

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- Force-free トルクと縦磁界効果

特集：超電導技術動向報告会 2009

- 基調講演-Y 系超電導電力機器基盤技術開発
- 電力機器応用に適応する Y 系線材作製プロセスの開発
- 高 J_c -B 特性を目指したピン止め点導入技術開発
- Y 系線材による電力機器技術開発の状況
- 住友電工における Bi 系線材開発と応用
- ニオブ系超電導デバイス開発の新展開
- 次世代気象レーダー用フィルタシステムの開発
- 低交流損失 Y 系線材に向けた加工・評価技術の開発
- フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の開発
- 超電導国際標準化のこれまでと今後
- 基調講演-超電導応用機器と酸化物超電導

- 超電導関連 7-8 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（5/21-6/19）
- 超電導速報—世界の動き（2009 年 5 月）
- 電気学会、電力エネルギーフォーラム「超電導を用いるエネルギー貯蔵の最先端」報告
- 「CIGRE—D1-Workshop」報告
- 隔月連載記事—やさしい”不確かさ”のおはなし（その 4）
- 読者の広場(Q&A)—日常身近な超電導応用（エネルギー、医療、交通、エレクトロニクスなど）の展望について教えてください。

[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>



トピックス： Force-free トルクと縦磁界効果

九州工業大学大学院
情報工学研究院
教授 松下照男

通常の横磁界中の超電導体に電流を流したとき、内部の磁束には Lorentz 力が働くが、この力は磁束に生じた粗密や曲げなどの歪みを解消する復元力、すなわち磁気圧や線張力として表すことができる。一方、平行磁界中の真っ直ぐな超電導線やテープに電流を流した、いわゆる縦磁界の場合には局所的に磁束と電流が平行な force-free 状態（電流密度を J として $J \times B = 0$ ）が成立することが実験的に知られているが、この状態では磁束は図 1 のような歪み（force-free 歪み）を有する。そして、Lorentz 力の例からは、この歪みに対してそれを開放するように復元トルク（force-free トルク）が働くことが想像できる。実際にこのトルクは Maxwell 理論を用いて、仮想的に force-free 歪みを導入したときのエネルギーの増加を求めて導くことができる。すなわち、歪みを導入する際の誘導電界を求め、表面でのポインティング・ベクトルからこのエネルギーを求めればよい。トルク密度はこのエネルギー密度の表面磁界角度に関する変化率で与えられる。

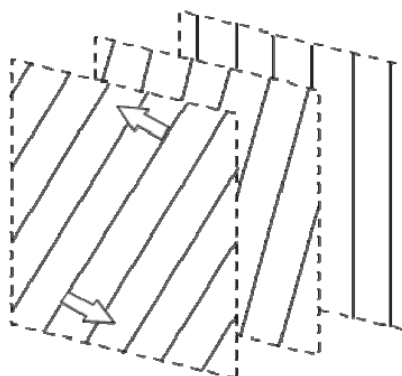


図 1. Force-free 状態の磁気構造の歪みとそれを緩和する force-free トルク

このトルクはこれまでにその存在を知られてはいないが、Coulomb 力や Lorentz 力などと同様に Maxwell 理論から導かれる基本法則の一つで、電磁気学の体系が確立されてから百数十年眠っていたものである。

Force-free トルクが知られていないのは Lorentz 力のように直接観測されないためである。これは、まず、通常の Ohm の法則が成り立つ金属などでは電流は真っ直ぐに最短路を流れて図 1 のような force-free 状態が実現しないからである。次に、超電導体内で force-free 状態が実現しても、このトルクは内力であるため、磁束の間で互いに打ち消しあって全体で 0 となるためである。このように直接観測されない force-free トルクの存在の証明はそれによって生じる電磁現象の説明を通して間接的に行うしかない。その電磁現象が縦磁界効果である。

縦磁界中の超電導線やテープに電流を流した場合に生じる電磁現象を総称して縦磁界効果と呼び、横磁界の場合に比べて臨界電流密度が大幅に増加すること、電流のために縦方向の磁化が常磁性になること、誘導電界に関する Josephson の式 $E = B \times v$ が成立しないこと（ v は磁束の速度）、電流

が臨界値を超えた抵抗状態において負の電界領域を含む表面電界構造が観測されることなどが知られている。この中で、常磁性効果については Josephson の理論で支持された **force-free** モデルで説明される。このため、**force-free** 状態はピンニングなしに本質的に安定であると考えられており、臨界電流密度は Josephson の式からの外れを説明するために提案された磁束カッティングの閾値で決まるとされていた。

しかし、現実には臨界電流密度は横磁界下同様にピンニングの強さに依存しており、ピンニングなしには臨界電流密度は 0 となることが予想される。この予想は **force-free** トルクの予言と一致し、Josephson の理論に問題があることを示唆する。実際に、理論で仮定されたベクトルポテンシャルのゲージは実験結果から否定され、ピンニングによる安定化がない場合の平衡状態では電流密度が 0 でなければならないことが導かれる。

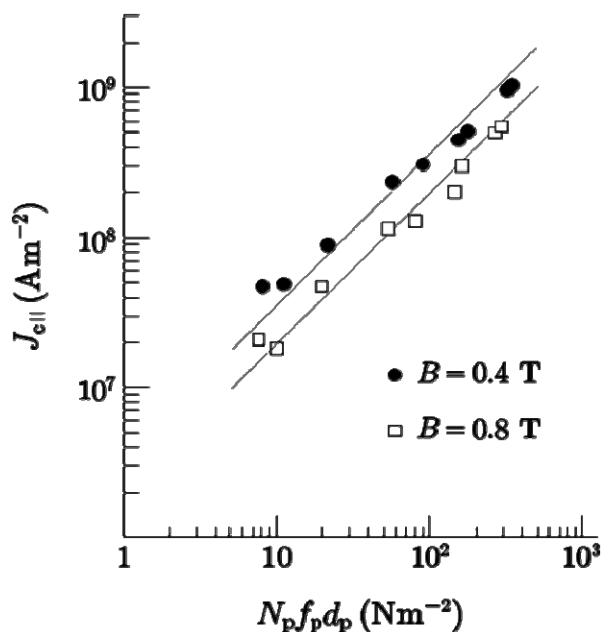


図 2. 縦磁界下の Pb-Bi 試料の臨界電流密度とピンニング関数の関係（直線は理論予想）

以上より、縦磁界下の臨界電流密度の決定は **force-free** トルクとピンニングトルクの釣り合いで与えられることとなり、横磁界下の力の釣り合いに対応する。この条件は縦磁界下でも臨界電流密度が磁束ピンニングの強さに依存するという実験結果を説明できる。図 2 は臨界電流密度がピンニングトルクに比例することを示す実験結果で、直線は理論予想を示す。ここで、 f_p 、 N_p 、 d_p はそれぞれピンの要素的ピン力、数密度、平均間隔である。

次に、縦磁界下で通電して **force-free** 状態が表面から侵入していく準静的過程で磁束の連続の式から磁束の速度 v の回転解を導き、この回転がピンニングトルクを上回った **force-free** トルクによるものであることを示した。合わせて、磁束の回転が起こる場合に Josephson の式 $E = B \times v$ が成立しないことを示した。さらに、抵抗が生じる動的状態において、**force-free** トルクのもとで生じる定常的な磁束運動としてらせん磁束フローを仮定し、表面電界構造についても説明した。

以上より、静的釣り合い、準静的過程および動的過程の全てにおいて縦磁界効果を **force-free** トルクおよびそれに起因する磁束の回転運動から説明することができ、**force-free** トルクの存在を間接的に証明できた。

なお、この現象の応用については縦磁界下で臨界電流密度が増えることを利用することが基本となる。そのときに重要なことは適した超電導線材の開発で、これまでとは少し違った原理により臨界電流密度が決定されることから、この形状の下で優れた特性を得るための基礎研究が必要であろう。次に重要なのはそうした優れた線材を用いた応用の可能性の検討で、現段階で考えられる高磁界応用や電力輸送以外に新しい応用のアイデアが生まれることが期待される。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「基調講演-Y 系超電導電力機器基盤技術開発」

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
所長 塩原 融

Y 系高温超電導線材は、将来コスト、磁界中超電導特性、機械強度、交流損失の観点から他の超電導線材に比して大きな優位性を有していることが認められている。超電導電力貯蔵システム（系統安定化用 2 GJ 級 SMES）、超電導電力ケーブル（66 kV5 kA 大電流ケーブル及び 275 kV3 kA 高電圧ケーブル）、超電導変圧器（66/6 kV 20 MVA 級配電用変圧器）の三つの超電導電力機器について、2020 年（平成 32 年）頃の普及・導入を見通す重要な技術開発を行うとともに、超電導電力機器に必要な低コスト、高性能線材の作製プロセスの技術開発及び超電導電力機器の適用技術標準化を行う国家プロジェクトが平成 20 年度から平成 24 年度までの 5 カ年計画で進められている。本動向報告会では、この新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿からの委託事業である「イットリウム（Y）系超電導電力機器技術開発」について、概説した。また、超電導技術を活用することで二酸化炭素（CO₂）排出量を低減させていくことの重要性を説明した。

Y 系超電導電力貯蔵システムの開発

超電導電力機器による都市部への大容量安定供給を前提に、長距離送電における電圧変動、発電機脱調等の問題に対して、SMES を発電所に設置することにより、有効電力制御で弾力的に運用が可能となることを目指し、2 GJ（～555 kWh）級の SMES 開発をターゲットとした 20 MJ 級 SMES の要素コイルでの成立性の検証実施を進めている。これまで、高磁界（～11 T）SMES にとって重要な機械強度の観点から、フープ力試験を実施するとともに、20 K 伝導冷却型コイルシステム、2 GJ/100 MW 級トロイド型 SMES の概念設計を終了している。

超電導電力ケーブルの開発

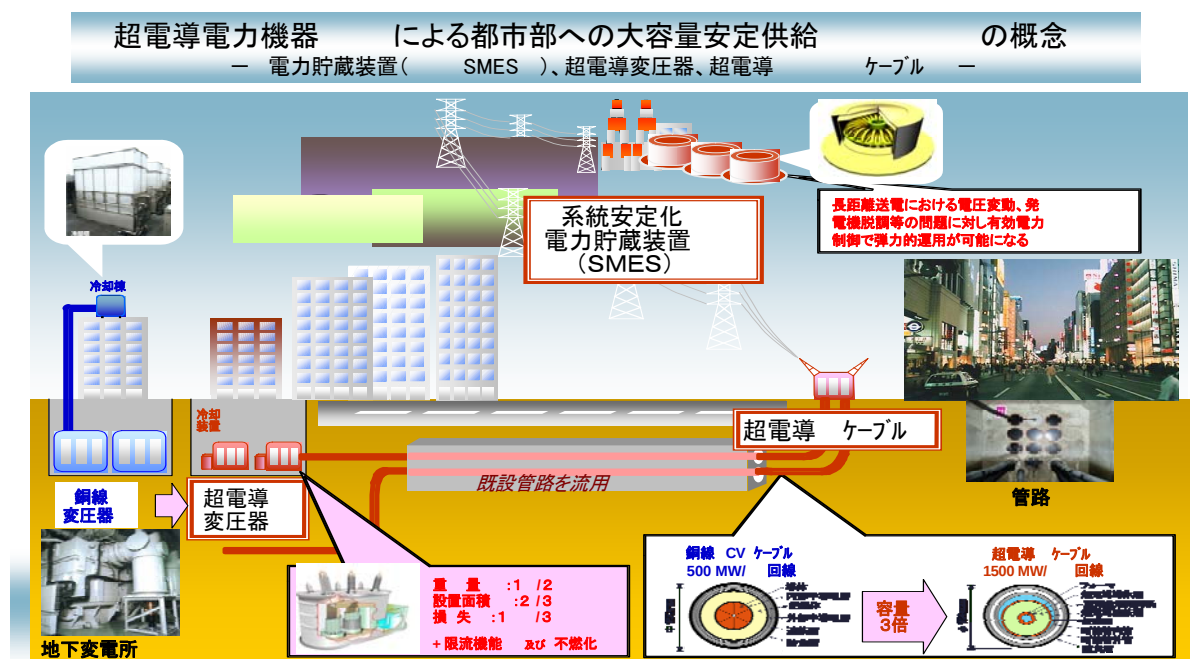
都市部への大容量電力安定供給には、既存の管路を有効利用した超電導ケーブルによる大容量化が効率的であるとの観点から、66 kV5 kA 超電導大電流ケーブル及び 275 kV3 kA 超電導高電圧ケーブルの開発を目指している。例えば、従来機器としての POF ケーブル（154 kVx900 A 級 x3 回線）を YBCO ケーブル（66 kVx5～6 kA 級 x1 回線）に置き換えることにより、送電ロスの低減により省エネルギー、CO₂削減が期待されるとともに、コンパクトで大容量送電を可能とする。コンパクト超電導ケーブル開発において、重要な交流損失低減に対して、テープ形状の Y 系線材の特徴を活かしたケーブル設計と 1 m 級ケーブル導体による交流損失低減策の検討を進め、銅フォーマにスパイラルに沿わせ損失低減を目指し、2 mm 幅細線化線材あるいは 10 mm 幅線材の可撓性を利用し、ケーブル導体断面を真円状にする技術で、ともに交流損失の低減が期待出来る実験結果を得ることに成功している。また、超電導線材の層数を増大させることによる電流容量増大にも成功している。また、高電圧ケーブルの設計において、導体／シールド間の絶縁層が厚くなることを想定した場合の導体冷却方法を検討し、丸撚（中実）ケーブル、中空ケーブルともに定常時の冷却に問題ないことをシミュレーションにより確認出来ている。

超電導電力変圧器の開発

変圧器を超電導化することにより、コンパクト化（重量 1/2、設置面積 2/3）、高効率、不燃化を目指すことが可能となる。これまでに、超電導変圧器開発に重要な要素技術であるコイル形状での交流損失低減は、線材の溝加工（スクライビング加工）と日本独自の巻き線技術により検証がなされている。現在、さらに詳細に安定化層の銅層とともに臨界電流特性、曲げ歪み特性、転位巻き線技術の要素技術開発を進めている。また、変圧器に限流機能を付加する独創的な研究開発も進めており、4 巻線構造で、各 1 次 2 次巻線に補助巻線を施し、変圧機能及び限流機能を検証するコイル設計・製作が完了しており、今後実験により、数百 kVA 級の限流機能付き変圧器の開発を実施する。

Y 系高温超電導線材の開発

Y 系超電導線材は、最近になって、 $I_c \times L$ で $350 \text{ A} \times 500 \text{ m}$ の成果（フジクラ）が報告されているように、Bi 系線材性能に肉薄している。Y 系線材の四大特徴（1. 将来の低コスト化、2. 磁界中高臨界電流密度、3. 高機械強度、4. 低交流損失化可加工性）から、Y 系線材開発は世界中、特に日米間で熾烈な開発競争が繰り広げられている。一昨年度で終了した「超電導応用基盤プロジェクト、第 II 期」では線材の臨界電流、長さ、磁界特性等のチャンピオンデータを目指した開発を進めてきたが、本プロジェクトでは、2020 年を想定した各超電導機器の普及・導入時に要求されるコストを含めた仕様を満足させる線材を目指し、歩留り向上も含めた線材開発を進めている。



今後の方針

昨年度から「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトが始まり、超電導電力貯蔵システム、超電導電力ケーブル、超電導変圧器の開発とともに、それらの開発に要する線材の開発を進めている。また、環境・エネルギー対策の一環としても、超電導高効率送電は、我が国の「Cool Earth エネルギー革新技術計画」に選定されており、イットリウム系線材による超電導送電の 2020 年以降の実用化を目指し、現行 5 %程度の送電ロスを 1/3 程度に削減する効果を期待している。

謝辞

本稿で紹介した研究成果は、主として「Y 系超電導電力機器基盤技術開発」業務の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により実施したものを含みます。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「電力機器応用に適応する Y 系線材作製プロセスの開発」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所線材研究開発部

部長 和泉輝郎

Y 系超電導線材は、開発が先行している Bi 系超電導線材に対してコスト、磁界中特性、機械強度、低交流損失等の観点において優位性を有していることから期待が大きいものの、結晶粒を三次元的に配向させることが必要であり、その難易度が高いことから開発に時間を要していた。そんな中、国家プロジェクトにより産官学の日本の力を結集し、Y 系超電導線材の開発に取り組んできた。

平成 10 年から 10 年間に渡って実施された「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトでは、ISTEC（財団法人国際超電導産業技術研究センター）が中心となり、電力会社、線材メーカー、大学等が共同で開発に取り組んだ。ここでは、層状構造を持つ、Y 系超電導線材の金属基板、酸化物中間層、超電導層の各層に対し、材料開発と共に長尺線材の高速製造技術開発を目指してプロセス、大型装置の開発を行った。プロジェクト開始時には m 級の線材を作るのがやっとであった技術を、プロジェクト終了時には複数のプロセスにおいて、500 m を越す長さで 300 A 以上の高い臨界電流を有する線材を作製するまでに至っている。特筆すべきは、この間、常に米国と激しい開発競争を繰り広げ世界をリードし続けてきたことである。

上記プロジェクトの成果を受けて、平成 20 年度より Y 系超電導線材を用いた機器開発プロジェクトとして「イットリウム系超電導電力機器技術開発」が始まった。このプロジェクトでは、「超電導電力貯蔵システム」「超電導電力ケーブル」「超電導変圧器」の 3 つの電力機器を選定し、本格的な機器開発を行うことになっている。更に、もう一つの柱として「超電導電力機器用線材開発」が設けられている。上記の機器開発に必要な線材は、応用基盤プロジェクト終了時に提供可能なレベルの線材を供することになっているが、2020 年頃に想定されている機器の普及導入時期に必要な線材仕様は長さや特性で高いレベル（例えば 500 m-500 A 以上）が求められるだけでなく、磁界中での特性や機械強度、交流損失低減のための均一性、加工性などそれぞれの機器に適した仕様を満たすことが求められている。さらに、これらの線材が極低コスト（3 円/Am 以下）でなければ機器の普及にはつながらない。これらの背景の下、現プロジェクトの中での線材開発においては、上記の 3 機器から求められる将来の線材仕様を低コストで作製する技術開発を行うものである。具体的には、

- ① 線材特性把握、
- ② 磁界中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発、
- ③ 低交流損失線材作製技術開発、
- ④ 高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発、
- ⑤ 低コスト・歩留向上技術開発、

の 5 つのサブテーマを設定し、研究開発を開始している。プロジェクトが開始してから約 1 年が経過し、すでに幾つかの成果が得られている。これまで、コスト高が指摘されてきたパルスレーザー蒸着 (PLD) 法により超電導層を形成する線材においても、イオンビームアシスト蒸着 (IBAD) 法

による配向中間層の材料を Gd-Zr-O から薄膜高速化が可能な MgO に変更し、PLD 法のレーザー条件の適正化や、プルーフ内で成膜する技術などの開発により 15 m/h で 448 A 以上の高い特性を有する極低コスト線材開発に成功している。また、これまで人工ピン止め点の導入が困難とされてきた有機酸塩堆積 (MOD) 法においても、Y の一部を Gd に置換し、BaZrO₃ 粒子を均一に分散させることに成功し、印加磁界の方向によらず均一で高い特性を実現している。他にも、低交流損失を実現するために必要な均一性の向上技術でも成果が挙がり、スクライビング加工技術では、浅い YAG レーザー照射と 2 種類の化学エッチング処理により、超電導特性を維持しつつフィラメント間絶縁特性を確保した 30 m-3 分割線材の作製に成功している。

今後は、平成 22 年度末及び 24 年度末に設定されている中間及び最終目標達成を目指し、イットリウム系超電導機器の普及導入時に必要な線材の作製技術の確立を目指していく予定である。

謝辞

本稿で紹介した研究成果は、超電導応用基盤技術研究開発業務及びイットリウム系超電導電力機器技術開発業務の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「高 J_c -B 特性を目指したピン止め点導入技術開発」

九州工業大学大学院
工学研究院物質工学研究系
教授 松本 要

ガソリンなどの化石燃料の使用を極力減らし、効率の高い電力へとエネルギー源をシフトしていく世界的な潮流が生まれてきており、このようなエネルギー・環境産業への大規模投資によって、新しい社会を構築していこうという動きは、国内外においてすでに始まっている。抵抗ゼロの超電導材料は、電力技術が主体となるこのような 21 世紀社会において重要な役割を担うと期待される。特に安価な液体窒素冷媒中で抵抗ゼロになる高温超電導体は、様々な電力応用にうってつけである。

ここで重要となるのが、超電導体に通電できる最大の電流値 J_c を制御する技術である。近年、ナノ組織制御により YBCO 高温超電導体中に結晶欠陥を導入して量子化磁束を強力にピン止めし、77 K 近傍の高磁界中の J_c を飛躍的に増大させることを目指した開発が進んでいる。こうして導入された結晶欠陥は、人工ピン (Artificial Pinning Center ; APC) と呼ばれる。人工ピン法では、最大の J_c が得られるように結晶欠陥の分布や密度を設計し、薄膜中に導入することを可能にする。人工ピンとして利用できる結晶欠陥を次元性で分類すると、転位やコラムナ欠陥のような線状欠陥 (1 次元人工ピン)、小傾角粒界の転位列や大きな析出物表面などの面状欠陥 (2 次元人工ピン)、そしてコヒーレンス長と同等かそれ以上のスケールの析出物や異相などの粒状欠陥 (3 次元人工ピン) などがある。

原理証明として筆者らが最初に行ったのは、PLD 法と Y_2O_3 ナノアイランドを利用した基板表面修飾法によるもので、基板上的 Y_2O_3 ナノアイランドを起点として YBCO 薄膜中に転位等の 1 次元人工ピンを高密度に導入するものである。ナノアイランドの密度向上に伴い 77 K の磁界中 ($B//c$) の J_c が数倍以上向上することが確認された。ほぼ同時期に、米国グループによってスイッチングターゲット法や混合ターゲット法によって、微細粒子を YBCO 薄膜中に導入することが試され、いずれの方法でも純 YBCO 薄膜の数倍に達する J_c が得られた。

これら研究の後、多くの人工ピン研究が開始され、最近では、 $BaZrO_3$ や $BaSnO_3$ 混合ターゲットを用いて、YBCO や GdBCO 薄膜中に直径 5~10 nm の多数のナノロッドを導入することが盛んに行われている。ナノロッドは c 軸に平行で 1 次元ピンとして作用する。ナノロッドによれば J_c は 1 MA/cm^2 (77 K、3 T、 $B//c$) に達している。ナノロッド形成機構については、まだ完全には理解されていないが材料科学的に大変興味深い。なおこれらのピン導入研究は PLD 法によるものが主体であるが、最近では MOCVD 法によってもナノロッド導入が可能であることが確認されている。2 次元人工ピンとしては、半位相界面 (APB) や小傾角粒界からなる結晶粒界によるものがあるが、現状では実施例が少ない。一方、3 次元人工ピンにはいくつかのパターンがあり、ひとつには Y_2O_3 などのナノロッドを形成しない物質と YBCO を、PLD 法を用いて同時に蒸着してナノ粒子を YBCO 薄膜中に導入する方法などがある。これらの方法で 10~20 nm 径のナノ粒子を人工ピンとして膜中に高密度に導入できる。ナノ粒子導入は PLD 法以外にも MOCVD 法や TFA-MOD 法などでも可能である。ナノ粒子の J_c 特性の温度依存性、磁界依存性はナノロッドの場合と大きく異なっており、今後、これらの詳細な比較研究が進むと思われる。

最近では、人工ピンを用いることで、77 K の温度において、YBCO 薄膜の不可逆磁界は 10 T 以上になり、かつ 4.2 K で動作する実用 Nb-Ti 線材の J_c を超える値も報告されるようになっている。これより YBCO や GdBCO などを用いた高温超電導線材に人工ピンを導入することで、77 K において Nb-Ti 線材並みの特性を有した高性能の線材の実現が期待でき、77 K での超電導パワー応用に道が開けつつある。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「Y 系線材による電力機器技術開発の状況」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所電力機器研究開発部
部長 藤原 昇

「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」（以下応用基盤）の成果によって、300 A/cm-500 m の Y 系線材が開発された。Y 系線材を用いた電力機器の技術開発の状況について「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの進捗・成果を報告する。

SMES

電力系統の長距離送電線に事故が発生した際の安定度向上方策として、発電所側に設置する 2 GJ 級 SMES の技術開発を行っている。

応用基盤等の成果として、10 mm 幅 IBAD-MOCVD 線材を用いた内径 100 mm のダブルパンケーキコイル 12 個をトロイド型に配置したコイルを製作し、充放電に成功している。（図 1）本プロジェクトでは、高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発、高効率コイル伝導冷却技術開発、SMES システムモデル検証等を実施しており、2 GJ 級を目指した 20 MJ 級 SMES の要素モデルコイル組み合わせ評価試験を行う。



図 1 IBAD-MOCVD 線材を用いたトロイド型コイル外観

電力ケーブル

コンパクトで大容量の送電を可能とする 66 kV-5 kA 大電流ケーブルおよび 275 kV-3 kA 高電圧ケーブル技術開発を行っている。

大電流ケーブルの開発では、2 mm 幅クラッド基板-PLD 線材による導体試作、評価を行った。上記線材 165 本を導体として 6 層に集合化、同じく 149 本をシールドとして 3 層に集合化した 1 m の単心ケーブルコアの試作を行った。（図 2）導体層 $I_c=7300$ A、シールド層 $I_c=5800$ A の臨界電流を達成した。これに先立ち試作した $I_c=2440$ A の導体では、交流損失 0.08 W/m-相@1 kA（負荷率 $I_p/I_c=0.58$ ）を達成した。

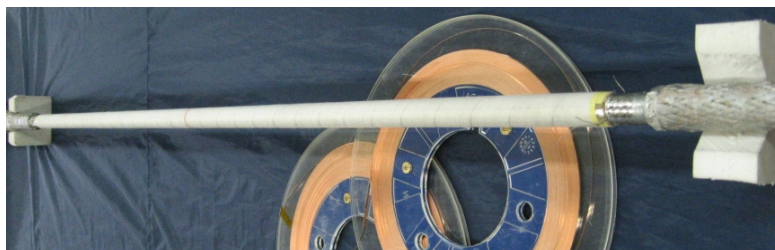


図 2 クラッド基板-PLD 線材によるケーブルコア外観

一方、高電圧ケーブルの開発では、4.5 mm 幅 IBAD-MOD 線材を用いて約 1 m の 2 層導体を作製した。(図 3) 4.5 mm 幅の線材は、中心部にレーザにより切り込みを入れることによってフォーマになじませた。この導体は $I_c=4554$ A、交流損失 0.01 W/m-相@1 kA を達成した。超電導電力ケーブルの開発では交流損失の低減が重要な技術開発課題である。ケーブルに生じる交流損失を低減するためには、負荷率 I_p/I_c のみならず線材幅、線材間のギャップ、線材可撓性能と真円度、層間隔等の諸要素による影響を評価する必要がある、今後は上記の成果を踏まえたケーブル設計を行う。



図 3 IBAD-MOD 線材による導体外観

変圧器

コンパクトで高効率かつ不燃（油不使用）を特長とする 66/6 kV 20 MVA 級配電用変圧器を目指した技術開発を行っている。

大電流を通電しても低損失であり、なおかつ短絡電流に耐えられる強度を有する巻線の技術開発を行っている。5 mm 幅 IBAD-PLD 線材によりモデルコイルを製作し（図 4）、このコイルを用いて 20 MVA 変圧器の短絡電流に相当する過電流通電試験を実施し、臨界電流特性と安定化銅による保護対策の効果を検証した。また、エッジワイズ曲げ歪による I_c 劣化を把握するため、コイル形状を模擬した曲げ歪により、0.3～1.0 %の曲げ歪による健全性を確認した。

さらに、限流機能付加変圧器の基礎技術の検証用として、補助巻線を持つ 4 巻線構造の限流機能モデルの設計及び巻線を行った。



図 4 IBAD-PLD 線材による巻線モデルコイル外観

謝辞

本稿で紹介した研究成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）からの受託によるものです。

特集：超電導技術動向報告会 2009

「住友電工における Bi 系線材開発と応用」

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
次長 林 和彦

住友電工では 1988 年の Bi 系高温超電導体の発見以来、一貫して線材化、応用開発に取り組んできた。本稿では、線材化の歩みと今後の見通し、Bi 系線材を用いた応用開発の現状について報告する。なお、ここで Bi 系線材とは、臨界温度が 110 K を越える Bi2223 系線材を指す。

1. Bi 系線材

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi2223) 高温超電導線材は、原料粉末を金属パイプに充填して複合加工し、内部の粉末を焼結する PIT (Powder In Tube) 法と呼ばれる方法で製造され、幅約 4.3 mm、厚さ約 0.23 mm のテープ状の形状をしている。可とう性を付与するため、セラミックである超電導フィラメントは銀や銀合金で覆われた多芯構造をしている。

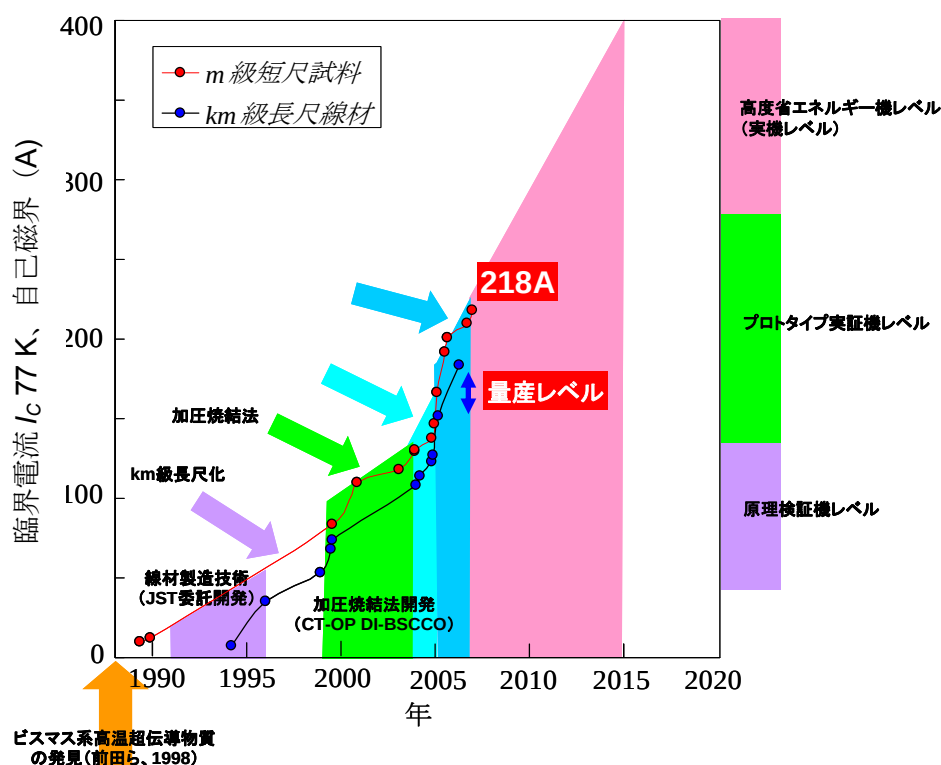


図 1 ビスマス系高温超電導線の性能向上

図 1 に Bi 系線材の臨界電流向上の経緯を示す。1995 年までの初期の段階で、銀と複合加工する PIT 法の基本プロセスが確立され、1 km 級の線材が試作された。この間、製造プロセスの最適化が進んで臨界電流特性も徐々に向上し、標準サイズで液体窒素温度、自己磁界下で 100 A に到達したが、線材化が大きく進展したのは加圧焼結法の開発によってであった。加圧焼結法により局所的な

欠陥が大幅に低減するなど製造歩留りが向上し、臨界電流、機械強度も改善されるなど、Bi 系線材が工業製品と呼べるレベルに到達した。その後も各製造プロセスの改善、製造条件の最適化が進み、短尺試料では臨界電流が 218 A に到達し、量産レベルの km 級長尺線材では、160～180 A の線材が工業レベルで供給可能になっている。

Spring-8 の高輝度 X 線を用いた線材の配向評価からは、臨界電流 210 A の線材でも平均的な配向乱れは 6° 程度であり、4° まで改善できれば臨界電流は 300 A に到達するものと予想している。また、線材のミクロな評価により局部的には 4～5 倍の臨界電流密度を有する部分が存在することが分かっており、高臨界電流密度領域の拡大により、臨界電流特性は大幅に改善される余地がある。

2. Bi 系線材を用いた応用開発の現状

Bi 系線材を用いた応用製品開発状況を表 1 に示す。医療分野では、低温超電導で普及している MRI について Bi 系を用いた小型（可搬型、脳用）MRI の開発が始まっており、癌治療機としての陽子/重粒子加速器の超電導化が検討されている。後者では、放射線遮蔽の必要な建屋の小型化が可能となり、建設コストの大幅な低減が可能になる。

表 1 超電導機器の検討状況

応用例	内容	低ロス	小型	軽量	大トルク	高磁場	高精度	静粛性	保守性	安定性	総合経済性	備考
MRI(医療用)	高磁場発生源	○				○			○	◎	○	可搬型(GE)脳計測(JST、京大)
NMR	超高磁場発生源	○				◎					○	高機能機種(>1GHz)
医療用加速器	陽子/重粒子加速器			○						○		ガントリー、シンクロトロン
ケーブル (交流、直流)	小さな直径で大電力、低ロス	◎	○							○	◎	電力会社、米国政府プロジェクト、自然エネルギーとの組合せ、鉄道
変圧器	新幹線用		○	◎								軽量化が至上課題、低交流損失化必要
	電力用	◎	○								○	地下変電所向けなど
限流器	事故電流抑制	○								○	○	過飽和鉄心型(Bi)、S-N転移型(2G)
SMES	磁気エネルギー貯蔵	○				◎						瞬低補償、負荷変動補償
船舶用モータ	小型化で推進抵抗の削減	◎	◎	◎	◎			◎	○	◎	◎	共同産学、400kW機開発
航空機推進	軽量化、燃料電池電力の利用	○	○	◎				○			◎	米空軍
溶湯の固化制御	高磁場で対流抑制	○				◎				○		次世代大型単結晶炉、鉄鋼の生産
工作機器	大トルクのためギアレシ・高精度化、保守性向上			○	○		◎		◎			超高精度製品を安定に製造するため
磁気分離	医薬品、廃水浄化	○				◎				○	○	製紙工場で実績積みつつある
自動車	駆動モータの大トルク、低ロス化	◎	◎	◎	◎						◎	液体水素燃料にて効果大
風力発電機	ナセル構造の簡素化		○	◎	○			○			○	軽量・静音化

電力分野では、ケーブル応用が世界的に進展しており、米国 Albany を初めとして実系統に接続した例もいくつか出てきている。日本でも、東京電力、前川製作所、住友電工により NEDO の高温超電導ケーブル実証プロジェクトで国内初の系統連係試験が、東京電力の旭変電所で実施される予定である。ケーブルの新しい応用として、太陽光発電等の自然エネルギーの送配電、鉄道のき電ケーブルなど、直流ケーブルが検討されており、交流損失の問題のない直流応用で超電導のメリットがより活かされるものと期待される。

電力エネルギー消費の 70 % を占めると言われているモータ応用では、まず船舶推進用モータの超電導化が世界各国で検討され、国内でも内航船への適用が可能な 400 kW 級のモータが開発された。また陸上での輸送機器として、超電導電気自動車が試作され、人を乗せたデモ走行が行われて

いる。超電導電気自動車としては稼働率が高く、発信・停止の繰り返しの多い路線バスへの適用について省エネ効果が試算され、通常の電気自動車に比べて、**13 %**の省エネ効果（同じ電池容量で**13 %**の走行距離改善）が見込まれている。

3. 今後の展望

今後高温超電導機器が既存の技術に打ち勝って普及するためには、電力ケーブル等の銅線との競争になる応用分野で線材価格（機器メーカーにとっての線材コスト）が**10 円/Am**、MRI 等の低温超電導との競争となる分野で**5 円/Am**の実現（いずれも臨界電流は**77K**、自己磁界換算）が入り口と考えている。**Bi**系線材では臨界電流性能、製造コストの見通しからこのレベルの線材価格の実現は可能であり、新たな応用分野の開拓とあわせて、今後も研究開発に注力する所存である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「ニオブ系超電導デバイス開発の新展開」

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 低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）では、ニオブを超電導材料として用いたデバイス開発を行っている。数多い超電導体の中からニオブを選んだのは、ニオブは単体の金属であること、エピタキシャル成長が不要なため低温プロセスのみで作製できること、良質なジョセフソン接合の形成方法が確立していること、半導体プロセスで通常使用される装置が使用でき特殊な装置が不要であることなどの理由から、全ての超電導体の中で最もデバイス開発が容易だからである。また、デバイスの特性が安定しており、経時変化の心配がないことも大きな理由である。

ISTEC では、単一磁束量子（SFQ）回路と呼ばれるデジタルデバイスの開発を行っている。SFQ 回路は超電導体の中にだけ現れる磁束量子の最小単位 SFQ を情報媒体として用い、超電導リングの中に SFQ が 1 個ある状態を論理“1”、SFQ が存在しない状態を論理“0”と定義する。また、超電導リング中に SFQ を出し入れするゲートとしてジョセフソン接合を用いる。

SFQ 回路の一番の特徴は 100 GHz を超える高速性とゲートあたり 0.1 μ W の低消費電力性が両立することである。これにより超高速で動作する大規模集積回路の実現が可能となる。この SFQ 回路の特徴を有効に利用できる応用として、ネットワークルータ用スイッチがある。2006 年度まで行われた NEDO「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」事業において、ISTEC は SFQ スwitchの開発を行い、4 台の PC を SFQ スwitchで接続してパケットの衝突を回避しながら動画転送を行う実験に成功した。この技術をベースに 100 Tb/s クラスの処理能力を持つ SFQ ルータの消費電力を試算した結果、半導体ルータ限界の 5 倍のエネルギー効率が可能であることが示された。さらに、省エネ化した SFQ 回路を用いれば、もう一桁のエネルギー効率改善が可能である。

SFQ スwitchをはじめとした大規模 SFQ 回路開発の過程で設計・プロセス・システム化技術が積みあがり、5 年前では不可能であったことができるようになってきた。しかし、大規模 SFQ システムを実現するためには、さらに多くのリソースや時間を必要とする現実があり、この技術を早期に実用化すべきであるという声に応えきれていなかった。一方、小規模であれば、現状技術を有効に用いることにより比較的早期に実用化できる超電導システムを作ることが可能である。このため、新しい流れとして小規模超電導デバイスを用いたシステムの開発が進められている。

NEDO「次世代高効率ネットワークデバイス開発」事業において、ISTEC は高速光通信信号を単発現象でも観測できる超電導リアルタイムオシロスコープの開発を行っている。この開発では、SFQ 回路の高速性を利用した AD 変換器（ADC）の開発と、冷凍機で冷却された超電導回路への高速光入力が主な開発課題となる。現在までのところ、超電導回路への 40 Gb/s 光入力と設計値通りの ADC 動作に成功している。今後、ジョセフソン接合臨界電流密度増加により半導体 ADC の限界を大きく上回る性能の超電導 ADC を実現するとともに、超電導 ADC を小型冷凍機に実装したシステムの開発を行う予定である。

ISTEC は産業技術総合研究所（産総研）と共同で交流電圧標準に使用できるパルス駆動型ジョセ

フソン信号源の開発を行っている。これは、これまで存在しなかった量子現象を利用した交流の電圧標準を、ジョセフソン接合の量子効果を利用して実現するものである。産総研が設計した超電導デバイスを ISTEK の光入力付冷凍機に実装して、任意波形の交流を発生する実験に成功している。このシステムは、交流電圧標準だけでなく各種信号源や ADC などの校正装置としても幅広い応用が期待されている。

横浜国大・吉川/山梨研究室は、コンパレータと呼ばれる非常に簡単な SFQ 回路を用いて高速の物理乱数発生回路が実現できることを示した。アルゴリズムに基づく擬似乱数と異なり、物理乱数は自然現象に基づき乱数を発生させるため予測が不可能であり、暗号通信の安全性を高めることができる。横国大では SFQ 回路を用いることによって、半導体物理乱数発生回路の 1000 倍の速度で NIST の基準を満たす物理乱数を発生させることに成功した。

以上紹介した小型超電導システムは早期に実用化可能であるだけでなく、その性能は既存技術をはるかに凌ぐものである。このため、これらの優位性を有効に発揮できる適用場所を見つけることが重要であると考えられる。

なお本稿の一部は、「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」及び「次世代高効率ネットワークデバイス開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。また、資料を提供いただいた独立行政法人産業技術総合研究所金子氏、横浜国立大学 山梨先生に感謝する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「次世代気象レーダー用フィルタシステムの開発」

株式会社東芝

研究開発センター機能材料ラボラトリー

加屋野博幸

近年、デジタルテレビ、携帯電話、無線 LAN 等の電波を利用する機器の利用が拡大し、将来に向けた高速通信への期待も高まっている。こうした期待に答えるために、限られた周波数資源を有効に利用し、適正な電波利用環境を確保することが重要になっている。特に 5 GHz 帯の無線 LAN は爆発的な利用増加のため、周波数の有効利用が急務となっている。弊社では、5 GHz 帯無線 LAN の周波数帯域拡大を想定し、隣接する気象レーダーの狭帯域化に向けた研究開発を進めてきた。本報告ではシステムの狭帯域運用に必要となる送受信用の狭帯域フィルタに関して報告する^{1), 2)}。

図 1 に示すように、信号を周波数軸上に高密度に割り当てる状況では、隣接したエリアに設置されている他の気象レーダーからの信号と一緒に受信機に入るために混信の原因となったり、送信のスプリアスが隣接の信号へ入ってしまうために受信感度が劣化したりすることが問題となっていた。この問題を解決するために、狭帯域な送受信フィルタが必要となる。しかしながら、従来フィルタでは金属導体（例として銅など）の損失が大きいため、狭帯域なフィルタを作ることができなかった。そこで、金属導体と比較して高周波領域でも 1/100 以下の低損失が期待できる超電導体を用いて狭帯域フィルタを開発した。特に送信用フィルタでは通過する信号電力が大きいために、臨界電流密度特性を持つ超電導体では大きな問題となる。気象レーダーに求められる高耐電力性を実現するために、我々は耐電力性に優れた空洞共振器と、狭帯域低損失性に優れた超電導共振器を用いるハイブリッドフィルタを開発した³⁾。その簡易な動作原理を図 2 に示す。ハイブリッドフィルタでは大電力をバイパスさせる構成を持ち、小さな電力の不要な信号のみを超電導共振器に通すことで急峻な特性と高耐電力特性の両立に成功した。開発したフィルタユニットの外観写真を図 3 に示す。19 インチラックマウントタイプで 15 U のサイズである。送受信フィルタの比帯域は 0.075 % の狭帯域特性を実現した。受信フィルタに関しては、隣接信

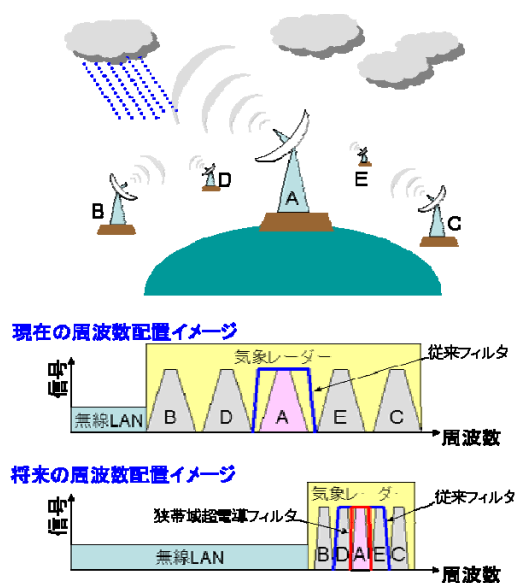


図 1 気象レーダーと周波数配置

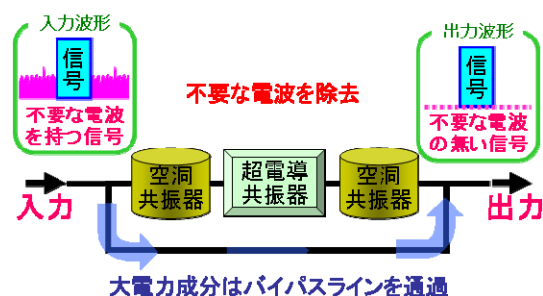


図 2 送信用ハイブリッドフィルタの動作原理

号抑圧 30 dB 以上を実現した。また、送信用フィルタに関しては 3.5 kW での動作を実証し、不要な電波放射は 1/10 以下に抑制可能である。このフィルタにより最大 4 倍の周波数利用効率が期待できる。



図 3 次世代気象レーダー用フィルタシステムユニット

なお、本研究は総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。

参考文献

- 1) 加屋野, 橋本, "気象レーダー用超電導フィルタの開発," 超電導 Web21, Feb. 2008.
- 2) 塩川, *et al.*, "気象レーダー用超電導フィルタの開発," 信学技報 SCI2008-14, MW2008-14, pp.75-80, Apr. 2008.
- 3) H. Kayano, *et al.*, "N arrow-band filter for transmitter of radar application," 38th European Microwave Conf., EuMC44-4, pp.853-856, Oct. 2008.

[超電導 Web21 トップページ](#)

関特集：超電導技術動向報告会 2009

「低交流損失 Y 系線材に向けた加工・評価技術の開発」

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

副所長 田辺圭一

平成 20 年度にスタートした NEDO「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて開発が進められている機器の中で、ケーブルと変圧器については、交流損失の低減が大きな目標の一つになっている。ケーブルの場合、電流が作り出す磁界の方向はフォーマの円周方向になるため、例えば 2 mm 程度の幅に細く加工した Y 系線材をできるだけ真円に近い形でフォーマに巻くことにより、線材の垂直方向に磁界がかからないようにして交流損失を低減することが可能である。一方、ソレノイド状のコイルを用いる変圧器の場合、コイル端に近い場所において線材の垂直方向にかかる磁界が必ず存在する。交流の垂直磁界中に置かれた超電導線材の損失としては、磁束が線材端から中心に向けて出入りすることにより生じるヒステリシス損失が概して最も大きい。Y 系線材では、中間層が絶縁体のため、溝加工が理想的にできていれば、フィラメント間の抵抗は非常に高くなるはずである。しかしながら、例えばフィラメント間に常電導の残渣物があると、フィラメント間に流れる電流によりいわゆる結合損失が発生する。この結合損失は、線材が長くなるとヒステリシス損失に比べ無視できなくなる可能性がある。

Y 系線材を溝加工しマルチフィラメント線材とするスクライビング技術としては、機械加工法、レーザースクライビング法、エッチング法などが提案されているが、ISTEC では NEDO の前プロジェクトにおいて、レーザースクライビング法と化学エッチング法を併用することにより、高いフィラメント間抵抗を得ることに成功している。また、加工した 3-5 m 長の 5 mm 幅 5 分割線材を用い、九州電力で独自の巻線方法により 19 層のソレノイドコイルを製作することにより、スクライビング加工がない場合に比べ交流損失が 1/5 に低減できることが実証された。一方、現プロジェクトで実証予定の 2 MVA 級変圧器の開発には、最長で 300 m の 5 mm 幅 3 分割線材が約 10 km 必要であり、このような多量の線材を安定して加工する技術を ISTEC で開発中である。また、将来の実用段階の変圧器には、5 mm 幅で 5 分割から 10 分割というより細いフィラメントへの加工が要求されており、長さ方向、幅方向に均一な特性をもつ線材の作製技術と共に、欠陥発生や臨界電流 (I_c) 劣化を抑制した細線加工技術の開発を ISTEC が現プロジェクトにおいて担当している。

平成 20 年度は、レーザースクライビング法と化学エッチング法による線材加工プロセスの改良を行った。具体的には、レーザー強度を落としたスクライビングにより、ハステロイ基板が融解してできるドロスの発生を抑制すると共に、Ag 安定化層と超電導層にそれぞれ適したエッチング液を用いることにより、従来の約 1/10 の時間で非常にシャープな端面構造をもつフィラメントの加工に成功した。また、リール・トゥ・リールの連続エッチング装置を開発し、これを用い 30 m 長 5 mm 幅 3 分割線材の加工を行った結果、加工による I_c 低下率を 3 % 以下に低減することができた。さらにフィラメント間抵抗は、30 m 長で 100 k Ω と、変圧器応用に十分な値を得ることに成功した。このプロセスはより長い線材にも適用可能である。一方、より長い線材のフィラメント加工を高い歩留まりで行うためには、加工前後の線材の I_c や欠陥の長さ方向、幅方向の分布を評価し、場合によ

っては線材の補修を行うことが効果的である。今年度は、従来は I_c の長手方向の非接触評価のみに用いていたホール素子法において、 I_c の幅方向分布を評価する手法を開発し、加工後のフィラメント間の I_c 分布を推定できる可能性を示した。また、前プロジェクトで開発した SQUID 磁気センサアレイを用いた渦電流法による欠陥分布評価装置においては、 I_c の劣化箇所だけではなく線材の剥離やフィラメント間短絡など種々の欠陥が検出できることが実証されると共に、線材の冷却方法の改善により 80 m/h という高速評価が可能となった。これらの改良加工プロセス及び評価技術を用い、今年度は 100 m 長 3 分割、50 m 長 5 分割線材の加工技術の確立を目指していく。

なお本稿は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により実施 したものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の開発」

財団法人鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部低温システム
研究室長 長嶋 賢

鉄道用の電力貯蔵装置は、回生エネルギーリサイクルやピークカット対策等を通じて省エネルギーに資すると考えられ、いくつかの適用例がある。重量物を回転させ、回転エネルギーとして電力を貯蔵する超電導フライホイール電力貯蔵装置は、機械式軸受を用いるフライホイール装置に比べて、非接触であるため、回転に伴う損失が少ない、メンテナンスの手間がかからない、等のメリットがある。これまで、日本をはじめ米国、ドイツなどにおいても超電導バルク体軸受を用いたフライホイール電力貯蔵装置の開発例が存在する。これらは永久磁石と超電導バルク体（以下、バルク体）を組み合わせた軸受を使用しており、バルク体のピン止め効果を用いて、制御不要の完全非接触安定浮上を実現できるメリットがあった。しかし、永久磁石を使う限り、発生磁界には限界（0.5 T 程度）があるので、載荷力密度（バルク体の単位面積あたりに支持できる電磁力）は最大で 100 kN/m^2 程度にとどまっていた。大きなエネルギーを蓄積するためには、当然ながら重量物を回転させる必要がある。一方、バルク体に対してより高い磁界を印加すれば、載荷力密度は磁界の自乗に比例して増大する。例えば、図 1 のように永久磁石のかわりに超電導コイルを磁束源として用いればその問題は解決できる。バルク体と超電導コイルの組み合わせによる超電導磁気軸受を適用したフライホイール電力貯蔵装置のイメージを図 2 に示す。この構成ではバルク体回転時のロスや、バルク体の冷却方法等、いくつかの問題があるものの、載荷力密度を画期的に向上できる可能性がある。

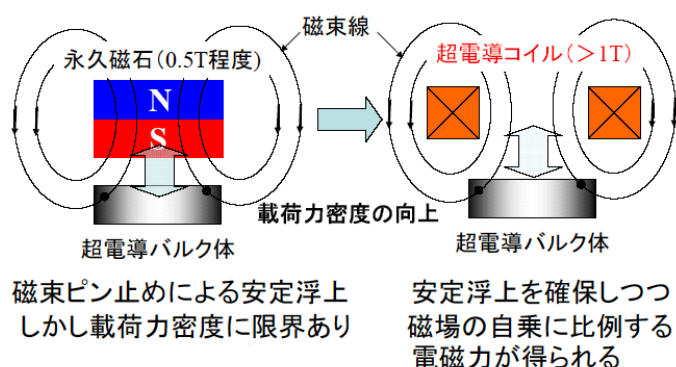


図1 超電導バルク体と超電導コイルを用いた軸受の概念図

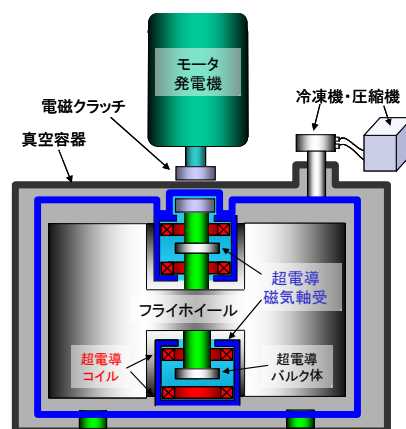


図2 超電導バルク体と超電導コイルを用いたフライホイール電力貯蔵装置(イメージ)

超電導体同士で構成する磁気軸受では、回転体側のバルク体を冷却することが課題である。しかし、今回は実験の容易さのため、液体窒素に浸漬冷却したバルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導コイル（磁石）を配置してスラスト軸受を構成した。軸受の目標仕様は、静荷重で 10 kN の荷重容量、 5 kN のスラスト荷重負荷で最高回転速度 3000 rpm とした。

表 1 に試験用超電導磁気軸受の材質・形状および冷却方法に関する仕様を示す。また、試験用超電導磁気軸受の概略形状を図 3 に示す。バルク体には、液体窒素温度（77 K）における磁界中の臨界電流密度特性に優れた Gd-Ba-Cu-O を選定した。回転試験用デュワーはバルク体を収納する液体窒素断熱保冷容器であり、それ自身が回転軸の一部となるものである。超電導磁石は、2 個のコイルを配置し、異極に励磁してカスプ磁界を発生させるものを開発した。カスプ磁界とすることで、コイル間の空間の磁界を弱めあう一方、空間における磁界の変化率を大きくする効果があり、液体窒素温度に保持されたバルク体に対して、効果的に電磁力を作用させることができる。超電導磁石の中央部分には、クライオスタット（低温容器）を貫通する室温空間(室温ボア)があり、この中に回転軸となるバルク体を入れた液体窒素断熱保冷容器（回転試験用デュワー）を配置して、軸受を構成した。

表 1 試験用超電導磁気軸受の仕様

ロータ		ステータ	
超電導バルク体		超電導磁石	
材質	GdBCO	線材	Nb-Ti
形状	円板形状, φ 60mm × t20mm 2個二段重ね	形状	室温ボア φ 120mm, カスプ磁場, 磁束密度 5T (Max)
冷却方法	液体窒素 (77K)	冷却方法	冷凍機直接冷却 (4K)

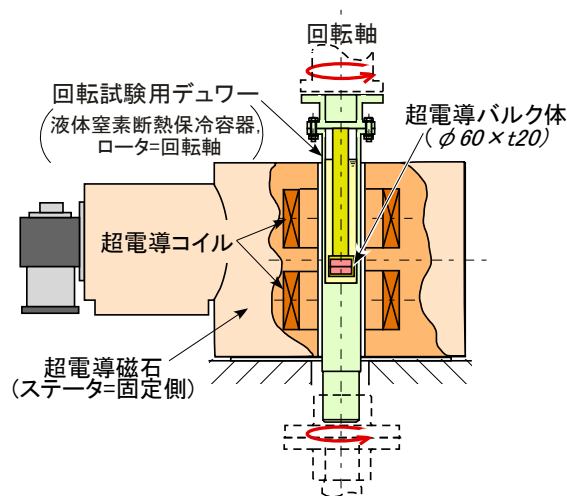


図 3 試験用超電導磁気軸受

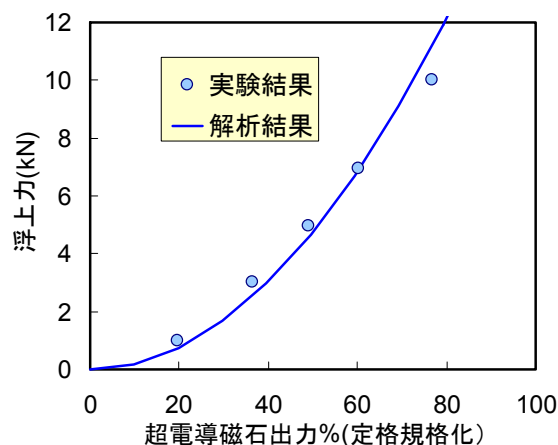


図 4 超電導磁石出力と発生浮上力の関係

バルク体をゼロ磁界冷却（磁界無印加冷却）で十分冷却したのち、超電導磁石を励磁して、発生浮上力を測定した。図 4 に電磁力予測値（電磁界解析結果）と電磁力の測定結果（実験結果）の比較を示す。両者はよく一致しており、超電導磁石の定格出力の 78 % で、超電導磁石の上下方向耐荷重限度 10 kN の電磁力が発生した。従来の液体窒素冷却のバルク体と永久磁石で構成されるスラスト型超電導磁気軸受の単位面積あたりの荷重容量（100 kN/m²程度）に比べて、今回開発した試験用超電導磁気軸受の荷重容量は その 10 倍以上に相当する。

さらにこの試験用超電導磁気軸受で 500 kg の回転体を支持して、高速で回転させる試験装置を製作し、超電導体同士で構成する磁気軸受のスラスト荷重負荷での動的特性を調べた。その結果、最高速度 3000 rpm で回転させる試験においても、顕著な電磁力の低下はなく、安定して浮上位置

が保持できることを確認した。この軸受はラジアル方向にも復元力を持つが、力の大きさが不十分なため、高速回転時には安全のため、機械式のラジアル軸受けを併用したことを付記しておく。

今後は、実用規模のエネルギー容量の実現を目指して、軸受容量の向上を図る。さらに、ラジアル軸受への適用についても検討を進めるとともに、回転体側に配置する超電導体の冷却方法や、周辺要素機器についても技術開発を進める予定である。今回は現状のコストを考え、超電導コイルには Nb-Ti 線を用いたが、将来的にはコイルは高温超電導線材を用いて装置の冷却に伴う消費電力を低減する。同時に図 2 に示すように、バルク体と超電導コイルを一つの真空容器におさめることで磁気結合を向上させてより強力な磁気軸受の構成を目指す。本研究の一部は国庫補助を受けて実施した。

参考 URL : http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/CS/cs_1.6.html

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009

「超電導国際標準化のこれまでと今後」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
標準部

部長 田中靖三

1. はじめに

国際社会は人類の英知の結集によって持続的に発展している。特に、超電導のような先端技術は国際社会を飛躍的に発展させる可能性を秘めている。超電導技術を国際社会の発展に役立たせるためには、超電導関連技術の知的財産権の確保に加え、昨今超電導技術の国際標準化の必要性が重要視されている。ここでは、これまでの超電導国際標準化、その必要性及び今後について述べる。

2. これまでの超電導国際標準化

超電導技術は 1970 年代わが国においてニオブ・チタン合金超電導線を適用した理化学機器としてすでに実用段階に入った。また、1980 年代には診断機器として MRI が急速に普及し、いまや MRI 市場が超電導の国際市場約 5,600 億円の 80 % 以上を占めるに至っている。かかる市場を背景に、超電導国際標準化は 1989 年から IEC（国際電気標準会議）/TC90（超電導）としてスタートした。わが国は、卓越した超電導技術力を背景に 1989 年以降継続して IEC/TC90 の幹事国を務め、超電導国際標準化をリードしている。この間、超電導関連用語規格及び試験方法規格合計 14 件の IEC 規格を発行し、これに整合した 14 件の JIS 規格も発行済である。

3. 超電導国際標準化の必要性

超電導技術分野において、わが国が得意としているニオブ・チタン合金やニオブ 3 すず化合物などの低温超電導技術に加え、1990 年代からビスマス系やイットリウム系などの高温超電導技術が加わった。2000 年代になって、高温超電導技術開発とその応用技術開発競争は激しさを増している。かかる国際的な超電導技術開発競争の中でわが国の超電導技術が停滞するようなことがあれば、わが国の超電導技術の進展が遅れ“ガラパゴス化”は免れないだろう。超電導技術のガラパゴス化を回避するためには、高温超電導関連技術の知的財産権の確保に加え、超電導技術の国際標準化を重視することが必要である。特に、超電導関連用語や基本特性の試験方法の規格化に加え、生産活動や市場活動の基盤ともなる製品規格の充実とその国際標準化が必要である。すなわち、IEC/TC90 の幹事国であるわが国がこの超電導国際標準化を主体的に推進することによってのみ、わが国の超電導技術の“ガラパゴス化”を回避することが可能になるといっても過言ではない。

4. 今後の超電導国際標準化

超電導国際標準化には大電流と強磁界を扱うパワー分野と微弱な信号や情報を扱うデバイス分野に大別することができる。パワー分野では、現在審議中の電流リード、2008 年に国際標準化がスタートした超電導線や超電導電力ケーブル及び 2020 年頃の市場を想定した SMES や超電導変圧器などが国際標準化の対象である。一方、デバイス分野では、パワー分野に比べ市場展開が遅いことを考慮し、高度なデジタルシステムよりも診断機器、計測器、検査機器などのような比較的小規模なシステムのデバイスである超電導センサーを当面の国際標準化対象とする。いずれの分野においてもつぎの 3 点に留意した国際標準化が肝要である。まず、国際社会に限らず張り巡らされている技

術体系に超電導技術を導入することは、丁度ジグソーパズルのカードを超電導カードに入れ替えるような作業である。すなわち、特性面で超電導技術が現行技術に優位であることは当然として、周辺技術との整合性、利害関係者とのグローバルな合意醸成、適用地域やシステムとの整合性並びに経済面での妥当性が明らかにされ、現行技術体系に受け入れられるものでなければならない。次に、超電導のような先端技術の国際標準化には、技術の有用性や経済性に加えて、多様化する社会ニーズに対応し得るスピードと環境や安全などに適合する“品格のある超電導技術”であることが求められている。最後に、超電導技術は日進月歩進展すること、また市場ニーズや社会ニーズの多様な変化することを踏まえて、超電導国際規格を体系的にメンテナンスし、流動的に改廃並びに充実することが必要である。

5. おわりに

100 年以上もある国際標準化の歴史の中で、超電導国際標準化はまだ 20 年の若輩者である。したがって、超電導技術が超電導関連産業を興し国際社会に貢献していくためには、国際合意の基盤となる超電導関係者の理解のみならず周辺技術並びにその関係者からの超電導国際標準化に対する一層の理解の深化とご協力を願いたい。

なお本稿は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により実施したものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会 2009「基調講演-超電導応用機器と酸化物超電導」

明星大学大学院
理工学部電気電子システム工学科
教授 仁田旦三

1. はじめに

将来のエネルギー消費を考える。省エネルギー、低炭素化社会を目指すことを考えると、最終のエネルギー形態が電気エネルギーを増やすことにその解があると考えられている。そこにおいて、その電気エネルギーの発生に関しては、原子力と再生可能エネルギーをさらに用いることで達成しようとしている。すなわち、多様なエネルギーによる電気エネルギー発生と現状の倍以上となる電気エネルギー利用が進められる。この電気エネルギー発生と消費（利用）の間を取持つのが電力系統である。以上の背景に加え、現状のシステムを有効利用する将来の電力系統の構築と運用に解を見いだす必要がある。

2. 電力機器と超電導応用

現状の電力機器は、発電所における発電機、変電所における開閉器・変圧器、それらをつなぐ送配電線からなる。これらの機器の超電導化により、上述の課題に対処できるかを再考してみる。超電導機器の一般的特徴は、小形・軽量・高効率に加え、恒温性にある。この恒温性は機器の寿命を長くする。それ以外の機器固有の特徴を述べる

a. 発電所

発電所の電気機器は、発電機と変圧器、それを接続する母線からなる。超電導発電機の特徴は、よく知られているように無効電力供給能力が高い、安定度向上など電力系統の特性を向上させる。超電導変圧器の効能をもっと調べるべきであろう。母線は、発電機の端子電圧を高くとれないため、20 kA を超える大電流が流れ、この超電導化は、いろいろな意味で有用である。

b. 変電所

変電所は、避雷器、開閉機器、変圧器からなる。変圧器以外の超電導化は難しい。開閉機器ではないが、超電導限流器はその導入により、既存の電力系統の大容量化へ大きく貢献する。

c. 送配電線

超電導送配電線は、架空送電線と同程度の線路定数をもつ。このことは、現用のケーブルにない良い特性である。

3. おわりに

現用の電力系統の一部を超電導化することにより、高性能の電力系統を構築・運用できる。酸化物超電導線は、その特性を生かすことで金属系超電導にない特性を有し、上述の将来の電力系統の課題を容易に解決する手段の最有力候補であると考ええる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 7-8 月の催し物案内

6/28-7/2

CEC & ICMC: Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference

場所: Tucson, Arizona, USA

問合せ: <http://www.cec-icmc.org/>

7/3

第 21 回超電導電力貯蔵研究会

場所: 東海大学校友会館、千代田区、霞ヶ関ビル 33 階

主催: 超電導エネルギー貯蔵研究会

問合せ: 超電導エネルギー貯蔵研究会 筑波研究センター内

Tel: 029-828-7901、Fax: 029-828-7902、E-mail: rasmes@nifty.com

7/17

超電導応用研究会シンポジウム「脳に学ぶ人に優しい情報通信技術」と「超電導を活用した近未来情報通信技術」

場所: 情報通信研究機構・神戸研究所 未来 ICT 研究センター (KARC) 第 1 研究棟、神戸市

主催: 低温工学協会関西支部

問合せ: 神戸大学海事科学研究科 武田 実

Tel/Fax: 078-431-6329 E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp

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

8/18-20

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

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (5/21- 6/19)

- 定説破り「鉄で超電導」証明 細野秀雄さん 壁を超えて 身近な材料「新素材」に一変 5/25 日本経済新聞
- 110 万 V 送電 世界標準電圧に認定 IEC 規格 日本提案盛り込む 5/26 電気新聞
- 脳疾患 自動診断へ 理研と放医研共同研究 CAD 技術応用 5/26 日刊工業新聞
- 今後の技術開発におけるポイント 燃料電池、水素インフラがカギ 5/26 電気新聞
- 超電導の最新動向紹介 ISTE C 都内で 09 年度技術報告会 5/26 電気新聞
- 原子力機構 超電導の解明に糸口 電流の流れ 3 次元観測 5/27 電気新聞
- がん細胞 治療遺伝子を画像化 放医研 鉄集めるたんぱく質利用 5/28 日経産業新聞
- 再生医療や電池チーム公募 先端技術 150 億円助成 政府が新制度 5 年の最大額 5/29 日本経済新聞
- 2050 年の夢技術 太陽エネ、宇宙から地球に送電 6/2 日刊工業新聞
- 核融合実験 大幅遅れ 日欧米など 建設費、計画の倍に 6/2 朝日新聞 (夕)
- 超音波診断装置 主戦場 日本攻略競う GE 横河 大きさ百科事典並み 日立メディコ 半導
体技術で高精細 6/3 日経産業新聞
- 加イムリス MRI 付き手術室、日本で 患者の移動不要、負担軽く 6/3 日経産業新聞
- 船舶用モーター 超電導材料で CO₂ 抑制 ディーゼルエンジン比 25 %削減 IHI など共同で開発
6/6 日本経済新聞
- ITER 計画 見直しを検討 日米欧など 6/8 日本経済新聞
- 放射線治療で生じる活性酸素 MRI で分布観察 放医研 6/8 日経産業新聞
- 2030 年への挑戦 次世代産業技術 高温超電導材料 上 電線に応用、課題は価格 6/9 日経
産業新聞
- 挑戦のとき 神原洋一さん 科学技術振興機構研究員 魅力感じる「錬金術」 6/9 毎日新聞
- リニア「1 県 1 駅」 JR 東海社長 設置費は地元負担 6/9 毎日新聞、日本経済新聞
- 2030 年への挑戦 次世代産業技術 高温超電導材料 下 乗り物・医療・・・用途広く 6/10
日経産業新聞
- 鉄を含む超電導物質 線材試作、通電を確認 物材機構、送電線に応用 6/10 日経産業新聞、
電気新聞
- 放医研 ガン遺伝子治療の様子 MRI で画像化 新技術開発 6/12 科学新聞
- 新エネ事始め 燃料電池 エネ効率高い SOFC 6/12 日経産業新聞
- 燃料電池 発電効率 最高レベルに 日本ガイシが開発 商業施設や家庭向け 6/12 日本経済
新聞
- カーボンナノチューブ 加熱で 100%金属型に 名大が作成技術、分離不要に 6/13 日刊工業
新聞
- 交流標準電源を開発 光パルス駆動型 測定器校正に仕様 ISTE C など 6/13 日刊工業新聞
- ISTEC、産総研など 高精度交流電圧装置を開発 測定結果の信頼性向上 6/15 電気新聞
- 理想の電圧波形を発生 ISTE C などが装置 電子機器の校正向け 6/16 日経産業新聞
- 新エネルギー開発 最先端走る NEDO 新エネ接続、円滑に 次世代送電網の中核技術 系統連
系 欧米と連携、研究加速 6/17 日刊工業新聞

- リニア建設費 3 ルート試算 北へ迂回、最大 6,400 億円増 JR 東海 長野などに説明へ 6/18 日本経済新聞（夕）
- 脳の構造、3 次元模型化 糸井樹脂製作所が独自ソフト MRI 検証や研究向け 6/18 日刊工業新聞
- 伊那谷ルートは 6,400 億円増 JR 東海 リニア工事試算提示 6/19 Fuji Sankei Business i、朝日新聞
- 鉄系超伝導線材簡便な作製方法 物材機構などのグループ開発 多芯化や長尺化が容易 6/19 科学新聞
- 18 年にプラズマ発生 ITER 機構 建設日程を決定 6/19 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 5 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

表彰

Office of Naval Research（2009 年 5 月 20 日）

Office of Naval Research (ONR) のプログラム担当 George Stimak は、世界初の高温超電導船体消磁システムの実現に結びつけたブレークスルー研究におけるリーダーシップが認められ「Top Navy Scientist and Engineer of the Year」を受賞した。この賞は毎年、科学技術上の大きな成果を挙げた海軍軍属及び軍人に与えられるものである。Stimak は次のように述べた。「この賞は私にとって大きな名誉であるが、受賞は研究チーム全体の成果によるものである。NAVSEA の Carderock、産業界、そして特に HTS コイルを設置した駆逐艦 Higgins の乗組員の支援がこの技術開発の成功に不可欠な要素であり、関係者の協力は素晴らしいものであった。」消磁技術により、船体の磁気的な痕跡を消去し、機雷が船体を感知できなくすることができる。

出典:

“Accolades for superior program leadership on groundbreaking superconducting degaussing technology”

Office of Naval Research press release (May 20, 2009)

<http://www.onr.navy.mil/media/article.asp?ID=187>

電力

Zenergy Power plc（2009 年 5 月 1 日）

Zenergy Power plc は、2008 年 12 月 31 日に終了する年度の概要を報告した。特に注目すべきは、E.ON AG 超電導水力発電機の商用化に向けた性能改善のための発注、超電導誘導ヒーターの設置（全ての予測性能を上回り、生産性の向上と大幅な省エネを達成）、Honeywell 社との超電導線材共同開発プログラムの立ち上げ、再生可能エネルギー向け電磁石の試験の成功、スマートグリッド用装置の試験成功と出荷などである。これらは、Zenergy 社にとって 2009 年に向け大きなはずみとなるものであった。米国電力グリッドへのスマートグリッド機器の設置の成功に加え、Zenergy 社はニューヨークの Con Edison 社から 2 台目のスマートグリッド機器のコマーシャルベースでの発注を新たに受けた。Zenergy 社は RWE AG から超電導水力発電機のコマーシャルベースでの発注を受けたほか、950 万ポンドの資金調達を行い米国への活動展開が可能となり、クリーンエネルギー向け米国 stimulus package 資金を得る途も開けた。この stimulus package 資金により、超電導 FCL や誘導ヒーターの商業展望が開ける可能性もある。

Zenergy Power 社長 Michael Fitzgerald は次のように述べた。「世界経済環境の変化により再生エネルギー産業が今日中心的かつ重要な位置を占めるにいたった。2008 年は、再生クリーンエネルギー産業の認知という点でパラダイムシフトが起こり、同産業が持続可能な経済社会の発展の手段を提供しうるものであるという意味でのその重要性が飛躍的に増加した年として認識されることにな

るであろう。クリーンエネルギー産業の隙間産業から主流産業への変化は、投資動向、公共政策、規制の変化として現れており、再生クリーンエネルギー産業の繁栄の基礎が形作られていくであろう。」

Zenergy Power 社 CEO, Jens Mueller は次のように述べた。「全体的に、2008 年は我々の技術が研究開発施設を出て、実際の商業の世界へと入った年と考えてよいであろう。これは、売り上げを通じ、また、第 3 者の試験・検証を通じ達成された。すなわち、我々の技術は研究所内部のみならず実世界の条件に耐えうるものであることが証明されたということである。実世界での運転の重要性はいうまでもないことである。我々は、2008 年の技術成果の結果を受け、多くの商談を進めることができるようになった。」

出典:

“Preliminary Results for the Year Ended 31 December 2008”

Zenergy Power Preliminary Results Report (May 1, 2009)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2009/2009-05-01-final-results.pdf

American Superconductor Corporation (2009 年 5 月 13 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、スペイン ACCIONA SA の子会社である ACCIONA Energy から 1,000 万ドル相当の Dynamic VAR Ride Through (D-VAR RT) ソリューションの発注を受けた。D-VAR RT は運転を妨害する恐れのある電圧変動があっても「ライドスルー」によって個々の風力発電機を円滑に連続運転することを可能にする製品である。AMSC 社の D-VAR RT は、スペインの厳格なグリッド接続基準を既存であれ、新規であれ、風力発電機が満たすことを可能とする。この D-VAR RT は、スペインの最も過酷な気象条件の地域に設置された風力発電所で AMSC-ACCIONA Energy チームによって各般のフィールド試験運転が行われた。このフィールド試験の結果、システムはグリッド接続基準に適合しているという公式認証を受けた。AMSC 社は今後数ヶ月で D-VAR RT システムを納品する予定。AMSC 社 Global Sales and Business Development 担当役員 Timothy Poor は次のように述べた。「ACCIONA Energy は、6,000 MW 以上の風力発電機をすでに保有し、今後 15,000 MW 以上の新設を計画している。同社は世界的なクリーン・エネルギー発電事業者であり、我々の新たな D-VAR RT にとって理想的な第 1 号のユーザーである。風力発電は世界の電力供給により大きな役割を果たしていくものであり、今後数年同様な基準を採用しているスペインを初め、各国において D-VAR RT は大きな市場ポテンシャルを有するものと考えている。」

Global Wind Energy Council によれば、2008 年末時点でスペインは 16,000 MW 以上の発電能力を持つ世界第 3 位の風力発電国である。

出典:

“AMSC Signs Contract with ACCIONA Energy for New Wind Turbine Low Voltage Ride Through Solution”

American Superconductor Corporation press release (May 13, 2009)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1287795&highlight

American Superconductor Corporation (2009 年 5 月 14 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は 2009 年 3 月 31 日に終了する第 4 四半期と通年の収支を発表した。第 4 四半期の収入は、前年同期 3,840 万ドルに対し 60 % 増の 6,120 万ドルであった。粗利益率は、前年同期 33.2 % に対し、当期が 32.6 %。AMSC 社は一般会計原則 (GAAP) による算定で第 4 四半期に同社史上初めて 130 万ドルの利益を生み出した。因みに前年同期は 180 万ドルの赤字。なお、一般会計原則に拠らない (non-GAAP) 算定では AMSC 社の利益は前年同期

の 270 万ドルに対し、当期は 410 万ドルとなる。

通年の収入は 1 億 8,280 万ドルであり、前年度の 1 億 1,240 万ドルに比べ 63 % の増加であった。粗利益率は、前年度 28.5 % に対し当年度は 28.4 %。2008 年度の損失は、一般会計原則 (GAAP) による算定では、前年度の 2,540 万ドルに対し 1,660 万ドル。なお、一般会計原則に拠らない (non-GAAP) 算定では 2008 年度の損失は、前年度の 680 万ドルに対し 310 万ドルとなる。2009 年 3 月 31 日時点で同社は、現金、現金等価物、流通債権、拘束性の現金合わせて 1 億 1700 万ドルを保有している。なお、2008 年 3 月 31 日時点では 1 億 1940 万ドルであった。2009 年 3 月 31 日時点での受注残は 5 億 5800 万ドル。一方、前年同時期の受注残は 1 億 9900 万ドル。この受注残の増加は Sinovel Wind Company から 2008 年 6 月に発注を受けた、風力発電コア電気システム分 4 億 5000 万ドル相当の 3 年契約からの寄与がその大部分を占める。

AMSC 社創立者、CEO、Greg Yurek は次のように述べた。「AMSC 社は 2008 年度第 4 四半期に非常に良好な収支決算を行うことができた。我々は記録となる収入を達成し、初めての黒字決算を実現した。2008 年度中に我々は雇用を 36 % 増やしたが、その間いくつかの風力発電システムや電力グリッドソリューションを開発、市場投入して収入を 63 % 増加させた。我々はこれらを自己資金で行ったが、当該年度を通してみるネットで使った現金はわずかであった。我々は 2009 年度を通して、利益ある成長とキャッシュフロー黒字化を果たすことに力を集中する。また、長期的な成長をより強固なものとするための投資を継続していく。」

AMSC 社は 2009 年度の収入が 2 億 2500 万ドル～2 億 3500 万ドル程度に増加することを予想しており、粗利益率は 30～32 % 程度になるものと見ている。

出典:

“AMSC Reports Fourth Quarter and Full Year Fiscal 2008 Financial Results”

American Superconductor Corporation press release (May 14, 2009)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1288260&highlight

American Superconductor Corporation (2009 年 5 月 27 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、完全子会社の AMSC Windtec™ が知的財産を保有している 2-MW 誘導風力発電機の設計を、インド Inox グループの Inox Wind Limited にライセンスしたと発表した。このライセンスにより Inox 社は全世界での風力発電機の製造販売の権利を取得する。Inox 社は 2010 年から 2-MW 風力発電機の生産を開始する予定である。AMSC 社は、風力発電機の主要部品の製造ラインを含めた現地生産、第 1 号原型機の製造、試験について Inox 社を支援する。その対価として、AMSC 社は一時金、ロイヤルティを受け取るほか、電気システムの供給も行い。Inox 社は現在インドにいくつかの風力発電所を保有しており、各種事業で年間約 6 億ドルの売り上げがある。

AMSC 社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「我々は、インドを我が社製品に大きな成長機会を与える市場と考えている。対中国戦略と同様に、我々は風力エネルギー市場を通じてインド市場に参入した。この市場は我々にとっての大きな利益源であるのみならず、インド国内での我々の各般の事業、人脈の基盤を形成するものである。ここで培われた基盤を元に、風力発電市場のみならず、大きな電力グリッド市場への展開を図っていきたいと考えている。」

出典:

“AMSC Expands Business in India with License to Inox Wind Limited”

American Superconductor Corporation press release (May 27, 2009)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1292657&highlight

医療

Brookhaven National Laboratory (2009 年 5 月 12 日)

DOE の Brookhaven National Laboratory は、より多くの患者の用に供することができる、高精度な粒子照射による癌治療のための簡便で安価なガントリーを開発した。BNL の運営会社である Brookhaven Science Associates は、このガントリー設計についての non-provisional な米国特許を申請し、この特許はすでにライセンシング及び商用開発に適用することができるようになっている。この新しい設計では、より小型の固定磁界超電導マグネットが使われ、粒子線をガイドし、集中させる。この設計により装置の操作が容易になった他、粒子搬送システムのコスト、重量、サイズ的大幅低減が図られた。超電導マグネットの冷却システムを考えたとしても、この粒子搬送システムは従来設計に比べよりコンパクトで経済的である。この新しい設計により、粒子線癌治療施設はその建設、運転がより経済的なものとなり、世界中の癌患者にとって粒子線癌治療がより身近なものとなる。

出典:

“Compact cancer-therapy particle-delivery system patented”

Brookhaven National Laboratory press release (May 12, 2009)

http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=947

量子計算機

University of California – Santa Barbara (2009 年 5 月 28 日)

University of California – Santa Barbara 校では、量子計算機、ひいては銀行業務、薬品設計、その他応用に大きなインパクトを持つ可能性のある光子の量子制御にブレークスルーを果たした。研究グループはジョセフソン接合として知られる超電導電子回路を使って、通常では見られないマイクロ波光子の量子状態を作り出した。実験では、光子は光トラップとして働くマイクロ波キャビティに蓄積された。研究グループは、光トラップ中に蓄積された光子数が異なる状態を同時に実現していることを確認した。内部に蓄積された光子数の測定は光子数を確定してしまうが、測定前には量子的な状態が重畳しており、測定結果には色々な可能性がある。このような量子的な状態の重畳は量子力学の基本的な認識であるが、研究グループの結果は世界で初めてこのような状態が光によって制御できることを示したものである。グループの研究結果は **Nature** に掲載された。研究は、米国連邦政府 Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA) の資金を得て実施された。

出典:

“UCSB researchers describe breakthrough in the quantum control of light”

University of California – Santa Barbara press release (May 28, 2009)

<http://www.ia.ucsb.edu/pa/display.asp?pkey=2026>

通信

Superconductor Technologies Inc. (2009 年 5 月 6 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、2009 年 3 月 28 日に終了する第 1 四半期の収支を発表した。第 1 四半期純収入は、前年同期 350 万ドルに対し、当期は 170 万ドルであった。当期純製品売り上げは、前年同期 200 万ドルに対し、110 万ドルであった。政府契約その他契約による収入

は前年同期 150 万ドルに対し、当期は 546,000 ドル。当期の収支は、前年度の第 4 四半期と比べ同等又は増加している。STI 社社長、CEO、Jeff Quiram は次のように述べた。「我々は、2008 年末の見通しの不透明な時期の後市場が安定に向かっていることに勇気付けられている。本年度第 1 四半期は、製品販売、受注残ともに伸びた。さらに、政府との取引も 2009 年中には増加する見込みである。これは、空軍との Ultra-Sensitive Radio Frequency Receivers (SURF) プログラムの一部である半導体—高温超電導フィルター次期フェーズ開発契約（410 万ドル）によるものである。」また、第 1 四半期中に、中国において CDMA のフィールドテストを終えており、その結果カバレッジと性能が大幅に改善するという結果が得られている。STI 社の SuperLink ソリューションは、今後中国通信ネットワークに展開されることが期待される。STI 社は、米国主要携帯電話会社とともに新しい 700-MHz 帯域を使った Long-Term Evolution (LTE) の北アメリカでのフィールド試験にも参加することになっている。さらに、STI 社は次世代電力グリッド応用に向けた HTS 線材製造など、2 つの戦略イニシアティブに参画、推進している。

純損失は、前年同期の 230 万ドルに対し、当期は 350 万ドルであった。2009 年 3 月 28 日現在で、STI 社は 510 万ドルの現金及び現金等価物を保有し、受注残は 434,000 ドルである（前年同期受注残は 192,000 ドル）。

出典:

“Superconductor Technologies Inc. Reports First Quarter 2009 Results”

Superconductor Technologies Inc. press release (May 6, 2009)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1284920&highlight>

基礎

Washington University in St. Louis (2009 年 5 月 15 日)

Washington University St. Louis 校 (W USL) では、ユーロピウムが 1.8 K、80 GPa の圧力下で超電導になることを発見した。この結果、ユーロピウムは 53 番目の超電導元素、かつ、高压化での超電導体という意味では 23 番目の超電導元素となった。Washington University St. Louis 校物理学教授 James S. Schilling は次のように述べた。「ユーロピウムは固体の状態では、1 原子あたり 2 つの電子を伝導電子として放出し、ユーロピウム自体は磁性を持つ。十分な高压化では、第 3 の電子が放出され、ユーロピウム金属は 3 価になる。3 価のユーロピウムは非磁性であり、適切な条件さえ与えれば超電導体となることが可能になった。」今回の発見は高温超電導の理論モデルにも有用と考えられる新しいデータを提供するもの。研究結果は Physical Review Letters 2009 年 5 月 15 日号に掲載された。この研究は National Science Foundation, Division of Materials Research から 4 年間にわたって提供された 500,000 ドルの資金により実施された。

出典:

“Europium discovery”

Washington University in St. Louis press release (May 15, 2009)

<http://news-info.wustl.edu/news/page/normal/14190.html>

University of Illinois at Urbana-Champaign (2009 年 5 月 27 日)

University of Illinois Urbana-Champaign 校では、超電導極細線中の超電導電子の一団が集団で高電流状態から低電流状態へトンネルすることを証明し、量子トンネル現象のマクロスコピックな証拠を示した。量子トンネル現象は、高電流状態から低電流状態へ電子の一団が「スリップ」し、エネルギーが散逸するといういわゆる「位相スリップ」の結果観測される現象である。これによって

発生する熱のためナノワイアは超電導状態から抵抗状態へと転移する。即ちこの現象が現れたということは量子トンネル現象が観測されたということになる。単一電子のトンネル現象はよく知られているが、細線中の超電導電子の集団トンネル現象の証拠は今日に至るまで殆ど知られていない。今回の量子トンネル現象の研究によって得られた結果は、量子計算機への応用できる可能性もある。グループの研究結果は *Nature Physics* に掲載された。この研究は DOE の資金により実施された。

出典: "Evidence of macroscopic quantum tunneling detected in nanowires"

University of Illinois at Urbana-Champaign press release (May 27, 2009)

<http://news.illinois.edu/news/09/0527tunneling.html>

Forschungszentrum Dresden, Rossendorf (2009 年 5 月 28 日)

ドイツの Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) では、初めて超電導ゲルマニウムを作り出した。また、超電導半導体に関連するいくつかの謎を明らかにした。超電導半導体を作り出すため、母体のゲルマニウム試料を処理し、ゲルマニウム原子 100 個あたり 6 個のガリウム原子をドーピングした。これは極めて高い比率である。このようにガリウムドーピングした 60 nm 厚のゲルマニウム試料において超電導状態が生じた。ドーピング（イオン・インプランテーション）の過程でゲルマニウムの格子はダメージを受けるので、ドーピング後格子の修復が必要である。このため、フラッシュ・ランプによるアニール装置を FZD 内に立ち上げた。この装置内で、ダメージを受けた結晶格子は、ドーピングした原子の分布を維持したまま、試料表面のみを急速に加熱することによって修復される。得られた試料は 0.5 K で超電導となったが、非常に高い臨界磁界特性を有するものであり、非常に有望な材料である。研究グループはイオン・インプランテーションやアニール時の各種パラメータを最適化して臨界温度を改善したいと考えている。現在ゲルマニウムは、マイクロ/ナノエレクトロニクス用半導体材料として見直されており、高速処理やシリコンを超える微細化が可能な材料として有望視されている。半導体ゲルマニウムは新しいコンピューター回路を現実のものとする可能性を秘めている。今回の結果は *Physical Review Letters* に掲載された。

出典:

"Superconducting chips to become reality"

Forschungszentrum Dresden, Rossendorf, press release (May 28, 2009)

<http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=28713&pNid=473>

[超電導 Web21 トップページ](#)

電気学会，電力エネルギーフォーラム

「超電導を用いるエネルギー貯蔵の最先端」報告

上智大学

理工学部機能創造理工学科

教授 高尾智明

春の低温工学・超電導学会の前日である 5 月 12 日（火）の午後，早稲田大学理工学部（東京・新宿区）にて電気学会の超電導フォーラムが開かれ、約 50 名が参加した。正式名は、電気学会電力エネルギー部門の超電導応用電力機器技術委員会（委員長：東北大、濱島高太郎氏）が主催したフォーラム「超電導を用いるエネルギー貯蔵の最先端」である。電力エネルギー部門ではフォーラム制度を 2009 年 4 月にスタートし、当該技術委員会では初めてのフォーラム開催である。

今回のフォーラムは、技術委員会傘下の調査専門委員会が解散後に開いていた講習会に代わるものである。対象となる調査専門委員会は 2 つあり、一方は「超電導応用機器設計基礎技術調査専門委員会（技術報告書番号 1120 号）」で、石山敦士氏（早大）が委員長を務めて 2007 年 3 月まで 3 年調査活動を行った。他方は「超電導磁気軸受フライホイールエネルギー貯蔵システム調査専門委員会（技術報告書番号 1152 号）」で、大崎博之氏（東大）が委員長を務め 2008 年 3 月まで 2 年間の活動期間であった。

両方の調査専門委員会の共通テーマとしてエネルギー貯蔵を取り上げ、前者の調査専門委員会からは広範な調査範囲の中で SMES を選び、後者からは委員会名自体であるフライホイール及び要素として超電導磁気軸受を選び、両委員会から 3 名ずつ合計 6 名の講師が各 40 分間講演を行った。



講演 3 件の前半 SMES については、主に NEDO プロジェクトとして実施されてきた SMES 開発の内容が話された。まず中部電力の長屋重夫氏が「強制冷却超電導 SMES（フェーズ 1 と 2）」と題して、SMES の動作原理や特徴、プロジェクトの第 1 フェーズ及び第 2 フェーズの概要、それぞれのフェーズでの具体的な開発内容や試験結果などを講演した。次に野村俊自氏（東芝）が「瞬低用 SMES」との題目で、開発の経緯、システム性能、超電導マグネット、動作実績など講演した。そして「高温超電導 SMES」として石山敦士氏（早大）が、フェーズ 2 から現在までの HTS 線材やコイル開発の進展、主要な成果、課題などを講演した。

後半 3 件の講演は超電導フライホイールがテーマである。テーマと調査専門委員会の活動内容がよく重なるため、まず大崎博之氏（東大）から委員会全体の活動やその報告書（第 1152 号）の内容が「超電導フライホイールエネルギー貯蔵システムの概要」と題して説明された。そして、各種のフライホイールシステム、要素技術として磁気軸受が話された。次に腰塚直己氏から「我が国における超電導フライホイールエネルギー貯蔵システム研究開発プロジェクトの概要」との題目で、こちらも SMES 開発と同様に NEDO プロジェクトとして開発が行われた高温超電導磁気軸受フライホイールシステムの第 1 フェーズ及び第 2 フェーズの概要、及び具体的な開発内容や試験結果などが講演された。最後に「超電導磁気軸受の特性解析と設計の考え方」と題して、東大の出町和之氏が軸受の磁気浮上力を維持する運転方法、回転数を保つ技術などを講演した。

なお、これらの調査専門委員会の活動報告をとりまとめた技術報告書（第 1120 号、第 1152 号）は、電気学会のホームページにて有償で入手できる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「CIGRE—D1-Workshop」報告

東京電力株式会社
技術開発研究所超電導技術グループ
三村智男

平成 21 年 5 月 13 日～15 日に国際大電力システム会議（CIGRE）試験法の Workshop が名古屋大学 野依（Noyori）科学研究室で開催された。参加数は約 80 名（外国人：約 20 名、一般参加：約 40 名、学生：約 20 名）程度であった。超電導応用機器の標準化に関する各分野の専門家が集まり数々の議論がなされた。

5/13 はケーブル、SMES、共通試験技術、Y 系線材応用、5/14 は限流器（FCL）に関して、総計 23 件の発表（Plenary：4 件）がなされた。最終日はテクニカルツアー（名古屋大学大久保先生、早川先生の研究室が対象）が開催された。

各機器毎に以下に報告をする。

【ケーブル】：6 件

- ・ 試験法に関しては、既に系統に接続されている LIPA、オーバニーのプロジェクトは IEC 規格等を用いた試験を実施したとの報告がなされたが、どちらかと言えば既に定められた値の課電試験を実施して問題なし、という内容であり、「超電導ケーブル独自の試験内容を詰める」という議論はあまりなかった。
- ・ 上記の方向性は韓国も同様であり、KERI の Cho 氏曰く、試験電圧が一緒なので、CV や OF と絶縁厚は一緒、とのこと。KEPCO/LS 新規プロジェクトは 500 m、1 接続部。

【機器】：SMES3 件、オランダケーブル 1 件

- ・ 中部電力 SMES の発表には線材コストの要求仕様はどれくらいか？との質問あり。回答は塩原 ISTECH・PL から、約 3 円/Am 程度。
- ・ オランダの 6 km のケーブル PJ 紹介あり。やはり実施するようなコメントであったが、発表については冷却システム（圧力損失）の話であり、液体窒素をフォーマー内（中空）と外側の「行って来い」の場合のシミュレーション結果が示されていた。

【試験法】：大久保先生&ORNL

- ・ 大久保先生からは従来機器の場合の試験法、特に試験電圧の決め方についてのプレゼンがなされた。機器毎（ケーブル・変圧器・SMES・限流器）についてそれぞれ述べており、重要なことは、「通常、部分放電開始電界（PDIE）と AC 破壊電界（BD）、インパルス部分放電開始電界と破壊電界の 4 点をまず把握した後、設計電界を決定するはずで、その上でマージンをどの程度の設定、試験電圧を決定するか」ということである。

【Y 系線材】

- ・ ISTECH の現在フェーズのプロジェクトが紹介された。限流器は何故プロジェクトのテーマに入っていないかというような質問があり、先導プロジェクトで実施済みであるため、各メーカー独自の判断に委ねられている旨説明された。

【FCL】：8 件

- ・ 限流器のプレゼンは日本 2 件（柳父・早川両先生）、独 3 件（Nexans, Siemens, Karlsruhe）、米、伊、ニュージーランドという構成であり、セッションのプレゼンはなかったが、韓国・中国でも研究がなされている。ケーブル PJ は大々的なイメージがあるが、研究実施して

いる国の数としては FCL の方が多いかもしれない。

- ・ ただし限流器のスペックとしては、未だ配電系統レベルのものしかなく、本 Workshop では試験法関連が主題であるため、ニーズの話題にはあまりならなかったが、High Voltage の限流器開発が必要といったような意見はなかった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい「不確かさ」のおはなし（その 4）

産業技術総合研究所

計測標準研究部門 応用統計研究室

榎原研正

5. 標準不確かさの A タイプ評価

標準偏差相当の大きさとして表現した不確かさを標準不確かさと呼ぶことはすでにお話ししました。標準不確かさの評価の方法を、GUM は次の 2 種類に分類しています。

A タイプ評価 = 一連の観測値に対する統計的解析による方法

B タイプ評価 = 統計的解析以外による方法

A タイプ、B タイプというのは身も蓋もない呼び方ですが、ばらつき、かたよりという不確かさの性質によらず、評価の方法で分類している点は重要なポイントと考えられます。評価方法で分類したのは、前節でやや長々と述べたようにばらつきとかたよりの区別を厳密に行うことはできないことと、GUM は評価の手続きを定めることを目的に書かれた文書であることから来していると考えられます。従来の「誤差評価」において、誤差をばらつき（偶然誤差）とかたより（系統誤差）に分類しているのとは、分類の考え方が違います。

家庭用血圧計の例（3 節）でいうと、繰り返し測定 of ばらつきは、複数のデータから実験標準偏差を求めているため A タイプ評価、目盛りのずれは外部情報にもとづいているため B タイプ評価に分類されます。今回は A タイプ評価の方法について解説します。

5.1 平均値の不確かさ

測定量 X に対して、 n 回測定を繰り返して得た一連のデータを $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ とします。これらの平均値と実験標準偏差をそれぞれ $\bar{x}$, s とします：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

X に対する最終的な測定結果を $\bar{x}$ とする場合、繰り返しのばらつきに起因するその標準不確かさは次の式で求められます。

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{A タイプ評価の基本式}) \quad (3)$$

これが A タイプ評価の最も基本的な式です。この式右辺の $1/\sqrt{n}$ と式 (2) の $1/\sqrt{n-1}$ の因子は少し紛らわしいので注意が必要です。前者は $\bar{x}$ が n 個のデータの平均であることから、後者は平方和 $\sum (x_i - \bar{x})^2$ の自由度が $(n-1)$ であることから来ています。

現実の測定では、必ずしも繰り返しが行われるとは限りません。1 回の測定で得たデータ x_1 をそ

のまま測定結果とすることはよくあります。その場合、式 (3) の分母では $n = 1$ とおけばよいのですが、データ 1 個では実験標準偏差 s を求めることはできません。また、 n が 1 でなくとも、2 や 3 といった小さな数の場合には、求まった s は信頼のおける値になりません。このような場合、 s を求めるための実験をあらかじめ別に行うことになります。あらかじめ行った m 回の繰り返し測定で得られたデータを $[q_1, q_2, \dots, q_m]$ とするとき、実験標準偏差 s はこれから、

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (q_i - \bar{q})^2} \quad (4)$$

これを式 (3) に代入することにより

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(m-1)} \sum_{i=1}^m (q_i - \bar{q})^2} \quad (5)$$

となります。これは、測定結果 $\bar{x}$ を求めるためのデータセットと不確かさを求めるためのデータセットが異なる場合に、式 (3) を一般化したものと考えられます。信頼性の高い s を求めるためには繰り返し数 m を大きくすれば良いのですが、どれ程大きければ良いかについては囲み記事 [5] を参照下さい。

5.2 因子 $1/\sqrt{n}$ について

基本式 (3) における $1/\sqrt{n}$ の意味について考えます。いま、血圧測定のばらつきを調べようとしているものとし、血圧のデータを次の 2 つの方法で記録するものとします。

[方法 A] 1 回毎の測定データをそのまま記録する

[方法 B] 4 回繰り返し測定したときの平均値を 1 回分のデータとして記録する

[5] A タイプ評価における測定の繰り返し数について

実験標準偏差を求めるための測定の繰り返し数 m をどの程度大きくとれば良いかについて、定説は実はありません。容易に繰り返し測定ができる場合には、大まかな目安として $m = 10$ 程度をここでは推奨したいと思います。

無限回測定を行ったと仮想したときのデータの集合（母集団）の標準偏差が母標準偏差 (σ) です。実際に無限回測定は行えませんので、母標準偏差は不可知量です。実験標準偏差 s は母標準偏差 σ の推定値として用いられます。 s は σ のまわりでばらつきますが、 m が小さいほど、このばらつきが大きく、従って推定の信頼性が低くなります。

s がどの程度ばらつくかを見るため、 s の分布の 95 % を含む範囲を繰り返し数 m の関数として示したものが下の図です。縦軸は s/σ で、この値が 1 であれば s が σ を正しく推定していることになります。図の下側の曲線が 2.5 パーセンタイル、上側が 97.5 パーセンタイル、両曲線の間が 95 % をカバーする区間で、区間の上下幅が狭

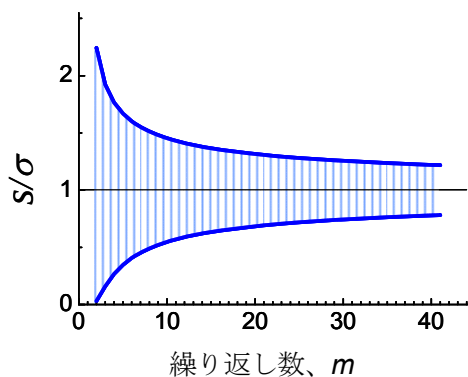


図 A1 実験標準偏差 s の 95 % 存在範囲

いほど、 s の信頼性が高いといえます。およそ $m = 10$ 程度までは、 m が増えるにつれて区間幅は速やかに狭くなっていきますが、 $m = 10$ を超えるあたりでそのスピードが鈍ります。これ以上 m を増やしても労多くして功少なしとなるのが、 $m = 10$ 程度が妥当ではないかと考える理由です。

m を繰り返し数と呼びましたが、何らかの測定条件を変えた反復の回数についても事情は同じです。単純な繰り返しと比べると反復の回数を大きくとることは一般に難しく、 $m = 10$ を実現することは難しいことも多いと考えられます。このようなときには、不確かさ評価結果の信頼性とそのために必要となる労力を天秤にかけて、 m の大きさを決める必要があります。

図 1 にこの様子を示します。記録を無限回行ったと仮想したときの値の集合は測定値の母集団で、その分布は図 1 下部のような確率密度関数 $p(x)$ で表すことができます。方法 A の母平均を μ 、母標準偏差を σ とすると、方法 B では母平均は μ のままで、母標準偏差が $\sigma/\sqrt{n} = \sigma/2$ と半分になることが証明できます（囲み記事 [6] 参照）。

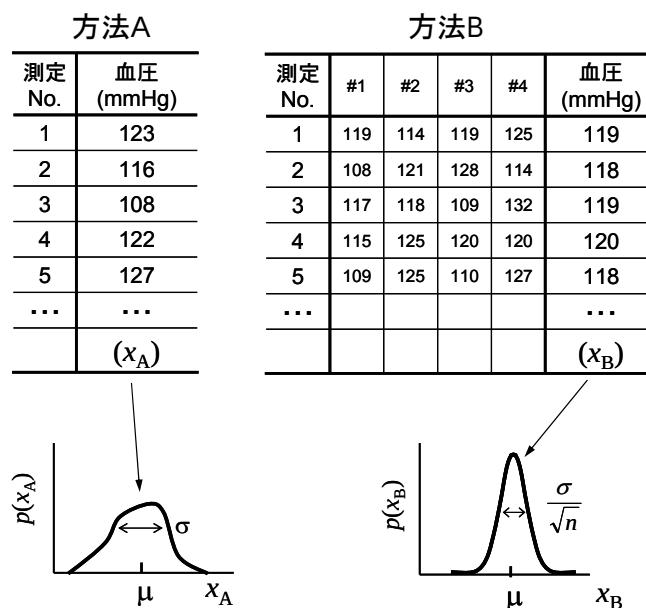


図 1 生データの分布と平均値の分布

[6] 試料平均の母平均と母標準偏差

個々の測定データ x_i ($i = 1 \sim n$) は、母平均を μ ($= E[x_i]$) として次のように表すことができます。

$$x_i = \mu + \varepsilon_i \quad (A1)$$

ε_i は誤差で、互いに独立、期待値はゼロ、分散は σ^2 と仮定します ($E[\varepsilon_i] = 0$, $V[x_i] = V[\varepsilon_i] = \sigma^2$)。 $E[\varepsilon_i]$ がゼロでないときは、それを μ に繰り込んだ残りを ε_i と再定義すれば良いので、 $E[\varepsilon_i] = 0$ は妥当な仮定です。なお、 $E[\]$, $V[\]$ の記号については、3 節の囲み記事で説明したように $p(x)$ を確率変数 x の確率密度関数として、

$$E[x] \equiv \int x p(x) dx$$

$$V[x] \equiv E[(x - E[x])^2] = \int (x - E[x])^2 p(x) dx$$

がそれぞれ x の期待値と分散を表します。 x_i の試料平均は、式(A1)から、

$$\bar{x} = \mu + \sum_i \varepsilon_i / n \quad (A2)$$

で、これに対して期待値を求めると、 $E[\bar{x}] = \mu$ が容易に得られます。これは平均値をとっても元のデータと母平均は変わらないことを意味しています。一方、 $\bar{x}$ の分散は、

$$V[\bar{x}] = E[(\bar{x} - \mu)^2] = E[(\sum_i \varepsilon_i)^2 / n^2] = E[\sum_{i,i'} \varepsilon_i \varepsilon_{i'}] / n^2 = \sigma^2 / n \quad (A3)$$

となります。ここで、 ε_i が相互に独立との仮定から、 $i \neq i'$ に対しては $E[\varepsilon_i \varepsilon_{i'}] = 0$ となることを使っています。従っ

て $\bar{x}$ の母標準偏差は

$$\sqrt{V[\bar{x}]} = \sigma / \sqrt{n} \quad (A4)$$

となり、もとのデータの母標準偏差の $1/\sqrt{n}$ 倍になることがわかります。

平均値をとるとその母標準偏差が小さくなるというのは重要な性質です。これが何故起きるかわかるが、図 1 の例で例えば 108 mmHg というのは方法 A におけるデータの中で極端に小さい値です。方法 B で 108 mmHg という値が記録されるためには、4 回の測定で連続して 108 mmHg 付近の値が出る必要があります。極端な値が 4 回連続する確率は当然小さく、結果として平均値は中心付近の値となる確率が高くなります。このため確率分布の分布幅が狭くなる、すなわち母標準偏差が小さくなることになります。

以上から、 n 個のデータの平均値 $\bar{x}$ の標準不確かさとして $u(\bar{x}) = \sigma / \sqrt{n}$ とすれば良いのですが、母集団のパラメータである σ は不可知量ですので、 σ をその推定値 s で置き換えた式 (3) が基本式として用いられるのです。これが式 (3) 右辺における因子 $1/\sqrt{n}$ の由来です。

平均値をとることのもう一つの効果として、もとの確率分布の形状が（ほぼ）どのようなものであっても、 n が大きくなるとともに平均値の分布形状は正規分布に近づくという性質があります。これは統計学において中心極限定理として知られている有名な定理です。測定データを統計的に解析する場合に、しばしば正規分布が仮定される根拠はこの定理にあります。

5.3 ばらつきに構造がある場合の A タイプ評価

短期間の繰り返し測定のばらつきを ε 、日によるばらつきを γ として、測定データが

$$x = \mu + \gamma + \varepsilon \quad (6)$$

とモデル化できる場合を考えます。ばらつきに階層構造がある例です。ここで μ は母平均です。 γ と ε の期待値はゼロ、分散はそれぞれ σ_γ^2 , σ_ε^2 と表記します ($V[\gamma] = \sigma_\gamma^2$, $V[\varepsilon] = \sigma_\varepsilon^2$)。 r 日にわたり、各日ごとに n 回の繰り返し測定を行ったときの平均値を測定結果として用いるものとします。個々の測定データ x_{ij} は

$$x_{ij} = \mu + \gamma_i + \varepsilon_{ij} \quad (i = 1 \sim r, j = 1 \sim n) \quad (7)$$

と表せます。 nr 個全部のデータの平均値は

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n x_{ij} = \mu + \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \gamma_i + \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

で、これを用いると $\bar{\bar{x}}$ の分散が、囲み記事 [6] と同じ考え方により、次のように求まります。

$$V[\bar{\bar{x}}] = \frac{\sigma_{\gamma}^2}{r} + \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{nr} \quad (9)$$

σ_{γ}^2 , σ_{ε}^2 はいずれも母集団のパラメータで不可知量なので、これらを何らかの方法により推定したものをそれぞれ s_{γ}^2 , s_{ε}^2 と表記します。 $\bar{\bar{x}}$ の標準不確かさの内、ばらつきに起因する成分は以上から次のようになります。

$$u(\bar{\bar{x}}) = \sqrt{\frac{s_{\gamma}^2}{r} + \frac{s_{\varepsilon}^2}{nr}} \quad (10)$$

これは、ばらつきに 2 層の階層構造がある場合の A タイプ評価の基本式です。 $\bar{\bar{x}}$ は、日間ばらつきについては r 個の、繰り返しばらつきについては nr 個の平均になっているため、式 (10) 右辺の分散のそれぞれの分母に、対応する因子が現れることがポイントです。

式 (10) に則って A タイプ評価を行うためには、 s_{γ}^2 と s_{ε}^2 を分けて評価する必要があります。単純に x_{ij} の実験分散を計算してもこれらを求めることはできず、分散分析といわれる統計的手法を用いる必要があります。分散分析は x_{ij} を対象に行うことも可能ですし、 n, r の大きさが十分でない場合には、別途行った実験で求めたデータ q_{ij} によることも可能です。これは式 (3) と (5) の関係に対応します。分散分析については今回は説明する余裕がありませんが、いずれ機会があれば触れたいと思います。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q:「日常身近な超電導応用（エネルギー、医療、交通、エレクトロニクスなど）の展望について教えてください。」

A:「超電導という言葉は聞いたことがあるけど、それが何なのかよく分からない。どんなところに使われるのかも分からない」と言われる方は多いと思います。ここでは、そういう方のために身近な超電導応用について考えてみましょう。“身近な”という言葉は“特定の人だけではなく、誰でもその恩恵を受けられる”という意味で考えて、現在どのような超電導応用が利用できるのか、また将来どんな応用が期待できるのかということを述べます。

具体的な応用について述べる前に、超電導現象を利用すると何ができるのかを考えて見ましょう。主には次のようなことが実現できます。

- ① 超電導線には沢山電流を流せるので、強い電磁石が作れる
- ② 超電導体は電気抵抗がないので、電線や薄膜として使うとほとんどエネルギーの損失がない（直流では損失ゼロ、交流では僅かに損失が起こるが、銅線に比べればはるかに小さい）
- ③ 超電導体に磁石を近づけると、反発して浮き上がる性質がある
- ④ 一度流した電流は超電導が保たれている限り永久に流れ続けるので、電流の形で電気を貯めることができる
- ⑤ 地磁気の 1 億分の 1 以下の微かな磁界を検出することができる
- ⑥ 300 GHz から 1 THz という高い周波数（テラヘルツ領域）¹⁾ の電波を検出できる
- ⑦ 僅かなエネルギーで超高速の演算ができる

超電導現象を利用した機器は非常にたくさん考えられます。図 1 には 2020 年の社会像として、どんな分野に超電導が使われていくかが示されています²⁾。まず、現在すでに使われているものを紹介します。

現在私達が恩恵を受けることのできる超電導応用機器として最も良く知られているのは、MRI (Magnetic Resonance Imaging) 診断装置でしょう。病院で自分の身体の断層写真（脳や心臓など）を撮られた方も多いと思います。その時使われた装置が MRI とよばれるものです。MRI には強い磁界を発生させる電磁石が必要です。そのためには①の性質が役立ちます。現在病院で使われている MRI の 9 割以上が超電導磁石を使っています。

SQUID（超電導量子干渉素子）とよばれる高感度の磁界検出装置も使われ始めています。これは⑤で述べたように地磁気の 1 億分の 1 以下の微弱な磁界が検出できます。たとえば、人体から発生する磁界（生体磁気という）を検出することができます。これまでの医療機器では発見の難しい虚血性心疾患などの診断に有効であると期待されています。人体に非接触で計測できるので母親の体内にいる胎児の心臓疾患の診断にも有効です。

そのほかにも、②の性質を利用して非常に理想的なマイクロ波フィルターが作れます。これは必要な周波数の電波だけを通過させ、それ以外の電波を遮蔽する装置です。米国では 7,000 箇所以上の携帯電話基地局に使われており、中国北京でもチャイナテレコムが稼働中の 8 つの基地局に試験的に導入しています。

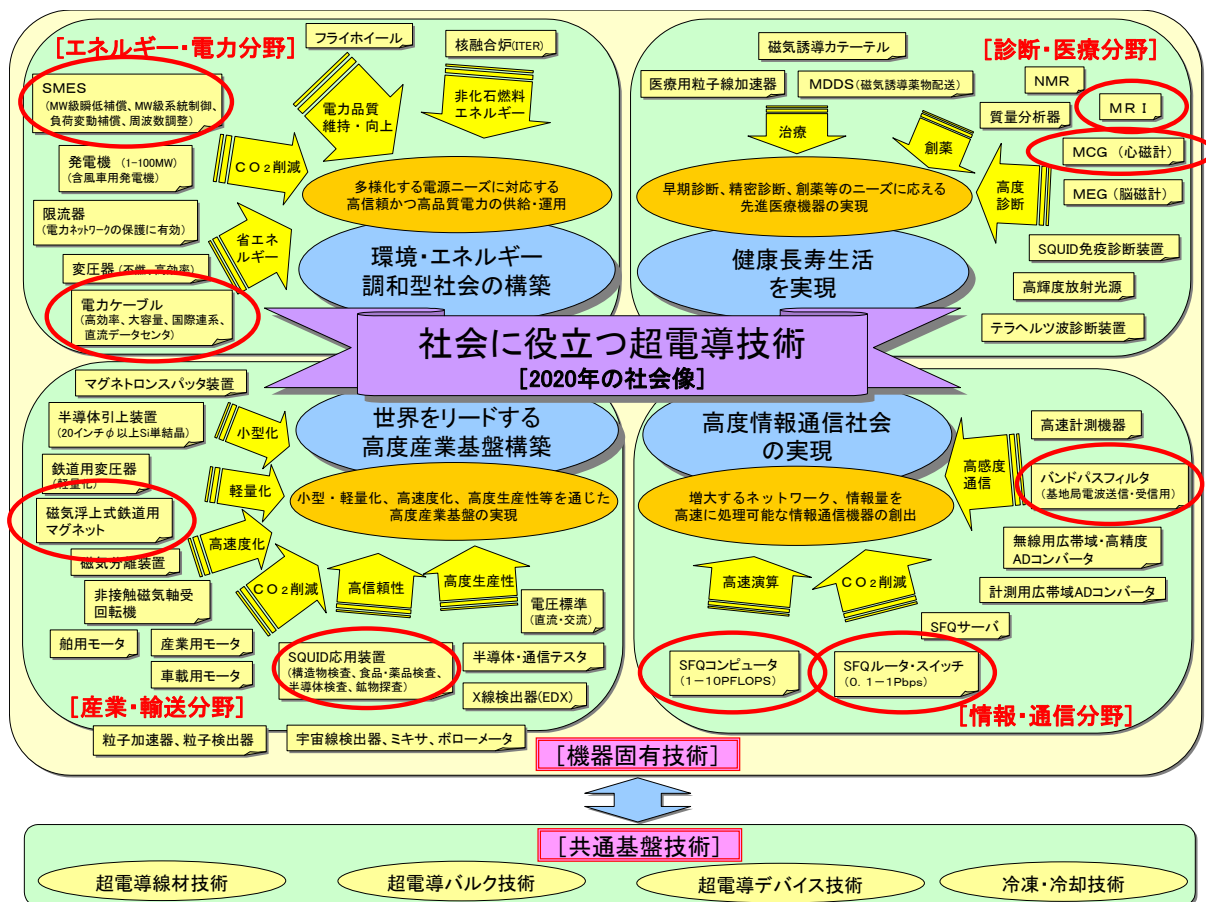


図 1 20 20 年の社会像²⁾。赤丸で囲ったものが本文で述べる応用機器

近い将来実用化されそうな身近な超電導応用を各分野からいくつか選んでみましょう。

1. エネルギー・電力分野

例えば電力ケーブルの開発です。これは電力を送る電線です。先に述べた②の効果を利用するものです。大きな電力を送る場合は超電導を利用することによって、十分省エネ効果があり環境保護に寄与できます。

④の効果を利用すると電力を貯めることができます。SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) とよばれる装置です。電圧変動のない安定した電力供給ができるようになります。

2. 診断・医療分野

⑥の性質を使ってテラヘルツ波の応用も進められています。癌細胞と正常細胞でのテラヘルツ波の吸収の様子が異なることを利用して、癌病巣を発見する試みが行われています。

3. 産業・輸送分野

最も良く知られているのが、2025 年に東京―名古屋間を走ることが予定されているリニアモーターカーでしょう。現在の新幹線の 2 倍近いスピードがでます。これは①の性質を利用しています。

先に述べた SQUID は診断・医療の分野だけでなく、いろいろな分野で非破壊検査に使うことができます。大きな構造物の内部亀裂を外部から非破壊で発見することもできます。

4. 情報・通信分野

超電導現象を使って論理回路を作ると、半導体に比べて消費電力が 1000 分の 1 程度で、動作速

度が 10 倍以上高速になります。⑦の性質です。

ここで述べたもの以外にも非常に多種多様な超電導機器の開発が進んでおり、あと 10 年後、20 年後にはいろいろな分野に導入されると思います。

ここでは超電導応用のほんの一部を述べたに過ぎません。もっと多くの種類の、現在はだれも思い付いていないような応用が実現される可能性もあります。③の現象を利用すれば、父親に手を引かれた花嫁が、ヴァージンロードの上を浮いて、まさに地に足が着かない状態で、新郎の胸に飛び込むかもしれません。

いろいろな分野で使われるとはいっても、ユーザから見れば超電導がどこに使われているのか分からない場合が多いと思います。縁の下の力持ちとして、人々の安全・安心な生活を支え、地球の環境を守り、快適な生活を支援することに大きく貢献するでしょう。

参考文献

- 1) http://www.istec.or.jp/Web21/PDF/09_2/all.pdf p.26
- 2) http://www.nedo.go.jp/roadmap/2007/data/manu_6.pdf p.6

回答者：SRL/ISTEC 特別研究員 蓮尾信也

[超電導 Web21 トップページ](#)