

目 次

巻頭言	1
活動報告	
第 28 回磁気科学会研究会報告	2
第 29 回磁気科学会研究会報告	4
第 15 回磁気科学会年会報告	5
日本磁気学会との連携	6
開催案内	
第 29 回磁気科学会研究会	9
第 16 回磁気科学会年会	10
第 31 回磁気科学会研究会	11
MAP9 開催検討状況の報告	12
受賞者の声	
第 11 回優秀学術賞受賞 藤原 昌夫 氏	13
第 11 回功労賞受賞 掛下 知行 氏	14
学生ポスター賞 高橋 巡季 氏	20
学生ポスター賞 長野 杜春 氏	21
会計報告	22
事業計画	23
会則等	
日本磁気科学会 会則	24
理事会運営規則	29
表彰制度	31
役員 (2021–2022)	33
第 29 回磁気科学会研究会予稿集	34

磁場は鉄ばかりではなく、

若い人を引き付ける（魅）力があるのだろうか？

北海道大学 岩井一彦

一部の研究者しか使うことがなかった強磁場を誰でも使える環境にしたのは、ヘリウムフリーの超伝導磁石である。磁場に興味を持つ研究者が増え、様々な分野で磁場応用の開拓が進んだ。超伝導磁石には人を引き付ける魅力があったのだ。研究分野が拡がり、多くの優れた学術的成果が得られた。例えば、配向、磁気分離などは、産業応用を目指したプロセス最適化などの研究がなされ、産業化する際の指針となっている。研究分野の拡がり、と研究進展に合わせて、テーラーメイドの磁石が開発されるなど、両輪がうまくかみ合ってきた。日本磁気科学会はその発展（の一翼）を担ってきた。超伝導磁石は、多くの研究成果を産んできたし、今後も重要なツールであり、研究成果を出し続けるだろう。

一方、日本磁気科学会は、若い人が少ないという問題を抱えている。論文数、獲得予算の向上ならよいのであるが、会員の平均年齢が向上しているのだ。若いあるいは女性の研究者、技術者は取り合いである。会長として解決する方向性を示せなかったのは非常に残念であり、忸怩たる思いがある。

超伝導磁石は研究者、技術者が容易に利用できる新たな場を提供してくれた。このような磁気科学に関係する研究者、技術者すべてに大きな影響を与える技術革新は早々でてこないであろう。新たな魅力を作り出すのは大変だと思う。何も脚光を浴びる必要はない。電磁石程度の磁場でも研究対象によっては、面白い成果が得られる。ところで、古い話で恐縮であるが、山登先生がある講演の中で、高分子の結晶配向のために融点を調節する旨の話がされた。金属系では同一物質ならば融点は一定なので小職はその時点で思考が停止してしまったものの、帰り道で融点が変わる理由を教えてくださいました。金属と高分子との違いを少し理解できた日であった。本会は様々な分野の研究者の集まりであり、そこに良さがある。狭い分野に籠っているとその常識で物事を考えて、発想などが似てしまうが、年会などは、視野を拡げてくれるのだ。鶏と卵であるが、中に入ってもらえば、本会の魅力が伝わるのである。

日本磁気科学会内で将来を明るくしそうな良い動きがある。若い人たちがタッグを組んで大型予算を取りに行っているようである。横の繋がりが強化されるので、今すぐ予算獲得できなくとも、将来実りある結果を産むはずである。また、本分野のテキストを作ろうと自ら言い出してくれた研究者もいる。これらの、次世代に繋がる動きが新たな魅力に繋がり、花開くことを願ってやまない。



咲き乱れるチューリップ
多くの虫が蜜につられるのだろう

第 28 回磁気科学会 物理化学分科会 開催報告

京都大学 奥村 英之

2021 年の第 28 回磁気科学会研究会（物理化学分科会）は 10 月 7 日（木）午後 1 時よりオンライン（Zoom）にて開催した。本分科会講演会では「電子スピンの検出と応用—磁場効果現象における物理化学と学際的磁気科学」というテーマのもと、電子スピンの観測と応用、理論的解明などに挑戦し、各分野でご活躍の 5 名の講師にご登壇いただくことにより、研究分科会活動を実施した。

物質材料研究機構[NIMS]の寺田典樹先生は「メタ磁性転移を利用した高効率な磁気冷凍法の開発」と題して、希土類単体金属 Ho を用いた効率的な磁気冷凍法について、その原理から応用まで紹介された。Ho 元素は 132 K 以下で螺旋磁性を示し、0.2 T 程度の磁場変化でも磁化がほぼゼロの螺旋磁性状態から大きな磁化を持つ異なる螺旋状態に変化する。このメタ磁性転移の際に生じる磁気エントロピー変化量 ΔS （約-12 J/kg K）は単位磁場変化あたりで大きいいため効率的な磁気冷凍システム構築が可能になる事などを報告された。

分子科学研究所の松井文彦先生は「光電子計測法開発による表面磁性研究：軌道磁気量子数分解 XMCD と光電子運動量顕微鏡」と題して、光電子や電子スピン計測に係る挑戦的研究開発について話された。前半は SPring-8 の表示型分析器[DIANA]による光電子回折・X 線吸収分光を融合した研究について、円偏光励起における回折模様と吸収スペクトル両方に現れる円二色性を駆使した磁性に関わる原子軌道情報の抽出について紹介された。また後半は分子研 UVSOR(極端紫外光研究施設)の軟 X 線ビームライン BL6U に整備された PMM(光電子運動量顕微鏡)拠点の到達点と今後の展開について報告された。PMM は二次元スピンフィルターを接続すると高効率のスピン・運動量分解光電子分光測定が実現するが、スピンの表面垂直配向成分の計測は困難であり、この打開策として開発中の結像型 90°偏向分析器(RADIAN)を用いたスピン分解顕微光電子分光について紹介された。

大阪市立大学の手木芳男先生は「 π スピン系の励起状態ダイナミクスと磁気科学」と題して、時間分解 ESR(電子スピン共鳴)を含む先端的 ESR 分析を駆使した π 共役有機分子のスピン科学・ダイナミクス及び各電子状態(光励起・基底・近接熱励起)について、実験と理論の両面から話された。 π 共役系は分子内スピン間交換相互作用が大きくスピン整列が容易であるため分子設計や機能性部位の付加等による電子状態制御が可能であるが、安定 π ラジカル励起状態スピン科学の関連研究として、それ自体では蛍光量子収率が 1 に近く殆ど励起三重項状態に移らないジフェニルアントラセンに安定ラジカルを π 共役付加すると系間交差が増強され励起五重項状態を効率よく生成する事をその機構とともに紹介された。また有機電荷移動錯体と有機半導体 TIPS-ペンタセンの先端的 ESR 研究、及び発光磁場効果を示す安定ラジカル励起状態ダイナミクス研究に関して報告された。

分子科学研究所の草本哲郎先生は「発光性有機ラジカルに基づく磁気・光機能開拓」と題して、ラジカル発光特性に関する研究を中心に話された。一般にラジカルは有意な発光を示さず光照射下(励起状態)で分解するため研究例が乏しいが、二重項や多重項に基づく発光機能開拓・解明を可能とする光安定発光性ラジカル PyBTM の新規開発に成功した事、非発光性閉殻分子結晶中に PyBTM をドーブした試料は 4.2 K で磁場中その発光スペクトル形状が大きく変化する事、発光減衰曲線の発光波長・磁場・温度依存性調査および量子力学シミュレーションにより磁場応答発光挙動メカニズムを検討した結果、ラジカル二量体のスピン状態が基底・励起両状態において磁場変調を受け、特に基底状態の静的な磁場効果が現象発現の鍵要因である事などを報告された。

崇城大学の米村弘明先生は「磁場と金属ナノ粒子を活用した光機能ナノ材料の創製」と題して、ラジカル対経路による光誘起電子移動(光電気化学)反応を活用した光電変換、T-T(三重項-三重項)対経路による PUC-TTA(三重項-三重項消滅に基づく光アップコンバージョン)や SF(一重項励起子分裂)に対する磁場効果、金属ナノ粒子の効果、金属ナノ粒子と磁場の相乗効果について紹介された。磁場と金属ナノ粒子の効果を活用した光電変換ナノ材料ではナノサイズ効果により光電流に対する磁場効果(ラジカル対)が増大する事、磁場と金属ナノ粒子の効果を活用した PUC ナノ材料研究では PUC 発光に対する磁場効果の正負を制御し得る事、また大きな増強電場を示す異方性金属ナノ粒子の銀ナノプレート(AgPL)を添加したポリマー複合膜では磁場強度増加に伴い PUC 発光が増加する事などが報告された。

今回はまだコロナ禍という事もあり残念ながらオンラインの研究会となったが、28 名が講演会に出席して質疑応答等に参加して下さった(読売新聞科学部の記者もおられた)。前半 2 件はどちらかと言うと物理寄り、後半 3 件はどちらかと言うと化学寄りの講演であり、電子スピンの計測と応用というタイトルに相応しい学際的内容の磁気科学(物理化学)研究会であった。研究分科会終了後は短時間ではあったが Zoom 上で懇親会を行い、談笑しながらゆったりした時間を過ごした。

ご多忙中、快く講演をお引き受け下さった 5 名の講師の方々には厚く御礼申し上げます。

第 29 回研究会（磁場発生分科会） 開催報告

東北大金研 高橋弘紀

2021 年 12 月 9 日（木）に、磁場発生分会の主催による第 29 回研究会を応用物理学会磁気科学研究会との共催でオンラインで開催した。正直なところ、磁場発生をテーマとすると内容がマンネリになりがちであり、何をテーマとするかは頭を悩ませるところである。そこで今回は磁気科学研究には欠かせない超伝導マグネットの中身に目し、テーマを「線材開発・評価からマグネット開発」として、超伝導線材の開発とマグネットの設計・開発の現状について、大学および企業の最前線で研究している 3 名の方を講師に迎え、超伝導線材開発研究を専門としていない研究者や学生にも分かりやすく解説していただくこととした。

東海大学の黒英俊先生には「強磁場・大口径超伝導マグネット用低温超伝導線材の開発」と題して、Nb₃Sn 線材を中心とする金属系超伝導線材の開発の歴史と現在の動向について解説していただいた。

株式会社フジクラの藤田真司氏には「RE 系高温超電導線材の開発と評価」と題して、フジクラにおける REBCO 線材開発の歴史と、高温超伝導線材がテープ形状ゆえに抱える課題や線材特性の評価方法について詳しく解説していただいた。

ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社 (JASTEC) の小湊健太郎氏には「超電導磁石の開発 -NMR を中心に-」と題して、NMR の測定原理から、それを踏まえた上で超伝導マグネットの設計手法について、同氏の思い出なども織り交ぜながらお話しいたいただいた。

今回の研究会も新型コロナウイルスの影響を考慮して Zoom によるオンライン開催とした。対面での開催であれば、質疑応答としては聞きづらいことなども休憩時間に気軽に質問したり、参加者同士の情報交換もおこなえるが、オンラインだとそのようなコミュニケーションをとるのが難しい。一方で、移動のための時間を必要とせず、旅費も不要となることから参加しやすいという一面もある。実際、今回の研究会でも 40 名近い参加者があり、対面開催よりも多くの方に参加していただけたと考えている。今後は新型コロナウイルスが早期に終息に向かい、以前のように活発に議論し、交流できる研究会に戻ることを期待したい。

第15回日本磁気科学会年会報告

実行委員長 鹿兒島大学 小山 佳一

実行委員 鹿兒島大学 三井 好古

第15回日本磁気科学会年会は、2021年11月15日(月)-17日(水)に鹿兒島大学稲盛会館とオンラインのハイブリッド形式で開催されました。口頭発表20件、ポスター発表17件が行われ、63名の参加者でした。2021年にコロナウィルスの影響で延期したため、2年ぶりの開催となりました。

初日は開会挨拶の後、13件の口頭発表が行われました。2日目午前のポスター発表では、現地でもポスターが掲示されるとともに、今回の年会ではすべてのポスターをオンラインでの発表としました。午後には、2020年、2021年の学会表彰式および受賞講演が行われました。2020年は、「材料科学における磁場応用および磁気科学会発足への貢献」として木村恒久氏(福井工業大学)が功労賞を、「磁気プロセスを用いた高分子材料制御に関する研究」として山登正文氏(東京都立大学)が優秀学術賞を受賞されました。2021年は、「マルテンサイト変態基礎科学の確立と強磁場材料科学の創成」として掛下知行氏(福井工業大学)が功労賞を、2021年「高磁気勾配型超伝導磁石を利用した磁気科学研究」として、藤原好恒氏(広島大学)、藤原昌夫氏(広島大学)が優秀学術賞を受賞されました。

3日目は、午前に7件の口頭発表が行われた後、研究奨励賞・ポスター賞表彰式後閉会いたしました。長野杜春氏(鹿兒島大学)と高橋巡季氏(鹿兒島大学)がポスター賞を受賞されました。

今回、初めてのハイブリッド開催の試みでしたが、参加いただいた皆様のご協力のもと無事終了することができました。最後に、本年会開催にあたりご協力いただきました、現地実行委員会の岩坂正和氏(広島大学)、藤原好恒氏(広島大学)、横井裕之氏(熊本大学)、米村弘明氏(崇城大学)に感謝いたします。



図 オンライン・現地参加者の皆様の集合写真

日本磁気科学会と日本磁気学会との連携について

東京都立大学 山登正文

日本磁気学会 (MSJ) では「磁気記録」, 「ハード・ソフト磁性材料」, 「磁気物理」, 「薄膜・微粒子・多層膜・人工格子」, 「スピンエレクトロニクス」, 「計測・高周波デバイス」, 「パワーマグネティクス」, 「生体磁気・医療応用」と, 基礎分野から応用に至るまで多様な分野を取り扱っています。MSJ には、今後の応用磁気研究の発展を期するために、特定のテーマの活性化ならびに萌芽的な研究テーマの育成を目的とした専門研究会が設けられています。現在 8 専門研究会が活動中で、その中の一つに「強磁場応用専門研究会」があります。強磁場応用専門研究会は、新磁気科学研究会発足当時から強磁場応用研究をけん引してきた日本磁気科学会のメンバーを中心に、日本磁気科学会と MSJ との連携を目的に設立されました。2021 年度も 2020 年度に引き続きコロナ禍のため、オンライン開催となりましたが 4 回の専門研究会を開催することができました。特に 57 回, 58 回の研究会では日本磁気科学会でご活躍されている先生方に多くご協力を頂き、実施することができました。この場をお借りしてお礼申し上げます。いずれの研究会も盛況となり、関係された方のご協力に感謝いたします。今後とも研究会の共催や講演依頼などで連携およびご協力をよろしくお願いいたします。

日本磁気学会 強磁場応用専門研究会

<https://www.magnetics.jp/special/kyojiba/>

第 232 回研究会/第 57 回強磁場応用専門研究会 (2021.5.12 13:00-16:15)

オンライン開催 (Webex)

“磁場の時空間制御と弱磁性物質への応用”

講演

- 回転磁場を用いた無機材料の結晶配向制御
鈴木 達 (物材機構)
- 磁場配向のための物質および磁束の制御
堀井 滋 (京都先端科大)
- ローラー型永久磁石式磁場源
佐久間洋志 (宇都宮大)
- バイオセンサへの磁気トラップ応用
牛島栄造 (ムラ・ジャパン)

第 45 回日本磁気学会学術講演会シンポジウム/第 58 回強磁場応用専門研究会 (2021.8.31 13:00-16:45)

オンライン開催 (Zoom)

“New trends in magnetic field application”

講演

- “Recent progress in magneto-Archimedes levitation”
○Y. Ikezoe (Nippon Inst. Tech.)
- “Electromagnetophoretic microfluidic technique for the separation of micro particles”
○Y. Iiguni (Nagoya Inst. Tech.)
- “Development of in situ solid-state NMR system for magnetically oriented microcrystal suspensions”
○R. Kusumi (Kyoto Univ.)
- “Magnetic field effect on the preparation process of carbon materials”
○A. Hamasaki (Shinshu Univ.)
- “Delay of magnetic field-induced martensitic transformation in some ferrous alloys”
Y. Song¹, ○T. Terai², T. Fukuda², Y. Narumi², M. Hagiwara², K. Sato², M. Sugiyama², T. Kakeshita³ (¹ Tohoku Univ., ² Osaka Univ., ³ Fukui Univ. Tech.)
- “Dynamic hysteresis measurement of a magnetic nano particle suspension under a DC bias magnetic field”
○R. Onodera¹, E. Kita^{1,2}, H. Yanagihara² (¹ NIT, Ibaraki Coll., ² Univ. of Tsukuba.)
- “In-field annealing for precipitation of magnetic alloys”
○Y. Mitsui¹, M. Onoue¹, S. Kuzuhara², W. Ito², K. Koyama¹ (¹ Kagoshima Univ., ² NIT, Sendai Coll.)

第 59 回強磁場応用専門研究会 (2021.12.9 13:00-19:00)

共催 日本磁気科学会 磁場発生分科会研究会, 応用物理学会 磁気科学研究会, 低温工学・超電導学会 磁気遠隔力の空間的・時間的制御とその応用に関する調査研究会
オンライン開催 (Zoom)

講演

- 強磁場・大口径超伝導マグネット用低温超伝導線材の開発
小黒英俊 (東海大)
- RE 系高温超電導線材の開発と評価
藤田真司 (フジクラ)
- 超電導磁石の開発 -NMR を中心に-
小湊健太郎 (JASTEC)

ポスター発表 8 件

情報交換会

第 60 回強磁場応用専門研究会 (2022.2.22 14:00-16:00)

共催 低温工学・超電導学会 磁気遠隔力の空間的・時間的制御とその応用に関する調査
研究会

オンライン開催 (Zoom)

講演

- キューブ状磁性粒子分散系の凝集構造と磁気粘性効果
岡田和也 (埼玉工大)

第 61 回強磁場応用専門研究会 (2022.3.7 14:00-16:00)

共催 低温工学・超電導学会 磁気遠隔力の空間的・時間的制御とその応用に関する調査
研究会

オンライン開催 (Zoom)

講演

- 磁気力制御による新生血管閉塞療法に関する基礎的研究
桐村 誠 (阪大)

第 29 回研究会（磁場発生分科会）開催案内

東北大金研 高橋弘紀

今回の研究会では、大学、企業の最前線でご活躍されている講師 3 名に、金属系および高温超伝導線材開発の現状とマグネット開発の実際について、分野外の研究者にも分かりやすく解説していただく予定です。

日時：令和 3 年年 12 月 9 日（木）13:00～19:00

会場：オンライン

共催：応用物理学会 磁気科学研究会

テーマ：「線材開発・評価からマグネット開発」

プログラム

13:00-13:40	「強磁場・大口径超伝導マグネット用低温超伝導線材の開発」 東海大 小黒英俊
13:40-14:20	「RE 系高温超電導線材の開発と評価」 フジクラ 藤田真司
14:20-15:00	「超電導磁石の開発 - NMR を中心に-」 JASTEC 小湊健太郎
15:15-16:00	ポスターA
16:15-17:00	ポスターB
17:15-19:00	情報交換会

参加費：無料

申し込み：こちらのサイトから登録をお願いいたします。

https://annex.jsap.or.jp/magneto-science/2021_reg.html

情報交換会：飲み物、食事は各自でご準備ください。

世話人：山登正文（都立大）yamato-masafumi@tmu.ac.jp

高橋弘紀（東北大金研）kohki.takahashi.e5@tohoku.ac.jp

渋谷和幸（JASTEC）shibutani.kazuyuki@kobelco.com

第 16 回日本磁気科学会年会 開催案内

実行委員長（日本大学） 安藤 努

第 16 回日本磁気科学会年会は、関東支部担当として日本大学 生産工学部 津田沼キャンパスで開催されます。開催日程等は下記の通りです。

第 16 回日本磁気科学会年会

会期：令和 4 年 11 月 7 日（月）～ 9 日（水）

会場：日本大学 生産工学部 津田沼キャンパス 39 号館 6 階スプリングホール
（千葉県習志野市泉町 1-2-1）

第 16 回年会は、当初予定されていた日本大学駿河台キャンパスがコロナ禍により、使用できなくなったことから、同じ日本大学でも郊外にある津田沼キャンパスで開催されることになりました。津田沼キャンパスは日本陸軍の騎兵隊演習場跡地にあります。京成大久保駅からキャンパスまでは商店街の中を通る道で結ばれており、この途中には司馬遼太郎著「坂の上の雲」の主人公の一人である習志野第一騎兵旅団長の秋山好古の顕彰碑があります。この第一旅団を構成していた第 13、14 連隊の碑が隣の東邦大学と本キャンパスの図書館裏手にそれぞれあります。近代日本史に興味がある人は訪ねてみて下さい。

昨年の第 15 回年会と同様に今回もハイブリッド形式で開催します。3 日間のシングルセッションで、一般の口頭講演とポスター講演の構成にて行います。初日午後にポスター講演をオンラインのブレイクアウトセッションで行います。企画としては優秀学術賞と功労賞の受賞講演を中日の 8 日（火）に予定しています。また、招待講演も同日に予定しています。コロナが収束していない状況で、様々な分野の方が集う日本磁気科学会の親睦の場である懇親会を本年会でも執り行うことができなかったことは大変残念ですが、各発表での意見交換等で盛り上げていければと思っています。皆様の積極的な講演申込およびご参加を心よりお待ちしております。

最後に、第 16 回年会開催にあたりご尽力頂いた現地実行委員の伊掛浩輝氏（日本大学）、



池添泰弘氏（日本工業大学）、小野寺礼尚氏（茨城工業高等専門学校）、後藤博正氏（筑波大学；関東支部長）、鈴木達氏（物質・材料研究機構）、中山麗氏（日本大学）、原秀太氏（神奈川大学）、廣田憲之氏（物質・材料研究機構）、山登正文氏（東京都立大学）（50 音順）の皆様には感謝申し上げます。

会場：39 号館（生産工学部 60 周年記念棟）

MAP9 開催検討状況の報告－2023 年後半、宮崎で開催－

MAP9 現地実行委員会幹事会

2020 年 6 月に開催を予定していた The 9th International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields (MAP9)は、新型コロナウイルス感染症が世界的に拡大する状況を鑑み、2020 年 4 月に 2 年の延期をアナウンスしました。しかしながら、延期後開催予定だった 2022 年になっても新型コロナウイルスのオミクロン株の拡大や、海外からの渡航制限措置など、海外研究者の実会場への参加が難しい状況が続きました。一方、もう一つの磁気科学分野の国際会議である ICMS(International Conference on Magneto- Science)は、これまで隔年で MAP と交互開催されてきましたが、この会議も 2019 年 10 月の合肥での会議のあと、2021 年にフランスで予定されていた会議が保留状態となっていました。そこで、フランス側関係者と協議した結果、MAP は 2023 年中の開催を目指し、ICMS はその後、フランスにとってのオリンピックイヤーとなる 2024 年に開催するという方針となりました。

これまでの MAP は 3 月から 7 月までの時期に開催されるのが通例でしたが、この冬には感染が再拡大する可能性も否定できないことから、現地実行委員会幹事会で議論の結果、2023 年後半に、当初予定していた宮崎を開催地とし、必要に応じてオンラインとのハイブリッドも視野に入れつつ、開催を目指すこととなりました。

日本磁気科学会会員の皆様には、会期が決定しましたら、直ちにアナウンスさせていただきます。

会議の成功には、皆様のご協力が必要です。また、磁気科学分野の海外の最新研究動向を知ることのできるまたとない機会でもあります。是非、皆様の温かいご支援と、積極的なご参加・ご協力をお願い申し上げます。

新磁気科学から

広島大学 統合生命科学研究科 藤原昌夫

日本磁気科学会より、第11回優秀学術賞を授与され、たいへん光栄で有難く思います。学会会員の皆様、選考関係者、推薦者の方々に感謝します。受賞対象は、高磁気勾配型超伝導磁石を利用した磁気科学研究（分子結晶の磁気配向と金属イオン集団の磁気移動に対する理論的解釈と一般化）です。

日本磁気科学会が設立された発端は、1990年代に、北澤宏一先生や青柿良一先生らが中心となって、埼玉県浦和市で研究会を開催された時と記憶しています。当時は、10—20 テスラ級の超伝導（電導）磁石が普及して、一般の研究室で比較的容易に使用され始めていました。私の磁気科学の歩みは、超伝導磁石と共に始まりました。液体ヘリウムの充填作業に忙しく、ヘリウム冷凍機の機械音に包まれる日々でした。今日と同じです。

初め、私たちは、水平型超伝導磁石を用いて、均一磁場下で、有機、無機物質の結晶成長を観察していました。磁気配向です。結晶軸を X 線回折で決めて、磁気軸との関係を調べ、磁気エネルギーによる配向分布を統計力学で議論しました。

また、遷移金属イオンの混合溶液をシリカゲル担体上に滴下して、勾配磁場下で、磁化率の差によって分離しました。磁気分離です。磁気力によるドリフト速度を流体力学で論じました。

さらに、鉛直型超伝導磁石を用いて、磁気微小重力下で、タンパク質の結晶成長を試みました。磁気浮上です。地上重力下よりも、良質の結晶が得られることを見出しました。

私の研究に対する思いを述べておきます。研究には、新しさが重要です。若い研究者の皆さんは、困難に立ち向かって、新しい目標にチャレンジしてほしいと思います。実験に失敗しても、目先の結果に一喜一憂してはいけません。実験には、強靱な持久力と屈しない精神力が必要です。

最後に、共同研究者、学生たちに感謝の気持ちを表します。

私の遍歴電子型研究人生

福井工業大学学長、大阪大学名誉教授 掛下知行

はじめに

私の主テーマであるマルテンサイト変態と磁気転移について、簡単に紹介させていただきます。

これまでに行ってきた研究は、材料の機能発現・組織制御において根幹となる基礎研究を、従来から用いられている温度・応力のみならず強磁場、高圧力の外場を新たに加えることで得られる実験結果に対して多次的現象理解および電子論的解釈を通して、未解決な問題の解明ならびに新規現象の発見と解明を行ってきました。その分野は、主に変位型相変態・磁気転移ならびに第一原理計算に基づく電子論に関するものであり、以下に示します4つの分野、すなわち、(i) 極限状態下(強磁場、高圧力)のマルテンサイト変態ならびに拡散変態 (ii) マルテンサイト変態のカイネティクスならびに巨大ひずみと臨界点 (iii) d電子系セラミックス(マンガナイト)ならびにf電子系金属間化合物(DyCu, DyAg)の磁性と電気伝導特性 (iv) 相安定性の電子論的解釈に関連しています。本稿では、マルテンサイト変態の核生成と関連した(ii)とそして(iii)の一部について簡単に紹介したいと思います。

(1) マルテンサイト変態のカイネティクス

マルテンサイト変態は多くの1次相変態と同様に、核生成・成長により進行することは良く知られていますが、マルテンサイトの核がどのようなものであるかは、未だ十分に明らかになっていません。この未解決なマルテンサイト変態の核生成について、その核生成と密接に関連する変態のカイネティクスと外場(磁場・静水圧)の関係を調査して、新たな知見とモデルを展開しつつあります⁽¹⁻⁴⁾。すなわち、これまで変態過程が異なるものとして認識されている非等温マルテンサイト変態(変態開始は瞬時に起きる。)と等温マルテンサイト変態(変態開始に数秒あるいは数時間の有限な時間が存在する。この時間は温度に依存し、最も短い時間で変態が開始する温度が存在する。これをノーズ温度という。)は(図1)、磁場印加により等温変態が非等温変態に⁽¹⁾、静水圧負荷により非等温変態が等温変態⁽²⁾に移行することを実験的に明らかにし、非等温変態と等温変態の違いは本質的なものではなく、本来統一的に考えることができ、等温マルテンサイト変態が本質であると提唱しています。そこで、この等温マルテンサイト変態挙動をモデル解析することで核の大きさについて議論をしました。それを以下に述べたいと思います。

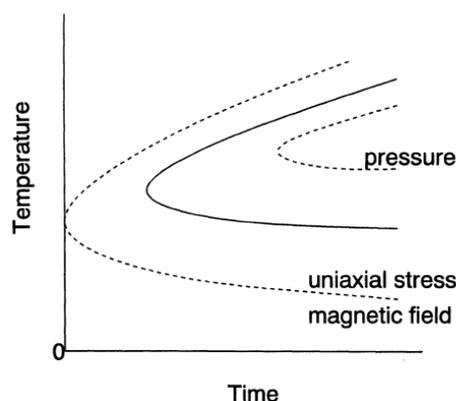


図1 Fe基合金におけるマルテンサイト変態のTTT図。外場(静水圧, 磁場, 一軸応力により潜伏時間ならびにノーズ温度が変化する)

モデルの構築⁽³⁾にあたり、2つの仮定を行いました。すなわち、すべてのマルテンサイト変態は熱活性化過程により起きることならびにポテンシャルバリア(活性化エネルギー)は外場に依存すると仮定し、統計熱力学を用いてマルテンサイト変態の起きる確率式を導入し、その逆数が時間に対応するというモデルを構築しました。以下に、そのモデルを簡単に説明したいと思います。

マルテンサイト変態は m *個の原子からなるクラスター(これが核に対応すると考えている。)が、このポテンシャルバリア(Δ)を乗り越えることにより進行すると考えると、その確率 P は次式のように表すことができます。

$$P = A \exp\left(\frac{-m^* \Delta}{N_A k_B T}\right) \cdot \exp\left\{-B \exp\left(\frac{-\Delta}{N_A k_B T}\right)\right\} \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 N_A はアボガドロ数、 A 、 B はパラメータであります。また、 $\Delta(T) = \delta - \Delta g(T)$ で(仮定)、 δ は母相とマルテンサイト相との熱力学的平衡温度 T_0 における1モルあたりのポテンシャルバリアの大きさであり、 $\Delta g(T)$ は、温度 T における1モルあたりの母相とマルテンサイト相との自由エネルギー差であります。潜伏時間は、このような確率を導入しているので P^{-1} で表されることとなります。このモデルの妥当性を、このモデルから予想される現象を実験的に示すことで確認しました。予想される現象は、以下の2つです。(i) 明瞭な M_s 点を有する合金、いわゆる非等温変態を示す系においても、変態開始温度 M_s 以上でかつ熱力学的平衡温度 T_0 以下の温度において等温保持すると、マルテンサイト変態が起きる。(ii) 静水圧負荷の TTT 図において、静水圧を負荷していない場合のそれと較べると、ノーズ温度が上昇し、潜伏時間が長時間側に移動することになる。また、磁場印加の場合、ノーズ温度が減少し、潜伏時間が短時間側に移動する(図1)。これらの現象の存在確認ならびに式(1)を用いた計算と実験値の一致は、数多くの系で得られました。一つの例を図2に示しました⁽⁴⁾。したがって、筆者は、式(1)の妥当性があると考えています。また、この式に含まれる m *から見積もったマルテンサイトの核の大きさが、ナノサイズ(2~5nm)であり、その値は古典論による値と2桁も違うことがわかりました⁽¹⁾。今後は、この大きさの違い(例えば界面エネルギーとは何か)が持つ物理的意味とその緩和時間(核からマルテンサイト相への成長時間)について調査することが課題であると考えております。

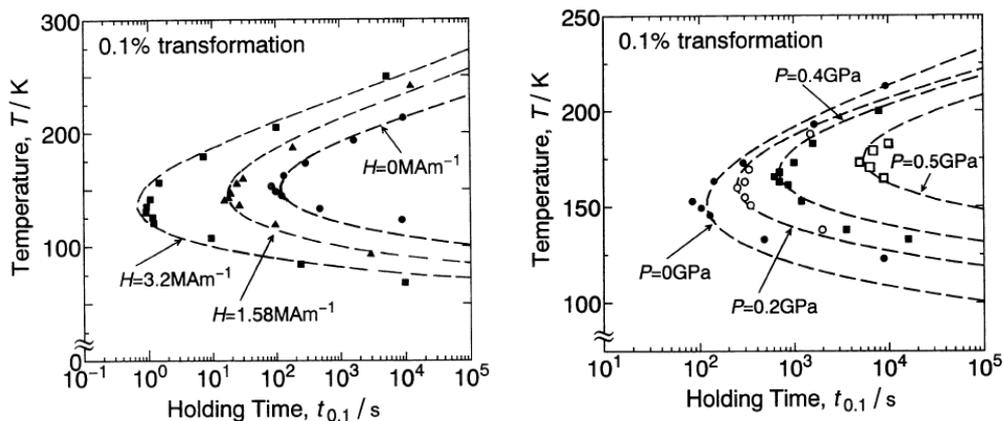


図2 Fe-24.9Ni-3.9Mn合金のTTT図に及ぼす磁場効果と静水圧効果⁽⁴⁾。磁場(静水圧)により潜伏時間が短く(長く)なり、ノーズ温度は低く(高く)なる。●, ▲, ■は実験値, 点線は(1)式を用いた計算値。

(2) 巨大ひずみの出現と臨界点の存在

多くのFe基合金ならびに代表的な形状記憶合金であるTi-Ni合金やCu系合金では、1

次変態であるマルテンサイト変態に伴い体積ならびに潜熱が大きく変化します。また、その変態は、上記で述べたように核生成・成長により進行します。ところで、変態に伴う体積ならびに潜熱が極めて小さく、ほぼゼロとみなせる変態が、Fe-Pd⁽⁵⁾、Fe-Pt 合金⁽⁶⁾において観察されています。いわゆる FCC から FCT への変態であります。筆者らはこのような変態を、弱い1次のマルテンサイト変態あるいは極めて2次に近いマルテンサイト変態と称しています。この場合、変態は1次なので核生成で起きるが、外場を与えると1次変態から2次変態に移行することがあり、したがってその変態の起源を電子状態に求めることができると考えております。事実、これらの合金では、高温相の弾性定数 $c' = (c_{11} - c_{12})/2$ が、変態温度に向かい減少し、変態温度では、ほぼゼロになるというソフト化が報告されています。著者は、このソフト化は変態様式が1次から2次となることに起因しており、それは、1次変態のいわゆる前駆現象ではないと考えていますが、その妥当性は将来の課題であります。このような、2次に近い変態では、ソフト化を考慮すると、新規な現象として巨大ひずみの出現と水の3態で良く知られている臨界点の存在が予想できます。事実、それらを実験的に初めて明らかにしたので、簡単に紹介いたします。

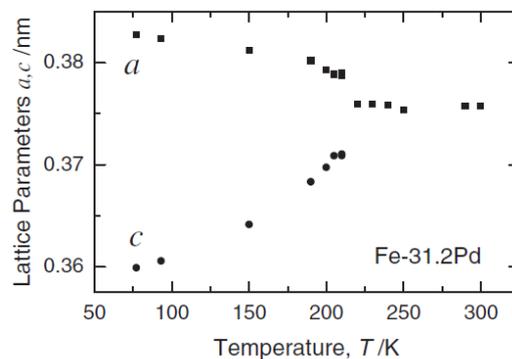


図3 Fe-31.2Pd (at%)合金における格子定数の温度依存性⁽⁷⁾。

2次に近い変態を示す Fe-31.2Pd 合金や Fe₃Pt (規則度は 0.8) においては、図3に示すように変態点における格子定数の変化が小さく変態点以下で格子定数が連続的に変化します⁽⁷⁾。このような Fe-31. Pd 合金や Fe₃Pt において、変態点付近の温度で c' の影響が最も顕著に表れる [100] 方向に応力を加え、応力-ひずみ曲線を測定しました。例として、Fe-Pd 合金の場合を図4に示します (すなわち、 c' が小さいので、わずかな応力で大きなひずみを得ることができると考えた。)⁽⁸⁾。この図から、応力が低い場合には、プラトーが観察され、変態が1次で起きている様子がわかります。しかしながら、さらに応力を負荷すると、ヒステリシスの小さな弾性的な変形を示し、その値は、予想した通り大きな値で6%にも達します。これは、変態が1次から2次へと変わり、応力下での構造変化が連続的となっていると考えられます。その妥当性を、中性子線回折実験で、構造、回折反射の位置、強度により確かめました⁽⁹⁾。また、このソフト化の原因、すなわち、2次転移の起源を第一原理計算により求めました⁽¹⁰⁾。その結果、この起源は、バンドヤーン・テラー効果に起因していることがわかり、この効果のために逆空間の原点 (Γ 点) における格子軟化が生じ、弾性定数 c' がマルテンサイト変態温度に向かってゼロに近づくことになると推論しました。しかしながらその定量性には問題があり、今後の課題となります。さらに、これらの系においては、変態開始応力が、ソフト化のために極めて低いことならびにすべり変形にのみに関与する弾性定数 (c_{44}) が十分大きな値となるため、これらの系では臨界点の存在が予測されます (変態応力は低く、降伏応力は数百 MPa 程度となり大きい。) そこで、Fe-Pd 合金における一定応力下での温度-ひずみ曲線から応力-温度相図を求めました。得られた結果を図5に示しました⁽¹¹⁾。この図からわかるように、確かに臨界点が存在し、その温度と応力は、それぞれ 280K、40MPa となりました。また、この連続的変態を考慮すると、応力による熱量効果が、数百 K もの広範囲の温度領域で存在することが期待され、事実それを初めて明らかにし、かつその大きさを定量評価しました。

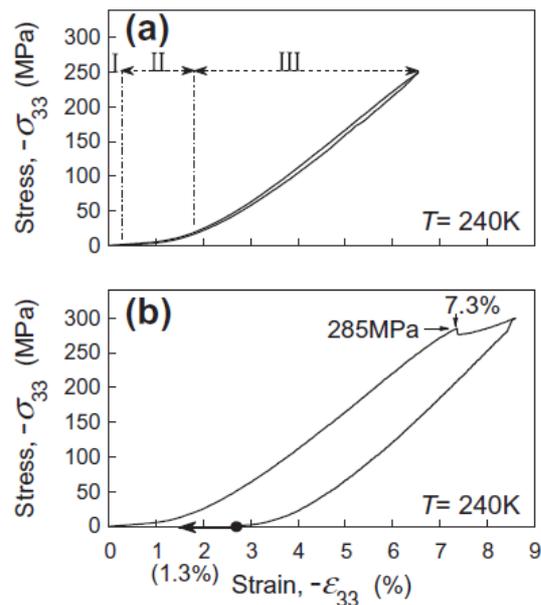


図 4 Fe-31.2Pd 合金における応力-歪曲線. I は母相の弾性域, II は応力誘起マルテンサイト変態によるステージ, III はマルテンサイト相における弾性変形⁽⁸⁾.

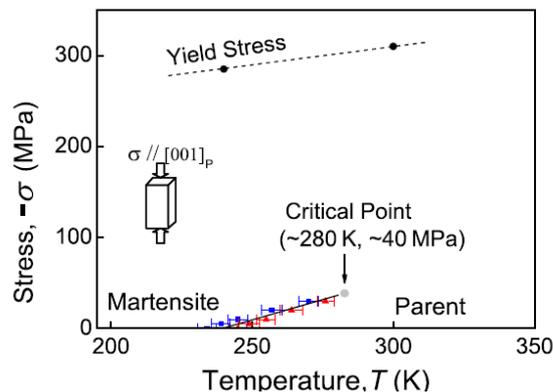


図 5 Fe-31.2Pd 合金における応力-温度相図. 母相とマルテンサイトの境界が臨界点で消滅する⁽¹¹⁾.

(3) f 電子系金属間化合物 (DyCu, DyAg) の磁性と電気伝導特性

磁気冷凍材料として有望視されている B2 構造の Dy 系金属間化合物, 特に DyCu, DyAg の磁気構造は, 複雑な $\langle 111 \rangle$ 伝搬ベクトルの triple- q 構造を有しています. この磁気構造は単に交換相互作用では説明ができないことから, 他の相互作用の存在が示唆されています. 本研究では, この相互作用が四極子相互作用であることを, 強磁場下で観察される多段階メタ磁性転移の方位依存 (図 6) とその転移磁場を調査ならびに中性子線回折によりいくつかのメタ磁性構造の同定を行い, 明確にしました. このことについて以下に簡単に述べたいと思います.

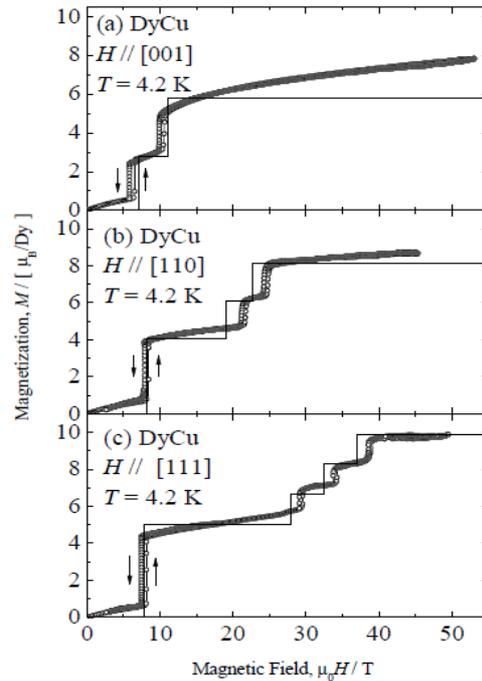


図 6 DyCu の[100], [110], [111]方向の磁化曲線⁽¹²⁾. ○はパルス磁場による測定値, 実線は(4)式を用いた計算値.

まず, 四極子相互作用を含む次式のハミルトニアンを考えました⁽¹²⁻¹⁴⁾.

$$\begin{aligned}
 H = & \sum_{i,j} -2J(\mathbf{r}_{i,j}) \left(S_x(\mathbf{r}_i)S_x(\mathbf{r}_j) + S_y(\mathbf{r}_i)S_y(\mathbf{r}_j) + S_z(\mathbf{r}_i)S_z(\mathbf{r}_j) \right) \\
 & + \sum_{i,j} -G(\mathbf{r}_{i,j}) \left(O_{yz}(\mathbf{r}_i)O_{yz}(\mathbf{r}_j) + O_{zx}(\mathbf{r}_i)S_{zx}(\mathbf{r}_j) + O_{xy}(\mathbf{r}_i)O_{xy}(\mathbf{r}_j) \right) \\
 & + \sum_i g_J \mu_B \mu_0 \left(S_x(\mathbf{r}_i)H_x + S_y(\mathbf{r}_i)H_y + S_z(\mathbf{r}_i)H_z \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで J および G は交換相互作用係数および四極子相互作用係数であり, S_x, S_y, S_z および O_{yz}, O_{zx}, O_{xy} はスピンベクトルおよび四極子テンソルの各成分, g_J, μ_B および μ_0 はランダウの g 因子, ボーア磁子および真空透磁率であります.

この式にある交換相互作用係数と四極子相互作用係数に対して第 2 近接まで考慮した分子磁場近似を行ない, それらの係数 (2 つの未知数となる) を, 磁場下での中性線回折で決めたいくつかのメタ磁性構造の 2 つの転移磁場を用いて, 決定しました. 次に, 主要 3 軸方向のすべてのメタ磁性相を適切な仮定を置き構築し, 式(2)を用いメタ磁性の磁化曲線を計算しました. 得られた DyCu の磁化曲線を図 6 の点線で示しました. この図から, いずれの方向においても, 少しは異なるが, おおむね実験を再現しているといえます. この結果から, 四極子交換相互作用の妥当性が得られたと考えております. また, DyCu の交換相互作用係数は 79K であり四極子相互作用係数は 45K と解析され, それらの大きさが同程度であることから, この系では四極子相互作用が大きな役割を担うと結論づけました. その詳細は原著論文を参考していただければと思います⁽¹²⁾.

結び

本講が若い研究者の方々に少しでも参考なると大変光栄に思います. さらに, 学生教育への最後の貢献として, 「理工系の量子力学」(阪大出版会) ならびに「統計力学講義ノート」(内田老鶴圃) と題する教科書を 3 人の先生方と書きました. 少しでも参考なると大変光栄

に思います。

本稿を結ぶにあたり、これまでいろいろな議論とお世話をいただきました材料系教室ならびに阪大の教職員、また、磁気科学会を含む様々な学会関係の先生および企業の方々に、この場をお借りまして心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) T. Kakeshita, K. Kuroiwa, K. Shimizu, T. Ikeda, A. Yamagishi, M. Date: *Mater. Trans., JIM*, 34 (1993) 415-422.
- (2) T. Kakeshita, T. Saburi, K. Kindo, S. Endo: *Jpn. J. Appl. Phys.* 36 (1997) 7083-7094.
- (3) T. Kakeshita, K. Kuroiwa, K. Shimizu, T. Ikeda, A. Yamagishi, M. Date: *Mater. Trans., JIM*, 34 (1993) 423-428.
- (4) T. Kakeshita, T. Yamamoto, K. Shimizu, K. Sugiyama, S. Endo: *Mater. Trans., JIM*, 36 (1995) 1018-1022.
- (5) M. Sugiyama, R. Oshima, F. E. Fujita: *Trans. Jpn. Inst. Metals*, 10 (1986) 719-730.
- (6) S. Muto, R. Oshima, F. E. Fujita: *Metall. Trans. A*, 19 (1988) 2931-2936.
- (7) T. Fukuda, T. Sakamoto, T. Kakeshita, T. Takeuchi, K. Kishio: *Mater. Trans.*, 45 (2004) 188-192.
- (8) F. Xiao, T. Fukuda, T. Kakeshita: *Acta Mater.*, 61 (2013) 4044-4052.
- (9) T. Yamaguchi, T. Fukuda, T. Kakeshita, S. Harjo, T. Nakamoto: *Appl. Phys. Lett.*, 104 (2014) 231908.
- (10) T. Yamamoto, M. Yamamoto, T. Fukuda, T. Kakeshita, H. Akai: *Mater. Trans.* 51(2010) 896-898.
- (11) F. Xiao, T. Fukuda, T. Kakeshita: *Philos. Mag.*, 95 (2015) 1390-1398.
- (12) T. Kakeshita, T. Terai, H. Sonomura, M. Yasui, T. Kida, M. Hagiwara: *Physica B: Cond. Mat.* 420 (2013) 32-35.
- (13) M. Yasui, T. Terai, T. Kakeshita, M. Hagiwara: *J. Phys. Conf. Ser.* 165 (2009) 012059.
- (14) S. Yoshii, H. Nakanishi, T. Kakeshita, K. Kindo: *Mater. Trans.* 44 (2003) 2582-2588.

学生ポスター賞を受賞して

鹿児島大学（現ソニーセミコンダクターマニュファクチャリング） 高橋巡季

学生ポスター賞を頂きまして、ありがとうございます。ご指導頂きました小山佳一教授、三井好古准教授、尾上昌平さん、また研究面以外でもフォローして頂いた学生部屋の皆さんに深く感謝申し上げます。今回、コロナ禍でありましたが、私自身としては初めて対面で学会へ臨むことができ、貴重な体験となりました。学会運営に関わります関係者の皆様にも深く感謝申し上げます。

私は学生ポスター賞受賞の2021年当時、鹿児島大学大学院に在学していましたが、現在は同大学院を修了し、ソニーセミコンダクターマニュファクチャリング株式会社にてイメージセンサーの開発関係の業務を行っています。在学時の研究内容は強磁性体であり、そこから半導体と内容が大きく異なる分野での業務になっており、日々色々な知識を吸収しながら業務に取り組んでいます。

研究内容等につきまして、学会で発表致しましたので、ここでは私自身が発表した際に考えていたことなどを書かせて頂こうと思います。私は学会発表の際、発表内容に関して「自分が全部見つけたんだ」と思う位の強い自信を持つことと、不明・曖昧なことに関してはポジティブな表現で応答することを心がけていました。これは私が高校時代（大分県立佐伯鶴城高等学校）に科学部で全国大会の発表したときから気を付けていることでした。私自身がとてつもない研究を通して大発見をできるような賢いかつ幸運な人間では無いと自覚していたので、そこをカバーできるような話し方などに気を付けようという考えでした。

これは仕事へ従事する中でも、十分に活着していると感じます。仕事は研究に比べると納期がよりシビアで、ここを守るため何人かで協力して時間を短縮・間に合わせています。そこでは間違いなく人と関わるので資料を用いて情報共有します。この際に話し方・伝え方が関係していると思います。これから学会の発表する方や就職を考えている学生皆さんに上記の発表態度と質疑応答の考え方が参考になれば幸いです。

最後に宣伝となりますが、今現在働いているソニーセミコンダクターマニュファクチャリング株式会社の紹介をします。ソニーがイメージセンサーの世界シェア1位を持っているのですが、その製造に関わっている会社になります。イメージセンサーはカメラ内部の光電変換を行う半導体部品で有り、一般的な一眼レフカメラなどからスマートフォン、監視、産機、車にも搭載されている製品を開発・製造しています。課長クラスの方でも人当たりが凄く良く、雰囲気の良い社風であり、私のように半導体を全く扱っていない人でも十分に働いていける職場だと感じています。これから就職活動の学生で興味がある方がいれば是非企業調査してみてください。

学生ポスター賞を受賞して

鹿児島大学 理工学研究科 長野杜春

この度は第 15 回日本磁気科学会年会において、学生ポスター賞をいただき誠にありがとうございます。このような栄誉ある賞をいただけたのは、普段からご指導して下さる小山先生、三井先生、測定のご協力をいただいた東北大学の梅津先生をはじめ、お世話になった多くの皆様のお陰です。厚くお礼申し上げます。今回の受賞にあたり、記事の執筆の機会をいただきましたので、これまでの研究生活と今後の取り組みについて簡単に紹介させていただきます。

私の研究室では、温度や圧力のように磁場のパラメータを加え、強磁性相の合成を制御する研究や、磁気機能性材料の探索や機構の解明が行われています。そこで私の研究は、磁気機能性材料として注目されている金属間化合物の一部を他元素で置換した未知の金属間化合物の磁気特性を明らかにする研究を行っています。今回のポスター発表では「 $\text{Cr}_x\text{Mn}_{1-x}\text{ZnSb}$ 擬三元化合物の磁性と結晶構造」というタイトルで発表させていただきました。磁気冷凍材料として注目されている Mn 基強磁性体 MnZnSb の Mn を Cr で置換していくことによって結晶構造は変化せず、全置換した CrZnSb は非強磁性体であることを見出しました。また、磁気特性と格子定数の変化に関係性があることが分かり、 MnZnSb の Mn を 15%Cr で置換した化合物は、 MnZnSb と比較して磁気特性が向上することを明らかにしました。未知の化合物がどのような特性であるか予測し、実際に測定してなぜこのような結果となるか考察することが、とても面白い研究であると感じています。

私が研究室に配属された学部 4 年生の時から、コロナウイルスが流行し、先輩方がされてきたような大学院生活とは少し異なった生活が強いられました。中でも、不自由なく研究をすることができ、昨年秋には東北大学へ行かせていただき、磁化測定を行うことができました。また、オンラインではありますが多くの学会で発表する機会をいただき、とても恵まれた環境で大学院生活を送ることができていると感じています。そして、今回行われた日本磁気科学会はハイブリット開催が鹿児島大学で開催され、初めて現地で学会に参加することができました。オンラインでは経験できない他大学の先生方との会話や意見交換はとても楽しく、とても良い経験になりました。ポスター発表では、多くの先生方から様々な質疑や助言をいただき、今後の研究を進めていく上で重要なことを多く学ばせていただきました。このようなオフラインでしか得ることのできない経験を多くされてきたコロナ禍以前の先輩方をとても羨ましく思ったことを鮮明に覚えています。大学院生活も残り僅かです。多くの未知の化合物に関して研究を行い理学的な材料マップの開拓を目標に、少しでも科学の発展に寄与することができれば良いなと考えています。最後に、このような機会を与えてくださいました学会に携わる先生方に深く感謝申し上げます、結びとさせていただきます。

2022年 事業計画

事務局長 茂木 巖

本会会則13条に基づき、2021年理事会、および2021年総会において、2022年1月から12月までに以下の事業を行うことが議決により承認された。

1. 第16回年会
コロナ禍の状況を鑑み、関東支部の主権によりハイブリッド開催とする。
2022年11月7日から9日 日本大学津田沼キャンパス+オンライン
2. 第30,31回研究会
有機・バイオ分科会の主権による第30回研究会を開催する。
高分子・材料プロセス分科会の主権による第31回研究会を開催する。
3. 会誌発行
第16巻を発行する。
4. 総会
3月に臨時総会開催し、本の出版事業を始めることに関して議論した
11月に、会則20条により総会を開催し、第22条に従って事業報告および会計報告等を行う。
これらはコロナ禍の状況のため、メール会議で行う。
5. 学会表彰
第12回優秀学術賞および第12回功労賞に関して、規定および内規に従い選考を行い、年会において授賞式を行う。
6. 共催、協賛、後援等
日本磁気学会主催の研究会、応用物理学会磁気科学研究会等の国内外の関連する団体と協力して学会および研究分野の発展をはかる。

以上

第1章 総則・目的・事業

第1条 この団体は日本磁気科学会（以下本会）という。

2 本会の英文呼称は **The Magneto-Science Society of Japan** とする。

第2条 本会は磁気科学を研究している、あるいは興味を持つ国内外の個人および諸団体の相互の連絡を促進し、国内外の磁気科学の発展とその成果の普及に務め、学術・教育・産業・環境・資源・医療・福祉などの各分野に寄与することを目的とする。

第3条 本会は、前条の目的を達成するために、次の事業を行う。

- (1) 磁気科学に関する研究集会を開催する。
- (2) 磁気科学に関する図書を発行する。
- (3) 磁気科学の研究を促進するための必要な事業を行う。
- (4) 磁気科学の成果を普及するための必要な事業を行う。

第4条 この会則の実行に必要な規則の制定・改廃は理事会が行う。

第5条 本会のすべての会議は議事録を作成し、事務局が保管する。

第2章 会員

種類

第6条 会員は、国籍または本拠の存在する国は問わず、次の4種類とする。

- (1) 正会員
- (2) 学生会員
- (3) 賛助会員
- (4) 提携会員

2 正会員は本会の事業に参加する研究者・技術者・教育者およびその他の個人とする。

3 学生会員は本会の事業に参加する大学および大学院に在学中の者とする。

4 賛助会員は本会の事業に協力する営利団体とする。

5 提携会員は本会の事業に協力する非営利団体とする。

入会

第7条 本会に入会しようとするものは、別に定める規則によって事務局に申し込み、理事会の承認を得なければならない。

2 会員は別に定める規則により入会金・会費を納めるものとする。納入した入会金・会費は払い戻さない。

権利

第8条 会員は次に掲げる権利を有する。

- (1) 本会の催す研究集会での発表およびその他の行事への参加
- (2) 本会に対する希望を申し出てその審議を求めること
- (3) 本会の発行する図書への寄稿

退会・除籍・除名

第9条 会員は別に定める規則により会長に届け出て退会することができる。

2 会員は死亡し、または失踪宣言を受け、または賛助会員または提携会員である団体が解散したときはその資格を喪失し、除籍となる。

3 会員が次の事項に該当するときは、会長が除名すること もしくは、会員資格を停止することができる。

- (1) 正当な理由なく会費等を1ヵ年以上滞納したとき
- (2) 本会の名誉を傷つけ、理事会の承認後、総会において除名の決議が行われたとき

第3章 組織

役員

第10条 本会に次の役員を置く。

- (1) 理事（会長）1名
- (2) 理事（副会長）3名以内（うち事務局長1名）
- (3) 理事（上記(1),(2)以外）理事全員で25名以内
- (4) 監事2名以内
- (5) 顧問 若干名

2 役員は無給とする。

3 理事および監事は総会において正会員中から選任する。

理事・監事の選任の方法は別に定める規則による。

理事会

第11条 理事会は理事および監事により構成される。

2 理事は互選により会長を選出する。

3 理事・監事の任期は1月1日から翌年の12月31日までの2年間とする。

4 理事・監事は再任ができる。ただし、連続して就任できる期間は3期6年までとする。

5 監事は理事を兼ねることができない。

第12条 会長は本会を代表し、会務を総理する。

2 会長は総会および理事会を招集してその議長となる。

3 会長は副会長を指名する。

4 副会長は会長を補佐し、会長の指示により、または会長に事故あるときは、その職務を代行する。

5 事務局長は、会長の指示により、本会の事務及び事務局委員会を掌理する。

6 その他の理事は、会長の指示により会務を担当する。

7 監事は本会の会計と業務を監査する。

第13条 理事会は、この会則に定める総会の権限であるもの以外の次の事項を議決し執行する。

- (1) 事業計画および収支予算
- (2) 事業報告および収支決算
- (3) 会員の入退会
- (4) 諸規則の制定および改廃
- (5) その他重要な事項

第14条 理事・監事が次の事項に該当するときは、総会の議決に基づいて解任・交代することができる。

- (1) 一身上の都合により役員の任を続けられないとき
 - (2) 心身の障害のために職務の執行に耐えないとき
 - (3) 職務上の義務違反または役員たるにふさわしくない行為があるとき
- 2 任期の途中で新しく選任された役員の任期は前任者の残余の期間とする。

顧問

第15条 顧問は、会長が有識者の中からこれを委嘱する。

- 2 顧問の任期は、委嘱した会長の任期と同じとする。
- 3 顧問は再任ができる。
- 4 顧問は他の役員を兼ねることができない。

第16条 顧問は、会長の求めに応じて意見を述べることができる。

- 2 顧問は随時、会長に対して意見具申ができる。

事務局

第17条 本会は会長の下に事務局を置く。

- 2 事務局は事務局長(理事・副会長)が管理する。
- 3 事務局の運営は別に定める規則による。

支部

第18条 本会は理事会の下に支部を置き、各地域において本会の事業を促進する。

- 2 会長が理事のうちから支部長を指名する。
- 3 支部の設置・運営は別に定める規則による。
- 4 必要に応じて国外に支部をおくことができる。

分科会

第19条 本会は理事会の下に分科会を置き、各分科における研究を促進する。

- 2 会長が理事のうちから分科会長を指名する。
- 3 分科会の設置・運営は別に定める規則による。
- 4 必要に応じて時限的な分科会を設置することができる。

第4章 総会

第20条 総会は正会員によって構成される。

- 2 通常総会は毎年1回、会長が招集する。
- 3 臨時総会は次の場合に会長が招集する。
 - (1) 会長がこれを必要と認めたとき
 - (2) 正会員の5分の1以上からあらかじめ議事を示して請求されたとき

第21条 会長が総会の議長となる。

- 2 会長の指名により、会長以外の者が総会の議長となることができる。
- 3 総会は正会員の2分の1以上が出席しなければ議事を開き議決することはできない。
- 4 正会員は書面あるいは書面に替わるものをもって会議に出席することができる。
- 5 総会の議事は出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長の決するところによる。
- 6 総会は郵便・電子メール等による通信媒体を利用して開催することができる。

第22条 総会は、理事会から提出される次の事項を議決する。

- (1) 理事・監事の選任
 - (2) 事業報告および収支決算
 - (3) 事業計画および収支予算
 - (4) その他理事会において必要と認めた事項
- 2 総会は、正会員の5分の1以上からあらかじめ請求された議事を審議する。

第5章 資産および会計

第23条 本会の会計年度は毎年1月1日にはじまり12月31日に終わる。

第24条 本会の資産は次のとおりである。

- (1) 入会金および会費
- (2) 事業に伴う収入
- (3) 資産から生じる果実
- (4) 寄付金品
- (5) その他の収入

第25条 本会の資産は理事会の議決を経て会長の指示の下で事務局長が管理する。

第26条 本会の事業計画および収支予算は、毎会計年度の開始前に、会長の指示の下に事務局長が起案し、理事会の議決を経て、総会にて承認を受けなければならない。

2 本会の収支決算は、毎会計年度の終了後に、会長の指示の下に事務局長が作成し、理事会の議決を経て、総会にて承認を受けなければならない。

第6章 著作権

第27条 本会の発行する出版物ならびに Web サイト等に記載された各種記事の著作権は本会に属するものとする。また、転載の希望がある場合は所定の様式の転載許可申請書を提出すること、ならびに

完全引用の場合は内容に関して一切の改変を認めないこと、部分引用の場合は完全な引用情報を付すことを条件に転載を認める。ただし、これらの各種記事の著者が自己引用する場合はこの限りではない。

第7章 会則の改廃および解散

第28条 本会則を改廃するには理事会の提案により、総会で過半数の同意がなければならない。

第29条 本会を解散するには理事会の提案により、総会で4分の3以上の同意がなければならない。

補則

- 1 本会は2006年4月1日に発足する。
- 2 発足時から2006年度通常総会が開催されるまでの間は旧新磁気科学研究会の会則および人事を援用する。
- 3 本会則に関わらず、2007年度の会費を事前に徴収するものとする。

以上

日本磁気科学会 理事会運営規則

2007/06/06理事会決定

総則

第1条 本規則は、日本磁気科学会会則に従い、日本磁気科学会理事会(以下、理事会という)の運営に関して制定するものである。

第2条 理事会に関わる事務は事務局が処理する。

会議の開催

第3条 理事会は会長が招集し、その議長となる。

2 会長の指名により、会長以外の者が理事会の議長となることができる。

3 議長は、原則として、年1回以上、理事会を開催しなければならない。

4 議長は、理事および監事の2分の1以上により請求されたときには理事会を開催しなければならない。

5 理事会の議決は、理事および監事の2分の1以上の出席があった場合のみ有効とする。

6 理事および監事は、議長ないし理事または監事の1に委任状を託して議決を委任することができる。

7 理事会は郵便・電子メール等による通信媒体を利用して開催することができる。

8 議長は、必要あるときは理事と監事以外の者を理事会に参加をさせ、意見を聴取することができる。

会議の議決

第4条 理事会の議事は出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長の決するところによる。

2 第3条8項により参加した者は議決権を有しない。

理事の職務担当

第5条 理事の職務担当は次のとおりとする。

(1) 会長

(2) 副会長(①事務局長、②分科会総括、③会長が指示する職務)

(3) 支部長(①北海道・東北支部、②関東支部、③中部支部、④近畿支部、⑤中国・四国・九州支部)

(4) 分科会会長(①物理化学分科会、②高分子・材料プロセス分科会、③無機・金属分科会、④有機・バイオ分科会、⑤分離・分析分科会、⑥磁場発生分科会)

(5) 特定事項担当(①産学官連携、②国際会議)

(6) 事務局委員会(①事務局長((2)の①に同じ)、②財務委員長、③広報委員長、④企画委員長)

(7) その他、会長が指示する職務

2 理事は複数の職務を担当することができる。

支部

第6条 支部の事業は支部長が統括する。

2 支部長の下に支部組織を設け、その形態および運営は支部において決定する。

3 支部に関わる事務は支部組織が処理する。

4 支部における事業は次の事項とする。

- (1) 支部地域における磁気科学の振興
- (2) 支部地域における本会会員の増員
- (3) 本会年次大会の実行

第7条 支部の事業計画および予算収支は、毎会計年度の開始前に支部が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 支部の事業実績および収支決算は、毎会計年度の終了後に支部が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

分科会

第8条 分科会の事業は分科会会長が統括する。

- 2 分科会に分科会組織を設ける。その形態および運営は分科会において決定する。
- 3 分科会に関わる事務は分科会が処理する。
- 4 分科会における事業は次の事項とする。
 - (1) 磁気科学の各分科における学術の振興
 - (2) 磁気科学の各分科における本会会員の増員
 - (3) 学術集会の企画と実施

第9条 分科会の事業計画および予算収支は毎会計年度の開始前に分科会が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 分科会の事業実績および収支決算は毎会計年度の終了後に分科会が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

年次大会

第10条 年次大会は理事会が決定した実行委員長の下に次の事項を実行する。

- (1) 年次大会の企画、準備、広報、実施
- (2) 年次大会のための実行委員会の構築
- (3) その他の年次大会実行に関わる諸事項

第11条 年次大会の事業計画および予算収支は、年次大会の開始前に実行委員長が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、大会開催に関して緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 年次大会の事業実績および収支決算は、年次大会の終了後に実行委員長が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

特設の作業部会

第12条 理事会は、第5条(1)-(7)以外の職務について必要に応じて理事会の下に特別の事項を担当する作業部会(以下、部会という)を設置することができる。

- 2 部会主査は、第5条(7)に基づき、会長が理事の中から指名する。
- 3 部会の運営に関する事項は別に定める規定による。

規則の改廃

第13条 本規則の改廃は理事会が行い、総会で報告する。

以上

日本磁気科学会 学会表彰規定

(2011年5月30日理事会決定)

改訂(2017年3月30日理事会決定)

第1条 (総則) 日本磁気科学会は、本会の賞を設け、本規定によって授与する。

第2条 次の3種の賞とし、毎年1回表彰する。

1. 優秀学術賞 賞状並びに記念品
2. 研究奨励賞 賞状並びに記念品
3. 功労賞 賞状並びに記念品

第3条 (優秀学術賞) 磁気科学分野において独創的かつ優れた研究業績を挙げた研究者に授与する。

第4条 (研究奨励賞) 年会において優秀な発表を行った若手に授与する。従来の、講演奨励賞・ポスター賞を引き継ぎ、その規定に従う。

第5条 (功労賞) 学会活動および磁気科学分野の普及に貢献した、あるいは当該分野で顕著な業績をあげた研究者に授与する。

第6条 (表彰の件数、人数) 優秀学術賞の授賞件数は毎年原則1件以内、功労賞は毎年原則1名とする。優秀学術賞の受賞者は1件につき複数名も可とする。

第7条 (選考委員会) 受賞候補者選考のため、表彰内規に従い選考委員会を設ける。委員は理事会の承認を得て、会長が委嘱する。

第8条 (受賞候補者の推薦) 会員(賛助会員を含む)は、優秀学術賞、功労賞の受賞候補者として適当と思う者を、選考委員会に推薦することができる。この場合は、自薦も認められる。

第9条 (受賞の決定) 選考委員会は、受賞候補者を選考し、会長に報告する。会長は理事会の議決により受賞を決定する。

第10条 (本規定の変更) 本規定の変更は理事会の議を経て行う。

附 則 この規定は2017年3月31日より実施する。

日本磁気科学会 年会における優良若手研究発表に対する表彰制度

2007/6/06理事会決定

- 賞の名称 : 研究奨励賞 (35 歳以下)、学生ポスター賞
- 受賞対象者 : 以下の条件すべてを満たすもの
- 1) 日本磁気科学会 会員
 - 2) 日本磁気科学会 年会で筆頭著者として研究発表を行なった者
 - 3) 当該年会開催年度の 4 月 2 日時点で 35 歳以下の者(研究奨励賞)または、博士課程以下に在学する学生(学生ポスター賞)
 - 4) 過去に該当する賞を受賞したことがないもの。
- 審査方法 : 講演発表申込時に、本人により審査希望の申請を受け付ける。その際、研究奨励賞については、本人に自身の発表する研究に関するアピール文を記入させる。
- プログラム委員会が、1 人の申請者につき、3 名の審査員を日本磁気科学会会員の中から指名する。ただし、発表の共著者、申請者と同一機関に所属するものは、審査を行なうことができない。
- 各審査員は、提出された要旨、年会における申請者本人による講演について、定められた様式に基づき、審査・採点する。
なお、採点結果の提出は、年会終了後 1 週間以内とする。
- 採点結果は、表彰選考委員会にて集計し、授賞者を選考する。
表彰選考委員会メンバーは当該年会のプログラム委員長が指名する。
- 授賞者数は、発表申込件数に依存して、その最大数を決定する。
研究奨励賞、学生ポスター賞ともに、年会における全体の発表数 50 件につき 1 件の割合を最大数の目安として選考する。ただし、基準を満たすものが少ない場合には、その数を減じ、基準を満たすものがない場合は、授賞なしとする。
- 審査内容 : 要旨、プレゼンテーション、本人の寄与、研究の新規性、意義、質疑応答、総合評価。総合評価以外の各項目は 5 段階、総合評価は 10 段階で評価し、さらにコメントをつける。
- 受賞者の発表 : 表彰選考委員会で受賞が決定したのものについては、学会発行のニューズレターに掲載することで発表し、賞状と副賞を郵送にて授与する。
- その他 : 学生の発表であっても、特に優秀と認められる場合は、研究奨励賞の授与対象となる。

磁気科学会役員 2021-2022年

役職 (2021-2022年)	理事・監事 (機関・職)
会長	岩井一彦 (北海道大学大学院工学研究科・教授)
副会長 (分科会統括)	岩坂正和 (広島大学RNBS・教授)
副会長 (事務局長)	茂木 巖 (東北大学金属材料研究所・助教)
支部長 (北海道・東北)	淡路 智 (東北大学金属材料研究所・教授)
支部長 (関東)	後藤 博正 (筑波大学数物系・准教授)
支部長 (中部)	田中 諭 (長岡技術科学大学・准教授)
支部長 (近畿)	堀井 滋 (京都先端科学大学・教授)
支部長 (中国・四国・九州)	小山 佳一 (鹿児島大学理工学研究科・教授)
分科会長 (物理化学)	奥村 英之 (京都大学エネ科学研究科・准教授)
分科会長 (高分子・材料プロセス)	伊掛 浩輝 (日本大学理工学部・准教授)
分科会長 (無機・金属)	鈴木 達 (物材機構・グループリーダー)
分科会長 (有機・バイオ)	井原 一高 (神戸大農学研究科・准教授)
分科会長 (分離・分析)	飯國 良規 (名古屋工業大学・助教)
分科会長 (磁場発生)	高橋弘紀 (東北大学金属材料研究所・助教)
特定事項 (国際会議)	米村弘明 (崇城大学工学部 ナノサイエンス学科・教授)
特定事項 (国際会議)	秋山庸子 (大阪大学工学研究科 環境・准教授)
特定事項 (国際会議)	櫻井智徳 (岐阜医療科学大・教授)
特定事項 (国際会議)	池添泰弘 (日本工業大学・教授)
特定事項 (産学連携)	渋谷和幸 (JASTEC、ソリューション推進部)
特定事項 (産学連携)	牛島 栄造 (株式会社 アイシンコスモス研究所)
特定事項 (将来構想)	浜崎亜富 (信州大学学術研究院理学系・准教授)
特定事項 (将来構想)	三井好古 (鹿児島大院理工・准教授)
事務局委員会 (財務)	小野寺 礼尚 (茨城高専・准教授)
事務局委員会 (広報)	久住 亮介 (京都大学大学院農学研究科・助教)
事務局委員会 (企画)	牧 祥 (岡山理科大・准教授)
監事	安藤 努 (日本大学生産工学部・教授)
監事	藤原好恒 (広島大学理学研究科・准教授)
顧問	山本 勲 (横浜国立大学工学研究院・教授)
顧問	安田秀幸 (京都大学大学院工学研究科・教授)

第 29 回日本磁気科学会 分科会研究会

「線材開発・評価からマグネット開発」

予稿集

2021 年 12 月 9 日 (木)

於： オンライン会議

主催：日本磁気科学会 磁場発生分科会

強磁場・大口径超伝導マグネット用低温超伝導線材の開発

東海大学 小黒英俊

1. はじめに

超伝導マグネットにより世の中に「強磁場」が生まれ、「無冷媒超伝導マグネット」ができたことで、超伝導マグネットの普及が進み磁気科学が生まれた。この、「磁場応用」にとって重要な超伝導マグネットであるが、これに使われる線材は、9割以上が低温超伝導線材である NbTi で占められている。その理由は、NbTi が合金であり機械的に強く使いやすかったことと、多くの超伝導製品、例えば MRI において、温度による制限を除くと、NbTi の超伝導特性で十分であるためである。しかし、研究の世界では新たな発見を生み出すための新しい「環境」として、より強い磁場が望まれる。さらに、その磁場空間が広がることで、可能となる実験が増えることも容易に想像できる。このため、強磁場、大口径の 2 点は超伝導マグネットにとって大きなステータスとなる。

強磁場を実現するには、電磁石である超伝導マグネットに大きな電流を流すことで良いが、そのときに超伝導マグネット用線材は強磁場にさらされるため、線材そのものの超伝導特性が高い必要がある。このときには、前述の NbTi に加えて、Nb₃Sn が使われるのが一般的である。(さらなる強磁場の場合に、高温超伝導が必要となる。)ところが、Nb₃Sn は金属間化合物であるため、金属との複合化により線材化はなされているものの、機械的に NbTi より圧倒的に弱い、という欠点がある。この欠点は、材料が化合物であるため取り除くことができない。さらに厄介なことに、Nb₃Sn は超伝導特性が結晶構造に起因して高くなっていることがあるため、変形を受けると超伝導特性が劣化し、通電電流限界となる臨海電流密度が低下してしまう問題も存在する。

現在の低温超伝導線材開発は、Nb₃Sn 線材が主流であり、それ以外には Nb₃Al、MgB₂、鉄系超伝導線材などが研究されている。すでに NbTi は線材開発の報告は無く、ケーブル化などの大型応用へ向けた報告が多い。そのため、本稿では Nb₃Sn 線材の開発動向を中心に紹介していく。

2. 世界と日本の Nb₃Sn 研究動向

Nb₃Sn 研究は、高温超伝導線材の利用が難しいことから、特に大型応用である加速器や核融合で注目を集めている。その中で、世界と日本の開発動向が、わかりやすく異なっている。

世界の Nb₃Sn 線材研究の目的は、現在より電流密度の高い線材を開発すること、に集中している。これは、CERN が計画している次世代円型加速器 FCC に必要な Nb₃Sn 線材の性能が、16 T にて 1500 A/mm² 必要であることが大きく関係している[1]。この目標を打ち出した当時、Nb₃Sn 線材の臨界電流密度は、大きいもので 300 A/mm² であり、目標まで 5 倍もの差があった。この大きな目標に対し、世界中で研究が進められ、線材断面積中の Nb₃Sn 占有率の増加、Nb₃Sn 結晶粒微細化によるピンニング特性の向上、新たなピンニングセンターの導入、そして、第 3, 4 元素の導入などが行われてきた。ヨーロッパでは、以前より Nb₃Sn 線材の臨界電流密度の最高値を保持していた、RRP という、Nb 管に Sn を入れ、その Sn を拡散させて Nb₃Sn を作る製法で、1300 A/mm² という最高値を記録した[2]。日本では、分散法という、Sn の六角ロッドを Nb の六角ロッドで囲むような配置の線材で、1100 A/mm² の臨界電流密度を安定して提供できる線材の作製に成功した[3]。アメリカでは、Nb-4at%Ta-1at%Hf 合金を使うことで、Nb₃Sn 層の臨界電流密度が 1500 A/mm² を大幅に超えた、と発表した[4]。このように、当初はあり得ないと思われた非常に高い目標に対して、世界中でそれを満たすための線材開発が、今も続いている。

日本では上記以外の動きがある。機械特性向上を目指した研究である。これには、強磁場超伝導マグネット用の線材開発(東北大)や、核融合用(核融合研)、加速器用(NIMS)があり、いずれも独自の方法で行なって

いるが、全て機械特性向上を目指した動きである。

東北大では、筆者が学生の時代から高強度 Nb₃Sn 線材の開発を行っており、すでに共同利用に供されている 25 T 無冷媒超伝導マグネットに使われている Nb₃Sn ラザフォードケーブルにも、CuNb 合金で補強した Nb₃Sn 線材を利用している[5]。これは、Cu-Nb 合金を Nb₃Sn 線材に組み込むことで、特に引張り方向に対して強化された線材である。開発の歴史が長く、すでに実用化もされている状況であり、さらに 30T 級無冷媒超伝導マグネット用線材の開発も進められている[6]。核融合研では、Cu-Sn 合金に穴を開け、Nb ロッドを挿入して作製する、ブロンズ法を用いた開発を行なっている。ブロンズ法で Nb₃Sn 線材を作製すると、後には Cu が残り、これがフィラメントを保護するので、機械的には強い線材であった。この、残った Cu に着目し、これを合金化することで、より強い線材開発を行なっている。当初 Cu-Sn-Zn 合金で研究を行っていたが、これを Cu-Sn-In に変更することで、線材の横方向から加わる圧縮力に対し、非常に強い線材の開発に成功した[7]。この線材は、核融合炉用撚線では、線材同士が横方向に動くことでお互いに圧縮力を及ぼしあうため、このときの劣化防止に大きく寄与することが期待されている。NIMS では上記の合金化を内部拡散法という、Nb と Sn のロッドを、穴を開けた Cu ロッドに挿入して組み合わせる方法で行なっている。Cu の代わりに Cu-Zn 合金を使い、Nb と Sn のロッドを挿入し、母材を強化することで「使いやすい線材を作製する」ことが当初の目的だったとのことである[8]。現在は機械特性の測定を進めているところであり、今後の結果が期待される。

筆者はこれらすべての線材開発に携わっているが、その立場からそれぞれの特徴を簡単に述べる。CuNb 補強の場合は、最も引張りに対して強い線材の開発が可能である。引張り方向の電磁力の影響が大きい超伝導マグネットには、この線材が最も有効と言える。Cu-Sn-In 補強は、横方向からの圧縮力に対する耐性が非常に大きい。このため、開発者の目的である、核融合炉用の線材に有効であるが、3 元系合金にすることで Sn の含有量が減ってしまい、高い臨界電流値を得るのが難しいことが問題となっている。Cu-Zn 補強内部拡散法は、高い強度と臨界電流を共存させる可能性を秘めた線材であり、機械特性に注目した開発はスタートしたばかりのため、今後期待される。

3. まとめ

すでに発見から 70 年、線材化からも 50 年経過した Nb₃Sn 線材であるが、まだ研究開発が続いており、その超伝導特性と機械特性が向上し続けている。すでに強磁場超伝導マグネットでは、高温超伝導マグネットのバックアップ的な存在になっているが、逆にバックアップとしてはなくてはならない存在である。大型マグネットでは、高温超伝導ではなく未だ Nb₃Sn が主流であり、今後もその開発が続いていくことが見込まれる。20 年後にはパラダイムチェンジを終え、高温超伝導線材が主流となっていることが期待されるが、それまでは Nb₃Sn 線材の研究開発は続いていくことになると考えられる。

参考文献

- [1] A. Ballarino et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25 (2015) 6000906
- [2] C. Sanabria et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 31 (2018) 064001
- [3] S. Kawashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30 (2020) 6000105
- [4] S. Balachandran et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 32 (2019) 044006
- [5] H. Oguro et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 29 (2016) 084004
- [6] M. Sugimoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30 (2020) 6000905
- [7] Y. Hishinuma et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30 (2020) 6001104
- [8] 太刀川恭治、他、日本金属学会誌 第 80 巻 (2016) 480-486

RE 系高温超電導線材の開発と評価

藤田真司（株式会社フジクラ）

1. はじめに

超電導体の中でも銅酸化物系超電導体は高い超電導転移温度（臨界温度、 T_c ）を有することから、様々な分野への応用が期待されている。なかでも、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ （YBCO）を含む $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ （REBCO：RE は希土類元素）超電導体は磁場中で高い臨界電流密度（ J_c ）特性を示し、機械強度にも優れることから、高磁場マグネット応用には最適な材料である。フジクラでは RE 系超電導線材の開発を長年行っており、現在では長尺かつ高特性の RE 系線材を量産・販売している[1]。本報告では、RE 系線材の最近の開発状況および、いくつかの特性評価手法について紹介する。

2. RE 系超電導線材の開発状況

REBCO が発見された当初は、単結晶上に成膜された薄膜で非常に高い J_c が確認されていたものの、結晶方位が揃っていない場合には J_c が大きく低下する問題があり[2]、長尺の線材として高い J_c を維持することは困難であった。この問題を解決するため、フジクラでは 1991 年にイオンビームアシスト蒸着（ion beam assisted deposition：IBAD）法を開発し、無配向の金属テープ基板の上に 2 軸配向した膜を形成することに成功し、この 2 軸配向膜上に REBCO をエピタキシャル成長させることで、初めて線材化することに成功した[3]。2 軸配向基板の作製方法は、IBAD 法の他に基板傾斜蒸着（inclined substrate deposition：ISD）法や rolling assisted biaxially textured substrate（RABiTS）法などがあるが、強度や配向性の観点で IBAD 法が優れている。当初は IBAD 法で蒸着する材料としてイットリア安定化ジルコニア（YSZ）や $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ （GZO）が用いられていたが、これらの材料では高い配向度を得るために厚い膜が必要であり、生産性が低く、長尺の配向基板を作製することが困難であった。その後、ごく薄い膜で配向が得られる MgO が報告され[4]、さらにフジクラでは大型のイオンソースを導入することで飛躍的に生産性が向上した[5]。一方、REBCO 薄膜の形成方法としては、パルスレーザー蒸着（pulse laser deposition：PLD）や有機金属化学気相蒸着（metal organic chemical vapor deposition：MOCVD）法、有機金属塗布熱分解（metal organic decomposition：MOD）法が代表的である。フジクラでは PLD 法を採用しているが、得られた膜の特性には成膜時の温度が大きく影響するため、均一な特性を得るためには成膜時の温度環境を一定に保つ必要がある。フジクラでは成膜領域を炉で囲った独自構造の Hot-wall 加熱式の PLD 装置を用いることで、長手方向に安定した特性を有する REBCO 膜を作製することに成功している[6]。

REBCO は高い磁場中 J_c 特性を有するが、その J_c 特性には結晶構造に起因した異方性があり、膜面に平行な磁場（結晶の ab 軸方向の磁場）中の J_c に比べて、垂直な磁場（結晶の c 軸方向の磁場）中の J_c は低くなる。これを克服するために、人工ピンニングセンター（人工ピン）と呼ばれる常伝導析出物を REBCO 膜中に導入する研究が広く行われている[7]。PLD や MOCVD のような気相蒸着法を用いて、人工ピン材料として BaMO_3 （ $M = \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Sn}, \text{etc.}$ ）を用いた場合、人工ピンは膜中でナノロッドと呼ばれる c 軸方向に伸びた柱状の欠陥として導入され、 c 軸方向磁場中の J_c は大きく改善される[8]。一方で、MOD では人工ピンはナノパーティクルとして点状に導入され、当局的な J_c 向上が報告されている[9]。フジクラでは Hot-wall PLD を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の開発

を行っており、REBCO層としてBaHfO₃を人工ピンとして添加したEuBa₂Cu₃O_yを採用している。人工ピンを導入することで、膜の結晶性以外に、導入される人工ピンの形状やサイズ等が特性に影響を与えることから、特性の均一性が悪くなることが想定されるが、温度安定に優れるHot-wall PLD装置を用いることで、特性が高く、かつ均一性にも優れる長尺人工ピン線材が実現できており[10]、量産に至っている。

一方で、マグネット応用ではREBCO膜の J_c 特性よりも、線材全体の断面積当たりの電流密度である工学的臨界電流密度 J_e が重要となる。REBCO線材は基板上に（IBAD層などの中間層を介して）REBCO薄膜を形成している構造であるため、基板の厚さが J_e に大きく影響する。基板の厚さを薄くすると機械強度が低下する側面はあるが、マグネット応用では高い J_e 、すなわち薄い基板が求められる。そのため、人工ピンタイプのREBCO線材では従来の75 μm厚から50 μm厚に薄くした基板を適用している。

3. RE系超電導線材の特性評価

REBCO線材の主な特性評価は、 J_c （または臨界電流 I_c ）評価と機械特性評価がある。 I_c 評価では四端子法による通電測定と磁化法による測定がある。磁化法による測定は、冷却したサンプルに磁場を印加することで磁化させ、それによる磁場分布の変化から間接的に I_c を求める手法である。磁化法は通電法に比べて簡便かつ、非接触な測定が可能であることから、線材の長手の I_c 分布を評価する手法として非常に有用であり、Tapestar™という評価装置が市販されている[11]。また、通電法による長手の I_c 分布評価も行われているが、これらの全長評価は液体窒素中で測定される。これは液体窒素温度で超電導になる高温超電導ならではの評価である。磁場中での I_c 評価は通電法で行っており、広い温度・磁場範囲での特性把握が重要であることに加え、磁場の印加角度を変化させた異方性の評価も重要であることから、高磁場超電導マグネットを用いて、 I_c の温度、磁場、磁場角度依存性を測定している[10, 12-14]。

REBCO線材をコイル化した際には、熱応力や電磁応力により様々な外力に曝されるため、様々な外力に対する特性を把握する必要がある。特に、高磁場マグネットではフープ応力と呼ばれる線材長手方向の引張応力が非常に大きくなる。そこで、液体窒素中で引張応力を加えながら I_c を評価する装置を開発し、引張強度を評価している[13, 15, 16]。REBCO線材は高強度の金属基板を使用しており、長手方向の引張に対しては金属基板が応力分担するため、非常に強く、また強度のばらつきも小さい。一方で、線材のテープ面に垂直方向の引張に対しては、REBCO層を含むセラミックス薄膜層に直接応力が作用するため、長手方向に比べて著しく弱く、強度ばらつきも非常に大きい。REBCO線材をコイル状に巻いて、樹脂で含浸することでターン間を接着したコイル（含浸コイル）を冷却した際に、熱応力によりこのようなテープ垂直方向の応力が発生し、それによりREBCO層が破壊し、線材内部で剥離して特性が劣化することが報告されている[17]。このようなテープ垂直方向の応力に対する強度評価は困難であったが、含浸コイルを多数作製し、冷却した際の劣化確率を求め、ワイブル解析という手法を用いることで、強度を定量的に評価することに成功した[18]。評価結果を線材の製造プロセスにフィードバックすることでプロセスを改善し、テープ垂直応力に対する強度は年々向上してきている。これらの評価の他にも、曲げや圧縮といった外力に対する評価や疲労特性に関する評価も行っており[16, 19]、様々な応用で想定される環境での特性把握に努めている。

参考文献

- [1] https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/2052502_12679.html
- [2] D. Dimos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 219-222.

- [3] Y. Iijima *et al.*, *Physica C*, **185-189** (1991) 1959-1960.
- [4] C. P. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 2955.
- [5] S. Hanyu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **23** (2010) 014017.
- [6] K. Kakimoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **23** (2010) 014016.
- [7] J. L. MacManus-Driscoll *et al.*, *Nat. Mater.*, **3** (2004) 439-443.
- [8] A. Goyal *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **18** (2005) 1533-1538.
- [9] M. Miura *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** (2009) 3275-3278.
- [10] S. Fujita *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018) 6600604.
- [11] <https://www.theva.com/products/>
- [12] S. Fujita *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.*, **507** (2014) 022007.
- [13] S. Fujita *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25** (2015) 8400304.
- [14] S. Fujita *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019) 8001505.
- [15] S. Fujita *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.*, **871** (2017) 012042.
- [16] S. Fujita *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30** (2020) 8400205.
- [17] T. Takematsu *et al.*, *Physica C*, **470** (2010) 674-677.
- [18] S. Muto *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018) 6601004.
- [19] S. Muto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **34** (2021) 075001.

超電導磁石の開発 -NMRを中心に-

小湊健太郎 (JASTEC)

kominato.kentaro@kobelco.com

超電導磁石は1911年に超電導現象が発見された直後からその実現が望まれていたが、商業的に成り立つものとして開発されるまで数10年が必要であった。ひとりの技術者が開発に従事できる期間は30年程度であることを考慮すると、超電導磁石実現は長い道のりと言えるのではないだろうか。この先人達の努力により知識経験の蓄積が進み、現在では超電導磁石の基本的要件について優れた教科書[1, 2]も出版されている。

その後周知のように様々な分野で超電導磁石応用が進んでいるが、それぞれ目的に応じて特徴がある。その特徴とは後述の事項について、強調したりバランスをとったものとなっている。磁場強度、磁場発生空間の広さ、磁場の安定度、均一度、漏れ磁場、励磁に必要な時間、ものとしての大きさ重さ、超電導状態を維持する(冷却)方法として、寒剤を使うか、冷凍機で直接冷やすか、その維持の簡単さ等。これらの特徴によって必要な技術や設備も異なるので、各超電導磁石メーカーも得意分野を持つことになる。ここでは先述の教科書以上の内容も含まれるだろう。我々の場合、比較的磁場強度が高く、安定度、均一度が高い特性を持つものを中心に生産している。これがNMR分析用の超電導磁石。本講演ではこのNMR用超電導磁石を中心として、必要な技術について紹介したい。図1は我々の超電導磁石を用いて得られたNMR信号。磁場均一度が十分に良くなったことを確認するもの。NMRはタンパク質の構造分析の重要な手法であり、化学、薬学分野等で多く用いられている。

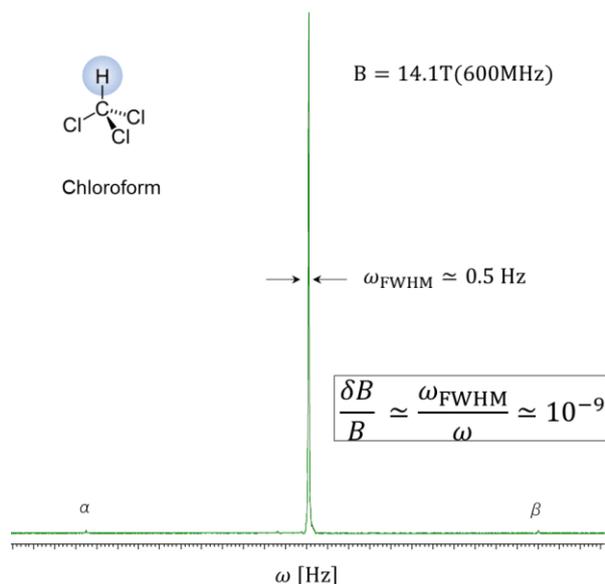


図1 クロロホルムの水素核NMRスペクトル。NMRは高分解能スペクトルが特徴のひとつ。磁場はなるべく高く、かつ均一さと時間的な安定が要求される。図は中心磁場14.1Tの超電導磁石を実際に磁場均一度調整途中に測定したもの。クロロホルムは図のようにシャープなシングルピークとなることから磁場均一度の指標として用いられる。この段階で試料空間の磁場均一度は 10^{-9} に達したことが確認できる。600MHzの共鳴ピークの半値幅は0.5Hz[†]以下。小さな二つのサテライトピーク(α , β)間が215Hz。磁場均一度の調整は室温空間に設置された調整用コイルも用いられる。JEOL RESONANCE社製ECA600にて測定。

[†]単位について: RF電磁波を用いてエネルギー準位遷移(共鳴)を見るので、慣習として周波数の単位が用いられることが多い。

[1] M.Wilson, *Superconducting Magnets* (Oxford University Press, 1984). 版を重ねる名著。最近Print On DemandスタイルでAmazon.co.jp 出荷品として購入できる。

[2] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues Second Edition* (Springer, New York, 2009). 具体的な計算例が豊富に、かつ丁寧に解説されている。フッターには「TRIVIA」と題して超電導や電磁気学に関するエピソード等が紹介されているので、ゼミ本としてもよいかも知れない。例: 磁石がニッケルによって損なわれないことを実証したのは次のうち誰か? i) Gilbert, ii) Oersted, iii) Peregrinus, iv) Thales