

2020年10月31日に、Zoom上で九州・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、九州大学、福岡工業大学、九州工業大学、鹿児島大学から合計で21名の学生と、大学、企業などから15名の参加者の合計36名で行なった。前日には第2回材料研究会／九州・西日本支部合同研究会がやはりZoom上で行なわれていて、連続して行なわれたことから同じ参加者も多くおられた。

午前には3人の講師による若手セミナーでの講義があった。そして午後10人の学生から、最近の研究成果発表が行なわれた。

昨年の若手セミナー・支部研究成果発表会ではSkypeを使って、島根大学に中継をおこなった。今年は新型コロナウイルスの影響でオンラインでの研究会がたくさん行なわれるようになり、隔世の感がある。

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。

## 若手セミナーにおける講義

### 三浦峻先生（九州大学）

最初に三浦先生の自己紹介があり、名古屋大学の吉田隆先生のところで学位をとり、九州大学の岩熊先生と合流して4年目になるということだった。

REBCOの紹介から始まった。直流応用ではMRI、NMRがあり強磁場かつ静磁場が必要となっている。直流応用では遮蔽電流磁場の問題がある。遮蔽電流で磁場が乱されるのでppmオーダーの磁場を発生しなければいけないときに問題になる。交流応用では変圧器、発電機、モータがあり、交流損失が一番大きな問題である。定常的にも交流損失は発生するが、事故のときにも耐えられるように設計する必要がある。次に大電流量化を進める要請が、直流でも交流でもある。数千アンペアを支えるときには複数の線材の組み合わせが必要となる。岩熊・三浦先生のグループではフィラメント化（細線化）と転位並列導体を用いることにより解決してきた。遮蔽電流磁場、交流損失、安定性、系統擾乱、大電流量化に対応することができるようになる。交流損失は、履歴損失、結合損失、動的抵抗損失および導体構成に伴う付加的損失に分けることができる。履歴損失の正体は量子化磁束が移動するためである。損失＝力×距離×本数である。したがって、磁束が動く距離は小さければいいので、超電導体の厚さを小さくすればよい。ではどのようにして超電導体の厚さを小さくするかというと、REBCO線材のときには線材製作後にレーザースクライビングをつかって幅方向に分割する。現在では4mmの幅を20分割することができる。実際に鞍型ピックアップコイルで短尺線材の磁化測定をおこなうと、スクライビングによって分割すると予想どおりに損失を小さくすることができている。また直流応用で問題になる遮蔽電流磁場についてもスクライビングによるフィラメント化により低減することができることを確認している。

さらに結合損失について議論をおこなった。金属系超電導体では母材に金属を使っているため、常伝導電流が流れると結合損失が発生してしまう。これに対してREBCO線材ではスクライビングで切り離しているため結合損失は心配ない。しかし、安定性の確保が問題になる。金属系超電導体での金属母材は安定性に寄与している。REBCO線材ではサブクール液体窒素冷却をすれば比熱が4Kに比べて100倍とかなり大きくて安定性は確保できる。次に並列導体について紹介を行った。並列導体は単純であり、多層に重ねて巻くというアイデアである。しかし単純に行くと素線間の結合損失が問題となる。そこでどのようにして結合損失の問題を解決するかというと、位置の入れ替え（転位）を行う。これにより、鎖交磁束が打ち消されて遮蔽電流が流れなくなり、付加的な損失が無くなる。3本の素線を並列化したときも電流が均等になるように適切に転位を入れることにより付加的な損失をゼロにすることができる。これらは実際にモデルコイルを作り、実験的に電流が均流化されていることを確認している。この技術により交流損失は履歴損失のみとなる。まとめるとスクライビングと転位並列導体を用いることにより低交流損失化と大電流化を実現している。

最後に電動機について解説があった。三相同期電動機について研究しているので、その説明があった。この電動機は固

定子（電機子巻線）があり、中心に回転子（界磁巻線）がある。固定子に三相交流が流れると回転磁場が発生し、そこに回転子の磁石がはいっていると同期速度で回転しはじめる。これを超電導化すると小型にしてさらに磁束密度を上げることができるので出力密度が高くなる。さらに普通は鉄心を使うが、鉄心を必要としないので軽量化することができる。したがって移動体輸送機用の電動機に利用することができる。そこで航空機の電気推進化について検討が進んでいる。ただ高出力密度 20–25 kW/kg（従来は 5kW/kg）を要求されている。また上空では耐電圧低下であり、低電圧での動作が求められている。したがって超電導化は有利である。まだ数 kW/kg のものですら製作されていない。ここでは全超電導電動機 の概念設計・電磁解析について紹介があった。鉄シールドのある電動機は重量が重くなる。超電導シールドであれば 20–48 kW/kg くらいになる。ただ、交流損失増加の原因になる。したがって、鉄シールドと超電導シールドのハイブリッドも検討できる。

質問は電動機のシールドにおける交流損失についてであった。また ASC2020 がちょうどこの研究会と併行して開催されており、三浦先生に注目している発表をお聞きしたところ、下記であった。

発表者：Enric Pardo

Wk2L0r2C-03 - Low AC loss in the REBCO stator of a 1 MW motor for aviation

鈴木恵友先生（九州工業大学）

超電導浮上のデモを見て、これを応用できないかと思って今回の工具を考えついた。機械加工では、加工形状がますます複雑になって工具干渉などの問題がある。そこで超電導浮上を利用して、工具を非接触で安定浮上させてさらに回転させる。これにより研磨面を加工物に接触させて加工することができる。実際に鈴木先生の研究室では Gd 系バルク超電導体を 4 つ使い、さらにネオジウム磁石を浮上させる加工工具を開発している。他のグループでは磁性体を使い、磁石で動かすことにより同じことを実現しているが、加工に制限がやはり残ってしまう。

SUAM (superconductor assisted machining) では加工力・工具浮上量の改善が必要で、ダブルマグネットを検討している。これは浮上用のマグネットを下部においたマグネットを使って、さらに強力に固定するものである。

ここで、実験結果として磁場中冷却で初期位置を変えたときに超電導バルクを固定する力として保持力の変化を示した。ここではギャップは 9–12 mm となっている。この実験結果を説明するために、浮上に使っているネオジウム磁石の磁束密度を測定している。

新しいダブルマグネット用の装置開発では、従来テフロンで超電導バルクカバーを作っていた。だが、アルミにしてその外側に断熱材を配置している。冷却はガス冷却が理想的であるが、コストの関係などから液体窒素を用いている。

測定する加工力は 4 つに分けて考えている。反発力、引力、横方向の復元力とトルクに相当する駆動力である。これらを総称して保持力と呼んでいる。特に引力は加工効率に直結するので重要である。

結果として、ダブルマグネットを利用することにより従来 5 N の引力だったものが最大 13 N まで増加させることができた。ここまでくると研磨圧力を確保できそうである。また復元力も 3.2 N から 9.5 N に上昇しておりかなりの効果がある。計算上では 1 mm のギャップに小さくするとより性能が向上することが示されているので、実際の工具でも工夫していきたいと考えている。

実際に 25 mm のギャップをもって、堅いステンレス SUS304 を用いて加工を行ってみた。10 分の加工で評価した。精密加工学会でよく質問されるのは磁性材料で研磨できるかどうかであり、今回 SUS304 は磁性体では無いが、加工すると磁性が現れることがあり検証した。研磨は常温で行われるので、研磨液（スラリー）を自由に選ぶことができる。またパッドの面積を変えると圧力を変えることができる。10 分で鏡面を得ることができた。シングルマグネットよりも改善できており、表面粗さも  $0.1 \mu\text{m}$  にすることができた。

次のデモ機では、全方位に動くことができるロボットの上に SUAM を載せて、 $x$ - $y$ と回転できるようにする。近い将来に紹介できるようにしたい。

今後は大電力での加工ではなくて、低消費電力化が期待されているので、SUAM が有利であると考えている。

Q 回転軸がぶれているように思う → レーザー計測で制御できるかもしれない。

Q 回る方向は気にしなくていいのか? → 気にする必要がある。動摩擦係数が重要であり、摩擦に勝てる必要がある。まず回るかどうか重要である。

Q 磁石を固定するのはどうするのか? → 4 極磁石を用いているために、固定することができる。

野口聡先生 (北海道大学)

Zoom の仮想背景には、当日の朝に撮った札幌の市内の紅葉の様子をしめしており、季節感あふれるスタートだった。2012 年に MIT の Iwasa 先生、2016 年には Florida 州立大の Larbalestier 先生の研究室を訪問している。韓国の Hahn 先生とは長年一緒にやっている。トランプが大統領になるころに MIT から Florida 州立大学に移動した。

高磁場発生に限った話をする事としている。REBCO は高電流密度で高磁場の発生に最適である。テープ形状というのがデメリットではある。40 T でも高い電流密度を保つことができる。

高磁場マグネットはハイブリッドで 45.5 T(2017)が実現できている。次は全超電導を目指しているが、なかなか難しい。定常的に出そうとすると壊れてしまう。たとえば 45.5 T の直流磁場を発生させることができた。31.1 T は外部銅マグネット、14.4 T が内部の REBCO マグネットである。1420 A/mm<sup>2</sup> というとても大きく電流密度を達成している。実際の REBCO マグネットは内径 14 mm、高さ 51 mm でかなり小さい。No-insulation を利用している。絶縁層がないので、体積を小さくすることができる。そして絶縁層は柔らかいので剛性が損なわれることがないので、剛性がある。さらに熱的安定性が上がる。欠点としては励磁遅れ、不均衡電磁力がある。

韓国からの動画で、コイルをハンマーでたたいたり、釘を打ったりしても磁場が落ちずに安定性が高いと示した。野口先生はシミュレーションをされるので、この原因を明らかにしている。線材の劣化が起こっても、局所的常伝導転位部分を電流が避けるように電流が流れることを示した。

45.5 T は燃えなかったけど、壊れてしまった。12 個のシングルパンケーキコイルがある。測定すると臨界電流が下がってしまった。テープの変形が確認された。特に全体のマグネットの上下の部分で変形や劣化が激しい。結局原因は遮蔽電流磁場の問題であった。ただ 1 GPa くらいの力がかかるとハステロイの変形にまで及ばない。現在も検討中である。ちょうど ASC でフロリダのグループが発表しているが、はっきりしていない。

まとめると No-Insulation は注目されている技術であるが、高磁場発生中に電磁力による機械的損傷に及んでいる。その原因はまだ解明中である。

フープ応力がよく知られているが、径方向の圧力も高い。今回は電流パスを増やしたために、電磁現象がとても複雑になった。

実は No-Insulation は金属系でもあったが、REBCO になって注目されるようになった。

現在 45 T、ボア径 50 mm のマグネットの開発が進んでいるが、残念ながらコロナの影響で進捗は遅い。

若い学生には海外にも目を向けてもらえるといいとメッセージを出された。

そこからはいくつかの大型の高磁場マグネットの紹介をされた。電磁力が大きくて、変形により壊れてしまう例が多い。日本 SMES MRI とかで NI 技術が使われている。韓国では、商業用マグネット 18T マグネットをつくっている。

Q なぜ計算は難しいか。 → REBCO 線材の厚さが薄いので全体のモデルを構築するのは難しい

Q ホットスポットができたときに復帰するか？ → 場合による。復帰しなくても NI だと分流して動いてしまう。

Q 日本の研究の方向は？ → 基礎をやるべきだ。応用だけではなくて。

Q クエンチ保護が大事ではないか。機械的な劣化が多い。前駆現象があるか？ → 難しい。MIT の結果では電圧があちこちで観測されている。いろんな要因があってクエンチになる。

#### 支部研究成果発表会

##### 1. 「FEM を用いた超電導線材のラップ長と接触抵抗の分布を考慮した臨界電流特性の評価」 鍾 宇軒 (九州工業大学)

ラップ長と接触抵抗のバラつきにより、 $I-E$  特性を計算した。そして有効ラップ率とラップ長と臨界電流の関係を調査した。ラップ長を増加させると臨界電流が増加し、30 mm の時に臨界電流は最大値 105 A になる。ラップ長と接触抵抗の分布を考慮した臨界電流特性を調査した。線材枚数を増加させると臨界電流が増加する。横渡線を左側ずらした場合の  $I-E$  特性を調査した。横渡線は 5 枚の時、ほぼ臨界電流は 5 枚ラップ率 100% の状態になった。

##### 2. 「様々な磁界方向における超電導線材中の 3 次元量子磁束構造のシミュレーション」 閻 洪 (九州工業大学)

3 次元の TDGL 方程式を数値的に解くことで、様々な磁界下での超電導体内の量子化磁束線の動きを可視化し、これを用いて様々な条件のピンにおける臨界電流密度の磁界の角度依存性の調査を行った。面ピンの場合、角度が大きくなるにつれて  $J_c$  が減少し、 $\theta$  が  $0^\circ$  から  $70^\circ$  の間、すべてのピンの条件下で最も高い  $J_c$  を示した。球状ピン、 $z$  軸柱状ピン、 $y$  軸柱状ピンおよびピンがない状態の場合、 $\theta=0^\circ, 90^\circ$  が最も大きな  $J_c$  を示した。 $\theta$  が  $0^\circ$  から  $20^\circ$  および  $60^\circ$  から  $90^\circ$  の間、球状ピンでは一番高い  $J_c$  を示した。そして  $\theta$  が  $20^\circ$  から  $60^\circ$  の間  $y$  軸柱状では一番高い  $J_c$  を示した。

##### 3. 「塗布熱分解法で作製された高温超電導線材の臨界電流密度分布測定と組織観察」 酒井 秀哉(福岡工業大学)

塗布熱分解法で作製された高温超電導線材が所望の性能が得られなかった原因を調査するため、走査型ホール素子磁気顕微鏡(SHPM)システムにより臨界電流密度分布測定を行うとともに、エネルギー分散型 X 線分光器搭載走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)による組成観察を行った。SHPM で  $J_c$  が観察されなかった領域では超電導相は存在しているものの、それらを囲むようにして非超電導相が存在しているため、大局的な電流パスを形成できなかったことが考えられる。一方で、高  $J_c$  領域にも非超電導相は存在しているのでこれらを減少させることでさらなる  $J_c$  向上が期待できると予測される。

##### 4. 「X 線 CT による $MgB_2$ 線材内部のフィラメント構造の非破壊観察」 福原 大貴(福岡工業大学)

$MgB_2$  線材内部のフィラメントの形状を直接調べるのは困難であるため、18+1' 芯  $MgB_2$  線材の熱処理前と熱処理後のフィラメントの構造解析を X 線 CT により行った。熱処理前の線材のパリア材は破れていなかったが、熱処理後は破れが生じていた。また破れが生じたフィラメントは内周 6 本のみであった。外周 12 本のフィラメントにおいては断面積分布の広がり小さく、熱処理前、熱処理後でさほど差はなかった。内周のフィラメントにおいては断面積分布が広がっていることが確認された。熱処理後は分布が更に広がっていた。パリア材の破れは熱処理前の段階でパリア材が薄くなっている箇所を起点に起こっているものと考えられる。

##### 5. 「追加堆積膜を利用した $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 線材接合体の

接合面積に及ぼす因子」 土井 裕太郎(九州大学)

高  $J_c$  を得られる GdBCO 線材接合体を作製するため、熱処理温度と接合面積の関係性を調査した。熱処理温度と接合面積率には正の相関関係が見られた。熱処理温度の上昇によって前駆体膜内での固相拡散が促進され、前駆体膜の GdBCO への結晶化が進んだ。接合界面でも熱処理温度の上昇によって前駆体膜の GdBCO への結晶化が進み、線材間の接合が促

進された。

6. 「YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>粉末を利用した磁場シールド材の開発」 田丸 隼也 (九州大学)

軽量かつ自由な形状が可能なシールド材を得るため、樹脂と YBCO 粉末を用いた新たなシールド材を作製し、YBCO の粒径の違いが膜質に及ぼす影響を調査した。樹脂と YBCO 粉末を用いた軽くて、形状の自由度の大きな超電導シールド材を作製でき、磁場遮蔽の効果を確認できた。YBCO の粒径の違いは、シートの膜質に影響を及ぼし、粒径が大きいと、凹凸が大きく、くぼみや破れが生じやすいことが分かった。膜質の良いシールド材を得るには、より粒径の小さな粒子を用いることが有用であることが示された。今後は粒径のより小さな粉末を用いて厚膜化し、磁場シールド効果を高めていく。

7. 「REBCO テープ積層導体の交流損失特性の評価」 上野 邑真(鹿児島大)

核融合炉に用いられる超電導導体は交流磁界中ではヒステリシス損失に加え、線材間に損失が発生する。大電流容量 REBCO 積層導体の開発に向け、モデル導体の交流損失特性を明らかにする。液体窒素中でピックアップコイル法により損失を測定した。磁場依存性はヒステリシス損失と結合損失を切り離して評価した。印加磁界の正弦成分によってヒステリシス損失が決まる。印加磁界の余弦成分によって結合損失が決まる。ヒステリシス損失と結合損失は、相互に影響していなかった。

8. 「HTS 誘導電動機用パイプ 形状回転子の特性評価」 大石 竣介(鹿児島大)

円筒形状回転子誘導電動機の設計にあたって、銅パイプ型回転子の特性評価、銅パイプ誘導電動機のすべり周波数トルク解析をした。超電導パイプ型回転子の特性評価、超電導パイプ誘導電動機同期運転中のトルク特性解析を行った。銅パイプ型回転子誘導電動機、100 kW オーダーの高出力が可能、低速では効率が悪くなる可能性がある。超電導パイプ型回転子誘導電動機、トルクリップルが大きいためから巻線に工夫を施し磁束密度分布を正弦波に近づけることで軽減できることを確認した。

9. 「高温超電導コイルの局所的な 臨界電流低下の検出」 佐藤豪(鹿児島大学)

本研究の目的はサンプルコイルでどの程度の局所 $I_c$ 低下を測定できるのかを計算で示すことである。測定システムでは、この「損失性の磁気モーメントによる電磁界」を測定している。臨界電流が変化するとき、エネルギーフロー分布にどれほど変化が起きるかを計算により確認した。臨界電流分布の変化を推定できる程、エネルギーフロー分布が変化することを確認した。

10. 「REBCO 超電導線材を用いた 1kW 級全超電導同期モータの冷却特性試験および運転試験」 佐々 滉太 (九州大学)

超電導回転機を搭載した電気推進航空機は特殊なケーシング構造および冷却方法を採用した 1 kW 級全超電導同期モータを設計・製作した。ケーシング構造の有効性の実証を行った。

特殊なケーシング構造をもつ、プロトタイプ全超電導同期モータの冷却特性試験と、回転試験を行った。冷却構造の有効性を実証し、電機子巻線は均一に冷却した。界磁巻線は不均一なら攪拌で改善した。対策はファン等を設置して積極的に攪拌する。磁性流体シールは室温を維持し、500 rpm のモータ運転に成功した。ケーシング構造の有効性を示した。