

## フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発の目指すもの

最近、フライホイールを用いた電力貯蔵システムの無停電電源(UPS)や高品質電源用としての商品化が進んでいる。それは、化学電池等の他の貯蔵システムと比較してエネルギー密度や充放電回数、信頼性、維持管理等の面で多くの利点をもっていることによる。

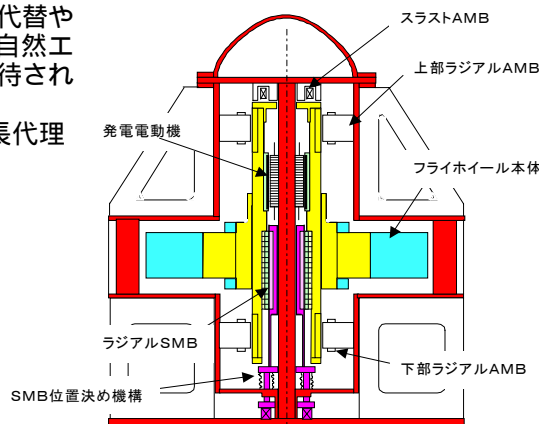
しかし、従来の機械軸受や磁気軸受を使用する限り、待機時間での回転損失が大きく、長時間の貯蔵は困難という欠点があった。これに対して、高温超電導固定子と永久磁石回転子から成る超電導軸受は、強力な載荷力に加えて回転損失の大幅な低減をもたらすので、比較的長時間の貯蔵が可能なフライホイール電力貯蔵システムへの適用が期待されている。

NEDOプロジェクトは、将来的な長期目標として、昼夜間の電力負荷の差を平準化するために使用する1~10MWh級のフライホイール電力貯蔵システムの実現を目指し、現在その基盤技術の研究開発を進めている。1999年度に終了した第1フェーズでは、10kWh級の超電導軸受要素技術の開発および0.5kWh実証システムの作製、運転試験を実施した。そこで、磁気回路と超電導体の対向面法線が軸の動径方向にあるラジアル方式が高速回転する大型重量物の軸受として優れていることを明らかにした。その成果に基づき、2000年度より開始された第2フェーズでは、100kWh級用ラジアル型超電導軸受の要素技術および10kWh実証システムの開発を行っている。要素技術については、載荷力の向上(10N/cm<sup>2</sup>)、回転損失の低減(2mW/N)、磁束クリープによる回転軸降下の抑制法の開発を主たる目標としている。また、10kWh実証システムに関しては、磁気軸受を使用した軸振動の制御技術、高強度CFRPフライホイールの開発、全体システムの設計、製作、運転試験を実施する予定である。

1~10kWh級の比較的小型の貯蔵システムでも、従来のものより大幅な低損失化が実現し、経済的

に見合うものになれば、その波及効果は大きく、現在の電力高品質化用貯蔵システムの代替や風力発電、太陽発電等の自然エネルギー源への応用も期待されよう。

(SRL/ISTEC 盛岡研究所長代理 腰塚直己)



10kWh級フライホイール基本構造

## 10kWh級フライホイールのシステム設計

石川島播磨重工業(株)  
基盤技術研究所  
機械要素研究部 課長 齊藤 修

高温超電導軸受(SMB: Superconducting Magnetic Bearing)を用いた電力貯蔵用フライホイールとして10kWh級システムについて紹介する。本装置は直径1mのCFRP製リングを中空ロータに取り付け、ロータ内部に設置された発電電動機により高速回転(15,860 rpm、周速830m/s)させることで電気エネルギーを回転エネルギーに変換して貯蔵する。長時間のエネルギー貯蔵を目的とするため、風損・機械的な摩擦などの損失を低減する必要がある。このため、フライホイール全体は真空中、かつ非接触状態で運転される。フライホイール重量はラジアル型SMBにより非接触で支持するとともに、フライホイールの振動を抑制するため能動型磁気軸受(AMB: Active Magnetic Bearing)が設置される。

本装置は平成15年度に工場運転を行った後、四国総研に移設され、平成16年度には長期運転試験によりSMBおよびシステムの信頼性が評価される予定である。

尚、本件は、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より委託を受け、平成12年度より平成16年度までの計画で実施しているプロジェクトの一部を石川島播磨重工業(株)へ再委託したものである。

## 超電導関連12月-1月の催し物案内

- 12/19  
第3回材料研究会・見学会  
場所: 京都大学工学部  
(主催: 低温工学協会)
- 1/26-28  
量子ドットによる量子計算機(IWQDQC)  
<http://qdc.is.kochi-u.ac.jp>  
場所: 土佐ロイヤルホテル  
(主催: 高知大学)

### 目次

フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発の目指すもの	1
10kWh級フライホイールのシステム設計	1
超電導関連12月-1月の催し物案内	1
【解説・言葉】フライホイールとは	2
フライホイール装置の動向について	2
特許情報	2
軸受用バルク超電導体の現状	3
新聞ヘッドライン	3
超電導速報-世界の動き	4
科学・研究の先端 第65回2001年度秋季低温工学・超電導学会報告	6
超電導応用研究会シボラジの比ッス7	7
【隔月連載記事】超電導「レキ」-ギ「ャップ」の神秘(その5 最終回)	7
量子コンピュータへの道	9
読者の広場(Q&A)	9

## 【解説・言葉】

### フライホイールとは

フライホイール (flywheel) とは、円盤 (wheel) を回転させて機械エネルギーのかたちでエネルギーを貯蔵する装置である。

フライホイールに貯蔵できるエネルギー (E) は、円盤の重量を m、半径を r、回転角速度を ω とすると

$$E = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2$$

で与えられる。よって、貯蔵エネルギーは円盤の重量に比例し、その半径と角速度の2乗に比例する。ただし、径の大きな円盤を高速で回転させると、材料の機械強度が貯蔵エネルギーの限界を与える。よって、貯蔵エネルギー密度は、材料の比強度によって決まる。

すでに、機械式ベアリングを使った貯蔵装置が開発されており、無停電電源や瞬間的に大きな電力を必要とする応用に利用されている。エネルギーの出し入れは、円盤が回転しているので、発電機とモータを利用している。

しかし、機械式ベアリングでは、回転ロスがあるため、長時間の貯蔵には適していない。最近、超電導体と永久磁石を組み合わせて、非接触のベアリングが開発されたことで、回転ロスを大きく低減できる可能性がある。現在、長時間のエネルギー貯蔵が可能な超電導フライホイールの開発が日米欧で行われている。

(SRL/ISTEC 第1・3研究部長  
村上雅人)

## フライホイール装置の動向について

フライホイールによる電力貯蔵は、従来より鉄製等の重いフライホイール体と機械式軸受を用いて回転させる形で実用化されている。しかしながら最近インターネットで調べていくうちに気がつくのは、実に多くのベンチャー企業等がフライホイール装置を商品化したり、これから商品化しようとしている動きがあることです。これらのフライホイールは高速回転によるコンパクト化及び軸受け部の負荷軽減等による電力損失の低減化を狙っており、今の時流に乗っているように思える。用途は落雷時等の瞬停対応電源用のものが多く、実際海外を始め日本でも半導体工場、データセンター等に納入されている。

私達 (ISTEC + 5社) が開発しているのは、この流れの究極として超電導を使ってフライホイール体を真空中で浮かせ、高速回転させることにより、コンパクトで大幅に少ない電力損失を狙ったフライホイール装置である (下図参照)。どのくらい電力損失が違うかを感覚的に説明すると、今迄のフライホイール装置では最高回転状態で投入電源をカットすると数分から数十分で回転が止まってしまうのに対して、超電導を使うと抵抗が少ないので数時間から数十時間も惰性で回り続けるのである。

現在、世界初の高速回転制御技術と最大 (300 ) 級の超電導軸受を開発しているところであり、非常にチャレンジングな研究である。

これらの課題をクリアして将来の展望を開くべく、関係者一同日夜頑張っている。

(SRL/ISTEC 企画本部  
主管研究員 富田 充)

## 特許情報

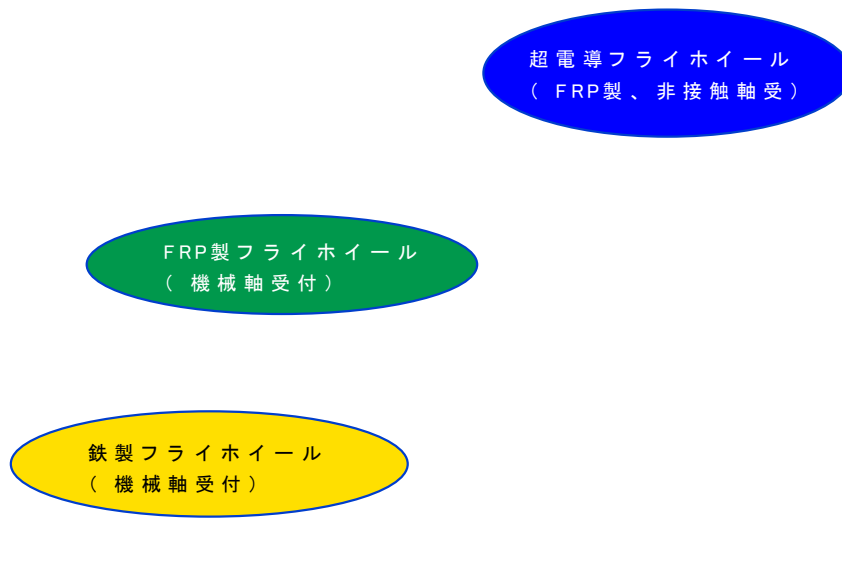
### 成立特許の紹介

最近成立した特許を紹介します。「酸化物結晶の製造方法」特開平 8-183698 (平成 6 年度出願): この特許はイットリウム系およびランタノイド系酸化物超電導体結晶の製造方法に関するものです。大型の酸化物超電導体単結晶を作製するには、るつぼ内に準備した原料融液の表面に結晶成長面を接触させながら結晶の引上げ軸を移動させる必要があります。こうした回転引上げ法で、融液表面の下降速度と結晶の成長速度の予測から引上げ軸の引上げ速度を決めることと、原料融液表面の検出方法を権利化しています。酸化物超電導体の大型単結晶作製の重要な特許の1つです。

なお、本発明の詳細は、特許庁のホームページから特許電子図書館 (IPDL) をご利用下さい。

(SRL/ISTEC 開発研究部長  
中里克雄)

コンパクト化  
大  
出力密度

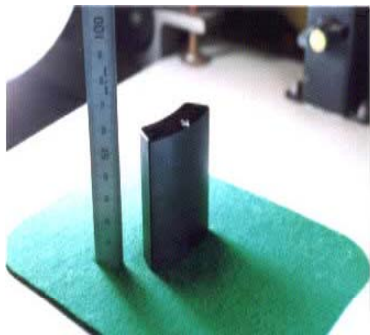


エネルギー貯蔵効率 (電力損失小)

超電導フライホイールの目標イメージ図

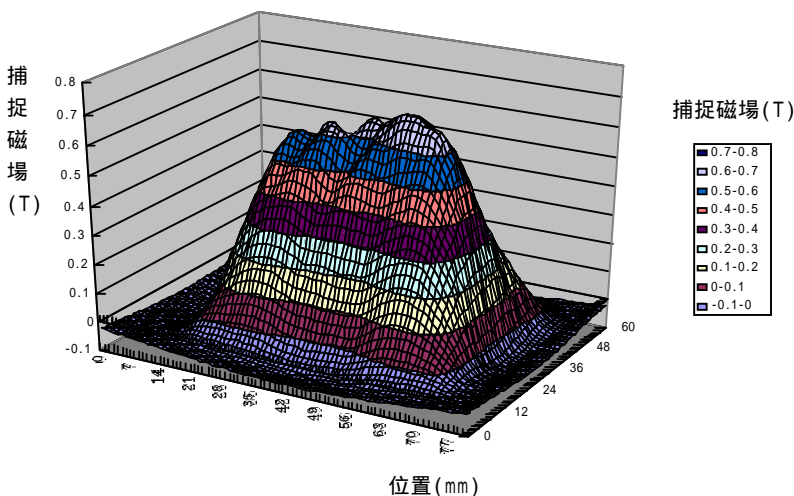
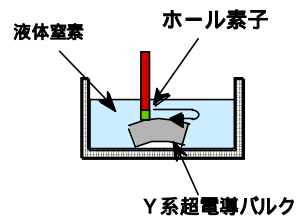
## 軸受用バルク超電導体の現状

10kWh級フライホイール電力貯蔵システムのラジアル型超電導軸受に適用可能な、特殊形状のY系超電導バルクの作製・評価を進めている。同ラジアル型超電導軸受は、中心軸が共通の二つの円筒を重ねた様な構造をしており、外側円筒が永久磁石磁気回路の回転子、内側円筒は超電導バルクにより構成される固定子となる。軸受Y系超電導バルクは外径123.2mm、内径93.2mm、高さ60mmの円筒を周方向に8等分割した瓦形形状である。軸受に組んだ時c軸が径方向となるように、瓦の厚さ方向がc軸となるようにした。個々の瓦形Y系超電導バルクには、経時変化予防、機械的特性改善及び長期使用時の信頼性向上を目的に、エポキシ系樹脂の真空含浸処理が施されている。



軸受用瓦形Y系超電導バルクの性能及び健全性を評価するため、液体窒素温度における捕捉磁場分布の測定を行った。数個の瓦形Y系超電導バルクについて、凸面上でホール素子を二次元的に走査しながら計測した結果、最大値が0.4~0.7Tであり、概ねシングルドメインを示唆する分布が得られた。また、これらのバルク8個を円周状に並べて作製した軸受モジュールは、液体窒素温度において最大で2,124Nの載荷力を達成した。

(SRL/ISTEC 第3研究部 松永晃治)



## 新聞ヘッドライン (10/18-11/19)

物材研究機構3研究センター新設  
 超電導材料など探索  
 10/18 日経産業新聞  
 炭素だけで磁石 ロシアの研究所  
 作製 10/22 日本経済新聞  
 プラズマ、セ氏1億度 核融合研  
 究所 10/22 日本経済新聞  
 強磁場プラズマ成膜実現へ 超電  
 導永久磁石を利用 名大グループ  
 研究本格始動 10/23 日刊工業新聞  
 脳活動 詳しく観察 理研など  
 高精度画像装置 10/25 日本経済  
 新聞、日経産業新聞、日刊工業新聞  
 テクノロジー 超克 基礎一徹の変  
 人魂 日立製作所フェロー 外村彰  
 氏 10/29 日経産業新聞  
 核融合実験炉国内誘致 負担想定  
 4000億円超に 総合科学技会議、決  
 定先送り 10/29 日本経済新聞  
 バイオ振興、既存組織強化で 核融  
 合実験炉誘致に慎重  
 10/29 日本経済新聞  
 プラズマ電流 補充不要 日本原発、  
 核融合炉で確認 11/2日経産業新聞  
 超電導コイル チタン製外装にメド  
 原研、線材のひずみ低減  
 11/5 日経産業新聞、日刊工業新聞  
 量子コンピューター 創世記  
 11/5、11/6、11/7、  
 11/8、日経産業新聞  
 極低温冷凍機 住重、研究向け参入  
 11/6 日経産業新聞  
 総重量4000トン特殊磁場シールド  
 11/6 日刊工業新聞、日経産業新聞  
 セラミックス結晶そろえ機能向上  
 長岡技科大 超電導磁石を利用  
 11/7 日経産業新聞  
 あすから政府間協議 ITER国際協定  
 を準備 11/7日経産業新聞  
 「国際熱核融合実験炉」誘致に慎重  
 論 計画足踏み 11/13 毎日新聞  
 ITER共同実施へ 来年末までに新協  
 定 11/13 日刊工業新聞  
 核融合科学研究所 重水素実験の協  
 議成立を望む 11/14 日刊工業新聞  
 01年度科学研究補助金採択テーマよ  
 り1万倍の高感度装置可能に  
 量子コンピューター実現近づく  
 11/14 日本工業新聞  
 NMR装置と大型放射光施設 世界最  
 大級を誇る 生命のナゾ解くカギに  
 11/16 日刊工業新聞  
 ヒトcDNA由来たんぱく質 理研とか  
 ずさ研共同で立体構造解析 11/16  
 日刊工業新聞、11/19 日経産業新聞  
 理研 新高機能素子開発へ 大型プ  
 ロジェクトスタート  
 11/19 日経産業新聞  
 日立と大林組 超電導で汚水浄化  
 11/19 日経産業新聞

## 超電導速報 世界の動き (2001年10月)

### 電力応用

#### Intermagnetics General Corporation (2001年10月5日、10月25日)

Intermagnetics General Corporationは低温超電導材料部門である IGC - Advanced Superconductors (Waterbury, Connecticut, USA)をフランドの Outokumpu グループ会社である Outokumpu Copper Products Oyに約3200万ドルで売却した。この売却契約には、今後6年間MRI用超電導磁石のためにLTSワイヤーをIGCへ供給することが含まれる。IGCが、今後2年間、契約に示された数量のLTSワイヤーを購入すれば、さらに400万ドルを受け取ることができる。IGC社長Glenn H. Epsteinは、この売却により、経営資源を先端MRI磁石、装置部門、第2世代線材及び送配電機器部門のような成長分野に集中させることができるとしている。

(出典)

“INTERMAGNETICS AGREES TO DIVEST LOW-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR DIVISION (Intermagnetics Press Release; October 5, 2001)

“INTERMAGNETICS COMPLETES DIVESTITURE OF LTS DIVISION (Intermagnetics Press Release; October 25, 2001)

<http://www.igc.com>

#### Oak Ridge National Laboratory (2001年10月16日)

Oak Ridge National Laboratoryの超電導開発チームが、DOEと民間企業との間で調整が進んでいる新しい3つの超電導開発プロジェクトのパートナーに選ばれた。高温超電導発電機、高温超電導ケーブル、高温超電導変圧器の3つのプロジェクトである。超電導発電機プロジェクトにおいては、導体評価を担当する。提案されている超電導発電機は、従来のものに比べて効率がよく、また、発電容量や無効電力の面でも大きなキャパシティーを持つ。ケーブル・プロジェクトに関しては、オハイオ州コロンバスに設置される1000フィート・ケーブル開発をサポートする。変圧器プロジェクトについてもORNLは研究サポート業務を担当することになっている。この超電導変圧器プロジェクトの目的は、送電網において66kVから12kVへの電圧変換を行う高温超電導変圧器プロトタイプの実験を行うことである。

(出典)

ORNL to partner with industry on three new proposals”

(ORNL Press Release; October 16, 2001)

[http://www.ornl.gov/Press\\_Releases/current/Science\\_and\\_Technology.html](http://www.ornl.gov/Press_Releases/current/Science_and_Technology.html)

#### American Superconductor Corporation (2001年10月16日)

American Superconductor Corporationは、GEにより100MW高温超電導発電機向けのHTSワイヤーのプライマリー供給者に指定された。このプロジェクトは、先ごろDOEの新たなSPIとして発表された7つのプロジェクトの内の1つである。GEは、このプロジェクトにより、年間数十億kWh、数百万ドルの省エネ効果と(炭酸ガス)排出低減、世界市場における電力産業の競争力の向上に向け大きなブレークスルーが図れるものと考えている。American Superconductor Corporationは、同社の第1世代ワイヤーがGEが想定している商用発電機に向けたコスト、性能目標をクリアできるものと考えている。

(出典)

“American Superconductor to Supply High Temperature Superconductor Wire for World’s First 100 Megawatt Superconductor Generator”

(American Superconductor Corporation Press Release; October 16, 2001)

<http://www.amsuper.com>

#### Nexans (2001年10月25日)

Nexansは、韓国電気研究所(Korean Electrotechnology Research Institute (KERI))とHTSワイヤーの供給契約を締結した。この契約は、韓国科学技術省が資金を出している21世紀フロンティア研究開発プロジェクトの一環として行われている研究のためのもの。同省は、今後10年間で8500万ユーロを超電導応用開発に投資する計画である。超電導ワイヤーは、Nexansの韓国子会社で製造され、ケーブル、変圧器、モーター、限流器などに適用される。

(出典)

“Nexans: Korean Government Research Institute chooses Nexans for the supply of HTS Wire”

(Nexans Press Release; October 25, 2001)

<http://www.nexans.com>

#### American Superconductor Corporation (2001年10月29日)

American Superconductor Corporation (NASDAQ: AMSC)は、2002年度第2四半期(2001年9月30日締め)の純損失が912万ドル、1株当たりの損失は45セントであると発表した。前年同期の純損失は500万ドル(1株当たり25セント)。純収入は、前年同期472万ドルに対し、今期は326万ドル。

同社社長Greg Yurekは、収入は減少傾向にあるものの当初目論見の年間で2000~3000万ドル(1株当たり1.45~1.75ドル)は達成可能であるが、PQ-SMESの販売が半導体産業の回復の遅れのため低調であることから、年間収入は2000万ドルに近い線に落ち着きそうであるとしている。同社はすでに所要

の対策を講じており、1株当たりの収入は1.60~1.75ドルの範囲内に収めることができると考えている。

なお、今期及び本年度前半の損失は、研究開発、設備増強等の予定していた支出を反映したものであり、特に今四半期の支出はマサチューセッツ州デブンの世界初のHTS生産プラント向けの設備投資のためのものである。

(出典)

“American Superconductor Reports Fiscal 2002 Second Quarter Results” (American Superconductor Press Release. October 29, 2001)

<http://www.amsuper.com>

### マグネット

#### University of Illinois at Urbana-Champaign (2001年10月1日)

人体のたんぱく質の集合体(Proteome)中の特定のたんぱく質を速やかに同定、解析するための新しい技術が、イリノイ大学(at the University of Illinois at Urbana-Champaign)で開発された。ペプチドのマッピングという面倒な方法は用いず、たんぱく質イオンへの直接分解という方法を取ることが特徴。フーリエ変換質量分析装置を用いるが、その主要部分はヘリウム冷却超電導マグネット。このマグネットは逆位相の磁場を用いて磁氣的にシールドされる。このマグネットの中心磁場は9.4テスラ。分解されたたんぱく質は磁場中に置かれるが、質量、電荷に応じて異なる周波数で回転する。また、これらたんぱく質は、より高い軌道に励起され、質量分析装置の高感度ディテクターに検知され、コンピューター処理を経て解析される。この技術により、複数のたんぱく質を同時解析することができる。詳細は、*Nature Biotechnology*10月号に掲載。

(出典)

“Automated analytical platform facilitates identification of proteins”

(University of Illinois at Urbana-Champaign Press Release; October 1, 2001)

[http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2001-10/uoi-aap100101.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-10/uoi-aap100101.php)

### センサー

#### CardioMag Imaging, Inc. (2001年10月25日、10月30日)

CardioMag Imaging, Inc.は10月29日、ニューヨーク州スケネクタディーの本社で公式に創業した。同社会長Carl Rosnerによれば、同社が開発した装置は超電導SQUIDセンサーとエレクトロニクス技術を用いたもので、心臓血管に関わる病気や初期段階の虚血症の診断が速

く、高い信頼性をもって、非接触で、安価に行える。これは、心磁計として知られた技術で、SQUIDにより心臓が作る磁場を計測するという技術を使ったもの。CardioMag Imaging, Incの技術の特徴は、従来の心磁計に必要であった高価な磁気シールド室が不要で、オープンな環境下での診断が可能であると言う点。この技術は経済的であり、診断の改善や早期発見により人命を救うことにもつながる。このシステムは、現在連邦 Food and Drug Administration の認可を目指し臨床試験中。

(出典)

“Cardiology Instrument Company Officially Opens in Schenectady, New York”

(CardioMag Imaging, Inc. Press Release; October 25, 2001)

“Firm develops heart-imaging device” (CardioMag Imaging, Inc. Press Release, by Kevin Harlin; October 30, 2001)

<http://www.cardiomag.com>

## 通信

Conductus, Inc. (2001年10月4日)

Conductus, Inc. (NASDAQ: CDTs)は、ISCOの215特許が無効である旨主張、同社を不正行為及び不正競争のかどで告発した。Conductusは、ISCOの特許(Cryoelectronically cooled receiver front end for mobile communications system)侵害についての訴えに対する答弁書の修正意見及びカウンター・クレームを作成する中で、ISCOの不正行為とこれに起因する特許無効の主張を追加した。Conductusは、弁護士費用と本件訴訟に係る懲罰的な意味合いも含めた損害賠償を求めている。

Conductusは215特許クレームを精査し、これが公知技術であるとしている。問題の発明者の1人が、学会においてバイパス回路について発表を行っており、この技術が会議参加者の誰もが知れる状況であったことを示す証拠を明らかにした。Conductusによれば、当該技術が出願時にすでに公知技術であったことを発明者は承知していたにもかかわらず、これを米国特許庁に伝えていなかった。故意の情報秘匿は不正行為と認められ、このため特許は無効となる。

Conductus社長 Charles Shalvoyは、「米国特許庁に対する故意の情報秘匿は重大な問題であり、特許は無効である。」と述べた。さらに、同氏は、「ISCOは本件が公知技術であること、また、出願時に発明者がこれを隠そうとしたことを知っていたことを示す証拠を持っている。」と付け加えた。また、「無効な特許を根拠とした Conductus 社の顧客に対する警告は州法及び連邦法違反である。」ことを指摘、懲罰的な意味合いも

含めた賠償請求を行っていくとした。

(出典)

“Conductus Accuses ISCO International of Unfair Competition and Inequitable Conduct; Seeks to Recover Damages in Dispute” (Conductus Press Release; October 4, 2001)

<http://www.conductus.com>

Superconductor Technologies Inc (2001年10月4日)

Superconductor Technologies Inc. (Nasdaq: SCON) (“STI”)は、ISCOの215特許(Cryoelectronically cooled receiver front end for mobile communications system)侵害についての訴えに対する答弁書の修正意見及びカウンター・クレームを作成し、この中でISCOを訴えた。

STIはISCOの主張を否定しており、裁判所に対して本特許は無効であり、特許侵害は存在しないことを認めるよう求めていた。今回、STIは答弁書の修正意見及びカウンター・クレームを作成し、この中でISCOが特許出願の過程で米国特許庁に対してこれが公知技術であることを明らかにしなかったとの主張を追加した。また、215特許の有効性に重大な疑問をもたらす特許出願時の欠陥について連絡を受けた後もSTIの顧客に対する警告を行っており、これは連邦法及び州法違反であるとしてISCOを訴えた。STIは、弁護士費用と本件訴訟に係る懲罰的な意味合いも含めた損害賠償を求めている。

STI社長 M. Peter Thomas は、「特許出願時に発明者の1人が、特許庁に対してこれが公知技術であることを隠していたという証拠を持っており、このような行為がある以上特許は無効である。ISCOがこの証拠を無視し、我々の顧客に対して警告を発してライセンス契約書にサインさせようとしていることに対して怒りを覚える。」と語った。

(出典)

“Superconductor Technologies Sues ISCO International (Superconductor Technologies Inc.; Press release; October 4, 2001)

<http://www.suptech.com>

Superconductor Technologies Inc. and AT&T Wireless (2001年10月9日)

Superconductor Technologies Inc. と北米最大のデジタルネットワーク、AT&T Wireless は、サンタバーバラ地区においてSTI社のフィルター・システムを展開することを発表した。これにより、通話のドロップやブロックといった通信障害の発生数を減少させ、通話品質を改善できる。AT&T Wireless は、「顧客満足度が第1であり、STIのフィルターを使うことにより顧客満足度があがって、いつでもどこからでも多くの通話が可能になる。」としてい

る。

(出典)

“AT&T Wireless and Superconductor Technologies Go the Extra Mile to Guarantee Superior Network Quality for Customers”

(Superconductor Technologies Inc. Press Release; October 9, 2001)

<http://www.suptech.com>

Conductus, Inc. (2001年10月10日)

Conductus, Inc. (NASDAQ: CDTs)は、第3四半期及び通年の収入が、これまでのアナリストの見積もりよりも低くなるであろうと見ている。監査前の第3四半期(9月29日締め)の収入見通しは約160万ドル(前年同期、170万ドル)、第3四半期の最終収支報告は11月13日に行われる予定。

同社社長 Charles Shalvoy は、「最近の出来事とも相俟って無線通信市場が受けたインパクトや経済事情が第3四半期及び2001年度中の予測に大きな影響を与えている。現在の見通しでは、第4四半期の収入は、第3四半期と同等かやや減少すると見ている。」と語った。さらに、付け加えて「無線通信市場及び本分野の技術の長期見通しは、昨今の経済減速はあるものの、引き続き明るい。本分野の市場や産業は引き続き成長していく。我々の成功を支える要因は変わっていないと確信しており、現在の一般市場の状況のために遅れが出ているだけである。」と語った。

(出典)

“Conductus announces Third Quarter Revenue Expectations”(Conductus Press Release; October 10, 2001)

<http://www.conductus.com>

ISCO International Inc. (2001年10月12日)

ISCO International Inc. は、スイス、ジュネーブの International Standards Organization の基準に合致する ISO 9001: 認証を受けたと発表した。ISO 9001 は、優れた製造に対する第一級のベンチマークと認められている。この認証を受けるためには、品質管理、顧客サポート及び製造プロセスに関する十全のドキュメンテーションが要求される。同社製造担当副社長 Dennis Craig によれば、この認証により、厳格な品質基準を求める顧客や OEM 先のプログラムに対し同社が的確に対応することを容易にするものである。

(出典)

“ISCO International Achieves Recognition for Manufacturing Excellence Upgrades Systems to Meet ISO 9001 Certification Processes (ISCO International Inc. Press Release; October 12, 2001)

<http://www.iscointl.com/>

Superconductor Technologies Inc. (NASDAQ: SCON) ("STI")は、2001年9月29日締めの第3四半期収支を発表した。

第3四半期の総製品売上は170万ドル(前年同期、160万ドル)。純販売収益は、前年同期と同じく120万ドル。政府からの収入の減少のため、全体の純収入は前年同期の240万ドルから、210万ドルに減少した。今期の総純損失は、前年同期の930万ドルに対し、480万ドル。

同社社長Peter Thomasは、「通信関連装置の同業他社同様、第3四半期の結果は業界の支出削減の影響を受けた。第3四半期は支出を慎重にチェックし、流動資金を確保、売上の減速環境下のビジネスを効率的に進めてきた。第4四半期の収入は、第3四半期を上回ると見ており、2002年度も着実に成長を続けていく考えである。」と述べた。

「我々の戦略は不変であり、全世界のマーケットへ我々の技術を販売し着実に成長を続けて行く。最近、3Gに向けた品質確認のための第2ラウンドのプロトタイプ・ユニットを日本向けに出荷したばかりである。また、我々は中国市場にも対応しておりこれもいよいよ有望になってきている。中国の次世代無線通信インフラ整備計画に対し我々は密接な関与をしているものと確信している。これらによりSTIの未来は明るく、国際的にも国内的にも市場において引き続き進歩を続けて行くわが社の姿を報告できることを楽しみにしている。」とPeter Thomas社長は語った。

「最後に、我々のコア技術に対する需要は、業界の垣根を越えて増々明白なものとなってきている。STIは、通信事業者に対し、魅力的なコストで容量やカバレッジを増やすソリューションを提供しており、先端技術を広め機器信頼性を明確に示している。三位一体のワイアレス・ソリューション、製品製造能力、販売努力を通じ、2002年もさらに将来に向かってSTIは成長が期待されている。現在のそして次世代のインフラが全世界で次々と求められているのだから。」と締めくくった。

同社の財務体質は強固であり、9月29日時点で、現金を含む流動資産が1970万ドル、現有ワーキング・キャピタルが2370万ドル、長期負債が30万3千ドルである。

(出典)

"Superconductor Technologies Inc. Reports Third Quarter 2001 Results" (Superconductor Technologies Inc. Press Release; October 24, 2001)

<http://www.supotech.com>

(ISTEC 国際部長 津田井 昭彦)

## 科学・研究の先端

### 第65回2001年度秋季低温工学・超電導学会報告

上記の学会が2001年11月23日より25日まで福井市の福井工業大学で開催された。今回は韓国の応用超電導・低温工学会と共催のジョイントワークショップが併催されており通算約500名の参加があったと地元紙に報じられていた。また26日にはスペシャルセッションが場所を移して開催されたが、ここでは紙数の関係で材料関連それもY系線材を中心に紹介する。本報告は会議のごく一部に関するものであることをご容赦いただきたい。

Y系材料に関する講演は初日全日にわたってあり、本学会での以前の状況に比較して、盛んになった感がある。実用への期待が高まっていることの現れであろう。Y系材料の応用としては、第一に線材化が期待されている。IBADテープ上のPLD膜に関しては大型イオン照射装置とパイロクロア構造のGd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>中間層を用いることにより1 $\mu$ m/h、数十メートルの中間層形成に成功している。またPLDによるYBCO形成は4 $\mu$ m/hでJ<sub>c</sub>は1.2MA/cm<sup>2</sup>まで達している。またエキシマレーザーの長時間運転に課題を残しているようであるが、プロジェクトの目標の100 $\mu$ m線材は軽くクリアしそうな勢いである(フジクラ)。住友電工はISDの改良版Reverse(R)ISD法を開発した。基板傾斜角度を途中で反転し、従来問題となっていたc軸の傾きを2-3度に抑えることができた。そのついでにHo123を成膜した結果、従来の2倍程度のJ<sub>c</sub>を得ている。SOE基板に関しては、100 $\mu$ mの基板作製、BaF<sub>2</sub> ex-situ法を見据えたCeO<sub>2</sub>キャップ層成膜、前駆体の結晶化に至る結果を発表した(古河電工)。またSOEのNiO平坦化により0.17MA/cm<sup>2</sup>と新たなBaSnO<sub>3</sub>中間層を用いて0.45MA/cm<sup>2</sup>のJ<sub>c</sub>を得た(京大)。ローコスト非真空プロセスであるのに高い特性が得られるTFA-MOD法に関してはSRLグループがCeO<sub>2</sub>中間相を介したYSZ基板を用いた10MA/cm<sup>2</sup>を超えるJ<sub>c</sub>の再現性を報告、また前駆体塗布を多数回繰り返すことにより1 $\mu$ m厚で3.1MA/cm<sup>2</sup>を達成した。ともに1cm幅で300A近くとI<sub>c</sub>としても高い値となるが金属基材上でどこまでこの値に近づけるかが今後の課題であろう。もうひとつの非真空プロセスとしてSRLが力を入れてきた手法にLPEがあるが、800程度まで低温化を進めることによりついに金属上でMA/cm<sup>2</sup>を超える特性が得られた。本格的長尺化が望まれる。

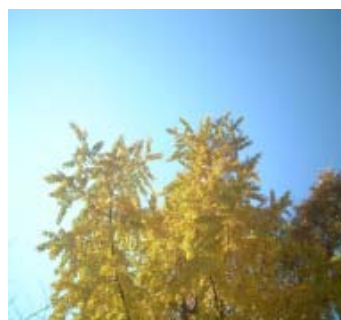
線材とともに大面積薄膜はRF応用や限流器などY系材料の応用に重要である。名大・山形大のグループはSm123でターゲットを揺動させ大面積製膜を行い表面抵抗の測定を行った。住友電工のグループはSNタイプ限流器用として3インチのCeO<sub>2</sub>中間層付きサファイア上にHo123をPLD成膜し、特性分布を調べた。平均2MA/cm<sup>2</sup>程度の高い特性を得ている。また電中研・産総研・東芝グループは塗布熱分解法の大面積膜を用いてJ<sub>c</sub>分布等の基礎データを得、限流器への応用可能性を示した。

この他Y系線材に関しては、J特性(九大)、交流損失(横浜国大)、機械特性、さらに転位導体の検討に関する発表も行われた。

MgB<sub>2</sub>は今年になってフィーバーが起きた新材料であるが、線材への応用が進んでいる。物材機構を中心に研究開発が進んでいる。特に予め作製したMgB<sub>2</sub>粉をシースに入れて圧延するだけで高い特性の線材が得られているのは興味深い。会議ではその他に、シース材の選択、後熱処理、Inなどの添加物効果(東海大)、電磁気特性(九工大)などについても発表があった。

最後に冷却技術関連の話題を紹介しよう。ジョセフソンミキサや粒子線検出器などでは雑音や分解能向上のため1K以下の冷却が必要となる。この温度は通常の液化<sup>4</sup>Heの温度領域を越え、<sup>3</sup>Heや希釈冷凍機を用いる領域であるが、衛星搭載等のニーズからくる小型化の要請から多段階熱消磁でなんと0.1Kに達する固体冷凍機が開発されている(NASA)。また従来の小型冷凍機を<sup>3</sup>Heで駆動することにより0.7K程度までの低温が得られている。これに関してはIwataniや住友重機が開発が進んでいて、すでに製品のカatalogも配布されていた。従来ごく限られた物理屋のものだった温度領域の大衆化は、上記のセンサー応用のみならず、新物質発見・低温物性研究の発展に役立つことが期待される。

(SRL/ISTEC 第5研究部長  
平林 泉)



## 超電導応用研究会シンポジウムのトピックス

このシンポジウムは低温工学協会主催で、10月12日午後千葉工大(津田沼)で開催された。「超電導デジタル回路の研究開発」をテーマに4件の講演と総合討論が行われた。

藤巻先生(名大)は、2005年頃に半導体集積回路が直面すると予想される三つの壁(回路設計の複雑化、消費電力の増大、配線遅延の増大)をうち破る技術の候補として、超電導回路のADコンバータ、ハイエンドルータ、サーバを紹介した。

萬氏(NEC基礎研)は、NECのNb接合標準プロセス(文科省科振費プロのファンドリ)を紹介した。またセルベース設計法と、その適用例として2x2パケットスイッチの設計と動作(低速)について述べた。

永沢氏(SRL/ISTEC)は、超電導ラッチSFQハイブリッドRAMの設計と動作(低速)について解説した。

吉川先生(横浜国立大学)は、CMOSメモリのセンス回路をジョセフソン回路で構成して高速化する低温動作メモリについて述べた。

総合討論では、「超電導デジタル回路の実用化(2010年頃)に向けて、最も重要な技術は何か」について議論され、それは低温高速実装技術であるという意見が大勢を占めた。

(SRL/ISTEC 第7研究部  
宮原一紀)

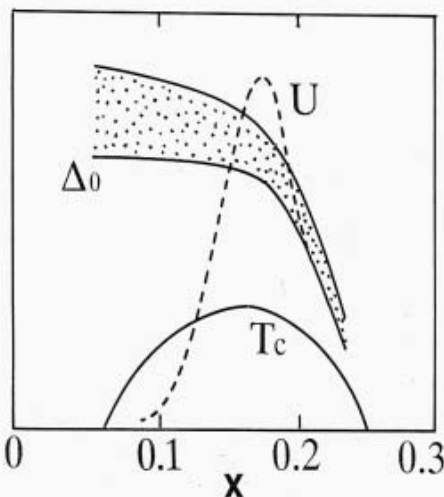


図7. 高温超電導体の臨界温度 $T_c$ と超電導ギャップの大きさ $\Delta_0$ のドーピング(x)依存性。超電導凝縮エネルギーUのx依存性も併せて破線で示す。

## 【隔月連載記事】

### 超電導エネルギーギャップの神秘(その5 最終回)

東京大学大学院  
新領域創成科学研究科  
教授 内田慎一

#### 9. 高温超電導体の超電導ギャップ

低温超電導体のエネルギーギャップと比べてとき、高温超電導Cu酸化物のギャップの特徴は、(1) d波ギャップ(低温超電導体はs波であり、最近話題の $MgB_2$ や $CuO$ のギャップもs波と考えられている。)(2) ギャップの大きさ(最大値 $\Delta_0$ )と $T_c$ との間に比例関係が成立していない。(低温超電導体では $2\Delta_0 = 3 \sim 5k_B T_c$ ) (3)  $\Delta_0$ の大きさが $T_c$ 以上の温度でもゼロにならない( $T > T_c$ で超電導性を失っても有限のギャップが残っている。これを「擬ギャップ」現象と呼んでいる) (4) 超電導の凝縮エネルギーUとギャップの大きさ $\Delta_0$ との間の関係も、 $U \sim \Delta_0^2$ (超電導Web21 6月号、その2 §6参照)のような単純なものになっていない。高温超電導体の $T_c$ 、 $\Delta_0$ 及びUがドーピング量xとともにどのように変化しているかを図7に示した。 $T_c - x$ 曲線があるxで $T_c$ のピークをもつことは良く知られているが、実験で決定された $\Delta_0$ は単調に減少する。 $\Delta_0$ の値に幅がついているのは、実験手段により、その値が多少異なっている他に、1つの試料(1つのx)中でも、その値が「本質的に」バラついていいる可能性があるからである。 $T_c$ のピークの左側では、 $T_c$ が下がる程、 $\Delta_0$ が大きくなるという傾向がみられる。同様に、Uも $\Delta_0$ が大きくなると急激に減少している事がわかる。全く、低温超電導(すなわちBCS理論)の常識があてはまらないのである。何故このような非常識な振舞をしているのか、その答は高温超電導メカニズムに密接に関係しているであろうが、未だ答を明確に記述できる段階には至っていない。ここでは、上記の特徴のうち、d波超電導ギャップとギャップ $\Delta_0$ の大きさに絞って、それらが「超電導特性」に与える影響について述べることにする。

より充分低温でもクーパ対の一部は壊され、準粒子が励起されることになる。図8の4つ葉のクローバで示したのがd波ギャップの大きさの運動量依存性である。2次元の運動量( $k_x, k_y$ )に対応したギャップの大きさは、原点からの矢印の長さに比例する。s波ギャップではクーパ対をつくる2つの電子は、あらゆる方向に互いに行きつ戻りつしているが、角運動量の大きなd波クーパ対では、電子が互いの周りを高速で回転して、電子同士が出会うことによって生ずるクーロン斥力を避けようとしているのである。したがって、s波の場合は、クーパ対の半径(2つの電子の平均距離)がコヒーレンス長 $\xi$ に等しかったのに対して、d波では、クーパ対の半径は $\xi$ よりはるかに大きくなってしまっている。これは、d波では超電導ギャップが実質的にゼロとなっているためである。

超電導のデバイス応用は有限の超電導ギャップを利用したものが多い。デバイスの動作特性、熱雑音に対する安定性の割合を測るのに、I.R積というパラメータが用いられるが(例えば超電導Web21、8月号

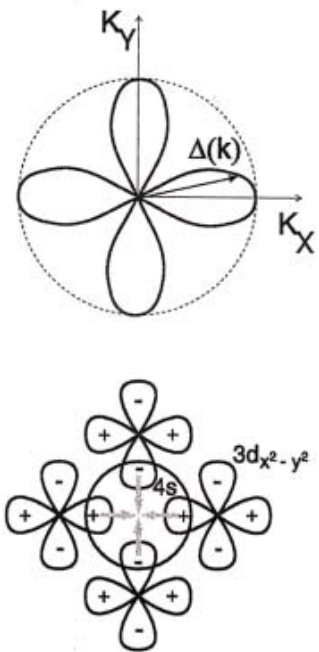


図8. d波超電導ギャップの面内運動量( $k_x, k_y$ )依存性。 $k_x = \pm k_y$ の対角線方向ではギャップがゼロになっている。下の図は電子の面間ホッピングの「フィルター効果」を表している。電子が1つの層から隣の層へホッピングする際、電子に占有されていないCu4s軌道を経由する。この4s軌道と隣接する4つのCu原子のd軌道との重なりがホッピング確率を与えており、重なり具合はd軌道の波動関数をコピーしたものになっている。

超電導のデバイス応用は有限の超電導ギャップを利用したものが多い。デバイスの動作特性、熱雑音に対する安定性の割合を測るのに、I.R積というパラメータが用いられるが(例えば超電導Web21、8月号

(次頁に続く)

(7頁からの続き)

「SFQ ワークショップ報告」鈴木克己)  $I_c R_J$  はギャップの大きさに比例する量である。では、実質ゼロギャップのd波高温超電導体はデバイス応用に向かないのであろうか？ 答は否である。デバイスが高温超電導体の **c 軸積層構造** をとる限り、ギャップゼロの部分避けることができるのである。その理由は、高温超電導体の結晶構造とCu原子の価電子軌道が図8と全く同じ形のd軌道であることにある。電子がc軸方向にCu<sub>2</sub>面間をホッピングする確率  $t_c$  は電子の運動量 ( $k_x, k_y$ ) に依存し、ギャップがゼロになる方向の運動量に対しては  $t_c$  がゼロになるのである。ある運動量(域)の電子の面間のホッピングを許さないという意味で、このことを「フィルター効果」と呼んでいる。このフィルターは結晶構造に多少依存しており、YBaCuO系及びHg1201、Tl1201においては、 $t_c$  は図8のd波ギャップと類似の運動量依存性を示す。従って、最もギャップが大きくなる運動量に対応する電子が最も大きな  $t_c$  をもち、フィルター効果が有効に働くと考えられるのである。これに対して、LaSrCuO系やBi系物質では、ギャップの節方向に対して  $t_c$  がゼロになるものの、ギャップ最大方向に対して  $t_c = 0$  であり、従って、ギャップの大きさが相対的に小さい部分が面間のホッピングに寄与することになる。この「フィルター効果」を考えると、デバイスの設計に多少役立つであろう。

### 9.3 超電導ギャップの大きさ - 常温超電導の可能性

図7はギャップ ( $\Delta$ ) のドーピング依存性を模式的に描いたもので縦軸のスケールを示していない。最も多くの研究が行われているBi2212では、 $\Delta$  は最大30-40meV程度であると報告されている。しかし、最近のSTMの実験で、局所的には更にギャップの大きな領域が試料にあることがわかってきた。実際には、 $\Delta \sim 100\text{meV}$  もの領域が存在することがわかっているが、この部分では位相のコヒーレンスが壊れており、「擬ギャップ」領域とでも呼ぶべき部分である。その2(超電導Web21 6月号)に記したように、ギャップ  $\Delta$  には長さのスケール(コヒーレンス長)  $\xi \sim \hbar v_F / 2 \Delta$  が付随しており、 $\Delta = 100\text{meV}$  に対応する長さは10 Å以下になる。このような短距離では、クーパー対の位相のコヒーレンスが保持できないのであろう。現在までに観測された最大の「超電導」ギャップは  $\Delta = 50 - 55\text{meV}$  である。

以下、空想的な話で本連載を終了する。もし、 $\Delta = 50\text{meV}$  のギャップを持つ一様な超電導体が存在したとしたら、その  $T_c$  は何度であろうか？ d波ギャップに対してもBCS理論は適用でき、 $T_c$  と  $\Delta$  の関係は  $2 \Delta \sim 4k_B T_c$  で与えられる。従って、 $\Delta = 50\text{meV}$  に対応する  $T_c$  は、 **$T_c = 300\text{K}$  (常温超電導)** になるのである。しかし、現実の物質では  $T_c$  は90K程度でしかない。その4(超電導Web21 10月号)で述べたように、高温超電導体では  $n_s$  が小さいため位相が固くない。折角、大きな(すなわち強いクーパー対の束縛力)をもっているにもかかわらず、大きな位相ゆらぎのため、位相が揃い難く、 $T_c$  が低く押さえられてしまうという見方がある。事実、 $T_c$  は  $\Delta$  の大きさではなく、位相の固さ  $n_s$  により決定されているようにみえる。位相を固くするには、 $n_s$  すなわちドーピング量  $x$  を増加させればよい。しかし、 $T_c$  はある  $x(n_s)$  で飽和し、更なる  $x(n_s)$  の増加に対しては再び減少に転じてしまうのである。この過剰ドーピングによる  $T_c$  の減少の1つの理由は、 $\Delta$  の値の減少である(図7)。従って、ドーピング量を変化させるだけでは  $T_c$  の上昇に限界がある。

すでに知られている  $T_c$  上昇の方策の1つはCuO<sub>2</sub>面の枚数を3枚以上に増やすことである。CuO<sub>2</sub>面3枚ないし4枚の物質では、外側のCuO<sub>2</sub>面はやや過剰ドーピング、内側のCuO<sub>2</sub>面は過少ドーピングとなっていることがわかってきた。位相の固い部分とギャップの大きい部分を空間的に隔てることにより、物質全体として固い位相と大きいギャップを実現していると考えられる。

Cu酸化物は、そのギャップの巨大さから、常温超電導の可能性を秘めているといえる。MgB<sub>2</sub>の超電導ギャップの大きさは小さく、 $T_c = 117\text{K}$  が実現したとされているC<sub>60</sub>FETの超電導ギャップも  $2 \sim 4 k_B T_c$  程度であると聞いている。Cu酸化物が現段階では唯一、常温超電導体の可能性を有しているといえるであろう。



### [これまでの連載記事の内容]

#### 超電導エネルギーギャップの神秘

##### その1 (4月号掲載)

1. はじめに
2. 半導体のエネルギーギャップと超電導ギャップ
3. 超電導ギャップと超電導特性
4. 高温超電導体のギャップ

##### その2 (6月号掲載)

5. 超電導ギャップの起源
6. 臨界温度と北-レス長

##### その3 (8月号掲載)

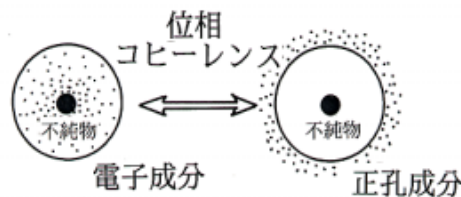
7. 位相の北-レスと準粒子

##### その4 (10月号掲載)

8. 超電導電流 - 位相の固さ
9. 高温超電導体の超電導ギャップ
- 9-1. 超電導ギャップと位相の固さ

##### その5 (本号掲載、完結)

9. 高温超電導体の超電導ギャップ
- 9-2. d波超電導ギャップとデルタ1応用についてのコメント
- 9-3. 超電導ギャップの大きさ - 常温超電導の可能性





## 量子コンピュータへの道

- 現行のスーパーコンピュータのアーキテクチャー開発の先にあるのは、実は、全く新しい計算アルゴリズムの超電導量子コンピュータ開発である? -

21世紀になってコンピュータの計算速度は数テラフロッパス(1秒間に浮動小数点演算を数兆回行う速さ)を達成している。また、2001年11月12日の日本経済新聞によると、米国IBMとローレンスリバモア国立研究所が2005年を目標に200テラフロッパスのスーパーコンピュータを「ブルージーン」計画の一環として開発することを明らかにした。2010年頃にはペタフロッパス(1ペタはテラの1000倍)が当たり前になっているだろうか。

現在世界で進められているスーパーコンピュータの開発は、CMOS(相補型金属酸化半導体)などを基調としたノイマン型コンピュータのアーキテクチャー(設計思想)にもとづいている。これまでの開発では、情報処理量の増大に伴ってデバイスの微細化と超高集積化に対応してきたが、実は、2つの問題点を抱えている。一つは、経済的問題点で、NASAジェット推進研究所のT.スターリング氏の報告にもあるように1メガフロッパス当たり40ドルもの高コスト化と発熱による高運転コスト化の問題である。いま一つは、技術的問題点で、計算速度を上げても有用な時間内に解けない重要な問題もある。上記T.スターリング氏、文部科学省科学技術政策研究所担当研究員などによると、天候変動の予測、実用核融合炉の設計、タンパク質の三次元解析と難病克服、地球規模の生態系管理、核兵器の劣化診断、経済予測、量子新素子開発、暗号通信解読、銀河のモデルなどの科学的課題はテラフロッパス級コンピュータによっては勿論のことペタフロッパス級コンピュータによっても難解である。

「これら科学的課題が容易に解けるのは唯一(固体素子を用いた)量子コンピュータであろう」とNEC基礎研究所の蔡兆申氏は言う。蔡氏は、1999年4月中村泰信及びY.A.バシキんとともに固体素子である超電導デバイスを用いて量子ビットの重ね合わせ状態(コヒーレント状態)を電気的に制御できることに成功している。(Nature, vol.398, 29 April, pp.786-788)。この成果は固体素子を用いたという点で画期的であり、量子コンピュータの実用化を目指す研究を大きく前進させた。現在は2010年を目標に約100量子ビットの回路を達成すべく研究が続けられている。

幸いにも、蔡氏に、この間の研究成果と超電導量子コンピュータの解説を本「超電導Web21」の2002年1月号から隔月連載して頂くことになった。読者の皆様、ご期待ください!!

(編集局 田中靖三)

## 読者の広場

### Q&A

Q: SQUIDを中学生に説明したいのですが、やさしく教えてください。(匿名)

A: 物事を考えた時や心臓の動きなどの生体活動、パソコンの電子回路、火山活動など、さまざまところから磁場がでています。これらの磁場は大変小さいので、検出するにはSQUIDというセンサーが必要になります。SQUIDは、Superconducting Quantum Interference Deviceを略称したもので、日本語では、超電導量子干渉素子です。スクウィド、スキッドなどと呼ばれます。

SQUIDは、超電導体に1/100ミリメートル程度の小さな穴をあけた構造で、高い磁気感度を持っています。北を指す磁石が反応する地球磁場の約1億分の1の磁場まで検出できます。超電導現象を使っているため、液体ヘリウムを用いて摂氏マイナス269度、または液体窒素を用いて摂氏マイナス196度まで冷却して利用します。

超高感度の磁気センサーとして、脳や心臓の病気診断や地球活動の観察などいろいろな利用方法があります。

なお、英単語のSQUIDの意味は、海で泳ぐ「イカ」のことです。

参考ウェブサイト:

<http://www.shs.co.jp/squid>

(回答者:住友電工ハイテックス(株) 開発事業部 技師長 糸崎秀夫)

「読者の広場」へのご意見ご質問等みなさんの投稿をお待ちしております。



e-mail to:  
[web21@istec.or.jp](mailto:web21@istec.or.jp)

## 第15回国際超電導シンポジウム(ISS2002)

... 15th International Symposium on Superconductivity 2002 ...

日時: 2002年11月11日(月) ~ 11月13日(水)

場所: パシフィコ横浜会議センター (横浜市)

論文募集:

4月1日ホムページにて案内

5月31日ファーストサーキュラ発送

発表申込: 7月15日締切

プログラム: 8月30日ホムページ掲載

事前登録: 9月30日締切



ISS2002の会場となる  
パシフィコ横浜周辺の航空写真

## 超電導Web21 12月号

2001年12月発行

<発行者>

(財)国際超電導産業技術研究会内

超電導Web21編集局

〒105-0004

港区新橋5-34-3 栄進開発ビル6F

Tel 03-3431-4002

Fax 03-3431-4044

ISTEC ホームページ

<http://www.istec.or.jp>

超電導関連ホームページへのリンク

超電導情報研究会(スーパーコム)

<http://www.appchem.t.u-tokyo.ac.jp/appchem/labs/kitazawa/SUPERCOM/index.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。