

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導産業機器技術の展開

- 超電導産業機器技術の動向
- Y 系高温超電導モータの開発
- 風力用突極型 HTS 同期発電機の技術開発
- 輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機システムの技術開発の進展
- Y 系超電導線のマグネットテクノロジー
- 12 層パンケーキ 5.1T 伝導冷却型 Y 系コイルの開発
- 磁気浮上用高温超電導マグネットの開発

○超電導関連 2012 年 3-4 月の催し物案内

- 新聞ヘッドライン（1/19-2/17）
- 超電導速報—世界の動き（2012 年 1 月）
- 「応用物理学会 超伝導分科会 第 44 回研究会 ジョセフソン効果 50 周年記念『超伝導エレクトロニクスにおける新しい胎動』」報告
- 隔月連載記事—やさしい人工ピンのおはなし（その 2）
- 読者の広場(Q&A)—超電導状態になる炭素繊維を開発したとの新聞記事がありました。という特徴を有しているのでしょうか。また、どういう応用が期待されるのでしょうか？

[超電導 Web21 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) 3536-5717

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



この「超電導 Web21」は、JKA の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導産業機器技術の動向」

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
教授 大崎博之

超電導技術の産業分野への応用の中で、今後の展開が注目されるものの一つとして、高磁場による配向技術がある。結晶や微粒子の配向などに磁場印加が有効であり、興味深い研究成果が報告され、超電導材料の作製プロセスにおいても高磁場を印加し、配向制御を行う可能性が示されている。永久磁石の着磁への超電導マグネット適用のための開発もみられる。また、住友電気工業（株）は DI-BSCCO 線材を用い、磁場強度を高速で変化可能な冷凍機冷却型超電導マグネットシステムを開発し、BH カーブトレサ用としての可能性を示すなど、直流磁場だけでなく、比較的高速な変動磁場発生装置としての応用も実現性が出てきた。このように高温超電導マグネットの性能向上が新たな革新的な材料プロセスや計測技術などに結びついて、超電導技術の市場が広がることが期待される。

高温超電導技術の回転機への応用は交通輸送機器システム応用や風力発電機などを中心に研究開発が進められている。ある程度の装置サイズ、出力が必要な応用であるので、着実に成果を上げ、超電導機器の優位性を実証していくことが必要である。

Bi 系コイルがいろいろと実績を上げてきている一方、RE 系コイルについても精力的な研究開発が行われ、コイル化技術の向上、成果の進展が見られる。平成 23 年 9 月には NMR 用として 24 T の磁場発生が報告され、SMES 用の比較的大型のコイル開発や、回転機や磁気浮上鉄道用レーストラックコイルなどにおいても RE 系コイルのポテンシャルを示す成果が報告されている。

超電導リニア中央新幹線についてはこの 1 年間で次のような進展があった。平成 23 年 5 月 27 日、国土交通大臣より JR 東海に対して中央新幹線建設の指示があった。東京都と大阪市を結ぶ中央新幹線は、超電導磁気浮上方式により最高設計速度は 505 km/h とされ、車両費を含む建設費概算は 90,300 億円である。技術的な進展としては、これまで車上電源として利用されてきたガスタービン発電装置の代替として、誘導集電が「車上電源として実用化に必要な技術として確立している」との評価がなされ、中央新幹線で採用されることになった。平成 9 年から行われてきた山梨リニア実験線の先行区間（18.4 km）を使った走行試験は平成 23 年 9 月末で終了し、この間約 87.4 万 km の走行実績をあげた。現在、設備更新・延伸工事が進行中であり、平成 25 年度中に工事が完了し、総延長 42.8 km の実験線で新型車両 L0 系による走行試験が開始される予定である。一方、JR 東海は中央新幹線建設のための環境影響評価方法書を公表し、沿線自治体ではそれに対する検討が行われている。また、駅の建設費を JR 東海が負担ことも発表した。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「Y 系高温超電導モータの開発」

産業用超電導線材・機器技術研究組合(ISTERA)

特別研究員

山田 穰

本誌 2004 年の 4 月号に“超電導回転機の技術開発”の特集が組まれて当時の現状が述べられているが、これまでの超電導モータの開発は Bi 系線材、バルクを用いたものであった。例えば、米国の AMSC 社、ドイツの Siemens 社、韓国の Doosan 社、日本の川崎重工などにより、船用、産業用モータのモデル検討が精力的になされてきた。大きさは、MW 級が多く、最大で 36 MW 級の船用まで開発されてきた。超電導により、界磁コイル（直流）の損失を減らすことができ、電流密度も大きくとれるので、コンパクト、軽量、高効率化が期待できる。例えば、AMSC 社、Siemens 社は、いずれも Bi 系線材により 36 MW、4 MW 機の船用回転機を開発してきたが、未だ商用には至っていない。

このため、Ag の使用量がごくわずかで低コスト化が見込め、かつ、高温で磁場中臨界電流 (I_c) が高く、コンパクト、軽量化が一層見込める Y 系 (Gd など RE 系全体を含む) 線材による検討が望まれていたが、近年になり、km 級長尺化など Y 系線材の進展が著しく、機器応用検討が可能な時代になってきた。このため、産業用超電導線材・機器技術研究組合 (ISTERA) (組合員 ISTECH、フジクラ、昭和電線) と九州大学では、2010 年 3 月から 2011 年 5 月にかけて約 1 年で Y 系線材によるモータ用界磁モデルコイルの検討とモータ設計を行ない、以下の点を明らかにした。¹⁾

1. 回転機用レーストラック形状コイル

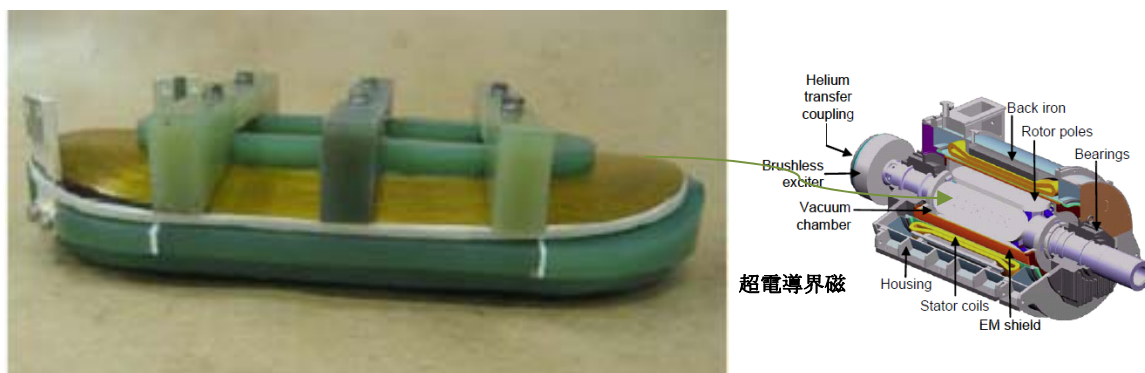


図 1 左) 長尺 Y 系線材によるモータ用レーストラック界磁コイル。長さ約 30 cm、幅約 15 cm、厚さ約 5 mm。右) 超電導界磁を用いたモータの模式図 (AMSC 社による)。

すでに多数の Bi 系線材で実績がある様に、回転機応用には、回転するシャフトに取り付ける界磁コイルとして長円形型のレーストラック型の検討が必要である。他方、Y 系線材は従来の超電導線材と形状が大きく異なり、超電導層厚みわずか $1\ \mu\text{m}$ 程度、幅が 5 mm あるいは 10 mm であり、非常にアスペクト比が大きい。極薄高アスペクト線材である。よって、各工程での機械特性による影

響を調べるために、Y 系線材を用いた種々のコイルを作製、試験した。一例を図 1 に示す。レーストラック形状で、かつ、モータのロータ曲面に合うような湾曲した鞍型形状にしてある。線材は、幅 5 mm に切断し、安定化のために Cu 層が被覆されている。その中に厚み 1-2 μm の GdBCO の超電導層があるが、巻線、含浸、冷却、励磁過程で劣化することなく、所定のコイル特性を得ることができた。Y 系線材の機械特性を事前に把握するなどして、図 1 の様な異型のコイルでの劣化を抑えた。図 2 は、そのコイルの電流-電圧特性である。短尺測定の臨界電流と同等の $I_c=81\text{ A}$ (5 mm 幅) を得た。また、 n 値も図中の式に示すように、34 と非常に良好な値を得て、これも劣化がないことを確認した。その他のコイルの試験では、温度 40 K~60 K において冷凍機冷却試験を行い、各温度で 150-250 A の通電を行い、高いコイル I_c が線材の劣化なく得られることを検証した。

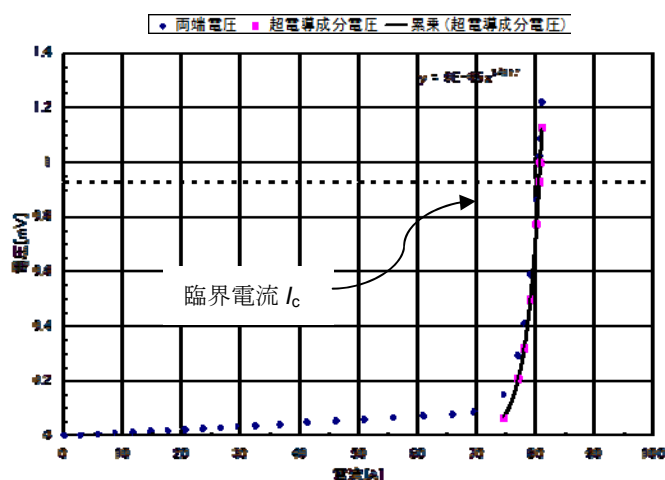


図 2 Y 系レーストラックコイルの励磁結果 (液体窒素中)。コイルの電流 I -電圧 V 特性である。使用した短尺線材の特性と同等の臨界電流 $I_c=81\text{ A}$ 、 n 値 34 の高い値が得られた。
●は、コイル全体の両端電圧、●は両端の抵抗分を除いた超電導部分の電圧。

2. 500 kW、5 MW モータの設計：40 K の高温、3~5 T の高磁場で動作する高効率モータ

仕様	出力	500kW
	電圧	440V
	回転数	1800rpm
	極数	4
固定子	外径	490mm
	鉄心相当長	330mm
	内径	370mm
	エアギャップ	5mm
	界磁電流*	230A
回転子 (40K)	ターン数	1050
	起磁力	241.5kAT
	線材量 (極)	1.2km
	界磁コイル磁束密度	3.0T
	ギャップ磁束密度	1.2T

*600A/cm幅(77K,自己磁場)線材での設計

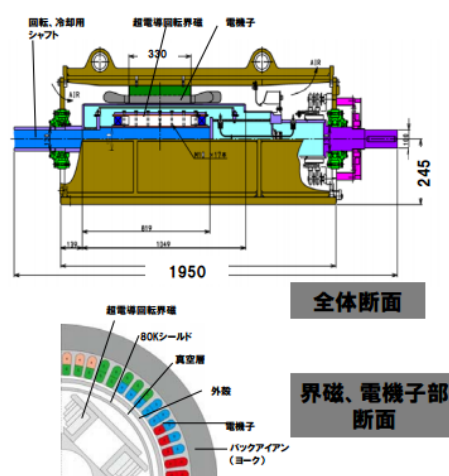


図 3 Y 系レーストラックコイルを界磁に用いた 500 kW モータの設計例：界磁コイルは、40 K で 3 T を発生させる。線材量は 1.2 km/極と少ない。

産業用モータ、5MW-200rpm の船用モータの設計検討を行った。一例として、500 kW モータの諸元を図 3 に示す。界磁コイルは、40 K 運転で 3 T の磁場を発生することが可能である。Y 系線材が高特性であるため、使用量は 1.2 km (1 極当たり) と比較的少量で済む。このため、全体のサイズは長さ 2 m、直径 50 cm 程度と従来の常電導モータを下回るレベルが可能と思われた。また、効率は 96.8 % と従来の常電動機を上回る性能が可能であることもわかった。さらに、5 MW 機の設計では、界磁は 40 K 運転で 5 T の磁場を発生させることが可能で、従来機と比べると大幅にコンパクト、軽量化でき、効率も 98 % に向上させることが可能であった。

以上、Y 系線材による高効率モータの可能性を検討したが、他の超電導線材ではこのような高温で高磁場を用いた設計は困難であると思われ、Y 系線材のポテンシャルを示すことができた。また、従来の Y 系コイルの検討は単純な円形コイルのみであったが、今回、回転機に適用できるレーストラック状コイルが実証できたことで、今後のさらなる大型検証への技術的な目途が立った。

また、コイルやシステムの製作技術のほかにも、線材特性の一層の向上による低コスト化と高均一化も工業製品としていくには必要であり、それによりコスト競争力のある産業用機器の実現が可能となる。また、Y 系のコイルの運転に関して、クエンチ、熱暴走に関する電氣的、熱的安全システムや保護の基準の把握も今後の産業化には必須である。

参考文献：

1. NEDO 平成 21 年度「希少金属代替材料開発プロジェクト：超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発」(東北大学、名古屋大学、九州大学、早稲田大学、産業用超電導線材・機器技術研究組合：H21 年 3 月～H22 年 5 月実施) による。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「風力用突極型 HTS 同期発電機の技術開発」

東京海洋大学

海洋工学部・海洋科学技術研究科

研究員 牧 直樹

風力用大容量 HTS 発電機に図 1 に示す極低温回転子と現用固定子を組み合わせたレトロフィット型同期発電機を提案している。突極磁性回転子の採用により所要界磁起磁力を大幅に低減でき、さらに HTS 導体経験磁場の顕著な低減に伴い導体電流密度を大幅に増大出来るメリットをもつ。開発した電気設計プログラムを用いて各種パラメータの発電機性能（発電機重量、効率）に及ぼす影響を明らかにし、それに基づいて発電機諸元と性能の最適化について検討してきた^{1,2)}。なお運転界磁電流は、導体経験磁場と n 値に角度依存性を考慮して求めた HTS 導体発熱量を三次元磁場解析を用いて算出し、これが許容値以下になるように定めている³⁾。

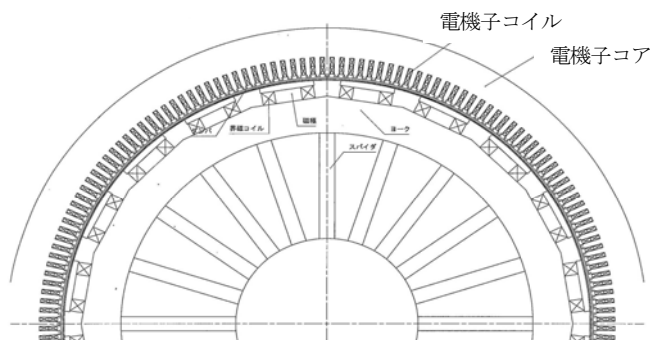


図 1 HTS 発電機の基本構造

発電機パラメータのうち発電機性能への影響が大きい出力容量と固定子外径について検討した結果を図 2 に示す⁴⁾。出力容量の増大（3→5→10 MW）とともに回転数が減少する（18.5→15→10 rpm）ために、発電機の出力容量当たりの重量が増加すること、並びに固定子外径は 5 MW 以下では陸上輸送制限内の 4m 程度でよいが、10 MW 程度の大容量機になると発電機性能上から固定子外径は 2 倍の 8 m 程度にするのが望ましいことが分かる。また、10 MW 機は Y 系線材使用の 70 K 運転において、発電機重量は 130 トンと現用型機の約 1/3 に大幅軽量化し、発電機効率は約 5 % 向上し、所要 HTS 線材長さは 60 km（断面 $0.2 \times 5 \text{ mm}^2$ ）に収まる見通しを得ている。

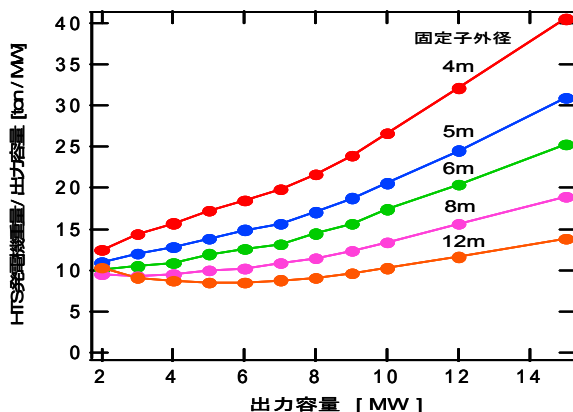


図 2 出力容量と固定子外径が重量に及ぼす影響

参考文献：

1. 牧直樹、小柴有、和泉充：平成 22 年電気学会産業応用部門大会、3-53pp.III-317-322
2. 牧直樹、篠原信行、和泉充：平成 23 年電気学会産業応用部門大会、3-83pp.III-383-388
3. 牧直樹、篠原信行、和泉充：第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集（2011） 39
4. 牧直樹、篠原信行、和泉充：第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集（2011） 90

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業機器技術の展開

「輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機システムの技術開発の進展」

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
准教授 中村武恒

筆者らは、輸送機器用高温超電導誘導同期回転機（High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM）の研究開発を産学連携プロジェクトとして実施している¹⁾⁻⁸⁾。本プロジェクトは、自動車、電車、船舶他の輸送機器を対象とし、超電導技術の導入によってイノベーション創出を目指しており、HTS 線材や鉄心材料他構成材料の極低温下電磁・機械特性評価、同特性を反映したコイル巻線技術開発、電磁・構造設計法の確立、冷却構造・冷凍機開発、駆動・制御技術開発、システム化など、包括的な研究開発を展開している。特に、超電導技術にとって最もハードルの高い輸送機器は電気自動車であり、様々な困難が立ちまわっているが、現状先進国だけでも 6000 万台程度の自動車消費の状況⁹⁾を鑑みると、同技術によってパラダイムシフトを達成するために挑戦すべき重要な応用分野である。

本プロジェクトについては、2009 年 10 月～2011 年 2 月に（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「H21 年度省エネルギー革新技术開発事業（第二次公募）」として実施され、実質 1 年 3 ヶ月程度の研究開発期間にもかかわらず、プロジェクトメンバーの多大な努力によって 4 大項目（①高温超電導誘導同期機の開発、②ドライブシステムの開発、③小型冷凍機の開発、④車載用冷却構造の開発）の全てについて当初目標を達成し、高温超電導回転機技術の発展に大きく寄与する成果を挙げることができた。また、上記プロジェクトによって実用化に向けた技術開発課題も明確化することができた。現在は、プライベートなプロジェクトとして開発課題を一つずつ解決しており、実用化に向けて研究開発を継続している。



(a) 毎極毎相固定子巻線



(b) 回転子ロータバー

図 1 HTS 巻線の写真¹⁰⁾

図 1 には、NEDO プロで開発した HTS 巻線の写真を示す¹⁰⁾。また、図 2 に HTS かご形回転子を、また図 3 に固定子 ((a) HTS 固定子ならびに(b) 銅固定子) の外観写真をそれぞれ示す。回転子は 50 kW 級 (1593 Nm@300 rpm ; 一次電流 58 A 通電時) として設計・試作した。ただし、図 3(a)の固定子を現状得られる市販 HTS 線材で試作する場合（巻線時の幾何学的制約から、HTS 線材幅を 3 mm 程度以下にする必要有）、58 A@77 K 以上の臨界電流を得ることは不可能であるため、その結果出力は 20 kW に留まっている。従って、現在は固定子巻線の大電流容量化が大きな課題の一つであり、種々検討を進めている。

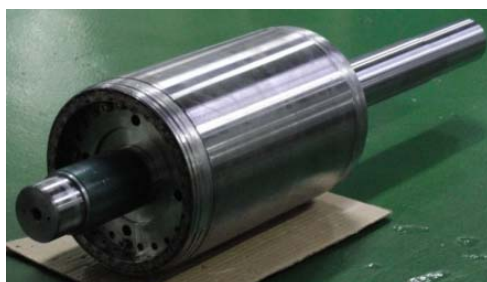


図 2 HTS かご形回転子の外観写真^{10),11)}



(a) HTS 固定子

(b) 銅固定子

図 3 固定子の外観写真

さらに、図 4 には銅固定子を適用して実施した無負荷加速試験結果の動画を示す¹¹⁾。この動画は、HTS-ISM の急加速を想定した試験であり、敢えて無負荷条件（通常の輸送機器の運転モードとしてはあり得ない）にて急加速指令を出し、定常同期回転数（1800 rpm ; 600 mm ϕ のタイヤを有するダイレクトドライブ自動車を想定した場合に車速 204 km/h に相当）に達するまでの様子を撮ったものである（ギャップ磁束の空間高調波に伴う始動異常防止の観点から、はじめに超低速（75 rpm）にて同期に引き入れている）。一般に、Ohm の法則に従う低抵抗導電材料を二次巻線に適用したかご形回転機では、力学方程式が不安定系になって制御不能になることが知られている。しかしながら、動画から分かるように、HTS 巻線ではその起磁力依存非線形抵抗を巧みに利用することによって、

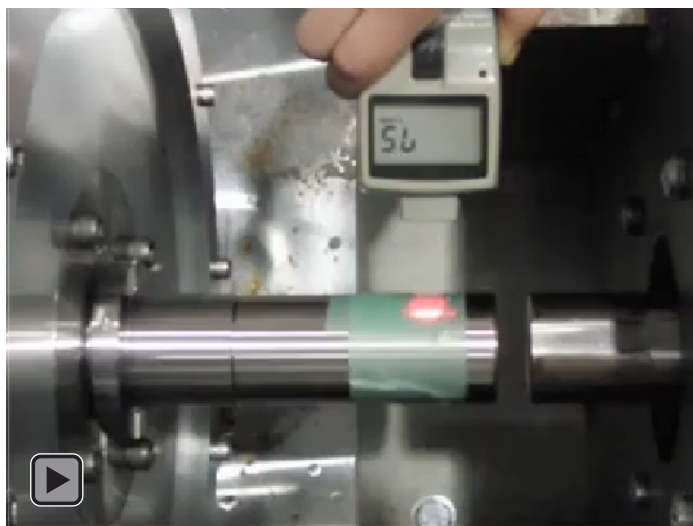


図 4 銅固定子を適用した HTS-ISM における無負荷急加速試験の動画（ギャップ磁束の空間高調波に伴う始動異常防止の観点から、はじめに超低速（75 rpm）にて同期に引き入れている；インバータによる加速指令後、約 3 s で同期回転数 1800 rpm に達して安定回転が実現されている）

約 3 s で同期回転数 1800 rpm に達して定常回転が実現している（光学式タコメータの計測応答遅れが若干ある）。このことから、HTS-ISM はゼロ抵抗特性だけでなく磁束フロー特性（熱力学的には超電導状態でありながら損失を発生する特性）をも有効に利用した回転機と言える。

以上、本稿では主として自動車を対象とした HTS-ISM システムの開発現状を紹介した。現在は、実用に向けて具体化した技術開発課題を一つずつ解決していく地道な検討を続けている。本研究開発が進展することによって、電車や船舶他の大形輸送機器への展開は比較的容易になると期待される。今後共、関係各位のご協力をお願い申し上げる次第である。

謝辞

本稿執筆に際して、(株)イムラ材料開発研究所ならびにアイシン精機(株)の関係各位にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献：

1. かご形誘導機+超電導技術で同期トルクが 1 桁超え！－高温超電導誘導同期機的能力をダイレクトに証明、京都大学、イムラ材料開発研究所、新潟大学、応用科学研究所、超伝導コミュニケーションズ (SUPERCUM), vol. 18, no. 2 (2009) pp. 1, 7-8
2. 中村武恒、特集：超電導産業機器技術の展開「電気自動車用超電導モータ技術開発の進展」、超電導 Web21, 2010 年 3 月号 (2010) pp. 5-7
3. 全超電導誘導同期機の回転試験に成功！－車載用高温超電導駆動システムの研究開発にはずみ、京都大学、イムラ材料開発研究所、応用科学研究所、新潟大学、超伝導コミュニケーションズ (SUPERCUM), vol. 19, no. 3 (2010) pp. 1, 4-5
4. 中村武恒、特集：超電導産業機器技術の展開「輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機の研究開発」、超電導 Web21, 2011 年 3 月号 (2011) pp. 13-14
5. T. Nakamura, Progress of HTS rotating machine development in Japan, Superconductivity and Cryogenics (KIASC), vol. 13, no. 2 (2011.05) pp. 1-4
6. 中村武恒、輸送機器用高温超伝導誘導同期機への挑戦、FSST NEWS ((社)未来科学技術協会 超伝導科学技術研究会), no. 130, (2011.07) pp. 22-24
7. 中村武恒、超電導電気自動車の夢、電気学会誌, vol. 131, no. 9 (2011) p. 630
8. 暴れ馬に磁束フロー：高温超伝導誘導同期回転機における起磁力依存非線形抵抗を利用した自律安定制御性の実証！、京都大学、(株)イムラ材料開発研究所、アイシン精機(株)、超伝導コミュニケーションズ (SUPERCUM), vol. 20, no. 4 (2011) pp. 1, 6
9. 日経 BP コンサルティング：「未来予測レポート 2011-2025 自動車産業」
10. D. Sekiguchi, T. Nakamura, S. Misawa, H. Kitano, Y. Kawanishi, T. Matsuo, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, Y. Ohashi, N. Okumura, K. Osamura, J. Ogawa, S. Fukui and T. Oka, Trial test of fully HTS induction/synchronous machine for next generation electric vehicle, 22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22), Marseille France, 2EP6-2 (12-16 September, 2011), to be included in IEEE Transactions on Applied Superconductivity
11. T. Nakamura, D. Sekiguchi, S. Misawa, H. Kitano, Y. Kawanishi, M. Fukui, T. Matsuo, M. Miyamoto, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, Y. Ohashi, N. Okumura, K. Osamura, J. Ogawa, S. Fukui and T. Oka, Current status of high temperature superconducting induction/synchronous machine for automobile application, Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2011 (ACASC2011), New Delhi, India, IT -16 (16-18 November, 2011)

特集：超電導産業機器技術の展開

「Y 系超電導線のマグネットテクノロジー」

独立行政法人 理化学研究所

生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム

/ 千葉大学大学院工学研究科

柳澤吉紀

本記事では、イットリウム(Y)系超電導線材をコイルとして用いる上での課題を乗り越える技術、すなわち「Y 系超電導線材-コイル間のインターフェース技術（マグネットテクノロジー）」の最近の動向を紹介する。

Y 系超電導線材は、磁場中での電流密度特性と、線材長手方向への引っ張り強度に優れた革新的な線材である。これらの利点を活かせば、コイルを高い電流密度（ 500 A/mm^2 以上）で運転することができ、超電導磁石の大幅なコンパクト化が実現できる。

ところが Y 系超電導線材はコイルとして使用すると、いくつかの重大な問題を示すことが明らかとなってきた。まず、Y 系コイルはエポキシ樹脂含浸を施すと、設計したコイル臨界電流より低くはるかに低い電流値で常伝導電圧が発生してしまう。この現象は「特性劣化」と呼ばれている。ビスマス(Bi)系コイルにおいても、励磁中の電磁力によって線材特性が劣化し、常伝導電圧が発生することがあるが、そのまま励磁を続けるケースが多い。しかし、Y 系コイルの場合、このようなコイルの励磁を続けると、突然コイル電圧が急俊に立ち上がり（これをテイクオフ電圧と呼ぶ）、最悪の場合コイルの局所的な焼損に至る。これが Y 系コイルにおけるクエンチである。テイクオフ電圧の発生から焼損に至るまでの時間は導体電流密度に依存し、たとえば 500 A/mm^2 の場合にはわずか 0.1 秒程度である。これではクエンチ検出～蓄積エネルギー回収を行う時間的余裕が全くなく、コイルを保護することができない。Y 系コイルにはこのほかにも、磁場の精度や安定度を劣化させる遮蔽電流磁場、永久電流モードでの運転を阻む接続抵抗などの課題がある。

このように、Y 系線材を巻いてコイルにただけでは、期待されるコンパクト超伝導磁石とこれを用いたシステムの実現は困難である。これには、線材とコイル間をつなぐインターフェース技術（すなわちマグネットテクノロジー）の構築が必須である（図 1 参照）。以下では、インターフェース技術の中でも特に重要な特性劣化を解決する技術の最近の動向を述べる。



図1 Y 系超電導線材とコイル間のインターフェース技術（マグネットテクノロジー）

特性劣化はコイル冷却時に発生する劈開力と呼ばれる熱応力によって、多層構造を持つ Y 系超電導線材が端の部分から剥離するために起こる。これを防ぐ技術は、いくつか提唱されてきている。まず、非含浸巻線やパラフィン含浸など、そもそもエポキシ樹脂含浸を避けるというのが有効な選択肢である¹⁾。パラフィン含浸した Y 系のレイヤー巻きコイルと低温超伝導コイルを組み合わせ、超伝導磁石では世界最高磁場となる 24.0 テスラの発生が成し遂げられている²⁾。一方、エポキシ樹脂含浸をする場合は、ポリイミド電着被膜線材³⁾、熱収縮チューブで線材を包む手法⁴⁾、シアノアクリレート系接着剤を併用する手法⁵⁾、径方向応力を抑制する設計⁶⁾などで特性劣化を防ぐことが可能である。

それでは、特性劣化が解決されればクエンチは起こらなくなるので、保護技術は必要ないのだろうか。確かに、Y 系などの高温超伝導コイルは安定性マージンが大きく、定常的擾乱が無ければクエンチしようがない。この問いに対するコンセンサスはまだ形成されていないようである。これについて筆者は、従来の低温超伝導コイルと同様に、安定性とクエンチ保護は切り離して考える必要がある、すなわち保護技術は必要であると考えている。クエンチ保護には電流密度、蓄積エネルギーなどが関係しており、これらはシステムによって様々である。すなわち、従来の保護技術が通用するシステムとそうでないものを仕分けし、通用しないものについては新しい考え方の保護技術を構築することが必要である。

参考文献：

1. T. Takematsu *et al.* Physica C, 470, 674-677 (2010).
2. S. Matsumoto *et al.* Superconductor Science and Technology, 25, 025017 (2012).
3. Y. Yanagisawa *et al.* Physica C, Article in press.
4. U. P. Trociewitz *et al.* Appl. Phys. Lett. 99, 202506 (2011)
5. K. Mizuno *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.104.
6. H. Miyazaki *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.197.

特集：超電導産業機器技術の展開

「12 層パンケーキ 5.1 T 伝導冷却型 Y 系コイルの開発」

株式会社 東芝
電力・社会システム技術開発センター
宮崎寛史

Y 系線材は、高強度、高電流密度という特長があり、機器の小型、軽量化が期待されている。我々は、液体ヘリウムなどの冷媒を使用しない伝導冷却型の Y 系コイルの開発を進めている。伝導冷却システムでは、固体中の伝熱経路を確保するために、超電導コイルを樹脂で含浸する必要がある。しかしながら、当初試作した含浸型の Y 系コイルは、液体窒素温度まで冷却すると、超電導特性が低下する問題が生じた。劣化の原因として、含浸コイルを室温から液体窒素温度に冷却する際に生じたコイル径方向の熱応力に注目した。この径方向の熱応力は、Y 系線材に対しては、剥離方向の応力となるため、線材が機械的に破壊されると考えられる。そこで、コイルに含まれる樹脂や絶縁テープなどの量や材質をコントロールすることにより径方向応力を低減する工夫を行った。その結果、図 1 に示すように、樹脂含浸による劣化のない Y 系コイルの製作に成功した¹⁾。

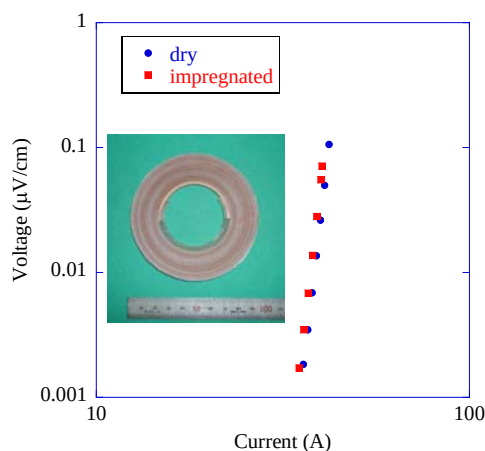


図 1 Y 系コイルの含浸前後の通電試験結果 (LN₂ 中)

次に、Y 系コイルの実機への適用を目指して、伝導冷却にて中心磁場 5 T を発生可能なコイルの開発を行った。表 1 に使用した 12 枚のシングルパンケーキコイルの諸元を示す。また、表 1 には液体窒素中での電流-電圧測定結果より算出したコイル I_c (10^{-6} V/cm 定義) および n 値 ($10^{-8} \sim 10^{-7}$ V/cm 定義) を示している。この 12 枚のシングルパンケーキコイルを積層し、12 積層コイルを製作した。12 積層コイルは、コイル内周および外周にて電気的に接続されており、2 枚のシングルパンケーキごとに厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付けている。各アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続し、コイルを冷却した。コイル温度は 2 段冷却ステージに取り付けたヒータにより制御し、発生電圧は各シングルパンケーキコイルの両端で測定した。また、通電中の中心磁場はホール素子により測定した。コイル温度を 10 K から 77 K まで変化させたときの電流-電圧特性の試験結果を図 3 に示す。全温度領域で低電界領域まで良好な超電導特性を有しており、コイル温度 10 K において 305 A 通電時に中心磁場 5.14 T を達成した²⁾。

表 1 シングルパンケーキコイル諸元

Coil No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Inner dia. (mm)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Outer dia. (mm)	91	92	92	91	91	92	92	92	88	88	88	88
Number of turns	108	110	109	108	108	108	108	108	108	108	108	108
Tape length (m)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Coil I_c at 77 K	48	61	54	54	48	47	49	51	45	56	59	47
n-value at 77 K	28	28	26	25	22	26	26	26	27	26	26	27

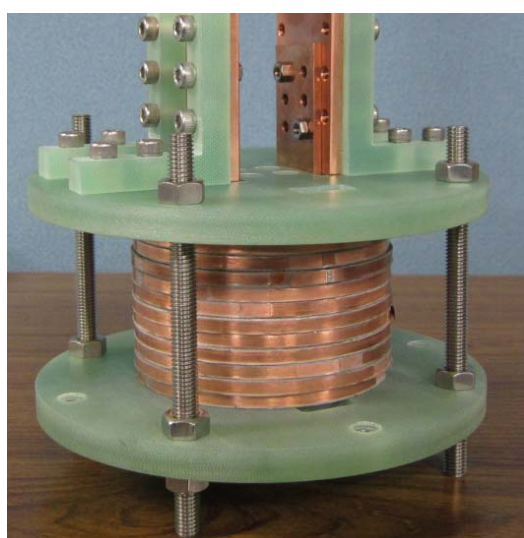


図 2 12 積層コイル

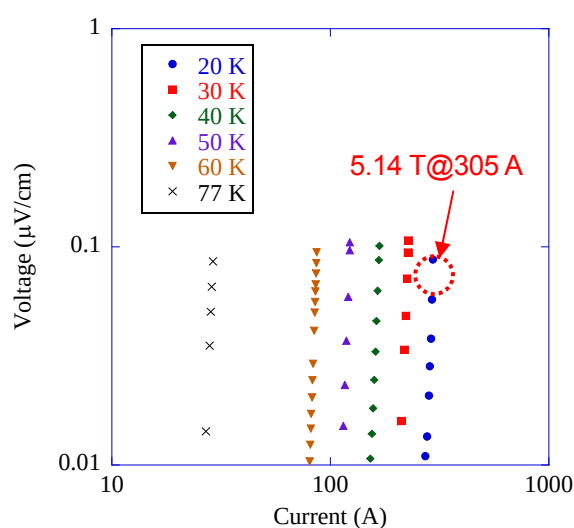


図 3 伝導冷却通電試験結果 (10 K ~ 60 K)

引き続き、12 積層コイルの電磁力に対する機械強度を検証するために、4 T バックアップ磁場中にて最大 8 T の中心磁場を発生させる試験を行った。その結果、8 T の中心磁場発生時においてもコイルは熱暴走することなく安定に運転できた²⁾。また、バックアップ試験後のコイルの健全性を評価するため、再度実施した液体窒素中での通電試験においても電流-電圧特性に変化は見られずコイルに劣化がないことを確認した。

現在、実機サイズを想定した大型コイルの開発および円形以外のコイル開発も進めており、引き続き、Y 系コイルの実機適用に向けて開発を進めていく。

参考文献：

1. H. Miyazaki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp 2453-2457, 2011
2. H. Miyazaki *et al.*, Abstracts of CSJ conference, Vol. 85, pp. 176-177, 2011

特集：超電導産業機器技術の展開

「磁気浮上用高温超電導マグネットの開発」

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

鉄道総研は 2005 年以降、国土交通省主催の「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」の提言を受け、高温超電導磁石の技術開発を進めている。特に、高温、高磁場中での臨界電流密度が大きい、高強度である、低コスト化の見込みがある、などの理由から RE 系線材に注目してきた。

RE 系線材を用いた超電導コイルを設計するためには、磁場、磁場角度、温度をパラメータとして、線材の臨界電流値を詳細に把握することが必要である。そこで浮上式鉄道用超電導磁石の検討のために必要な、表 1 に掲げるような環境下での臨界電流値、あるいは n 値の評価に必要な装置を開発した（図 1、図 2）。この装置を用いれば、長さ 10 cm 程度の市販線材を加工せずに性能評価できる。また、RE 系線材で気になる磁場角度依存性は、超音波モータにより低温状態でサンプルを回転しながら迅速に評価できる。現在、線材の磁場中特性を向上する開発が盛んだが、本装置により、常に線材性能を正確に把握しつつ高温超電導磁石開発を進められる。もちろん RE 系線材だけでなく、Bi 系、 MgB_2 、鉄系の超電導線材の評価も可能である

(http://www.rtri.or.jp/sales/jutaku/shi_fujou_05/shi_fujou_05.html)。

表 1 高温超電導線材評価試験装置の主要性能

電流(I)	0～ 1000 A
磁場(B)	0～ 5.5 T (超電導コイル使用)
磁場角度(θ)	～10 $^\circ$ (無段階)
温度(T)	10 K～ (冷凍機伝導冷却)



図 1 高温超電導線材評価試験装置

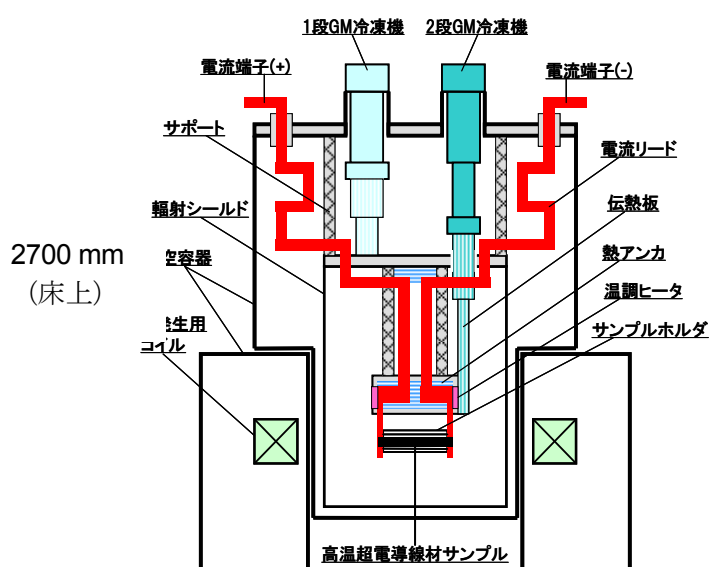


図 2 高温超電導線材評価試験装置（模式図）

一方、巻線についても所内で要素技術開発を実施している。既にRE系線材は剥離方向の強度が低く、コイルをエポキシ含浸した際、線材の劣化を招くことが報告されている（T. Takematsu, *et al.*: Physica C, 470 (2010) pp.674-677）が、鉄道総研でも同様の事象を確認した。そこで、熱応力による線材の劣化を防ぐ方法の一つとして、RE系線材の剥離強度以下の含浸材を用いる方向で検討を進めた。浮上式鉄道用の超電導磁石では、コイルを内槽と呼ばれる金属容器に収納し、内槽でコイルを固定するので、線材間の充填剤には強度というより熱伝導経路としての役割を期待する、という考えからである。含浸を行う上では、線材の間に入っていくよう、粘性が小さいことも求められるので、これらの条件を満たす含浸材としてシアノアクリレート系接着剤（瞬間接着剤）の適用を提案した。そしてサンプルの小型コイルを製作して検証した結果、含浸前後で通電特性の劣化が無いことを確認した（K. Mizuno, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.104）。

鉄道総研では「イットリウム系高温超電導線材を用いた小型超電導磁石」を開発し、コイル温度50 Kにおいて1 T以上の磁場を発生することには成功している

（<http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7920/rd79200102.html>）が、今後は同じくコイル温度50 Kにおいて実機並みの5 Tの磁場を発生することを目指して開発を進める予定である。なお、本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

超電導 Web21 トップページ

超電導関連 ‘12/3 月-4 月の催し物案内

3/15-17

2nd International Lunar Superconductor Applications Workshop

場所：Houston, TX, USA

問合せ：

<http://lunarscience2011.arc.nasa.gov/2nd-international-lunar-superconductor-applications-workshop>

3/15-18

2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会

場所：早稲田大学

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

3/19-23

9th International Temperature Symposium

場所：Los Angeles, CA, USA

問合せ：<http://www.its9.org/>

3/24-27

日本物理学会第 67 回年次大会

場所：関西学院大学

問合せ：<http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/jps2012sp/>

3/28-30

日本金属学会 2012 年春期大会

場所：横浜国立大学

問合せ：<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jim/>

4/9-13

2012 MRS Spring Meeting and Exhibit

場所：San Francisco, California

問合せ：<http://www.mrs.org/spring2012/>

4/10-13

International Workshop on Numerical Modeling of HTS

場所：Barcelona, Spain

問合せ：<http://www.icmab.es/htsmodelling2012/>

4/20

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会

場所：機械振興会館

問合せ：

http://www.ieice.org/ken/program/index.php?tgid=IEICE-SCE&tgs_regid=6869aa380ff4a0afd3d0d8d1a8068f5b8c85266adc22593fcbbe4974b30aa7cd&lang=jpn

4/29-5/4

International Conference on Superconductivity and Magnetism – ICSM 2012

場所 : Istanbul, Turkey

問合せ : <http://www.icsm2012.org/>

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (1/19-2/17)

- 電機各社 「脱レアアース部品」三菱電などモーター、HOYA は研磨剤・・・ Fuji Sankei Business i. 1/19
- 風力発電協会 「飛躍の年」へ意欲 永田代表理事 賀詞交歓会に 300 人 電気新聞 1/20
- 全量買い取りに「既設」含まれず 風力先発組の受難 赤字脱却へ陳情攻勢 日経産業新聞 1/23
- ネオジム磁石 常温で磁力取り除きます マグネットフォースが装置 日刊工業新聞 1/24
- 「客家」vs. 中国政府 レアアース大国揺れる 権益、人脈が左右 日本勢、立ち回り微妙に 日経産業新聞 1/24
- 中国の国家电网 送電網整備に 15 兆円 超高压やスマートグリッド 15 年までの 4 年で 日経産業新聞 1/24
- 14 年度まで約 20 万キロワット 中部電力、再生可能エネルギー開発を推進 、風力発電 自社開発、御前崎が運開 洋上風力の可能性を検討 電気新聞 1/24
- 信越化学、ベトナムに拠点 レアアース加工、海外工場 「中国依存」を軽減 日本経済新聞 1/24
- 2011 年度技術トレンド調査 ⑤ ナノテク駆使に成果 物材機構 原子 1 層でも超電導 日経産業新聞 1/25
- 信越化学工業、中国依存脱却へ新工場 ベトナムで希土類リサイクル Fuji Sankei Business i. 1/25
- レアアース・LED パッケージ材料工場 ベトナムに新設 信越化 日刊工業新聞 1/25
- 尾根に風力建設 難しく 自然公園景観配慮 技術指針見直し検討 環境省 電気新聞 1/25
- 風力発電機 大型化で洋上設置 経産省 部品開発を支援 日刊工業新聞 1/26
- 風力の送電線に財政支援 民主委提言案 発電施設 新設で 電気新聞 1/26
- リニア奈良駅 地上化を検討 読売新聞 1/29
- 鉄系の超電導材、柔らかく 岩手大など 極低温でプラ並みに 日経産業新聞 1/30
- 風力発電の保守会社 J パワー、故障に迅速対応 日経産業新聞 1/30
- 沖縄、企業誘致へ資源外交 レアアース事業 内モンゴルと協力 Fuji Sankei Business i. 1/30
- 風力保守で専業会社 J パワー 総合力の向上狙い 電気新聞 1/30
- レアメタル規制 WTO 協定違反 中国の敗訴確定 毎日新聞 1/31
- 小型家電 96 品目を再利用 新制度案 レアメタル回収 朝日新聞 1/31
- 中国の鉱物輸出制限 上級委も「協定違反」 WTO レアアースにも影響も 朝日新聞 1/31
- レアアース事業協力 沖縄県日中友好協会 中国内モンゴルと合意 日刊工業新聞 1/31
- 浮体式洋上風力 安全評価へ年度内指針 国交省 国際標準化主導目指す 日刊工業新聞 1/31
- 電気全量買い取り 下 風力普及、裾野産業に追い風 日刊工業新聞 1/31
- レアメタル 中国敗訴確定 輸出規制 WTO 協定違反 読売新聞 夕刊 1/31
- 携帯電話やデジカメ レアメタル回収制度 環境省、14 年度全面施行めざす 日本経済新聞 1/31
- 中国の鉱物輸出規制 WTO 協定違反 レアアースが次の焦点 朝日新聞 2/01
- 風力送電網に支援 山からの中継線整備 経産省方針 朝日新聞 2/01
- レアアース進む脱中国 国内大手、リサイクル施設整備 次世代ネオジム磁石開発 廃材有効利用で調達容易に 日刊工業新聞 2/02
- 再生エネ 規制緩和 刷新会議部会案 太陽光・風力促進 読売新聞 2/03
- J パワー 風力新設を再開 3 年ぶり、国内 3 カ所 電力買い取りで採算 日本経済新聞 2/03
- インド発電 3 億ドル融資 JBIC、太陽光や風力 日本経済新聞 夕刊 2/03
- リニア駅「橋本駅周辺に建設を」 朝日新聞 2/04
- サムスン重工 スコットランドで洋上風力設備設置 電気新聞 2/06
- 風力発電の DC 六ヶ所村で実証 NTT ファミリ 日刊工業新聞 2/07
- 排水処理も風力で 茨城で発電設備稼働 日刊工業新聞 2/07

- 風力発電を活用 データ拠点稼動 NTT 系、青森で実験 日経産業新聞 2/07
- 風力の送電網 強化へ 東北など 経産相、補助金検討 毎日新聞 2/07
- 市況フロントライン レアアース ジスプロ、3000 ドル台へ反発も 日本経済新聞 2/07
- レアアース需要 官民で 3 割削減 中国の管理強化対策 日本経済新聞 2/08
- レアアース削減 「2 年で約 200 トン」 経産省、50 億円支援 朝日新聞 2/09
- クラレ・福井大 レア金属回収新技術 Fuji Sankei Business i. 2/09
- 三菱電機 調達不安に対応 レアアース回収を事業化 Fuji Sankei Business i. 2/09
- ナブテスコ 風力の方向制御に参入 年内に開発メド 駆動装置とセット 日経産業新聞 2/09
- エアコンのレアアース磁石 三菱電が回収事業 解体装置開発 日経産業新聞 2/09
- 経産省 希土類削減プロ ジスプロシウム焦点 日刊工業新聞 2/09
- 三菱電機 空調機からレアアース 自動解体装置を開発 電気新聞 2/09
- 茨城で初の風力事業 東光電工 設計から建設まで担う 電気新聞 2/09
- 英、風力発電量 10 倍目指す 世界最大の洋上発電所が稼動 Fuji Sankei Business i. 2/10
- 列島細見 北海道 風力発電 保守に課題 読売新聞 2/10
- 取得額 204 億円、20 年間運営 三菱商事 独で海底送電 Fuji Sankei Business i. 2/11
- 小型風力発電 中国で販売 ゼファー 携帯基地局など照準 日経産業新聞 2/14
- フロンティア知恵を絞る 鉄道総合技術研究所 上 超電導リニア開発 50 年目 日経産業新聞 2/14
- 希土類代替材研究者を公募 文科省プロジェクト 日経産業新聞 2/14
- 関電エネルギー開発 淡路の風力事業 運転開始を延期 電気新聞 2/14
- フロンティア知恵を絞る 鉄道総合技術研究所 下 超電導送電で変電所半減 日経産業新聞 2/15
- 小型発電装置に商機 東芝 水力 シンフォニア 太陽光+風・水力 電力不足で需要 再生エネ
買い取り 追い風 日本経済新聞 2/15
- レア金属回収事業 活性炭技術で参入 クラレケミ 日刊工業新聞 2/16
- JR 東海「リニアの京都駅併設困難」 Fuji Sankei Business i. 2/16
- レアアースのジスプロ 豪州産、15 年から供給 ノーザン社社長「日本に全量も」 日本経済新聞 2/17
- 風力発電を利用したコンテナ型データセンターの実証実験開始 NTT ファシリティーズが六ヶ所
村で 科学新聞 2/17"

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（2012 年 1 月）

財団法人国際超電導産業技術研究センター

超電導工学研究所

特別研究員 蓮尾信也

ケーブル

Helmholtz Association of German Research Centres（2012 年 1 月 19 日）

ドイツ研究センターヘルムホルツ協会は、“AmpaCity”プロジェクトを開始すると発表した。このプロジェクトでは、RWE グループとそのパートナー企業が、最先端の超電導電力ケーブルを用いてドイツのエッセン市にある 2 ヶ所の変電所を結ぶ 1 km に及ぶ高電圧ケーブルを交換する。ケーブルの導入が完了すれば、世界最長の超電導ケーブルが設置されることになる。このプロジェクトの一環として、Karlsruhe 工科大学が、超電導および絶縁に適した材料を分析している。Nexans 社は、送電容量 40 MW に設計された 10-kV の 3 相同軸タイプの超電導電力ケーブルを製造する予定である。ケーブル導入のための最初の作業として、抵抗型超電導限流器と超電導ケーブルが、過負荷防止のために組み合わせられる。この超電導限流器も Nexans 社が製造する。2 年間のフィールドテストを経て成功すれば、エッセン市に広がる配電幹線網の大部分において、10-kV の超電導ケーブルによる接続が実現可能なものとなる。このような装置の導入は、効率性の良さだけでなく、運用費とメンテナンス費を低減させ、また同時に土地利用の面積も削減することができる。AmpaCity プロジェクトは、ドイツ経済技術省（BMW）のエネルギー研究部門によって支援されている。

（出典）

“World’s longest superconductor cable”

Helmholtz Association of German Research Centres press release (January 13, 2012)

線材

Superconductor Technologies Inc.（2012 年 1 月 10 日）

2012 年 1 月 1 日、Superconductor Technologies 社（STI）は、オースティンに新しくできた Advanced Manufacturing Center of Excellence (AMCE) の施設の所有権を取得した。この新しい建物は、現在、HTS 線材の製造装置の設置に向けて準備が進められており、2012 年の第 1 四半期には設置が始まる予定である。STI の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram は、「2013 年以内に HTS 線材の商用化に結び付けていく上で、オースティンの AMCE 施設の開設は、我々 STI にとって重要な節目である。この新施設により、我々は生産能力を大幅に強化させることができ、HTS 線材の見込み顧客からの一層の期待を満たすことができる。昨年は、我々が予想していた通り売買契約を全く成立できなかったけれども、現在は数々の素晴らしい HTS 線材の商業的機会を積極的に追求している。我々は、弊社の Conductus® 2G HTS 線材を大量に供給することで、HTS 機器の業界リーダーたちと緊密な事業推進に取り組んでいる」とコメントした。また、STI は本社をオースティンに移転する作業の真っ最中である。移転するまでは、引き続きカリフォルニア州サンタバーバラに本社を置く予定である。

(出典)

“Superconductor Technologies Inc. Takes Possession of Advanced Manufacturing Center of Excellence in Austin, TX”

Superconductor Technologies Inc. press release (January 10, 2012)

Superconductor Technologies Inc. (2012 年 1 月 17 日)

Superconductor Technologies社 (STI) は、STIの次世代HTS線材のテストが General Cable Superconductors社 (GCS) によって完了したことを発表した。ニュージーランドにあるHTS Roebel ケーブルのプロバイダーであるGCSが実施したテストでは、STIのHTS線材が目標臨界電流値を満たしていることが確認された。STIの社長兼最高経営責任者であるJeff Quiramは、「モーター、発電機、そして変圧器のような将来の超電導アプリケーションに非常に高い電流容量を提供できる Roebel ケーブルのような革新的電力アプリケーションの需要を満たしていく上で、弊社の Conductus®2G HTS 線材の開発が着実な進展を遂げていることが、今回の General Cable Superconductors社による検証結果によって再び証明されたと言える。GCSの技術が、次世代HTS 線材の新規市場の開拓に向けて前途有望な道筋を与えてくれたのである」と述べた。

(出典)

“Superconductor Technologies Inc. Completes Testing of Conductus® 2G HTS Wire with General Cable Superconductor Ltd. for HTS Roebel Cable Applications”

Superconductor Technologies Inc. press release (January 17, 2012)

Superconductor Technologies Inc. (2012 年 1 月 19 日)

Superconductor Technologies社 (STI) は、超電導ハイパワー送電ケーブルの実証プロジェクト用に、STIのConductus® 2G HTS線材をHTS送電ケーブルの大手プロバイダーに提供することに同意した。このプロジェクトの完了は、2012年末と予定されている。STIの社長兼最高経営責任者であるJeff Quiramは、「我々がこのプロジェクトに選抜されたことは光栄であり、弊社のConductus 線材がこの線材クラスの中でも最高のパフォーマンスを見せることを期待している。先般我々は、77 Kで1 cm幅あたり500 A以上の臨界電流を保持できる線材サンプルを生産した。ここで重要なのは、2G HTS線材の経済的生産という観点で設定された業界目標である厚さ2- μm というHTS薄膜で、この臨界電流値が達成されたということである。この技術成果がオースティン市にある我々の新施設での線材の大量生産能力と組み合わせられた結果、我々は見込み顧客に大量の線材の提供を約束できるようになったのである。見込み顧客が実証プロジェクトに参加するにあたり、弊社の高性能 Conductus線材は、その技術的要件を満たすとともに期待されている供給力も満足できる。しかしこのプロジェクトが無事成功に終わったとしても、HTS送電ケーブルの性能に関する新たな業界基準がさらに設けられるであろうことは、弊社と顧客共に予想していることである」と述べた。

(出典)

“Demonstration project scheduled to be completed by end of 2012”

Superconductor Technologies Inc. press release (January 19, 2012)

限流器

Nexans and Helmholtz Association of German Research Centres (2012 年 1 月 13 日)

Nexans 社は、次世代 YBCO 超電導テープ線材を用いた世界初の抵抗型超電導限流器 (SFCL) の受託に成功した。この SFCL は、Karlsruhe 工科大学と共同で開発され、Vattenfall Europe

Generation 社の製品として設置された。この SFCL は、ドイツのザクセン州にある Boxberg 発電所の微粉炭機と破砕機に使われる内蔵型中電圧電源装置の短絡保護のために使用される。固体超電導材料を用いた初代 SFCL から新しい SFCL に交換することによって、既に初代 SFCL で低損失になっていた導体損失をさらに 90 %低減することができ、運用コストを削減することができる。また新しい SFCL は、初代 SFCL よりもさらに迅速に短絡回路に対応することができる。この新しい SFCL は、12,000 V で 560 A の標準電流用に設計されているが、2,500 A までの短時間の電流なら限流しないで動作することができる。このような特徴により、起動時に容易に高電流を引き出すことができるので、微粉炭機の動作には重要な役割を果たす。もし限流機能が誘発されても、部品を破壊することなく、限流器は自動的に通常の作動状態に数秒以内に回復することができる。こういった優れた特徴により、従来の装置と比べて停電の時間ははるかに短くて済む。現在、装置の設置は既に完了し、実用性でのフィールドテストが行われようとしている。このフィールドテストでは、将来的にこの電流制限機能が超電導変圧器とエネルギーケーブルに適用できる可能性を示すことが大いに期待されている。

(出典)

“Nexans goes live on grid with world’s first fault current limiter based on second-generation superconductors”

Nexans press release (January 13, 2012)

および、

“Superconducting current limiter guarantees electricity supply of the Boxberg power plant”

Helmholtz Association of German Research Centres press release (January 13, 2012)

大型契約

Bruker Energy & Supercon Technologies (2012 年 1 月 5 日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社 (BEST) は、医療用 MRI (磁気共鳴映像装置) の一流メーカーからこれまでで三番目に大きい受注規模の低温超電導体 (LTS) の複数年契約に加え、MRI 磁石を製造するアジアのメーカーからも LTS の大量注文を受けた。この 2 つの契約によって、少なくとも 4000 万ドル以上の注文取引額が加算されることになる。またこれらの契約は、2011 年 11 月に発表された別の大手 MRI メーカー 2 社との最低購買取引額 7100 万ドルに加算される。これら契約からの収益は、2012 年、2013 年、そして 2014 年に明確に反映される。尚、この 3 年の契約期間中に行われた実際の購入額は、最低取引契約額を 25 %ほど上回る見込みである。

(出典)

“Bruker Energy & Supercon Technologies (BEST) Announces New Large Asian Order and Third Multi-Year Superconductor Contract from MRI Manufacturer”

Bruker Energy & Supercon Technologies press release (January 5, 2012)

エネルギー輸送

Columbus Superconductors 社 (2011 年 12 月 15 日)

ロシア人研究者で構成される共同チームは、水素と超電導エネルギーの両方を輸送できるシステムのプロトタイプを開発し、その実証試験を行った。このシステムは長さ 12 m の水素輸送クライオスタットと最大定格電流 3 kA から 4 kA の電流リードで構成されている。電力ケーブルは、

Columbus Superconductor 社が製造した MgB_2 超電導線材を使用して開発された。このプロトタイプの実証試験によって、液体水素と電気の両方を送ることのできるハイパワーエネルギー輸送システムの実現可能性が初めて検証されたこととなる。

(出典)

“First in the World Prototype of Hydrogen Superconducting Transport System Has Been Tested”

Columbus Superconductors press release (December 15, 2012)

<http://ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/highlightsHP43%20.html>

無重力実験

University of Nottingham (2012 年 1 月 4 日)

Nottingham 大学の研究者たちは、宇宙の無重力状態が生物体にどのような影響を与えるかを調査する研究の一環として、強力な超電導磁石 (16 T) を用いてミバエを空中浮揚させた。磁石を使った地表でのこの無重力シミュレーションでは、ミバエがより迅速に走る様子がうかがえた。これは、国際宇宙ステーションが行った同様の実験で観察された効果と全く同じである。この調査により、衛星打ち上げに必要とされる資金を使う前に、宇宙でのパフォーマンスにどのような実験が適切で興味深いかを決める方法として、地球上でできる実験として、反磁性浮上の利用が有効であると期待されている。当研究グループの研究成果は、ロンドン王立協会のジャーナルである *Interface* の最新版に記載されている。

(出典)

“Magnetically-levitated flies offer clues to future of life in space”

University of Nottingham press release (January 4, 2012)

<http://www.nottingham.ac.uk/news/pressreleases/2012/january/magnetically-levitated-flies-offer-clues-to-future-of-life-in-space.aspx>

[超電導 Web21 トップページ](#)

「応用物理学会 超伝導分科会 第 44 回研究会 ジョセフソン効果 50 周年記念『超伝導エレクトロニクスにおける新しい胎動』」報告

財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所
低温デバイス開発室
佐藤哲朗

応用物理学会・超伝導分科会では、春季および秋季学会期間中のシンポジウム・スクール等に加え、研究会を年 2 回企画・開催している。また、定期刊行物 “超伝導ニュース” を年 2 回発行し、分科会会員向けに最新の超電導関連情報を発信している。

2012 年はジョセフソン効果の理論的予言から 50 周年にあたることから、これを記念する研究会を企画した。ジョセフソン接合関連の研究の歴史や得られた知見・残された課題に関する 2 件の記念講演に加え、関連分野の最新の研究成果を解説する講演 5 件で構成した。記念講演を中心に内容を紹介する。

ージョセフソン効果 温故知新（井口家成・筑波大 物材機構）ー

井口先生には、古典的なジョセフソンの理論、直・交流ジョセフソン効果、SQUID から、巨視的量子トンネリング、最近の微小接合を用いた Qubit まで、ジョセフソン効果の物理全体を広く網羅する記念講演をお願いした。範囲が広いことから困難な依頼であることは承知していたが、ご自身の研究歴を絡めながら優れたレビューを実現していただいた。

ジョセフソン効果は理論面はほぼ完成しており、材料系によらずジョセフソンの関係式はよく成り立っている。その中でも d 波超電導体である銅酸化物系のデバイス応用はまだ探索の余地が残されていること、また固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振機構もすべて解明されたとは言えないとの指摘があった。応用面に関しても広範な言及がなされ、生体磁気測定等に応用されている SQUID は今後データを積み重ねることで本格的な臨床応用への道が開けるであろうこと、一方、新たな応用と期待されている超電導 Qubit はまだ基礎研究段階であり、デコヒーレンス等の課題が解決されない限り実用的な量子計算機の実現は見えてこないという話であった。

ー材料学的側面から見たジョセフソン接合（内藤方夫・農工大）ー

内藤先生には、酸化物・ホウ化物・鉄系での薄膜成長・接合作製評価のご経験から得られた確かな知見をまとめていただこうと考えて講演をお願いした。講演では直接手掛けておられない Nb 系を含め、MgB₂、酸化物系とジョセフソン接合を主に 3 つのグループに分け、それぞれの材料系の優れた点や困難な点・今後の課題を化学の立場から解説していただいた。日頃超電導デバイスプロセス開発に関わる報告者にとっても、基礎的な立場からデバイス作製をとらえる本講演ならびに講演資料は大変有益な内容であった。

なお、両先生ともに、ジョセフソン効果は Josephson の予言より早く Giaever らによって実験的に観測されていたと指摘されていたことが印象的であった。実験家はデータを注意深く虚心に見ることが大切である。

研究会後半の最新の研究成果についてのご講演は以下の通りである。

1) SIS 接合におけるサブギャップ電流の起源（野口卓・国立天文台）

宇宙観測用 SIS ミキサーの高性能化をめざし、サブギャップリークの原因を追究した近年の一連の研究のまとめ。

2) 電気磁気化学の創成 -SQUID を用いた電気化学反応の可視化- (塚田啓二・岡山大)

燃料電池の白金触媒における水素応答を微小な電圧 (あるいは電流) として SQUID で検出する新しい試みを紹介。

3) 集積型極低温電流比較器(ICCC) -量子電気標準の高度化- (前澤正明・産総研)

報告者も関わっている ICCC のねらいと最近の進展。

4) パイ接合 (超伝導/強磁性接合) の様々な可能性 (前川禎通・原研)

超伝導/強磁性接合のさまざまな特性、量子論理ゲートへの応用などを解説。

5) 超伝導体/半導体接合の物理とその応用 -超伝導エレクトロニクスから超伝導フォトンクスへ- (赤崎達志・NTT)

NTT で研究されてきた超伝導/半導体接合のレビューに加え、最近の LED 発光領域へのクーパ対の注入実験に関して解説。(超電導 Web21 2008 年 10 月号 p.31 に解説有。)

なお、本研究会の資料集は冒頭に述べた会員向け”超伝導ニュース”に掲載される予定である。

また、超伝導分科会が企画したシンポジウム 2 件が 2012 年春の応用物理学会 (早稲田大学) で開催される予定である。開催予定日はいずれも 3 月 15 日(木)で、午前は超電導分野に大きな足跡を残された、前超電導工学研究所所長・田中昭二先生を追悼するシンポジウム「高温超伝導研究開発の 25 年と将来 - 発見前夜から超伝導デバイス・線材開発まで -」、午後は「動き始めた超伝導技術 - 風力発電と超伝導医療 -」が予定されている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 2)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

超電導状態にある高温超電導線材は抵抗ゼロのまま大電流を流すことができる。このとき線材中にはクーパー対の集団が形成されており巨視的な波動関数で表される状態にある。超電導状態は液体ヘリウムにおいて生じる粘性のまったくない超流動状態によく似ているが、ヘリウム原子は電荷を持たないが、電子は電荷を持っているために抵抗なしで大電流を運ぶことができる。しかし大電流とはいうものの、線材に無制限に電流を流せるわけではない。抵抗なしの電流値には上限があるのだ。その上限を決めているのが今回の話題である“渦糸”の運動である。

2. 超電導現象とその波及

(1) 自発的な対称性の破れ

最近では科学の急速な発展に伴い宇宙の構成やその起源に関わる理解が進み、また新粒子発見への期待も高まって新聞紙面を飾ることも多い。CERN の LHC (スイス) という史上最大の素粒子加速器では、現代物理学の最高峰、標準理論の最後のピースであるヒッグス粒子 (ヒッグス場) の発見が間近に迫っていると考えられている。LHC には多くの日本の先端技術が用いられており、その中心となる超電導線材や超電導コイル技術では日本企業の貢献も大変大きい。そしてこのヒッグス粒子および標準理論の成り立ちそのものにも超電導が果たした役割は極めて大きいのだ。

水は高温では気体であるが、温度を下げるにつれ液体そして固体になる。このように物質の相が温度に伴って変化することを相転移とよび、境目の温度を臨界温度 T_c とよぶ。超電導であれば高温相は常伝導状態であり、 T_c 以下の低温相は超電導状態である。常伝導状態では電子の運動はランダムであり特別な方向は存在せず対称的であるが、超電導状態は巨視的な波動関数で表される特別な秩序状態にあり対称性が破れている。超電導は自発的な (ゲージ) 対称性の破れの最初の例である。

超電導に触発され 1960 年、南部陽一郎 (2008 年ノーベル物理学賞) は真空すなわち見かけ上何もない宇宙も、超電導の電子の海のように何かが真空を埋め尽くし、その中で宇宙はうごめいていると説いた。その後、ヒッグスは超電導で起こるマクスナー効果との類推から真空は相転移によって南部の言うように対称性が破れており、そこではクーパー対の海のような秩序状態 (ヒッグス場) が存在し、素粒子はヒッグス場との相互作用によって質量を獲得するとした。当時、素粒子の質量を説明することが困難だったがヒッグス場はこの状況を救い、ワインバーグらによって標準理論の根幹をなすものとして取り入れられていく。

(2) マクスナー効果の本質

ここで超電導に話を戻そう。超電導の特徴は抵抗ゼロとともにマクスナー効果を示すことはよく知られている。マクスナー効果は抵抗ゼロの完全導体の考えでは説明できず、超電導特有の反磁性の効果であることが分かっている。つまり、超電導体に磁場を印加すると、ロンドン侵入長 λ とよばれる短い深さの超電導体表面に抵抗ゼロの遮蔽電流が流れ、外部磁場を完全に排除するのだ。この状態は臨界磁場 (H_c) まで続き H_c で常伝導に転移する。このような超電導体のことを第一種超

電導体とよび、水銀や鉛がこれに相当する。ところがこれらに他元素を添加して合金化すると別種の超電導体に生まれ変わり、 H_c を超えた磁場中においても超電導が維持される。これは後述する第二種超電導体とよばれるものだ。

現代物理学では素粒子間に働く力は粒子のやりとりで説明される。電磁気力も電荷を持った物体どうしが仮想的な光子すなわち電磁場の量子をやりとりすることで生じる。光子は質量をもたないので遠くまで飛んでいくことができ、電磁気力はかなたまで届く。ところが超電導体の中ではマイスナー効果が働くため磁場はその内部深くまで侵入できない。これはあたかも電磁気力を伝える光子が超電導体の中では質量を持ち、遠くまで飛んでいくことができなくなったとも解釈できる。素粒子の一部が質量を持つのも、宇宙誕生後に真空が相転移を起こして対称性が破れ、超電導のような一種の秩序状態になっていると考えるのが現代物理学の解釈なのだ。

マイスナー効果、ギンツブルグ・ランダウ理論、BCS 理論と超電導の基本概念は物理の最先端領域に数々の影響を及ぼしてきた。宇宙が一種の超電導状態になっているなどなんとも壮大な話である。

3. 渦糸の形成

さて、風呂の栓を抜いたときやキッチンの流しで水の吸い込み口を見ていると、図 1 のような渦運動が起こる。中心に穴ができ、その周りに水が回転運動する。この種の渦のことを流体力学では渦糸とよび、中心の穴を芯とよぶ。

(このような渦は自然界にもたくさん見受けられる。鳴門海峡のうずしおや竜巻、台風、はては木星の大赤斑や渦巻銀河などがそれだ。) ボーズ・アインシュタイン凝縮した液体ヘリウム (超流体とよぶ) においてもこのような渦糸が生じると指摘したのは素粒子物理で有名なファインマンだ (1955 年)。液体ヘリウムからなる超流体は巨視的な波動関数で表される状態になっているので、水や台風などとはちがって渦の強さも量子化される。波動関数は位相と振幅を持った波なので、渦糸 (ヘリウム原子サイズの穴) の周りを一周したときぴったりと重ならない。

そのため位相の増加は 2π の整数倍に限られる。こうして超流体の中で生じる渦糸の強さも量子化され、ある最小単位のとびとびの場合に限られてしまうのだ。

ではなぜ渦糸が生じるのか? ここでドーナツ型の中空の容器に液体ヘリウムを入れ、適当な軸をつけてコマを作ったと考えよう。これを一定速度で回転させながら臨界温度以下に冷却してボーズ・アインシュタイン凝縮を起こさせ、その後モーターのスイッチを切ると容器そのものは停止するが、内部の超流体は粘性がないためいつまでも回り続ける (永久回転)。そこでさらに回転速度を高めてみよう。するとある一定の速度以上に達すると超流体中に渦糸が発生してくる。先に述べたように渦糸のまわりには超流体が環状に流れており、渦糸が量子化された一定の回転エネルギーを持つことが明らかだろう。これより、超流体全体の回転エネルギーがある一定値を超えると耐え切れなくなり、過剰な回転エネルギーが小さな渦糸の回転エネルギーに分断されその侵入が起こったものと考えられる。自然はエネルギーが低い状態を好むので、大きな永久回転として一生懸命耐えてエネルギーを上げるより、小さな渦糸の永久回転に分かれることで全体のエネルギーを下げたともいえるだろう。

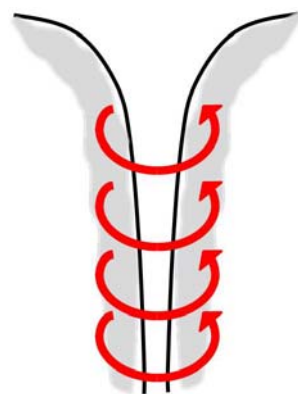


図 1 渦糸の芯とその周りの回転運動の模式図。

4. 超電導体における渦糸

相転移を起こして秩序状態にある超電導においても同様にして量子化された渦糸が発生する。ギ

ンツブルグ・ランダウ理論を基にして 1957 年に渦糸の存在を見事に示したのはアブリコソフであった（2003 年にギンツブルグとともにノーベル物理学賞）。渦糸の存在が許される超電導体を第二種超電導体とよぶ。ランダウ自身も超流動でノーベル賞を受賞しているが、その弟子であるアブリコソフがファインマンの渦糸の論文発表のはるか前に、超電導の渦糸の存在についてランダウに進言したとき、師の逆鱗にふれ論文を長く机の中にしまいこむ羽目になったという逸話がある。どうも論文の中でロンドン理論を引用したのが原因らしい。（ランダウはファインマンが大好きでロンドンが嫌いだったのだ。）しかし、その後ファインマンの渦糸のおかげで陽の目を見たアブリコソフの渦糸は、超電導の発展において大活躍することになる。

超電導の場合にコマの回転に相当するのは、お察しのとおり外部磁場である。大きな永久回転はマイスナー効果の部分に相当し、ある一定の回転速度とは下部臨界磁場 (H_{c1}) に相当する。この磁場を超えると超電導体は外部磁場の圧力に耐え切れず、磁場のエネルギーを下げるため小さな渦糸の侵入を許す。超電導の渦糸（図 2 参照）は渦のまわりにクーパー対からなる永久電流が λ の範囲で環状に流れている。しかし液体ヘリウムとの大きな違いは、クーパー対は電荷を持っており電流を運んでいるという点だ。このためこの環状電流によって超電導の渦糸には量子化された磁場が閉じ込められている。この磁場のことを磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) とよび、渦糸のことを量子化磁束線ともよぶ。超電導の渦糸の芯にはクーパー対が存在せず常伝導状態の領域ができていると考えられ、芯の半径をコヒーレンス長 ξ とよんでおりその長さは絶対零度ではクーパー対の大きさにほぼ等しい。

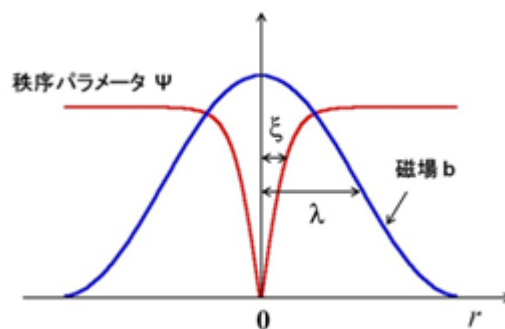


図 2 渦糸の内部構造。渦糸の芯の半径は ξ であり、 λ 程度の範囲に環状の永久電流が流れている。

クーパー対の海の中に渦糸が生じた状態を混合状態とよぶが、この状態は渦糸がぎっしりと詰め込まれ渦糸中の常伝導領域が重なるまで続く。このときの磁場を上部臨界磁場 (H_{c2}) とよびこの磁場で超電導状態は完全に壊れることになる。以上のことから短いコヒーレンス長を持つ超電導材料は低い H_{c1} と高い H_{c2} を持ち、極めて広範囲にわたって超電導状態を維持することができる。なお、渦糸は同じ向きの量子化された磁場を持つことからお互いに反発しあい、混合状態においては一般に三角格子（アブリコソフ格子ともよぶ）を組む。現在ではアブリコソフ格子はさまざまな方法によって可視化されている。各サイトに行けば渦糸運動の動画も楽しめる。[1\), 2\)](#)

5. 渦糸の運動と抵抗発生

通常、超電導線材は磁場中において使用される。そこで垂直磁場中におかれ混合状態にある超電導線材を考えよう。ここで線材に電流を流すと線材のまわりには電流の向きと右ねじの関係にある磁場が生じ、垂直磁場と重なって線材の片側の磁場が強くなる。各渦糸は磁束量子を持っているため、片側の磁場が強くなるということはその部分の渦糸密度が増大し、その反対側が疎な状態にあることを意味している。そのため電流と磁場の双方に垂直な方向へと渦糸を押しやって、渦糸分布を均一化しようとする力が働く。この力はローレンツ力とよばれ、単一渦糸に働く力は電流と磁束量子の積に比例した量である。

ローレンツ力によって渦糸は電流に対して横方向へ動こうとする。単一渦糸が一秒間当たり q 個の割合で電流を横切ると電流方向に $q\Phi_0$ の電圧が発生する。多数の渦糸が線材を横切るようになると電流方向の線材の両端には大きな電圧が現れ、あたかも有限の抵抗を持った状態になる。これを

磁束フロー状態という。この関係を渦糸の運動の速度 v と磁場 B で表せば $E=Bv$ の電場が発生する。こうして混合状態にある超電導体に電流を流すと、渦糸の運動に伴う抵抗が生じエネルギー損失が発生してしまうことが示される。

しかしながら、苦労して臨界温度の高い物質を見出し、長い時間をかけて線材開発し、電流を流してみたら渦糸の運動により抵抗発生してしまっって線材が使いものにならなかつたら大変困ったことである。したがって何としても渦糸の運動を止め、大電流を流しても抵抗発生のない線材に作り込む必要がある。それを可能とする技術が渦糸のピン止めである。そこでは小さな結晶欠陥たちが大活躍する。次回はこのピン止め技術について触れることにしたい。

参考文献：

1. <http://www.youtube.com/watch?v=TxVqO5zPmvU>
YouTube のサイトで日立のローレンツ顕微鏡による渦糸運動のビデオがみられる
2. <http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/groups/amks/superconductivity/sv/>
オスロ大学のサイト 磁気光学で見た渦糸運動のビデオがある

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q:「超電導状態になる炭素繊維を開発したとの新聞記事がありました。どういう特徴を有しているのでしょうか。また、どういう応用が期待されるのでしょうか?」

A:よく知られているように超伝導磁石に応用されている線材は金属線であり、銅のマトリックスにより安定化されています。実用化され始めた酸化物超電導体線材や研究中である MgB_2 線材では、原料が粉末であるためにハステロイなどの Ni 基合金や銀シースなどの金属パイプを用いてテープ状・線状にして使われようとしています。今回、我々が報告した「フラーレンナノウィスカーの超電導化」では「もともとが繊維状であるものを超電導化して、超電導線として使えないだろうか?」という、これまでの「超電導物質を線材にする」とは異なった考えから出発しています。今回の研究のベースとなったのが物質・材料研究機構の「ノベルナノカーボンの開発と機能化」(サブテーマリーダー: 宮澤薫一) と題するプロジェクトです。そのテーマの一つが超電導を研究している高野グループとフラーレンナノウィスカーやファイバーなどの合成と新機能の研究をしている宮澤グループとの共同研究「フラーレンナノウィスカーの超電導化」です。

図 1 を見てください。これはフラーレンナノウィスカーと呼ばれる繊維状の C_{60} を構成ユニットとする超分子です。これまでの C_{60} 粉末や結晶とは異なり図 2 に示すような液-液界面析出法 (LLIP 法) という液体と液体の界面の形成と拡散現象を利用した方法で作られ出されることが 2001 年宮澤によって発見されました。今回、実験で体積分率 80 %以上の超電導化に成功したのは LLIP 法で作製された平均長 5 ミクロン程度の短く細長いウィスカーです。これまでは、 C_{60} へのアルカリ金属のインターカレートで超電導体積分率を上げることは簡単ではなく、これがバルク応用の問題点でもありました。今回の成功は、フラーレンナノウィスカーの LLIP 法というウィスカーの製法に秘密があると考えています。磁化から見積もった臨界電流密度も図 3 のように高く 5 T まではほとんど低下しないという特徴があります。



図1 フラーレンナノウィスカーは、フラーレンを原料にした糸状の結晶で、さまざまな長さのものが作製できる。

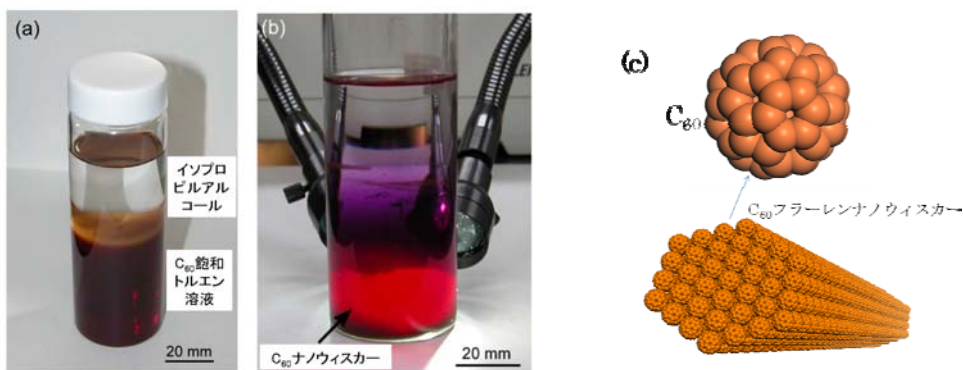


図2 (a)LLIP 反応の実験の様子 (b) 反応によって生じたフラーレンナノウィスカー (c) C_{60} フラーレン (上) とフラーレンナノウィスカーの模式図 (下)

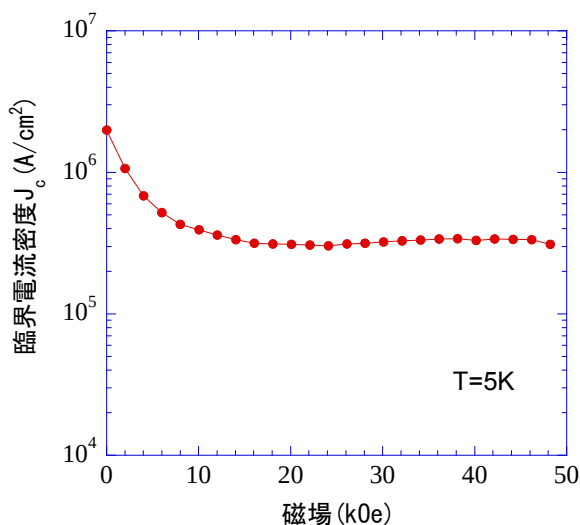


図3 フラーレンナノウィスカー超伝導体の臨界電流密度 (5 K)

磁場の強さが変化しても臨界電流密度は一定を保つ範囲が広く、優れた超伝導特性を有する。

実験は始まったばかりですのですぐに応用ということは難しいですが、フラーレンナノウィスカーは比重が金属の 4 分の 1 程度で絹ほどしかない非常に軽い素材であり、それを生かしてこれまでの金属線材や酸化物高温超伝導線材とは異なった応用があるのではないかと期待しています。将来の応用に向けて束ねたり編んだりできるような軽いしなやかな超電導繊維ができ、それこそ魔法の超伝導絨毯のようなものができたらと夢を膨らませています。最後に付け加えますと、フラーレン自体は人類誕生以前から地球上に存在する安定物質でありますし、フラーレンナノウィスカーは生分解性があり環境にもやさしい物質です。

回答者：独立行政法人 物質・材料研究機構 竹屋浩幸 様 宮澤薫一 様 高野義彦 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

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