

掲載内容 (サマリー) :

特集 : SQUID ・ 医療機器

- ランプエッジ型接合を用いた HTS-SQUID の作製とノイズ特性
 - High- T_c SQUID を用いた太陽電池パネル電気特性分布計測システム
 - HTS-SQUID グラジオメータを用いた組物 CFRP の非破壊検査
 - 高温 SQUID を用いた非破壊検査技術
 - レーザ SQUID 顕微鏡による太陽電池欠陥評価
 - SQUID を用いた磁氣的免疫検査の定量評価に向けて
 - 超低磁場機能的核磁気共鳴画像装置(ULF-fMRI)の可能性
 - 高温超伝導磁力計を用いた金属資源探査装置 (SQUITEM) 技術の現状
-
- 超電導関連 2011 年 8-9 月の催し物案内
 - 新聞ヘッドライン (6/17-7/18)
 - 超電導速報—世界の動き (2011 年 6 月)
 - 「2011 Cryogenic Engineering Conference (CEC) & International Cryogenic Materials Conference (ICMC)」報告
 - 隔月連載記事—やさしい超電導リニアモーターカーのおはなし (その 4)
 - 読者の広場(Q&A)—最近、電界効果を用いて新たな 超伝導材料を開発したという記事がありました。これはどのような手法で、今後どのような応用が期待されるのでしょうか?

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-7318

超電導 Web21 トップページ : <http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：SQUID・医療機器

「ランプエッジ型接合を用いた HTS-SQUID の作製とノイズ特性」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 デバイス研究開発部
部長代理 安達成司

SQUID は超高感度の磁場センサである。超電導現象を利用するという事は冷却システムが必要となり、室温付近で動作する他のデバイスに比べると大きなデメリットを持っていると言わざるを得ない。しかし、他の物理現象ではなかなか到達し得ない感度を実現できる SQUID への期待は大きい。これまで医療・バイオ（脳磁、心磁、免疫検査、低磁場 MRI）、分析・評価（非破壊検査（材料・食品・電子部品）、磁気顕微鏡）、磁気探査（資源探査、遺跡調査）などの広範囲にわたる応用が提案され、実際にシステムとして実証試験等が行われ、一部は工業製品として販売されている。世間に広く普及し一般に用いられるための条件は、システムの実現できる性能がユーザの要求する信頼性・コスト・使い勝手と見合うかどうかである。この分岐点となる条件をクリアするための努力が懸命になされている。

近年、ISTEC ではランプエッジ型接合を用いた高温超電導（HTS）SQUID の作製プロセスを立ち上げ、各種用途に応じた実用システムの作製/評価/実証を行っている。これまでは比較的簡単なプロセスで作製可能なバイクリスタル型やステップエッジ型接合の使用が主流であったが、ランプエッジ型接合及び超電導交差配線を含むチップの作製プロセスを立ち上げることによって回路設計における自由度が飛躍的に増し、これまで諦めざるを得なかった複雑な回路レイアウトのチップ作製も可能になった。

チップ作製における最重要課題は歩留りと特性向上である。前者に関しては、徹底的なプロセス管理が重要となる。特に歩留り低下のボトルネックとなっているのはジョセフソン接合作製工程である。最近ではレイアウト設計にも工夫を凝らして、基板上に使用可能な SQUID が得られるチャンスを複数個配置することで良品チップがとれる確率を増やしている。後者の特性向上に向けては相変わらずトライアンドエラーの試行錯誤を繰り返しているのが実状である。我々が試した中では、接合バリヤ部分に銅が2割ほど少なくなった組成の上部超電導電極材料を極薄く堆積する手法が良好な接合特性を示しており、 $15 \times 15 \text{ mm}^2$ 基板に作製したマグネットメータにおいて $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@77 K, 1 kHz) のホワイトノイズが観測されている。上述の歩留り向上レイアウトを適用して、接合作製以外の工程に問題が無ければ8割程度の歩留りで $10\text{--}80 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@77 K, 1 kHz) のチップが作製可能になってきた。

これまで考えられてきた SQUID 応用における信号磁界の大きさはフェムトテスラ ($\text{fT} = 10^{-15} \text{ T}$) からナノテスラ ($\text{nT} = 10^{-9} \text{ T}$) の範囲にある。脳磁や心磁測定には最も厳しい数 fT の低ノイズが要求され、低温超電導 (LTS) SQUID が用いられている。現在の我々の技術レベルでは脳磁計測にはまだ届かないまでも、その他のかかなり広範な SQUID 応用に関しては充分対応できるものと思われる。SQUID で実現できる極限性能を用いる応用は LTS に任せて、それ以外の応用を簡便なシステムで実現して行くところに HTS-SQUID の活路がある。もちろんシステム開発においてはチップのノイズ性能だけでなく周波数特性やスルーレートさらには FLL 回路等の駆動系エレクトロニクス、環境雑音の除去技術や冷却技術等、それぞれの応用に応じた開発要素が多々あるが、チップ作製プロセスに関する限り実用システム開発に対して ready の状態は確立しつつあると言って良いだろう。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID・医療機器

「High- T_c SQUID を用いた太陽電池パネル電気特性分布計測システム」

岡山大学大学院
自然科学研究科
准教授 紀和利彦

1. はじめに

現在、クリーンかつ安全、枯渇の心配をほとんどする必要がない自然エネルギーの活用が求められている。その中でも太陽電池による発電は、システムの構造がシンプルであるため、設置場所を選ばずかつ、メンテナンスをほとんど必要としないなどの特徴を持っており、積極的な導入が進められている発電方法である。太陽電池パネルの検査は、端子間の電流・電圧特性を計測することが一般的であり、太陽電池パネルの種類ごとに多くの JIS 規格が設定されている。しかしながら、各太陽電池パネルの効率低下、出力以上の原因を検査するためには、端子間出力の計測のみでは困難であり、パネルの各種面分布を計測する必要がある。現在、様々な計測手法が研究・開発されている。例えば、欠陥に起因するエレクトロルミネッセンス (EL) 発光を CCD カメラにより計測するシステムがある。マイクロクラックの検出が可能である一方、発光を伴わない欠陥の検出が困難である。近年では、大阪大学の糸崎氏のグループがレーザー SQUID を用いた非破壊検査を提案し、特にレーザー波長の選択により、深さ方向の情報を得ることに成功している。

我々のグループでは、交流変調した電圧を太陽電池パネルに印可し、発生する磁場分布を計測することで、太陽電池パネル面内の電気特性分布を評価するシステムを開発しているので報告する。

2. 電気特性分布計測システム

図 1 は、構築した電気特性分布計測システムの構成図である。まず、暗箱に設置された太陽電池パネルに一定オフセット電圧 V_{dc} を重畳した交流電圧を印可する。この時、流れる電流によって発生する磁場は、パネル裏面に設置されたピックアップコイルによって検出される。ピックアップコイルのサイズは、内径 10 mm X 20 mm、200 巻とした。検出された磁場は、2 重パーマロイシールド内に設置された HTS-SQUID へ、インプットコイルを介して伝達される。HTS-SQUID で検出された磁場は、ロックイン増幅器によって検波され出力される。この時、得られる信号は磁場の電圧微分 (dB/dV) に比例する。検出磁場方向を太陽電池パネルの接線方向としたとき、磁場の大きさは、ピックアップコイル直下の電流に比例するため、得られた微分信号の逆数は、電圧の電流微分すなわち、太陽電池パネルの微分抵抗を反映している。

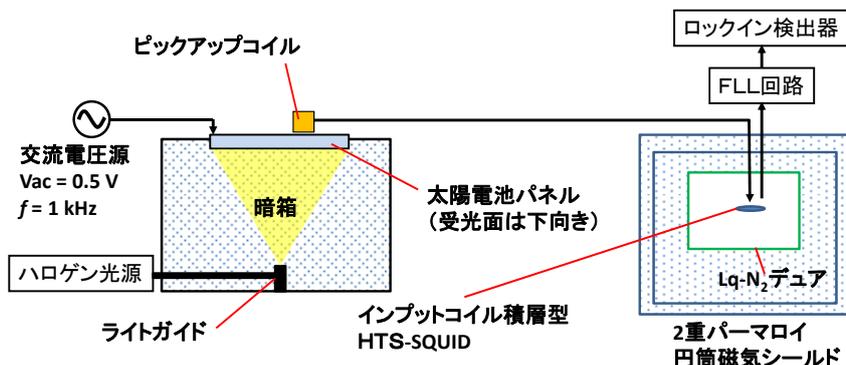


図 1 電気特性分布計測システム

図2は、オフセット電圧を8.8Vおよび1.0Vとしたときの得られたdV/dB分布である。パネルの面内において、微分抵抗に分布が生じていることがわかる。また、印可電圧すなわち、負荷抵抗の違いにより、分布が変化していることがわかる。一般的に、微分抵抗は、負荷抵抗が無大の極限で、pn接合の直列抵抗、負荷抵抗が0の極限で接合抵抗を反映することが知られており、本システムで得られた分布もこれらの抵抗成分を反映していると考えられる。今後、空間分解能の向上および位相情報の取得を実現することにより、太陽電池の電気特性との関連を解析していく。

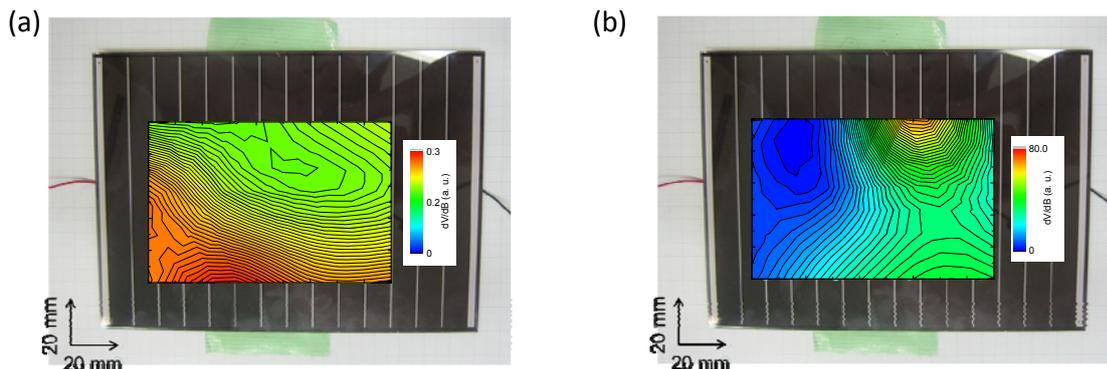


図2 dV/dB 分布分布 (a) $V_{dc}=8.8\text{ V}$, (b) $V_{dc}=1.0\text{ V}$

3. まとめ

本稿では HTS-SQUID を用いた太陽電池パネル電気特性分布計測システムの紹介を行った。システムによって得られた分布は、太陽電池の直列抵抗および接合抵抗分布を反映していることが示唆された。

本稿で紹介した研究成果は、産学イノベーション加速事業により実施したものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID・医療機器

「HTS-SQUID グラジオメータを用いた組物 CFRP の非破壊検査」

豊橋技術科学大学大学院
環境・生命工学系
准教授 廿日出 好

現在、軽量化による省エネルギーや燃費向上の観点から、一般の金属よりも軽量で、比強度と比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が、航空機や自動車に利用されている。近年、より高い強度や機能性を求め、組物（斜め方向に配向した繊維が絡み合った細長い布）状に炭素繊維の束を編み込んだ組物 CFRP が開発されている（図 1）。組物 CFRP では、負荷を支える繊維束が連続して配向した構造となっている。このため従来の CFRP よりもすぐれた強度・弾性特性を示し、最終製品形状に合わせて成型可能、異なる種類の繊維を使用できる、中央糸を使った強化やカーボンナノフィラー添加による母材エポキシ樹脂の強化が可能など多くの特徴があり、新しい構造の材料が次々に開発されている。

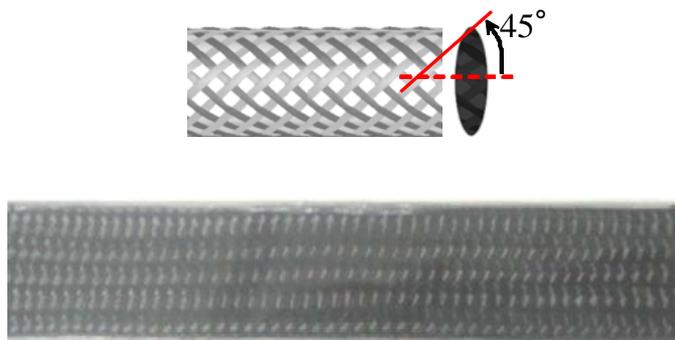


図 1 丸打組物（上）と丸打組物 CFRP（下）

これら新材料の力学特性や破壊メカニズムの解明が現在行われているが、応力ひずみ特性測定や顕微鏡観察を行う破壊検査が主な手段となる。一方、材料内部の情報を得るため、アコースティックエミッションや X 線、超音波を用いた非破壊検査技術も適用されているが、直径数 μm の炭素繊維からなる繊維束の断線を検出・位置同定したり、欠陥の定量化を行うことは困難である。

そこで、豊橋技術科学大学では炭素繊維断線時の導電性の変化に着目し、高感度かつ高空間分解能を有する高温超伝導（HTS）SQUID グラジオメータを用いた非破壊検査技術を組物 CFRP に適用して、非破壊検査の実現可能性を検討している。ここでは、1 mm サイズの小型な一次微分型 HTS-SQUID グラジオメータを電流検出器として使い、炭素繊維に電流を注入した組物 CFRP から発生する磁場勾配の分布を二次元走査して、内部の電流分布を可視化する手法を適用した。

図 1 に示す丸打組物 CFRP サンプルに上記手法を適用した際の、サンプル内部の疑似電流分布を図 2 に示す。健全なサンプルの場合、サンプル左から注入した電流が、端効果の現れている上下端を除いて、およそ一様に右方向に流れている様子を示している（図 2 上）。一方、サンプル上端中央に約 1 mm の切り欠きを設け、数本の繊維束の連続性を切断した場合、切断部両側の切断繊維束に沿って流れる電流量が減少しており、断線部から離れた場所では切断束に流れる電流量は周辺とあまり変わらないという結果となった（図 2 下）。これらの結果から、繊維束が連続している組物

CFRP では、電流は主に導電率の高い繊維束中を流れるが、繊維束断線が生じると、断線繊維束と接触する他の繊維束に接触抵抗を介して電流が伝達されることが示された。

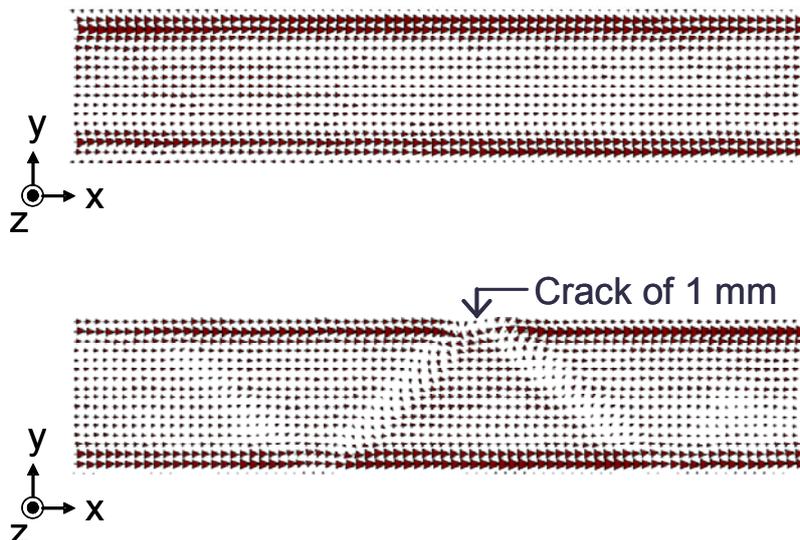


図2 HTS-SQUID グラジオメータを用いた組物 CFRP 内部の電流分布可視化結果。
健全なサンプル（上）と上端中央に切り欠きをもつサンプル（下）の場合

このように、本手法は繊維束断線の検出・位置同定だけでなく、組物 CFRP 内部の繊維の状態（繊維束配向の均一度、繊維密度の濃淡、束間接触具合）まで推定できる可能性がある。現在、共同研究を行っている京都工芸繊維大学の濱田・仲井グループで引張試験を行った際に、破壊検査と SQUID による非破壊検査を適用して、組物 CFRP の破壊メカニズムの解明を行っている。メカニズム解明だけでなく、欠陥の定量化が行えるようになれば、組物 CFRP のさらなる発展・普及が期待できる。なお、この一連の研究では、ISTEC/SRL が開発したランプエッジ型ジョセフソン接合を用いた積層型 HTS-SQUID グラジオメータを使用している。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID・医療機器

「高温 SQUID を用いた非破壊検査技術」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 デバイス研究開発部
主任研究員 河野丈治

1. はじめに

ISTEC 超電導工学研究所デバイス研究開発部では、銅酸化物高温超電導材料を用いたエレクトロニクスデバイス用の薄膜積層及び接合作製プロセスの高信頼化研究を行うと共に、究極の感度をもつ磁気センサーである SQUID (Superconducting Quantum Interference Device: 超電導量子干渉素子) の開発を行っている。また、高温 SQUID を用いた非破壊検査装置や金属資源探査装置などの開発を行うと共に、SQUID 非破壊検査装置を利用した線材開発の支援も行っている。ここでは、主として Y 系線材や機器への適用を目指した非破壊検査技術及び検査装置に関する研究状況を紹介する。

2. SQUID 非破壊検査の特徴と開発状況

SQUID の用途としては、心磁計測、免疫検査、超低周波 NMR/MRI 等の医療・バイオ応用に加え、素材や構造物の非破壊検査の検討がなされている¹⁾。SQUID は究極の感度を持つ磁気センサーで、その感度は地磁気の 10 億分の 1 程度の脳磁を測定することも可能である。また、他の磁気センサーと異なり非常に広帯域で、数十 Hz の低い周波数でも感度低下が少ないという特徴がある。

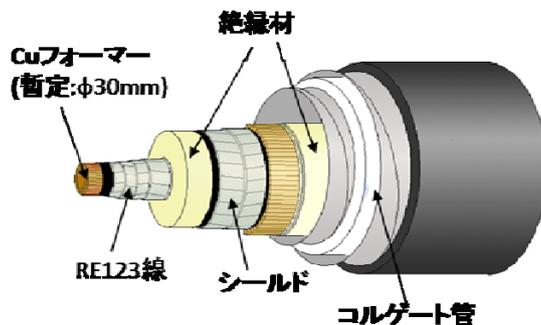
SQUID を用いた非破壊検査にはさまざまな手法があるが、デバイス研究開発部では交流磁場を非破壊検査の対象に印加し、欠陥により生じる磁場変化を検知する渦流探傷法: ECT 法 (Eddy current test) に関する研究を行っている。ECT 法では測定対象となる金属導体にコイルにより交流磁場を印加し、電磁誘導の原理を利用して交流渦電流を注入する。ここで、励磁周波数 f に対して誘導電

流の侵入深さは $\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ で与えられ (μ は導体の透磁率、 σ は導体の導電率)、印加する交流磁場の周波数が低いほど誘導電流の侵入深さは大きくなる。具体的には、対象がアルミニウムや銀の場合、励磁周波数 10 Hz に対し侵入深さは約 20 mm となる。

これまで、この手法を Y 系超電導線材、とりわけマルチフィラメント形状に細線加工された線材中の欠陥検査に適用し、その有用性を実証してきた²⁾。Y 系超電導線材評価装置においては、3 kHz 程度の周波数の交流磁場を T_c 以下に冷却した Y 系超電導線材の表面に印加し、欠陥により発生する微小な磁場変化を、検出コイル幅が 1 mm の SQUID を 5 チャンネル配列したアレイセンサーで検出する。本装置では、長尺線材フィラメント中の局所的な低 I_c 箇所や、剥離箇所の高速検出 (最大 80 m/h) が可能である。一方、厚さ 2 mm のアルミニウム板を多層化した試験体を用いた基礎実験では、励磁周波数を 40 Hz 程度にすることにより、表面から 40-50 mm の深さにあるスリット状の欠陥検出が可能であることを確認している³⁾。

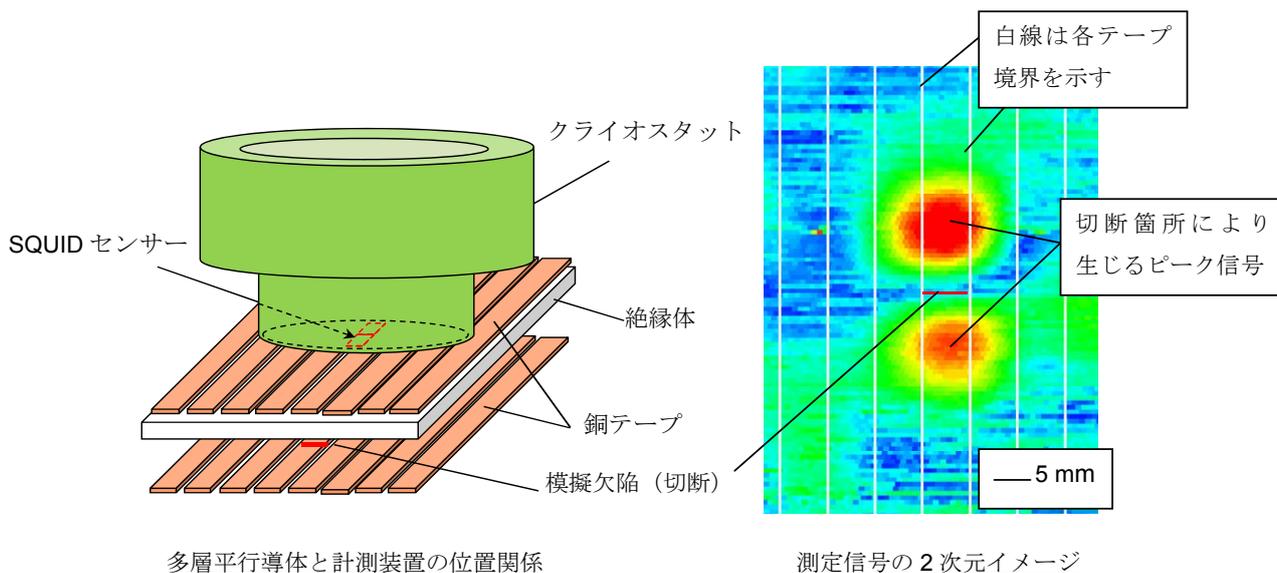
Y 系超電導線材素線や多層構造試験体中の欠陥の非破壊検査に見通しを得たため、次のステップとして、より複雑な構造をもつ電力ケーブル等の超電導電力機器を想定した非破壊検査技術の検討を進めている。

2020年頃に実用化が想定されている Y 系超電導電力ケーブルのうち高電圧 (275 kV) 仕様のケーブルは、中心部に直径約 30 mm の Cu フォーマを持ち、その上に薄い絶縁紙で隔てられた 2~3 層の超電導線 (導体層)、約 20 mm 厚の絶縁層、1~2 層の超電導層 (シールド層) が積層された構造をもっている (下図、詳細仕様は現在検討中)。導体層、シールド層は幅数ミリのテープ状超電導線材が並列配置されている (らせん巻き構造)。超電導電力ケーブルのような中間層に絶縁層をもつ多層導体内部の非破壊探傷は、ECT 法以外の手法では困難である。究極の感度をもつ SQUID と ECT 法を組み合わせ、シールド層の上部から厚い絶縁層を介して内部導体箇所の断線等を検出することを目標に、検査装置の開発・改良を行っている。検査装置は、1 チャンネルの SQUID センサー (磁場の差分を検出するグラジオメータセンサ) を冷却するクライオスタット (液体窒素槽からの伝導冷却)、SQUID 制御回路、励磁コイル及び電源、ロックインアンプ、試験体を走査するための X-Y ステージなどから構成される。



275 kV 級超電導ケーブル断面イメージ

これまで、ケーブルを模擬した並列多層導体の試験体を作製し、非破壊検査装置の検出能力について検討を行った。試験体は、超電導テープ線材を模擬した幅 5~10 mm、厚さ 0.05 mm の銅テープと中間絶縁層を模擬したアクリル板を組み合わせで作製した。検討の結果、5 mm 幅の銅テープからなる並列導体の中央部の断線箇所を 5 mm の絶縁層、上部並列導体 (模擬シールド層) の上から検出することが可能であるとの見通しを得た。



多層平行導体と計測装置の位置関係

測定信号の 2 次元イメージ

3. 今後の展望

SQUID センサーのもつ高い磁場感度を利用した渦流探傷法により、中間層に厚い絶縁層を介した複雑な形状をもつ試験体についても欠陥探査が可能との見通しを得た。今後、より機器に近い形状の試験体を作製し、欠陥に起因する信号の検出を目標とする予定である。また、低周波での感度低下が少ないという SQUID の特徴を最大限利用した深部欠陥の検査技術の高度化についても、さらに検討を進めていく予定である。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により実施したものである。

参考文献:

- 1) <http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h21theme04.html>
- 2) T. Hato *et al.* *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (2009) 804-807.
- 3) J. Kawano *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (2011) 428-431.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID・医療機器

「レーザ SQUID 顕微鏡による太陽電池欠陥評価」

大阪大学大学院
基礎工学研究科電子光科学領域
教授 糸崎秀夫

高温超電導 SQUID の応用研究として、SQUID 磁気顕微鏡の検討を行ってきた。磁気分布観察の空間分解能を改善するため、高透磁率針を利用し、かつ先端と試料間にトンネル電流を流す STM-SQUID などの検討を実施している。また、半導体材料へ光を照射して発生する電流を磁氣的に観察することにより、半導体の非破壊非接触検査の可能性についても検討を進めている。ここでは、レーザ SQUID 顕微鏡について紹介する。

レーザ SQUID 顕微鏡は、レーザを使って半導体試料に電流を誘起させる。誘起された電流により磁場が生じ、これを SQUID で捉える。レーザを照射する場所を変えていくと、その場所の特性を反映して電流の大きさや流れる方向が変わり、SQUID で検出する磁場も変化するので、レーザ SQUID 顕微鏡における空間分解能は、レーザスポットサイズに依存することになる。

レーザ SQUID 顕微鏡の応用として太陽電池の欠陥評価がある。従来、太陽電池の評価の一つに変換効率の面内分布の評価があり、Laser Beam Induced Current 法 (LBIC 法) では、太陽電池上でレーザを走査し、外に取り出される電流値をマッピングするもので、電極や配線が必要であった。そこで、レーザ SQUID 顕微鏡を用いることで、電極や配線を不要とし、さらに、電極を作成する前の段階での評価を可能とした。また、レーザと SQUID との位置関係を工夫することで、レーザ照射点から流れ出る電流の大きさと方向、つまり、電流ベクトルを推定することも可能である。

レーザ SQUID 顕微鏡装置の原理図を図 1 に示す。強度変調したレーザをサンプルに集光し、サンプルに誘起される電流から発生する磁場を、ニードルを使って SQUID に伝達している。ニードルは、高透磁率材料でできており、ニードル先端付近の磁場を拾うために使用している。SQUID は FLL 回路で駆動され、ロックインアンプにより、レーザ変調周波数と同じ周波数成分のみを抽出し、これを PC に保存している。ロックインアンプを使用することにより、ノイズを効果的に除去できる。レーザ SQUID 顕微鏡の特徴の一つは、このように、ロックインアンプが使用できることが挙げられる。通常の走査型 SQUID 顕微鏡では、サンプルに存在する磁場を測定するため、変調技術は使用できないが、レーザ SQUID 顕微鏡では、レーザを使って磁場を誘起させるため、能動的な変調が可能である。

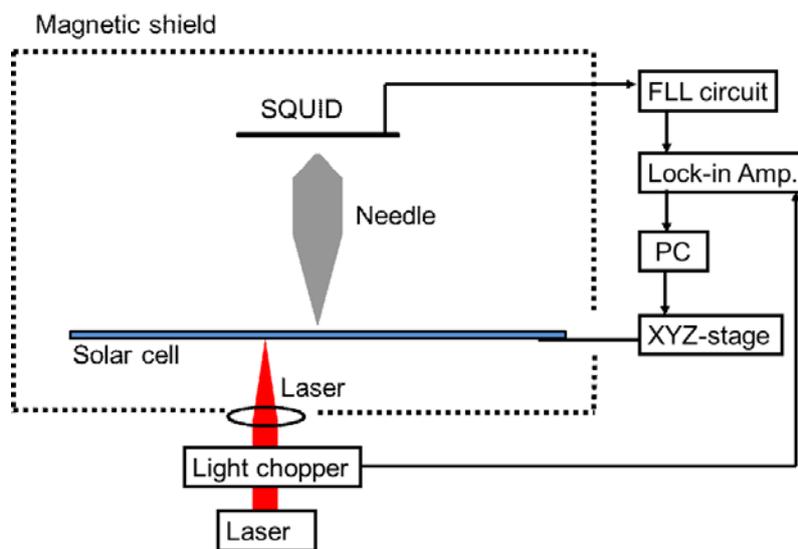


図 1 レーザ SQUID 顕微鏡装置の概略図

図2は、多結晶太陽電池の評価結果の一例である。(a)の光学像では、数mm程度のいくつかの結晶粒が確認できる。結晶粒界では、電気的な欠陥が存在する可能性がある。(b)のレーザ SQUID 像では、一部の結晶粒界に沿って、線状に、磁場強度が低下する場所があることが確認できた。さらに、結晶粒内部にも、線状に磁場強度が低下する箇所も確認できた。これらの箇所は、(c)の LBIC 像でも同様に確認され、レーザ光による光励起電流の発生が少ない、すなわち太陽電池変換効率が低い場所であることを示している。LBIC 像とレーザ SQUID 像は、よく一致しており、レーザ SQUID 顕微鏡で、LBIC 法と同等な検査を非接触で行えることが示された。

レーザ SQUID 顕微鏡は、太陽電池以外でも、光電変換材料の観察や、光によるスピン制御デバイスの部分的な動作状態観察など、多様な応用が今後期待される。

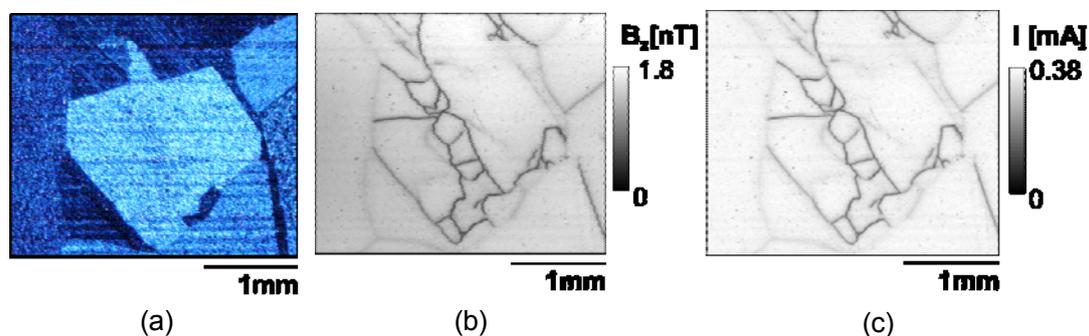


図2 太陽電池の欠陥観察 (a) 光学像 (b) レーザ SQUID 像 (c) LBIC 像

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID・医療機器

「SQUID を用いた磁氣的免疫検査の定量評価に向けて」

九州大学
超伝導システム科学研究センター
センター長 円福敬二

ナノメータサイズの磁性微粒子を高分子等で被覆し、その表面に検査試薬や薬剤を固定したものは磁気マーカーと総称されており、種々のバイオ応用への展開が期待されている。これまでに細胞や病原菌の分離・精製やMRI用の造影剤のための磁気マーカーが実用化されている。また、磁気マーカーを用いた免疫検査、磁気イメージング、磁氣的ハイパーサーミア、ドラッグデリバリー等の研究開発がなされている。

免疫検査は血液検査等の医療検査において、疾患由来の蛋白質や病原菌等のバイオ物質を、抗原抗体の結合反応を用いて検出する方法である。この検査においては、バイオ物質（抗原）に選択的に結合する検査用の磁気マーカー抗体を用いて、バイオ物質の種類と量を磁氣的に検出する。この磁氣的検査法には“洗い工程”を省いた液相での検査が可能である等の、従来の光学的手法にはない種々の特長があり、新規な検査法として近年注目されている。

ところで、磁氣的検査法の性能は測定システムとともに磁気マーカーの性能により決定される。測定システムについては、SQUIDを始めとして種々の磁気センサを用いた高感度なシステムがこれまでに開発されている。これに対して、免疫検査用の磁気マーカーの開発は遅れており、分離・精製用に開発された磁気マーカーを代用しているのが現状であり、その高性能化が望まれている。

図1(a)に磁気マーカーの模式図を示す。実際の磁気マーカーでは作製過程において磁気ナノ粒子の凝集が避けられず、磁気粒子はナノクラスターとして存在する。この磁気クラスターの磁気特性が免疫検査の性能を決めることになるが、その特性はクラスターのサイズやクラスター内の磁気粒子間の結合度、等の多くのパラメータに依存することになる。このため、実際の

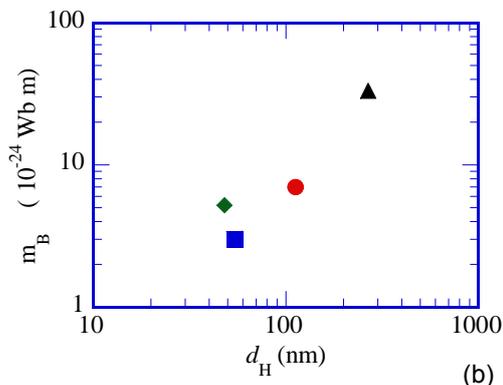
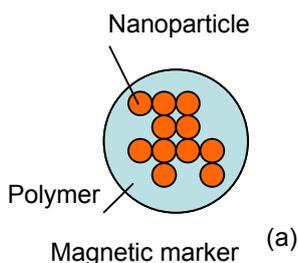


図1 (a)磁気マーカーの模式図、(b)種々の磁気マーカーのサイズ d_H と磁気モーメント m の評価結果。

使用条件での磁気マーカーの磁気特性の定量的な評価が必要となる。特に、磁気クラスターのサイズ d_H と磁気モーメント m の大きさを定量的に評価する必要がある。これは、磁氣的免疫検査では、サイズ d_H が液相検査の基本となる溶液中でのブラウン緩和時間を決め、磁気モーメント m がクラスターからの磁気信号の強さを決めるためである。

このため、これらの量を定量的に評価する手法を開発した。図1(b)に市販の磁気マーカーの測定結果を示す。この結果を用いることにより、磁氣的な免疫検査を定量的に評価することが出来る。なお、同図に示すように m の値は d_H とともに増加するが、単一粒子で予想される $m \propto d_H^3$ の関係に

比べて弱い依存性を示す。この原因は磁気マーカーが磁気クラスターで形成されているためである。

図2は磁気的手法を用いた液相での免疫検査の例を示す。図2(a)に示すように、直径が $6.7\ \mu\text{m}$ のポリマー粒子の表面に固定用抗体を付けており、これに抗原(Biotin)を結合する。この後に検出用の磁気マーカーを投入すると、一部は結合して結合マーカーとなり残りは未結合マーカーとなる。未結合マーカーは溶液中で高速にブラウン回転するのに対して、結合マーカーはほとんど回転しない。この結果、両者の磁気特性は大きく異なり、この違いを利用することにより“洗い工程”なしで両者を磁気的に識別することが可能になる。

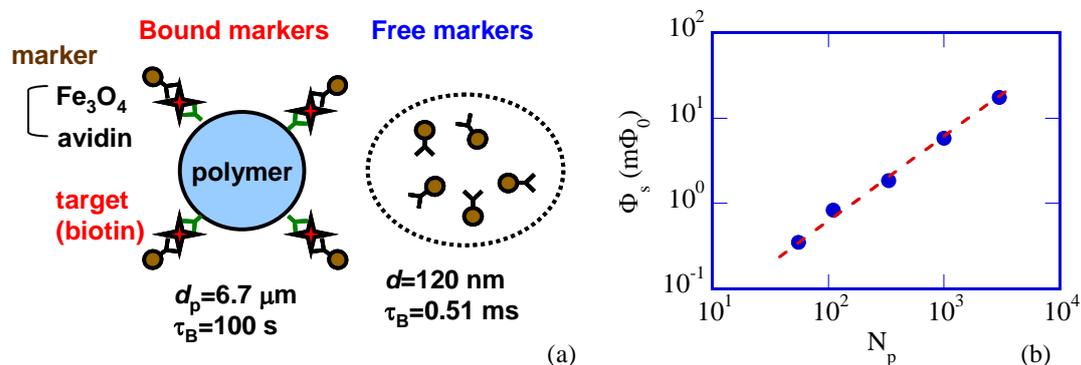


図2 (a)固定用ポリマービーズを用いた液相免疫検査法、(b)ビオチンの検出。
ビオチンを固定したポリマービーズの数 N_p と磁気信号の関係。

図2(b)は本方法を用いてビオチンと呼ばれる蛋白質を検出した例である。図の横軸はビオチンを固定したポリマービーズの数 N_p を表しており、縦軸は SQUID で検出した磁気信号を示している。図に示す様に、 $N_p=50$ 個までの検出が可能である。ポリマービーズ 1 個の表面には 3,000~5,000 個のビオチンが固定されているため、 $N_p=50$ 個の検出は $1.5\sim 2.5 \times 10^5$ 個のビオチンの検出に相当する。この検出感度はモル濃度で表すと $6\sim 10$ atto-mol/ml となり、“洗い工程”を省いた液相でアトモルレベルの微量な検出が可能なが分かる

なお、本研究は長崎国際大学と日立製作所中央研究所との共同研究により行なわれた。

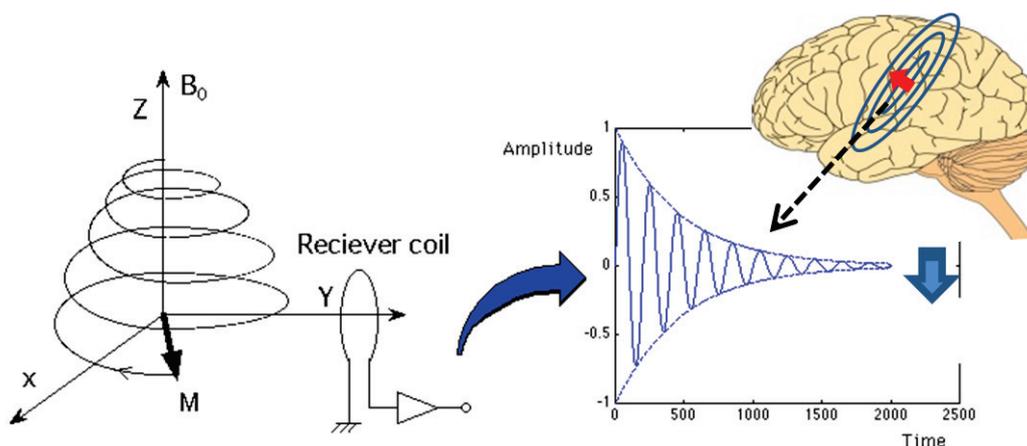
特集：SQUID・医療機器

「超低磁場機能的核磁気共鳴画像装置(ULF-fMRI)の可能性」

金沢工業大学
先端電子技術応用研究所
教授 樋口正法

1. はじめに

近年 SQUID を用いた低磁場核磁気共鳴画像装置が注目されている。静磁場が低磁場化すると、脳神経活動による微弱磁場の影響が無視できなくなってくる。この現象を利用することにより、従来の高磁場 fMRI（機能的核磁気共鳴画像装置）とは原理的に異なる新たな fMRI を実現できる可能性がある（超低磁場機能的核磁気共鳴画像装置：Ultra Low Field functional Magnetic Resonance Imaging (ULF-fMRI)）。なお、従来の高磁場 fMRI は主に血流量の変化（代謝）を画像化するのに対し、ULF-fMRI は神経活動を直接反映したものを画像化する点異なる。



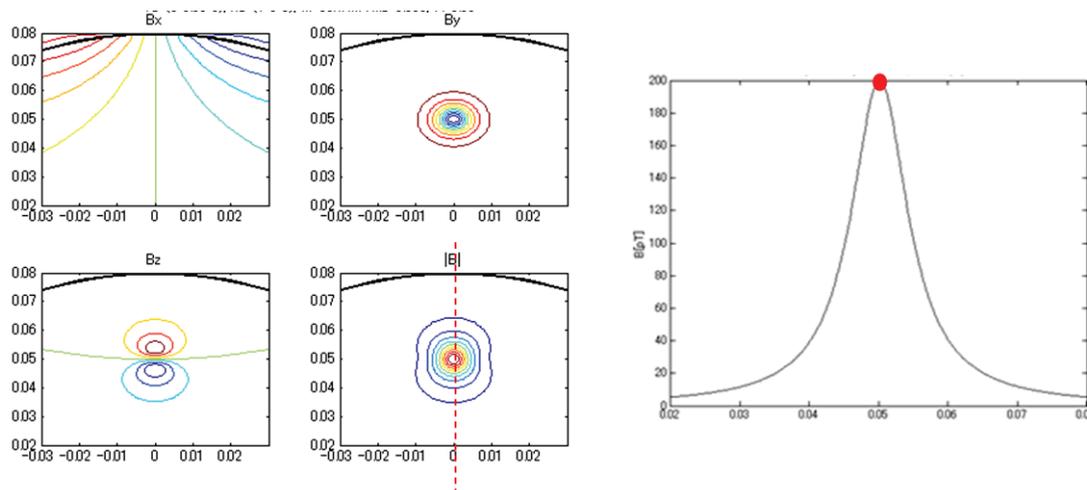
ULF-fMRI の原理

左：核磁気共鳴現象 (FID)、右：脳機能情報取得の原理

2. 脳神経活動に伴う脳内磁場

ULF-fMRI の実現可能性を検討するためには、まず脳神経活動による磁場の大きさを知る必要がある。脳神経活動による磁場を知る手段として MEG（脳磁計）が知られている。しかしながら、MEG は頭外での磁場強度および分布を計測するものであり、脳内磁場を直接知ることはできない。そこで、MEG 計測で用いられている脳神経活動モデルを用いて脳内磁場を見積もることとする。MEG 計測の一つである聴覚誘発脳磁場においては、音刺激提示後約 100 ms に観測される反応 (N100m) の脳神経活動モデルとして電流ダイポールがよく用いられる。我々の実測例では、そのダイポール強度は左右それぞれ 60 nAm、125 nAm であった。これらの値よりも小さい 50 nAm の電流ダイポールを脳神経活動の磁場源モデルと仮定し、脳内で発生する磁場を計算した。ただし、MEG で一般に用いられている磁場計算式は、球体外部の磁場を算出する式であり、球体内部に適用することはできない（頭を球体と仮定）。そこで、Heller 等が導出した式を用いて球体内部の磁場

を計算した¹⁾。下図に示すように電流ダイポール近傍では 200 pT 程度の磁場が発生する。なお、特殊な場合として、ラジアル方向を向く電流ダイポールは頭外には磁場を発生しない。このため、MEG では原理上計測できない。しかしながら、脳内には磁場を発生するため ULF-fMRI では計測可能である。



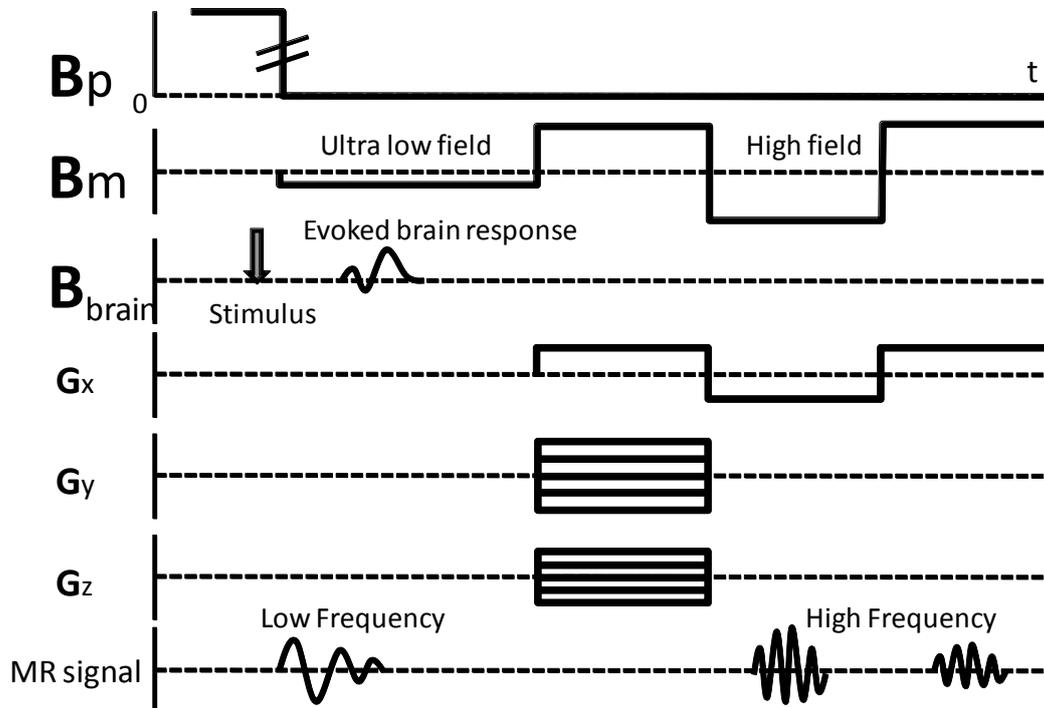
脳神経活動モデル（電流ダイポール）による脳内磁場
左：磁場の各成分（3方向成分）と絶対値の強度分布
右：磁場強度曲線（左図の破線上の値を示す）

3. ULF-fMRI の実現化に向けての課題

先に示したように脳神経活動に伴う磁場は、その活動源の近傍では数百 μT 以上の磁場強度を有する。従って、数 μT 以下の静磁場であれば核磁気共鳴現象に影響を及ぼす可能性がある。ドイツの Burghoff 等は 0.5 μT 中での核磁気共鳴信号の観測に成功しており²⁾、このような超低磁場下での信号検出は不可能ではない。しかしながら、超低磁場における勾配磁場の精度や低周波共鳴信号における周波数分解能の確保などが画像化の際に課題となる。例えば後者については、静磁場を 1 μT とした場合その核磁気共鳴周波数は約 43 Hz となる。離散フーリエ変換を用いる場合その周波数分解能は時間長の逆数になるため、0.1 Hz の周波数分解を得るためには 10 s もの時間長が必要である。データ数が足りない場合、不足分に 0 を入れて必要な時間長にする手法が用いられるが、その場合においてもデータ長に対応する窓関数が適用されているものと考えることができ、窓関数によるスペクトルの広がりには避けることはできない。

4. ULF-fMRI 用静磁場制御シーケンス

先に述べた課題を解決する方法として、信号検出時の静磁場を大きくし信号を高周波化する静磁場制御シーケンスを考案した。これは、核磁化磁場遮断直後の静磁場を超低磁場にして神経活動による磁場でスピンを磁場修飾し、その後極性を反転した静磁場を加えエコー信号を検出するものである。このときの信号は反転磁場前の低磁場中において神経活動の影響を受けたものであり、反転磁場を高磁場化することにより高周波化できる。また、画像化に必要な勾配磁場はこの反転磁場以降に印加することによれば、より大きな勾配磁場を用いることができ精度の確保が容易となる。現在、筆者等は本手法の実験的検証を行い、ULF-fMRI の実現化に向けて研究を進めている。



ULF-fMRI 用静磁場制御シーケンスの一例

Bp:核磁化用磁場、Bm:静磁場、 B_{brain} :脳磁場、
Gx,Gy,Gz:イメージング用勾配磁場、MR signal: 核磁気共鳴信号

参考文献：

- 1) L. Heller, D. Ranken, and E. Best (2004), The Magnetic Field Inside Special Conducting Geometries Due to Internal Current, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 51, No.8, 1310-1318
- 2) M. Burghoff, S. Hartwig, L. Trahms J. Bernarding (2005), Nuclear magnetic resonance in the nano Tesla range, Appl. Phys. Lett., 87,054103

特集：SQUID・医療機器

「高温超伝導磁力計を用いた金属資源探査装置（SQUITEM）技術の現状」

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）
資源探査部探査技術開発課
課長代理 荒井英一

1. はじめに

JOGMECは、金属資源探査を行う上で使用頻度の多い電磁探査の探査深度を向上させるために、平成13年度から17年度までの5年間で、高温SQUIDを用いた電磁探査装置（SQUITEM1号機）を開発した。平成18年度には、野外性を改善したSQUITEM2号機を製作して、現在、JOGMECの金属資源探査で活用しているところである。また、平成21年度からは、SQUIDのノイズレベルが更に低く、スルーレートや携帯性・操作性を更に高めた3号機を3年計画で開発している。本稿では、2009年8月号で報告した内容に引き続いて、金属資源探査において2号機を利用するメリットを再度述べるとともに、その後の2号機の適用事例、さらに、3号機の開発進捗について報告する。

2. SQUITEMの概要

時間領域電磁探査法（TEM法）は、地下の比抵抗分布を調べる物理探査法の一つである。銅電線による送信ループを地上に敷設し、オン・オフ時間のある交替直流をそれに通電すると、電流を遮断した直後に地下深部に向けて拡散する誘導電流が発生する。TEM法は、誘導電流が形成する磁場を地表で連続的に計測して、地下の比抵抗分布を調査する手法である。詳細は2009年8月号で記述したとおりである。

比抵抗の低い金属鉱床、または、それに付随する鉱徴（粘土化変質帯など）の位置を探る方法としてTEM法が多用されているが、近年の金属鉱床の深部化にともない、より探査深度が大きい装置が求められている。そこで、注目されているのが、従来装置のように誘導コイル型磁力計を用いて磁場時間微分値を測る代わりに磁場値を計測する方法である。磁場値は磁場時間微分値よりも時間減衰が遅いため、磁場値測定は従来の誘導コイルよりも遅い時間（深い深度）までデータを取得できる。磁場値を計測する磁気センサーとして、SQUIDは他の磁気センサーに比べてノイズレベルが極めて小さいこと、周波数帯域が広く金属資源探査の対象深度を十分にカバーできることから、金属資源探査用のTEM装置の磁気セ



図1 SQUITEM2号機の全容

ンサーとして適している。

SQUITEM2号機は、コントローラー、バッテリー、SQUID磁力計、測定制御用のノートPC、コントローラーとSQUID磁力計の結線ケーブル、コントローラーから送信機（送信ループに通電する装置）への同期信号の伝達ケーブル、その同期信号の増幅器から構成される（図1）。SQUITEMの周波数帯域はDC~100 kHz、SQUID磁力計のノイズレベルは約 $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、スルーレートは $1 \text{ mT}/\text{sec}$ 程度である。

3. 金属資源探査への適用事例

SQUITEM2号機の金属資源探査への適用事例として、2010年に実施したボツワナ東部でのニッケル探査の結果を紹介する。

調査地区は、金属資源ポテンシャルの高い始生代のリンポポ変動帯に位置する。調査ターゲットは、花崗岩質片麻岩に板状に貫入した超苦鉄質岩の中や片麻岩との接触部に賦存するニッケル鉱床である。

測定は正方形型の送信ループ（一辺 200 m）の中心で磁場を計測する送受信配置で行い、受信点の間隔は 100 m（一部、50 m）、合計 11 測線（測線長計 21.8 km、総測点数 250 点）でデータを取得した。その内、既知の鉱化帯の南延長を調査するために設定した測線での結果を図2と図3に示す。

図2は、この測線でのデータプロファイル図である。データプロファイル図とは、各測点の同じ時間（送信ループへの電流遮断後からの経過時間）での測定データを結線した曲線を複数の時間について同時プロットしたグラフであり、横軸は測線、縦軸は測定データを示す。プロファイルを構成する各曲線は、電流遮断後 11.8 μsec から 1.4 msec までの合計 20 個の時間に対応する。プロファイル図では、576300 mE から 576700 mE にかけて地下での低比抵抗の存在を示唆する顕著なピークが現れている。この範囲では、他の調査により超苦鉄質岩が存在していることが分かっているために、それに伴う鉱化が低比抵抗として捕捉された可能性があるとして解釈された。

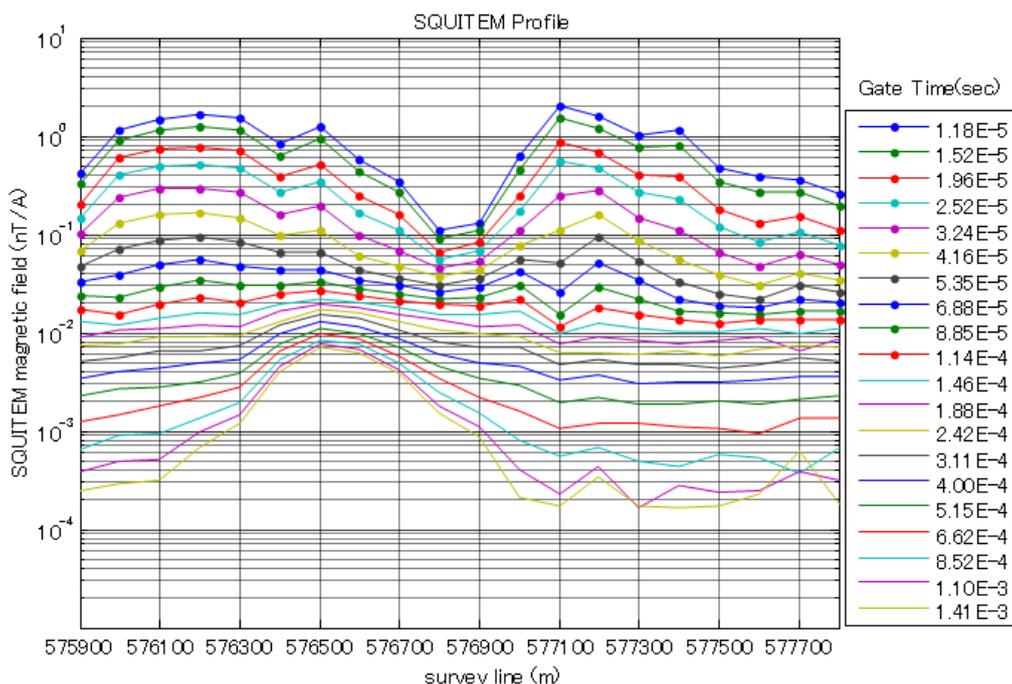


図2 2号機によるデータプロファイル図の例（ボツワナでのニッケル鉱床探査）

図3は、2号機で取得したデータから、地下比抵抗（水平多層構造）と測定値の理論値についてのフォワードモデリング、非線形最小二乗法並びに regularization 理論（例えば、Hansen、1998）に基づく1次元インバージョンの結果（地下の比抵抗断面）である。具体的には、各測点毎に1次元インバージョンを行って、その測点の直下の水平比抵抗構造を求め、それを繋ぎ合わせて作成した2次元断面である。1次元インバージョンでは、地下を深度700mまで深度に応じて層厚が大きくなる45層に分割し、regularization 理論を導入した非線形最小二乗法により実測値と理論値の差が十分に小さくなるまで繰り返し水平比抵抗構造を修正した。

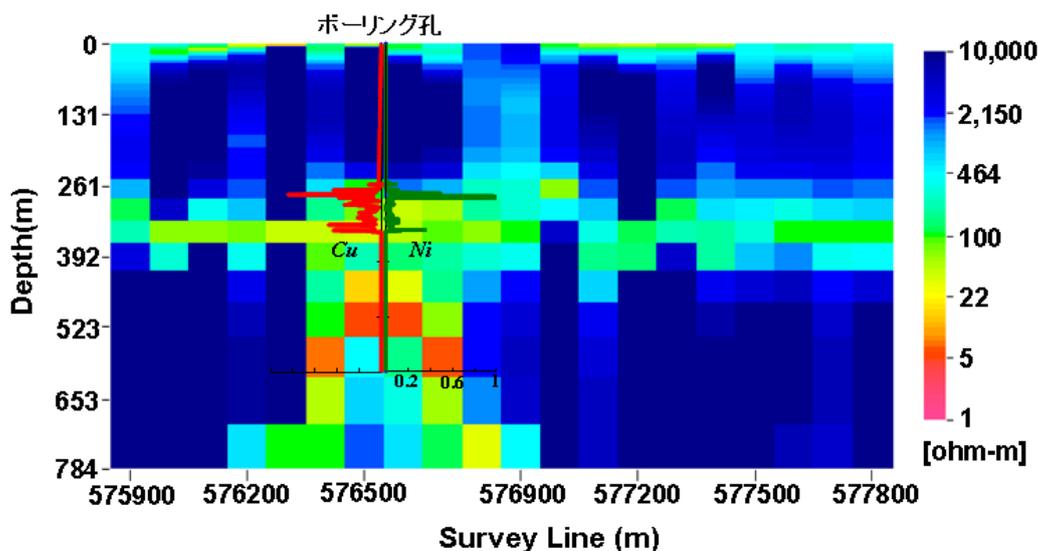


図3 2号機データ（図2）の1次元インバージョン結果（地下比抵抗断面）。図中の曲線は、銅（左）とニッケル（右）の分析結果（%）

図3では、始生代の基盤（花崗岩質片麻岩、超苦鉄質岩）は1,000Ω-m程度の高比抵抗として解析されている。深度300m～350mにおいて100Ω-m前後の比抵抗で再現されている水平層は、塩分を含む帯水層を反映しているものと考えられる。また、576400 mE～576700 mEにおいて前述の水平層の下位に垂直方向に伸長する低比抵抗が解析されており、その形状から鉱化を反映していると解釈された。そこで、図に示すとおり低比抵抗に対してボーリングを掘進した結果、深度254.56mから344mにかけて目視レベルで品位20%以上の金属硫化物が捕捉された。しかし、解析された低比抵抗の深度が400mから600mであり、ボーリングにより捕捉された金属硫化物の深度と違いが見られる。これは、3次元構造を呈する鉱化を水平多層構造（1次元構造）と仮定して解析したために生じた解析誤差である。

4. 3号機開発の進捗

このように、JOGMECの金属資源探査においてSQUITEM2号機を利用しており、成果を上げているところである。送信ループへの電流値と測定値は比例するため、大きな電流を通電することによりS/N比の大きいデータが取得できる。しかし、2号機においては、スルーレートの限界から十分な電流を送信ループに流すことができない等、SQUIDの探査深度に関する有意な特徴を活かし切れていない。そこで、SQUITEMのスルーレートを向上させることを主目的として、平成21年度より3年計画で3号機開発を行っている。なお、3号機はSQUID磁力計と受信装置から構成され（図4）、SQUID磁力計開発については（財）国際超電導産業技術研究センター、受信装置開発については三井金属資源開発（株）に委託している。



図4 開発中の SQUITEM3 号機。左奥は SQUID 磁力計、右奥は受信装置、手前は GPS 同期クロック。

3号機は、SQUID 磁力計、コントローラー（バッテリー内蔵）、測定制御用のノート PC、コントローラーと SQUID 磁力計の結線ケーブル、同期信号の伝達ケーブル、コントローラーと送信機の同期を取るための GPS クロックから構成される。2号機に比べて重量・サイズともに 1/3 程度であり、可搬性・操作性がかなり改善されている。

SQUID 素子は直結型に基づくもので、ノイズレベルは約 $30 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と 2号機の 1/3 程度である。開発目標値である $20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を達成するために、直結型素子の感度を更に高めたり、積層型素子の導入方法について研究開発を進めている。

スルーレートについては、2011年5月下旬に秋田県の油田地帯で実施した野外試験において、送信ループ（一辺 50 m）の中心で 2号機と 3号機を用いて計測比較を行った結果、2号機は 1 A の通電で不安定となったが、3号機は送信機の限界である 15 A でも安定的に作動した。したがって、2号機のスルーレートに比べて 3号機は 15 倍以上であり、連続的に計測した 3号機のデータからスルーレートを計算した結果、開発目標値（8 mT/sec）を上回る 9.2 mT/sec を達成した。現在、本年度末での 3号機開発完成に向けて、更に感度の高い SQUID 素子の開発や、SQUID の自動調整機能を主とした測定制御プログラムの仕上げを行っているところである。

5. おわりに

JOGMEC は、JOGMEC が実施する金属資源探査において、従来の TEM 装置の代わりに、SQUITEM2 号機を活用して成果を上げているところである。また、2号機の探査深度を更に向上させ、携帯性・操作性を高めるために 3号機開発も実施しており、順調に行けば本年度末に完成する予定である。冒頭で述べたとおり、近年、金属鉱床の深部化が進んでおり、特に、低比抵抗の被覆層で覆われた地域でも利用できる電磁探査技術の開発が強く望まれている。SQUITEM はその要望を実現し得る装置である。3号機が完成すれば、探査の効率化と成功率の向上に更に寄与できるものと期待する。

超電導関連 8-9月の催し物案内

8/1-5

14th International Workshop on Low Temperature Detectors

場所：Heidelberg University

問合せ：<http://ltd-14.kip.uni-heidelberg.de/>

8/4-5

2nd New York State Superconductor Technology Summit

場所：Schenectady Museum & Suits Bueche Planetarium, Schenectady, New York

問合せ：

<http://events.r20.constantcontact.com/register/event?llr=jki9ubdab&oeidk=a07e3qqdtn96828298d>

8/21-26

23rd IIR International Congress of Refrigeration

場所：Prague, Czech Republic

問合せ：<http://www.icr2011.org/>

8/29-9/2

応用物理学会

場所：山形大学

問合せ：<http://www.jsap.or.jp/index.html>



9/4-9

2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC'11)

場所：Kursaal, San Sebastian, Spain

問合せ：<http://www.ipac-2011.org/inicio.asp>

9/12-16

22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22)

場所：Marseille, France (Parc Chanot)

問合せ：<http://www.mt22.org/conference-program>

9/13-16

電子情報通信学会 2011年ソサイエティ大会

場所：北海道大学

問合せ：http://www.toyoag.co.jp/ieice/S_top/s_top.html

9/18-23

ICMC 2011-Superconductivity Centennial Conference EUCAS-ISEC-ICMC-2011

場所：The Hague, the Netherlands

問合せ：<http://www.icmc2011.org/>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (6/17-7/18)

- コバルト化合物を母物質に 新たな超伝導体発見 東工大 科学新聞 6/17
- ISTEC 新理事長に森氏 電気新聞 6/21
- 世界最高電圧の超電導線 古河電工 原発1基分を送電 日本経済新聞 6/21
- 古河電工 27万5千V超電導線を開発 送電容量、従来比3倍に 電気新聞 6/22
- 極低温冷却システム 東大発VB、運転費1/10 高価なヘリウム再利用 日経産業新聞 6/23
- 21Tの超強力磁場で一東北大、JASRI、東大など共同軟X線分光実験に成功 科学新聞 6/24
- レアアース急騰 1カ月に3倍弱の品目も 中国が管理強化 車など影響懸念 日本経済新聞 6/25
- 電子の磁石「スピン」材料に簡単注入 東北大 超省エネ基盤技術に 日経産業新聞 6/28
- 理工系人材を育てる 東工大の知と技 研究者が知財を教育 新材料発掘で成果連発 日刊工業新聞 6/29
- 超電導線材 重量1/10 磁気シート完成 名城大学理工学部材料機能工学科 坂えり子研究室 日刊工業新聞 7/01
- レアアース頭打ち 一部品種 代替材使用で需要減少 日刊工業新聞 7/01
- 放射光X線を用いて一原子力機構、高エネ機構など一電子の軌道状態識別に成功 科学新聞 7/01
- 家電向けレアメタル反落 アンチモニー5月比15%安 一転、調整局面に 日本経済新聞 7/02
- 太平洋底にレアアース 埋蔵量「陸上の800倍」と試算 東大など 毎日新聞 7/04
- レアアース巨大鉱床 太平洋、陸の1000倍 東大など推定 日本経済新聞 7/04
- 太平洋にレアアース床 東大が発見 陸上埋蔵量の800倍 日刊工業新聞 7/04
- レアアースの巨大鉱床 太平洋海底で発見 東大など 日経産業新聞 7/04
- 太平洋に大量レアアース 海底の泥の中、採取容易 朝日新聞 7/04
- レアアース北欧に古里 7元素発見 イッテルビー鉱山 朝日新聞 7/04
- 卓上型MRI 小動物の断層写真撮影 理研など共同開発 分解能20倍に 日経産業新聞 7/05
- レアアース急騰6倍超 中国規制で投機対象 部品メーカー 毎月価格改定も 毎日新聞 7/05
- レアアース 中国の価格戦略を注視 供給解決へ取り組み加速 日刊工業新聞 7/05
- 風力と太陽光を融合 コムターズ LED照明灯開発 日刊工業新聞 7/05
- 風力21%最大電力源に スペイン「福島」で世論の追い風 Fuji Sankei Business i. 7/06
- 超電導ケーブル開発加速 無駄なく送電 コスト高普及の壁 読売新聞 7/06
- レアアースも提訴の観測 中国輸出規制、決着見えず 読売新聞 7/07
- メガソーラー参入拡大 ソフトバンク、商社も検討 読売新聞 7/07
- 中国、WTOに反発 鉱物輸出制限の違反認定 「レアアース戦略資源」 朝日新聞 7/07
- 基礎からわかる再生可能エネルギー 太陽光、風力、バイオマス…永続的に使える 読売新聞 7/07
- 高品位のレアアース含む泥 太平洋海底に膨大な量分布 科学新聞 7/08
- リニア新幹線ってどんな列車? 強い磁石で浮き、時速500キロ 朝日新聞(夕刊) 7/09
- 原発並み太陽光発電 日射量多いサウジで実験 東大・シャープ協力 朝日新聞 7/12
- 超伝導 現象発見から100年 経済ナビゲーター 朝日新聞(夕刊) 7/13
- 強相関電子物質の薄膜積層 高温超電導材実現へ 東大 日刊工業新聞 7/15
- 次世代送電網日本で展開 電力ピーク抑制に狙い スイスABB・米IBM 日本経済新聞 7/16
- レアアース独自調達に道 太平洋に巨大鉱床 採掘技術の開発は難題 日本経済新聞 7/17
- レアアース輸出1割削減 中国「合金」も対象に Fuji Sankei Business i. 7/18

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2011年6月)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 蓮尾信也

医療

Luvata (2011年6月28日)

Luvata 社は、中国の中山における MRI 用超電導線材及びケーブル事業を拡大すると発表した。新しい施設は、新たに賃借した 5 万平方フィートの建屋の中に設けられ、専ら MRI 用超電導線材及びケーブルの製造に活用される。新施設に設置される装置の据付は、2011 年末前には完了する予定であり、生産は 2012 年第 1 四半期に開始される見込みである。Luvata 社 CEO の John Peter は次のように述べた。「中国の中山における超電導事業の拡大は、新規事業及び技術志向で高付加な価値製品やソリューションへ注力していくという我が社戦略の一環である。我々は、パートナー企業と密接な関係を維持し、世界的な最新の MRI 技術が誰にでも使えるようにと考えている。今後 5 年間に、我々は MRI 超電導線材の売り上げを倍増させることを計画している。」Luvata 社は、世界の MRI 市場が年率 6 % で成長し、その大部分がインドや中国といった発展を続ける新興国からの寄与であろうと考えている。

出典:

“Luvata announces plans to double its sales of MRI superconducting wire and cable”

Luvata press release (June 28, 2011)

<http://www.luvata.com/en/News-Room/Press-Releases/Luvata-announces-plans-to-double-its-sales-of-MRI-superconducting-wire-and-cable/>

量子計算機

Columbia University and Consiglio Nazionale delle Ricerche (2011年7月7日)

Columbia Engineering, National Research Council (イタリア), Princeton University, University of Missouri 及び University of Nijmegen (オランダ) の研究グループは、先端加工技術を使ったナノメータ・スケールの構造を持った人工半導体構造の開発に成功した。このナノ構造は、グラフェンに見られる蜂の巣格子と類似の形状をしており、デバイスは「人工グラフェン」と名付けられた。このデバイスは、強相関電子の量子挙動をシミュレートするのに使うことができ、超電導のような複雑な相互作用など基礎量子力学の研究にも応用可能な革新的固体量子シミュレーター実現に向けた第 1 歩と考えられる。人工グラフェンの最初の試運転において、予期しない特異な量子状態が生成されるなど有望なデータが生み出され、このデバイスが大きなポテンシャルを持つことが示された。グループの研究結果は Science に掲載された。

出典:

“Innovative device for quantum simulations”

Columbia University press release (June 7, 2011)

<http://engineering.columbia.edu/innovative-device-quantum-simulations>

“Nuove soluzioni per la simulazione quantistica”

Consiglio Nazionale delle Ricerche press release (June 7, 2011)

<http://www.cnr.it/cnr/news/CnrNews?IDn=2240>

加速器

CERN (2011年6月5日)

CERN は、16 分以上の反物質原子の維持・閉じ込めに成功したと発表した。これは、その性質を調べるのに十分に長い時間である。この反物質原子の捕捉実験は、現在 CERN が実施している APLHA 実験の一部を成す。約 300 の反物質原子が 1000 秒捕捉されたが、これは反物質水素をレーザーやマイクロ波分光器により正確にマッピングしたり、通常の水素原子と比較するのに十分な時間である。今回の結果は、Nature Physics オンライン版に掲載された。

今回の反物質原子の捕捉は、反物質に対する重力の影響を測定するための手段としても活用可能である。反物質に対する重力の影響については、近々、AEgIS 実験の中で反物質水素を使って調べることが計画されている。また、長時間の捕捉により、捕捉時間中に反物質原子が基底レベルへ緩和するため、CPT のような対称性の研究に必要な正確な測定も可能になる。

ALPHA 実験の次の段階では、捕捉された反物質水素の測定に着手する。

出典:

“CERN experiment traps antimatter atoms for 1000 seconds”

CERN press release (June 5, 2011)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2011/PR05.11E.html>

CERN (2011年6月17日)

CERN は、LHC での ATLAS 及び CMS を使った実験が、重要なマイルストーンを達成したと発表した。即ち、1 インバース・フェムトバーンのデータ取得である。この数値は、物理学者が「integrated luminosity」と称するものを表しており、生成された総衝突回数を表す指標である。1 インバース・フェムトバーンは、約 70 兆回の衝突事象に等しい。1 インバース・フェムトバーンのデータ取得は 2011 年の目標であり、わずか 3 ヶ月の運転でこれが達成されたということは LHC が順調に運転されていることを示している。ATLAS 実験担当スポークスマン Fabiola Gianotti は次のように述べた。「これは素晴らしい成果であり、加速器の優れた性能と運転チームの優秀さを示すものである。夏の主要学会向けに間に合うようこのように多量のデータを取得したことは、誠に素晴らしいことである。ATLAS 担当の研究者、なかんずく学生やポストドクが熱心かつ熱意を持って研究を進め、既知の素粒子の正確な測定やヒッグス・ボゾン、そして新しい現象の探索に関連した心ときめく結果を生み出した。」

出典:

“LHC achieves 2011 data milestone”

CERN press release (June 17, 2011)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2011/PR06.11E.html>

基礎

Brookhaven National Laboratory (2011年6月10日)

米国エネルギー省 Brookhaven National Laboratory の研究グループは、スイスの Paul Scherrer Institute と共同で、低温に維持された銅酸化物の超薄膜において非常に薄く孤立した原子層が長距離磁気秩序を失い、量子スピン液体のように振舞うことを報告した。量子スピン液体とは電子のスピン方向が広い領域でゆらぐ状態である。この予期せざる発見は、この新しい物質の状態（量子スピン液体）が高温超電導の前駆現象であるという仮説を支持しているように思われる。Brookhaven National Laboratory の研究者 Ivan Bozovic は今回の研究結果を次のように解説した。「ランタン系銅酸化物の結晶は層構造であり、銅酸化物とランタン酸化物の層から構成されている。同一の銅酸化物面でのスピン間の相互作用は強いが、近接銅酸化物面間（距離 0.66 nm）のスピン間の相互作用は 1 万倍小さい。このように弱い相互作用であってもスピンのゆらぎを抑えるには十分であり、反強磁性状態を安定化しているようである。」研究グループは原子層毎に積層できる専用の MBE を使って、正確に厚みが制御された層数の異なるランタン銅酸化物を合成した。合成された試料は、低エネルギー・ミュオン・スピン分光器を使って調べ、超薄膜の磁性を調べた。その結果、4 層またはそれ以上の銅酸化物層を持つ試料は反強磁性秩序を示すが、1 ないし 2 層の銅酸化物層しか持たない試料は予期しない現象を示した。即ち、磁気モーメントが存在し、その大きさは一定であるものの、長距離磁気秩序は見られず、僅か数ナノメートル・オーダーの磁気秩序すら消滅していた。そして、スピンは大きくゆらぎ、非常に高速にその方向が変化していた。この効果は低温になればなるほど大きくなることから、これが量子的なものであり、熱的なものではないことを示唆している。Bozovic は次のように結論付けている。「結果として、この実験結果は銅酸化物層が十分に孤立して、他の層との相互作用がない場合、低温では一種の量子スピン液体のように振舞うということを示している。」この結果は、高温超電導に関わる物理により深い洞察を与えるものであり、新規かつより優れた超電導体の検討に寄与するものであるかも知れない。今回の結果は、Physical Review Letters オンライン版に掲載された。

出典:

“Ultrathin copper-oxide layers behave like quantum spin liquid”
Brookhaven National Laboratory press release (June 10, 2011)
http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1294

University of Buffalo (2011年6月13日)

University of Buffalo の 2 名の化学研究者は衝撃波による水素金属化の代替手法を提案した。即ち、水素にナトリウムを加えることにより、その化合物を比較的低压で超電導金属に変えることができる可能性があるというものである。固体の安定な結晶構造を決定するための公開計算機コード (XtalOpt) を使い、加圧下で超電導体となる可能性のあるナトリウム・ポリハイドライドの検討を行った。その結果、 NaH_9 が約 250 GPa (実験的に達成可能な圧力) で金属になることが予想された。University of Buffalo の準教授で、本研究者の 1 人である Eva Zurek は次のように述べた。「もしナトリウムを加えることで水素が金属化できるのであれば、超電導理解に役立つばかりでなく、室温超電導体設計の新しい手法に繋がるかもしれない。」今回の研究結果は、Physical Review Letters 6 月 10 日号に掲載された。

出典:

“Under pressure, sodium, hydrogen could undergo a metamorphosis, emerging as superconductor”
University of Buffalo press release (June 13, 2011)
<http://www.buffalo.edu/news/12644>

[超電導 Web21 トップページ](#)

「2011 Cryogenic Engineering Conference (CEC) & International Cryogenic Materials Conference (ICMC)」報告

九州工業大学大学院
情報工学研究院
名誉教授 松下照男



会場から望める公園とスポケーン川

2011年のCEC/ICMC会議は米国ワシントン州のスポケーン（Spokane）市で6月14日から17日までの4日間開催された。この市はシアトルから遠く離れて内陸側に位置し、ロッキー山脈に挟まれた盆地の東の縁にあって、隣のアイダホ州に近い。目だつた産業はないが、医療関係が集中する人口45万人の静かな都市である。市の中心部を東から西にスポケーン川が流れ、速い流れに沿っていくつかの滝がある。その川に面した公園の一部にあるコンベンション・センターで会議は開催された。

主催者の集計によると、開催国の米国を含む23か国からの参加があり、参加者数は624人であった。全体的に参加者が少なかったが、これは東日本大震災の影響で日本からの参加者が減ったこと、DAPASのプロジェクトが終了した韓国からの参加がほとんどなかったことに加えて、DOEからの研究費の打ち切りによって米国の国立研究所からの参加者も少なかったことなどが原因のようである。とくに日本からの参加者は55名で、全体の10%を下回っており、目だつて減少している。この会議は前回の2年前も新型インフルエンザのために日本からの参加者が少なく、不運な巡り会わせとなっている。日米に続く参加者数はドイツが35人、中国が30人となっている。

調査の関係で、共通のプレナリー・セッションを除いてほとんどICMCのセッションに参加したので、そちらの面から会議を紹介する。こうした参加者の影響からか、超電導材料としては最も多いはずのREBCOコート線材に関する発表がひじょうに少なく、同じ米国で開催される応用超電導会議（Applied Superconductivity Conference）と比べて異常な印象であった。逆に金属系超電導体、Bi-2212丸線材、MgB₂線材が目立ったくらいである。実際にBi-2212丸線材に関する発表は4つのセッションにまたがり、全部で15件（Bi-2223は2件）あり、3つのセッションであったREBCOコート線材の11件を上回る。

日本からの発表がなく、米国も元気がない今回の会議では目だつた成果は見えなかったが、それでも超電導発見から100年ということで、特別企画としてシンポジウムが開催された。このシンポジウムで行なわれた講演は「超電導の昨日・今日・明日（主として応用の面から）」「超電導のための冷却」「実用超電導を支える磁束ピンニングの科学と歴史」「超電導応用技術（主としてマグネット）」「超電導の電力応用」「大型風力発電のための超電導発電機」「高温超電導の各種応用システム」

の七つで、この一世紀を振り返り、今後の応用の問題点を認識する上で有効であった。ただし、講演の中で米国における DOE からの電力応用に関する研究費のカットが明確に言及され、日本や欧州における今後の研究に対する影響が懸念されるところである。

次回の CEC/ICMC 会議は 2013 年 6 月 17 日-21 日という夏至に近い頃に予定されており、10 年ぶりにアラスカ州のアンカレッジで開催される。ちょうど白夜のころである。日本からの貢献に期待したい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話 (その4)

～超電導磁石の開発経緯～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所

浮上式鉄道技術研究部

低温システム研究室長 長嶋 賢

1. 超電導磁石の必要性

前回は「JR-Maglev 開発のあゆみ」と題して歴代の車両を紹介したので、今回は超電導磁石の開発経緯について紹介する。ここで超電導磁石の必要性についてもう一度考えたい。図1に示すように JR-Maglev では地上側に配置するコイルと車載磁石間に働く電磁力によって車両を推進、浮上、案内するわけであるが、この電磁力は地上コイルの起磁力と車上のコイル、あるいは磁石の起磁力の積に比例する。そして、地上コイルの数は車載磁石にくらべて圧倒的に多く、目的地まで切れ目なく沿線に配置する必要があるため、これの起磁力を小さくし、その分車載磁石の起磁力を大きくする方が全体システムとしては経済的である。ところで、車載磁石として考えられるのは図1に記載した3種類があるが、電磁石や永久磁石は発生磁界や損失(ロス)、質量の面で搭載が困難である。試みに今の JR-Maglev 用超電導磁石と同じ起磁力の永久磁石の質量を計算すると、質量が超電導磁石の10倍程度となる上、当然超電導磁石と同等の磁界は発生しない。したがって、永久磁石を現行のシステムにそのまま持ち込んだのでは浮上走行ができないという結論になる。もちろん車両と軌道間の空隙を小さくすれば、車載磁石に必要な磁界を下げられる。しかし、本システムの開発当初に、日本の地理的な事情等を考慮して、車両-軌道間の空隙を10cm程度確保することを決めている。この方針を守るためには超電導磁石が不可欠ということになる訳である。また、超電導の特徴である「電気抵抗無し」により、磁界を出すことに対する損失は無いというメリットも大きい。このあたりの事情を、既に紹介した J.Powell と G.Danby の論文では「車上の超電導コイルには損失なく数百 kA の電流を流し、地上コイルへの通電電流は数 kA だけに限定することによって通電にともなう損失を小さくできる。車上にだけ超電導コイルがあればよいので、コストも、必要な冷凍能力も少なく済む。」という様な表現で記述している。

ただ、開発開始当初には現在のように軽量の車載超電導磁石を製作することができるかどうかということにはわからなかった。電磁石や永久磁石で可能性が無いことは確かだが、超電導磁石なら可能性が有りそうだ、ということから開発が始まったわけである。JR-Maglev の開発の歴史は車載超電導磁石の軽量化の歴史という面もある。

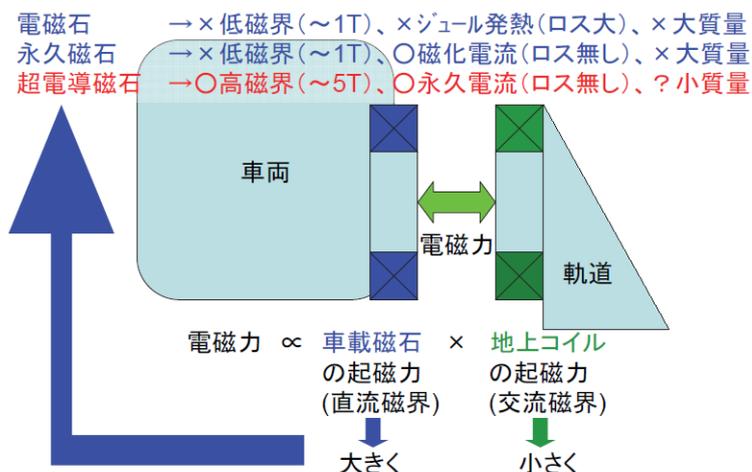


図1 超電導磁石の必要性

2. 超電導磁石による自力浮上走行

浮上式鉄道の研究で、はじめに製作された超電導磁石は図2に示す「超電導磁気浮上特性基礎試験装置」の超電導磁石であり、走行するタイプではなかった。直径約1.7 m、高さ約1 mの円形のクライオスタット中に、起磁力200 kAのアーチ型超電導コイルが2個設置されていた。超電導磁石の下で6個のコイルを取り付けた円盤を回転させ、浮上力の測定を行った。この時の超電導磁石の全体質量は2 tであった。外槽、内槽、超電導コイル、永久電流スイッチ、荷重支持材、熱シールド板、低温配管、液体ヘリウム及び液体窒素など、現在の超電導磁石の基本構成要素すべてがこの時点でこの装置には組み込まれていた。以下、「超電導コイル」と「超電導磁石」という言葉が頻出するが、「超電導コイル」は文字通りのコイルを指し、「超電導磁石」は一つまたは複数の「超電導コイル」を組み込んだ、クライオスタット単位の装置全体を指す。

図3はML100用に製作された超電導磁石である。これは、車体下部に2個並列に取り付けられた。磁石の幅は0.6 m、高さ0.4 m、長さ約4 mで、中に起磁力250 kAの超電導コイルが2個水平に設置されていた。超電導磁石1個の質量は1 t。車両単位では磁石2個で2 t。これが磁石質量を含む3.5 tの車両質量を支えた。なんとか自力浮上はしたものの、車両全体の半分以上が超電導磁石の質量という状態であった。



図2 超電導磁気浮上特性基礎試験装置

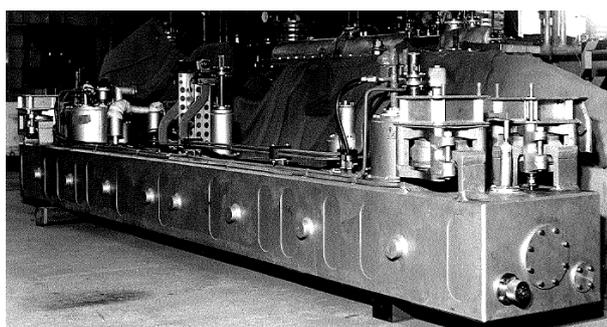


図3 ML100用超電導磁石

3. L字型超電導磁石からI字型超電導磁石へ

1977年に宮崎実験線で517 km/hの速度記録を達成したML-500の超電導磁石は、図4に示すようなL字型の断面を持つものであった。幅約0.7 m、高さ約1.3 m、長さ約4.2 mの磁石の中には水平に配置した起磁力250 kAの浮上コイルと、垂直に配置した起磁力450 kAの推進コイルが2個ずつ入っていた。超電導磁石は4個で5.6 tとなり、磁石質量を含んで10 tの車両質量を支持した。ML-500は完全非接触浮上状態で目標速度の500 km/hを超えた記念すべき車両であるが、まだ全体質量の半分以上が超電導磁石という状態であり、次の段階に進むには磁石の軽量化が必須であった。そんな中、このL字型超電導磁石では、実際には浮上力の半分近くを垂直に配置した推進（超電導）コイルが受け持っていることがわかったため、ここで発想の転換がなされ、図5に示すI字型超電導磁石が開発された。

上で述べたことをもう少し詳しく説明する。ML-500は図6左の断面図に示すように縦横2種類の超電導コイルを搭載している。車上の推進（超電導）コイルは車両の推進と案内の役割を担い、浮上（超電導）コイルは浮上の役割を担うよう設計されている。しかし、実際には上で述べたように推進（超電導）コイルの起磁力が大きいこともあり、その発生する磁界が地上の浮上コイルに誘導電流を誘起する効果が、浮上（超電導）コイルの効果と同程度であった。そのため、「浮上力の半分近くを推進（超電導）コイルが受け持っていた」ということになる。そこで、「推進（超電導）コイルの起磁力を向上すれば、浮上（超電導）コイルを省略できる」という考えに至ったわけである。このI字型超電導磁石は一種類の縦型超電導コイルで推進・浮上・案内のすべての役割を担うもの

であり、これを搭載した車両が MLU001 である (図 6 中)。I 字型超電導磁石の起磁力は L 字型超電導磁石の推進コイルの起磁力と浮上コイルの起磁力の合計値に近い 750 kA であり、磁石 4 個で 2.6 t と L 字型超電導磁石の半分以下になったにも関わらず 10 t の車両質量を支持することができた。これにより、無人の実験車両 ML-500 から乗客が搭乗できる MLU001 へ進化することができ、実用化の可能性が見えてきた。



図 4 ML-500 用 L 字型超電導磁石

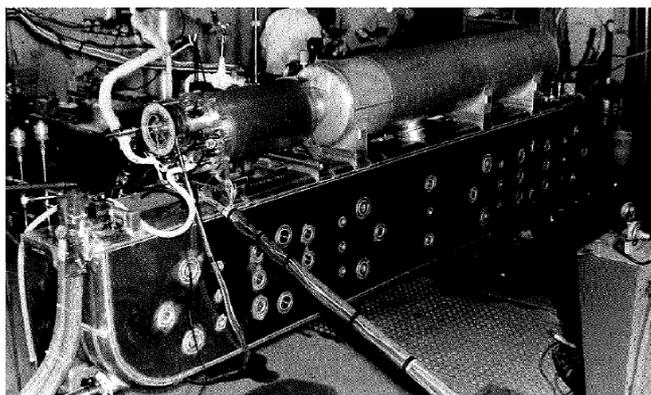


図 5 MLU001 用 I 字型超電導磁石

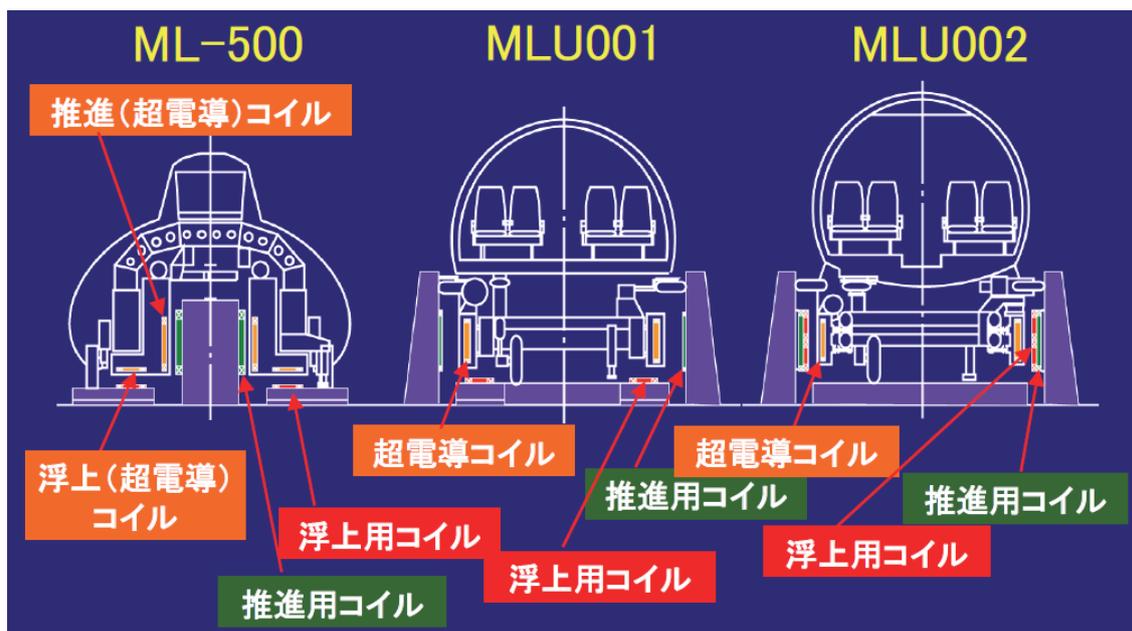


図 6 車両断面とコイル配置

4. 現在の超電導磁石

MLU002 以降、ガイドウェイ下面に設けられていた浮上コイルを側壁に移したシステム (側壁浮上方式) が採用された。このシステムは図 6 右に示すように、車上の超電導コイルと地上コイルが全て垂直に配置され、I 字型超電導磁石に適したコイル構成となっている。また超電導磁石の浮上力を増大することによって、より少ない個数の超電導磁石で車両が浮上走行できるようになってきた。そのため、乗車スペースから遠ざけた位置に超電導磁石を配置することが可能となり、車内磁界も低減できた。現在の超電導磁石は基本的に I 字型超電導磁石の構成を踏襲し、図 7 の様なものとなっている。

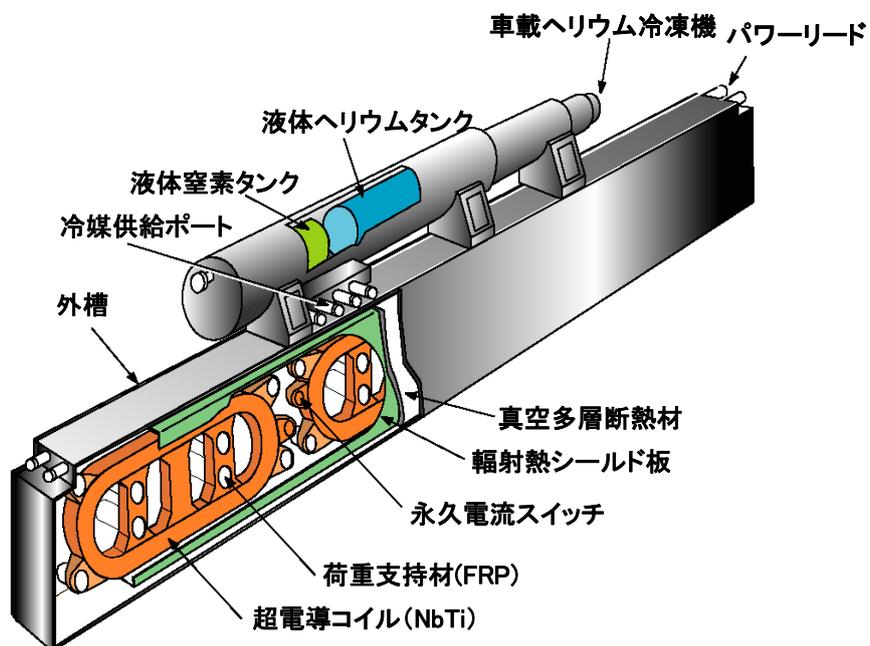


図7 現在の超電導磁石

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q: 「最近、電界効果を用いて新たな超伝導材料を開発したという記事がありました。これはどのような手法で、今後どのような応用が期待されるのでしょうか？」

A: 電界効果は新しい超伝導材料開発の手法です。超伝導は金属で起きる現象であり、たとえば Nb₃Sn など多くの超伝導材料は金属を混ぜ合わせる合金化の手法によって作られてきました。一方、最初の銅酸化物高温超伝導体 (La,Ba)₂CuO₄ は電気を流さない絶縁性母材 (La₂CuO₄) に不純物元素(Ba)を混ぜ合わせることで発見されました。絶縁体や半導体は低温で全く電気を流しませんが、これらの材料に不純物元素を混ぜることで、電気伝導を担う伝導キャリアを誘起することができます。その結果、絶縁体から金属へ伝導性が変化し、十分な伝導キャリアを誘起することで多くの材料が超伝導体に変化します。この不純物を用いて伝導キャリアを誘起する手法は化学ドーピングとよばれ、有機物や半導体など多くの材料から高い転移温度を持つ新しい超伝導体が開発されました。一方、化学ドーピングが可能なのは不純物元素の固溶源が大きな一部の材料だけであり、超伝導にできる母材の選択の幅が小さいという問題がありました。

電界効果では半導体シリコンで開発された電界効果トランジスタを応用することで、電氣的に絶縁体表面に伝導キャリアを誘起し、超伝導を作り出します。電界効果トランジスタは誘電体を金属と半導体で挟み込んだコンデンサの構造を持っており、金属と半導体の間に電圧をかけてコンデンサを充電することで、半導体表面に電荷を誘起することができます。最近、誘電体の部分を電解液（電池などに使われる、液体にイオンが溶け込んだ溶液）に置き換え、固液界面に自己生成する電気二重層をコンデンサとする新しいトランジスタ（電気二重層トランジスタ）が開発されました。このトランジスタは酸化物や有機物などさまざまな材料の上に容易に作製でき、しかも超伝導を引き起こすのに必要とされる多量の伝導キャリアを誘起できます。これらの性質を生かし、酸化物半導体 SrTiO₃ や層状絶縁体 ZrNCl で電界効果超伝導が実現しました。

電界効果超伝導のもっとも重要な特徴は、化学ドーピングに適さなかった絶縁性母材から超伝導体を作り出せる、という点です。最近、電界効果により発見された超伝導体 KTaO₃ は化学ドーピングでは伝導キャリアの誘起が難しく、超伝導にならないとされてきた材料でした。遷移金属酸化物や軽元素で作られた半導体には、同様に化学ドーピングが難しい材料が数多くあり、高い転移温度をもつ超伝導体の開発が期待されています。また、電界効果ではトランジスタにかける電圧を変えるだけで絶縁体を超伝導体にスイッチングしたり、超伝導物性を制御することができます。こうした性質を生かした新しい超伝導デバイスとしての応用も期待できます。

回答者：東京大学 総合文化研究科 准教授 上野和紀 様

[超電導 Web21 トップページ](#)