

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容 (サマリー) :

特集 : SQUID 応用

- 回転方式 2-SQUID 磁場偏差計の開発
- HTS-SQUID を用いた電気化学評価システム
- 異物検査装置開発の最近の進展
- STM-SQUID 磁気顕微鏡
- SQUID を用いた鉄道レールの非破壊検査
- LTS-SQUID による脊髄診断装置開発の進展

- 超電導関連 2014年8月-9月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (6/19-7/20)
- 世界の動き
- 「IEC TC90 定例会議」報告
- 隔月連載記事「超電導センサ」(その4)
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」(第7回)
- 研究室紹介 (大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 西嶋研究室)

[超電導 Web21 トップページ](#)



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
213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3丁目2番1号 KSP A-9
Tel 044-850-1612 Fax 044-850-1613

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://ringing-keirin.jp>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「回転方式 2-SQUID 磁場偏差計の開発」

(公財) 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 物性・デバイス研究部
主管研究員 塚本 晃

地下の磁性金属鉱床は地磁気によって磁化されており、地表で観測される地磁気に影響を与える。地磁気の分布（変化）を調べることで地下の情報を得る探査方法は磁気探査と呼ばれている。地磁気は一日に数十nT（静穏日）から数百nT変動（磁気嵐）するため、地磁気の値そのものではなく、2点間の差（磁場偏差）を測定する必要がある。今回、2つのSQUIDを回転させることで磁場偏差の絶対値測定が可能な磁場偏差計の試作を行った。

SQUIDはフィードバック制御で動作させており、磁場の絶対値ではなく、ある基準値からの相対的な変化しか測定できない。異なるSQUIDではこの基準値が異なるため、単純に差分を求めるだけでは磁場偏差の絶対値を得ることができない。地磁気のグローバルな変動の影響を避け、SQUIDの絶対値の問題を解決するため、図1に示すような2つのSQUIDで離れた2点の磁場を交互に測定する方式を検討した。同じSQUIDを移動させて2カ所の磁場を測定するため、磁場偏差を求める際に基準値がキャンセルされ、磁場偏差の絶対値を求めることができる。さらに、同時刻に測定している2つのSQUIDの出力の差を求めることで、グローバルな地磁気変動の影響をキャンセルできる。

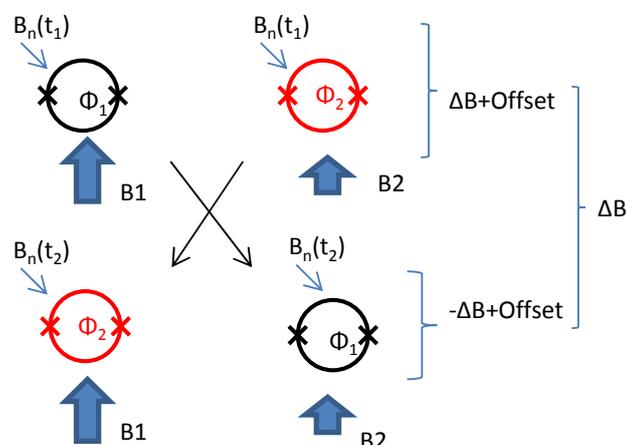


図1 測定原理説明図

図2に試作した装置の構成を示す。SQUIDの位置を入れ替えるために2つのSQUIDを同心円上に連続回転させる方式を採用した。垂直方向（回転軸方向）に向けた2つのHTS-SQUIDマグネトメータ（検出コイルサイズ13.5x13.5 mm）がそれぞれのデュワーで冷却されている。各デュワーは自公転機構により面内の方位を維持したまま公転ステージ上を移動する機構となっている。回転には磁気雑音が少ない超音波モータを使用し、赤外線リモコンで外部から制御可能となっている。デュワーの上には無線LAN対応のFLL回路（日立製）が搭載されており、公転位置情報とSQUIDの信号がPCに逐次転送され、PC上でリアルタイムに差分処理を行うことができる。連続回転させることで、dBz/dxおよびdBz/dy成分の同時測定と加算処理が可能である。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

本研究は、経済産業省の資源探査技術開発事業として、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。

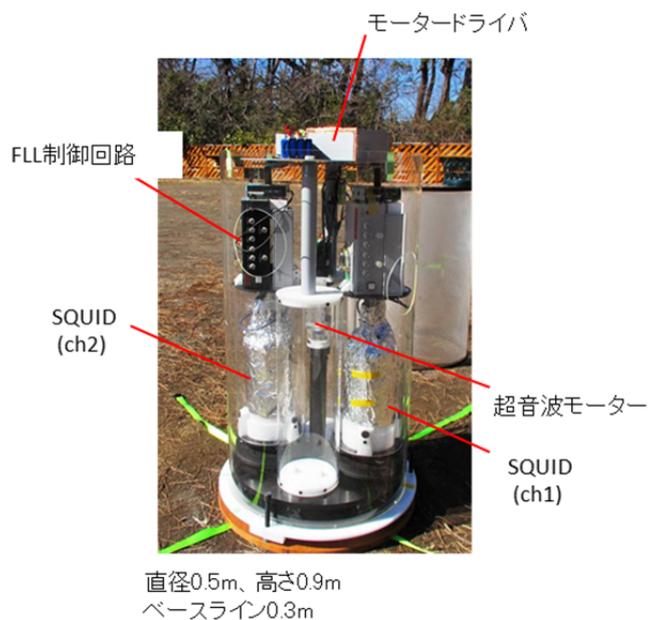


図2 試作した回転方式 2-SQUID 磁場偏差計

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「HTS-SQUID を用いた電気化学評価システム」

岡山大学大学院
自然科学研究科
准教授 紀和利彦

電極と電解質の電気化学反応の計測は、古くより科学・工学の幅広い分野で活用されている重要な計測である。近年においても、分析化学や表面ナノ科学の分野において、また、高効率バッテリーや燃料電池開発のエネルギーシステム分野などにおいて重要な役割を果たしている。その中で、ボルタンメトリー法は最もよく使用されている電気化学計測手法の一つである。この方法では、作用電極・対向電極・参照電極の3つの電極を電解質溶液中に挿入し、作用電極—対向電極間の電位差にたいする電流を計測する。この電流は、一般的に電子差に比例せず、電極—電解質間の酸化還元反応に起因する非線形特性を示すため、特性を解析することで、電解質に含まれる物質の同定や電極表面のナノ領域の状態を知ることができる。しかしながら、計測する電気化学反応は、電解質中を流れるイオンの輸送経路や、電極の形状など様々な要因に影響されるという課題があった。その為、電解質中を流れるイオンの輸送分布を計測する必要があり、様々な研究がされている。たとえば、微小コイルアレイを電解質中へ挿入し、イオン輸送によって発生する磁場を検出する方法がある¹⁾。しかしながら、挿入したコイルによってイオン流が乱されるという課題がある。そこで、我々のグループでは、電解質中のイオン輸送によって発生する磁場を、HTS-SQUID を用いて、非接触で可視化するシステムの構築に取り組んできた。

図1は、計測に用いた電気化学セルである。電解質としては0.5 M- Na_2SO_4 溶液中に溶解した0.5 mM- $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ を用いた。セルの深さは約5 mm であり、磁気計測システムの空間分解能に比べて十分小さいために、深さ方向の電流分に関しては無視することができる。HTS-SQUID は、ISTEC より供給された $\text{La}_{0.1}\text{Er}_{0.95}\text{Ba}_{1.95}\text{Cu}_3\text{O}_y$ および $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ によってランブエッジ接合を構成したものをを用いた。HTS-SQUID は同一平面内に作製されたベースライン長7.5 mm の平面型グラジオメーターに接続されている。素子詳細については、以下の文献2)～4)を参照されたい。図2(a)から(d)はそれぞれ作用電極の電位が参照電極に対して+0.15 V, +0.80 V, +348 V, および-0.295 V の時の磁気分布である。また、図中のベクトルは、磁場分布より推定した電流分布である。磁気信号は、セルの面内独立2方向に対して、磁場勾配を計測し、その合成ベクトルの大きさをプロットしたものであり、電流の強度分布に一致する。図より、電極との酸化還元電位に従って電流の向きが変化しているのがわかる。また、作用電極付近に電流が集中している様子も見ることができる⁶⁾。

現在、パルス状に電位が変化したときの磁気信号応答の計測にも成功しており⁷⁾、今後、電気化学反応の過渡的な応答を可視化できると考えており、電気化学反応メカニズム解明に有用なツール

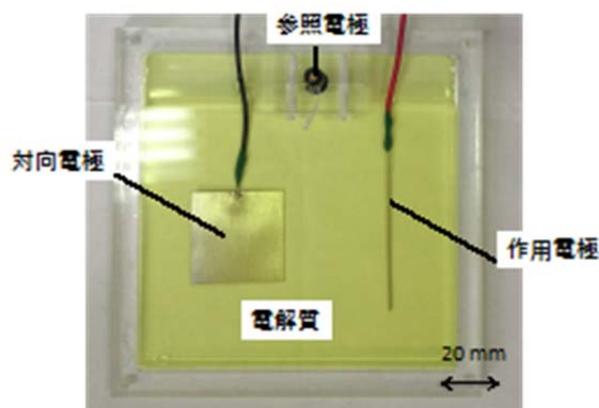


図1：計測に使用した電気化学セル

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

となると考えている。

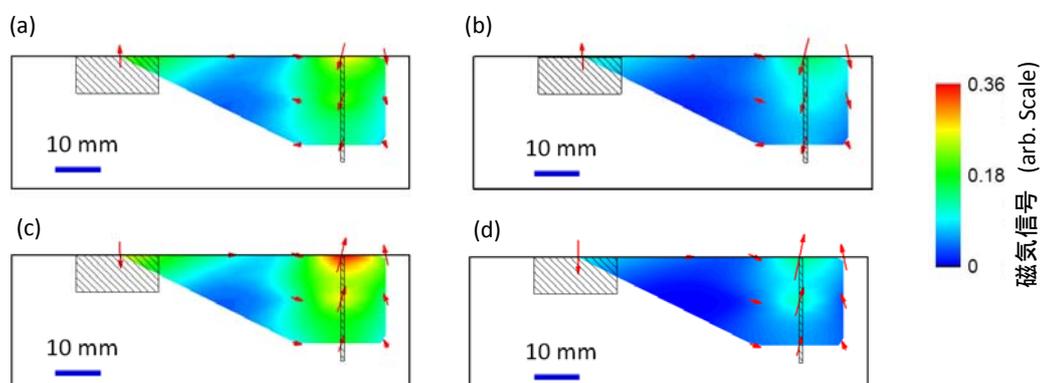


図 2 : 計測した磁気分布. 参照電極にたいする作用電極の電位
(a) +0.15 V, (b) +0.80 V, (c) +0.348 V, (d) -0.295 V

引用文献 :

- 1) Ch. Wieser, et al., J. Appl. Electrochem. 2000; 30: pp. 803-807.
- 2) S. Adachi, et al., 2008; 468: pp. 1936-1971.
- 3) H. Wakana, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 2009; 19: pp. 782-785.
- 4) K. Sakai, et al., Supercond. Sci. Technol. 2012; 25: 045005.
- 5) K. Tsukada, et al, Rev. Sci. Instrum. 2006; 77: 067303.
- 6) T. Kiwa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 12: 1600804.
- 7) T. Kiwa et al., Physica C, 2014, In press

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「異物検査装置開発の最近の進展」

豊橋技術科学大学大学院
環境・生命工学専攻
教授 田中三郎

長年、食品用金属異物検査装置の開発を進めてきており、これまでに企業との共同開発で、高温超伝導 DC-SQUID を用いたチーズブロック向けの装置が実用化され、食品工場で 10 年以上にわたって稼働中である。その後、より信頼性の高いシステムを目指して、平成 23 年度に愛知県の「知の拠点重点プロジェクト（5 年間）」に採択され、研究開発が進められている。

食品内の異物検出方法としては、SQUID 磁気センサ方式、渦電流検査方式、X 線方式などがあり、その中でも渦電流検査方式は、広く食品検査のために使用されている。しかし、その感度は金属異物の導電率および食品自体の導電率に影響される。また、X 線方式も有用な技術として多く使われてきているが、実際の X 線による検出下限は 1 mm 程度であり、X 線使用による食品のイオン化や善玉菌の死滅、味の劣化など、問題もある。SQUID 磁気センサ方式はこれらの課題を解決するものである。検出原理は図 1 に示すように SQUID センサを用いて金属異物の残留磁化を検出することに基づいている。H25 年度に開発されたシステムの外観写真を図 2 に示す。

検出原理

- ① 磁性金属異物が混入した製品が流れてくる。
- ② 永久磁石により磁性金属を帯磁する。
- ③ 磁性金属に僅かな磁化が残留する。
- ④ 残留磁化を SQUID 磁気センサで検出する。

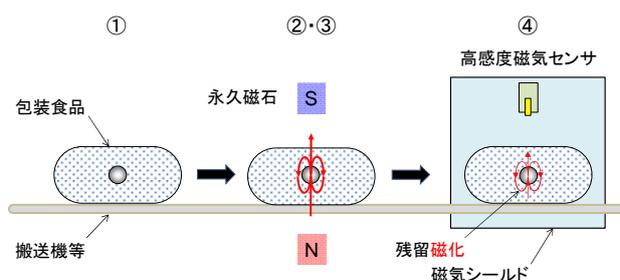


図 1 異物検出原理



図 2 外観写真

愛知県のプロジェクトでは汎用性と信頼性を重要視して、RF-SQUID を採用した。高温超伝導 SQUID では毎日液体窒素を補給する必要があり、その際に少なからず水分の侵入があり、霜を溶かして取り除くなどの定期的な保守が不可欠となる。DC-SQUID では 10 年以上の長期間の使用では配線の劣化断線などが避けられない。一方、RF-SQUID では同軸ケーブル一本だけとなるので、信頼性は比較的高い（まだ、導入実績がないので、長期使用の劣化については断言できない）。帯磁用の磁石は磁束密度の最大値が 0.34 T（従来のシステムでは 0.1 T）で 150 mm のコンベア幅のすべての箇所ですべて 0.3 T を上回るように設計した。RF-SQUID の温度を 77 K に保持するための液体窒素 (LN₂) デュワーは、図 3 に示すように個別の 3 つのガラスデュワーから出来ている。こうすることで、一

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

体型の大きなデュワーに比べて底厚を薄くできるので、センサと検査物間の距離を小さくすることができる。RF-SQUID 電子回路からの信号は、カットオフ周波数 0.2 Hz のハイパスフィルタ (HPF) および 20 Hz のローパスフィルタ (LPF) を通過し、その後、A/D 変換器に送られる。図 4(a)は、3つ SQUID 磁気センサからの信号の時間波形を示している。これらの信号を記録したときのスタンドオフ (鋼球と SQUID センサ間距離) は 64 mm とした。鋼球は ch2 の真下の位置を通過するため、ch2 の信号が他の 2 つのセンサよりも大きい。φ 0.4 mm 以上の鋼球で信号対雑音比 (SNR) > 3 以上が得られ、φ 0.3 の鋼球では SNR>2 以上が得られた。図 4(b)に試料の直径と SQUID センサの出力ピーク信号の依存性を示す。信号は試料の直径の 3 乗で増加しており、これは試料の体積に比例することを示唆している。

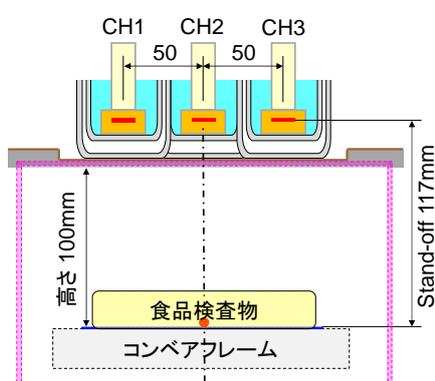


図 3 検査部断面図

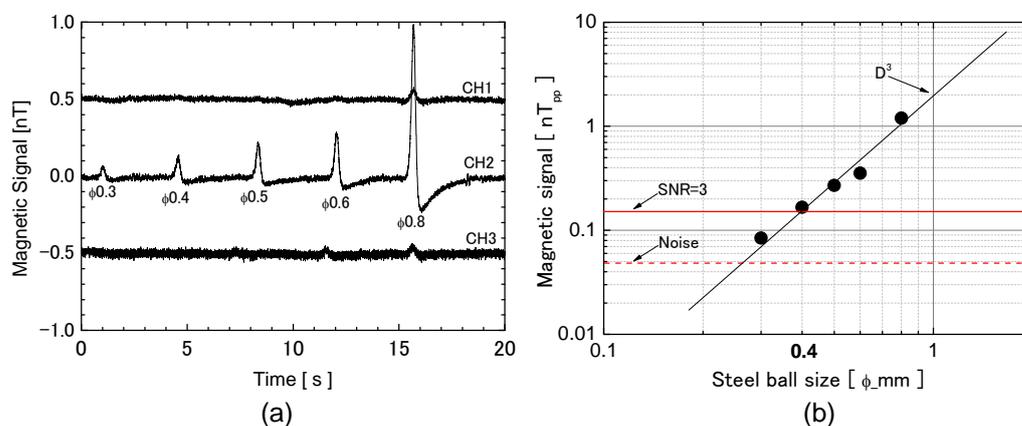


図 4 (a) 時間波形 (b) 信号と異物サンプルサイズの関係

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「STM-SQUID 磁気顕微鏡」

大阪大学大学院
基礎工学研究科
教授 糸崎秀夫

SQUID の応用研究のひとつとして、磁気顕微鏡がある。2013 年ボストンで開かれた ISEC (超伝導エレクトロニクス国際会議) では、SQUID 顕微鏡のセッションが設けられ、我々も STM-SQUID 磁気顕微鏡についての報告を行い、その独自性と分解能の良さから高い評価を受けた。

さて、我々が開発している SQUID 磁気顕微鏡は、2つの大きな特徴を有している。①先端をサブミクロン径に鋭く加工した高透磁率の針を独自に開発し(図1)、サンプル表面の局所的な磁場を SQUID へ伝達する方式を開発した。②針に一定電圧を印加し、針が表面に接近した際に流れるトンネル電流を一定に保つように制御することで STM (走査型トンネル顕微鏡) として機能させ、針の先端をサンプル表面にナノスケールで接近して距離を保持し表面の凹凸観察と表面の磁場観察を同時に可能とする方式を開発した。

以上の大きな2つの特徴をもつ STM-SQUID 磁気顕微鏡の概要図を図2に示す。SQUID は液体窒素容器の底にとりつけた液体窒素温度に冷却されたサファイアロッドに取り付け動作するようにしている。SQUID 下部に針を取り付け針は断熱真空槽を貫くように配置し、大気室温のサンプルに接近させるように配置する。サンプルは 3次元 XYZ のピエゾスキャナー上に固定し、サンプル表面の凹凸に追従するように Z 方向を制御しながら、XY 走査をし、表面の凹凸像と磁気像を同時取得する。

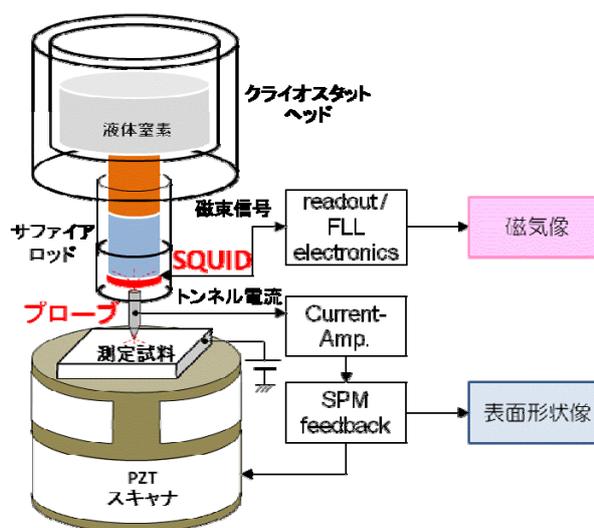


図1 STM-SQUID 磁気顕微鏡の概念図

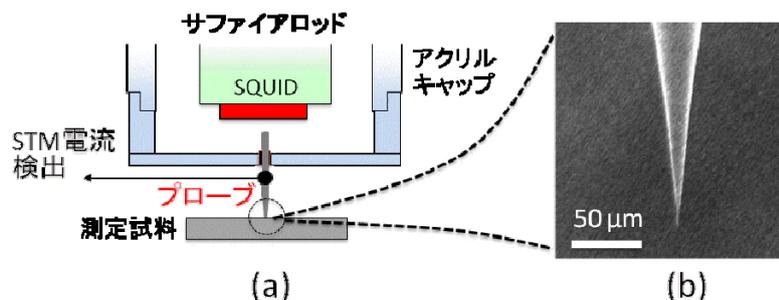


図2 磁気プローブ用の針の設置状態と針先端 SEM 像

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

図3にはNi薄膜(膜厚1ミクロン)の磁区を観察した例を示す。また同時観察したサンプル表面の凹凸STM像も併せて示す。表面は、ナノスケールの凹凸はあるもののほぼ平滑な表面である。一方磁気画像は、Ni薄膜特有の磁区が明瞭に観察されている。

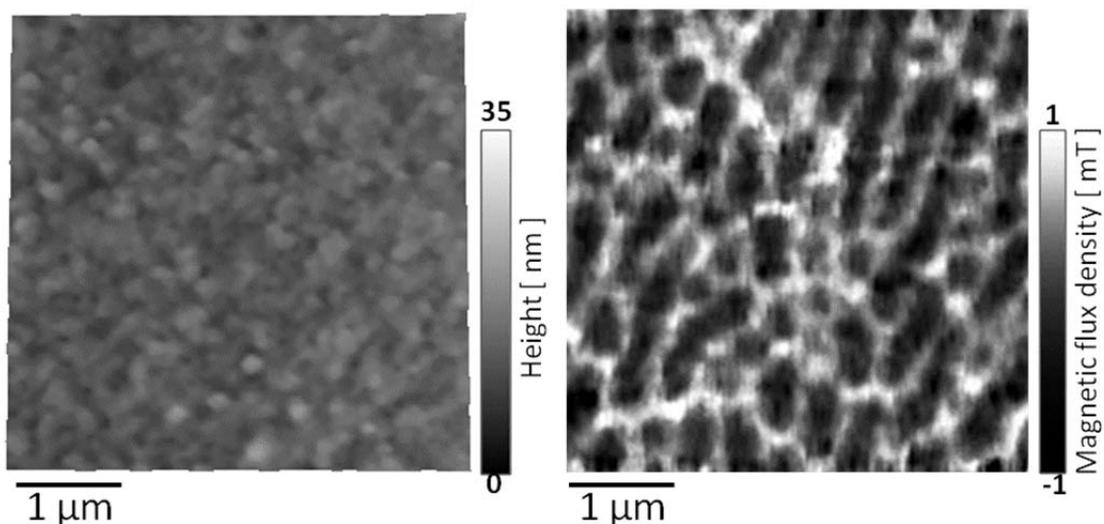


図3. Ni薄膜の表面STM像(左)と表面磁場分布像(右)

STMでは、針とサンプルの間にトンネル電流を流すことが必要となるため、サンプルは導電性に限られ、絶縁材料の観察は難しかった。そこで新たにSTMの代わりにAFMを用いたAFM-SQUID磁気顕微鏡の開発も進め、絶縁性磁性材料の観察も可能となっている。

さて、SQUIDを用いた磁気顕微鏡の研究は欧米を中心に盛んであるが、日本における我々の針を用いた独自の方法は、大気中室温のサンプルを高い分解能で観察でき、表面モフォロジも同時観察でき、すぐれた性能を有したSQUID磁気顕微鏡といえる。

この装置は、多様な微細構造を有する磁気材料等の研究ツールとして、また、電流分布観察ツールとして、今後とも楽しみなSQUID磁気顕微鏡である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「SQUIDを用いた鉄道レールの非破壊検査」

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
 副主任研究員 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、進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。

本研究では、これまでに実際の車両走行によりレール上に発生した白色層を、SQUID-渦電流探傷の原理を用いて検出できることを確認している。しかし、初期の検査装置は、レールの残留磁気を除去するため、事前にサンプルを消磁し、かつ装置全体を磁気シールドで覆っていた。

屋外に敷設されたレールを測定するには、磁気シールドで覆うようなシステムは不可能あり、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、屋外で使用可能なレール検査装置として、図1のようなSQUID-レール検査装置のプロトタイプを開発した。測定の原理を図2に示す。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。



図1 SQUID-レール検査装置

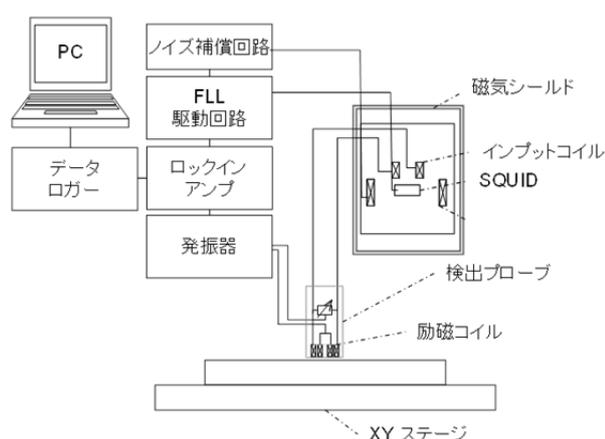


図2 SQUIDによるレール検査の原理

屋外型に改良した測定システムをレール走行装置に搭載し、実レール白色層を測定した。5 mm/sec の走査速度において、膜厚 15 μm 程度の実レール白色層を検出できており、SQUIDを用いたレール白色層検査の可能性を示すことができた（図3）。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

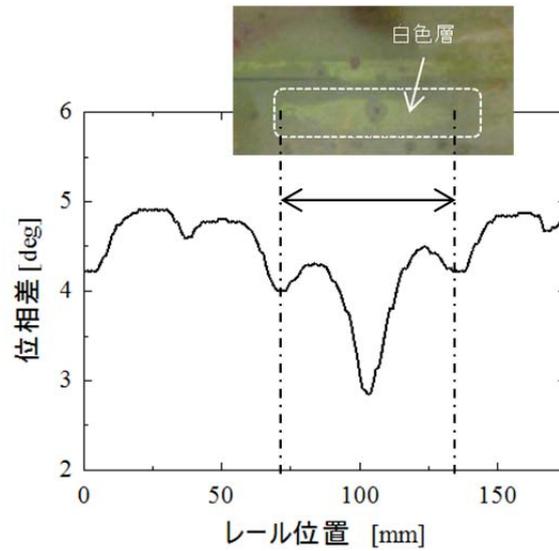


図3 スキャン速度 5 mm/sec 検査結果

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用

「LTS-SQUID による脊髄診断装置開発の進展」

金沢工業大学
先端電子技術応用研究所
准教授 足立善昭

脊髄の神経活動に伴って発生する微弱な磁場を、体表面に配置された SQUID 磁束計アレイで検出し、脊髄機能の非侵襲的な検査を実現する脊磁計 (Magnetospinogram: MSG) の開発を進めている¹⁾。脊磁計は脊髄神経の活動を可視化できるので、手足の麻痺やしびれの原因となる脊髄変性疾患の正確な診断に役立つ。脊磁計の試作機は東京医科歯科大学整形外科で継続的に運用されており、脊髄疾患の診断に有効であることが示されつつある。

脊磁計は、脳磁計や心磁計など他の SQUID 生体磁気測定装置と同様に、液体ヘリウムを使用するため、高いランニングコストが病院への普及の妨げとなる。そこで、パルスチューブ冷凍機による低温ヘリウムガスで低温容器の熱放射シールドを冷却し、液体ヘリウムの蒸発量を低減する実験を行った²⁾。

一般に、冷凍機の振動や磁気ノイズは生体磁気測定に大きな影響を及ぼす。しかし、脊髄磁場信号は、帯域が数 100 Hz～数 kHz で、10 Hz 以下の冷凍機からのノイズとは重畳しない。そのため、ハイパスフィルターでノイズを低減することができ、測定への影響は小さい。

図 1 は実験装置の構成図である。使用したパルスチューブ冷凍機の冷凍能力は 0.5 W@4K (岩谷産業, CryoMini PDX05/CW701) で、この構成により、ヘリウムの蒸発量を 46% 低減することができた。また、図 2 に示すように、パルスチューブ冷凍機がシールドルームの壁から 1.5 m のところで稼働しているにも関わらず、冷凍機がない場合と同等の品質の脊髄磁場信号を計測することができた。

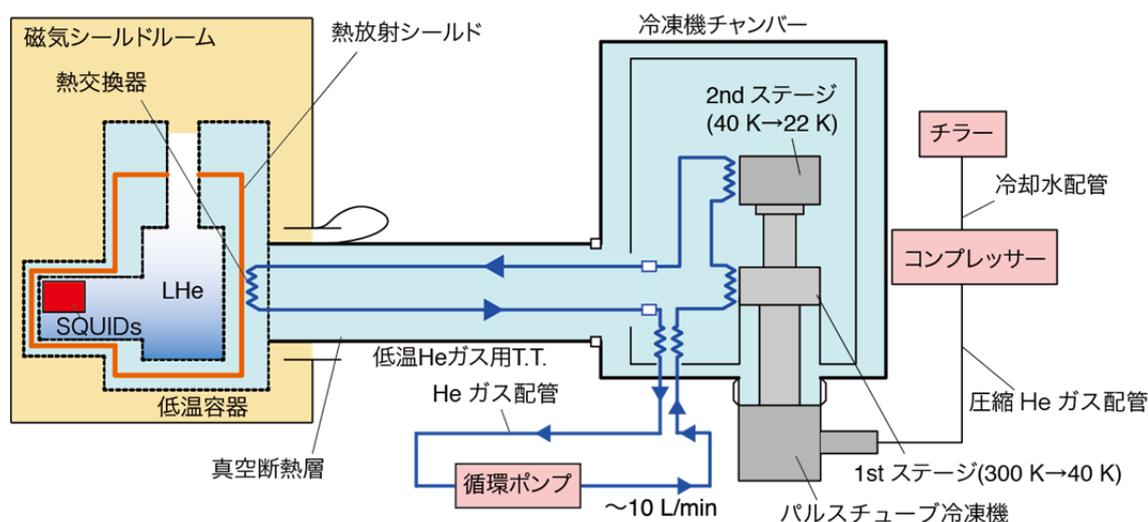


図 1 冷凍機によるヘリウム蒸発量低減実験の構成図

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

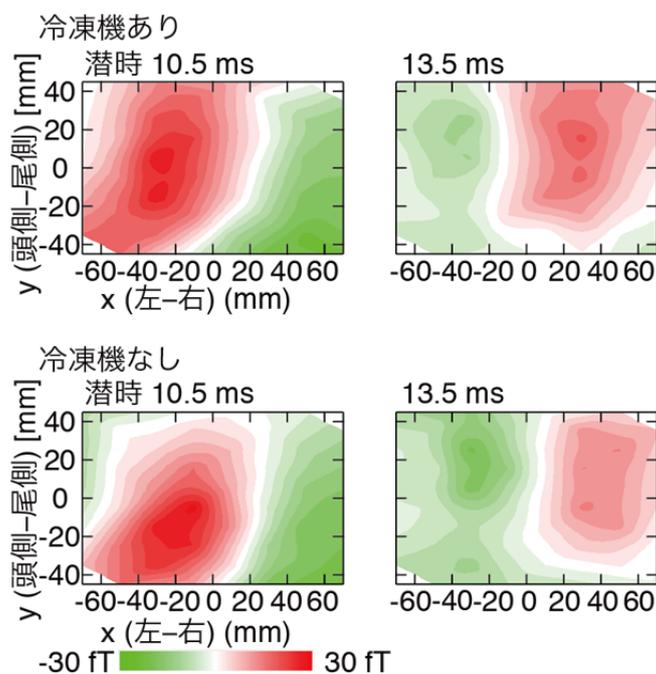


図2 冷凍機の有無による左手首正中神経刺激頸部脊髓誘発磁場の比較

参考文献：

- 1) Y Adachi *et al.*, "Magnetospinography: Instruments and Application to Functional Imaging of Spinal Cords", IEICE Trans Electron, E96-C, 326–333, 2013.
- 2) Y Adachi *et al.*, "Spinal Cord Evoked Magnetic Field Measurement Using a Magnetospinography System Equipped with a Cryocooler", Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 35th Annual International Conference of the IEEE, 4426–4429, 2013.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 ‘14/8月－9月の催し物案内

7/31-8/4

Advanced Topics in Magnetism and Superconductivity

Bariloche, Argentina

http://fisica.cab.cnea.gov.ar/atoms2014/index.php/P%C3%A1gina_principal

8/6-13

27th International conference on Low temperature Physics

Buenos Aires, Argentina

<http://lt27.df.uba.ar/>

8/4

非常用エネルギー供給源としての携帯型スターリングエンジン

東京・日本機械学会

<http://www.jsme.or.jp/event/detail.php?id=2960>

8/10-15

2014 Applied Superconductivity Conference

Charlotte, USA

<http://ascinc.org/>

8/10-15

第15回国際伝熱会議 IHTC-15

京都・国立京都国際会館

<http://www.ihtc-15.org/>

8/25-29

低温技術講習会「77K 小型冷凍機を作ろう」

つくば 桜地区

http://www.csj.or.jp/reitob/2014/summercamp_0825.pdf

8/28,29

第9回極低温技術スクール

つくば 物質材料機構、筑波大学

http://www.csj.or.jp/seminar/2014/9th_school_0828.pdf?pdf=20140705

8/29-31

「室温超伝導体を目指す物質調査」

静岡県東伊豆 熱川温泉堂

<http://www.csj.or.jp/communication/2014/SSS2014.pdf>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

9/2

第54回 (2014年度) 真空夏季大学

ヤマハリゾートつま恋

<http://www.vacuum-jp.org/SUMMER/summerhome.html>

9/7-10

物理学会 秋季大会 物性関係

中部大学

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.html>

9/10-12

電気学会 電力・エネルギー部門大会

同志社大学

http://www.iee.jp/pes/?custom_event=%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E3%83%BB%E3%82%A%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E9%83%A8%E9%96%80%E5%A4%A7%E4%BC%9A

9/17-20

応用物理学会秋季学術講演会

北海道大学

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

9/18-21

物理学会 秋季大会 素宇関係

佐賀大学

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.html>

9/24-25

電力技術 電力系統技術 合同研究会

大阪府立大学

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00002E71>

9/24-26

日本金属学会 秋期講演大会

名古屋大学

http://jim.or.jp/MEETINGS/2014_atmn/index.html

9/28-10/1

22nd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Devices

Rio de Janeiro, Brazil

http://www.maglev2014.com.br/MagLev_2014_Conference_-_Rio_de_Janeiro_-_Home.html

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン (6/19-7/20)

- トポロジカル超伝導体の渦糸に出現 スピン偏極マヨラナ粒子解明 科学新聞 6/20
- 住友電工が第70回電気学術振興賞で受賞 3テーマの関係者が進歩賞 電気新聞 6/26
- 原子力機構 ITERプロジェクト初の海外輸送 超電導導体を米に出荷 電気新聞 6/26
- 住友電工 電気学会「進歩賞」 3テーマで受賞 日刊産業新聞 6/26
- 住友電工 「電気学術振興賞」を受賞 蓄電池、超電導など評価 鉄鋼新聞 6/26
- 電車走行、ロス少なく、鉄道総研、超電導ケーブル実験 日本経済新聞 朝刊 7/04
- 超電導で10センチ浮上、リニア新幹線500キロ走行 使いやすい材料開発進む 日本経済新聞 朝刊 7/04
- 300級超電導き電線を公開 鉄道総研 省エネ効果に期待—4~5年後の実用化めざす 交通新聞 7/10
- 東大 テラヘルツ波で超電導体の電子対密度を振動させることに成功 日刊工業新聞 7/14
- 古河電工 伯で金属超電導線加工 海外子会社の設備活用 鉄鋼新聞 7/17
- 住友電工が磁石検査向け冷凍機冷却型超電導マグネットシステムを開発 電気新聞 7/18
- 超電導マグネットシステム 住友電工が小型・軽量化 日刊産業新聞 7/18
- 住友電工 超電導マグネットを小型化 検査装置向けなど拡販 鉄鋼新聞 7/18
- 住友電工、超電導マグネットシステムを発売 化学工業日報 7/18
- 探訪・先端研究 新領域を開く材料科学—触媒・超電導の視点、相互活用 日刊工業新聞 News ウェーブ 21 7/18

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

世界の動き (2014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



★ 今月のニュース発信地

▶マグネット

CuNb 強化 Nb₃Sn 超電導線材を、世界で初めて開発-東北大強磁場施設用に東芝に納入-

古河電気工業株式会社 (2014年6月12日)

古河電気工業株式会社は、超電導マグネット用に新しい超電導線材を開発し、この度納入に成功した。東北大学（宮城県仙台市）と共同で進めてきた強磁場コラボラトリー計画の一環として、同社は、歪みに強く、Nb₃Sn 生成の熱処理後にコイル巻きが可能な CuNb 強化 Nb₃Sn 超電導線材を、世界で初めて開発することに成功した。現在、高い臨界磁場をもつこの超電導線材は、強磁場を発生する超電導マグネットに使用されている。

新しく開発された線材は、熱処理後にマグネット用にコイル巻きできるため、磁石の製造工程を簡略化し、コスト削減が可能となる。この線材は、東北大学で建設中の無冷媒25 T超電導マグネットの主要部品として使用される。強磁場コラボラトリー計画で東北大学と共同開発する中で、同社は今年3月、量産製造した全長7.8 kmに及ぶ線材を株式会社東芝に納入した。またこの線材は、より強磁場の発生を目指す30 Tマグネットや50 Tハイブリッドマグネットなどに使用される予定であり、従来法の Nb₃Sn線材を代替することで、最終的には既存の消費者向けNMRの適用性も大きく期待されている。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Source: "Successful commercialization of superconducting cables that are distortion resistant, and that can be wound after heat treatment"

Furukawa Electric Press Release (12 June, 2014)

URL: http://www.furukawa.co.jp/english/what/2014/kenkai_140612.htm

Contact: <http://www.furukawa.co.jp/english/inquiry/index.htm>

▶医療応用

21T マグネットによる分析装置

Bruker Corporation (2014年6月16日)

ブルカー社、そしてフロリダ州立大学 (FSU) の米国立強磁場研究所 (NHMFL) は、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴 (FT-ICR) に世界初の 21 T マグネットを設置できたことに成功したことを発表した。このマグネットは世界最高磁場を持つ超電導マグネットで、ブルカー社と NHMFL が共同で設計・構築した FT-ICR 質量分析計に適用し、米国立科学財団より資金提供を受ける NHMFL FT-ICR プログラムに採用される予定である。このマグネットは、(a) トップダウンプロテオミクス (蛋白の構造と機能に関する研究) において、質量分解能を損なわずに処理能力を高速化、(b) タンパク質複合体のサイズおよび複雑さについて解析可能上限の拡大、(c) 組成的に複雑な有機混合物 (石油、溶存有機物、メタボローム) を特徴づけるための質量分解能とダイナミックレンジの改善、という主要推進事項 3 点の改善を提供すると期待されている。

この 21 T マグネットの設計には、110 ミリメートルの室温水平ボアが含まれている。設計上の特徴として、寒剤の再補充やユーザー側の磁石メンテナンスを劇的に軽減するアクティブマグネット冷凍技術の搭載をはじめ、浮遊磁場を低減させるため UltraStabilized™ サブ冷却技術と UltraShield™ 技術設計など、ブルカー社の先進的技術が組み込まれ、2 K (ケルビン) 以下の温度領域で作動する。

フロリダ州立大学の化学・生物化学部門 Robert O. Lawton 教授であり、NHMFL の強磁場 FT-ICR プログラムのディレクターでもある Alan Marshall 教授は、「我々は、ブルカー社製 21 T マグネットが万全であることを報告でき、大変うれしく思っている。21 T FT-ICR 質量分析計の他のサブシステムは既に設計され、現在組み立て中であり、2014 年初秋には稼働できることを目標としている。」と述べた。彼はまた、「高磁場を獲得することで、質量分解能や解像度、質量精度、ダイナミックレンジ、そしてデータ取得速度など、FT-ICR 質量分析計の性能指標に劇的な改善 (40~100 % 改善する要因) がもたらされるはずである。」と付け加えた。

Source: "World's Highest Field 21 Tesla Magnet for FT-ICR Mass Spectrometry Installed at National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL)"

BRUKER Press Release (16 June, 2014)

URL:

<http://ir.bruker.com/investors/press-releases/press-release-details/2014/Worlds-Highest-Field-21-Tesla-Magnet-for-FT-ICR-Mass-Spectrometry-Installed-at-National-High-Magnetic-Field-Laboratory-NHMFL/default.aspx>

Contact: Tony Lewtas tony.lewtas@bruker.com

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

▶バルク

世界記録 17.6T を達成

University of Cambridge (2014年6月27日)

ケンブリッジ大学の工学研究チームは、高温ガドリニウムバリウム酸化銅 (GdBCO) 超電導体に、17.6 T (テスラ) という強磁場を封じ込めることに成功し、過去 10 年に亘って破られることのなかった世界記録を更新した。研究成果は、**Superconductor Science and Technology** というジャーナルに掲載されている。新記録は、熔融加工法で作られた単一粒子の GdBCO 高温超電導体のサンプル (直径 25 mm) を使用することで実現した。これまでに達成された 17.24 T という記録は、日本の芝浦工業大学の村上雅人教授率いる研究チームによって 2003 年に達成された。今回、同研究チームが使用した超電導体は、芝浦工業大学が使用したものと似通ってはいるものの、異なった組成と構造を持つ超電導体である。

この大きな磁場には、銅酸素化合物がうまく含有されている。磁場を閉じ込める上で、研究者たちは許容電流を高めるため GdBCO の微細構造と熱伝達特性を修正し、ステンレス製鋼リングを使って補強した。バルク微細構造を設計することにより、磁場は物質全体に分散した磁束ピン止めセンターでサンプル内に保たれる。熔融加工の製造を開発してきた Yun-Hua Shi 博士は、「GdBCO 内のピン止めサイトを効果的に開発したことが、ここでの成功の鍵となっている。」と述べている。

この研究では、エネルギー貯蔵用のフライホイールをはじめ、鉱物精錬や汚染制御に使われる磁気分離装置、そして高速磁気浮上列車など、高温超電導体が様々な分野で応用される可能性を明らかにした。同研究チームとその共同研究者は現在、今後 5 年以内に超電導体の商用アプリケーションの普及を予測しながら、ニッチなアプリケーションを多数開発している。この研究は、ボーイング社並びに英国工学・物理科学研究会議 (EPSRC) によって資金提供されている。測定が行われた米国立強磁場研究所は、米国立科学財団とフロリダ州から資金を受けている。

Source: "Cambridge Team Breaks Superconductor World Record"

University of Cambridge Press Release (27 June, 2014)

URL: <http://www.cam.ac.uk/research/news/cambridge-team-breaks-superconductor-world-record>

Contact: communications@admin.cam.ac.uk

▶経営・決算

AMSC 社 2013 年度通年決算

AMSC (2014年6月5日)

AMSC 社は、2014年3月31日締め第4四半期、および2013年度通年決算報告を行った。2013年度第4四半期の収益は、前年同期の2,040万ドルに比べ、1,630万ドルであった。収益の減少は、同社のグリッド部門における収益減少が原因である。また同社の2013年度第4四半期の純損失は、

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

前年同期の1,980万ドルから2,270万ドルに増加した。これは、リストラや減損費用のほか、同社の未払転換社債の満期償還損引当としての非現金費用が原因と考えられる。2013年度総収益は、前年度8,740万ドルに比べ、8,410万ドルであった。風力発電による2013年度収益は、前年比26%増であるものの、グリッドの収益減少で相殺された。

同社は、2014年6月30日締め第1四半期には、収益が約1,100万ドル～1,300万ドルになると予想している。ある顧客の一時的な製造上の問題により、風力発電部門での収益は減少すると見込まれている。同社の2014年度第1四半期の純損失は、1,600万ドル未満であると予想され、2014年度通年総収益は、2013年度に比べ、わずかな低下が予測されている。

Source: "AMSC Reports Fourth Quarter 2013 Financial Results and Provides Business Outlook"
AMSC Press Release (June 5, 2014)

URL: <http://ir.amsc.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=852658>

Contact: Kerry Farrell [kerry.farrell @ amsc.com](mailto:kerry.farrell@amsc.com)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「IEC TC90 定例会議」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉



NEXANS 本社周辺の市街

日本が国際事務局を務める IEC (International Electrotechnical Commission) の中の TC90 (超電導) 会議の Plenary 会議が 7 月 4 日 (金) パリ NEXANS 本社にて行われた。総出席者は約 30 名で、日本からは、三戸利行 IEC/TC 国内技術委員会委員長、松下照男 WG1・WG4 委員長、西島元 WG3・WG7 委員長、長村光造 WG2・WG5・WG13 委員長、大久保雅隆 WG14 委員長、藤上純 国際幹事 (住友電工株)、渡辺勉 国内事務局長 (ISTEC)、山本潔 国内幹事 (ISTEC)、山田雄一氏 (住友電工株) が出席した。その他、フランス (8 名)、韓国 (5 名)、米国 (3 名)、中国 (2 名)、イタリア (1 名) が出席した。

午前中前半にミニシンポジウム、以降定例会議となった。
概要は以下のとおり。

○ミニシンポジウム (9:30-10:30)

Andre Sulpice 博士による SC 新技術動向の紹介

Matteo Tropeano 博士による MgB₂ 線材技術の紹介

○本会議 (10:40-17:00)

①IEC 事務局からテレビ会議導入が紹介され、活用が進められる。

②7 月 2 日、3 日に開催された WG 審議状況が紹介された。

③戦略ビジネスマンに関し以下の議論が行われた。

・TC90 関連標準の全面的な配置買えは提案した米国が取り下げ

・MgB₂ の標準化準備 (NP 準備) を進めることとした (Tropeano 氏主査)

・TC20 (ケーブル関連) と TC90 の Joint TASK を引き続き続ける

・実施中、計画中の Round Robin Test は引き続き実施・評価を行う

・曲げに伴う特性評価方法が了承された。

④次回：米国 (ASC と複合した形で開催できるかを含め検討)



NEXANS 本社前



Plenary 会議

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なお、定例会議に先立ち、WG1（超電導用語）（松下委員長）、WG13（実用送電線の通則）（長村委員長）、WG2（NbTi 超電導送電線の臨界電流測定法）+WG3（酸化物超電導線の臨界電流測定法）+WG7（Nb₃Sn 超電導線の臨界電流測定法）（合同会議（長村委員長、西島委員長他）、WG14（超電導センサ）（大久保委員長）、WG4（Cu/NbTi と Nb₃Sn 超電導線の残留抵抗比測定法）（松下委員長他）、WG5（複合超電導線の引張試験方法と電磁機械的特性）（長村委員長他）の各 WG が、フランス規格協会（AFNOR：パリ）で開催され、上記定例会議に参加した日本委員も出席し活発な議論が行った。



AFNOR



WG

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ (その 4) - 電波天文 (ALMA) 用受信機

独立行政法人 情報通信研究機構
テラヘルツ研究センター テラヘルツ連携研究室
室長 鶴澤佳徳

1. はじめに

南米チリ共和国の北部、標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) は、東アジア・北米・欧州合同で建設した地上最大の電波望遠鏡である¹⁾。2014年6月に、ALMA望遠鏡を構成する最後のアンテナとなる 66 台目が山頂施設 (AOS) に到着した (図 1 の赤丸)。ALMA 望遠鏡の観測周波数は 31-950 GHz の「ミリ波、サブミリ波」で、各アンテナには、これを 10 の周波数帯に分割したバンド 1 からバンド 10 のヘテロダイ



図 1 標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生した ALMA 望遠鏡 (山頂施設の写真)。赤丸で示したアンテナが最後の 66 台目 (欧州製)

ン受信機が搭載される。各アンテナで受信した天体からの電波信号を「干渉」させることによって、66 台のアンテナ群をあたかも 1 つの大きな望遠鏡として動作させているため、「干渉計」と呼ばれる。干渉計は、望遠鏡の視力 (解像度) が最も離れたアンテナ間の間隔 (基線長 D) と観測波長 λ の比 (D/λ) で決まる。ALMA は「大型」という名前の通り、最大基線長が 18.5 km (東京の山手線サイズ)、また観測波長を「サブミリ波」特にテラヘルツ ($\lambda \sim 300 \mu\text{m}$) まで短くすることによって、高解像度を誇る「すばる望遠鏡」や「ハッブル宇宙望遠鏡」の約 10 倍高い解像度を実現する。さらに、感度も既存の電波望遠鏡の一桁以上上回る世界最高性能を実現し、これまで解明されなかった太陽系外の惑星系形成や宇宙初期の星や銀河の形成、そして生命の起源を含む宇宙の物質進化など、宇宙天文科学における重要な問題を次々と明らかにすることが期待されている。この実現のために受信機に課された性能は、これまででない極めて高い感度や安定性 (電氣的、機械的にも) などであった。国立天文台では、バンド 4 (125-163 GHz)、バンド 8 (385-500 GHz)、バンド 10 (787-950 GHz) 用の超電導体—絶縁体—超電導体 (SIS) 受信機の開発・製造を担当した。各バンドの製造台数は全アンテナ台数分にスペア 7 台を加えた 73 台で、天文観測機器としては初の「量産」であった。2013 年度末までに 3 バンド分全ての受信機の製造・試験および ALMA プロジェクトへの出荷を無事終了し、国際公約を果たした。本稿では、筆者が開発に携わったバンド 4 およびバンド 10 受信機を例に、最新の天文観測用 SIS 受信機について紹介する。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

2. ALMA 受信機と超電導技術

前述のように、ALMA の観測周波数は 31-950 GHz であり、これを大気の窓に対応する 10 の周波数バンドに分けて、バンド 1 からバンド 10 の受信機を各アンテナに設置して観測する (図 2)。現在の技術ではサブミリ波・テラヘルツ帯の信号を直接増幅することが難しい。そこで、アンテナで集めた受信信号と局部発振信号を「ミキサー」と呼ばれる非線形素子に通して、数 GHz-10 GHz 程度の低い周波数の信号に変換する。これをヘテロダイン変換という。ヘテロダイン変換された信号は中間周波 (IF) と呼ばれ、昨今のマイクロ波技術で増幅が可能となる。

ALMA のような究極の電波望遠鏡を実現するには、超高周波・超高感度ヘテロダイン受信機が必要であり、その心臓部であるミキサーでは、超電導薄膜、デバイス技術が中心的な役割を果たしている。

超電導技術を用いた SIS ミキサーは、その電流-電圧 ($I-V$) 特性における強い非線形性などにより、原理的に理論限界の「量子雑音」に迫る究極的な高感度を達成できる²⁾。1970 年代後半にミリ波において SIS ミキサーの優れた低雑音温度性能が実証され、電波天文望遠鏡への応用可能性が拓けた^{3), 4)}。特に、超電導材料としてニオブ (Nb) を用いた信頼性の高い超電導技術によって実用化に成功し、電波天文学が大きく発展してきた。この技術は ALMA 受信機にも用いられている。バンド 9 (600-720 GHz) までの SIS ミキサーには、ミキサー素子を構成する SIS 接合や配線材料に全て Nb を用いている。ところが、バンド 10 では、この確立された Nb 技術を用いることはできない。それは、超電導材料に「ギャップ周波数」と呼ばれる材料固有の応答周波数限界があることに起因している。Nb のギャップ周波数は約 700 GHz であり、これ以上の周波数では、フォトンが超電導状態を破壊し、配線 (高周波伝送線路部) の損失増加を引き起こす。この結果、伝送線路中で信号が減衰し、受信機の感度が極端に悪くなる。このためバンド 10 受信機では、SIS ミキサー素子の配線の一部をギャップ周波数が約 1.2 THz の窒化ニオブチタン (NbTiN) にすることによって、伝送線路の損失を低減しているのである⁵⁾⁻⁷⁾。高品質 NbTiN 薄膜の開発は、情報通信研究機構と国立天文台が協力して行い、超電導技術の実用化への新たな選択肢となっている。

また ALMA 望遠鏡では、超電導デバイスの作製技術の進歩から、高機能な SIS ミキサーを搭載することが可能となった。これはサイドバンド分離型 (2SB) SIS ミキサーと呼ばれるものである⁸⁾。LO 信号周波数の高周波側の上側波帯 (USB) と低周波側の下側波帯 (LSB) を分離して独立に受信可能とするものだ。これには、特性の良く揃ったペアの SIS ミキサー素子が必要で、70 台以上の受信機を製造するためには相当量の素子が必要である。また後に示すように、複雑な導波管回路も必要となる。高精度なデバイス作製技術や機械加工技術によって 2SB ミキサーの量産が可能となった。この 2SB 方式による観測上のメリットは非常に大きい。図 3 に、ミキサー素子 1 個で受信可能な従来の両側波帯を重畳する DSB 方式と上述の 2SB 方式での輝線観測例を示す。DSB 方式では、

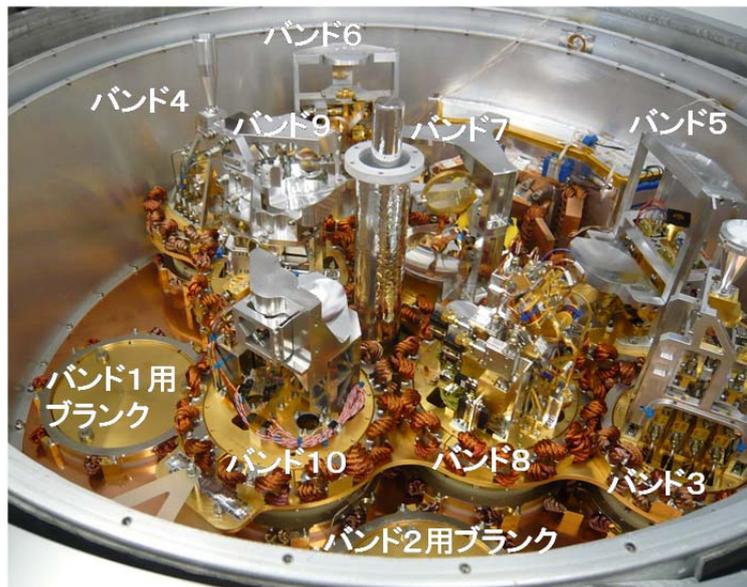


図 2 ALMA クライオスタットに搭載された受信機群。バンド 4、8、10 受信機の開発、製造は国立天文台が担当した。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

観測したい周波数帯だけでなく不要な周波数帯からも大気電波吸収による雑音が入り込み、観測効率の劣化を招く。2SB方式ではこれを避けることが可能なため、バンド8までのSIS受信機では、2SB方式を採用している。それ以上のバンド9、10では、DSB方式となっている。この主な理由は、動作周波数が高いために金属導波管の損失の影響が無視できなくなり、受信機の感度が劣化してしまうためだ。しかし、このような高周波帯では水蒸気の電波吸収による大気雑音が増加することから、観測効率を上げるために2SB方式化が求められている。このために我々は、金属導波管壁にNbTiNを成膜することによって、導波管回路の損失を低減することを検討している⁹⁾。

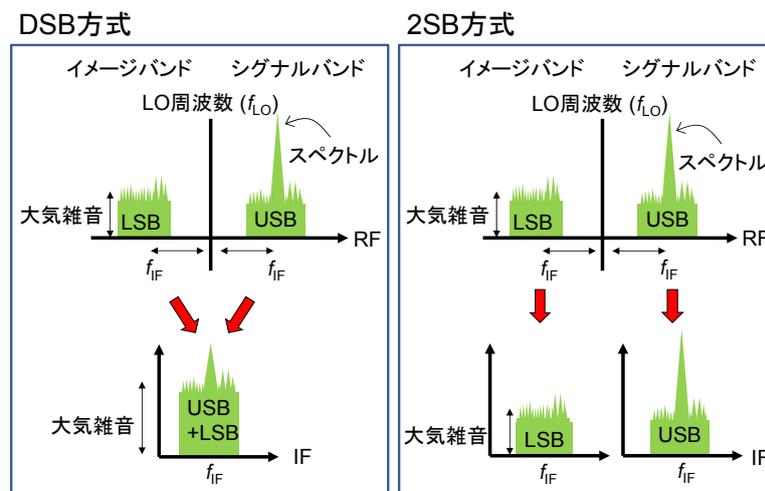


図3 DSB方式と2SB方式での信号検出感度の違い。2SB方式はイメージバンドからの大気雑音の混入を避けることが可能なため、高い観測効率を得られる。

3. バンド4受信機

多くのバンドが採用している2SB方式の受信機について、バンド4受信機を例に説明する¹⁰⁾。図4に開発したバンド4受信機を示す。受信機は、英国ラザフォードアップルトン研究所(RAL)から供給された構造体を用いており、上部から直径約140mmの4K、15K、110K冷却プレート(銅またはアルミ製)と室温の真空シールプレート(ステンレス製)、そしてこれらを支持する熱伝導率の低い繊維強化プラスチック(GFRP)製の円筒形構造体を有する。パラボラアンテナからのRF信号は、クライオスタットに取り付けられた常温光学系を介してコルゲートホーンに入力される。その後、導波管直交偏波分離器(OMT)で2つの偏波

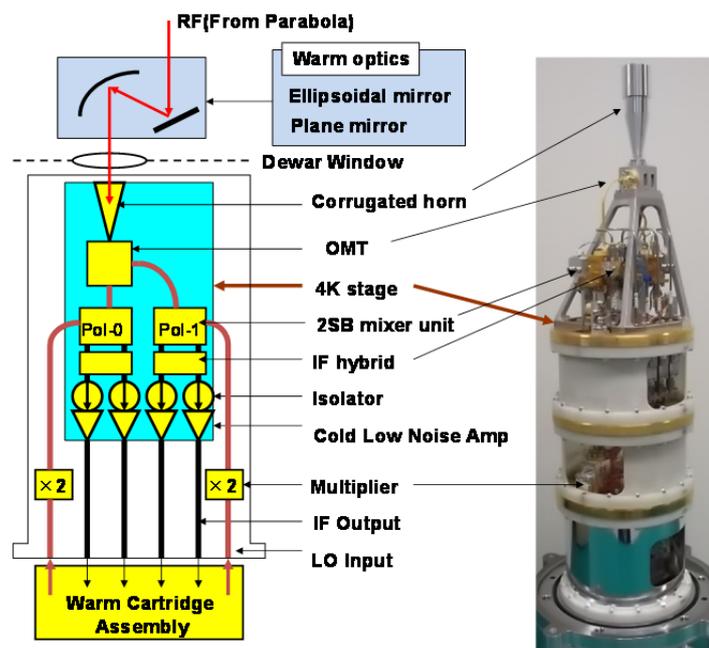


図4 バンド4受信機のブロック図(左)と外観写真(右)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

に分離され、それぞれの導波管 SIS ミキサーブロックへ入力される。各ブロックには、USB と LSB の側波帯分離を可能にするための導波管回路と SIS チップ 2 個が集積化されている。各 SIS チップからの IF 出力は、最終的に IF 帯 90 度ハイブリッドカップラーによって USB と LSB に分離された IF 信号となる。これらの IF 信号は、冷却アイソレーターを介して冷却低雑音 HEMT アンプで増幅される。コルゲートホーン以下のこれらの部品はすべて 4 K 部に設置されている。HEMT アンプからの出力は断熱同軸ケーブルなどにより、受信機外に取り出される。したがって、受信機からの IF 信号出力数は 2 偏波分の USB と LSB の合計 4 つとなる。

図 5 にバンド 4 導波管ミキサーブロックと SIS ミキサーチップの同調回路部を示す¹⁰⁾。ブロックには、高度な機械工技術を要する RF 帯 90 度ハイブリッドカップラーが集積化されている。これにより RF 信号は 2 つに分配され、それらの位相差は 90 度となる。一方、LO 信号は、電力分配器によって 2 つに同相で分配され、17 dB 方向性結合器を用いて上記のそれぞれの RF 信号に結合される。これらは独立した SIS チップで IF 信号に周波数変換される。この際、2 個の SIS ミキサーの特性が一致していると、高いサイドバンド分離特性が得られる。また、バンド 4 受信機の雑音温度仕様 (2SB) は 51 K 以下 (DSB 方式換算で $3hf/k_B$ 以下) と全バンドの受信機の中で最も厳しく、リーク電流の極めて低い接合特性が要求されている。我々は、臨界電流密度が約 3 kA/cm^2 の Nb/AlOx/Nb 接合を用いて 2 接合同調回路を設計し、4 K におけるサブギャップ抵抗対正常抵抗比 (R_{SC}/R_N) が 20 以上となる SIS 接合を使用した。図 6 に代表的なヘテロダイン応答特性を示す。直流的には 2 接合同調回路が直列に接続されているため、ギャップ電圧は約 5.6 mV となっている。73 台の受信機を製造するためには、このような SIS チップを少なくとも 292 個 (受信機 1 台当たり 4 個) 準備する必要がある。図 7 に製造した全 73 台のバンド 4 受信機の雑音温度性能のまとめを示す。全ての受信機で ALMA の厳しい雑音温度仕様を達成している。

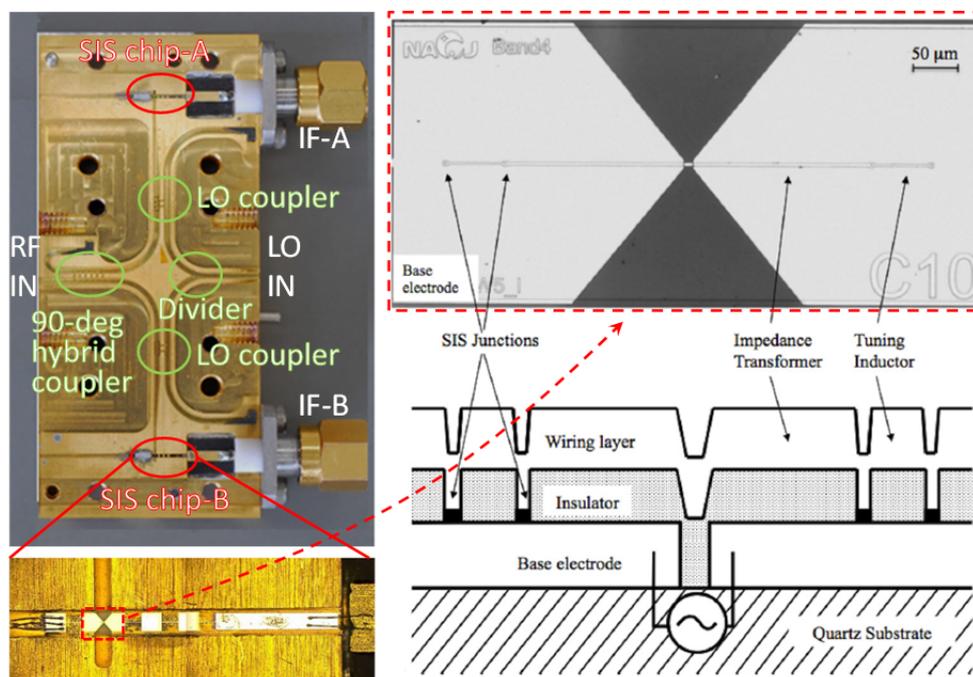


図 5 バンド 4 受信機の 2SB 方式用ミキサーブロック (左) と SIS チップ構造 (右)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

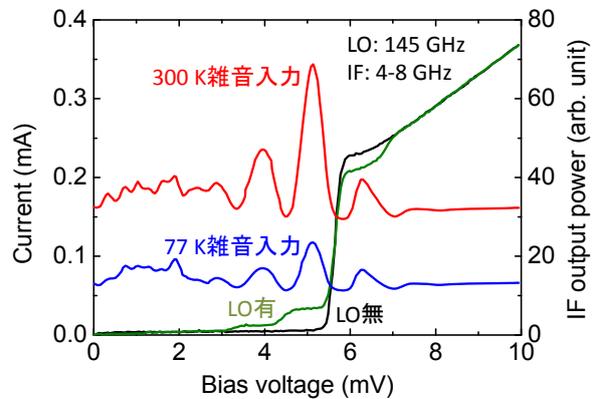


図6 代表的なバンド4受信機のヘテロダイン応答特性

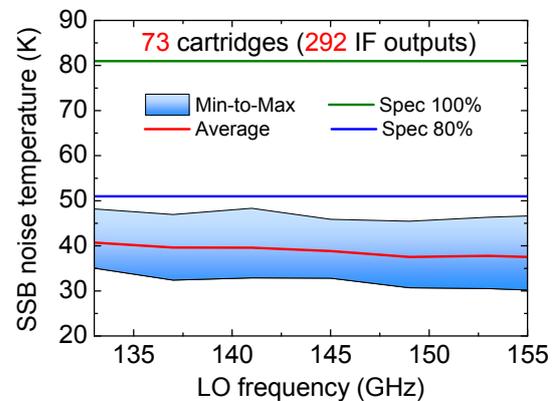
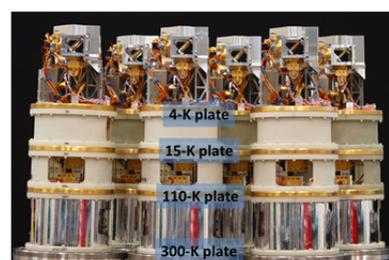


図7 製造したバンド4受信機73台の雑音温度性能

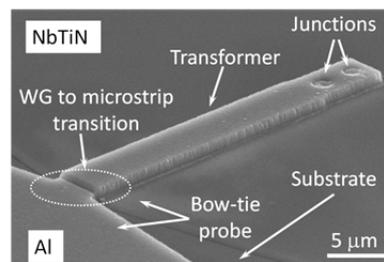
4. バンド10受信機

バンド10受信機は、バンド9受信機と同様に直交2偏波のDSB受信機である^{11), 12)}。図8に示すように、直径約170 mmの4 K、15 K、110 Kの冷却プレートと室温の真空シールプレートとを有している。パラボラアンテナからのRF信号は、4 K冷却部に設置された2枚の楕円鏡で集光され、自立型ワイヤグリッドによって準光学的に直交2偏波に分離される。偏波分離されたRF信号は、それぞれの偏波用コルゲートホーンアンテナに入力される。各ホーンには、SISミキサーブロックが取り付けられている。各ブロックには、LO信号受信用ダイアゴナルホーンとLO信号をRF信号に結合させるための13 dB方向性結合器が集積化され¹³⁾、SISチップ(図8の走査型電子顕微鏡写真)1個を用いてDSB方式でRF信号をIF信号に周波数変換する。したがって、受信機からのIF信号出力数は2偏波分のDSBとなるため、合計2つとなる。

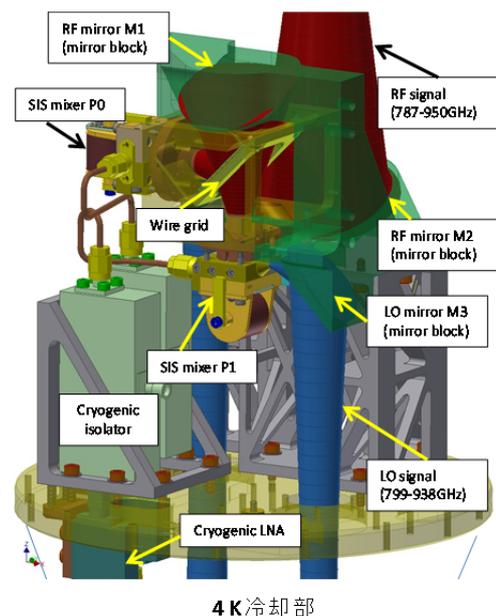
SISチップには、前述したようにNbTiNが伝送線路に用いられている。これまで他の研究機関でも700 GHz以上の高感度受信機用にNbTiN薄膜が開発されてきたが、ALMA受信機の厳しい雑音温度仕様を達成し、かつ「量産」も可能にする信頼性の高い薄膜技術はなかった。今回我々は、73台の全ての受信機(146個のSISミキサー)で、ALMAの雑音温度仕様に適合させることに成功した。



バンド10量産受信機



SISミキサーチップ電子顕微鏡写真



4 K冷却部

図8 バンド10受信機の外観写真(左上)、4 K冷却部の構成図(右)とSISチップの電子顕微鏡写真(左下)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

図9に、これまで報告されている SIS 受信機雑音温度 (4 K 動作) と ALMA で課されているバンド 3 から 10 の雑音温度仕様 (DSB 方式換算) を示すと同時に、バンド 10 受信機 73 台の測定で得られた各周波数での最小雑音温度のプロットを示す。我々の開発した受信機は、低い周波数帯の Nb 受信機と同様に量子雑音の 3 倍程度の感度にまで到達しており、世界最高性能を誇る。この結果は、Nb のギャップ周波数を超えるテラヘルツ帯において伝送線路の NbTiN が極めて低損失であることを示唆している。

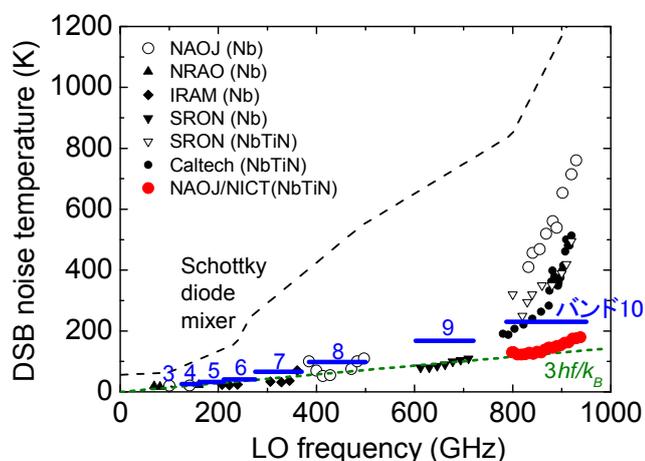


図9 これまで報告されている代表的な SIS 受信機の雑音温度性能と ALMA の各バンドの SIS 受信機に対する雑音温度仕様

5. 今後の展望

日本における大型ミリ波サブミリ波干渉計計画の初期構想から 30 年が経過し、ようやく ALMA 望遠鏡は完成した。この間、超電導技術の進歩が電波天文学の発展をもたらし、また電波天文学からの科学的要請が超電導技術を大きく進歩させてきたといえる。この相互作用こそが「究極の望遠鏡、ALMA」完成への原動力となったことは間違いない。人類は、これまでにない高解像度・高感度観測を可能にする ALMA 望遠鏡を手に入れ、次々と新たな科学的成果を生み出し始めている。一方で、現在の ALMA 望遠鏡では不可能な観測性能が存在することにも気づいている。それは、視野の狭さである。電波干渉計におけるこの最後の弱点を克服するための検討が始まっている。例えば、受信機をマルチビーム化することが提案されている。このためには、超電導ミキサの多素子化や集積化、これに伴い必要数が増大する IF 低雑音増幅器を低消費電力化する (超電導増幅器で?) など、新たな研究開発が必要である。この際、出力されるデータも膨大になることから、A/D 変換などの超高速超電導デジタル回路技術が有用となり得る。また既存観測方式においても、ALMA 望遠鏡での本格的観測が進んで行くに従って、バンド 10 周波数帯よりさらに高い周波数での観測要求が出てくる可能性は非常に高い。その候補として、1.4 THz 帯 (1.25-1.55 THz) がすでに挙がっており、「バンド 11」と呼ばれている。この周波数領域は、バンド 10 受信機で用いた NbTiN 薄膜や Nb 接合の動作周波数限界を超えているため、新たな超電導材料による研究開発を必要としている。このように電波天文学が近未来に要請しているマルチビーム化、低消費電力化、高速化、高周波化などへ研究課題は、大容量・高速化を目指している超高速無線通信技術と同様のトレンドであり、共通点が多いことに気付く。筆者は、これまで培ってきた超電導技術と高度化した無線通信技術を融合させることによって、革新的な観測装置や計測装置などが生まれることを夢見ている。

参考文献:

- 1) <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>
- 2) J. R. Tucker, IEEE J. Quantum Electron. QE-15, 1234 (1979).
- 3) P. L. Richards, T. M. Shen, R. E. Harris, and L. Lloyd, Appl. Phys. Lett. 34, 345 (1979).
- 4) G. J. Dolan, T. G. Phillips, and D. P. Woody, Appl. Phys. Lett. 34, 347 (1979).
- 5) M. Kroug, A. Endo, T. Tamura, T. Noguchi, T. Kojima, Y. Uzawa, M. Takeda, Z. Wang, and W. Shan, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19, 171 (2009).

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

- 6) T. Kojima, M. Kroug, M. Takeda, Y. Uzawa, W. Shan, Y. Fujii, Z. Wang, and H. Ogawa, Appl. Phys. Exp. 2, 102201 (2009).
 - 7) K. Makise, H. Terai, M. Takeda, Y. Uzawa, and Z. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 139 (2011).
 - 8) S. Claude, C. Cunningam, A. R. Kerr, and S.-K. Pan, ALMA Memo 316 (2000).
 - 9) 黒岩宏一 他、第 58 回応用物理学関係連合講演会, 25p-KJ-1 (2011 年, 神奈川工科大学) .
 - 10) S. Asayama, T. Takahashi, K. Kubo, T. Ito, M. Inata, T. Suzuki, T. Wada, T. Soga, C. Kamada, M. Karatsu, Y. Fujii, Y. Obuchi, S. Kawashima, H. Iwashita, and Y. Uzawa, Publ. Astron. Soc. Jpn, psu026 (2014).
 - 11) Y. Fujii, M. Kroug, K. Kaneko, A. Gonzalez, Y. Uzawa, T. Kojima, K. Kuroiwa, A. Miyachi, K. Makise, Z. Wang, and W. Shan, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 606 (2011).
 - 12) Y. Fujii, A. Gonzalez, M. Kroug, K. Kaneko, A. Miyachi, T. Yokoshima, K. Kuroiwa, H. Ogawa, K. Makise, Z. Wang, and Y. Uzawa, IEEE Trans. THz Sci. Technol. 3, 39 (2013).
- T. Kojima, K. Kuroiwa, Y. Uzawa, M. Kroug, M. Takeda, Y. Fujii, K. Kaneko, A. Miyachi, Z. Wang, and H. Ogawa, J. Infrared Milli. THz Waves 31, 1321 (2010)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第7回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回は電力系統流通設備のうち地中送電設備の解説をします。
夏休み？につきやや短めの解説とさせていただきます。

○地中送電設備の基本構造

・ケーブル

ケーブルは主に、電気を流す導体、導体の電圧と地面電圧間の絶縁を維持する絶縁体、ケーブルの表面を守るシースから構成されます。(図-62)

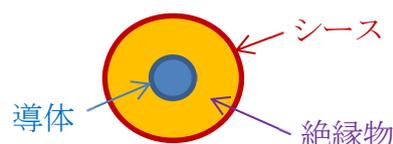


図 62 ケーブルの基本構造 (単相型)

なお、絶縁体は、送電設備に使われるような比較高い電圧レベルでは、紙、油、(架橋)ポリエチレン等です。

交流ケーブルでは 3 相まとめた構造とする場合と、1 相 (単相) ずつの構造とする場合があります。

・ケーブル設置設備

ケーブルは相当な重量物となるため、地中敷設が一般的です。諸外国では、特に設置するための設備は設けずそのまま埋める (直接埋設) ことも多いですが、日本では何らかの入れ物に入れるのが通常です。高電圧の場合 (10 万 V 以上のイメージ)、設置設備又はスペースを専用に設けます。この設備が管の場合は管路、トンネルは洞道と呼ばれます。(図-63) なお、洞道は、上下水道等と併せて施工されるタイプ (共同溝) もあります。

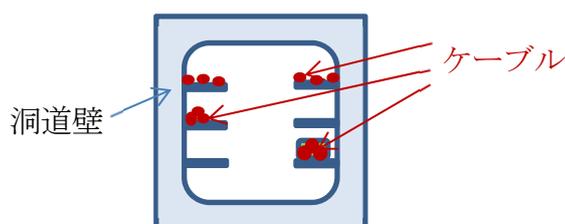


図 63 ケーブル設置設備 : 洞道

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ケーブルは、ある長さ毎（長さは電圧等より異なる）に接続してゆきます。ケーブルの引き入れ・引き抜き、接続の作業スペースや接続設備スペース、通電時のケーブルの伸縮を吸収するスペースを確保した設備をマンホールと呼びます。道路表面をよく見ると「マンホールの蓋」が見えます、地中のマンホールは「蓋」より遥かに大きなスペースを占め、建設コストも相応に要します。

(余談) 直埋は工事費が安いけれど

発展途上国の大都市に行くと道路掘削工事現場でケーブルが掘り出されているのを見かけることがあります。系統運用者に聞くと、道路工事で誤ってケーブルを切断し停電発生、が良くあるとのことでした。直接埋設（直埋）は工事費が相当安いですが、信頼性や安全面から現状の技術レベルではさすがにお勧めできません。となると、地中送電設備の工事費は高い！とのジレンマに陥りますが、是非一層の現場技術開発を期待したいものです。

・ケーブル冷却設備

地中送電で送電容量を確保するため、ケーブルを冷却させる場合があります。冷却方法として、絶縁に使用している油を循環させる、水冷管をケーブルに沿わせる等があり、循環ポンプ等の冷却用付属設備がケーブル設備沿いに一定間隔毎で必要となります。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：メリット

①送電面積が小さい

架空送電線は絶縁に空気を利用するのに対し、地中送電線は絶縁物を使うため電気を送るのに必要な面積は遥かに小さくなります。このため、送電設備ルートを比較的自由に設定することが可能です。

②電界・磁界の影響が小さい

ケーブルは、電気が周辺に及ぼす影響、すなわち、ケーブル周辺の電界や磁界を小さくする様に作られます。（専門的になりますので具体的な説明は省きます）

③雷の影響を受けない

架空送電線設備の様に雷事故は（殆ど）発生しません。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：デメリット

④送電容量が小さい

架空送電線と同じ材質・太さの電線でケーブルを作っても、送電できる電力（送電容量）は小さく、凡そ、1/2 から 1/3 となります。この理由は、ケーブルは電線が絶縁体に覆われているため架空線と比較し熱が逃げにくく、電流を増やすと温度が上昇しケーブルが壊れるためです。このため、ケーブルを冷却する設備を設け送電容量を増やす場合もあります。

⑤事故が自然回復しない

架空送電設備での主な事故原因である雷事故では、空気の絶縁能力は自然に回復して再び使用できる様になりますが、地中送電設備で絶縁物に事故が発生するとその部分の絶縁能力は永久に失われます。その事故部分を取り替えるまでは壊れたままで使えません。

⑥交流送電の場合、無効電力発生量が大きい

特に地中送電設備が長い距離となると（50 km 程度以上）地中送電設備で発生する無効電力発生量（充電電流）が大きくなり、有効電力（kW）の流す能力を阻害します。

なお、交流送電する架空送電設備でも無効電力は発生しますが、同じ電圧で送電する場合、地中送電の数分の1以下と小さくなります。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・充電電流の特徴

交流地中送電設備での充電電流は、電力送電の際に非常に重要な要素となります。このため、以下で少し具体イメージを解説します。

ケーブルは図-64 のとおり電線と地面と同じ電圧のシース間を距離の小さい絶縁物で挟んだ構造となっています。この様な構造に高い交流電圧をかけると、絶縁物の特性によりますが、ケーブルに使用される絶縁物の場合、無効電力が発生する、すなわち、無効電力電流（充電電流と呼ばれます）が流れます。送電距離が長くなるほど無効電力量は大きくなります。(図-65) 結局、交流送電では、絶縁物であっても大きな交流電流が流れるのです。これが直流送電との重要な違いです。

基幹送電電圧（30万V程度）50km程度以上になると、この電流値は、流したい有効電力量に近い値となります。「充電電流」が最終的には有効電力の流せる量を低下させてしまいます。

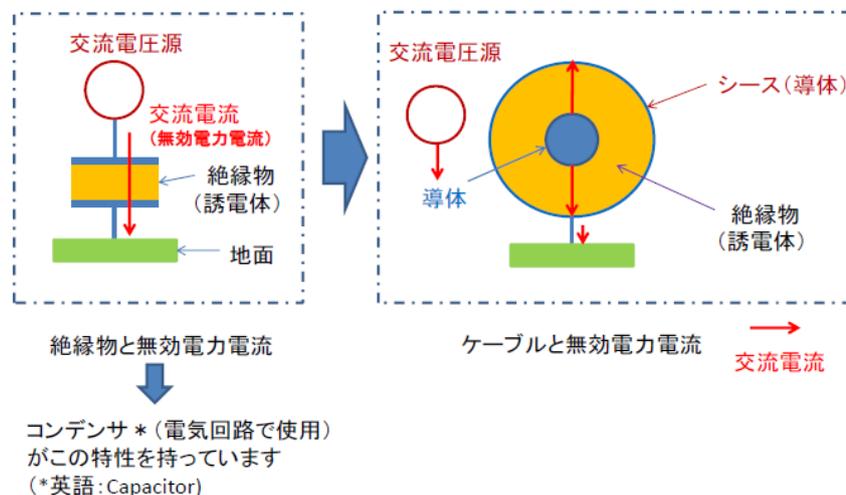
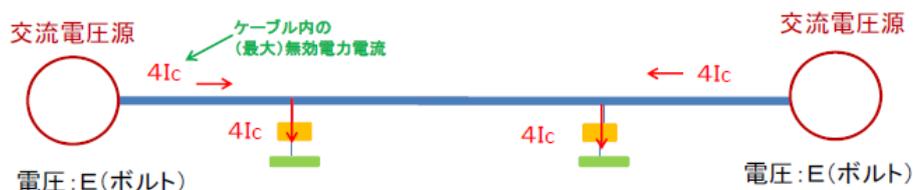
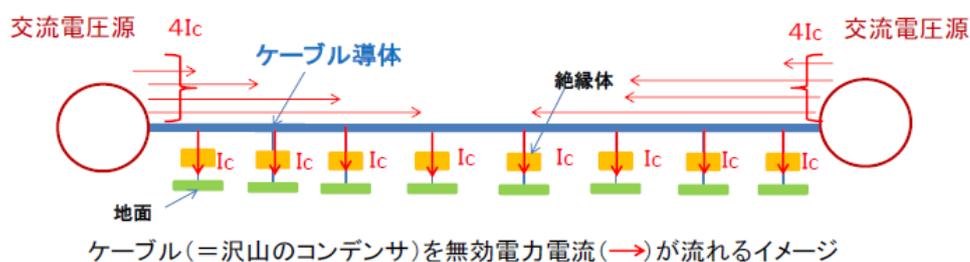


図64 ケーブルの無効電力電流（充電電流）



2つのコンデンサにまとめて表示した無効電力電流の流れ

図65 長距離ケーブルの無効電力の流れ（両端が同電圧の場合）

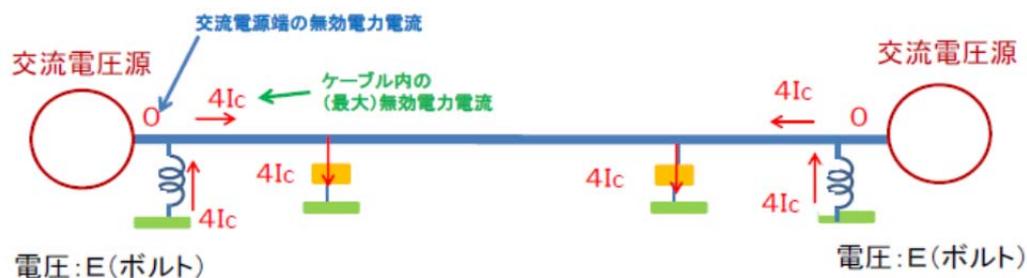
超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・充電電流をコントロールする方法

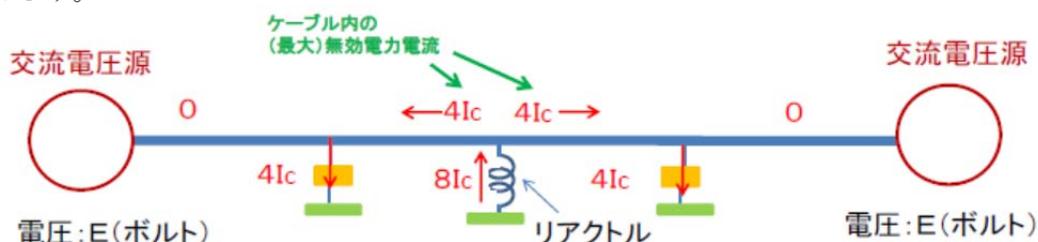
充電電流が発生させる無効電力は、反対位相の電流が発生させれば打ち消すことができます。反対位相が発生させる設備をリアクトルと呼び、図-65 の中間点（中間点 X 点）にケーブルで発生する無効電力電流の半量分のリアクトルを置いた場合を図-66-1 に示します。この場合、ケーブルの無効電力電流とリアクトルの無効電力電流が打ち消し合うため、ケーブルを流れる無効電力電流が減少します。（図-65 ; $4I_c \rightarrow$ 図-66-1 ; $2I_c$ ）

ところで、リアクトルを真ん中ではなく両端（A、B 点）に置くと（図-66-2）、無効電力は交流電源端から見ると完全に打ち消されますが（図で零となっています）、ケーブル内の無効電力電流はリアクトルを設置しない場合（図-65）と同じ $4I_c$ となり、ケーブルを流れる最大無効電力電流は変わりません。この様に無効電力電流を制御し送電容量を確保するにはリアクトルの位置と容量の設定が重要となります。



(余談) 過ぎたるは及ばざるがごとし

さて、図-66-1 から更にリアクトル量を増やし、例えば図-66-3 の様に交流電源端から見て零となる量とすると、電流面でもっと良くなる気がするかも知れません。実際は、同図のとおりリアクトルにつながるケーブル部分に $4I_c$ が流れ、（最大）無効電力電流は図-65 と同じ値になります。電力システムではこの様に状況改善方法を一方的にどんどん増やしていくと、かえって状況が悪化する場合があります。電力システムにとどまらず、「極端に偏らずほどほどが良い」との教訓？が結構あてはまる気がします。



超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

図-66-1 の様に中間点（ぴったり中間でなくても良いですが）にリアクトルのためだけに設備を設置するのは“もったいない”面があります。このため、同様の効果が得られる地点の変電所にリアクトルを設置し、地域への電力供給機能と無効電力制御機能の両方を変電所に持たせる、のが一般的です。なお、技術的には、電圧を制御しても無効電力を制御できるため、それらを含め総合的な無効電力調整が変電所で行われます。これらについては、次回、変電設備で解説します。

・海底ケーブルは充電電流をコントロールできない

さて、海底ケーブルで交流長距離送電する場合、リアクトルを置くこととすると中間点は海底になりますが、余程浅い海でない限りリアクトル設置は非現実的です。（保守等が困難です）このため、送電容量確保のための無効電力制御は実質的に不可能です。「長距離」の目安は 50 km 以上、この場合、電力を交流海底送電することは不可能です。なお、将来、充電電流（無効電力電流）を発生しにくい絶縁物が実用化されれば可能となるかも知れません。

・長距離海底ケーブルは直流送電の独断場

直流送電は無効電力を発生しないため、交流送電に伴う充電電流問題がありません。このため、長距離海底送電は直流を使用します。

・現在の超電導送電は地中送電技術

現在の超電導送電は、マイナス 200 度程度以下に冷却する必要があります。このため、基本的な設備構造は導体（超電導）、絶縁体、それを囲む冷却媒体、外部の熱が内部に入らないための熱シールド体の構成となります。この基本的な構造は地中ケーブルと同じになります。

なお、地中送電線は電気を流すと導体で熱が発生し、冷却をかけて送電容量を増加させる場合がありますが、超電導送電では外部から熱が電気の流れに関係なく入ってくるため（侵入熱）、冷却が必須です。

冷却するとエネルギーを消費しますから、超電導送電でも送電（するための）エネルギー損失が発生することになります。ケーブルに電流を流すとエネルギー損失が発生しますから、結局、超電導送電は地中送電技術として技術評価や経済性評価を行うのが妥当と思います。

なお、超電導送電は冷却が必須なため、海底に冷却設備を確保するのは困難ですから（リアクトルと同じ理由）で長距離海底送電には適しません。

一方、超電導送電は地中送電の“仲間”ですが、送電損失が冷却エネルギーだけで電流の大きさに関係しない特長がありますから、大電流を流せる超電導線ならば、低電圧で大電力送電が可能となります。従来の電力送電では、電流を大きくすると、エネルギー損失が大きくなるとともに電線の加熱への対応が困難となるため、大電力を送電する場合、高電圧として必要な電流を減らしました。この面では、同じ地中送電でも異なる発想での活用が考えられます。なお、交流低電圧送電は、交流高電圧送電と比較して充電電流の影響が小さくなり有効電力を送りやすくなる効果もあります。この様に、超電導の特長を踏まえて、総合的な視点から導入検討を進めていくのが良いと思います。

なお、以上は「現在の」超電導送電技術に対する評価ですが、将来、常温で超電導となる材料が発見され送電技術が確立されれば、冷却が不要となり全く違う活用の仕方が出てくるでしょう。

(余談) 技術者は夢をどう実現させる？

超電導は「夢の技術」と言われてきました。ただ、送電分野では、現状、冷却が必須ですので数々の技術的な制約が生じます。その様な制約を前提とし現実的な「夢を語るか」、あくまで「常温（室温）超電導と言う究極を追いかけるか」が技術者として思案のしどころとなります。近い将来の実用化を考える「工学的な」技術者は、現代社会への適用を前提に夢を追いかけるので、前者の考え

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

に立つと思いますが、その分、夢のスケールが小さくなるジレンマがあるでしょう。どのような分野でも、工学技術者は「大きな夢」と「現実的な夢」の狭間で悩むと思います。

・地中送電設備により電力系統増強を進める場合の注意点

地中送電設備は、通常、道路下に（占有し）敷設しますから、道路計画との調整が重要になります。需要密度が高くなることが予想されるエリア（いわゆる都市化地域）では、都市計画、その中では当然、道路整備計画も含まれますが、と整合をとりながら管路や洞道の整備を進めるのが合理的です。

ただ、都市計画も適宜見直されますから、送電設備の整備に際しては、柔軟性を持たせておく必要があります。一方、柔軟性を持たせると「種々な対応をとれるための「余力」を持たせることとなり、建設コストは増加する可能性があります。このため、ある程度経済性を踏まえた割り切りも必要となります。なお、道路は整備されるとしばらくの間（5年程度）、再掘削できなくなりますから、これを踏まえ先行投資的な判断も（どうしても）必要となります。これらを総合判断するには相当の実務経験が必須です。

(余談) 地中送電設備と架空送電設備はどちらが経済的？

配電設備では、架空設備（電柱を経由した配電）が地中設備より建設コストは安価になりますが、送電設備では、架空 vs 地中について単純に言い切れないと思います。特に都市化が想定されるエリアでは、架空送電と地中送電の双方のメリットを総合的に比較検討する必要があります。

例えば、架空送電設備は、用地確保面等から建設可能な場所が限られますから、ルート近辺で変電所設置を想定すると変電所から需要地帯までの流通設備コストが大きくなり、地中線設備で需要地帯に中心へ送電し、線路近傍に変電所を設ける方が総合的に見た経済性が勝る場合も有ります。

(図-67 のイメージ) 特に、発展途上国での大都市電力送電は都市化がどんどん進んでいきますから、ダイナミックな発想が必要です。

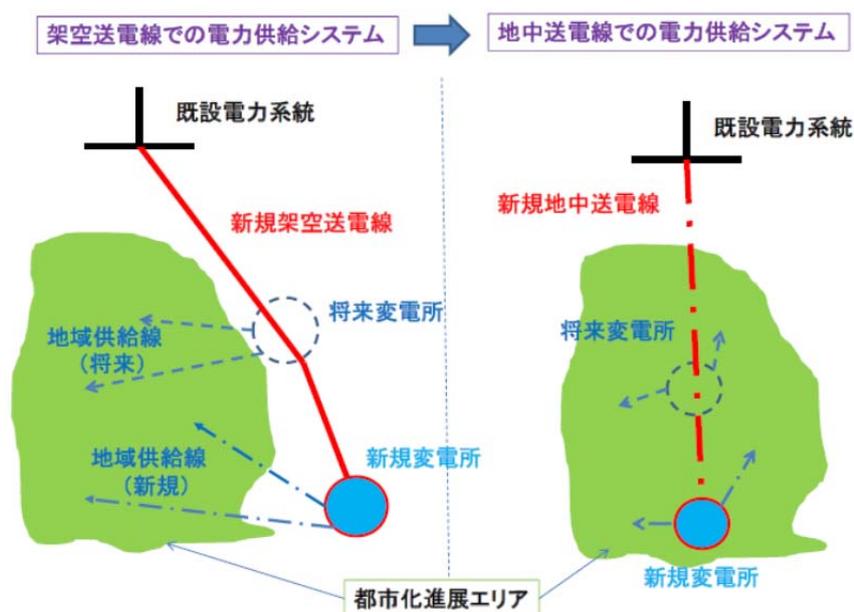


図 67 地中線設備が経済的に合理的な例 (イメージ)

今回はここまでとし、次回、変電設備について解説します。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「研究室紹介」

大阪大学大学院工学研究科
環境エネルギー工学専攻 環境資源・材料学講座
量子線生体材料工学領域
教授 西嶋茂宏

研究室メンバー (2014年7月現在)

当研究室は、西嶋茂宏教授(筆者)、秋山庸子講師、三島史人助教、特任研究員6名、秘書2名、学生：博士後期課程2名、博士前期課程10名、卒研究生6名から構成されています。

本研究室では、超電導磁石の実用化を目指したR&Dを行っています。いままでに実用化した応用例は、MRI、NMRさらには結晶引上げがありますが、いずれも磁場を利用した応用となっています。この考えを延長すると、次の実用化に手が届く応用も、強い磁場を広い空間に作るような応用になる可能性があります。そこでこの考えに沿って、強磁場の応用、特に磁気力制御技術の実用化の研究を行っています。さらに、その応用分野も時宜を得たものである必要があります。このため、想定している分野としては、環境浄化、資源回収、エネルギー機器の効率化などを検討しています。

これまでに検討してきた例とそれぞれから学んだ事項を以下に述べます。

平成12年度には「半導体工場の無機懸濁廃液磁気清澄システム」の開発を行いました¹⁾。太陽電池のウェーハを作るためのスライシングには遊離砥粒を利用したワイヤー・ソーが利用されました。その加工時に使う砥粒の再生を試みたものです。長時間使用すると砥粒の角頂には、ソーからの鉄が付着し、切れ味が落ちていました。このため磁気分離でその切れ味の落ちた砥粒を分別することを行ったものです。技術的には成功したのですが、この分野の技術革新はすさまじく、遊離砥粒から固定砥粒に、さらに外国勢の加工メーカーの登場で、当該技術の重要性が低下してしまいました。

続いて、平成13年から16年には、「超伝導磁気分離を利用した製紙工場からの廃水処理システム」を²⁾、平成20年度には「磁気ろ過器によるドラム缶洗浄水の浄化」システムの開発を行いました^{3,4)}。いずれも超電導磁石の強磁場を利用した排水処理システムです。前者はNbTiの超電導磁石(室温ポア400mm、長さ600mm、最大経験磁場3T)を、後者はバルク磁石を利用したシステムでした。大量の水処理を超伝導磁石で実現できることを実証しました。従来の対抗技術に対して、性能のみならず経済性でも互角に張り合える機器となりましたが、停電等のトラブル、強磁場特有の取り扱いの困難さ等があり、残念ながら積極的に次の機器の導入の機運が高まっているとは言えない状況です。

平成18年度には、医療応用である「磁気誘導DDS(MDDS)による次世代治療システム」を検討し^{5,6)}、平成23年度にはレアアースのリサイクルシステムである「磁気アルキメデス法によるレアアース(酸化セリウム)のリサイクル技術開発及びリサイクルシステムの構築」を行いました⁷⁾。

現在は、福島汚染土壌の減容化に超電導磁石を応用する



磁気アルキメデス用超電導マグネット

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ことを試みております。また並行して、超電導磁石を用いた火力発電ボイラーシステムの性能維持の検討を行っております。近い将来、市民権を得た（市場を形成した）応用を実現したいと思っています。

参考文献：

- 1) S. Nishijima, Y. Izumi, S. Takeda, *et.al*, IEEE Trans. Appl. Supercond 13 (2003) 1596.
- 2) S. Nishijima and S. Takeda, IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 (2006) 1142.
- 3) F. Mishima, T. Terada, T. Ohnishi, K. Iino, H. Ueda, S. Nishijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2165.
- 4) F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (2010) 937.
- 5) S. Nishijima, S. Takeda, F. Mishima, *et.al*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 18 (2008) 874.
- 6) S. Nishijima, F. Mishima, Y. Tabata, *et.al*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2257.
- 7) F. Mishima, T. Terada, Y. Akiyama, S. Nishijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 2059.

[超電導 Web21 トップページ](#)