

# 垂直通電スピバルブ型 ナノコンタクト磁気抵抗効果膜

Nanocontact Magnetoresistance Film with Current-Perpendicular-to-Plane Spin-Valve Structure for Ultrahigh-Density Magnetic Recording

福家 ひろみ      橋本 進      岩崎 仁志

■ FUKU Hiromi      ■ HASHIMOTO Susumu      ■ IWASAKI Hitoshi

2 T(テラ:  $10^{12}$ ) ビット/ $\text{in}^2$  級の高記録密度HDD(ハードディスク装置)を実現するためには、現行のトンネル型磁気抵抗(MR: Magnetoresistance)再生ヘッドを超える、低い抵抗で高感度(大きなMR変化率)の再生ヘッドが不可欠である。この要求に応えるブレークスルー技術として、東芝は、トンネル型再生ヘッドに匹敵する100%以上のMR変化率が期待できる、2枚の強磁性体に挟まれた絶縁層に強磁性金属のナノコンタクト部を埋め込んだ新しい原理のMR効果に着目し、研究開発を推進している。

今回、ナノコンタクト部の高純度化に成功し、再生ヘッドとして搭載可能な垂直通電スピバルブ構造で、世界で初めて<sup>(注1)</sup> 20%のMR変化率を実現した。

A magnetic read head with high sensitivity at a low resistance-area (RA) product beyond that of current tunnel magnetoresistance (TMR) read heads is necessary in order to realize high-area-density recording of 2 Tbit/ $\text{in}^2$ .

In response to this situation, Toshiba has developed a ferromagnetic nanocontact MR read element that is based on a new principle of MR effect and is expected to exhibit an MR ratio of more than 100% comparable to TMR read heads highly-pure. We have successfully achieved a nanocontact MR ratio of 20% for a current-perpendicular-to-plane (CPP) spin-valve structure with ferromagnetic nanocontacts.

## 1 まえがき

HDDの記録密度は、一時の年率100%よりは鈍化したものの、依然として年率30~40%の高率で確実に向上を続けており、2014年には、2.4 Tビット/ $\text{in}^2$ のHDDの実現が予測されている。そのためには、高記録密度化により縮小された微小ビットからの微弱な信号磁界を読み取れる感度の高い再生ヘッドが必要となる。更に、高記録密度化により再生ヘッドのサイズも縮小するので、高速応答性を確保するために、再生ヘッドの面積抵抗(RA)の低減も要求される。

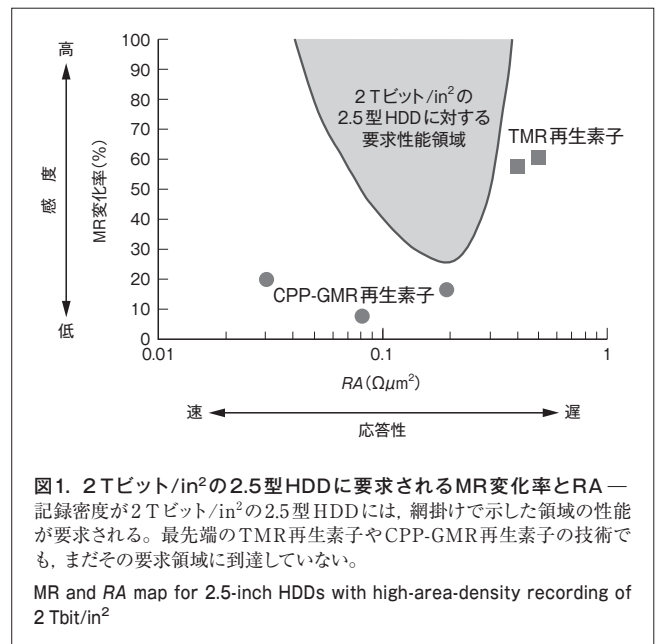
そこで、東芝は、高感度で高速応答性を満たす新しい再生ヘッド用磁気抵抗(MR: Magnetoresistance)効果技術として、垂直通電スピバルブ型ナノコンタクトMR効果膜を提案し、開発を進めている。ここでは、この技術の開発に至った背景、開発した膜の特性、及び再生ヘッドへの搭載の可能性について述べる。

## 2 垂直通電スピバルブ型ナノコンタクトMR効果

### 2.1 競合技術

再生素子のスピバルブ構造は、フリー層、中間層、第1ピン層、磁気結合層、第2ピン層、及び第2ピン層の磁化を固定する反強磁性層という数nmの膜が積層されたものである<sup>(1)</sup>。

(注1) 2009年5月時点、当社調べ。



ディスク磁界に応じたフリー層の磁化回転により発生する抵抗変化で、再生信号を検出する。このため、高感度ヘッドには大きなMR変化率が必要となる。

記録密度が2 Tビット/ $\text{in}^2$ の2.5型HDDに要求される性能のシミュレーション値を図1に示す。縦軸がMR変化率、横軸がRAで、図中央の網掛け領域が要求性能である。現在、量産されている再生ヘッドには、電子のトンネル現象を利用した

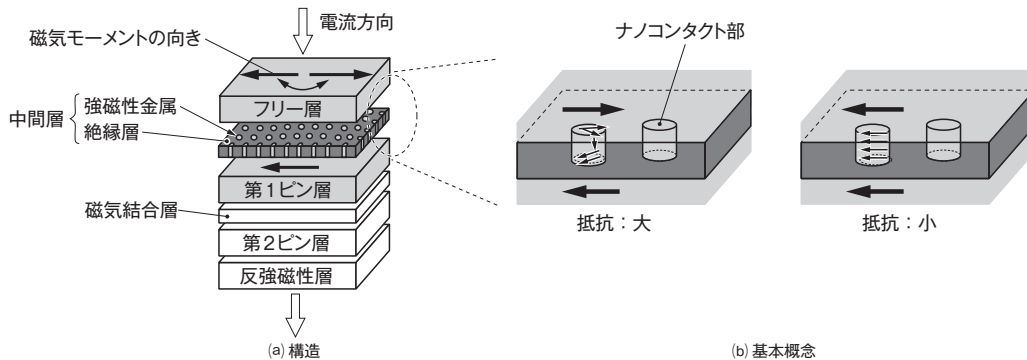


図2. ナノコンタクトMR再生素子の構造と基本概念 — 絶縁層をAlの酸化物 ( $Al_2O_3$ ) とし、その中に強磁性金属を形成している。その結果、ピン層とフリー層の磁化が平行のときには、強磁性金属には磁壁が生じないため抵抗は小さいが、反平行状態のときには磁壁が生じ抵抗は大きくなる。

Structure of nanocontact MR read element and its basic concept

TMR (Tunnel MR) 再生素子が用いられている。TMR再生素子は、スピンバルブ構造の中間層が絶縁体で構成されている。図1中に■で示した特性が、競合するTMR再生素子の最先端特性である<sup>(2), (3)</sup>。TMR再生素子は高いMR変化率を示す高感度素子ではあるが、絶縁中間層を挟んでいるので、高速応答性を確保するための低RA化が困難である。また、競合するCPP (Current-Perpendicular-to-Plane)-GMR (Giant MR) 再生素子は、中間層が非磁性体のCu (銅) であり金属伝導なので低RA化が容易だが、MR変化率の増大が課題である (図1の●)<sup>(4), (5), (6)</sup>。

### 2.2 ナノコンタクトMR効果の基本概念

図1からわかるように、2 Tビット級の記録密度を実現する技術として、TMR再生素子の低RA化、CPP-GMR再生素子の高MR変化率化の二つのアプローチが考えられるが、当社は、それらのアプローチとは異なる第3の再生素子として、図2(a)に示すような膜構造を持つナノコンタクトMR再生素子の研究開発も進めている<sup>(7)</sup>。

ナノコンタクトMR効果は、1999年にスペインのGarciaらにより発見され、強磁性体であるニッケル (Ni) の細線どうしを接触させたポイントコンタクトで、200%という非常に大きなMR変化率が観測された<sup>(8)</sup>。その後、当社は、文部科学省のIT21プロジェクトにより、薄膜の平面構造で140%のMR変化率を観測した<sup>(9)</sup>。この新しいMR効果の原理は、ナノコンタクト部に生じる磁壁でのスピン依存散乱によると考えられている<sup>(10)</sup>。

当社開発のナノコンタクトMR再生素子は、強磁性体の第1ピン層とフリー層に挟まれた絶縁層中に強磁性金属から成るナノコンタクト部を複数埋め込んだ構造をしている。ナノコンタクトMR再生素子では、ナノコンタクト部が強磁性体で形成されているため、第1ピン層とフリー層の磁化方向が反平行関係となったときに、図2(b)に示すように、この部分に磁化のねじれ構造 (磁壁) が形成され、抵抗が大となる。ナノコンタクトMR効果は、この磁化のねじれ変化が急激であるほど、高い

MR変化率を示すことが、実験的にも示されている<sup>(9)</sup>。その急激なねじれ変化はナノコンタクト部のサイズを極小化することで実現できる。

HDDの高記録密度化に伴って、再生ヘッドの素子サイズは小さくなる傾向にある。各素子サイズに対して要求されるナノコンタクト部の径を図3に示す。ナノコンタクト部の数が素子中10個の場合と20個の場合について、占有率を3.5%一定として計算しているが、素子サイズが小さくなるに従い、ナノコンタクト部の径も小さくする必要があることがわかる。記録密度が2 Tビット/ $in^2$ では、要求されるナノコンタクト部の径は約1 nmである。このトレンドは高いナノコンタクトMR変化率が得られる方向と合致する。

更に、ナノコンタクトMR効果は、金属伝導であるため低RA化も可能な技術である。つまり、ナノコンタクトMR再生素子は、まさに2 Tビット級に適した技術と言える。

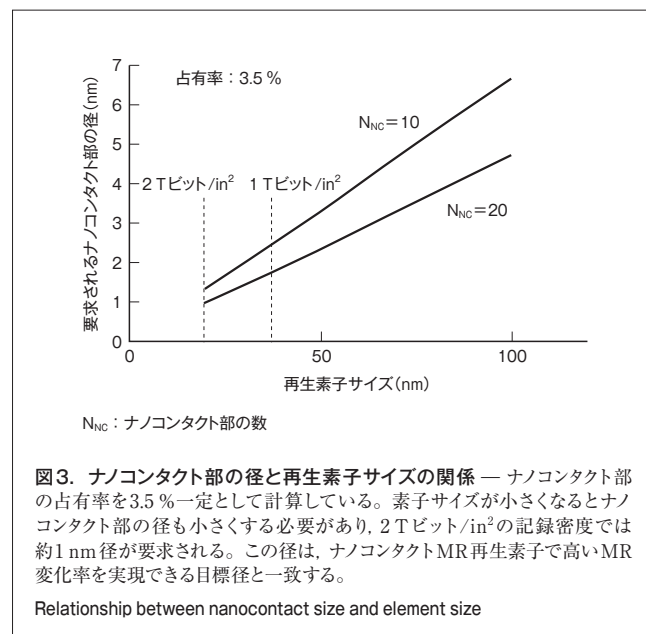


図3. ナノコンタクト部の径と再生素子サイズの関係 — ナノコンタクト部の占有率を3.5%一定として計算している。素子サイズが小さくなるとナノコンタクト部の径も小さくする必要がある。2 Tビット/ $in^2$ の記録密度では約1 nm径が要求される。この径は、ナノコンタクトMR再生素子で高いMR変化率を実現できる目標径と一致する。

Relationship between nanocontact size and element size

### 2.3 強磁性ナノコンタクト部の形成

図2に示すような絶縁層中に強磁性のナノコンタクト部を形成する方法は、CCP (Current-Confined-Path)-CPP-GMR再生素子と同様のIAO (Ion-Assisted Oxidation) 法<sup>[1], [2]</sup>を用いている。鉄コバルト (FeCo) 第1ピン層まで成膜した後、第1ピン層上にアルミニウム (Al) 層を積層しIAO処理する。このIAO処理中にAlの選択酸化とFeCoナノコンタクト部の形成が進行する。

ナノコンタクトMR再生素子の中間層をConductive-AFM (導電性原子間力顕微鏡) で観察した。その電流像を図4に示す。これは、下地層/イリジウムマンガン (IrMn) 反強磁性層/コバルト鉄 (CoFe) 第2ピン層/ルテニウム (Ru) 磁気結合層/FeCo第1ピン層/Al酸化物層+FeCo強磁性金属/保護層から成るモデル膜に対して、真空中でイオンミリングにより保護層を除去後観察したもので、熱処理は施していない。図4から、絶縁層中に導電部分が複数存在しているのがわかる。導電部の径はおおよそ1~3 nmと見積もられる。ただし、流れる電流値は個々のナノコンタクト部で歴然と差がある。つまり、IAO処理だけではAlの選択酸化とFeCoナノコンタクト部形成の分離が不十分であり、形成されたナノコンタクト部の純度が低いことが予想される。

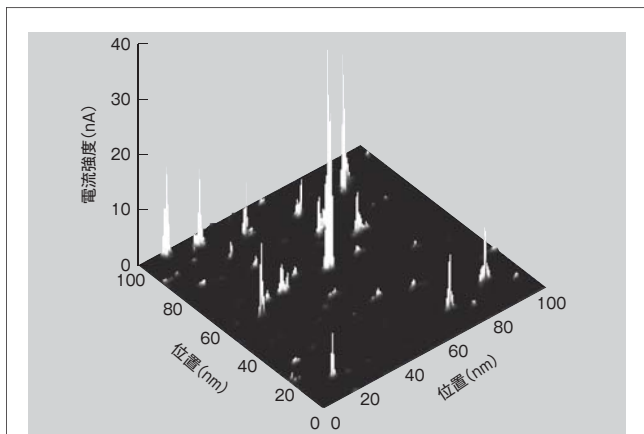


図4. conductive-AFM観察による電流像 — 絶縁層中に直径2 nm前後の導電部の存在が確認された。  
Conductive atomic force microscopy (AFM) image of current intensity

### 2.4 追加の熱処理によるMR変化率の向上

作成したIrMn反強磁性膜とFe-Co系ピン層、フリー層を持つ図2の構造のナノコンタクトMR再生素子に対して、ピン層安定化のための通常の熱処理温度 (290℃) より高温の熱処理を追加した。

RAの熱処理温度依存性を図5に示す。熱処理温度の上昇に伴いRAが減少することから、熱処理によりナノコンタクト部が高純度化していることが予想される。このときのMR変化率の変化を図6に示す。380℃までは、熱処理温度の上昇に

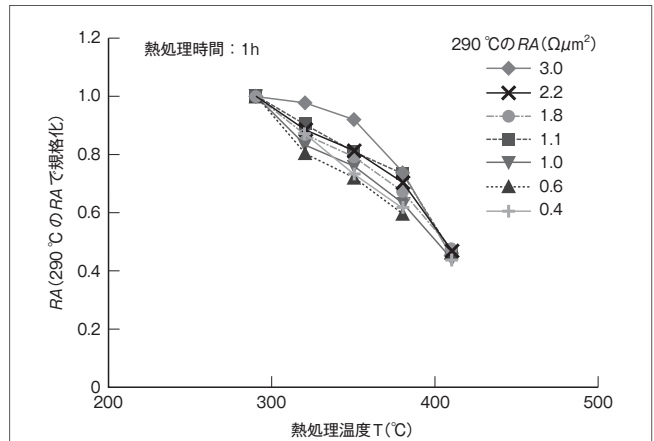


図5. RAの熱処理温度依存性 — RAは、熱処理温度が高温になるにつれて低下する。熱処理により、ナノコンタクト部が高純度化していると推測される。

Dependence of RA on annealing temperature

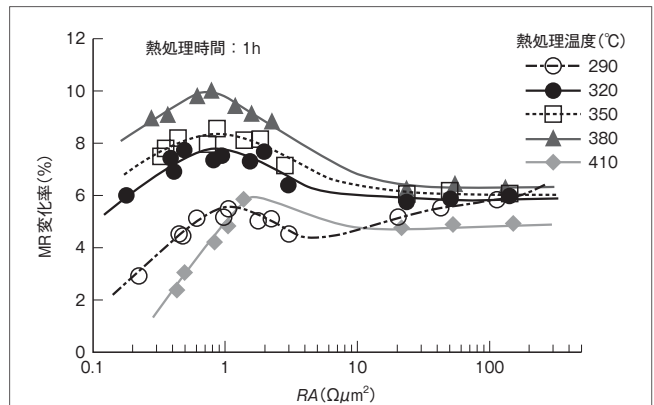


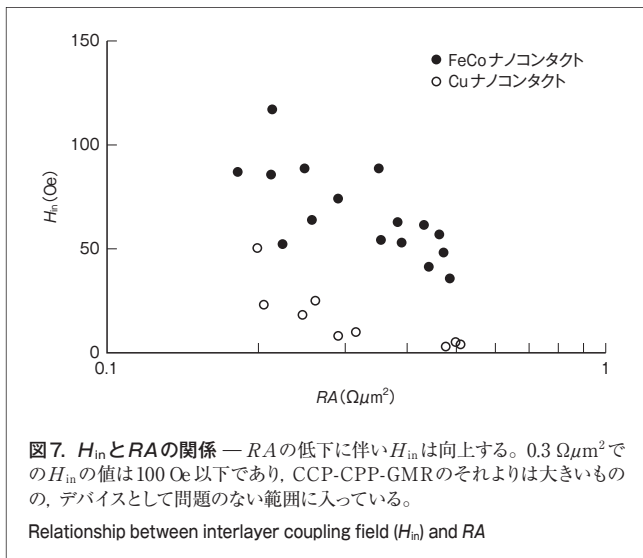
図6. 各熱処理温度でのMR変化率とRAの関係 — 380℃までは、熱処理温度の上昇に伴いMR変化率は大きくなる。380℃の熱処理で、通常熱処理 (290℃) のときの2倍近く (RA: 1 Ωμm²時) のMR変化率が得られた。

Relationship between MR ratio and RA for each annealing temperature

伴いMR変化率は大きくなり、380℃の熱処理で通常熱処理 (290℃) のときの約2倍 (RA: 1 Ωμm²時) のMR変化率が得られた。ここで、410℃熱処理でMR変化率が大きく減少したのは、ピン特性の劣化によるものである。図6では、380℃×1時間 (h) の熱処理により0.7 Ωμm²の低RAでMR変化率は約10%となっているが、この後、更にAl層の厚さ及びIAO条件を調整し、20%のMR変化率を実現できた。

## 3 再生ヘッドの動作確認

ナノコンタクトMR再生素子は、強磁性のナノコンタクト部で第1ピン層とフリー層を接続しているため、層間磁気結合力 ( $H_{in}$ ) が原理的に大きく、中間層が非磁性体のCuであるCPP-GMR再生素子や中間層が絶縁体のTMR再生素子に比べて、フリー層の磁化回転に悪影響を与えることが懸念され



る。図7に $H_{in}$ と $RA$ の関係を示す。追加熱処理の効果で $H_{in}$ は低下し、比較で示したCCP-CPP-GMRよりは大きいものの、0.3  $\Omega\mu\text{m}^2$ の $RA$ でも100 Oe以内であり、デバイスとして許容される範囲に入っている。

更に、ナノコンタクトMR再生ヘッドのディスク磁界に対する動作は、現行のTMR再生ヘッドと同じ線形応答をすることが確認されたので<sup>13)</sup>、現行再生ヘッドの読取りシステムをそのままナノコンタクトMR再生ヘッドへ置き換えることができる。

#### 4 あとがき

0.7  $\Omega\mu\text{m}^2$ という低い $RA$ で、20%のナノコンタクトMR変化率を得ることに成功した。この値は、実用化できるスピバルブ構造を持つナノコンタクトMR変化率としては世界最高<sup>(注2)</sup>である。

今後、ナノコンタクト部の形成プロセスの検討や材料改善などを行い、2 Tビット級の目標値である0.3  $\Omega\mu\text{m}^2$ の $RA$ で高MR変化率を目指す。

更に、観測されているナノコンタクトMR効果の原理は磁壁でのスピン依存散乱であるという検証を、フリー層の磁気構造観察やノイズ評価などの実験で行う予定である。

#### 謝辞

この研究の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) によるナノテク・先端部材実用化研究開発「自己組織化ナノパターンニング法によるナノ狭帯磁壁型HDD磁気ヘッド素子の開発」の委託を受けて進めた。

また、このテーマの共同研究者として、Conductive-AFM像の撮影などご協力いただいた東北大学大学院 工学研究

(注2) 2009年5月現在、当社調べ。

科 電子工学専攻の佐橋政司教授、河崎昇平氏に感謝の意を表します。

#### 文献

- (1) 福澤英明, ほか. 電流狭窄型ナノオキサイドレイヤーを用いたCPPスピバルブ膜. 東芝レビュー. 61, 2, 2006, p.19-22.
- (2) Nagamine, Y., et al. Ultralow resistance-area product of 0.4 ( $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup> and high magnetoresistance above 50% in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. App. Phys. Lett. 89, 16, 2006, p.162507-1 - 162507-3.
- (3) Komagaki, K., et al. "Influence of diffused boron into MgO barrier on pinhole creation in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions". The digest of INTERMAG2009. Sacramento, USA, 2009-05, IEEE. Session DB-03.
- (4) Katada, H., et al. "CPP-GMR heads with a current screen layer for high-area-density". The digest of PMRC2007. Tokyo, Japan, 2007-10, Committee 144 of the Japan Society for the Promotion of Science and The Magnetics Society of Japan. Session 16aB-06.
- (5) Saito, M., et al. "Narrow track width CPP spin-valve GMR heads utilizing half-metallicity materials". The digest of INTERMAG Asia 2005. Nagoya, Japan, 2005-04, IEEE. Session FB-02.
- (6) 桜庭裕弥, ほか. "Co<sub>2</sub>MnSi ハーフメタル電極を用いたCPP-GMR素子におけるスピン非対称性の定量的評価". 第56回応用物理学関係連合講演会講演予稿集. 筑波, 2009-03, 日本応用物理学会. 講演番号 1a-Q-10.
- (7) Fuke, H. N., et al. Magnetoresistance of FeCo nanocontacts with current-perpendicular-to-plane spin-valve structure. IEEE Trans. Magn. 43, 6, 2007, p.2848 - 2850.
- (8) Garcia, N., et al. Magnetoresistance in excess of 200% in ballistic Ni nanocontacts at room temperature and 100 Oe. Phys. Rev. Lett. 82, 14, 1999, p.2923 - 2926.
- (9) 大沢裕一. NiFeのナノ接点における新磁気抵抗効果. 東芝レビュー. 62, 10, 2007, p.38 - 41.
- (10) Tataru, G., et al. Domain wall scattering explains 300% ballistic magnetoconductance of nanocontacts. Phys. Rev. Lett. 83, 10, 1999, p.2030 - 2033.
- (11) Fukuzawa, H., et al. Specular spin-valves with FeCo alloy by ion-assisted oxidation. J. Appl. Phys. 91, 10, 2002, p.6684 - 6690.
- (12) Fukuzawa, H., et al. MR ratio enhancement by NOL current-confined-path structures in CPP spin valves. IEEE Trans. Magn. 40, 4, 2004, p.2236 - 2238.
- (13) Takagishi, M., et al. The magnetoresistance origin of FeCo nanocontacts with current-perpendicular-to-plane spin-valve structure (invited). J. Appl. Phys. 105, 7, 2009, p.07B725-1 - 07B725-5.



福家 ひろみ FUKE Hiromi, D.Eng.

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー主任研究員, 工博。磁性材料, 磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本磁気学会, 日本金属学会会員。  
Storage Materials & Devices Lab.



橋本 進 HASHIMOTO Susumu

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー研究主務。磁性材料, 磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本磁気学会会員。  
Storage Materials & Devices Lab.



岩崎 仁志 IWASAKI Hitoshi

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー参事。磁性薄膜材料, 磁気ヘッドの研究・開発に従事。日本磁気学会会員。  
Storage Materials & Devices Lab.