

Basic Investigation of Strain Sensing Using the Stress-Magneto-resistance Effect of NiFe Alloy Film

Y. Okada, M. Nishibu, K. Sakamoto, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura

Spin Device Technology Center, Faculty of Eng., Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano City, Nagano 380-8553, Japan

A new method of strain sensing using the stress-magneto-resistance (MR) effect was investigated. In this study, an Ni₈₇Fe₁₃ (at.%) alloy film with in negative magnetostriction and a magnetic MR effect was used for strain sensing. The resistance increased with increasing compressive stress and decreased with increasing tensile stress. A gas pressure sensor was demonstrated using the film.

Key words: strain sensor, magneto-resistance effect, magnetostriction, stress-magneto resistance effect, NiFe alloy film

NiFe 合金磁性膜を用いた応力磁気抵抗効果型歪センサの基礎検討

岡田勇輝・西部正規・阪本一樹・佐藤敏郎・山沢清人・三浦義正

信州大学工学部スピンドバイステクノロジーセンター, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

1. はじめに

歪ゲージには様々な種類があり, 外部応力による可逆的な変形で生じる抵抗変化を利用した金属抵抗線型歪ゲージ, 応力印加によるバンドギャップの変化を利用した半導体歪ゲージ, 応力-磁歪効果を利用した磁気インピーダンス効果 (SI 効果) 型歪ゲージ¹⁾ 等がある. しかしながら, 金属歪ゲージは低コストであるものの感度が低い, 半導体歪ゲージは高感度であるものの温度特性が悪い, SI 効果型歪ゲージは超高感度であるものの高周波電流を通電するために周辺回路がやや複雑になるなどの欠点がある.

本研究は, 低コストで高感度, 温度特性に優れた新しい歪ゲージを開発することを目的として, 逆磁歪効果²⁾と磁気抵抗効果³⁾を併用する応力磁気抵抗効果⁴⁾を利用した歪ゲージの基礎検討を行ったものである.

Fig. 1 に, 負磁歪を持つ場合の応力磁気抵抗効果の原理を模式的に示す. 応力印加に伴う逆磁歪効果によって, 磁気モーメントの向きが変化する. このとき, 外部から供給する電流密度ベクトルと磁気モーメントのなす角が変化すれば, 異方性磁気抵抗効果によって電気抵抗が変化することになる. 筆者らは, 上記の原理で外部応力によって電気抵抗が変化する現象を「応力磁気抵抗効果」と呼んでいる.

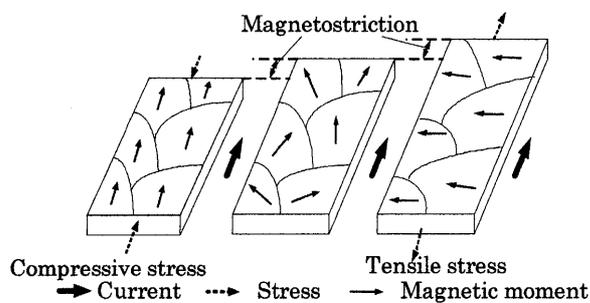


Fig. 1 Stress-magneto-resistance effect in the case of negative magnetostriction.

本研究で提案した手法では, 金属磁性膜を用いた磁気利用センシングという点で従来の半導体歪ゲージに比べて温度特性に優れるといった特徴を有するが, 一方, 外部磁界は応力センシングの外乱となる. この点は従来の磁気インピーダンス効果を利用した歪ゲージと何ら違いはなく, 磁気を利用した力学量センシングに共通の課題である. 外乱磁界を抑制するには, 磁気シールドなどの手法が必要になるものと考えられる.

本論文では, 逆磁歪効果と異方性磁気抵抗効果の関係を単磁区モデルを用いて記述するとともに, 磁歪と磁気抵抗効果を両立する材料として負磁歪 Ni₈₇Fe₁₃ (at.%) 薄膜を選定し, その基礎特性を示すとともに, 気体圧力センシングの基礎実験を行った結果を報告する.

2. 単磁区モデルを用いた応力磁気抵抗効果の解析

2.1 単磁区モデル

ここでは, 磁壁の効果や磁気異方性分散などの影響を排除し, 単純な単磁区モデルを対象にして, 応力磁気抵抗効果の振る舞いを議論する. Fig. 2 に解析に用いた単磁区モデルを示す. 解析に当たっては, 次の諸条件を仮定した.

(1) 磁性体は一軸磁気異方性エネルギー K_u を有し, 磁化容易軸と x 軸のなす角を ϕ とする.

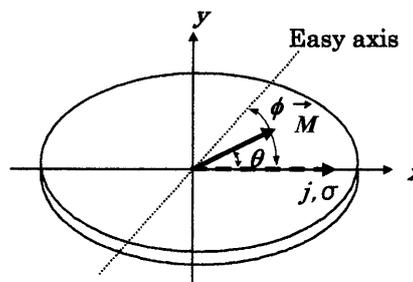


Fig. 2 Single-domain model of the stress-magneto-resistance effect.

- (2) ϕ の範囲を $0 \leq \phi \leq \pi/2$ とする.
- (3) 外部磁界を 0 とし, ゼーマンエネルギーを考慮しない.
- (4) x 軸方向に応力を加えるものとし, x の正の方向を引張り応力 $\sigma (> 0)$, 負の方向を圧縮応力 $\sigma (< 0)$ と定める.
- (5) 磁化ベクトル M と x 軸のなす角を θ とする.
- (6) x 軸方向に電流密度ベクトル J を与える.

2.2 外部応力印加による磁気モーメントの回転

応力印加時の磁性体内のエネルギーを考える. 2.1 項で示した単磁区モデルによる解析の諸条件によれば, 磁性体の全エネルギー E は, 異方性エネルギー E_a ⁵⁾ と磁気弾性エネルギー E_σ ⁶⁾ の和として表現できる.

$$E = E_a + E_\sigma \tag{1}$$

ただし,

$$E_a = K_u \sin^2(\theta - \phi) \tag{2}$$

$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \theta \tag{3}$$

である. (1)~(3)式から次式を得る.

$$E = K_u \left\{ \sin^2(\theta - \phi) - F \cos^2 \theta \right\}, \quad F = \frac{3\lambda_s \sigma}{2K_u} \tag{4}$$

ここで, λ_s は磁歪定数, K_u は一軸異方性定数である. (4) 式中のパラメータ F は, 磁気弾性エネルギーと異方性エネルギーの比を表すものであり, 両者の大小関係に依存するとともに, 磁歪定数の正負によって符号が変化する. λ_s と K_u をともに材料定数とみなせば, F は応力 σ に比例するものとして扱うことができる. $K_u > 0$ とすれば, F の符号は磁歪の正負と応力の正負で決定され,

- 磁歪が正の場合 ($\lambda_s > 0$)
- $F > 0 : \sigma > 0, F < 0 : \sigma < 0$
- 磁歪が負の場合 ($\lambda_s < 0$)
- $F < 0 : \sigma > 0, F > 0 : \sigma < 0$

となる.

Fig. 3 は, 磁歪定数を負 ($\lambda_s < 0$), 磁化容易軸方位 ϕ を $\pi/4$ と仮定した場合の磁気モーメント方位 θ と全エネルギー E の関係を F をパラメータにして計算したものである. $F < 0$ は引張り応力印加, $F > 0$ は圧縮応力印加を意味する. 同図の縦軸は全エネルギー E を異方性定数 K_u で規格化した E/K_u で表示してある. 図中の○印は全エネルギー E が最小となる磁気モーメント方位を示しており, 当然の帰結として, 外部応力の印加によって磁気モーメントはエネルギー最小となる方位に回転する.

エネルギー最小となる磁気モーメント方位 θ_0 は(4)式から以下のように与えられる.

$$\tan \theta_0 = \frac{\sin 2\phi}{\cos 2\phi + F} \tag{5}$$

Fig. 3 は負磁歪を仮定して計算しているのので, 引張り応力を印加した場合 ($\sigma > 0, F < 0$), 磁気モーメントはもとの磁化容易軸方位である $\pi/4$ から応力印加方向と直交する $\pi/2$ 方向に回転する. 圧縮応力を印加した場合 ($\sigma < 0, F > 0$),

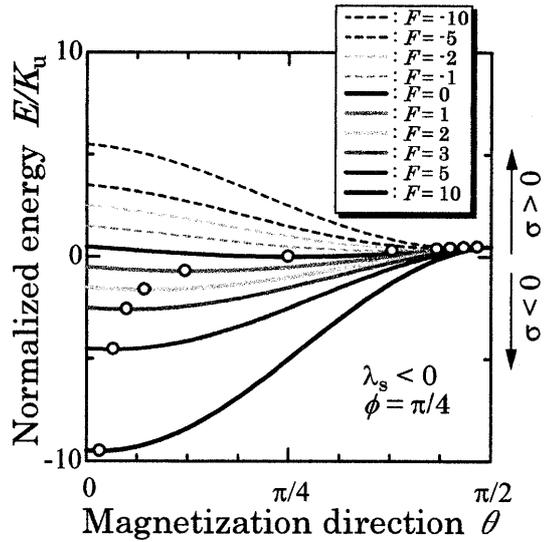


Fig. 3 Relation between the normalized energy and the magnetization direction θ . Easy magnetization axis: $\phi = \pi/4$.

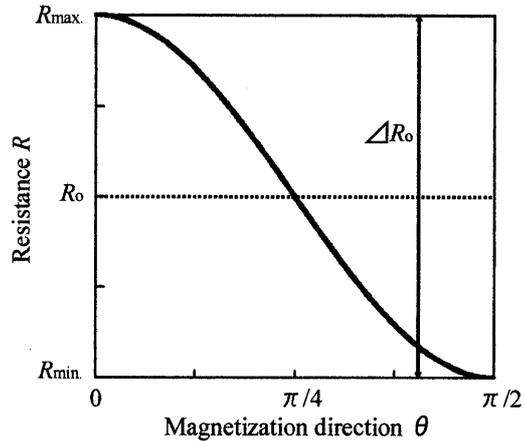


Fig.4 Relation between the resistance and the magnetization direction.

磁気モーメントは応力印加方向に回転することになる. したがって, 外部応力によって, 磁気モーメントは $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で回転する.

2.3 異方性磁気抵抗効果

Fig. 2 の単磁区モデルにおいて, x 方向に直流電流 I を流すものと仮定する. この時, 電流密度ベクトルと磁気モーメントのなす角 θ によって電気抵抗が変化する異方性磁気抵抗効果が現れる. 本論文では, 異方性磁気抵抗効果を以下に示す実験式で表現した⁷⁾.

$$R = R_0(1 + MR \cos 2\theta) \tag{6}$$

ただし,

$$R_0 = (R_{\max} + R_{\min})/2, MR = \Delta R/R_0$$

である. Fig. 4 に電流密度ベクトルを基準とした磁気モーメントの方位 θ と抵抗 R の関係を示す. 実験式として(6)式を採用した理由は, (5)式から定まる応力印加時の磁気モーメ

ントの最小エネルギー方位 θ_0 を用いて応力磁気抵抗効果を解析的に表現できるからである。

2.4 応力磁気抵抗効果

(5), (6)式を用いて応力と抵抗の関係を整理すると, 応力磁気抵抗効果を次式で表すことができる。

$$R = R_0 \left\{ 1 + MR \frac{\cos 2\phi + F}{\sqrt{(\cos 2\phi + F)^2 + \sin^2 2\phi}} \right\} \quad (7)$$

Fig. 5 に, $\phi = 0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2$ の場合の抵抗 R と F の関係を示す。同図において, 負磁歪材料の場合は $F < 0$ が引張り応力印加時, $F > 0$ が圧縮応力印加時にそれぞれ相当する。一方, 正磁歪材料の場合は $F > 0$ が引張り応力印加時, $F < 0$ が圧縮応力印加時にそれぞれ相当する。

後述するように, 本研究では負磁歪 $\text{Ni}_{87}\text{Fe}_{13}$ (at.%) 薄膜を用いているので, ここでは, $\lambda_s < 0$ の場合について抵抗 R と応力の σ の関係を議論する。

最初に, 応力印加前のもの磁化容易軸方位 ϕ が 0 の場合を考える。磁化方位が $\theta = 0$ の方位に揃っているため, $F > 0$ となる圧縮応力を加えても磁気モーメントの回転は起こらず抵抗 R は変化しない。 $F < 0$ である引張り応力に対しては, $F = -1$ を境に抵抗 R が不連続的に変化する。 $F = -1$ では全エネルギーが最小点を持たない(等方性)ため, 磁気モーメントの方位は一意に定まらない。 $F < -1$ となる引張り応力が印加されると磁化が $\theta = \pi/2$ の方位に揃う。このため, $F = -1$ となる臨界引張り応力を境に抵抗 R がスイッチング的に変化するようになる。

$\phi = \pi/2$ の場合, 応力印加前は磁気モーメントが $\pi/2$ 方位に揃っているため, $F < 0$ である引張り応力に対して磁化回転が起きず, 抵抗 R は変化しない。 $F > 0$ である圧縮応力に対しては, $F = 1$ となるときにエネルギーが等方的になり, それ以上の圧縮応力で磁化が $\theta = 0$ の方位に揃う。以上の $\phi = 0, \pi/2$ の場合は, $F = \pm 1$ となる臨界応力で抵抗 R がスイッチ的に変化する。このような現象の一つの応用として, 構造材料の破断応力を上記の臨界応力に一致させて使用する破断検出センサなどが考えられる。

Fig. 5 から明らかなように, 応力印加前の磁化容易軸方位が $0 < \phi < \pi/2$ にある場合, $F > 0$ である圧縮応力に対して抵抗 R は増大し, $F < 0$ である引張り応力に対して抵抗 R は減少することになる。特に, $\phi = \pi/4$ とした場合, 抵抗 R は外部応力 σ に対して奇関数の関係があり, $F = 0$ ($\sigma = 0$) 付近の線形性も良好で傾きも最も大きい。 $\phi = \pi/4$ の場合の抵抗 R を $F = 0$ の点で直線近似すると次式が得られる。

$$R = R_0 + (R_0 MR) F \quad (8)$$

$F = (2\lambda_s / 3K_u) \sigma$ の関係を用いれば,

$$R = R_0 + (R_0 MR_\sigma) \sigma \quad (9)$$

となる。ただし,

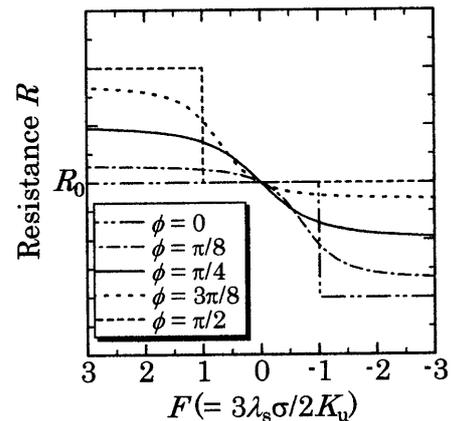


Fig. 5 Relation between the resistance R and the parameter F .

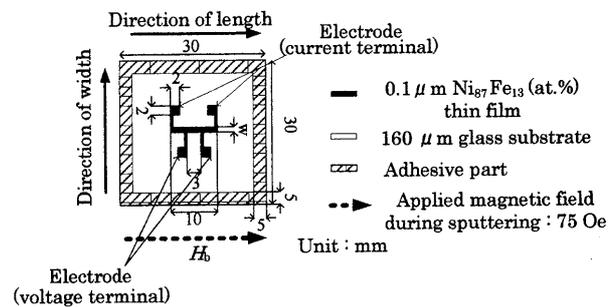


Fig. 6 NiFe sample under test.

Table 1 Sputtering conditions for the NiFe film.

Target	$\text{Ni}_{87}\text{Fe}_{13}$ (at.%)
Base pressure	$< 6 \times 10^{-4}$ Pa
Ar pressure	0.7 Pa
r.f. power	500 W
Applied magnetic field	Longitudinal direction of sample

$$MR_\sigma = \frac{2MR\lambda_s}{3K_u} \quad (10)$$

であり, MR_σ を応力磁気抵抗変化率と呼ぶことにする。抵抗 R の応力 σ に対する感度は $R_0 MR_\sigma$ となり, MR と磁歪定数 λ_s が大きく, 異方性定数 K_u が小さいほど高感度になることを示している。 $\phi = \pi/4$ の場合の抵抗 R は $|\sigma| < 0.48 K_u / \lambda_s$ の範囲で 3 % 以内の直線性を有することがわかっており, MR_σ を大きく設定することで微小応力に対して直線性良く高感度な応力検出が可能になるものと考えられる。

3. 実験方法

3.1 デバイスの試作方法

本研究では, 適度な磁歪と磁気抵抗効果を併せ持つ材料として $\text{Ni}_{87}\text{Fe}_{13}$ (at.%) 合金³⁾ を選択した。 $\text{Ni}_{87}\text{Fe}_{13}$ (at.%) 合金は負磁歪組成であり, 磁歪定数は -10 ppm である⁸⁾。

Fig. 6 に試作した NiFe 薄膜の形状と寸法を示す。マグネトロンスパッタ法により 30 mm 角, 厚さ 160 μm のカバーガラス上に厚さ 0.1 μm で NiFe 膜を磁界中成膜した。成膜中の印加磁界 H_b は 75 Oe である。成膜条件を Table 1 に示

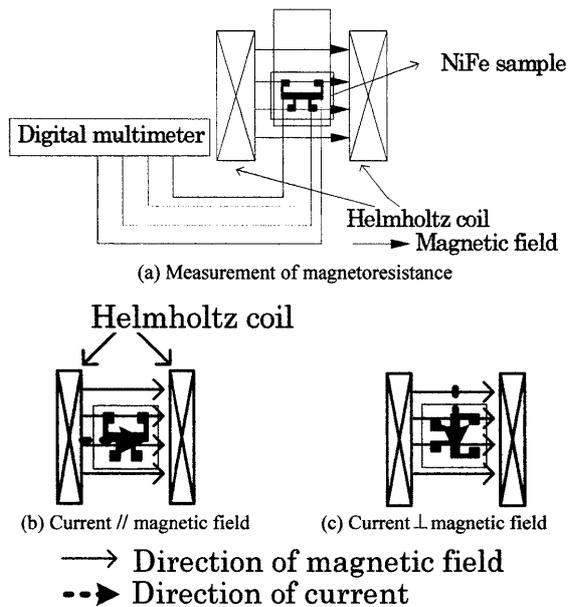


Fig. 7 Magnetoresistance measurement for the NiFe film.

す。NiFe 成膜後に、王水によるウェットエッチングを用いて、成膜時の磁界印加方向が NiFe 薄膜長手方向となるように Fig. 6 に示す形状に加工した。試料の電気抵抗は図中に示す 2 mm 角パッドを用いて四端子法で測定した。今回の試作では、四端子測定に利用するための引き出しリードも NiFe で構成している。電気抵抗を測定する試料領域の長さを 3 mm として、幅 1 mm, 2 mm の 2 種類を作製した。

3.2 測定方法

3.2.1 静磁化曲線と磁気抵抗効果

NiFe 薄膜の静磁化曲線は振動試料型磁力計（以下、VSM と記述）（理研電子株式会社製；BHV-55）を用い、薄膜の長手方向、幅方向について測定した。

NiFe 薄膜の磁気抵抗効果の測定法を Fig. 7 に示す。ヘルムホルツコイルを用いて直流磁界を印加し、デジタルマルチメータ（株式会社アドバンテスト製；R6781）を用いた四端子法で電気抵抗を測定した。Fig. 7 に示すように、測定電流と印加磁界方向が平行となる場合と、測定電流と印加磁界方向が直交する場合の二通りの条件で測定を行っている。測定電流は 10 mA である。

3.2.2 気体圧力センシング

応力磁気抵抗効果を測定するには、試料に引張り応力や圧縮応力を直接印加することが必要であるが、現時点では、これらの実験のセットアップが困難であり、これに替わる方法として、気体圧力を用いて試料に応力を与える方法を採用した。なお、この方法は応力磁気抵抗効果の気体圧力センシングの具体的な応用に繋がるものと言える。

Fig. 8 に、NiFe 膜試料を用いて構成した気体圧力センシングの方法を模式的に示す。2 枚の亚克力板を O リングを介して共締めし、気密封止した空間に NiFe 膜試料を接着する。上下の亚克力板にはガス導入用の孔が空けられて

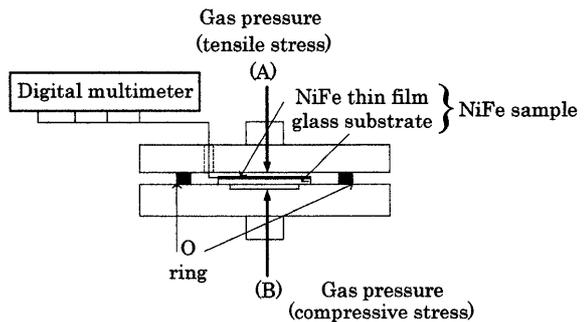


Fig. 8 Experimental set-up of gas-pressure sensing.

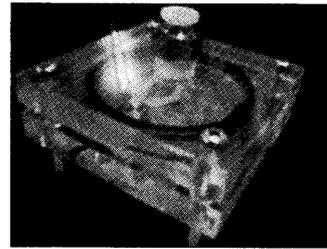


Fig. 9 Gas-pressure sensing apparatus using an NiFe sample.

おり、ここから所定の圧力の Ar ガスを導入することで、試料に応力を与える。Fig. 8 中の (A) の方向から NiFe 薄膜側に Ar ガスを導入した場合、基板全体が下に凸の形に反る。一方、Fig. 8 中の (B) 方向からカバーガラス側にガスを印加した場合、基板全体が上に凸に反る。したがって、Ar ガスの導入方向によって引張り、圧縮の両方の応力を NiFe 膜試料に加えることができる。Ar ガス圧力 P は、レギュレータで調整し、最大印加圧力を 40 kPa とした。

Fig. 9 に測定装置の概観写真を示す。

4. 実験結果

4.1 NiFe 膜の基礎特性

Fig. 10, 11 に、幅 $w = 1, 2$ mm の NiFe 薄膜の静磁化曲線を示す。これらの図では、試料の長手方向、幅方向の 2 方向で測定した磁化曲線を示している。Fig. 10 より、 $w = 1$ mm の NiFe 薄膜は長手方向に磁化容易軸が誘導されていることが確認できる。 $w = 2$ mm の場合は、保磁力が小さく、長手方向と幅方向の磁化曲線の差も小さい。NiFe 膜試料の磁気異方性は、成膜時の磁界印加による誘導磁気異方性だけでなく、試料寸法による形状磁気異方性、膜内部応力による応力誘起磁気異方性によって決定されるものと考えられるが、Fig. 10 や 11 のみではどれが支配的かは判別が困難である。しかしながら、2 mm 幅試料の場合、長手方向と幅方向の磁化曲線の差が小さくなっているため、形状異方性の効果が無視できず、2 mm 幅試料の磁化容易軸は長手方向から傾いているものと推定される。

Fig. 12, 13 に、幅 $w = 1, 2$ mm の NiFe 薄膜の磁気抵抗効果の測定結果を示す。図では、印加磁界 0 の場合の抵抗値を基準にした抵抗の変化率で示している。Fig. 13 において、

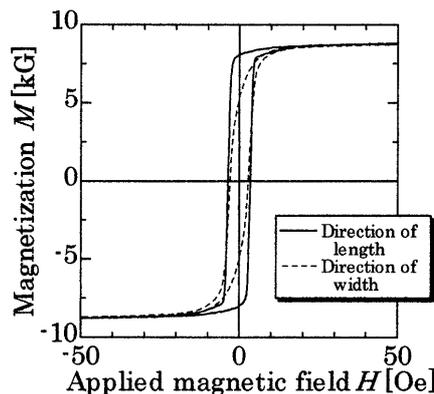


Fig. 10 Magnetization curves of a 1-mm-wide NiFe film.

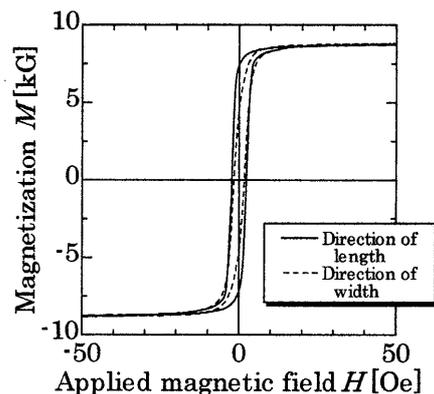


Fig. 11 Magnetization curves of a 2-mm-wide NiFe film.

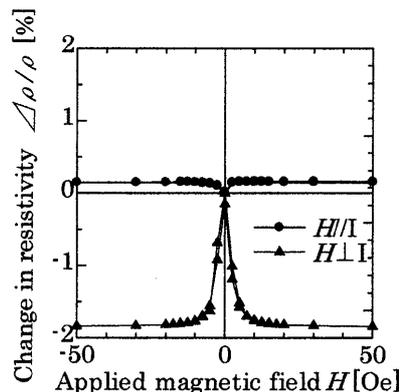


Fig. 12 Magneto-resistance effect of a 1-mm-wide NiFe film.

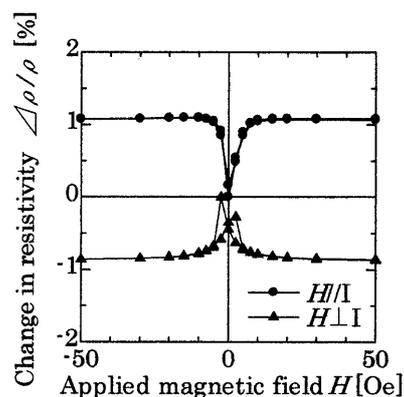


Fig. 13 Magneto-resistance effect of a 2-mm-wide NiFe film.

電流と直交方向に $\pm 500\text{Oe}$ の範囲で磁界を掃引して抵抗を測定した場合に、2箇所抵抗の異なるピークが現われている。測定誤差が主因と思われるが、はっきりとした原因は、現在のところ、明確ではない。

Fig. 12, 13から明らかのように、いずれの膜幅 w の場合も、電流と平行方向に磁界を印加した場合に抵抗が増加し、電流と直交方向に磁界を印加した場合に抵抗が減少している。 $w = 1\text{ mm}$ のNiFe薄膜は電流と直交方向に磁界印加した場合の抵抗変化が大きいのに対して、電流と平行方向に磁界印加した場合の抵抗変化は僅かであった。これは、膜幅の狭い 1 mm 幅試料の磁化容易軸がほぼ試料の長手方向にあるためであり、これと同じ方向に磁界印加してももはや磁気モーメントの回転は僅かであり、抵抗の変化も小さい。前述したように、膜幅の広い 2 mm 幅試料では、磁化容易軸が試料長手方向から傾いているものと考えられ、電流と平行方向、直交方向どちらに磁界を印加しても1%前後の抵抗変化が得られた。

4.2 気体圧力センシングの測定結果

Fig. 14, 15に、 $w = 1, 2\text{ mm}$ のNiFe薄膜試料を用いて行ったArガス圧力センシングの実験結果を示す。これらの図では、Ar圧力が0の場合の抵抗値を基準として抵抗の変化率で表している。Fig. 14, 15でデータが欠落しているように見えるのは、 1 kPa 以下の低いArガス圧力では、参照データとして用いたガス圧力計の測定分解能以下であるため

に、データが取得できなかったことが理由である。

Fig. 14で示した 1 mm 幅NiFe薄膜を用いた場合、圧縮応力となる負のArガス圧力範囲では抵抗は圧力にほぼ無関係であると言える。 $0 \sim -10\text{ kPa}$ の圧力範囲において、測定値のばらつきが大きい。これは、 $\pm 1\text{ kPa}$ の圧力範囲において抵抗変化が急峻であることと、参照測定に用いたガス圧力計の測定誤差によるものと考えている。一方、引張り応力となる正のArガス圧力に対して抵抗は大幅に減少する。これは、 1 mm 幅試料の場合、磁気モーメントが概ね長手方向に揃っており、圧縮応力印加に対しては磁気モーメントの回転がほとんど起こらないのに対し、引張り応力に対しては磁気モーメントが膜幅方向に回転することで大きな抵抗変化を示したものと考えられる。

Fig. 15で示した 2 mm 幅試料では、正負のいずれのArガス圧力に対しても抵抗が変化しており、定性的には、前述したNiFe膜の磁化容易軸の長手方向からの傾きに対応しているものと考えられる。

Fig. 14, 15の実験結果を定性的に考察するために、単磁区モデルを用いた応力磁気抵抗効果の計算結果と比較した。もとより、単磁区モデルによる解析は磁壁の効果や異方性分散の影響を排除しているため、実験結果を定量的に説明できるものではないが、おおよその振る舞いを議論することは可能であると考えられる。

Fig. 16に、単磁区モデルを用いて計算した抵抗と応力の

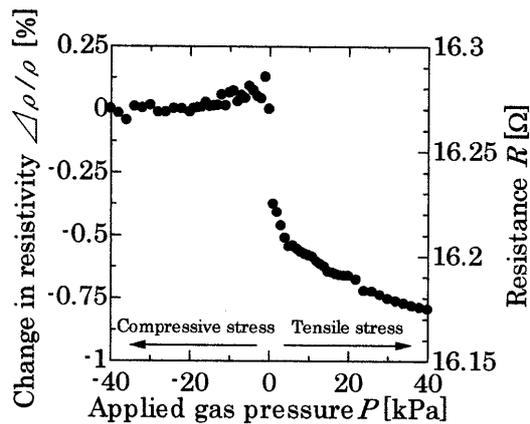


Fig. 14 Relation between the Ar gas pressure and the magneto resistance of a 1-mm-wide NiFe film.

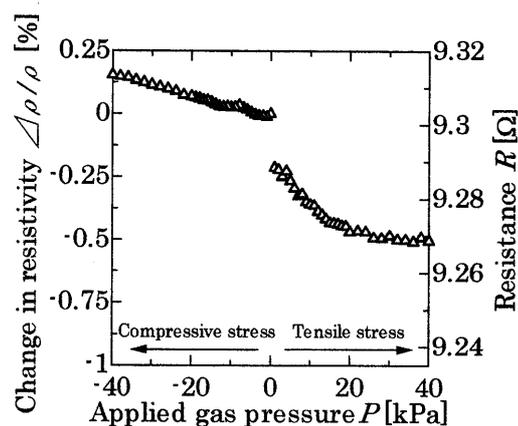


Fig. 15 Relation between the Ar gas pressure and the magneto resistance of a 2-mm-wide NiFe film.

関係を示す。同図には、磁化容易軸として $\phi = 0, 10, 30, 45$ deg.の4通りの場合を示した。気体圧力センシングの実験で得られた1 mm幅 NiFe 薄膜の測定結果 (Fig.14 参照) と比較すると、抵抗の変化は $\phi = 10$ deg.とした場合の計算結果と概ね一致している。2 mm幅試料の実験結果 (Fig.15 参照) は $\phi = 30$ deg.とした場合の計算結果と概ね一致している。しかしながら、Fig.16 の計算結果と Fig.14, 15 の実験結果を詳細に比較すると、Ar ガス圧力に対する抵抗の変化が横方向にシフトしていることがわかる。これは、気体センシング実験に供する際の試料の接着応力によるプリストレスが原因になっているものと推定しているが、現在のところ、詳細な理由は明確でなく、今後の課題である。

5. まとめ

応力磁気抵抗効果型歪センサの基礎検討を行い、単磁区モデルによる応力センシングに関する考察と負磁歪 Ni₈₇Fe₁₃ (at.%) を用いた気体圧力センシングの基礎実験を行った結果を述べた。以下に得られた結果を要約して示す。

- (1) 一軸異方性エネルギーならびに磁気弾性エネルギーを考慮した単磁区モデルと異方性磁気抵抗効果の実験式を用いて、応力磁気抵抗効果の解析を行った。磁化容易軸を $\pi/4$ 方向にすることで、正負の微小外部応力に対して線形的に応力センシングできる可能性を示した。
- (2) 磁化容易軸方位の異なる2種類の負磁歪 NiFe 膜を製作し、磁気抵抗効果の測定を行うとともに、気体圧力センシングの基礎実験を行った。その結果、電流方向 (試料長手方向) に対する磁化容易軸の傾き角に応じて抵抗変化が異なることが示され、単磁区モデルによる予測と定性的に一致することが明らかになった。

前述のように、磁性体の磁化容易軸方位を $\pi/4$ とすることによって高感度で線形性の良好な応力センシングが可能になると予測されるが、現状ではそれに至っていない。今後は、NiFe 膜を用いた応力磁気抵抗効果型歪センサの改良

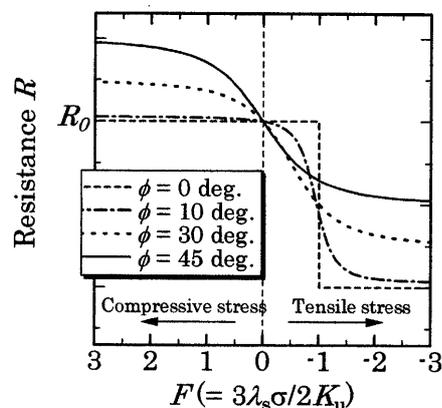


Fig. 16 Calculation result for the stress-magnetoresistance effect obtained by using a single-domain model.

を行う予定である。また、スピバルブ GMR やトンネル MR 効果の利用によって、超高感度歪ゲージの実現も期待される。

References

- 1) Y. Naruse, L.P. Shen, E. Kita, D. Kusumoto, K. Mohri, and T. Uchiyama: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 4-2, pp.1449-1452 (1992).
- 2) S. Chikazumi, K. Ohta, K. Adachi, N. Tuya, and Y. Ishikawa: *Jiseitai Handbook* (in Japanese), p. 832 (Asakura Shoten, Tokyo, 1975).
- 3) K. Kakuno: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 1, pp.5-12 (2002).
- 4) M. Nishibu, Y. Okada, K. Sakamoto, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura: *The 2006 Annual meeting record, IEE Jpn., MAG-02-139*, pp.155-156 (Yokohama, 2006).
- 5) S. Chikazumi, K. Ohta, K. Adachi, N. Tuya, and Y. Ishikawa: *Jiseitai Handbook* (in Japanese), p. 845 (Asakura Shoten, Tokyo, 1975).
- 6) S. Chikazumi, K. Ohta, K. Adachi, N. Tuya, and Y. Ishikawa: *Jiseitai Handbook* (in Japanese), p. 179 (Asakura Shoten, Tokyo, 1975).
- 7) K. Mohri: *Jiki Sensor Rikougaku*, Corona Publishing Co., (1975).
- 8) Richard M. Bozorth: *FERRROMAGNETISM*, Bell Telephone Laboratories, Inc (1951)

2006年11月22日受理, 2007年5月16日採録