Ni₂MnGa 強磁性形状記憶合金スパッタ膜の開発とアクチュエータへの応用

大 塚 誠*

1. は じ め に

近年、各種産業機器の単純化や小型化への強い要望から、マイクロマシンの開発が盛んに行われている。マイクロマシンを構成するアクチュエータの候補材料には、形状記憶材料、圧電材料、超磁歪材料などが挙げられる。その中でも形状記憶材料は、大きな力と変位量を発生でき、単位体積当たりの仕事、圧電素子、静電力、電磁力など、他の代表的なアクチュエータ素子と比べて2桁以上大きいため、マイクロマシン駆動用のアクチュエータ材料として優れた機能を発揮することが期待される⁽¹⁾。

また、高温と低温の2つの状態の形状を記憶させることができる2方向性の形状記憶効果を示す形状記憶合金は、1方向性の形状記憶合金を他の部品と組み合わせて構成された2方向性素子と比べて、その小型化や簡素化に非常に有効であり、信頼性の向上につながる。そこで、形状記憶合金としては、実用材料として利用可能な特徴を有するNi-Ti合金と一部のCu系合金を中心に、2方向形状記憶効果の研究が積極的に進められている。ここで、実際の使用を考えた場合、2方向形状記憶効果を発現させるためには加熱-冷却を行わなければならない。そのため、良好な形状記憶特性を発揮させるには特に冷却系の制御が問題になり、その制御には大がかりな装置を必要とする⁽²⁾。このことから、温度ばかりでなく磁場によっても応答する強磁性形状記憶合金の開発が切望されている。

Ni-Ti合金などの従来の形状記憶合金では、温度変化や応力誘起によりマルテンサイト変態(熱弾性型)が生じ、マルテンサイト相では応力誘起による双晶バリエーションの再配列が起こる。一方、Ni₂MnGa合金などの強磁性形状記憶合金は強

磁性と形状記憶効果の2つの機能を併せ持つ多機能材料であり、形状記憶効果を担うマルテンサイト変態や形状変化の発現を従来の温度や応力だけでなく磁場により制御できる可能性があることから、高速応答型の磁場駆動アクチュエータ材料への応用が期待される。

Ni₂MnGa単結晶合金は2節に述べるように巨大磁場誘起ひずみを示すことから、磁場による高速応答可能なアクチュエータへの応用が提案されており⁽³⁾、いくつかの報告がある⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。Ni_{49.7}Mn_{29.0}Ga_{21.3}単結晶合金を利用したものは、交流磁場で3%の磁場誘起ひずみが確認された⁽⁴⁾。また、交流磁場で発生する渦電流を減らすことによりアクチュエータの高速化を図り、最大変位を200 Hzの周波数で実現した⁽⁵⁾。さらに、AdaptaMat社では、力、変位量、寸法などの異なるアクチュエータを作製・販売しており、リニアモータ、ポンプなども試作している。これらは、ホームページ(<http://www.adaptamat.com>)でも紹介されている。しかし、巨大磁気誘起ひずみを利用した磁場駆動アクチュエータの発生できる応力は数MPaと小さく、用途が限定される。

形状記憶合金薄膜はマイクロマシン用のアクチュエータとして注目されており、小さな電圧で大きな力と変位量を得ることができる特徴を有している。なお、温度変化に伴う形状記憶効果を利用したNi-Ti合金薄膜の研究に関しては、本学会報「まてりあ」の解説に紹介されている⁽⁸⁾。本報では、強磁性形状記憶合金であるNi₂MnGa合金の特徴について簡単に述べた上で、最近、筆者らがを行っている本合金スパッタ膜の開発とその応用に関する研究の一部を紹介する。

2. Ni₂MnGa 強磁性形状記憶合金

Ni₂MnGa合金は1960年にHames⁽⁹⁾により強磁性を有する

* 東北大学助手；多元物質科学研究所(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

Development of Ferromagnetic Shape Memory Alloy Ni₂MnGa Sputtered Films and Its Application for Actuator; Makoto Ohtsuka (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai)

Keywords: ferromagnetic shape memory alloy, sputtered film, martensitic transformation, shape memory effect, actuator, optical scanner, nickel-manganese-gallium alloy

2004年12月20日受理

金属間化合物であることが報告されて以来、古くから磁性材料として知られていた。化学量論組成の Ni_2MnGa 合金は、強磁性の温度領域でホイスラー型 (L2_1) の結晶構造を有するオーステナイト相 (母相) から正方晶にマルテンサイト変態を起こし、母相の立方晶では磁気異方性がなく、マルテンサイト相の正方晶では大きな磁気異方性を有することが Webster ら⁽¹⁰⁾ により報告された。その後、Vasil'ev ら⁽¹¹⁾ によって Ni_2MnGa 合金の形状記憶効果が報告されて以来、形状記憶効果と強磁性を併せ持つ材料として近年注目を集めるようになった。化学量論組成の Ni_2MnGa 合金におけるマルテンサイト変態温度は 202 K、キュリー温度は 376 K である⁽¹⁰⁾。そこで、マルテンサイト変態はキュリー温度以下の強磁性領域で起こることから、これまでの熱や応力に加え磁場でマルテンサイト変態温度を制御することが可能であり⁽¹²⁾、マルテンサイト変態温度とキュリー温度が接近している状況下では、合金に磁場を印加することによりマルテンサイト変態を誘起できることが期待される。 Ni_2MnGa 合金のマルテンサイト変態温度に及ぼす磁場の影響については、実験と理論の両面から検討されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。このように、形状記憶効果を担うマルテンサイト変態や形状変化の発現を温度だけでなく磁場により制御できる可能性があることから、高速応答型の磁場駆動アクチュエータ材料への応用が期待される。

また、非化学量論組成の $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ ($x=0\sim0.19$) 合金では、ニッケル含有量の増大に伴いマルテンサイト変態温度は上昇し、キュリー温度は低下した⁽¹⁵⁾。これより、目的とするマルテンサイト変態温度やキュリー温度を得るには、合金の組成を制御すればよいことがわかる。

さらに、非化学量論組成の Ni_2MnGa 単結晶合金では、マルテンサイト相に磁場を印加することにより 4~6% の巨大ひずみを生ずることが報告された⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾。最近では、9.5%⁽¹⁹⁾ や 15%⁽²⁰⁾ もの巨大ひずみが報告されている。一方、多結晶合金でも磁歪が確認されており、マルテンサイト変態温度直下で極大値を示した⁽²¹⁾。なお、強磁性形状記憶合金において出現する磁場誘起ひずみの機構については、本学会報「まてりあ」の解説に紹介されている⁽²²⁾。

3. Ni_2MnGa スパッタ膜の開発

Ni_2MnGa 多結晶合金 (バルク材) は非常に脆いという問題があり、その機械的性質、特に延性の改善が求められる。筆者らは、スパッタ法により作製された Ni_2MnGa 合金膜では、バルク材で問題視されている脆性を 1073~1273 K での均質化熱処理により改善できることをこれまでに確認している。また、薄膜化により合金の熱容量は小さくなり、冷却効率は上昇し、温度変化に伴う形状記憶効果の応答速度も飛躍的に向上することが期待できる。

そこで、非化学量論組成の Ni_2MnGa 膜を高周波マグネトロンスパッタ装置により作製し、1073 K で 3.6 ks の均質化熱処理を施した。スパッタ膜の組成はターゲット組成および

スパッタ電力により制御できること、均質化熱処理を施されたスパッタ膜のマルテンサイト変態温度およびキュリー温度はその組成や熱処理条件により制御できることを明らかにしてきた⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾。均質化熱処理された Ni_2MnGa 合金スパッタ膜のマルテンサイト変態開始温度 (M_s) およびキュリー温度 (T_C) の組成依存性を図 1 に示す⁽²⁵⁾。なお、横軸には合金の組成と密接に関係する価電子濃度 (e/a) をパラメータとした。また、図中には、Chernenko⁽²⁷⁾ により報告されたバルク材の値を同時に示した。マルテンサイト変態温度は組成に強く依存し、価電子濃度とともに大きく上昇するが、キュリー温度は組成にあまり依存せず、バルク材の傾向と良い一致が見られた。

本節では、1073 K で 3.6 ks の均質化熱処理された Ni 過剰組成を有する Ni_2MnGa スパッタ膜において、磁場駆動アクチュエータへの応用を実現させるために、曲げ変形あるいは拘束時効により形状記憶処理を施し、温度および磁場変化に伴う形状記憶効果について調査した結果について紹介する。

(1) 温度制御による形状記憶効果

ポリビニルアルコール (PVA) 基板上に成膜された Ni 過剰組成を有する Ni_2MnGa スパッタ膜 (膜厚: 5 μm) を基板から剥離した後、1073 K で 3.6 ks の均質化熱処理を施した。得られた平板状の均質化熱処理膜を、短冊状に切断した後、室温で曲げ変形により円筒状にした。均質化熱処理されたスパッタ膜に室温で曲げ変形を加えたものでは、加熱により逆マルテンサイト変態に起因する形状回復が起こり平板形状へと変化し、その後の冷却過程では、再び湾曲した形状へと変化した⁽²⁶⁾。これより、均質化熱処理した後、室温で曲げ変形されたスパッタ膜は、加熱-冷却に伴い、2 方向形状記憶効果の発現が確認された。均質化熱処理を施したスパッタ膜に

図 1 Ni_2MnGa 合金のマルテンサイト変態開始温度 (M_s) およびキュリー温度 (T_C) に及ぼす価電子濃度 (e/a) の影響。

対して曲げ変形を加えた時に得られた X 線回折図形の変化から、応力誘起マルテンサイト変態が確認された⁽²⁶⁾。このことから、曲げ変形されたスパッタ膜では、応力誘起マルテンサイト相が母相中に存在し、これにより導入される不均質な応力場に伴う双晶バリエーションの選択的な出現に起因して 2 方向形状記憶効果が発現したと考えられる。しかし、曲げ変形の場合、形状変化量や温度ヒステリシスなどの制御が困難であった。そこで、拘束条件下で時効処理されたスパッタ膜の形状記憶効果について調査した。

Al_2O_3 基板上に成膜された Ni 過剰組成を有する $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜 (膜厚: $5\text{ }\mu\text{m}$) に対して 1073 K で 3.6 ks の均質化熱処理を施した後、基板から剥離して平板状の均質化熱処理膜を得た。これを短冊状に切断し、室温で円筒状に変形した後、内径 4 mm の石英管内に拘束し、 $573\sim 673\text{ K}$ で $0\sim 57.6\text{ ks}$ の時効処理を施した。円筒状に拘束時効処理されたスパッタ膜について加熱-冷却に伴う形状変化を観察した結果、曲げ変形したものと同様に 2 方向形状記憶効果が発現した⁽²⁸⁾。一例として、 673 K で 1.8 ks の拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜 ($e/a=7.69$) における温度変化に伴う形状変化を図 2 に示す。X 線解析および TEM 観察の結果から、拘束時効処理を施されたスパッタ膜には、加熱時に母相の他に、マルテンサイト相および L_{12} 構造を有する $\text{Ni}_3(\text{Mn}, \text{Ga})$ の時効析出物が確認された⁽²⁹⁾。時効温度を 673 K 一定として時効時間を $0\sim 57.6\text{ ks}$ まで変化させて拘束時効処理を施した $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜の室温および 373 K における X 線回折図形の変化を図 3 に示す。いずれの拘束時効処理膜も、室温ではマルテンサイト相であり、 373 K では母相へと変態している。拘束時効処理を施されたスパッタ膜には、母相に起因する回折ピークの他に、マルテンサイト相および L_{12} 構造を有する $\text{Ni}_3(\text{Mn}, \text{Ga})$ の時効析出物に起因する回折ピークが見られる。このマルテンサイト相

は、加熱しても逆変態せずに残留した熱安定化された応力誘起マルテンサイト相であると推察される。拘束時効処理を施されたスパッタ膜においては、熱安定化された応力誘起マルテ

図 2 673 K で 1.8 ks の拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜における温度変化に伴う形状変化。

図 3 時効温度を 673 K 一定として時効時間を $0\sim 57.6\text{ ks}$ まで変化させて拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜の (a) 室温および (b) 373 K における X 線回折図形。

ンサイト相および $\text{Ni}_3(\text{Mn, Ga})$ 時効析出物が拘束状態におけるひずみを緩和するように存在し、加熱に伴う形状変化に伴いこれらの周りには不均質な応力場が形成され、冷却時にはこの応力場を緩和するように双晶バリエーションが選択的に出現するために2方向形状記憶効果が発現したと考えられる。このことから、このような応力場を制御することにより、形状変化挙動を制御することが可能になると期待される。

また、得られた形状変化挙動から、表面ひずみ量($\varepsilon = d_s/2r$)および有効回復ひずみ量($\varepsilon_{\text{TWME}} = \varepsilon_{\text{LT}} - \varepsilon_{\text{HT}}$)を評価した。ここで、 d_s は膜厚、 r は合金膜の曲率半径である。得られたひずみ-温度曲線において定義される各表面ひずみ量および変態温度を模式的に図4に示す。 ε_{HT} は加熱後の平板形状(高温相)における表面ひずみ量、 ε_{LT} は冷却後の円筒形状(低温相)における表面ひずみ量である(図4(i))。また、図4(ii)に示すように、加熱時におけるひずみ-温度曲線の勾配が最大となる点で接線を延長し、 ε_{LT} と交わる点を A_s^* 、 ε_{HT} と交わる点を A_f^* と定義した。同様に、冷却時のひずみ-温度曲線から、 ε_{HT} 、 ε_{LT} と交わる点をそれぞれ M_s^* 、 M_f^* と定義した。また、この最大勾配を α と定義した。

673 K で 1.8 ks の拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜のひずみ-温度曲線を図5に示す⁽²⁸⁾。なお、図5中の(a)~(h)は、図2中の(a)~(h)に対応している。加熱-冷却を繰り返すことにより、拘束時効処理を施されたスパッタ膜では、1回目の冷却時には元の円筒状の形状に完全には戻らなかったが、2回目以降の加熱-冷却では高温相および低温相のひずみ量(ε_{HT} および ε_{LT})がある一定の値を示し、

図4 ひずみ-温度曲線における各表面ひずみ量および変態温度の定義。

温度ヒステリシスの小さな可逆的な形状変化挙動が得られた。また、拘束時効処理により2方向形状記憶効果を発現させる場合、時効条件は形状変化挙動に大きな影響を与え、時効温度の上昇あるいは時効時間の増加に伴い、 ε_{HT} および ε_{LT} は共に増大し、 $\varepsilon_{\text{TWME}}$ は増大した。また、温度ヒステリシスは小さくなる傾向を示した⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。

(2) 磁場制御による形状記憶効果

強磁性形状記憶合金において、注目される機能の1つは磁場誘起形状記憶効果である。室温において強磁性である Ni_2MnGa 合金は、熱による熱弾性型マルテンサイト変態ばかりでなく、磁場による磁気弾性型(磁場誘起)マルテンサイト変態により、これまでの形状記憶材料にはない磁場誘起の形状記憶効果を発現する可能性がある。そこで、近年、磁場誘起マルテンサイト変態に関する研究が盛んに行われている。磁気弾性型マルテンサイト変態は母相とマルテンサイト相の磁化の差に起因しており、母相に磁場を印加したときにマルテンサイト相の磁化が母相の磁化を上回ると、それに伴いマルテンサイト相の自由エネルギーの減少量が大きくなるため、マルテンサイト変態が誘起されると考えられる。磁気弾性型マルテンサイト変態が Ni_2MnGa 時効処理膜に誘起されれば、磁場の制御により形状記憶効果を発現することが可能になるため、その実現がアクチュエータへの応用において非常に重要となる。

673 K で 57.6 ks の拘束時効処理されたスパッタ膜(膜厚: 5 μm)に対して 5 T の磁場を膜面に対して平行に印加した状態で温度変化に伴う形状変化挙動を観察した結果、磁場印加に伴いひずみ-温度曲線は高温側に 4~6 K 移動するこ

図5 673 K で 1.8 ks の拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜におけるひずみ-温度曲線。

とを確認した⁽³⁰⁾．これより，磁場印加に伴いマルテンサイト変態温度が高温側に移動し，磁場によるマルテンサイト相の安定化が示唆された．

そこで，拘束時効処理膜に対して0～5 Tの磁場を膜面に対して平行に印加-除去した時の形状変化挙動を調査した．保持温度は，形状変化挙動が発現しやすいと予想される加熱過程のマルテンサイト逆変態温度($A_s^* \sim A_f^*$)間あるいは冷却過程のマルテンサイト変態温度($M_s^* \sim M_f^*$)間とした．673 Kで14.4あるいは57.6 ksの拘束時効処理されたスパッタ膜(膜厚：5 μm)に対して磁場を印加-除去した結果，磁場制御による形状記憶効果が認められた⁽³⁰⁾．一例として，673 Kで1.8 ksの拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜における磁場変化に伴う形状変化を図6に示す．磁場の印加-除去に伴う形状変化挙動は保持温度によって大きく異なることがわかる．加熱過程で温度保持した場合，磁場印加に伴い時効処理膜の曲率半径は小さくなり，磁場の除去に伴い曲率半径は大きくなり元の状態に戻ったが，その形状変化量はわずかであった(図6(i))．一方，冷却過程で温度保持

した場合，磁場印加に伴い時効処理膜の形状は大きく変化した，その曲率半径は小さくなったが，磁場の除去に伴う形状変化はわずかであり，磁場を印加する前の形状には戻らなかった(図6(ii))．磁場印加に伴う形状変化挙動は，冷却に伴う場合と同様であり，磁場印加に伴いマルテンサイト変態が誘起され，マルテンサイト相が安定化したためと推察される．冷却過程で温度保持した場合，5 Tの磁場印加により見かけ上約4～5 Kの冷却に相当するひずみ量が得られた．また，磁場印加に伴うひずみ変化量は時効条件により異なった⁽³⁰⁾⁽³¹⁾．さらに，温度-ひずみ曲線の勾配(α)が大きいほど，磁場印加に伴うひずみ変化量は大きくなり，磁場変化に伴う2方向形状記憶効果を発現させるには温度ヒステリシスを小さくする必要があることが示唆された．しかし，磁場誘起マルテンサイト変態に伴う形状記憶効果における回復力を磁場駆動アクチュエータに利用するためには，さらに低磁場で磁場誘起マルテンサイト変態を示す材料の開発が必要とされる．

4. スパッタ膜を用いたアクチュエータへの応用

強磁性形状記憶合金 Ni_2MnGa 膜をアクチュエータなどに応用した研究報告はこれまでにない．しかし，前節で述べたように Ni_2MnGa 合金の磁場誘起マルテンサイト変態には大きな磁場が必要とされる．そこで，均質化熱処理を施された Ni_2MnGa スパッタ膜における温度変化に伴う形状記憶効果と磁気特性の変化を利用してマイクロアクチュエータ用デバイスの一例として光学スキャナを作製し，その動作特性を評価した⁽³²⁾⁽³³⁾．

1073 Kで36 ksの均質化熱処理を施された Ni_2MnGa スパッタ膜(膜厚：10 μm)に微細加工を施し，光学スキャナを作製した(図7)．用いた Ni_2MnGa スパッタ膜の組成は $\text{Ni}_{54.0}\text{Mn}_{24.1}\text{Ga}_{21.9}$ ($e/a=7.74$)であり，マルテンサイト変態温度およびキュリー温度は室温以上であった．スパッタ膜はリソグラフ法により，2本の梁を有するコの字型の形状に微細加工され，その先端に微小な鏡を取り付けた．永久磁石にはSmCo合金を用い，スパッタ膜を自己抵抗加熱するために，

図6 673 Kで57.6 ksの拘束時効処理された $\text{Ni}_{53.6}\text{Mn}_{23.4}\text{Ga}_{23.0}$ スパッタ膜における磁場変化に伴う形状変化．(i)加熱過程の $A_s^* \sim A_f^*$ 間，および，(ii)冷却過程の $M_s^* \sim M_f^*$ 間に温度保持．

図7 1073 Kで36 ksの均質化熱処理を施された Ni_2MnGa スパッタ膜を用いて作製された光スキャナの概観．

図8 光スキャナの動作原理.

図9 パルス電流の印加に伴う光スキャナの動作.

電極を取り付けた。作製された光スキャナの寸法は、長さ7 mm、幅3 mm、高さ5 mmであり、非常にコンパクトな構造とした。

光スキャナの動作原理図を図8に示す。室温ではスパッタ膜は強磁性のマartenサイト相で、永久磁石による引力(磁気力)により曲げられる(図8(i))。一方、逆マartenサイト変態終了温度以上で、かつ、キュリー温度以上に通電加熱した場合には、スパッタ膜は常磁性の母相となり、磁場による引力が働かなくなり、形状記憶効果に伴う形状回復力により平板状に戻る(図8(ii))。そこで、光スキャナは、スパッタ膜における永久磁石による引力とそれに反発する形状回復力により動作することが期待される。

作製された光スキャナに通電しない場合、永久磁石による引力でスパッタ膜は上の方に曲げられた。一方、通電により逆マartenサイト変態終了温度以上で、かつ、キュリー温度以上に加熱した場合には、磁場による引力が働かなくなり、形状記憶効果に伴う形状回復力によりスパッタ膜は平板状へと変化した。そこで、スパッタ膜にパルス電流を印加して加熱-冷却した場合、光スキャナは周期的に走査運動(曲げ振動)を繰返した(図9)。光スキャナの走査角度(ϕ)に及ぼすパルス電流の周波数の影響を図10に示す。これより、光スキャ

図10 光スキャナの走査角度に及ぼす周波数の影響.

ナの走査角度は最大で120度程度の大きな値を示し、約70 Hz以下では、走査角度は周波数に依存しなかった。

5. おわりに

本稿では、最近、著者らが行っている Ni_2MnGa 強磁性形状記憶合金スパッタ膜の開発とその応用に関する研究成果について紹介した。

Ni_2MnGa 合金を始めとする強磁性形状記憶合金では、①磁気誘起マartenサイト変態に伴う形状記憶効果における回復力、あるいは、②巨大な磁場誘起ひずみを利用した磁場駆動アクチュエータが考えられ、高速応答性や大きな変位量を有し遠隔操作が可能であるなどの利点がある。しかし、①では大きな磁場が必要であり、②では発生する力が小さいなどの問題点がある。実用化のためには、これらの問題を解決する必要がある。そこで、著者らは、小さな磁場でマartenサイト変態を誘起できる薄膜材料の開発研究を進めている。また、アクチュエータとして利用するためには、疲労特性や寿命など繰返し使用した場合の信頼性の評価が求められる。

一方、 Ni_2MnGa 合金のマartenサイト相では、応力負荷により双晶バリエーションの再配列が起こり、応力レベル(ひずみ量)に伴いその割合が変化する。 Ni_2MnGa 合金のマartenサイト相は結晶磁気異方性が大きいので、双晶バリエーションの割合に応じて合金の磁気特性が大きく変化する。このように、 Ni_2MnGa 合金に現れる磁場誘起ひずみの効果を逆に利用することにより、高感度の応力あるいはひずみのセンサーとして応用できる可能性があり、今後の開発が期待される。

そこで、材料、加工、制御など広い分野の研究者、技術者が横断的に連携することにより、強磁性形状記憶合金による磁場誘起アクチュエータやセンサーを用いた応用デバイスが実用化されることを期待したい。

本稿で紹介した研究を遂行するにあたりご指導とご助言を賜りました東北大学多元物質科学研究所教授 板垣乙未生先生、元講師 松本 實先生、東北大学流体科学研究所教授 高木敏行先生に深く感謝申し上げるとともに、研究に協力いただいた板垣研究室の学生諸君に感謝いたします。また、光

文 献

- 142-151.
- (18) S. J. Murray, M. Marioni, S.M. Allen and R. C. O'Handley: Appl. Phys. Lett., **77**(2000), 886-888.
- (19) A. Sozinov, A. A. Likhachev, N. Lanska and K. Ullakko: Appl. Phys. Lett., **80**(2002), 1746-1748.
- (20) C. Jiang, T. Liang, H. Xu, M. Zhang and G. Wu: Appl. Phys. Lett., **81**(2002), 2818-2820.
- (21) K. Tsuchiya, A. Ohashi, D. Ohtoyo, H. Nakayama, M. Umemoto and P. G. McCormick: Mater. Trans., JIM, **41**(2000), 938-942.
- (22) 福田 隆, 掛下知行, 竹内徹也 : まてりあ, **44**(2005), 285-291.
- (23) M. Suzuki, M. Ohtsuka, T. Suzuki, M. Matsumoto and H. Miki: Mater. Trans., JIM, **40**(1999), 1174-1177.
- (24) M. Ohtsuka and K. Itagaki: Int. J. Appl. Electromagn. Mech., **12**(2000), 49-59.
- (25) K. Ohi, S. Isokawa, M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki: Trans. Mater. Res. Soc. Japan, **26**(2001), 291-294.
- (26) M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki: Trans. Mater. Res. Soc. Japan, **26**(2001), 201-204.
- (27) V. A. Chernenko: Scr. Mater., **40**(1999), 523-527.
- (28) S. Isokawa, M. Suzuki, M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki: Mater. Trans., **42**(2001), 1886-1889.
- (29) M. Suzuki, M. Ohtsuka, M. Matsumoto, Y. Murakami, D. Shindo and K. Itagaki: Mater. Trans., **43**(2002), 861-866.
- (30) M. Ohtsuka, M. Sanada, M. Matsumoto, T. Takagi and K. Itagaki: Mater. Trans., **44**(2003), 2513-2519.
- (31) M. Ohtsuka, M. Sanada, M. Matsumoto and K. Itagaki: Mater. Sci. Eng. A, **378**(2004), 377-383.
- (32) M. Kohl, S. Hoffmann, Y. Liu, M. Ohtsuka and T. Takagi: J. Phys. IV France, **112**(2003), 1185-1188.
- (33) M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka and T. Takagi: Sens. Actuators A, **114**(2004), 445-450.

大塚 誠

1992年3月 東北大学大学院工学研究科材料物性学
専攻博士課程修了(博士(工学))

1992年4月 東北大学選鉱製錬研究所助手

1992年4月 改組により、東北大学素材工学研究所
助手

2001年4月～現職

専門分野：機能材料学，素材プロセス工学

高機能性合金薄膜の開発に従事。現在，強磁性形状記憶合金や水素吸蔵合金などを対象に，スバツタ薄膜の開発とデバイス応用に関する研究を積極的に展開中。