

■ ミクロな磁場の形 — SQUID磁気顕微鏡 —



ナノセンシング磁気顕微鏡研究グループ ■ 門 脇 和 男 ■

目を開ければ我々は様々な景色や風景を自然に認識することができる。ついこの間、あのような長時間にわたる月食は今世紀や来世紀はおろか、あと1787年間も見ることができないと言われるまさに大皆既月食が真夏の夜空に1時間47分にわたって展開された。満月が左側から少しずつ、しかし、正確に少しずつ欠けていく様は自然界に展開される壮大なドラマである。

夜空に煌々と輝く満月は「丸い形」をしていて、三日月は引き絞った「弓のような形」をしている。そもそも「形」とは何であろうか？我々が通常「形」と認識しているのは、まず、物体（あるいはより詳しくは物体を構成している原子あるいは分子）の存在が必然的で、それが空間的に分布しており、その分布の空間的な変化に伴って光の散乱が変化するのでその分布状況として「形」を認識することができるのである。

「磁場の形」とは聞き慣れない表現であるが、磁場の空間的な強弱や変化の様子を、そういう意味で表しただけのことである。

「何だ、そんなことだろうと思った。」と、もう興味を失ってしまった読者もあると思うが、この小文の核心は、実は、これからである。もう少し先までお読みいただきたい。物質の「形」は通常の顕微鏡で十分観測できるが、物質内部のミクロな「磁場の形」を観測する手段は意外に確立されていないのである。

この研究テーマは、まさに微小空間の磁場の分布を極めて高感度に測定する装置— SQUID 磁気顕微鏡—を開発し、様々な物質内部の微視的な「磁場の形」を拡大し、覗いてみようという大胆不敵な試みである。よく考えて見れば、光学顕微鏡を始め、電子顕微鏡や

X線顕微鏡など、「顕微鏡」と名の付く機器は多いが、これらはすべて物質中の電子の散乱によるもので、磁場の空間分布を見る顕微鏡はこれまで聞いたことがない。この研究では、高感度化はSQUID (Superconducting Quantum Interference Devices: 超伝導量子干渉計) を用い、微小化はSQUID センサー自身を微細加工することで達成しようとするものである。

このように書くと「磁場の形」を見る手段はSQUID 磁気顕微鏡以外に無いという印象を持たれるかもしれないが、実はそれでは嘘になる。SQUID 磁気顕微鏡と競合する重要な測定手段としてMFM (Magnetic Force Microscope: 磁気力顕微鏡) がある。これは、AFM (Atomic Force Microscope: 原子間力顕微鏡) と対比され、微小な磁性体をカンチレバー先端に取り付け、この磁性体に働く磁気力を直接測定する手法である。空間分解能に優れ(0.5 μ m程度)、感度も比較的高い。1992年4月、ちょうど、高温超伝導体の磁束状態の研究が盛んになりつつある頃、MFM を用いて個々の量子化磁束を観測できないものかと考え、IBMのThomas J. Watson 研究所を密かに訪ねたことがある。なぜなら、このアイディアに基づいたMFM 装置は既に1987年にワトソン研究所で開発されていたからである¹⁾。しかし、勇んでワトソン研究所に乗り込んで見ただけのもの、よく聞いてみるともうその開発プロジェクトは終了しており、研究開発担当者もすでにIBMを去って(当時の担当研究部の同僚の話) 途方に暮れてしまったことを思い出す。結局、ニューアークの空港からタクシーで1時間半もかかってようやくたどり着いたワトソン研究所で

あったが、それ以上の情報は入手できなかったのである。その後も、この実験手段の魅力を忘れることができず、一時は自主開発を決心したが、予算が思うように獲得できず、結局、断念せざるを得なかったのである。日本では当時、この分野へはセイコー電子と日立が自主開発に乗り出していた。

このような事情があったので、原研の先端基礎研究センター長から昨年、SQUID 磁気顕微鏡の開発とそれを用いた原研独自の研究ということでこのお話をいただいたとき、一度はあきらめかけていた夢が実現できるかもしれないという思いで無意識のうちに承諾してしまっていた。

まず、本題に入る前にもう少し磁場の空間分布測定手段の例を紹介しよう。

その一つは磁気光学効果を用いる方法であり、観測対象物の表面にインディケーターという特殊な磁性薄膜を塗布し、カー効果 (Kerr effect) によって試料表面上の磁場分布に対応した位相の回転を測定することで、磁場の空間分布を知る方法である。比較的大きな磁場でも有効であるが、空間分解能はせいぜい数 μm が限界である。実験装置が比較的簡単で、安価であることから高温超伝導体の磁場分布の測定などに広く用いられている。

もう一つは磁場測定法としては最もポピュラーなホール素子を用いた方法で、走査型ホールプローブ顕微鏡 (SHPM: Scanning Hall Probe Microscope) である²⁾。ホール素子は微小化が容易であり、最近、2次元電子ガス系の GaAs/AlGaAs を素子として用いることで素子の有効面積を $0.3\mu\text{m} \times 0.3\mu\text{m}$ 程度まで微小化し、数 mG 程度の磁場感度が実現されている。多数の素子を集積できること、応答速度が速いこと、ダイナミックレンジが大きいことなどから今後、さらに発展が期待されている。

最後に電子顕微鏡を応用したローレンツ顕微鏡を紹介しよう。これは電子線の位相が磁場のベクトルポテンシャルによって変化する効果を利用し、異なる経路を通過してきた電子線の位相の干渉を観測するものである。空間的な分解能は原子スケールと高く、応答速度が速いが、実験は電子線の透過が主であること、装置が高価であること、磁場の絶対値が評価しにくいことなど技術的に難しく、研究対象が限られる。マニアックな装置である。

さて、本研究の核心部分である走査型 SQUID 磁気顕微鏡について述べよう。装置本体はセイコーインスツルメンツ株式会社の協力を得、これまで開発してきた「高感度磁気イメージングシステム」にさらに改良を加えたものである。磁場に極めて敏感な SQUID 素子を数 μm に微細化して用いており、超伝導体の量子化磁束である $\phi_0 = 2.07 \times 10^{-7} \text{Gcm}^2$ を容易に検出できる性能を持つ。あまり感度が良すぎて逆にノイズに弱く、また、液体ヘリウム温度まで素子を冷却する必要があることから、試料の冷却技術や走査技術を含めて、全体として高度な低温技術や微細加工技術が開発のキーポイントとなる。特に SQUID 素子の開発に関してはセイコーインスツルメンツ株式会社がすでにある程度の経験と実績を持っていることから重要な研究パートナーである。装置開発上の核心は、「SQUID の感度を落とすことなくどこまで微小化できるか」にかかっている。現状では直径 $10\mu\text{m}$ の SQUID リングを用いているが、最終的にはこれを数 100nm まで微細化し、かつ十分な測定感度を確保することにある。SQUID リングを小さくすればするほどリングのインダクタンスと浮遊インダクタンスの比が小さくなるから、感度が悪くなってしまうのである。もし、直径 200nm の SQUID リングで動作が可能となれば、空間分解能は 50nm 程度となり、ナノメーター級の磁気顕微鏡が誕生することになる。この辺が装置開発上の目標である。当然ながら、このような磁場感度と空間分解能を持つ装置はこれまで存在しない。

さて、「こんな装置を開発して何の役に立つのか？」とスポンサーの方々はずでいら立っておられるかもしれない。最初にも述べたが、「磁場の形」を微視的スケールで観測する手段はこれまで確立していなかったので、この領域は全く未知の研究領域であり、あらゆるものが研究の対象となりうる。興味ある対象物に存在する微小空間の「磁場の形」をそのまま見ることがまず重要である。すでに紹介した超伝導体中の量子化磁束の観察はそのほんの一例にすぎないが、高温超伝導体では磁束状態が特異であることから、この分野は格好の研究対象となる。まだ予備的な研究段階ではあるが、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の高品質薄膜で観測された「磁場の形」の一例を図 1 に紹介しよう。超伝導体内にトラップされた量子化磁束一つ一つの持つ「磁場の形」が事実に観測される。量子

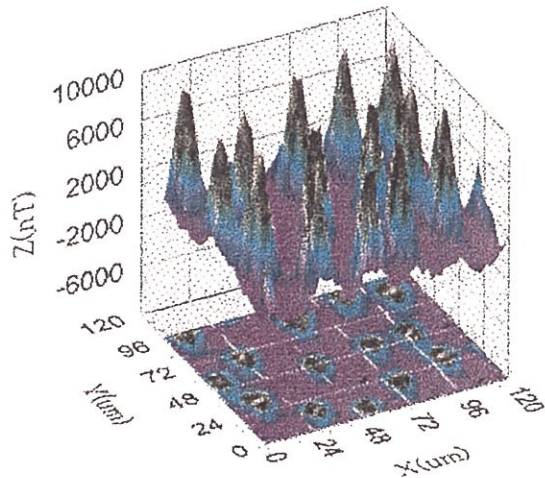


図1 高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜にトラップされた量子化磁束。各々は $2.07 \times 10^{-7} \text{Gcm}^2$ の値を持ち、この値以外のものは観測されない。

化磁束の存在形態は内在するピン止め中心と相まって多様な存在形態を持ち、これを解析することによって薄膜や超伝導線材の欠陥を調べることができ、超伝導材料開発に重要な貢献をするものと考えられる。また、SQUID 顕微鏡は超伝導機構の解明に関連する新しい物理現象の観測手段としても重要な貢献をするものと期待されている³⁾。

そのほかにも面白い研究対象がたくさんある。現在進行中の研究で実験手段をこの走査型 SQUID 磁気顕微鏡に置き換えるだけでも相当数のトピックスがある。たとえば、最近、酸化物全般にわたった共通の問題として電荷秩序状態（ストライプ）がとりわけ話題となっているが、実は磁気秩序状態も同時に発生していることが多い。これはよく知られているように、金属磁性体でも磁気秩序状態が発生し、空間的なスピンの不均一分布が発生するとそれに伴い電荷密度の空間分布も不均一に変化することとよく似ている。ただし、酸化物の場合、電荷の秩序状態が発生すると多くの場合、電荷は局在する点が異なっているようである。このような空間的な磁気秩序が強磁性的であると、結晶中に磁区構造が発生して、磁壁が磁場とともに極めて複雑かつ多様に変化することが最近明らかになってきている⁴⁾。磁気ネットワークのフラクタル現象もその一つである。このような対象に本装置を用いることでストライプ構造や相転移機構をさらに詳細に解明することができよう。

強磁性体はバルク体としての応用である「磁石」のみでなく、常にハイテク産業の花形材料の一つとして応用と密接に関連して発展してきた。磁気記録密度は最近、 $100\text{GB}/\text{inch}^2$ に到達する勢いで時とともに急速

に現在も増加している。このような高密度磁気記録はその材料開発研究上、記録状態の観察が必要不可欠である。この研究で開発される走査型 SQUID 磁気顕微鏡はこの目的にピッタリであり、商業的にも魅力的である。

そのほか、いろいろなアイデアはつきないが、研究が始まったばかりであり、空論に過ぎないとおしかりをいただく恐れがあるのできちんとした結果ができるまでのお楽しみとしてとっておこう。いずれにしろ、この装置は微視的空間にある「磁場の形」を覗き見るための全く新しい物性解析手段を提供する。空間的に規則性があれば磁気散乱（たとえば中性子散乱など）による完成された強力な手法が使えるが、規則性が無い場合はほとんど無力化してしまう。この SQUID 磁気顕微鏡はそういう意味でも磁気散乱法と相補的な情報を与える新種の強力な実験手段となるであろう。当面の研究目標は数100nm の領域の「磁場の形」を見ることにあるが、さらに空間分解能をあげ、原子1個の持つ磁場分布を計測できないであろうかという想像力をたくましくしてしまう。このような究極的な原子レベルの「磁場の形」を見るのが実は私の本当の夢である。

参考文献

- 1) Y. Martin and H.K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. 50(1987)1455.
- 2) A. Oral, S. Bending and M. Henini, Appl. Phys. Lett. 69(1989)1324.
- 3) 特筆すべき一例として、高温超伝導の電子対が d 波であることを決定した実験結果 (C.C. Tsuei, et al., Phys. Rev. Lett. 73(1994)593.) と、P.W. Anderson が一時主張した高温超伝導の層間結合モデルを否定した実験結果 (J.R. Kirtley, K.A. Moler, G. Villard and A. Maingnan, Phys. Rev. Lett. 81(1998)2140.) をあげておく。このほかにも超伝導の機構に絡んだ重要な実験が可能となる。
- 4) 磁区の移動のみでなく、それに伴って磁気抵抗も大きく変化することが知られている。(U. Welp and G.W. Crabtree, private communication.)