

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760082

研究課題名(和文)形状記憶合金リボン材の高疲労強度化技術の構築と温熱排水用熱エンジンの試作

研究課題名(英文) Developments of the high fatigue characteristics of shape memory alloy ribbon element and manufacturing of heat engine driven by hot waste water.

研究代表者

長 弘基 (Cho, Hiroki)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：00435421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：Ti-Ni合金の各種特性に及ぼす熱処理中の付与ひずみおよび表面状態の影響について調べた。その結果、付与ひずみが疲労特性に及ぼす影響は少ないが、10%以上の付与ひずみ下での熱処理により形状記憶・機械的特性が向上することを明らかにした。また、SMAの表面状態の平滑化にともない疲労特性は向上するが、ナイロンコーティングを施すことにより機械研磨程度でも十分な疲労特性を示すことを明らかにした。

さらに、新しく考案した「渦巻きばね型SMA熱エンジン」を試作し、ギアやワンウェイクラッチによる機械的損失を削減した「プーリー式渦巻きばね型SMA熱エンジン」を試作、従来比で約20%のエンジン出力向上を果たした。

研究成果の概要(英文)：Effects of applied strain during heat-treatment and surface smoothness on mechanical characteristics and fatigue characteristics of Ti-Ni shape memory alloy (SMA) are investigated. From the results, the applied strain during heat-treatment has a small influence on fatigue characteristics of Ti-Ni SMA. However, mechanical and shape memory characteristics of Ti-Ni SMA are improved by the heat-treatment under applying strain above 10%. Moreover, fatigue characteristics of Ti-Ni SMA is improved with the surface smoothing of SMA sample. Furthermore, fatigue characteristics are improved by nylon-coating even if mechanical polished sample.

Meanwhile, we develop a new heat engine (the belt-driven type heat-engine) to improve the output power of heat engine using SMA spiral spring actuators, and investigate output characteristics of this engine. In consequence, the output efficiency of the new engine is 20% higher than that of the previous type heat-engine using a spiral spring actuator.

研究分野：金属工学

キーワード：形状記憶合金 アクチュエータ 熱エンジン 低温排熱回収 機械的特性 疲労特性

1. 研究開始当初の背景

現在急速に拡大する自然エネルギー利用技術に太陽光発電があるが、100°C以下の温熱排水からのエネルギー回収技術は確立されておらず、発電施設や工場・温泉などから排出される温水は周辺施設への温水供給以外にはほとんど未利用のまま破棄される。これは、ランキンサイクルのような液体の相変化を利用する方法では、温熱排水のような低品位熱エネルギーの回収はエネルギーコストに大きな課題を持つためである。低品位熱エネルギーは日本国内の工場から排出される廃熱エネルギーの約7割を占めており、このエネルギーを1%でも回収できれば、原油換算で10万キロリットルのエネルギーを回収することができる。我々研究グループは低品位熱エネルギー回収用の、渦巻きばね型の形状記憶合金(SMA)素子を用いた新しい熱エンジン用アクチュエータを考案した。この熱エンジンの実用化のためにはSMAの高疲労強度化技術の構築が必要であり、市場からも大いに求められている。

2. 研究の目的

低品位エネルギーを回収する装置として、100°C以下の温水にて良好に駆動する形状記憶合金を用いたSMA熱エンジンの研究がなされている。しかし現状では、SMA素子の使用寿命が短く、実用化には至っていない。そこで本研究ではSMAの疲労特性向上を目的に、熱処理や表面処理がSMAの疲労特性に与える影響について調べることを目的とした。この疲労特性向上の技術は同じく形状記憶合金を用いる医療機器である血管拡張用ステントの製品寿命向上にも用いることができる。

また、疲労特性を向上させたSMA素子を用いてSMA熱エンジンを試作し、その特性試験も行った。

3. 研究の方法

(1) SMA素子の高疲労強度化の研究

SMA素子の表面に対し、機械的研磨および電解研磨、さらにはナイロンコーティングを施した試料を作製し、それぞれに疲労試験を行うことで、疲労特性に及ぼす表面状態の影響について調べた。また、破断面の観察を行うことで、破壊の過程についても調べ、破壊を抑制するための手段についても検討した。

(2) SMA熱エンジンの研究

新しく考案した「渦巻きばねSMA素子」を用いた「渦巻きばね型SMA熱エンジン」を試作、その動作特性について調べた。本研究では結果的に「ギア駆動式」と「ベルト駆動式」の2つのタイプのSMA熱エンジンを試作した。

4. 研究成果

(1) ひずみ付与下での熱処理が形状記憶特性に及ぼす影響

形状記憶合金は変形させ、その変形を保持した状態で熱処理を施すことで、変形した形を記憶する特徴を有している。形状記憶時の変形量はひずみ換算で5%以内に収めることが通常であるが、本研究ではそれを超えた10%以上の変形を付与した状態で形状記憶熱処理を行い、形状記憶・機械的特性に与える影響について調べた。図.1に熱処理時の付与ひずみと疲労特性の関係を示す。ひずみの付与により、若干の疲労特性の低下が見られるが、明確な影響を見ることはできなかった。また、形状回復が開始する温度についても付与ひずみの影響はみられなかった。

しかし、図.2に示すように一定温度下での引張試験において、付与ひずみの増加にともない形状回復量が大きく増加することがわかった。また、10%以上の付与ひずみを与えた場合、繰り返し特性についても大幅に向上することがわかった。この結果から、10%以上のひずみ付与下で熱処理を施すことにより形状記憶素子の性能向上を図れることを明らかにした。

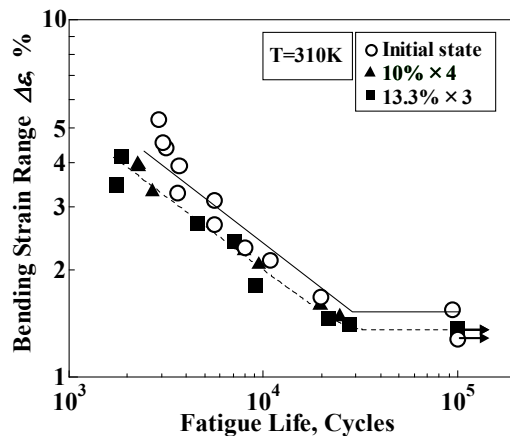


図.1 通常熱処理および付与ひずみ下での熱処理を施した試料のS-N線図.

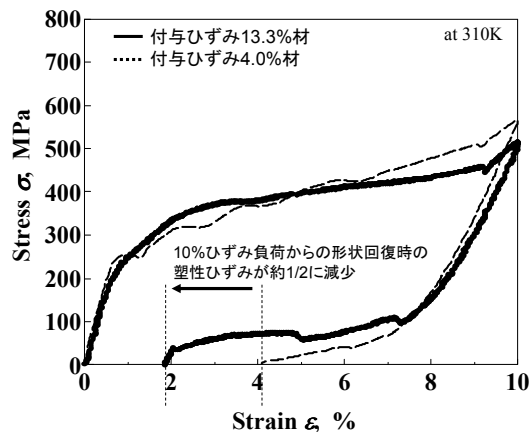


図.2 ひずみ10%付与後の形状回復量試験

(2) 表面処理が疲労特性に及ぼす影響

次に、系形状記憶合金の表面処理の影響が疲労特性に及ぼす影響について調べるため、通常熱処理をただけの未研磨材、熱処理後に機械研磨を施した物理研磨材、および熱処理・機械研磨後に電解研磨を施した電解研磨材を用意し、それぞれの試料の疲労特性について調べた。

SEMにより各々の試料の表面状態を観察すると、未処理材には表面に試料製作時の加工痕が無数に存在していた。機械研磨によりそれら加工痕は除去されるが、研磨痕は残留していた。電解研磨を施すと、SEM観察のレベルでは表面に傷が観察されなかった。

これら試料に対し疲労試験を行うことで疲労特性を調べた。各試料の疲労特性の比較を図.3に示す。全体的には表面状態の平滑化にともない、疲労特性が向上していることがわかる。3%以上の振幅ひずみ領域に着目すると、未研磨材と物理研磨材にはほとんど差が見られないのに対し、電解研磨を施した試料の疲労特性は他の2つに比べ大きく向上する傾向にあった。一方3%以下の振幅ひずみ領域では物理研磨材と電解研磨材間の疲労特性差が少なくなり、未研磨材が他の2つと比較し疲労特性が大きく低下する傾向にあった。

これら傾向の原因を特定するため、SEMによる破断面の観察を行ったところ、すべての試料において破壊の起点は試料表面に存在することがわかった。また破断面の側面付近の観察を行ったところ(図.4)、未研磨材は付与したひずみ量にかかわらず破断面付近に亀裂が発生していた。しかし物理研磨材においては、3%以上のひずみを付与した場合は破断面付近の亀裂が確認されたが、3%以下の領域では観察されなかった。また電解研磨材においては、すべての領域では断面付近の亀裂は観察されなかった。このことから、3%以下のひずみを付与した場合は、機械研磨程度の表面処理によるクラック除去により、破壊の起点となりうる亀裂の進展が起こる頻度が低下するものの、3%以上のひずみを付与した場合は、機械研磨では疲労特性は向上せず、電解研磨程度までの表面平滑度が求められるということがわかった。

(3) 表面コーティングが疲労特性に及ぼす影響

SMAの表面状態が疲労特性に大きな影響を及ぼすことが確認できたため、通常の金属と同様に、表面に圧縮応力を付与することにより疲労特性が向上する可能性が考えられた。ただし、通常金属で行われるブラスト処理などによる表面圧縮応力の付与は、処理した表面層の形状回復能が喪失すること、形状記憶合金の変形量が通常の金属の10倍以上であることなどから、形状記憶合金には効果が無いと考えられた。

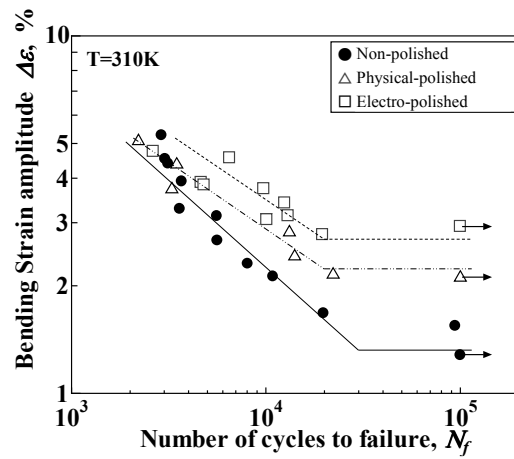


図.3 表面状態を変化させた各試料のS-N線図

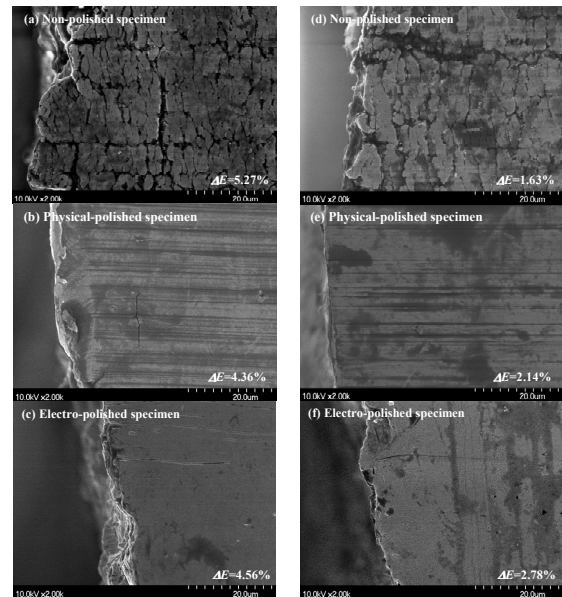


図.4 3%以上のひずみ付与下((a)~(c))および3%以下のひずみ付与下((d)~(f))で破断した各試料の側面SEM写真

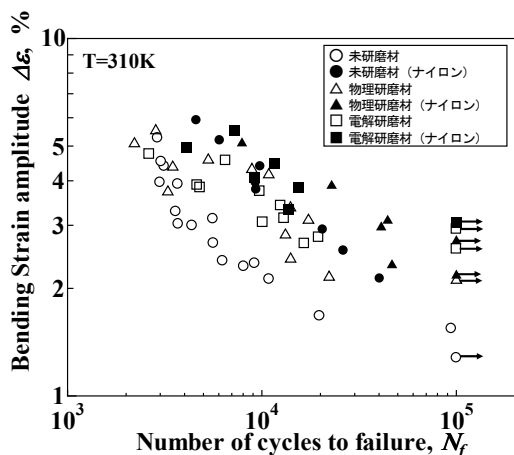


図.5 ナイロンコーティングを施した各試料のS-N線図との比較

そこで、形状記憶合金の大変形に対応でき、かつ表面圧縮応力を発生させる方法として、(2)にて製作した各試料に対しナイロンコーティングを施した試料を製作、疲労試験を行

うことで、ナイロンコーティングが疲労特性に及ぼす影響について調べた。

図.5に疲労試験の結果を示す。試験結果から、未処理材および物理研磨材に関してはナイロンコーティングによる疲労特性の向上が見られた。しかし、電解研磨材に関してはナイロンコーティングの影響が少ないことがわかる。このことから、ナイロンコーティングは疲労特性の向上に寄与するが、電解研磨程度まで表面を平滑化した場合はナイロンコーティングによる疲労特性向上の余地が少ないことが明らかになった。逆に、機械研磨程度の試料において、ナイロンコーティングを施すことで電解研磨と同等の疲労特性を示す材料が製作できることを明らかにした。

(4) ギア駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの試作と動作特性

新しく開発した「渦巻きばね型 SMA アクチュエータ」は温水の流入などの加熱により回転動作を行うが、動作終了後に外力により「ネジを巻く」ことで再度の動作が可能な機構である。そこで渦巻きばね型アクチュエータ2つギアにより連結し、加熱・冷却を交互に行うことで連続的な動作が可能な機構をとし、さらにワンウェイクラッチにより一方向回転の出力のみを取り出すことが可能な「ギア駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジン」を試作した。図.6の(a)に装置全体図、(b)にその模式図を示す。この装置は、連結することでフライホイール効果を得ることができ、大出力化に向けた機構である。

本機構は温水・冷水を交互に2つのアクチュエータに流入させることで良好に動作し、一方向回転を取り出すことに成功した。エンジンの出力特性の測定結果を図.7に示す。本エンジンの特徴として、エンジンの回転数によらずトルクがほぼ一定であることがわかる。これは SMA 素子の形状が定トルクばねに準じる形であることが原因であると考えられる。一方、単位質量・ひずみ当たりの出力は 0.028W/g\% であり、従来開発された SMA 熱エンジンの平均である約 0.05W/g\% の約半分程度であることがわかった。これはギアやワンウェイクラッチなどによる駆動損失が大きいことが原因であった。この駆動損失は装置の大型化にともない顕著になり、大型化した試作品では良好な動作を得ることができなかった。

(5) ベルト駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの試作と動作特性

ギア駆動式は装置の大型化に伴い駆動損失が増加し、結果として良好な動作を得られない傾向にあることがわかった。そこでギアやワンウェイクラッチなど、駆動損失の大きい機構を用いず、アクチュエータおよびモータ

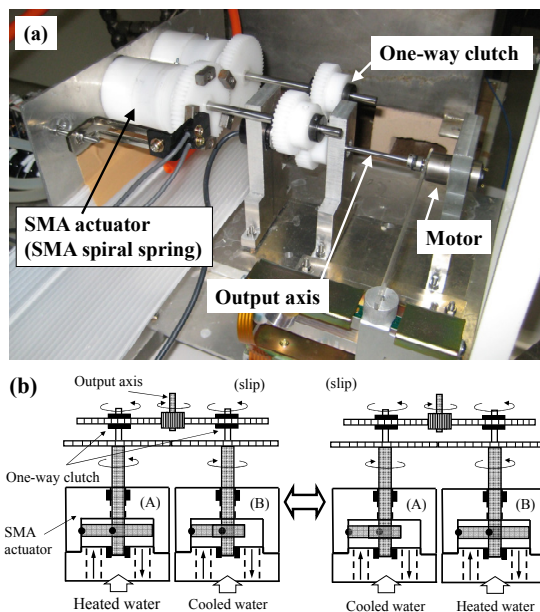


図.6 ギア駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの(a)装置全容および(b)模式図。

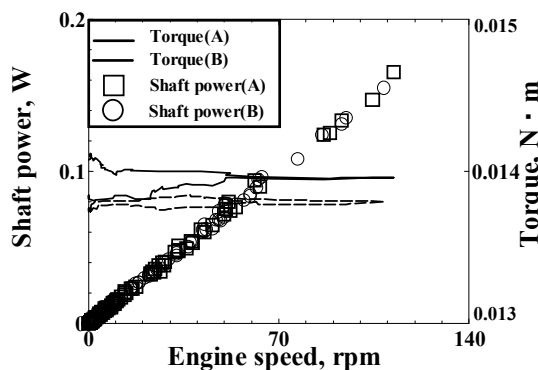


図.7 ギア駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの動作特性

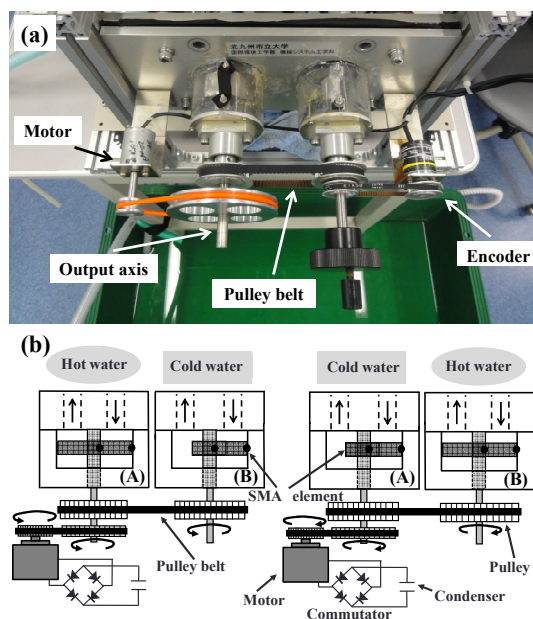


図.8 ベルト駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの(a)装置全容および(b)模式図。

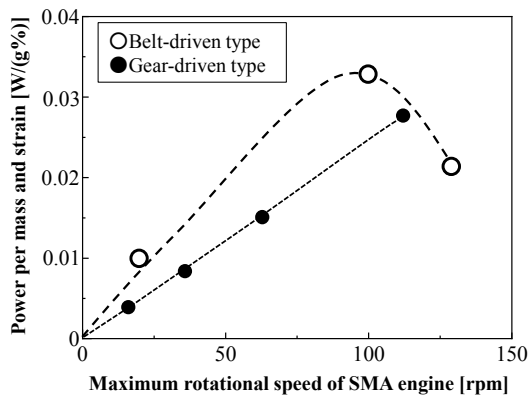


図.9 ベルト駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの動作特性

一をプーリーにより連結する「ベルト駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジン」を考案した。本機構はギア駆動式と異なり、モーターの回転数が変化するため、整流子とバッテリーを用いてモーターの回転にかかわらず充電が可能なシステムを製作した。図 8(a)に装置全体図、(b)にその模式図を示す。本機構も温水・冷水の交互の流入により良好に動作することを確認した。また出力特性を測定すると(図.9)0.03W/g%を発生し、ギア駆動式と比較し約 20%の性能向上を確認できた。現在、本機構のさらなる出力向上を目指し、機構の改修を行なっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件, 査読有り)

- 1) T. Morita, Y. Nishimura, H. Fujiki, S. Kishimoto, Y. Takeda, H. Cho, "Fabrication and Output Characteristics of a Belt-Driven Type Heat-Engine Using Shape Memory Alloy Spiral Spring Actuators", *Trans. MRS-J*, (2015) in press.
- 2) S. Narumi, K. Takigawa, H. Cho, "Effects of Surface Smoothness on the Fatigue Characteristics of Ti-50.4at%Ni Shape Memory Alloy Wire", *Trans. MRS-J*, (2015) in press.
- 3) H. Cho, D. Kotegawa, T. Sakuma, K. Yamauchi, "The Effect of Applied Strain during Repeated Heat-treatment under Constrained Strain on the Mechanical and Shape Memory Properties of Ti-Ni Shape Memory Alloy", *Trans. MRS-J*, 38 [3] (2013) 427-430.
- 4) H. Cho, M. Senju, Y. Takeda, T. Yamamoto, T. Sakuma, "The Fabrication and Output Power Characteristics of a Heat-Engine using a Shape Memory Alloy", *Trans. MRS-J*, 38 [3] (2013) 423-426.
- 5) A. Suzuki, T. Yamamoto, H. Cho, T. Sakuma, "Numerical Study on Transformation/Deformation Behavior of Shape Memory Alloy under Mechanical and Thermal Loading in the Uniaxial and Multi-axial Stress State", *Trans. MRS-J*, 38 [1] (2013) 1-6.

6) H. Cho, T. Yamamoto, A. Suzuki, T. Sakuma, K. Yamauchi, "Effect of Repeated Heat-treatment under Constrained Strain on Mechanical Properties of Ti-Ni Shape Memory Alloy", *Advances in Science and Technology*, Vol.78 (2013) 69-74.

7) T. Yamamoto, A. Suzuki, H. Cho, T. Sakuma, "Transformation Behavior of Shape Memory Alloys in Multiaxial Stress State", *Advances in Science and Technology*, Vol.78 (2013) 46-51.

[雑誌論文] (計 1 件, 査読無し)

1) 長 弘基, 佐久間 俊雄, チタン誌, Vol.61 No.4, (2013) "チタン-ニッケル形状記憶合金渦巻きばねアクチュエータを用いた熱エンジンの開発" pp.309-313.

[学会発表] (計 14 件)

1) 鳴海 真也, 滝川 健一郎, 長 弘基, "Ti-50.4at%Ni 形状記憶合金ワイヤーの曲げ疲労特性に及ぼす表面処理の影響" SMA シンポジウム 2014 2014 年 11 月 13 日, アクロス福岡

2) 西村 祐樹, 森田 剛弘, 竹田 悠二, 長 弘基, "ベルト駆動式渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの試作と動作特性" SMA シンポジウム 2014 2014 年 11 月 13 日, アクロス福岡

3) T. Morita, Y. Nishimura, H. Fijiki, S. Kisimoto, Y. Takeda, H. Cho, "Fabrication and Output Characteristics of Belt Driven Type Heat-engine using Shape Memory Alloy Spiral Spring Actuator" The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka University, Fukuoka, Japan (2014) August 28.

4) S. Narumi, K. Takigawa, H. Cho, "Effects of Surface Smoothness on the Fatigue Characteristics of Ti-Ni Shape Memory Alloy Wire" The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka University, Fukuoka, Japan (2014) August 28.

5) 森田 剛弘, 西村 祐樹, 竹田 悠二, 長 弘基, "ベルト駆動による渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの試作および動作特性" 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス 2014 年 7 月 20 日, 福島大学.

6) 鳴海 真也, 滝川 健一郎, 長 弘基, "Ti-50.4at%Ni 形状記憶合金の疲労特性に及ぼす表面処理の影響" 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス 2014 年 7 月 20 日, 福島大学.

7) 森田 剛弘, 竹田 悠二, 長 弘基, "ベルト駆動による渦巻きばね型 SMA 熱エンジンの試作" 先進機能材料・先進生体材料としての形状記憶合金の新しい用途開発 SMA シンポジウム 2013, 2013 年 11 月 14 日, ホテル華乃湯 コンベンションホール(仙台市).

8) 森田 剛弘, 長 弘基, 佐久間 俊雄, 山内 清 "Ti-50.4at%Ni 形状記憶合金の疲労寿命特性に及ぼす段階拡張熱処理の影響" 日本機械

学会 M&M2013 材料力学カンファレンス
2013年10月12日, 岐阜大学.

9) D. Kotegawa, H. Cho, T. Yamamoto, T. Sakuma, K. Yamauchi, "Effect of Applied Strain during Repeated Heat-treatment under Constrained Strain on Mechanical and Shape Memory Properties of Ti-Ni Shape Memory Alloy" International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials 2012 (IUMRS-ICEM2012), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan (2012) September 25.

10) M. Senju, H. Cho, Y. Takeda, T. Yamamoto, T. Sakuma, "Fabrication and Output Power Characteristics of Heat-Engine using Shape Memory Alloy Spiral Spring Actuator" International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials 2012 (IUMRS-ICEM2012), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan (2012) September 25.

11) T. Ushiroda, T. Yamamoto, H. Cho, T. Sakuma, "Effect of Heat Treatment Conditions on Deformation Behavior of Ti-50.3at%Ni Shape Memory alloy" International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials 2012 (IUMRS-ICEM2012), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan (2012) September 25.

12) 小手川 大地, 長 弘基, 山本 隆栄, 山内 清, 佐久間 俊雄, "Ti-50.4at%Ni 形状記憶合金の形状記憶・機械的特性に及ぼす拡張熱処理中の付与ひずみの影響" 日本機械学会 M&M2012材料力学カンファレンス 2012年9月24日, 愛媛大学.

13) 後田 達哉, 山本 隆栄, 長 弘基, 佐久間 俊雄, "Ti-50.3at%Ni 形状記憶合金の変形挙動に及ぼす温度の影響"

日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス 2012年9月24日, 愛媛大学.

14) 千住 匡人, 長 弘基, 山本 隆栄, 佐久間 俊雄, "渦巻きばね型アクチュエータを用いた SMA 熱エンジンの作製と出力特性", 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス 2012年9月24日, 愛媛大学.

〔図書〕(計2件)

1) 長 弘基 "未利用向上排熱の有効活用技術と実用展開", サイエンス&テクノロジー, 2014, 総ページ数413項(うち pp.195-207).

2) 佐久間 俊雄, 長 弘基, サーマルマネジメント ~余熱・排熱の制御と有効利用~, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2013, 総ページ数636項(うち pp.443-454).

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 強ひずみ付与下での熱処理による Ti-Ni 系形状記憶合金の形状記憶処理方法

発明者: 長 弘基, 佐久間 敏夫

権利者: 大分大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-203352

出願年月日: 平成 24 年 9 月 14 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

※現在、上記特許を審査請求中

〔その他〕

ホームページ等

<http://hiroki-cho.jimdo.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長 弘基 (CHO, Hiroki)

北九州市立大学・国際環境工学部・機械シ

ステム工学科・准教授

研究者番号: 00435421