

掲載内容（サマリー）：

特集：SQUID を用いた診断・検査技術の動向

- 高温超電導磁力計を用いた金属資源探査装置（SQUITEM）技術の現状
- ロボット式モバイル HTS-SQUID 非破壊検査装置の現状
- SQUID による鉄道用レール診断技術
- 脳磁計（MEG）診断技術の現状
- SQUID 磁束計による脊髄誘発磁界計測技術の進展

○超電導関連 8-9 月の催し物案内

- 新聞ヘッドライン（6/19-7/17）
- 超電導速報—世界の動き（2009 年 6 月）
- 特許情報

○超伝導科学技術研究会、材料研究会合同ワークショップ

「超伝導材料と先端ナノ材料における自己組織化」報告

○ISEC2009「12th International Superconductive Electronics Conference」報告

○隔月連載記事—超電導と MRI / NMR（その 4—高磁界化）

○読者の広場(Q&A)—SQUID 計測において、外部磁気雑音の影響を

どのようにして回避するかを教えてください

[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/index-J.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 を用いた診断・検査技術の動向

「高温超電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
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（SQUITEM）を開発した。現在、JOGMEC が実施する金属資源探査で SQUITEM を利用しているところである。本稿では、SQUITEM の概要と金属資源探査において SQUITEM を利用した事例を紹介する。

2. SQUITEM の概要

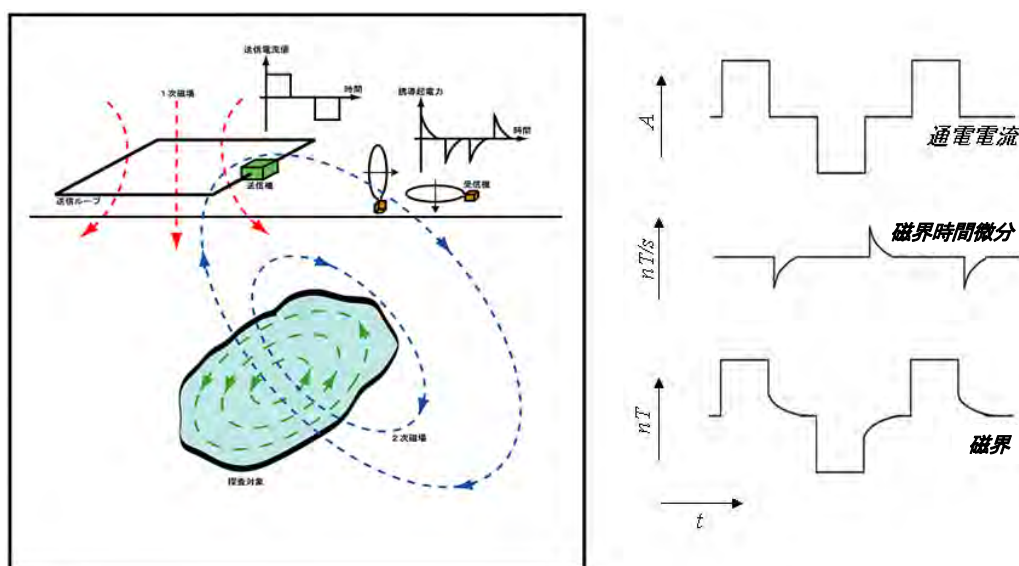


図 1 電磁探査の説明図

電磁探査（時間領域電磁探査）では、地下の比抵抗分布を調べる媒体である電磁界を発生させるために送信ループを地上に設置し、一般的にオン・オフ時間のある交替直流をそれに通電する（図 1）。地表に設置した送信ループに流す電流を急激に遮断すると、電磁誘導の法則により、それまで形成されていた磁界が変化することを妨げるように、それまでループに流れていたのと同じ大きさの電流がループ直下の地表面に発生する。この誘導電流は大地の比抵抗により減衰するが、この誘導電流の変化を妨げるような新しい誘導電流が地中に発生する。このプロセスが繰り返され、あたかも誘導電流が地下深部に伝播していくような現象をスモークリングと呼ぶ。これらの誘導電流は、伝播経路の比抵抗に応じて減衰するため、それらの作る磁界、あるいは磁界時間微分値を時間の関数として測定することにより地下の比抵抗分布を調べることができる。深度方向に拡散する電磁界

の時刻 t での最大振幅の深度を表す拡散深度 $d = \sqrt{\frac{2t\rho}{\mu}}$ (ρ : 地下の比抵抗、 μ : 地下の透磁率)

を時刻 t まで測定したときの探査深度の目安と考えることができる。拡散深度の式からも分かるように、誘導電流は時間とともに地下深部に浸透するので、より長い時間測定することにより、より深部までの比抵抗分布を得ることができる。

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電磁探査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電磁探査が求められている。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界時間微分値を測る代わりに、磁界を直接計測する磁力計を用いて磁界測定を行う方法である。磁界は磁界時間微分よりも時間減衰が遅いために、従来の磁界時間微分よりも遅い時間（深い深度）までデータを取得することができる。ノイズレベルが他の磁気センサーに比べて極めて小さいこと、周波数帯域が十分に広く金属資源探査の探査深度に適していること、さらに指向性があることから、SQUID は金属資源探査用の電磁探査装置の磁気センサーとして適している。

SQUITEM は、測定制御用のノート PC、A/D コンバーター、コントローラー、電源、SQUID 磁力計などから構成される（図 2）。SQUITEM の周波数帯域は DC～100 kHz であり、SQUID 磁力計の磁気シールド中でのノイズレベルは $100 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。



図 2 SQUITEM (2 号機) の全容

3. 金属資源探査への SQUITEM の適用事例

適用事例として、平成 18 年にオーストラリアでの亜鉛探査に利用した例を紹介する。調査範囲は、ニューサウスウェールズ州南西部にあるブローケンヒル鉱山（鉛・亜鉛・銀鉱床）の周辺である。オーストラリアを代表する鉱山の一つであるブローケンヒル鉱床は、堆積岩を母岩とする層準規制型硫化物鉱床であり、鉱石は方鉛鉱及び閃亜鉛鉱を主とし、黄銅鉱や磁硫鉄鉱を伴う。JOGMEC が実施した探査においてもブローケンヒル型を探査ターゲットとして想定したために、それに起因する低比抵抗を捕らえるために SQUITEM 調査を実施した。送信ループの大きさは $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ であり、送信ループの中心（測点）で SQUITEM により磁界を計測した。なお、測点間隔は 100 m であり、有望範囲では 50 m 間隔でデータを取得した。

図 3 に、電磁探査の従来装置と SQUITEM によるプロファイル曲線を示す。プロファイル曲線とは、各測点で取得した測定値を時間毎に繋いだ曲線であり、横軸は測点、縦軸は測定値である。6464500N から 6465200N にかけて地下に低比抵抗が存在することを示すピークが SQUITEM と従来装置で現れている。6464500N から 6464800N にかけてのピークは早い時間から現れているために、浅部に存在する低比抵抗を反映している。一方、6464800N から 6465200N にかけてのピークは遅い時間で現れているため、深部に存在する低比抵抗を反映している。深部の低比抵抗を反映す

るプロファイル曲線については、従来装置では乱れている一方、SQUITEM では信頼性の高いデータが得られている。これは、SQUITEM の方が従来装置よりも探査深度が大きいことを示している。

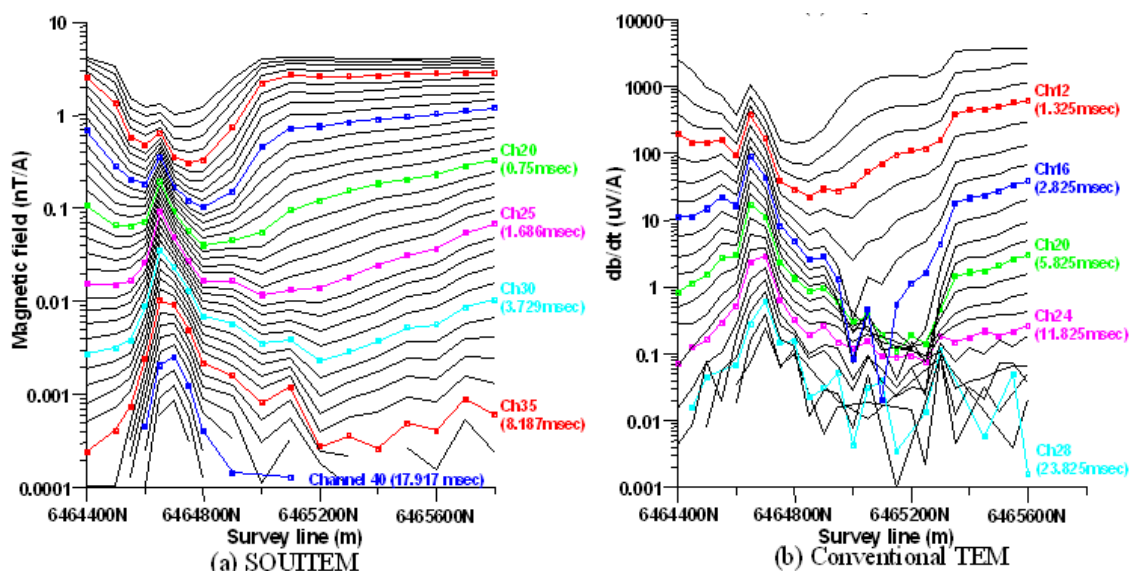


図3 SQUITEM (左) と従来装置 (右) によるプロファイル曲線

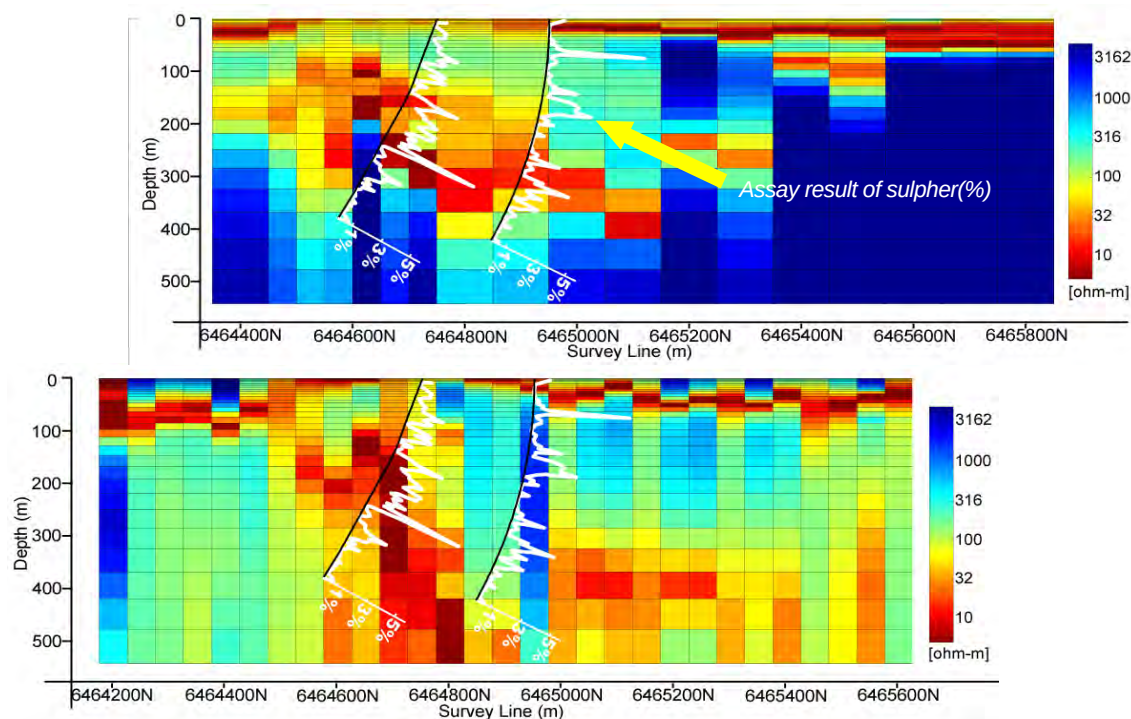


図4 SQUITEM (上) と従来装置 (下) によるデータの比抵抗インバージョン結果

従来装置と SQUITEM で取得したデータを、地下の比抵抗についてインバージョンした結果（地下の比抵抗分布図）を図 4 に示す。プロファイル曲線により浅部での低比抵抗が推定された 6464500N から 6464800N にかけて、SQUITEM 及び従来装置ともに浅部で低比抵抗が解析された。

しかし、6464800N から 6465200N にかけては、SQUITEM では深部で精度良く低比抵抗が再現されているが、従来装置では低比抵抗と高比抵抗が不規則な分布で再現されている。SQUITEM の比抵抗インバージョンにより緩やかに右に向けて潜頭する低比抵抗に対して 2 本のボーリングを掘進した。その結果、左側のボーリングでは深度 250～260 m と深度 343 m、右側のボーリングでは深度 318～320 m と深度 350～360 m において磁硫鉄鉱を主体とした多量の硫化鉱物を捕捉した。これらの位置は、SQUITEM により解析された低比抵抗の位置と調和的である。

4. おわりに

金属資源探査で多用されている電磁探査装置の探査深度を向上させるために JOGMEC は高温 SQUID を磁気センサーとして用いた SQUITEM を開発し、JOGMEC が実施する金属資源探査に利用しているところである。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気・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電磁探査装置である。SQUITEM を JOGMEC の金属資源探査にさらに活用していくことにより、探査の効率化と成功率の向上に寄与できるものと期待する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID を用いた診断・検査技術の動向

「ロボット式モバイル HTS-SQUID 非破壊検査装置の現状」

豊橋技術科学大学
エコロジー工学系
助教 廿日出 好

現在、高温超電導材料（主に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ など）を用いた SQUID 磁気センサは、その超高感度特性を活かして心磁計や磁性異物検査などの応用に関して実用化されており、さらに免疫検査や材料・構造物の非破壊検査などへの応用が検討されている。しかし、一般的な HTS-SQUID は、バイクリスタル SrTiO_3 基板上へ一層の高温超電導薄膜を蒸着して作製するバイクリスタル型ジョセフソン接合を有した構造となっており、 $1\ \mu\text{T}$ 未満の磁界中でも磁束トラップや磁束ジャンプが生じて動作が不安定になるという課題があった。このため、磁気シールドのない環境で、さらに磁界を加えて計測を行うアクティブな非破壊検査などの応用では実用化が困難であった。

そこで、豊橋技術科学大学では、まず、従来型のバイクリスタル型ジョセフソン接合をもつ HTS-SQUID グラジオメータ（勾配計）を、磁気シールドのない環境中で移動させても磁束トラップ・ジャンプが生じないような、低磁界環境を作り出すアクティブノイズキャンセリング技術の開発を行った（図 1）。ここでは、環境中で数 $10\ \mu\text{T}$ の磁気ノイズが存在しても安定動作するフラックスゲート磁束計と補償コイルを用いて、環境磁気ノイズが常時低減された空間を発生させるフィードバック回路を開発・導入した。この低磁界空間中に HTS-SQUID グラジオメータを設置することにより、数 μT の磁気ノイズを発生するロボットアームを用いて、 $100\ \text{mm/s}$ の速度で HTS-SQUID を安定動作・移動させることに成功した。

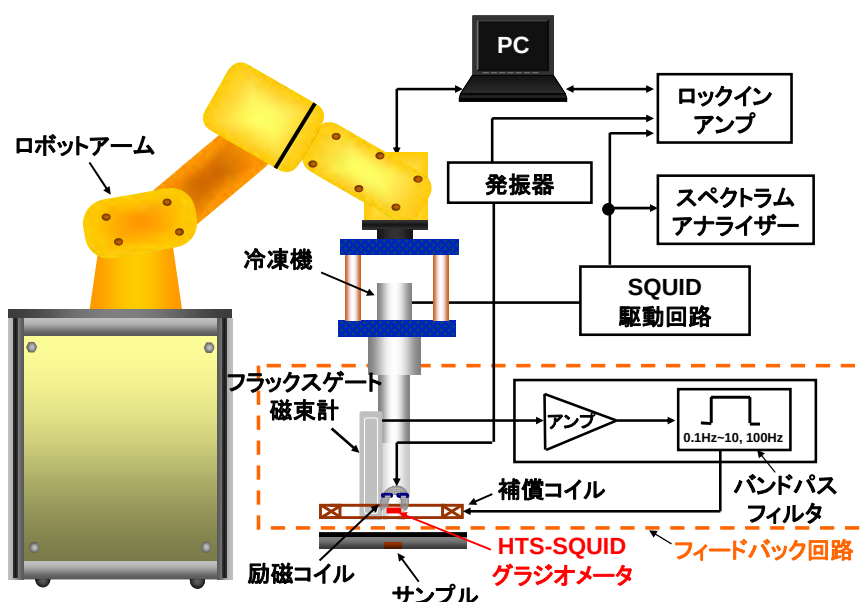


図 1 アクティブノイズキャンセル技術を用いたロボット式 SQUID 非破壊検査装置

一方、超電導工学研究所（ISTEC/SRL）は、近年、ランプエッジ型ジョセフソン接合を用いた積層型 HTS-SQUID を開発している。この SQUID には、ランプエッジ接合を構成する上下薄膜とし

て 87 K 以上の T_c をもつ SmBCO と La-ErBCO が用いられている。開発された SQUID の性能を示す磁界変動電圧は最大 $50 \mu\text{V}$ と大きな値が得られており、磁気シールドのない環境で冷却・使用した場合でもホワイトノイズレベル $6 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ と優れた低ノイズ特性が得られている。

このようなランプエッジ接合をもつ HTS-SQUID グラジオメータの交流磁界中での安定性を、豊橋技術科学大学で評価したところ、従来よりも 4~5 桁大きな約 1.5 mT の交流磁界中まで安定に動作し、優れた磁界耐性を持つことがわかった。この高い磁界耐性は、第一にランプエッジ型ではバイクリスタル型のピックアップコイル中に存在するような臨界電流を制限する粒界接合を持たないこと、第二にランプエッジ型ジョセフソン接合を形成するバリア面の上下が超電導薄膜でサンドイッチされた構造により、接合において磁束トラップ・ジャンプが抑制されるためと考えられる。この耐性により、磁気シールドのない環境において、残留磁化をもつ強磁性金属に接近させてもトラップ磁束抜きなどがほぼ不要となり、扱いやすさが格段に向上したことになる。

この HTS-SQUID グラジオメータを小型クライオスタットにマウントし、ロボットアームに搭載したセンサ三次元移動型の非破壊検査装置を豊橋技術科学大学で開発した（図 2 左）。本装置は、ランプエッジ接合 SQUID グラジオメータの高い磁界耐性のため、特別な磁気シールド技術を用いることなく、数 10 mm/s の速度で SQUID を三次元的に移動することが可能である。本装置を用いて、次世代自動車である燃料自動車に搭載される水素燃料タンクの内部欠陥検出試験を行い、その有効性を実証した。この試験では、SQUID 直下に設置したダブル D 型励磁コイルから振幅約 $20 \mu\text{T}$ 、1 kHz の低周波数励磁磁界を発生させた状態で、タンク周囲の円筒曲面に沿って SQUID による三次元走査を実施した。この結果、高圧の繰返し負荷によりタンク内部に発生させた長さ約 10 mm の亀裂による磁気応答の検出に成功している（図 2 右）。

このように、従来の HTS-SQUID では困難であった磁気シールドレス環境におけるロボットによるセンサのモバイル化が可能となっており、燃料タンクのような先進構造物を含め、検査可能な対象が大きく拡張されたと考えられる。これにより、近い将来において SQUID 磁気センサおよび工業用の実用的非破壊検査装置の商用化が期待される。

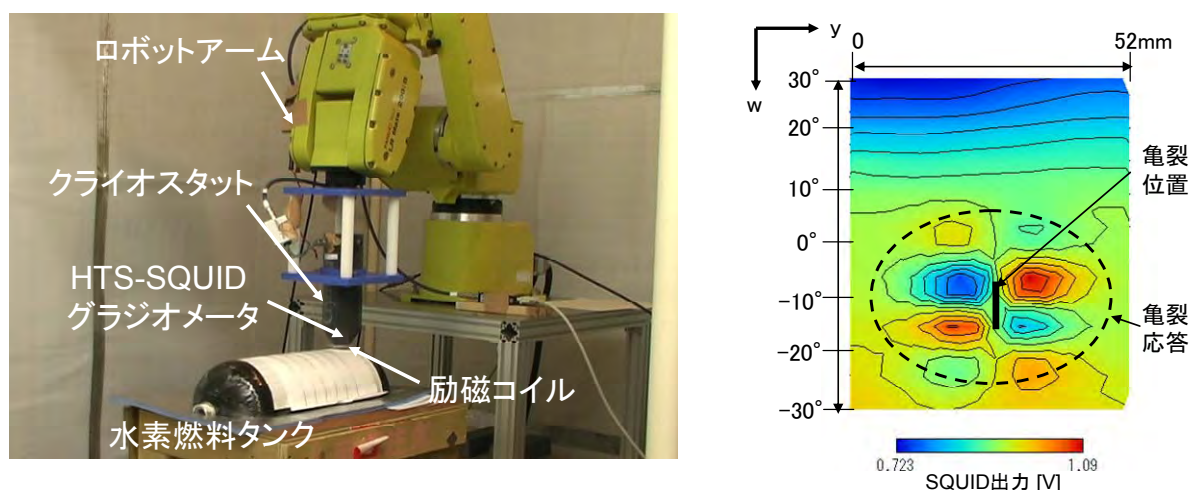


図 2 水素燃料タンクを検査するロボット式 SQUID 非破壊検査装置（左）と亀裂検出結果（右）

特集：SQUID を用いた診断・検査技術の動向

「SQUIDによる鉄道用レール診断技術」

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

研究員 宮崎佳樹

鉄道用レールは、車両の駆動・制御時に車輪の空転・滑走により、表層部に白色層（White Etching Layer: WEL）と呼ばれる硬くて脆い熱変態組織が発生することがある。白色層の周辺では微小き裂が伸展しやすく、伸展した微小き裂は、レール頭頂面のはく離など、レール損傷を引き起こすことがある。白色層はこうしたレール損傷の一因となると考えられており、白色層とき裂や損傷の関係を明らかにすることが求められている。

<http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd45/kouzou/research08/index.html>

白色層については、現在スポット的に硬さ測定、目視確認が実施されているが、連続的に検査する手法がない。このような白色層の連続的な分布情報が得られれば、線区情報と白色層の発生状況の対応を検討する有効な手段となる。

本研究では、白色層の検出手法としてSQUID（超電導量子干渉計）による非破壊検査の検討を進めており、これまでに実際の車両の走行によりレールに発生した白色層を、SQUIDを用いて検出できることを示した（超電導Web21 2008年8月号）。図1に測定回路を示す。本測定の原理は電流法であり、2つの励磁コイルが試験体を作る渦電流分布が試験体不良箇所では不均一となった場合、その差分が、渦電流の作る磁場としてSQUIDで観測されることとなる。

図1の測定回路で、実レール白色層を測定した結果を図2に示す。図2中に丸枠で示したA、B部分の白色層箇所と、図2の信号強度の強いA、B部分の整合性は良好であり、白色層分布と測定信号がよく対応していることが確認できる。信号変化は白色層部の組織変化（マルテンサイト変態）による物性（透磁率、抵抗率）の変化に対応していると考えられる。

http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/CS/cs_1.7.html

図1の測定回路では、磁気シールドを用いてノイズ対策を行っているが、測定対象であるレールが強磁性体であるため、レールは消磁処理を施して残留磁化を減じている。また、除去しきれない残留磁化については、SQUIDの出力のうち、低周波成分をフィードバックし、ノイズを打ち消す工夫をしている。

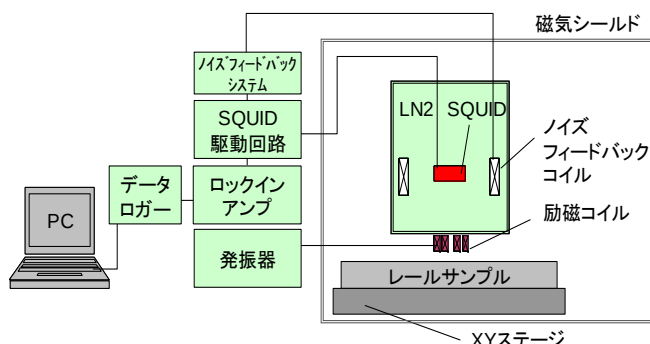
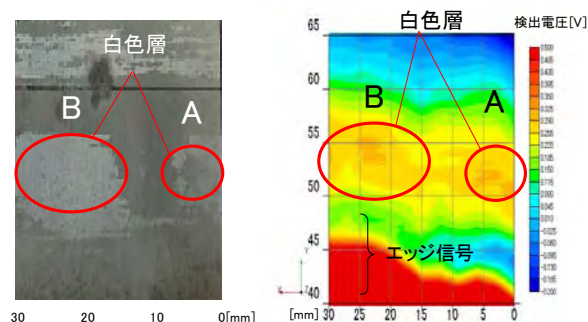


図1 測定回路



測定試料(実レール)

誘導磁界強度の2次元コンター図

図2 白色層測定結果

しかし、屋外に敷設されたレールを測定するには、レールごと磁気シールドで覆うようなシステムは不可能であり、また、レールを消磁するなどの前処理も、検査時間を増大させるため好ましくない。そこで、屋外測定に向け、図 3 のような回路に改良した。レールには、ブリッジ回路を構成する検査プローブのみを接近させ、SQUID は入力コイルから信号を得る。この方式だと、SQUID 自体は磁気シールドに完全に格納することができ、かつレールから離れた位置に配置することができるため、レールの残留磁化の影響を受けにくい安定な測定システムとすることができる。さらに、ノイズフィードバック回路に補償器を追加することで、フィードバック回路を安定化させた。ノイズ対策後では、SQUID のノイズ耐性は 30~40 dB 程度向上し、ノイズの影響を受けにくい測定システムを構築することができた。

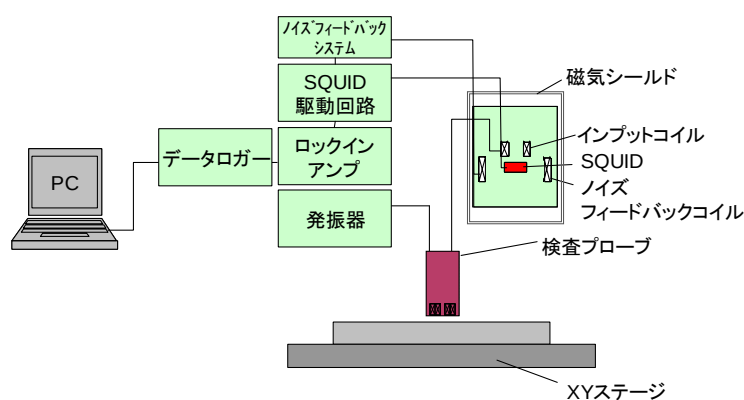


図 3 改良した測定回路

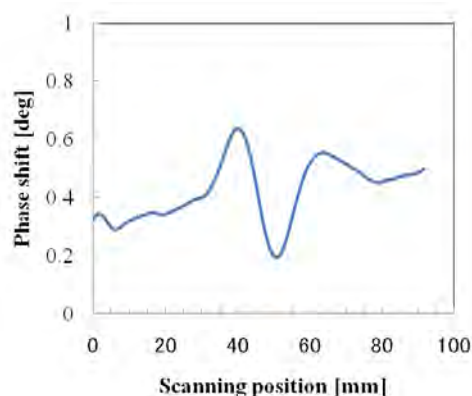


図 4 白色層標準試験片測定結果

レーザ加工により作成した幅 4 mm、膜厚 5 μm の白色層標準試験片を XY ステージ上に載せ、検査プローブを対象からの垂直方向の距離が 1 mm となるように設置した。検査プローブは固定したまま、XY ステージを模擬白色層に対して垂直方向に 5 mm/s の速さで移動させ、上記測定システムにて測定した。渦電流信号は SQUID 出力として得られ、これと励磁信号の位相差をロックインアンプにより比較した。位相差の測定結果を図 4 に示す。模擬白色層のある位置を通過する際に、明確な位相差変化が得られていることがわかる。現在、レール上をステッピングモータにより自走 (5 mm/sec ~ 70 mm/sec) 可能な測定装置を製作し、屋外適用試験を進めているところである。

現在、レール上をステッピングモータにより自走 (5 mm/sec ~ 70 mm/sec) 可能な走行装置を製作し、測定試験を進めている。

特集：SQUID を用いた診断・検査技術の動向

「脳磁計（MEG）診断技術の現状」

横河電機株式会社 通信・計測事業部

バイオ・アナリティカルセンターMEG Gr.開発チーム

風見邦夫

脳内では情報伝達が神経細胞の電氣的活動によりおこなわれており、この電氣的活動により神経細胞内外に電流が生じる。興奮性シナプス後電位に起因する細胞内電流は比較的大きな電流と長い持続時間をもつため、脳活動による磁界（脳磁界）の主たる発生源と考えられている（図1）。脳磁界は $10^{-12} \sim 10^{-13}$ Tesla（地磁気の10億分の1以下）と極めて微弱であるが、脳磁計を用いて測定することができる（図2）。

脳磁計は 10^{-14} Tesla以下の感度を持つ超電導デバイスであるSQUID磁束計が内蔵され内部にヘリウムが充填されたデュワなどで構成され、被検者の頭部をデュワの凹部へ挿入することで脳磁計測がおこなわれる。微弱な磁界を測定するため、デュワを磁気シールドルーム内に設置するなどのノイズ対策が必要となる。

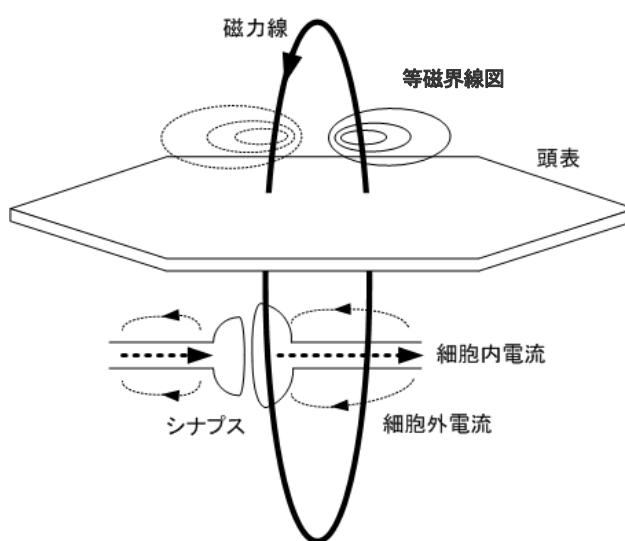


図1 脳磁界発生メカニズム

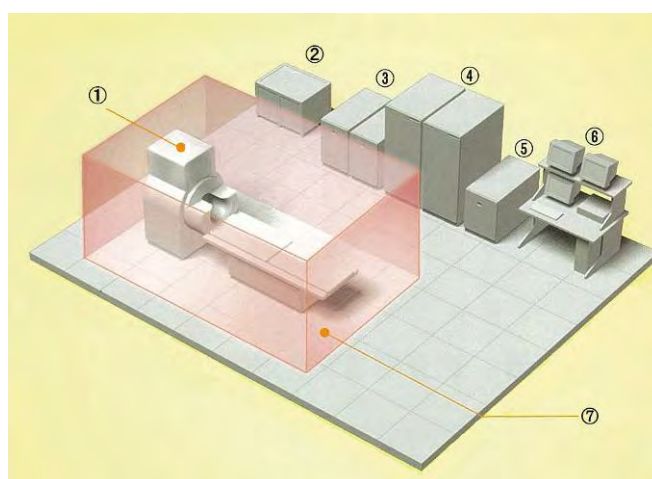


図2 生体磁気計測装置（①デュワ ②エレクトロニクス部 ③DC電源部 ④収録用コンピュータ ⑤AC電源部 ⑥制御用コンピュータ ⑦磁気シールドルーム）

脳磁計測は、脳や脳脊髄液等の透磁率がほぼ真空透磁率に等しいため、生体組織による影響を非常に受けにくく、脳活動を高い空間分解能で捉えられる。SQUID磁束計の高速応答性のほか完全に非侵襲測定である特長をもつため、脳機能診断や脳科学研究で注目を集めている。

近年アルツハイマーなどの認知症、幼児の発達障害（自閉症）、脳虚血などの広い範囲で脳磁計を用いた診断方法の確立が期待されている。それに伴い、現在各方面で脳磁データの新しい解析技術や、使いやすくなるためのノイズ低減法等の開発が進められている。また、脳活動情報を多角的に捉える目的で脳波やfMRIなどの機能的画像とのマルチモダリティへの関心も高い。図3に最近注目されている空間フィルタ法で脳磁を解析した例を示す。左耳へのクリック音により誘発される聴覚誘発脳磁界（AEF : Auditory evoked field）の脳磁データより活動部位を推定しMRI画像に投射したもので、これにより左耳への音刺激により左右の聴覚野が活動している様子が視覚的にわかるようになった。一方で、MEGを利用する上で長い間課題であった運用コストの低減にむけヘリウム回収システムの開発もされて実用に供されつつあり、今後の医療分野への拡大が期待される。

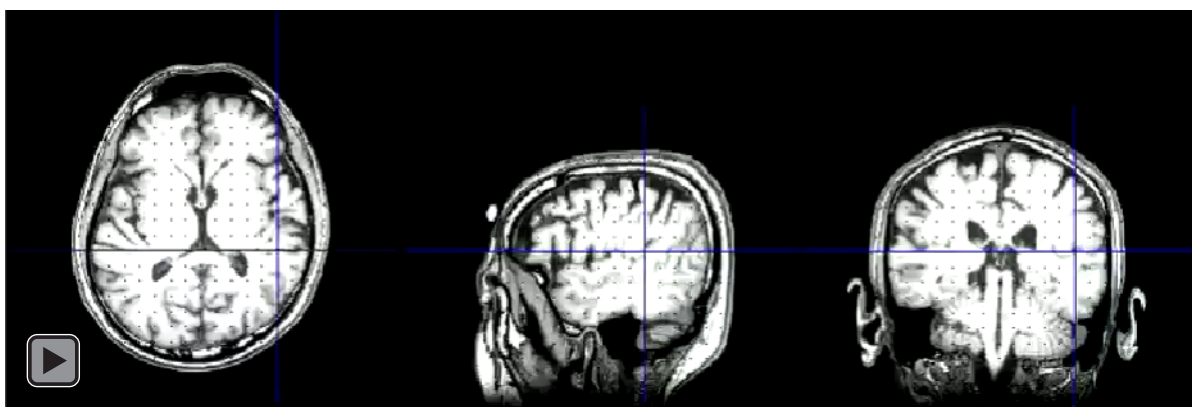


図3 AEFの脳磁データに対するsLORETA空間フィルタ法による信号源推定の例（動画）

（動画が動かないときには QuickTime をダウンロードして下さい。 <http://www.apple.com/jp/quicktime/download/index.html>）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID を用いた診断・検査技術の動向

「SQUID 磁束計による脊髄誘発磁界計測技術の進展」

金沢工業大学
先端電子技術応用研究所
准教授 足立善昭

脳の神経活動に伴う微弱な磁界を頭部周囲に配置された SQUID 磁束計で検出し、脳活動を観測する脳磁計は、実用化されてから長きにわたり、脳機能の研究や、医療機関における癲癇診断、術前マッピングなどに利用されている。われわれは、同じ神経活動でも、脊髄の神経活動に伴う微弱な磁界を頸部で検出し、脊髄の機能を調べる装置の開発を進めている。手足の麻痺やしびれなどの症状の原因は脊髄の圧迫障害によることが多く、磁界計測を適用すれば、その障害部位を非侵襲的な検査で知ることができる。このような検査は従来困難だったため、脊髄誘発磁界計測は整形外科医や神経科医からの大きな期待と関心を集めている。

図 1(a) は、脊髄誘発磁界計測システムの構成図である。仰臥位で横たわる患者の頸部を背側から検査できるように、特別な形状の低温容器を新たに開発した。低温容器は円筒形の容器本体の側面からセンサ保持部が突き出たような構造をしている。センサ保持部の上面にセンサアレイが配置され、患者はこの上面に頸部背側をのせるようにして安定的な計測が可能となっている。脊髄磁界の磁界源は体表から 60～70 mm の深いところに位置し、体外で検出される磁界の強度は数 10 fT 以下となる。このため、観測面の低温-室温距離を 7 mm 以下とし、センサを可能な限り磁界源に近づけるようにした。また、脳や心臓に比べて、頸部は磁界の観測範囲が狭いため、ベクトル SQUID 差分型磁束計^{1),2)}を採用し、小さな観測領域からより多くの磁界情報を取得できるようにしている。システムの外観図を図 1(b) に示す。

開発した計測システムを健常被験者に適用し、磁界計測実験を行った。仰臥位で横たわった被験者の左手首末梢神経に繰り返し電流パルス刺激を与え、頸部に誘発する磁界を計測した。得られた磁界分布の例を図 2 と動画 1 に示す。刺激後約 10 ms 以降に、特徴的な磁界分布パターンが現れる。この磁界分布パターンの中には図 3 の矢印で示すように、脊髄に沿って上行する成分が含まれている。

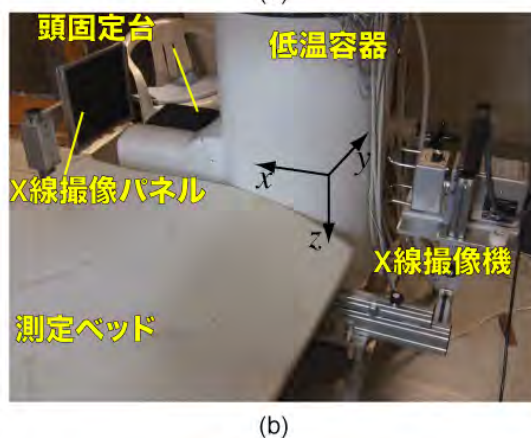
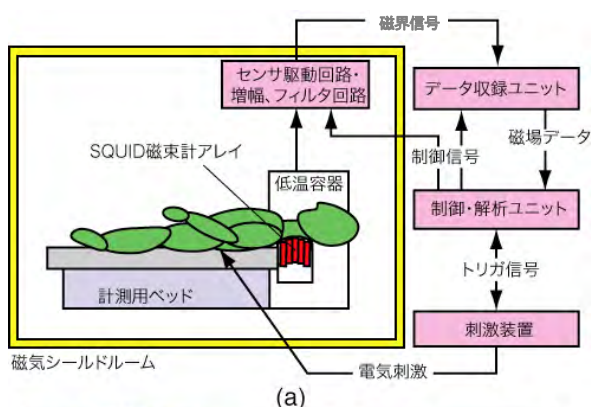


図 1 システムの構成図(a)と外観(b)

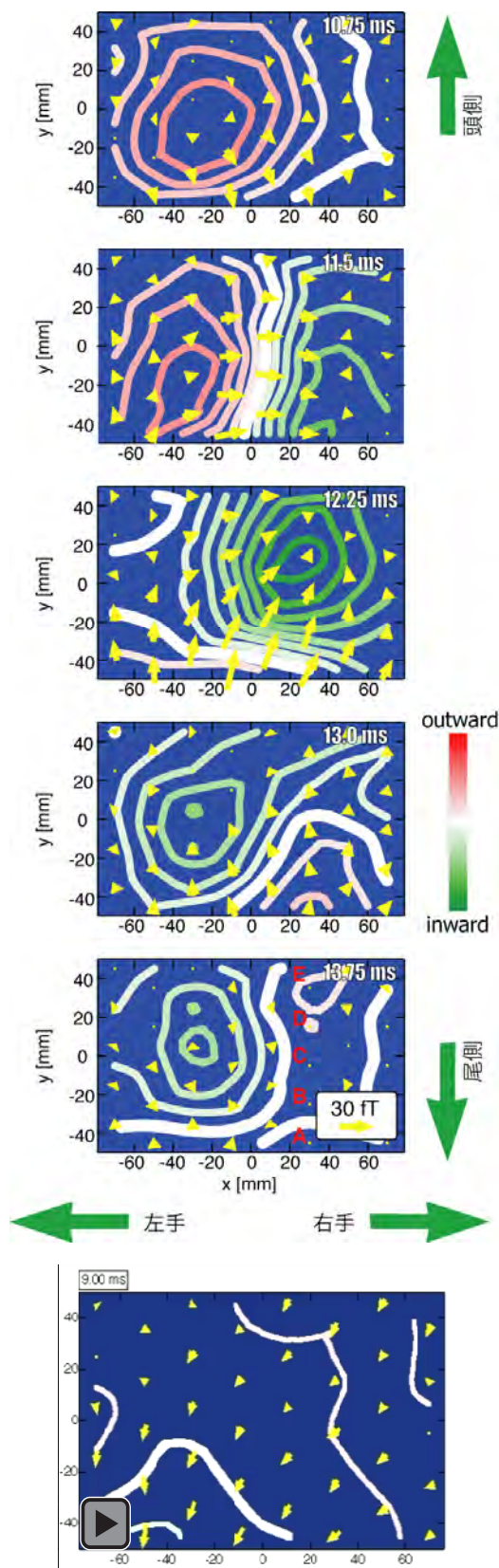


図2 動画1 末梢神経刺激脊髄誘発磁界計測例 (動画)

開発した試作機は東京医科歯科大学の整形外科に設置され、すでに 100 人以上の患者に対して検査を行い、そのうち約 9 割から診断に有用なデータを得ることができた。計測システムとしての実力は十分実用化レベルに達してきていると言える。今後は、メーカーと協力して、脳磁計、心磁計に続く SQUID 生体磁界計測の三本目の柱として、脊髄誘発磁界計測を製品化までつなげていきたい。

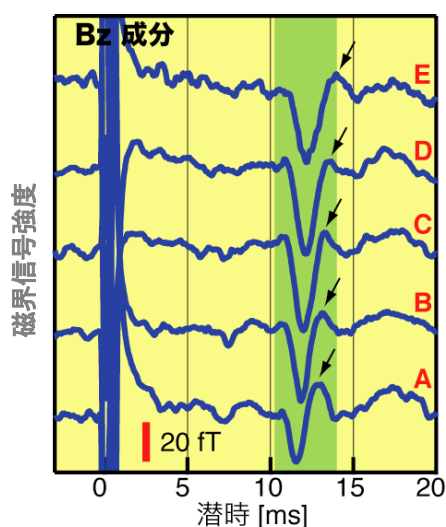


図3 脊髄誘発磁界信号波形

参考文献

- 1) A. Kan dori *et al.*, "A vector fetal magnetocardiogram system with high sensitivity", Rev . Sci. Instrum., vol. 70, pp. 4702-4705, 1999.
- 2) Y. Adachi *et al.*, " Three dimensionally configured SQUID vector gradiometer for biomagnetic measurement", Supercond. Sci. Technol., vol. 16, pp. 1442-1446, 2003.

(動画が動かないときには QuickTime をダウンロードして下さい。
<http://www.apple.com/jp/quicktime/download/index.html>)

超電導 Web21 トップページ

超電導関連 8 月 - 9 月の催し物案内

8/10-11

第 8 回高温超伝導バルク材「夏の学校」in 岩手ーピーニング制御と応用技術ー

場所：休暇村岩手網張温泉、岩手県岩手郡雫石町網張温泉

問合せ：岩手大学工学部マテリアル工学科 藤代博之

Tel&Fax: 019-621-6363、E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp

8/17-19

未踏科学技術協会飯綱サイエンスサマー道場「超」の世界を見るー放射光の威力

主催：(社) 未踏科学技術協会

場所：長野県飯綱光源「ホテルアルカディア」、長野市門沢

問合せ：(社) 未踏科学技術協会 飯綱・サイエンスサマー道場 (担当：大貫留美子)

Tel: 0303503-4681、Fax: 03-3597-0535、E-mail: nanosci09@sntt.or.jp

8/18-20

電気学会 電力・エネルギー部門大会

場所：芝浦工業大学 工学部 豊洲キャンパス、江東区東雲

http://www.shibaura-it.ac.jp/about/a05_02_j.html

主催：(社) 電気学会 電力・エネルギー (B) 部門

問合せ：電気学会 事業サービス課 電力・エネルギー部門大会担当

Tel: 03-3221-7313、Fax: 03-3221-3704、E-mail: pes21@iee.or.jp

8/27-28

第 4 回極低温技術スクールー超伝導、超流動、低温液体の体験と基礎講義ー

場所：高エネルギー加速器研究機構 (8/27)、筑波大学 (8/28)

主催：低温工学協会 教育・セミナー委員会

問合せ：物質・材料研究機構 材料ラボ 沼澤健則 Tel: 0298-863-5454

8/28-29

第 14 回超伝導・低温若手セミナー「ここまで進んだ超伝導 (2)ー超伝導材料の基礎と先端研究ー

場所：新潟大学 (8/28)、ウエルサンピア新潟 (8/29)

問合せ：新潟大学・大学院自然科学研究科・情報工学専攻 福井 聡

Tel&Fax: 025-262-6731、E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

9/7-12

M²S-IX: 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity

場所：Keio Plaza Hotel, Tokyo

主催、協賛：日本物理学会、応用物理学会

問合せ：<http://www.m2s-tokyo.org/> E-mail: M2s2009@isc-inc.co.jp、

9/13-17

EUCAS2009: 9th European Conference on Applied Superconductivity

場所：Dresden, Germany

問合せ：<http://www.eucas2009.eu/>

(編集局)

超電導 Web21 トップページ



新聞ヘッドライン (6/19-7/17)

- JR 東海 新幹線低迷で株価さえず リニアの巨額投資も重し 6/19 日経産業新聞
- ITER 機構 26 年に反応運転 水戸市で理事会を開催 6/19 電気新聞
- リニア 東京一名古屋「40 分」 安い！速い！直線で■JR 経済活性化迂回を■長野県 ルート調整本格化 沿線自治体 駅誘致へ動き 6/22 読売新聞
- クルマ大革命 エレキカーの衝撃 超電導がカネになる日 住友電工、研究 40 年花開く 重電不況を乗り越えて 明電舎、モーター供給まで 18 年 6/23 日経産業新聞
- 身近な電磁波、体に大丈夫 携帯の子供への影響など調査開始 注目呼ぶ中間周波数 6/23 朝日新聞
- 宇宙の電磁波 高感度で感知 国立天文台受信機開発 6/23 日経産業新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー エネルギーの質と価値 異種エネルギーの効率、どう比較？ 6/23 電気新聞
- スマートグリッド 米国、標準化へ本腰 年末までに開発計画 6/24 電気新聞
- リニア歓迎のシンポジウム狙う 名古屋周辺に底力 6/24 日本経済新聞
- 風車発電にも「環境問題」「体調不良訴える住民」 疑われる低周波音 6/25 読売新聞 (夕)
- 直流給電 変換ロス解消で 3 割省エネ 太陽光発電普及が後押し データセンターでも検討 6/25 日刊工業新聞
- 重粒子線が生成する活性酸素 MRI で可視化に成功 放医研 6/26 科学新聞
- ラットリング現象で超伝導 オスミウム酸化物に着目 特異な原子振動示す 東大物性研 室温超伝導実現に期待 6/26 科学新聞
- クルマ大革命 エレキカーの衝撃 スマートグリッドにらむ 東電、余剰電力の蓄え先に 6/26 日経産業新聞
- スマートグリッド 国際規格化 議論始まる ニーズ調査 IEC13 ケ国が参加 6/26 電気新聞
- 宇宙で太陽光発電 送電技術、年内から実験 政府、来月にも参加企業選定 6/28 日本経済新聞
- リニア新幹線「直線ルート」本命 JR 東海、速さを最優先 6/29 日本経済新聞
- NEDO パナ電工・シャープと省エネ配電 交直流併用 住宅向け実証実験 6/30 Fuji Sankei Business i
- 映画 天使と悪魔の「反物質」って何 原爆なものの爆発物なの？ 6/30 毎日新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー “数値化” で効率性を簡単に比較 6/30 電気新聞
- TDK 電磁波測定施設 電子機器の安全性認証 脱・受け身、提案力磨く 7/1 日経産業新聞
- 電磁波シールド材に採光確保 MRI 室向け初適用 竹中工務店 7/2 日刊工業新聞
- 「太陽光発電 20 倍化」エネ庁報告書 送電網に最大 6.7 兆円必要 宮古島など 10 島で実験 7/2 Fuji Sankei Business i
- グリーン インダストリー 電力革命 新市場を創出 グーグル・東芝・・・総力結集 太陽光と蓄電池組み合わせ 離島で実証実験 九電など、CO₂削減へ 7/2 日本経済新聞
- 単純構造の鉄系超伝導体で 超伝導相の全体像明らかに 山田・東北大教授ら成功 7/3 科学新聞
- スマートグリッド標準化、欧米先行 日本の技術、反映急務 7/3 日経産業新聞
- 火山版！ レントゲン 世界初宇宙線利用し成功 東大地震研 噴火予知に期待 7/4 毎日新聞
- 注目この素材 レアアース エコカー向け需要拡大も 7/6 日経産業新聞
- 巨大「顕微鏡」産業界に光 トヨタ系燃料電池素材開発へ 高エネ研、構造解析「3 ボンの矢」体制 新薬・半導体も研究 利用法の指南 7/6 日経産業新聞
- 温度振幅 0.2℃以内に制御 アルバック・クライオ 極低温冷凍機を開発 7/7 日刊工業新聞

- エネルギーのものさし エクセルギー 熱への変換で無効エネルギーが増加 7/7 電気新聞
- 成田ー羽田を 15 分で結び国際ハブ空港化を リニア新幹線が日本を救う 7/9 毎日新聞
- 極低温冷凍機 温度のブレ抑える アルバック・クライオ 医療機器や測定器向け 7/9 日経産業新聞
- 超電導の球形タービン構想 7/9 日経産業新聞
- MRI が発する磁力 医療機器への影響測定 バイオビュー、新サービス 7/10 日経産業新聞
- リチウム電池 MRI で内部を撮影 東北大 劣化メカニズム解明へ 7/13 日刊工業新聞、日経産業新聞
- 活躍の舞台さまざま ゼネコンの技術 医療現場に新風も 多様な耐震方法 各社で開発進む 7/13 日刊工業新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー 最も価値が高い電気エネルギー 7/14 電気新聞
- リチウム電池内部 「世界初」MRI で撮影 東北大 7/17 科学新聞
- リニア中央新幹線 期待高まる経済効果 直線ルートが有力 名古屋経済圏が変わる 大震災リスクを回避 7/17 Fuji Sankei Business i
- カナダ国立研究機構理事長 ピエール・クロム氏に聞く エネルギー研究推進 J-PARC に期待 燃料・水素電池などへ生かす 次世代加速器誘致は様子見 7/17 日刊工業新聞

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2009 年 6 月)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
国際部
部長 津田井昭彦

電力

National Institute of Standards and Technology (2009 年 6 月 17 日)

米国 National Institute of Standards and Technology (NIST) は、結晶粒界のひずみを低減することにより高温超電導体の特性が著しく向上することを見出した。この発見は、送電から先端物理研究までの幅広い応用範囲で使われる低コスト、高性能超電導体への道を開くものである。結晶粒界は電流の流れを阻害するものであり、多結晶性が線材性能に与える影響は長尺、高品質 HTS 線材の開発の主要課題であった。薄膜開発は Y 系線材の性能を大幅に向上させてきたが、結晶粒界が相変わらず高配向超電導薄膜の性能の制約要因であった。NIST では、ひずみが YBCO の結晶粒界を通過する電流を弱める大きな効果を持つことを見出した。結晶粒界を加圧してこのひずみを取り除くことにより、薄膜の特性が格段に改善された。薄膜超電導体においてひずみが電流に与える影響に関するこの知見は、超電導材料開発及びその低コスト化を促進するものと考えられる。この研究結果の論文は Physical Review Letters に受理されている。

出典:

“NIST discovers how strain at grain boundaries suppresses high-temperature superconductivity”

National Institute of Standards and Technology (June 17, 2009)

http://www.nist.gov/eeel/electromagnetics/htc_061609.cfm

NMR

Bruker BioSpin (2009 年 6 月 1 日)

Bruker BioSpin は新しい 1-GHz 超高磁場 AVANCE™ 1000 NMR 装置を市場に投入した。この装置の心臓部は 23.5-T、標準ボア径 54 mm の超電導マグネットである。この装置はすでにドイツ、カールスルーエの Bruker 社超高磁界マグネット工場で 1-GHz NMR スペクトル測定実験に使用された。この実験の成功により、新たなハイエンド装置の能力が実証された。AVANCE 1000 システム第 1 号機は、2009 年 7 月、フランス、リヨンの RMN 高磁界研究センターに納入される予定である。Bruker 社は現在この超高磁界システムの注文を受け付けており、受注後 18~24 ヶ月で納入するとしている。このシステムの価格は約 1,600 万ドルである。

出典:

“Bruker Announces AVANCE 1000, the World's First 1 Gigahertz NMR Spectrometer”

Bruker BioSpin press release (June 1, 2009)

<http://www.bruker-biospin.com/avance1000.html>

量子計算機

California Institute of Technology (2009 年 6 月 19 日)

California Institute of Technology は、物質を形成する多数の原子の集団において、重ねあわせやエンタングルメントといった量子現象を測定できる新しいツールを開発した。研究グループは、マイクロ加工技術を使って MEMS 共振器を製作した。この共振器は電圧印加時に高周波と共振する 2- μm 長、0.2- μm 幅の SiN の梁から構成されている。単一クーパー対ボックスとして知られる超電導 qubit が共振器から 300 nm 離れたところに配置された。この超電導 qubit は 2 つのエネルギー状態を取りうるものであり（基底状態と励起状態）、これはマイクロ波、即ち電場によって制御できるようになっている。MEMS 共振器と超電導 qubit は非常に近接して置かれているので、相互に結合しており、MEMS 共振器を qubit の状態を調べるプローブとして使うことができる。このような結合を使うと全く逆の測定も可能であり、超電導 qubit を使って振動する共振器のディスクリートなエネルギーレベルが測定できる。このようにして、ナノメカニカルな量子重ね合わせやエンタングルメントの実証が可能になる。研究結果は、Nature 6 月 18 日号に掲載された。

出典:

“Mechanics: Ordinary meets Quantum”

California Institute of Technology press release (June 19, 2009)

http://media.caltech.edu/press_releases/13271

Yale University (2009 年 6 月 28 日)

Yale University では簡単な固体量子プロセッサを作製した。研究グループは、2 つの超電導 qubit チップを使って単純検索といった初歩的アルゴリズムを実行した。これは、固体デバイスを使った初めての量子情報処理の実証である。現在、qubit の情報はマイクロ秒程度しか保持できない。研究グループでは、次のステップとして、qubit の状態保持の時間を延ばして、より複雑なアルゴリズムを実行することを計画している。また、qubit 間の情報伝達を担っている量子バスに結合する qubit の数を増やしたいとしている。研究結果は 6 月 28 日 Nature オンライン速報版に掲載された。

出典:

“Scientists create first electronic quantum processor”

Yale University press release (June 28, 2009)

<http://opa.yale.edu/news/article.aspx?id=6764>

通信

Superconductor Technologies Inc. (2009 年 6 月 15 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) と GE 子会社の GE Global Research は、DOE の Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E) 部門に共同して 2 件の応募を行った。この応募は資金補助を必要とする提案の募集に応じたもの。第 1 の提案は、次世代風力発電機に使われる冷凍機技術 (STI 社知的所有権) に関するものである。STI 社は開発プログラムのリーダー役を勤め、GE Global Research は冷凍機仕様と製品を組み込む際の要求事項を明確化するための技術支援を行う。第 2 の提案は、発電機や電力グリッド応用を目指した Y 系線材の商用生産プロセス開発を今後とも継続するため現行の共同開発プログラムを延長するためのものである。特にこのプログラムは、STI が特許を持つ HTS 材料の積層プロセスを商業化可能なコストでの HTS 線材製造プロセスに転用することを目指している。GE Global Research は、性能要求明確化や HTS 製造プロ

セス向け STI 製造技術改善のために技術支援を行う。2 件の応募は現在 ARPA-E で審査中である。
出典:

“Superconductor Technologies Submits Dept. of Energy Proposals With GE Global Research”
Superconductor Technologies Inc. press release (June 15, 2009)
<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1298873&highlight>

Superconductor Technologies Inc. (2009 年 6 月 23 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、米国機関投資家から同社株 3,752,005 株の購入による 1,126 万ドルの出資の合意を得たと発表した。STI 社は、手取額約 1,058 万ドルを通常運転資本として使う予定。この募集は、2009 年 6 月 23 日に締め切られる。

出典:

“Superconductor Technologies Announces \$11.26 Million Registered Direct Offering”
Superconductor Technologies Inc. press release (June 23, 2009)
<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1301350&highlight>

加速器

CERN (2009 年 6 月 19 日)

CERN は、当初見込みより 2~3 週間遅れるものの、Large Hadron Collider (LHC)が今年秋の運転再開を目指してオンスケジュールで作業が進んでいると発表した。この遅れは、昨秋装置の停止を招いた事故の原因である高電流ケーブルの接合不良があったセクター3-4 の隣接セクター4-5 の追加試験が必要となったため。セクター4-5 を 80 K で測定したところ、少なくとも 1箇所疑わしい接合部がセクター中にあることがわかった。その結果、80 K の測定結果を確認するためこのセクターを再度室温に戻しているところである。これが確認されれば、このセクターの疑わしい接合部の修理を行う。また、以上により 80 K での測定が正しいことが確認できれば、80 K での最後の 3 セクターの接合抵抗測定は室温での再確認作業が不要となり時間の節約となる。この測定が終了すれば秋の再起動の日が確定できる。長期間の安全な運転を確保するため、他の多くの改良や機器の据付けが同時に行われている。

出典:

“CERN reports on progress towards LHC restart”
CERN press release (June 19, 2009)
<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR09.09E.html>

基礎

University of Texas at Austin (2009 年 6 月 8 日)

University of Texas オースチン校は、これまでで最も薄い超電導金属薄膜を作製した。この Pb 超電導薄膜の厚みはわずか原子 2 層分しかない。研究グループは先端の材料合成技術を使って、シリコン薄膜表面に 2 原子厚さの Pb 層を形成した。得られた Pb 薄膜は均一で、不純物を全く含んでいない。特に、この超電導薄膜中の電子は 2 次元中、即ち 1 つの「量子チャンネル」しか動けない。この電子の運動に対する制約にもかかわらず、Pb は良好な超電導体である。今回の結果は、超電導技術の将来の進歩のための基礎になる可能性を持っている。Texas University 物理学教授 Ken Shih

は次のように述べた。「この材料を制御し、新しい形状に作り上げ、どういうことが起こるかを調べることは大変興味深い。超電導体の表面が新しいデバイスにつながったり、超電導の新しい特性の研究につながることを望んでいる。」この薄膜の特性に関する研究グループの結果は Science 6 月 5 日号に掲載された。

出典:

“Thinnest superconducting metal created”

University of Texas at Austin press release (June 8, 2009)

<http://www.utexas.edu/news/2009/06/08/superconductors/>

Princeton University (2009 年 6 月 29 日)

Princeton University は、高温超電導体において電子の振る舞いがいかに電気伝導に影響を及ぼすかについて驚くべき発見をした。研究グループは電子が対をなす相互作用の強さが材料が超電導体に転移する温度を決定するのではないことを突き止めた。むしろ、超電導ペアーを組むことができる角度の大きさが臨界温度に影響を与えており、電子が広い角度で対形成ができる場合に最適の臨界温度が実現されるようである。最高臨界温度に関する理解を深めるための研究の一環として、研究グループは走査トンネル顕微鏡を使って、異なったドーピングの銅酸化物試料における電子対の結合強さを測定した。驚いたことに、低い臨界温度のアンダードーブ試料の電子対の結合強さと臨界温度が高い最適ドーブの試料の電子対の結合強さとは同じという結果が得られた。この結果を説明するため、研究グループは異なる試料中での電子対の結合可能な角度を測定する新しい手法を開発した。その結果、臨界温度は超電導対が生成しうる角度範囲に支配されているようであり、電子対生成角度範囲が最大である材料において最高の臨界温度が実現されていた。研究グループは今後とも検討を継続して、なぜある角度で電子対を組むものは超電導に寄与しないのかを明らかにするため電子対メカニズムの詳細を詰めていく考えである。研究結果は、Science 6 月 26 日号に掲載された。

出典:

“Research offers new insights, and a new angle, on high-temperature superconductivity”

Princeton University press release (June 29, 2009)

<http://www.princeton.edu/main/news/archive/S24/62/99S21/index.xml?section=topstories>

[超電導 Web21 トップページ](#)

特許情報

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所企画部
部長代理 永野一郎

◆平成 21 年度第 1 四半期公開特許

平成 21 年 4 月～6 月に公開された ISTEK 出願の特許をお知らせします。詳しい内容は特許庁ホームページ内の特許電子図書館等のデータベースをご利用ください。

1) 特開 2009-111306 「ジョセフソン接合を備えた電子デバイスとその製造方法」:

本特許は、特性のばらつきの小さい多数のジョセフソン素子を、同一基板上に作成するための製造方法に関するものである。この発明により、ニオブ電極の接続具合、すなわちパターンに依存したジョセフソン接合の臨界電流値の設計値からのずれを抑制でき、大規模で高性能のジョセフソン接合 LSI を実現することが可能になる。

高集積化された電子デバイスでは、これを構成する要素の特性ばらつきを小さく一定の範囲に収めることが必要である。超電導ジョセフソン素子では、同一の寸法に設計されたジョセフソン接合の臨界電流値が許容値を超えてばらつかないような製造プロセスが求められている。

これまで、このばらつきを決める最大要因の一つがエッチングであると考えられており、臨界電流が広くばらついている場合の対策としてプラズマエッチング技術が検討されている。しかし、別の文献では少数個のみが大きく平均値から外れる現象が報告されており、大規模集積回路を実現するためには、現時点では後者のほうが深刻な問題と考えられる。

本発明者らは、上記後者の現象を観測、検討していたが、臨界電流変動の根本原因は素子の電極材料であるニオブ中に水素が混入し、素子内で場所による濃度差ができることが原因であることを突き止めた。水素の濃度に応じてニオブ電極の超電導特性が変化するため、水素濃度変化が直接に超電導臨界電流値変動を引き起こしてしまうことがわかった。混入する水素の濃度は成膜装置、成膜条件および使用状況に依存するだけでなく、成膜工程以外で水素がニオブ電極に入る場合も、ニオブ電極から出る場合もあり、さらにそれがプロセス条件やニオブ電極の接続具合に依存する（パターン依存性）という非常に込み入った仕組みがあり、この現象が複雑に見えることもわかってきた。

水素は室温でもニオブ中を移動する。また水素はジョセフソン素子で使用されることのあるアルミニウム、モリブデン、タングステンやその窒化物、およびニオブ窒化物中は殆ど移動できず、パラジウム、白金やチタン等では逆に移動しやすい。これらの特性を利用し、ニオブ中の水素濃度の均一化を考えることができる。

図 1 は本発明を適用して効果のある超電導ジョセフソン接合素子の一例を示す断面図である。1 はシリコン基版、2 はシリコン熱酸化膜による絶縁膜、3 はスパッタにより形成した SiO_2 による各層の絶縁膜、Nb (図 1 中で Nb_{11} 、 Nb_{31} 、などで示す) は超電導配線のニオブ層、 Al_2O_3 は酸化アルミニウムの層、Mo はモリブデンの層である。

超伝導科学技術研究会、材料研究会合同ワークショップ「超伝導材料と先端ナノ材料における自己組織化」報告

株式会社日立製作所
日立研究所エネルギー材料研究部
主管研究員 岡田道哉

平成 21 年 6 月 24 日、東大山上会館にて、低温工学協会材料研究会及び未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会は、「自己組織化」という切り口で、異分野交流を趣旨に共同研究会を開催した。超電導線の高 J_c 化には、ナノレベルの組織制御によるピンングセンタの導入が不可欠である。自己組織化は、新たなナノレベルの組織制御に結び付く可能性のある概念といえる。参加者は約 60 名であった。講師は 5 名。内、2 名は、超電導以外の分野から招き、自己組織化にかかわる事例と応用について報告いただいた。以下にその概要を報告する。

＝前半の講演＝（超電導以外との異分野交流）

中山（NIMS）は、「自己組織化の工学的アプローチ」と題して講演。本ワークショップのイントロとして、「自己組織化」の定義及び事例を紹介した。自然界の事例として、宇宙の銀河、星の集まり、生物、細胞などが紹介された。また、自己組織化を工学的に応用した事例として、 C_{60} （フラーレン）による fcc 結晶や、フラーレン粒子で膜を作り、STM によりナノスケールで電界かけナノスケールのメモリ等に応用する事例が紹介された。自己組織化は、高分子の形状制御に広く応用されている。

田畑（東大）は、「バイオに学ぶ自己組織化と“ゆらぎ”機能」と題して講演。生物の DNA を工学的に利用する研究で、自己組織化が利用されている事例を紹介した。DNA ラセンの直径と Au 粒子の直径が同程度であることを利用。キャピラリー・フォースとして DNA ラセン構造を使い、Au ナノ粒子を基板上に均一に分散できる事例を紹介した。また、ZnO ナノロッドを利用して、細胞ひとつに薬を直接投与する事例が紹介された。薬理学的に貴重なデータが得られるとのことである。

＝後半の講演＝（超電導関連）

後半の 3 件は、吉積（SRL）、飯島（フジクラ）、一瀬（電中研）から、Y 系超電導線における組織制御切り口で講演がなされた。

吉積は、イントロとして、高温超電導の概要、Y 系の利点、組織制御の概要、について紹介するとともに、BZO ナノ粒子の分散メカニズム、バンパー構造の BZO 生成メカニズムについて紹介した。

飯島は、IBAD 技術全般をレビュー。開発の歴史から最先端の問題点までを大変わかりやすく紹介した。自己組織化の視点で、

- ①狙った構造とは違う成長をして、（自己組織化して）新たな展開へつながったこと、
- ②IBAD では、なぜ YSZ で(100)が成長するか分かっていないこと、
- ③スタンフォードで発見された、MgO が Y_2O_3 のベッド層の上で、なぜ (100) が成長する理由は分からないままであること、

などが紹介された。大変興味深い。自己組織化の恩恵で、IBAD プロセスの中間層厚みが 1/100 になり、1000 m/h と実用レベルの生産が可能になった。

最後に、一瀬から、BZO ナノロッド生成メカニズムについて、自己組織化の視点で講演された。

ナノロッドが花火のような美しい広がりを見せる「FireWorks 構造」が紹介され、まさに、本ワークショップのテーマである「自己組織化」の最後の講演を飾るようであった。花火構造は、S-K 様式による結晶成長で説明されるであろうとのことであった。ナノスケールの組織制御は、自己組織化をうまく利用することで、さまざまな可能性が開けることがよく理解できた。大変実りのあるワークショップであった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

ISEC2009 「12th International Superconductive Electronics Conference」 報告

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

ISEC は日本で創設された超電導エレクトロニクスに関する国際会議である。第 1 回は東京で 1987 年に開催された。その後、隔年開催で、日本だけではなく欧米でも開催されてきた。今回が 12 回目となる。今回の ISEC2009 は 6 月 17 日ー19 日の 3 日間、九州大学医学部（福岡）の百年記念講堂で開催された。日本で開催されたのは 5 回目である。

今回は 245 名の参加者があり、うち 85 名が海外からの参加者であった。図 1 に会議の様子を示す。この会議では超電導エレクトロニクスに関するすべての分野が議論される。具体的には、SQUID、TES (Transition Edge Sensor)、HEB (Hot Electron Bolometer)、STJ (Superconducting Tunnel Junction)、SSPD (Superconducting Single Photon Detector)などの各種センサ応用、超電導フィルタや SIS ミキサなどを用いた高周波（マイクロ波/ミリ波/テラヘルツ波）応用、プロセッサや通信機器などのデジタル応用、量子ビット応用、電圧標準への応用、などである。



図 1 ISEC2009 の会場の様子

SQUID が着実な進歩を遂げている。MCG（心磁計）については、多くの研究機関が臨床試験を行っている。日米欧だけでなく、韓国や台湾でも多チャンネルシステムを用いて精力的にデータを集めている。MCG や MEG（脳磁計）のほかに、最近研究が盛んになっているのが低磁界 NMR/MRI である。通常の NMR や MRI は解像度を高めるために数テスラ～20 テスラ程度の強い磁界を用いているが、低磁界 NMR/MRI は 50 マイクロテスラ程度の非常に低い磁界を用いる。数 10 ヘルツでの物質の共鳴を SQUID で検出することにより、従来の NMR では検出できない信号を検出するのである。 T_1 とよばれるスピン・格子共鳴の緩和時間は正常細胞では 80 ms であるのに対し、がん細胞では 50 ms 程度に減少する。この差を検出することによって、がん細胞を画像化することができる。MCG や MEG と組み合わせた低磁界 MRI の検討も進んでいる。PTB では SQUID を用いた Cryogenic Current Comparator (CCC) という電流計を完成し来年 Magnicon という会社から売り出す予定である（感度 70 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ）。ISTEC では 5 チャンネル SQUID を用いた線材欠陥検査装置をほぼ実用レベルまで完成させている。

SQUID 以外のセンサの進歩も顕著である。とくに TES を用いたセンサアレイの研究が活発である。SII は東京理科大学と共同で TES を用いた物質のスペクトル分析を行っている。電子顕微鏡と組み合わせて局所的な物質の同定ができるシステムを完成している。現在は TES を移動させて 64×64 の測定点の画像を表示しているが、将来的には TES を多チャンネル化して画像表示をすることが望ましい。チャンネル数が少ない場合は、それぞれの TES からの信号線を取り出して画像処理できるが、画素数が数十万～百万素子程度になると、配線の数が増大になり読み出しが困難になる。これら膨大な数の TES からの信号を多重化して 1 本の信号線で室温に取り出すことが理想である。信号を多重化することは TES アレイに限らず、SIS アレイや STJ アレイにも必要な技術である。信号の多重化については多くの研究機関が研究開発を行っている。NIST や JAXA では、多重化の手段として時分割、周波数分割、コード分割の利害得失を議論し最終的なシステム作りを目指している。

高周波応用の分野では、超電導フィルタの完成度が高くなっている。東芝は従来の空洞共振器と超電導フィルタを組み合わせ、3.5 kW の送信電力に耐える気象レーダ用超電導送信フィルタシステムを作った。富士通は携帯基地局用送受信フィルタを完成させている。産総研では 10 V の標準電圧発生装置の完成度を高めるとともに、ISTEC と共同で交流電圧標準装置のプロトタイプを完成させている。国立天文台では ALMA 計画の 10 種類のバンドのうち 3 つのバンドを担当し、そのうち最も開発が困難であったバンド 10 (787-950 GHz) 用 SIS 受信機の性能を向上させて ALMA 仕様を満足するレベルまで完成させている。

デジタル関係では、米国の HYPRES 社の成果と日本の NEDO や JST のプロジェクト成果が群を抜いている。HYPRES 社は X バンドデジタル受信システムを陸・海・空軍併せて 5 セット納入した実績がある。納入台数を確実に増やし、機器の操作も HYPRES の研究者ではなくユーザである軍関係者が行っていることに意味がある。これまで大きなトラブルもなく稼動している。現在のシステムは 19 インチフルラック 1 台に収まっているが、次機種はロッキードマーチン社製の小型冷凍機を用いるためシステム全体が 19 インチラックの中の数センチの厚みで収まってしまう。また、最近になってプロセス装置の新規導入を行っている。8 インチウェハにも対応できる装置である。とくに 0.25 ミクロンの解像度がある日本製の露光装置(ステッパー)を導入しているのは注目に値する。大型マルチチャンバーの真空装置や平坦化加工装置 (CMP) など導入している。近い将来プロセス技術の大幅な向上が期待される。

その他のデジタル関係はほとんどが日本からの発表であり、ISTEC、名大、横国大などから、NEDO プロジェクトで進められているプロセス技術や高速測定システム、JST プロジェクトで進められている再構築可能なデータプロセッサ (RDP) などに関して多くの発表が行われた。

今回の会議の特徴を一言でいえば、これまでの要素技術から一歩踏み込んで、いろいろなシステム性能をプロトタイプとして実証していることである。ものによっては受注生産可能なレベルのものもある。長い揺籃期を経て、超電導エレクトロニクスがビジネス展開に向かって歩き始める時期に差し掛かってきたという印象が強い会議であった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR（その 4—高磁界化）

（社団法人）低温工学協会
副会長 堀上 徹

4.1 はじめに

MRI も NMR も技術的には高磁界化の方向にある。技術的には、と書いたのは、現時点では市場面からはコストの観点から必ずしも高磁界化の方向にあるとは言えないからである。

MRI は、現在国内では 1.5 T 機が主流であるのに対し、欧米では 3 T 機の市場が伸びてきている。

市場規模から見れば 3 T クラスが今後主流になるとみられているが、脳の働きなどを更に鮮明に画像化したり、今まで観測できなかったものを観るためにはさらなる高磁界（10 T クラス）が必要とされており、探索研究という観点から世界的に高磁界化の開発が進められている。

NMR においても同様に高磁界化が要求されているが、市場規模は 700～800 MHz 機が主流である。一方では高磁界化することにより、測定時間の短縮、測定精度の向上はもとより、より大きな分子量を持つ物質の分析が可能となるので、高磁界化の開発も進められており、現在は 950 MHz（磁界強度 22.3 T に相当）機が既に開発され、今後は 1 GHz 超の装置開発が世界的に活発になると考えられている。MRI も NMR も高磁界化すれば装置の大型化、重量やコストの増大等を伴うが、研究・開発により高磁界化技術が成熟すれば、いずれ市場に浸透するものと期待される。

4.2 高磁界用超電導材料

機器の新機能性付与や高性能化は材料開発と密接な関係にある。超電導マグネットの場合も例外ではない。前号では超電導現象が生じる温度（臨界温度）について記載したが、臨界温度以外に、ある温度のもとで、超電導線材にある磁界を外部から印加したとき、どれだけ大きな電流を流せるか（臨界電流値）と、どれだけ高い磁界まで超電導性を保存することができるか（臨界磁界）が高磁界化の実現には重要となる。

図 4.1 に各種超電導線材の印加磁界と臨界電流値の関係を示した。それぞれの材料を線材形状にした場合、その線材に外部から磁界を印加した状態で電流を流す。磁界強度が増すにつれ、流し得る電流値（臨界電流）が減少している。実用超電導材料としては、できるだけ強い外部印加磁界のもとで、できるだけ大きな臨界電流値を持つ材料が高磁界化には適している。

図では材料間の性能比較をするために、横軸の印加磁界に対して縦軸には線材の単位断面積あたりの電流値、即ち臨界電流密度を示してある。

図中、各グラフに温度が記載されていない場合は 4.2 K での測定結果である。例えば、Nb₃Sn(Bronze) の場合、温度 4.2 K では磁界が 23 T 程度で超電導電流がほとんど流れないのに対して、最近開発が急速に進みつつある酸化物超電導体の Y 系（YBCO）の場合は 30 T でも未だ十分な電流を流し得るということが分かる。MRI などでも多用されている Nb-Ti 材料は 10 T 程度で超電導状態から常電導状態に移転してしまう。即ちこの材料で作製したマグネットでは 4.2 K で 10 T 以上の磁界を発生させることはできないということを意味する。

今更言うまでもないが、図から分かるように、MRI や NMR に限らず高磁界化のためには、高温超電導材料が非常に適しており、今後の実用化開発が期待されているところである。高温超電導体は、液体窒素温度以上でも超電導現象を示すことも魅力の一つではあるが、外部からの大きな印加磁界に対しても大きな電流を電気抵抗なしに流せるということも応用に際しては大いなる魅力の一つなのである。

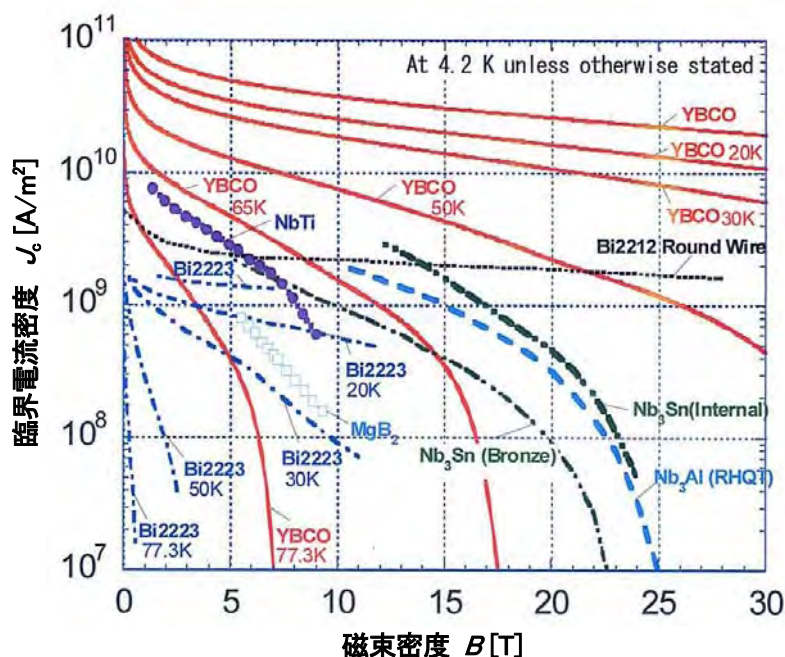


図 4.1 各種超電導材料の外部印加磁界と臨界電流密度との関係
(提供 九州大学 木須隆暢 教授)

4.3 MRI の高磁界化

少し古い情報になるが、2007 年 4 月 19 日の日経産業新聞に「欧米の医療機器各社 MRI、3 テスラ時代到来？」という見出しで、「国内、一気に普及も」というサブタイトルのついた記事が出た。

この記事では、3 T 機は、現在主流である 1.5 T 機に比べて、血管や海馬の輪郭などがよく見える。脳腫瘍の組織内の化学物質の量などもより詳しく見えると説明している。

また、今年（2009 年）4 月に横浜で開かれた「2009 国際医用画像総合展」においても、東芝メディカルシステムズ、GE 横河メディカルシステム、シーメンス旭メディックスやフィリップスエレクトロニクスジャパン等の各社が主に 3 T 機の MRI を出展していた。この様子から見ても分かるように世界的に 3 T 機への移行が進んでいる。

一方、医用 MRI では従来から円筒形状（ソレノイド形状）のマグネットが用いられているため、患者はトンネルの中に居るような感覚になり、特に閉所恐怖症の人には精神的な負担になっていたようである。欧米ではその傾向が強いらしい。MRI の形状は、前号の図 3.1 に示したように随分と短軸化してきているものの円筒形状であり未だ十分ではないようである。2 個のコイルを対向させて配置すれば円筒形状よりは空間を確保できる。そのような形状をした装置は既にオープン型の MRI として 0.5 T 機では商品化されている。しかし、高磁界化が進めば進むほど 2 個のマグネット間に働く電磁気力が巨大となり、2 個のマグネットを支える支持構造材料の量が莫大となり、重量的にもコスト的にも商品化することは困難とされている。この状況がある程度克服したのが、株式会社 日立メディコから「オアシス」という商品名で売り出されているものである。先の横浜での展示会において出展された。

この製品の謳い文句は①オープン型としては世界最高の 1.2 T の磁界強度 ②270 度の開放感とベッド横移動による広い撮像可能範囲 ということになっている。装置の写真を図 4.2 に示した。この装置では静磁界の発生方向が上下方向となっている。



図 4.2 オープン型 1.2 T MRI
(提供 株式会社 日立メディコ)

MRI のさらなる高磁界化開発は国内外で行われている。ドイツやフランスでは 9.4 T や 7 T の MRI が設置されている。わが国でも東大が中心となって「Super-MRI コンプレックス」というプロジェクトを立ち上げようとしている。ここでは 11.7 T 級の MRI を開発し、スーパーコンピューターを活用して糖尿病、がん、脳梗塞、心臓病、アルツハイマー病などの疾患を正確に診断することやテーラーメイド医療の実現等を目的としている。（「2008 東京大学の提案 Super-MRI コンプレックス」パンフレットより）

4.4 NMR の高磁界化

NMR 装置の高磁界化は図 4.3 に示すように、1960 年代半ばから急速に進展し、現在は 1 GHz 級の装置がドイツの Bruker 社から販売されるに至っている。

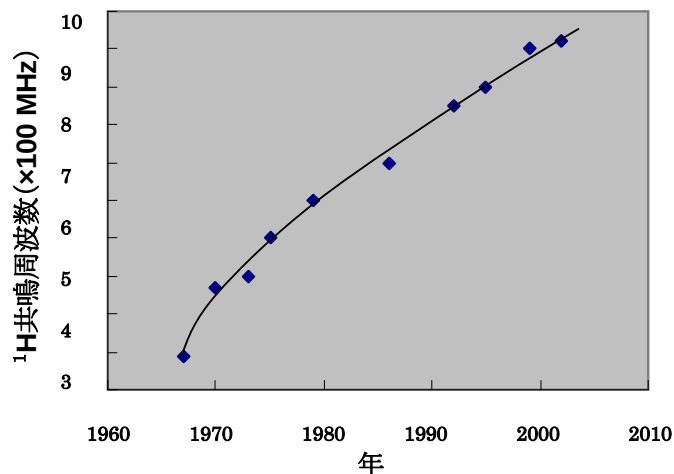


図 4.3 NMR 装置の高磁界化傾向（共鳴周波数 f は $f(\text{MHz}) = 42.6 \times B(\text{T})$, B は印加磁界）

NMR は、分子量の大きなタンパク質の構造解析に有力なツールであるだけでなく、開発中の薬剤化合物の迅速な分析等大変広く分析化学の分野では普及している。共鳴周波数が高ければ高いほど、即ち磁界強度が高ければ高いほど分析精度や感度の向上、分析時間の短縮等が図れるが、「コスト対効果」を考慮すると共鳴周波数が高ければ高いほどよいというわけにはいかない。

独立行政法人 物質・材料研究機構と神戸製鋼所は 2004 年に 930 MHz（磁界強度 21.9 T）機を開発し、タンパク質の構造解析に大いに貢献した。最近では科学技術振興機構の「先端計測分析技術・機器開発事業」により高温超電導を用いた 1.05 MHz (25 T) クラスの開発が進められている。このように国の主導で技術開発が進められ、それが一般産業に展開するという図式が期待されるところである。

4.5 第 4 回目を終えるに当たって

今までの解説で、超電導という特性が MRI や NMR の発展に大いに貢献してきたことをご理解いただけたと思う。次号では世界の情勢や市場について書く予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「SQUID 計測において、外部磁気雑音の影響をどのようにして回避するかを教えてください。」

A：SQUID（超電導量子干渉素子）は、地磁気（約 $30 \mu\text{T}$ ($3 \times 10^{-5} \text{T}$)) の数億分の一の微弱な磁気信号を検出できる非常に高感度な磁気センサです。微弱な磁気信号として心臓や脳から発生する磁気（生体磁気 ($10^{-14} \text{T} \sim 10^{-11} \text{T}$ 程度)) があります。図 1 は生体磁気信号と地磁気や市街地の磁気雑音の大きさを示しています。市街地の磁気雑音は、電線、自動車や電車、電気製品、空調ファンなどから発生します。SQUID を使用しても、微弱な磁気信号は環境雑音に埋もれているため測定することができません。そこで、様々な方法で外部磁気雑音を低減させ、微弱な信号を測定しています。

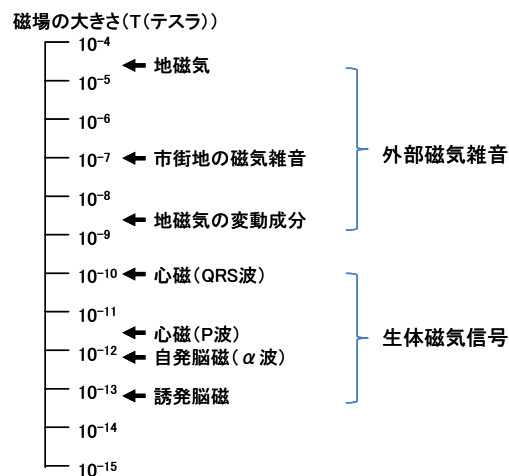


図 1 いろいろな磁場の強さ

雑音除去技術の例として、生体磁気信号の計測システムの構成を図 2 に示します。外部磁気雑音の影響を低減させるために、(1)磁気シールド、(2)グラジオメータ、(3)フィルタ、(4)加算測定、の 4 つの方法を使用しています。これらを組み合わせることで外部磁気雑音の影響を排除し、微弱な信号を計測しています。

まず、磁気シールドですが、磁力線は透磁率が高い材料（高透磁率材料）により多く流れる性質があります。そこで、パーマロイのような高透磁率材料で密閉された箱（部屋）をつくるとその内部に外部の磁力線が入りにくくなります。パーマロイ 1 層で内部の磁界を約 1/10 に減衰できます。生体磁気計測では 2 層ないしは 3 層の磁気シールド室が用いられています。このタイプの磁気シールドは強磁性磁気シールドと呼ばれています。その他の磁気シールドとして、超電導体の磁場を全く通さない性質（完全反磁性またはマイスナー効果）を利用した超電導磁気シールドや、電磁石で逆方向の磁場を発生させ外部磁場を打ち消す方法（アクティブ磁気シールド）などの技術を併用する場合もあります。

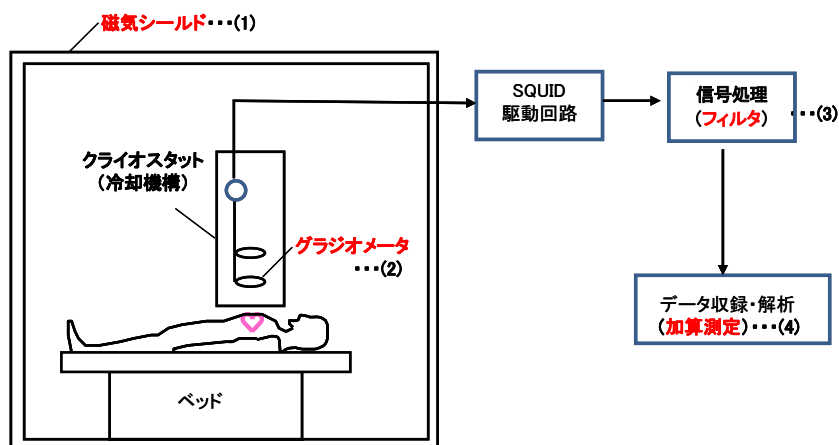


図 2 生体磁気計測システムにおける雑音除去方法

次にグラジオメータについて説明します。図 3 にもっとも基本的なグラジオメータである一次微分型グラジオメータの構造を示します。左側は電気差分式グラジオメータの構造です。2つの SQUID 磁束計を磁束計の検出方向にある距離（ベースライン）だけ離して配置し、2つの SQUID 磁束計の出力の差を求めます。試料に近い方を計測用の SQUID、遠い方を参照用の SQUID と考えると分かり易いと思います。試料からの信号は試料に近い計測用の SQUID により検出されます。一方、外部磁気雑音は、2つの SQUID 磁束計に同じように検出されます。したがって、2つの SQUID の出力の差を求めることで雑音信号をキャンセルすることができます。右側の図はハードウェアグラジオメータの例です。計測用と参照用の検出コイルを互いに逆向きに巻き、直列につなぐことで差分された信号を 1つの SQUID で直接測定できます。その他に、2つのコイルを同一平面上に配置した平面型グラジオメータや 3 個以上の検出コイルあるいは SQUID 磁束計を組み合わせた高次のグラジオメータなど、必要に応じて様々な構成が用いられています。

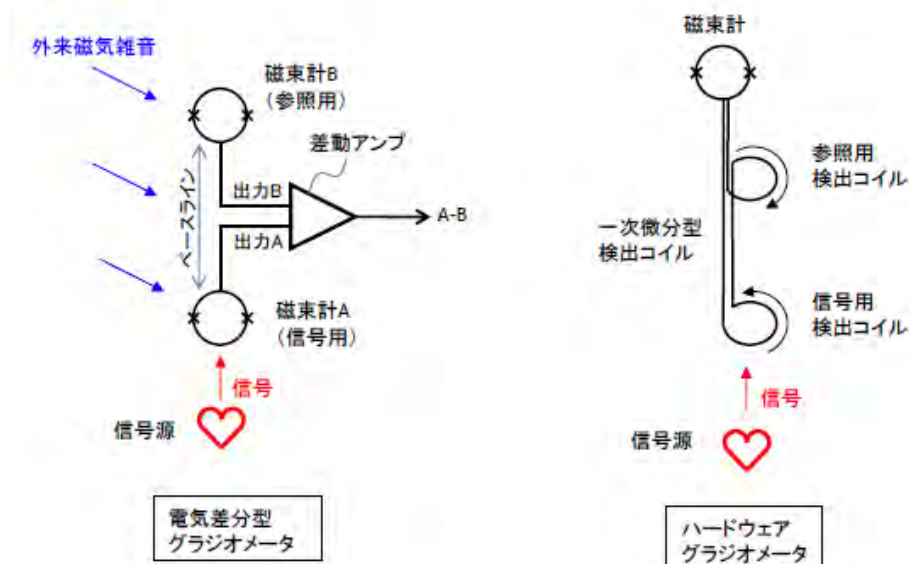


図 3 グラジオメータの基本構成

このようにして外部磁気雑音をできるだけ排除して測定した信号に対して、信号処理を行いさらに雑音成分を除去します。測定したい信号と除去したい雑音の周波数が異なる場合はフィルタを使用することで雑音成分を選択的に減衰させることができます。指定した周波数帯域のみを通過させることができるバンドパスフィルタを使用することで、通過帯域外の雑音信号成分を除去できます。心磁計測では 0.1~100 Hz 程度のバンドパスフィルタが使用されています。また、特定の周波数成分を遮断するノッチフィルタを使用して、電源周波数の 50 Hz（または 60 Hz）とその高調波（100, 150 Hz など）のような特定の周波数の雑音を除去しています。

さらに、心磁波形のように繰り返される信号を測定する場合には、加算測定が雑音除去に有効です。 n 回の測定データを加算した場合、同期した信号は n 倍に増加しますが、同期していない信号は $\sqrt{n}$ 倍にしか増加しません。その結果 S/N は $\sqrt{n}$ に比例して向上します。心磁計測の場合、心電図を同時に測定することで心臓の動き（心拍）に同期させて加算測定を行っています。

このように、複数の雑音除去技術を組み合わせて必要なレベルまで外部磁気雑音を低減させることで、微弱な磁気信号を測定することが可能になります。

回答者：SRL/ISTEC 塚本 晃

[超電導 Web21 トップページ](#)