

総説／解説

磁石がスマホ情報を保存している：古典磁石から量子磁石へ

山田豊和*

Magnetic Data Storage: from Classical to Quantum Magnets

by

† Toyo Kazu YAMADA *

(Received xxx xx, xxxx; Accepted xxx xx, xxxx)

要 約

情報は現在社会を支える基盤の一つであり IT 産業の発展は目覚ましい。一方、情報がどのようにして磁石で保存されているか正しく理解している大学生は少ない。磁石（磁化）と磁界の関係性を理解させる実験とシミュレーションを紹介する。さらに、量子コンピューターにも磁石の物理学が重要である事を示し、古典磁石と量子磁石の違いを解説する。

キーワード：磁石、情報、スピントロニクス、量子磁石

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末など、社会にあふれる多様な情報の中で我々は人生を享受している。情報とは何だろうか。例えば、スマホで写真を撮る。この画像が 4000×2000 画素（いわゆる 4K 画像）であれば、静止画像一枚で実に $8,000,000$ 個 = $8M$ バイトの情報になる ($M = \text{メガ} = 10^6$)。この静止画像を毎秒数十枚、連続して写すことで人間の目には動いているように見え、動画となる。社会全体では、天文学的な 10^{24} 個の膨大なデータが世界を駆け巡っている。

すべての情報は「1」と「0」の二進数に変換され、各企業の大規模データセンターに届く (Fig. 1)。このデータセンターで情報を記憶しているのが、ハードディスクドライブ (HDD) である。HDD は家電量販店でも買うことができる。1T バイト ($T = \text{テラ} = 10^{12}$) であれば、 10^{12} 個の情報が記憶できる。

では、どの物質が情報記憶に使われているのだろうか？



Fig. 1 情報社会を支えるナノ磁石。

現在、HDD で使われているのは「磁石」である。磁石 NS 極で「1」、SN 極で「0」の情報を保存している (Fig. 1)。

2. 身近な情報を記憶している磁石

HDD 内の磁石は、現在約 20 nm (ナノメートル = 10^{-9} m) と非常に小さい。可視光波長は $400\text{-}800 \text{ nm}$ であるため、可視光波長の約 20 分の 1 の大きさの HDD 内の磁石は目では見えない。一方で、身近で情報記憶に使われている目に見える大きさの磁石もある。Fig.2 にクレジットカードの裏面を示す。これのどこに情報が記憶されているだろうか？実

令和 年 月 日受付

* 千葉大学大学院工学研究院: 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

Department of Materials Science, Chiba University: 1-33 Yayoi-chou, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

†: 連絡先/Corresponding author

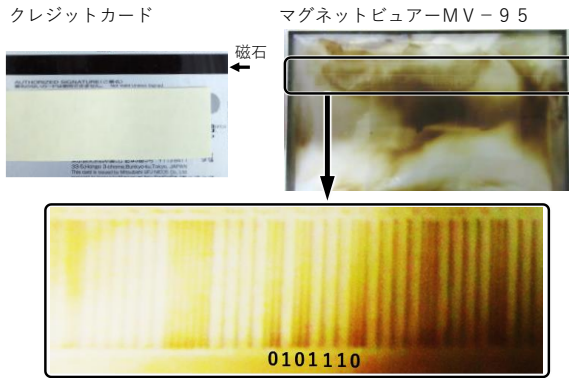


Fig. 2 カード情報を記憶する磁石.

は、黒いテープの部分、ここに磁石が隠れている。磁石の向きは人の目では見えない。磁石が赤色と青色で塗られているのを思い浮かぶ人も多いが、これは人が色をつけただけである。目では見えない磁石の向きを見るため、様々な「磁気イメージング」法が開発されてきた¹⁾。

Fig. 2 に、手軽に安価で磁石が簡単に見える、マグネットビューアー (MV-95 (株)シグマハイケミカル)を使った磁気イメージングを示す。茶色のフェライト微粒子がコロイド溶液中に拡散している。マグネットビューアーをカード上に重ねると、磁性微粒子が磁石からの磁束密度に引き寄せられ S 極に集まる。結果、Fig. 2 に示すバーコード模様が生じたことから、縦長の細い磁石が配列していることが分かる。暗い場所が情報「0」、明るい場所が情報「1」とすれば、Fig. 2 の「SNSNNNS」は「0101110」の情報を保存している。

これまで、高校生や大学生に、Fig. 2 のデモ実験を実施してきた。「情報」という一見あいまいな言葉が、目に見える形で具現化されることで、学生に磁性材料が情報社会を支えているという気付きを与える。磁石の特性を正しく理解し制御することで、未来の情報社会を担う希望ある学生が増えることを切に願う。

3. 磁化と磁場の違いから磁気情報制御の理解へ

Fig. 3 に HDD 内での磁気情報「書き込み」の仕組みを示す。HDD 内にも Fig. 2 で示す磁石より約 10,000 倍小さなナノ磁石がディスク円盤上に並んでいる。そのわずか「20 nm」上を「磁気ヘッド」が超高速で動き回っている。この感覚は、ジェット飛行機が地面の上わずか数 mm をすれすれで飛び続けていることに匹敵する。磁気ヘッドから 1 個 1 個の磁石の磁気能率 (磁化ベクトル M [A/m]) に磁界 (H [A/m]) を印加し、情報書き込み (=データ保存) が、日々行われている。

特定の磁石だけにピンポイントで磁界を印加するため、

HDD : writing (情報「書き込み」)

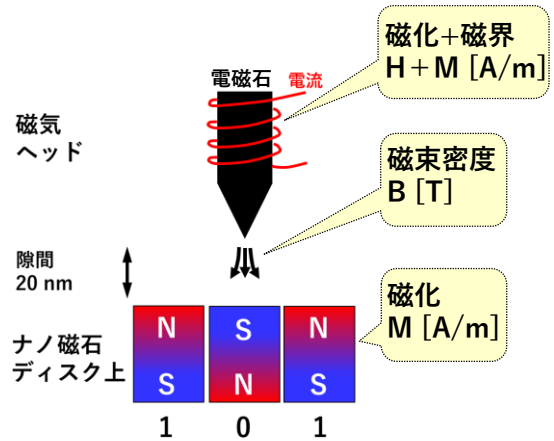


Fig. 3 磁石を電磁石からの磁界で反転。磁気情報のデ

電磁石を用いる。鉄などの軟磁性体に銅線コイルを巻き電磁石になる。SI 単位系で採用されている MKSA 単位系の E-B 対応を用いた場合、この電磁石からは、磁化(M)と磁界(H)が足し合わさった磁束密度 $B = \mu_0 (H+M)$ が出力し、HDD 内のナノ磁石 1 個 1 個の磁化(M)の向きを変える²⁾。

この情報書き込みの基本的な事：(1)磁石の向き(M)を磁束密度 B で反転させる事、(2)電磁石を使って磁束密度(B)を強めたり弱めたりする事、の正しい理解が大学生でも難しい。理由は教科書で習う電磁気学が、実際の磁石や磁界を使った実験と結びつきにくい点にある。

そこで、我々が実施している、大学生向けの磁石の特性を正しく簡単に理解できる実験を Fig. 4 に示す。この実験を通して、磁束密度 B [mT]、磁化 M [A/m]、磁界 H [A/m]の

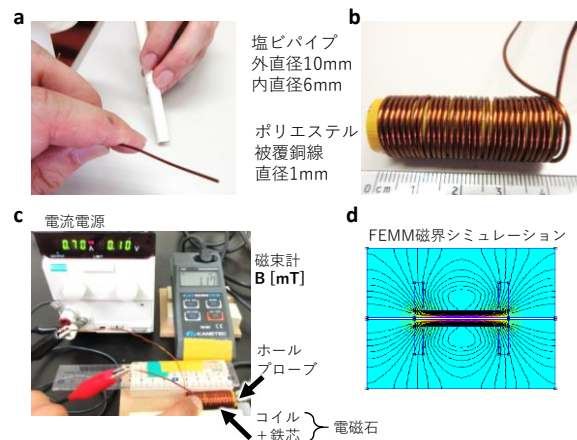


Fig. 4 . 実験による磁束密度 B [mT]、磁化 M [A/m]、磁界 H [A/m]の関係性の習得。(a,b)自作コイル。(c)磁束密度計測の概要。(d)FEMM 磁界シミュレーション。

関係性： $B = \mu_0(H+M)$ を感覚的に習得し磁気情報記憶の原理が理解できるようになる。

具体例を Fig. 4 に示す。最初にコイルを作製する (Fig. 4a)。塩化ビニルチューブなど筒状であればよい。これにポリエステル被覆銅線(直径 1 mm)を巻き付け一層 20 巻で二層作る (Fig. 4b)。被覆銅線の両端 10 mm 程を紙やすりで磨き被覆を取る。そして、銅線コイルに電流 I [A] を流す (Fig. 4c)。銅線コイルの中心軸上に、磁束計(Kanetec TM-801)のホールプローブを固定し、磁束密度 B [mT] を計測する (Fig. 4c)。電流は以下のように正側から負側に流し磁束密度の向きの変化を計測する (0.0 A → +2.0 A → 0.0 A → 配線を繋ぎ変え 0.0 A → -2.0 A → 0.0 A)。このデータより、縦軸 B 、横軸 I のグラフを描き、近似直線より傾き α を得る ($B = \alpha I$)。すると、 $B = \alpha I = \mu_0 H$ なので、銅コイルが作る磁界 H [A/m] = $\alpha I / \mu_0$ が得られる。学生も気づくが、銅コイルだけが作る磁束密度は大変弱い。クリップ 1 個も引き寄せられる磁力が無い。

ところが、この銅コイルに鉄棒を入れるだけで磁力が一気に増大する。実際に、磁束計の値が数倍に増大し、クリップが近くにあれば、多くのクリップが吸い寄せられるため、学生は肌で磁束密度の増大を体感できる。

では、なぜ鉄棒を入れるだけで磁束密度が増大するのか？上記と同様に、縦軸 B 、横軸 I のグラフを作る。横軸 I は、上記で求めた銅コイルが作る磁界と電流のグラフで得た傾き α を使って、横軸を磁界に変換できる (H [A/m] = $\alpha I / \mu_0$)。しかし、縦軸の磁束密度は鉄棒を入れることで大きく変化する。式で書くと M が新たに加わるためである： B [T] = $\mu_0 (M$ [A/m] + H [A/m])。学生には、 $M = (B / \mu_0) - H$ から鉄棒の磁化 M を求めさせ、縦軸 M 、横軸 H のグラフを描かせる。すると、 M - H 曲線は、ヒステリシス曲線になる。一定の磁界 (=保磁力) をかけると、鉄棒内の微小な磁区が一気に同じ方向に揃うことで磁化 M が増大し、結果として磁束密度 B が増大する原理が理解できる。

実験だけでは、目に見えない磁束密度の空間分布のイメージが付きにくい。そこで、磁界シミュレーションで検証する。フリーソフトである FEMM を使用する³⁾。Fig. 4d にシミュレーション結果を示す。

以上を通して、磁束密度 B [mT]、磁化 M [A/m]、磁界 H [A/m] の関係性： $B = \mu_0 (H+M)$ を肌で体感し理解できる。コロナ禍では、1 時間ずつ学生を順に來させ Fig. 4 の実験を個別に行い、シミュレーションは個別に実施した。

4. 磁石は小さくなる：古典磁石から量子磁石へ

今後の素子開発は 20 nm サイズから 2 nm サイズになるとニュースで報道されている。物質最小の原子と原子の間

の距離は約 0.2 nm である。つまり、2 nm サイズの物質には、わずか数十から数百個の原子しかない。

磁石を 2 nm サイズまで小さくしていくと、「Stoner 条件」と呼ばれる物理的な状況が成り立たなくなる。NS 磁石に代表される電磁気学が支配する「古典磁石」から、量子力学が支配する「量子磁石」になる。この量子磁石をつかった情報処理技術の例が量子計算アルゴリズム(量子コンピュータの計算方法)である。Fig. 5 に古典磁石と量子磁石の違いを説明する。古典磁石はアボガドロ定数ほどの 10^{23} 個の鉄原子が集まった塊(パルク)である (Fig. 5a)。一つの NS 磁石では 1 と 0 の 2 個の情報しか保存できない。

一方、量子磁石は 1 個の磁性原子で実現できる (Fig. 5b)。何が異なるのか？パルクでは無数の磁性原子の電子軌道が重なり電子バンド(広がり=分散)を持つ。ところが、1 個の磁性原子では、電子軌道の重なりは制限され電子バンドを形成しない。縮退が解け離散準位ができる。各電子軌道にはアップスピンとダウンスピンの二個の電子が入れる(パウリ排他律)。各電子スピン状態は、量子力学で習う波動関数を用いて記述できる。そして、1 個の原子の磁気モーメントベクトルは、全スピン角運動量 S で記述できる： $\mu = -g \mu_B S$ (g : g 因子 ~ 2 , μ_B : ボーア磁子, S : 全スピン角運動量)。磁性原子の場合、最外殻は 3d 電子軌道である。仮にアップスピンが 5 個、ダウンスピンが 1 個入っていれば $S = (5-1) / 2 = 2$ となり、磁気モーメント $\mu = 2\mu_B$ の磁石となる (Fig. 5b)。

1 個の原子からなる量子磁石の磁石の向きは全スピン角運動量 S が支配する。単純に N 極 S 極とはならない。 $\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$ の形で表記できる。アップスピンが $|1\rangle$ 、ダウンス

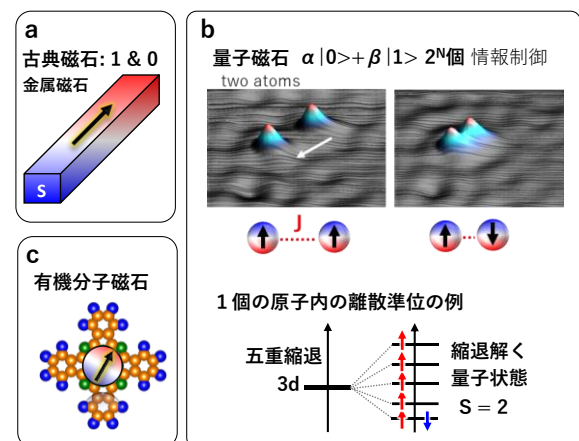


Fig. 5 古典磁石から量子磁石へ。(a)古典磁石。(b)上部：量子磁石となる孤立した磁性原子二個の観察例。下部：金属元素に存在する価電子のうち s と p 軌道は無視した d 軌道のみでの離散準位。(c)有機分子磁石。

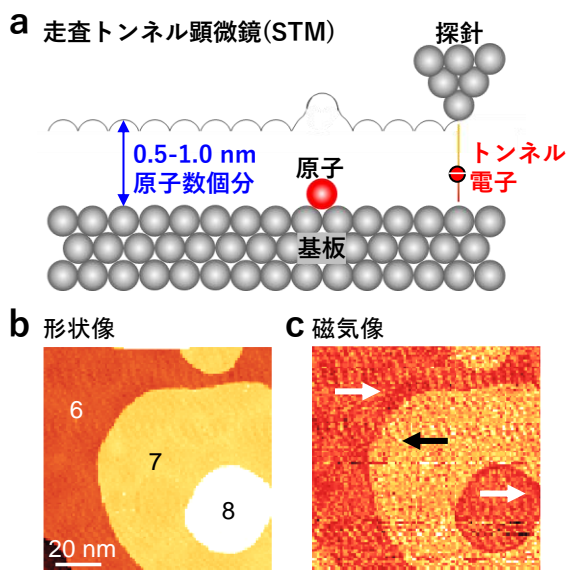


Fig. 6 原子が見える走査トンネル顕微鏡 (STM). (a) STM モデル図. (b)Mn 薄膜表面の STM 形状像. (c)形状像と同時に得た磁気像⁵⁻⁸⁾. 矢印が磁化の向き.

ピンが $|0\rangle$ と考えるとよい⁴⁾. そして、 α と β は「波」として記述できる点が量子力学の面白さである：例、 $\alpha = A(\cos\theta + i\sin\theta)$. つまり、上向きと下向きスピンの波のように変化できてしまう. その結果、原理的には1個の量子磁石で 2^N 個の情報が制御できると期待されている. 夢のような磁石である.

ではどのようにすれば、物質最小である1個の原子を制御してデバイスに使えるだろうか？

5. 原子分子が見える走査トンネル顕微鏡

量子コンピューター実現の有力な候補材料が量子磁石である. そのためには、1個の原子磁石が制御できなくてはならない. Fig. 5b で二個の鉄原子を示した. この原子を見るために開発されたのが、走査トンネル顕微鏡 (STM)である (Fig. 6). この顕微鏡は、原子レベルに尖らせた探針を使う. 探針を試料の上、わずかに原子数個分(0.5-1.0 nm)の位置にピタッと止め、非接触で試料表面をなぞるようにして形状を観察できる. Fig. 6b は磁性マンガン薄膜表面の STM 形状像を示す. Fig. 6c は同時に得た磁気像である. 磁気像中でマンガン膜一層毎に明暗が反転している. これはマンガン膜が原子一層毎に磁化が反転していることを示す⁵⁻⁸⁾. 現在、1個の原子サイズの磁石を直接観察するには、この STM を用いた磁気イメージングが有効と考えられている (スピン偏極 STM, と呼ばれる).

量子磁石の研究開発が、このような最先端の高分解能顕微鏡を用いて世界中で研究が実施されている. 実際には、原子一個は熱拡散しやすいため、Fig. 5c に示すような有機分子磁石で1個の磁石原子を固定して実用化する方法が試みられている⁹⁻¹³⁾. さらに、有機分子磁石を超伝導基板につけることで、準粒子励起と呼ばれる量子コンピューターに不可欠な状態の研究開発が進んでいる¹⁴⁾.

6. おわりに

情報が社会に果たす役割が大きくなる一方で、情報記憶を支える磁気情報デバイス (スピントロニクスデバイス) の教育現場への教材や実験教育方法の普及は進んでいない. 未来の量子コンピューター社会を支える人材育成には、量子磁石の理解も重要である. 本解説が磁気情報や量子情報などの未来の IT 産業を支える人材育成の助けになることを願う.

参考文献

- 1) 大島則和, 小野寛太, 笹田一郎, 三俣千春, 山田豊和: 磁気イメージングハンドブック, 共立出版, (2010)
- 2) 高梨弘毅: 磁気工学入門, 共立出版, (2013)
- 3) <https://www.femm.info/wiki/HomePage>, アクセス日時 2023年1月12日.
- 4) 後藤憲一, 西山敏之, 山本邦夫, 望月和子, 神吉健, 興地斐男: 量子力学演習, 共立出版, (1982)
- 5) T. K. Yamada, H. van Kempen *et al.*, Phys. Rev. Lett., **90** 056803 (2003).
- 6) S. Schmaus, T. K. Yamada *et al.*, Nature Nanotechnology **6**, 185 (2011).
- 7) T. K. Yamada and A. L. Vazquez de Parga, Appl. Phys. Lett. **105**, 183109 (2014).
- 8) L. Mougel, T. K. Yamada *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 262406 (2020).
- 9) T. K. Yamada, K. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 195437 (2016).
- 10) E. Inami, T. K. Yamada. *et al.*, Scientific Reports **8**, 353 (2018)
- 11) E. Inami, T. K. Yamada. *et al.*, Anal. Chem. **90**, 8954 (2018)
- 12) E. Inami, T. K. Yamada. *et al.*, J. Phys. Chem. C **124**, 3621 (2020).
- 13) H. Chen, T. K. Yamada *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 085423 (2021)
- 14) C. G. Ayani, T. K. Yamada *et al.*, Nanoscale **14**, 15111 (2022)