

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560095

研究課題名（和文） 形状記憶合金の温度応答性向上技術の構築と3次元位置制御システムの試作

研究課題名（英文） The improvements of temperature-response of shape memory alloy and the trial manufacture of the three-dimensional positioning system.

研究代表者

佐久間 俊雄 (SAKUMA TOSHIO)

大分大学・工学部・福祉環境工学科・教授

研究者番号：10371303

研究成果の概要（和文）：形状記憶合金(SMA)を用いたアクチュエータの温度応答性は、SMA 素子の熱処理温度を高くまたは長時間の低温時効処理を施すこと、素子形状は細線よりも表面積の大きなりボン形状が有効である。通電 OFF 時間を導入した抵抗値制御による位置制御システムを提案し、制御特性に及ぼす制御距離、外部負荷等の影響を明らかにした。また、OFF 時間を設けない新たな制御方法を提案し、10 $\mu$ m 以下の精度で位置保持が可能である。また、力学および伝熱モデルを構築し、制御システムの動作特性シミュレーション技術を確立した。これらの技術を基に、3次元位置制御システムを試作し、位置制御性や操作性等について検証した。

研究成果の概要（英文）：It is effective for improving the temperature response of SMA actuator to raise the heat treatment temperature of the SMA elements or to give long-term low temperature aging treatment of elements. And the ribbon shaped element with large superficial area is more effective for improving temperature response than wire element. The resistance feedback control system using the method of setting off-time has proposed that positioning can be set and retained at an arbitrary position. The effect of positioning characteristics on control distance and external loads are investigated. Furthermore, the new resistance control system without setting off-time has proposed. This new system can be controlled position with accuracy less than 10 $\mu$ m. New kinetics and constitutive equations which are available to plastic deformation region and the heat transfer model in consideration with ambient temperature and phase transformation latent heat have proposed and the displacement with time is simulated by these equations and model. The calculation results coincide with those of experiments well. The three-dimensional positioning system using these techniques was produced and its operability and controllability were inspected.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	600,000	180,000	780,000
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：形状記憶合金，温度応答性，加工率，熱処理，アクチュエータ，抵抗値フィードバック制御，位置制御

## 1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金（SMA）を用いたアクチュエータは，SMA自体がセンサ機能を持つ機能素子であることから，センサレスで位置制御と位置の保持が可能である．さらにSMAは，大変形が可能であり，かつ出力-重量比はSMAが最も優れている．SMA素子は加熱，冷却を繰り返すことによりアクチュエータ素子としての機能を発現する．加熱は通電により容易に行うことができるが，Ti-Ni合金などSMAを構成する元素の熱伝導率が小さいため冷却に課題があり，温度応答性に劣る要因となっている．応答性を大幅に改善できるSMAの薄膜（熱弾性型，磁場駆動型）を利用する方法も提案されているが，大きな力を利用することはできない．このため，高速応答が要求されるアクチュエータにSMAを適用することは現状では困難であり，SMAアクチュエータの用途は限定される．したがって，SMAの温度応答性が向上すればSMAの特徴を活かせるコンパクトで応答性の良いアクチュエータシステムが可能となり，さらに多くの分野での利用拡大が期待できる．

SMAを用いたアクチュエータは，約20年ほど前から現在に至るまで内外で広く研究されている．SMAは加熱，冷却による相変態に伴い電気抵抗が変化する．この抵抗変化は変位と力の変化であり，SMAを用いたアクチュエータに抵抗値をフィードバックしてPID制御による位置制御が試みられているが，連続的な位置制御もしくは力の制御に留まっており，多くは2点間の往復動作のみの位置制御である．したがって，任意の位置での位置制御ができればSMAアクチュエータの一層の用途拡大が期待できる．

## 2. 研究の目的

本研究では，SMAの温度応答性の向上を目標に，変態温度ヒステリシスおよび変態（逆変態）開始，終了温度差に及ぼす加工，熱処理条件の影響を明らかにすることを目的としている．また，SMAアクチュエータにとって有利な特性である二方向性ひずみの発現因子となる負荷ひずみ，温度等の影響を明らかにすることを目的としている．次に，SMAアクチュエータの位置決め制御方法の基盤技術の構築を目標に，任意の位置で位置制御できるOFF時間を導入した抵抗値制御方法を提案し，位置保持精度，制御速度等の制御特

性に及ぼすSMA素子形状，制御距離，外部負荷，OFF時間等の影響を明らかにすることを目的としている．さらに，SMAアクチュエータの設計に必要なSMA素子の形状・寸法，印加電圧（電流）等の設計条件や性能等を評価するためにSMAアクチュエータの動作特性をシミュレーションできる力学モデルおよび伝熱モデルを構築することを目的としている．また，抵抗値制御による3次元位置制御システムを試作し，位置決め操作性等を評価することも目的とした．

## 3. 研究の方法

(1) SMAの変態・変形挙動評価に関する試験  
変態，逆変態などの繰返し特性に優れたTi-Ni合金にCuを添加すると，温度ヒステリシスはTi-Ni合金の約1/3になる．そこで，Ti-Ni-Cu合金を対象に，温度ヒステリシス，（逆）変態開始-終了温度差に及ぼす負荷ひずみ，冷間加工率，熱処理条件の影響を負荷/徐荷，加熱/冷却試験により調べ，負荷ひずみ，熱処理温度および時効時間との関係で評価する．また，回復応力，回復ひずみに及ぼす負荷ひずみ，冷間加工率，熱処理条件の影響についても同様の試験により調べ，負荷ひずみ，加工率，熱処理温度，時効時間との関係で評価する．

(2) 二方向性ひずみ発現に関与する影響因子の評価試験

形状記憶合金の二方向性ひずみ発現に関与する負荷ひずみ，加熱温度および繰返し効果について，負荷/徐荷，加熱/冷却試験により調べ，二方向性ひずみを塑性ひずみおよび残留マルテンサイト（M相）分率との関係で評価する．

(3) SMAの電気的特性評価に関する試験

一定応力下での加熱/冷却試験および一定温度下での負荷-徐荷試験により，SMAの電気抵抗値を調べ，比抵抗と温度，（回復）ひずみ，加工率，時効時間との関係で評価する．

(4) 力学・伝熱モデルの構築とSMAアクチュエータ動作特性のシミュレーション

塑性変形を考慮した応力ひずみ関係を表示できる一軸引張の構成式を構築するため，負荷ひずみに伴う変態温度の変化，加熱，冷却に伴うM相/母相の体積分率等を調べ，

(1)の試験で得られた応力 ひずみ関係, ひずみ-温度関係, 負荷ひずみ-回復応力関係等により構成式の妥当性を検証する. また, SMA素子の温度上昇を通电によるジュール熱, 環境への放熱および変態, 逆変態に伴う潜熱を考慮した伝熱モデルと, 構成式による力学モデルとにより, SMA アクチュエータの動作特性(位置-時間関係)をシミュレーションし, 試験結果の再現性を評価し, モデルの妥当性を検証する.

(5) 抵抗値制御によるアクチュエータの制御特性評価に関する実験

抵抗値フィードバック制御を用いたアクチュエータの動特性, 安定性, 位置決め精度などの制御特性を試験により調べ, 制御特性に及ぼす負荷, 制御距離, 通电 OFF 時間, 素子形状, バイアス方式等の影響を調べる. また3次元位置制御装置を試作し, 位置決め等の操作性や応答性等を調べる.

4. 研究成果

(1) SMA の温度応答性に及ぼす加工, 熱処理条件の影響

形状記憶効果を利用するアクチュエータの温度応答性を向上させるためには, (i) 温度ヒステリシスが小さいこと, (ii) 温度変化に対する回復力の変化を大きくすること, 即ち, 逆変態開始 - 終了温度差 ( $A_f - A_s$ ) が小さくなれば僅かな温度変化で応力が大きく変化することになり, 応答性が向上する. さらに, (iii) SMA アクチュエータ素子の冷却は自然冷却となるため, 変態開始温度 ( $M_s$  点) を高くすることにより応答性の向上が期待できる. すなわち, 冷却速度は, 素子の温度と環境温度の差に比例し, 温度差が大きいほど冷却速度が大きくなるため, 素子を高い温度で変態させることにより応答性を向上させることができる.

変態温度ヒステリシスは, 加工率および熱処理温度の影響をほとんど受けない. 負荷ひずみを増大させるとヒステリシスは増大するが, 負荷ひずみが約 1.5%を超えると

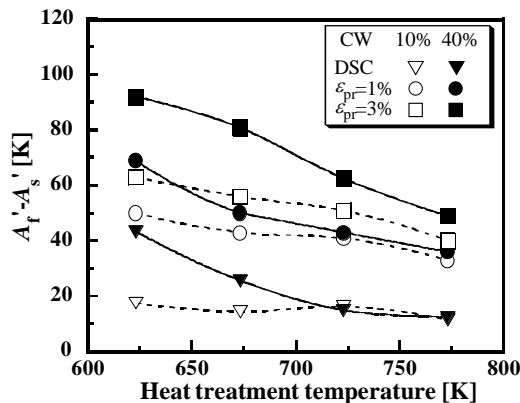


図1 逆変態開始 - 終了温度差と熱処理温度との関係

増大しない.

逆変態開始 - 終了温度差 ( $A_f - A_s$ ) は, 負荷ひずみ, 加工率が大きいほど温度差は増大するが, 熱処理温度を高くすることにより小さくすることができる(図1). また, 高加工率の素子でも長時間の時効処理を施すことにより, 温度差を低減できる. 変態開始温度 ( $M_s$  点) は, 高加工率ほど上昇し, 熱処理温度を高くするた逆に低下する. また, 負荷ひずみの影響はほとんどない.

(2) 二方向性ひずみ

二方向性ひずみを発現させる方法は, 幾つかの方法があるが 本研究では M 相で変形し, 変形拘束下で加熱し逆変態させ, この過程を 30 回繰返す方法で行った.

Ti-Ni-Cu 合金の二方向性ひずみは, 予ひずみ付与後, ひずみ拘束の状態加熱する方法により発現できることを明らかにした. また二方向性ひずみ量は予ひずみ量の増加に伴い増大し, 予ひずみ約 10%で最大値をとり, その後減少する. さらに, 二方向性ひずみは塑性ひずみの増加に伴い増大するが, 塑性ひずみが約 4%で最大値をとり, その後減少する(図2).

(3) Ti-Ni-Cu 合金の抵抗値特性

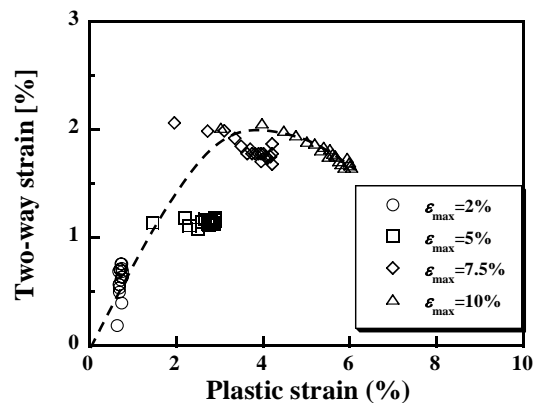


図2 二方向性ひずみと塑性ひずみとの関係

みとの関係

本研究では, SMA アクチュエータを抵抗値制御により位置制御を行うことを目的としている. 特に, SMA は温度ヒステリシスを有するため, ヒステリシスが大きいと正確な位置決め制御はできない.

Ti-Ni-Cu 合金の比抵抗値は, 相状態が M 相か母相であるかにより異なり, 母相に比べて M 相の比抵抗値が大きい.

比抵抗値は, 加工率の増加に伴い, ほぼ線形的に増大する.

時効処理を施すと, M 相, 母相の比抵抗値は時効時間の増加に伴い増大し, M 相の比抵抗値は母相に比べてより増大する.

比抵抗値は、温度との関係で表わすと大きなヒステリシスを有し、かつ温度に対して非線形な変化を呈する。これに対し、比抵抗値を回復ひずみとの関係で表わすと、ヒステリシスは極めて小さく、かつ、回復ひずみに対して線形的に変化する。

抵抗値と回復ひずみの関係は、ヒステリシスが無く、線形的な変化を呈することを明らかにしている(図3)。

M相と母相の抵抗値の差は大きく、かつ、ヒステリシスがほとんどなく、回復ひずみに対して線形的に変化することから、位置情報としての抵抗値が加熱、冷却に関わらず一つの抵抗値によって決まるため、位置制御システムでは抵抗値制御が有効であることを明らかにしている。

(4) 力学・伝熱モデルとシミュレーション抵抗値制御による位置決め制御システムの設計を行うため、外部負荷や環境温度等の

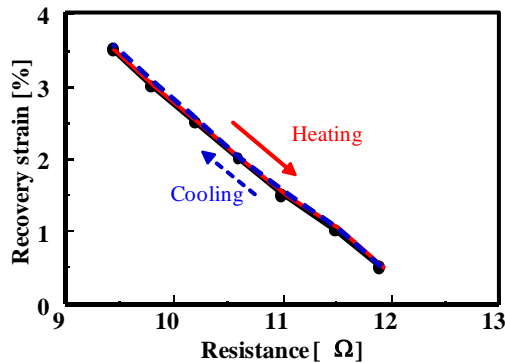


図3 Ti-Ni-Cu合金の抵抗値とひずみの関係(変化)等の制御特性をシミュレート可能な解析ソフトを作成した。

単軸引張の変態・変形挙動に関して、M相分率を内部関数として導入することにより、材料中の相変態の進行程度を考慮し、さらにMageeの変態カインेटックスを拡張した構成式を基本に、すべり変形および

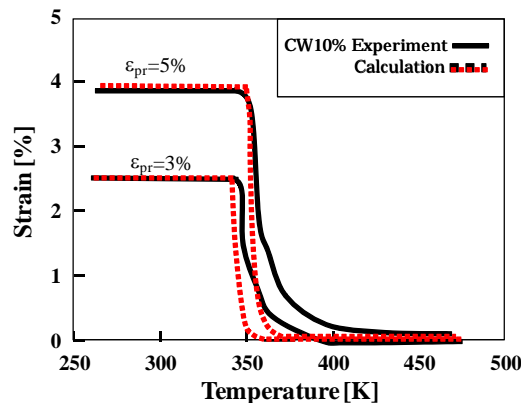


図4 温度変化に対するひずみの変化(実線:実験結果,破線:シミュレーション)

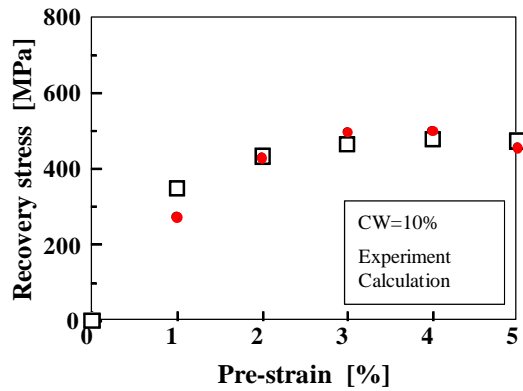


図5 予ひずみに対する回復応力の変化(●:実験, □:シミュレーション)

負荷ひずみ(予ひずみ)付与に伴う変態温度の上昇を考慮した構成式を提案した。温度変化に伴うひずみの変化(図4)および予ひずみに対する回復応力の変化(図5)についてシミュレーション結果は実験結果とほぼ一致する。

次に、SMAアクチュエータは通電により加熱する。そこで、通電時のジュール加熱によるSMAの温度上昇は環境中への自然対流熱伝達による放熱およびSMAが変態、逆変態する際の放熱および吸熱を考慮した伝熱モデルを作成した。

上記で作成した構成式及びの伝熱モデルにより時間変化に対する位置の変化をシミュレーションした結果は、1次元駆動の位置制御システムで得られた位置-時間関係の実験結果と良好に一致する(図6)ことから、本解析ソフトはSMAアクチュエータの設計に有用なツールとして利用できることが検証できた。

(5) 位置制御システムの制御特性と3次元位置制御装置の試作

抵抗値制御によるSMAアクチュエータを製作し(図7)、バイアス方式(バイアススプリング、定荷重)および拮抗方式について制御

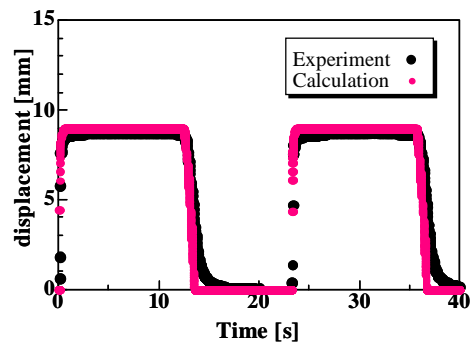


図6 位置-時間関係のシミュレーション(●:実験, —:計算)

時間（速度）、位置制御精度等の制御特性に及ぼす外部負荷、制御距離等の影響を調べたい。いずれの方式においても外部負荷の増加にもとない SMA の変態温度が上昇するため、立上りの整定速度は低下し、立下がりの整定速度は上昇する。また、保持精度は外部負荷の影響を僅かに受けるものの、10 ~ 20 $\mu\text{m}$  程度の精度で保持できる。また、保持精度に及ぼす制御距離の影響はほとんどない。

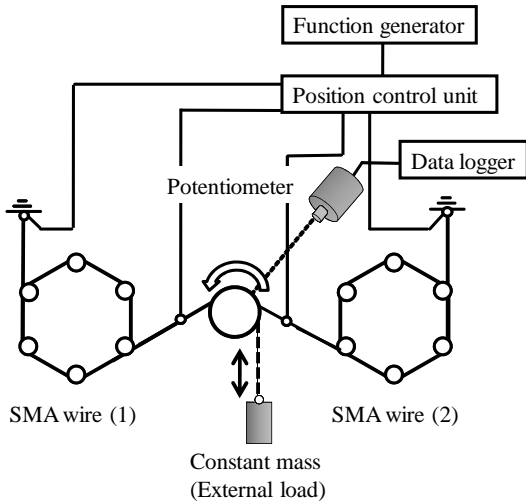


図7 抵抗値制御による位置制御装置

制御速度、位置制御精度におよぼす電流および電流 OFF 時間の影響については、電流の増加に伴い立上り・立下がりの整定速度は上昇するが、保持精度低下する。また、OFF 時間が短いほど保持精度は向上する(図8)。

上記の結果から、OFF 時間を設けない抵抗値フィードバック制御技術を新たに提案した。この方法により、位置誤差が 10  $\mu\text{m}$  以下の精度を持つ位置制御装置を構築した。またこの方法を用いて、これまで使用していた SMA ワイヤ材ではない、メルトスパン法による SMA リボン材を用いた位置制御アクチュエータを作製した。リボン材は従来使用していたワイヤー材( 0.15)

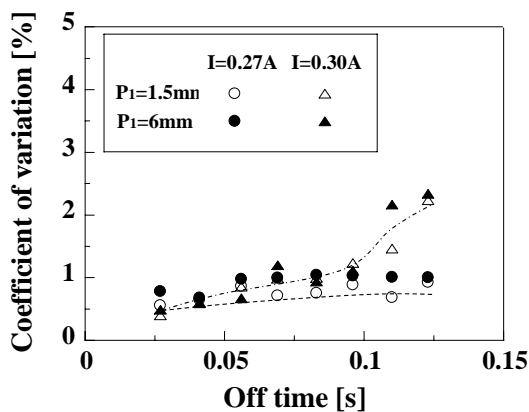


図8 保持精度に及ぼす OFF 時間の影響

と比較し、厚さが 0.012mm と薄く、また長方形断面であり比表面積が大きいため、冷却効率に優れる。また、メルトスパン法により作製したリボン材は結晶粒が微細化するため、抵抗率がワイヤー材と比較し大きい。その結果、これまでのワイヤー材を用いたアクチュエータと比較し、位置保持精度は変わらず、立上り（加熱）時に 10 倍、立下り（冷却）時に 3 倍の制御速度となる(図9)。

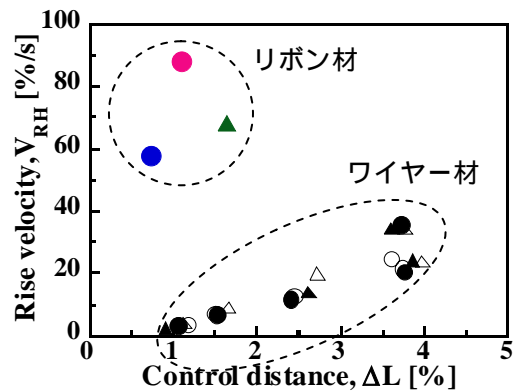


図9 リボン材およびワイヤー材を用いた抵抗値抵抗値制御による SMA アクチュエータの立上り速度

の結果から、抵抗値フィードバック制御による 3 次元位置制御装置を試作した。図 10 にその実物写真を示す。マニピュレータの各リンクにはポテンシオメーター、3 平行リンクの各リンクは SMA 線材とバイアスばねを組み込んだアクチュエータが内蔵されている。マニピュレータを操作すると、各リンクに接続されたポテンシオメーターが移動距離を測定し、測定した移動量だけ通電量制御により SMA アクチュエータを伸縮させる機構である。つまりマニピュレータのリンク機構の動きに 3 平行リンクのリンク機構が追従するシステムである。このシステムは医療機器や災害救助での遠隔操作などへの応用が期待される。



図10 3次元位置制御装置

## 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17件)(全件:査読有)

- (1) T. Yamamoto, M. Kanda, H. Cho, T. Sakuma, Effect of Heat Treatment Temperature on Thermomechanical Properties of Ti-Ni Shape Memory Alloy, Trans. MRSJ(in print)
- (2) H. Cho, K. Mutoh, Y. Takeda, T. Yamamoto, T. Sakuma, Effect of Aging Treatment on Transformation Temperature Difference and Temperature Hysteresis of Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy after Pre-Deforming, Trans. MRSJ(in print)
- (5) Y. Takeda, T. Yamamoto, M. Uegaki, H. Cho, T. Sakuma, A. Suzuki, Transformation/Deformation Behavior and its Constitutive Equation for Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy, Advances in Science and Technology, Vol. 59 (2008), 129-134.
- (6) Y. Takeda, H. Cho, T. Yamamoto, T. Sakuma, A. Suzuki, Control Characteristics of Shape Memory Alloy Actuator Using Resistance Feedback Control Method, Advances in Science and Technology, Vol.59 (2008), 178-183.
- (7) Y. Takeda, Y. Kudo, T. Yamamoto, T. Sakuma, Position Control Characteristics of Antagonism Type SMA Actuator Based on Resistance Feedback Control, Trans. MRSJ, 33[4](2008), 877-880.
- (8) T. Takeda, T. Yamamoto, A. Goto, T. Sakuma, Effect of Thermomechanical Cyclic Loading Condition on Two-Way Strain in Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy, Trans. MRSJ, 33[4](2008), 869-872.
- (9) Y. Takeda, T. Yamamoto, A. Goto, T. Sakuma, Effect of Heat Treatment on Temperature Response and Recovery Stress of Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy after Pre-Deforming, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 33[4] (2008), 873-876.
- (10) Y. Takeda, T. Yamamoto, A. Goto, T. Sakuma, Thermomechanical Behavior and Electric Characteristics of Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy, Trans. MRSJ, 32[3] (2007), 627-630.
- (11) Y. Takeda, T. Yamamoto, T. Sakuma, Effect of Bias Load on Positioning Characteristics of Shape Memory Alloy Actuator Based on Resistance Feedback Control, Trans. MRSJ, 32[3] (2007), 635-638.

[学会発表](計30件)

- (1) 長 弘基, アクチュエータ用Ti-Ni-Cuリボン材の特性、日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月14日, 岩手大学
- (2) 山本 隆栄, SMAアクチュエータの位置制御における動的挙動のコンピュータシミュレーション, 第19回日本MRS学術シンポジウム, 2009年12月8日, 横浜
- (3) H. Cho, Dynamic Behavior and Position Stability of SMA Actuator Using Resistance Feedback Control, 3rd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, 2008年12月9日, Taiwan
- (4) T. Yamamoto, Constitutive Equation for Deformation Behavior of Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy under Unrestrained Strain Condition after Pre-Deforming, 3rd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, 2008年12月10日, Taiwan
- (5) T. Yamamoto, Effect of Aging on Thermomechanical and Electric Characteristics of Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy, International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, 2007年12月4日, つくば
- (6) T. Sakuma, Position Control Characteristics of Shape Memory Alloy Actuator Using Resistance Feedback Control Method, International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, 2007年12月4日, つくば

[その他]

ホームページ等

<http://www2.hwe.oita-u.ac.jp/~sakumalab/>

## 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・福祉環境工学科・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・機械・エネルギーシステム工学科・助教

研究者番号: 20295166

長 弘基 (HIROKI CHO)

大分大学・工学部・福祉環境工学科・助教  
研究者番号: 00435421