

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560136

研究課題名（和文） 強磁性形状記憶合金複合材を用いた磁気駆動アクチュエータの開発

研究課題名（英文） Development of magnetic drive actuator
by using ferromagnetic shape memory alloy composite

研究代表者

日下 正広 (KUSAKA MASAHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40244686

研究成果の概要（和文）：超弾性形状記憶合金と強磁性材料からなる強磁性形状記憶合金複合材を用いて、高負荷能力、大変形能を有する磁気駆動トルクアクチュエータを開発した。トルクアクチュエータ内の超弾性形状記憶合金ワイヤーの形状および磁場を印加したときの回転角を計算するための方法を提案した。計算に基づいてトルクアクチュエータの試作機を製作し性能試験を実施した結果、高負荷トルク域において磁場を印加すると、回転角が理論計算の30%程度ではあったが、大きな回転角を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：The magnetic driving torque actuator that have the high load ability and the large deformation capability was developed by using the ferromagnetic shape memory alloy composite composed of the superelastic shape memory alloy and the ferromagnetic material. The calculation methods of the geometry of the superelastic shape memory alloy wire and the rotation angle for the applied magnetic field were proposed. The prototype of torque actuator was made on the basis of the calculation. Consequently, large angle of rotation was able to be obtained by applying the magnetic field in high torque region although the angle of rotation was about 30% of the theoretical value.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：固体力学

科研費の分科・細目：機械工学 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：形状記憶合金、強磁性材料、アクチュエータ、複合材料、モデリング、超弾性、大変形解析、摩擦圧接

1. 研究開始当初の背景

金属系アクチュエータ材料として形状記憶合金（SMA）が広く用いられているが、SMAの中でも強磁性形状記憶合金（FSMA）は次世代アクチュエータ材料として期待されている。TiNi合金のような反応スピードのやや遅い熱感応性の形状記憶合金に対して、磁気感応性の強磁性形状記憶合金はそのス

ピードを ms オーダーにまで向上できる見通しが得られている。しかし、強磁性形状記憶合金の中で最もよく研究されている NiMnGa はそのもろさ (brittleness) のため、わずかな応力にしか絶えられないことから、圧縮応力下のみでしか使用できないという問題点がある。また、Fe-Pd 系に代表される強磁性形状記憶合金は非常に高価であり、安

価なアクチュエータを製作する上で障害となる。そこで、TiNi のような比較的安価な形状記憶合金 SMA と鉄に代表される強磁性材料を組み合わせた強磁性形状記憶合金複合材(FSMA 複合材)を製作することができれば、安価でなおかつ高速で高性能(高負荷能力, 大変形能)な新たなアクチュエータ材料が開発できるものと期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、超弾性効果を有する形状記憶合金と磁場下で磁力を発生する強磁性材料からなる強磁性形状記憶合金複合材を用いて、実際に航空・宇宙産業での使用が期待される高負荷能力, 大変形能を有する磁気駆動アクチュエータを開発するため、以下の検討課題を明らかにすることを目的とした。

(1) 超弾性形状記憶合金の簡易構成式の検討

ヒステリシスループを描く超弾性形状記憶合金の応力とひずみの関係を、設計に使用できる簡易な構成方程式で表す。

(2) ダイアフラムタイプアクチュエータ素子形状の検討

油空圧装置に変わる新たなアクチュエータへの適用を想定したダイアフラムタイプアクチュエータ素子として、強磁性材料と超弾性形状記憶合金からなる積層板を対象として、その最適形状を磁場-構造連成解析を行うことにより求める。

(3) 異材複合材製作のための摩擦圧接法の検討

強磁性形状記憶合金複合材のような異種材の接合法として、摩擦圧接法に着目し、その基礎的知見を得るために、チタンと銅の組み合わせにおいて、接合が可能か検討する。

(4) 磁気駆動トルクアクチュエータの設計・および性能試験

航空機のフラップへの適用を想定した、磁気駆動トルクアクチュエータの設計手法の確立し、および試作機の作製とその性能試験をおこない、設計通りの性能があるか検討する。

3. 研究の方法

(1) 超弾性形状記憶合金の簡易構成式の検討方法

試験片として、公称外径 1mm の Ti-55.77%Ni 合金の線材を用いて室温 25°C の定温環境で引張試験を行い材料の引張特性を求めた。試験方法としては、一定のひずみ速度 0.5mm/min で負荷を行い、変位が一定の値に到達した時点で止めて、変位が 0mm になるまで除荷を行った。なお、標点間距離は 150.0mm とした。そして、実験結果をもとにして、超弾性 SMA の垂直応力-垂直ひずみ関係を最も簡易で設計に適用可能な構成式として、一次関数の形で定式化する方法につ

いて検討した。

(2) ダイアフラムタイプアクチュエータ素子形状の検討方法

解析モデルを図 1 に示す。モデル 1 では、超弾性材円板下面の全面に強磁性材を配置した全面二層複合板を作成し、その厚さ比を変化させ最適な比を検討した。モデル 2 では、超弾性材円板下面の中心部に強磁性材を配置した部分二層複合板を作成し、強磁性材の半径 r_f を変化させ、より変位が大きくなるような強磁性材の形状を検討した。さらにモデル 2 において、超弾性材の厚さ t_s を変化させた場合の解析を行い、超弾性材の超弾性領域が増加する方法を検討した。解析は軸対称で磁場-構造の連成解析を行った。このとき、強磁性材および複合材右端の r, z 方向の変位量を固定し、対称軸となる左端は r 方向のみ固定した。また要素は四節点四角形要素を使用した。強磁性材の降伏応力を 400MPa ヤング率を 200GPa とし、超弾性材は (1) の構成式を用いて解析を行った。

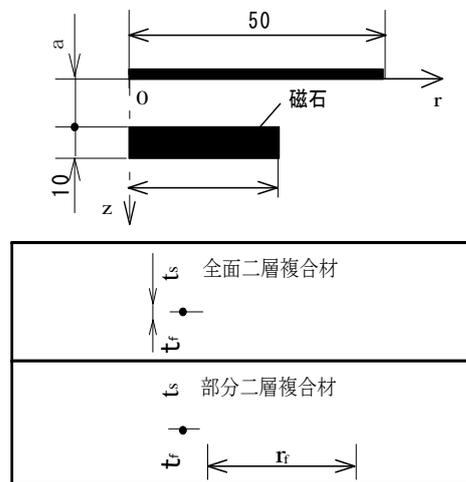


図 1 解析モデル

(3) 異材複合材製作のための摩擦圧接法の検討方法

異種材の接合法の検討に摩擦圧接法を用いた。供試材料には P-Ti および OFC の外径 16 mm の丸棒を用いた。なお、P-Ti の引張強さは 478MPa であり、OFC のそれは 326MPa である。これらを接合端面直径 12mm に加工し、接合端面を平面研削盤で研磨して試験片とした。また、P-Ti 側の表面性状が継手強度にどのような影響を及ぼすかを検討するため、平面研削盤、旋盤、#2000 エメリー紙、精密旋盤、ならびにバフ研磨によりそれぞれ最終仕上げを行って試験片とした。接合にはブレーキ式摩擦圧接機を用い、電磁クラッチを用いて摩擦時間の終了と同時に摩擦圧力を加えたまま固定側と回転側の相対速度を瞬時に零とする実験を行った。また、圧接条件は摩擦速度 27.5s⁻¹、摩擦圧力 75MPa の一定とし、摩擦

時間およびアプセット圧力を種々変化させ、圧接条件の影響も検討した。接合後、継手のバリを除去して室温にて継手の引張試験を行った。

(4) 磁気駆動トルクアクチュエータの設計法の検討および性能試験結果の検討

図 2 に、提案する磁気駆動トルクアクチュエータを示す。短冊状の強磁性材料に穴を開け、超弾性ワイヤを通して複合材として用いる。この複合材を中心の回転軸と外周に配置された電磁石の一つに一端ずつ取り付け、回転軸にトルクを加えると、複合材中の超弾性ワイヤの超弾性特性によって大変形を生じる。この状態で電磁石を ON にすると強磁性材料に磁力が発生する。この磁力によって超弾性ワイヤに逆変態が生じ、電磁石に近い部分から吸着されながら逆に回転する。このトルクアクチュエータの特徴は超弾性ワイヤを用いることにより大きなトルクをかけ、大回転を生じさせることが可能な点である。

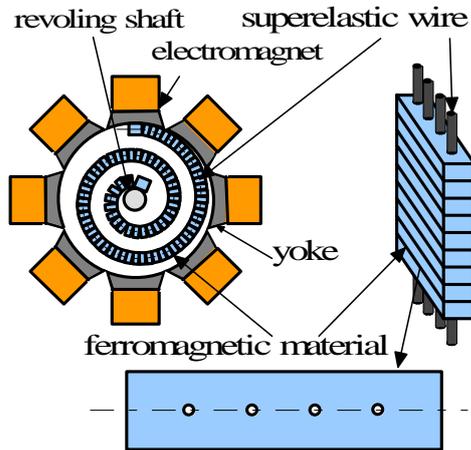


図 2 トルクアクチュエータの構造

本トルクアクチュエータを設計する上において、トルクアクチュエータ内の超弾性ワイヤの変形形状を解析する必要がある。そこで、両端固定ばりの理論を適用し、ワイヤ形状を理論解析し、実験結果との比較を行った。また、そのワイヤ形状から磁力による回転角の変化を求めるための設計マップを作成する方法について検討した。さらに、それらの結果を基にトルクアクチュエータの試作機を作製し、磁力を加えることによる回転角の変化を測定し、高いトルクの領域で、大きな回転角を生じさせることが可能か実際に性能試験を行うことで検討した。

4. 研究成果

(1) 超弾性形状記憶合金の簡易構成式の検討結果

実験により得られた荷重-変位曲線を図 3 に示す。図は任意の変位で除荷した曲線を重ねている。図より負荷時と除荷時で異なる経

路を通り、除荷すると元の形状に戻ることがわかる。このような現象は超弾性によるものであり、超弾性 SMA ではオーステナイト変態終了温度以上で SMA に外力を加えると、応力誘起マルテンサイト変態が生じると同時に大変形し、除荷すると逆変態が可逆的に生じ、逆方向の変形により元の形状に戻ることができる。

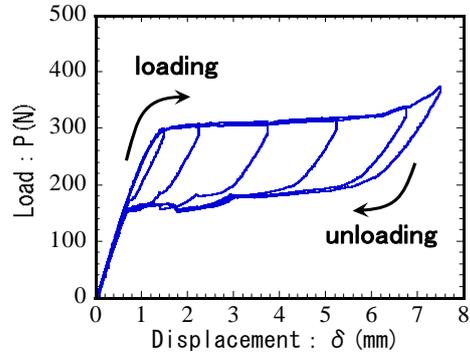


図 3 荷重-変位曲線

垂直応力-垂直ひずみ関係が曲線関係では解析が複雑となるため、解析上、扱いやすい一次関数の構成方程式で表した。図 4 に実験結果から得られた垂直応力-垂直ひずみ関係と、近似結果との比較を示す。図より部分負荷から除荷した場合においても直線関係で求めた結果は、実験結果の垂直応力-垂直ひずみ線図をほぼ表せていることがわかる。得られた引張特性を表 1 に示す。以降の解析では、超弾性材料の機械的特性として、この値を用いた。

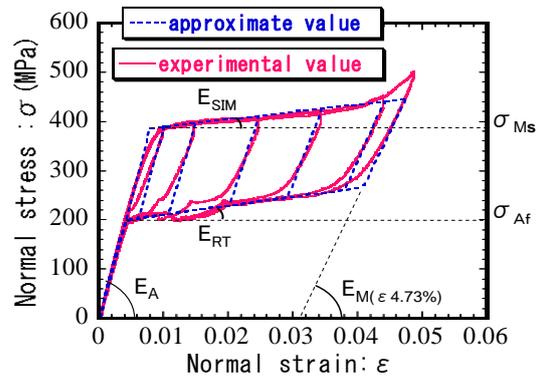


図 4 応力-ひずみ曲線の比較

表 1 Ti-Ni 合金の材料特性

E_A (GPa)	$E_{M(\epsilon 4.73\%)}$ (GPa)	σ_{MS} (MPa)	σ_{Af} (MPa)
49.1	27.6	386	200
E_{SIM} (GPa)	E_{RT} (GPa)		
1.47	1.80		

(2) ダイアフラムタイプアクチュエータ素子形状の検討結果

全面二層複合材の解析の結果、複合材の厚

さ比を変えたとき、強磁性材の厚さが最も薄くなる厚さ比 1:9 の場合が最大の変位量を示したが、超弾性材部に働く最大相当応力は変態開始応力に達しておらず、超弾性を起こしていないことがわかった。

次に、複合材の変形量を増加させるために、超弾性材円板下面の中心部に強磁性材を配置した部分二層複合材の解析を行った。強磁性材の半径を変化させたときの複合材中心での変位量を図 5 に示す。部分二層複合板において効果的な強磁性材の半径は $r_f=20\text{mm}$ のとき、すなわち強磁性材と超弾性材の半径比が 0.4 の場合であり、最大変位量は 2.30mm であり、全面二層複合材より多く変形していることが明らかとなった。

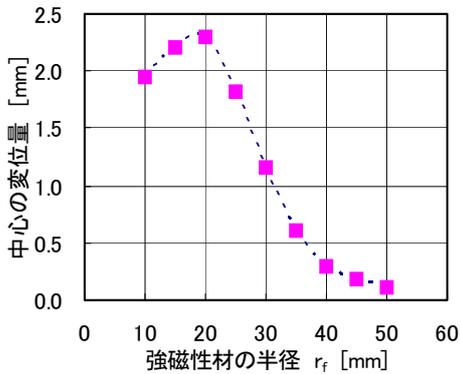


図 5 強磁性材半径と中心変位の関係

さらに、磁石と強磁性材の半径 r_m , r_f は変えず、超弾性材の厚さを薄くした場合の解析を行った。図 6 に強磁性材の外周部付近での超弾性材の相当応力分布図を示す。磁石と強磁性材の距離 a と超弾性材の厚さ t_s を変える前に比べて、超弾性材の超弾性域が増加しており、有効な方法であることがわかった。また変位量は超弾性材の厚さを薄くした場合 12.2mm であった。よって、超弾性材の厚さを薄くすることで目標の変位量に近づけることが可能となることが明らかとなった。

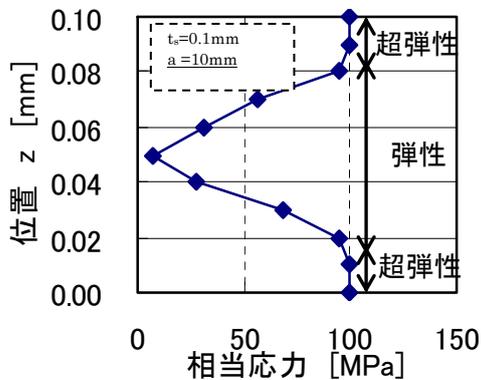


図 6 相当応力分布

(3) 異材複合材製作のための摩擦圧接法の検討結果

継手強度に及ぼす摩擦時間の影響を調べるため、アプセット圧力を摩擦圧力と同じ 75MPa として実験を行った。その結果を摩擦トルク曲線と対応させて図 7 に示す。初期トルク直後の摩擦時間 0.3s や 0.5s ではバラツキが少なくなり、継手効率（軟質母材強度に対する強度割合）も約 70%程度で最大となった。その後、摩擦時間の増加にともなって継手効率が減少した。なお、すべての継手が圧接面からの破断となった。

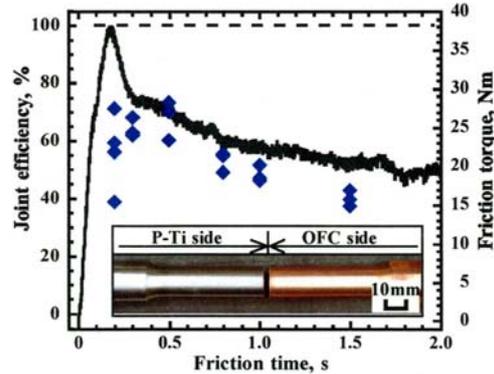


図 7 摩擦時間と継手効率の関係

アプセット圧力の影響を調べるため、摩擦時間 0.3s と 0.5s の継手について、アプセット圧力を増加させた圧接継手の引張試験を行ったが、アプセット圧力を増加させても継手効率は大きく増加せず、すべての継手が圧接面から破断した。以上の結果より、圧接条件を変化させるだけでは OFC 側から破断する良好な継手は得られないことがわかった。

異種材料の場合、継手強度は接合端面性状の影響を受けることが報告されている。そこで、アプセット圧力を 270MPa とし、P-Ti 側の接合端面仕上げ加工を変えて接合試験片を作製した。なお、各仕上げにおける表面粗さ (Ra) は、①平面研削盤: $0.34\mu\text{m}$, ②#2000 エメリー紙: $0.13\mu\text{m}$, ③精密旋盤: $0.03\mu\text{m}$, ④バフ研磨: $0.03\mu\text{m}$ である。得られた継手の引張試験結果を図 8 に示す。図より、表面粗さが小さくなることで継手効率が上がり、継手の破断位置に変化が見られたが、③精密旋盤と④バフ研磨のように、同じ表面粗さ (Ra) でも継手の破断位置が異なる結果となった。そこで、表面の凹凸を表す最大粗さ (Rmax) を比較した。③精密旋盤では $0.771\mu\text{m}$, ④バフ研磨 $0.428\mu\text{m}$ で、表面の凹凸はバフ研磨の方が小さかった。すなわち、表面の凹凸を小さくする仕上げ方法を採用することにより、母材破断させることが可能であることが明らかとなった。なお、継手効率が 100%でないにもかかわらず、母材破断したのは、圧接時の圧縮応力によるバウジージャー効果が原因であると考えられる。

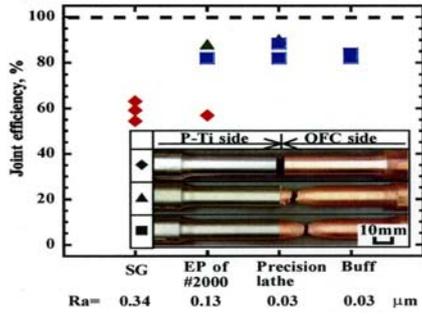


図 8 表面粗さと継手効率の関係

以上のように異種材摩擦圧接では、表面性状の影響を大きく受けることが明らかとなり、今後の強磁性材と記憶合金の接合における知見を得ることができた。

(4) 磁気駆動トルクアクチュエータの設計法の検討および性能試験結果の検討

Ti-Ni ワイヤ形状は、回転軸と外周部（電磁石面）でたわみ角が拘束され図 9(a) のような形状となる。これを考慮に入れた変形形状推定式を図 9 (b) に示す両端支持ばりの理論を適用することにより求めた。Ti-Ni ワイヤの角度 θ に対する半径 r_a の簡易推定式を式(1)に示す。

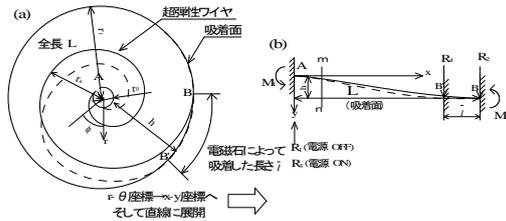


図 9 Ti-Ni ワイヤ形状の解析モデル

$$r_a = r_0 + \frac{12(r_1 - r_0)}{\theta^3} \left(\frac{\theta^2 \theta'}{4} - \frac{\theta^3}{6} \right) \quad (1)$$

ここで、 θ' は $r_a=r_1$ となる電磁石に接触するまでの角度であり、ワイヤ長さ L 、 r_0 、 r_1 と $L=(r_0+r_1)\theta'/2$ の関係が成り立つとして求めた。

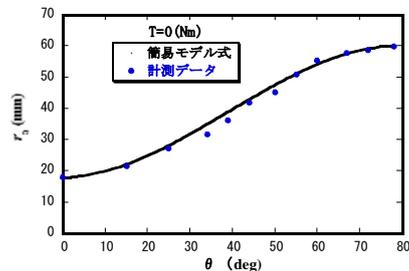


図 10 Ti-Ni ワイヤ形状の推定式と測定値の比較

得られた簡易推定式と試作機の Ti-Ni ワイヤ形状測定結果との比較を行なった結果を図 10 に示す。図より、推定式より求めた形状と測定結果は良く一致しており、本推定

式が適用できることが明らかとなった。

次に、アクチュエータの磁力による回転角とそれに応じた吸着力の関係調べた。トルクをかけた状態から電磁石の電源を ON とし、長さ l' だけ吸着させるのに必要な力を軸と円周固定部にかかる反力の差から求めた。そしてその吸着に必要な力の式から n をワイヤの巻き数とし、そのワイヤの巻き数に応じた吸着に必要な力と回転角との関係を図 11 の実線に示した。さらに吸着実験で得られた電磁石と強磁性材料の間隙の関係を用い、実際に生じる吸着力を求めた。まず短冊状の強磁性材料 1 つ 1 つの間隙を求め、その間隙に応じた吸着力を求める。アクチュエータの外周部全体が吸着面となっているためすべての強磁性材料に生じる吸着力を足し合わせ、実際に生じる吸着力とした。これを図 11 の破線として示す。そして、破線が実線を上回る領域（網掛け部）が吸着可能領域として求められる。このように、各巻き数に対する磁力による軸の回転量を求めることができた。

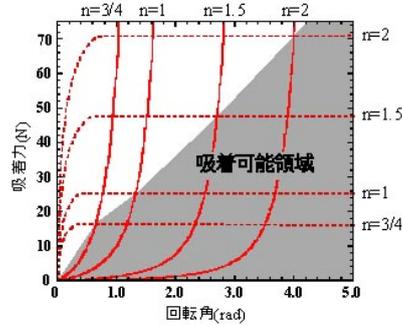


図 11 巻き数における吸着力と回転角との関係

以上の結果を基に、アクチュエータ形状は、超弾性ワイヤ本数を 4、巻数を 1 とし、試作機を作製した。そして試作機の回転軸にトルクを加え、軸の回転角を測定する性能試験を行った。また、一定のトルクにおいて、磁力を加え、その時に減少した回転角を測定する実験も行った。図 12 に試作機および性能試験装置を示す。

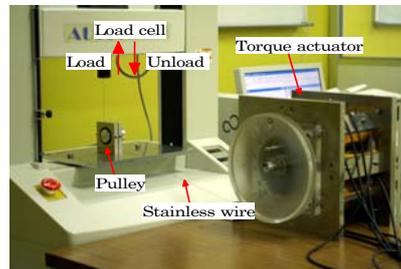


図 12 試作機および性能実験装置

図 13 に性能試験結果を示す。グラフの実線が、磁力を加えない状態での回転角とトルクの関係を示している。実線の上側の曲線が負荷時、下側の曲線が除荷時の関係を表し、

ヒステリシスループを示している。トルク 2.49Nm において、磁力を加えると図中の A 点から B 点に回転角が減少する。種々のトルクでの回転角減少点をプロットし、磁力を加えた時のトルクと回転角との関係を推定した曲線を、破線で示す。このグラフから、トルク 2.49Nm で磁力を加えると、負荷時において破線の矢印で示すように 1.6rad から約 1.25rad までの 0.35rad (20.1°) 回転することがわかる。これは、図 11 の解析結果 1.2rad (68.8°) の約 30% であり、この点については今後、理論式の修正、試作機の摩擦などの機械的損失の低減など行っていく予定である。しかし、超弾性領域では、弾性領域に比べ、トルク-回転角曲線の傾きが緩やかになっており、わずかな磁力によるトルク曲線の変化でも回転角の大きな変化として表れるという、本研究の開発概念を確認することができた。

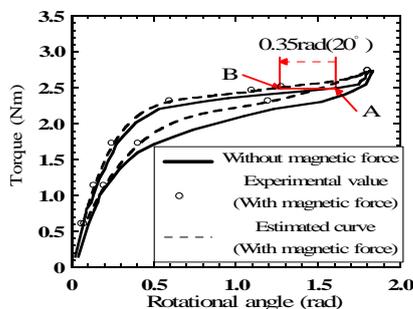


図 13 性能試験結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① M. Kimura, M. Kusaka, K. Kaizu, A. Fuji:
Effect of post-weld heat treatment on joint properties of friction welded joint between brass and low carbon steel, Science and Technology of Welding and joining, 査読有, Vol.15 No.7, 2010, pp.590-596.
- ② M. Kimura, D. Utsumi, M. Kusaka, K. Kaizu:
Strength enhancement of autocompleting medium and high carbon steels friction welded joints, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vo.211, 2010, pp.256-262.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 倉田裕二, 目下正広, 木村真晃, 海津浩一:
超弾性材料を用いた磁気駆動トルクアクチュエータの挙動実験, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都工芸繊維大学
- ② 木村真晃, 齋藤嘉孝, 目下正広, 海津浩一, 富士明良:
純 Ti / OFC 摩擦圧接の接合現象, 日本機械学会第 18 回機械材料・機械加工技術講演会 (M&P 2010), 2010 年 11

月 27 日, 東京大学

- ③ 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
接合自己完了摩擦圧接した A5052 継手の接合現象と引張強さ, 平成 22 年度溶接学会春季全国大会, 2010 年 4 月 20 日, 東京ビッグサイト
- ④ 石野陽祐, 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
接合自己完了型摩擦圧接した黄銅/軟鋼継手の引張強度に及ぼす黄銅挿入材形状の影響, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会, 2010 年 3 月 17 日, 神戸大学
- ⑤ 齋藤嘉孝, 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
純 Ti / OFC 摩擦圧接の継手強度に及ぼす Ti 側接合端面性状の影響, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会, 2010 年 3 月 17 日, 神戸大学
- ⑥ 一原彰宏, 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
SUS310S 鋼薄肉円管摩擦圧接の継手性能とその改善, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会, 2010 年 3 月 17 日, 神戸大学
- ⑦ 倉田裕二, 目下正広, 木村真晃, 海津浩一:
超弾性材料を用いた磁気駆動トルクアクチュエータにおけるヨーク形状の検討, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2010 年 3 月 15 日, 神戸大学
- ⑧ 目下正広, 海津浩一, 木村真晃:
強磁性材と超弾性材料を用いた磁気駆動トルクアクチュエータの変形挙動解析, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会, 2009 年 3 月 16 日, 近畿大学
- ⑨ 高橋恭平, 目下正広, 海津浩一, 木村真晃:
超弾性形状記憶合金を用いた高速磁気駆動トルクアクチュエータの開発, 兵庫県立大学シンポジウム, 2008 年 9 月 22 日, 姫路商工会議所
- ⑩ 井上晴雄, 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
摩擦圧接中における摩擦トルク・圧接面温度の有限要素解析, 溶接学会平成 20 年度秋季全国大会, 2008 年 9 月 10 日, 北九州国際会議場
- ⑪ 一原彰宏, 木村真晃, 目下正広, 海津浩一:
SUS310S 鋼薄肉円管摩擦圧接の継手強度に及ぼす円管肉厚の影響, 溶接学会平成 20 年度秋季全国大会, 2008 年 9 月 10 日, 北九州国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

目下 正広 (KUSAKA MASAHIRO)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40244686

(2) 研究分担者

木村 真晃 (KIMURA MASAOKI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90285338