

11 超伝導大分類では、12 件のポスター発表があり、83 件の口頭発表があった。

#### 11.1 デバイス系 筑波大 柏木

2022 年 9 月 21 日午後の「基礎物性 (デバイス系)」では、9 件の口頭発表があった。内訳は、THz-TDS を用いた YBCO 薄膜の複素伝導度解析が 1 件で、残り 8 件は Bi-2212 の固有接合を用いたテラヘルツ (THz) 波発振関係であった。また 9 件全てが現地発表であった。このセッションの聴講者は 30 名程度 (現地 : 20 名程度, オンライン 10 名程度) であった。西村 (京大) らは、YBCO/強磁性薄膜試料を用いて、d 波超伝導体に強磁性体が及ぼす近接効果について調べた。具体的には、THz-TDS 計測によって得られた複素伝導度を用いて、超伝導電子密度の評価を行い、それらが外部磁場により抑制されることを示した。菊池 (筑波大) らは、Bi2212-THz 波発振器のアレイ化に向けた発熱を抑えたバイアス方法としてパルス電圧での駆動方法について検討した。2 段階の階段状の電圧パルスと三角波の電圧パルスでの動作方法について検討を行い、三角波パルスでは、パルス幅の短縮により発熱が抑えられる傾向があることを示した。齋藤 (筑波大) らは、Bi2212-THz 波発振器の高出力化に向けた誘電体共振器の設計に関する報告を行った。具体的には、現状の Bi-2212 メサ構造上部に設置する誘電体共振器のサイズと、放射効率の関係について電磁界シミュレーションの結果を示した。柳生 (京大) らは、Bi-2212 メサアレイ化において欠かすことのできない配線技術であるワイヤーボンディングに関する方法を検討した。Bi-2212 メサ上部の蒸着膜や用いるワイヤー径を調整することで金線をメサ構造にボンディングできることを示した。実際にワイヤーボンディングで配線した素子の電流電圧特性についても報告があった。小林 (京大) らは、Bi2212-THz 波発振器の電流電圧特性と電磁波放射特性を同時に説明できる等価回路モデルを検証した。検証したモデルにて、実験結果を説明できることを示すとともに、同モデルを用いて、2 アレイ素子での並列および直接動作についてもある程度説明できることを示した。齋藤 (NIMS) らは、Bi-2212 ウィスカーを用いた THz 波発振素子の発振特性の解析を行った。これまでにバルク結晶のメサ構造から得られている発振周波数特性との違いから、屈折率が異なる可能性があることを示すとともに、その屈折率をベースにした電磁界シミュレーションにより、現状のウィスカー素子からの電波放射の周波数特性や偏光特性が説明できることを示した。中川 (筑波大) らは、Bi2212-THz 波発振器用の結晶チップ作製のためのウェットエッチングに関する報告を行った。これまでの酸溶液の代わりにアルカリ溶液を用いることで、アンダーカットを抑え、厚みのある結晶チップが作製できることを示した。作製したチップからはこれまでと同様に形状で決まる発振が得られることも示した。柏木 (筑波大) らは、Bi2212-THz 波発振器用の結晶チップの熱

処理および結晶性と発振特性の関係について報告を行った。明瞭な発振を得るためには、若干のアンダードープで、結晶方位の分布が小さい結晶チップを用いることが望ましいことが示された。山口（筑波大）らは、Bi2212-THz 波発振器の応用として、小型冷凍機を用いたテラヘルツ波発生システムの構築とそれを用いた THz 波透過型イメージングの装置について報告を行った。構築したシステムの説明とともに、Bi2212-THz 波発振器で発生した 0.7 THz の周波数を用いて、実際に IC カードの内部構造が非破壊で明瞭に撮像できることを示した。

### 11.1 材料系 山梨大 長尾

「基礎物性（材料系）」では、20 件の口頭発表があった。

銅酸化物超伝導体関連 7 件、鉄系超伝導体関連 5 件、カルコゲナイド系超伝導体関連 2 件、MgB2 超伝導体関連 1 件、第一原理計算や機械学習を用いた超伝導体探索に関する研究 4 件、新規測定手法に関する研究 1 件、であった。

機械学習による新規超伝導体の探索が精力的に進められており、非超伝導体に関するデータを入れることで、超伝導転移温度が過剰に見積もられるのを抑えられることが報告された。多くの化合物を形成できる ThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 型化合物群で BCS 型超伝導体について第一原理計算による物質探索や最近研究が盛んな水素化物超伝導体に関する計算による研究が報告された。

表面弾性波デバイスを使った表面超伝導測定方法に関する新しい手法について報告があった。

カルコゲナイド系の超伝導体の研究として、BiS<sub>2</sub> 系超伝導体に Sb をわずかに置換すると超伝導が消失することやミスフィット層状化合物(SnSe)<sub>m</sub>(NbSe<sub>2</sub>)において非超伝導層の数を変えた単結晶の育成と評価について系統的な報告があった。

鉄系超伝導体関連では、ペロブスカイトの大きなブロック層を有する鉄系超伝導体において数百マイクロメートル程度の単結晶育成の報告や FeSe 極薄膜において保護層の有無が超伝導特性に影響をあたえることなどが報告された。

Mg 蒸気を用いた気相輸送法によって超伝導特性が均一な MgB<sub>2</sub> バルクが作製できることが報告された。

銅酸化物超伝導体に関する研究では、REBCO 溶融凝固バルクにおいてポストアニールのプロセスが捕捉磁場に大きく影響することや R サイトをハイエントロピー化した R-123 超伝導体の針状単結晶(ウィスカー)の育成に関する報告があった。また、(Pb,Cu)系に関する報告が 3 件あり、酸素不定比性や元素置換などに関する報告があった。

様々な超伝導体を対象に活発な議論が展開された。ハイブリット開催であったが、対面でセッションが行われている部屋が満員となり、一部視聴者が別の部屋で視聴することになる盛況ぶりであった。対面による講演会が重要であることを改めて認識した。

## 11.2 関西学院大 尾崎

11.2 「薄膜，厚膜，テープ作製プロセスおよび結晶成長」では9月21日午前に6件のオンラインでのポスター発表と9月21日午後に講演奨励賞受賞記念講演を含めた，13件のハイブリットでの口頭発表があった。内訳は，Bi系線材で2件，RE系超伝導膜で12件，鉄系超伝導膜で2件，Bi-S系超伝導体で1件，Nb<sub>3</sub>Al薄膜で1件，PLD法に関する検討が1件であった。武田(物材機構)氏から，前回の講演会での講演奨励賞受賞記念講演として，(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>[Bi-2223]線材の超伝導接合について報告がなされた。武田らはBi-2223線材の超伝導接合組んでおり，接合  $I_c$  制御指針の確立を目指し，両面研磨法で超伝導線材の接合を行った。一軸プレス後に1次熱処理した試料の  $n$  値は，いずれも  $n > 12$  と再現よく高い値が得られた。また，中間一軸プレス(圧力  $P_{IP}$ : 100 – 200 MPa)後に2次熱処理を行ったところ， $P_{IP}$  が 150 – 200 MPa において高い  $n$  値と高い  $I_c$  が得られた。微細構造観察結果から，これは中間層の高密度化が寄与していると報告した。小澤(青学大)らは，YBCO 薄膜の高  $J_c$  化を目的とし，金属組成を精密に調整した溶液を用いて微量不純物添加 YBCO 薄膜を FF-MOD 法を用いて作製した。Ni を 0.05 – 0.2% 超微量添加すると 20 及び 40 K で  $J_c$  が向上することが確認された。0.5 % 添加すると  $T_c$  及び  $J_c$  が低下した。さらに添加量増加に伴い， $T_c$  は低下するが，再度酸素アニールを行うことで  $T_c$  が大きく向上した。これは Ni の一部が CuO<sub>2</sub> 面から CuO 鎖の Cu サイトへ移動したことによると報告した。松本(九工大)らは，GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (GdBCO) に体積分率で 5% 程度の BaHfO<sub>3</sub> (BHO) を添加した薄膜試料を作製し，その組織を透過型電子顕微鏡で詳細に観察した。BHO 添加量を 5 から 5.5% に変化させると，GdBCO マトリックス中に成長した BHO の構造が柱状から層状に変化する。この構造転移の原因をマイクロメカニクスによるエネルギー解析から説明した。松本(物材機構)らは，多芯 YBCO 薄膜形成に向け，フォトリソグラフィ技術で作製し，バンク構造及び，その上に成膜した YBCO について報告した。バンク構造は STO 基板上に Zr, Nb, Ag により形成され，いずれの場合も，MO から YBCO が寸断された構造が実現できていることが示された。Zr 上では配向が乱れた YBCO がバンクを覆うように形成されていたのに対し，Nb 上では YBCO のきれいな結晶が形成されていなかった。また，Zr より Nb のほうがシャープな界面を得られるとのことであった。

## 11.3 九州産業大 末吉

11.3 「臨界電流・超伝導パワー応用」では9月22日の午前に9件の口頭発表があった。末吉(九産大)らは，3種の重イオンビームにより高温超伝導薄膜中に線状，短尺状，球状の欠陥を導入し，磁場中の  $J_c$  特性への形状および導入量の影響について系統的に調べ， $J_c$  の絶対値の増加には磁束ピン止めに有効な形状も必要であるが，導入量に対して  $J_c$  を低下しないことも重要であることを実験的に示した。土屋(東北大)らは，PrBCO バッファ層上に成膜した YBCO 薄膜を超伝導ダイオードとして用いて，マイクロ波信号の 1GHz 帯の整流効果の検証を行った。1GHz 近くの周波数で問題になる熱起電力の影響を Cu 基板などで

抑制することで、1GHz の交流信号に対して整流作用が得られることを確認した。Luo（東北大）らは、Cu/Ag シース Ba122 鉄系超伝導多芯線の臨界電流の励磁・減磁および磁場角度増減時に現れるヒステリシス特性は、粒界弱結合に起因しており、*c* 軸方向の電流と面内方向の二つの電流モードを考慮することで定性的に説明できることを報告した。呉（九大）らは、高温超伝導線材に対する液体ヘリウム中のリール式での磁気顕微鏡法による磁場中の連続  $I_c$  測定を試み、1000 A 近くの高  $I_c$  領域での測定が可能であることを報告した。また、本測定によって得られた 4.2K, 1T の  $I_c$  値は、77K, 0.05T での  $I_c$  値と強い相関があることを示した。木須（九大）らは、深層学習を用いた画像認識をリール式磁気顕微鏡観察の結果に適用し、REBCO 線材における欠陥の影響下の  $I_c$  分布と健全部位の  $I_c$  分布の分離を行うことで、局所欠陥が線材の  $I_c$  分布への程度影響を与えているかを定量的に評価できることを示した。筑本（中部大）らは、超伝導ケーブルコアに流れる超伝導電流の自己磁界の影響を把握するために、ホール素子を用いてケーブル周囲の磁場分布の測定を試みた。超伝導線材 2 本へ同時に通電時の磁場分布は、各線材に通電時の磁場分布の合成によって再現できることを示し、本測定によりケーブルコア周囲の磁場分布を測定できる可能性を示した。筑本（中部大）らは、REBCO 線材の銅安定化層を直接固相反応拡散した低抵抗接続の再現性を高めるために、熱処理時の雰囲気ガスの影響について報告した。熱処理時の雰囲気ガスの湿度に対して接続抵抗が低くなる傾向があり、加圧、雰囲気ガスなど制御することで、はんだ接続と同等またはそれ以下の接続抵抗が得られることを示した。町（産総研）らは、機械的強度特性も期待できる貼り合わせ REBCO 線材について、各種曲げに対する機械強度評価について報告した。フラットワイズ曲げ、エッジワイズ曲げでは 10 mm 直径の曲げまでは  $I_c$  の値はわずかに増加し、ツイスト曲げでも 3 回捻ったもので 80%以上の  $I_c$  の値を維持できることを示した。岩崎（九工大）らは、超伝導線材を用いた永久磁石の磁気浮上において強い反発力を得られる超伝導線材の配置と構造について有限要素法を用いた電磁界解析により調べた。浮上対象となる 4 極磁石に対して、超伝導線材を複数層重ねたものを 4 極磁石の周方向に配置した構造で、十分な反発力を得られることを示した。

#### 11.4 岡山大 堺

11.4「アナログ応用および関連技術」では、9月21日午後と9月22日の午前に、あわせて25件の口頭発表が行われた。9月21日午後はTESや光子検出器に関する発表があり、山森（産総研）は、共焦点顕微鏡と超伝導転移端センサ（TES）を組み合わせた光量子顕微鏡の実現を目指し、単一光子検出器アレイで広帯域化を実現できる素子開発に関する報告を行った。40 chの多重読み出し回路を試作し、これまでに10 chの単一光子の同時読み出しに成功したことを示した。知名（情通機構）らは、衛星量子通信などで求められている波長2  $\mu\text{m}$  帯の高性能な単一光子検出器を実現するため、超伝導ナノストリップ単一光子検出器（SNSPD）の光結合効率と光吸収率を向上させることで検出効率の向上を目指した。発表では誘電体多層膜を用いた波長2  $\mu\text{m}$  用 SNSPD の作製および性能評価を行い、内部検出効率

が 0.77K で 90%程度になることを報告した。成瀬（埼玉大）は、暗黒物質の検出に向けて広い検出面積，高い位置分解能，高エネルギー分解能を実現するため，960 個の力学インダクタンス検出器 (KID) アレイを作製しエネルギー分解能を制限している性能指標を調査した。その結果，エネルギー分解能は Q 値よりも読み出し雑音に強く支配されていることを明らかにした。9 月 22 日の午前は，SQUID やコイル応用に関する発表があり，江畑（豊橋技科大）は，走査型トンネル顕微鏡 (STM) の探針プローブに超伝導体を適用し，開発した超伝導プローブを用いた STM の測定結果について報告を行った。機械加工と FIB により YBCO バルクを尖端曲率半径が 1  $\mu\text{m}$  以下の探針を作製し，STM の校正用回折格子を測定した結果，幅 5  $\mu\text{m}$  の Si ウエハ上の SiO<sub>2</sub> ステップのパターンを明瞭に識別でき STM のプローブとして十分な性能を有することを明らかにした。押本（山梨大）は，無線電力伝送におけるコイル Q 値の向上を目指し，高 Q 値バルクコイルの開発とその特性評価について報告した。超伝導バルクからコイルを作製し 2 枚のサファイア基板で支持した状態で液体窒素により冷却し，ネットワークアナライザで Q 値を測定した。その結果，銅コイルと比較して 12 倍の Q 値を達成し，さらに超伝導バルクコイル表面の凹凸を軽減することで Q 値の改善が見込めることも示した。

#### 11.5 産業技術総合研究所 竹内

「接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用」では、9/22（木）の午後に 7 件の口頭発表が行われた（現地発表 6 件、オンライン発表 1 件）。デジタル応用に関しては、横浜国大より大規模 SFQ システムに向けた複数 SFQ クロックジェネレータの同期方法；名大等より量子応用に向け HFQ を用いた低電力な T フリップフロップおよびアンシャント回路；横浜国大等より AQFP と SFQ を組み合わせたストカスティック数生成器に関する報告があった。量子応用に関しては、横浜国大より位相を  $0/\pi$  で制御可能な量子ビット制御用マイクロ波生成器；NICT 等より高い均一性を有する TiN 薄膜の開発及び高 Q 値 TiN 共振器に関する報告があった。また、上記以外の研究に関しては、広大等より JJ 回路を用いた擬似的ホーキング輻射の理論研究が報告された。

本報告は、柏木隆成(筑波大学)，長尾雅則(山梨大学)，尾崎壽紀(関西学院大学)，末吉哲郎(九州産業大学)，堺健司(岡山大学)，竹内尚輝(産業技術総合研究所)，各氏の協力により作成したものです。