一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

CODEN: FSNEFR

2012-5-15

発行 一般社団法人 未踏科学技術協会 平成24年5月15日発行 〒105-0003 東京都港区西新橋1-5-10 新橋アマノビル6階 Tel:03-3503-4681 Fax:03-3597-0535 Email: fsst@sntt.or.jp

Forum of Superconductivity

Science and Technology News

No. 133

<FSST NEWS No.133 目次>

<トピックス 1> 地下資源探査用高温超電導 SOUID 磁力計の開発					
国際超	電導産業技術研究センター	波頭 経裕2			
<トピックス 2>					
トポロジカル超伝導とマヨラナ粒子	大阪大学	安藤 陽一6			
<トピックス 3>					
MBE 法による鉄系超伝導薄膜作製とその薄膜の特	徴 東京農工大学	上田 真也9			
<会議報告1>					
第 78 回ワークショップ「再生可能エネルギー導入へ	向けた超伝導・低温技術」				
	日立製作所	和久田 毅17			
<会議報告 2>					
第38回シンポジウム会議報告	古河電気工業	木村 昭夫18			
<会議報告3>					
応物田中先生追悼シンポジウム報告 国際超	電導産業技術研究センター	田辺 圭一19			
<会議報告 4>					
電子情報通信学会 2012 年総合大会チュートリアル・	セッション				
「発見から 50 年!ジョセフソン効果のインパクト」報告	E T				
	産業技術総合研究所	前澤 正明20			
く授賞発表>					
「第16回超伝導科学技術賞」発表	審査委員会委員長	太刀川 恭治22			
<研究室紹介>					
(1) 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻	小形正男研究室	24			
(2) 中部電力株式会社 電力技術研究所 超電導	「プロジェクト	25			
(3) 山形大学大学院理工学研究科 大嶋·齊藤研	究室				
(4) 九州大学 木須研究室					
(5) 京都大学 雨宮研究室					
○第 79 回ワークショップ					
○研究会の動き					
○国内紹伝道関連会議/国際会議及び国外の主要					
	要な会議				

<トピックス 1>

地下資源探査用高温超電導 SQUID 磁力計 の開発

Development of HTS-SQUID magnetometer system for exploration of earth resources

超電導工学研究所 波頭 経裕, 塚本 晃, 安達 成司, 押久保 靖夫, 田辺 圭一 Superconductivity Research Laboratory, ISTEC T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi Y. Oshikubo and K. Tanabe

1. はじめに

地下資源の探査は、衛星や航空機からのリモートセンシング、地上での物理探査(振動や電磁探査)、ボーリング調査という具合に絞り込んでいく。ボーリングには多額の経費がかかるため、事前の物理探査をより高精度に行うことが求められている。物理探査の手法の一つが電磁探査で、中でも人工的に加えた電磁場に対する時間的変化を受信して解析する方法がTEM法 (Transient Electromagnetic)またはTDEM法(Time-Domain EM)と言われる[1]。

SQUIDを用いた物理探査は、探査深度の向上を目 指し、ドイツやオーストラリアなど、海外で盛んに研究開 発されており[2-6]、日本では、JOGMEC(石油天然ガ ス・金属鉱物資源機構)が平成13年から高温超電導 SQUIDを用いた電磁探査装置(SQUITEM)の開発を 進め、金属資源探査に活用してきた[7],[8]。従来の誘 導コイル型磁力計を用いた磁場時間微分値を計る方法 と比較して、磁場値での測定は時間減衰が遅く、遅い 時間まで測定できるため、より深い深度の測定に向いて いる。また、磁気センサとしてSQUIDは、100 kHzにおよ ぶ周波数帯域に加え、30 fT/√Hz 以下の低いノイズレ ベルを有し、深い金属鉱床の探査に有用と期待されて いる。

超電導工学研究所(SRL)では、高温超電導デジタ ル回路の研究過程で培った、ランプエッジ型接合を中 心とする高度な多層構造作製プロセス技術を活かし [9-11]、高性能な高温超電導SQUIDおよびシステムを 製作した経験を持つ[12], [13]。そこでJOGMECの要請 に従い、さらに深部の探査が可能で、かつ精度の高い 次世代 TEM測定システムの開発を行うこととなった。

図1にTEM法の原理説明図を示す。地表に設置し たループコイルに矩形波電流を繰り返し流す。ここで発 生した一次磁場によって地中に誘導電流が発生するが、 この電流が生じさせる二次磁場がさらに誘導電流を地 中に拡散させていく。この二次磁場の時間変化を測定 することによって、地下の比抵抗構造を推定することが できる。今回の開発では、地質にもよるが、地下1000 m 程度までの深部探査が可能となる高温超電導SQUID 磁力計の開発を目指した。



図1. TEM 法の原理説明図

2. 開発のポイント

開発のポイントをまとめると、次の5つになる。図2に TEM受信波形を模式的に表し、そのポイントを説明する。



(1)野外での安定動作

本装置の第一の課題は、野外で磁気シールドなしに 使用するということである。一般に、高感度なSQUIDを シールドレスで使用するためには、素子の特性が安定 に保たれることと磁場の変化に追従することが鍵となる。 後者は次項で説明する。SQUIDの素子特性を不安定 にする重大要因の一つはRFノイズの侵入である。RFノ イズによりジョセフソン接合のI。は小さくなり、SQUID特 性が変化する。これが動作を不安定にする。そのため 厳重にRFノイズの侵入を防ぐシールドを施したいが、 TEMシステムのRFシールドには特別な工夫が必要となる。なぜなら、急峻な磁場変化の中で使用するため、装置へのエディー電流(渦電流)の発生を抑制する必要があり、アルミフォイルで何重にもシールドを施すようなわけにはいかない。RFシールド性能とエディー電流の抑制の両立が求められる。そこで、我々はあえて磁性材料を含有するが高周波において高シールド性能で、かつエディー電流の減衰時間の短い材料を選択した。

また、地磁気(〜50 μT)で冷却するため、磁束トラップ に強い素子構造が求められる。我々は、ランプエッジ接 合を使用した。ランプエッジ接合は一層の超電導層から 構成されるバイクリスタル型と比較すると、5桁程度トラッ プを起こす磁場が強いことが報告されている[14]。図3 にランプエッジ接合を用いたSQUIDの断面構造を示す。 接合部が上部電極に覆われる構造となっているのが特 徴で、この構造がトラップしにくい原因となっている可能 性がある。電極にはイットリウム系超電導体の中でも比 較的*T*_cの高い、SmBaCuOとLaErBaCuOを用いている。 接合の*T*_cは87 Kで、77 Kでの安定した動作を実現して いる。また、地磁気中で冷却するため、その過程で磁束 がSQUID周辺にトラップされないよう5 μm以下のライン 幅で構成されている。



図3. ランプエッジ接合を用いたSQUIDの断面構造

図4にSQUID チップの写真と実装封止されたパッ ケージの写真を示す。円で囲んだ部分にSQUIDがあり、 チップの周囲を検出コイルが取り囲む構造をしている。 このチップをプリント基板からなるチップキャリアに固定 し、ボンディングワイヤで配線するが、野外でも簡単に 素子交換ができるよう、密閉保護され、内蔵されたヒー ターで必要なときには磁束トラップの解除ができるように なっている。



(2)高スルーレート

次に、急峻な磁場の変化に追従する性能指標として スルーレートが挙げられる。図2中、②に相当する課題 である。送信機からの磁場印加を遮断した瞬間、磁場 は急激に減少する。大きな磁場印加と急激な遮断がよ り深い探査を可能にするため、スルーレートの向上は重 要である。地質の比抵抗が高ければ二次磁場はより急 峻に変化する。例えばニッケル鉱床のあるボツワナのよ うな比抵抗の高い地層を有する地域(数千〜数万Ωm) での資源探査には、より高いスルーレートが必要となる。 このスルーレートの向上は、いかに素早く安定にSQUID を動作点にフィードバックをかけるかということである。そ のため、FLL(Flux Locked Loop)回路の高速性、信号 配線の低ノイズ化と高速性、SQUIDの安定動作、 SQUID素子とFLL回路定数のマッチングなどが重要で ある。回路定数の最適化を含め、システム全体の最適 化設計により、スルーレートは向上した。

図 5 は比抵抗の高い神岡鉱山 (数千 Ωm)で計測したTEM 測定の一部で、最大スルーレート10.5 mT/sを達成した。



図5. TEM応答によるスルーレートの測定

その結果、より深い探査に必要とされるより強い磁場の印可も可能となった。従来は、一辺100m以上の正方形ループに電流1アンペア程度を流して計測を行っていたので、中心磁場は11.3nT_{pp}に相当した。これが858nT_{pp}、100mループで40アンペアの印加が可能となった。従来機器の約1mT/sおよび資源探査上切望された8mT/sを上回る結果で深部探査が期待される。

(3)エディー電流の抑制

エディー電流は慎重に検討する必要があった。それ は、地中だけでなく、計測器自体にもエディー電流が流 れ、そこで発生した磁場が計測データに重畳するため である。図2の③に示したように、地質の比抵抗が低く、 磁場の変化がゆっくりとした場合には見えず、比抵抗の 高いところで計測データに影響を与える可能性がある。 図6は、FLL回路を実装するアルミボックスに誘起された エディー電流が、TEM測定に影響を与えた例である。





一般にFLL回路はアルミボックスに収納されているが、 今回、比抵抗の高いところで大電流を流して計測できる ようになったことで、その影響が明らかとなった。比抵抗 の高い神岡鉱山での測定では、たとえFLLボックスを1 m磁力計から離してもその影響を完全に消すことは出 来ず、スルーレートの向上とともにエディー電流の影響 をより配慮した設計が必要であることが明らかとなった。 これは、探査において、本来なら比抵抗が高い地層と 見なされるべきところに、特異的に比抵抗が低い部分が 存在するがごとく現れ、より深く探査するために印加す る電流を大きくするほど顕著になり、地下構造の解析を 誤る原因となりかねないからである。そこで、システムを 構成する各々の部品に発生するエディー電流による計 測磁場への影響を、実測と計算で検討を繰り返し、計 測に影響しうるエディー電流の減衰時間が十分に短い 10⁻⁶ s台以下になるようシステムを設計した。従来機につ いてもエディー電流の減衰時間を計算で求めたところ、 FLL回路ボックスが10⁻⁴s台の減衰時間を要し、これは比 抵抗の低い地域では影響がないものの、比抵抗の高い 地域では影響が出ることが計算からも裏付けられた。

(4)ノイズの低減

図2中、④に示すように、低ノイズ化は、より深部の測 定に重要である。野外の計測のため、多くの磁場信号 が混在するが、地磁気は短時間では一定と見なせるこ と、商用周波数に同期させて積算平均処理を数百から 数千回行うことによって環境ノイズを消去できることから、 SQUIDの高感度性は野外でも十分に有用である。図7 に野外でのノイズ測定結果を示す。従来機に従来の SQUIDを搭載した場合、従来機にSRL製のランプエッ ジ型接合を用いたSQUIDを搭載した場合、そして新型 3号機にSRL製のSQUIDを搭載した場合を比較した。 素子を変えただけでもノイズレベルは低減しているが、 システム全体でさらにノイズレベルが低減している様子 がわかる。ホワイトノイズは30 fT/√Hz 程度が実現できて いるが、再現性には課題もある。SQUID素子のノイズの 原因については、未だわからないことが多く、今後も設 計やプロセスの検討が必要である。



(5)携行性の改善

野外で移動しながら測定を繰り返すTEM測定におい て、携行性は重要である。図8に、磁力計(液体窒素 デュワ、プローブ、FLL回路、ケーブル類)を収納した ケースと、受信機および制御システムを搭載したケース の写真を示す。我々が開発を担当したのは左の磁力計 部である。収納したケースの重量はそれぞれ15 kgと 10.6 kgで、一人で十分に運搬できる大きさである。



図8. SQUID-TEMシステムの携行型パッケージ

今回のシステムでは、本体を小型化するのみならず、 液化窒素の保持能力の向上、真空断熱層のメンテナン スフリー化、防塵防水性、コンパクトなパッケージへの収 納を心がけた。従来機の液体窒素デュワが3.5 kgで、し ばしば真空層を真空ポンプでメンテナンスする必要が あったのに対し、3号機では2.5 kgで、1 Lの液体窒素を 静置状態で17時間保持する断熱性能を有する。移動を 繰り返しても8時間の保持は可能で、一日の測定作業 を、液体窒素を補充すること無く行える。真空断熱層の 真空をメンテナンスする必要がないように設計しており、 真空ポンプセットを携行する必要が無い。つまり、「冷却 する」というストレスを極力排除した構成とした。

3. むすび

地下資源探査用のSQUID-TEM磁力計の最新の開 発状況について紹介した。SQUIDの高感度性や周波 数帯域の広さが、高温超電導の取り扱いに優れた冷却 によって活かされた一例である。デジタル回路の設計製 作で培われた高度なプロセス技術、高温超電導システ ム開発で培われた実装およびシールド技術、これらが 融合してはじめて高性能な実用機が誕生しようとしてい る。耐磁場性能、スルーレート、ノイズ特性、携行性やメ ンテナンス性など、従来機から大きく改善された。今後、 国内での最終試験を終えた後、海外の資源地帯で地 下資源探査の実用機としての性能試験に入る予定であ る。

このシステムが、地上からより深い地下構造の情報を 得ることを可能にし、資源権益確保の一躍を担うことを 願う。今回の開発が超電導システム実用機の一つの突 破口となることを期待している。

参考文献

- 後藤忠徳,三ケ田均:地学雑誌,117(6)(2008) 997-1010.
- M. Bick, G. Panaitov, N. Wolters, Y. Zhang,
 H. Bousack, and A. I. Braginski: IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 3780-3785.
- [3] C. P. Foley, K. E. Leslie, R. Binks, C. Lewis,
 W. Murry, G. J. Sloggett, S. Lam, B. Sankrithyan,
 N. Savvides, A. Katzaros, K. –H. Muller,
 E. E. Mitchell, and J. Pollock: IEEE Trans. Appl.
 Supercond. 9 (1999) 3786-3792.
- [4] V. Zakosarenko, A. Chwala, J. Ramos, R. Stolz,
 V. Schultze, H. Lutjen, J. Blume, T. Schuler, and
 H. –G. Meyer: IEEE Trans. Appl. Supercond. 11 (2001) 896-899.
- [5] C. P. Foley, D. L. Tilbrook, K. E. Leslie,

R. A. Binks, G. B. Donaldson, J. Du, S. K. Lam,P. W. Schmidt, and D. A. Clark: IEEE Trans. Appl.Supercond. 11 (2001) 1375-1378.

- [6] H. –J. Krause, G. I. Panaitov, Y. Zhang, and M. Bick: IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 745-748.
- T. Nagaishi, H. Ota, E. Arai, T. Hayashi, and H. Itozaki: IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 749-752.
- [8] 荒井英一:超電導 Web21 (2009) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/11_08/200908J1.pdf
- [9] S. Adachi, K. Hata, T. Sugano, H. Wakana, T. Hato, Y. Tarutani, and K. Tanabe: Physica C 468 (2008) 1936-1941.
- [10] K. Tanabe, H. Wakana, K. Tsubone, Y. Tarutani, S. Adachi, Y. Ishimaru, M. Maruyama, T. Hato, A. Yoshida, and H. Suzuki: IEICE Trans. Electron. E91-C No. 3 (2008) 280-292.
- T. Hato, H. Wakana, S. Adachi, M. Maruyama,
 H. Suzuki, and K. Tanabe: Physica C 463-465 (2007) 956-960.
- [12] T. Hato, S. Adachi, H. Wakana, K. Hata, Y. Tarutani, T. Machi, and K. Tanabe: IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 804-807.
- [13] T. Hato, S. Adachi, Y. Sutoh, K. Hata, Y. Oshikubo, T. Machi, and K. Tanabe: Physica C 469 (2009) 1630-1633.
- Y. Hatsukade, K. Hayashi, Y. Shinyama,
 Y. Kobayashi, S. Adachi, K. Tanabe, and S. Tanaka: Physica C 471 (2011) 1228-1233.

<トピックス 2>

トポロジカル超伝導とマヨラナ粒子

Topological Superconductivity and Majorana Fermions

> 大阪大学産業科学研究所 安藤 陽一 Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University Y. Ando

本稿では、トポロジカル超伝導体に関するわかりやす い解説を行うことを試みる。まず、超伝導体が「トポロジ カル」とはどういうことだろうか? 中学の数学では、1次 関数は「直線」に、2次関数は「放物線」に対応すること を学ぶ。これと同様に、数学的な関数は必ずそれに対 応する「形」を持つ。現代物理学の基礎である量子力学 においては、物質の状態は波動関数と呼ばれる数学的 な関数によって記述されるので、やはりその関数に対応 する形を考えることができる。この関数と「形」の対応関 係が、超伝導がトポロジーとつながる所以である。

例えばメビウスの環が普通でないトポロジーを持って いるように、波動関数に対応する「形」が普通でないもの を一般にトポロジカルな量子状態と呼ぶ*。従って、トポ ロジカル超伝導体とは、超伝導状態を記述する波動関 数が普通でない「形」に対応するような超伝導体であ る。

固体物理学の分野で最近、このようなトポロジカルな 量子状態に関する研究が急速に発展してきたが、その きっかけとして、3つのことが挙げられる。最初のきっか けは、量子ホール効果を示す2次元半導体中の電子状 態を記述する波動関数が、チャーン数という不変量で 特徴付けられるトポロジカルな量子状態であることが認 識されるようになったことである(1982年)[1]。その次が、 トポロジカル超伝導体を利用すると非可換統計に従う 「マヨラナ粒子」と呼ばれる不思議な粒子(後で詳述)を 準粒子として作り出すことができ、この非可換マヨラナ粒 子を量子ビットとして使うと擾乱に強いトポロジカル量子 計算が可能になる、という提案である(2000年)[2]。そし て3つ目が、普通のバンド絶縁体の中にもZ₂インデック スという不変量で特徴付けられるトポロジカルなものがあ るという発見である(2005年)[3]。そのような絶縁体は当 初、量子スピンホール絶縁体と呼ばれたが、2007年ご ろからトポロジカル絶縁体と呼ばれるようになり、その後 に具体的な物質も発見されて、理論・実験ともに最近そ の研究が世界的な流行を見せている[4]。

トポロジカル絶縁体の特徴は、バルクにはエネルギー ギャップを持つ絶縁体なのに、その表面にギャップレス の金属状態が生じていることである。その表面状態中の 電子は、質量項をゼロにおいたディラック方程式で記述 されるエネルギー状態を持つため、これを「相対論的 ディラック粒子」とみなすことができる。しかもそのスピン の向きが、面内に固定された上で運動量ベクトルに対し て常に垂直になる「ヘリカルスピン偏極」を持つ**のが大 きな特徴である[図1 (a)]。このようなヘリカルスピン偏極 の存在はすなわち無散逸スピン流の存在を意味するの で、トポロジカル絶縁体の表面を利用した超省エネル ギー型スピントロニクスの応用が期待されている[5]。

トポロジカル超伝導体もトポロジカル絶縁体と似た特 徴を備えており、バルクの波動関数には超伝導ギャップ が開いているのに、表面にギャップレスの状態が現れる [6]。ただしトポロジカル超伝導体のバラエティはトポロジ カル絶縁体よりも幅広く、バルクの持つトポロジカルな性 格に応じて、表面状態の性質も様々であるところが重要 な違いである。例えば時間反転対称性の破れた2次元 トポロジカル超伝導体(=カイラル超伝導体)のトポロ ジーはチャーン数によって決まり、その端には右回りか 左回りかどちらか一方の電子の流れ(カイラルエッジ流) が生じる[図1(b)]。これに対して、時間反転対称性を 保った3次元トポロジカル超伝導体のトポロジーはヒル ベルト空間の巻き付き数によって決まり、その表面には ヘリカルなスピン偏極を持ったマヨラナ粒子が現れる [図1(c)]。

このマヨラナ粒子とは、粒子がそれ自身の反粒子でも あるという奇妙な粒子で、もともとは1937年にイタリアの 理論物理学者エットーレ・マヨラナによって、当時未知 の粒子だったニュートリノのモデルとして提唱されたもの である[7]。これまでマヨラナ粒子が素粒子として実際に 自然界に存在することは確認されていないが、超伝導 体の表面では電子がマヨラナ粒子として振舞うことが起 こり得る。その理由は、超伝導状態における励起である ボゴリューボフ準粒子が持つ基本的な性質である粒子・

^{*}正確に言うと、ある状態を記述する波動関数が構成するヒル ベルト空間が非自明なトポロジカル不変量を持つ(例えば種 数や巻き付き数がゼロでない)とき、その状態はトポロジカルな 量子状態である。

^{**}このとき、スピンの方向が固定されていることから、スピンの 「自由度」は失われている。しかしスピン自体が消失しているわ けではない。なおグラフェンにおける2次元電子系はトポロジ カル絶縁体表面と同様に質量ゼロのディラック粒子と見なせる が、こちらはスピン縮退しており、スピンの自由度は2である。



- 図1:(a) トポロジカル絶縁体におけるヘリカルにスピン偏極した表面ディラック電子系のエネルギー分散の概念図。 (b) 時間反転対称性の破れた2次元トポロジカル超伝導体の端に現れるカイラルエッジ流のエネルギー分散の概
 - 念図。黒線はスピン縮退したボゴリューボフ準粒子を表す。
 (c)時間反転対称を保った3次元トポロジカル超伝導体の表面に現れるヘリカルにスピン偏極したマヨラナ粒子のエネルギー分散の概念図。この状態はボゴリューボフ準粒子なので、アップスピンの分散とダウンスピンの分散それぞれについて、フェルミレベルの上と下は固有状態として同じものである。

正孔対称性にある。つまり、超伝導体中でクーパー対を 壊したときにできる励起状態は、粒子が1個できた状態 と見ることも、正孔が1個できた状態と見ることもでき、こ の「粒子」と「正孔」は固有状態として同じもの(つまり生 成演算子が同一)である。ただしボゴリューボフ準粒子 が粒子・正孔対称性を持っていても、スピン縮退してい る限りマヨラナ粒子とは見なせない。特別な場合、つまり ボゴリューボフ準粒子がスピンの自由度を失った場合に 限り、「粒子がそれ自身の反粒子である」***というマヨラナ 粒子の性質を満たすようになる。3次元トポロジカル超伝 導体の表面ではボゴリューボフ準粒子がヘリカルなスピ ン偏極を持つため、スピンの「自由度」が無くなっている ので、これをマヨラナ粒子と見なせる、というわけである。

なおp波超伝導体の代表例であるSr₂RuO₄は、時間 反転対称性の破れた擬2次元トポロジカル超伝導体で ある可能性が高いが[8]、この系ではエッジ状態がスピ ン縮退しているため、エッジにマヨラナ粒子は現れない。 これに対して、最近筆者らがトポロジカル超伝導体であ ることを発見[9]したCu_xBi₂Se₃超伝導体の表面にはへ リカルなマヨラナ粒子が存在するため、筆者らによるポ イントコンタクト分光実験で観測されたギャップ内電子 状態[図2]は、このマヨラナ粒子を見ているものと考え られる。

既に述べたようにトポロジカル超伝導体の性質はいく

つかのバラエティを持っている。マヨラナ粒子はエッジに だけ現れるとは限らず、磁場をかけたときにできる量子化 磁束の中にも現れることがある。さらに、そのような量子 化磁束中のマヨラナ粒子はnon-Abelianと呼ばれる非可 換統計に従うことがあり、現在、どのような場合に非可換 マヨラナ粒子が現れるのかを明らかにするための理論研 究が精力的になされている。この非可換マヨラナ粒子が2 つあるとき、その粒子を入れ替えた状態はエネルギー的 には縮退しているが波動関数としては直交した別の状態 であり、粒子を入れ替えるたびに別の直交した状態が得 られる(つまり状態は無限に縮退している)。このため、そ のような2つのマヨラナ粒子を空間的に引き離すと、トポ ロジカルに守られた量子情報を作ることができる。この性 質を利用した「トポロジカル量子計算」では、擾乱によっ て量子情報が失われることがないので、実用的な量子コ ンピュータを実現する鍵として注目されている。

筆者らのCu_xBi₂Se₃超伝導体におけるポイントコンタクト分光の実験[9]は、2次元的なマヨラナ粒子を初めて間接的に観測したものであり、これまで仮想的な粒子に 過ぎなかったマヨラナ粒子を実験的に調べる舞台がついに見つかった、といえる。しかしゼロ次元粒子である 非可換マヨラナ粒子の観測は、世界中で競争が行われ ているもののまだ未達成であり、今後トポロジカル超伝 導体の研究が大きく進展していくことが期待できる。

^{****}正確に言うと、粒子の生成演算子の複素共役(つまり消滅 演算子)が生成演算子と同一であること、つまり $\gamma = \gamma^{\dagger}$ である ことがマヨラナ粒子であるための条件である。



図2:時間反転対称性を保った3次元トポロジカル超伝導体の最初の例として確認されたCuxBi2Se3超伝導体。

(a)単結晶の写真。(b)ポイントコンタクト分光法によって観測された微分コンダクタンスのピーク。図中の縦の破線が超伝導ギャップのエネルギーを表す。このデータは、超伝導ギャップ内にギャップレスの表面状態が存在することを示しており、CuxBi2Se3において異方的超伝導状態が実現していることがわかる。この物質は非常に単純な電子構造を持っており、もしこの物質で異方的超伝導状態が実現していればそれはトポロジカル超伝導でしかあり得ないことが理論的に示されているため、この微分コンダクタンスのピークがトポロジカル超伝導体の証拠を与え、マヨラナ粒子を間接的に検出しているものであることが結論できる。

参考文献

- D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs, Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 405-408.
- [2] N. Read and D. Green, Phys. Rev. B 61 (2000) 10267-10297.
- [3] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 146802.
- [4] 日本語の解説として、安藤陽一、固体物理 45
 (2010) 667-680; 永長直人、固体物理 45 (2010)
 681-689.
- [5] J. E. Moore, Nature 464 (2010) 194-198.
- [6] 日本語の解説として、佐藤昌利、固体物理 46 (2011) 399-411.
- [7] F. Wilczek, Nature Physics **5** (2009) 614-618.
- [8] Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, and K. Ishida, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 011009.
- [9] S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada,
 Y. Tanaka, M. Sato, and Y. Ando, Phys. Rev. Lett.
 107 (2011) 217001.

<トピックス 3>

MBE 法による鉄系超伝導薄膜作製とその 薄膜の特徴

MBE growth and characteristics of Fe-based superconducting films

東京農工大学

上田 真也, 高野 志郎, 菅原 弘晃, 内藤 方夫 Department of Applied Physics, Tokyo Univ. of Agriculture and Tech. (TUAT) S. Ueda, S. Takano, H. Sugawara and M. Naito

1. はじめに

超伝導デバイスの基本は、図1(a)に示すように2枚の 超伝導薄膜を数nm程度の厚みの絶縁層で隔てた超 伝導体/絶縁体/超伝導体(SIS)のサンドイッチ構造 である。この構造をもつ超伝導デバイスは、トンネル(積 層)型ジョセフソン接合と呼ばれる。金属系の超伝導エ レクトロニクスの歴史から明らかなように、高性能のエレ クトロニクスの実現には、クリーンな界面を有するトンネ ル型ジョセフソン素子が不可欠である。

しかし従来の銅酸化物高温超伝導体では、未だに再 現性、制御性に優れたトンネル接合は実現していない。 それは、銅酸化物の特筆すべき特徴として銅と酸素の 結合が弱いため、接合界面において酸素が銅酸化物 から容易に離脱するためである。図1(b)のように、異物 質と接する界面では銅酸化物の超伝導性が劣化する。 この界面制御の問題があるために銅酸化物のSIS接合 はデバイス化が難しい。

一方、2008年に東工大グループにより発見された鉄 系高温超伝導体は[1]、銅酸化物のような酸素との弱結 合の問題がなく、界面の問題を含まないと予想される。





さらに、鉄系超伝導体の化学式は、REFeAs(O, F) (RE は希土類元素、通称1111系)やAEFe2As2系超伝導体 (AEはアルカリ土類金属、通称122系)と表され、いず れも結晶構造に特徴的なFeAs層を有する。このFeAs 層は、接合界面においてシリコンやIII-V族化合物半導 体の閃亜鉛鉱構造と優れた格子整合性を有する。この ことは、鉄系超伝導接合のI層(絶縁層)に半導体を用 いることができる点、また鉄系超伝導接合技術が半導体 プロセス技術との整合性を有することから、将来的な多 層構造の集積デバイスの作製の点からも有利である。

2008年以来、いくつかの新しい鉄系超伝導体が発見 されているが、代表的な系は、*RE*FeAs(O, F)、Kまたは Coをドープした*AE*Fe₂As₂、*A*FeAs(*A*=Li, Na)、Fe*Ch* (*Ch*=Te, Se, S)、ブロック層にペロブスカイト型酸化物層 を持つ(Fe₂*Pn*₂)(*AE*_{n+1} M_nO_{3n-1})[M22(*n*+1)*n* (3*n*-1) 相](*Pn*=As, P)または(Fe₂*Pn*₂)(*AE*_{n+2} M_nO_{3n})[M22 (*n*+2)*n*(3*n*)相]の5つである。これらの中で、*RE*FeAs (O, F)は現在最高の T_c (=55 K)を有する。*AE*Fe₂As₂は 比較的高い T_c (=38 K)を有し、かつ、結晶構造が *RE*FeAs(O, F)より単純である。またFe*Ch*は鉄系超伝導 体の中で最も単純な結晶構造を持つ。そのため国内外 の薄膜作製の研究はこの3つの系に集中している。

我々はれまでにMBE成長によりこれら3つの系すべ ての薄膜作製に成功している[2-10]。鉄系超伝導薄膜 作製に関する重要な成果の多くは、これまで日本、EU、 アメリカから報告されているが、高いT。を有するK添加 AEFe₂As₂およびREFeAs(O, F)において、積層型接合 が可能なas-grown薄膜を作製できるのは現時点で日本 のみである。以下に、当グループの特徴である蒸着 レート制御MBE装置、およびこれまでに成膜した REFeAs(O, F)およびAEFe₂As₂系超伝導体の薄膜作製 について記す。

2. 蒸着レート制御分子線エピタキシー(MBE)装置

本研究の特徴は、蒸着レート制御 MBE成長による薄 膜作製である。一般に、鉄系超伝導体などの多元化合 物の薄膜成長には組成制御が不可欠であるが、従来 (市販)のMBE装置には蒸発フラックス比を正確かつ再 現性良く制御する機構がない。組成制御には、蒸発フ ラックスの元素識別可能な原子吸光分光や原子発光分 光を原理とした蒸発レート制御器が有用であることから、 当グループでは MBE 装置に電子衝撃発光分光 (EIES)レート制御装置と原子吸光分光(AAS)レート制 御装置を搭載している(図 2) [11, 12]。この組成制御 MBE法により、従来は蒸着法による薄膜作製が不可能 だった多元機能材料(太陽電池材料 Cu(InGa)Se₂等) の薄膜作製も可能となる。 MBE法は本来、他の成膜法と比較して長所が多い。 超高真空中の清浄雰囲気下での成膜が可能なこと、成 長プロセスが単純であるため低温成長が可能なこと、大 面積化が可能でデバイス作製のコスト低下を実現できる こと、などが挙げられる。組成制御という唯一の弱点が 克服されたことにより、今後、鉄系超伝導体のみならず 次世代の電子・磁気薄膜素子の作製においても主流と なることを期待している。



図2. (a) 電子衝撃発光分光 (EIES)、(b) 原子吸光分光 (AAS)の概念図

3. (AE, K)Fe₂As₂(AE = Sr, Ba)の薄膜成長 [2-5, 8]

 $AEFe_2As_2$ 系の鉄系超伝導体は、 T_c については REFeAs(O, F)よりもやや劣るものの結晶構造がよりシン プルで、アニオンの数も一種類 (As)のみであることから、 薄膜成長および将来のデバイス作製において有利にな ることが期待できる。 $AEFe_2As_2$ の T_c はK添加により30 K を超え、(Ba, K)Fe_2As_2および(Sr, K)Fe_2As_2においてそ れぞれ T_c =38 Kおよび37 Kと $AEFe_2As_2$ 系で最も高い T_c を有する。

国内外の研究を見渡すと、 $AEFe_2As_2 \propto O$ 薄膜作製 に関しては、PLD法およびMBE法でSr(Fe, Co)₂As₂, Ba(Fe, Co)₂As₂薄膜、BaFe₂(As, P)₂薄膜が報告されて いるがが[13-17]、(AE, K)Fe₂As₂薄膜をin situで成膜し ているのは当グループのみである。当グループでは MBE法の特長である低温成長により、低Asフラックス 下で(AE,K)Fe₂As₂薄膜作製に初めて成功し、これまで に(Sr, K)Fe₂As₂で $T_c^{\text{on}}(T_c^{\text{end}})$ =33.5 K(31.0 K), (Ba, K) Fe₂As₂で $T_c^{\text{on}}(T_c^{\text{end}})$ =38.3 K(35.5 K)の超伝導特性を 得ている。

3.1 実験方法

単体原料 Sr, Ba, Fe, AsおよびKの蒸発源である In-Kを、真空チャンバー(~ 10^{-9} Torr)中で抵抗加熱に より蒸発し、*r*-cut Al₂O₃, SrTiO₃(001), LaAlO₃(001), MgO(001)基板上に成膜を行った。Sr, Ba, Feの蒸発 レートはEIESにより、Kの蒸発レートはAASにより制御 した。Asは $\lambda \approx 2000$ Åに強い原子発光線を持つとされて いるが、我々は信号を観測できなかった。この原因は As の蒸気種がほぼ四原子分子As₄になっているためと 考えられた。そこでAsフラックスに関しては、As分圧を イオンゲージと四重極形質量分析計(Q-mass)によりモ ニタリングした。 $p_{As} = 10^{-5} - 10^{-8}$ Torr、基板温度 $T_s = 250-700^{\circ}$ Cの成膜条件で、Feの蒸着レートを~0.5 Å/sと して5分間成膜し1300 Åの薄膜を得た。Kを含む薄膜 は大気中で速やかに劣化するため、真空チャンバーか ら取り出した直後にポリスチレン樹脂を塗布し、酸化を 防いだ。薄膜の表面構造の観察、相同定はRHEED、 XRD測定により行った。

3.2. (AE, K)Fe₂As₂薄膜成長

3.2.1 Sr_{1-x}K_xFe₂As₂ [(Sr, K)122] 薄膜

当グループでは、まずKを含まない母物質SrFe₂As₂ の薄膜成長を試みた。その結果、SrFe₂As₂の成長は比 較的容易であり、 $T_s = 480-650^{\circ}$ C、 $p_{As} = 10^{-5}-10^{-6}$ Torr の広い範囲において、r-cut Al₂O₃上に良質なc 軸配向 エピタキシャル薄膜を得た。薄膜のXRDおよび ρ -T 測 定結果を図 3.1に示す。 $T_s = 370^{\circ}$ Cでは、XRDパターン からはSrFe₂As₂生成が確認できないものの、200 K付近 にSrFe₂As₂の磁気相転移に由来する特徴的なキンクが 観測されることから、370°Cにおいても相が生成すること を示唆している。 $T_s > 700^{\circ}$ Cでは、Al₂O₃基板とFeの反 応により膜が劣化する。従って薄膜成長の最適条件は、 $T_s = 550-650^{\circ}$ C、また $p_{As} = 2-4 \times 10^{-6}$ Torrであった。

続いてK添加 SrFe₂As₂の合成を試みた。Kは高い平 衡蒸気圧を有し、 $T_s > 350$ °Cで直ちに基板から再蒸発 するため、母物質と同じ条件では成膜できない。Kを薄 膜に取り込むには、成長温度の低下が不可欠であり、さ らに同時にAs分圧を下げることが必須である。試行錯 誤の結果、成長温度を300-350°C付近まで大幅に下げ、 同時に p_{As} =4×10⁻⁷ Torrに下げることでc軸配向の Sr_{1-x}K_xFe₂As₂薄膜を得ることに成功した。得られた薄膜 のXRDおよび電気抵抗率測定結果を図3.2に示す。成 長条件を T_s =340°C、 p_{As} =5×10⁻⁷ Torrのときに、ほぼ最 適ドープ量に近いx=0.45で T_c °n(T_c ^{end})=33.5 K(31.0 K) を示した。さらにAs圧を下げて p_{As} =1×10⁻⁸ Torrとする と、Sr_{1-x}K_xFe₂As₂相は形成されなかった。



図3.1 *r*-cut Al₂O₃基板上に得られたSrFe₂As₂薄膜の(a) XRDおよび(b) *ρ*-7測定結果。成膜時のAs分圧はp_{As} = 5 × 10⁻⁵ Torr

以上のことから、(AE, K)Fe₂As₂系薄膜成長について 次のことが考察される。従来の銅酸化物高温超伝導体 の薄膜成長では、分解曲線直上の酸素分圧で成膜す ると表面マイグレーションが高まり結晶性が向上すると いうBormann-Hammond則が知られている。鉄系超伝 導体の薄膜成長においても、酸素分圧をAs分圧に読 み換えれば同じ法則が成り立っているように見える。す なわち、低 As 圧の効果として表面マイグレーションが高 まと考えられる。また、(Sr, K)Fe2As2が低温かつ低As圧 で生成したのと対照的に、母物質SrFe2As2は同じ条件 では生成しない。これは(Sr, K)Fe2As2の薄膜成長にお いてはKが成長を促進する役割を果たしていることを示 唆している。T。≈300℃において、平衡蒸気圧の高いK が薄膜表面への吸着、脱理を頻繁に繰り返すことで、 表面マイグレーションが高まると考えられる。以上より (AE, K)Fe₂As₂の低温成長には、低いAs 圧及びKの吸 着、脱理による表面マイグレーションの向上が重要な ファクターである。



図3.2 *r*-cut Al₂O₃基板上に得られたSr_{0.55}K_{0.45}Fe₂As₂およ びBa_{0.65}K_{0.35}Fe₂As₂ 薄膜の(a) XRDおよび(b) *ρ*-T測 定結果。成膜条件は、Sr系ではT_s = 340°C, *p*_{As} = 5 × 10⁻⁷ Torr, Ba系ではT_s = 340°C, *p*_{As} = 3 × 10⁻⁸ Torr

3.2.2 Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ [(Ba, K)122] の薄膜

(Ba, K)Fe₂As₂薄膜は、(Sr, K)Fe₂As₂とAs 分圧以外 はほぼ同じ条件で得られた。最適成長温度は、母物質 BaFe₂As₂薄膜ではT_s=550-650°C、K添加(Ba, K)Fe₂As₂ 薄膜ではT_s = 315-340°Cであった。一方、(Ba, K)Fe₂As₂ 薄膜成長に適したAs分圧は、(Sr, K)Fe2As2と比べ約一 桁低い。この成長条件を図3.3に示した。Sr系とBa系で 薄膜成長に必要なAs分圧が異なる理由は、より大きな Ba²⁺イオンの方が大きなAs³⁻イオンを安定化するため格 子エネルギーが高く、(Ba, K)Fe,As,の方がAsの解離圧 が低くなると考えられる。図3.2に、最適条件で作製した (Ba, K)122 薄膜のXRDパターンおよび電気抵抗率の 温度依存性を示した。基板温度 340°C, pAs = 3×10-8 Torrの成長条件でほぼ最適ドープ量x=0.35が得られ、 T_c^{on}(T_c^{end}) = 38.3 K(35.5 K)の鋭い超伝導転移を示して いる。RHEEDパターンからも良好な結晶性と表面平坦 性を有することが分かった。



図3.3 (Sr, K)Fe₂As₂および(Ba, K)Fe₂As₂の成長条件



図3.4 Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ 薄膜のc軸長のKドープ量x依 存性

続いて、 $Ba_{1,x}K_xFe_2As_2$ 薄膜のKドープ量xを0から1.0 に系統的に変えて超伝導特性を調べた。図3.4に示し たように、Kを増やすに従ってc軸長は12.94–13.77 Åま で系統的に伸びた。格子定数の異なるr-cut Al₂O₃, SrTiO₃, LaAlO₃, MgOの4種類の基板上の薄膜の格子 定数には系統的な違いは見られなかった。ただし、用い る基板によって薄膜の化学的安定性に違いが見られ r-cut Al₂O₃およびMgOを用いた場合に、薄膜が大気中 でより安定であることが分かった。

図3.5は(Sr, K)Fe₂As₂および(Ba, K)Fe₂As₂薄膜の各 Kドープ量による T_c^{on} および T_c^{on} の変化である。 Ba_{1-x}K_xFe₂As₂では置換量 $x \approx 0.3$ で T_c^{on} の最高値~39 K が得られる。一方、Sr_{1-x}K_xFe₂As₂では置換量 $x \approx 0.4$ で T_c^{on} の最高値33.5 Kが得られている。最高の T_c を与える 置換量がBa_{1-x}K_xFe₂As₂とSr_{1-x}K_xFe₂As₂で異なることは、 以下のように理解される。鉄ニクタイドの多くが $T_N = 100$ ~200 K で磁性(スピン密度波(SDW))を伴う構造相転 移を示す。Ba系とSr系の両系の電子相図を比較すると、 BaFe₂As₂ は $T_N = 150$ K、SrFe₂As₂ では SDW 相領域が Ba_{1-x}K_xFe₂As₂よりも拡がっている。SDW と超伝導は競 合するため、Sr_{1-x}K_xFe₂As₂においてSDWを抑制して超 伝導を発現するにはより大きなxが必要となる。



図3.5 (Sr, K)Fe₂As₂および(Ba, K)Fe₂As₂薄膜のT_c^{on}、 T_c^{end}のKドープ量依存性

4. SmFeAs(O, F)の薄膜成長 [5-10]

REFeAs(O, F)、REFeAsO_{1-y}は鉄系超伝導体の中で 最も高い超伝導転移温度を持つ。なかでも、RE = Nd、 Smでは $T_c \sim 55$ Kに達する。この系の薄膜は最初に名古 屋大学の生田グループから報告され、MBE成長によっ て高い $T_c^{onset} = 56$ Kを有するNdFeAs(O, F)薄膜がCaF₂ 上に得られている[18-21]。彼らはまた、成長後半に薄 膜表面に生成するNdOF層が膜内へのフッ素供給およ び膜内からのフッ素抜け抑制の2つ重要な役割を果た していることを明らかにした。我々も、母物質 SmFeAsO を成膜後、その上にさらに SmF₃を堆積してF 拡散する 同様の手法により、超伝導 SmFeAs(O, F)薄膜を得てい る[5-7, 9]。

一方、上記のREFeAs(O, F)薄膜は単膜を用いた応 用には適用可能であるが、REOF層が表面に生成する ため積層応用には適さない。そこで我々は、SmとSmF3 の蒸着比を精密制御しながら共蒸着し、REOFを含まな いSmFeAs(O, F)薄膜にも成功した[8, 10]。しかし、基板 として、CaF2バッファー/LAOという特殊な基板を用い なくてはならないこと、単相が得られる成長条件が非常 に狭く再現性が十分に得られないといった問題が残さ れている。

以下に(i) ポストアニール法によるSmFeAs(O, F)薄膜 作製(SmF₃キャップレイヤーからのF拡散による SmFeAs(O, F)薄膜作製)および、(ii)薄膜表面に不純 物相を含まないSmFeAs(O, F)の1ステップ成長につい て記す。

4.1 実験方法

(i) ポストアニール法によるSmFeAs(O, F)薄膜作製で は、 O_2 ガスを0.1-0.5 sccm で基板に吹き付けながら (チャンバー内の $p_{02} = 10^{-5}-10^{-7}$ Torr)、単体原料 Sm, FeおよびAsを $T_s = 650-670^{\circ}$ Cで共蒸着し、酸化物基板 (LaAlO₃(001), YalO₃(001), MgO(001), *r*-cut Al₂O₃, *etc*)およびフッ化物基板(CaF₂(001), SrF₂(001), BaF₂(001))上にまず母物質 SmFeAsOを得た。薄膜の 膜厚は、Feの蒸着レートを0.25-0.5 Å/sとして5-10分間 成膜し1000-1700 Åとした。その後 SmFeAsO上に $T_s = 650^{\circ}$ CでSmF₃を200-300 Å蒸着し、30 minポストアニー ルすることでSmF₃からFを薄膜中に拡散し、 SmFeAs(O, F)薄膜を得た。各元素およびSmF₃の蒸発 レートはEIESおよび水晶振動子を用いて精密に制御し た。

(ii) SmFeAs(O, F)の1ステップ成長では、単体原料Sm, Fe, Asに加えSmF₃を酸素雰囲気下で共蒸着した。 SmF₃: Smの蒸着比は0.1–0.15:0.85–0.90とした。基板 には、通常のLaAlO₃(001), CaF₂(001)の他に、本手法 において特に重要なCaF₂バッファーLAO 基板 (T_s = 650°CにおいてLaAlO₃基板上にCaF₂をバッファー層と して500-1000 Å堆積したもの)も用いた。

4.2 SmFeAs(O, F) [Sm1111] 薄膜成長

4.2.1 SmF₃キャップレイヤーから母物質 SmFeAsO への F 拡散

以下には、高い T_c が得られるフッ化物基板上の薄膜 について述べる。まず母物質 SmFeAsOの薄膜成長で は、 O_2 量の精密制御が極めて重要となった。図 4.1(a) は、CaF₂上に成膜した母物質 SmFeAsO について、 (003)のX線回折ピーク強度を成膜中の O_2 流量を横軸 にとってプロットしたものである。2通りの成膜速度(三角 でプロットされたデータは丸のプロットの倍の速度)につ いて示しており、高い成長レートで成膜した膜は O_2 流 量 0.30 sccmで、低い成長レートでは0.19 sccmのときに のみピーク強度が高い。いずれも O_2 ガス流量がわずか ±0.02 sccmずれるだけでピーク強度は急激に低下する。 SmFeAsO の成長条件は、As 圧に関しては $p_{As} = 1 \times$ 10^{-6} -1×10⁻⁷ Torr と一桁以上の範囲で成長するが、 O_2 に関してはピンポイントである。

続いて CaF_2 上の薄膜の特徴として、格子定数が SmFeAsOバルクで報告されている値 (a = 3.935 Å, $c \approx$ 8.50 Å [22])と比べ、c軸長が長くa軸長は短い。図 4.1(b)は薄膜のc軸長のO₂流量依存性を示しているが、 得られた薄膜のc軸は8.53–8.684 Åとすべてバルクより も長い。最も長いc軸長は8.684 Åで、そのときのa軸長 は3.868 Åであった。このa軸長の値は、 $CaF_2(001)$ 基板



図4.1 CaF₂上に成膜した母物質SmFeAsOの(a) (003)のX線回折ピーク強度および(b) c軸長 の成膜時のO₂流量依存性

表面の原子間距離(3.863 Å)と近いことから基板からの 圧縮歪みによるものであることが示唆される。図 4.1(b) からは低い成長レートで成膜した薄膜のc軸長はやや 短いことが見て取れるが、これは基板からのFドープに よって格子定数が縮むことによる。

図4.2は、SmF₃キャップレイヤーからFを拡散したフッ 化物基板(CaF₂(001), SrF₂(001), BaF₂(001))上の SmFeAsO_{1-x}F_x薄膜のXRDパターンと ρ -T曲線である。 いずれの薄膜もF拡散前の母物質はXRDパターンから はほぼ単相であったが、F拡散後はSmOF, SmO_{0.7}F_{1.6}の 不純物が存在していることがわかる。F拡散によりc軸長 は、0.02–0.06 Å短縮しており、これはx = 0.075-0.225に 相当する。これらの薄膜の T_c は高く、CaF₂, SrF₂, BaF₂上 それぞれ T_c ^{on} (T_c ^{end}) = 57.8 K (56.4 K), 56.7 K (54.2 K), 55.3 K (41.8 K)であった。CaF₂およびSrF₂上の薄膜の T_c はバルクで得られている最高値よりも高い。BaF₂では不 純物が多くやや低い T_c となっている。

図 4.3は、SmFeAs(O, F)薄膜の $T_c \&c_0$ に対してプロットしたものである。フッ化物基板上のSmFeAs(O, F)薄膜 の c_0 はすべてSmFeAsO_{0.8}F_{0.2}組成のバルク試料の c_0 (= 8.484 Å[22])よりも長い。全体的な傾向として、 c_0 が短い 薄膜ほど T_c は高く、逆に c_0 が長いほど T_c は低く ΔT_c も大 きくなっている。つまり、基板からの歪みの大きい薄膜 は T_c が低い。



図4.2 SmF₃キャップレイヤーからF 拡散を行った フッ化物基板 (CaF₂(001), SrF₂(001), BaF₂(001)) 上のSmFeAsO_{1-x}F_x薄膜の(a) XRD および(b) ρ-T測定結果

鉄系超伝導体では、As-Fe-Asの角度が109.47°となり FeAs₄が正四面体になるときに高い T_c が得られることが 知られており、*RE*FeAs(O, F)において*RE* = Sm, Ndのと きにはほぼ109.47°となっている。これが基板からのエピ タキシャル歪みによって109.47°からずれると T_c が低下 すると考えられる。

X線回折ピーク強度が弱く、結晶性のあまり良くない 母物質 SmFeAsO薄膜では、基板からの圧縮歪みの効 果が小さいことから T_cが高くなる傾向が見られた。逆に 結晶性の良い母物質薄膜では、基板からの圧縮歪み が大きく、またフッ化物基板からのFドープ量も少ないこ とから長いc軸長を有する傾向があった。このような薄膜 は、F拡散によりSmFeAs(O, F)となった後もc軸長が長く T_cは低い。

これらの薄膜の磁化特性を示す。電気抵抗率測定で $T_c^{\text{on}}(T_c^{\text{end}}) = 57.1 \text{ K}(55.3 \text{ K})$ が得られた薄膜は、磁化の 温度依存性からも $T_c^{\text{on}} = 54.1 \text{ K}$ が得られ、均質性の高い 薄膜であることが示唆された。



図4.3 CaF₂, SrF₂, BaF₂上のSmFeAs(O, F) 薄膜のT_c をc₀に対しプロットした図。プロットの白抜 きのマークはT_c^{on}を示し、塗りつぶしたマー クはT_c^{end}を示す。





また、その J_c は、 1.8×10^6 A/cm²(5 K, in self-field), 8.8×10⁵ A/cm²(20 K, in self-field), 2.3×10^5 A/cm²(40 K, in self-field)と高く、SmFeAs(O,F)単結晶のデータと も良い一致を示した[23]。また J_c の磁場依存性も小さく、 20 K, 5Tにおいても高い値 1.3×10^5 A/cm²を有すること が分かった。

4.2.2 SmFeAs(O, F)の 1 ステップ成膜

SmFeAs(O, F)薄膜の1ステップ成膜では、基板の選 択が非常に重要となった。これまでに単相に近い薄膜 はCaF₂バッファーLAO基板上にのみ得られている。図 4.5は、CaF₂バッファーLAO基板上、通常用いられる酸 化物基板であるLaAlO₃上およびCaF₂基板上に、 SmFeAs(O, F)を成膜したものである。LaAlO₃基板や CaF₂基板上では微量のSmFeAs(O, F)相が確認できる もののSmAs, SmOFが主な不純物として現れる。一方、 CaF2バッファーLAO基板上では、SmAsの生成が著しく 抑制され、SmFeAs(O,F)の単相薄膜が得られた。SmAs の生成を抑制する機構はまだわかっていない。

ただ、この基板を用いてもSmFeAs(O, F)の単相薄膜 を得ることは容易ではない。Feの蒸着レートを最適値か ら±10%変えるとFeAs, SmAs, SmOFなどの不純物が生 成し、またO₂の供給レートを±0.05 sccm変えるだけでも 不純物が生成する。母物質 SmFeAsOの成長ではO₂の 供給レートが重要であることを述べたが、SmFeAs(O, F) の1ステップ成長では、単相を得る条件がさらに厳しい。



図4.5 CaF₂バッファーLAO基板、LaAIO₃基板、CaF₂基板 上に1ステップ成膜したSmFeAs(O, F)のXRDパ ターン



図4.6 CaF₂バッファーLAO基板上に1ステップ成膜した SmFeAs(O,F)のρ-T測定結果

最後にCaF₂/LAO 基板上に得られたSmFeAs(O, F) 薄膜の電気抵抗率の温度依存性を図4.6に示す。F ドープ量が最適値よりもやや少ないため、post-anneal 膜 の最高値 $T_c^{on} \sim 57.8$ Kよりは低いものの $T_c^{on} = 51.0$ Kに おいて鋭い超伝導転移を示している。

5. まとめ

本研究では、 $Ba_{1,x}K_xFe_2As_2$ 薄膜、 $Sr_{1,x}K_xFe_2As_2$ 薄膜、 さらに現在鉄系超伝導体で最高の T_c を有する SmFeAs(O, F) 薄膜のMBE成長を行った。また、 SmFeAs(O, F)超伝導薄膜上に余計なフッ素化合物が 析出・堆積しないクリーンな表面を持つSmFeAs(O, F) 薄膜成長に成功している。

鉄系超伝導薄膜について本研究で得られた知見とし て以下が挙げられる。(1)(AE, K)Fe₂As₂の薄膜作製に は低温成長が必須であり、結晶成長には低 As 圧及び Kの出入りによるマイグレーションの向上が重要なファク ターであることがわかった。300℃付近の低温成長は、 これまで鉄系超伝導体の薄膜成長が行われてきた温度 に比べて格段に低く、今後も同様な方法によって他の 物質でも低温成長が可能であればエレクトロニクス応用 には大きな進展となりうる。(2)(Ba, K)Fe₂As₂薄膜成長 では、格子定数や超伝導特性の基板依存性は小さい。 当初、鉄系超伝導体は格子の歪みが超伝導特性に大 きく影響するため、格子定数が近い単結晶基板を用い ないと優れた超伝導特性を有する薄膜作製が難しいこ とも予想されたが、(Ba, K)Fe2As2のa軸長が3.917 Åで あるのに対してMgO基板のa軸長が4.20 Åと大きくずれ ているにも関わらず良質な単結晶薄膜が得られたことか ら、基板との格子整合がそれほど重要ではないことが示 唆された。これは今後、(AE, K)Fe₂As₂鉄系超伝導体を 用いた積層型接合構造を作製するにあたり、バリア材と して格子定数の近いIII-V族半導体のみならず、様々な 絶縁体をバリア材として使える可能性を示唆する。一方、 SmFeAs(O, F)に関しては、(3) 薄膜成長は540°C以上 の高温成長が望ましく、高温でも被覆性の良いバリア材 が今後見つかるかどうかが接合作製の課題となる。また (4) SmFeAs(O, F)薄膜の超伝導特性は基板依存性が 大きいことが分かった。従って、バリア材の上に再び良 質なSmFeAs(O, F)薄膜を成長できるようなバリア材を見 つけることが重要である。

6. 謝辞

本研究はNEDO若手研究グラントより支援を受けて 行われたものである。本研究を行うにあたり、試行錯誤 を厭わずに辛抱強く薄膜成長を続けてくれた本学卒業 の我妻伸哉氏、山岸健氏、武田宗一郎氏、磁化測定を して頂いた山本明保氏(東京大)、またKソースのIn-K 合金を提供して頂いた光田暁弘氏(九州大)にお礼申 し上げます。

参考文献

- Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and
 H. Hosono: J. Am. Chem. Soc. 130 (2008) 3296.
- [2] S. Agatsuma, T. Yamagishi, S. Takeda, M. Naito: *Physica C* **470** (2010) 1468.
- S. Takeda, S. Ueda, T. Yamagishi, S. Agatsuma,
 S. Takano, A. Mitsuda, and M. Naito: *Applied Physics Express* 3 (2010) 093101.
- T. Yamagishi, S. Ueda, S. Takeda, S. Takano,
 A. Mitsuda, and M. Naito: *Physica C* 471 (2011) 1177.
- S. Ueda, T. Yamagishi, S. Takeda, S. Takano,
 A. Mitsuda, and M. Naito: *Physica C* 471 (2011) 1167.
- [6] S. Ueda, S. Takeda, S. Takano, A. Yamamoto, and M. Naito: *Appl. Phys. Lett.* **99** (2012) 232505.
- S. Takeda, S. Ueda, S. Takano, A. Yamamoto, and M. Naito: *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 035007.
- [8] S. Ueda, S. Takeda, S. Takano, A. Mitsuda, and
 M. Naito: *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (2012) 010103.
- [9] S. Takano, S. Ueda, S. Takeda, H. Sugawara, and M. Naito: *Physica C* 475 (2012) 10.
- [10] S. Ueda, S. Takeda, S. Takano, and M. Naito: *Appl. Phys. Express.* 5 (2012) 053101.
- [11] M. Naito, H. Sato, and H. Yamamoto: *Physica C* 293 (1997) 36.
- [12] H. Yamamoto, K. Aoki, A. Tsukada, and M. Naito: *Physica C* 412 (2004) 192.
- [13] H. Hiramatsu, T. Katase, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono: *Appl. Phys. Express* 1 (2008) 101702.
- K. Iida, J. Haenisch, R. Huehne, F. Kurth,
 M. Kidszun, S. Haindl, J. Werner, L. Schultz, and
 B. Holzapfel: *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 192501.
- [15] E. Choi, S.-G. Jung, N. H. Lee, Y.-S. Kwon,
 W. N. Kang, D. H. Kim, M.-H. Jung, S.-I. Lee,
 and L. Sun: *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 062507.
- [16] S. Lee, J. Jiang, Y. Zhang, C. W. Bark, J. D. Weiss,
 C. Tarantini, C. T. Nelson, H. W. Jang,
 C. M. Folkman, S. H. Baek, A. Polyanskii,
 D. Abraimov, A. Yamamoto, J. W. Park, X. Q. Pan,
 E. E. Hellstrom, D. C. Larbalestier, and
 - C. B. Eom: Nat. Mater. 9 (2010) 397.
- [17] N. H. Lee, S. -G. Jung, D. H. Kim, andW. N. Kang: *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 202505.

- T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, R. Watanabe,
 M. Tabuchi, T. Ujihara, K.Takenaka, Y. Takeda,
 and H. Ikuta: *Appl. Phys. Express* 2 (2009)
 093002.
- [19] H. Ikuta, T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, K. Takenaka, and Y. Takeda: presented at ISS2010, program No. FD-1-INV.
- [20] T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, K. Takenaka, Y. Takeda, and H. Ikuta: *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 042509.
- [21] T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, Y. Takeda, and H. Ikuta: *Appl. Phys. Express* 4 (2011) 083102.
- [22] J. Yang, Z.-A. Ren, G.-C Che, W. Lu, X.-L. Shen, Z.-C. Li, W. Yi, X.-L. Dong, L.-L. Sun, F. Zhou, and Z.-X. Zhao: *Supercond. Sci. Technol.* 22, 025004 (2009).
- P. J. W. Moll, R. Puzniak, F. Balakirev,
 K. Rogacki, J. Karpinski, N. D. Zhigadlo and
 Batlogg, *Nature Materials* 9, 628 (2010).

<会議報告 1>

第 78 回ワークショップ「再生可能エネルギー 導入へ向けた超伝導・低温技術」

Report on the 78th Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics for the use of renewable energy

> 日立製作所 日立研究所 和久田 毅 Hitachi Ltd., Hitachi Research Laboratory T. Wakuda

2011年3月11日の震災をまたいでほぼ一年ぶりに開催されたワークショップで、3月13日、東京大学武田ホールにて開催された。参加者は講師5名を含め86名であった。ワークショップ前半では、風力発電、電力貯蔵技術といった超伝導・低温技術から離れた分野の講演がなされ、後半では超伝導電力応用機器、冷却システム、超伝導ケーブルといった超伝導・低温技術の最新の状況が報告された。また、最後に総合討論が実施された。前半の講演は、超伝導・低温技術分野に偏りがちな超伝導サイドの研究者にとっては、競合もしくは協調すべき既存技術の全体像を把握するのに絶好の講演であった。また、後半では最新の超伝導・低温技術動向が紹介され、将来の超伝導機器普及の可能性を感じさせるものであった。以下、講演内容についてかいつまんで紹介する。

日本風力エネルギー学会会長の勝呂幸男氏より「風 力発電の現状と将来展望」と題して、風力発電の現状 から風力発電技術そして超伝導に対する期待について の講演があった。風力発電の設置件数の上位は中国、 米国およびドイツであり、風力発電機市場シェアにおい ても近年中国メーカーの台頭が目立っている。風車の 単機容量の大容量化が進んでおり、現在のところは 3.5-4 MW機が主流であるが、海外では6MW機が市場 投入されはじめている。国内メーカーでは三菱重工の 2.4 MW機が現時点で最大、7 MW機が開発中である。 強風や落雷等による故障以外では、機械故障で最も多 いのが増速用ギアの破損。発電機と車軸を直結するダ イレクトドライブが大容量化に伴い開発されている。超 伝導に対する期待としては、発電機の小型化・軽量化 であり、また、風車の平均出力は強風域でも35-50%出 力であることから、部分負荷時の効率の向上が期待され るとのことであった。風力発電と水素の連携についても 触れられ、パタゴニアの風力を利用して水の電気分解 で水素を製造すれば、日本の電力の8倍、世界の自動

車の2倍の燃料を供給できるとのことであった。

産業技術総合研究所の大和田野芳郎氏より「電力貯 蔵技術の現状と将来」との題で現在開発が進められて いる様々な電力貯蔵方法が紹介された。再生可能エネ ルギー導入による電力系統の変動抑制に関しては、基 本的には系統の連携強化により地域間で電力を融通 することによって変動抑制を図り、用途にあわせ適材適 所に最小限の電力貯蔵装置を導入するのが良いとのこ とであった。負荷平準化用途としてpumped storage(揚 水発電)が紹介された。国内34 GWの水力発電総量に 対し揚水発電は24 GWで十分に普及、水力発電の良 好なサイトは既に開発済み。今後は海水や地下を利用 することになるだろうとのこと。また、NaS電池に期待をし ていたが昨年に火災事故が発生しており今後が懸念さ れるとのことであった。

東京大学大崎博之教授より「超伝導応用機器開発の 現状と将来」と題して、電力向けの超伝導応用機器とし て、風力発電機、SMES、限流器、ケーブルなどについ て説明がなされた。大型風力発電機は6 MW機が市場 投入されようとしており、ダイレクトドライブ、永久磁石を つかった同期発電機が主流になるように見える。超伝導 発電機は、大容量、小型軽量、高出力密度、低速・大ト ルクといった特徴を持ち、ナセル部の重量低減が期待 され、様々な形態の10 MW級の発電機が検討されてい る。超伝導発電機をはじめ、SMES、限流器といった超 伝導応用を、再生可能エネルギーと組み合わせるため には、単に超伝導による高性能化、新機能の実現だけ でなく、既存技術に対しコストを含めたメリットがでるよう なバランスのとれたシステム設計と効果の明確化・定量 化(経済性メリット)が必要であるとのことであった。

前川製作所の池内正充氏より「超伝導電力機器用冷 却システムの現状と今後」と題して、超伝導電力応用向 けの冷却技術に関する講演があった。冷凍サイクルとし ては大きく2つの方式、蓄冷器型と熱交換器型があり、 前者としてはスターリング、GM冷凍機、後者としてはブ レイトン冷凍機がある。蓄冷器型にくらべると熱交換器 型の方が大容量化に有利のため、ターボブレイトン冷凍 機開発が進んでいるとのことであった。また、冷凍機本 体の性能向上に加え、システムとしての信頼性や運転 方法を改善していくことが必要であり、ひとたび納入され れば数十年は運転することを踏まえ運転実績を積み上 げていくような機会、プロジェクトがほしいとのことであっ た。

古河電工の向山晋一氏により「再生可能エネルギー における超伝導伝送システム」という題目で、超伝導 ケーブルの開発状況に加え、韓国、米国、欧州での ケーブル開発プロジェクトが紹介された。海外の超伝導 ケーブル開発が再生可能エネルギーに対応したプロ ジェクトであるのに対し、国内でもケーブル実証プロジェ クトが走っているもののそれに対応したものはない。超 伝導ケーブルの開発は着実に進んでいるが、交流損失 や断熱管などで課題が残っているとのこと。冷凍機間隔 は陸上ではせいぜい1 km。ケーブル運搬の制約がある とのこと。海底なら冷却流路を大きくできることもあり100 kmくらいはいけるとのこと。区間長が短いと長距離送電 する場合には接続箇所がふえ現実的ではなくなるため、 陸上と海底ケーブルで常伝導ケーブルと超伝導ケーブ ルの使い分けがされるだろうと見ているとのことであっ た。

総合討論では、国内には再生可能エネルギーと超伝 導を連携させたプロジェクトがないことを認識し、また、も はやHTS線材の性能向上や価格が下がることを待つの ではなく、現状の線材を受け入れ既存技術に対し性能 のみならずコストでも勝てるようなシステム設計を行うこと が必要という共通認識に達した。

<会議報告 2>

超伝導科学技術研究会 第 38 回シンポジウム会議報告

Report on the 38th FSST Symposium

古河電気工業(株) 木村 昭夫 Furukawa Electric Co., Ltd.. A. Kimura

超伝導科学技術研究会第38回シンポジウムが、4月 17日(火)にタワーホール船堀の小ホールで開催された。 参加者は105名であった。

午前には2件の基調講演が あり、1件目はMITの岩佐先生 の超伝導科学技術賞特別賞 の受賞記念講演でもある。 "Past and Future of Magnet Technology"と題して、超伝導 現象発見から101年目を迎え てのマグネットテクノロジーの歴 史を概観し、期待する将来像に



関してのご講演であった。特に印象に残った文章を示す。 "Our urgent task is to enable more superconducting devices *pay tax* rather than these devices kept alive by tax money."

2件目は物質・材料研究機構の戸叶氏から、「マグ ネット用線材-開発の経緯と展望」と題して40年間のご自 身の経験を踏まえた立場から過去から現在までの線材 開発の経緯を紹介され今後を展望するというご講演が あった。ここではとくに金属系であるNb3Snを代表とする A15型線材について紹介する。1961年から1972年にか けてテープ形状線材開発をベースにして15 T級の超伝 導マグネットが市販されたが、テープ導体の宿命である 不安定性が障害となった。1970年の太刀川によるブロ ンズ法の発明とともに丸線や平角形状のNb3Sn線が開 発され臨界電流密度の向上が進展して核融合等の応 用への道が開けた。さらにNb₃SnやNb₃AlなどのA15型 の線材化研究が進められている。また2001年には MgB2線材が発見され、Bi2223やYBCOの高温超伝導 材料よりも臨界温度 T。は38 Kと低いが異方性が小さく コヒーレンス長が長く、丸線の開発が進められている。 今後は、高磁場特性の改善やPIT法以外の製造プロセ スの開発が必要だろう、とのことである。

午後は、高エネルギー加速器研究機構の荻津氏か らは、「加速器における超伝導マグネット」と題して、まず は加速器用超伝導磁石の歴史についてお話があった。 また、超伝導化することにより、高磁場化に伴った加速 器の小型化と1/10以下の省電力化が可能であることが メリットとなる。また、ヨーロッパにおける世界最大の超伝 導粒子加速器 LHC で起きた故障の原因が導体の接続 部の半田施工不良であり、その後順調に復旧し、現在 では目標エネルギーの50%で運転を続けていることに ついての紹介があった。さらにご自身の超伝導科学技 術賞の受賞対象になったJ-PARCニュートリノビームライ ンにおける新型マグネットについては、場所の制約によ りビームラインを90度に曲げることが必要になり、かつ予 算と工期の制約から2極磁石と4極磁石を合成した磁石 の設計・製作をし、要求性能を実現したとのことで、筆者 にとっては、興味あるお話を聞くことができた。

次に、日本原子力研究機構の小泉氏からは「ITERに おける超伝導マグネット」と大型プロジェクトに関わるマ グネット開発についてのお話を伺った。順調に資材調 達が進んでいる、との印象を持った。とくにブロンズ法 Nb₃Sn線材の臨界電流密度が当初の計画の2倍近くま で上昇したことについて、本プロジェクトの重大な成果 であると感じた。

信州大学の干川氏から「CZ法 Si結晶成長における 磁界印加効果と研究開発の経緯」について、ご講演い ただいた。今では、300 mm以上の直径を持つシリコン 単結晶の製造に必要不可欠となった磁界印加装置に ついて、熱対流の抑制以外に結晶中の酸素濃度の制 御も有効、必須技術であるとのことであった。また超伝 導磁石の価格については、現在の1/3の価格を希望する、と要望があった。

理化学研究所の前田氏からは「高温超伝導を用いた NMRの開発」について高温超電導線の課題、解決法 が示された。NMRの開発で重要な点は高磁場の発生、 永久電流モードを使った磁場安定性等があげられる。 高磁場の発生には、臨界磁場の高い材料、すなわち Bi2223線材やYBCO線材を使うことが必須である。磁 場安定性については、これらの高温超伝導線では超伝 導接続ができないため、「磁場周波数ロック・システム」 でフィードバック制御した電源を使うことで、電源の不安 定性から解放された、とのことである。

最後の講演者として、物質・材料研究機構の和田氏 からは「MRIと超伝導マグネット」について現状と今後の MRI用超伝導マグネットの方向性についてのご講演が あった。超伝導現象は、電気抵抗がゼロになるという物 性を持ち、誰もが社会の変革を夢見てしまうが、現実に は超伝導化が社会の隅々まで広がるにはほど遠い。そ の中でMRIが社会的課題解決のために大きく貢献する だろう。超伝導の有用性について新たな工夫により証明 できれば、超伝導研究開発の継続的な発展をもたらし、 さらに他の社会的課題の解決あるいは新産業の創成へ とつながるだろう、とのことであった。

<会議報告 3>

応用物理学会 田中先生追悼シンポジウム 報告

Report on the memorial symposium of Prof. Shoji Tanaka at JSAP 2012 Spring Meeting

> 超電導工学研究所 田辺 圭一 Superconductivity Research Laboratory, ISTEC K. Tanabe

高温超伝導の研究分野を切り開き、(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 超伝導材料とその応用技術の研究開発を牽引された田 中昭二先生(東京大学名誉教授)が昨年11月11日に急 逝された。また、高温超伝導体の臨界温度が77 Kを超 えたのが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、応用 物理学関連連合講演会(早大)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;田中研究室OB)が、東京大学在職、在学時代 を振り返り、高温超伝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 導による高温超伝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年に田中先生に要請されて工業 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、酸化物超伝導体BaPb_{1-x}Bi_xO₃ の研究を行っていたが、これはBCSの壁への反抗で あった。BednorzとMüller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伝導物質(USO) 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、12月にはついに結晶構 造を突き止めた。これら、高温超伝導体発見の経緯が 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、米国のPhysical Review Letters 誌の特集(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 したことや、米国議会の要請により13ヶ所で講演を行っ たという苦労話もされた。高温超伝導体の実用化に関し ては、20年の技術開発で長尺線材ができあがり、舶用 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年にかけて大田中グルー プの北澤先生、内田先生の研究室に在籍し、ちょうど高 温超伝導体が発見された当時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、高温超伝導体で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Fröhrichの機構 に基づく室温超伝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、その後1995年に先生 からの要請でNTTからSRLに移ることになった経緯に ついて紹介した。1998年からの筆者は、薄膜、デバイス 分野をSRLにおいて担当することになった。当時、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、科技庁に働きかけられ、まず ニオブ系低温超伝導 SFQ回路の基盤研究プロジェクト を立ち上げ、次に自らがリーダを務めたNEDO「超電導 応用基盤技術開発」プロジェクトにおいて、高温超伝導 SFO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、先生は、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も尽力 された。このプログラムの中心は半導体デバイス開発で あったが、SFO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、国のサポートが継続された。田 中先生の夢は超伝導コンピュータの実現であった思う 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伝導 LSIの実現という非常に高い ものであった。実際、銅酸化物ではLSIの実現はできな かったが、プロジェクトで開発したジョセフソン接合作製 技術は、高性能の高温超伝導 SQUIDの開発に繋がり、 金属資源探査機やバイオ・非破壊センシング装置の実 現へと花開きつつある。また、ニオブ系低温超伝導 SFQ回路用の世界最高水準のプロセスが構築され、ま ずは超伝導検出器用の多重信号処理回路等への応用 が見込まれている。

塩原所長は、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系超伝導材料の大型単結 晶引き上げ技術(SRL-CP法)の開発等が特筆されるが、 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「超電導応 用基盤技術開発」プロジェクトにおいては、Y系超伝導 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 CeO, キャップ層の開発、GdBCO超伝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 超伝導臨界電流値(Ic)、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。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。

<会議報告 4>

電子情報通信学会 2012 年総合大会 チュートリアルセッション「発見から 50 年! ジョセフソン効果のインパクト」報告

Report on a tutorial session "Impact of Josephson effect (in commemoration of the 50th anniversary of the Josephson effect discovery)" at the 2012 IEICE general conference

產業技術総合研究所 前澤 正明 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology M. Maezawa

昨年、1911年のH. Kamerlingh Onnesによる超伝導現 象の発見から100年を記念する多くの講演やシンポジウ ムなどが国内外で開催されたことは記憶に新しい。引き 続いて本年2012年は、ジョセフソン効果発見の50周年 にあたる。ジョセフソン効果は1962年にB. D. Josephson が理論的に予言し、翌1963年にP.W. AndersonとJ.M. Rowellにより実験的に検証された。物理学において巨 視的波動関数の位相の意味を明確にし、また応用分野 ではSOUIDなど超伝導エレクトロニクスの動作原理を与 えるなどきわめて重要な現象である。表に示すように発 見から50年の節目にあたって、ジョセフソン効果が科学 技術に与えてきた影響を検証し、未来の展望を議論す ることの意義は大きく、シンポジウムや論文誌特集号な どが企画されている。本稿では、2012年3月21日に岡山 大学で開催された電子情報通信学会総合大会チュート リアルセッション「発見から50年! ジョセフソン効果のイン パクト」の概要を報告する。

表 超伝導の歴史に関する略年表

1911 年	超伝導現象	H. Kamerlingh Onnes
1933 年	マイスナー効果	W. Meissner, R. Ochsenfeld
1935 年	ロンドン方程式	F. London, H. London
1950年	GL 理論	V. L. Ginzburg, L. D. Landau
1957 年	BCS 理論	J. Bardeen, L. N. Cooper,
		J. R. Schrieffer
1962 年	ジョセフソン効果	B. D. Josephson
1986 年	高温超伝導	J. G. Bednorz, K. A. Müller

セッション開始にあたり、前半の座長であるISTECの 日高睦夫氏から座長挨拶があった。日高氏が委員長を 務める電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス(SCE) 研究専門委員会が本セッションを企画した経緯と後に 続く6件の講演の概要が紹介された。

最初の講演は、京都大学の鈴木実教授から「ジョセフ

ソン効果とは」と題するジョセフソン効果の概論であった。 当時大学院生であったJosephsonがクーパー対のトンネ ルを予言する論文をPhysical Review誌に投稿したが査 読者のJ. Bardeenが掲載を拒絶したという有名なエピ ソードなど歴史的背景に始まり、ジョセフソンの関係式 の導出、臨界電流の磁場依存性やシャピロステップの 説明などジョセフソン効果の基礎が全般的に解説され た。さらに、d波、p波超伝導体におけるジョセフソン効 果など最近の話題も紹介された。

二番目の講演では、ISTECの田辺圭一氏が「ジョセ フソン接合作製技術の進展」と題して接合作製技術を 概説した。IBMのジョセフソンコンピュータープロジェクト で精力的に研究されたが実用には至らなかった鉛合金 接合、IBMプロジェクト終了直後に発見され現在最も広 く普及しているNb/AIO_x/Nb接合など低温超伝導接合技 術の概略が歴史的経緯を含めて紹介された。さらに、 ISTECが開発に成功し薄膜積層型 SQUIDなどへの応 用が進められているREBa₂Cu₃O_y系ランプエッジ接合を 中心に高温超伝導接合技術が解説された。

三番目の講演では、産総研の金子晋久氏から「超伝 導技術を基盤にした量子電気標準の現状と展望」と題 して電気標準への応用が解説された。ジョセフソン効果 と量子ホール効果に基づく電気標準体系が示され、直 流および交流電圧標準の原理や研究開発の現状が示 された。電圧標準の基礎となるジョセフソン効果の普遍 性の実証には本セッションの講演者でもある蔡兆申氏 が大きく寄与したことなど興味深いエピソードが紹介さ れた。また、ボルツマン定数の決定に関連するジョンソ ン雑音温度測定や抵抗標準システムの要素デバイスで ある極低温電流比較器などへの応用が概説された。

休憩をはさんで座長を筆者(前澤)に交代した後、四番目の講演では、九州大学の円福敬二教授から「SQUID磁気センサの基礎と応用計測システム」と題してSQUID応用の現状が概説された。はじめにSQUIDの動作原理、実際のデバイス、周辺エレクトロニクスを含むセンサシステムなどが説明された。次いで、脳磁・心磁計測、免疫検査、低磁界NMR/MRI、超伝導検出器の読み出し回路、非破壊検査、SQUID顕微鏡、資源探査などSQUIDの応用が幅広く紹介された。

五番目の講演では、名古屋大学の藤巻朗教授より 「ジョセフソン効果のデジタル応用」と題してデジタル回 路への応用が解説された。ジョセフソン効果発見以前 のクライオトロンを第ゼロ世代とし、IBMプロジェクトを中 心に開発が進められたラッチング回路を第一世代、 1990年代から研究開発が盛んになった単一磁束量子 回路を第二世代と位置づけ、これまでの研究の進展が 概説された。さらに、単一磁束量子回路を発展し、徹底 的な低消費電力化を目指す回路方式を第三世代とし、 ジョセフソンデジタル応用の将来展望が示された。

本セッション最後の講演は、NECおよび理研の蔡兆 申氏による「ジョセフソン回路での量子コヒーレンスと情 報処理」と題する量子計算応用の解説であった。ジョセ フソン接合を用いた量子二準位系の構成、それらを応用 した量子ビットの各方式、これまでの主要な実験結果な どが解説された。また、1999年に蔡氏のグループが初め て超伝導量子ビットの動作を実証して以来、デコヒーレン ス時間は3年ごとに10倍に伸びているという「蔡の法則」 が示された。また、ジョセフソン効果の完全な双対である コヒーレント量子位相すべり現象の観測に最近成功した ことが報告された。

「第 16 回超伝導科学技術賞」発表

On the 16th Superconductivity Science and Technology Award

> 審査委員会 委員長 太刀川恭治 The Chairman of The Selection Committee K.Tachikawa

(1)「第16回超伝導科学技術賞」にあたって

本賞は、超伝導関連分野における永年の功労者に 対する感謝、強いインパクトのある研究の評価、活発な 若手への応援、関連企業グループへの精神的支援、学 会、官界、報道界からの貢献に対する感謝等の表明を 目的としております。平成9年に発足してから、これまで の14年間で100件を超す合計108件に達する多くの テーマが受賞されております。

今回の応募に対しては平成23年12月26日と同24 年2月8日の2回にわたり第16回超伝導科学技術賞審 査委員会が開かれ、合計16件の御推薦に対して慎重 な審査が行われた結果、6件(内特別賞1件)が選定さ れました。受賞の運びとなりました各位に心からお祝い を申上げるとともに益々の御活躍をお祈りいたします。

今後もエネルギー問題や新技術開発に関連して超 伝導科学技術の重要性が一層増して行くことと考えられ ます。それに応えるためには、材料の性能向上、プロセ スの改善、新材料の探求の他、応用技術の進歩が求め られます。本賞もこのような点を重視して授与されており ます。今後これらの分野で目からうろこが落ちるような進 展が生まれることを期待しております。

終わりに今回の賞がいささかでも受賞者各位の功績 に報い、またこれからの超伝導分野の一層の活性化に 役立って、冒頭に述べた目的に沿うことが出来ましたら 誠に幸いに存じます。今後も本賞の公募に対し広い関 連分野から多数の応募をいただくことを期待いたしまし て今年度の選考経過の御報告といたします。

(2)受賞者、授賞テーマと授賞理由

特別賞

岩佐幸和殿

「超伝導大型応用の基礎技術開発」

米国 MITの Francis Bitter マグネット研究所において、 半世紀近く一貫してMRI、NMR、核融合、ハイブリッド マグネット等の各種超伝導大型応用機器の設計、試作 について研究を行い、世界をリードする多くの業績をあ げた。これらの研究でMgB2を含む金属系超伝導線材 についてその応用の基礎技術を確立し、さらに銅酸化 物系超伝導線材についてもそのマグネット応用への導 入について貢献した。以上の業績は国際的にもきわめ て高い評価を受けている。

一方、長年にわたり超伝導分野の日米協力に対して 貢献し、両国の研究協力とレベルアップに多大の成果 をあげた。これらの諸業績は超伝導科学技術賞特別賞 にふさわしいものとして表彰する。

科学技術賞

① 平松 秀典 殿、片瀬 貴義 殿、石丸 喜康 殿 「鉄系超伝導体薄膜材料に関する先駆的研究」

受賞者らは鉄系超伝導体において超伝導を示す SrFe₂As₂系エピタキシャル薄膜を世界で初めて実現した。また非ドープ材料でも水分により超伝導が誘起され る新現象の発見、BaFe₂As₂膜での1 MA/cm²を越える高 い臨界電流密度の達成、バイクリスタル接合を利用した ジョセフソン接合と超伝導量子干渉素子の実現など、世 界に先駆けて多くの成果を挙げてきた。さらに受賞者ら は、その高品質BaFe₂As₂膜成長技術を駆使し、鉄系超 伝導体では銅酸化物の2倍の傾角まで臨界電流密度 が落ちず、また金属テープ基板上においても、単結晶 基板上と同等の臨界電流密度を有する薄膜が得られる ことを示し、鉄系超伝導体の薄膜線材応用の可能性を 見いだした。

落合 庄治郎 殿、菅野 未知央 殿 「高温超伝導線材の機械的特性に関する研究」

落合氏は酸化物高温超伝導線材黎明期から、複合 材料力学の素地に立脚して線材機械強度特性の評価・ 解析に取り組んできた。Bi系多芯線材について、フィラ メント破壊挙動を詳細に解析して破壊に至る各段階を 推論するとともに、強度特性評価のワイブル分布を用い た統計的処理を提唱する等した。菅野氏はBi系、Y系 等の超伝導線材の機械的特性評価について、引張挙 動だけでなく疲労挙動についても試験装置を試作、評 価して多くの基礎的データを提供してきた。また、臨界 電流の歪依存性に関して、放射光X線回折を組み合 わせた研究にも取り組んできた。以上のように、高温超 伝導線材の機械的特性に関する研究において多くの 有益な知見を得た両氏の業績は高く評価される。 ③ 佐保 典英 殿、松田 和也 殿、西嶋 規世 殿、 田中 弘之 殿

「省電力超小型の強力超伝導バルク磁石システムの 開発」

溶融凝固法で作製される希土類123系高温超伝導 バルクは、着磁によって永久磁石よりはるかに高い磁場 を発する固体磁石となることから、磁気分離や医療など 様々な応用が期待されている。しかし、着磁方法が簡便 でなく、また冷却状態の維持に大型の容器と大電力を 要することが応用分野を制限し普及の妨げにもなって いた。本受賞者らは独自の発想と技術により、これらの 問題を同時に解決する画期的な省電力超小型強力磁 石システムの開発に成功した。着磁に超伝導電磁石や パルス磁石ではなくあらかじめ着磁した大型のリング状 バルク磁石を用いることと、冷却システムの改良によっ て消費電力を大幅に低下させたことが特徴で、3 T級の 強力磁石装置となることが実証されている。以上、本研 究成果は、超伝導バルク磁石の斬新なシステムを生み 出した意義深いものと位置付けられる。

④ 荻津 透 殿、槙田康博 殿

「ニュートリノビームライン超伝導磁石システムの開 発と安定運用」

本受賞者らは、陽子加速器施設 J-PARCにおいて、 ニュートリノ振動探索実験のための一次陽子ビームライン用超伝導磁石と冷却システムの開発、およびその長期安定運用を推進してきた。これまでに、各要素技術開 発、加速器ビームライン建設、その動作および精度の 確認に成功するとともに、2009年以来、継続的運転を 行ってきた。その間本受賞者らは、『単層コイルでの二 極、四極複合磁場超伝導磁石と超臨界へリウム強制冷 却技術』を融合し、加速器用超伝導磁石応用における 実用化のマイルストーンとなるシステムを実現した。この 成果は、粒子加速器分野での超伝導応用・低温技術の 飛躍的発展および長期運用における安定性、経済性 の実証に大きく貢献した。

⑤山口作太郎 殿、浜辺 誠 殿

「高温超伝導直流ケーブルシステムの先駆的研究」

電力輸送の高効率化や変動の大きな再生可能エネ ルギーの普及拡大に役立つ超伝導直流技術に対する 関心が高まっている。本受賞者らは実用レベルの特性 と量産技術が確立されたBi系高温超伝導線材の長所 と将来性にいち早く着目し、20mの直流ケーブルシステ ムを世界に先駆けて開発した。さらに一連の設計製作 技術の最適化、冷却・通電試験などで超伝導直流送電 のメリットを実証した。続けて、200mの直流ケーブルシ ステムを製作、敷設してフィールド試験を行い実用化へ 向け実証的研究を進めている。本受賞者らのグループ は高温超伝導直流送電の分野で世界をリードし、日本 の超伝導研究のユニークな分野を開拓した。この先駆 的研究は、近未来の大容量低損失送電システムや将 来の地球規模超伝導送電網の実現に向けて欠かせな いものであり、本受賞者らの業績は高く評価される。



第16回超伝導科学技術賞 授賞式 (平成24年4月17日)

<研究室紹介>

(1)超伝導のメカニズムや特徴を探る 東京大学大学院理学系研究科・小形研究室(小形正男) Search for Superconductivity Mechanisms and Characteristics Masao Ogata Labo in Department of Physics, University of Tokyo

(1)研究室紹介

私の研究室は、助教の松浦弘泰さん(阪大三宅研出身)と大学院生は博士課程も含めて大体6名程度います (各学年1~2名)。研究室全体としての方向性は「強相関電子系」ですが、大学院生個人個人の好みによって 様々な研究をすることを推奨しています。今までの研究テーマは、銅酸化物高温超伝導体から始まってホットな話 題の超伝導体、有機導体での超伝導やモット絶縁体、フラストレーションのあるスピン系、2次元へリウム3の系、 重い電子系などです。最近ではさらにグラフェンにおける近藤効果や、単体Biでのディラック電子によるスピン ホール効果、Ca₃PbOという新しい物質におけるディラック電子の予言などということにも手を出しています。理論は お互いに関連する部分も多く、近接の分野での話題やテクニックをよく知っておくことは非常に重要ですので、各 人お互いの距離を微妙に保ちつつ楽しくやっています。

研究室の設備としては、写真のようなコンピュータがあれば十分で す(冷暖房完備の別室にあります)。理論の基本は未だに紙と鉛筆に よる計算で、その式を元にコンピュータにかけることがあるという感じで す(人によっては激しい数値計算を中心に研究することもあります)。 理論計算の場合、実験事実とは異なって、「ゆるぎない結果」というも のはなかなか得られません。(厳密解が得られた場合だけです。)物事 の本質を見極めようと、簡単化したモデルを用いますし、計算の途中 では様々な近似を用います。得られた結果が実験と合わなければ、モ デルが悪いとか近似が悪いとか言われてしまいます。そのため、(ここ



が難しい所なのですが)アイデアで勝負するしかありません。途中の近似が荒っぽくても、またアヤフヤでも(よくあ ります)、出発点のアイデアと出てきた結果が面白ければ素晴らしい!ということになっています。実際、超伝導の BCS理論も、相当大胆な仮定の連続からなっているとも言えます。

超伝導研究は、BCS理論から出発して高温超伝導体の研究の歴史を経て、現在ではいろいろなテクニックが 完備されています。近似方法としては平均場近似、GL理論、RPA近似、FLEX近似(動的なスピン揺らぎなどを考 慮したRPA近似)、実空間を扱えるBogoliubov-de Gennes方程式などです。現在はコンピュータも早くなりソフトも 充実していますので、大学院生が1か月も頑張ればFLEXなどまで簡単にマスターできるという時代になりました。 このためどのようなモデルを立てるか、どのような物性に注目するかというアイデアの勝負になります。

(2)これまでの成果、最近のトピックス

最近我々の研究室で超伝導に関して研究してきたものを挙げますと、高温超伝導のRVB理論の数値的な裏付け(モット転移の本質とRVB理論との関連)、エキゾチックな超伝導の提唱(Sr₂RuO₄のようにスピンー軌道の入った場合、有機導体における電荷ゆらぎによるf波超伝導)、鉄系超伝導体の新奇なメカニズム(少数キャリアによる exitonic なものや、軌道選択モットと関連したもの)、鉄系超伝導体における非磁性不純物近傍での電子状態(STS)によるs⁺⁻波とs⁺⁺波の識別方法の提唱、などです。

理論ばかりで暴走しますとどうしようもなくなりますので、常に実験からのインプットがとても重要です。新しい現象や、面白そうな現象が見つかりましたら、ぜひご相談下さい。

(3)連絡先

研究室のホームページは http://hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp(hosiは星です。もとはsola(空)とかumi(海)とかが あった名残です。)理論の研究者が普段していることを知りたければ「理論物理学者への道」という駄文もあります。

http://hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~ogata/daigakuin.html

煙と理論屋は高い所に上りたがりますので(又は、高い所に追いやられますので)、研究室は理学部1号館の9 階にあります。下図のように研究室の窓は東側を向いていて見晴が素晴らしい。上野の山から遠くスカイツリーが 真正面に見えます。



(左)院生室と黙々と計算する院生。

(右) 左の写真中の窓から見えるスカイツリー。そのふもとの右側に吾妻橋の アサヒビールの黄色いオブジェが小さく見えています。

(2)中部電力株式会社 電力技術研究所 超電導プロジェクト Chubu Electric Power Co., Inc. Electric Power Research & Development Center Superconductivity Group

(1)研究室紹介

中部電力は、酸化物超電導体が発見されて以来、その電力応用に向けた研究開発を続けている。平成5年には、研究所に超電導専属組織を発足し、電力会社の研究所であるにもかかわらず、材料開発からその応用まで幅広い超電導研究を進めている。材料開発では、イットリウム線材開発に早くから取り組み、世界で初めてCVD法による200m長の線材作製に成功し、また、低コスト化を進めるための安価な基板の開発にも成功している。また、酸化物超電導体ならではの大型バルク体の合成にも成功し、それを用いた軸磁気受けの応用として、電力貯蔵用フライホイールの開発も進めた。イットリウム系超電導体を用いた当時世界最大の20kA級の電流リードの開発も行った。機器開発においては、超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発に、平成3年度の国家プロジェクトスタート時点から参画し、金属系コイルの開発や実系統連系試験の成功など多くの成果を残している。特に、電力会社が中心となって受託したことで、低コスト化を意識した開発を進展させて功績は大きい。また、超電導研究から派生した極低温冷凍機の開発や、磁気変化を利用して空調などに応用を図る磁気ヒートポンプの研究などでも成果が得られている。

(2)これまでの成果、最近のトピックス

上述した成果の中でも、特筆すべき成果として挙げられるのは、SMES国家プロジェクトの成果も踏まえ、実用 化に成功した瞬時電圧低下(瞬低)補償装置である。この装置は、大電力を素早く充放電することが可能な超電 導コイルを使用することにより、大規模工場等を一括で補償することができることを特長としており、高電圧化を 図った固体絶縁コイルの浸漬冷却を、複数台の小型冷凍機により実現した。2003年7月より、大手電気機器メー カーの最先端大規模工場にて出力5 MW機による実証試験を開始し、2005年10月からは、世界最大規模となる 出力10 MW機での試験を実施し、これまでに30 回以上の瞬低補償動作 が確認されている。日本初の超電導電力機器として、現在も実運用され ており、日本国内には同型の装置がほかに2 基運用されている。

また、超電導コイルは、大型化・大容量を図る上で機械的強度を高めることが重要であり、最近、イットリウム系超電導コイルにおいて、新しいコイル構造の開発等により、これまでの常識を覆す高強度コイルの開発に成功した。これにより、同じ大きさで10倍のエネルギー貯蔵が可能となるコイル技術実現の見通しが得られている。

(3)連絡先

連絡先:平野直樹 Hirano.Naoki@chuden.co.jp 中部電力(株)の技術研究開発に関するホームページアドレス: http://www.chuden.co.jp/corporate/study/stu_torikumi/index.html



出力10 MW 瞬低補償用SMES

(3)山形大学大学院理工学研究科 大嶋・齊藤研究室 Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University Ohshima and Saito Laboratory

(1)研究室スタッフ(H24.4月現在)

教	授:大嶋 重利
准 教	授:齊藤 敦
技術職	員:堺 三洋
秘	書:鏡 由美子
学	生;修士2年生:7名、修士1年生:6名、学部4年生:11名

(2)研究概要

我々の研究室では、超伝導エレクトロニクスに関して基礎から応用まで一貫し て行っている、「超伝導研究」の研究室である。基礎研究では、高温超伝導薄膜 や低温超伝導薄膜のエピタキシャル成長技術の確立、積層膜技術の開発、超 伝導薄膜への人工ピンの導入手法の開発、超伝導薄膜の低表面抵抗化に関す る研究等を主に検討している。応用研究では、高耐電力超伝導フィルタの開発、 NMR 超伝導検出コイルの開発やテラヘルツ波検出用のMKID_S (Microware Kinetic Inductance Detectors)の開発などを行っている。

(3)特徴ある研究・所有装置

〇超伝導体のマイクロ波表面抵抗測定装置

高性能な超伝導フィルタ、NMR 超伝導検出コイルを開発するためには、マイ クロ波帯で低表面抵抗を有する超伝導体を探索することが重要である。そのた めには、超伝導薄膜の表面抵抗を精密に測定することが必要となる。NMR 検出 コイルでは、高磁場中での表面抵抗を評価することが必要である。我々は図1で 示すような装置を試作し、0~5テスラの磁場中で、21.8 GHzの表面抵抗を精密 に測定している。



図1 高磁場中で表面抵抗 を測定するシステム の写真

○永久磁石を用いたⅠ。評価システム

超伝導薄膜やテープ線材のJ。を簡便に、正確に測定することは意外と難しい。我々は、永久磁石を用いて、超伝導薄膜やテープ線材のJ。分布を短時間に正確に測定できるシステムを構築した。その写真を図2に示す。

(4) 最近の成果

最近の成果を示すデータを図3~5で示す。図3BZOを添加したYBCOと添加していないYBCO薄膜の磁場中表面抵抗の測定結果、図4永久磁石法で測定したYBCOテープ線材のJ。分布、図5新たに提案した分割型マイクロストリップ線路フィルタの電流分布シミュレーション。

我々は、大学、研究所、企業等との共同研究、受託研究等を積極的に進め ています。測定の依頼や要望等がありましたら、連絡をください。



図2 永久磁石を用いたJ_c評 価装置の写真



(5)連絡先

〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16 山形大学工学部 電気電子工学科 大嶋重利 Tel:0238-26-3286, ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp, http://www.ohshima-lab.yz.yamagata-u.ac.jp

(4)九州大学大学院システム情報科学研究院 電気システム工学部門 木須研究室 Kiss Laboratory, Department of Electrical Engineering Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering Kyushu University

本研究室では、世界最先端の計測 評価技術開発による超伝導材料の特性 解明と高性能化、さらにその電力・エネ ルギー応用のための研究を行っていま す。研究室は、福岡市西部に位置する 九州大学伊都キャンパスにあり、超伝 導システム科学研究センターの一講座



も担っています。国家プロジェクトや民間との共同研究、国際共同研究も積極的に推進すると共に、これらの研究活動を通じて、電気電子工学分野の次代を担う若手研究者、技術者の教育に取り組んでいます。

(1)研究室スタッフ(2012年4月現在)

教授: 木須 隆暢(超伝導システム科学研究センター併任) 准教授: 井上 昌睦、特任准教授: 東川 甲平 技術職員1名、秘書1名、博士4名(内社会人博士3名)、修士9名、卒論生4名

(2) 主要研究テーマ

●希土類系(RE-123)高温超伝導線材の特性解明と高性能化

NEDO【イットリウム系超電導電力機器技術開発】の一環として、超電導 工学研究所ならびに線材メーカーとの共同研究により、RE-123先進超伝導 材料の特性解明に向けた先端計測システムの開発と当該装置を用いた特 性評価を実施しています。具体的には、

- ▶ 局所磁束フロー損失計測システム(図1: 高磁場型低温レーザ顕微鏡)
- ▶ 結晶欠陥位置の可視化システム
- ▶ 局所電流計測システム
- ▶ km 級長尺線材評価システム(図 2: リール式高速磁気顕微システム)

など多くの独創的な計測手法を開発するとともに、これらを用いた複合的な 評価により、RE-123超伝導線材の臨界電流制限因子を明らかとし、プロセ ス開発に貢献しています。

図1に示した、高磁場型低温レーザ顕微鏡では、高温超伝導線材 内部の局所電界損失をµmオーダーの空間分解能で計測することが 可能となります。数テスラの強磁界中の局所損失の可視化は世界初の 成果です。また、図2に示した、リール式高速磁気顕微システムでは、 長尺テープ線材における面内の臨界電流(*I*_c)分布を非接触・非破壊 に計測することが可能となります。長尺線材の2次元的な*I*_c評価を実 用的な評価速度(36 m/h)で実現した世界初の装置で、線材の信頼性 試験やプロセス条件の最適化、耐加工性の評価などにおいて威力を



図1 高磁場型低温レーザ顕微鏡



図2 リール式高速磁気顕微システム

発揮しています。

この他、走査 SQUID 磁気顕微鏡を用いた高感度磁気イメージングによる量子化磁束挙動の計測や、通電法による広範な実用環境下に亘る電流輸送特性の評価、更に、これらの詳細な実験を基に、各種製法により作製されたRE-123超伝導線材の電流輸送特性のデータベース化など、高温超伝導線材の実用性能向上のための総合的な研究を行っています。

●Bi-2223高温超伝導線材の高性能化

JST戦略的イノベーション【次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション】の一環として、鉄道き電ケー ブルへの適用を目的に、Bi-2223線材の高性能化に取り組んでいます。本プロジェクトでは、多芯テープ線材内の フィラメントレベルの電流分布を調べ、局所的な臨界電流密度はフィラメント厚さと相関を持っており、薄いフィラメ ントほど高い臨界電流密度を有していることを明らかとしました。さらに、長尺線の性能向上に関する研究を開始し ています。これらの知見は、線材のフィラメント構成や圧延加工プロセスにフィードバックされています。

●MgB₂線材の超伝導特性の解析に関する研究

将来のクリーンエネルギーとして期待される(液体)水素エネルギー利用技術と超伝導技術とを組み合わせると 相乗効果が発揮され、再生可能エネルギーの大規模導入を可能とする低環境負荷型の高効率エネルギーインフ ラが実現すると期待されています。本研究は、JST【戦略的創造研究推進事業(先端的低炭素化技術開発)】の一 環として、物質・材料研究機構との共同研究により、その要となる実用レベルの低コスト高性能多芯MgB2超伝導 線材、ならびに超伝導接続技術をはじめとする基盤技術の開発に取り組んでいます。

鉄系超伝導体の電流輸送特性の解明

近年我が国で発見された、鉄系新超伝導体は結晶構造の多様性や化学組成の柔軟性に富むことから、新しい 系、新しい構造の超伝導体が生まれる可能性が大きいと期待されています。本プロジェクトではJST【戦略的国際 共同研究推進プログラム】の一環として、それぞれ世界トップレベルの技術を有する日本-EU間の研究グループ が集結し、多角的な研究を有機的に結び付けながら、鉄系超伝導体のポテンシャルを究明する研究体制を構築 し、実用材料化の観点から性能向上の指針を明らかとすることを目指しています。また、国際共同研究を通じて、 日欧間の強固な研究ネットワークを確立すると共に、若手人材の育成に取り組んでいます。

●電力・エネルギー応用を目指した超伝導基盤技術

量子化磁束挙動に関する理論的考察を基に、超伝導線材の電流輸送特性の物理モデルを構築するとともに、 動作条件によって複雑に変化する線材特性の定式化・推定法を提出しています。更に、この手法に基づく機器設 計手法の確立に向けた取り組みも行っています。例えば、超伝導線材の電流輸送特性の温度、磁場、磁場印加 角度、機械歪依存性を考慮したマグネットの最適設計を実現しています。

上記のテーマを密接にリンクさせながら、超伝導応用機器毎の使用環境を考慮した先進超伝導材料の開発や 高性能化を実現するための研究活動に取り組んでいます。

(3)連絡先

木須 隆暢

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp, Phone: 092-802-3686

〒819-0395 福岡市西区元岡744九州大学 伊都キャンパス ウエスト2号館546室

http://super.ees.kyushu-u.ac.jp/

※ 超伝導特性の精密測定のための各種評価装置を揃えています。詳細は研究室のホームページもご参照下さい。 研究室の見学は随時受け付けています。また、共同研究の機会などございましたら、お気軽にご連絡下さい。

(5)京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 雨宮研究室 Applied Superconductivity Laboratory, Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

(1)研究室スタッフ

雨宫尚之教授、中村武恒准教授、研究員3名、学生14名、事務補佐員

(2)研究室の簡単な紹介

電気抵抗がゼロであること、高磁界を発生できることという超伝導の2大メリットを上手に活用できれば、電気工 学の様々な分野でのイノベーションが期待できます。我々の研究室では、超伝導材料のミクロスケールの電磁現 象およびその発現としてのマクロスケールの電磁特性の解明・把握に立脚し、超伝導を使った、エネルギー効率 が高く環境に優しくコンパクト・大容量な電気機器の実現、常伝導では実現困難な医療機器の実現などに向けた 研究を展開しています。具体的な応用機器の例として、高温超伝導加速器(医療、環境・エネルギー応用)、高温 超伝導ケーブル、車載用などを目指した高温超伝導モータを3本柱として研究を進めているほか、NMR, MRI用 マグネットの基盤技術、先進電気機器の研究も進めています。

(3)特徴ある装置

図1は加速器用マグネットで重要な磁場精度を評価するためのマグネット多極磁場測定用回転ピックアップコイルシステムと伝導冷却マグネットテストベンチ、図2は交流磁界下で交流電流を輸送する高温超伝導線の交流損失を評価できる交流損失測定システムです。図3には、後述するNEDOプロジェクトにおいて開発した20kW級高温超伝導誘導同期回転機(HTS-ISM)プロトタイプ機の外観写真を示します。本機によって、車載用HTS-ISMの可能性を実証することに成功しました。これらのほか、薄膜線材の幅方向臨界電流密度分布を評価する磁気ナイフ装置、500 A級伝導冷却高温超伝導コイル特性評価装置と磁場印加用2 T大口径冷凍機冷却マグネット、温度可変超伝導線材特性評価装置と磁場印加用10 T冷凍機冷却マグネット、クラスタ型計算サーバ、各種試験用大電流電源(例:2000 A 可変周波数電源、500 A 高安定度電源)などを用いて研究を進めています。



図1:マグネット多極磁場測 定用回転ピックアップ コイルシステムと伝導 冷却マグネットテスト ベンチ



図2:交流損失測定システム



図3:20 kW級高温超伝導誘 導同期回転機 (HTS-ISM) プロトタイプ機

(4)これまでの成果、最近のトピックス

加速器用高温超伝導マグネットの研究

重粒子線がん治療装置の小型化・高機能化や、暴走の危険を抑え核廃棄物処理にも使える加速器駆動未臨 界炉の実現に向けて、加速器用マグネットを高温超伝導化するための研究を推進しています。この研究は、科学 技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)に採択されたプロジェ クト「高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」の一環として、東芝、高エネルギー加 速器研究機構、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構と共同で実施しているものです。我々の研 究室はマグネットの磁場設計、線材磁化と磁場精度、高温超伝導マグネットの安定性の研究などを担当していま す。

高温超伝導体の交流損失の研究

交流超伝導電気機器の実現に向けて、交流損失の低減は大きな鍵となります。電磁現象を可視化し交流損失 を計算する電磁現象シミュレーション、電気的方法・熱量法による交流損失の実測といったアプローチにより、交 流損失の研究を進めています。特に、イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトにおいては、超伝導電 カケーブルの交流損失低減に取り組み、ケーブル構造と線材特性が交流損失特性に与える影響を明らかにし、 交流損失に関するプロジェクト目標値達成に貢献してきました。また、最近ではニュージーランドのIndustrial Research Limitedと共同で高温超伝導Roebelケーブルの交流損失についても研究しています。

高温超伝導誘導同期回転機の研究

高温超伝導誘導同期回転機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) の研究開発を実施しています。本回転機は、かご形誘導機の簡易な構造ながら同期トルクを有するなど、既存機 に対して様々なメリットを有しています。当研究室では、HTS-ISMの基礎研究を推進するとともに、電気駆動式自 動車、発電機、直流電気鉄道、液体水素移送ポンプなど、様々な応用研究開発を実施してきました。特に、車載 用HTS-ISMについては、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託事業(平成21年度省エネルギー革新技 術開発事業(第二次公募))として研究を推進し、特質すべき成果を上げています。

(5)連絡先、ホームページアドレス等

連絡先(メールアドレス):prof@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp(雨宮)、tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp(中村) ホームページアドレス:http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/

(6)求人

ポスドク募集中、お問い合わせは雨宮(recruit@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp)まで。

一般社団法人未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会

第79回ワークショップ

「3.11震災を乗り越えて」

2011年3月11日の東日本大震災。これは日本に大きなダメージを与えただけでなく、超伝導技術・低 温技術の関係者に与えた影響も大きかったのではないでしょうか。ただ、ここに立ち止まってばかり居るだ けではなく、この震災の経験を生かし大きく前に進む必要があります。そこで、本ワークショップでは震災 で起きたこと(事故)および、その事故からの復旧されたあるいは復旧途中の超伝導システムに焦点を当 て、そこから抽出される課題を検証議論し、今後の対策に役立てることを目的としてワークショップを開催 致します。超伝導・低温技術に携わられている皆様だけでなく、これらにご興味をお持ちの方々を含めて 多数の参加をお待ちしております。

主催:一般社団法人未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会協賛:公益社団法人低温工学・超電導学会(予定)
日時:平成24年7月19日(木)13:30-17:45
場所:全日通霞が関ビルディング大会議室B http://www.neu.or.jp/html/map/ 〒100-0013 千代田区霞が関3-3-3 TEL 03-3581-2261
定員:120名
参加費: 超伝導科学技術研究会員:参加費無料、資料代2,000円 協賛学会:参加費4,000円、資料代2,000円

■一般:5,000円、資料代 2,000円

■学生:参加費無料、資料代2,000円

プログラム(案)

13:30-13:35	開会の挨拶	下山 淳一(東京大学)
13:35-14:15	NMRの被災、復旧の現状、今後の課題	清水 禎(物質·材料研究機構)
14:15-14:55	J-PARCでの被災、復旧の現状、今後の課題	
		槙田 康博(高エネルギー加速器研究機構)
14:55-15:35	MRIの被災状況とそこから見えてきた課題	
		野口 隆志(物質・材料研究機構)
15:35-15:50	休憩	
15:50-16:20	超伝導ケーブルシステムと震災	山口作太郎(中部大学)
16:20-16:50	免震・制震対策の実情	西 敏夫(東京工業大学)
16:50-17:40	パネルディスカッション:極低温機器に要求され	れる安全対策
17:40-17:45	閉会の挨拶	木村 茂行(未踏科学技術協会)

参加申込はこちらから: http://www.sntt.or.jp/~fsst/20120719.html 問い合わせ先: 一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 担当 大貫 Phone: 03-3503-4681 Fax: 03-3597-0535 e-mail: fsst@sntt.or.jp

研究会の動き

〔平成 23 年 (2011 年) 10 月 1 日~平成 23 年 (2011 年) 12 月 31 日〕

第16回超伝導科学技術賞審査委員会

平成 23 年 度 第 2 回

日 時:平成24年2月8日(水)13:30~15:30 場 所:学術総合センター11階 共用会議室 出席者: 委員9名 事務局1名

議事:

- (1) 第16回超伝導科学技術賞の確定
- (2) 第16回超伝導科学技術賞の授賞理由の検討

幹事会

平成23年度第6回

日 時:平成24年2月8日(水)15:40~17:30 場 所:学術総合センター11階 共用会議室 出席者:幹事9名 事務局1名

議事:

- (1) 第78回ワークショップについて
- (2) 第79回ワークショップについて
- (3) 第38回シンポジウムについて
- (4) 第16回超伝導科学技術賞について
- (5) 平成23年度収支決算見込み及び平成24年度収 支予算について
- (6) 平成24年度事業計画について
- (7) FSST NEWSについて

第78回ワークショップ

- 日 時:平成24年3月13日(火)13:30-17:45
- 場 所:東京大学 本郷キャンパス 武田ホール
- テーマ:再生可能エネルギー導入へ向けた超伝導・低 温技術

参加者数:86名

プログラム:

- 13:30-13:40 開会の挨拶 下山淳一(東京大学)
- 13:40-14:40 風力発電の現状と将来展望
 - 勝呂幸男(日本風力エネルギー学会)
- 14:40-15:20 電力貯蔵技術の現状と将来 大和田野芳郎(産業技術総合研究所)
- 15:30-16:10 超伝導応用機器開発の現状と将来

大崎博之(東京大学)

- 16:10-16:40超伝導電力機器用冷却システムの現状と
今後今後池内正充(前川製作所)
- 16:40-17:10 再生可能エネルギーにおける超伝導伝送システム 向山晋一(古河電気工業)
- 17:10-17:40 総合討論
- 17:40-17:45 閉会の挨拶

木村茂行(未踏科学技術協会)

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会/秋季	H24.9.11~9.14	愛媛大学城北地区 (愛媛県松山市文京町) 松山大学文京キャンパス (愛媛県松山市文京町)	応用物理学会
日本物理学会/秋季	H24.9.18~21	横浜国立大学 (神奈川県横浜市保土ヶ谷区)	日本物理学会
日本金属学会/秋期	H24.9.17~19	愛媛大学城北地区 (愛媛県松山市文京町) 松山大学文京キャンパス (愛媛県松山市文京町)	日本金属学会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会議名	日付	開催場所	主催及び問合せ先
ICEC-ICMC2012	2012.5.14~5.18	Fukuoka (Japan)	http://www.icec24-icmc2012.org/
M2S2012	2012.7.29~8.3	Washington, D.C. (USA)	www.m2s-2012.org
ASC2012	2012.10.7~10.12	Portland, OR (USA)	www.ascinc.org
ISS2012	2012.12.3~12.5	Funabori (Japan)	www.istec.or.jp/ISS/main_J.html

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本明言	* 独立行政法人 物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主任研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム株式会社 技術開発センター 超電導線材開発グループ グループ長
荒井 有领	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 研究員	日高 睦夫	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 低温デバイス開発室 室長
伊豫 彰	独立行政法人 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 主任研究員	木村 茂行 大貫留美子	一般社団法人未踏科学技術協会 理事長 一般社団法人未踏科学技術協会 事務局長

イットリウム系超電導線材

高温超電導のベストサプライヤー

く特長>

- 長尺における高い臨界電流値、長手方向に優れた均一性を実現
- 高磁場における高い臨界電流密度、高い機械強度を実現
- 浸漬冷却・伝導冷却用コイル等、高磁場下の応用に適した 高性能なコイルアプリケーションが可能
- ○電力ケーブルの大容量・大電力化、コンパクト化、低送電損失化、 高性能・高効率な超電導ケーブルが実現可能

<標準仕様*1>

○ 線材幅(5mm, 10mm)、基板厚さ(75µm, 100µm)に応じた製品ラインアップ

O 標準臨界電流 Ic>500A/cm-w@77K,0T、単長>300m級にも対応可能

피성	線材幅 ^{*2}	線材厚さ			臨界電流値 (A)
空名	(mm)	基板厚さ (µm)	安定化層厚さ (µm)	総厚さ (mm) ^{*2}	(@77K, 0T)
FYSC-SC05	~ 5.15	75	75	~ 0.25	> 250
		100	100	~ 0.3	> 250
FYSC-SC10	~ 10.15	75	75	~ 0.25	> 500
		100	100	~ 0.3	> 500
FYSC-S05	~ 5.15	75	_	~ 0.15	> 250
		100	_	~ 0.2	> 250
FYSC-S10	~ 10.15	75	_	~ 0.15	> 500
		100	_	~ 0.2	> 500

*1 上記仕様は2012年4月時点のものです。仕様のご確認、ご要求等、何なりとお問い合わせ頂けますようお願い致します。 *2 線材幅、厚さは絶縁テープを含む平均値となります。

<線材構造>



お問い合わせ

株式会社フジクラ新規事業推進センター 超電導事業推進室 〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440 TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472 E-mail ask-sc@fujikura.co.jp / Web http://www.fujikura.co.jp



Fujikura