinds of shape-memory alloy tape and shape-memory polymer film, three-way deformation properties appear during heating and cooling. If the nitrogen ion is implanted to the shape-memory alloy wire, the fatigue life becomes longer. In the shape memory alloy subjected to the stress-controlled subloop loading, creep or creep recovery and stress relaxation or creep recovery appear. The torsional fatigue life curve of the shape-memory alloy tape is expressed by a power function. Two kinds of small actuator models, an automatic opening and closing door and an automatic opening and closing blind, were developed by using two kinds of shape-memory alloy tapes showing shape memory effect and superelasticity.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：インテリジェント材料 形状記憶合金 形状記憶ポリマー 複合材料 形状記憶効果 超弾性 疲労 マルテンサイト変態

## 1. 研究開始当初の背景

形状記憶材料はインテリジェント材料としての機能特性に優れており、その実用が世界的に研究されている。本研究では高機能形状記憶材料の開発、実用化において最も重要な熱・力学的機能特性とそれを長期間繰り返し使用した場合の機能特性を明らかにし、新型アクチュエータを開発する。

## 2. 研究の目的

(1) 形状記憶合金と形状記憶ポリマーとの複合材料の研究は本研究が世界で最初であり、3方向形状記憶効果や回復応力などの機能特性を明らかにし、形状記憶アクチュエータの設計法を開発する。

(2) 形状記憶材料に関する申請者のこれまでの多くの研究成果は世界的に高く評価されており、本研究ではさらに高機能形状記憶材料および新型の形状記憶アクチュエータの開発に発展させる。

## 3. 研究の方法

傾斜機能を有する形状記憶合金および形状記憶ポリマーを開発し、それらの機能特性を調べる。さらに、市販の形状記憶合金ワイヤーおよびテープの曲げとねじりに関する疲労寿命特性を調べ、疲労き裂の発生と進展特性を明らかにし、合金テープによる小形の回転駆動アクチュエータを開発する。形状記憶ポリマーの形状保持条件を変化させ、形状回復性と二次賦形特性に対する影響および形状記憶素子の設計法を明らかにする。形状記憶合金と形状記憶ポリマーの構成、体積分率および変態温度を組み合わせた複合材料を作製し、3次元で3方向挙動を示す形状記憶複合材料アクチュエータを開発する。

## 4. 研究成果

本研究により得られた主要な研究成果は以下のとおりである。

(1) TiNi 形状記憶合金とポリウレタン系形状記憶ポリマーを組合せた形状記憶複合複合ベルトを作製し、アクチュエータとしての変形特性を明らかにした。変態温度が異なり形状記憶効果と超弾性を示す2種類の形状記憶合金テープおよびガラス転移温度が形状記憶合金の変態温度の中間にある形状記憶ポリマーフィルムを積層した形状記憶複合複合ベルトを作製した。この形状記憶複合複合ベルトは、加熱と冷却で3方向の曲げ変形を示す。これらの加熱と冷却の過程におけるたわみおよび回復力の3方向の挙動特性を、ベルトを構成する形状記憶合金と形状記憶ポリマーの特性に基づいて明らかにした。

(2) TiNi 形状記憶合金ワイヤーに窒素イオンを注入すると変態温度は上昇し、応力誘起マルテンサイト変態の応力レベルは低下するために、超弾性を示すSMAが形状記憶効果を示すようになる。また、窒素イオン

を注入することにより曲げ疲労寿命が長くなる。特に曲げひずみ振幅の小さい場合には、疲労き裂の起点が最大曲げひずみの位置と異なるために疲労き裂進展速度が低くなり、疲労寿命が長くなる。

(3) 応力制御のサブループ負荷を受けるTiNi形状記憶合金について、負荷過程における応力誘起マルテンサイト変態の上部応力水平段において応力を一定に保持すると時間の経過と共にひずみの増加するクリープ変形が現れる。また、除荷過程における逆変態の下部応力水平段で応力を一定に保持するとひずみの減少するクリープ回復が現れる。これらのクリープとクリープ回復のひずみ速度は応力速度に比例して高くなる。このクリープとクリープ回復は外部からの加熱冷却なしで生じるので、アクチュエータの応用において位置を制御する形状記憶合金素子の設計において考慮すべき重要な現象である。

(4) 両振りのねじりを受ける形状記憶合金テープの変形特性は、両振りに関してほぼ対象になる。ねじり疲労寿命曲線はべき関数で表される。ねじり疲労寿命は、両振りに対して片振りの方が長い。両振りと片振りの疲労寿命特性を1サイクル当りの散逸仕事で整理すると、両者の疲労寿命特性は単一のべき関数で統一的にあらわされる。合金テープによる小形の回転駆動アクチュエータとして、超弾性と形状記憶効果を示すSMAテープを組合せたアクチュエータを2種類開発した。ねじりを与えた超弾性合金テープに対して形状記憶効果を示すSMAを通電加熱することにより動作するドアの開閉モデルを作製し、その挙動を明らかにした。また、ねじりを与えた超弾性合金テープに対して形状記憶効果を示すSMAを太陽光により加熱し、太陽光が当たる場合と陰る場合で自動開閉するブラインドモデルを作製し、その開閉挙動をした。

(5) 応力制御のサブループ負荷を受けるTiNi形状記憶合金について、負荷過程における応力誘起マルテンサイト変態の上部応力水平段においてひずみを一定に保持すると時間の経過と共に応力の減少する応力緩和が現れる。また、除荷過程における逆変態の下部応力水平段で応力を一定に保持すると応力の増加する応力回復が現れる。これらの応力緩和と応力回復の大きさは負荷除荷過程における応力速度に比例して大きくなる。この応力緩和と応力回復は外部からの加熱冷却なしで生じるので、駆動力を制御する形状記憶合金素子の設計において考慮すべき重要な現象である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 19 件)

(1) 武田亘平、松井良介、戸伏壽昭、応力制

- 御サブロープ負荷における TiNi 形状記憶合金の応力緩和および応力回復、日本機械学会論文集、80巻、809号、pp. 1-11, 2014, DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0002, 査読有
- (2) K. Takeda, R. Matsui, H. Tobushi, E. Pieczyska, Transformation-Induced Relaxation and Stress Recovery of TiNi Shape Memory Alloy, *Materials*, Vol. 7, pp. 1912-1926, 2014, 査読有
- (3) K. Takeda, H. Tobushi, K. Mitsui, N. Levintant-Zayonts and S. Kucharski, Influence of Nitrogen Ion Implantation on Deformation and Fatigue Properties of TiNi Shape Memory Alloy Wire, *Arch. Mech.*, Vol. 65, No. 5, pp. 391-405, 2013, 査読有
- (4) K. Takeda, R. Matsui, H. Tobushi, E.A. Pieczyska, Creep and Creep Recovery under Stress-Controlled Subloop Loading in TiNi Shape Memory Alloy, *Arch. Mech.*, Vol. 65, No. 5, pp. 429-444, 2013, 査読有
- (5) H. Tobushi, E. Pieczyska, K. Miyamoto, K. Mitsui, Torsional Deformation Characteristics of TiNi SMA Tape and Application to Rotary Actuator, *J. Alloys and Compounds*, Vol. 577S, pp. S745-S748, 2013, 査読有
- (6) E. A. Pieczyska, H. Tobushi and K. Kulasinski, Development of Transformation Bands in TiNi SMA for Various Stress and Strain Rates Studied by Fast and Sensitive Infrared Camera, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, 035007, doi:10.1088/0964-1726/22/3/035007, 2013, 査読有
- (7) K. Takeda, H. Tobushi and E. A. Pieczyska, Transformation-Induced Creep and Creep Recovery of Shape Memory Alloy, *Materials*, Vol. 5, pp. 909-921, 2012, 査読有
- (8) K. Takeda, H. Tobushi, K. Mitsui, Y. Nishimura and K. Miyamoto, Torsional Properties of TiNi Shape Memory Alloy Tape for Rotary Actuator, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, pp. 2680-2683, 2012, 査読有
- (9) H. Tobushi, K. Mitsui, K. Takeda, K. Kitamura and Y. Yoshimi, Performance and Design of Precision-Cast Shape Memory Alloy Brain Spatula, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 50, No. 3, pp. 855-869, 2012, 査読有
- (10) E. A. Pieczyska, H. Tobushi, K. Kulasinski and K. Takeda, Impact of Strain Rate on Thermomechanical Coupling Effects in TiNi SMA Subjected to Compression, *Materials Transaction*, Vol. 53, No. 11, pp. 1905-1909, 2012, 査読有
- (11) E. A. Pieczyska, H. Tobushi, K. Takeda, D. Stroz, Z. Ranachowski, K. Kulasinski, S. Kudela Jr. and J. Luckner, Martensite Transformation Bands Studied in TiNi Shape Memory Alloy by Infrared and Acoustic Emission Techniques, *Kovove Materials*, Vol. 50, pp. 309-318, 2012, 査読有
- (12) K. Takeda, H. Tobushi, K. Miyamoto and E. A. Pieczyska, Superelastic Deformation of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Various Subloop Loadings, *Mater. Trans.*, Vol. 53, No. 1, pp. 217-223, 2012, 査読有
- (13) 戸伏壽昭、宮本浩司、三井健人、形状記憶合金熱エンジンの出力特性と応用、日本機械学会論文集(A編) 77巻 777号, pp.754-758, 2011, 査読有
- (14) 戸伏壽昭、林俊一、伊達功祐、西村泰彦、形状記憶複合帯板の3方向曲げ挙動、日本機械学会論文集(A編) 77巻 777号, pp.759-763, 2011, 査読有
- (15) H. Tobushi, K. Miyamoto, Y. Nishimura and K. Mitsui, Novel Shape Memory Actuator, *Journal of Theoretical and Appl. Mech.*, Vol. 49, No. 3, pp. 927-943, 2011, 査読有
- (16) 武田巨平、戸伏壽昭、宮本浩司、E. A. Pieczyska, TiNi 形状記憶合金のサブロープ超弾性変形、日本機械学会論文集(A編) 77巻 781号, pp.1509-1517, 2011, 査読有
- (17) H. Tobushi, S. Hayashi, E. Pieczyska, K. Date and Y. Nishimura, Three-Way Actuation of Shape Memory Composite, *Arch. Mech.*, Vol. 63, No. 5-6, pp. 443-457, 2011, 査読有
- (18) H. Tobushi, K. Miyamoto, Y. Nishimura and K. Mitsui, Novel Shape Memory Actuator, *Journal of Theoretical and Appl. Mech.*, Vol. 49, No. 3, pp. 927-943, 2011, 査読有
- (19) E. A. Pieczyska and H. Tobushi, TiNi Shape Memory Alloy Tension at Various Temperatures – Infrared Imaging of Shape Memory Effect and Pseudoelasticity, *Mechanics and Control*, Vol. 30, No. 1, pp. 20-26, 2011, 査読有
- [学会発表](計 35 件)
- (1) H. Tobushi, K. Takeda, R. Matsui and S. Hayashi, Shape-Memory Composite Actuator with SMA and SMP, *Proc. of*

- The 19<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, pp. 9285-9295, July 28-August 2, 2013, Montreal, Canada
- (2) E.A. Pieczyska and H. Tobushi, Development of Stress-Induced Martensitic transformation in TiNi Shape Memory Alloy, Proc. of International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, pp. 225-226, May 20-24, 2013, Prague, Czech Republic
  - (3) E.A. Pieczyska, M. Maj, K. Kowalczyk-Gajewska, M. Staszczak, H. Tobushi, S. Hayashi and M. Cristea, Mechanical and Infrared Thermography Analysis of Shape Memory Polyurethane, Proc. of International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, pp. 282-283, May 20-24, 2013, Prague, Czech Republic
  - (4) K. Kulasinski, E.A. Pieczyska, H. Tobushi and K. Takeda, TiNi SMA Subjected to Compression – Thermomechanical Effects Investigated with IR Technique, 38<sup>th</sup> Solid Mechanics Conference, pp. 290-291, August 27-31, 2012, Warsaw, Poland
  - (5) K. Mitsui, K. Takeda, H. Tobushi, N. Levintant-Zayonts and S. Kucharski, Influence of Nitrogen Ion Implantation on Deformation and Fatigue Properties of TiNi Shape-Memory Alloy Wire, 38<sup>th</sup> Solid Mechanics Conference, pp. 292-293, August 27-31, 2012, Warsaw, Poland
  - (6) K. Takeda, H. Tobushi and E.A. Pieczyska, Creep Behavior under Stress-Controlled Subloop Loading in tiNi Shape Memory Alloy, 38<sup>th</sup> Solid Mechanics Conference, pp. 296-297, August 27-31, 2012, Warsaw, Poland
  - (7) K. Takeda, Y. Nishimura, K. Mitsui and H. Tobushi, Rotary Actuator Using Torsional Deformation of Shape Memory Alloy Tape, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2012. p. 45, April 23-25, 2012, Hirosaki, Japan
  - (8) K. Takeda, Y. Nishimura, K. Mitsui and H. Tobushi, Shape-Memory Composite Belt for Actuator, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2012. p. 46, April 23-25, 2012, Hirosaki, Japan

〔図書〕(計 2 件)

- (1) H. Tobushi, R. Matsui, K. Takeda and E. A. Pieczyska., Mechanical Properties of Shape Memory Materials, Nova Science Publishers., pp.1-271, 2013
- (2) 戸伏壽昭、林俊一、よくわかる実験技術・学術用語 第2版、日本実験力学会、pp. 75-78, 2012

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

戸伏壽昭 (TOBUSHI, Hisaaki)  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号：70103231

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

北村一浩 (KITAMURA, Kazuhiro)  
愛知教育大学・教育学部・准教授  
研究者番号：40332035