

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560298

研究課題名(和文)形状記憶合金を用いた位置およびトルク制御システムの構築と設計支援ツールの開発

研究課題名(英文) The development of the position/torque control system using the shape-memory alloy and development of the design support tool

研究代表者

佐久間 俊雄 (Sakuma, Toshio)

大分大学・工学部・客員教授

研究者番号：10371303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：結晶方位と変態面方位および変態方向を直接参照することなく、材料のマクロの相変態挙動を予測する多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モデルを開発し、形状記憶効果を含む種々の温度・応力変動負荷に対する形状記憶合金の応答を計算できることを確認した。制御距離を大幅に増大できる単軸インチワームの機構を開発し、良好に動作することを確認した。設定抵抗値と測定抵抗値との間の偏差をフィードバックして設定抵抗値を調節する「位置+トルク」制御システムを開発し、同制御システムによってSMAの過負荷を防止することができた。

研究成果の概要(英文)：We developed the phase transformation behavior prediction model for predicting macro phase transformation behavior of the polycrystal shape memory alloy without directly referring to crystal orientation, transformation plane and transformation direction. The model could calculate the various thermomechanical response of shape memory alloy including the shape memory effect. We developed the uniaxial inch worm mechanism that could largely increase control distance. The uniaxial inch worm mechanism worked well. We developed the position/torque control system of shape memory alloy actuator which feeds back the deviation between a setting resistance value and the measurement resistance value. The control system could prevent overload of the SMA.

研究分野：機能材料

キーワード：形状記憶合金 アクチュエータ 位置制御 トルク制御

1. 研究開始当初の背景

サーボモータに代表されるアクチュエータではエンコーダやレゾルバなどの位置センサーが用いられ、精確かつ高速の位置決め制御が可能である。一方、形状記憶合金(SMA)を用いたアクチュエータでは、SMA自体がセンサ機能を持つ機能素子であることから、センサーレスで位置制御と位置の保持が可能である。また、センサーレスはシステムの小型・軽量化、操作性の簡便化などそのメリットは大きい。さらにSMAは大変形が可能であり、出力/重量比はSMAが最も優れている。また、通電加熱駆動方式であるため機械的、電気的にノイズレスのシステムであるという特徴を有する。このために、機械、電気、自動車、宇宙航空、医療など多くの分野での利用が見出され、その実用化が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、抵抗値制御による形状記憶合金(SMA)を駆動素子とする位置決め制御システムを試作し、任意の位置に位置決め制御が可能であり、かつ、位置決め精度は $3\mu\text{m}$ 以下にできることを明らかにしてきた。本提案課題では、(1)制御システム設計支援ツールの開発、(2)制御距離の大幅な拡大を可能とするインチワーム機構さらに(3)トルク制御方法を構築し、能動カテーテル、能動ガイドワイヤーや能動内視鏡等への適用を想定した「位置+トルク」制御システムの基盤技術を構築することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)設計支援ツールの開発

SMAアクチュエータ設計支援ツールを開発するため、既に提案したアコモデーション挙動を考慮した応力-ひずみ関係を表す計算手法を基に、伝熱モデルを組合あわせた位置制御システムの変位-時間関係を高精度にシミュレートできる設計支援ツールを開発してきたが、これを用いて材料の変態挙動を知るためには、材料中に含まれるすべての結晶粒の方位およびそれぞれの結晶粒における変態面と変態方向(24通りの組み合わせがある)における分解せん断応力の値を計算し、変態および逆変態発生を判定をすることが必要であり、それによる計算負荷が大きい。そこで、結晶方位と変態面方位および変態方向を直接参照することなく、材料のマクロの相変態挙動を予測する多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モデルを用いた設計支援ツールを開発した。同モデルでは、部分的な変態および逆変態を示す部分要素の直列モデルを用い、この直列モデルと図1に示す変態応力・逆変態応力の温度依存性のデータを用いることにより、形状記憶効果を含む種々の温度・応力変動負荷に対する形状記憶合金の応答を計算することができる。

開発手順は以下の通りである。

(a) 駆動素子の特性評価実験

多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モ

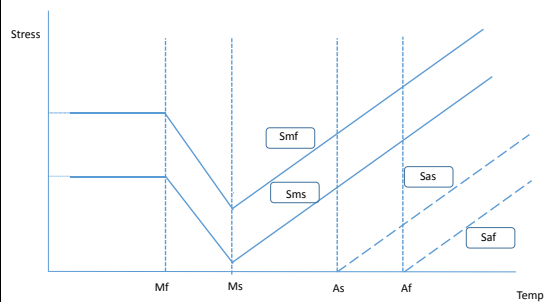


図1 変態応力・逆変態応力の温度依存性

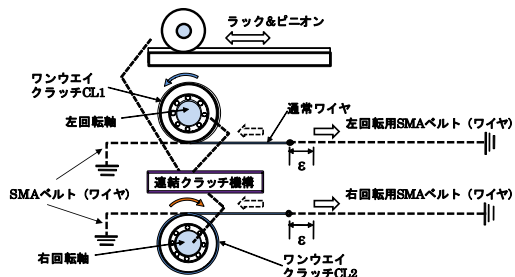


図2 インチワーム機構

デルの計算結果を検証するために、アクチュエータの駆動素子となるTi-Ni-Cu合金の超弾性や形状記憶特性に係わる応力-ひずみ関係を調べる実験を行う。実験は一定温度下での引張-徐荷試験、常温下での引張→徐荷→加熱の試験を行い、応力-ひずみ関係を求める。対象とするSMAは組成、加工率、熱処理等の異なる試料とする。

(b) 多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モデルの検証

多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モデルにより応力-ひずみ関係を計算するためには図1に示す変態応力・逆変態応力の温度依存性のデータが必要である。これらのデータは合金の組成や加工・熱処理条件により異なることが想定される。そこで、上記(a)の試験結果と計算結果との比較により各種合金の材料定数を定め、計算手法の高精度化を図る。

(2)単軸インチワーム機構の製作と性能評価

インチワーム機構(図2参照)を設計・製作し、位置制御性能に及ぼす課題を抽出する。具体的には、1回の駆動で行う制御距離の最適化、目標位置に位置決めするための制御方法および制御性能に及ぼす外部負荷の影響等に関する制御性能評価試験により課題を抽出し、インチワーム機構の基盤技術を構築する。

(3)「位置+トルク」制御システムの開発

「位置+トルク」制御システムは図3に示すような試験装置を用いて開発する。試験装置はSMA、スライダ、ロードセル、電動アクチュエータ、レーザー変位計および制御装置等で構成されている。試験は、通電加熱により設定した抵抗値の位置まで変位させる

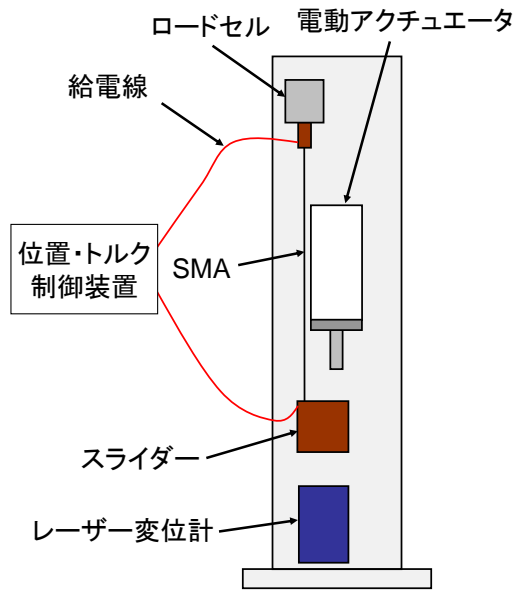


図3 位置・トルク制御システム用試験装置

途中の任意の位置で、電動アクチュエータを用いて SMA アクチュエータに拘束を与える。SMA アクチュエータは設定した抵抗値の位置まで移動しようとするが、拘束されているため、SMA に過電流が流れ焼損に至る。ここで過電流が流れないように電流量の上限値を制限することによりトルク制限をかけることができるが、この方法では、電流制限値の低下に伴い、SMA アクチュエータの最大移動量および移動速度が低下する。そこで、SMA 自体を荷重センサーとして利用する過負荷保護機能を開発するため、SMA アクチュエータが設定した抵抗値の位置まで移動する途中の任意の位置で拘束されたときの抵抗値、電流値および負荷応力の変化を調べた。

4. 研究成果

(1)設計支援ツールの開発

図4に形状記憶合金の超弾性挙動の計算例を示す。変態完了まで付加し、逆変態完了まで計算したものである。オーステナイト状態 (A_f 点以上の温度領域)にある形状記憶合金に単軸引張り応力を負荷すると、応力の増加に伴いマルテンサイト変態が生じ、応力・ひずみ曲線の勾配が緩くなる。さらに変形が進みマルテンサイト変態が飽和するとマルテンサイトの弾性変形により、応力・ひずみ曲線が立ち上がる。次いで除荷過程においては、ある応力以下になるとオーステナイト逆変態が起こり、オーステナイト逆変態の飽和を経て、応力・ひずみの原点に復帰する。この一連の応力・ひずみ挙動が示されている。

図5は図4と同じく形状記憶合金の超弾性挙動の計算例であるが、負荷途中で、変態完了以前に応力を除荷し、逆変態を起こさせ、逆変態完了以前に再負荷を行い、変態を生じさせる場合の応答を示したものである。部分

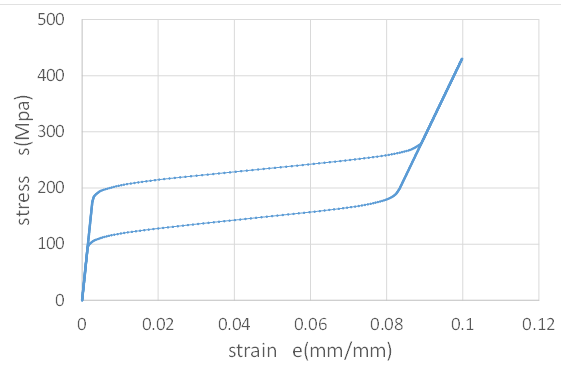


図4 超弾性挙動

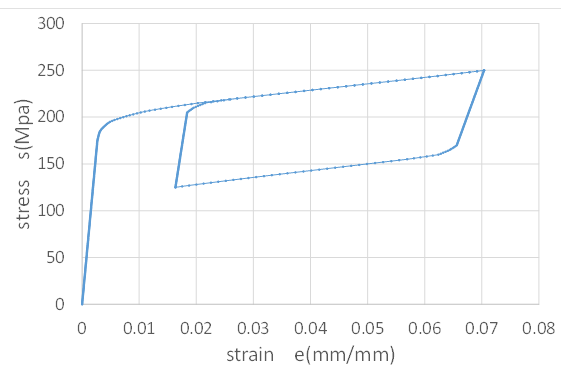


図5 除荷—再負荷超弾性挙動

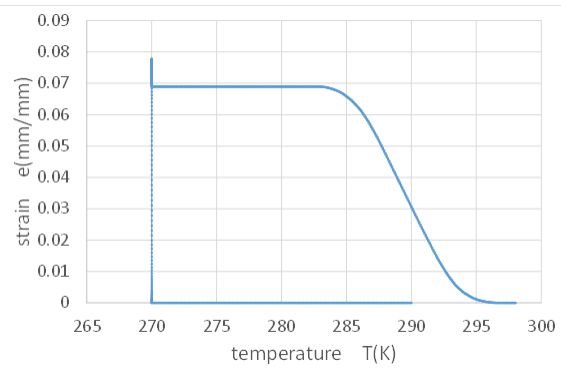


図6 形状記憶効果

変態および部分逆変態を許す部分要素を用いることにより、負荷途中で除荷する場合における弾性から逆変態への滑らかな遷移および除荷途中で再負荷する場合における弾性から変態への滑らかな遷移が表されている。

図6は形状記憶合金の形状記憶効果の計算例を示す図であり、ひずみと温度の関係を示している。無応力状態において温度を 290K から 270K まで下げる負荷条件においては、温度 283K (M_s) から温度誘起変態が始まり温度 273.4K (M_f) で温度誘起変態が完了する。温度誘起変態によっては変態ひずみが発生しないのでこの負荷条件ではひずみゼロのままである。温度 270K に温度を一定に保

ったまま単軸引張り負荷を与え変態を生じさせる。温度 270K の縦軸上のひずみ 0.078 は弾性ひずみと変態ひずみの和である。応力を負荷することにより温度誘起変態が応力誘起変態に変化し、変態ひずみが発生したものである。この間、材料はマルテンサイト状態にあるので、弾性ひずみの計算はマルテンサイトの弾性定数を用いて行う。この状態から応力を除荷するとそれに伴い弾性ひずみがゼロとなるが、この温度においては図 1 よりわかるように逆変態は生じないので変態ひずみはそのまま残りその値が 0.069 となる。次にこの状態から応力をゼロに保ったまま温度を上昇させていくと、温度 287.9K (As) から逆変態が開始し変態ひずみが減少し始め温度 297.3K (Af) に達すると逆変態が完了し変態ひずみは完全にゼロとなり変形前の状態に戻り形状記憶効果が表現される。応力ゼロの状態では図 1 からわかるように温度 As および Af が応力誘起変態に対する逆変態開始および終了条件となり Af 以上の温度においては逆変態完了により応力誘起変態ひずみがリセットされるからである。

以上の結果から、多結晶形状記憶合金の相変態挙動推定モデルにより、形状記憶効果を含む種々の温度・応力変動負荷に対する形状記憶合金の応答を計算することができる。したがって、同モデルは SMA アクチュエータの設計支援ツールとして用いることができる。

(2) 単軸インチワーム機構の製作と性能評価

製作した単軸インチワーム機構を図 7 に示す。同機構は、前進用 SMA アクチュエータ部(図 8)、後退用 SMA アクチュエータ部(図 9) 前進と後退との切り替えを行うクラッチ用 SMA アクチュエータ部から構成されている。動作確認を行った結果、前進および後退ともに制御距離を 30mm 程度まで増大できた。また、クラッチ用 SMA アクチュエータにより、前進と後退に切り替えができた。なお、位置決め制御の最適化については、今後の課題である。

(3) 「位置+トルク」制御システムの開発

図 11 に拘束なしの場合の抵抗値および変位の変化を示す。設定抵抗値の減少に追従して測定抵抗値は減少し、変位は増加していることがわかる。拘束なしの場合の抵抗値および電流値の変化を図 12 に示す。SMA アクチュエータが移動している際の電流値はやや変動しながら最大で 0.28A となっているが、移動終了後は 0.21A で安定している。

図 13 に移動量が 4mm の位置で拘束した場合の抵抗値および変位の変化を示す。拘束前までは設定抵抗値の減少に追従して測定抵抗値は減少しているが、拘束後の測定抵抗値は設定抵抗値の減少に追従できなくなり、徐々に増加して行く。その結果、設定抵抗値と測定抵抗値との間に大きな偏差が生じている。拘束ありの場合の抵抗値および電流値



図 7 単軸インチワーム機構



図 8 前進用 SMA アクチュエータ部

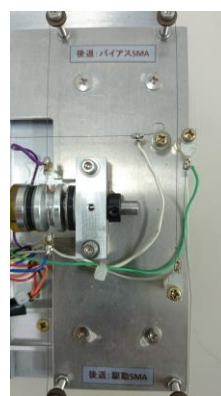


図 9 後退用 SMA アクチュエータ部



図 10 クラッチ用 SMA アクチュエータ部

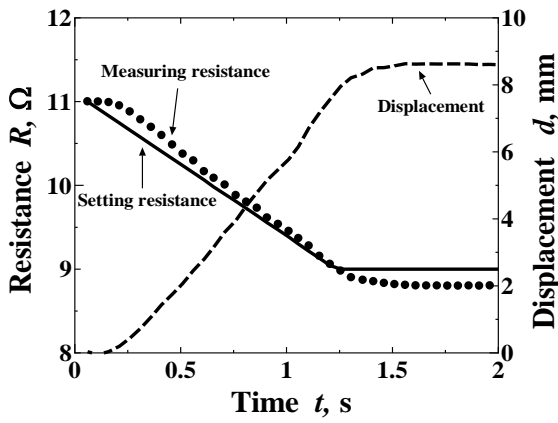


図 11 抵抗値および変位の変化 (拘束なし)

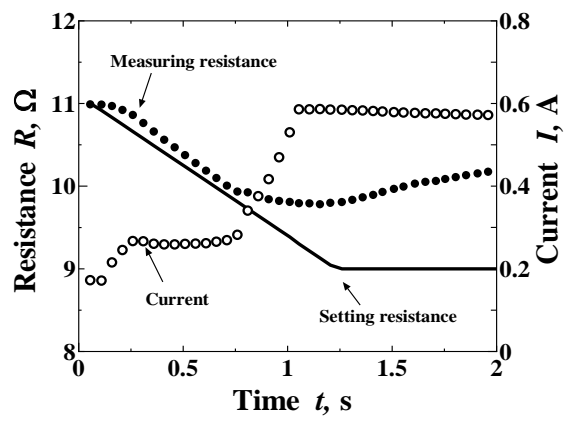


図 14 抵抗値および電流の変化 (拘束あり)

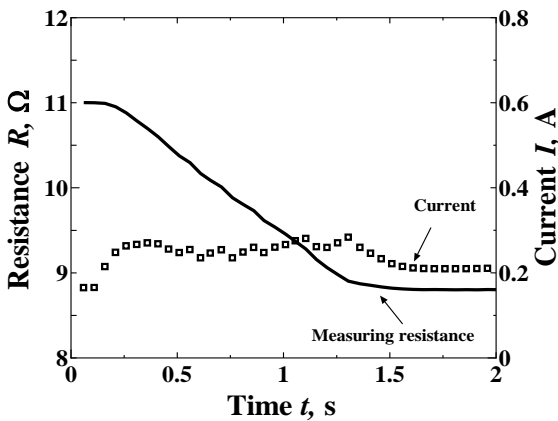


図 12 抵抗値および電流値の変化 (拘束なし)

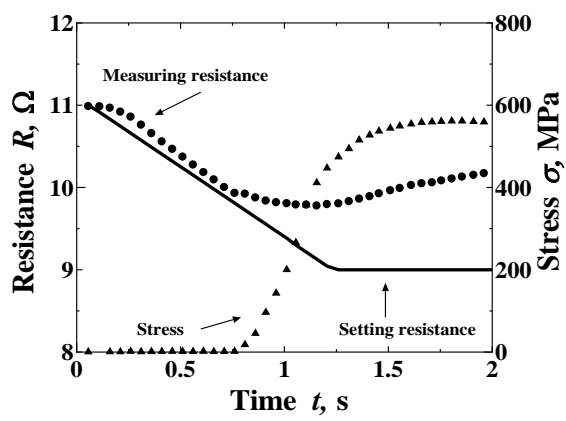


図 15 抵抗値および応力の変化 (拘束あり)

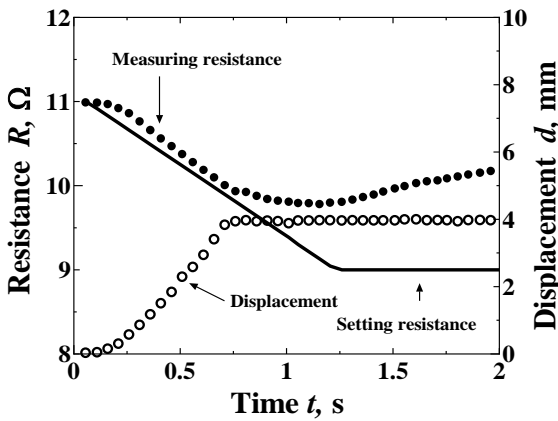


図 13 抵抗値および変位の変化 (拘束あり)

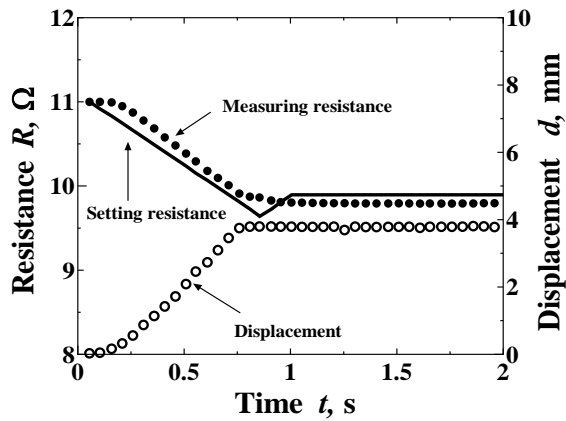


図 16 抵抗値および変位の変化 (過負荷保護)

の変化を図 14 に示す. 0.26A 程度であった電流値は拘束直後に急激に増加し, 制御装置の最大電流値である 0.59A となっている. また, SMA が負荷されている応力は図 15 に示すように, 拘束直後から急激に増加し, 最終的には 562MPa に達している. この応力値は SMA の最大許容応力 113MPa を大きく超えており, SMA は過負荷となって損傷してしまっていることがわかる.

図 13 に示したように, 拘束を受けることによって設定抵抗値と測定抵抗値との間に

大きな偏差が生じる. そこで, この偏差をモニターし, 偏差が一定の範囲内に収まるように設定抵抗値を調節する過負荷保護機能を開発した.

図 16 に過負荷保護機能がある場合の抵抗値および変位の変化を示す. 拘束を受けた後, しばらくの間は設定抵抗値との測定抵抗値との偏差は増加し, その後, 設定抵抗値が増加して偏差が小さくなり, 小さな偏差のまま設定抵抗値と測定抵抗値はほぼ一定の値となっている. 過負荷保護機能がある場合の抵

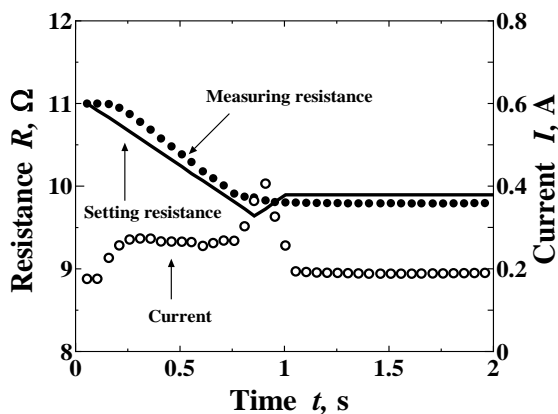


図 17 抵抗値および電流の変化（過負荷保護）

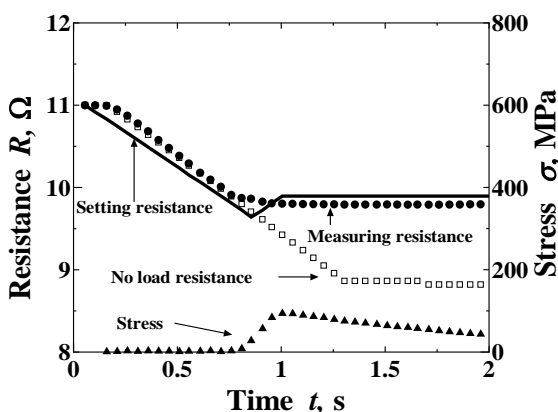


図 18 抵抗値および応力の変化（過負荷保護）

抵抗値および電流値の変化を図 17 に示す。電流値は拘束直後から急激に増加して 0.41A に達した後、設定抵抗値と測定抵抗値との偏差の減少に伴い急激に減少し、0.19A で一定となっている。SMA が負荷されている応力の変化は図 18 に示すように、図 17 に示した電流値の増加に伴って 94MPa まで増加し、電流値が減少した後は、緩やかに減少している。このように、過負荷保護機能がある場合の応力の最大値 94MPa は SMA の最大許容応力 113MPa よりも小さいことから、開発した過負荷保護機能を有する位置制御システム、すなわち、「位置+トルク」制御システムにより SMA の過負荷を防ぐことができたことがわかる。

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 1 件）

(1) Takaei Yamamoto, Akihiko Suzuki, Hiroki Cho, Toshio Sakuma, Transformation Behavior of Shape Memory Alloys in Multiaxial Stress State, Advances in Science and Technology, 査読有, Vol.78, 2013, pp.46-51

〔学会発表〕（計 3 件）

① Takaei Yamamoto, Akihiko Suzuki, Hiroki Cho, Toshio Sakuma, Transformation Behavior of Shape Memory Alloys in Multiaxial Stress State, 4th INTERNATIONAL CONFERENCE “SMART MATERIALS, STRUCTURES AND SYSTEMS”, 2012

② Takaei Yamamoto, Yuji Takeda, Toshio Sakuma, Position/Torque Control of Shape Memory Alloy Actuator Based on Resistance Feedback Control Method, International Conference on Martensitic Transformations 2014, 2014

③ 山本隆栄, 佐久間俊雄, 鈴木章彦, 非比例多軸負荷下における形状記憶合金の変形挙動, SMA シンポジウム 2014, 2014

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：形状記憶合金アクチュエータ制御装置
 発明者：山本隆栄, 佐久間俊雄, 竹田悠二
 権利者：山本隆栄, 佐久間俊雄, 竹田悠二
 種類：特許
 番号：特願 2014-119001
 出願年月日：2014 年 6 月 9 日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐久間 俊雄 (TOSHIO SAKUMA)
 大分大学・工学部・客員教授
 研究者番号：10371303

(2)研究分担者

山本 隆栄 (TAKAEI YAMAMOTO)
 大分大学・工学部・助教
 研究者番号：20295166