

## Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜の磁気抵抗効果

佐藤匡朗\*<sup>1</sup> 小川 卓\*<sup>1</sup> 小泉義晴\*<sup>2</sup>

### Magnetoresistance of Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Laminated Films

by

Kunio Sato\*<sup>1</sup>, Takashi Ogawa\*<sup>1</sup> and Yoshiharu Koizumi\*<sup>2</sup>

(Received on March 31, 2005 & accepted on May 20, 2005)

#### Abstract

The magnetoresistance of the spin tunneling junction of Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> laminated films has been studied using polycrystal Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> films. An Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> film of base substrates was prepared by the low-temperature solid-phase reaction of a Fe thin film produced by vacuum evaporation. Although the magnetic resistance ratio of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> film of the cloth was 1% or less, in the Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> laminated film, a maximum value of about 5.3% was obtained. The base substrate material in the solid-phase reaction produced the interval from 5K/min to 30K/min with respect to the rising gradient of the firing temperature.

**Keywords:** magnetic thin film, spin tunnel, magnetoresistance, spin electronics, magnetic device

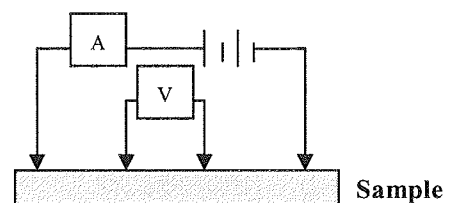
#### 1.はじめに

マグネタイト(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)の電気的磁気的性質については古くから多くの研究がなされてきた<sup>1)3)</sup>。近年、巨大磁気抵抗(GMR)効果に係わる一連の研究において、スピネル型フェライトの中にあつて Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>は唯一、半金属的性質(電気伝導度  $2.5 \times 10^2$  S/m; 移動度  $1 \times 10^5$  m<sup>2</sup>/V·s, 室温)と大きな磁気分極(80±5%)を有することから、GMR 材料として注目されている<sup>4)</sup>。また、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の磁気抵抗(MR)効果は単結晶に比べ多結晶膜の方が顕著に現れることが知られており、結晶粒界が MR 効果に関与していると考えられる。このことから Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>結晶粒界中に常磁性物質 Pt を注入し Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Pt/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>系スピネル依存トンネル(TMR)効果が調べられており<sup>5)</sup>、この系の磁気抵抗効果の発現機構は粒界制御型のグラニュー膜<sup>6)</sup>と類似していることが明らかにされている。

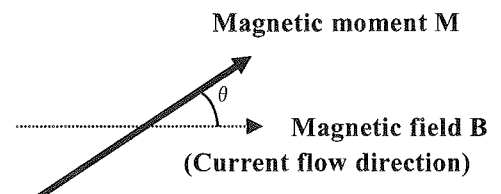
一方、磁性酸化物と強磁性金属とのヘテロ接合の場合、フェルミ面で酸化物の磁気分極率は 100%であることから、スピネルに係わる巨大磁気抵抗効果が期待される。このスピネルに依存するトンネル磁気抵抗(TMR)効果は磁性体の磁気分極率で決まる<sup>7)</sup>。そこで、本研究は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>層と Co 層の間に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>によるトンネル障壁を設けた Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜(ヘテロ接合膜)のスピントンネル効果について調べることを目的とした。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>単結晶膜と FeCo 膜の間に AlO<sub>x</sub>膜のトンネル障壁を設けた磁気デバイスにおいて、スピントンネルを反映した顕著な TMR 効果の発現について報告があるが<sup>8)</sup>、本実験では Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜の生成には、Fe 薄膜の低温固相反応により作製した多結晶薄膜を用いた。

#### 2.MR 効果とスピン TMR 効果の理論的検討

(i)MR 効果: Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>ヘテロ接合のスピン TMR 効果を調べるには、母材に Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜を用いているので、その MR 効果について検討しておく必要がある。Fig.1(a)のように四端子法により測定試料に電流 J を流す。初期条件として、Fig.1(b)のように磁性薄膜試料の平均化された磁気モーメント M と J とのな



(a) Principle of fore-terminal probe method.



(b) M vs B on sample surface.

Fig.1 Principle of MR measurement.

\* 1 東海大学大学院工学研究科応用理学専攻院生  
\* 2 東海大学電子情報学部エレクトロニクス学科教授

す角度を  $\theta$  とする。この状態で、 $J$  と平行に磁場  $B$  を作用し、 $B$  値を増加して  $M$  を  $B$  の作用方向へ回転させ  $J \parallel M \parallel B$  なる条件を満たすものとする。これらの条件の下での MR 比は

$$\left[ \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right]_{\theta} = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)} \cos^2 \theta \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $\rho(0), \rho(H)$  は磁場の作用がないときとあるときの抵抗率である。この形式から磁気抵抗は磁場の増加とともに増大することが分かる。

(ii) スピン TMR 効果：スピン TMR 効果では、強磁性体の電子構造が直接伝導現象に反映する。Fig.2 は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Co 対の強磁性層を電極として、薄い絶縁体層で隔てられたヘテロ接合磁性積層膜の電子状態密度とスピン依存トンネル現象の模式図を示したものである。強磁性層 I と II のスピンの向きが同じ向きのバンド

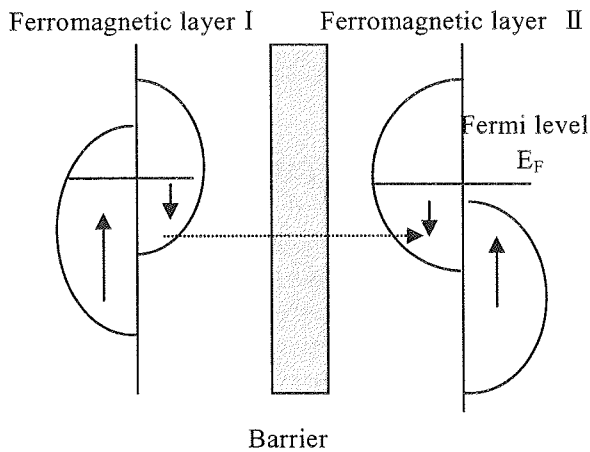


Fig.2 Illustration of spin tunneling for ferromagnetic layer I (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) to ferromagnetic layer II (Co).

間ではスピンの依存して電子の受諾が許されトンネリングが起きる。スピンの向きが互いに反対向きのバンド間ではスピンフロップ散乱が大きくトンネリング確率は極めて低いと考えられる<sup>9)</sup>。

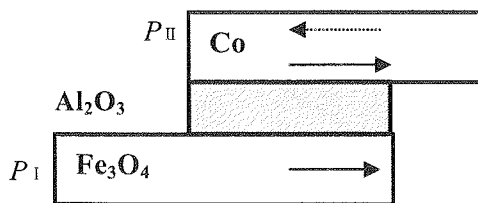


Fig.3 Illustration of hetero-junction and spin configurations for ferromagnetic layer (I) / non-magnetic layer / ferromagnetic layer (II)

ここで Fig.3 のヘテロ接合モデルにより、強磁性層 I と II のスピン分極の割合をそれぞれ  $P_I$  と  $P_{II}$  とし、電流の流れる方向と作用磁場を平行に設定し、試料を磁化方向の矢印の向きにとると、スピン依存トンネル磁気抵抗効果(TMR)の抵抗比は次式で定義される<sup>8)</sup>。

$$\frac{\rho_{\uparrow\downarrow} - \rho_{\uparrow\uparrow}}{\rho_{\uparrow\uparrow}} = \frac{2P_I P_{II}}{1 - P_I P_{II}} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{\uparrow\downarrow}, \rho_{\uparrow\uparrow}$  は両磁性層の磁化が反平行のときと、平行のときのトンネル抵抗である。 $P_I, P_{II}$  は強磁性層 I と II のスピン分極率であり、 $\uparrow$  向きと  $\downarrow$  向きのスピンバンド電子数を  $n_{\uparrow}$  および  $n_{\downarrow}$  とすると

$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}} \quad (3)$$

で与えられる。したがって、スピン分極率  $P$  が 100% に近い大きな強磁性体では超巨大磁気抵抗効果の発現が期待される。本実験に用いる Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> と Co の磁気分極率  $P$  は単体では  $80 \pm 5\%$  と  $34\%$  であるので、式(1)から TMR 比は約 74.7% と見積もられる。実際、ヘテロ接合状態ではフェルミ面での分極率は非常に大きく巨大磁気抵抗比が期待できる。

### 3.実験方法

(a) 試料作製：測定試料は Fig.4 のダイアグラムに示す通り低温固相反応法により作製した。まず、Fe(99.99%)塊状を蒸発源として電子ビーム蒸着法により耐熱性ガラス(CONING705#)基板上に蒸着した。蒸着時の真空度は  $2 \times 10^{-6}$  Torr 以下とし、膜堆積速度を 0.2nm/s、膜厚 100nm を標準とした。この膜厚は Fe 膜を酸化すると膨張し、膜厚が増大することを予測したものである。Fe 蒸着膜は大気中 673K で 90min 加熱酸化して  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜とした。この場合、固相反応法による酸化膜結晶は加熱の昇温勾配に強く左右されるため、毎分当たりの昇温勾配を (a)5K/min, (b)10K/min, (c)15K/min, (d)20K/min, (e)25K/min, (f)30K/min について実験を行なった。

次に、昇温勾配をパラメータとして作製した  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜に対して組成比で Fe12.5% を真空蒸着し、真空中 ( $2 \times 10^{-6}$  Torr) 673K で 180min 熱処理し還元することにより Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜を得た。作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜の膜厚は  $275 \pm 10$  nm であった。作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜を母材に、Fig.3 の原理図のトンネル障壁として Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を蒸発物として Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜 (1nm) を形成した。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜は緻密性を考慮して膜堆積速度を 0.02nm/s(室温)で成膜した。

最後に、金属磁性層として Co を堆積速度 0.2nm/s(室温)で膜厚 50nm 蒸着した。以下、作製した試料の呼び名は上記の加熱酸化温度の昇温勾配の記号(a)~(f)とする。

(b) 試料の測定・評価：膜の堆積速度は水晶振動子型膜厚モニターを用いて制御した。固相反応過程の温度制御はコンピュータで行なった。作製した膜厚は表面段差計で測定した。各試料の結晶構造は X 線回折(XRD)測定し、JCPDS-ICDD と照合して確認した。試料の表面状態は走査型電子顕微鏡(SEM)像の観察を行なった。試料の磁気特性には振動試料形磁力計(VSM)、電

気伝導特性および磁気抵抗(MR)効果の測定は直流四端子法を用いて、供給電流 0.5mA および印加磁場±3kOeで行なった。

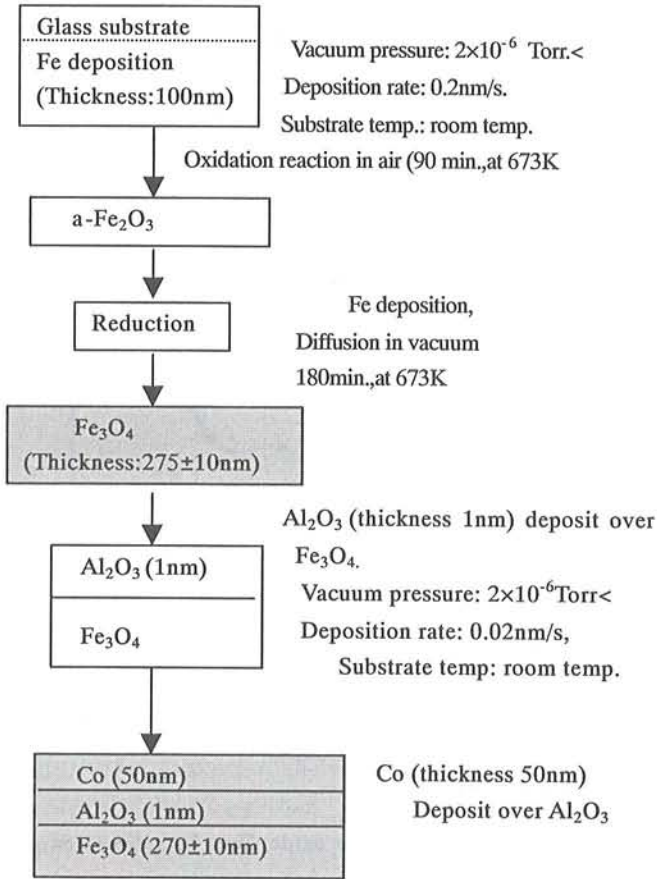


Fig.4 Schematic illustration of the sample preparation procedure.

#### 4.測定結果および考察

##### 4.1 膜結晶と表面状態

母材試料となる Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜生成に向けて、Fe 薄膜の低温固相反応による生成酸化膜の結晶状態を調べるため XRD 測定を行なった。Fig.5 は Fig.4 で示した初期加熱酸化の昇温勾配をパラメータとする最終酸化膜の XRD 測定を示したものである。図は昇温勾配が(a)5K/min, (b)10K/min, (c)15K/min, (d)20K/min, (e)25K/min, (f)30K/min の場合の XRD プロファイルであり、いずれも Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> からの回折線を示しており、本実験の範囲内ではその他の生成酸化物からの回折線は認められなかった。

次に、XRD 測定で Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜の生成が確認できたので、膜表面状態の昇温勾配への依存性を調べるため、SEM 像観察を行なった。Fig.6 は上述の XRD 測定に用いた試料の SEM 像である。昇温勾配が Fig.6(a)のような緩やかな場合、膜表面は微結晶粒が緻

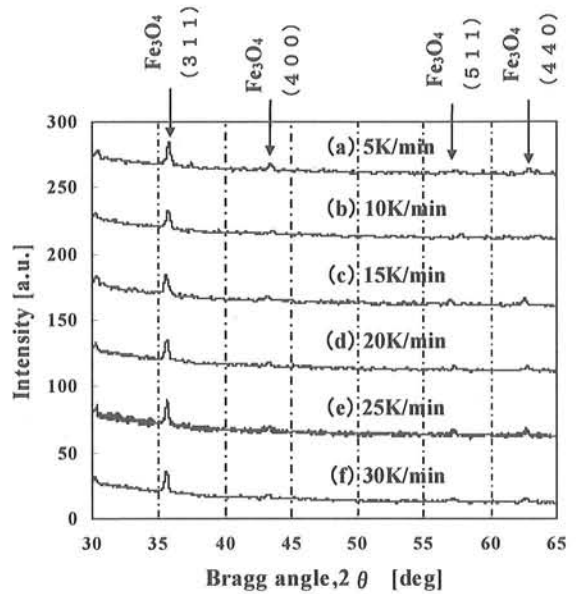


Fig.5 X-ray diffraction profiles of Fe-oxide films by solid reaction as a function of up-temperature gradients to time.

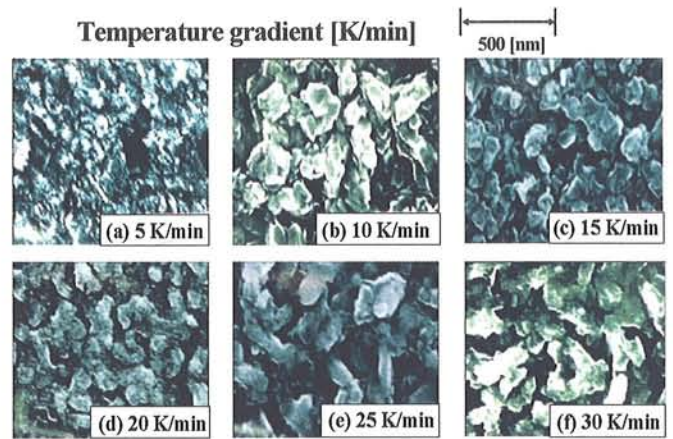


Fig.6 SEM images of Fe-oxide films by solid reaction as a function of up-temperature gradients to time.

密に集合し平坦である。Fig.6(b), (c), (d)のように昇温勾配の増加とともに結晶粒は増大傾向にある。また、結晶粒も昇温勾配の増加にともない明瞭となる。この粒界制御はスピントンネル障壁の意味から重要と考えられる。昇温勾配が急激な Fig.6(e), (f)では結晶粒形が不揃いで、膜表面状態も粗状であり、結晶粒は幅広で非常に乱れた状態になっているものと推察される。これら膜の形成状態は、電氣的磁氣的特性に強く影響するものと予測される。

##### 4.2 生成酸化膜の磁化特性

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜を母材とする積層膜の磁気抵抗効果を求めるには母材の生成酸化膜の磁気特性を明らかにしておかなければならない。そこで、生成した Fe 酸化膜の磁化ヒステリシス測定の結果を Fig.7 に示す。これより算出した飽和磁化と固相反応における加熱温度の昇温勾配との関係を Fig.8 に表した。昇温勾配が

(b)から(e)の場合、飽和磁化  $M_s$  はほぼ  $275 \leq M_s \leq 380 \text{ emu/cm}^3$  の範囲にある。また、XRD および SEM 像観察でみた試料(a), (b) について、試料(a)では非磁性酸化物の生成が推測されることから  $I_s$  は小さくなっている。膜状態が乱雑であった試料(f)の場合、結晶粒界の幅が大きく、膜全体として  $I_s$  の平均値を小さくしているものと考えられる。しかし、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>バルクの  $I_s$  は室温で約

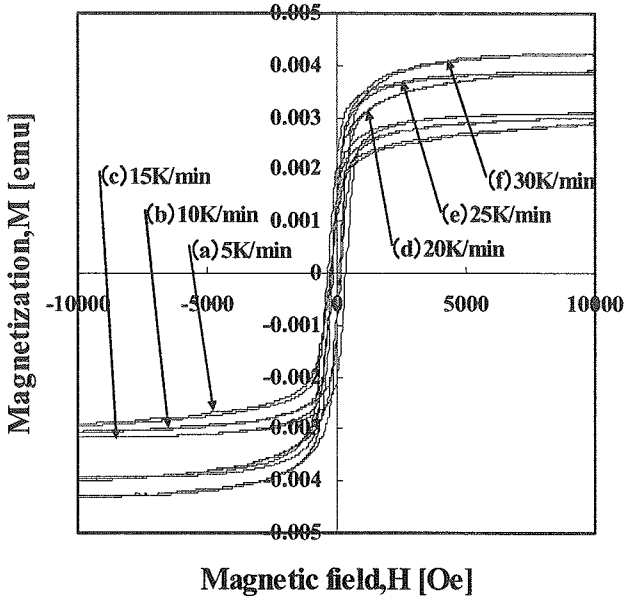


Fig.7 Magnetization hysteresis loops of Fe-oxidefilms by solid reaction as a function up-temperature gradient to time.

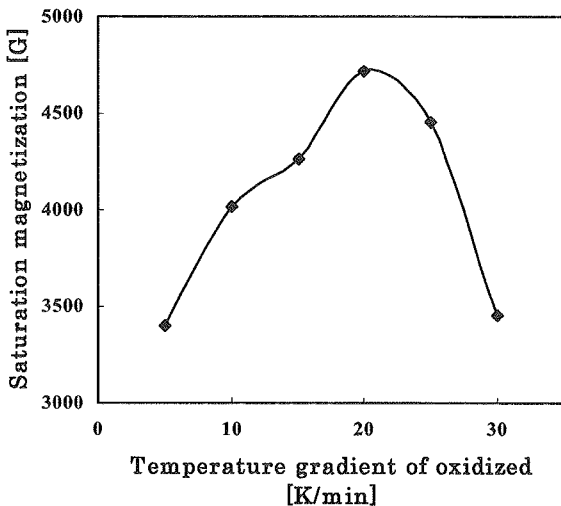


Fig.8 Saturation magnetization properties of the samples (a) to (f).

5KGであることから、本実験で作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜には、XRD 測定では現れていない非磁性の生成酸化物が、結晶粒界などに介

在していると考えられる。

### 4.3 生成酸化膜の電気伝導特性

母材試料の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜の電氣的磁氣的特性を明確にしておくことは、本題の MR 特性を評価するのに重要であると考えられる。そこで、まず、生成酸化膜の抵抗率に対する Fe 膜の加熱温度の昇温勾配との関係について調べた。Fig.9 は上述の生成試料(a)から(f)までの抵抗率を室温で測定したものである。測定には

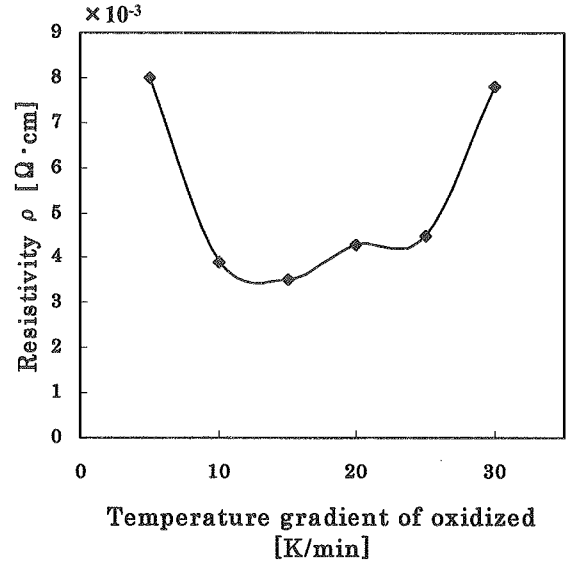


Fig.9 Electric resistivity of Fe oxide films by solid reaction as a function of up-temperature gradient to time.

直流四端子法を用い、投入電流は 0.5mA 一定とした。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>バルクの抵抗率は約  $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  であることから、本実験で作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜試料(b)から(e)の抵抗率はバルクの値にはほぼ一致している。ここで、先述の飽和磁化では膜結晶の粒界に非磁性酸化物が生成しているものと考察したので、粒界の電気抵抗が考えられるが、粒界障壁が非常に薄い場合、ホッピング確率は大きいので、電気伝導への影響は小さい。しかし、昇温勾配 5K/min と 30K/min の場合の抵抗率が高いことについて次のように考察される。両者は XRD 測定では Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜が生成されているが、SEM 像観察では膜状態が著しく異なっている。5K/min の場合、膜表面は緻密構造になっているが、昇温勾配が比較的緩やかであるため、XRD 測定には現れていない結晶粒界に  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  などの酸化物を多く生成し、抵抗を大きくさせていると推察される。また、30K/min の場合、生成酸化膜は非常に大きな結晶粒が形成されており、粒界幅も広く煩雑な構造になっているため、粒界でのホッピング確率は低下すると考えられる。

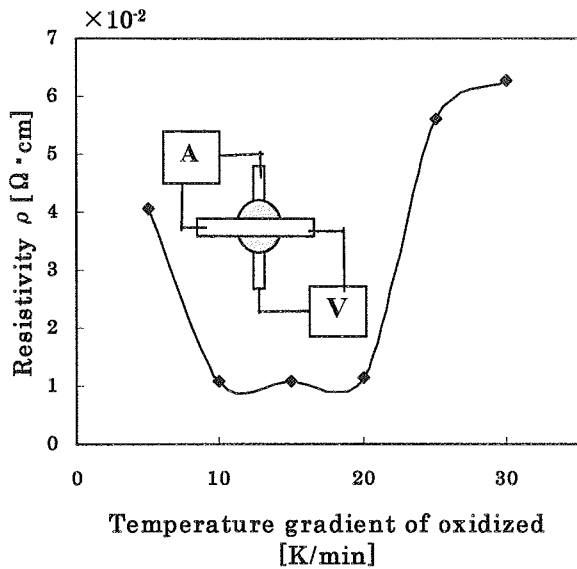


Fig.10 Electric resistivity of Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> films by solid reaction as a function of up-temperature gradient to time. The insertion figure is four-terminal probe of the cross type.

次に作用磁場がない場合、Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜の室温における伝導特性を調べるため、抵抗率の測定を行った。測定には直流十字形四端子法を用い、投入電流は 0.5mA 一定とした。Fig.10 は生成試料(a)から(f)までを母材とした積層膜の、作用磁場 H=0 での抵抗率を測定したものである。全体の傾向は母材の特性とよく対応している。ただし、抵抗率の値は母材に比べて約 1 桁大きくなっている。これは、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 絶縁層(トンネル障壁)の影響によるものと考えられる。

#### 4.4 磁気抵抗効果

Fig.11 は固相反応法で作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜試料((a)~(f); ■印)とそれを母材とした Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜(●印)の MR 比 (Δρ/ρ<sub>0</sub>)の測定結果を示したものである。ただし、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜の MR 測定は Fig.1(a)で示した直流四端子法を用い、投入電流は 0.5mA 一定とし電流方向に印加磁場±3kOe/5min で掃引した。積層膜については直流十字形四端子法を用い、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜の場合と同じ条件で測定した。まず、母材の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜の MR 効果について考察する。試料(b)から(e)の MR 比の値は 1.4%と 1.5%の範囲にある。試料(a), (f)は先の膜状態を反映して、低いものになっている。グラニュー型スピン分極モデルでの MR 比はスピン分極率 P に依存し、飽和磁化の状態では Δρ/ρ<sub>0</sub>=P<sup>2</sup>/(1+P<sup>2</sup>)と与えられることから<sup>7)</sup>。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>膜の MR 比は約 40%と見込まれる。しかし、本実験での値は計算値と 1 桁以上の差異がある。このことは、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 酸化物伝導機構はスモールポーラロンのホッピングであり<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>、伝導担体の結晶粒界の乱れや不純物による散乱、結晶粒内の格子欠陥および格子振動などの損失によるものと考えられる。

次に、Co(50nm)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1nm)/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(270nm)標準とするヘテロ接合積層膜の磁気抵抗効果について考察する。この系での磁気

抵抗効果は先述の理論的考察で述べたスピン TMR 効果に基づくものである。試料(a), (b)による MR 比は低い値を示している。これは Fig.6 の SEM 像観察で試料(a), (b)の最表面には、XRD 測定に現れない Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 以外の酸化膜が生成されており、スピントネリングを妨げていると考えられる。試料(c), (d)の MR 比の値は 5~5.3%であり本実験では最も大きな値を示している。これは Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>層と Co層の平行スピンバンド間でスピンに依存するトンネリングが実現しているものと考えられる。しかし、試料(e), (f)では減少傾向を示している。これは、SEM 像観察で見られるように昇温勾配が 25K/min 以上大きくなると、母材の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜表面モロロジーが粗くなる傾向にあり、その表面上に形成されるトンネル障壁に欠陥を生じ、磁性層の間に短絡路をもったスピン TMR 効果が失われるためと考えられる。

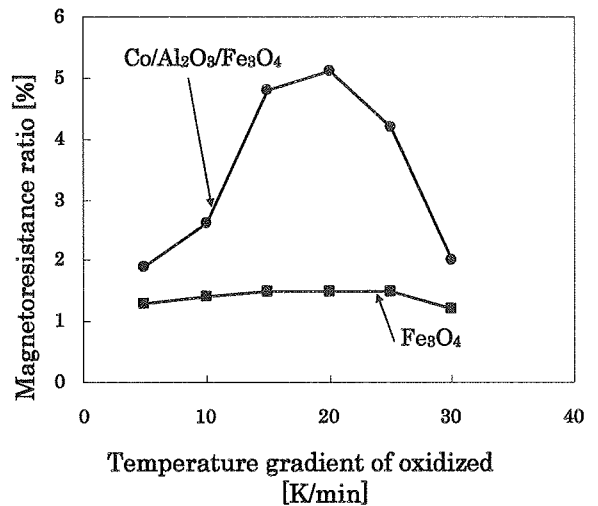


Fig.11 Spin-TMR and MR effect of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> film and Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> film as a function of up-temperature gradient of oxidation ,at room temperature.

#### 5.まとめ

Fe 薄膜の低温固相反応により Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜を作製した。低温固相反応は熱酸化温度の昇温勾配をパラメータとして実験を行った。作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜を母材として、L-ガン電子ビーム真空蒸着法を用いて Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜を形成した。得られた Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜および Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜の電気的磁気的特性を明らかにし、スピントネル磁気抵抗効果について調べた。その結果、次のことが分かった。

1. Fe 薄膜の低温固相反応法は XRD 測定の範囲内ですべて Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の生成が確認された。それらの飽和磁化は 275 ≤ M<sub>s</sub> ≤ 380emu/cm<sup>3</sup>を得た。
2. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の電気伝導度は、固相反応法による昇温勾配に強く依存する。これは粒サイズや粒界形成の状態に影響するためである。

3. 母材の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜の電気伝導度は、固相反応法による昇温勾配に強く依存する。これは電気伝導機構がスモールポーラロンのホッピングによることから結晶粒や粒界形成の状態に影響することによると考えられる。
4. 母材の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 薄膜単体の磁気抵抗効果は理論値に比べ非常に低いものとなった。このことの原因は伝導過程での散乱などの損失によるものと考えられる。
5. Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜の比抵抗値は母材に比べ約 1 桁大きな値であった。これは Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> トンネル障壁の介在によるためである。
6. Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 積層膜における磁気抵抗効果は、加熱温度の昇温勾配 20K/min の時に最大値約 5.3% の値 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 単層膜の約 3.4 倍) が得られた。これはスピンの依存するトンネル磁気抵抗効果によるものと考えられる。

以上、本実験で作製した Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ヘテロ接合積層膜の磁気抵抗効果の実験値は理論値に比べ 1 桁以上低い。これは母材試料の表面モロロジーおよびそれにかかわる接合界面の不完全性などが問題であると考えられるため、今後の課題として界面形成とスピントンネル磁気抵抗効果について検討したい。

## 文 献

- 1) 星野勝美, 今川尊雄, 重松恵嗣, 上田和浩, 平野辰巳: 日本応用磁気学会誌, 24, 311 (2003).
- 2) S.F.Alvarado, M.Erbudak, and P.Munz: *Phy.Rev.*, B-14, 2740 (1976).
- 3) A.Yanase and K.Siratori: *J. Phys. Soc. Jpn.*, 53, 312 (1984).  
I.V.Shvets, R.Wiesendanger, D.Burgler, G.Tarrach, H.J.Guntherodt and J.M.D.Coey: *J.Appl.Phys.*, 71, 5489 (1992).
- 4) 安達和正, 沖村浩史, 小泉義晴: 日本応用磁気学会誌, 23, 1201 (1999).
- 5) H.Fujimori, S.Mitani, S.Ohnuma: *Mater. Sci. Eng.*, B-31, 219 (1995).  
井上順一郎: 日本応用磁気学会誌, 22, 158 (1998).
- 6) H.Matsuda, M.Takeuchi, H.Adachi, M.Hiramoto, N.Matsukawa, A.Odagawa, K.Setsune and H.Sakakima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, L387 (2002).
- 7) J.A.Appelbaum: *Phys. Rev.*, 154, 633 (1967).
- 8) W.Brenig, G.H.Dohler and H.Heyszenau: *Philos. Mag.* 27, 1093 (1973).
- 9) D.Ihle: *Z.Phys.B Condensed Matter* 58, 91 (1985).