

Fe-Pd 合金薄膜の磁歪特性の組成依存性

矢部 洋正*・西 義武*2

Chemical Composition Dependence of Magnetostrictive Properties of Fe-Pd Alloy Films

Hiromasa YABE and Yoshitake NISHI

Synopsis : The Fe-43.8at%Pd, -60.3at%Pd and -66.9at%Pd alloy films were prepared by DC magnetron sputtering method. The structures of Fe-Pd alloy films were mainly fcc phase and partially fct phase. The compressive residual stresses were generated in films on film formation. In addition, the good correlation was obtained between compressive residual stress and coercive force of Fe-Pd alloy films. The Fe-60.3at%Pd alloy film has the largest compressive residual stress, the largest coercive force and largest magnetostriction. The magnetostrictive susceptibility largely depends on the magnetic susceptibility. These changes in the properties depend on the composition rate of Fe-Pd alloys.

Key words : crystal structure; production control; alloying element; stainless steel; physical property.

1. 緒言

マイクロマシン等の次世代技術用アクチュエータの駆動エネルギーの1つである磁場は、応答性の高いリモート操作のための駆動源として期待される¹⁾。さらに磁場によるリモート操作は、熱よりも素早い精密な変形の制御が可能であるという利点がある。このような磁場駆動型のスマート材料には、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金²⁾や、近年は Ni_2MnGa 合金³⁾やFe-Pd合金⁴⁾などが着目され、研究が盛んに行われている。

$Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金は典型的な磁場駆動の高感度駆動機構材料であり、さらに $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金薄膜はスマート電子デバイスへの応用や、疲労特性の向上のために研究されている^{5,6)}。しかしながら $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金は耐食性が低く、大気中での放置により酸化し易く、その良好な磁歪特性を失う可能性が高い欠点がある。また Ni_2MnGa 合金は5%程度の非常に大きな磁歪を示すが⁷⁾、脆いために加工性が悪いことや、磁化が小さいために高出力が得られないなどの短所がある⁸⁾。一方、Fe-Pd合金はその良好な耐食性と低磁場での高い磁歪感受率を保持するために、現在、 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金で実用化されている海洋トモグラフィの低周波音源⁹⁾をより高性能にする可能性が高い。さらに破壊しにくく、振動に強いFe-Pd合金の磁歪材料は、宇宙ステーションの平衡制御用機能材料として実用化される可能性が高い。このような高耐食性、高感度、強靱性の他に、磁化が高いために高出力が期待できるFe-Pd合金に着目し、実用的な駆動機構材料としての研究開発を行ってきた¹⁰⁻¹⁷⁾。特に、マイクロデバイスとして有用である薄膜化の研究を重点的に行ってきたので報告する¹³⁻¹⁷⁾。このFe-45at%Pd合金薄膜は80kA/m以下という低磁場で飽和す

る良好な超磁歪および高磁歪感受率を示し¹³⁻¹⁷⁾、超磁歪単結晶と比較して磁場に対する感度が非常に大きいことや、鉄とパラジウムの成分比が70:30以外の組成においても磁歪を生じるなど、バルク体とは異なる性質を保持することが明らかとなっている¹³⁻¹⁷⁾。本研究では広範囲の組成依存性を調べるために、DCマグネトロンスパッタリング法により組成の異なるFe-Pd合金薄膜を作製し、その磁歪特性の組成依存性を調べることを主な目的とした。本研究では重要な磁歪特性として、磁歪量と磁歪感受率に焦点を絞って評価を行った。

2. 実験方法

2.1 薄膜試料の作製

超磁歪薄膜において高い磁歪性能、特に高磁歪感受率を得るための1つの方法として、微細な集合組織の形成が有効である¹⁸⁾。ところでスパッタリングによって形成された膜は、選択的に一方向に配向することがThorntonのスパッタ薄膜のモデルから十分推定できる¹⁹⁻²¹⁾。そこでFe-Pd合金薄膜試料の作製には、短時間で質の良い薄膜を作製することが可能で実用的に用いられているDCマグネトロンスパッタリング装置を用い、Thorntonのモデルを参考に細かな集合組織が得られる成膜条件を決めた。装置構成図をFig. 1に示し、薄膜の成膜条件をTable 1に示す。ターゲットにはモザイクターゲットを用い、鉄ターゲット(99.9%)上のパラジウム(99.9%田中貴金属工業株式会社より貸与)の量を調整して組成を制御し¹⁴⁻¹⁷⁾、Fe-43.8at%Pd、Fe-60.3at%PdおよびFe-66.9at%Pdの3種類の組成の異なる薄膜を作製した。基板材料にはSi(100)単結晶ウエハーを用

平成14年5月13日受付 平成14年10月15日受理 (Received on May 13, 2002; Accepted on Oct. 15, 2002)

* 東海大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tokai University)

*2 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname Hiratsuka 259-1292)

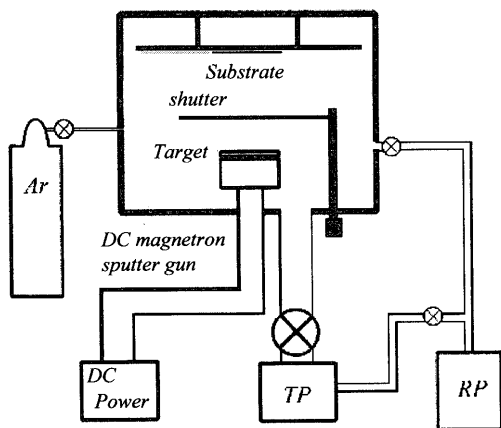


Fig. 1. Schematic diagram of DC magnetron sputter system.

Table 1. Condition of the film formation by DC magnetron sputtering.

Base pressure	$4.47 \times 10^{-5} \text{ Pa} \sim 5.47 \times 10^{-5} \text{ Pa}$
Leak rate	$5.0 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s}$
Sputtering gas	Argon (5 N)
Argon pressure	$1.09 \times 10^{-1} \text{ Pa} \sim 1.94 \times 10^{-1} \text{ Pa}$
Target	palladium on iron target (mozaic)
Sputtering power	DC 200 W
Sputtering time	3600 s
Substrate	Si (100) (5 mm x 25 mm x 0.3 mm)
Substrate temperature	$391 \pm 16 \text{ K}$

いた。成膜速度は $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ とした。

2.2 測定方法

作製した試料の組成は、エネルギー分散型X線分光 (energy dispersive spectroscopy; JSM-6301F, JEOL) を用いて確認した。電子線の加速電圧は 20 kV, 測定時間は 150 s とした。試料の結晶構造および格子定数は、室温での X 線回折 (X-ray diffraction; X'Part-MRD, PHILIPS) により確認した。X 線源には Cu ターゲットを用い、Cu-K α 線を用いて評価した。また試料が鉄系材料であるため、受光側に湾曲モノクロメータをセットして蛍光 X 線を取り除き、回折ピークの S/N 比を向上させた。薄膜試料の磁化特性は振動試料型磁化力計 (vibrating sample magnetometer; Model BHV-55, RIKEN) を用いて測定した。試料を消磁した後、印加磁場 $\pm 80 \text{ kA/m}$ で 300 秒間スイープさせた。また消磁状態から印加磁場 $\pm 80 \text{ kA/m}$ までの初期磁化曲線も合わせて測定した。磁化特性の I - H ヒステリシスは磁気異方性が効果的な²²⁾ 薄膜の面内方向のみ測定を行った。

Fe-Pd 合金薄膜の面内方向の磁歪特性 (λ_{ij}) は、Fig. 2 に示す光柁子方式の磁歪評価装置を用い、試料の面内方向に印加磁場 $\pm 80 \text{ kA/m}$ の範囲を 300 s でスイープさせ λ_{ij} - H_{ij} ヒステリシスループを測定した²³⁻²⁵⁾。印加磁場による薄膜の反り d を反射ビームスポットの移動距離 D から (1) 式を用いて求め、(2) 式を用いて面内方向の磁歪 (λ_{ij}) を算出した²³⁻²⁵⁾。

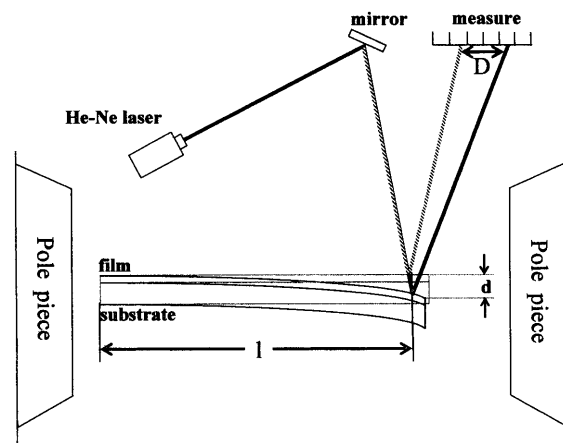


Fig. 2. Schematic diagram of measurement of magnetostriction by cantilever method.

$$d = lD/2L \dots \dots \dots (1)$$

ここで l と L は、それぞれ薄膜を固定しているクランプからレーザー光が当たる点までの長さ、薄膜にレーザー光があたっている点から変位を測定する測定器までの長さである。

$$\lambda_{ij} = d \cdot t_s^2 \cdot E_s / 3t_f \cdot l^2 \cdot E_f \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 t_s と t_f は、それぞれ基板と薄膜の厚さである。 E_s と E_f は、それぞれ基板と薄膜のヤング率である。Fe-Pd 合金薄膜のヤング率の報告はこれまでにされていないため、作製した薄膜の機械的特性の評価およびヤング率の算出のために、ナノインデント (nano-indenter; ENT-1100a, ERIONIX) を用い、荷重と押し込み深さの測定結果からヤング率を測定した²⁴⁾。

3. 結果

3.1 X線回折

マグネトロンスパッタリングにより作製した薄膜の組成は Fe-43.8at%Pd, Fe-60.3at%Pd および Fe-66.9at%Pd であり、薄膜の平均膜厚は約 $3.6 \pm 0.8 \mu\text{m}$ であった。さらに、作製した薄膜は良好な金属光沢を示し、数年間の大気放置にも全く光沢が経年変化せず、耐食性の高い合金薄膜であることが確認できた。

Fig. 3 に試料の室温での X 線回折により得られたピーク・プロファイルを示す。Fe-43.8at%Pd 薄膜および Fe-60.3at%Pd 薄膜の薄膜 X 線回折結果からは磁歪に寄与する (002) 面のピークが確認されるため²⁶⁾、大きな磁歪が期待できる。また、Fe-Pd 合金薄膜には非常に強く fcc (111) 面に配向した相と弱い fct 相の 2 相が共存していることが確認された。

微細な針状集合組織の薄膜を得るために、Table 1 に示す成膜条件で高速で成膜した¹⁹⁻²¹⁾。ここで特に、基板温度

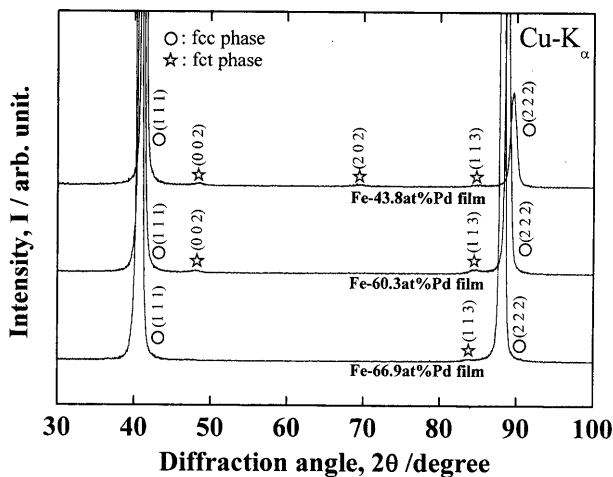


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Fe-43.8at%Pd film, Fe-60.3at%Pd film and Fe-66.9at%Pd film.

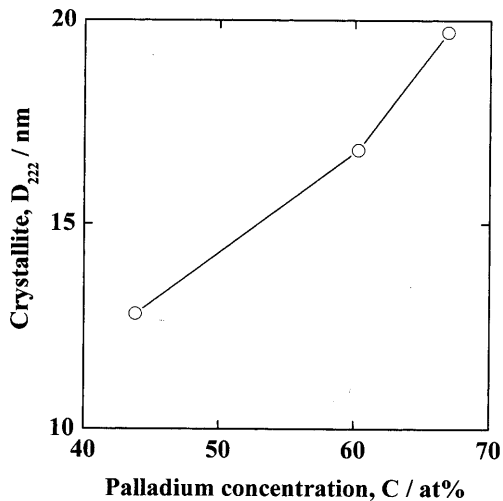


Fig. 4. Change in crystallite against palladium concentration of Fe-43.8at%Pd film, Fe-60.3at%Pd film and Fe-66.9at%Pd film.

(T_s)と融点(T_m)の絶対温度の比 T_s/T_m が0.24から0.25であり、アルゴン圧力が1-2 mTorrである。そこで結晶粒径を知るために薄膜試料のX線回折ピークのfcc(222)面の半価幅からScherrerの式を用いて結晶子の大きさを求め、薄膜組成のPd成分(at%)で整理した結果をFig. 4に示す。薄膜組成のPd成分が増加するほど、結晶子サイズが大きくなることを確認したが、いずれの場合も20nm以下である。Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂合金薄膜において、薄膜の結晶粒径を細かくすることにより磁歪感受率を高めた研究報告があることから¹⁸⁾、マグネトロンスパッタリングで作製したFe-Pd合金薄膜の高い磁歪感受率が期待できる。

Fig. 5に、3種類の組成が異なるFe-Pd薄膜の、X線回折から求めた格子定数をプロットした図を示す。図中の△は、ICDDカードに登録されている、オーステナイト鉄²⁷⁾、Fe-50at%Pd合金²⁸⁾、純Pd²⁹⁾、および十分に容体化处理されたFe-30at%Pd合金薄膜³⁰⁾の格子定数のプロットである。格子定数の文献値の各プロットを点線で結び測定結果と比

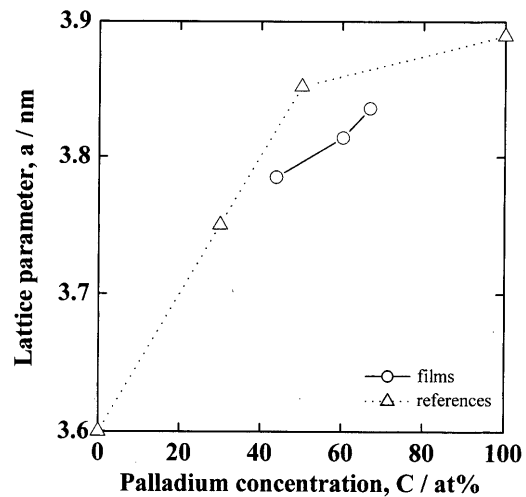


Fig. 5. Change in lattice parameter against palladium concentration of Fe-Pd films with reference data of austenite-iron,²⁷⁾ Fe-50at%Pd alloy,²⁸⁾ pure palladium²⁹⁾ and solution-treated Fe-30at%Pd alloy thin film.³⁰⁾

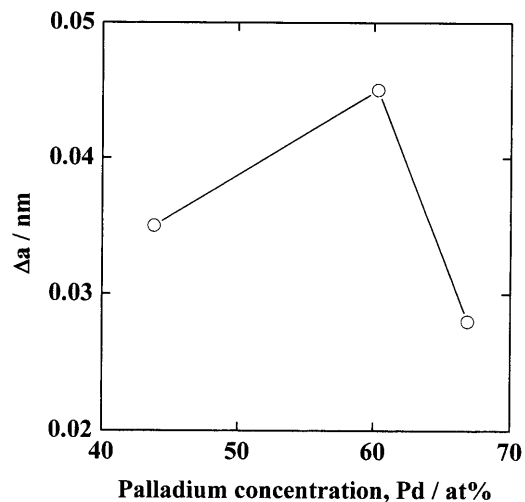


Fig. 6. Change in difference in theoretical lattice parameter and measured lattice parameter against palladium concentration of Fe-43.8at%Pd film, Fe-60.3at%Pd film and Fe-66.9at%Pd film.

較すると、本研究で作製した3種類の組成の異なるFe-Pd合金薄膜の格子定数は、3組成ともに文献値よりも小さいことが確認できる。薄膜の格子定数が文献値よりも小さいことは、試料の原子間距離が凝縮するためである。これらの結果より、DCマグネトロンスパッタリングにより作製したFe-Pd合金薄膜は、薄膜の形成時に凝縮していることが示された。ここで、原子間距離が凝縮した長さを Δa として、組成依存性を示した図をFig. 6に示す。Fe-66.9at%Pd合金薄膜が最も小さく、次いでFe-43.8at%Pd合金薄膜、Fe-60.3at%Pd合金薄膜の順に大きくなっている。

3.2 磁化特性

Fig. 7に、Fe-43.8at%Pd合金薄膜、Fe-60.3at%Pd合金薄膜、およびFe-66.9at%Pd合金薄膜の3種類の試料の面内方

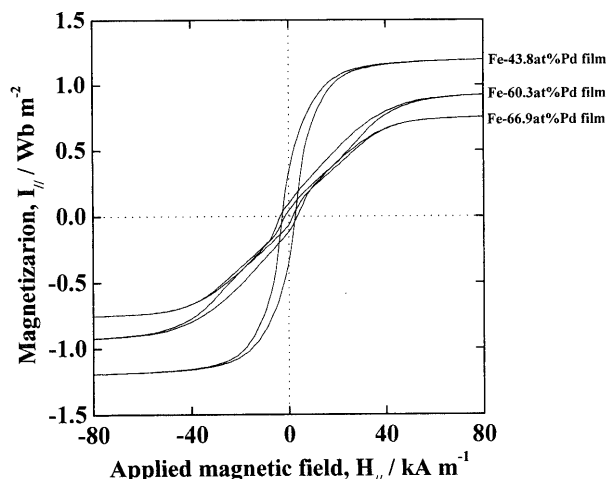


Fig. 7. Magnetization curves of Fe-43.8at%Pd film, Fe-60.3at%Pd film and Fe-66.9at%Pd film.

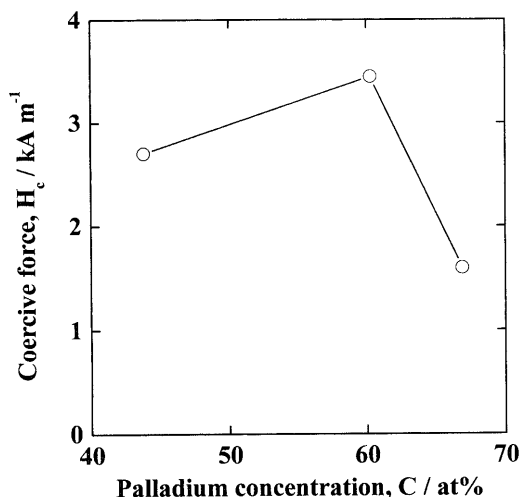


Fig. 8. Change in coercive force against palladium concentration of Fe-43.8at%Pd film, Fe-60.3at%Pd film and Fe-66.9at%Pd film.

向の磁場対磁化ヒステリシス曲線 (I - H ループ) を示す。ヒステリシス曲線より、これらの試料はいずれも軟磁性的傾向を示すことが確認できた。印加磁場 ± 80 kA/m における面内方向の飽和磁化は、Fe成分が多い Fe-43.8at%Pd合金が約 1.2 Wb/m² と最も大きく、Feが減少するにしたがって飽和磁化の値が減少する。一般的に知られている、純鉄が十分強い磁界の中で磁化したときの飽和磁化の値は約 2 Wb/m² であることから、Fe-Pd合金の飽和磁化の値は、合金中のFe原子%に依存するといえる。

Fig. 7の I - H 曲線より、各組成の Fe-Pd 合金試料の保磁力のPd依存性を示した図を Fig. 8に示す。Fe-60.3at%Pd合金薄膜の保磁力が最も大きく、Fe-66.9at%Pd合金薄膜の保磁力が最も小さいことから、保磁力はPd成分に依存することを確認した。さらに Fig. 9に Fe-Pd合金の平衡状態に近い試料の格子定数と実測値との差 Δa と保磁力との関係を示す。図が示すように、薄膜試料と保磁力の間には、良い

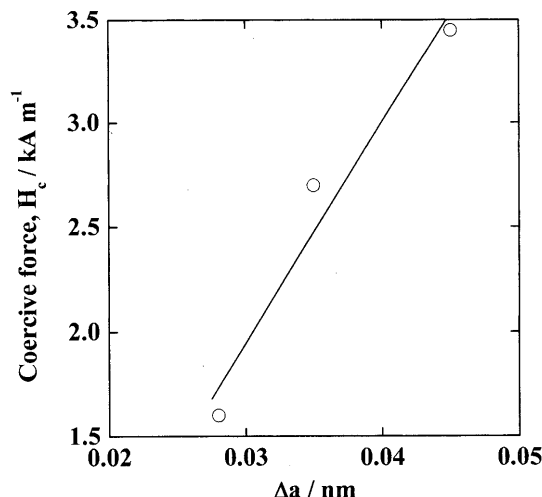


Fig. 9. Change in coercive force against difference in theoretical lattice parameter and measured lattice parameter of Fe-Pd films.

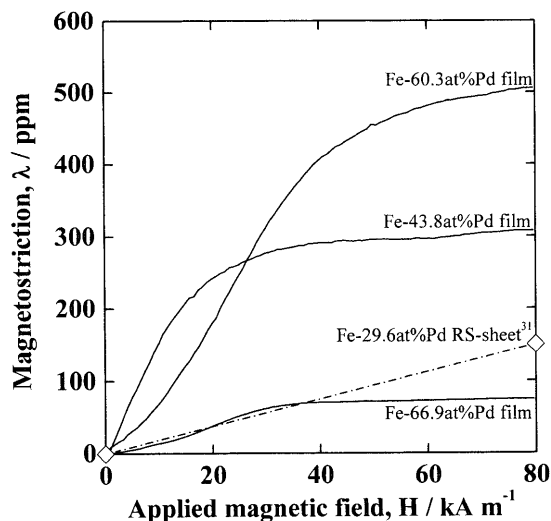


Fig. 10. Magnetostriction curves of Fe-Pd films and Fe-29.6at%Pd rapidly solidified sheet.³¹⁾

相関関係が見られることを確認した。

3.3 磁歪特性

Fig.10に、Fe-43.8at%Pd合金薄膜、Fe-60.3at%Pd合金薄膜、およびFe-66.9at%Pd合金薄膜の3種類の試料の面内方向への印加磁場 ($H_{//}$) と磁歪 ($\lambda_{//}$) の関係を Fe-29.6at%Pd液体急冷試料³¹⁾のデータと共に示す。ここで Fe-29.6at%Pd液体急冷試料の結果に関しては、印加磁場無し(地磁場)と印加磁場約 80 kA/mの結果のみを示す³¹⁾。Fe-29.6at%Pd液体急冷試料の磁歪に関しては、印加磁場が増えることによりさらに大きな磁歪が発現することが確認されている³¹⁾。一方、薄膜試料における面内方向の磁歪は、印加磁場約 ± 80 kA/mでほぼ飽和することから、非常に低磁場での磁場感度が高いことがわかる。さらに Fe-Pd合金の組成が変わることにより、磁歪が飽和するにいたる磁歪曲線はそれぞれ異なることを確認した。

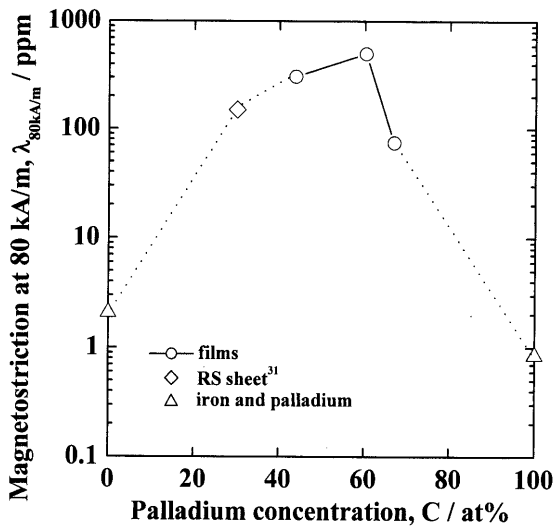


Fig. 11. Change in magnetostriction at 80 kA/m against palladium concentration of Fe-Pd films and Fe-29.6at%Pd rapidly solidified sheet³¹⁾ with calculated data of fcc-iron and pure palladium.

ここで印加磁場約+80kA/mで最も大きな磁歪を示した試料は、Fe-60.3at%Pd合金薄膜であり、その磁歪量は500ppmを超えている。次にFe-43.8at%Pd合金薄膜が300ppm程度の磁歪を示し、Fe-29.6at%Pd液体急冷試料が約150ppm³¹⁾、Fe-66.9at%Pd合金薄膜が80ppm程度の磁歪を示した。+80kA/mでの磁歪の結果に関するFe-Pd合金の組成依存性をFig.11に示す。図には純鉄と純パラジウム、さらに急凝固法により作製されたFe-29.6at%Pd合金シート³¹⁾の磁歪量も合わせて載せた。純鉄や純パラジウムの磁歪が0.8-2ppmと非常に小さいのに比べ、本研究で作製したFe-Pd合金試料の磁歪量が2桁以上大きく、Fe-60.3at%Pdで最大値を示すことを確認した。

4. 考察

Fig.12にFe-Pd合金の平衡状態に近い試料の格子定数と実測値との差 Δa と、印加磁場約+80kA/mでの磁歪量との関係を示す。図が示すように、Fe-Pd薄膜試料中の原子間距離が凝縮した長さ Δa と磁歪量との間には、良い相関関係があることがわかった。一般的に、磁歪材料にバイアス圧力を加え、圧縮応力を付加することにより磁歪特性を向上させることは、良く用いられている手法である^{9,32)}。Fig.12から、本研究で作製したFe-Pd合金薄膜の磁歪に関しては、成膜時に原子間距離が凝縮した長さ Δa が飽和磁歪量の大きさに寄与している可能性が高い。さらにFig.6により、 Δa はFe-Pd合金薄膜の組成に強く依存することがわかる。したがって、以上の考察により、Fe-Pd合金薄膜の磁歪量は組成に依存すると結論付けられる。

磁歪薄膜の応答性能を工学的に評価するための1つの重要な因子として、磁歪感受率 $(\Delta\lambda/\Delta H)$ がある。超磁歪材

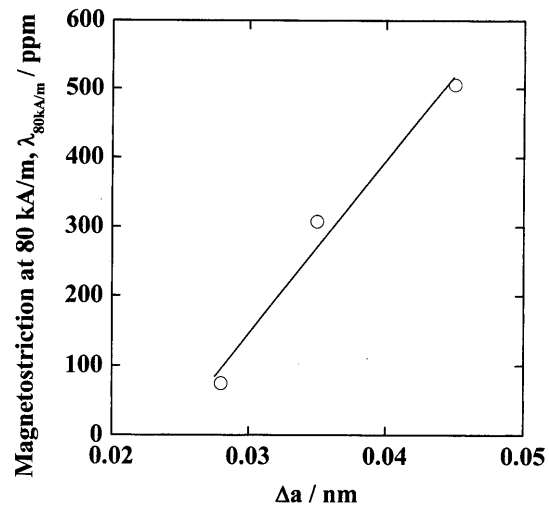


Fig. 12. Change in magnetostriction at 80 kA/m against difference in theoretical lattice parameter and measured lattice parameter of Fe-Pd films.

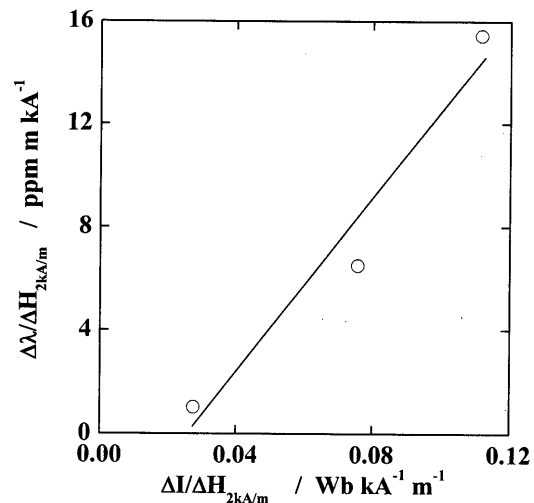


Fig. 13. Change in magnetostrictive susceptibility at 2 kA/m against magnetic susceptibility at 2 kA/m of Fe-Pd films.

料において高い感度を得るためには、高い磁歪感受率 $(\Delta\lambda/\Delta H)$ を示す材料開発を行う必要がある。Fig.10が示すように、磁歪が飽和するにいたる磁歪曲線はFe-Pd合金の組成が変わることにより、それぞれ異なっていることが示された。すなわち、磁歪感受率 $(\Delta\lambda/\Delta H)$ が異なることを示している。磁歪感受率は磁歪材料の磁場に対する感度を示している。したがって高い帯磁率を示す材料は高い磁歪感受率が観察される可能性が高いと予測できる。磁場による物質の磁化のされ方は一般的には帯磁率 (I/H) で示される。本研究では帯磁率を $\Delta I/\Delta H$ と定義する。そこで、Fe-Pd合金薄膜に対して印加磁場+2kA/mでの帯磁率 $(\Delta I/\Delta H)$ および磁歪感受率 $(\Delta\lambda/\Delta H)$ を算出した結果をFig.13に示す。図が示すように、帯磁率と磁歪感受率との間には良い相関関係があることが確認できた。以上の考察から、Fig.10の λ - H 曲線の立ち上がりの違い、すなわち磁歪感受

率の組成依存性の原因は、各組成のFe-Pd合金薄膜の帯磁率によるものであると結論付けられる。

5. 結言

マグネトロンスパッタリングにより作製した、組成の異なる3種類のFe-43.8at%Pd合金薄膜、Fe-60.3at%Pd合金薄膜、およびFe-66.9at%Pd合金薄膜は、fcc(111)面に強く配向した相とわずかなfcc相の2相が共存している結晶構造をもち、その格子定数は平衡状態に近い試料よりも小さく、成膜時に原子間距離が凝縮していることを示した。さらに薄膜試料中の原子間距離が凝縮した長さ Δa と保磁力との間には、良い相関関係が見られている。本研究で作製した3種類の組成の異なるFe-Pd合金薄膜の中で、原子間距離が凝縮した長さ Δa が最も大きなFe-60.3at%Pd合金薄膜は、3.45kA/mという大きな保磁力を示し、500ppmを超える大きな磁歪を示すことが確認できた。さらに Δa はFe-Pd合金薄膜の組成により変化することを確認し、Fe-Pd合金薄膜の磁歪量は組成に強く依存することを見出した。

さらに、リモート駆動素子としての実用上重要である磁歪薄膜の応答性能を評価するための因子である、磁歪感受率($\Delta\lambda/\Delta H$)の組成依存性の評価を行った。その結果、磁場による物質の磁化のされ方を示す帯磁率($\Delta I/\Delta H$)と磁歪感受率との間には良い相関関係があることを確認し、帯磁率はFe-Pdの組成に依存することを見出した。

以上の結果より、Fe-Pd合金薄膜の磁歪量および磁歪感受率は、Fe-Pd合金組成に強く依存することを本研究によって見出した。

本研究の遂行にあたり、マグネトロンスパッタリング装置の貸与をしていただきました、(株)鷺宮製作所金子俊夫氏、金崎文雄氏、スパッタ原料のパラジウムの貸与をしていただきました、田中貴金属工業(株)宝沢勝幸氏に感謝いたします。さらに研究の遂行にあたり多くのご協力をいただきました、東海大学小泉義晴教授、松村義人助教授に感謝いたします。

なお、本研究の一部は日本学術振興会からの科学研究費補助金(特別研究員奨励費:受付番号06659)によって実施いたしました。

文 献

- 1) R.Maeda, H.Takagi and S.Nakano: *Kougyouzairyou*, **41** (1993), 93.
- 2) A.E.Clark, R.Abbundi, O.D.McMasters and H.Savage: *Physica B*, **86-88**, (1975), 73.
- 3) K.Ullakko, J.K.Huang, V.V.Kokolin and R.C.O'Handley: *Scr. Mater.*, **36** (1998), 1133.
- 4) R.D.James and M.Wuttig: *Philos. Mag.*, **A77** (1998), 1273.
- 5) E.Quandt and K.Seemann: Proc. 5th Int. Conf. on New Actuators (ACTUATOR 96), ed. by H.Borgmann, AXON Technologie Consult GmbH, Bremen, (1996), 279.
- 6) M.Wada, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and H.Kaneko: *Thin Solid Films*, **281-282** (1996), 503.
- 7) R.D.James, R.Tickles and M.Wuttig: *Mater. Sci. Eng.*, **A273-275** (1999), 320.
- 8) K.Tsuchiya, A.Tsuzumi, T.Nojiri and M.Umemoto: Proc. 11th MAGDA Conf., ed. by K.Ishibashi, The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Tokyo, (2002), 140.
- 9) I.Nakano: *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, **60** (1994), 1711.
- 10) R.Kondo, H.Yabe, Y.Hiraiwa, H.Ishii, Y.Ozu, T.Matsumura, K.Oguri, M.Iwase, H-H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 4th Int. Conf. Intelligent Mater. (ICIM '98), ed. by T.Takagi *et al.*, Intelligent Materials Forum (The Society of Non-Traditional Technology), Tokyo, (1998), 104.
- 11) H.Yabe, R.Kondo, T.Toriyama, R.Fujii, K.Oguri, S.Uchida, H-H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 6th Japan Int. SAMPE Symp., Vol. 2, ed. by T.Tanimoto *et al.*, SAMPE Publishing, Covina, Calif., (1999), 1045.
- 12) H.Yabe, R.Kondo, K.Oguri, M.Iwase, T.Kaneko, T.Kuji, H-H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 44th SAMPE Symp., SAMPE Publishing, Covina, Calif., (1999), 2416.
- 13) H.Yabe, R.Fujii, K.Oguri, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 9th Symp. on Intelligent Materials, ed. by Intelligent Materials Forum (Society of Non-Traditional Technology), Tokyo, (2000), 26.
- 14) H.Yabe, R.Fujii, K.Oguri, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 7th Int. Conf. on New Actuators (ACTUATOR 2000), ed. by H. Borgmann, Messe Bremen GmbH, Bremen, (2000), 107.
- 15) H.Yabe, R.Fujii, K.Oguri, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and Y.Nishi: Proc. 10th Symp. on Intelligent Materials, ed. by Intelligent Materials Forum (Society of Non-Traditional Technology), Tokyo, (2001), 20.
- 16) H.Yabe, K.Oguri, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and Y.Nishi: *J. Adv. Sci.*, **12** (2000), 343.
- 17) H.Yabe, K.Oguri, H-H.Uchida, Y.Matsumura, H.Uchida and Y.Nishi: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **12** (2000), 67.
- 18) M.Wada, H.Uchida and H.Kaneko: *J. Alloy. Compd.*, **258** (1997), 143.
- 19) J.A.Thornton: *J. Vac. Sci. Technol.*, **11** (1974), 666.
- 20) J.A.Thornton: *J. Vac. Sci. Technol.*, **12** (1975), 830.
- 21) J.A.Thornton: *Thin Solid Films*, **40** (1977), 335.
- 22) H.Yabe and Y.Nishi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, in press.
- 23) A.C.Tam and H.Schroeder: *IEEE Trans. Mag.*, **25** (1989), 2629.
- 24) P.I.Williams, D.G.Load and P.J.Grundy: *J. Appl. Phys.*, **75** (1994), 5257.
- 25) A.C.Tam and H.Schroeder: *J. Appl. Phys.*, **64** (1988), 5422.
- 26) T.Kubota, T.Okazaki and Y.Furuya: *J. Jpn. Inst. Met.*, **65** (2001), 1053.
- 27) H.J.Goldschmidt: *Metallurgia*, **40** (1949), 103.
- 28) R.Hultgren and C.A.Zopffe: *Z. Kaist.*, **99** (1938), 511.
- 29) H.E.Swanson and E.Tatge: *NBS Circular 539*, **1** (1953), 21.
- 30) Z.Wang, T.Iijima, G.He, T.Takahashi and Y.Furuya: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **12** (2000), 61.
- 31) T.Furuya, N.W.Hagood, H.Kimura and T.Watanabe: *Mater. Trans. JIM*, **39** (1998), 1248.
- 32) J.C.Yan, X.Q.Xie, S.Q.Yang and S.Y.He: *J. Mag. Mag. Mater.*, **223** (2001), 27.