

2018年度若手セミナー・支部研究成果発表会

- ・主催：低温工学・超電導学会 九州・西日本支部
- ・共催：島根大学
- ・日時：2018年8月28日(火) ～ 29日(水)
- ・場所：島根大学松江キャンパス 教養講義室棟1号館1階102教室
〒690-8504 島根県松江市西川津町1060



・URL：
http://www.shimane-u.ac.jp/nyushi/transport_access/campus_map/campus_map01.html

・プログラム

8月28日(火)：支部研究成果発表会

9:00～9:10 開会の挨拶

9:10～12:00 参加学生からの最近の研究成果発表

8月28日(火)午後に同会場で開催される第4回材料研究会／九州・西日本支部合同研究会とともに、同日夕方から懇親会を開催

8月29日(水)：若手セミナー

講義

圓福 敬二 (九州大学)

内藤 智之 (岩手大学)

研究室見学 (島根大学 山田・船木研究室及び、共通設備)

11:50～12:00 閉会の挨拶

- ・参加費：学生：1,000円，一般（正会員）：2,000円，一般（非会員）：3,000円
(テキスト代を含みますが、昼食、宿泊費は含みません。同時に学会への入会申込みをされる方も正会員とみなします。開催当日までに支部事務局の銀行口座宛お振り込み下さい。)
- ・申込締切：2018年8月3日(金)
- ・申込方法：参加申込書にご記入の上、下記事務局宛にお送り下さい。

低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 事務局 (九州大学 木須研究室内)

Tel : 092-802-3678 Fax : 092-802-3677 E-mail :

jcryo_qw@sc.kyushu-u.ac.jp

- ・参加費振込先：福岡銀行 黒門(くろもん)支店 (店番 215) 口座番号：普通 1612494
口座名義：低温工学・超電導学会九州西日本支部事務局
会計幹事 木須 隆暢(きす たかのぶ)

・問合せ先：2018 年度 九州・西日本支部 若手セミナー 世話人

島根大学大学院 自然科学研究科 物理・マテリアル工学コース 船木 修平

Tel : 0852-32-6406 E-mail : s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

2018 年 8 月 28 日から 29 日に、島根県松江市の島根大学松江キャンパス 教養講義室棟 1 号館 1 階 102 教室にて、九州・西日本支部若手セミナー・支部研究成果発表会が行われた。島根大学、九州工業大学、鹿児島大学から合計で 13 名の学生と、大学、企業などから 13 名の参加者の合計 26 名で行なった。

初日には 8 人の学生から、最近の研究成果発表が行なわれた。また二日目には講義が 2 件と、島根大学総合理工学部の山田・船木研究室を中心に見学会があった。充実した試料作製装置や環境、そして最新の SQUID 磁力計と再凝縮装置を組み合わせた地方大学ならではの上手な運用の方法を知ることができた。

2003 年 12 月に低温工学・超電導学会秋季研究発表会が、また 2009 年 12 月に Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2009(ACASC2009)が松江市で開催されているが、初めて松江市に来られた参加者も多かった。松江城、出雲大社などの国宝があり、また松平不昧公没後 200 年を記念して様々な行事が明々庵をはじめとして行なわれており、参加者は松江市も楽しんだ様子だった。

以下、講義と研究成果発表の詳しい内容についてまとめる。

講義

内藤智之先生（岩手大学）

「高温超伝導体の磁束状態と超伝導バルク磁石の開発」

講義は、完全反磁性とかのごく基本的な話から始められた。また磁束ピン止め効果の基本的な原理について説明があった。高温超伝導体として銅酸化物 CuO_2 面を持つ材料の紹介があり、異方性について異方性パラメータを通じて説明があった。この影響で、異方的な磁束構造を示す。たとえば c 軸方向に磁界をかけたときに異方性が小さければ 3D、大きければ 2D になると言われている。 ab 面内に磁界をかけると、 CuO_2 面を横切る方向には動きにくい。また量子化磁束の断面は楕円になる。高温超伝導体では、3つのエネルギー弾性エネルギー、熱エネルギー、ピン止めエネルギーそして異方性が、磁束構造に様々な影響を与えている。1957 年に磁束格子状態は初期にアブリコソフが格子を組むことを予言して、2003 年にノーベル賞を受賞している。ビッター法で三角格子を確認することができる。走査型トンネル顕微鏡でも見ることができている。Hess らによる。従来の低温超伝導体の磁場中での電気抵抗の温度依存性は磁場が大きくなるについて、単純にシフトしているように見える。ここから上部臨界磁界 H_{c2} を見ることができる。ちなみに超伝導体における磁場中での電気抵抗というのは磁束の運動によって生じる。これが高温超伝導体の場合には、

ゼロ磁場でさえ転移幅が広くて、転移温度が決められないくらいである。これは高温での熱揺らぎに由来している。そのために相転移線が消失している。しかしちゃんと反磁性もあり、超伝導状態になっている。またビッター法で三角格子を観察することもできる。ただし低温のみである。

高温では磁束格子が溶けるという概念が提案されている。リンデマン条件というのがあり、それを使って定義をすることができる。また、相転移の説明があった。1992年 Safarらによって磁束格子融解を電気抵抗率から示した。とびとヒステリシスを観測したが、電気抵抗率は熱力学量ではないので、直接的な証拠とはなり得なかった。1995年に Zeldovらが磁場のとびを測定した。ここから一次相転移の存在が確立されていった。また1999年に鈴木らが中性子小角散乱をもちいて磁束格子融解を示した。結局、相図は融解曲線と不可逆磁界があらわれる。

ここでピン止めエネルギーが、弾性エネルギーより大きくなると、固体であるが非晶質になり、磁束ガラス状態が現れる。1989年に Fisher が理論的に提案している。液体とガラスの間は二次の相転移なのだが、熱力学的量での観測はなくて、電気抵抗率から説明されている。相図としては、融解曲線はサンプル依存性がないが、ガラス融解曲線はサンプル依存性があり、ピンニングに依存することが分かる。なぜ高磁場でガラス相になるのかというと、高磁場でピン止め中心を使い果たすからである。これらをまとめて相図を描くことができる。ちなみに相図は酸素欠損の影響を大きく受けて変化する。

後半は超伝導バルク磁石の開発の話を行った。まず超伝導バルク材の紹介をされた。センチサイズの超伝導体の塊をよぶ。ここでは RE-Ba-Cu-O 系と MgB_2 はテスラ級磁場を実現できる。また強い磁気力場（吸引力）を作ることができる。開放空間でテスラ級磁場を利用可能となる。そのために装置開発の自由度が増加している。たとえば永久磁石の代替や新しいアプリケーションが考えられてきている。なぜ磁石になるかというと、超伝導電流が内部に流れているからである。バルク超伝導体マグネット以外にも超伝導マグネット、電磁石、永久磁石などがあり、それらを比較した。バルク超伝導体マグネットは、そこそこのコストでそこそこの磁場を発生させることができる、いいポジションにある。着磁の方法は磁場中冷却着磁(FC)とゼロ磁場中冷却着磁(ZFC)とパルス着磁(PFM)がある。このなかでFCがよく使われる。補足磁場を向上させるためには、臨界電流密度をあげる、大型化、PFMでは着磁技術の向上があげられる。大型の単結晶を作る必要がある。いわゆる溶融法が開発された。補強をしないと、バルクが壊れる。現在は Durrel らが 26K で 17.6T の着磁が SUS リングで補強した Gd 系バルクで実現している。

最後に MgB_2 によるバルク超伝導体マグネットの紹介をおこなった。特徴としては軽量であり、弱結合問題がない。また高機械的強度をもつ。ただ、硼素の値段が高い。作製法としては in-situ 法と ex-situ 法がある。現在は 5T が最大で 2014 年ごろで開発はほぼ停まっている。時間の関係で、モーゼ効果の利用について有機半導体薄膜の磁場配向制御の紹介と、岩手大で開発している MRI,NMR 用バルク磁石の紹介をして講演を締めくくった。

Q 磁束量子の状態について、磁束ガラスと不可逆磁界の関係を教えて欲しい。

A 融解曲線の下に現れる。そこは磁束格子があるので、長距離秩序が現れている。

Q 不可逆磁界と融解曲線の違いは。

A 測定で決定することができる。不可逆磁界はサンプルサイズや臨界電流密度に依存し、融解曲線は依存しない。

Q アプリケーションは？

A MRI, NMI は有用なアプリケーションと考えている。MgB₂ では粒界の問題がなく、人の頭が入るサイズを作ることができると考えている。

圓福敬二先生（九州大学）

「超伝導を用いた先端エレクトロニクス」

最初に、気楽に聞いて下さいと講義を始められた。冷やさないといけないのでデメリットと言われているが、冷やすと熱雑音が小さくなるので微弱な信号を検出しやすくなる。エネルギーギャップが小さいので、高感度に応答できる。また量子効果を利用できる。これらが超伝導エレクトロニクスと言われる。どこまで冷やすかが問われるが、77K、4.2Kが一般的で、最近では100mKも最近量子効果を利用するのによいということで、注目されている。デジタル技術、アナログ技術を適宜組み合わせている。

デジタルに関して、まず情報通信について説明された。超伝導デジタル回路はシリコンに比べて3桁ほどエネルギーが小さくて注目されている。15 から 50GHz で動作させているプロセッサがある。また量子コンピュータに超伝導量子ビットをつかって実現使用としている。また(擬)量子コンピュータとして D-wave を紹介した。2017 年には 2000 量子ビットマシンを発売している。

次にアナログとして、超伝導センサを使った応用について説明があった。超伝導は直流から X 線までカバーできる。大きく、電波技術、光・高エネルギー粒子、医療・バイオ、検査・探査の 4 つの分野で活躍している。最初に気象レーダ用超伝導フィルタユニットの紹介があった。銅のフィルタに比べて圧倒的に遮断性能が高いことが分かる。現在東芝が開発した機器を気象庁で使っている。沢山のバンドを使っているので、フィルタがとても重要になっている。電波天文でも高感度な超伝導センサが活躍している。また固有ジョセフソン接合による THz 発振器を紹介した。他の素子に比べて優れていることがわかる。

準粒子励起を用いた研修を利用して光などの検出器が使われている。これは超伝導体のエネルギーギャップが小さいことが有利に働いている。つまり少ないエネルギーで大きな差を得ることができる。たとえば抵抗変化が極端に検出される。これを利用した材料分析用エネルギー分散型 X 線解析装置では、従来の半導体検出器では見えなかった多数のピークをスペクトルに見いだすことができる。また質量分析計にも利用されている。

量子暗号通信にも超伝導エレクトロニクスが利用されている。単一光子の受信が重要であり、超伝導単一光子検出器が開発されて通信性能の飛躍的向上に繋がっている。

次に「検査・探査」。野外での使用が必要であり、高温超伝導体が使用される。周波数が高くないので SQUID が使われている。pT から nT で利用されている。資源探査ではループコイルにパルス電流を流して、その応答として磁場を検出する。また食品の中の不純物（ステンレス針）の検出器も作られている。

「医療・バイオ」の紹介があった。ニューロンに電流が流れると磁界が発生するので、脳磁界、心臓磁界を検出する。あるいは磁石による磁界を検出することにより、マーカーとしての磁界を高感度に検出する。脳磁計が世界で数百台使われている。脳機能マッピングに利用されている。また心磁計や脊髄を伝搬する神経信号の検出をする脊磁計もある。もちろん超伝導 MRI 装置は一般に使われている。ここでは高磁界ではなくて、超低磁場 NMR/MRI の紹介があった。たとえば $46\mu\text{T}$ では金属の影響を受けない。アルミ缶の中の試料計測ができる様子が紹介された。脳の機能についても $130\mu\text{T}$ で観測できた例がある。

最後に、圓福先生が開発されている磁気マーカーを用いたバイオセンシングの紹介があった。抗原抗体反応を利用して、特定のタンパク質を検出するのに、磁気マーカーを修飾し、これまでの蛍光による手法ではできない観測ができるようになった。たとえば 3 次元的に分布している磁気マーカーの様子を可視化することに成功している。

これらをまとめて科学の基盤技術として利用されているが、さらに産業にも利用されるように研究を進める必要があると講義を締めくくった。

Q SQUID はもっと大きくて特別に思っていたが、実際には小さいようだ。

A アタッシュケースサイズで十分に使うことができる。

Q 鉱床探査では深さ方向にどのくらいできるのか？

A 脳磁図と同じで、数カ所移動しながら測定して 3 次元的に見るようになる。だいたい km オーダーになる。分解能は 50m 単位であり、導電率が高い低いかわかる。もし当てるとすごいお金になるので、成果は非公開になっている。高温超伝導体のもっとも大きなアプリケーションである。

Q 材料へのリクエストはあるか？

A 磁束を伝達しなければならない。永久電流が必要などがある。低温超伝導体は Nb で超伝導接合ができているが、高温超伝導体では超伝導接合ができていない。薄膜とテープの低抵抗接合ができるととてもいい。

(九州工業大学 小田部荘司)

九州・西日本支部 2018 年度 支部研究成果発表会

1. 「REBCO 線材を用いた全超伝導同期電動機の交流損失に及ぼす電機子巻線形状の影響」
工藤 和真 (鹿児島大学)

モータの巻線を超伝導化することで高トルク、低損失を実現することができる。そこで電機子巻線に着目し、形状を鞍形にすることで交流損失を低減できるのではないかと考えた。

本研究では鞍形コイルとレーストラック型コイルで交流損失を比較し、また鞍形コイルにすることで I_c への影響があるのかを調査した。その結果、鞍形コイルにすることで交流損失が低減し、形状による I_c への影響は見られなかった。

2. 「ポインティングベクトル法を用いた三相同軸超伝導電力ケーブルの交流損失測定」

鶴田 絢也 (鹿児島大学)

電力ケーブルを超伝導にすることで小型化、大容量化、損失の低減が実現できるが、さらに三相同軸高温超伝導ケーブルにすることで低コスト、低損失になると考えられる。本研究では三相同軸高温超伝導ケーブルの交流損失を、ポインティングベクトル法を用いて測定した際の問題点と解決策を議論した。その結果、見かけ上観測されるエネルギーフローがあることが明らかになり、その発生要因が軸方向磁束による誘導電圧であることが分かった。また、その誘導電圧をキャンセルする方法を提示し、キャンセルコイルの設計を行った。

3. 「FEMによる超伝導バルクを用いた磁気研磨装置の評価」

張 睿哲 (九州工業大学)

中空加工技術として旋盤加工や磁気研磨加工があるが、様々な欠点があり、それらを改良するために磁気浮上工具 SUAM が提案されている。その SUAM による複雑な内部加工に必要な条件を満たすために、いくつかのモデルを考案し、有限要素法により各モデルにおける圧力と回転トルクを求めた。その結果、下部に磁石を配置し、上部の磁石を拡大し、更に上部の磁石に重りを乗せることにより、目標の圧力と回転トルクを達成することができた。

4. 「点接合分光測定による超伝導ギャップと臨界温度の圧力依存性の研究」

國中 柁希 (島根大学)

BCS 超伝導体では $\Delta_0/k_B T_c = 1.76$ で一定であることが知られているが、圧力下での測定は行われていない。そこで本研究では点接合分光測定を用いて圧力下で BCS 超伝導体のスペクトルを測定した。その結果、圧力下でエネルギースペクトルが観測でき、 $\Delta_0/k_B T_c = 1.76$ と一定で、BCS 理論が成り立つことが確認できた。

5. 「超伝導コート線材における縦磁界効果を利用した臨界電流密度特性の膜厚依存性の評価」

米中 友浩 (九州工業大学 情報工学府)

電力損失を削減するため、超伝導層の膜厚が異なる試料を縦磁界・横磁界状態で測定し、膜厚の変化による J_c - B 特性の振る舞いを調査した。Super0x 社製 $GdBa_2Cu_3O_7$ 長尺コート線材を超伝導層の厚さのみ違う A - D 試料を選択し、ブリッジ加工をした。実験方法について、直流四端子法を使用し、温度 77.3 K, 70.0 K, 65.0 K、磁界 0 - 0.5 T の環境で行っ

た。結論について、膜厚が薄すぎると結晶成長が不十分なため J_c が小さい、厚すぎると結晶配向性の悪化により減衰が大きい。膜厚依存性を述べるには、細かい間隔でより厚い試料まで測定する必要がある。

6. 「熔融水化物法 $REBa_2Cu_4O_8$ 膜の熱分解処理によって形成した $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 膜の特性評価」

宮地 優悟 (島根大学 総合理工学研究科)

RE123 と RE124 超伝導体の特徴を比較し、熔融水酸化物法を用いて作製した RE124 に熱処理をすることで RE123 相変態を得た。熱処理時の酸素圧力を下げることで、600 - 625 °C 以下の温度で相変態に成功し、温度の上昇に従って Eu124 \rightarrow 247 \rightarrow 123 へ相変態することが確認された。相変態によって得られた Eu123 は、バルク値 (93.7 K) に匹敵する高い T_c を有する。また、NdGaO₃seed/LaAlO₃基板の使用でクラックフリーGd123 膜の形成に成功し、Gd 元素の使用においても、RE124 \rightarrow RE123 で T_c が向上した。

7 「RE123-RE124 相変態を用いた熔融水酸化物法 Sr-Y124 の Sr 置換サイトの検証」

大川 真弘 (島根大学 自然科学研究科)

YBa₂Cu₃O_yの酸素量制御と酸素量による T_c の変化、ホール濃度と T_c の関係とYBa₂Cu₄O₈の諸特性について調査した。アニール条件から酸素量を制御し、ホール濃度を変化させて特性を測定・評価したところ、SQUID 測定によるO₂-anneal試料は non-dope に比べて Sr, Ca を添加した試料は T_c が低かったことから、酸素を充填することで Sr-dope は Ca-dope と同様にオーバードープ状態となっていることが予想され、低温合成で Sr/Y 置換の可能性があることが分かった。

8. 「新規 REBCO 線材に用いる導電性Nb-TiO₂中間層への酸素アニールの影響」

長瀬 侑弥 (島根大学)

Y123 とTiO₂の諸特性から、酸素分圧と温度の変化がNb-TiO₂の電気特性に与える影響について調査した。酸素アニール前では、XRD 測定によるSrTiO₃ (100)基板上にNb-TiO₂が2軸配向することを確認した。 ρ -T 測定による 77 K で低抵抗率(0.73 m Ω cm)を確認し、導電性中間層として期待できるが、酸素アニールによって抵抗率が増加され、さらにアニール温度の上昇に伴って電気抵抗率が増加された。

(九州工業大学 米中友浩、張睿哲)



写真 1：山田・船木研究室の試料作製室見学



写真 2：集合写真