

掲載内容（サマリー）：

特集：SQUID 応用

- HTS-SQUID を用いた非破壊検査による組物 CFRP の破壊メカニズムの解明
- HTS-SQUID を用いた試料回転式小型磁化率計
- 磁気マーカーを用いたバイオ免疫検査法の開発（HTS-SQUID）
- Y 系高温超電導テープ線材を利用した大型磁場偏差計
- SQUID 磁束計による地磁気計測の実用化を目指して
- SQUID を用いたプロトンとフッ素の超低磁場 NMR 計測
- 我が国における超電導検出器読み出し SQUID 開発の現状

- 超電導関連 2012 年 8-9 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（6/21-7/20）
- 超電導速報—世界の動き（2012 年 6 月）
- 「低温工学協会超電導応用研究会シンポジウム参加」報告
- 隔月連載記事—超電導磁石開発のこれまでとこれから（その 4） - （都合により 9 月号にて掲載します）
- 読者の広場(Q&A)—『超電導で水素効率移送 世界初試験に成功』との記事がありましたが、どのように移送するのでしょうか。また、どういう応用が期待されるのでしょうか？

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 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) 3536-5717

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 応用

「HTS-SQUID を用いた非破壊検査による組物 CFRP の破壊メカニズムの解明」

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

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、金属よりも軽量で比強度・比剛性に優れた材料であり、軽量化による省エネルギーや燃費向上の観点から、航空機や自動車の構造部材に使用されている。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。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、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。

2011 年 8 月号の超電導 Web21 にて、HTS-SQUID グラジオメータを用いた電流可視化手法により、組物 CFRP における繊維束の断絶を検出可能であり、本手法により材料内部の導電率分布推定の可能性を示した。その後、共同研究を行っている京都工芸繊維大学の濱田グループにおいて、組物 CFRP に引張試験を行い、表面観察と応力・ひずみ線図による破壊プロセス・材料特性の解析を行うと共に、破壊プロセスの途中にある組物 CFRP を除荷してから上記電流可視化手法を適用し、破壊検査と非破壊検査の両面から組物 CFRP の破壊メカニズムの解明を試みた。

ここでは、平均直径約 100 nm、長さ約 10 μm のカーボンナノファイバー (CNF) を母材エポキシ樹脂に 2 wt% 混ぜ込み、25 本の炭素繊維束を平打で組上げた組物とあわせて CNF 入り組物 CFRP を作製した。また、比較のため、CNF 無しの組物 CFRP も作製した。次にこれらサンプルに引張負荷を与え、表面観察、および応力・ひずみ線図計測を行った。これらの実験の結果を図 1 の上半分に示す。表面欠陥の観察のため、負荷適用後はサンプル表面に絵具を塗布した。CNF 無しの組物 CFRP では、初期段階 (①) から負荷を加えていくと、まずサンプルの左下に母材割れが生じて応力が低下し (②)、ひずみ増加に伴い母材割れに沿って亀裂が進展し、応力低下とひずみ増加を何度か繰り返した後、最終破断が生じた (③)。一方、CNF 入りの組物 CFRP では、初期段階 (①) から負荷を加えていくと、最終破断前に母材リッチな下側の端で応力の低下を伴わない母材割れがいくつが生じ (②)、その一つを起点として一気に最終破断が発生した (③)。

以上の①~③、および①~③の状態のサンプルについて交流電流を注入し、HTS-SQUID グラジオメータを用いた電流可視化手法を適用した結果を図 1 下半分に示す。ここでは、x 方向電流分布 (中段) と y 方向電流分布 (下段) に分けて表示した。x 方向電流分布 (上図) では、赤色が濃いほど右方向への電流が強いことを表す。一方、y 方向電流分布 (下図) では赤色と青色はそれぞれ上下方向への電流を表す。どちらのサンプルでも、y 方向電流分布より、最終破断発生前は注入した電流は 45° に組まれた炭素繊維束に沿って流れたことが示されている。また、CNF 入り組物 CFRP の電流分布の方が、CNF 無しよりも分布不均一が小さく、上下の端効果の幅が広い。これは炭素繊維束間に存在する CNF を媒介して繊維束間で電流が流れ、繊維束あたりの電流密度が平均化されたためと考えられる。一方、それぞれのサンプルで欠陥が生じた②と②では、その前の状態と比較して電流分布に大きな変化が見られない。このため、これらの亀裂は母材割れであると推定できる。最終破断が生じた③、および③では、繊維束破断により電流分布が大きく変化した。図 1 に示す非破壊検査の結果より、CNF 無しの組物 CFRP では図の下半分の繊維束がほぼ全て破断しており、

CNF 入り組物 CFRP では破断部全体に渡り多くの繊維束が破断したことが分かる。CNF 入り組物 CFRP では最終破断が一気に生じたが、これは CNF が繊維束間の電気伝導を強めたのと同様に、繊維束間の負荷伝達を機械的に強めたためと考えられる。

このように、破壊検査と非破壊検査を組み合わせることで、対象内外の情報および機械的特性と電気的特性の相関が得られるため、有効な破壊メカニズム解析手法となる可能性を示した。実際に使用中の組物 CFRP においては、②で生じた繊維束間の母材割れなどの初期欠陥を検出することが求められている。そこで、初期欠陥検出のため、繊維束間に電流を誘導できる渦電流法を応用した検査技術の開発を現在進めている。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。

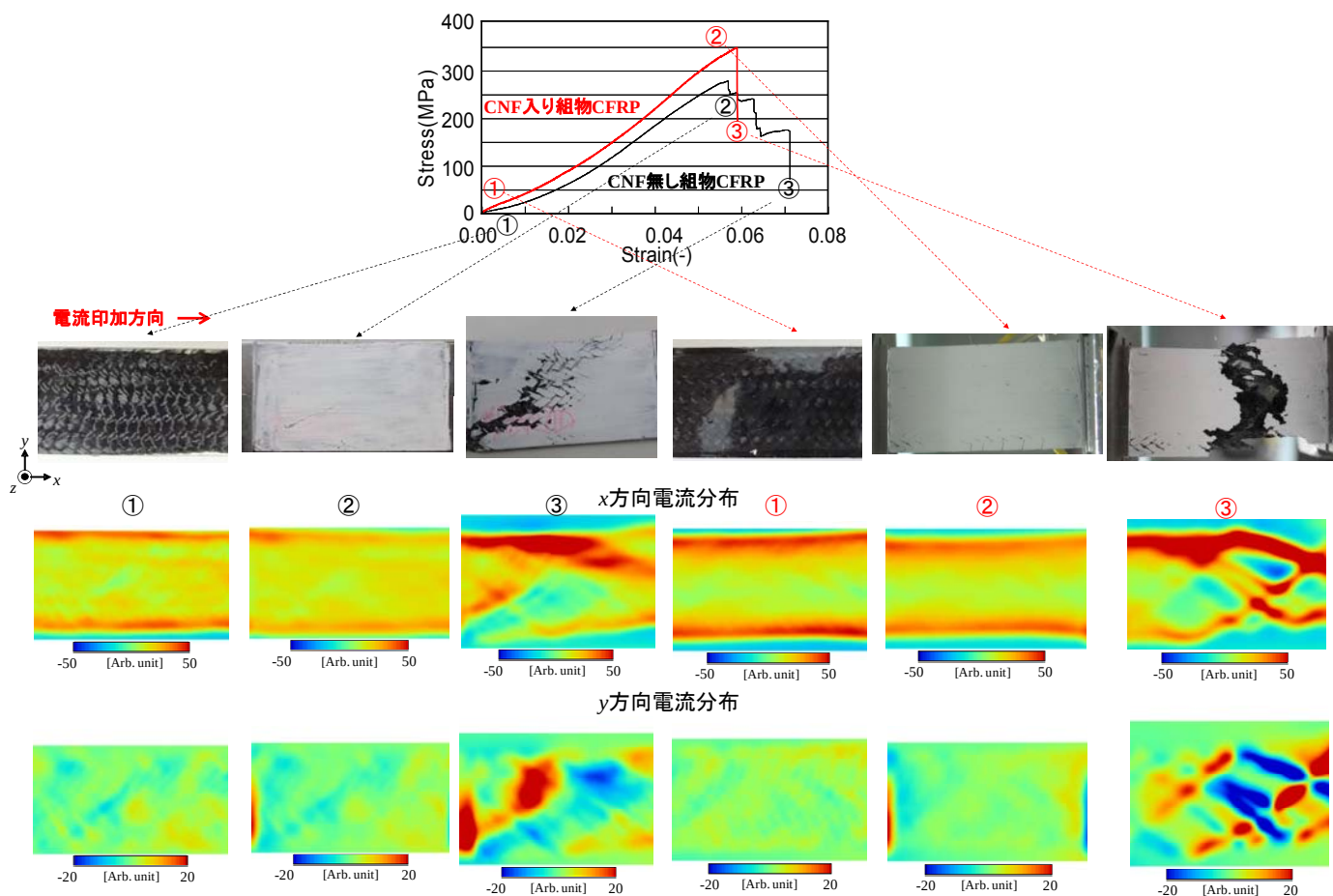


図 1 (上半分) CNF 入り組物 CFRP と CNF 無し組物 CFRP の応力・ひずみ線図と破壊様相。

(下半分) 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。

x 方向電流分布 (中段) と y 方向電流分布 (下段) に分けてそれぞれ示した。

特集：SQUID 応用

「HTS-SQUID を用いた試料回転式小型磁化率計」

岡山大学
大学院自然科学研究科
助教 堺 健司

1. はじめに

磁化率は物質の基礎的なパラメータであり、物質はそれぞれ固有の磁化率の値を示す。従って磁化率の測定により、物質の特定を行うことや、ある物質の含有量を評価する非破壊検査を行うことが可能となる。磁化率の測定には一般的に磁化率計が用いられているが、測定する磁化率の大きさによりその測定原理が異なる。磁化率の値が大きい強磁性体は、外部磁場の印加により発生する二次的な磁場の強度が大きいので、強磁場を印加する大型のコイルは不要で、磁気センサも高感度なものを必要としない。しかし、常磁性体や反磁性体は磁化率の値が非常に小さいため、強磁場を印加し、高感度な磁気センサで物質から発生する微小な磁場を検出する必要がある。現在常磁性体や反磁性体の磁化率は、最も高感度な磁気センサである LTS-SQUID を用いた磁化率計により測定されるのが一般的である。しかし、LTS-SQUID を使用した場合、液体ヘリウムによる冷却が必要なためシステム自体が大型になる、ランニングコストが高く装置の維持・管理が難しいなどの欠点がある。実際に市販されている LTS-SQUID を用いた磁化率計は、実験室の一角を占有するほどの大きさであり、導入に際して設置スペースの確保が必要となる。また、測定する試料の量や形状も制限があり、測定可能な試料は一般的に固体や粉末である。そのため、液体試料の測定は難しく、液体の磁化率を高感度に評価した報告例も少ない。そこで我々のグループでは、これらの欠点を解消すべく冷却機構が簡易でランニングコストも安い HTS-SQUID を使用し、卓上サイズの小型磁化率計を開発した。なお、本研究で使用した HTS-SQUID は、ISTEC/SRL により開発されたランプエッジ型ジョセフソンジャンクション接合を用いた HTS-SQUID である。

2. 開発したシステムの構成と測定結果

図 1 に開発したシステムの構成を示す。測定試料は超音波モーターで回転する円盤に固定し、図 1 に示すように電磁石の磁極間を試料が通過する構造となっている。試料からの磁場は以下のようにして検出される。まず、電磁石により直流磁場を発生させ、回転させた試料が磁極間を通過し磁化される。図 1 のように磁極の下側に 1 次微分ピックアップコイルを設置し、試料の回転により変動する磁場をピックアップコイルで検出し、検出した信号をピックアップコイルと直列に接続したインプットコイルを介して HTS-SQUID へ伝達する。ここで、SQUID とインプットコイルのみが磁気シールド内に設置されており、試料の取り付

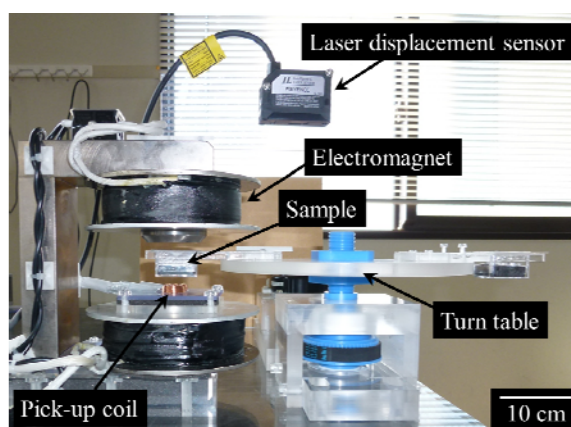


図 1 開発した小型磁化率計

け・交換は容易に行える。また今回は $25 \times 25 \times 19 \text{ mm}^2$ の試料ケースを使用した。ある程度試料ケースの形状や大きさも変更できる。さらに、試料ケースは液体の充填も可能で、液体試料を容易に測定できる点も本システムの大きな特徴である。

開発したシステムを評価するため、強磁性体の酸化鉄粒子と樹脂の混合物、および反磁性体である純水の測定を行った。図 2 はそれぞれの試料に対する SQUID の出力波形を示す。ノイズを低減するため多数回転分のデータを取得し、レーザ式位置センサで試料の位置を特定して、取得データの加算平均を行った。図 2 (a) に示すように得られた出力電圧の波形は、微分コイルに起因する特有の波形となり、また強磁性体であるため純水の場合と比較して非常に大きな出力電圧となった。一方、純水の出力電圧は小さいものの、図 2 (a) と同様に微分コイル特有の波形が観測され、開発したシステムが純水から生じる微小な磁場を検出できることが確認できた。さらに図 2 (a)、(b) を比較すると強磁性体と純水の波形が逆転していることが分かった。これは水が反磁性体であるため、外部磁場の印加により生じる二次的な磁場が、強磁性体と反対方向になっていることを示している。従って、開発したシステムで測定した磁場の波形から強磁性体・常磁性体と反磁性体を特定することも明らかになった。

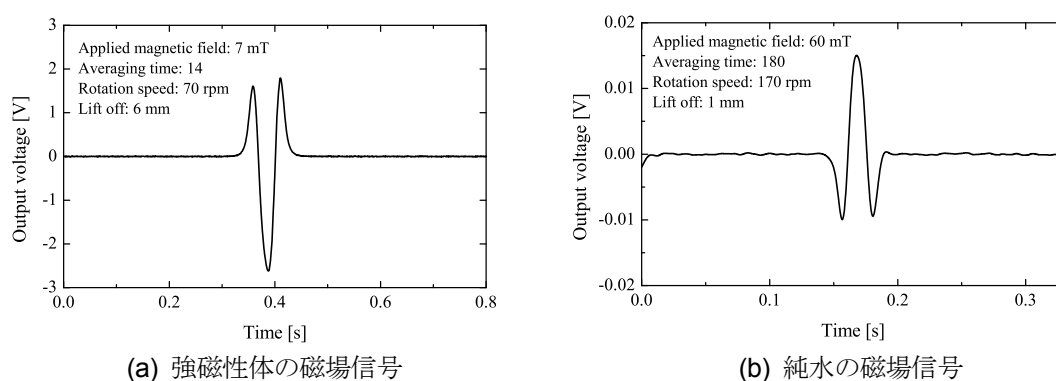


図 2 開発した磁化率計で測定した (a) 強磁性体の磁場信号と (b) 純水の磁場信号

3. まとめ

非常に小型で測定が容易に行える高感度な磁化率計を開発し、純水から生じる微小な磁場の測定を行った結果、純水からの磁場を検出することに成功した。今後、開発したシステムを発展させ、水分量評価や物質の特定・定量評価などを行う新たな計測システムを検討する予定である。

本稿で紹介した研究成果は、JST の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。

特集：SQUID 応用

「磁気マーカーを用いたバイオ免疫検査法の開発（HTS-SQUID）」

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気微粒子を高分子で被覆し、その表面に検査用抗体や薬剤を結合したものは磁気マーカーと呼ばれており、種々の医療・バイオ分野に応用されている。代表的なものとしては、蛋白質や細胞の分離・精製、MRI の造影剤、磁気的ハイパーサーミア、磁気的免疫検査等がある。この中で、免疫検査は疾患由来の蛋白質や病原菌などのバイオ物質を検出する検査法であり、医療診断において多く用いられている。

磁気的な免疫検査法では、磁気マーカーとバイオ物質の結合反応を磁気マーカーからの磁気信号を測定することにより検出する。この磁気的な検査手法には、従来の光学マーカーを用いた光学的手法にはない多くの新機能性が期待されている。すなわち、(1) 光学的手法では困難な B/F(Bound/Free) 分離不要の液相検査が可能であり、この機能を用いれば迅速・高感度な検査が可能となる。また、(2) 磁気信号は体内を透過するため体内での結合反応を計測でき、免疫検査を体内診断へと展開することが可能となる。

ところで、微量なバイオ物質を検出するためには磁気マーカーからの微弱磁界を測定する必要がある。このため、SQUID センサを用いることにより高感度な検査システムを開発することが可能となる。本稿では、上述の磁気的手法の特徴を生かしたバイオ免疫検査法に関する我々の研究を紹介する。

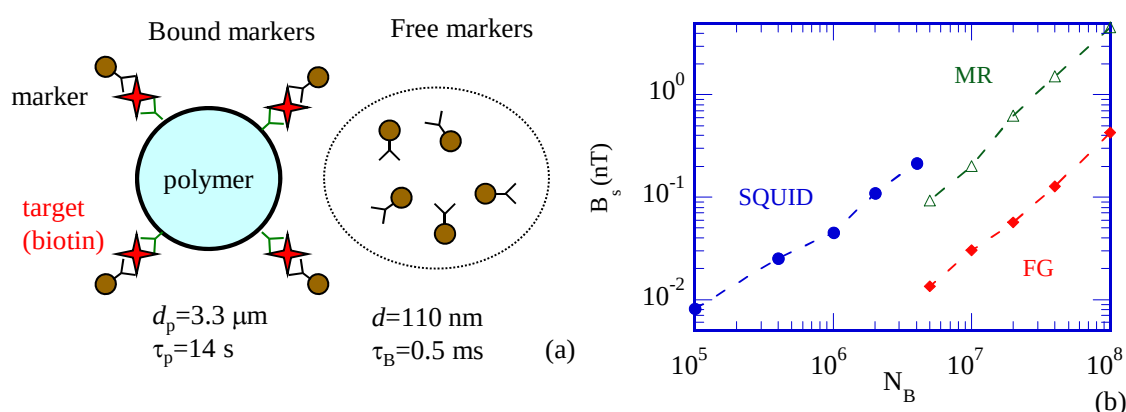


図 1 (a) 磁気マーカーを用いた液相免疫検査、(b) ビオチンの検出結果。
ビオチンの数 N_B と磁気信号の関係。

最初に磁気マーカーを用いた液相での免疫検査について紹介する。血液検査などの体外診断への応用を目指したものである。図 1(a) に示すように、直径が $3.3 \mu\text{m}$ のポリマー粒子の表面に固定用抗体を付けており、これに検出すべきバイオ物質 (target) 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 (Bound marker) となり残りは未結合マーカー (Free marker) となる。結合マーカーと未結合マーカーの磁気特性の違いを利用することにより“洗

い工程“なしで両者を磁氣的に識別出来る。

図 1(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の数 N_B であり、縦軸は検出した磁気信号を示している。図に示す様に、 10^5 個のビオチンの検出が可能であり、この検出感度はモル濃度で表すと 6 atto-mol/ml となり、アトモレベルの微量な検出が可能なが分かる。比較のため、他の磁気センサを用いて計測した結果も示している。図で MR は磁気抵抗素子 (MR センサ)、FG は Flux Gate センサを用いた結果を示す。同図に示すように SQUID を用いることにより、微量なビオチンの検出が可能となる。

次に、免疫検査の体内診断への展開について紹介する。磁気マーカーを用いた体内診断の例として、乳がんのセンチネルリンパ節生検への応用を図 2(a) に示す。図に示すように磁気マーカーを体内の患部 (ガン細胞) に注入すると、マーカーはリンパ管を經由して最初のリンパ節 (センチネルリンパ節) に到達する。ガン細胞がこのリンパ節に達していれば、磁気マーカーはガン細胞と結合しこの場所に集積する。従って、リンパ節に集積した磁気マーカーからの磁気信号を体表面で計測することによりガン細胞の広がりを検査できる。このように、体内に集積した磁気マーカーの量と位置を検出し体内診断を行なう検査法は、一般に Magnetic Particle Imaging (MPI) と呼ばれている。

磁気マーカーイメージングの模擬実験の結果を図 2(b) に示す。実験では深さ $z=20$ mm の位置にあり、距離 $\Delta x=20$ mm 離れた二つの磁気マーカー (サイズ 5 mm ϕ 、重さ 100 μ g) の検出を行なった。図 2(b) は $z=0$ mm の位置 (体表面に対応) で測定した信号磁界マップの結果である。同図に示すように二つの磁気マーカーの直上で磁界のピーク値が得られており、この場所に磁気マーカーがあることが分かる。ただし、図 2(b) に示すように磁界マップは空間的に広がっており、マーカーの位置を推定する際の空間分解能はあまり高くない。図 2(c) は特異値分解法 (SVD) と呼ばれる手法を用いて、磁界マップから磁気マーカーの分布を求めた結果である。同図に示すように二つの磁気マーカーが明瞭に区別されている。この様にして、体内に集積した磁気マーカーの位置と量を正確に検出することが出来き、免疫検査を体内診断へと展開することが可能となる。

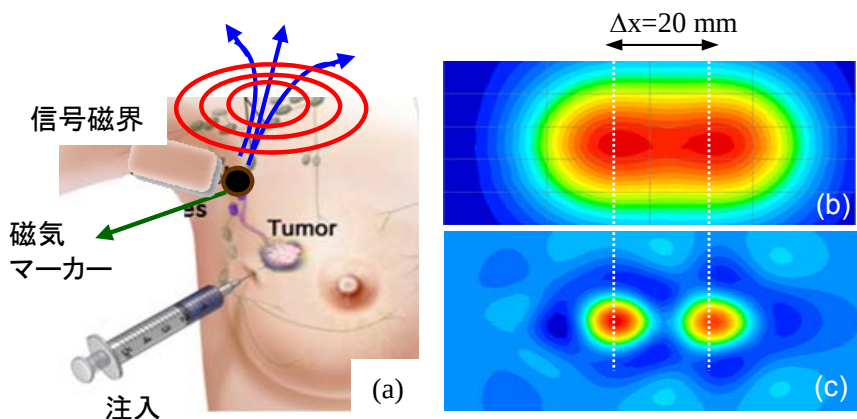


図 2 (a)体内診断のための磁気マーカーイメージング法、(b) 二つの磁気マーカーからの磁界マップ、(c) 二つの磁気マーカーの位置推定。

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 応用

「Y 系高温超電導テープ線材を利用した大型磁場偏差計」

公益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

主管研究員 塚本 晃

高温超電導 SQUID を用いた TEM (Transient Electromagnetic) 法による地下資源探査は、国内外で盛んに開発が進められており、実際の金属資源探査に活用されはじめている。TEM 法は、地面に設置された一辺 100～200 m のループコイルに数十アンペアのパルス電流を流し、地下に拡散する誘導電流から発生する 2 次磁場の減衰特性から地下の比抵抗構造を推定する探査手法である。高感度な SQUID を使用することで、従来の誘導コイルをセンサーとして用いた TEM 法よりも深部の探査が可能であるが、環境磁気雑音の影響を受けやすいという問題がある。この問題は、2 点間の磁場偏差を計測する偏差計（グラジオメータ）を用いることで環境雑音をキャンセルでき、また磁場偏差を計測することで、境界部分の検出精度が向上することも期待できる。しかし、数十から数百 m 離れた地下からの磁気信号を計測するためには長いベースライン（測定する 2 点間の距離）が必要であった。

今まで高温超電導では超電導線材を超電導状態で接続する技術がまだ開発されていなかったため、このような大型の磁場偏差計の作製が困難であったが、超電導工学研究所は、低接触抵抗で Y 系テープ線材と高温超電導 SQUID 素子を接続する方式で大型磁場偏差計を開発した。

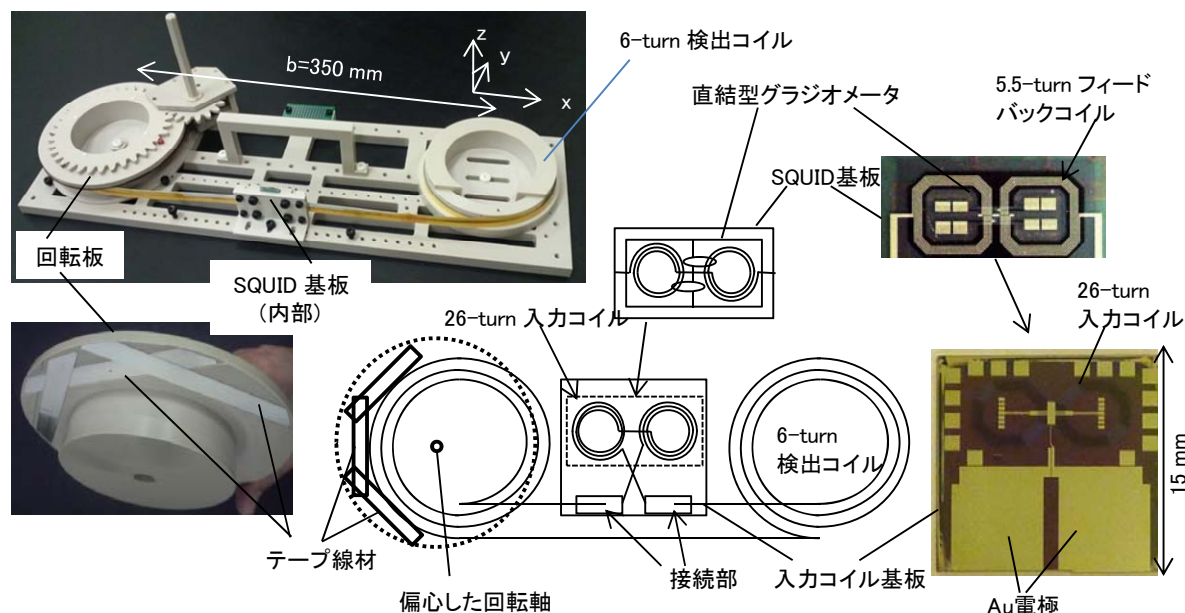


図 1 開発した大型磁場偏差計の構造

図 1 に開発した大型磁場偏差計の写真と構造図を示す。検出コイルの作製には、幅 10 mm の Gd123 系高温超電導テープ線材（（株）フジクラ製）が用いられており、両端がつながった状態で

幅 5 mm に 2 分割した後に、直径 100 mm ボビンに立体的に巻き付けることでつなぎ目のない平面型一次微分検出コイル構造を実現した (図 1)。長い線材を使用することで任意の巻き数のコイルを作製することができる。使用した SQUID 素子自体も、一次微分薄膜検出コイルが SQUID インダクタに直接結合した直結型グラジオメータになっている。検出コイルが接続される入力コイルは SQUID 素子とは別の基板に形成されており、フリップチップ方式で入力コイルの上に直結型グラジオメータがエポキシ系接着剤で固定された構造になっている。試作した磁場偏差計では入力コイルの巻き数 (N_i) は 26 巻き、検出コイルの巻き数 (N_p) は 6 巻きとなっており、インダクタンス整合が取られている。入力コイルと検出コイルとの接続には低融点合金 (融点 79°C) が用いられた。また、偏差計では検出感度に加えて 2 つの検出コイルのバランスが重要である。高いバランスを得るため、偏心した回転板に 3 本の Y 系線材が固定されたバランス調整機構を開発した。回転板の角度に依存して検出コイルに対する Y 系線材位置が内側から外側に連続的に変化するため、鎖交する磁束量を調整できる。

図 2 に磁場偏差計 ($N_i=26, N_p=6$) の周波数特性を示す。カットオフ周波数 9 Hz 以上でフラットな感度特性が得られた。低周波側の感度低下は接触抵抗の影響である。フラットな感度領域では、有効面積として 1.89 mm^2 、有効面積×ベースラインで定義される有効体積として 662 mm^3 が得られている。磁束雑音は $25 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}(\text{white})$ であり、傾斜磁場雑音に換算すると約 $1 \text{ fT/cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}(\text{white})$ の低い雑音が得られている。グラジオメータバランスは $1/142$ (バランス調整前は $1/69$) であった。地下資源探査では約 $1/1000$ のバランス性能が求められており、より高精度なバランス調整が必要と考えられる。

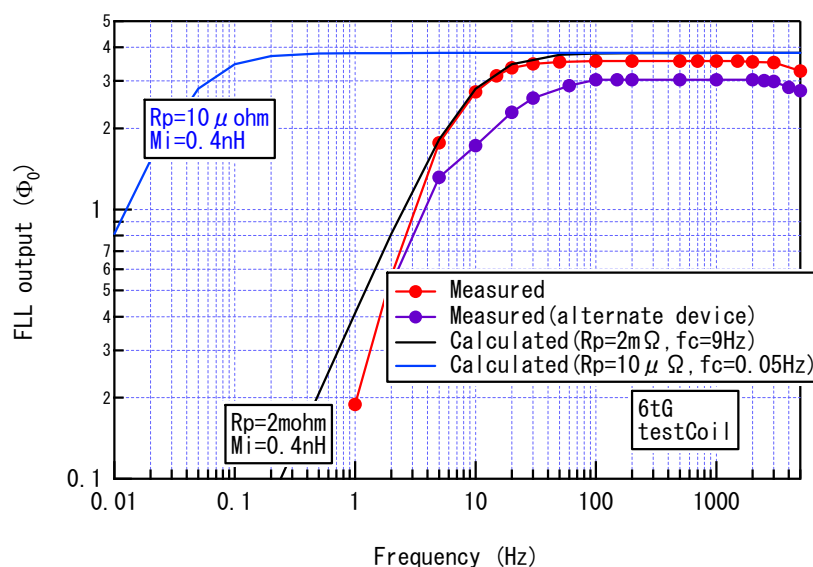


図 2 磁場偏差計の周波数特性 (実測値と計算値の比較)

本研究は、経済産業省より資金を受けた資源探査プログラムの一部として、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の委託により実施したものである。

特集：SQUID 応用

「SQUID 磁束計による地磁気計測の実用化を目指して」

金沢工業大学
先端電子技術応用研究所
教授 河合 淳

1. はじめに

地磁気計測を始めとする地球電磁気現象の観測は、地球のダイナミズムや、オーロラや磁気嵐など磁気圏における物理現象を解明するために古くから行われているが、近年地震や噴火といった地殻変動に起因する電磁気現象も示唆され研究が進められている (Hayakawa 2010)。最近のニュースでも、昨年の M9.0 の東北地方太平洋地震の発生時前後に震源付近における OLR (外向き長波放射量) が異常に増加したという報告があり (Ouzounov 2012)、地殻変動が電離層に与える影響は地表での微弱な地磁気の変化としても検出される可能性があるのではなかろうか。海外では、廃坑を利用した研究施設 (フランス：LSBB) において地殻変動により電離層が励起されたと思われる 100 pT~1 nT 程度の磁気信号を SQUID で検出したとの報告もある。(Waystand 2009)

地磁気変動の計測には従来からフラックスゲート磁力計、オーバーハウザー磁力計などが利用されている。一方で、より高感度な SQUID を応用するアイディアも早くから考えられ、国内でも地磁気計測の実験が行われた。(Kitamura 1978、Kamata 2000) また可搬性を利用した HTS-SQUID による火山近傍での野外計測なども試みられている。(Kasai 2001、Nomura 2002、Machitani 2003) しかしながらこれまでのところ、地磁気の長期連続計測に適用できる安定な SQUID システムが確立されているとは言い難い。そこで改めて『液体ヘリウムなど寒剤を扱う不便さや、絶対値が計測できないことを差し引いても、SQUID が高感度な地磁気計測の研究ツールとして有用である』ことを示し、その実用化を目指すことを目的として、野外計測に向けた SQUID システムを試作し、長期的な野外実験を行いながら実用性の検証を行うことにした。

2. 試作システムと野外計測

今回試作した計測システムは、地磁気の XYZ 成分を検出する SQUID マグネットメータ、クライオスタット、直接読み出し方式の FLL、増幅回路、およびハイパスフィルタ、ローパスフィルタなどのアナログフィルタで構成されている。図 1 左に 3 軸 SQUID マグネットメータの外観を示す。SQUID マグネットメータは Nb 系の磁束伝達方式で、チップサイズは 2.5 mm×2.5 mm である。図 1 中央は FRP 製のクライオスタットで直径 0.42 m、高さ 1 m、液体ヘリウムの容量は 35 L で 1 ヶ月間の連続冷却が可能である。SQUID を超伝導シールド中に置いて評価したシステムノイズは 100 Hz で 15 fT/√Hz、0.01 Hz で 2 pT/√Hz であり、低周波でのノイズは電子回路、特にプリアンプの温度ドリフトが支配的である。気温の変化に伴う温度ドリフトは磁場換算で最大 6.5 pT/°C であり、今後の改良課題である。また、SQUID の FLL 動作時に発生する直流オフセットをキャンセルするための機能も付加した。SQUID マグネットメータの周りには高周波ノイズの影響を低減するために電磁シールドを施し、フィルタと組み合わせた総合的な周波数帯域を DC~500 Hz 程度に制限した。検出可能な最大磁場は、地磁気の日変動を考慮して ±150 nT に設定している。データ収録には市販の 16bit データロガーを用いているが、その保証分解能から現在のところ最小計測磁場は 15 pT に制限されている。高分解能のデータロガーを用いれば SQUID 本来のノイズレベルまで収録が可能になるであろう。また、GPS からのパルス信号を取り込み、データの時刻校正を行えるようにした。

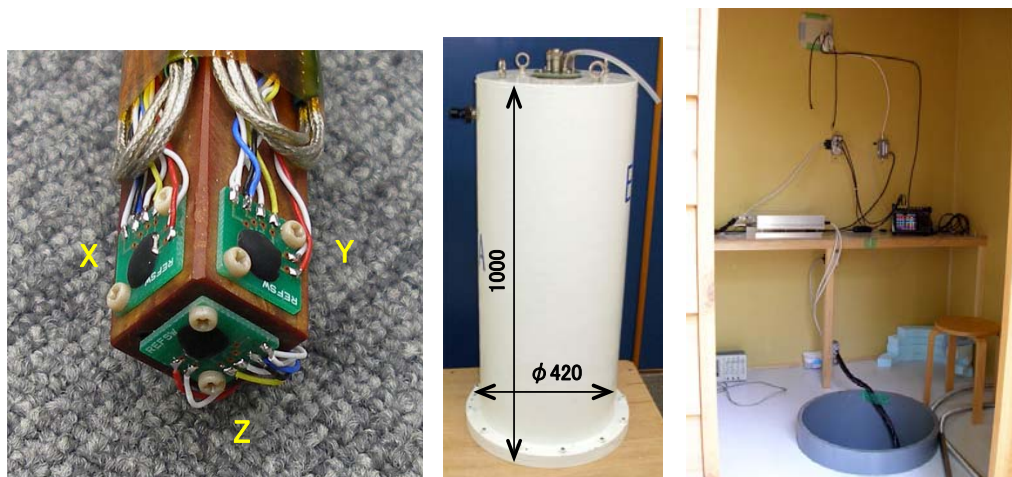


図 1 3 軸 SQUID マグネトメータ (左) とクライオスタット (中央) および実験棟内部 (右)

野外計測実験を行うために当研究所の敷地内に木造の実験棟を建設し、本年 4 月よりこの試作システムを設置して連続計測を行いながら実用性の検証を始めた。図 1 右に実験棟の内部の様子を示す。設置場所の地理的位置は北緯 $36^{\circ} 30'00.8''$ 、東経 $13^{\circ} 41'51.5''$ 、標高 199 m である。クライオスタットは地面に設けられた穴に設置され、SQUID センサは地表面より深さ 1 m に位置している。また、震動を計測するために、床下の地面に埋めた花崗岩の円柱の上に 3 軸の加速度センサを設置した。ところで一般的な地磁気変動は周期が数秒から数 1000 秒と非常に低い。従って、まずは DC からの変動が、フラックスジャンプなどの誤動作無しにきちんと検出できることを確認することが重要である。現在のところ数日おきにデータを回収しながら解析を進めているところである。

図 2 左に本システムで計測した 2012 年 5 月 12 日～14 日の約 2 日間の地磁気変動の信号例を示す。周波数帯域は DC～20Hz で、50Hz でサンプリングを行った。尚、X、Y、Z はそれぞれ南北、東西、鉛直である。まだ短い期間ではあるが、地磁気の変動が安定に計測できていることがわかる。また、このデータにカットオフ 150 秒のデジタルハイパスフィルタ処理を施した際の南北成分 (Bx) における 5 月 12 日 22:00 (JST) から 1 時間分の波形を図 2 右に示す。周期 100 秒程度の Pi2 と呼ばれる地磁気脈動が検出できていることが確認できた。

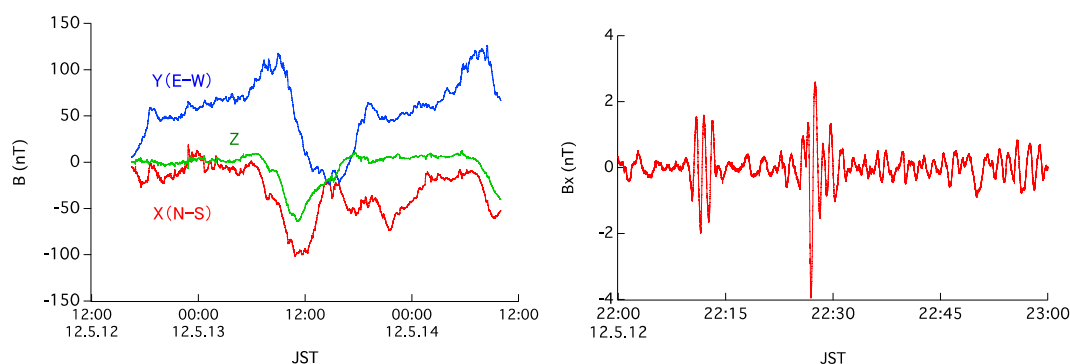


図 2 SQUID で計測した地磁気変動例 (左) と検出された Pi2 地磁気脈動 (右)

3. まとめと今後の課題

SQUID による地磁気変動の高感度計測の実用化を目指して計測システムを開発し、野外における長期の実地試験を始めた。今後 1 年以上をかけて気象条件や環境ノイズの影響などを詳しく調べ、『SQUID システムを野外での地磁気計測に最適化するためには何が必要なのか?』といった課題を検証しながら必要な改良を進め、実用化を行う予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID 応用

「SQUID を用いたプロトンとフッ素の超低磁場 NMR 計測」

株式会社日立製作所
中央研究所
関 悠介

1. はじめに

近年、超電導量子干渉素子 (superconducting quantum interference device: SQUID) を用いて、静磁場強度が地磁気レベルの 10–100 マイクロテスラ (μT) の領域で NMR/MRI を計測する、超低磁場 NMR/MRI が注目されている^{1),2)}。通常の NMR/MRI における静磁場強度は数 T であり、信号周波数 (プロトンの共鳴周波数) は 100 MHz 程度である。これに対して μT -NMR/MRI では、静磁場強度が 10–100 μT 程度、信号周波数は 1–10 kHz 程度であり、通常の NMR/MRI に比べて 5–6 桁低い。このため、超低磁場 NMR/MRI では高感度な磁気センサである SQUID を用いて NMR 信号を検出し、さらに 10–100 mT 程度の分極磁場を用いて計測対象の核スピンを前分極 (pre-polarization) することにより信号強度を高める手法が採用されている。

超低磁場の静磁場コイルや傾斜磁場コイルは、常温の銅線コイルによって構成されるため、超電導磁石に比べて大幅な小型化・低コスト化・安全性向上が可能である。また、信号周波数が kHz オーダーまで低くなることから、金属存在下での NMR/MRI 計測が可能となる³⁾。通常の MRI では不可能であった脳磁計との同時計測も、超低磁場 MRI では可能である⁴⁾。さらに、縦緩和時間 (T_1) のコントラスト画像により、腫瘍や液体爆発物など、高磁場 MRI では捉えることが困難であった組織・物質を検出する可能性が示唆されている^{5),6)}。さらに、SQUID を用いた検出手法は、共振回路を必要とする誘導コイル検出手法に比べて広帯域計測に優れている。

我々も新しい生体計測技術の開発を目指して超低磁場 NMR/MRI の研究を進めている。本稿では、上記の広帯域計測に優れるという SQUID 検出方式の特長に着目し、共鳴周波数の異なるプロトンとフッ素の超低磁場 NMR 信号を同時に計測した研究を紹介する。

2. 超低磁場 NMR の構成

本研究で試作した超低磁場 NMR の構成を図 1 に示す。超低磁場 NMR のハードウェアは大きく分けて、信号を検出する SQUID 磁束計と、サンプルに磁場を与えるコイルシステムによって構成される。本研究では、低温超電導 SQUID を用いた同軸 2 次微分型グラジオメータ (直径 50 mm、ベースライン 70 mm、磁場雑音 $0.65 \text{ fT/Hz}^{1/2}$) を作製した。

サンプルを磁化するために用いる分極磁場コイルは、信号強度の増加に重要な役割を果たす。また、分極磁場コイルに流す電流は高速に遮断されることが望ましい。このような観点から、分極磁場コイルは高周波インピーダンスの低い Litz 線 (72 本の撚り線) を直径 110 mm、長さ 178 mm のボビンに 1550 ターン巻いて作製した。また、分極磁場コイルに流れる電流を高速に遮断するため、FET リレーを用いたスイッチング回路を作製した。

静磁場コイルは、2 個のコイルを平行に対向させた Helmholtz コイルを採用した。Helmholtz コイルにおいて、サンプルが存在する中央付近において磁場均一度を確保するためには、コイル半径は対向するコイル間距離と同程度以上とする必要がある。本研究では、直径 1.2 m、コイル間距離は 0.53 m の Helmholtz コイルを用いた。静磁場 B_0 の方向 (z 方向) は、分極磁場 B_p の方向 (x 方向) と垂直であり、静磁場強度は地磁気と同程度の 50 μT とした。

磁気シールドルーム

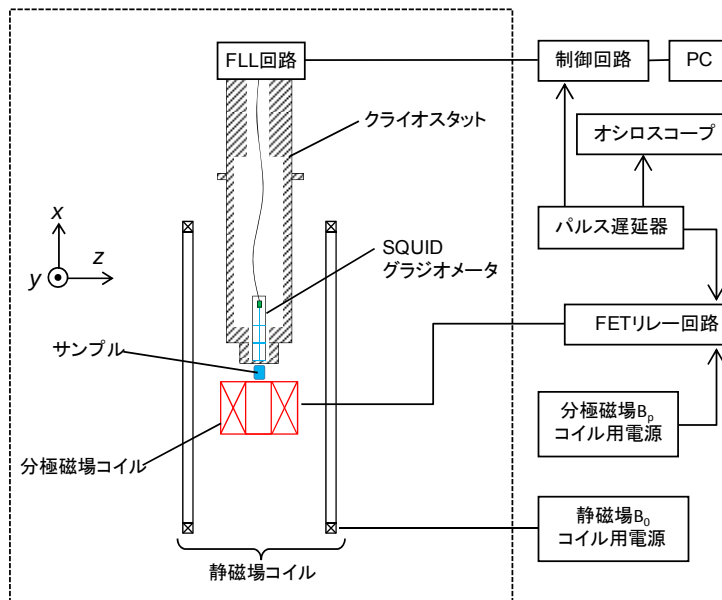


図 1 超低磁場 NMR の構成

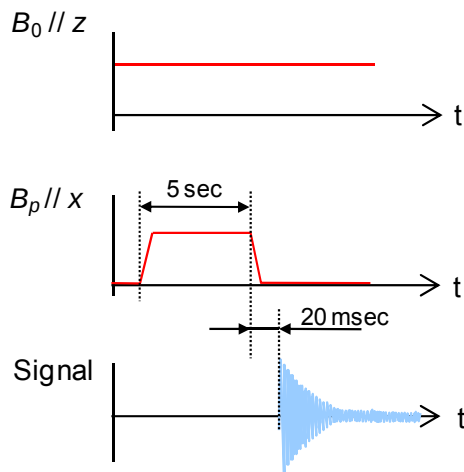


図 2 NMR 計測シーケンス

3. NMR 計測

本研究で採用した NMR 計測シーケンスを図 2 に示す。分極磁場 B_p により、サンプル中の核スピンは x 方向に磁化される。ここで、分極磁場に流れる電流を遮断すると、核スピンは静磁場 B_0 の方向に磁化していく。この時、サンプルからは、分極磁場方向に周波数 $f_0 = \gamma B_0 / 2\pi$ に対応する共鳴周波数の NMR 信号が発生し、横緩和時間 T_2 で減衰する。 γ は磁気回転比と呼ばれる定数であり、核種毎に特定の値を持つことが知られている。この NMR 信号は、自由誘導減衰 (free induction decay: FID) と呼ばれており、最も基本的な NMR 信号である。

本実験では、分極磁場 B_p は 17 mT、静磁場 B_0 は 50 μ T とした。静磁場強度はフラックスゲート磁束計を用いて計測した。また、分極磁場の印加時間は 5 sec とし、分極磁場遮断から 20 msec 後に SQUID グラジオメータによる計測を開始した。計測データは 1.6k–2.5k Hz のバンドパスフィルタを通過させた後、オシロスコープを用いてサンプリングレート 10 kHz で分極磁場遮断直後から 250 ms 計測した。さらに、得られた波形に対して FFT 処理を行い、NMR 信号のスペクトルを算出した。

サンプルは純水 (H_2O) とフッ素化合物であるパーフルオロオクタン (C_8F_{18}) を使用した。フッ素化合物は人体含有量が極めて低いため、MRI の造影剤として広く利用されている。本実験では、純水 15 ml とパーフルオロオクタン 15 ml のサンプルを対象として NMR 計測を行った。

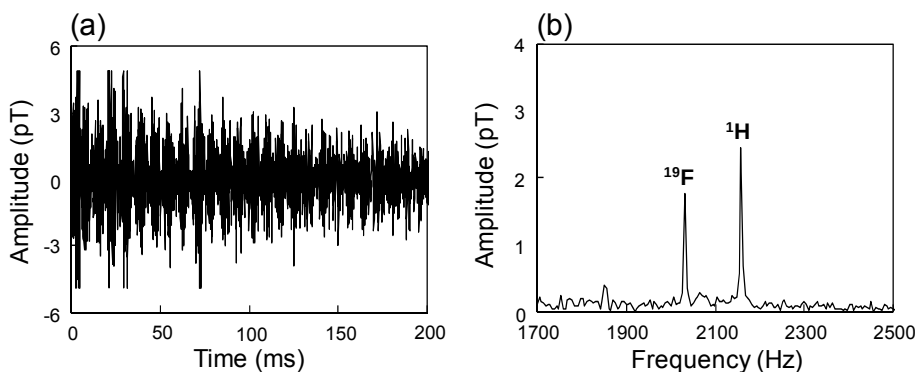


図 3 純水とパーフルオロオクタンの(a) FID 信号 (b) NMR スペクトル

図 3 (a) にサンプルの FID 信号を、図 3 (b) に FID 信号を FFT 処理して得られた NMR スペクトルを示す。これらは図 2 に示される 1 回のシーケンスによって得られた加算平均なしの実験結果である。この結果によれば、静磁場強度 50.7 μT に対応するプロトンの共鳴周波数 2158 Hz あるいはフッ素の共鳴周波数 2031 Hz において明瞭なピークが検出された。信号雑音比はおおよそ 10 であった。また、図 3 (a) の FID 信号では、プロトンとフッ素の共鳴周波数の差 127 Hz に対応するビート信号が確認できる。

4. まとめ

SQUID を用いた超低磁場 NMR 計測技術の検証を目的として、静磁場強度 50 μT において水およびパーフルオロオクタン NMR 計測を行った。その結果、共鳴周波数の異なるプロトンおよびフッ素の NMR 信号を加算平均なしで同時に検出した。以上の結果より、試作した超低磁場 NMR が複数の原子核に由来する磁気共鳴信号を高感度かつ同時に検出可能であることを実証した。

参考文献:

1. R. McDermott, S-K. Lee, B. Ten Haken, A. H. Trabesinger, A. Pines, and J. Clarke, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, 7857–62 (2004).
2. J. Clarke, M. Hatridge, and M. Mößle, *Annual Review of Biomedical Engineering* 9, 389–413 (2007).
3. M. Mößle, S. I. Han, W. R. Myers, S. K. Lee, N. Kelso, M. Hatridge, A. Pines, and J. Clarke, *Journal of Magnetic Resonance* 179, 146–151 (2006).
4. V. S. Zotev, A. N. Matlashov, P. L. Volegov, I. M. Savukov, M. A. Espy, J. C. Mosher, J. J. Gomez, and R. H. Kraus, Jr., *Journal of Magnetic Resonance* 194, 115–120 (2008).
5. S. Busch, M. Hatridge, M. Mößle, W. Myers, T. Wong, M. Mück, K. Chew, K. Kuchinsky, J. Simko, and J. Clarke, *Magnetic Resonance in Medicine* 67, 1138–1145 (2012).
6. M. Espy, M. Flynn, J. Gomez, C. Hanson, R. Kraus, P. Magnelind, K. Maskaly, A. Matlashov, S. Newman, T. Owens, M. Peters, H. Sandin, I. Savukov, L. Schultz, A. Urbaitis, P. Volegov, and V. Zotev, *Superconductor Science and Technology* 23, 034023 (2010).

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID 応用

「我が国における超電導検出器読み出し SQUID 開発の現状」

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系
助教 竹井 洋

1. TES マイクロカロリメータと SQUID

高精度の観測が要求される分野において、低ノイズの極低温検出器は非常に魅力的である。たとえば、TES (transition-edge sensor) マイクロカロリメータという超電導検出器は、超電導遷移端の急激な抵抗変化を高感度の温度計として用いる X 線分光器であり、X 線の光子 1 つ 1 つを検出しエネルギーを測定する (図 1)。分光性能は常温の半導体検出器の 50 倍以上すぐれており、6 keV の X 線に対して 2 eV が達成されている。

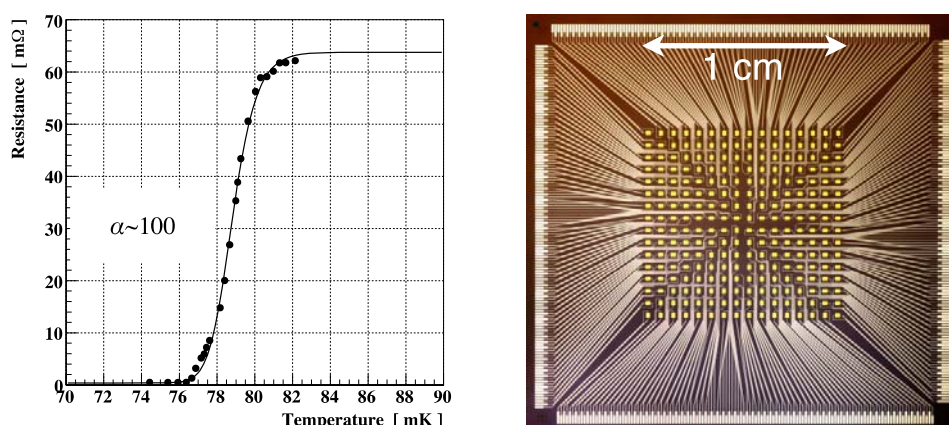


図 1. TES の抵抗-温度関係 (左) と、JAXA、首都大で製作した 256 ピクセル TES マイクロカロリメータアレイの写真 (右) ^{1), 2)}

TES マイクロカロリメータに X 線が入射すると TES の抵抗が変化し、TES を流れる電流が変化する。TES のインピーダンスは $1\ \Omega$ 以下と小さいため、この信号を読み出して増幅するには、低インピーダンス、高感度、低ノイズの電流計 (プリアンプ) が要求される。これは、TES の出力を超電導コイルで SQUID (dc-SQUID) に結合することで実現する。TES、SQUID 共に、極低温で使用する超電導を利用したデバイスであり、非常に相性がいい。実際、SQUID と組み合わせて用いるようになって、はじめて TES マイクロカロリメータの開発が大きく進展した、という経緯があったほどである。

2. SQUID の新規開発で実現した TES の信号多重化

TES マイクロカロリメータの実用のためには、TES だけではなく、SQUID の開発が鍵となる。特に宇宙からの X 線の観測のためには人工衛星に搭載する必要があり、使用電力や冷媒の量の極めて厳しい制限がある。我々は、十分な低ノイズ、ゲインを持ちながら、低発熱かつ複数の TES から

の信号多重化を可能にするような SQUID の開発を行っている。SQUID の製作は国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) 超電導工学研究所のニオブプロセスラインで行った。製作した SQUID を図 2 に示す。

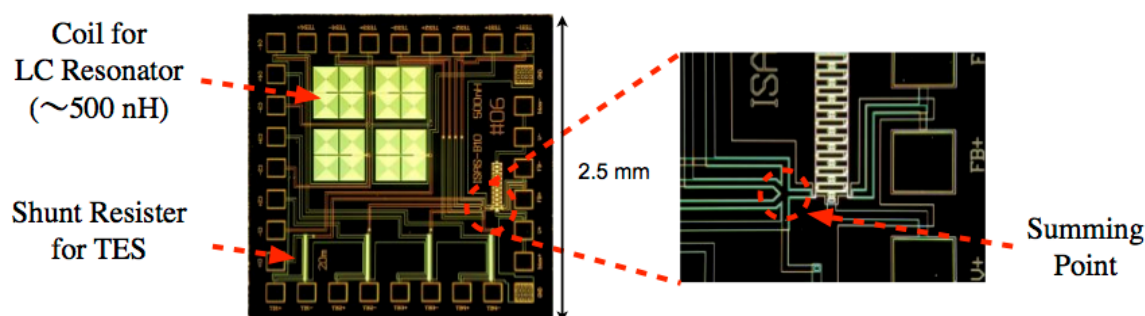


図 2. ISTEC と開発した低発熱・信号多重化可能な SQUID 電流計

宇宙応用など、世界最先端の性能が要求される分野では、開発している検出器の性能にマッチした SQUID を設計・製作する必要がある。ISTEC のような高性能のプロセスラインを有する機関が日本にあり、協力して設計を詰められることの意義は大きい。小面積でも再現性の高い JJ が製作できるプロセスラインは高性能の SQUID の開発に最適である。我々の開発している TES は信号多重化のために MHz 帯の交流バイアスで動作させるため、TES 駆動のためのシャント抵抗や LC バンドパスフィルタのための超伝導コイルも必要となる。図 2 のようにそれらを SQUID と同じチップに成膜することで、省スペースが実現できている。図 3 には TES と SQUID を接続して取得した信号の例を示す。我々が MHz 帯で駆動した複数の TES の信号を同時に読み出すことができたのは初めてである。SQUID の開発によって研究が大きく進展したことは喜ばしい。

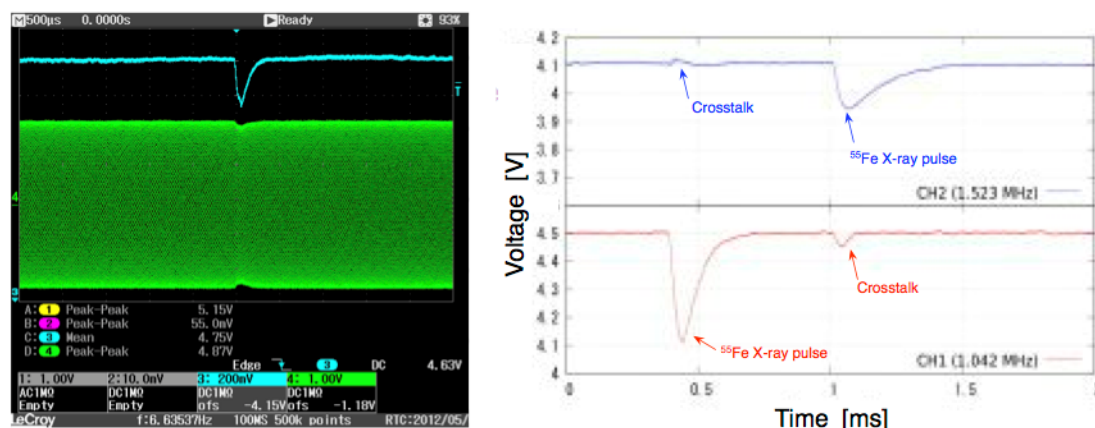


図 3. 開発した SQUID を TES と組み合わせて取得した信号。

左: SQUID 信号入力に同等なフィードバック信号 (緑) と復調後の信号 (青)。
右: 1 MHz と 1.5 MHz で駆動した 2 つの TES からの信号を復調した例

3. おわりに

高い感度、分光性能を持つ TES は、X 線天文だけでなく、他波長の宇宙応用や、微量分析などにも応用されている³⁾。TES の画素数を増やし、データを高速に取得できるようになることが、応用範囲を広げる上で望まれている。SQUID の開発を進めることで、そのような応用が発展していくことも期待している。

参考文献：

1. 江副祐一郎、篠崎慶亮、竹井洋、日本物理学会誌 第 64 巻、第 8 号、61
2. Ezoe *et al.*, 2009, AIP Conference Proc. 1185, 60
3. <http://www.nims.go.jp/AEMG/recent/TES-TEM/TESTEM1006/TESTEM1006-1.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 ‘12/8 月-9 月の催し物案内

8/2-3

低温工学・超電導学会

2012 年度東北・北海道支部研究会／第 2 回材料研究会

場所：まちなかキャンパス長岡

問合せ：<http://csj.or.jp/>

8/26-30

18th International Conference on Biomagnetism

場所：Paris, France

問合せ：<http://www.biomag2012.org/>

8/30-8/31

鉄道総研 技術フォーラム 2012

エネルギー問題に対する鉄道総研の取り組み

場所：国立研究所

問合せ：http://www.rtri.or.jp/index_J.html

8/31-9/1

低温工学・超電導学会

東北・北海道支部／第 17 回超伝導・低温若手セミナー

場所：新潟大学・新潟駅前キャンパスときめいと

問合せ：<http://csj.or.jp/>

9/11-9/14

電子情報通信学会

ソサイエティ大会

場所：富山大学 五福キャンパス

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

9/11-9/14

応用物理学会

2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会学術講演会

場所：愛媛大学・松山大学

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

9/17

低温工学・超電導学会 九州・西日本支部

2012 年度 若手セミナー・支部研究成果発表会「低温物性・超電導特性の測定法」

場所：九州地区九重共同研修所

問合せ：http://www.csj.or.jp/kyushu/2012/Jr_Seminor_0917.pdf

9/17-9/19

日本金属学会

2012 年秋季大会

場所：愛媛大学

問合せ：http://jim.or.jp/MEETINGS/2012_atmn/2012_autumn.html

9/18-9/21

日本物理学会

2012 年秋季大会

場所：横浜国立大学

問合せ：<http://jps2012au.ynu.ac.jp/index/>

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (6/21-7/20)

- レアアース価格反転狙う 中国、埋蔵量を下方修正 需要減に危機感 日本経済新聞 6/21
- 超電導直前に電子変化 京大など 鉄系物質の特性解明 日経産業新聞 6/22
- 私の履歴書 高温超伝導 熱狂の講演 前線で体験 日本経済新聞 6/23
- 再生可能エネルギー 効率供給の視点なし 価格更新頻度短縮を 電気新聞 6/25
- 時速 500 キロでトンネル疾走 本番に向け延伸工事着々 JR 東海山梨リニア実験線 Fuji Sankei Business i. 6/25
- 熱核融合実験炉 計画通り建設へ 理事会で合意 日経産業新聞 6/26
- 超電導物質の新タイプ 東北大が発見 銅酸化物、3 層構造 日経産業新聞 6/28
- リニア始動 ルート来秋絞り込み 日本経済新聞 (夕刊) 6/29
- 地域共生 発展の鍵に 7 月 1 日全量買い取り開始 中央資本一辺倒に限り 電気新聞 6/29
- 南鳥島付近にレアアース EEZ 内 国内需要 200 年分 朝日新聞 (夕刊) 6/29
- ランタン系銅酸化物に超電導物質 電子取り除き発現 東北大 日刊工業新聞 6/29
- 再生可能エネルギー 「固定価格買い取り」7 月からスタート 制度の定着には不断の見直しが必要だ Fuji Sankei Business i. 6/29
- 再生エネ原発 2.5 基分 買い取り制度きょう開始 毎日新聞 7/01
- 再生エネ元年拡大どこまで 再生可能エネルギー電力全量買取制度スタート 電気新聞 7/03
- 「リニアで巨大都市実現を」世界都市サミット 石原知事が講演 読売新聞 7/03
- 風力発電の連系 随時受け付けへ 東北電力 電気新聞 7/04
- 「ヒッグス粒子」発見 欧州原子核機関 質量与える役割 現代物理の枠組み証明 読売新聞 7/05
- 「神の粒子」発見 日本貢献 東大など 110 人参加、実験器具を製造 読売新聞 7/05
- 宇宙成立の謎解明へ光 ヒッグス粒子 質量もたらし原子誕生 読売新聞 7/05
- ヒッグス粒子存在確実 宇宙探る基本理論完成へ 巨大研究施設「LHC」日本企業が存在感 日本経済新聞 7/05
- NEDO 洋上風力事業 北九州に国内初の風況塔 電気新聞 7/06
- 「電子のネマティック液晶状態を発見」高温超伝導体の仕組み解く鍵へ京大、原子力機構など共同 科学新聞 7/06
- 30 年の洋上風力発電市場 8 倍の 3 兆 875 億円 富士経済まとめ 日刊工業新聞 7/10
- 東工大、鉄系超電導体に 2 倍以上の電子注入成功―「転移温度」上昇に道 日刊工業新聞 7/11
- イットリウム系超電導で特許 AMSC 日経産業新聞 7/11
- 鉄系超電導で新現象 東工大が発見 抵抗ゼロの温度 10 度上昇 日経産業新聞 7/11
- ダウンウインド型洋上風車 500 キロワット級開発着手 日立 15 年度、本格販売へ 電気新聞 7/13
- ホールを注入した T' 型銅酸化物超伝導物質 東北大の研究グループ発見 科学新聞 7/13
- 酒の有機酸で超電導 物材機構と慶大 鉄化合物を利用 日本経済新聞 7/17
- 赤ワインでなりやすく お酒で煮込む超電導体に 物材機構と慶大 仕組み解明 日経産業新聞 7/17
- 電力貯蔵の最新動向 実用化へ 3 件報告 超電導エネルギー貯蔵研究会 電気新聞 7/17
- 高温超伝導 前触れあった「ネイチャー」「サイエンス」に 2 論文 大阪読売新聞 7/17
- 風力発電：普及へ送電網整備促進 新産業育成会議 毎日新聞 7/18
- どうする原発比率：選択の前に 再生可能エネルギー 毎日新聞 7/19

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（2012 年 6 月）

公益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 山田 穰



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶加速器・基礎

ヒッグス粒子 長年の夢

CERN（2012 年 7 月 4 日）

ATLAS と CMS の両実験で、長年続けてきたヒッグス粒子の探索に関して最新の暫定結果を発表した。両実験ともに、質量領域 125-126 GeV 付近に新粒子を観測し、5 シグマ程度の顕著な新素粒子の信号を観測したのである。実験結果はまだ暫定的なものであるが、まさに画期的な新粒子の発見であり、これまで発見されたボゾンの中で最も重いものである。現在報告されているのは、2011 年と 2012 年に収集されたデータを基にしているが、2012 年のデータの一部はまだ解析途中にある。今回の解析結果の最終公表は 7 月末を予定しており、LHC の実験でさらにデータを収集した後に、今年後半には観測結果の全体像が見えてくる。この粒子の性質を精密に測定し、宇宙を理解する上でどのような役割を果たしているかを明らかにすることが次のステップである。CERN 所長の Rolf Heuer 氏は、「我々は自然を理解する上での新たな段階に入った。ヒッグスボゾンとみられる粒子の発見は、より詳細な研究への道が開かれたと言える。たくさんのデータを収集することで、新粒子の性質をさらに突き止めることができ、そこから我々の宇宙に関する他の謎を解き明かすことができるかもしれない。」と語った。

（出典）

Source: “CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson”

CERN press release (June 13, 2012)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR17.12E.html>

Contact: CERN press office, Email: press.office@cern.ch

▶ 電力応用



再生可能エネルギー用に 100 台目の STATCOM を出荷

AMSC (2012 年 6 月 13 日)

AMSC 社は、100 台目となる自励式無効電力補償装置 (STATCOM) ソリューションの販売について発表した。同社が開発したこの D-VAR® STATCOM システムの使用目的は、(1) 送電網で懸念される電圧不安定性問題の修正、(2) 送電網と配電網における動的定常状態での電圧並びに力率の制御およびその規制の提供、(3) プレミアム電力品質を必要とする産業施設の保護、そして(4) 分散型発電施設と大型風力発電所や太陽光発電ファームの安定した相互接続のサポートである。

これらは全て、送電システムと発電地点で起こりうる連係障害、グリッドへの擾乱、そして安定性の問題を解決するのに役立つソリューションであり、再生可能エネルギーの発電施設と電力グリッドを安全且つ効率的に接続させることが可能となる。公益電力事業の送電または配電システムと連結して使用する場合、D-VAR システムは、電力グリッドを監視しながら自動的に且つ素早い電圧安定化を提供し、既存の電力線を使ってより大電力、より信頼性の高く効率的なエネルギーを送ることができる。よって、大規模産業施設に設置された D-VAR STATCOM ソリューションは、最終的には、電圧のサポートや安定化に加え、大容量のドライブ、モーター、その他機器の起動時に発生する電圧不安定性の問題を解決することができる。これにより、プレミアム電力品質の確保が実現されている。

100 台目の STATCOM ソリューションについては、Iberdrola Renewables LLC 社が購入し、New Hampshire 州にある 48 MW の風力発電所と電力グリッドを接続するのに使用される。この風力発電所では、150 人以上の建設要員が採用され、発電所が作動可能となれば、New Hampshire 州 Groton 町の年間自治体予算総額の半分以上が提供されることになる。Iberdrola Renewables 社は現在、米国で行われている 50 以上もの再生可能エネルギープロジェクトに参画している。

(出典)

Source: "AMSC Celebrates 100th STATCOM Sale"

AMSC press release (June 13, 2012)

http://www.amscom/about/news_events/press_releases.html

Contact: Jason Fredette, Email: jason.fredette@amscom

▶ 線材



高温超電導基本特許

AMSC (2012 年 6 月 5 日)

AMSC 社は、HTS の基本特許*に関して米国内での専売権を取得した。特許には、広範囲にわたる次世代 (2G) 並びに類似の HTS 材料、線材、そして電源関連アプリケーションが含まれている。電源関連とは、"スマート"電源ケーブル、限流器、風力タービン発電機 (特に大容量、洋上風力タービン用)、および超小型モーターなどである。特許に関する追加情報は、同社が 6 月下旬に申請する米国証券取引委員会の Form10-K 年次報告書にて確認できるようになっている。同社の社長兼最高経営責任者である Daniel P. McGahn 氏は、「世界中のパートナー企業との協力のもと、AMSC 社は、業界最高水準の能力、生産、受注率を備えており、期待どおりの HTS 材料を提供するに至った。我々本来の市場地位に関しては、その知的財産のポートフォリオは比類のないものである。この新しいライセンスによって、我々の地位が一層強固なものとなり、その結果、我々は米国市場における 2G 線材のニーズに応えるべく能力を将来何年にもわたって増強させていくことができる。」と述べた。

(出典)

Source: "AMSC Receives Exclusive Right to Fundamental HTS Patent"

AMSC press release (June 5, 2012)

http://www.amsc.com/about/news_events/press_releases.html

Contact: Jason Fredette, Email: jason.fredette@amsc.com

*編注 ; AMSC 社 Form10-K 年次報告書 (下記アドレス参照) によれば、本特許は 2G や同様の HTS 線材・応用をカバーする下記的基本的特許で、AMSC は 2017 年まで Exclusive Right を取得した。

Patent No.: U.S. 8,060,169 B1,

Date of Patent: Nov.15, 2011,

Title: Superconductive Compounds Having High Transition Temperature, And Methods for their Use and Preparation

Inventors: J. G. Bednorz, C. A. Mueller

Assignee: International Business Machines Corporation, Armonk, NY (US)

Filed: Jun.7,1995

なお継続出願にいくつかあり、最初の出願は May 22, 1987 で、これらは放棄している。

Abstract : 新しいクラスの超電導組成物 (compositions)、その作成及び使用を記述。この組成物は 26 K 以上で超電導を発現。事例として、RE-AE-TM-O (RE;レアアース等、AE;アルカリ土類、TM ; 銅などの遷移金属、O ; 酸素)

AMSC 社 Form10-K 年次報告書

http://www.faq.s.org/sec-filings/120626/AMERICAN-SUPERCONDUCTOR-CORP-DE-_10-K.A/

▶ 経営・決算



2011 年決算

AMSC (2012 年 6 月 6 日)

AMSC 社は、2012 年 3 月 31 日締め 2011 年度第 4 四半期および通年決算を発表した。同社の 2011 年度第 4 四半期の収益は、前年同期の 5980 万ドルに対して、2860 万ドルとなった。この収益減は、主に元顧客である Sinovel Wind 社からの収入不足が原因である。また、第 3 四半期の収益 (1810 万ドル) に比べ第 4 四半期にかけて収益増が見られたのは、主に風力並びにグリッド事業の報告セグメントの業績の影響である。第 4 四半期の純損失は、前年同期の 1 億 8510 万ドル (一時的資産

評価損の総額、減損額、および未払い費の 1 億 5530 万ドルの損失を含む) に対して、2120 万ドルであった。そして、第 4 四半期の非 GAAP ベースの純損失は、前年同期の 2610 万ドルに対して、1510 万ドルであった。

同社の通年総収益は、前年度の 2 億 8660 万ドルに対して、今年度は 7650 万ドルとなった。この収益減もまた、主に Sinovel 社からの収入不足が原因である。同社の 2011 年度純損失は、前年度の 1 億 8630 万ドルに対し、1 億 3680 万ドルであった。また、通年の非 GAAP** ベースの純損失は、前年度の 1280 万ドルに対して、今年度は 8550 万ドルであった。2012 年 3 月 31 日時点で、同社の現金、現金同等物、有価証券、ならびに拘束預金の総額は 6620 万ドル、受注残高は約 2 億 9100 万ドルであった。

2012 年 6 月 5 日、同社は Hercules Technology Growth Capital から 1000 万ドルの融資と担保契約を受けたことを発表した。融資の金利は 11 % である。

2012 年 6 月 30 日締め四半期において、同社は 2600 万ドルを超える収益と 1000 万ドル未満の純損失（特定の業者との不利な購入契約における示談交渉の手当金 700 万ドルを含む）を見込んでいる。また、2012 年度第 1 四半期の非 GAAP ベースの純損失は、1300 万ドル未満であると予測している。2012 年 6 月 30 日時点で、同社は現金、現金同等物、有価証券、ならびに拘束預金で約 8500 万ドルを確保する予定である。

(出典)

Source: "AMSC Reports Fourth Quarter and Fiscal Year 2011 Financial Results"

AMSC press release (June 6, 2012)

http://www.amscom/about/news_events/press_releases.html

Contact: Jason Fredette, Email: jason.fredette@amscom

**GAAP (generally accepted accounting principles 一般会計原則)

▶ 基礎



ネマティック液晶状態と超電導

Rice University (June 20, 2012)

Rice 大学、京都大学、そして高輝度光科学研究センター (JASRI) の研究者たちは、鉄系高温超電導材料と銅酸化物高温超電導材料の電子的性質に興味深い類似点があることを報告した。この国際的研究グループは、鉄系高温超電導材料の電子的性質が水平方向と垂直方向で異なり、銅酸化物高温超電導材料で観察された非対称性と似ていることを発見した。“ネマティック状態”として知られるこの非対称性は、広範な温度域（物質が超電導になる時を含む）にわたって観察される。また、この非対称性は異なったドーピング組成を有する物質でも観察された。研究者たちは、リンをドーピングした時に超電導になるヒ化バリウム鉄の親化合物をここで使用した。リンの分量を変え、さまざまな温度での電子的挙動を測定し、高温超電導が起こる原因を調べることができた。高温超電導材料は冷却されると、一連の中間相を経て超電導相に到達する。これらの相転移は、温度や化学的ドーピングに基づいて高温超電導材料が占有する特定の相を表した相図を用いて可視化することができる。ネマティック状態は、これまで考えられていたような磁気相の近傍だけに存在するのではなく、超電導に至る全工程に存在するのだという新しい証拠が示された。さらに興味深いことに、ヒ化バリウム鉄の相図は、銅酸化物高温超電導材料の相図に似ている。特に、鉄系高温超電導材料の

ネマティック秩序として新しく示された領域は、銅酸化物高温超電導材料の“擬ギャップ”として知られる領域に限りなく類似している。Rice 大学の物理学准教授 Andriy Nevidomskyy 氏は、「物理学者たちは長い間、擬ギャップの起源と重要性を高温超電導の前駆現象の 1 つの可能性として議論してきた。この新しい研究結果により、鉄系高温超電導体における擬ギャップの潜在的な類似物質の手がかりが初めて提供されたことになる。」と述べた。同研究グループでは、彼らの研究結果は、今後、物理学者たちがネマティック電子状態は高温超電導に不可欠であるか否かを決定する上で役立つものと確信している。同研究グループの研究成果は **Nature** に掲載されている。

(出典)

Source: “Asymmetry may provide clue to superconductivity”

Rice University press release (June 20, 2012)

<http://news.rice.edu/2012/06/20/asymmetry-may-provide-clue-to-superconductivity/>

Contact: Jade Boyd, Email: jadeboyd@rice.edu

編注) http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120621_1.htm にも詳しい説明があります。



鉄系超電導体の磁性

Ames Laboratory (2012 年 6 月 25 日)

米国エネルギー省にある Ames 研究所の研究者たちは、京都大学、Illinois 大学 Urbana-Champaign 校、Bristol 大学（英国）との共同研究において、鉄系高温超電導材料において、磁気が超電導の発現を手助けしている、もしくはその原因となっているかもしれないことを発見した。同研究チームでは、超電導状態にある時のこれら材料の基本的な情報を取得するために、ロンドン侵入長（磁場が超電導体を貫通する深さ）を測定してきた。Iowa 州立大学の准教授並びに Ames 研究所主任研究員である Ruslan Prozorov 氏は、「ロンドン侵入長とは、超電導状態中の出来事を学ぶ上で測定が可能な数少ない量の 1 つであり、我々がここ Ames 研究所で特化したこの技術は、今回の研究プロジェクトでは特に効果的であった。共同研究において、我々は 0 ケルビン（絶対温度）近くでバリウム-鉄-ヒ素-リンの化合物を研究し、我々が行ったロンドン侵入長測定では、磁気が鉄系超電導体の超電導を引き起こすことを示唆している。通常、磁気は超電導に弊害をもたらすが、十分に弱ければ、実のところ超電導を促進している可能性がある。」と述べた。同研究チームの研究成果は **Science** に掲載されている。

(出典)

Source: “Unraveling the mysteries of exotic superconductors”

Ames Laboratory press release (June 25, 2012)

<http://www.external.ameslab.gov/news/news-releases/unraveling-mysteries-exotic-superconductors>

Contact: Breehan Gerleman Lucchesi, Email: breehan@ameslab.gov

[超電導 Web21 トップページ](#)

「低温工学協会超電導応用研究会シンポジウム参加」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

6 月 6 日に JAXA 宇宙科学研究所（相模原キャンパス）において低温工学協会超電導応用研究会シンポジウム「JAXA における衛星搭載超電導技術の進展と将来展望」が開催された。本シンポジウムでは JAXA で現在開発中の科学天文衛星に焦点を当て、超電導を利用した赤外線・X 線検出技術、100 mK 級の冷凍機技術について講演が行われた。また、講演終了後衛星試験設備、X 線、赤外線検出器実験室の見学会が行われた。

満田先生から JAXA における衛星用超電導技術開発の概要説明があった。宇宙観測は雑音パワーを下げ、エネルギー分解能を向上させるために本質的に超低温が必要となる。現在打ち上げられている衛星には半導体の検出器が用いられているが、エネルギー分解能と応答速度に優れた TES（超電導遷移端検出器）型の検出器が次世代の衛星搭載用として開発されている。TES 型を用いるもう一つのメリットは、インピーダンスが低いため読み出しに SQUID が使えることである。SQUID を使うと極低温での信号多重化により大規模 TES アレイの読み出しを行うことができる。100 mK 級の極低温冷凍機として、多段化した断熱消磁冷凍機（ADR）が開発されている。また、異なる温度ステージを結ぶための低熱伝導リードとして高温超電導体が用いられており、ISTEC と共同で将来に向けた高温超電導リード開発に着手したことが述べられた。

東大の土井先生から SPICA 搭載赤外線検出器 SAFARI の説明があった。遠赤外線を用いた天体観測は銀河・星・惑星の形成および進化を調べるために決定的に重要であるが、遠赤外線は大气吸収を強く受けるため、地上観測が不可能であり人工衛星などの飛翔体観測が不可欠である。高空間分解能を達成するための大口径と天体からの微弱な遠赤外線を観測するための冷却（<10 K）を同時に達成することを目的とした初の衛星ミッションは JAXA が計画する SPICA であり、搭載する赤外線検出器が SAFARI である。SAFARI ではその非常に高い検出感度を達成するために、検出素子として周波数分割多重化を用いた TES 大規模アレイ（388 素子）を採用する計画である。SPICA 打ち上げは 2020 年代初頭を予定しているが、そこから逆算すると使用する検出器開発は今年度中にフィックスする必要があるとのことであった。

人工衛星搭載用 X 線分光検出器研究の紹介が JAXA の竹井先生からあった。X 線も赤外線同様地上では観測できず、衛星搭載が必須である。X 線衛星で現在主に使用されている検出器は X 線 CCD と回折格子であるが、どちらも分光と撮像を両立することはできず、この両立が可能な検出器として TES 型マイクロカロリメータの開発が行われている。TES は JAXA と首都大で 16×16 アレイが作製され、6 keV に対して 2.8 eV の分光性能が得られている。周波数分割多重化用の読み出し SQUID は、設計を JAXA・産総研、作製を ISTEC が担当して開発が進められている。また、三次元形状を持ったステージの複数面に各部品を配置するための超電導配線技術が開発されている。

衛星搭載用 ADR 開発が JAXA の篠崎先生から紹介された。ADR は原理的に重力を使用しないため、無重力下で 100 mK を高い温度安定度で作り出すことのできる冷却手段である。ADR は日本の“すざく”で初めて宇宙機に搭載され、宇宙空間において世界で初めて 60 mK を作り出すことに成功した。また、宇宙用としては近年多段式の ADR が主流になりつつある。さらに、多段式の各段の冷却サイクルを交互に行い、連続的に 100 mK 以下を作り出す連続型 ADR が研究開発されている。

読者の広場

Q&A

Q: 『超電導で水素効率移送 世界初試験に成功』との記事がありました。どのように移送するのでしょうか。また、どういう応用が期待されるのでしょうか？

A: 現在のエネルギー問題や環境問題を解決する先進技術の 1 つとして、水素エネルギー社会が検討されています。水素エネルギーを持続可能な形で利用するためには、水素を安全かつ安定的に製造・輸送・貯蔵・移送する社会システムを構築する必要があります。水素の利用形態として主に、高压ボンベ内に圧縮した水素ガス、および断熱容器内に比較的低压で保持した液化ガスがあります。水素は最も軽い元素であり、体積エネルギー密度（単位体積当たりの利用可能エネルギー）が本質的に小さいため、特に輸送や貯蔵の際には液化ガスとして利用する方が優位となります。何故なら、将来の燃料電池自動車へ搭載予定である 70 MPa（約 700 気圧）の水素ガスの密度でさえ、大気圧下にある液体水素の密度の半分程度と小さいためです。この液体水素は大気圧下で約 20 K の沸点を有するため、西暦 2000 年に発見された約 39 K の臨界温度をもつ二ホウ化マグネシウム (MgB_2) 超電導体を利用することが可能となります。そこで、 MgB_2 線材を適用した水素利用基盤技術を開発するために、超電導ポンプを用い液体水素移送を目指した産業技術研究助成事業（期間：2008 年 6 月～2012 年 5 月の 4 年間）が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援の下で実施されました。

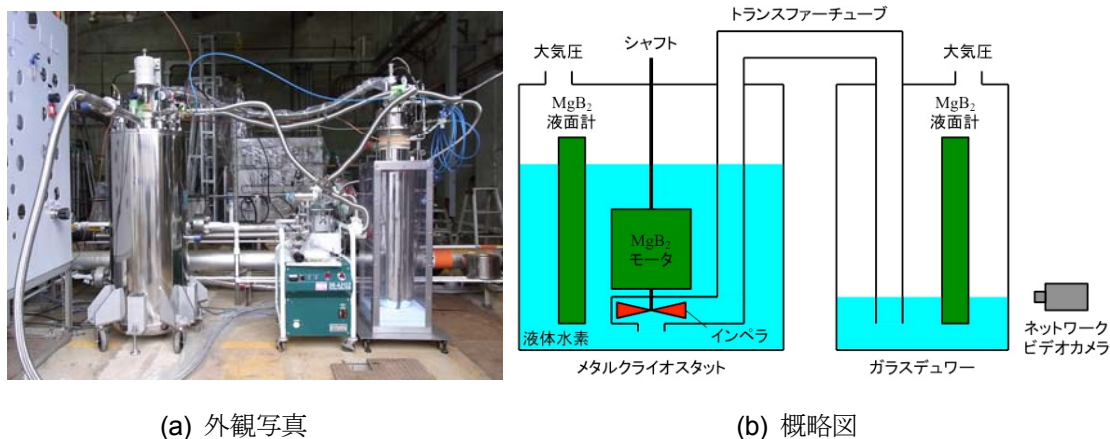


図 1 製作した MgB_2 超電導ポンプシステム

図 1 に、製作した MgB_2 ポンプシステムの外観とその概略図を示します。 MgB_2 線材を用いて製作した超電導モータをメタルクライオスタット内に設置しました。かご型回転子巻線を MgB_2 線材で構成し、鉄心内に配置しました。本構造は高温超電導誘導／同期機（HTS-ISM）と呼ばれており、研究分担者の 1 人である中村武恒准教授（京都大）が中心になって研究開発しているものです。なお、固定子には通常の銅線を巻いたものを使用しました。本モータのシャフトの片方にアルミ製のインペラ（羽根車）を取り付けました。インペラ周囲をケーシングすることで遠心ポンプを構成し、ケーシングの下部中央から吸い込んだ液体水素を遠心力で押し出すことが可能になります。メタルクライオスタットから移送された液体水素を受け取るために別容器であるガラスデューワーを準備し、両者を有効内径 10 mm のトランスファーチューブで接続しました。また、ネットワークビデオカ

メラも用意し、スリットを介してガラスデュワー内部にある液体水素の様子を撮影しました。MgB₂ 線材を用いて製作した 2 本の超電導式液面計も両容器内に鉛直に配置し、液体水素の液位を計測するだけではなく、その出力を基にして MgB₂ モータの回転を制御しました。これらの MgB₂ 線材はすべて、(株) 日立製作所日立研究所からご提供いただいたものです。蒸発ガスを逃がすためにほぼ大気圧のベントラインへ直接配管したため、両容器は常圧となっています。研究分担者の 1 人である小林弘明主任研究員 (JAXA) が所属する能代ロケット実験場にて実施した一連の試験の結果、回転数 1800 rpm で最大 6.5 リットル毎分の液体水素を移送することに成功しました。

国内 3 社の自動車メーカーは、2015 年に燃料電池自動車を市場投入する計画であり、主要都市で多数の水素供給ステーションが建設されています。当初は、多数の高圧ポンペを枠組みに固定したカードルで圧縮水素ガスの輸送や貯蔵を運用しますが、圧縮水素ガスは密度が小さいため非効率적입니다。そこで、水素を大量消費する近未来には、より密度の大きな液体水素を輸送や貯蔵に利用するようになると思われます。液体水素の輸送では、タンクローリーに搭載した液体水素を水素供給ステーションにある液体水素貯槽へ移送する際に、電気式で簡便な超電導ポンプが活躍すると思われます。また、水素供給ステーションの液体水素貯槽内部に設置した超電導ポンプを駆動すれば、燃料電池自動車等の利用機器へ水素を簡便に移送することが可能となります。将来的には、海外の風況が良好な地域に設置した風力発電設備や、日射条件が良好な地域に設置した太陽電池パネル等の再生可能エネルギーを利用して、水の電気分解により水素を発生させた後に液化し、大型のタンカーにより消費地へ輸送した大量の液体水素を小分けする際にも、超電導ポンプが必要となります。さらに、パイプラインを敷設して大量の液体水素を輸送する際にも、超電導ポンプが利用されるかもしれません。

回答者：九州大学 超伝導システム科学研究センター 准教授 柁川 一弘 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」