

ナノ構造と磁性材料

宝野和博
NIMS

Nanostructure and Magnetic Materials
K. Hono
NIMS

磁性材料の特性は微細構造によって大きく変化する。その端的な例が保磁力であり、同じ強磁性化合物を主相として使った材料であっても、その保磁力は微細組織によって大きく変化する。永久磁石、軟磁性材料、磁気記録媒体、スピントロニクス素子開発は、主相となる強磁性相が持つ *intrinsic* な磁気特性をデバイスで引き出せるように微細構造を制御していく過程である。例えば $L1_0$ -FePt は高い結晶磁気異方性を持つ安定な化合物として知られてはいたが、2008年に我々が FePt-C でナノ粒子構造を実現するまで[1]、誰が FePt を HAMR 媒体として使えると真剣に思っていただろうか？この例にみられるように、磁性体を磁性材料として応用するには材料とそれを用いたデバイスの微細構造と異相界面をマイクロから原子レベルのマルチスケールで解析・制御し、磁気特性や磁気伝導特性を最適化する必要がある。

本講演では私自身の研究者としての原点となったアトムプローブによるナノ結晶軟磁性材料 FINEMET のナノ結晶メカニズムの研究[2]に遡り、ナノ解析が材料開発にいかにか有用かを例示する。FePt 薄膜の保磁力の研究から FePt-C 系 HAMR 媒体開発への展開 [3]、ナノコンポジット磁石研究で感じた理論予測と現実の乖離 [4]、Nd-Fe-B 焼結磁石の結晶粒界の原子レベル解析[5]、その知見を応用した Dy フリー高保磁力 Nd-Fe-B 磁石開発[6]、ホイスラー合金の規則化とスピン分極率の評価と理論との乖離[7]、それを用いた多層膜の界面制御による磁気抵抗の限界への挑戦 [8]、 $SmFe_{12}$ 系磁石の可能性[9]などに例示し、磁性・スピントロニクス材料開発におけるナノ構造解析の重要性を語る。

参考文献

- 1) A. Perumal, Y. K. Takahashi and K. Hono, APEX, 1, 101301 (2008).
- 2) K. Hono et al. Acta Mater. 47, 997 (1999).
- 3) L. Zhang et al. JMMM, 322, 2658 (2010), JAP, 109, 07B703 (2011).
- 4) W. B. Cui, Y. K. Takahashi and K. Hono, Adv. Mater. 24, 6530 (2012).
- 5) H. Sepehri-Amin et al. Acta Mater. 60, 6061 (2012), T. T. Sasaki et al. Acta Mater. 61, 269 (2016).
- 6) H. Sepehri-Amin et al. Scripta Mater. 63, 1124 (2010), Acta Mater. 61, 662 (2013).
- 7) T. M. Nakatani et al. JAP 52, 737 (2004), T. M. Nakatani et al. JAP 96, 168 (2010).
- 8) T. Nakatani, JAP 126, 173904 (2019).
- 9) A. K. Srinithi et al. Acta Mater. 256, 119111 (2023).

非金属材料におけるスピントロニクス機能の開拓と その外場制御

Pioneering of spintronic functions of non-metallic materials and its control by external fields

Masashi Shiraishi

(Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Japan.)

スピントロニクスは1988-89年頃に拓かれた比較的新しい研究分野である[1-3]。新しい研究分野はいつの時代も魅力的であり多くの研究者を魅了する。さらにスピントロニクス機能が発現する材料プラットフォームとして、草創期の(バルク状)金属から幸いにもすぐに無機半導体が仲間入りし、21世紀になると分子やトポロジカル量子物質、さらに2次元系や超薄膜金属もプラットフォームに仲間入りしている。このように多様な材料プラットフォームでスピントロニクス機能が発現することは、様々なバックグラウンドを持つ研究者が参入する大きな魅力となる。

本講演では、私自身の研究バックグラウンドから読み解いたスピントロニクスの魅力と、異分野からの参入者に「優しい」スピントロニクスの魅力を述べながら、スピントロニクスにおける絶対的エース物質であるバルク金属を扱わず、非主流派物質である非金属材料に光をあてながら楽しんできた研究について、その一端を紹介して若い学生・研究者の皆さんに自由に(好き勝手に)心の赴くままに研究することの楽しさをお話したいと思います。

Reference

- 1) M.N. Baibich, A. Fert et al., Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988).
- 2) G. Binasch, P. Grünberg et al., Phys. Rev. B39, 4828 (1989).
- 3) 今の学生さんには、1988年とはソウルオリンピックが開催されて東京ドームができた遠い昔、としか認識されていないと思いますが、大学2年の時に発見された効果が分野を拓いた、という意味で私にはごく最近の出来事に思えてしまいます。さらに大学時代は1900年代初頭に開拓された素粒子論、企業研究者時代には1950年代に勃興した半導体トランジスタやレーザという古めかしい分野を専門にしていただけに、スピントロニクスの新鮮さと魅力は私には傑出したものに映りました。

新機能スピントロニクス素子の開発と革新的情報処理への展開

深見 俊輔

(東北大・通研/CSIS/CIES/WPI-AIMR、稲盛科学研究機構)

Development of new-functional spintronic devices and its application to innovative information processing

Shunsuke Fukami

(Tohoku University, Inamori Research Institute for Science)

我々の生活を支えるコンピューティング技術は Moore の法則のもとで年々指数関数的に発展してきた。数年前からは AI, IoT, DX などの進展によりコンピュータに求められる性能の増加のペースが明らかに増しており、ここ最近の生成系 AI の出現によりこの先そのペースは一段と増すものと予測されている。本講演では、我々磁気工学分野の研究者がこのような社会的要請に対してどのように貢献できるか、講演者らの最近の研究を紹介しながら議論したい。

今後のコンピューティング技術への要請は、以下に述べる課題へとブレイクダウンできる。

一つ目は計算性能を向上させながら消費電力を低減する技術の確立である。これに向け、磁気工学分野は不揮発性スピントロニクスメモリ素子で貢献できる。AI 処理は多数の積和演算によって実行され、大量のメモリアクセスを伴う。つまりメモリアクセスの高速化、低消費電力化が重要となる。不揮発性スピントロニクスメモリ素子は配線間に形成でき、高速な AI 処理に適した Near-memory computing や In-memory computing などの発展的なアーキテクチャとの相性が良く、また待機時に電力を消費しないことから電力効率にも優れる。講演者らは最先端 CMOS プロセスへの適用を目指し、10 nm を下回るような領域で高い性能（書込み、読み出し、保持）を有した極微細磁気トンネル接合素子[1-3]や、最先端 CMOS と同じ周波数で動作する超高速スピントロニクス軌道トルク素子[4-6]などの研究開発を進めている。

二つ目は古典コンピュータが苦手とするタスクを効率的に処理する新概念技術の確立である。古典コンピュータは単純な四則演算に落とし込める問題を得意とする一方で、組合せ最適化や機械学習、量子計算などの計算論的複雑性の高い問題には多くの計算時間と電力を要する。量子コンピュータはこのような問題への解決策になるものと期待されているが、実現に向けての道のりは平坦ではない。講演者は、磁気工学の原理に立脚し、古典でも量子でもない、その中間に位置するコンピューティング技術の開拓に取り組んでいる。上述のような計算論的複雑性の高い問題を古典コンピュータで扱う際、乱数を用いたアルゴリズムの利用が有効であることが知られている。古典コンピュータは質の良い乱数を生成することを苦手とする一方で、スピントロニクス素子の熱ゆらぎ現象を利用することでこれが可能となる。講演ではこの思想に基づき構築した「確率論的コンピュータ (P コンピュータ)」を用いて行った組合せ最適化[7], ボルツマン機械学習[8], 量子計算[9]の原理実証を紹介する。

本研究は内閣府 ImPACT プログラム、JST-OPERA (JPMJOP1611), JST-CREST (JPMJCR19K3), 文科省 XNICS (JPJ011438), 科研費 (19H05622)などの支援の下で行われた。

参考文献

- 1) K. Watanabe et al., Nat. Comm. **9**, 663 (2018).
- 2) B. Jinnai et al., IEEE IEDM, 24.6.1 (2020).
- 3) B. Jinnai et al., IEEE IEDM, 2.6.1 (2021).
- 4) S. Fukami et al., Nat. Nanotechnol. **11**, 621 (2016).
- 5) H. Honjo et al., IEEE IEDM, 28.5.1 (2019).
- 6) M. Natsui et al., IEEE J. Sol.-Sta. Cir. **56**, 1116 (2021).
- 7) W. A. Borders et al., Nature **573**, 390 (2019).
- 8) J. Kaiser et al., Phys. Rev. Appl. **17**, 014016 (2022).
- 9) A. Grimardi et al., IEEE IEDM, 22.4.1 (2022).