

掲載内容 (サマリー):

特集: 超電導産業・輸送機器技術

超電導磁石を使った液体攪拌技術
バルク超電導磁石を用いた多目的磁気分離技術
強磁場中における日本酒もろみの発酵技術
鉄道車両用超電導主変圧器の開発状況
超電導かご型誘導 / 同期モータの開発
電気推進船舶の展望

超電導関連 3-4月の催し物案内

新聞ヘッドライン (1/20-2/16)

超電導速報 - 世界の動き (2007年1月)

低温工学会 第一回極低温技術スクール「低温計測からヘリウムの液化・超流動生成まで」
開催報告

隔月連載記事 - 高温超電導の謎に迫る (その2)

読者の広場(Q&A) - 日本では超電導関連の研究開発に研究者は何人くらいが携わっているのでしょうか?

[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

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

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://keirin.jp>



特集：超電導産業・輸送機器技術 「超電導磁石を使った液体攪拌技術」

芝浦工業大学
材料工学科 材料工学専攻
教授 村上雅人

医療分野やバイオ分野では、技術の高度化にともない、高い清浄性が環境に要求されている。これら分野では薬品どうしの混合なども行われるが、すべての作業が密閉容器内で行われる必要がある。

清浄性の向上には、非接触の攪拌が有効である。この非接触攪拌を行うために超電導を利用した装置がすでに考案されている。今回開発した超電導攪拌機は、超電導バルク体の特性であるピン止め効果によって、超電導バルク体と攪拌させる翼の両方を安定な状態で浮上させたのちに回転させる方法を用いている。これにより、密閉容器内での非接触攪拌が可能となり、よりクリーンな環境で溶液を攪拌させることができるようになる。

図1に、開発した攪拌機の概略図を示す。この装置は、超電導体と永久磁石のカップリングにより攪拌を行う。この攪拌機は3つの主要な部分： 駆動部と接続し回転トルクを攪拌機に伝達する下部磁石回路；攪拌容器の外部に設置したクライオスタット内に配置され、液体窒素内で回転トルクを伝達するバルク超電導体； 攪拌容器内で液体を攪拌させる回転翼のついた上部磁石回路により構成されている。

実際の攪拌工程はつぎのように行われる。まず、クライオスタットの底にバルク超電導体を設置する。この際、下部磁石回路と上部磁石回路は、一定の距離を保った状態で静置されている。この状態で、液体窒素により超電導体を冷却する。

この冷却によって超電導体とその上下の磁石間にピン止め効果による磁気カップリングが生じる。ここで、下部磁石回路を上方へ移動させると、バルク超電導体および上部磁石回転翼が非接触の状態で浮上する。この状態で、モータにより下部磁石を回転させると、超電導体、上部磁石回路が連動して回転し、溶液の攪拌を行うことができる。

磁石回路は、直径が約 100mm のステンレス製の外枠に、N 極および S 極を交互に埋め込むような構造をとっている。これはピン止め効果によって回転トルクを伝達するためである。また、超電導体としては、直径が 110mm および 140mm の Gd-Ba-Cu-O 超電導体を使用している。トルクは初期ギャップに依存するが、超電導体と磁石回路の距離が 15mm の場合に、300Ncm が得られている。100Ncm が容量 30 の攪拌に必要とされており、実用レベルの値が得られている。今後は、実用機を試作して、性能評価を行っていく予定である。

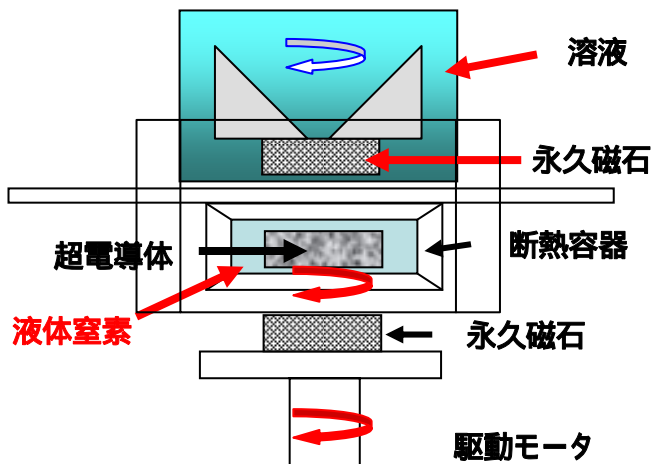


図1 新しく開発した超電導攪拌装置の模式図

特集：超電導産業・輸送機器技術

「バルク超電導磁石を用いた多目的磁気分離技術」

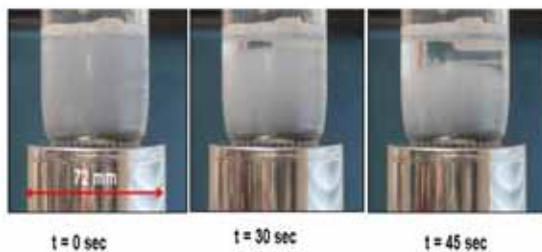
大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻
学内講師 武田真一

1. はじめに

これまで我々の研究グループは水溶液中の浮遊性物質（例えば微粒子、油滴、繊維状物質、微生物等）や可溶性物質（アンモニア態窒素やリン等）に対する担磁プロセスを種々開発し、様々な磁気分離システムと組み合わせることで実用レベルの廃水処理が可能なシステムの開発研究を行ってきた。その中で大型工場廃水よりも少量で多品種の処理を対象とする小型廃水処理システムの必要性や、バイオやメディカル分野への新規応用開拓の要望が多く寄せられてきた。そこで、バルク超電導磁石を用いたシステムであれば、比較的小型で工夫すれば持ち運びも可能になることから、バルク超電導磁石の磁気分離の可能性を検討してきた。その結果、様々な分野への応用の可能性が確認できたので紹介する。

2. 磁気分離の汎用性のための前処理法 担磁プロセス

磁気分離法は、溶液中から汚染物質や有用物質などの対象物質を、磁場を利用して分離・回収するプロセスである。分離・回収の対象物が強磁性物質でない場合（例えば常磁性や反磁性物質の場合）通常永久磁石を利用した方法では磁場を利用して分離することは困難である。一方、超電導磁石を用いた場合は、常磁性物質や反磁性物質も分離可能ではあるが、経済性を維持しつつ処理を行うことは難しい。とくに、廃水処理の場合、処理コストの点から経済的に成立させるのは困難である。しかしながら、常磁性や反磁性物質に強磁性粒子を付着させること（担磁と呼ぶ）が可能となれば、幅広い種類の物質の分離・回収に磁気分離技術が適用可能となり、しかも経済性も維持できるシステムの構築が可能となる。



3. モデル実験

油滴が水に分散している O/W エマルジョンに強磁性粒子と凝集剤を用いて担磁プロセスを施したサンプル溶液を調製し、ガラス容器に移した後、図1の写真に示すようにバルク超電導磁石 (GdBaCuO バルク超電導磁石) の上に設置した。その結果、エマルジョンと磁性粒子からなる磁性フロックが約1分程度で急速に沈降させることができた。このことから、バルク超電導磁石を用いることで磁気牽引力を磁石表面から数 cm 離れた位置まで働かせることが可能であり、永久磁石では達成できなかった速度で分離できることが分かった。

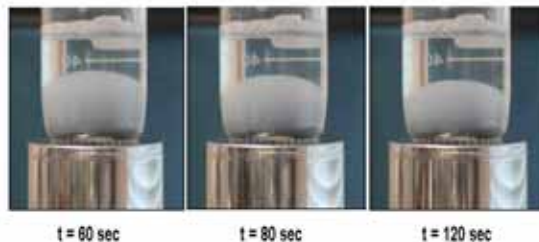


図1 バルク超電導磁石を用いて行ったエマルジョンの磁気分離過程の写真。浮遊する油滴が時間

4. 磁気分離システム設計法

磁気分離法の駆動力は被分離物質に印加される磁気牽引力である。一般に磁気力 F_M は次式(1)で表わされる。ここで、 b は磁性粒子半径、 μ_0 は真空の透磁率、 χ_p 、 χ_f はそれぞれ粒子、媒体の磁化率、 H は磁場の強さ、 ∇H は磁場勾配である。

$$\begin{aligned} F_M &= 4 / 3 \pi b^3 \mu_0 (\chi_p - \chi_f) H \cdot \nabla H \\ &\cong 4 / 3 \pi b^3 M_s \nabla H \end{aligned} \quad (1)$$

$$F_D = 6 \pi b \eta (v_f - v_p) \quad (2)$$

$$v_p = v_f - \frac{2 b^2 \mu_0 \chi H \nabla H}{9 \eta} \quad (3)$$

最後の項は、体積と飽和磁化 (M_s) と磁気勾配の積である。これは、強磁性粒子の磁化が充分飽和していることが前提としてある。磁化が飽和する外部磁場は、約 0.3~0.5T であるので、これ以上の外部磁場が実現できているとした場合の近似項である。一方、磁気力に対抗するドラッグ力 F_D (流体からの力で、被分離体を押し流そうとする力) は(2)式で表される。ここで、 v_f 、 v_p はそれぞれ、流体の速度と粒子速度、 η は流体の粘度である。磁気分離を実施するためには、磁気力 F_M がドラッグ力 F_D を上回る必要がある ($F_M > F_D$)。両者を連立させて、 v_p で解くと、磁氣的に満足すべき条件が出る。これを(3)に示した。この式の右辺第 2 項は、磁気速度と呼ばれ、速度の次元を持つ、磁氣的性質をまとめた項となる。この磁気速度を設計していくことが、磁気分離システムを設計することになる。この磁気速度を大きくするために担磁プロセスがあるとも言える。例えば、処理速度を大きくしたい場合、超電導磁石のような強磁場の発生装置が必須となるが、(1)式から明らかのように磁場勾配が高いほど磁気牽引力は大きくなるので、磁石の特性だけでなく、磁場中に強磁性の細線を配置したりするなど、高勾配磁場を発生させるシステムを考えることも磁気分離を成功させるための要件となる。

5. さいごに

我々の研究グループは、磁気分離の基礎研究を 1997 年頃より行ってきたが、NEDO の支援による製紙廃水処理設備の実用化を契機に、展示会や学会等を通して日本国内だけでなくアジアやヨーロッパ地域からも注目される技術として知られるようになってきた。そこで、「磁気分離技術研究会 (仮称)」を設立し、磁気分離技術に関する情報交換やシステム理論、技術情報を発信するだけに留まらず、さらに環境分野やバイオ分野に応用可能な磁気分離技術の事業化を目的として、これまでに本技術に興味を持って頂いた企業群とコラボレーション可能な共同技術開発機構を目指すこととなった。今後、超電導工学の大きな一分野として成長していくことを心から願っている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業・輸送機器技術 「強磁場中における日本酒もろみの発酵技術」

九州工業大学
情報工学部
助教授 小田部 荘司

冷凍機冷却型超電導マグネットにより、長時間に亘って 10T もの強磁界を室温空間に印加できるようになった。このためこれまで実現できなかったような応用が考えられている。そのうちの一つに生物への影響がある。これまでオタマジャクシ、メダカ、線虫などの生物に与える磁界の影響が調べられてきたが、いずれも再現性にかけるという問題点があった。これに対して微生物は一度に多く個体に磁界を印加することができ、また世代交代も早いことから影響がはっきりと確認できる可能性が高い。我々のグループでは酵母に磁界を印加して日本酒を醸造するときに、味にどのような違いが現れるか調べることにした。日本酒は非常に繊細な醸造物であるので、差が大きくなる可能性がある。また人による官能試験(利酒)はかなり感度が高く、少しの差を検出できる。

日本酒の製造過程はかなり複雑であるので、ここでは麹汁を準備して日本酒もろみを作ることにした。麹汁は米と米麹をまぜて糖化させたものである。これを福岡県工業センターで準備してもらった。麹汁は飴色をしており、甘い。これに実際に日本酒を作る清酒酵母を入れる。酵母はグルコースをアルコールに発酵させて変換する。酵母を入れた麹汁の温度を 15 度に保ち、10T の磁界を印加した。比較のために磁界を印加していない試料も準備する。福岡国税局の酒類鑑定官により官能試験を行った。その結果、かなりはっきりと磁界をかけた方が甘いという結果を得た。また化学定量分析では、磁界をかけた方はグルコースの量が若干多く、アルコールの量が少ないことがわかった。さらに酵母の数を確認したところ、磁界をかけた方は酵母の数が少ないことが分かった。これらのことから磁界をかけると酵母の活動が抑えられていることが結論づけられる。つまり、酵母の活動が抑えられているので、グルコースが十分にアルコールに変換されず、甘くなったと考えられる。このことを酵母数の時間変化を測定することにより確認をしているところであるが、さまざまな条件下で同じ結果が得られており、再現性が確認できていると考えている。

磁界をかけるとなぜ酵母の活動が抑えられるかは分かっていないが、酸素は磁性を持っており、また鉄を含む物質もあることから代謝に影響を与えていることが推察される。

これまで日本酒の醸造において酵母の活動を抑制する方法は温度をさげるしかなかった。実際、高級な吟醸酒は酵母の活動が最も盛んな 25 度程度ではなく、低温である 10 度でじっくりと醸造を行う。温度の他に、磁界により酵母の活動が制御できるようになると、これまで作ることができなかった味を作ることができるかもしれない。

なお、この研究は九州電力(株)との共同研究で実施されているものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業・輸送機器技術 「鉄道車両用超電導主変圧器の開発状況」

財団法人 鉄道総合技術研究所
材料技術研究部 超電導応用
上條弘貴

新幹線をはじめとする交流、交直流電車に搭載される主変圧器は、架線から受けた電力を、車両を駆動する主回路や空調装置などの補助回路に供給する重要な機器である。しかし、搭載機器の中では最重量物の一つであり、軽量化に対する要求が高い。特に、高速鉄道では、高速化、エネルギー消費の点からはもとより、地上設備への負荷の点からも、車両の軽量化が重要なテーマであり、主変圧器の軽量化は重要な研究開発要素である。新幹線の主変圧器では、コイル導体のアルミ化、部品類の軽量化などにより、容量あたりの質量が、初期(0系)の2kg/kVAから、最近の700系では0.74kg/kVAと1/3近くに減少しているが、さらなる軽量化と、効率の向上を目指して、巻線を超電導化することが考えられている。¹⁾

超電導化に関する研究は、1990年代初めに鉄道総研で金属系超電導線を用いた場合を検討したが、交流損失が大きく、冷凍機重量が大きくなるなどメリットが見いだせなかった。²⁾しかし、高温超電導線の開発が進んだことから、1990年代後半から高温超電導線を用いた超電導主変圧器の研究開発が、日本およびドイツで進められている。

鉄道総研では、九州大学、富士電機システムズ、大陽日酸などの協力を得て、1990年代後半から新幹線への搭載を前提に、Bi系超電導線を用いた超電導主変圧器の研究開発を進めている。表1のような仕様の超電導主変圧器について、軽量化のための最適設計を行った結果、従来の高温超電導線では交流損失が大きく、効率の向上は見込めても質量は4tを超え従来器より重くなるが、交流損失が理論値に近づき現状の1/5程度に低減されたと仮定すれば、効率は99%を超え質量も2.4tと従来器より20%程度の低減が期待できることなどを明らかにした。¹⁾2004年には、設計検討の結果をもとに、実規模の床上配置超電導主変圧器を試作(図1)して、電気的な特性を確認するためJIS-E 5007「鉄道車両用主変圧器の試験方法」の形式試験に準拠した評価試験、実際に鉄道車両に搭載された場合を想定した主回路組合せ試験および振動試験を実施して、容量が3.5MVA相当であることや、質量の見積もり、絶縁特性の確認など設計の妥当性を確認している。³⁾しかし、高温超電導線の特性が設計時の想定より低いいため容量が

表1 4MVA 鉄道車両用超電導主変圧器の仕様

一次巻線	4MVA、25kV、160A
二次巻線	3.6MVA、1.2kV×4巻線、750A
三次巻線	400kVA、440V、909A
%イビ-ダツ	現状(20%程度)と同程度
リアクタンストリクス	現状(対角要素0.8mH程度、非対角要素0.1mH程度以下)と同程度
試験方法	JIS鉄道車両用主変圧器の試験方法による。なお、二次巻線短絡時間は0.1秒。
設置箇所	床上



図1 実規模の床上配置超電導主変圧器

小さく、交流損失が大きい、冷凍機の冷却容量が小さく運転時間が制約されるなどの課題もあり、実用化に向けて、交流損失低減、1kW級冷凍機の開発などに取り組んでいる。

ドイツなどでは、周波数 16.7Hz の交流電化が採用されており、商用周波数の変圧器と比べて質量が重く、大きなものになっている。ドイツ、シーメンスでは、このような背景のもと高温超電導主変圧器開発の取り組みをスタートさせ、最初に 100kVA 小型モデル器を試作し、1999 年から 1MVA デモ器を試作して、50Hz および 16.7Hz における負荷損失、無負荷損失試験などの各種特性試験や、実際の運用を想定してコンバーターとの接続試験などを行った(図 2)。その後、さらに実規模の数 MVA プロトタイプ器を試作する計画を持っていたが、現在開発は中断しているようである。^{4), 5)}

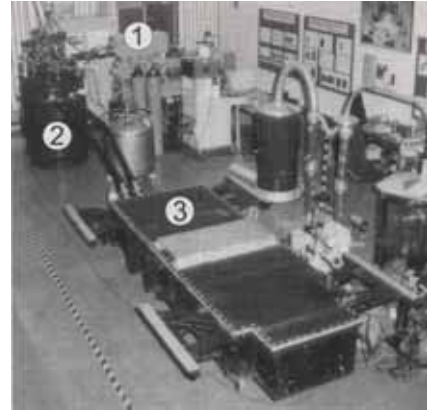


図 2 シーメンス社が試作した 1MVA 超電導主変圧器

参考文献

- 1) 上條弘貴、秦広、藤本浩之、坊野敬昭、井上亮二、伊賀吾朗、岩熊成卓、船木和夫：鉄道車両用 4MVA 高温超電導主変圧器の設計、電気学会静止器 / 超電導応用電力機器 / リニアドライブ合同研究会資料、SA-03-30/ASC-03-13/LD-03-13、2003. 1
- 2) 秦広、竹内典子：鉄道車両用主変圧器の超電導化、1994 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集、B1-9、1994
- 3) H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, A. Inoue, K. Nagashima, K. Ikeda, M. Iwakuma, K. Funaki, Y. Sanuki, A. Tomioka, H. Yamada, K. Uwamori, S. Yoshida : Presented at ASC 2006, Seattle, USA, Aug. 2006
- 4) R. Schlosser, H. Schmidt, M. Leghissa, M. Meinert : IEEE Trans. Applied Superconductivity, 13, No. 2, July 2003, pp. 2325–2330
- 5) M. Meinert, M. Leghissa, R. Schlosser, H. Schmidt: IEEE Trans. Applied Superconductivity, 13, No. 2, July 2003, pp. 2348–2351

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業・輸送機器技術 「超電導かご型誘導 / 同期モータの開発」

京都大学大学院
工学研究科電気工学専攻
助教授 中村武恒

近年、高温超電導 (High Temperature Superconductivity: HTS) 材料開発の目覚ましい進展を背景に、様々な HTS 応用電力機器が検討されている。特に、20 K 程度以上の高温領域で動作する HTS 同期モータの研究開発が精力的に行われており、電気装荷・磁気装荷の大幅な改善に伴う高出力密度化や小形軽量化への期待が高まっている。

一方、翻って従来型 (常電導) モータに注目してみると、効率や速度制御面で難があるものの、誘導モータ (特にかご型誘導モータ) が単純な構造や保守の容易性、安価、大量生産向きといった理由から広く使用されている。このことは、モータの長い開発の歴史の中で、ユーザからみると上記メリットが重要であることを明らかに示しているものである。そこで、筆者の研究室では誘導機のメリットを生かしつつ、超電導化に伴う高性能化 (小形軽量化や高出力密度化、大きな始動・加速トルクの実現) だけでなく、既存モータを凌駕する新機能 (誘導ならびに同期運転の両立性、同期運転に伴う高効率化、定トルク用の垂下加速特性、過負荷に対するロバスト制御性) の実現が可能であることを理論的・実験的に明らかにしている。

誘導モータの超電導化については、筆者の知る限り初めに Sim ら (Soonchunhyang 大学、韓国) が基礎特性を実験的に検討し、同期トルクの存在を確認した (残念ながら、同研究グループは現在研究を行っていないようである)。¹⁾ 最近では、石郷岡 (成蹊大) らによっても実験的検討が始められている。²⁾ また、公開特許公報を調べてみると、例えば常電導ロータバーとエンドリングを中空とし、その内部に HTS 材料を挿入する構造が提案されている。³⁾ 同構造において、まずモータを HTS の臨界温度以上で始動し、ある程度加速してから臨界温度より低い温度に設定後、“常電導 - 超電導 (ゼロ抵抗)”状態遷移を利用して磁束捕捉に伴う同期トルク実現の可能性を示唆している。しかしながら、上記状態遷移の実現には、すべりから同期運転に移行させるために 2 次巻線温度を変化させる必要があり、現実的でないと考えられる。また、始動に常電導ロータバーの抵抗を利用していることから、いわゆる 2 重かご型的特性になると予測される。

筆者らは、高温超電導材料の“磁束フロー - ゼロ抵抗”状態遷移 (常電導状態には遷移しない) を利用するため、上記温度制御などは全く必要なく、かつ始動 加速 同期のプロセスが HTS 線材の非線形通電特性によってオートマチックに実現することが大きな特長である。⁴⁾ また、本モータは高効率な同期定常運転を基本としているが、いわゆる乱調や脱調が起こりにくいモータを実現可能である。即ち、同期運転時に最大同期トルク以上の過負荷がかかった場合にも、すべりモードへ移行してほぼ定トルクで運転可能であり、負荷が除かれれば同期運転状態に速やかに移行することを実験的に確認している (負荷特性の一部については、非線形等価回路解析をベースとして定量的に説明できることを検証している)。⁵⁾ さらに、同期モータで問題となるいわ



図1 試作した高温超電導かご型回転子
外観写真

ゆる電機子反作用が起こらず、独立の界磁用電源も必要ない。図1には、筆者のグループが試作した HTS かご型回転子の外観写真を示す（このモータを、高温超電導誘導・同期モータ（HTS Induction-Synchronous Motor: HTS-ISM）と呼んでいる）。今後、本モータ開発のためのコミュニティが広がることを祈念したい。

参考文献

- 1) 例えば、J. Sim, K. Lee, G. Cha and J. Lee: "Development of a HTS Squirrel Cage Induction Motor with HTS Rotor Bars", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.14, No.2 (2003) pp.916-919
- 2) 例えば、T. Song and T. Ishigohka: "Experimental Study on Induction Motor with Superconducting Secondary Conductors", presented at ASC'06, Seattle, USA, 5LH052 (2006)
- 3) K. Higashi: "Motor and Motor Device", US Patent, No. 4,885,494 (1989)
- 4) 例えば、G. Morita, T. Nakamura and I. Muta: "Theoretical analysis of YBCO squirrel-cage type induction motor based on equivalent circuit", Supercond. Sci. Technol., Vol.19 (2006) pp.473-478
- 5) T. Nakamura, Y. Ogama, K. Nagao and T. Nishimura, in preparation

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導産業・輸送機器技術 「電気推進船舶の展望」

三菱重工業株式会社
長崎研究所
主幹研究員 星野徹二

近年の地球温暖化に対する関心の高まりや、資源ナショナリズムに端を発した原油価格の高騰により、自動車を始め輸送機器の効率向上(燃費向上)に対する要求が益々強くなってきている。特に自動車では、プリウスに代表される電動機とのハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車が脚光を浴びている。

船舶に対しても、COP3 に対応した CO₂ の排出削減や、IMO による NOX 規制の動きがあり、電気推進船に対する関心が高まりつつある。国土交通省主導で実施されているスーパーエコシッププロジェクトの研究開発の中でも、電気推進システムが採用されている。電気推進船の長所は、

- (1) 主機の 4 サイクル化等による NOX 排出量低減。
- (2) 機関室のレイアウトの柔軟性による有効スペースの拡大。
- (3) 騒音・振動の低減。
- (4) POD との組み合わせによる操船性の向上。

等である。これに対し、欠点は、

- (1) (発電効率)+(変換効率)+(電動機効率)を含めた総合伝達効率は 82~85%とディーゼル主機の伝達効率 96~99%より 10~15%低い。
 - (2) 初期コストが高い。
- 等である。

自動車と同様に、船舶に対しても電気推進船が普及する為には、これらの欠点を克服する必要がある。すなわち、大型船舶の主機として多用されている 2 サイクル低速ディーゼル機関は、他の機関と比べても非常に高効率

の機関(図 1 参照)であり、ディーゼル直結の従来推進方式を電気推進方式で置き換えるためには、推進効率の大幅な改善が不可欠である。この為、三菱重工(株)で開発した高速フェリーでは、図 2 に示す世界初のハイブリッド型 CRP ポッド推進方式を採用(1 軸船化)することにより、従来の 2 軸船に比べ大幅な抵抗低減と推進効率の向上を図り、電気推進にも拘わらず 13%の省エネを達成して

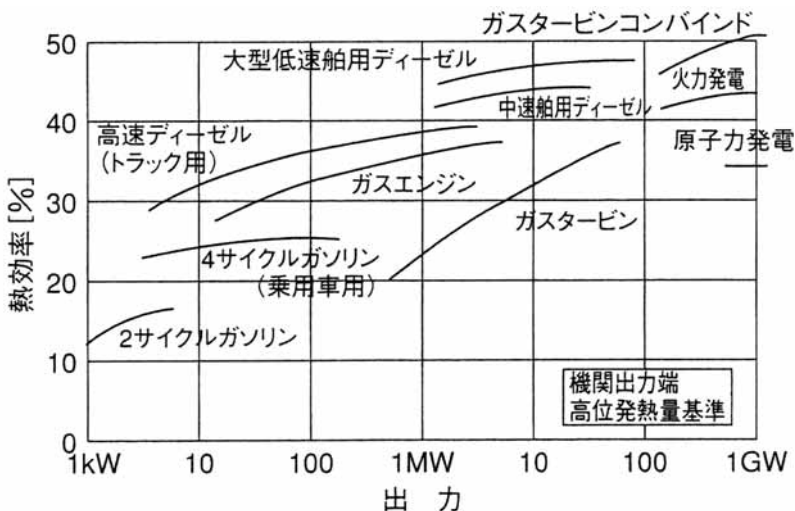


図 1 各種原動機の熱効率 (出典：三菱重工技報 Vol.34. No.3)

いる。しかし、通常の1軸船ではこのような大きな改善効果は期待できず、機関室レイアウトの柔軟性を考慮して大幅に抵抗の少ない船型を開発すると共に、発電効率、電動機効率の向上による総合伝達効率の改善が不可欠であろう。

急発進、停止を繰り返す自動車に比べほぼ定常状態での航行が大部分の船舶ではハイブリッド化による効率向上はあまり期待できず、超電導の採用による発電機や電動機のコンパクト化と効率向上が、電気推進船普及の一助となることを期待したい。

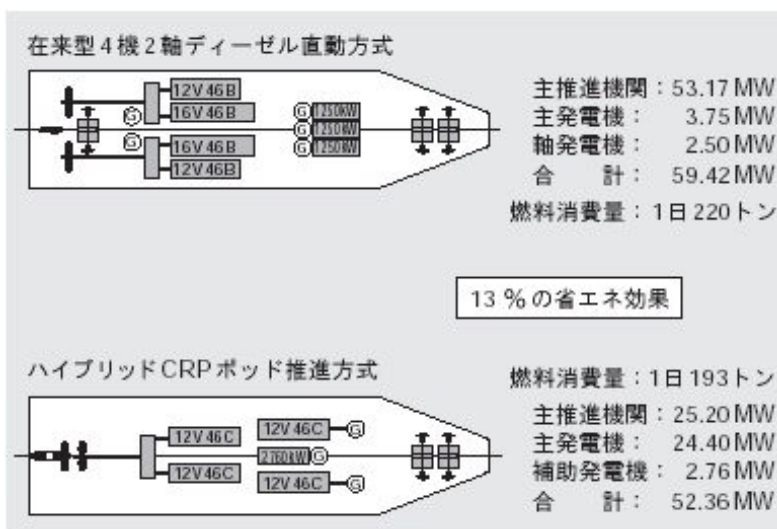


図2 推進プラントの比較 (出典：三菱重工技報 Vol.41 No.6)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 3-4月の催し物案内

3/5-9

APS March Meeting

場所：Colorado Convention Center, Denver, CO, USA

主催：American Physical Society

e-mail: gaier@aps.org, Fax: 301-209-0866

3/6

低温熱物性計測技術

場所：大陽日酸西新橋ビル 会議室、東京都港区

主催：低温工学協会 冷凍部会

問合せ：(独)物質・材料研究機構 強磁場研究センター 佐藤明男

Tel: 029-863-5453, Fax: 029-863-5470, e-mail: nquire@akahoshi.nims.go.jp

4/9-13

MRS 2007 Spring Meeting

場所：San Francisco, California

主催：Materials Research Society

問合せ：Tel: 724-779-3003, Fax: 724-779-8313, e-mail: info@mrs.org

4/16-20

Hannover Messe Energy Conference

場所：Hannover, Germany

主催：Deutsche Messe

問合せ：Tel: +49-511/89-0, Fax: +49-511/89-32626, <http://www.messe.de>

4/22-27

Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference - 48th ENC Conference

場所：Daytona Beach, FL

問合せ：<http://www.enc-conference.org/>

e-mail: enc@enc-conference.org, Tel: 505-989-4573, Fax: 505-989-1073

4/23-26

TTC Meeting (Tesla Technology Collaboration)

場所 Fermi National Accelerator Lab

主催：SMTF and FRA(Fermilab) with Participation of STF(KEK)

問合せ：e-mail: sazama@fnal.gov

4/27

東北・北海道支部 2007 年度総会・講演会「普く知りたい超電導機器開発」・見学会

場所：東北大学金属材料研究所 本多記念館視聴覚室(3階) 仙台市青葉区

主催：低温工学協会 東北・北海道支部

問合せ：東北大学金属材料研究所 渡辺和雄

Tel: 022-215-2147, Fax: 022-215-2149, e-mail: cshibata@imr.tohoku.ac.jp

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (1/20-2/16)

情報通信研 電磁界を可視化 1万点1秒内に 回路の欠陥把握 1/22 日経産業新聞
J-PARC 運用体制、一元的に センター核に 基本方針を固める 1/22 電気新聞
永久磁石 用途広く活用広がる MRIに威力 医療分野で活躍 高磁界への開発盛んに 1/22
日経産業新聞
「ねじれ」で挑戦 核融合発電 プラズマ温度1億度以上、超高密度 条件達成に磁力で封じ込め 1/22 読売新聞(夕)
次世代キャパシタ 高純度の量産法が焦点 1/24 日経産業新聞
多結晶シリコン 品薄感 08年まで続く 各社増産への対応急ぐ 1/24 日経産業新聞
リニア実験線の延伸承認 国交省 1/24 フジサンケイビジネスアイ
分散電源市場、10年度1.2倍 富士経済まとめ 1/24 日経産業新聞
先端赤外(東京都八王子市) テラヘルツ波で 隠れた物質解明 1/24 日経産業新聞
核融合炉発電プランケット 第1壁の製作技術確立 原子力機構 1/24 日刊工業新聞、日経産業新聞
ITER 高出力化に可能性 原子力機構 実験装置で確認 1/29 日経産業新聞
原子力機構法 国との関係を明確化 文科省改正案 ITER計画進展で 1/29 電気新聞
RPS法 2014年度目標160億キロワット時 11年度から 太陽光2倍換算も 1/29 電気新聞、フジサンケイビジネスアイ
イットリウム系超電導ケーブル 住友電工、米に敷設 大規模送電実験 1/30 日経産業新聞
風力・太陽光など自然エネルギー 供給量3倍に拡大 14年度までに 電力会社に義務づけ 経産省 1/30 日本経済新聞、毎日新聞
RPS法 160億kW時へ 太陽光発電に優遇措置 1/30 日刊工業新聞
日立メディコ 中国で医療機器 自社販売 画像診断用 現地生産も拡充 1/31 日経産業新聞
住友電工 磁場、20センチ空間で8.1テスラ 高温超電導磁石で最高 2/1 日経産業新聞
半導体材料 世界2強 投資競う SUMCO 3500億円で能力3倍 2/2 日本経済新聞
核融合研究 “フォーラム”設置へ ITER BAなど 連携して推進図る 2/2 電気新聞
核融合研究開発プロ協力 欧州と協定調印 きょう 2/5 電気新聞
投機マネー 科学技術の未来につなげよう 2/12 日刊工業新聞
「技術経営力」で利益確保を追求 経産省が産技法改正案 NEDOと産総研 強化盛る 2/12 日刊工業新聞
科技ロードマップを作成 機械学会など4学会 2020-50年の展望探る 2/12 日刊工業新聞
高温超電導線材 昭和電線、量産にメド 従来よりコスト3割減 2/15 日本経済新聞、電気新聞、日経産業新聞、日刊工業新聞
次世代加速器、基本設計案を公表 技術開発、世界に1カ所建設 各国で本格化 2/16 日刊工業新聞

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報 - 世界の動き (2007年1月)

電力

American Superconductor Corporation (2007年1月8日)

2007年1月5日、American Superconductor Corporation (AMSC)は先日発表した Windtec の買収手続きを完了した。Windtec 社は今後 AMSC 社の完全子会社となり、同社の Power Electronic Systems 事業部として事業を推進する。オーストリアにある Windtec 社は、風力タービンシステムを設計し、その設計を初期フィー及びロイヤリティーを対価として第三者にライセンスングすることにより事業を行っている。Windtec 社の顧客には中国、日本、チェコの産業装置製造事業者、エンジニアリング会社等があり、カナダ、フランス、インド、韓国からも引き合いがある。AMSC 社最高責任者 Greg Yurek は次のように述べた。「この買収によりわが社の歴史の重要なページが開かれる。これにより、今日のエネルギー分野で最も急速に成長している市場でさらなる売り上げ増が期待できる位置につけることができた。わが社は D-VAR®及び PowerModule で3年間風力市場に寄与してきたところである。いまや我々は、風力発電システムの設計、ライセンスングから風力発電所のグリッド接続ソリューション向け電気システムまで、より幅広く、よりユニークな製品、サービスを提供できるようになった。財務的な観点からも、Windtec 社は AMSC 社に強いキャッシュ・フローのみならず、強力な収入増の手段をもたらしてくれる。この買収を完了したことにより、我々は今期新たな受注を得、また、来期の良好な財務パフォーマンスを確実なものとした。」Windtec 社は2006年12月31日締めめの12ヶ月間の収入が約1,300万ドルであり、利益が100万ドルであった。買収完了日時点で、Windtec 社は約3,500万ドルの受注残がある。

出典:

“American Superconductor Completes Acquisition of Windtec™”

American Superconductor Corporation press release (January 8, 2007)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=947620&highlight

American Superconductor Corporation (2007年1月16日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は商品グレード 344 超電導線材の世界記録レベルの生産を達成したと発表した。生産スピードは商品化に必要なコスト目標水準を上回るものである。同社は2007年12月に予定している最初の大量生産に向け順調に準備を進めている。同社線材担当副社長 Angelo Santamaria は次のように述べた。「我々はこれまでに商品グレードの電気特性を持つ線材の生産に成功しているが、市場ニーズを満たすにはそれだけでは十分ではない。魅力的な価格、同時に我々に利益をもたらすことができるコストの高性能線材を日常的に生産できるようにならないといけない。我々は、今や銅と同等のコスト・パフォーマンスを有する HTS 線材生産への明確な道筋を持っている。」AMSC 社は344 超電導線材 6,800m を顧客に出荷した実績を持っており、2007年3月までにはさらに3,200m を出荷する予定である。

出典:

“American Superconductor Demonstrates World-Record-Level Production Rates for 344 Superconductors with Commercial-Grade Electrical Performance”

American Superconductor Corporation press release (January 16, 2007)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=950395&highlight

Trithor (2007年1月16日)

Zenergy Power plc社は、2006年 Frost & Sullivan European Product Innovation of the Year Awardを受賞した。受賞理由は、電力及びマグネット向け先端次世代線材の研究と開発。Frost & Sullivanの上席研究アナリスト Kasturi Nadkarny は次のように述べた。「装置の運搬や据付コスト低減を睨み、風力発電事業者は常により軽くて、より安価で、より効率のよい部品、材料、デバイスを探し求めている。このような観点から、Zenergy社の軽量、高電導率次世代線材がそのトップランナーである。」

出典:

“Frost & Sullivan Product Innovation of the Year”

Trithor press release (January 16, 2007)

<http://www.trithor.com/pdf/press-en/2007-01-16-F&S-TT.pdf>

American Superconductor Corporation (2007年1月18日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は、韓国 Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.と、風力発電システム開発のため総額 200 万ドル超の契約を締結した。本契約の下、AMSC社の完全子会社 Windtec™が第1号プロトタイプの3-MW風力発電システムの開発を行うとともに、組み立て及び据付の支援を行う。Doosan社は2009年後半にはその生産を開始する予定。この新システムは3-MWシステムとしてはWindtec社の第1号機。Doosan社再生エネルギー開発チーム・ジェネラルマネージャーJong-Po Parkは次のように述べた。「AMSC社子会社のWindtec社はユニークな技術を提供し、Doosan社が風力発電市場に参入するに当たっての障壁を大きく引き下げる。今日の市場では1 MWシステムが一般的であるが、Windtec社の3 MWタービン設計技術により、いち早くわが社が世界のリーダーになれるものと確信している。また、長期に実り多い両社の関係を期待している。」この契約は、Windtec社の韓国市場参入の最初のケースである。

出典:

“AMSC Signs Wind Energy System Development Contract with Doosan Heavy Industries & Construction”

American Superconductor Corporation press release (January 18, 2007)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=951438&highlight

American Superconductor Corporation (2007年1月23日)

AMSC社の子会社 Windtec™社は、China-Southern-Loric社の一部門である中国の Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute (ZELRI)に Model WT1650風力発電システムをライセンスした。このライセンスには初期フィー約 200 万ドル及び 1.65-MWシステム販売毎のロイヤルティが伴うが、ZELRIが製造するシステムに必ずしもAMSC社の電気部品を組み込むことは義務付けられていない。このライセンスにより、ZELRI社が製造、設置を予定しているWT1650システム1号機からは、3,000万ドルを超える収入が期待される。ZELRI社は2007年後半にWT1650のデモを行い、2008年にフル生産を開始する予定である。

出典:

“AMSC's Windtec(TM) Sells License for New Wind Energy System Design in China”

American Superconductor Corporation press release (January 23, 2007)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=952775&highlight

American Superconductor Corporation (2007年1月30日)

American Superconductor Corporation (AMSC)と Siemens AG は、中規模容量 (2 MVA)の限流器で、商用に耐えうる性能を達成したと発表した。この限流器は、Siemens 社の特許を基に AMSC 社の 344 線材を使って製造された。このシステムは 7.5 kV (配電用途として広く採用されている 3 相、13-kV 級に相当) で稼動した。限流器は 25 回電流を遮断することに成功した。Siemens 社技術部門責任者 Heinz-Werner Neumueller は次のように述べた。「両社の協力の結果、世界の増大する電力需要に見合う信頼性ある電力グリッドを拡大していくため、事故電流を抑制することのできる商用限流器の開発に向け展望が開けた。」この成功により、AMSC 社及び Siemens 社は戦略アライアンスを 3 年度目も延長し、送配電グリッド向け限流器の開発、商品化を継続して進めていくことになった。米国エネルギー省は、今後 15 年間の限流器市場は数十億ドルに上ると試算している。

出典:

“American Superconductor and Siemens Achieve Commercial-Grade Performance Levels for Superconductor Surge Protection Device for Power Grids”

American Superconductor Corporation press release (January 30, 2007)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=955580&highlight

(ISTEC 国際部長 津田井昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

低温工学会 第一回極低温技術スクール「低温計測からヘリウムの液化・超流動生成まで」開催報告

独立行政法人 物質・材料研究機構
材料ラボ / 強磁場共用ステーション
沼澤健則

2007年1月24日、つくば市にて第一回極低温技術スクール（低温工学会教育・セミナー委員会主催）が開催されましたので報告します。低温工学会ではこれまでに20年間にわたり低温工学サマーセミナーを開催し、低温や超電導の基礎から最新のトピックスまでを取り上げてきました。しかしながら、講義形式という一方通行のためどうしても受動的な聴講となりがちで、より実践的な技術スクールに対する要望が少なからずありました。

本スクールはこのような視点から、体験を通して極低温技術に関する理解と興味を深めることを目標とし、テキストによる簡単な講習の後、実際の装置を用いた実習に力点を置いたものとしました。さらに開催期間を1日の日帰り可能な時間帯とし、講習費を個人でも気軽に参加できるものと設定しました（一般5千円、学生3千円）。この結果、15名が参加され（一般8名、学生7名）、遠くは金沢や岡山から泊まり込みで来られる方々もおり、技術スクールに対する期待を実感しました。

今回のスクールでは、午前中に低温計測の基礎と比熱計測技術、午後にヘリウムの液化と超流動ヘリウムの2テーマについて絞り込んで行いました。比熱計測では産総研で開発された断熱法による高精度比熱測定装置を用い、その構造から実験操作の実際までを実習しました。また、PIDコントローラによる温度制御を実感してもらうために、温度計とヒーターを用い、各パラメータを変化させ最適値を求める実験も行いました。ヘリウムに関しては筑波大学の低温センターにて実際の液化機を用い、液化の方法から制御方法までを学びました。さらに、液体ヘリウムの注入や超流動ヘリウムの生成方法を実習しました。ガラスデューワーを用い可視化できるようにしたため、ヘリウムの液面の様子が手に取るようにわかり、特に噴水効果の実験には委員も含めて参加者全員が釘付けとなりました。

以上のように、第一回の極低温技術スクールは盛況のうちに終了しました。受講者の一部には極低温をツールとして使うユーザーの方々もおり、開催のもう一つの狙いである、極低温分野以外への裾野の拡大は一定の成果を収めたと思います。今後はより魅力的な技術スクールを目指して内容の充実をはかる予定です。皆様のご参加をお待ちしております。



筑波大学での実習風景

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

高温超電導の謎に迫る (その2)

東京大学
大学院理学系研究科
教授 内田慎一

2.高温超電導ミステリー

前回、高温超電導研究が「ミステリーシリーズ」と書いたのは、この分野の多くの研究者の実感を一言で表現したものである。1つの謎に迫ろうとすると、そこから新たな謎が浮かび上がってくるからである。高温超電導研究は、常にこの繰り返しであった。

2.1 強い斥力

研究者が最初に遭遇した謎は、電子間の強い斥力相互作用(強電子相関と呼ばれている)であった。Cu 酸化物中の Cu は 2 価のイオン (Cu^{2+}) である。その電子構造はコバルト (Co) や鉄 (Fe) と類似しており、従って強磁性体の仲間である。強磁性あるいは反強磁性という物性は電子間の強い斥力相互作用によって起こる。斥力が弱い場合は、1つの電子軌道に上向き、下向きスピンをもつ2個の電子が入ることができる。多くの物質は、このために電子のスピン磁気モーメントが打ち消され(反)強磁性を示さない。しかし、斥力が強いと1つの電子軌道には1個の電子しか入らず(このことを電子相関という)、孤立した電子によるスピン磁気モーメントが発生し、(反)強磁性を示すことになるのである。反対に、超電導は電子間に働く引力を必要とする。この意味で磁性と超電導は水と油の関係にあり、磁性体の仲間の Cu 酸化物が超電導体になるとは全く予想外のことであった。

研究者は高温超電導発見後間もなくこの事実に気づかされたのであったが、この謎に対する解答として2つのシナリオを考えた。1つは、(反)強磁性状態にはマグノンと呼ばれるスピン磁気励起が存在し、これが結晶のフォノンと同様に、しかも、より強い電子間の引力を媒介するというものである。他方、斥力で超電導を起こすメカニズムも提唱された。RVB 理論と呼ばれているものである。粗っぽく言えば、斥力は電子が持つ電荷の間のクーロン力なので、電子のもつ「電荷をスピンから分離」させてしまえばよいという発想である。実際、 CuO_2 面は上向きスピンの隣には必ず下向きスピンが来るという反強磁性的環境であり、逆向きのスピン間で先に対を作ってしまうと電荷の方も対を作らざるを得なくなるという考え方である。

高温超電導体の電子相図(図1)でいえば、上記2つのシナリオの前者は、ドーピング x - 正孔ドーピングのみを考える - の大きいところの正常金属(フェルミ液体という)から、後者は $x=0$ の反強磁性絶縁体から出発して超電導

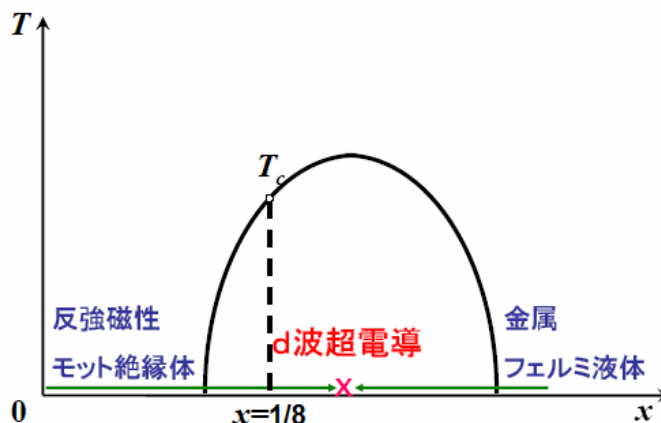


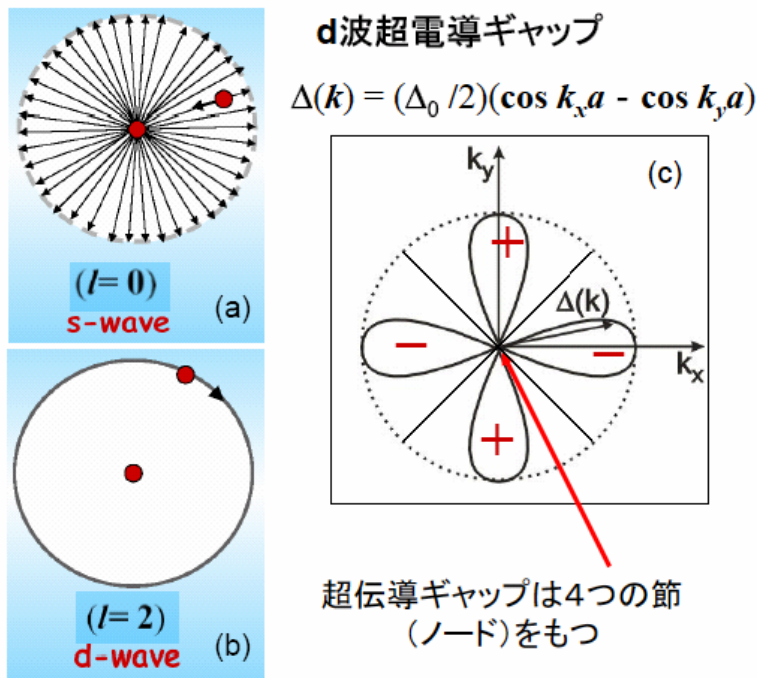
図1 Cu 酸化物高温超電導体の電子相図

相に迫ろうというものである。しかしながら、それぞれが予想する超電導相は本質的に異なったものにならざるを得ない。どちらがより正しいかを決定づける実験結果は無い。そのため論争がいまだに続いている。

2.2 d 波クーパー対

上述の2つのシナリオに共通しているのは、超電導状態のクーパー対がd波だということである。d波というのは、2個の電子が互いに距離をおいて対をつくることを意味する。通常の超電導体におけるクーパー対はs波で、一方の電子を中心においたとき他方が角運動量 $l=0$ でその周りを「回転」している。古典力学では角運動量ゼロの回転はありえず、相手の電子が中心にいる電子に向かって直線的に行き来する運動となる。量子力学の世界では直線の向きが不確定になり、クーパー対は図2(a)に示す「ウニ」のようなイメージになる。2個の電子は、このような断続的な接触を繰り返し微弱の引力を有効に働かせているのである。d波の場合は角運動量 $l=2$ なので、電子が相手の周りをグルグル回っている運動を想像すればよい(図2(b))。地球と月との関係のように、2個の電子は距離を保って運動するため、接触時の強い斥力を避けることができる。

高温超電導体のクーパー対がd波と確定したとき(1993年)、多くの研究者が超電導機構解明に大きく踏み出したと思った。と同時に以下に述べる謎も生まれたのである。d波クーパー対は古典力学描像では図2(b)であるが、実際は量子力学的運動状態である。クーパー対の束縛エネルギー(超電導ギャップ)¹⁾より正確には超電導の秩序パラメーター(Δ)は電子の運動方向(運動量)とともに変化し、正から負、負から正へと符号を変える(図2(c))。このようなクーパー対は必然的に不純物や結晶の欠陥の影響を受けやすい。クーパー対の一方の電子が不純物などに散乱され運動方向を変えると Δ の符号が変わり、散乱前と散乱後の状態が重ね合わさって Δ の打ち消しが起こってしまうのである。これは超電導の破壊・ T_c の低下をもたらす。我々はCu酸化物高温超電導体結晶が不純物や欠陥を数多く含んでいることを知っている。ドーピング操作は異種元素置換や酸素の出し入れで行われる。また、酸化物の結晶構造は金属と違って、原子と原子との間に大きな隙間があり、局所的に結晶変形が起こりやすくできている。何故このような物質でd波超電導が実現し、なおかつ T_c がとてつもなく高いのであろうか？



2.3 ストライプ秩序 - 超電導の敵か味方か？

(3)の擬ギャップミステリーは次回にまわして、(4)ストライプのミステリーについて触れる。ストライプ秩序は1995年に発見され

図2 (a) s波クーパー対, (b) d波クーパー対の古典的描像 (c) d波超電導ギャップ(秩序パラメーター)の運動量(k)依存性

たもので、²⁾ La系でのみ、またドーピング量 $x = 1/8$ の近くで特に明確に観測される。図3のように超電導相では均一に分布していた正孔が CuO_2 面上に1次元的に配列するのがストライプ秩序である。 T_c が著しく低下し、超電導秩序が抑えられたところで観測されるという意味でストライプ秩序は超電導と競合する秩序である。La系物質の T_c が最高で40Kにしかならないのもストライプ秩序との競合が原因であると考えられる。

一方、超電導とストライプのどちらかの秩序が勝つかは僅かな「環境の違い」が決めている。ストライプは、ドーピング量 $x = 1/8$ あるいは $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のLaの10%程度を同じ希土類のNdに置換すると優勢になる。いずれの場合も CuO_2 面外の原子がその位置を僅かにずらすこと(格子変形)に便乗してストライプ秩序が安定化する。逆に、これらの条件が微妙に変わると超電導の方が優勢になり、移り変わりの途中では超電導とストライプの共存が見られる。

ストライプ秩序はLa系特有のもので高温超電導にとって本質的ではないという見方もされた。しかし、ストライプ秩序発見の意義は、d波超電導だけがドーピングされた CuO_2 面で実現する秩序ではなく、他に実現可能な秩序が存在し、 CuO_2 面で競合・共存していることを明らかにした点にある。実際、Bi系物質においても、2次元的なチェッカーボード状の「電荷」秩序のようなものがミクロに超電導秩序と共存していることが観測されている。別の言い方をすれば、これは、例えば磁場で、あるいは温度を T_c 以上に上げて超電導秩序を破壊したとき、どのような状態が実現しているかという問題に関わることである。低温超電導体ならば、単に金属状態に戻るにすぎない。高温超電導体の場合は、それと競合する秩序状態が実現することを示唆しているのである。

今回述べた事柄がミステリーである理由は、これらが通常の超電導にとって厳しい状況を意味しているからである。原子間の隙間の多い、従って原子密度の低い構造であること、そしてドーピングによりキャリアが導入されることで、キャリア密度そして超流動密度(クーパー対密度) s_c が低温超電導体に比べ1桁以上も小さくなっている。 s_c は超電導の位相の硬さを表わす量であるので、¹⁾ s_c の小さい超電導体では必然的に位相のゆらぎが大きくなり、位相が揃う温度 T_c を低くする事になる。競合相の存在も位相を揃える障害となるだけでなく、超電導になることによって得するエネルギー(凝縮エネルギー)を小さくするであろう。更に、 CuO_2 面へのドーピングは多くの場合、 CuO_2 面外の構造に乱れを生じさせる。d波超電導は通常、このような乱れにより対破壊を起こす。このような状況で何故 T_c が100Kを超える程高くなるのだろうか？

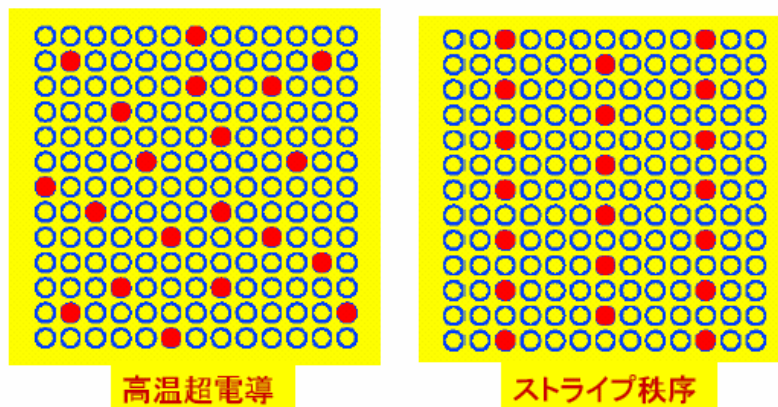


図3 超電導秩序とストライプ秩序におけるドーピングされた正孔の分布

参考文献

- 1) 内田慎一、「超電導 Web21」 連載記事 (2001年)
- 2) J. M. Tranquada *et al.*, Nature 375 (1995) 561-563.

読者の広場

Q&A

Q : 「日本では超電導関連の研究開発に研究者は何人くらいが携わっているのでしょうか？」

A : 結論から申し上げますと、この種の統計が見つかりませんのでお答えできません。しかし、学協会等の関連情報からある仮定のもとに推定いたしますと、およそ 2,300 人になります。

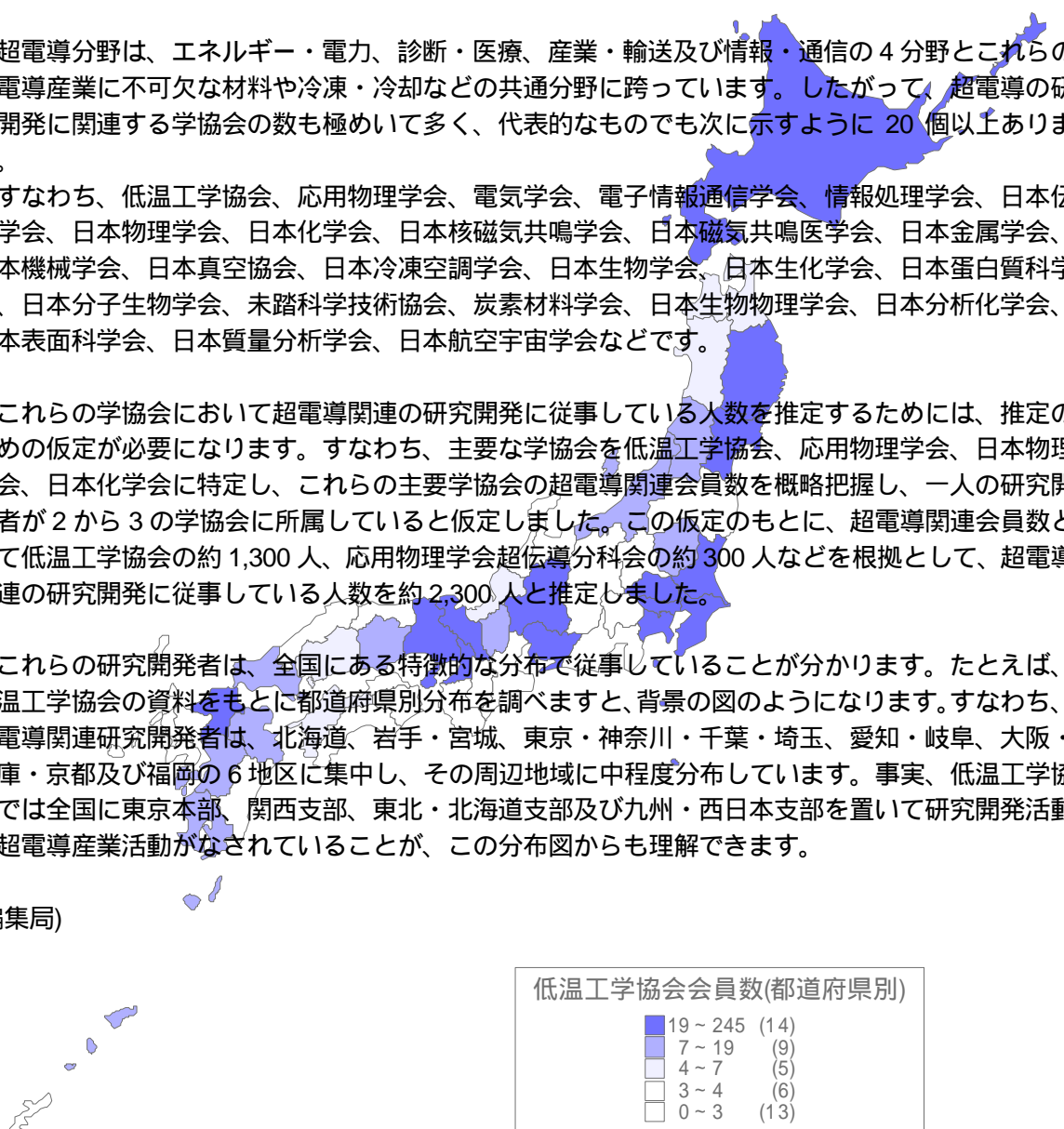
超電導分野は、エネルギー・電力、診断・医療、産業・輸送及び情報・通信の 4 分野とこれらの超電導産業に不可欠な材料や冷凍・冷却などの共通分野に跨っています。したがって、超電導の研究開発に関連する学協会の数も極めて多く、代表的なものでも次に示すように 20 個以上あります。

すなわち、低温工学協会、応用物理学会、電気学会、電子情報通信学会、情報処理学会、日本伝熱学会、日本物理学会、日本化学会、日本核磁気共鳴学会、日本磁気共鳴医学会、日本金属学会、日本機械学会、日本真空協会、日本冷凍空調学会、日本生物学会、日本生化学会、日本蛋白質科学会、日本分子生物学会、未踏科学技術協会、炭素材料学会、日本生物物理学会、日本分析化学会、日本表面科学会、日本質量分析学会、日本航空宇宙学会などです。

これらの学協会において超電導関連の研究開発に従事している人数を推定するためには、推定のための仮定が必要になります。すなわち、主要な学協会を低温工学協会、応用物理学会、日本物理学会、日本化学会に特定し、これらの主要学協会の超電導関連会員数を概略把握し、一人の研究開発者が 2 から 3 の学協会に所属していると仮定しました。この仮定のもとに、超電導関連会員数として低温工学協会の約 1,300 人、応用物理学会超伝導分科会の約 300 人などを根拠として、超電導関連の研究開発に従事している人数を約 2,300 人と推定しました。

これらの研究開発者は、全国にある特徴的な分布で従事していることが分かります。たとえば、低温工学協会の資料をもとに都道府県別分布を調べますと、背景の図ようになります。すなわち、超電導関連研究開発者は、北海道、岩手・宮城、東京・神奈川・千葉・埼玉、愛知・岐阜、大阪・兵庫・京都及び福岡の 6 地区に集中し、その周辺地域に中程度分布しています。事実、低温工学協会では全国に東京本部、関西支部、東北・北海道支部及び九州・西日本支部を置いて研究開発活動や超電導産業活動がなされていることが、この分布図からも理解できます。

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)