

2019年秋季講演会(9/18-21 北海道大学札幌キャンパス)

大分類 11「超伝導」講演会報告

11.1「基礎物性(デバイス系)」においては6件(ポスター講演除く)の発表があった。内訳は、ジョセフソン接合の磁場中特性1件、固有接合関連が5件であった。

ジョセフソン接合の磁場中特性では、接合バリアに対して水平磁場を印加した場合に加えて垂直磁場を印加した状態でのジョセフソン電流の変調について調べた結果に関し数値解析の結果とともに議論が行われた。

固有接合関連の報告からはテラヘルツ発振特性向上のために素子アレイ化の試み、共振器との結合効果、テラヘルツ発振の理解に重要となる同期現象を解析するための手段として放射電磁界の偏光特性を制御しそれを利用した解析法の提案と得られた結果から同期現象の理論的推察、また大面積の固有接合に電流注入した場合の発熱効果について調べた研究結果について報告され議論が行われた。特に、放射電磁界の偏光特性を利用した固有接合の同期現象についての議論はこれまで実験的にはなされておらず興味深く、また応用の観点からも強く印象に残った。

11.1「基礎物性(材料系)」では、18件の口頭発表と9件のポスター発表があった。銅酸化物超伝導体関連6+6件(口頭+ポスター)、鉄系超伝導体関連4件(口頭)その他の超伝導体関連6+2件(口頭+ポスター)、試料の作製技術関連2+1件(口頭+ポスター)であった。水蒸気を含む雰囲気下でのアニールがREBCO超伝導体作製に有効であるといった新たな知見が報告されたほか、収束イオンビームを用いて、超伝導細線を直接描画する技術についても報告があり、新しい超伝導体作製プロセスとして、今後の進展が期待される。

新超伝導体の探索に機械学習やデータベースといったデータサイエンスの手法を用いた新規超伝導体の探索および発見に関する講演があった。鉄系超伝導体に関しては、熱分析に関する講演奨励賞受賞記念講演が行われた。また、1212系銅酸化物やBiS₂系、ミスフィット層状化合物といった超伝導体に関する講演もあり、多数の超伝導物質に関する議論が活発に展開される講演会であった。

11.2「薄膜、厚膜、テープ作製プロセスおよび結晶成長」のセッションでは口頭発表16件とポスター発表9件の計25件の講演が行われた。内訳はRE-Ba-Cu-O薄膜・線材5件、コーテッド線材の導電性中間層6件、磁場配向1件、MgB₂膜1件、デバイス膜3件、Fe系膜・材料2件、超伝導接合2件、フッ素フリーMOD膜5件、であった。オーラルセッション会場は座席数が60席ほどで、聴講者は50名程度であった。会場の大きさとしては適切なサイズであった。

名大の佐藤らは、金属基板の直接通電加熱する方式で、膜厚約5ミクロンのYBCO線材で、*c*軸配向かつ最大1000 A/cm@77 Kの臨界電流を達成した。また、熱電対と放射温度計の二通りの温度測定方法で基板温度制御を試みていた。名大の安田らは、Vapor-Liquid-Solid法

を用いて、BHO 添加 YBCO 線材を Reel-to-Reel システムで作製し、 $J_c > 1 \text{ MA/cm}^2 @ 77 \text{ K}$ を達成した。名大の一野らは、REBCO+BaMO 薄膜の結晶成長シミュレーションによって、成膜速度や基板温度が BMO ナノロッドの成長に与える影響について報告した。関西学院大の尾崎らは、YBCO 膜に 10 MeV の低エネルギー Au イオンを照射し、YBCO 膜の超伝導特性に与える照射量依存性を評価した。照射量増加に伴い、 T_c は低下したが、磁場中 J_c 上昇が向上した。特徴的なのは、 J_c の磁場印加角度依存性において、 $B//ab$ の J_c ピークが消失していた。九工大の吉田らは、 -160°C の低温断面 TEM により BSO ナノロッドをドーブした YBCO 膜を評価した。 -160°C において、面内方向は変化しないが、面直方向の歪みが増加することを明らかにした。青山学院大の権藤らは、フッ素フリー MOD 法で作製した YBCO 膜において、水蒸気中熱処理で生じる積層欠陥について検討した。低酸素分圧、高温アニールで積層欠陥が消滅することを明らかにした。電中研の一瀬らは、La 添加 STO 導電性バッファ層の断面 TEM 観察から、Cu、Ni の拡散バリアとして機能することを確認した。京大の濱田らは、 $(\text{Sr}, \text{La})(\text{Ti}, \text{M})\text{O}_3$ (SLTM, M=Ga, Al) 導電性中間層において、 $\text{Sr}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Ti}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_3$ (SLTA) では剥離無く、YBCO 膜を平滑に成膜できることを確認した。また、酸素アニールによる電気抵抗率の上昇も小さかった。京大の井上らは、Nd ドープ SrTiO_3 導電性中間層を作製し、Nd ドープ量が 0.3, 0.4 では、450 度 1 時間の酸素アニールでも as-depo. 膜と同じ抵抗率であることを報告した。京大の吉岡らは、Ag インゴット冷間圧延、 O_2 中、Ar 中の二段階再結晶化で Ag 集合組織テープを作製し、YBCO 膜を成膜した。一層目に Cu リッチ YBCO を成膜し二層目に YBCO 膜を成膜することで、Ag テープへの Cu の拡散が抑制出来る可能性を示した。京大の太田らは、 $(\text{Sr}, \text{La})\text{TiO}_3$ 導電性中間層を用いて、二軸配向した YBCO/La-STO/Ni メッキ/配向 Cu/SUS を得た。京大の柏木らは、リニア駆動型回転変調磁場発生装置を開発し、薄膜法を使わずに DyBCO 配向試料を得た。京大の土井らは、 MgB_2 膜を $\text{Ar}+3\%\text{H}_2$ 雰囲気中 $450\text{-}650^\circ\text{C}$ のアポストニールで T_c が向上し、磁場中 $J_c @ 20 \text{ K}$ の高磁場側で J_c が大幅に向上することを報告した。埼玉大の水野らは、超伝導トンネル接合 (STJ) の X 線検出分解能向上を目的に、STJ エッジ付近にアパーチャーを設けた。これによって、検出エネルギー分解能が向上した。名大の近藤らは、Nd1111 膜のオーバードープ領域の物性を調べるため、O サイトへ H 置換を試みた。その結果、F ドープの二倍以上のキャリア密度の上昇を確認した。名大の辻らは、Nd1111 膜を用いてフォトンやイオン検出器用の超伝導細線の作製に、薄膜試料のエッチング方法について検討した。その結果、Ar イオンミリングで、線幅 2 ミクロン以下に細線化しても J_c が低下しにくく、歩留まりが向上することを報告した。

11.3 「臨界電流・超伝導パワー応用」は 9 月 19 日の午後のセッションにおいて 10 件の口頭発表があった。磁束ピンニング特性からエレクトロ応用と幅広い報告があり、特に現在精力的に研究が進められている超伝導接続に関する発表が半数を占めた。

はじめに注目講演である九工大の松下らから MgB_2 と REBCO 線材で得られている臨界電流密度 J_c が、超伝導状態で流しうる最大の電流である対破壊電流 J_d にどこまで近づけるか

が議論された。現状では MgB_2 は J_d の 1/2 が達成されているが、REBCO はまだ 1/4 程度であり、REBCO の更なる特性改善の可能性が示唆された。

有明高専の松野氏から時間依存ギンツブルグ・ランダウ方程式を用いた、磁束線のシミュレーションで使用しているアルゴリズムの性能評価について報告があった。特に解析に用いている数値積分スキームは、時間刻み幅に関して 2 次の精度を有することを示した。

次に J_c 特性について、熊大の末吉らは、YBCO 薄膜の ab 面に対して 5 度の角度と c 軸方向の 2 方向から重イオン照射を行い、 J_c の角度依存性への影響を調べた。特に ab 面方向に導入した柱状欠陥が、磁束線のチャネリングのような現象を誘発する可能性は低いと報告した。名大の伊東らは、PLD と液相エピタキシーを組み合わせた Vapor-Liquid-Solid 成長を用いて、BHO 添加 YBCO 線材を作製した。26.0 nm/sec の高速成膜で 4.2 μm まで作製しても、 a 軸配向粒の生成を抑制し、優れた J_c - B 特性が得られることを示した。また、名大の土屋らは、電流通電方向で異なる J_c を示す超伝導ダイオードを提案し、今回は REBCO 薄膜平坦性を制御するために反応性イオンエッチング(RIE)を用いて J_c 非対称性への影響を調べた。RIE の強度と処理時間の最適化で、 J_c 非対称性が 30% 向上することを報告した。

以降 5 件、超伝導接続の発表が続いた。九大の鈴木らは音波を用いた REBCO 線材の接続を提案した。適度な周波数を用いることにより臨界電流低下を抑えた接続の可能性を報告した。ただし、線材表面に生じた接続痕が大きくなるにしたがって、 I_c が低下する傾向があることを報告した。この点に関して線材自体の表面粗さの影響によるものでないかとの指摘もあった。続いて、物材機構の松本らから MgB_2 線材の接続に関して、接続後の熱処理により I_c の増加を報告した。特に 650°C の熱処理を 2 回行うと一番大きな I_c が得られ、2 回目の熱処理により MgB_2 フィラメントの未反応部分の減少による I_c 増加の可能性を示した。詳細な組成分析等による考察を今後予定しているとコメントした。九大の Wu らは、NbTi と Bi2223 の接続における電流分布特性を、磁気顕微法を用いて評価した。特に、接続に超伝導はんだの $(\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3})\text{Bi}_{0.4}$ を用いた場合は、はんだ部の電流密度も大きくなり、Bi2223 線材との良好な接続が得られることを示した。さらに、東理大の今井らは、 $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 線材を cold-press 法を用いて接続し、その通電特性評価を行った。接続部の悪い I_c - B 特性は、接続端部分の線材の変形やクラックが原因であると報告した。最後に中部大の筑本らから、ホール素子を用いた REBCO 線材の接続部分の電流分布特性評価を報告した。実験から得られた電流密度は線材が広く面接触している部分よりも端部の方が大きく、この部分に流れる電流が接続部分の通電特性を決定していると指摘した。

11.4 「アナログ応用」セッションは、9/19(木)午後及び 9/20(金)午前に行われた。まず 9/19(木)午後のセッションでは、アンテナや実装、アンプ、様々な検出器等、幅広い研究テーマに関する報告が行われた。静岡大の中川らは、Fishbone 型伝送線路の設計手法を開発し、実効波長が CPW よりも短い半波長共振器の設計・評価を行いほぼ設計通りの実験結果を得たことを報告した。共振器の小型化へ有用な手法・構造である。国立天文台の鶴澤らは、マルチビームヘテロダイン受信機のアンプに適用可能な Nb 系 SIS 接合による 100GHz 帯

アップコンバージョンアンプを作製し 6.1dB の利得を観測した。また産総研の浮辺らは、量子ビット集積化のためのシリコン貫通電極 (TSV) 技術に関して、ウェットエッチングによるスキヤロップの 100 nm 以下への低減と TSV 内部への TiN 成膜について報告した。埼玉大の林らは、フリップチップボンディングに向けた Pb-In 合金超伝導バンプの表面粗さに関する質量比や時間依存性に関する体系的な評価を行い、Pb と In の合金化が粗い表面の形成に関与していることを報告した。続いて超伝導転移端センサ (TES) やナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) といった超伝導光子検出器に関して、産総研、東大、神戸大、NICT 等のグループにより様々な報告がなされた。その中で NICT の藪野らは、従来よりも線幅の広いマイクロブリッジにより構成される新しい SSPD の作製を行い、波長 1,550 nm の単一光子に対して応答可能なことを実験的に示した。セッションを通じて、会場の席はほぼ埋まり時には立ち見が出るほど盛況であった。

9/20(金)午前のセッションでは、フィルタ及び SQUID に関する報告が行われた。山梨大の林らは、耐久性やコストに優れた r 面サファイア基板を用いた超伝導フィルタの設計・作製・評価を行った。JAXA 深宇宙探査地上局への採用が決定しており、これは国内の大学による超伝導フィルタ実用化として初の成果とのことである。SUSTERA の波頭らは、高温超伝導 SQUID 用の液体窒素冷却と冷凍機のハイブリッドシステム開発について報告し、冷凍機のコールドヘッドをガラスデュアーに接触させることで液体窒素の蒸発をほぼ抑えることが可能で、月 1 回の測定 (測定時は冷凍機停止) ペースで 1 年 8 ヶ月は液体窒素が保持可能なことを実証した。また豊橋技科大の古久保らは直列 SQIF に関し、SQIF を構成する各 SQUID の最大電流のばらつきを抑えた素子の開発について報告した。

11.5「接合, 回路作製プロセスおよびデジタル応用」では 24 件の発表申し込みがあった。うち 6 件は量子情報技術に特化したコードシェアセッションで発表が行われた。名古屋大学からは磁性ジョセフソン接合によるパイ遷移ジョセフソン接合を産総研で試作された超伝導チップの上に集積する技術と、その基本的な回路の構成に関する研究がなされた。まだ期待される SQUID の磁場変調パターン等は明確に得られていないが、通常ジョセフソン接合とパイ遷移ジョセフソン接合をモノリシックに集積する技術として今後が楽しみである。電気通信大学からは単一磁束量子 NOT ゲートの新しい構成に関する発表があった。従来の NOT ゲートに比べ、大幅に回路構成が簡素化できており、NAND や NOR ゲートへの適用も可能であるということであった。横浜国大からは断熱磁束量子パラメトロン関係の様々な発表があった。遅延線を用いた回路駆動法は断熱磁束量子パラメトロンの短所であるレイテンシを劇的に減少できる。大規模回路の作製も順調に進んでおり、32 語レジスタファイルの設計と動作実証が報告された。ビット誤り率の評価ではシミュレーションベースでは高い誤り率が得られる結果となり、今後その低減に関する研究が待たれる。産総研からは超伝導量子アニーリングマシンの大規模化に必須となるフリップチップに関する発表があり、世界最大規模のバンプ数を実現した。今後この技術を用いた大規模超伝導量子アニーリングマシンの実現が期待される。

本報告は、加藤孝弘（矢崎総業）、長尾雅則（山梨大学）、木内勝（九州工業大学）、山下太郎（名古屋大学）、山梨裕希（横浜国立大学）、各氏の協力により作成したものです。