

# 微粒子型垂直磁気記録媒体の高密度記録機構

村岡 裕明

(東北大学工学研究科)

Recording Mechanism for Granular Perpendicular Magnetic Recording Medium

Hiroaki Muraoka

(Engineering Department, Tohoku University)

## はじめに

情報量の著しい増加が引き続き進んでいる。磁気記録は幾多の限界論を突破して高密度化を続け、何度も競合技術に駆逐されると言われながら情報ストレージのコア技術として今日でも情報化社会の必須技術であり続けている。Poulsen から 120 年、テープレコーダから 80 年、垂直記録から 40 年を経過し、中でもハードディスク装置は開発から 60 年以上今日に至るまで中心的な情報産業であり続けている。このような進化を続けた技術的背景は、垂直磁気記録をはじめとするイノベーションに加えて、磁気工学と磁気物理学の技術領域に留まらず、デジタル信号処理、流体工学、機械工学、など多様な分野の革新を適時取り込んで発展できたためと思われる。ここでは、磁気記録機構の中心的な課題である微粒子型媒体を前提とする記録理論を踏まえて今後の高密度化の可能性を展望する。

## 微粒子型記録媒体の記録機構と高密度化

高密度化の論点としていわゆる Trilemma が知られている。これを限界説として用いる議論が見受けられるが、HAMR や MAMR が示すようにこの trilemma はその前提を崩せば高密度化への道が開けると理解すべきである。更なる将来を考える際には、1930 年代の塗布媒体以来磁気記録媒体の大きな前提である微粒子集合構造が重要に思える。HAMR や MAMR においても微粒子媒体を用い続けており、一方、ビットパターン媒体 (BPM) では、記録媒体のビットを微細加工することで粒子体積を増やして熱緩和制約を緩めている。今後の高密度磁気記録には、この微粒子型記録媒体の記録機構の議論は不可欠と思われる。

高線密度記録とは、微細な間隔のビット一つ一つを連続的に磁化することである。例えば、ビット間隔が 10 nm 弱とすると、一般的な記録ヘッド磁界傾斜の数百 Oe/nm ではあるビットを記録しているときに隣接領域との磁界強度差は数 kOe 程度小さいだけで漏洩磁界による再反転のおそれがあり、これはストレージには致命的な書込み誤りになる。また、微粒子集合体では粒子群は反転磁界分布(SFD)を持ち、記録磁界が印加された際の粒子の磁化反転は SFD に応じて統計的になる。もしビット内の全粒子の半分未満しか正しく反転しない、あるいは隣接ビットで半数以上が漏洩磁界で誤反転すると、いずれも書込みエラーとなる。この書込みエラーはビット内粒子数と個々のビットの反転確率が与えられれば二項分布を用いて定量的に計算できる。BPM はビット当たりの粒子数が 1 個の記録媒体に相当するので SFD の要求は厳しくなる。

単なる熱緩和限界は  $10^7$  erg/cm<sup>3</sup> 程度の磁気異方性があればビット当たりの粒子数を減じて数十 Tbit/inch<sup>2</sup> まで安定にできるが、現状の記録ヘッドや記録媒体の性能ではより低い記録面密度の 10 Tbit/inch<sup>2</sup> 以下で記録磁界勾配や SFD の制約が顕在化する可能性がある。

## まとめ

今後も微粒子型の微細磁気構造を持つ記録媒体は引き続き使われると思われるが、ビットサイズの低下に伴うビット当たり粒子数の低減のため、熱緩和限界に比べて粒子均一性が厳しい面密度限界を与えることが想定される。磁気記録媒体を構成する微粒子の SFD を小さくすることが効果的である。また、これは記録磁界傾斜の急峻化によって対策できるので地道は記録ヘッドと記録媒体の性能改善が必要である。

## 参考文献

- 1) H. Muraoka, and S. Greaves, IEEE Trans. Magn., 47, 26-34, 2011.

# 強磁性トンネル磁気抵抗効果から生体磁気センサまで

安藤 康夫

東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻

From ferromagnetic tunnel magnetoresistance to biomagnetic sensor

Yasuo Ando

Graduate School of Engineering, Tohoku University

**はじめに** 1994年に我々のグループで強磁性トンネル磁気抵抗 (TMR) 素子が室温で大きな磁気抵抗効果を示すことを示してから四半世紀があつたという間に過ぎた。この間関連する大きな発見がいくつかあり、またスピントロニクス領域が形成されて、新しいデバイス創成の機運が高まったにもかかわらず、いっこうに出てきていないと感ずることが多い。本稿はこれまで自分が携わっていた研究課題から得た結果と教訓を紹介し、生体磁気計測という新たな挑戦的な課題の現状と展望についてこれまでの経験をもとにして述べる。

**ハードディスクドライブ (HDD)** 1990年台に自分が会社勤めをしていた当時、携わっていた研究課題が塗布型の磁気記録媒体であったので、大学に赴任後に着手した HDD の研究開発のテーマは無理なく理解できた。そんな最中に発見された TMR 効果であったため、否応なしにこの素子を何とか使いこなす研究を推進していった。TMR 発見当初は、こんな nm オーダーの絶縁体を壊すことなくデバイスに使いこなす技術など到底無理だと思ってしまった。しかし世の中の技術の進展は驚くもので、2000年代には TMR 素子は HDD の読み出しヘッドに使われるようになり、いくつかの会社で大量に安定に生産できるところまでになった。まさに「最初から限界を設定すべきでない」という気持ちがたたき込まれた。

**不揮発性磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)** 2000年代になると TMR 素子を MRAM に応用するプロジェクトが始まった。文科省や経産省から独自のプログラムが立ち上がったため、両者の間に挟まれた我々は、そのやりくりに苦労した思いが強い。いずれにしても、当時は次世代のメモリは MRAM であると信じて企業、大学共にそれなりの時間を費やして研究を進めた。しかし当然ながら他のメモリも同じかそれ以上のペースで開発を進め、現在、誰が勝者であるのかよく分からず、達成感のない状況である。MRAM 開発は現在も進められているが、「研究も開発も旬を逃したら意味がない」という気持ちが強く残された。

**高感度磁気センサ** 2010年代になって自分たちの研究の主題を TMR 素子を用いた高感度磁気センサにシフトし始めた。TMR 素子が高感度磁気センサに使えることは、素子発見の直後からわかっていたことで、誰もが研究をし始められたはずであるが、なぜかその研究に着手する人はあまりでこなかった。技術の新鮮さ、市場の規模など理由はあると思うが、実際に手がけてみると開発すべき課題は以外に多く、また潜在的なアプリケーションも非常に多いことを痛感している。特に私が究極の課題と見据えている生体磁気センサに関しても、決して夢物語ではないと確信している。図1は心臓からの生体信号である心磁ではなく、ある手法で心臓の動き(脈波)を磁気センサでモニタした結果である。センサは体表面から10cm以上離れているにもかかわらず心臓の動きのみならず、体表面が心拍に伴い振動し、被験者AとBとであきらかにその振動に差が見られる。これは生体磁気センサの転用例であり、工夫しだいでこれまでの常識とは異なったものも観測可能ということである。これまでの研究のなかで得た教訓をもとに「限界を定めず」「旬を逃さず」生体磁気センサを是非実現させたいという思いを講演当日は併せて述べたいと思う。

**謝辞** 本研究は JST S イノベプロジェクト、先端スピントロニクス研究開発センターおよびスピントロニクス学術連携研究教育センターの支援を受けて行われた。

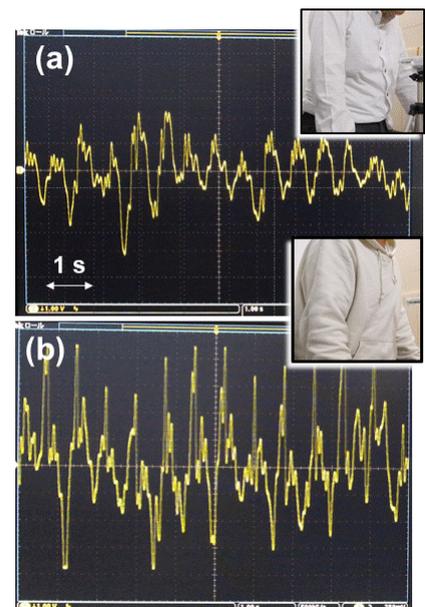


図1 心臓からの脈波信号を TMR 磁気センサで捉えた結果。(a), (b)は被験者の違い。

# 永久磁石材料の高性能化・多機能化に関する研究

杉本 諭

(東北大学大学院工学研究科)

Improvement of Magnetic Properties of Permanent Magnets

Satoshi Sugimoto

(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

## 【緒言】

永久磁石は、電気自動車 (EV)、風力発電、高性能モータなど、様々な製品において使用され、私たちの生活を豊かにすることに貢献している。著者らは、これまでに、その高性能化・高機能化の研究として、1. 合金系磁石の高性能化と新材料開発では、高性能 Fe-Cr-Co 系磁石や高保磁力 Mn-Sn-Co-N 系合金の開発、2. 希土類 (RE) 磁石における高性能化と新プロセスの開発では、未分離混合希土類金属 (ジジム) を用いた低価格高性能 RE-Fe-B 系磁石、結晶粒微細化による省 Dy 高保磁力 Nd-Fe-B 系焼結磁石、希土類-鉄系急冷ならびに厚膜磁石、高異方性 HDDR 粉末などの開発、3. 永久磁石における新規応用分野の開発では、フェライト磁石を用いた GHz 帯電磁波吸収材料などの開を行ってきた。本講演では、これら近年著者らが取り組んでいる研究のうち、Nd-Fe-B 系 HDDR 磁石における異方性化機構に関する研究について紹介する。

## 【Nd-Fe-B 系 HDDR 磁石における異方性化機構】

Nd-Fe-B 系異方性磁石粉末を樹脂で固めた Nd-Fe-B 系異方性ボンド磁石は、複雑形状が可能で、かつ高い電気抵抗率を有するため、今後モータの高速回転化を目指すロボット市場等で大いに期待されている。しかしその一方で、最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ の更なる向上が求められており、そのためには磁石粉末自体の $(BH)_{max}$ を向上させる必要がある。著者らは、Nd-Fe-B 系異方性磁石粉末の高異方性化による $(BH)_{max}$ の向上を目指し、まず、異方性磁石粉末が得られる HDDR (Hydrogenation, Disproportionation, Desorption, Recombination) 法における水素圧を制御した d (dynamic) -HDDR 法における異方性 (磁気特性) と組織の関係について調べている<sup>1),2)</sup>。まず、d-HDDR 法の不均化反応処理条件による磁石粉末の異方性 (磁気特性) の変化を調べた結果、処理時間が長くなるに従い異方性が低下すること、水素圧力 30 kPa で処理した場合は、100 kPa での処理よりも異方性が高くなる傾向にあることを示した。また、不均化反応処理条件に伴う組織の変化を調べたところ、不均化反応処理後の組織には、隣接した  $NdH_{2+x}$  と  $\alpha$ -Fe が整合したラメラ状組織、それが不連続粗大化した粗大なラメラ状組織、および非整合の球状組織があることを明らかにしている。このうち、d-HDDR 処理後にはラメラ状組織は高異方性・低 $(BH)_{max}$ の、粗大なラメラ状組織は高異方性・高 $(BH)_{max}$ の、球状組織は低異方性・低 $(BH)_{max}$ の  $Nd_2Fe_{14}B$  相にそれぞれ再結合すること、などを明らかにした。これより、水素圧力 30 kPa で不均化処理した場合は、100 kPa で処理するよりもラメラ状および粗大なラメラ状組織が多く形成され、異方性が高くなると判断された。したがって、高異方性化のためには、球状組織領域を減らし、相対的に繊維状および粗大なラメラ状組織の領域を増やすことが有用であると考えられる。

## 【謝辞】

本研究にご協力いただきました愛知製鋼 (株) 御手洗浩成氏、三嶋千里氏、山崎理央氏、堀川高志氏に感謝申し上げます。また、本研究の一部は、NEDO「未来開拓研究プロジェクト/次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発プロジェクト (MagHEM)」、文部科学省「元素戦略磁性材料拠点 (ESICMM)」の支援の下で行われました。

## 参考文献

- 1) T. Horikawa et al, AIP Advances, 9 (2019), 35244.
- 2) M. Yamazaki et al, REPM 2018, Beijing, China, 26-30, August 2018, A0302.