

掲載内容 (サマリー) :

- 超電導関連 2012年5-6月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (3/18-4/19)
- 超電導速報—世界の動き (2012年3月)
- 「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会-SQUID」報告
- 「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会
-11.5 接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用セッション」報告
- 「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会における
-田中昭二先生 (初代超電導工学研究所長) 追悼シンポジウム」報告
- 「電子情報通信学会報告-チュートリアル講演
『発見から50年!ジョセフソン効果のインパクト』」報告
- 隔月連載記事—やさしい人工ピンのおはなし (その3)
- 読者の広場(Q&A)—超電導材料の磁力線観察に成功したという記事がありました、
どういう技術により可能になったのでしょうか。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〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒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>



超電導関連 ‘12/5月-6月の催し物案内

4/29-5/4

International Conference on Superconductivity and Magnetism – ICSM 2012

場所：Istanbul, Turkey

問合せ：<http://www.icsm2012.org/>

5/14-18

ICEC 24 - ICMC 2012

(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)

場所：福岡国際会議場

問合せ：<http://www.icec24-icmc2012.org/index.html>

5/25

低温工学・超電導学会 関西支部 2012 年度総会、第 1 回講演会、見学会

場所：京都大学桂キャンパス

問合せ：http://www.csj.or.jp/kansai/2012/generalassembly_0525.pdf

6/6

第 1 回超電導応用研究会「JAXA における衛星搭載超電導技術の進展と将来展望」

場所：JAXA, 相模原キャンパス

問合せ：http://www.csj.or.jp/application/2012/1st_0606.pdf

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (3/18-4/19)

- 英の洋上風力建設 買収 丸紅、革新機構と 700 億円 日本経済新聞 3/19
- ワタミ、風力稼動 秋田・ひかほ市で電力購入 日刊工業新聞 3/19
- 社説 レアアース 中国はWTO 協定守れ 朝日新聞 3/19
- 日本製鋼所が「一般認定」取得 大型風車建設 手続き簡略に 日経産業新聞 3/19
- 英・洋上風力に貿易保険 丸紅への融資 200 億円適用 NEXI 日刊工業新聞 3/20
- レアアース 国内産業保護を否定 日米欧 WTO 提訴 中国反論 Fuji Sankei Business i. 3/20
- 日本製鋼所 国交省の一般認定取得 風力発電設備 建築申請を簡略化 電気新聞 3/21
- 静脈産業 上 エコチャレンジ アジア成長市場へ輸出 日刊工業新聞 3/21
- 海洋レアメタル新型調査船公開 石油・資源機構 毎日新聞 3/22
- レアアース安定供給 最新戦略など共有 日米欧ワークショップ 28 日都内で会合 日刊工業新聞 3/22
- 静脈産業 中 エコチャレンジ 小型電子機器 再資源化で新制度 レアメタル回収に弾み 日刊工業新聞 3/22
- 英洋上風力発電設備 据え付け社買収 丸紅、産業革新機構と 日刊工業新聞 3/22
- テクノ編集局 浮体式洋上風力発電 日本近海の強い風、有効利用 福島県沖に「原発 1 基分」の構想も 日刊工業新聞 3/22
- レアアース輸出制限に対応 信越化学、中国に合金工場 日本経済新聞 3/22
- 信越化学 安定調達とリスク分散 中国にレアアース合金工場 Fuji Sankei Business i. 3/23
- レアアース回収装置 環境浄化研、開発に着手 千葉大と共同 環境負荷 5 割減目標 日刊工業新聞 3/23
- 中国にレアアース合金工場 年産 3000 トン、日本へ 信越化学 日経産業新聞 3/23
- 静脈産業 下 廃棄製品は貴重な資源 材料を繰り返し利用 レアメタル回収 日刊工業新聞 3/23
- レアアース磁石用合金 中国福建省で生産 信越化学 来年 1 月 日刊工業新聞 3/23
- 洋上発電誘致へ宿敵対決 スコットランドとイングランド 基盤整備 Fuji Sankei Business i. 3/24
- 海水からレアメタル 「104 の夢」 30 年後の目標に 日本化学会がロードマップ 毎日新聞 3/25
- レアアース 中国を WTO 提訴 資源の囲い込みけん制 日本経済新聞 3/25
- 沖縄電力 再生可能エネルギー導入への取り組み 可倒式風車 風を逃がす逆転の発想で万一の破損時にも対応容易 電気新聞 3/26
- 期待高まる「太陽光」「風力」発電 環境面で優れるも安定性などに課題 Fuji Sankei Business i. 3/26
- 大量レアアース 広東省に埋蔵か Fuji Sankei Business i. 3/26
- 人工噴出口に大量レアメタル 海洋機構、沖縄沖で確認 回収装置開発目指す 日本経済新聞 3/26
- 北電・東北電が再生エネ受け入れ試算 送電線増強に 1 兆 1700 億円 Fuji Sankei Business i. 3/27
- 送電網に 1 兆円 再生エネ本格導入で 東北電と北海道電 日刊工業新聞 3/27
- 風力・太陽光発電の導入 北海道電・東北電 1 兆円超必要に 日本経済新聞 3/27
- 再生可能エネルギー最前線 商社の戦略 丸紅 洋上風力で復興に貢献 日刊工業新聞 3/28
- 住商、米で風力発電 事業費 415 億円 運営の主体担う 日本経済新聞 3/28
- 三菱電機が自動解体装置公開 レアアース自給自足照準 Fuji Sankei Business i. 3/29
- 日米欧、レアアース代替開発で協力 Fuji Sankei Business i. 3/29
- 住商、米社の風力発電に 50%出資 Fuji Sankei Business i. 3/29
- トップは語る 昭和電工社長 市川秀夫さん レアアース磁石用合金を「第 3 の翼」に Fuji Sankei Business i. 3/29

- 地域発エコトピックス HDDのレアアース回収・販売 環境開発工業 日経産業新聞 3/29
- レアアース技術 日米欧共同開発 朝日新聞 3/29
- 代替素材開発で日米欧協力確認 レアアース会議 毎日新聞 3/29
- 米国で風力発電事業 住友商事 2地点、計30万キロワット 電気新聞 3/29
- 使用済み家電のレアアース回収 安定供給へ再資源化 メーカーの枠を超えて 三菱電機グループ 電気新聞 3/30
- 強靱な高温超伝導ナノワイヤー NIMS、細野・東工大教授ら開発 鉄系ウィスカー結晶構造 科学新聞 3/30
- 風力発電システム事業 日立、富士重から取得 製販一貫体制を構築 日経産業新聞 4/02
- モーター磁石用レアアース逼迫 「5年で使用料9割減に」 強みの材料技術で克服を 日経産業新聞 4/02
- ウラン化合物に電気抵抗成分 超電導機構を解明 原子力機構と阪大 日刊工業新聞 4/02
- レアアース下落続く 日米欧、使用量削減で協調 なお供給不安 日経産業新聞 4/03
- 再生エネ普及へ規制緩和を決定 政府 毎日新聞 夕刊 4/03
- 「買い取り期間20年必要」 再生可能エネ 事業者から要望 経産省算定委 日経産業新聞 4/04
- 興和が風力発電機参入 建材の販路活用 ベンチャーを傘下に 日本経済新聞 4/04
- 次世代電力網の離島版 インドネシアで開発 明電舎 日刊工業新聞 4/06
- 「ゆめいるか」でレアメタル探査 毎日新聞 4/06
- ギアなし風力発電機 KISCO、出力10%向上 日経産業新聞 4/06
- 海底レアメタル効率採取 穴掘り→噴出する熱水に鉱物 海洋機構成功 読売新聞 4/07
- 中国レアアース団体発足 採掘や加工など155社参加 日経産業新聞 4/10
- 再生エネ 普及か抑制か 買い取り価格 欧州では政策迷走 Fuji Sankei Business i. 4/11
- レアアース磁石3割安 4~6月出荷価格 原料下落を反映 日本経済新聞 4/11
- レアアース使わず産業用モーター 日立、エネ効率93%達成 日刊工業新聞 4/12
- 風力発電「30倍必要」 経産省 自然エネ35%なら 朝日新聞 4/12
- EV活用 最大50キロワット供給 三菱自 スマートグリッド実証設備を稼働 Fuji Sankei Business i. 4/13
- 風力発電関連産業被災地を集積地に 新エネ財団が提言 Fuji Sankei Business i. 4/14
- 次世代送電網の構築 蓄電インフラに課題 日経産業新聞 4/17
- 新しい超電導状態発見 ウラン化合物 自発的に回転対称性破る 東工大など 従来理論を覆す 日刊工業新聞 4/17
- 超電導研究6件を対象 未踏科学技術協会 日経産業新聞 4/18
- レアアース再利用 ホンダ ニッケル水素電池で 日経産業新聞 4/18
- ITER計画 主要機器製作が本格化 本部建屋も今夏竣工 電気新聞 4/18
- 磁石磁壁の微振動運動 超電導体で高精度測定 原子力機構と理研 日刊工業新聞 4/19
- 超電導で新現象 磁力線、物質をすり抜け 理研・NEC 発見 日経産業新聞 4/19
- 超電導の新現象発見 理研・NEC 正確な電流測定に活用 日本経済新聞 4/19

(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3月)

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

特別研究員 山田 穰



★ 記事のニュース発信地

線材

Superconductor Technologies Inc. (2012年3月7日)

Superconductor Technologies 社 (STI) は、2011年12月31日締め第4四半期並びに通年決算報告を発表した。第4四半期の純収益は、前年同期78万9000ドルに比べ、当期は28万4000ドルとなった。この減収には、3G データ通信製品の需要が継続的に低迷したことが反映されている。第4四半期の純損失は、前年同期300万ドルに対して、当期は310万ドルとなった。さらに、通年の純収益は前年度850万ドルに対して、350万ドルとなり、純損失は前年度1,200万ドルに対して、1340万ドルとなった。尚、2011年12月31日時点で、同社は現金及び現金同等物期末残高620万ドル、そして受注残高1万3000ドルを保有していた。

将来の見通しについて、同社の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram氏は、「STI社は、これからも次世代HTS線材の経済的生産という観点において技術的進捗のマイルストーンを次々と達成し続け、業界トップレベルの技術力を一層推進していく所存である。」と述べた。同社は、2012年度上半期において、1 km級の長尺線材が作製可能なシステムを利用して高性能なテンプレートの生産を開始する予定である。また、第2四半期中にはHTS成膜システムをインストールし、これら長尺テンプレートを使用して長さ100 mの線材作製に取り掛かり、2013年には計画どおり1 kmに及ぶ長尺HTS線材を生産できる機器を展開できるよう準備が進められている。

(出典)

“Superconductor Technologies Reports 2011 Fourth Quarter and Year-End Results”
Superconductor Technologies Inc. press release (March 7, 2012)

Superconductor Technologies Inc. (2012年3月20日)

Superconductor Technologies社 (STI) は、新しいイオンビームアシスト蒸着 (IBAD) システムの受け入れテストを完了した。このIBADシステムは、長さ1 kmに及ぶHTSワイヤテンプレート上に酸化マグネシウムのバッファ層を堆積するために使用される。このシステムは、供給業者先で実施されたテストに成功し、まもなく同社が所有する施設Advanced Manufacturing Center of Excellence (テキサス州オースティン市) に出荷され、その後インストールされる。同社の社長兼最高経営責任者であるJeff Quiram氏は、「我々は、我が社の溶液塗布法平坦化 (SDP) 素材を使用したシステムを用いて、IBADの効果を実証することに成功した。この新しいIBADシステムと既存のSDPがうまく機能することにより、2012年末に完成予定の超電導ハイパワー送電ケーブルに必要とされるConductus 2G HTS線材のワイヤテンプレートを生産することが可能となる。我々は、線材を提供することで顧客のニーズを満たし、その節目となるこのプログラムが完了を迎えることを楽しみにしている。」と述べた。

(出典)

“Superconductor Technologies Inc. Accepts IBAD System for Producing HTS Wire Templates”
Superconductor Technologies Inc. press release (March 20, 2012)

物性、線材

National Institute for Materials Science (2012年3月19日)

物質・材料研究機構 (NIMS) 超伝導物性ユニット強相関物質探索グループの研究者たちは、共同研究者たちと共に強靱な高温超電導ナノワイヤーの開発に成功した。これまで鉄系超電導体のウィスカー結晶の製造が困難であったものの、同グループの研究者たちは、原料物質に結晶育成を促進する添加剤を混ぜ、この混合粉末をカプセル状の金属製反応容器に充填し、機械的に圧力を加えて混合粉末の最適な高密度化を図った後に除圧し、適切な熱処理を施すことによってウィスカー結晶を製造することに成功した。ここで得られたウィスカー結晶は絶対温度 33 K で超電導状態に転移し、また、形状は棒針状であり、直径が 1 マイクロメートル程度以下であることも確認された。他のナノワイヤーとは異なり、鉄系超電導体のウィスカー結晶は、セラミックスよりも合金にその性質が近く、比較的強靱である。またアスペクト比も大きく、適用可能な用途を拡大できる。同研究グループの研究結果は、Journal of the American Chemical Society に公表されている。

(出典)

“Strong, Tough High Temperature Superconducting Nanowires”
National Institute for Materials Science press release (March 19, 2012)
<http://www.nims.go.jp/eng/news/press/2012/03/p201203190.html>

高磁場コイル

Los Alamos National Laboratory (2012年3月22日)

米国ロスアラモス国立研究所のパルス強磁場施設の研究者たちは、6つの実証実験の一環として、100 テスラ領域を超える磁場を作り出すことに成功した。この成果は、非破壊パルス磁場 100 テス

ラのマルチショット磁石を使うことによって成し遂げられた。超電導体の上部臨界磁場の認識や、今までにない解像度での高温超電導体における磁気量子振動の観測など、現在この高磁場を利用した研究がさまざまな研究機関で行われている。極度な高磁場パルスを生非破壊的に生成できることによって、非常に高い磁場の下で物質がどのような動きをするのか、また、固体における相転移に伴う量子論的挙動など、幅広い科学的疑問を解決するために一段と研究が深まることになる。

(出典)

“Magnetic field researchers target 100-tesla goal”

Los Alamos National Laboratory press release (March 22, 2012)

http://www.lanl.gov/news/releases/magnetic_field_researchers_target_hundred_tesla_goal.html

パルスレーザー計測

University of British Columbia (2012年3月29日)

British Columbia大学の研究者をはじめとする国際研究チームにより、超高速レーザーパルスを使用して高温超電導体の超電導の発現を機動させる微視的相互作用を識別する実験が行われた。研究者たちは、超短レーザーパルス（100フェムト秒）を使用して、プロトタイプの銅酸化物超電導体の電子を励起させた。その電子が緩和し平衡状態に戻ると、超電導体の原子格子（フォノン）の変形またはその磁気相関（スピン揺動）の摂動により、余分なエネルギーが放出される。緩和過程の速度と超電導体特性への影響に関するこのデータは、これら化合物の高臨界温度が純粋に電子的（磁氣的）過程に基づくものでありうることを示唆した。固体電子構造分野のカナダ研究議長として、同大学物理・天文学部並びに材料工学部の准教授であるAndrea Damascelliは次のように述べた。「この新しい技術は、時間的且つ広範囲にわたる特徴的エネルギーの両面において、理解し難い超電導特性の形成を左右する相互作用を識別するための最善方法であると言える。我々はいよいよ、この興味深い性質に寄与するさまざまな相互作用の謎を解き始める段階に達した。」このグループの研究結果は、Scienceに掲載されている。

(出典)

“Ultrafast laser pulses shed light on elusive superconducting mechanism: U of British Columbia”

University of British Columbia press release (March 29, 2012)

<http://science.ubc.ca/news/609>

限流器

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2012年4月3日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社 (BEST) と Schneider Electric Sachsenwerk 社は、新しいシールドタイプの誘導型超電導限流器 (iSFCL) の開発進捗がまた一つ大きな節目を迎え、2013年には Stadtwerke Augsburg 電力グリッドのフィールド試験を開始する予定であることを発表した。サブスケール装置の試験は、想定内の作動条件の下、Braunschweig 大学で既に行われている。BEST 社製 2G HTS テープ線材 (40 mm 幅) を使用して製造されたこの装置には、フルサイズの iSFCL システムと同じコンセプトが使用されている。この超電導モジュールは、そのシステムが障害耐久時間 500 ミリ秒まで持ちこたえられるよう斬新にデザインされており、HTS 線材を用いた装置としては、これまで報告された中でその耐久時間が最長であると考えられている。BEST 社事業開発部門の副社長である Hans-Udo Klein 博士は、「これらの試験で肯定的な結果を出せたこと

で、我々はこのプロジェクトを成功させ、iSFCL デザインがその優れた性能で高い市場性を持つであろうということに一層自信が高まった。来年予定されているフィールド試験並びに Augsburg 電力グリッドへの取り付けを前に、今年後半には iSFCL 製品開発最終ゲートであるフルサイズの単相型プロトタイプのパフォーマンステストと安全性テストが行われることになっている。」と述べた。尚、この中電圧 iSFCL プロジェクトは、ドイツ経済技術省 (BMWi) が資金提供している。

(出典)

“Bruker and Schneider Electric Announce Successful Validation Test for the Inductive Superconducting Fault Current Limiter (iSFCL) for the ‘Smart Grid’”

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (April 3, 2012)

<http://www.bruker-est.com/pr120403.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会-SQUID」報告

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所デバイス研究開発部
主管研究員 波頭経裕

大会期間中、15日のシンポジウムで2件、16日および17日の一般講演で10件の報告が行われた。総括して言えば、NMR、資源探査、非破壊検査、顕微鏡、脳磁計、心磁計、計測器、バイオ関連など、各種応用システム開発や実用が着実に進んでいる。既存の磁気センサ技術に対して、どこで優位性を発揮できるかを分析し、ユーザーサイドから見て魅力あるシステムが次々に誕生しつつある予感である。

シンポジウムでは、SQUIDシステムを研究にツールとして利用するユーザーの立場から、情報通信研究機構の藤巻氏と筑波大学医学部の吉田氏によって講演が行われた。藤巻氏らは、MEG（脳磁計）による神経細胞の電気信号と、MRIによる脳の詳細構造解析を組み合わせ、言語脳機能の分析を行っている。また、吉田氏らは、心房細動の研究にMCG（心磁計）を応用している。脳梗塞のリスクを上昇させる心房細動であるが、左心房の信号をとらえるのに心臓の体内位置の関係で、心電図よりMCGが高分解能であることを利用したものである。現在、心房細動の治療に使われているアブレーション治療が、どのような患者に有効か、また、どのような患者は再発の危険が高いかなど、非侵襲的に調べられる可能性を示された。MCGの心電図に対する優位な点が、ユーザーサイドから示された結果であり、今後の進展に大いに期待したい。

一般講演では、豊橋技術大学は、カーボンファイバーで強化されたプラスチックの破断過程をSQUIDで観察評価している。組糸のように編まれたファイバーに、種々の3種の中央糸を入れた場合の破断の仕方を比較し、中央糸の特性によって破断のプロセスに相違があることを見いだしている。これは、カーボン繊維強化素材の非破壊検査の破断予測技術につながる可能性があり、今後の研究に期待したい。九州大学は免疫検査の磁気マーカーについての検討を継続しているが、マーカーの直径や磁気モーメントの違う7種類のマーカーを比較し、検出感度を従来の4.5倍に改善することに成功した。また、低磁場NMRシステムを高温超伝導SQUIDで開発している。その中で、検出コイルとして素線の径の異なるリッツ線での高周波特性を比較し、理論Q値400の高周波性能を実現している。広い周波数帯域で高感度（10～60 kHzで0.88～2.39 fT/√Hz）を達成している。SRL-ISTECは、10 mm幅の超伝導テープ線材を検出コイルに利用した大型グラジオメータについて報告した。機械式のバランス調整機構を備えていて、資源探査用の装置開発の一貫で行われたものである。また、地下資源探査用のSQUID-TEMシステムの開発では、スルーレート10 mT/s以上を有する携行型システムを開発した。今後、実地試験にて実用性能評価を行う。素子開発では、入力コイル付き高温超伝導グラジオメータの作製プロセスの検討を行っている。積層構造による乗り越え構造が歩留まりを低下させていることがわかり、検出コイルを2本から1本に減少させて入力コイルの乗り越えを減らす一方、入力コイルの本数を26本から59本に増やして結合を補い、カップリング係数を約1.4倍に改善している。岡山大学は、SQUIDを用いた太陽電池の欠陥解析用システムについて報告した。常温ピックアップコイルを用い、磁気シールド内の高温超伝導SQUIDと検出部を分離している。1 mm間隔の直線導線に対して分離検出が確認されている。また、高温超伝導SQUIDを用いた交流磁気特性計測システムを開発している。コンクリート内の水分分析を想定し、強磁性体1 wt%酸化鉄と蒸留水の分離分析を試み、磁化特性の計測に成功している。金沢工大は、低温超伝導SQUIDを用いたSQUID地磁気計の開発を行っている。150 nTの地磁気変動

を想定し、液体ヘリウムを 30 日以上保持できるシステムを開発している。ドリフトとスルーレートが開発課題となり、今後フィールド試験に入る。大阪大学は、STM-SQUID 磁気顕微鏡の開発において、2 本の探針のうち一方に環境磁場を拾わせ、もう片方で試料測定を行い、双方をグラジオメータコイルにいれることで環境ノイズを打ち消すシステムを提案、作製している。日立は、体内の抗がん剤の追跡などの応用を目指して、低温超伝導 SQUID でのプロトンとフッ素のマイクロテスラ NMR 計測について検討している。50 μT という従来の NMR の 5-6 桁小さい磁場で加算平均なしの同時計測を実現している。山形大学は、NMR 用の検出コイルに高温超伝導線材が使用可能かを検証している。表面抵抗では 15 T 下で銅の 1/1000 になり、十分な性能を発揮する。しかし線材の磁化率が問題で、電流を上げるために設けたピニングセンターが、妨げになっている可能性がある。横浜国大は、高感度デジタル SQUID の検討を行っている。デジタル SQUID の低感度を、磁束の保持機構を使って改善しようというものである。感度とダイナミックレンジのトレードオフがあるが、応用にあわせた最適設計で活路を見出せる可能性がある。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会—11.5 接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用セッション」報告

独立行政法人 情報通信研究機構
未来 ICT 研究所 ナノ ICT グループ
寺井弘高

2月17日午後のポスターセッション(8件)、18日午前のオーラルセッション(12件)に分かれて20件の発表が行われた。

接合、回路作製プロセス関連では、まず高温超伝導 SQUID の進展が注目を集めた。ISTEC の安達らは、非破壊検査システムや資源探査等への応用を見据えた高温超伝導 SQUID グラジオメータの開発を進めており、作製技術はかなり成熟しているという印象を受けた。高温超伝導体のエレクトロニクス応用が着実に進んでおり、システムレベルでの性能評価フェーズにあることを実感できた。一方、名大の舩井ら、情通機構の牧瀬らは、NbN 系ジョセフソン作製プロセス・回路作製プロセスの進展を報告した。接合特性の高品質化、制御性の向上がさらに進めば、NbN 系ジョセフソン接合の実ユースも十分視野に入ってくるという印象を受けた。このような Nb 系以外の接合・回路作製技術は、超伝導エレクトロニクスの幅と奥行きをさらに広げることになるため、今後の研究開発のさらなる進展に期待したい。

SFQ 回路関連では、最近の世界的トレンドである省電力 SFQ 回路に関する発表が注目を集めた。名大の北山らは、現状の SFQ 回路の臨界電流値(最小 100 μA)を 1/4 にしても、十分低いビット誤り率(10^{-19} 以下)で動作することを実証した。これにより、直流バイアス電流量を 1/4 に減らすことが可能で、バイアスフィード抵抗の低減と併せれば、消費電力を 1/100 以下に削減することが可能となる。一方、スイッチングに伴うダイナミックな消費電力をさらに大幅に削減しようというアイデアが横国大のグループが提案する断熱型 QFP 回路である。今回もこれに関連したオンチップ交流電流供給源、超伝導共振器を用いた消費電力の実験的評価についての報告があった。実験的に得られた断熱型 QFP のスイッチングあたりの消費電力は 40 zJ (4×10^{-20} J)で、65 nm CMOS に対して 4 桁以上の優位性があることが示された。冷却に要する消費電力を含めても CMOS に対して 1~2 桁の優位性を持つ省電力デジタル情報処理システムを実現できる可能性がある。このような省電力 SFQ 回路による大規模回路の動作実証を、ビット誤り率評価と併せて行うことが今後の課題となるだろう。

超伝導量子ビットに関連する発表も前回秋の講演会に引き続き 11.5 のセッションで行われた。多ビット化へ向けた研究が着実に進展していて、読み出し精度の改善(NEC・理研、山本ら)、状態に応じた高速制御(NTT、角柳ら)、量子メモリへの応用展開を念頭に置いたダイヤモンド結晶中の NV 中心と磁束型量子ビットとの結合(NTT、斉藤ら)、デコヒーレンス時間の改善を目指したエピタキシャル NbN/AlN/NbN 接合を用いた超伝導 CPW 結合型の量子ビット(情通機構、丘ら)等の発表があった。最近、IBM のグループから 100 μs 近いデコヒーレンス時間も報告されており、量子誤り訂正プロトコルの実装を視野に入れた多ビット化へ向けた研究が今後活発になってくる可能性もある。

上記以外にも、講演奨励賞記念講演である山下ら(情通機構)の超伝導単一光子検出器のダークカウント起源、柏谷ら(産総研)の微小 SQUID の作製、横国大から SFQ 回路設計に関する多数の発表があり、活発な議論が行われた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「2012年春季第59回応用物理学会理学関係連合講演会－田中昭二先生（初代超電導工学研究所長）追悼シンポジウム」報告

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長 田辺圭一

高温超電導の研究分野を切り開き、(公財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) において、副理事長、超電導工学研究所 (SRL) 所長として 20 年にわたり高温超電導材料開発とその応用技術開発を牽引してこられた田中昭二先生 (東京大学名誉教授、超電導工学研究所名誉所長・顧問) が昨年 11 月 11 日に逝去された。また、高温超電導体の臨界温度が液体窒素温度を超えたのがちょうど 25 年前の 1987 年 2 月であったことから、応用物理学会超伝導分科会の企画により、「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」と題した追悼シンポジウムが 3 月 15 日、早稲田大学で開催中の応用物理学関連連合講演会の会期中に行われた。このシンポジウムは前半・後半各 2 件の講演で構成され、前半は北澤宏一先生 (JST 前理事長) と石井英雄氏 (東京電力: 東京大学田中研究室 OB) が、東京大学在職、在学時代を振り返り、高温超電導発見当時の状況について紹介した。また後半は、ISTEC/SRL における田中先生ご指導による高温超電導研究開発の進展を筆者と塩原 融・現 SRL 所長が紹介し、先生のご功績を振り返った。

北澤先生は、1980 年に田中先生に請われて応用化学科から物理工学科の田中先生のグループに移った。当時の田中研では、酸化物超電導体 $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ (BPBO) の研究を行っていたが、これはいわゆる BCS の壁への反抗であった。ベドノルツとミュラーの論文を入手したのが 1986 年 9 月、初めは当時よくあった未確認超電導体 (USO、北澤先生の造語) の一つかとも思ったが、11 月には卒論の学生がマイスナー効果とゼロ抵抗を確認した。12 月には結晶構造を突き止めたが、1970 年代にフランスのラボ教授グループや東北大グループが研究していたが、低温の特性を調べていなかった K_2NiF_4 構造の物質であった。これら、高温超電導体発見の経緯が当時出版された漫画のコマも引用して紹介された。その後の 1987 年 3 月の米国物理学会でのフィーバーぶりは有名であるが、米国物理学会の雑誌 *Physical Review Letters* の特集 (86 報掲載) に対抗し日本の基礎研究のアクティビティを示すため、JJAP の 4 月号に 85 報を集め、田中先生が発表した 5 月のアナハイムでの MRS にこれを 1000 冊輸送し配布した (輸送料は企業の好意で請求されなかった)。また当時の日米摩擦にも配慮し米国議会の要請により 13 カ所で講演を行ったという苦労話もされた。酸化物高温超電導体の実用化に関しては、20 年の技術開発で電流の流せる長尺線材ができあがり、船用モーターからリニア新幹線用のマグネットとして使われることを信じている。また、地下送電ケーブルだけでなく将来的には地球規模の送電網に使われるという夢が語られた。

石井氏は 1985 年から 1988 年にかけて田中グループの北澤先生、内田先生の研究室に在籍し、ちょうど高温超電導体が発見されたときに立ち会ったメンバーの一人である。当時感じ取った田中先生の特徴や人柄について語ると共に、高温超電導体で 28 K を確認し皆で祝ったこと、また企業から田中先生の研究室に派遣された研究者の数が急に増えたことなど、発見当時の研究室が活気づいた様子を紹介した。

筆者は、大学院時代に田中先生からフレイリッヒの機構に基づく室温超電導につながるかもしれない挑戦的な研究テーマを与えられたことや、研究室での酸化物超電導体 BPBO の研究の始まりに出会ったことをまず紹介した。また、ISTEC 創立 7 年目に超電導工学研究所の田中先生を訪問した際に、今後の超電導応用研究への先生の熱い思いを聞き、その後の先生からの要請で新物質探索チ

ームのリーダーとして研究所に移ることになった経緯について話した。1998年からの筆者は、NTT研究所時代に経験した薄膜、デバイス研究分野を超電導工学研究所において担当することになった。当時、超高速・低消費電力の単一磁束量子 (SFQ) 回路の研究が米国で盛んになっていたが、田中先生は通産省、科技厅 (それぞれ当時) に働きかけられ、まずニオブ系低温超電導 SFQ 回路の基盤研究プロジェクトを立ち上げ、次に自らがプロジェクトリーダーを務めた NEDO の「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトにおいて、高温超電導 SFQ 回路の基盤技術開発を主要テーマの一つに設定した。その後 2001 年には、JEITA、光協会、素子協、ISTEC の 4 団体が事務局となった「電子基礎・基盤研究のあり方懇談会」を主導され、これが 2002 年の経産省の情報通信ネットワーク機器基盤研究開発プログラム発足に繋がった。このプログラムの中心は光やワイヤレスネットワーク用の半導体デバイス開発であったが、超電導 SFQ デバイスも次世代の低消費電力デバイスとして位置づけられ、継続して国の研究サポートが受けられるようになった。田中先生の夢は超電導コンピュータの実現であったと思うが、我々に示された研究目標も、当初は 5-10 年で 10 K ゲートクラスの高温超電導大規模集積回路の実現という非常に高いものであった。実際、銅酸化物高温超電導体は構造が複雑なため、大規模集積回路の実現は容易ではなかった。しかしながら、プロジェクトで開発された酸化物薄膜積層技術やジョセフソン接合作製技術は、高性能の薄膜積層型高温超電導 SQUID の開発に繋がり、金属資源探査実用機やバイオ・非破壊センシング装置の実現へと花開きつつある。また、低温超電導 SFQ 回路用の世界最高水準のプロセスが構築され、将来のコンピュータ応用への前段として、まずは各種超電導検出器用の多重信号処理回路への応用が見込まれている。

塩原所長は、超電導ではなく方向凝固や結晶成長など材料プロセスの専門家として、発足時の ISTEC/SRL の研究室長の一人とし、田中先生より MIT からの移籍を要請された経緯についてまず紹介した。SRL での最初の 10 年間の研究としては、包晶反応を利用した Y 系超電導材料の大型単結晶引き上げ技術 (SRL-CP 法) の開発や液晶エピタキシャル法によるデバイス用の超電導基板作製などが特筆されるが、これは単結晶が非常に重要だという田中先生のお考えにも沿うものであった。1998 年からの NEDO の「超電導応用基盤技術開発」プロジェクト (第 I 期、第 II 期) においては、Y 系超電導線材の基盤技術開発に線材メーカーと共に取り組み、フジクラによる IBAD 法の開発、SRL における CeO₂ キャップ層や IBAD-MgO バッファの開発、GdBCO 超電導層の採用による線材の特性向上や製造速度の大幅向上などの大きな成果が生まれた。線材開発についても田中先生は、例えば超電導臨界電流値 (I_c)、長さ (L) の後は低コストなど次々と新しい課題を出され、IBAD-PLD 線材だけでなく低コストの MOD 線材の開発に繋がった。Y 系線材の $I_c \cdot L$ 値のチャンピオンデータは、昨年未の段階で日本のフジクラが持っているが、韓国の SuNAM 社が最近これに迫りつつある。SRL の最近の重要な成果としては、BaHfO₃(BHO) 人工ピンの開発があげられる。BHO 人工ピンは低温、高磁場においても臨界電流密度 (J_c) 向上に効いていることが最近明らかになっており、高磁場マグネットや加速器などの今後の機器開発への応用が期待される。田中先生から学んだ教訓としては、常に第一線にいるという意識をもつことであり、それが科学技術を伸ばしていく原動力になるということであった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

「電子情報通信学会報告-チュートリアル講演『発見から 50 年!ジョセフソン効果のインパクト』」報告

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

「発見から 50 年!ジョセフソン効果のインパクト」と題するチュートリアル講演が行われた。ジョセフソン効果は 1962 年にイギリスのジョセフソンによって発見された効果であり、この効果を用いたジョセフソン接合によって超電導エレクトロニクスは成立していると言っても過言ではない。このチュートリアル講演は、ジョセフソン効果発見 50 周年にちなみ、ジョセフソン効果の基礎と応用の広がりを知りやすく理解してもらうために企画された。超電導エレクトロニクス分野外の聴衆も数多く見受けられ、第一人者を集めた講師陣の素晴らしい講演と相まって所期の目的は達せられたと思われる。

最初に京大の鈴木教授からジョセフソン効果の物理についての説明があった。ジョセフソン効果は絶縁層を介した二つの超電導体間の位相の \sin に比例して超電導電流が流れ（直流ジョセフソン効果）、二つの超電導体間の電位差に比例して位相が回転する（交流ジョセフソン効果）効果である。この位相の物理的意味を説明することから入ってジョセフソン効果の興味深い性質がわかりやすく説明された。例えば、超電導の巨視的量子効果の位相はベクトルポテンシャルにより大きな変化を示すため、微小信号に対して極めて感度の高い応答をする。ジョセフソン効果は超電導現象における巨視的量子効果の位相を外部に取り出すためには現在のところ唯一の手段であることが述べられた。

ISTEC の田辺氏はジョセフソン接合作製技術について解説を行った。ジョセフソン接合は簡単に言うと二つの超電導体を弱く結合した素子であるが、結合の仕方によってトンネル型やマイクロブリッジ型など数多くの種類がある。また、超電導材料の特性によっても作り方を変える必要がある。代表的なジョセフソン接合である Nb/AIOx/Nb 接合と高温超電導体を用いた界面改質型ランブエッジ接合についてその開発の歴史、詳細な特徴、応用が解説された。

産総研の金子氏はジョセフソン接合を使った計測標準の紹介を行った。ジョセフソン接合を用いると量子力学的に定義された電圧を容易に発生することができる。また、電圧降下のない超電導配線も電圧を定義することに大いに貢献している。ジョセフソン直流電圧標準は既に国家標準として用いられており、現在はプログラマブル型とパルス駆動型の二種類の交流電圧標準を開発中であり、それぞれ成果が示された。また、標準抵抗の構成に用いる極低温電流比較器 (CCC) をニオブの多層集積回路プロセスを応用して作製する技術が紹介された。この技術は将来の量子電流標準への適用も期待されている。

九大の円福教授は SQUID の原理、種類とその応用について解説した。SQUID は超電導ループにジョセフソン接合を 1 個もしくは 2 個含む素子であり、高感度の磁束計として知られている。医療応用では SQUID 脳磁計が世界の病院で約 100 台稼働しており、筑波大に置かれた SQUID 心磁計は年間 2,000 件の心機能検査を行っている。他にも非破壊検査や地質探査などの興味深い応用が数多くあり、魅力的な分野であることが紹介された。

名大の藤巻教授からジョセフソン接合を用いたデジタル回路研究の歴史と研究動向が紹介された。デジタル回路はラッチング回路を用いた第一世代から SFQ 回路による第二世代に研究が進み、現在は第三世代の入り口にあることが述べられた。第三世代は物理限界に迫るような超低消費電力

SFQ 回路とスピンなどの他の物理現象を用いたメモリとのハイブリッドであると考えられており、アメリカを中心に大きな研究のうねりが起きている。

NEC/理研の蔡氏から量子コンピュータの基本素子である超電導量子ビット研究の報告があった。超電導の巨視的量子効果とジョセフソン接合の非線形インダクタンスを用いることによって、他の現象を用いる場合よりも容易に量子二準位状態を作ることができる。課題はデコヒーレント時間を延ばすことと量子ビット間の可変結合である。デコヒーレンス時間は 1999 年の超電導量子ビット発見当時から 6 桁向上し、実用レベルまであと 3 桁ほどに迫っている。量子ビット間結合は最近レゾネータを用いる方法が導入され、効果を上げている。また、ジョセフソン効果と完全に共役な効果として Coherent Quantum Phase Slip (CQPS)の確認実験に世界で初めて成功したことが報告された。

[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3)

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

金属、半導体、セラミックスなどの物質群は一般に結晶とよばれる構造を持っている。結晶は原子や分子が空間的に繰り返しパターンを持って格子を組み、整然とならんでいる物質の状態のことだ。指先くらいの大きさの金属結晶の塊の中には 10^{23} 個という膨大な数の原子が詰め込まれている。原子が整然と並んで公園のジャングルジムのような構造を組み、無限に広がっているような状態を想像すればいい。超電導はこのような結晶の中に閉じ込められた電子の海の中で発生する現象だ。理想的な結晶ではどこまで行っても同じ構造パターンが現れ、電子の運動もこのパターンに追従する。しかし、もし結晶のどこかでその並び方に乱れが生じると電子の運動にも影響が出てくる。例えば結晶の乱れによって電子が局所的に散乱されたり、あるいは電子が流ることができないような領域が発生したりすると、その結果として超電導状態そのものにも空間的な不均一性が発生する。このような不均一性は超電導にとっては厄介者かもしれない。ところが渦糸のピン止めにおいては大変重要なものだ。

2. 対破壊電流、ピン止め

前回述べたように、渦糸（典型的には直径数 nm）の周囲には磁場侵入長 λ （典型的には数 10～150 nm）の範囲でクーパー対からなる永久電流が周回電流を作り磁場を閉じ込めている。渦糸の中心に近い所で最大の電流が流れ、中心から遠ざかるにつれて電流は小さくなっていく。ここで、最大の電流値のことを対破壊電流 (J_d) とよぶ。対破壊電流とはこれ以上流すと電流の力によってクーパー対が引きちぎられて超電導が壊れてしまうような電流値のことだ。その値は極めて大きく電流密度で 10^8 A/cm²（断面積 1 cm² 当たり数億アンペア）を超える。しかし、渦糸の周りには対破壊電流が流れているが、超電導線材の端から端にわたって対破壊電流を取り出すことにかつて成功したためしはない。そのはるか以前の小さな電流値で、ローレンツ力によって渦糸が動き出し抵抗が発生してしまうためだ。

実用超電導線材では電流密度 10^6 A/cm² が実用の目安と考えられており、これは直径が 0.1 cm の超電導電線に電流を流したとき、1 万アンペアまでゼロ抵抗を維持でき、それを超えると渦糸の運動によって抵抗が現れてしまうことを意味する。この場合、 10^6 A/cm² が臨界電流密度 (J_c) に相当する。抵抗が発生しないようにするためには、ローレンツ力によって渦糸が動かないように個々の渦糸を強くピン止めする必要がある。ピン止めとは文字通り採集した昆虫を虫ピンで標本箱にピンで止めるのと原理的には同じだ。しかし超電導渦糸はクーパー対の海の中に形成された量子力学的な渦だ。渦糸をピン止めする？ 超電導の場合の虫ピン・標本箱？ そんなものを動かないように本当にピン止めできるのか？ その答えは、冒頭に述べた内部に形成される超電導の空間的な不均一性の中にある。

3. ピン止めエネルギー

本来、超電導の中では渦糸は存在しない。超電導体においてはマイスナー効果が本質的であり、

磁場をできるだけ排除しようとする性質がある。渦糸は外部磁場が大きくなってその圧力に耐え切れず、全体の磁場エネルギーを下げるために無理やりクーパー対の海の中に形成されるものだ。そのため渦糸は長さに比例した余分なエネルギー（自己形成エネルギー）を持ち、エネルギーの高い状態にある。ここで超電導体内部に小さな球状の不均一部分がある場合を考えよう。渦糸がすっぽりとクーパー対の海の中にある場合と、渦糸の一部が不均一部分にある場合を比較する。不均一部分は超電導ではないから周回電流は流れず、その部分では渦糸は形成されない。よって渦糸の実質的な長さは短くなっており、渦糸の一部が不均一部分に存在する方が全体的なエネルギーは低くなっている。

ここで、仮想的に渦糸をクーパー対の海から不均一部分を通るように動かすと、渦糸は図1に示すようなエネルギーの変化を感じるようになるだろう。これは平らな台の上に置いたボールが穴に落ち込んだような関係に等しい。ボールが穴に落ちたことと台の上にある場合のエネルギー差をピン止めエネルギー（ポテンシャルエネルギー）とよび、その空間的な傾きをピン止め力とよんでいる。穴が深く傾きが急峻であればあるほど渦糸をピン止めする力が強い。以上より、超電導の場合、渦糸をピン止めする虫ピンとは、結晶の中に導入された不均一部分であり、標本箱とは、超電導が発生する舞台である結晶そのものであることがわかるだろう。なお渦糸をピン止めする虫ピンに相当するものを、ピン止め点、あるいはピン止め中心とよぶ。

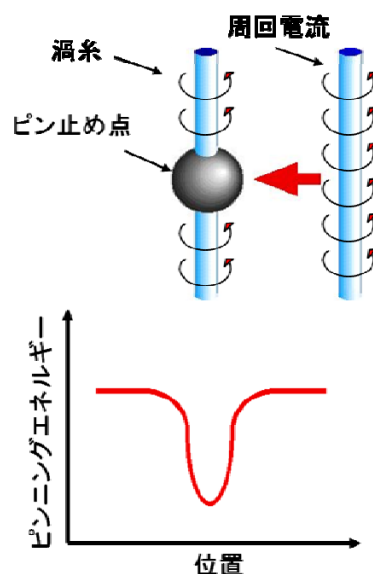


図1 渦糸を仮想的に動かした時のピン止めエネルギーの変化。

4. 結晶欠陥・格子欠陥

結晶は原子や分子が整然と並んだものだが、一般に配列の乱れである様々な結晶欠陥・格子欠陥、すなわち点欠陥、転位、粒界などを含んでいる。点欠陥は空間的に整然とならんだ原子のうち、ランダムに原子が抜けたり追加されたりすることによって発生する0次元的な欠陥であり、結晶構造の局所的な乱れを生み出す。転位とは原子の配列の乱れが一つの線にそって生じている1次元的な欠陥であり、途中で途切れることなくその両端部は結晶の表面にまで繋がっている。さらに2つの結晶が出会ってできる境界を粒界とよぶ。これは2次元的な欠陥である。一般に金属、半導体などの結晶は高温状態にある気体や液体（あるいは固体）を冷却して固体状態にする過程で作製される（金属の場合は塑性加工も加わる）。この間に結晶を空間的に整然と並べることは難しく、小さな結晶が集まった多結晶体となり、同時に多くの欠陥も導入されるのだ。

多結晶体によく似た身近なものが、洗髪したときできるシャボン玉だ。小さな泡が一つの結晶に対応し、泡と泡の境界が粒界であり、小さな泡を吸収して大きなひとつの泡になったものが単結晶だ。ちなみに同じような構造が最近宇宙でも見つかっている。それは宇宙の泡構造とよばれる。金属の結晶粒径は 10^{-7} m程度であるが、宇宙の泡構造（ボイドという）の直径は1億光年（ 10^{23} m）を超え、泡のなかに我々の住むような銀河系はなく、むしろ泡と泡の境界部分である粒界に銀河系の集団が密集しているという。金属の結晶粒界とはサイズは桁違いに異なるが、泡構造もビッグバン後の高温の宇宙からの冷却過程でできた構造であり、われわれの宇宙には階層構造が多々見出されるという点でも注目される。ちょっとこれとは原理的に違うが、似たような存在として、0次元的な宇宙空間そのものの欠陥である“モノポール”や1次元的な欠陥である“宇宙ひも”もいつの日か発見されるのかもしれない。

5. さまざまなピン止め点

さて、少し寄り道したが、様々な欠陥によるピン止めに戻ろう。図1に示したように球状の不均一部分として非超電導析出物を想定した。析出物が非超電導状態にあればそこにはクーパー対はなく、磁場を閉じ込める周回電流も生じない。よってその部分の渦糸は途切れたのも同然である。析出物が大きければ大きいほど、実質的な渦糸の長さは短く（ピン止めされる部分が長く）なってピン止めエネルギーは大きくなる。しかし、大きな析出物がたくさん存在するとクーパー対の居場所がなくなり逆に超電導電流が流れなくなってしまう。したがって析出物の大きさは渦糸の直径くらいが丁度いいのだろう。

図2に示すように、点欠陥はどうか。これは原子レベルの欠陥であり、渦糸直径よりもかなり小さい。点欠陥の存在によって電子の運動は乱され、局所的に散乱されたりするので超電導も局所的に弱められるだろう。よって渦糸は点欠陥の存在によってピン止め力を感じるようになる（0次元ピン止め点）。しかし大きなピン止め力は期待できそうにない。転位は点欠陥が直線状に並んだものであり、渦糸が転位にそってピン止めされた場合はそれなりのピン止め力が期待できそうだ（1次元ピン止め点）。さらに、結晶粒界は1次元の転位が方向をそろえて並び2次元面を作ったものだ。したがって渦糸に平行に粒界面が存在する場合は、多数の渦糸を同時に強くピン止めできるかもしれない（2次元ピン止め点）。実際、粒界近傍にある電子は強く散乱され、粒界でのクーパー対密度も低下することで強いピン止め点として作用することが知られている。金属間化合物の超電導体である Nb_3Sn や近年発見された MgB_2 では粒界が主要なピン止め点であることが確認されている。先述の渦糸直径より大きい析出物は3次元的なピン止め点に分類されよう。

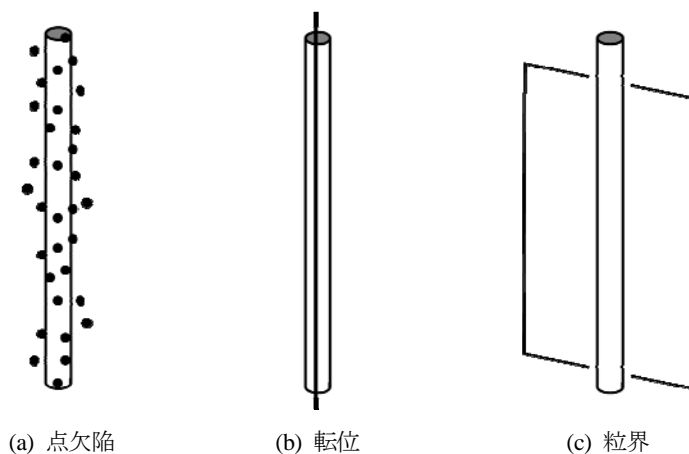


図2 様々な結晶欠陥による渦糸のピン止めの様子

6. ピン止めにまつわる課題

以上のように渦糸のピン止めを考えると、その次元性が重要であることに気づく。これは渦糸がひも状の構造をしているためである。また、渦糸の本数は外部磁場の強さによって大きく変化する。例えば1Tの磁場中においては超電導体の断面積1 cm^2 当たり483億本、5Tでは2415億本もの渦糸が存在することになる。高い臨界電流密度を実現するためには、これだけの膨大な数の渦糸を動かないように強くピン止めする必要がある。ところが厄介なことに渦糸には磁束量子が閉じ込められているため、渦糸間には磁気的な反発エネルギーが働く。さらに厄介なことに77Kで動作する高温超電導体においては、熱ゆらぎのエネルギーが顕著になる。実はこれらのエネルギーはピン止めエネルギーの効果を弱める方向に働くのだ。こうして超電導体におけるピン止めの問題は多体問

題とよばれる複雑怪奇な問題となり、一筋縄ではいかなくなる。次回以降は粒界にまつわる問題や、ピン止めに関係する問題について考えてみたい。

参考文献:

ピン止め全般の解説として次の文献をあげておく

1. 松下照男「磁束ピンニングと電磁現象」、産業図書（1994）

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「超電導材料の磁力線観察に成功したという記事がありました。どのような技術により可能になったのでしょうか。また、どのような応用が期待されるのでしょうか？」

A：

電子線ホログラフィー

磁力線の観察は透過電子顕微鏡法 (TEM) の一つである電子線ホログラフィーという手法を用いて行いました。電子線ホログラフィーでは「試料周辺を通過した電子波 (物体波)」と「試料から離れたところ通過した電子波 (参照波)」を干渉させて干渉縞 (ホログラム) を撮影・記録し (図 1)、この干渉縞を解析することで、物体波の位相と振幅を計算 (再生) することができます。電磁場の存在する空間を電子の平面波が通過するとき、その空間におけるスカラーポテンシャルやベクトルポテンシャルに応じて波の位相が変化するため、この位相変化をホログラムに記録し、再生することで試料内外の微弱な電磁場を可視化することが可能です。

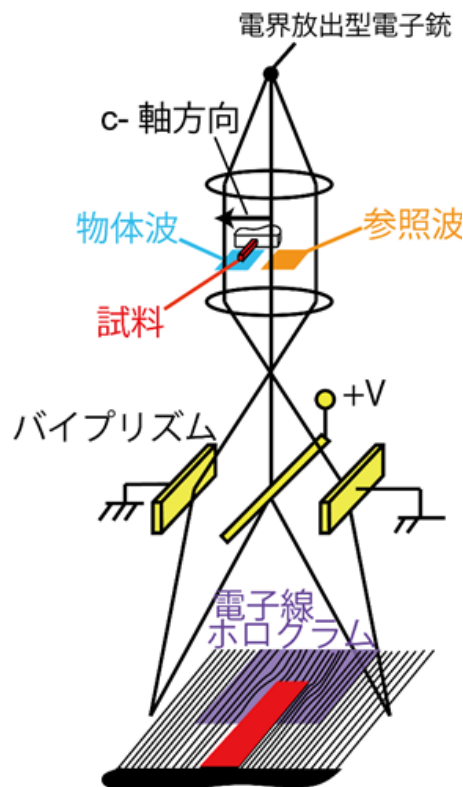


図 1 電子線ホログラム形成の模式図

試料準備方法とホログラムの撮影手順

観察に用いた試料は熔融法で作製されたバルク YBCO で、方向凝固された超伝導の 123 相の中に磁束のピン止めサイトとして常伝導の 211 相粒子が分散された試料です。これを集束イオンビーム (FIB) を用いて $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 程度の角柱状に加工し観察用の試料としました。ホログラムの撮影には鏡筒内で温度制御と外部磁場制御ができる特殊な透過電子顕微鏡を用いました。まず T_c 以上の温度域で c 軸方向に外部磁場を印加し、外部磁場を印加したまま T_c 以下の温度に冷却後、外部磁場をオフにして、試料周辺のホログラムを撮影しました。得られた位相再生像には電場のノイズを差し引く処理を行いました。観察初期ではいろいろなサイズの試料を観察しましたが、上記の試料形状のときに磁束量子一個がピン止めされている様子が捉えられました。

走査イオン顕微鏡による組織観察

上記試料は厚さが $2\ \mu\text{m}$ あって入射電子が透過できないため、TEM では材料の組織観察ができません。そこで、組織観察は FIB 装置で得られる走査イオン顕微鏡法 (SIM) の像を用いました。これはガリウムイオンで試料表面をスキャンした時に発生する 2 次電子を、走査電子顕微鏡法 (SEM) と同じ要領で画像化する顕微鏡法です。SIM 像では 211 相が暗いコントラストになり、123 相との区別は容易につきます。図 2 (a) に、ホログラフィーで得られた位相再生像 (位相増幅 2 倍) に SIM による試料の像を重ねたものを示します。図 2 (b) は試料を 52° 傾けた側面の SIM 像です。このように位相再生像と SIM を組み合わせることで磁束量子がピン止めされた位置を材料組織と対応付けすることに成功しました。

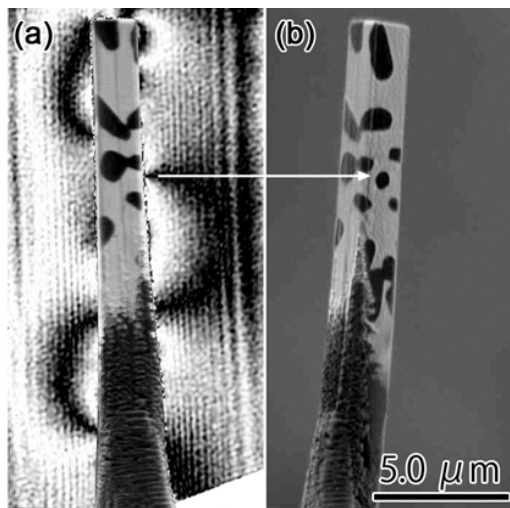


図2 (a) 位相再生像（背景、位相増幅2倍）と走査イオン顕微鏡像（試料）を合成した図。
(b) 試料の右側面（52°傾斜）の走査イオン顕微鏡像。

応用について

高温超電導材料は社会の多方面で実際に利用されるステージに入りつつありますが、電力や通信への応用にしろ、強力な電磁石としての応用にしろ、磁束量子のピン止めがその性能の要になっています。現在、超電導材料ではピン止め点として更に微細な非超伝導相が導入されたものが実用化に向けて開発されてきており、評価する側も、より高倍率での解析が必要となってきました。そうした材料の評価に本研究結果が活用されていくことを望みます。

参考文献：

Z. Akase, H. Kasai, S. Mamishin, D. Shindo, M. Morita and A. Tonomura: "Imaging of magnetic flux distribution in vicinity of insulating particles in high- T_c superconductor by electron holography", J. Appl. Phys., 111 (2012) 033912(1)-033912(5).

回答者

東北大学多元物質科学研究所：赤瀬善太郎 様、進藤大輔 様
理化学研究所,株式会社日立製作所：外村 彰 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。」