

イオンゲルゲート制御された二層グラフェンにおける サイクロトロン共鳴測定

物材機構、東北大^A、NTT 物性基礎研^B、関西学院大学^C

竹端寛治、今中康貴、金子智昭^A、関根佳明^B、高村真琴^B、日比野浩樹^C

二層グラフェンにおいては \sqrt{B} とは異なる特徴的な磁場依存性を示すランダウ準位に分裂することが知られている。サイクロトロン共鳴(CR)測定は、これまで劈開試料[1]において研究されているが試料が数十 μm であることから詳細な測定が行われていない。また、電荷中性点より約 0.4 eV 離れた励起バンドに関しては高濃度の電荷誘起が必要なため少数の研究[2]があるのみで詳細は分かっていない。

我々は、イオンゲルゲートを用い高濃度に電荷密度を制御しつつ強磁場下で遠赤外領域分光測定を行う測定技術を開発し、SiC 上成長大面積二層グラフェンに関してフェルミエネルギーを幅広い範囲で制御しながら CR 測定を行った。図 1 にイオンゲルゲートに $V_g = 0 \text{ V}$ 、および $V_g = -2.0 \text{ V}$ を印可した場合の CR スペクトルを示す。 $V_g = 0 \text{ V}$ では 1 成分の CR が観測されるのに対し、 $V_g = -2.0 \text{ V}$ ではそれに加えて強磁場側に新たな CR 吸収が現れた。同時測定している輸送現象測定からも $V_g = 0 \text{ V}$ では 1 成分の Shubnikov-de Haas (S-dH)振動を観測するのに加えて $V_g = -2.0 \text{ V}$ では周期の異なる S-dH 振動が新たに出現した。これらの結果から、ゲート電圧

印可でフェルミレベルが低エネルギー側にシフトしホール側励起バンドにホール誘起されたことにより、 $V_g = -2.0 \text{ V}$ で励起バンドにおける CR および S-dH 振動が新たに観測されたと考えている。(図 2 参照。)

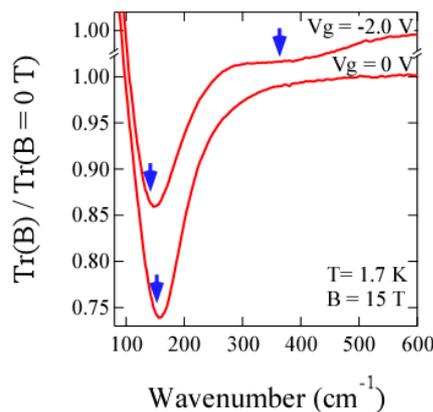


図1 二層グラフェンにおける $V_g = 0 \text{ V}$ 、および $V_g = -2.0 \text{ V}$ 印可時のサイクロトロン共鳴スペクトル。

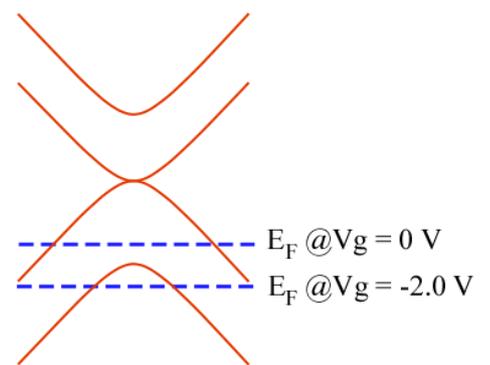


図2 二層グラフェンにおけるバンド概略図。青破線はゲート電圧印可時のフェルミレベルを示す。

References

[1] E.A. Henriksen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 087403 (2008).

[2] D.K. Efetov *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 161412(R) (2011).

鉛ハライド系ペロブスカイト単結晶の励起子磁気分光

千葉大国際教養、千葉大院教^A、千葉大院理^B、京大化研^C

三野弘文、河原拓也^A、保屋野瑞希^B、山田泰裕^B、音賢一^B、金光義彦^C

ペロブスカイト半導体はシリコン等に代わる次世代の太陽電池材料として注目されている。なかでも、鉛ハライド系ペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は太陽電池の効率が飛躍的に増大しており、様々な研究が展開されている。しかしながら、照射によって生成される励起子の振る舞いについては未解明な点も多い。特に、基礎的な物理パラメータである励起子束縛エネルギーは年々小さな値が報告され、未だ確定には至っていない[1, 2]。そこで、本研究では、鉛ハライド系ペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ [X:Cl,Br,I] (以下 MAPbX_3 とする) を対象に、極低温 (1.5K) 下での精密磁気分光から、この系の励起子遷移について定量的に評価することを試みた。試料にはいずれも逆温度法によって作製された高品質単結晶の劈開表面を用いた。液晶リターダで左右円偏光制御された白色光を試料に入射し、得られる反射光スペクトルを CCD で検出の際、カウント数が飽和直前になるまで露光し、左右円偏光の差を積算する方法で高感度な信号検出を可能とした。図 1、2 に Faraday 配置にて磁場を印加した際の MAPbBr_3 、 MAPbI_3 の偏光度スペクトルを示す。 MAPbBr_3 では 1s 励起子の高エネルギー側に反磁性シフトを示す高次励起子遷移が明瞭に観測されており、 MAPbI_3 では 1s 励起子の高エネルギー側に線形シフトを示すランダウ準位間の遷移が見られている。これらの結果から前者では 13.5 meV、後者では 5.5 meV の励起子束縛エネルギーを導出した。

本研究の一部は JST-CREST(JPMJCR16N3)の支援による。

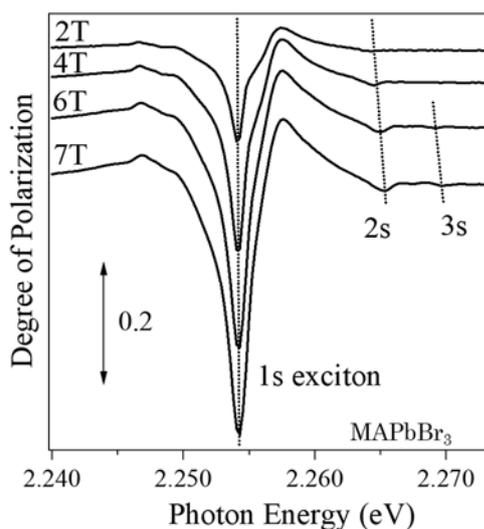


図 1

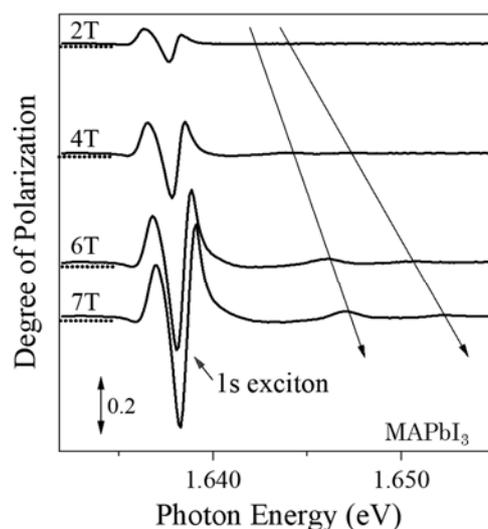


図 2

[1] K. Tanaka et al., Solid State Commun, 2003, 127, 619-623

[2] K. Galkowski et al., Energy Environ.Sci., 2016, 9, 962-970

ビスマスにおける完全バレー分極状態の 熱力学的実証

東大物性研、電通大基盤理工^A

岩浅歩，河智史朗，伏屋雄紀^A，近藤晃弘，秋葉和人，三田村裕幸，
金道浩一，徳永将史

半金属ビスマス (Bi) は、磁場方位により内在する 3 つの電子バレー自由度を制御することができる数少ない物質の一つとして、近年バレートロンクス (Valleytronics) の研究分野において注目を浴びている。最近、強磁場中 Bi では、電子ポケットが完全バレー分極する可能性があるということが輸送実験を通じて報告された [1]。今回我々は、最大 60T までのパルス強磁場下で磁歪測定を行い、得られた実験結果が理論曲線と定量的に非常に良い一致を示すということを見出した (下図参照)。この結果より、強磁場中で電子ポケットが完全バレー分極状態になっていることを、より直接的に実証することに成功した。

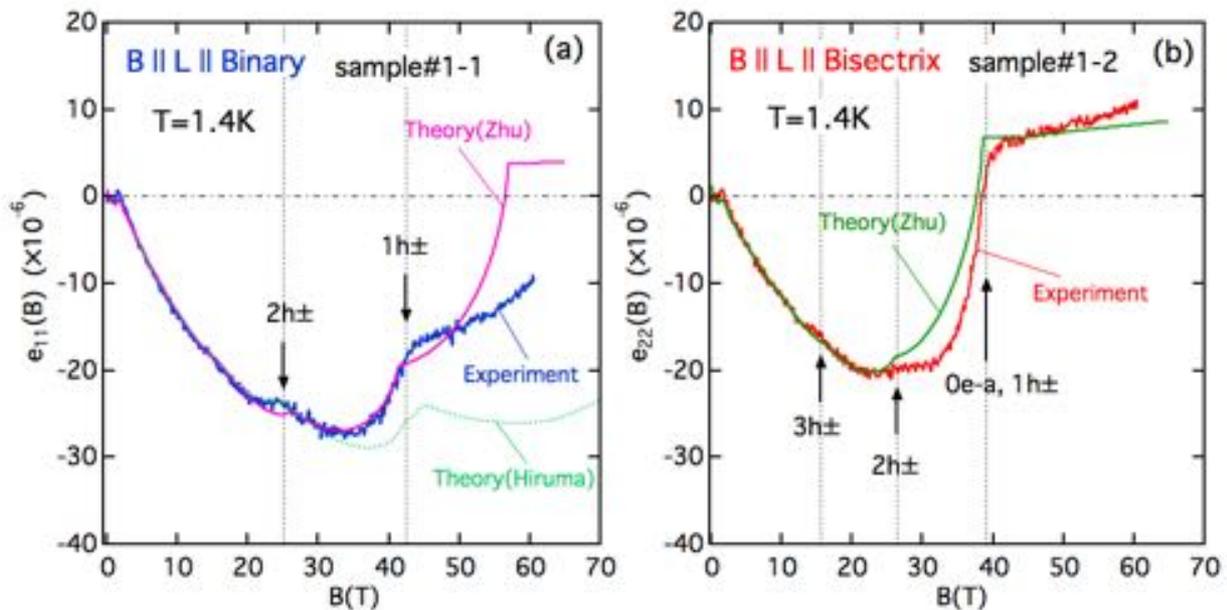


図: ビスマスの強磁場下縦磁歪測定の実験と理論曲線との比較
(a) $B \parallel L \parallel \text{Binary}$ の場合 (b) $B \parallel L \parallel \text{Bisectrix}$ の場合

[1] Z.Zhu *et al.*, Nature Communications 8,1529(2017).

Bi(111)/Si(111)テンプレート上におけるトポロジカル 結晶絶縁体 SnTe 薄膜の成長とその評価

東大理

中西亮介, 秋山了太, 宮内恵太, 長谷川修司

トポロジカル結晶絶縁体 (TCI) は鏡映対称性により保護された表面状態を持ち、トポロジカル絶縁体とは異なる新奇物性やその応用が期待されている[1]。しかしながら TCI の典型物質である SnTe は MBE による作製が難しく、種々の基板上的作製が試みられてきた[2]。

今回、我々は SnTe(111)と格子定数の近い(格子不整合率~1%) Bi(111)薄膜を下地として用い、基板温度等のパラメータを変化させながら、SnTe 薄膜作製を試みた。図(a)の RHEED からわかるように、最適条件下において SnTe(111)の高品質結晶を作製することに成功した。

さらに、SnTe を Bi(111)上に室温蒸着した系において電気伝導度測定を行ったところ、5.3K において図(b)にみられるような超伝導由来の抵抗減少が観測された。

さらに磁場強度・磁場印加方向を変化させ詳細に伝導測定を行ったところ、図(c)のように 2 次元性を持つことが分かった。また、Bi、Sn、Te のみからなるいかなる物質も 5K を超える温度において超伝導を示さないことから、この超伝導は SnTe/Bi(111)界面における新規界面超伝導の可能性があると考えられる。SnTe のトポロジカル表面状態にクーパーペアが染み出すと、エッジに二つのマヨラナゼロモードを持つトポロジカル超伝導が実現される可能性が理論的に予測されている[3]。本系は新しいトポロジカル超伝導の可能性を示唆するものである。

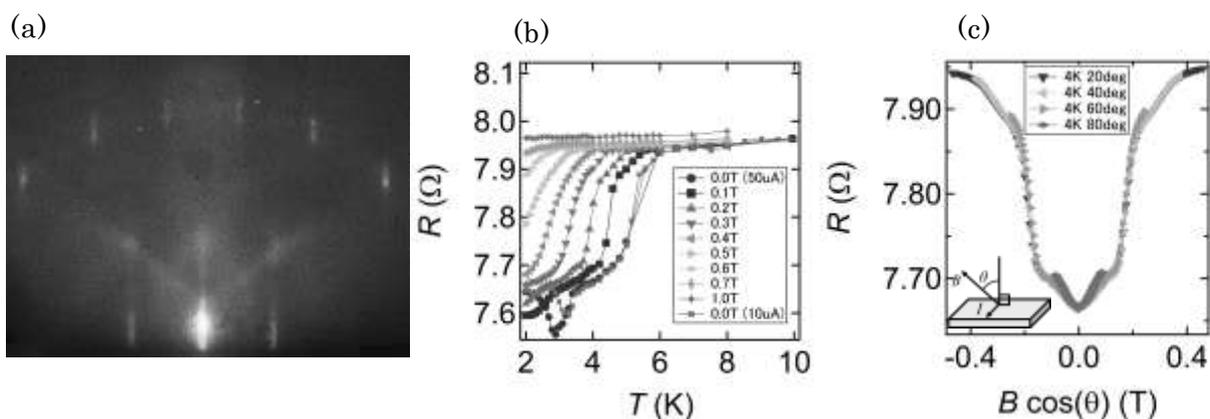


図: (a)SnTe(111)/Bi(111)の RHEED, (b)抵抗の温度・垂直磁場依存性, (c)抵抗の磁場印加方向依存性。

[1] L. Junwei *et al.* *Nature Materials* **13**, 178–183 (2014).

[2] R. Ishikawa *et al.* *Journal of Crystal Growth* **453** 124-129 (2016).

[3] Chen Fang *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **112**, 106401 (2014).

パルス強磁場を用いたワイル半金属 TaAs, NbAs の

電気伝導特性の研究

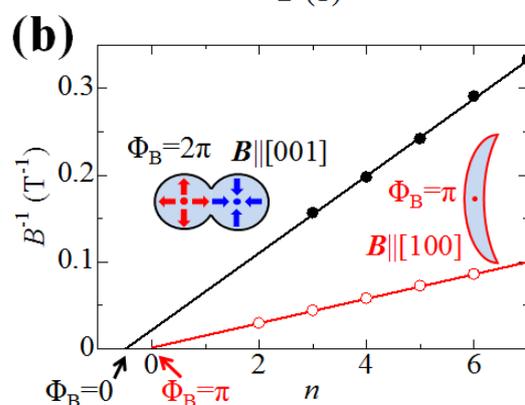
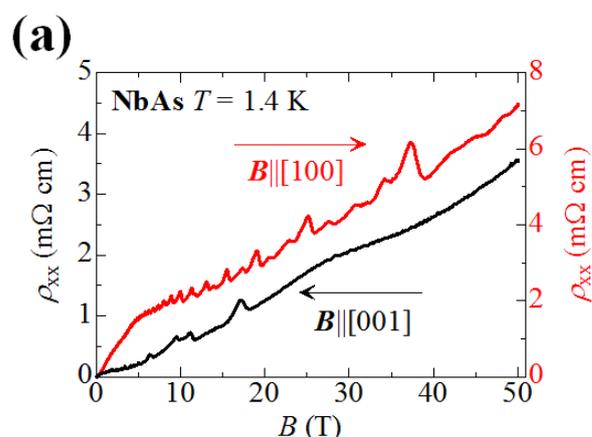
阪大院理^A、阪大強磁場^B、JST-PRESTO^C

駒田盛是^A、村川寛^A、横井滉平^A、木田孝則^B、
萩原政幸^B、酒井英明^{A,C}、花咲徳亮^A

ワイル半金属は波数空間においてスピンの湧き出しと吸い込みの中心となるワイル点近傍にフェルミ準位を有する物質であり、ワイルフェルミオンに由来する興味深い現象の発現が期待されている。TaAs と NbAs は空間反転対称性を破ったワイル半金属であり、APRES でのフェルミアークの観測、カイラルアノマリーの検出など、固体中のワイルフェルミオンが引き起こす新規現象の研究が精力的に行われている。

TaAs と NbAs はブリルアンゾーン内に 2 種類のワイル点を持ち、ペアとなるワイル点は波数空間上で接近した位置に存在する。このためフェルミ準位のわずかな変化により、フェルミ面内のワイル点の数を 1 つから 2 つへと変化させることができる。フェルミ面が複数のワイル点を囲んだ状態では、磁場方向に依存してサイクロトロン軌道が囲むワイル点の数が異なる状態の実現が期待できるが、このときのランダウ準位構造についてはこれまで研究された例はない。

今回我々は NbAs の 1cm^3 の大型良質単結晶を合成した。同一の単結晶からさまざまな結晶軸方向に切り出した試料を用い、50 T までのパルス磁場下で電気抵抗率を測定した。量子振動を解析した結果、磁場方向に依存してベリ一位相が変化することを見出した。これはサイクロトロン周回軌道が囲むワイル点の数に対応してランダウ準位構造が変化していることを示唆している。



(a) NbAs の 50 T までの電気抵抗率。

(b) $B \parallel [001]$ と $B \parallel [100]$ の Landau index プロット。

強磁場における創発モノポール物性

東大工

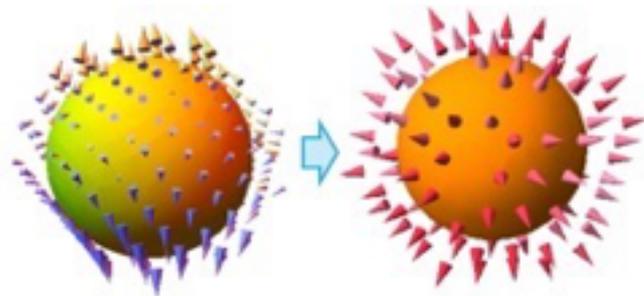
金澤 直也

トポロジカルなスピン構造と伝導電子が結合した系においては、その非自明なトポロジカル量がゲージ場として現れ、固体中に実効的な電磁場が発生しているように見える。多数のスピンが集まりが生み出す電磁場のため、このゲージ場は「創発電磁場」と呼ばれ、トポロジカルホール効果といった巨視的電磁気応答として検出されてきた[1]。創発電磁場の分布はスピン配列のトポロジーによって一意に決定されており、特に三次元のトポロジカルスピン構造の1つであるヘッジホッグ構造の創発電磁場分布は、磁気モノポールの生み出す磁場分布のようになっている。

本発表では、ヘッジホッグスピン配列による固体中の「創発モノポール」が生み出す特徴的な物性について、強磁場測定の観点から紹介する。トポロジーによって守られたヘッジホッグ構造の安定性とその運動の自由度の高さに由来した強いゆらぎが、強磁場まで存在する正の磁気抵抗効果や巨大な熱電効果に寄与していることを中心に議論し、今後のスピン構造のトポロジーの研究に強磁場測定が重要であることを述べたい。

本研究における強磁場測定は東京大学物性研究所国際強磁場科学研究施設ならびに東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターにて行った。また本発表内容は藤代有絵子氏、下志万貴博氏、中村飛鳥氏、石坂香子氏、是常隆氏、有田亮太郎氏、三宅厚志氏、三田村裕幸氏、秋葉和人氏、徳永将史氏、塩貝純一氏、木村尚次郎氏、淡路智氏、塚崎敦氏、吉川明子氏、田口康二郎氏、十倉好紀氏との共同研究の成果を主題としております。

[1] N. Nagaosa and Y. Tokura, *Nature Nanotech.* 8, 899 (2013).



図：ヘッジホッグ磁気構造(左)とその創発磁場分布(右)

高圧・高磁場下における中性子回折実験による

マルチフェロイクスの研究

物材機構、ISIS^A、原子力機構^B

寺田典樹、D. D. Khalyavin^A、P. Manuel^A、長壁豊隆^B、吉川明子、北澤英明

最近、マルチフェロイクス TbMnO_3 において、4.5 GPa 以上の圧力によって誘起される巨大強誘電相が発見された。[1] 第 1 原理計算によって、圧力誘起相の Mn モーメントの磁気構造が *E*-type 反強磁性状態であることが予想されたが、実験による磁気秩序の直接探査は成されていなかった。我々は最近 ISIS の冷中性子 TOF 回折計 WISH においてハイブリッドアンビルセル[2]を用いた高圧力下中性子回折実験環境を整備した。[3] 本研究において、 TbMnO_3 の単結晶を用いた高圧下中性子回折実験を上述の装置を用いて行った。

電気分極測定で報告されていた相転移圧力 4.5 GPa において、磁気伝播波数がインコメンシュレートからコメンシュレートへ変化が観測され、高圧力下での磁気構造解析によって Mn スピンが *E*-type のコリニア反強磁性秩序を、Tb スピンはノンコリニア秩序を示すことが解った。また、高圧力、高磁場相においても磁気構造解析を行い、Mn スピンは *E*-type 磁気構造を保持するが、Tb スピンは $k=0$ の磁気秩序に相転移することが解った。[4]

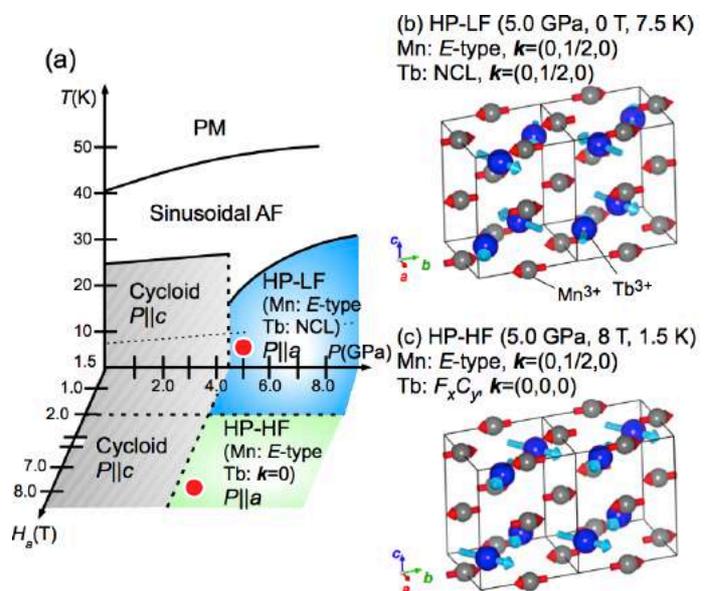
本発表では、実験結果の詳細について報告する。

[1] T. Aoyama et al. Nat. Comm. 5, 4927 (2014)

[2] T. Osakabe et al. JPSJ 79, 034711 (2010).

[3] N. Terada et al. Phys. Rev. B 89, 220403(R) (2014)

[4] N. Terada et al. Phys. Rev. B 93, 081104(R) (2016)



強磁場電子スピン共鳴測定による

スピン四極子励起の観測

阪大先端強磁場、沖縄科学技術大学院大学^A、
ハンガリー科学アカデミー^B

赤木暢, 吉澤大智, 奥谷顕, 木田孝則,
J. Romhányi^B, K. Penc^C, 萩原政幸

物質内の磁気励起を観測する電子スピン共鳴 (ESR) は、磁性体の研究において微視的情報を得ることのできる測定手法の一つである。電気磁気マルチフェロイック物質では、スピンと電気分極が強く相関しているため特異な磁気励起が観測されることがある。実際、オケルマナイト構造を持つマルチフェロイック物質 $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ では、振動電場誘起の磁気励起 (エレクトロマグノン) が観測され、大きな方向二色性を示すことが知られている [1]。本研究では、磁気誘起の電気分極を持つマルチフェロイック物質である $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ においてパルス強磁場 ESR 測定から磁性と誘電性の相関を微視的に調べることを目的とした。

図 1 に強磁場 ESR 測定から求めた $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ における共鳴磁場の周波数-磁場プロットを示す。磁場は c 軸方向に印加しており、(a) Faraday 配置、(b) Voigt 配置の結果を示している。 $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ では、 c 軸方向に磁場印加したときの飽和磁場は 21.6 T であり、飽和後の強磁場領域でフォークト配置でのみ 2 マグノン励起 (Q_1 モード) が観測された。この磁気励起は、入射電磁波の電場成分によるスピン四極子励起で説明できることがわかった。

[1] I. Kézsmárki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 057403 (2011).

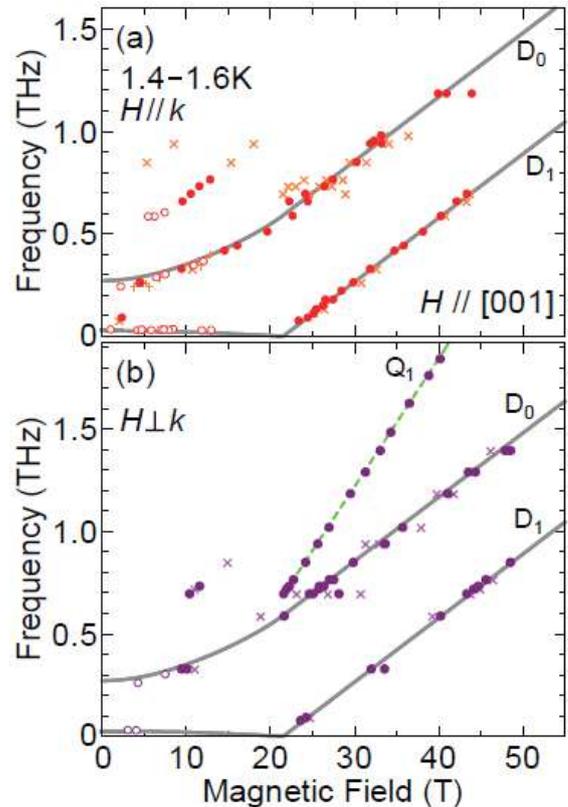


図 1. $\text{Sr}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ の ESR 共鳴磁場の周波数-磁場プロット ($H // c$)。 (a)ファラデー配置、(b)フォークト配置。実線は反強磁性共鳴モードを示す。

マルチフェロイック BiFeO₃ の新奇磁場誘起相

東大物性研^A、産総研^B、福岡大理^C、ORNL^D、

河智史朗^{A*}、伊藤利充^B、宮原慎^C、松田雅昌^D、三宅厚志^A、徳永将史^A

マルチフェロイック物質の代表的物質である BiFeO₃ は約 1100 K 以下で歪んだペロフスカイト構造となり、三方晶の *c* 軸方向に巨大な自発分極を持った極性結晶になると知られている。また、640 K 以下で横滑り型のらせん構造であるサイクロイド磁気秩序を有している [1]。最近の強磁場の研究で自発分極方向として知られている三方晶 *c* 軸に対して垂直な方向に磁場で制御できる新しい電気分極成分が発見された。この電気分極成分の磁場制御は不揮発性メモリー効果を示しており、磁気ドメインの再配列として考えられている [2]。

この新しい電気分極成分の存在は三回回転対称性の破れを意味している。放射光 X 線の研究では、解像度よりも大きな Bragg ピーク幅の広がりから、三方晶よりも対称性を低下させた単斜晶歪みが存在していると主張している [3]。しかし、このピーク幅の広がりにはネール温度以上でも見られているため、磁気秩序と単斜晶歪みの関係性は明らかでない。そこで、我々は LD-FZ 法によって作られた BiFeO₃ 単結晶 [4] を用いて室温で磁歪測定を行った。

磁歪の結果は歪みの磁場による不揮発性メモリー効果を示し、ゼロ磁場において三回回転対称性が破れていることを示した [5]。更に、磁歪の結果はサイクロイド磁気秩序と磁場誘起相として知られている傾角反強磁性相の中間領域に新たな磁気相を観測した。

本講演では、室温付近の温度で発見した新しい磁場誘起相について、磁歪、磁化、電気分極、及び中性子散乱実験の結果を通して考察する。

[1] I. Sosnowska *et al.*, J. Phys. C **15**, 4835 (1982).

[2] M. Tokunaga *et al.*, Nat. Commun. **6**, 5878 (2015).

[3] I. Sosnowska *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 044604 (2012).

[4] T. Ito *et al.*, Cryst. Growth Des. **11**, 5139 (2011).

[5] S. Kawachi *et al.*, Phys. Rev. Materials **1**, 024408 (2017).

強磁場を使った鉄系超伝導体のフェルミ面研究

1111 型母物質 CaFeAsF の場合

物材機構、NHMFL^A、Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology^B、立命館大^C

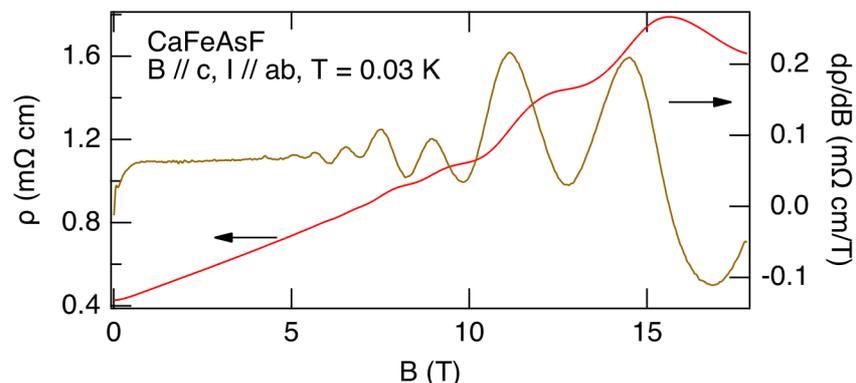
寺嶋太一、廣瀬陽代、David Graf^A、Yonghui Ma^B、Gang Mu^B、Tao Hu^B、鈴木雄大^C、宇治進也、池田浩章^C

ドーハス・ファンアルフェン(dHvA)効果やシュブニコフ・ドハース(SdH)効果等の量子振動測定に基づくフェルミ面研究は、強磁場計測を使った物質・材料研究の代表例の一つです。私たちはこの手法を用いて、 KFe_2As_2 、 BaFe_2As_2 、 FeSe 、 FeS などの鉄系超伝導体のフェルミ面を明らかにしてきました。本講演では、1111 型母物質としては初めて CaFeAsF のフェルミ面を決定したことを報告します[1]。

LaFeAsO などの 1111 型母物質は十分なサイズの高品質単結晶を得ることが難しく、これまでフェルミ面研究が遅れていました。一方、スパーサーの LaO 層を CaF に置き換えた CaFeAsF については、最近上海の Gang Mu らがセルフフラックス法でミリメートルサイズの高品質単結晶の合成に成功しており[2]、本研究でも彼らの単結晶を用いました。図に物材機構強磁場ステーションの 20 テスラ・希釈冷凍機で測定した磁気抵抗とその磁場微分を示します。5 T 付近から SdH 振動が観測されます。様々な測定とバンド計算から、ホールと電子の 2 次元シリンダーからなる単純なフェルミ面が結論され、更に後者が Berry phase を伴う（ディラックフェルミオンである）ことを明らかにしました。

[1] Taichi Terashima *et al.*, arXiv:1710.03938.

[2] Y. Ma *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **28**, 085008 (2015).



図：CaFeAsF の磁気抵抗とその磁場微分

磁気秩序を持たない Ce 及び Yb 化合物でのメタ磁性的

磁化の増大とフェルミ面観測への期待

静大理, 東大物性研^A

海老原孝雄, Jumaeda Jatmika, 三宅厚志^A, 徳永将史^A

Ce あるいは Yb 元素を含む重い電子系物質では、4f 電子と伝導電子の相関に起因する近藤効果と磁気秩序が競合している。両相関の安定化温度がほぼ一致する量子臨界点では、量子力学的揺らぎが発達し、新奇な超伝導状態や non-Fermi Liquid 状態などの特異な物性が発現する。量子臨界点の近傍に位置する非磁性の重い電子系物質は、磁場中でメタ磁性的磁化の以上を示す場合があるが、広く知られた CeRu_2Si_2 を除いて、微視的電子状態に基づいたメタ磁性的磁化異常のメカニズムの解明は、あまり行われていない。

最近、物性研三宅等によって、 ThCr_2Si_2 型正方晶を取る非磁性重い電子系物質であり超伝導を示す CeNi_2Ge_2 と、同じ結晶構造をもつ Ce の比較参照系である YbNi_2Ge_2 において、30T~50T の磁場範囲でメタ磁性的磁化の増大を見出した。この磁化測定は単結晶を用いて行われており、今後のメタ磁性前後での微視的電子状態研究の可能性を切り開いた[1]。磁場中での電子状態決定にはドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果測定が強力な手段の一つであり、上記メタ磁性転移の観測を元に dHvA 観測を進めることで、メタ磁性前後の微視的電子状態を明らかにできることを期待している。

[1] A. Miyake, Y. Sato, M. Tokunaga, J. Jatmika, T. Ebihara, Phys. Rev. B 96, 085127 (2017).

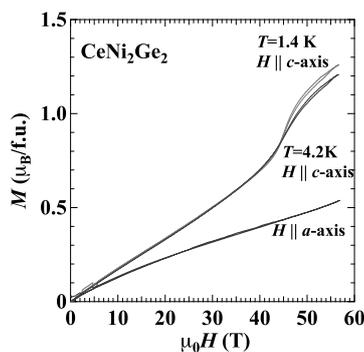


図 1 CeNi_2Ge_2 の磁化

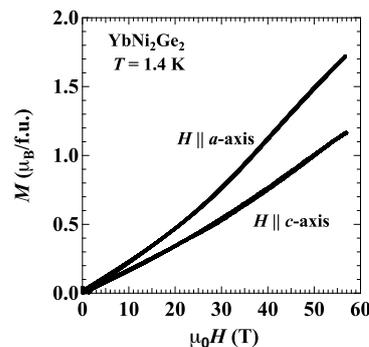


図 2 YbNi_2Ge_2 の磁化

強磁場下における Bi 系銅酸化物高温超伝導体の 電気輸送特性

物材機構 ^A、弘前大理工 ^B、東北大金研 ^C、京大工 ^D、東大物性研 ^E

足立伸太郎 ^{A, B, E}、佐々木菜絵 ^B、臼井友洋 ^B、寺本祐基 ^B、木村尚次郎 ^C、
掛谷一弘 ^D、近藤晃弘 ^E、小濱芳允 ^E、金道浩一 ^E、渡辺孝夫 ^B

銅酸化物高温超伝導体が発見されて 30 年以上が過ぎたが、肝心の高い転移温度 T_c が発現する原因が分かっていない。重要課題の一つは擬ギャップが超伝導の前駆現象か否かであるが未だ決着がついていない。これまでの研究から、物質や実験手法によって物性値に影響が及ぶ温度が異なることや、 T_c と擬ギャップが開く温度 T^* が近い時に両者を区別することが難しいという問題が分かってきた。さらに、高 T_c に関するもう一つの謎は、結晶構造中の CuO_2 面数が増えると T_c が高くなることである。しかしながら、最も T_c が高い 3 層構造銅酸化物は単結晶育成が難しいことで物性実験が停滞していた。近年、Bi 系銅酸化物高温超伝導体の純良単結晶の育成を進展させることができ、多様な実験を進めている。その中でも、強磁場下輸送特性の測定は、超伝導、擬ギャップ、超伝導ゆらぎとの関係を系統的に調べることができる強力な手法であると信じてこれまでにいくつかの研究を進めてきた。

最近の研究では、擬ギャップの増減に敏感な面間抵抗に着目し、 CuO_2 面数 2 層構造 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) を用いた磁気抵抗測定を行った。その結果、面間抵抗における正の磁気伝導度の起原として従来考えられてきた擬ギャップの効果だけでなく、超伝導 DOS 揺らぎの寄与が存在することをはじめて見出した[1]。

また、ドーピング量を制御して物性を系統的に変化させた Bi2212 単結晶と 3 層構造 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (Bi-2223) 単結晶を用いて磁場中面内抵抗測定を行った。実験値を超伝導ゆらぎの理論式を用いて解析し、 T_c に関係する物理量(超流動密度 ρ_s 、面内コヒーレンス長 ξ_{ab}) を求めて T_c との相関関係を調べた結果、Bi-2223 は 2 層構造に比べて不利な状態 (ρ_s や $1/\xi_{ab}$ が小さい場合) でも、より高い T_c を示すことを見出した[2]。即ち CuO_2 面内で生じる超伝導の駆動力に加えて、 CuO_2 面が積層することに伴う付加的な電子対凝縮エネルギーを獲得することで高い T_c が実現していると考えている。最近のレーザー-ARPES 実験の結果[3]から、超伝導状態の Bi2223 内でドーピングの異なる CuO_2 面間のバンド混成が観測された。このことが超伝導ギャップを増強し、3 層構造銅酸化物の高 T_c 発現の一翼を担っていると考えている。

[1] T. Watanabe, T. Usui, S. Adachi *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 174517 (2016).

[2] S. Adachi, T. Usui, Y. Ito *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 024706 (2015).

[3] S. Kunisada, S. Adachi, S. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2017), accepted.

層状有機超伝導体 β'' -(ET)₂SF₅CH₂CF₂SO₃

における強磁場相図

筑波大学^A、物材機構^B、広島工大^C、アルゴンヌ国立研究所^D

杉浦栞理^{A,B}、寺嶋太一^B、安塚周磨^C、J. A. Schlueter^D、宇治進也^{A,B}

二次元性の強い超伝導では、重心運動量 (q) が 0 でないクーパ対による超伝導 (FFLO) 状態が理論的に予想され、近年重い電子系超伝導体や有機超伝導体においてその存在を示唆する実験結果が報告されている。FFLO 超伝導では有限な q によって秩序変数が実空間で周期的な構造もち、これによって強磁場下でも超伝導が安定し、高い臨界磁場 (H_{c2}) を持つことが知られている。FFLO 状態では、その発現と絶縁層内の磁束量子 (Vortex) のダイナミクスとの関連が実験的に示唆され、また相内で q の変化に伴う逐次相転移が理論的に期待されるなど、FFLO 相内の理解が活発に進められてきた。[1]

β'' -(ET)₂SF₅CH₂CF₂SO₃ (β'' -SF₅ 塩) は大きなアニオン層 (絶縁層) を持つため、面間方向への遷移積分が小さく、極めて二次元性の強い有機超伝導体 ($T_c = 5.2$ K、 $H_{c2}^{\parallel}/H_{c2}^{\perp} \sim 10$) である。超伝導相内では H_{c2} よりも明らかに低磁場で高周波応答や NMR、比熱に異常が観測されており、低温・強磁場下で FFLO 相の存在が強く示唆されている。[2] そこで本研究では、低温・強磁場における磁気トルク、および磁気熱量効果測定を行い、 β'' -SF₅ 塩の FFLO 相図を明らかにした。さらに、磁気熱量効果では、FFLO 相転移と区別して Vortex の相転移と考えられる一次相転移に特徴的な熱異常を観測した。

[1] 宇治,他 日本物理学会 2016 年秋季大会 15pAG-5, Shimahara, *et al.*, J. Phys. Soc.Jpn. **66**-11, 3594 (1997)

[2] R. Beyer, *et al.*, Low Temp. Phys. **39**(3) (2003), G. Koutroulakis *et al.*, Phys. Rev. B **116**, 067003 (2016), K. Cho *et al.*, Phys. Rev. B **79** 220507(R) (2009)

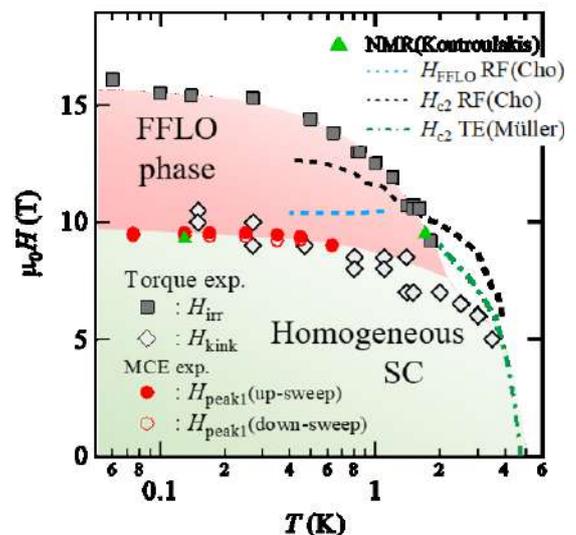


図 1：磁気トルク、磁気熱量効果測定から得られた相図

スピネマティック相の出現とマグノン対励起

理研

桃井 勉

フラストレート磁性体中において、スピン自由度が秩序を持たない「スピン液体」でもなく、スピン（ベクトル）秩序を有する状態（言えなれば「スピン固体」）でもない液晶的な量子相「スピネマティック相」の出現が理論的に提唱されている[1, 2]。スピネマティック相は、スピンベクトルの秩序が存在しないものの、スピン自由度が作る4極子秩序が存在する隠れた秩序相である。この相は、飽和磁場近傍において、マグノン対の凝縮相として良く理解されており、1次元 J_1 - J_2 ジグザグ鎖や正方格子 J_1 - J_2 模型等の、最近接強磁性、次近接反強磁性相互作用が競合する系で実現し得ることが判明してきている[2]。

この講演では、このスピネマティック相に関する最近の二つの理論研究について紹介したい。一つ目は、複雑なスピン $1/2$ のカゴメ格子構造を持つボルボサイト $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ におけるスピネマティック相出現の可能性についての解析[3]を紹介したい。この系は純粋なカゴメ格子系とは異なり、広い $1/3$ 磁化プラトーが磁化曲線中に観測されており、そのプラトーのすぐ下の磁場領域では NMR スペクトルに通常のスピン構造では説明できない奇妙な振る舞いが観測されている。この領域においてマグノン対形成によるネマティック相が出現する可能性を議論する。

また、二つ目は、スピネマティック相における ESR 吸収スペクトルの理論[4]を紹介したい。ネマティック状態は、秩序変数の実験による直接観測が難しいことから、相の存在そのものを実験的に検証することが困難な状況にある。我々は、ESR の吸収スペクトル中にスピネマティック相に特徴的なマグノン対励起が現れることを示し、その共鳴ピークが特徴的な磁場依存性及び回転角度依存性を持つことを議論したい。これらの情報が、スピネマティック相検出の手助けになると期待する。

[1] N. Shannon, TM, and P. Sindzingre, PRL **96**, 027213 (2006).

[2] 桃井 勉、日本物理学会誌 Vol. 65, No. 5, 345 (2012).

[3] O. Janson et al., PRL **117**, 037206 (2016).

[4] S. C. Furuya and T. Momoi, arXiv:1707.08784.

ロングパルス磁石を用いた、隠れた秩序相の観測

東大物性研^A, シュトゥットガルト大^B

小濱芳允^A, 石川孟^{A,B}, 松尾晶^A, 金道浩一^A, 広井善二^A

強磁性と反強磁性相互作用が競合する正方格子(J_1 - J_2 正方格子)は様々な基底状態をとる。例えば強磁場下では、スピン自体は秩序化していないが、スピンの揺らぐ方向が定まった“スピンネマテック相(SN)”と呼ばれる秩序状態が理論的に予想されており、広く注目を集めている[1]。しかしながら SN 相のオーダーパラメータは磁気双極子ではなく検出が難しい磁気四極子であり、一般的な磁気的プローブ(NMR, μ SR, 中性子回折)ではその観測は非常に困難である。このため SN 相は“隠れた秩序”と呼ばれており、この存在を示す確かな実験的証拠は、これまで全く見つかっていない。

我々は、近年 SN 相が予想されたボルボサイト($\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)において[2]、パルス強磁場下で比熱(C)および磁気熱量効果(MCE)を測定した。これらの熱測定手法は“エントロピー”の測定であり、オーダーパラメータの種類に関わらず、秩序化に伴うエントロピー変化を検出できる。このため熱測定は一般的な磁気プローブで測定不可能な秩序も検出可能だと期待でき、実際に本研究では NMR^{3,4} や磁化測定^{3,4} などで検出されなかった新規磁場誘起相を観測した。この磁場誘起相は磁気双極子をオーダーパラメータとしない“隠れた秩序”と考えることができ、理論的には SN 相の可能性が最も高い。講演では、ロングパルス磁石を使った比熱測定手法にもフォーカスしつつ、この隠れた秩序相について議論する。

参考文献 [1] N. Shannon, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 027213 (2006). [2] O. Janson, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 037206 (2016). [3] H. Ishikawa, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 227202 (2015). [4] M. Yoshida *et al.*, *arXiv*: 1602.04028v1.

量子スピンドイマー系の動的電気磁気効果

東北大金研、静岡大理^A、阪大先端強磁場^B、
東大物性研^C、東工大理^D

木村尚次郎，松本正茂^A，赤木暢^B，萩原政幸^B，
金道浩一^C，田中秀数^D

本講演では、電磁波の振動電場とスピンドイマー系 $ACuCl_3$ ($A = K, Tl$) の強磁場 ESR 測定によって観測した結果について述べる。近年の磁気強誘電マルチフェロイクスに関する研究からベクトルスピнкаイラリティー $S_i \times S_j$ による電気分極発生機構 [1] が広く知られるようになったが、スピンドイマーはその固有状態であるスピンスングレットとトリプレット状態との間にこの $S_i \times S_j$ の行列要素をもつ。このため、通常の磁気共鳴を引き起こす磁気双極子遷移では禁制なシングレットからトリプレット状態への光学遷移が電磁波の振動電場によって生じうる。これを $KCuCl_3$ について偏光を用いた ESR 測定により確かめた。結晶の単位胞に 2 つのダイマーが存在するため、 $KCuCl_3$ は Acoustic と Optical の 2 つのトリプレットモードをもつが、この両方のモードが振動電場によって励起されることが分かった。磁場を結晶の $[010]$ 方向にかけた場合、それぞれのモードが結合する振動電場の向きは互いに直交している。この結果は、 $S_i \times S_j$ 由来の電気分極と $KCuCl_3$ が持つ結晶の対称性を考慮した計算と一致した。また、 $ACuCl_3$ に磁場を印加してトリプレット励起のエネルギーギャップを閉じると、磁気励起子のボースアインシュタイン凝縮 (BEC) による反強磁性秩序が生じるが、このとき同時に自発電気分極が発生する [2]。この BEC に伴って現れる磁気秩序モーメントの位相振動に相当するゴールドストーンモードは、磁化 M とベクトルスピнкаイラリティーの両方の振動を伴っていると考えられる。このためその励起によって磁化 M と電気分極 P の同時振動が起こると期待される。 M と P の同時振動が生じると電磁波の吸収量が光路の反転によって変化する方向二色性が現れる。その観測結果についても述べる予定である。

[1] H. Katsura, N. Nagaosa and A. V. Balatsuki, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 057205.

[2] S. Kimura, K. Kakihata, Y. Sawada, K. Watanabe, M. Matsumoto, M. Hagiwara and H. Tanaka, Nat. Commun. **7** (2016) 12822.

強磁場高圧下テラヘルツ ESR 装置の開発と応用

神戸大研究基盤セ, 神戸大院理^A, 神戸大分子フォトセ^B,
東大物性研^C, 東工大院理^D, 広大院理^E,
広大キラル物性研究拠点^F, 広大院先端^G, 広大 IAMR^H

櫻井敬博, 大木瑛登^A, 肘井敬吾^B, 大久保晋^B, 太田仁^B,
上床美也^C, 田中秀数^D, 世良文香^{E,F}, 高坂勇輔^{E,F},
秋光純^{E,F}, 世良正文^G, 井上克也^{E,F,H}

強磁場や圧力の量子スピン系に対する印加は、しばしば系の競合する相互作用のバランスを変化させ新奇な相を生ずる。我々はこうした多重極限が誘起する新しい物理現象の探索、研究を目的に、強磁場高圧下でのテラヘルツ ESR 装置の開発を行ってきた[1]。現状では最大磁場 10 T、最大発生圧力 2.5 GPa、周波数範囲 0.05~0.8 THz での ESR 測定が可能である。磁場領域については、現在、外部の共同利用施設を利用して拡張しつつある。

測定例として三角格子反強磁性体 CsCuCl_3 の結果を紹介する。本系は最近、 T_N 以下、 $H \parallel c$ 、0.7 GPa 程度の圧力で磁化過程に 1/3 プラトーを示すことが見出され[2]大変注目されている。我々は、圧力下での磁化率測定、THz-ESR 測定により、 c 面内の反強磁性相互作用 J_1 、面間の強磁性相互作用 J_0 、 c 方向の DM 相互作用、 J_0 の異方性の圧力依存性を分離して評価し、圧力印加に伴って相互作用の比 $\kappa = J_1/J_0$ が著しく増大していることを明らかにした。更に厳密対角化による計算を行い、比 $\kappa = J_1/J_0$ の変化に伴う磁化プラトー出現の有無を調べた。図は $\kappa = 0.3$ 、異方性を表すパラメータ $\eta = 1.01$ での磁化過程を示したものである。飽和磁化 M_s の 1/3 に相当する磁化で他に比べ有意にステップの幅が長くなっている。一方常圧の相互作用パラメータに相当する $\kappa = 0.18$ 、 $\eta = 1.01$ では、この様なプラトーは見られなかった。即ちプラトー出現の起源が相互作用の比の増大にあると考えられる。講演では装置概要とともに上記の内容について詳細に報告する。

[1] T. Sakurai *et al.*, J. Magn. Reson. **259** (2015) 108.

[2] A. Sera *et al.*, Phys. Rev. B **94** (2016) 214408.

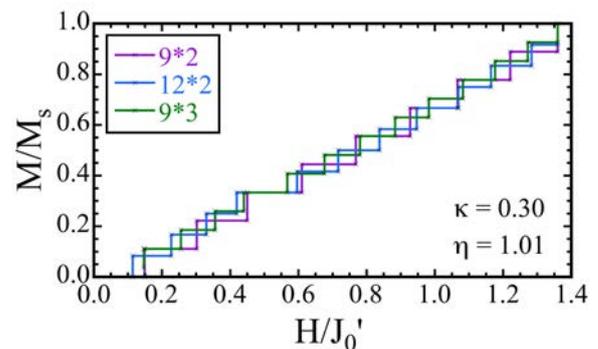


図. 厳密対角化による磁化過程.

キラル磁性体 CrNb_3S_6 の強磁場 ESR

阪大先端強磁場

澤田祐也, 吉澤大智, 萩原政幸

キラル磁性体では, 一般的に強磁性的な相互作用とジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用の競合によってらせん状の磁気構造を示すことが知られている. DM ベクトルの向きに応じてらせん方向が一意に決まり, 結晶全体においてキラリティが有限となるために, 磁場中において特異な現象を引き起こす場合がある. これらの中で, キラル磁性体 CrNb_3S_6 は零磁場下において c 面内に揃った Cr^{3+} イオンの局在スピンの c 軸方向に沿って回転するらせん磁気構造を有する物質である [1]. 中性子回折実験から, 127 K 以下の温度領域におけるらせんのピッチは 480\AA であることが明らかになっている [2]. さらにローレンツ透過型電子顕微鏡を用いた実験から, c 軸方向に垂直に磁場を印加することで, スピンが平行に並んだ強磁性領域とらせん状の領域が交互に現れるカイラルソリトン格子 (CSL) を形成することが知られている [3]. 今回, この物質の X バンド電子スピン共鳴 (ESR) 実験から, CSL 相において特徴的に現れるスパイク状のシグナルの存在がわかった. そして種々の条件下における ESR 実験を行い, スパイク状のシグナルの振る舞いについて詳細に調べた. ESR シグナルの外部磁場に重畳する変調磁場の周波数, 磁場強度, およびマイクロ波出力強度に対する依存性を調べたところ, スパイク状のシグナルはこれらにほとんど依存せずにより形を変えずに現れることが明らかとなった. また, ESR シグナルの磁場角度依存性を調べたところ, 印加磁場角度が c 軸に垂直な方向から平行になるにしたがって, スパイク状のシグナルが現れる領域が高磁場側に移りながら広がり, c 軸に完全に平行に磁場を印加した場合には観測磁場領域からなくなる振る舞いが観測された. 講演では ESR シグナルの磁場角度依存性と, 磁化の磁場角度依存性との対応についても紹介する予定である. 本研究は, 井上克也教授 (広島大学), 秋光純特任教授, 高阪勇輔博士 (岡山大学), 岸根順一郎教授 (放送大学), 戸川欣彦准教授 (大阪府立大学), 美藤正樹教授 (九州工業大学), 野末泰夫教授, 中野岳仁博士 (大阪大学) との共同研究であり, 独立行政法人日本学術振興会の科研費基盤 S (No. 25220803) および研究拠点形成事業 (A. 先端拠点形成型) の助成を得て行われたものである.

[1] T. Moriya and T. Miyadai, *Solid State Commun.* **42**, 209 (1982).

[2] T. Miyadai *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **52**, 1394 (1983).

[3] Y. Togawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 107202 (2012).

ファイバー・ブラッググレーティングをもちいた高速 100MHz 歪み測定法の開発とそれによる 100 テスラ超

強磁場中磁歪測定

東大物性研、^A 阪大生命、^B 茨城高専、^C 京大理化

池田暁彦、野村肇宏、松田康弘、谷俊太郎、小林洋平、^A 渡邊浩、^B 佐藤桂輔、^C 植田浩明

近年 100 テスラを上回る超強磁場領域において、フラストレート磁性体の磁化飽和直前の非自明な磁気相転移、固体酸素の α - θ 相転移、スピנקロスオーバー酸化物における量子論的スピנקロスオーバー、近藤半導体の金属絶縁体転移などの観測が報告された。これらの現象では多分に漏れず強いスピン格子結合が期待され、その直接観察が望まれるが、そのような測定は従来不可能であった。

本研究では微小歪み計測能をもつファイバー・ブラッグ・グレーティング (FBG)、モード同期型エルビウム添加ファイバーレーザーと可変型光学フィルターモジュールを用いて、微小歪みの 100MHz 測定を可能にした。また、この高速 100MHz 歪み計を用いて、7 マイクロ秒のパルス幅を持つ 100 テスラ超強磁場下における磁歪測定を実現した[1,2]。歪み精度は 10^{-4} から 10^{-5} の範囲で、ダイナミックレンジは 10^{-3} から 10^{-4} の範囲で、光学フィルターの交換により簡便に変更できる。

講演ではスピנקロスオーバー酸化物、フラストレート磁性体を初めとした複数の系への適用例を示す。また、サンプルに依存した接着方法の重要性も議論する。

- [1] A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato, Rev. Sci. Instrum. **88**, 083906 (2017).
- [2] A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato, Physica B, in press. (DOI: 10.1016/j.physb.2017.09.017)

光照射下での NMR 測定技術の開発

(国研) 物質・材料研究機構

後藤 敦, 端健二郎, 大木 忍, 清水 禎

物質の表面・界面は様々な機能が発現する舞台であり、そこで生じる現象を理解するための分析手法は重要です。私達は、核磁気共鳴法 (NMR) に光照射を組み合わせることで、表面・界面敏感な NMR 技術の実現を目指しています。

図 1 に、本技術の基盤となる測定システムを示します¹⁾。本システムでは、半導体のバンド間遷移を用いて核スピンを偏極する「光ポンピング NMR」と、核スピンを異種核間で転写する「交差分極」を同時に実現することができます。本システムは、局所敏感 NMR²⁾のほか、新しい核スピンの相互作用の発見³⁾などにも貢献しています。

また私達は、上記システムをもとに、固体表面における光誘起現象を NMR でその場観測するためのシステムの開発も進めています。NMR と励起光を同期させることで、光照射後の変化を NMR で追跡することが可能となります。

本研究の実施に当たり、NIMS 技術開発・共用部門強磁場ステーションにご支援頂きました。本研究の一部は、JSPS 科研費 (25287092, 25610079) の助成を受けたものです。

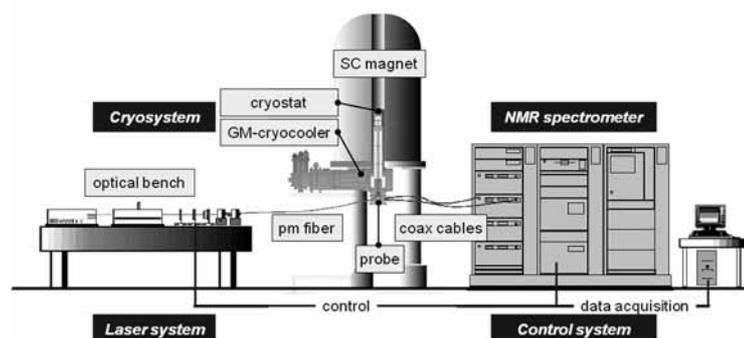


図 1 光ポンピング NMR システム

1) A. Goto, S. Ohki, K. Hashi and T. Shimizu: Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 126701.

2) A. Goto, K. Hashi, S. Ohki and T. Shimizu: arXiv:1710.10039.

3) A. Goto, S. Ohki, K. Hashi and T. Shimizu: Nat. Commun. 2 (2011) 378.

メンブレン型表面応力センサーを用いた磁気測定

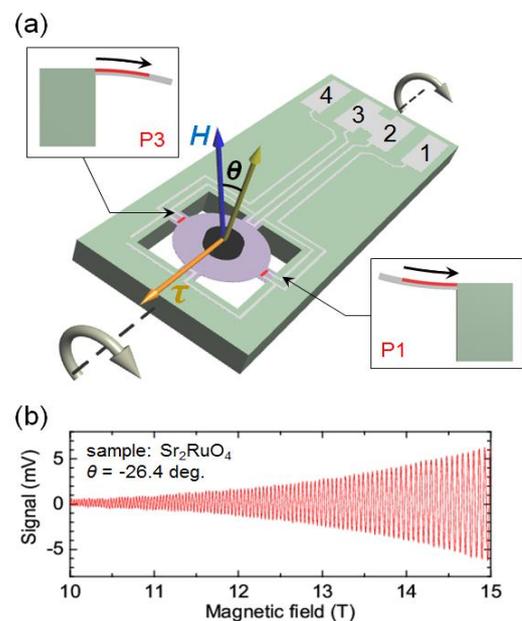
神戸大先端、神戸大院理^A、神戸大分子フォトセ^B

高橋英幸、石村謙斗^A、岡本翔^A、大道英二^A、太田仁^B

ピエゾ抵抗検知型のマイクロカンチレバーは強磁場下における磁気測定ツールとして用いられてきたが、近年、市販製品の生産が終了したために入手が困難になっている。我々は、カンチレバーの代替となる市販センサーとして、におい検出用素子であるメンブレン型表面応力センサー（MSS: Membrane-type surface-stress sensor）を使用した磁気測定法の開発に取り組んでいる[1]。このセンサーは直径 1mm、厚さ約 $5\mu\text{m}$ のシリコンのメンブレンが 4 本の梁で保持された構造を持つ。梁部分にはピエゾ抵抗が埋め込まれており、膜の変形を電氣的に検出できる。4 つのピエゾ抵抗は、チップ上のアルミ配線を介してホイートストンブリッジを形成している。

図 1(a)は、このセンサーを用いて磁気トルク測定を行う際のセットアップである。トルク測定では、チップ上のアルミ配線の一部をあえて切断し、バイアス電流が一つの対向するピエゾ抵抗ペアのみを流れるようにする。対向するピエゾ抵抗ペアの特性はマッチングがとれているので、外部抵抗を用いてブリッジ回路を形成することで、磁気抵抗により生じるバックグラウンドを打ち消すことができる。図 1(b)はこの手法を用いて測定した Sr_2RuO_4 単結晶 ($0.35 \times 0.35 \times 0.14\text{ mm}^3$) のドハース・ファンアルフェン振動である。

また、MSS を用いて電子スピン共鳴信号を力/トルク検出することにも成功している。カンチレバーよりスピン感度では 1-2 桁劣るが、試料搭載部分の面積が広いため、試料を増やすことで S/N を補うことができる。



[1] H. Takahashi *et al.*,
J. Phys. Soc. Jpn. **86** (2017) 063002.

図 1. (a) 磁気トルク測定の設定アップ。 (b) 1.5 K での Sr_2RuO_4 の磁化振動。

50 T パルス強磁場装置の

断熱消磁による極低温域への展開

阪府大工、阪府大理^A、阪大強磁場^B

石打翔馬、楠佳也、野口悟^A、石田武和、鳴海康雄^B、萩原政幸^B

純有機磁性体や低次元磁性体など局在量子スピン系を中心に、極低温パルス強磁場のニーズは高い。しかし、パルス強磁場実験は誘導電流による発熱や電磁応力のため金属材料が使えず、また、希釈冷凍機や³Heクライオスタットとパルス強磁場との組み合わせは、万一コイルが破壊した時の³He損失が極めて大きいこともあり、1 K以下の極低温データが極端に少ない。我々は250 kJ コンデンサバンクを整備し、物性研で作製された内径18Φと30Φのパルスマグネットを用いて50 Tのパルス強磁場を発生させることに成功した。また、常磁性塩断熱消磁法を用いて、³Heを使用せずに、最低到達温度0.227 Kを150秒以上維持させることに成功した。現在は両者を組み合わせた50 T、0.1 Kの複合極限環境の実現を進め、その環境下での磁化測定を目指している[1]。

強磁場と消磁の組み合わせは、図1に示すように、両者を空間的に切り離すことで実現できる。パルスマグネットの上部～300 mmに消磁塩を設置し、0.03Φの被覆銅線束で熱伝導を確保する。渦電流発熱は線径の4乗に比例するため、被覆銅線の発熱は極めて小さくなるが、これを定量的に評価するため、現在、阪大先端強磁場の共同利用研究で温度上昇の実測を行っている。また、パルスマグネット直上で被覆銅線をサファイヤや⁴Heなど非金属熱伝導体で接続する方式を検討中である。一方、磁化計測のための試料の出し入れが非常に困難になるため、予めバックグラウンドを計測しておくか、温度変化で差し引きを試みるかなど新たな磁化計測手法を検討している。現在、クライオスタットを設計、試作しており、最低到達温度やパルス強磁場中での消磁塩の冷却能力データを取得する予定である。

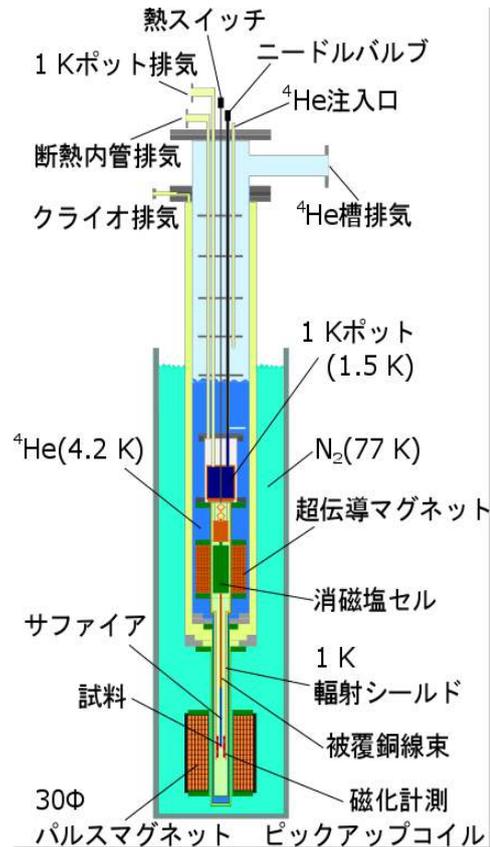


図1. 断熱消磁クライオスタット概略図

[1] 石打翔馬、他 日本物理学会 2017年春季大会 17pC-PS-34.

1/5 欠損ハイゼンベルグ正方格子 CaV_4O_9 の強磁場磁化

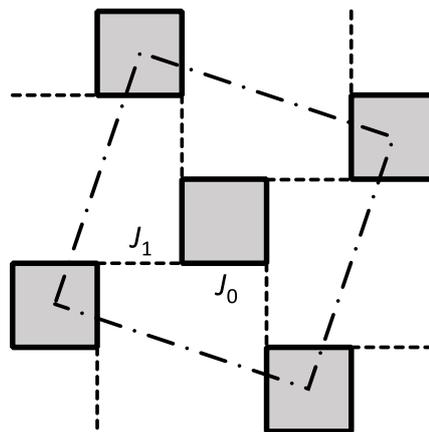
過程におけるスピングャップと磁気励起状態の観測

東大物性研、^A マックスプランク量子物質

池田暁彦、野村和哉、松田康弘、山内徹、^A 磯部正彦

2次元直交ダイマー量子スピン系 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ は基底状態でスピングャップをもち、強磁場磁化過程で $1/16$, $1/8$ などの非自明な磁化プラトーを示すため、多くの研究がある。一方、 CaV_4O_9 は同時期に発見され[1] プラケットシングレットの基底状態を持つと考えられたが[2]、107K という大きなスピングャップを持つために磁場下の研究はなかった。本研究では CaV_4O_9 の超強磁場磁化過程における非自明な磁気相の観測を目指している。

今回一巻きコイル法で発生した 160 T に及ぶ磁場中で誘導法による低温磁化測定を行ったところ、85 T 付近で磁化が立ち上がり、磁化上昇が 150 T まで継続することを見いだした。磁化の立ち上がりはスピングャップの消滅に対応し、定量的にギャップの値を再現する[3]。磁化上昇中に非自明な磁化プラトーは観測されなかったが、この磁気相はマグノン超流動やスピンネマティック相に対応すると考えられる。講演では詳細と展望を併せて述べる。



1/5欠損ハイゼンベルグ正方格子の模式図

- [1] S. Taniguchi, T. Nishikawa, Y. Yasui, Y. Kobayashi, M. Sato, T. Nishioka, M. Kontani, K. Sano, J. Phys. Soc. Jpn. **64**, 2758 (1995).
- [2] M. Troyer, H. Kontani, K. Ueda, Phys. Rev. Lett. **76**, 3822 (1996)
- [3] Y. Fukumoto, A. Oguchi (1999). J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 3655 (1999).

有機スピンラダー物質の超強磁場磁化過程

東大物性研、阪大強磁場^A、大阪府立大^B、東大理^C

野村和哉、松田康弘、池田暁彦、小濱芳允、鳴海康雄^A、嶽山正二郎、
金道浩一、天谷直樹^B、長谷川直哉^B、小野俊雄^B、細越裕子^B、諏訪秀磨^C、
藤堂眞治^C

スピン鎖が複数本ならんだスピンラダー系は低次元スピン系のうちの一つであり、これまでにスピン鎖の偶奇で物性が異なることやホールドープによる超伝導の出現が予測され多くの研究がなされている [1]。我々はこれまでに有機物の $S = 1/2$ および $S = 1$ のスピンラダー系と指摘されている BIP-BNO および BIP-TENO [2] について一巻きコイル法を用いた超強磁場下での磁化測定を行った。

BIP-BNO に関しては 76 T までの磁化測定を行い、飽和までの磁化過程を明らかにした。量子モンテカルロ計算との比較と、磁化の磁場微分 (dM/dB) における 2 本足 $S = 1/2$ スピンラダー系の特徴的なふるまいから BIP-BNO は有機物としては初めての $S = 1/2$ スピンラダー系物質であることを明らかにした [3]。

$S = 1$ のスピンラダー物質といわれている BIP-TENO に関しては 100 T までの磁化測定を行い、40, 55, 77, 95 T 付近に dM/dB の磁場依存性に明確なピークを観測した。しかしながら、55 T 付近における磁化のとびは、先行研究による非破壊型マグネットを用いた磁化測定では磁化プラトーの領域であり異なる磁化過程が得られている [4]。この結果は非常に高い再現性で得られており、またサンプル依存性はなく本質的な現象であると考えている。この一巻きコイル法の測定のみで現れる磁化のとびは一巻きコイル法 (約 7 μ s) と非破壊型マグネット (約 30 ms) の磁場発生時間の違いによるものと考えている。具体的には一巻きコイル法の測定では非破壊型マグネットよりも 3 桁ほど速い磁場掃引であるために (a) 周囲の環境と熱交換せずに磁場発生が完了し、断熱過程での測定となる。そのため磁気熱量効果によりスピン系の温度は極低温に下がり磁気秩序が現れる。(b) 磁場掃引により格子変形が起こるが、格子が追従できずにスピン系のみが応答し、異なる磁化過程が現れる。という 2 つの仮説を立てた。この仮説を明らかにするために、磁気熱量効果測定、初期温度を変化させた磁化測定、磁歪測定を行った。これらの結果から (b) の仮説を支持する結果を得た。これはマイクロ秒スケールの速い磁場掃引を行うことにより格子を置き去りにしスピン系のみが応答するという大変興味深い現象である可能性が高い。発表ではこれらの検証についてくわしく議論する。

[1] E. Dagotto, T. M. Rice, *Science* 271 (1996) 618.

[2] K. Katoh, Y. Hosokoshi, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn*, **69** 1008 (2000).

[3] K. Nomura, Y. H. Matsuda, *et al.*, *J. Phys Soc. Jpn*. **86** 104713 (2017).

[4] T. Sakai *et al.*, *Physica B* **329_333**, 1203 (2003).

フラストレーション系における磁場誘起量子現象 の大規模数値対角化による研究

兵庫県立大物質理^A、兵庫県立大フロンティア機能物質創製センター^B、
量研 SPring-8^C

坂井徹^{A,B,C}、中野博生^{A,B}

フラストレーション系は磁化曲線のプラトー・ジャンプ・カuspなどを伴ったさまざまな興味深い磁場誘起量子現象を示す。なかでも高温超伝導の起源として提唱された量子スピン液体を実現する候補物質として、三角格子・カゴメ格子を中心とする二次元フラストレーション系の研究が注目されている。しかし、量子スピン系を扱う大規模数値解析の方法のうち、量子モンテカルロ法と密度行列繰り込み群法は、二次元フラストレーション系については、必ずしも有効ではないため、有限系の数値対角化が一つの有力な手法となっている。そこで本研究では、京コンピュータ等のスーパーコンピュータを利用した大規模数値対角により、二次元フラストレーション系の磁場誘起量子現象を理論的・数値的に解析した。このうち以下のような最新の成果を報告する。

1. カゴメ格子反強磁性体の磁化過程[1-3]
2. 次近接相互作用を持つ三角格子反強磁性体の磁化プラトー[4]

[1]T. Sakai and H. Nakano: Phys. Rev. B 83 (2011) 100405(R)

[2]H. Nakano and T. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 053704

[3]H. Nakano and T. Sakai: J. Phys.: Conf. Ser. 868 (2017) 012006

[4]H. Nakano and T. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn. 86 (2017) 114705

三角格子反強磁性体 NiGa_2S_4 のパルス強磁場下熱測定

阪大先端強磁場、東大物性研^A、東北大金研^B

佐藤和樹，鳴海康雄，小濱芳允^A，南部雄亮^B，金道浩一^A，萩原政幸

NiGa_2S_4 は 2 つの GaS 層と NiS_2 層が一つのユニットになって c 軸方向に積み重なっている層状物質であり(図 1)、磁性を担う Ni^{2+} ($S=1$) が三角格子状に配列した幾何学的にフラストレートしている反強磁性体である。強い反強磁性相互作用($\theta_w \approx -80$ K)が働いているにもかかわらず 0.08 K まで長距離秩序を示さず、中性子散乱からは MHz 程度のダイナミクスを伴う物質として注目されている[1][2][3]。この物質において強磁場中でスカーミオン格子形成(図 2 の Triple- q 相)の可能性が理論的に示唆され[4]、対応する強磁場中の磁化にアノマリーが観測されている[5]。これはカイラル磁性体で考えられているジャロシンスキー・守谷相互作用により誘起されるスカーミオン格子ではなく、フラストレーションによって誘起されるスカーミオン格子であると考えられている。また図 2 の Z 相では、スカーミオンと反スカーミオンが混在すると予想されており、これらを実験的に検証することは非常に興味深い。

本研究では、 NiGa_2S_4 の強磁場下でこれらの新奇相への相転移を観測する目的で、最大磁場 60 T、温度 2~10 K において磁気熱量効果測定を行った。その実験結果や考察の詳細を当日の講演にて報告する。

参考文献

- [1] S. Nakatsuji *et al.*, Science **309**, (2005) 1697.
- [2] H. Takeya *et al.*, Phys. Rev. B. **77**, (2008) 054429.
- [3] Y. Nambu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, (2015) 127202
- [4] T. Okubo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, (2012) 017206.
- [5] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. B. **78**, (2008) 180404(R).

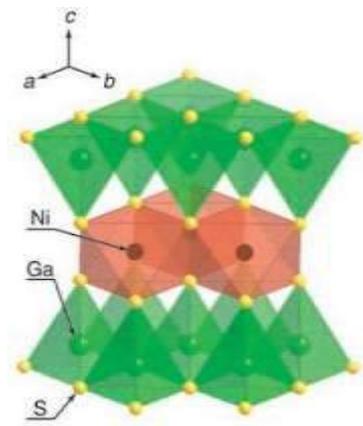


図 1 NiGa_2S_4 の結晶構造

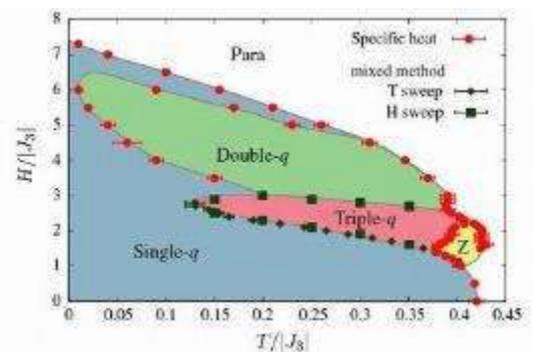


図 2 NiGa_2S_4 において実現すると予想される温度-磁場相図

ブリージングパイロクロア反強磁性体

LiMCr₄O₈ (M=Ga, In) の 100 T 超強磁場磁化過程の観測

東大物性研、名大工^A

巖正輝, 中村大輔, 岡本佳比古^A, 嶽山正二郎

幾何学的フラストレート磁性体は、古典スピン系において絶対零度で基底状態に巨視的な数の縮退が生じるためにスピン液体を発現し得る物質として注目され、近年実験・理論の両面から盛んに研究が行われている。 $S = 3/2$ の磁性を担う Cr 原子がパイロクロア格子を組んだクロムスピネル酸化物 ACr_2O_4 ($A = \text{Hg, Cd, Zn, Mg}$) は、3次元系の幾何学的フラストレート磁性体の代表物質である。これらの物質に対する強磁場磁化測定の実験結果、 $1/2$ プラトーに代表される様々な磁気相が観測されており、スピン-格子結合の強さが磁化過程に影響を及ぼす主要なパラメータとなっていることが理論研究から明らかになっている[1]。

我々は、Cr 原子の正四面体が交互に膨張収縮したブリージングパイロクロア反強磁性体 LiMCr₄O₈ (M=Ga, In) に着目した。先行研究から、これら 2 物質ではブリージングの度合いが異なるために、両者の低温における磁気的性質が大きく異なることが帯磁率測定などから分かっており、ブリージングも幾何学的フラストレート磁性体の物性を左右する重要なパラメータとなることが期待される[2]。そこで、ブリージングが磁場下での磁気構造に及ぼす影響を解明するために、両物質の飽和までの全磁化過程の観測を目指して研究を行っている。

誘導法磁化測定においては、現在では平行型の磁化検出ピックアップコイルを用いるのが一般的となっている。しかし、電磁濃縮装置への応用を考えた場合、平行型は磁場の均一性の問題やより高磁場での測定の観点から適していないために、同軸型の磁化検出ピックアップコイルを用いた測定技術の確立が必要となる。そこで、今回私は一巻きコイル実験装置にて同軸型ピックアップコイルを用いた誘導法磁化測定を試みた。その結果、LiInCr₄O₈ では 90 T 付近から $1/2$ プラトーが観測された。本発表では、同軸型ピックアップコイルの開発および測定手法について述べた上で、得られた磁化測定の結果を示す。

[1] K. Penc, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 197203 (2004).

[2] Y. Okamoto, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 097203 (2013).

ボルボサイト $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の

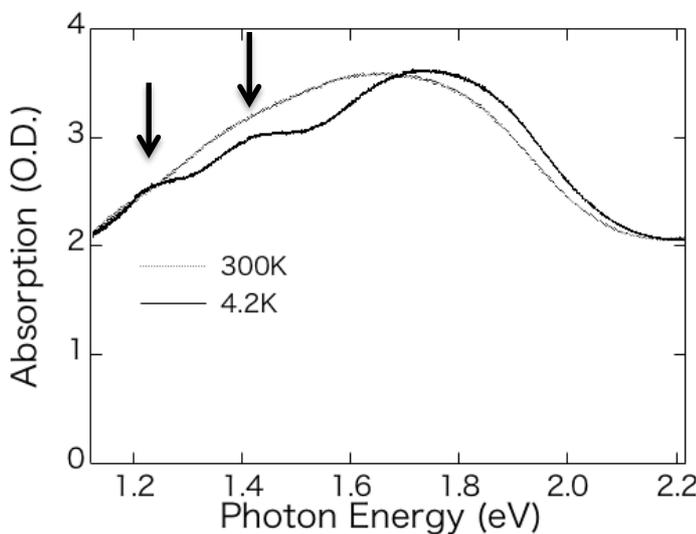
磁気光学吸収スペクトル

東大物性研

安井伸, 中村大輔, 石川孟, 小濱芳允, 廣井善二, 嶽山正二郎

ボルボサイト $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ はスピン 1/2 を持つ歪んだカゴメ格子反強磁性体であり、幾何学的フラストレーションを持つ。本物質は超強磁場下で非常に長い 1/3 プラトーが観測されたり[1]、26 T 近傍でボンドネマティック磁気相の存在が予見されるなど注目されている[2]。我々は実験的には検知が困難と言われているボンドネマティック磁気相をマグノンに敏感な励起子光吸収遷移を使って検知しようと試みている。しかしボルボサイトの単結晶の合成は非常に難しく[3]、光学測定を行うために適した大きさの結晶を得ることは困難である。

そこで Poly vinyl Alcohol 膜内にボルボサイト単結晶をいくつか埋め



込むことで光学測定を可能にし、各温度での光吸収スペクトルを測定した。結果を図に示す。

4.2K では、d-d 遷移の裾付近において新たなピークが観測された(図中矢印)。この新たなピークはエキシトンを励起する際にマグノン、フォノンを同時に励起することにより、スピン量子数、運動量を保存する[4]、エキシトン-マグノン-フォノン遷移である可能性がある。

図 ボルボサイトの吸収スペクトル

- [1] 山下知大, 修士論文, 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻嶽山研究室 (2015)
- [2] O.Janson, et,al., Phys. Rev. Lett. 117, (2016)
- [3] H. Ishikawa, et al., Phys.Rev.Lett.114,227202 (2015)
- [4] 菅野暁等 編「新しい磁気と光の科学」 (講談社サイエンティフィック 2001)

マルチフェロ・フラストレート磁性体 CuCrO_2 の

超強磁場磁化

東大物性研、Laboratoire National des Champs Magnetiques Intenses ^A、東北大院理 ^B

青木孝晶，宮田敦彦 ^A，中村大輔，大串研也 ^B
Oliver Portugall ^A，嶽山正二郎

CuCrO_2 は、スクリュウ型スパイラルスピン構造の形成に伴い 24K 以下でマルチフェロイック性を示す [1, 2]。また CuCrO_2 は、 Cr^{3+} イオンがわずかに変形した三角格子を形成する幾何学的フラストレート磁性体でもあり、磁場の印加により、様々な磁気相が存在することが知られている。これまでに非破壊パルスマグネットを用いて、分極測定が 92T [3] まで行われたが、高磁場領域における分極と磁化の関係は未解決の問題である。我々は、破壊型シングルターンコイルパルスマグネットにより 160T までの CuCrO_2 の高磁場特性を調べた。磁場は結晶の c 軸に沿って印加され、光磁気ファラデー回転法による磁化測定を行った。

我々は 75 T でヒステリシスを有する磁化の小さな飛びを発見した。 [3] これは一次相転移が起きていることを示している。75 T を超えると、磁化は磁場と共に単調に増加するが、これは 75 T 以上で 1/3 のプラトー相が予測されるモンテカルロシミュレーションの結果 [4] と矛盾する。理論モデルと比較しながら実験結果を検討する。

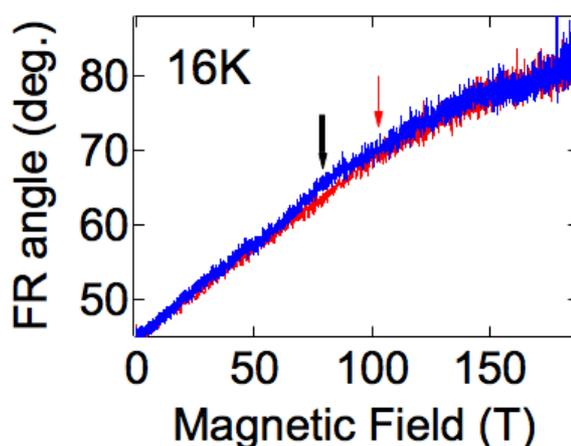


図 CuCrO_2 の磁場と磁化に比例した角度の関係

- [1] S. Seki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 101, 067204 (2008).
- [2] K. Kimura *et al.*, Phys. Rev. B 78, 140401R (2008).
- [3] A. Miyata *et al.*, arXiv.1710.07174 (accepted in Phys. Rev. B)
- [4] S.-Z. Lin *et al.*, Phys. Rev. B 89, 220405(R) (2014).

スピネマチック候補物質 $S=1/2$ 擬 1 次元 J_1 - J_2 フラストレート磁性体 $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ の磁場中配向試料による強磁場 ESR 測定

神戸大分子フォトセ、神戸大院理 ^A、神戸大研究基盤セ ^B、
阪大先端強磁場 ^C、京大院農 ^D、東北大多元研 ^E、名大院工 ^F、
東大物性研 ^G

大久保晋，久保田創 ^A、北原遥子 ^A、原茂生 ^B、櫻井敬 ^B、太田仁，
吉澤大智 ^C、萩原政幸 ^C、木村史子 ^D、木村恒久 ^D、那波和宏 ^E，
岡本佳比古 ^F、廣井善二 ^G

$S=1/2$ 強磁性-反強磁性フラストレート鎖では、飽和磁場近傍でスピネマチック相の出現が理論的に予想されている [1]。 $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ は $S=1/2$ 強磁性 J_1 -反強磁性 J_2 を持つフラストレート 1 次元鎖のモデル物質である。帯磁率、比熱の温度依存性で $J_1=-51\text{K}$ 、 $J_2=36\text{K}$ と見積もられ、 0.6K まで長距離秩序がないことが示されている [2]。また、NMR 測定でこの系が SDW 状態をとるなどモデル物質に合致しているとの報告がされている [3]。我々はこれまでに粉末試料の強磁場 ESR 測定 [4]、磁気異方性を得るための磁場中配向試料 [5] の強磁場 ESR 測定を報告している [6]。しかしながらスピネマチック相の磁場範囲が約 1T と狭いため測定点が少なく、スピン状態の変化を議論するには十分ではなかった。今回、遠赤外レーザーによる測定を行い、データ点を増やして測定を行ったので、その結果を報告する。測定はパルス強磁場を用いて 45T までの磁場範囲で行い、温度は 1.5K の測定を行った。図 1 に $H//b$ の 1.4K における ESR スペクトルの周波数依存性を示す。スピネマチック相に対応する磁場で顕著な共鳴磁場のシフトは観測されなかった。線幅などの変化やについては、当日報告する。この測定は西日本パルス強磁場研究拠点 KOFUC ネットワークの協力のもとで行われている。

- [1] T. Hikihara, *et al.*, Phys. Rev. B 78 (2008) 144404
- [2] K. Nawa, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 103702
- [3] 那波和宏他, 2015 年秋季大会 領域 3 15pCG-2 ISSN: 2189-079X
- [4] 北原遥子他, 2015 年秋季大会 領域 3 16pCG-2 ISSN: 2189-079X
- [5] F. Kimura *et al.*, CrystEngComm 16 (2014) 103702
- [6] 大久保晋他, 2016 年次大会 領域 3 21aBD-3 ISSN: 2189-079X

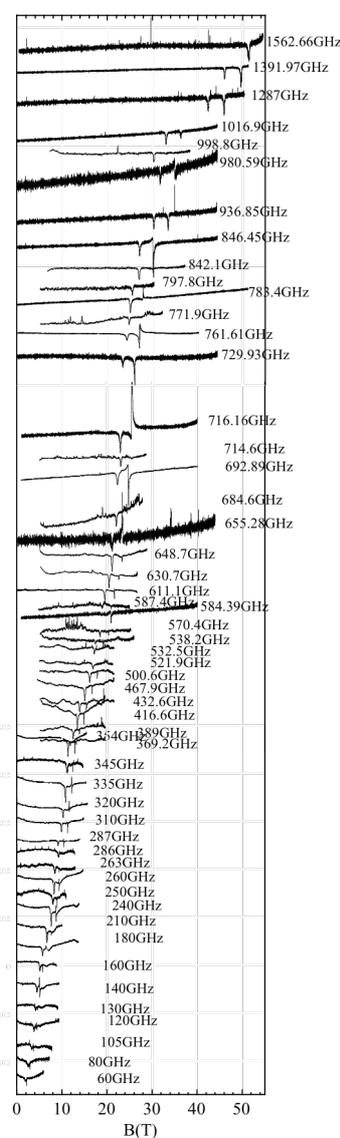


図 1 $H//b$ の 1.4K における ESR スペクトルの周波数依存性

High-magnetic-field thermodynamics in the $S=1$

kagome staircase compound $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$

ISSP^A and *WHMFC*^B

Dong Chao^{A,B}, Y. Kohama^A, J. F. Wang^B and K. Kindo^A

Recently, a field-induced multiferroic behavior concomitant with an incommensurate spin structure has been reported in the kagome staircase vanadium oxide, $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$ [1]. To elucidate the thermodynamic properties of the incommensurate phases, such as the shape of H - T phase diagram and the absolute value of entropy, we perform magnetocaloric effect (MCE) and specific heat (C_p) measurements in pulsed magnetic fields up to 50 T. We will present the high-field MCE and C_p data with focus on the technical details and discuss the origin of multiferroic behavior with comparing the previous polarization data [1].

[1] Junfeng Wang, M. Tokunaga, Z. Z. He, J. I. Yamaura, A. Matsuo, and K. Kindo, Phys. Rev. B. 84, 220407(R) (2011)

ホイスラー合金 $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$ および

$\text{Ni}_{50-x}\text{Co}_x\text{Mn}_{31.5}\text{Ga}_{18.5}$ の磁歪の実験的研究

龍谷大理工、東北学院大工総研^A、東北大金研^B、山形大工^C

左近拓男、藤本尚巳、鹿又武^A、野尻浩之^B、安達義也^C

ホイスラー合金の単結晶では巨大な磁場誘起歪みが観測される。Ni や Fe の磁歪に比べて 3 桁もの大きさと非常に興味深い、単結晶であるので、多結晶よりも脆性に劣ることと、純良で巨大な単結晶を育成することが困難なので、歪み率は少ないが脆性や耐久性に長ける多結晶が産業への応用材料として注目されている。我々は Ni_2MnGa の Mn や Ga の Fe, Cu, Co, Cr 置換 4 元系合金の磁性を研究している。

$\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ga}$ は $x < 0.25$ でプレマルテンサイト相が出現する³⁹⁻⁴⁰⁾。 Ni_2MnGa ではプレマルテンサイト相で磁歪が観測されたことから、Cr 置換した合金でもプレマルテンサイト相で磁歪が観測されると期待し、磁歪の実験を行なった。 $x=0.15$ では、プレマルテンサイト転移温度 $T_P = 230$ K 付近で 0.3 T の磁場中で 120 ppm の大きさの磁歪が観測された [1]。 Ni_2MnGa の磁歪測定並びに、他の研究者の結果の価電子密度 e/a と磁歪の最大値の関係について考察したところ、両者は比例関係にあり、 e/a が大きくなると磁歪も大きくなることが分かった。

東北大学金研強磁場センターの 10T ヘリウムフリー磁石を利用した磁歪実験では、 $\text{Ni}_{41}\text{Co}_9\text{Mn}_{31.5}\text{Ga}_{18.5}$ 多結晶において、磁場誘起歪みが観測された。大気圧、350 K において 0.12 % の磁場誘起歪みが観測された。これまでの研究で、メタ磁性転移も観測された。このことは、マルテンサイト相において磁場を印加すると、常磁性から強磁性に磁気相転移(メタ磁性転移)が起こり、それと同時に逆マルテンサイト構造相転移が起こることを示している。磁場により容易にマルテンサイト転移が起こることと、転移温度が磁場に対応して大きく変化することから、結晶構造と磁性との強い相関が存在することが確認できた。高速応答性を確認するために、364 K において 0.2 T/s の励磁速度で 260 ppm の磁場誘起歪みを観測した。速い励磁速度でも歪みが発生することが観測された。

[1] T. Sakon, N. Fujimoto, T. Kanomata and Y. Adachi, *Metals* 7 (2017) 410.

液体及び固体酸素の構造および磁性における強磁場効果

東大物性研、量研^A

清水歩実, 松田康弘, 稲見俊哉^A

固体酸素の磁気状態の変化は結晶構造に影響し、温度変化のみで多様な相が出現する。また、約 120 T の超強磁場を印加すると酸素分子間の反強磁性秩序が壊れ、 θ 相に転移する[1]。我々は、結晶構造決定など θ 相の詳細な物性を解明するために次の 2 種類の実験を行った。

実験 1

一般的な化合物磁性体では、相転移磁場を制御するために元素置換によって結晶に化学圧力を加える試みはよくなされる。本実験では、酸素に窒素を混合し、結晶性の操作と相転移時の核形成過程の観点から α - θ 相転移の臨界磁場を変化させることが可能かどうか、磁化測定によって検討した。

窒素を約 30% 混合し、温度 4K で磁化測定を行った実験結果を図 1 に示す。純粋な酸素の磁化曲線には、一次相転移で出現する磁化の飛びが見られる。一方、窒素を混合すると明瞭な相転移が消えたように見えるがその原因は現在のところよく分かっていない。

実験 2

強磁場中で液体・固体酸素の X 線回折を行い、固体酸素の結晶構造と液体酸素の局所構造の直接観測を行った。先行研究では、7.5 T の磁場で X 線回折が行われている[2]。実験は SPring-8 のビームライン BL-22XU で行った。小型のパルスマグネットですべて約 24 T の磁場を発生させて、磁場下での X 線回折を測定した。10 K の α 相において固体酸素のブラックピークが磁場印加によって低角側にシフトすることが確認できた。これは、磁場によって結晶格子が膨張したことを示している。発表では、より高温の β 相や γ 相、及び液体の結果についても紹介する。

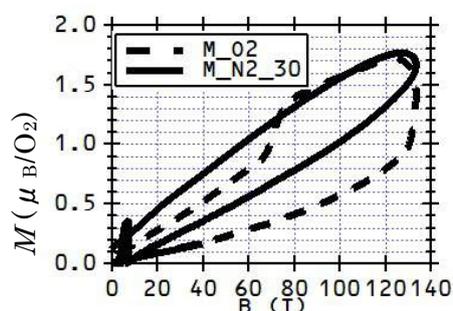


図 1: 純酸素と窒素-酸素(7:3)混合系の磁化曲線

[1] T. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. 112, 247201 (2014).

[2] K. Katsumata et al., J. Phys.: Condens. Matter 17 L235. (2005).

Co₂Mo₃O₈ の磁場誘起相転移

東邦大理学部^A、東邦大複合物性センター^B

赤星大介^{A,B}、藤井沙織^A、齊藤敏明^{A,B}

カミオカイト型酸化物 $M_2Mo_3O_8$ ($M = Mn, Co, Fe, Zn$ など)は、ハニカム格子を形成している M^{2+} 層とカゴメ格子を形成している Mo^{4+} 層が交互に積層した構造を持っている。 Mo^{4+} は層内で非磁性のトライマーを形成しているため、 $M_2Mo_3O_8$ の磁性は M^{2+} が担っている。

$(Zn_{1-y}Fe_y)_2Mo_3O_8$ は、磁場誘起の逐次相転移などの興味深い磁氣的振る舞いを示すことが報告されている[1]。これは磁性イオンがハニカム格子を形成していることに起因すると考えられる。今回、我々は $Co_2Mo_3O_8$ の磁氣的性質について調べたので、それについて報告する。

$Co_2Mo_3O_8$ の磁化の温度依存性においては、40 Kと10 K付近に異常が観測される。40 Kの異常はハニカム格子面内の磁気転移、10 Kの異常はハニカム格子面間の磁気転移によるものと考えられる。2 Kの磁化曲線($H = 0 - 50$ kOe)においては、複数の異常が観測された。この結果は、 $(Zn_{1-y}Fe_y)_2Mo_3O_8$ と同様に、 $Co_2Mo_3O_8$ においても磁場誘起の逐次相転移が存在することを示している。また、 $H = 50$ kOeにおける Co^{2+} の磁化はその飽和磁化($3 \mu_B / Co^{2+}$)の十分の一程度である。従って、 $H = 50$ kOe以上の高磁場側でも磁場誘起相転移が起こる可能性がある。当日はCoサイトの置換効果などについても報告する。

[1] S. Nakayama, *et. al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80** 104706 (2011).

CeNi₂Ge₂ と YbNi₂Ge₂ におけるメタ磁性

東大物性研、岩手大院工^A、静岡大院理^B

三宅厚志, 河智史朗, 秋葉和人, 中西良樹^A, 吉澤正人^A,
Jumaeda Jatmika^B, 海老原孝雄^B, 徳永将史

f 電子を持つ常磁性体において、ある磁場 H_m で磁化が非線形に増大するメタ磁性現象は f 電子の遍歴・局在性、磁気不安定性、スピン・軌道・価数の自由度といった固体物理において重要かつ根本的な課題を含んでいるが、起源に関して統一的な見解は得られていない。我々はメタ磁性の起源に迫ることを目標に、同じ正方晶構造を持つ CeNi₂Ge₂、YbNi₂Ge₂ に着目した。両者ともに常磁性基底状態を持つ珍しい系で、前者は反強磁性量子臨界点近傍に位置し、後者では 5 GPa で圧力誘起磁気転移の報告がある。単結晶試料を用いた 56 T までの磁化測定を行い、図 1 のようにそれぞれ $H_m = 45$ T ($H \parallel c$), 40 T ($H \parallel a$) でメタ磁性的な磁化異常を観測した。特に YbNi₂Ge₂ は Yb 系正方晶常磁性体で初めての観測例である。磁化、非線形磁化率の温度依存性から CeNi₂Ge₂ は近藤格子系、YbNi₂Ge₂ は強磁性近傍の遍歴メタ磁性体との類似性があることが分かった [1]。さらに、CeNi₂Ge₂ では線磁歪、超音波測定を行い、それぞれメタ磁性に伴う明瞭な異常を観測した。両者を比較し、Ce、Yb 系のメタ磁性の違いを議論する。

[1] A. Miyake, Y. Sato, M. Tokunaga, J. Jatmika, T. Ebihara, Phys. Rev. B **96**, 085127 (2017).

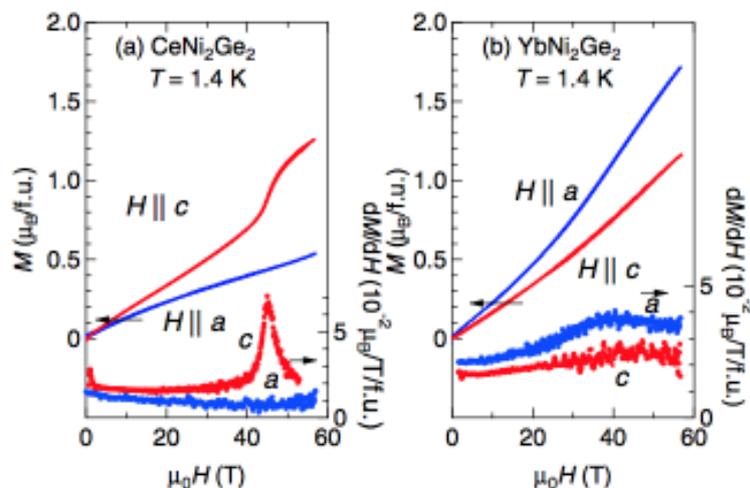


図 1. (a)CeNi₂Ge₂ と (b)YbNi₂Ge₂ の磁化と微分磁化率の磁場依存性。

2次元有機超伝導体における新奇強磁場超伝導状態

物材機構^A,筑波大数理物質^B,大阪大^C,NHMFL^D,Univ. College, London^E

宇治進也^{AB}、飯田頼嗣^{AB}、杉浦栞理^{AB}、磯野貴之^A、菊川直樹^A、
寺嶋太一^A、坏広樹^C、中澤康浩^C、D. Graf^D、P. Day^E

極めて2次元性の強い超伝導体では、面内方向で臨界磁場 B_{c2} がパウリ常磁性極限 (B_{Pauli}) を超える現象が低温域で観測される。そこでは、超伝導秩序変数が実空間で振動するFFLO超伝導が発現していると予想される。

β'' -(BEDT-TTF)₄[(H₃O)X(C₂O₄)₃]Y (β'' 塩)はアニオンが大きいために、2次元性が極めて強い超伝導体 ($T_c = 6K$) である。このような系では、理論的にはFFLO状態の逐次相転移も期待されている。この系でのFFLO超伝導相の有無、逐次相転移の可能性、さらにその発現に伴うジョセフソンボルテックス (JV, 面間に侵入した磁束) のダイナミクスについての研究を行っている。図1は、面間抵抗の面内

磁場依存性を示している。0.36Kでは、抵抗は約1Tで急激に増加した後になだらかな依存性を示し、約12Tでまた急激に増加する。このステップ的振る舞いは、温度の上昇とともに抑制され、2K以上では、はっきりと観測できなくなる。また、磁場を面内方位から垂直方位に2度程度傾けただけで、ステップ構造は消失する。このことから、有限な抵抗はJVの運動によるものと理解できる。磁気トルク測定では、20T付近まで大きな反磁性と非可逆的振る舞いが観測できることから、 B_{c2} は20T以上であり、その値は大きく B_{Pauli} を超えている。そのため、FFLO超伝導が発現している可能性が高い。ステップ構造は、FFLO相への転移に関連したJVのダイナミクスの変化である可能性がある。

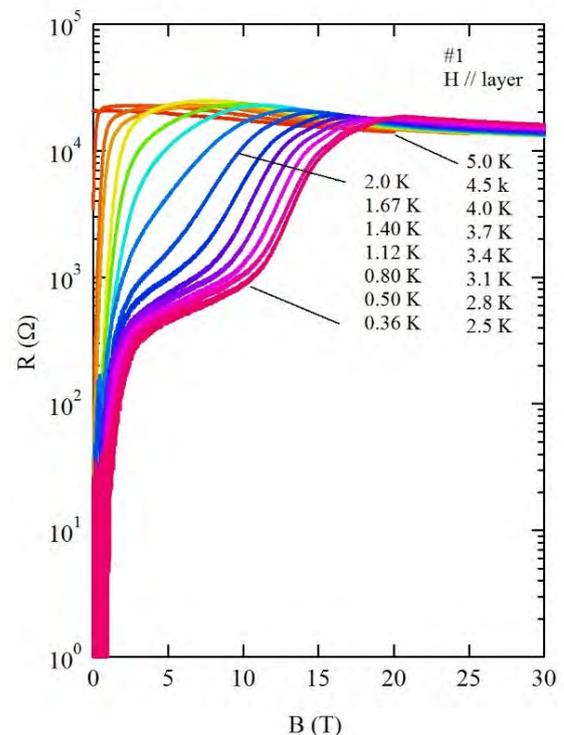


図1 : β'' 塩の面間抵抗の磁場変化。

Magnetization and magnetic phase diagram in heavy fermion antiferromagnet CeAl_2 at high magnetic fields

Jumaeda Jatmika, Atsushi Miyake^A, Takao Ebihara

Department of Physics, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan

^A *Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, Chiba 277-8581, Japan*

We report magnetization measurements performed at high magnetic fields in heavy fermion compound CeAl_2 with Néel temperature at 4 K. Magnetization measurements in SQUID magnetometer revealed anisotropic magnetization and Curie-Weiss temperature at -32 K. As a result of magnetization measurements in long pulse magnet up to 70 T, we drew anisotropic phase diagrams for $\langle 100 \rangle \langle 110 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$.

The de Haas-van Alphen oscillations with the frequencies 0.30 kT (F_1) and 6.6 kT (F_2) along $B \parallel \langle 111 \rangle$ up to 55 T were observed. The cyclotron mass of F_2 is comparable to the former one reported by a different group in pulse field up to 50 T. Detection of dHvA oscillation indicates our sample has high purity.

Keywords: CeAl_2 , Phase diagram, high magnetic fields

$V_{1-x}W_xO_2$ の磁場誘起絶縁体金属転移の探索

東大物性研、岡山大院自然^A

松田康弘, 村岡祐治^A、壽賀友貴^A

VO_2 は 340 K で高温の金属相から絶縁体相に鋭く転移[1]し、ルチル構造（高温）から単斜晶（低温）に結晶構造が変化する。絶縁体相ではバナジウム原子が構造的にダイマーを形成することも知られており、パイエルス転移との関連が示唆されている。しかし一方で、電子相関効果も重要な要因であるとする多体パイエルス転移[2]や、バナジウム原子間の結合軌道形成と構造不安定性から理解する考え方[3]も提唱されており、転移機構には未だ議論が残されている。我々は今回、絶縁体相において V^{4+} (d^1 , $S=1/2$) ダイマーがスピン 1 重項状態を形成することに注目した。十分強い外部磁場によりスピンを強制的に揃えた場合、分子軌道形成を抑制して絶縁体から金属への転移が誘起される可能性がある。

絶縁体金属転移にともなって赤外域の光学特性が大きく変化するため、磁場中の光透過実験を波長 2 μm のレーザー光を用いて行った。試料には VO_2 及び、W で V サイトを置換した $V_{1-x}W_xO_2$ ($x=0.06$) を用いた。両試料ともパルスレーザー堆積法により、 TiO_2 基板に成長させた単結晶薄膜である。W 置換で絶縁体金属転移の転移温度 T_{MI} が抑制される[4]ことが知られており、 T_{MI} を 100 K 前後に制御する目的で W 置換を行った。 $V_{1-x}W_xO_2$ ($x=0.06$) において一巻きコイル法を用いて 140 T までの磁気透過スペクトルを 95 K で測定したところ、100 T 以上で 2% 程度の僅かな透過率の減少が観測された。これは電気抵抗率の減少を示唆するため、さらに強磁場領域に存在する絶縁体金属転移の前駆的振る舞いを捉えたと期待できる。発表では VO_2 の結果とも合わせて議論する予定である。

[1] F. J. Morin, Phys. Rev. Lett. **3**, 34 (1959).

[2] T. C. Koethe et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 116402 (2006).

[3] Z. Hiroi, Prog. Solid State Chem. **43**, 47 (2015).

[4] K. Shibuya et al, Appl. Phys, Lett. **96**, 022102 (2010).

有機物質ディラック電子系における 強相関効果の強磁場 NMR 研究

東北大金研^A, 名大理^B, 東理大理工^C, 東大工物工^D, CNRS-LNCMI^E

平田倫啓^A, 松野元樹^B, 小林晃人^B, 田村雅史^C,
宮川和也^D, 鹿野田一司^D, Claude Berthier^E,

単層グラフェン, カーボンナノチューブの発見に端を発するゼロ質量ディラックフェルミオンの研究は, 近年, トポロジカル絶縁体やワイル/ディラック半金属, ^3He , 有機導体など, 様々な凝縮系を舞台として目覚ましい発展を続けており, 質量ゼロの特異な粒子を基軸とした「ディラック物質の科学」の新展開に注目が集まっている[1]. 本研究で扱う有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ (α -I $_3$) [2] は, 中でも圧力や温度によって電子相関を精密自在に制御できる稀有なディラック物質で, まだ実験的に十分解明されていないディラック電子の強相関効果の全容を明らかにするための理想的舞台として期待されている.

我々は最近, α -I $_3$ の相関の強いディラック電子相において, 圧力下 ^{13}C -NMR 測定と理論モデルの数値解析を合わせて行い, グラフェンなど従来の相関の弱いディラック物質には見られない, 多彩で劇的な電子相関効果が階層的に発現することを見出し, 原著論文や解説記事として報告してきた[3-5]. 今回, これまで行ってきた低磁場での NMR 測定を伝導面平行な強磁場域まで拡張して行い, スピン格子緩和率 $1/T_1$ に顕著な磁場および試料依存性を見出したので報告する. 当日はモデル計算との比較に加え, ゼーマン分裂の影響や自発的質量獲得機構としてのエキシトニック転移・揺らぎの可能性などを絡めた議論を行い, 従来あまり検証されることがなかった相関の強いゼロ質量フェルミオンの物理にさらなる光を当てたい.

[1] T. O. Wehling et al, *Adv. Phys.* **63**, 1-76 (2014).

[2] S. Katayama et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 054705 (2006).

[3] M. Hirata et al, *Nat. Commun.* **7**, 12666 (2016).

[4] M. Hirata et al, to appear in *Science*; *arXiv*: 1702.00097 (2017).

[5] 平田倫啓 et al, 日本物理学会誌, to appear in 『最近の研究から』 (2017).

YbB₁₂ の 100 T 磁化曲線の温度依存性

東大物性研、茨城大理^A

柿田頼輝、伊賀文俊^A、松田康弘

YbB₁₂ は 4f 電子と伝導電子の混成によりエネルギーギャップが形成され、フェルミ準位がギャップ内に位置することで半導体的な振る舞いを示す近藤絶縁体として知られている。低温において 55 T 付近に絶縁体金属転移と同時に磁化過程にメタ磁性転移が起こり、転移磁場からエネルギーギャップを評価することができる。[1] エネルギーギャップの温度依存性はギャップ形成過程の理解に有用と考えられるが、これまでに十分明らかとなっていない。今回、メタ磁性転移の温度依存性を調べることで、YbB₁₂ のエネルギーギャップの温度依存性を評価できると考え、実験を行った。

従来、物性研究所の縦型一巻きコイルにおいてはヘリウムや窒素温度以外での温度での測定が難しかったが、最近、安定な温調が可能なクライオスタットが導入されたため、これを用いて 4 K~30 K 温度域で 100 T までの磁化測定を行った。

実験では YbB₁₂ 粉末を用いた。図 1 に磁化の磁場微分 (dM/dB) の磁場依存性の結果を示す。4 K~10 K において明確に見られた 55 T 付近における転移が温度上昇に伴い転移が幅広になり不明瞭になる様子が見られる。30 K においては転移に関連すると思われる異常はほぼ観測されなくなる。発表では得られた結果をゼロ磁場で調べられた光学伝導度の報告[2]などと比較して、議論を行う。

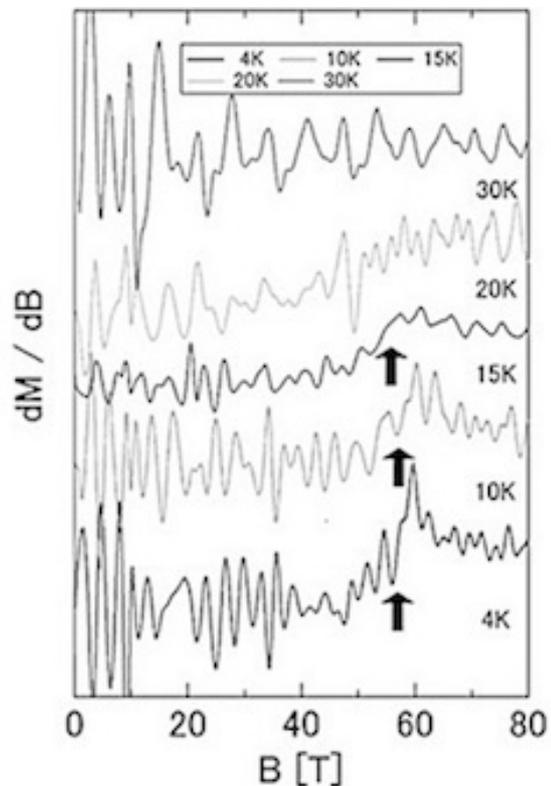


図 1 4 K~30 K における YbB₁₂ の dM / dB の磁場依存性
縦軸は offset を使っている。

[1] T.T. Terashima, A. Ikeda, Y.H. Matsuda, A. Kondo, K. Kindo, F. Iga, J. Phys. Soc. Jpn., 86, 054710(2017)

[2] H. Okamura, T. Michizawa, T. Nanba, S. Kimura, F. Iga, and T. Takabatake, J. Phys. Soc. Jpn. 74, 1954 (2005).

量子ホール効果ブレークダウンによる

動的核スピン偏極の磁気光学 Kerr 効果を用いた観測

千葉大院理^A、東北大院理^B、NTT 物性科学基礎研究所^C

石橋陵駕^A、色部潤^A、音賢一^A、平山祥郎^B、熊田倫雄^C

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造においてランダウ準位の占有数 n が奇数であるような量子ホール効果のブレークダウン状態では、電子スピン分極が動的な核スピン偏極(DNP)を引き起こす[1]。私たちは磁気光学 Kerr 効果を用いて電子スピン分極率を測定することで DNP を評価し、それが超微細相互作用を通じて二次元電子系のゼーマンエネルギーを変化させることを確認した[2]。GaAs 量子井戸での DNP 後の Kerr 回転角の時間依存性を $n=1$ 、 $T=0.5$ K にて観測した結果を図 1 に示す。図 1 の挿入図に示すようにブレークダウンによる核スピン励起の後に Kerr 信号が急速に緩和していく様子がわかる。また図 1 は Kerr 信号の変化量 ΔS をブレークダウンによる核スピンの励起時間 t_{pump} に対してプロットしたもので、励起時間が数百秒を超えると ΔS が飽和することからこの量を DNP 生成量に比例したものと考えられる。図 2 は ΔS の試料端からの位置依存性を示し、 $n=1.03$ でのブレークダウンによる DNP の空間分布に相当する。この図では DNP による緩和が測定試料の端付近でのみ見られ、ブレークダウン電流が大きいほど DNP の検出範囲がバルク領域へと拡大していくことがわかる。以上をもとに、より詳細な空間分布や、DNP の温度依存性、占有数依存性、さらには NER による DNP の評価について報告する。

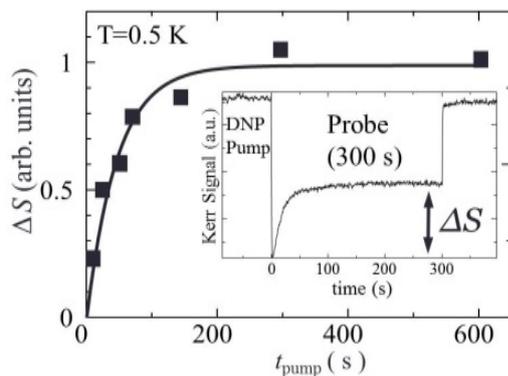


図 1 励起時間 t_{pump} に対する Kerr 信号の変化量 ΔS 。挿入図はポンププローブ測定を用いた Kerr 信号の緩和の様子。

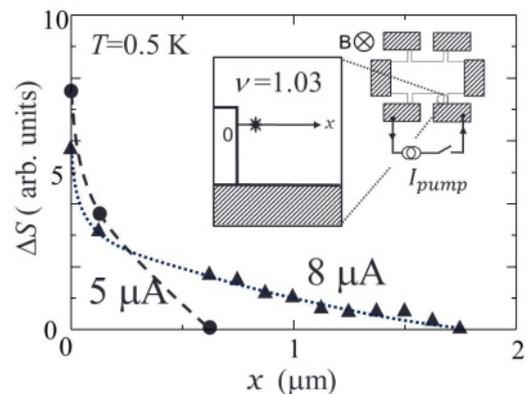


図 2 x は試料端からの距離で、ブレークダウン電流($5\mu\text{A}$ ●, $8\mu\text{A}$ ▲)で励起した場合の ΔS の位置依存性。

References

- [1] M. Kawamura, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **90**, 022102 (2007).
- [2] J. Irobe, *et al.*, Int. Conf. HMF-22, Hokkaido, Japan, July 26 (2016), TuP-16.

強磁場における CdTe 二次元電子系の荷電励起子発光

物材機構、ポーランド科学アカデミー^A

今中康貴, G. Karczewski^A, T. Wojtowicz^A

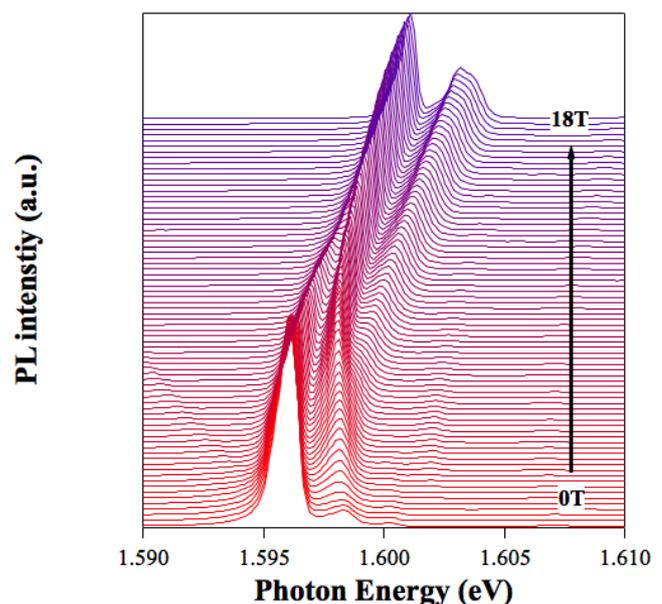
近年、様々な材料系で量子ホール効果が観測されるようになり、II-VI 族半導体 CdTe 系でも分数領域の研究が可能となってきた。[1]

これまで我々は、NIMS のハイブリッド磁石を使って CdTe 二次元電子系試料で強磁場輸送測定を行い、 $\nu < 1$ の強磁場領域で $\nu = 2/3$ などの分数量子ホールプラトーを観測し、移動度が極低温で $20\text{m}^2/\text{Vs}$ を越す高いものであることを確認している。またサイクロトロン共鳴の測定も行い、二次元電子系の有効質量に関して明らかにしてきた。

そこで今回、以前行っていた整数量子ホール効果試料の結果との比較も含めて、強磁場下で複数の試料について強磁場発光測定を行った。

その結果、ゼロ磁場で高い移動度を反映していると思われる非常に線幅の細い発光スペクトルを下図のように観測した。但し輸送測定から得られているフェルミエネルギー程度の幅を持ったフェルミ端異常のような振る舞いは観測されず、強磁場領域で 2 つの発光ピークが交差するような振る舞いが観測された。これらの振る舞いは、過去に計測した整数量子ホール試料の発光スペクトルの磁場依存性と明らかに異なっている。

この原因として、試料の井戸幅の変化によるバンドパラメータの変化、特に電子、正孔の有効 g 因子の変化によるものではないかと考え、円偏光による各発光ピークの同定を行ったところ、特に発光エネルギーの交差に対して重要な知見を得たので、理論との整合性も含めて議論を行う。



[1] B. A. Piot *et.al.*, Phys. Rev. B 82, 081307(R) (2010).

光渦照射下における量子ホール電子系の

磁気光学カー効果

千葉大院理^A、千葉大分子キラリティ研^B、千葉大国際教養^C、
千葉大院工^D、NTT物性基礎研^E、東北大院理^F

堤純一^A、音賢一^{A,B}、三野弘文^{A,C}、山田泰裕^A、尾松孝茂^{B,D}、
熊田倫雄^E、平山祥郎^F

光渦は軌道角運動量に相当する成分を持つ光として近年注目され、光渦を用いた光アブレーションによるキラル螺旋構造体の生成や光マニピュレーションなど、渦状の光圧を用いた研究が盛んに行われている。また、光渦と電子の相互作用についても興味を持たれており、様々な研究が始まっている。

2次元電子系を低温・強磁場下においた量子ホール電子系では、電子のエネルギーはランダウ量子化されており、さらにゼーマン分離によって電子スピンの向きごとに異なるエネルギーを持つ。さらには、電子の軌道角運動量も量子化されているため、光渦と電子の相互作用がより明瞭に現れることが期待される。

本研究では、ガウス光と光渦を用いて $\nu=3$ 付近での量子ホール系の磁気光学カー効果スペクトルを測定し、ランダウ準位への励起エネルギーや電子系のスピン偏極率が光渦照射によりどのように変化するかを調べた。カー効果スペクトルのエネルギー値は、光渦かどうかによる違いは見いだせなかった。一方でカー効果スペクトルの形状には、光渦照射により変化が見られ、電子系のスピン状態が変化していることを意味する。図1は、通常のガウス光で測定したカー効果スペクトルより得られた電子スピン偏極率の磁場依存性で、一電子モデルでの予想値（青線）より低くなっている。これは、空間分布を持つスピン渦”スカーミオン”が存在することを示している。一方で、図2に示すように光渦照射下ではランダウ準位依存性が $\nu=3 \pm 0.3$ 付近（図2の矢印付近）でスピン偏極率が大きく落ち込んでいる。このことから光渦がスカーミオンの生成や消滅に影響を与えていることが示唆される。

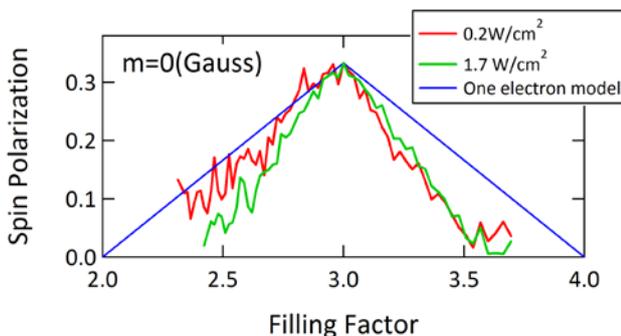


図1: ガウス光で測定した $\nu=3$ 付近での電子スピン偏極率

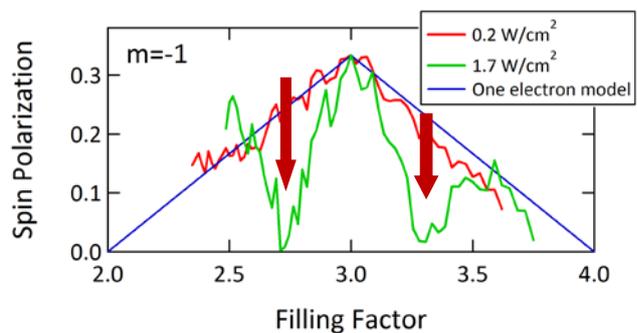


図2: 光渦で測定した $\nu=3$ 付近の電子スピン偏極率

Au(111)上への青リンのエピタキシャル成長とその評価

東大理

宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 長谷川修司

近年グラフェン等の二次元物質について、高い移動度や特異な超伝導を示すなどの新奇的な物性を持つことから盛んに研究がなされている。グラフェンに類似する二次元物質としては armchair 状の構造を持つ黒リンが挙げられるが、最近新たに報告されたものとしてワイドギャップ原子層半導体で、グラフェンと同じくハニカム状の構造を持つ青リンが注目を集めている[1]。理論計算から free-standing の1ユニット層の青リンは 2eV、bulk では 1.2eV のギャップを持つなど、ギャップのチューニングによって電子物性の制御が可能であると期待されている[1]。さらに、興味深いことに Li 等のアルカリ金属のドナーを 2 層青リン間にインターカレートさせることで約 20K の二次元超伝導体としては高温の超伝導が発現することが理論的に予測されている[2]。また、Au(111)表面上に安定した青リンが作製可能であるという理論モデルと STM による構造の局所観測が報告されており[1,2]、電気伝導による評価が待たれている。

本研究ではまず青リンの下地層として MBE 法により Si(111)基板上に Cu シリサイドを 7ML 成長させ、その上に Au を 20ML 程度蒸着することで清浄な単結晶 Au(111)表面を作製した。結晶構造は in-situ で RHEED を用いて評価した。図 1(a), (b)はそれぞれ今回作製した Cu シリサイド表面、Au(111)表面の RHEED パターンである。両層ともにエピタキシャル成長していることが確認できる。講演では下地層 Au(111)作製について成膜温度などの条件を最適化し、様々な条件下での青リンの作製についての結果、及びその電気特性についても紹介し議論する。

[1] Jia Lin Zhang, Songtao Zhao, Cheng Han et al., Nano Lett. **16**, 4903-4908 (2016).

[2] Jun-Jie Zhang, Shuai Dong, 2D Mater. **3**, 035006 (2016).

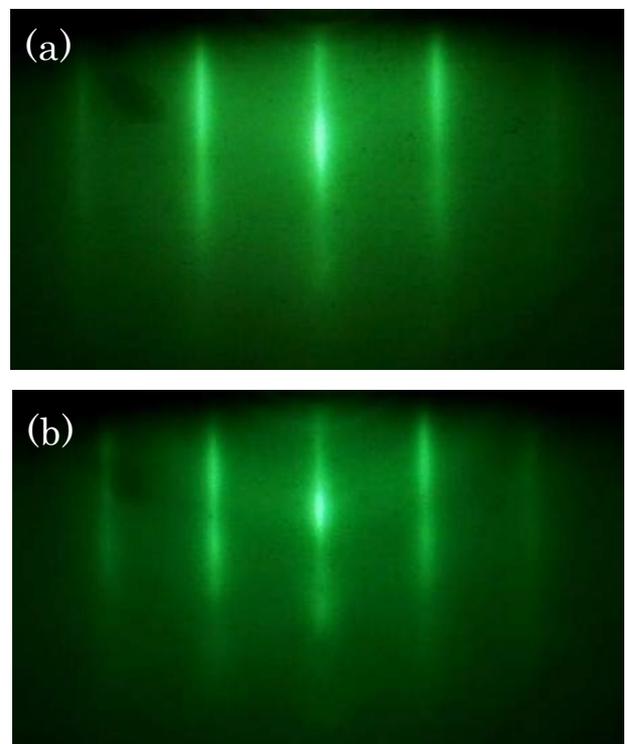


図 1 (a) Cu シリサイド及び(b)Au(111)の [11-2]入射の RHEED パターン

配列 GaN ナノコラムによる GaN/AlGaIn

2次元電子系へのポテンシャル変調

千葉大院理 A、上智大理工 B

宮地晴子 A、音賢一 A、中岡俊裕 B、石沢峻介 B、岸野克巳 B

本研究では GaN ナノコラムを二次元電子系 (2DEG) の上に成長し、その 2DEG の量子伝導を測定することで、周期的配列したナノコラムの電子状態に関する情報を得ることを目的としている。図 1 のように配列された GaN ナノコラムは、直下の 2DEG に対して静電的なポテンシャル変調を与えるほか、光照射による GaN ナノコラム中の電子励起・緩和の様子や、キャリアドープされたナノコラムでの帯電効果等の影響なども 2DEG の伝導度変化を通じて検知できるものと期待される。

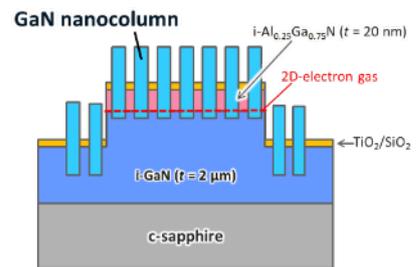


図 1 : GaN/AlGaIn 上に成長されたナノコラムの断面模式図

実験では GaN/AlGaIn ヘテロ接合 2DEG に周期的配列ナノホールを微細加工しテンプレートとして GaN ナノコラムを成長した。これをホールバー形状の試料に加工し、交流 4 端子法を用いて液体ヘリウム温度において 8 T までの磁気抵抗を測定した。様々な周期 (75 nm~200 nm) のナノコラム試料の他に、ナノホールのみの試料や無加工の 2DEG 試料についても測定を行った。

まずナノコラム試料において弱磁場領域では弱局在による磁気抵抗と AB 効果による抵抗振動が、強磁場では 2DEG のシュブニコフ・ドハース振動 (SdH 振動) が観測され、ナノコラムの成長後も 2DEG はダメージ等を受けていないといえる。またナノコラムの周期と電子のサイクロトロン半径の関係によって、図 2 の矢印のように特定の磁場で抵抗がピークをもつ整合性磁気抵抗振動も観測されていることから 2DEG が実際にナノコラムの作る周期ポテンシャルの影響を受けていることも確認された。

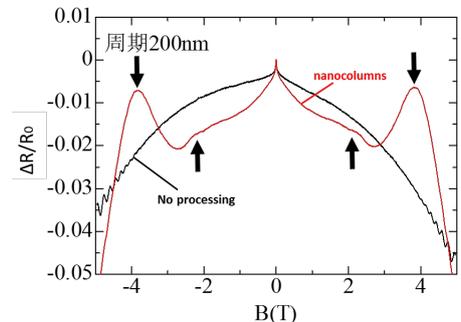


図 2 : 周期 200nm ナノコラムの 4.2K における磁気抵抗

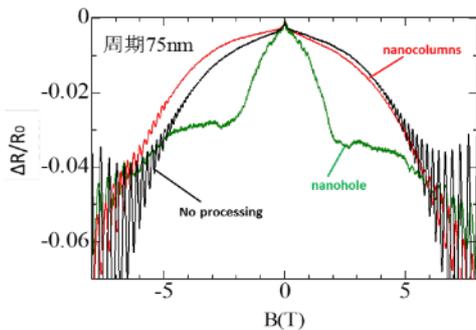


図 3 : 4.2K における磁気抵抗。周期 75nm ナノコラム (赤)、周期 75nm ナノホール (緑)、無加工 2DEG (黒)

図 3 には周期 75 nm のナノコラムと同周期のナノホール及び無加工の試料の結果を示す。弱磁場でのナノコラムとナノホール試料の結果からナノホールでは空乏化していた部分が、ナノコラムを成長することで回復していることが予想される。さらに、SdH 振動の解析から 2 種類の電子濃度の存在が示され、条件によってはナノコラム直下部分にも SdH 振動を生じる電子が存在しているものと考えられる。

SrTiO₃(001)上への FeSe 薄膜の成長と

in situ 電気伝導評価

東大理

武内康範, Wang Jianlin, 秋山了太, 長谷川修司

膜厚を薄くすることでバルクより高い超伝導転移温度を示す FeSe は、その新奇性から盛んに研究が行われており、これまでに単原子層の超伝導として最高の転移温度（～100K）が報告されている[1]。その高温超伝導の起源は、SrTiO₃ (STO) 基板からの電子ドーピングあるいは電子格子相互作用に由来すると考えられており[2]、実際 FeSe への電子ドーピングによって転移温度が変化するという実験報告もあるが[3]、未だ系統的知見は得られていない。

本研究では、MBE 法によって FeSe 薄膜を STO 基板の上に作製し、その後大気に晒すことなく超高真空中で独立駆動型 4 探針 STM 装置を用いて電気伝導測定を行うことによって輸送特性の評価を行った。

STO 表面を清浄化するために超高真空中でアニールを行った結果、図 1(a)のように表面の酸素欠陥に由来する表面超構造が確認できた。その後、高温での Se エッチングに続き Fe と Se を共蒸着することで、FeSe 薄膜を作製した。作製した FeSe 薄膜は RHEED によって単結晶となっていることを確認した（図 1(b)）。講演では電気伝導の結果も含めて議論を行う。

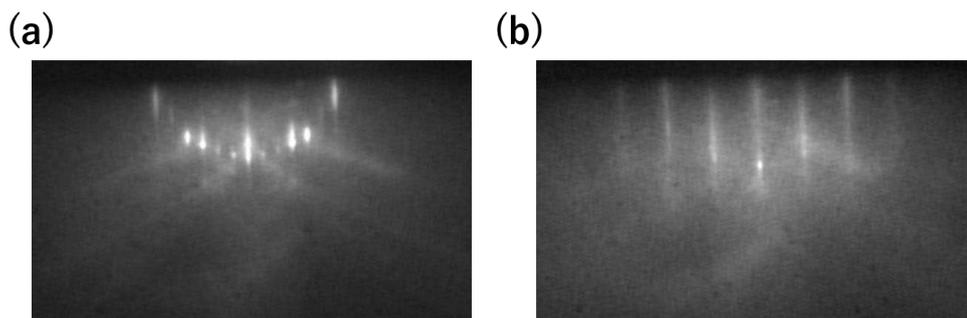


図 1. (a)表面処理後の SrTiO₃(001)、および(b) SrTiO₃ 基板の上に作製した FeSe 薄膜における [11-2] 入射の RHEED パターン。

[1] Jian-Feng Ge, *et. al.*, Nat. Mater. 14, 285-289 (2015).

[2] Huimin Zhang, *et. al.*, Nat. Commun. 8, 214 (2017).

[3] Giao N. Phan, *et. al.*, J. Phys. Soc. 86, 033706 (2017).

トポロジカル結晶絶縁体(Pb,Sn)Te 薄膜の作製および 強磁場下での電気伝導特性

筑波大数理物質、東大理^A

伊藤寛史, 石川諒, 大滝祐輔, 秋山了太^A, 黒田眞司

1. Introduction

トポロジカル結晶絶縁体(TCI)は結晶内部(バルク)は絶縁体でありながら、表面にギャップレスな金属的な状態が現われる物質である。Pb_xSn_{1-x}Te は角度分解光電子分光測定(ARPES)によってバンド構造から Pb 組成 x がおよそ 0.7 以下の範囲では TCI であることが確認されている[1]。デバイス応用を考える際、表面状態の電気伝導特性を知ることが必要になる。しかし、SnTe 結晶中には Sn 欠損の生成により高密度の正孔がドーピングされ、バルク内部の電気伝導が支配的になり表面状態由来の信号検出が困難になる。そこで、本研究では、Sn と同じ IV 族元素である Pb との混晶半導体を作製することによりカチオンサイト欠陥の割合を減らし、バルクキャリア密度を減少させることを目指した。さらに、ドナーとしての役割が期待される V 族元素である Sb のドーピングを行いバルクキャリアの低減を図った。強磁場下での電気伝導特性を評価することで、トポロジカル性を示す Pb 組成の範囲 $x \leq 0.7$ の試料においてトポロジカル表面状態由来の伝導特性を抽出することを試みた。

2. Experiments

試料作製には MBE 法を用いた。基板には、GaAs(111)A 上に ZnTe, CdTe を積層したものを使用した。分子線源として、SnTe, Pb, Te, PbTe, Sb を用い SnTe と PbTe (Pb+Te)の供給量比の調整により Pb/Sn 比を変化させ、薄膜(~60nm)、厚膜(0.5~1 μ m)と異なる膜厚の試料を作製した。さらに、Sb のドーピングには、Sb の flux 量を SnTe と PbTe の供給量に対する割合で変化させ供給した。作製した試料は 4K にてホール測定、磁気抵抗測定を行い、キャリア密度および移動度を求めた。

3. Results and Discussion

Fig.1 に Pb_xSn_{1-x}Te 混晶におけるキャリア密度の Pb 組成依存性を示す。ドーピングを施していない Pb_xSn_{1-x}Te では Pb 組成の増加に伴い正孔密度は減少した。さらに、Pb 組成 $x=0.5$ の試料においては、Sb のドーピングによりさらに一桁程度のバルクキャリアの低減に成功した。また、Fig.2 にこれらの試料の面直に磁場をかけた際の磁気抵抗を示す。磁気抵抗比は、Sb のドーピング量が増加すると減少した。これは、バルクキャリアが低減したことにより、零磁場での抵抗が増大したためであると考えられる。詳細は講演で議論したい。

[1] C. Yan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 186801 (2014)

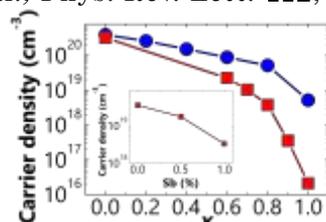


Fig. 1: Sb ドーピングを施していない Pb_xSn_{1-x}Te 混晶におけるキャリア密度の Pb 組成 x 依存性。内挿図は Pb 組成 $x=0.5$ で Sb ドープを施した厚膜のキャリア密度の Sb ドープ量依存性(4K)。●は PbTe の化合物を分子線源として成長した厚さ ~50nm、■は Pb と Te 別々の分子線源を用いて作製した厚さ 0.5~1.0 μ m の試料における結果を示す。

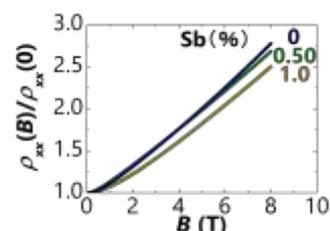


Fig. 2: Sb ドーピングを施した Pb_{0.5}Sn_{0.5}Te 膜(~0.5 μ m)における磁気抵抗比。

PbTe におけるディラックネスの評価

東大物性研、阪大院理^A、JST さきがけ^B、岩手大院工^C

徳永将史、秋葉和人、三宅厚志、酒井英明^{A, B}、片山敬介^A、
坂本拓也^A、花咲徳亮^A、鷹岡貞夫^A、中西良樹^C、吉澤正人^C、
上床美也

近年フェルミ面付近で線形分散を持つ伝導電子系の物理が盛んに調べられている。その代表格であるディラック電子系に対する磁気輸送特性が数多く報告されてきたが、実際にどのような振る舞いがディラック電子系の本質であるかは依然混沌とした状況が続いている。そのような中で早坂らは、ゼーマンエネルギーとサイクロトロンエネルギーの比が、理想的なディラック電子系への近さ（”ディラックネス”）の指標として使えることを提案した[1]。我々は”ディラックネス”を系統的に変化させたときの巨視的物性の変化を系統的に調べる舞台として $Pb_{1-x}Sn_xTe$ に注目し、その強磁場物性を研究している。その起点となる PbTe は高易動度の縮退型半導体である。我々は PbTe の単結晶試料に対して最高 55T までの磁場下で磁化、磁気抵抗、超音波の測定を行い、スピン分裂を伴う明瞭な量子振動を観測した（図 1）。観測された量子振動を詳細に解析することで、この物質におけるゼーマンエネルギーとサイクロトロンエネルギーの比が 0.52 であることを突き止めた。

[1] H. Hayasaka and Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 31LT01 (2016).

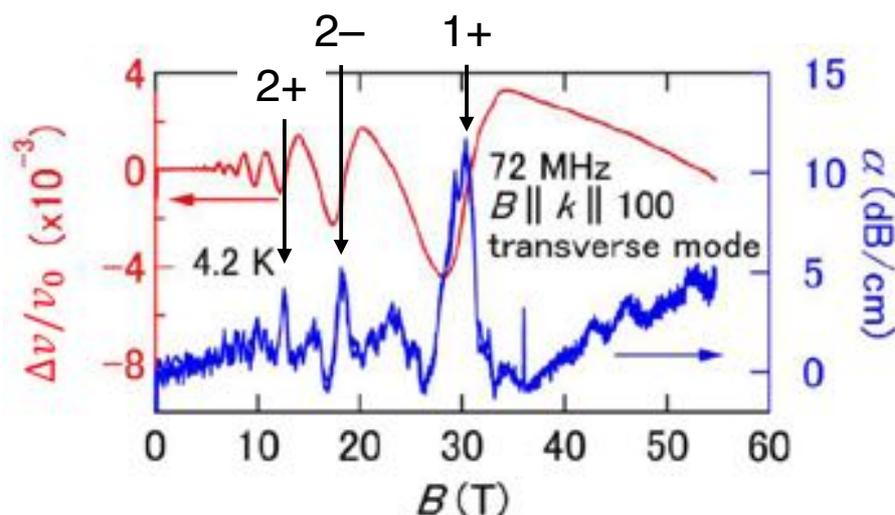


図 1 パルス磁場下における超音波実験で測定した PbTe の音速と超音波吸収係数の磁場変化。

半金属 NbAs₂ の純良単結晶の合成と強磁場下での

100 万倍を超える巨大な磁気抵抗効果の観測

阪大院理^A、阪大先端強磁場^B、JST-PRESTO^C

横井滉平^A、村川寛^A、駒田盛是^A、木田孝則^B、萩原政幸^B、酒井英明^{A,C}、
花咲徳亮^A、

近年、低温強磁場下において、1万倍を超える巨大な磁気抵抗比を示す二元系半金属が多数報告され、注目を集めている[1,2]。しかし、その値は、古くから報告されている単体半金属のものと比べると、二桁程度低いものである[3]。半金属の磁気抵抗効果では、キャリアの移動度が磁気抵抗比の上昇率に関係し、電子とホールとの補償性が高磁場極限での飽和値に関係する。二元系半金属のキャリア密度は比較的大きく、高い補償性の実現には有利であるが、単体半金属と比べると移動度ははるかに低く、磁気抵抗比を抑制する主な要因になっている。すなわち、二元系半金属の結晶性を改善することで、これまでより飛躍的に大きな磁気抵抗比の実現が期待できる。

そこで我々は、合成法に改良を加えることで、高純度の半金属 NbAs₂ 単結晶を合成し、磁気抵抗効果を向上させた。1.7 K, 40 T の低温強磁場下において、180 万倍にも及ぶ磁気抵抗比を観測した。これは従来の二元系半金属の値を大きく上回り、単体半金属に迫るものである。補償性と移動度について、Two-band model を用いて解析したところ、 $n_h/n_e = 0.999$ 、 $\mu_e = 720,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という非常に高い補償性と移動度を有していることが明らかになった。

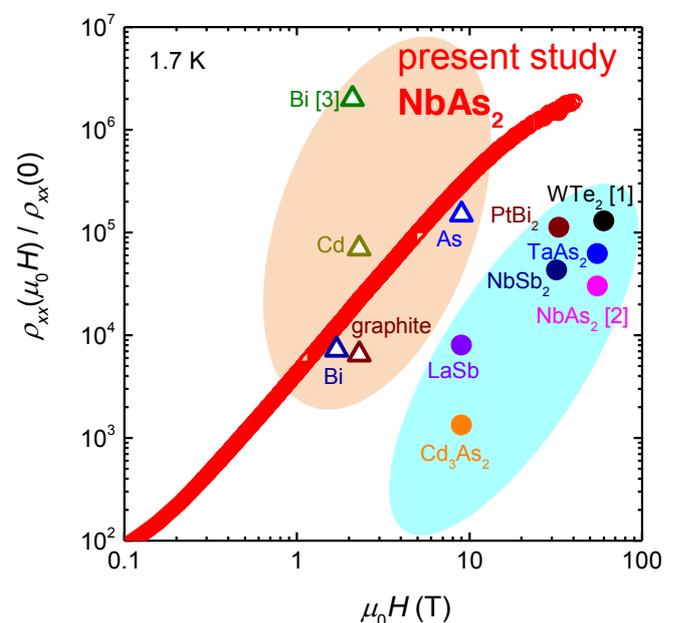


図. 様々な半金属の磁気抵抗比

[1] M. N. Ali *et al.*, Nature 514, 205(2014).

[2] Zhujun Yuan *et al.*, Phys. Rev. B 93, 184405 (2016).

[3] von W. J. de Haas *et al.*, Physica 2, 907 (1935).

カーボンナノポットの低温強磁場下電気伝導特性の特異なふるまい

熊大院先端科学、物材機構^A

横井裕之、原正大、今中康貴^A、竹端寛治^A

我々は最近、壺型のナノ構造を有する新規カーボンナノ物質（カーボンナノポットと命名）を開発した[1]。カーボンナノポットは図1に示すように層数が部位によって異なり、開口端と閉口端を有する多層カーボンナノチューブ様のユニットがファイバー状に連なった構造をしている。ケルビンカプローブ顕微鏡により、カーボンナノポットの表面電位は直径の大きな部位で数 mV 程度高くなることがわかった。ユニット間でグラフェン層は共有していないため、ファイバーに沿った電気伝導では、グラフェン層内伝導に加えて層間伝導も必ず起こることになる。我々は、このように独特な系においてどのような電気伝導現象が生じるか調べるため、15 T・1.6 K までの磁気抵抗を二端子法で測定した。その結果、図2に示すように 9 K と 19 K ではほぼ単調な負の磁気抵抗が観測された。この振る舞いは弱局在によるものと考えられる。さらに 1.6 K まで温度を下げると、負の磁気抵抗に加えてプラトー様の振動的な振る舞いが観測された。今後は四端子法による精密測定に取り組んで、このプラトー様振動の再現性や起源などを探る予定である。

[1] H. Yokoi, et al., J. Mater. Res., 31, 117 (2016).

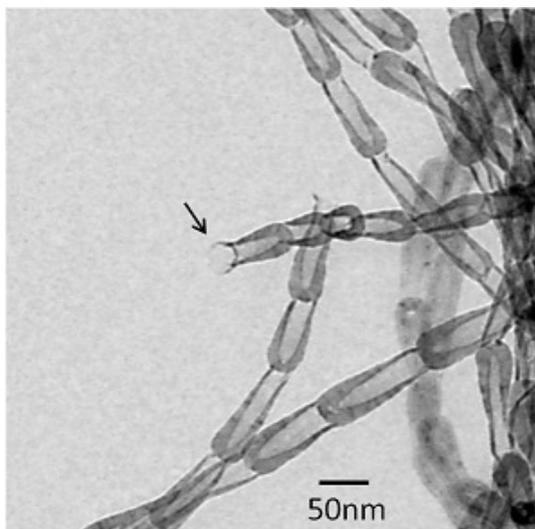


図1 カーボンナノポットの TEM 像

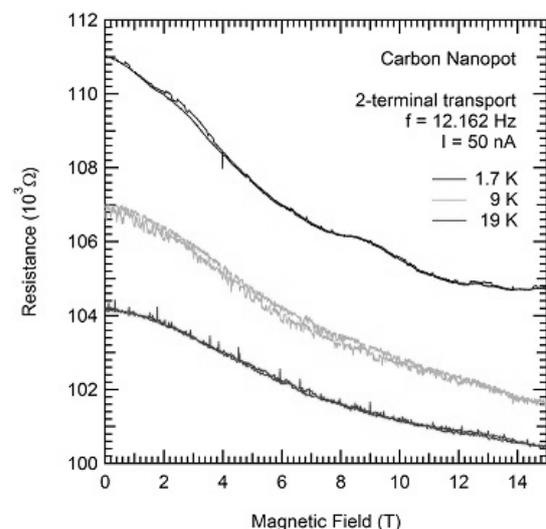


図2 カーボンナノポットの磁気抵抗

Cyclotron Resonance in GaN Quantum Hall Systems

NIMS, Hokkaido University^A

D. Kindole^{A*}, Y. Imanaka^A, K. Takehana, L. Sang, M. Sumiya

GaN based electronics have received much attention for the industrial applications, in particular for the fabrication of power electronic and optoelectronic devices.

We have studied cyclotron resonance (CR) and magneto-transport properties in order to determine the effective mass in AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas (2DEG) at high magnetic fields.

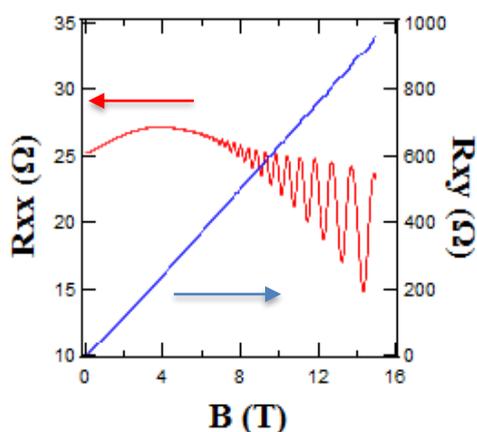


Fig 1: Magneto-resistance and Hall resistance $T=1.7$ K.

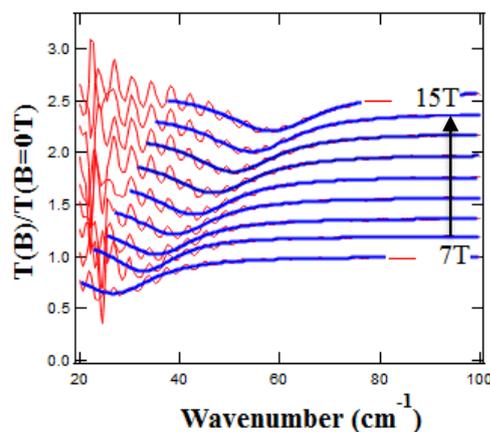


Fig 2: Magnetic field dependence of the CR spectra at $T=1.7$ K.

As shown in the figure 1, in the magneto-transport experiments, the Shubnikov de Haas oscillation is clearly observed at integer filling factors. In addition, quantum Hall plateau is also observed in the Hall resistance data at high magnetic fields, indicating that our sample grown by the metal organic vapor phase epitaxy have fairly high carrier mobility.

In the CR spectra, a single absorption peak is clearly observed for each magnetic field (fig.2). From the CR results, the effective mass (m^*) is estimated as $m^*=0.227m_0$ at low field region. The magnetic field dependence of the cyclotron energy is in good agreement with the polaron theory¹⁾ because of the large electron-phonon interaction in GaN.

Reference

- 1) Xiaoguang Wu and F.M. Peeters, Phys. Rev. B **55**, 23 (1997).

微細加工を用いた精密物性計測：

単結晶磁性体におけるスピホール効果測定を例に

東北大金研、理研^A、東大物性研^B、

木俣基、近藤浩太^A、大森康智^B、Muhammad Ikhlas^B、
富田崇弘^B、中辻知^B、大谷義近^{A,B}

本発表では集束イオンビーム(FIB)加工装置を用いた単結晶試料の微細加工手法とその測定例を報告する。

電気抵抗測定の高精度化は強磁場物性研究における重要課題の一つであり、近年の著しい進展に微細加工技術の応用がある。中でも FIB 加工装置は、バルク結晶から特定の部分を切り取り、任意形状の薄片形成が可能なことから材料や結晶軸の選択自由度が高く、様々な系に応用可能である。

現在パルス強磁場中の抵抗測定の下限は $1\ \Omega$ 程度と考えられ、機械研磨による加工では、抵抗率 $100\ \mu\Omega\text{cm}$ 以下の試料の測定は困難であると考えられる。一方微細加工技術を用いれば試料の電流断面積を $1\ \mu\text{m}^2$ 程度まで縮小することは容易であり[図 1]、抵抗率 $1\ \mu\Omega\text{cm}$ 程度の試料でも測定が可能になると期待される。また試料形状を正確なホールバー形状等に加工した精密ホール抵抗測定や、高電流密度に誘起されるスピホール効果や非線形伝導など新規物理現象測定に威力を発揮すると期待される。

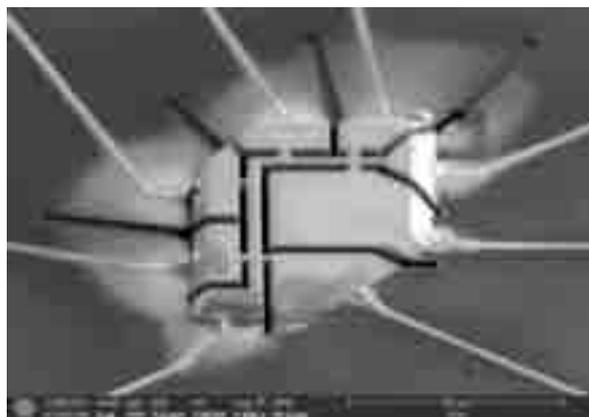


図 1: FIB 加工装置を用いた単結晶微細素子の例。試料形状の精密加工、多端子化が可能になる。

パルスマグネットを用いた近藤半導体 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$

($T = \text{Ru, Os}$) の圧力下磁気抵抗

東大物性研、富山県立大工^A、広大院先端^B、高知大理^C

近藤晃弘、金道浩一、谷田博司^A、世良正文^B、
川端丈^B、高畠敏郎^B、西岡孝^C

近藤半導体 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($T = \text{Ru, Os, Fe}$) は、 $T = \text{Ru}$ と Os において特異な反強磁性 (AFM) 秩序が出現する。特に、一般的な Ce 化合物と比べると転移温度が高温 ($T_0 \sim 30 \text{ K}$) であることや、磁化容易軸方向 (a 軸) とは異なる c 軸方向に磁気モーメントが配列すること、さらには近藤半導体であるにも関わらず磁気秩序が基底状態となる点などが大きな特徴である。これまでの研究から、異方的な c - f 混成や電荷ギャップ、スピンギャップの存在が AFM 秩序の形成に重要な役割を果たすことが明らかになっている。近年では、さらに知見を得るため元素置換系の体系的な研究や圧力下物性測定による研究が行われている。我々も $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ の特異な AFM 相の起源を明らかにすべく、パルス強磁場下での物性測定を置換系も含めて行ってきた。最近、我々は Ru を Fe で置換した系について強磁場磁化測定を行い ($B \parallel a$)、AFM 相から常磁性領域への臨界磁場 B_{c^p} が Fe 置換によって増大することを見出した[1]。興味深いことに、 B_{c^p} の Fe 濃度依存性はスピンギャップの Fe 濃度依存性とほぼ一致する[2]。この事実は、この系の AFM 秩序とスピンギャップ形成との間には何らかの関係があることを強く示唆している。

Fe 置換は主に c - f 混成の強度を強める効果があることから、圧力を加えることによっても B_{c^p} は顕著な増大を示すのではないかと考え、我々はパルス磁場と圧力を組み合わせた磁気抵抗測定システム (最大 55 T、2 GPa) を新たに立ち上げた。まず母物質である $T = \text{Ru}$ と Os に対して測定を行い、予想された通り B_{c^p} は加圧により高磁場側に大きくシフトすることがわかった。さらに多くの情報を得るため、 T サイトを置換した系の測定を現在進めている。今回の研究会では、母物質である $T = \text{Ru}$ と Os の結果に加え、主に電子ドーピング系 (Rh 、 Ir 置換) の結果を報告し、 B_{c^p} とスピンギャップとの関係を中心に議論する予定である。

[1] A. Kondo et. al., J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 023705 (2017).

[2] D. T. Adroja et. al., Phys. Rev. B **87**, 224415 (2013).

高周波透過法による $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の磁場誘起 絶縁体金属転移の探索

東大物性研、東工大元素セ^A

三田航平、山浦淳一^A、廣井善二、松田康弘

パイロクロア格子をもつ $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ は $T_{\text{mag}} = 227 \text{ K}$ で all-in/all-out 型の反強磁性秩序が起こることが知られている。その際に金属絶縁体転移が同時に起こるが、反強磁性秩序との関連及びその機構は未解明である [1]。

本研究は、 $\text{Cd}_2\text{Os}_2\text{O}_7$ の金属絶縁体転移と反強磁性秩序との関連の解明を目的としている。実験では、金属絶縁体転移温度 $T_{\text{MI}} = 227 \text{ K}$ 以下の絶縁体状態において 100 T 以上の強磁場を用いて反強磁性秩序を抑制し、電気抵抗の磁場依存性から絶縁体-金属転移の有無を調べる。磁場発生には一巻きコイル法（コイルの破壊を伴うパルス磁場発生手法の 1 つ）、電気抵抗の測定には高周波透過法を用いた。この手法は、図 1 に示すように 2 つのソレノイドコイルの間に試料を配置することで、試料の透過率から電気抵抗を非接触で求めるというものである。破壊型パルスマグネットにおいては、 dB/dt に起因するノイズの周波数が 1MHz 程度まで分布するため、高周波による電気抵抗測定が有効であると考えられる。

発表では測定系構築の現状と予備的な実験の結果について報告する予定である。

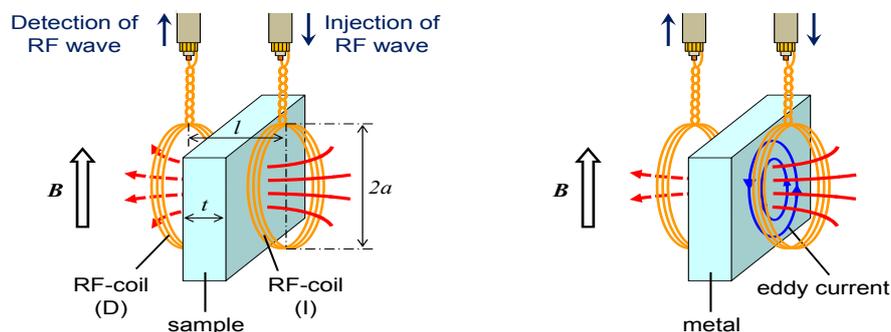


図 1. 高周波透過法による電気抵抗測定模式図

[1] Z. Hiroi, J. Yamaura, T. Hirose, I. Nagashima, and Y. Okamoto, APL Materials **3**, 041501 (2015)

パルス及び定常強磁場を用いた

巨大磁気熱量効果の研究

東北大金研、東大物性研^A、東北大工^B、仙台高専^C、
山形大^D、東北学院大^E

木原工，三宅厚志^A，徳永将史^A，許晶^B，伊東航^C，
貝沼亮介^B，安達義也^D，鹿又武^E

Gd₅(Si₂Ge₂)における巨大磁気熱量効果(GMCE)の発見以降[1]、室温領域で動作する磁気冷凍材料の開発が世界中で盛んに行われている[1-3]。Ni-Mn基ホイスラー合金は、高価な希土類元素を含まない組成でありながら、室温付近で構造相転移(マルテンサイト変態)する際に巨大なエントロピー変化[巨大磁気熱量効果(GMCE)]を示すことから、レアアースフリーの磁気冷凍材料候補として興味を持たれている[3]。この系では、1次相転移に伴い電子系、格子系、磁気系等の複数の自由度が同時に変化することで全体として巨大なエントロピー変化が得られると理解されている。しかし、各自由度のエントロピーがどのようにGMCEに寄与しているか、またその組成依存性については未解明なままである。

我々は、パルス強磁場の速い磁場挿引を利用して、ホイスラー合金Ni₄₅Co₅Mn_{36.7}In_{13.3}の磁気熱量効果を断熱磁化(消磁)過程における試料温度変化として直接測定し、磁化や比熱などのデータと組み合わせることで、転移に伴う電子系、格子系、磁気系のエントロピー変化をそれぞれ見積もった。そこから、格子系の巨大なエントロピー変化がこの系のGMCEにおいて重要な役割を果たしていることを明らかにした[4]。今回、関連物質であるNi₄₁Co₉Mn_{31.5}Ga_{18.5}のパルス強磁場下磁気熱量効果測定を行ったところ、NiCoMnInとは異なる磁場依存性が得られた。講演ではパルス強磁場下の磁化測定、イメージング観察、定常強磁場中の比熱測定などの結果と合わせてNi-Mn基本ホイスラー合金のGMCEの発現機構とその磁場依存性について報告する。

- [1] V. K. Pecharsky et al., Phys. Rev. Lett. 78 4494(1997).
- [2] E. Bruck, J. Phys. D: Appl. Phys. 38 R381(2005).
- [3] A. Planes, J. Phys.: Condens. Matter 21 233201(2009).
- [4] T. Kihara et al., Phys. Rev. B, 90 214409(2014).

100 T 磁場における絶縁体金属転移観測

のための電気抵抗測定技術の開発

東大物性研、東北大金研^A

都築崇, 松田康弘, 小濱芳允, 金道浩一, 井口敏^A, 佐々木孝彦^A

絶縁体金属転移(IMT)がその一例であるが、多くの物理的特性は強磁場の印加によって著しく変化する。中でもスピンと伝導電子の結合を起源とする磁場誘起 IMT は興味深い課題である。しかしながら 100T を超える破壊型パルス磁場下での電気抵抗測定は非常に困難であり、その技術は十分確立されていない。本研究では、破壊型パルス磁場中での 4 端子法を用いた技術開発を試みた。

この研究では 2 通りの実験を行った。はじめに予備測定として非破壊型のパルス磁石を用いて 50 T までの磁場において 85 K から 150 K の温度領域で電気抵抗測定を行った。磁場の発生時間は約 36 ms であり、最大磁場は 50 T である。次に約 100 K でパルス磁場下において 87 T までの電気抵抗測定を行った。磁場の発生には一巻きコイル(STC)法を用いた。コイルはマクスウェル応力によって毎回壊れるが試料は損傷しないため繰り返し測定が可能である。STC 法では磁場持続時間が 7 μs 程度と短いために測定回路系の応答速度が速いことが必要である。絶縁体相では高抵抗になり、通常の方法では回路の応答速度が遅くなるため、200 MHz の応答速度を有するパルストランスで結合し、高速の測定を可能にした。抵抗値は試料にかかる電圧と、電流を算出するためのシャント抵抗にかかる電圧の比から算出した。どちらの実験も試料は α -(BEDT-TTF)₂RbCo(SCN)₄[1]を使用した。

非破壊型パルス磁石を用いた 50 T までの抵抗の磁場依存性では、転移温度の 100 K 近傍において如実な負の磁気抵抗を観測した。それぞれのグラフを磁場の 2 乗でフィッティングしたところ、150 T で元の金属状態へ戻る可能性が示唆された。図 1 に STC 法における 3 kV でのテスト充放電の結果を示す。図中の電圧は抵抗値が 7 Ω であることを示唆しており、これは妥当な値である。ただし、テスト充放電でさえ放電スイッチから出るノイズが大きいため、精度の高い実験には信号の絶対値を 100 倍程度大きくする必要がある。また、87 T を発生させた破壊型実験では端子が外れるトラブルも起こった。現在、端子づけも含めて新たに工夫した測定系を構築中である。

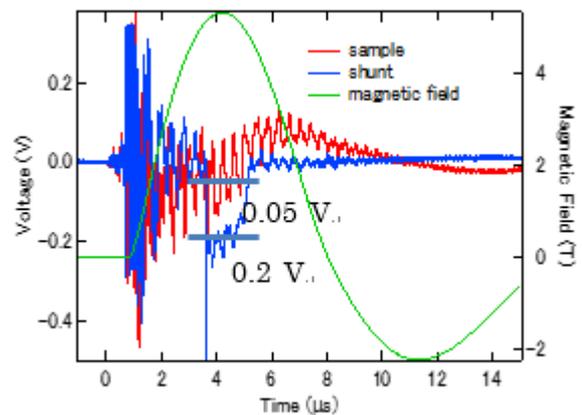


図 1: 3 kV テスト充放電におけるサンプル電圧(赤線)、シャント抵抗電圧(青線)、磁場(緑線)の時間依存性

[1] 井口敏 他, 日本物理学会第 71 回春季大会 19pAR-1

100 T 磁場中の磁化測定手法の改良の試み

東大物性研^A

周旭光^A, 松田康弘^A, 池田暁彦^A

パルス強磁場下で、最も一般的な磁化測定方法はピックアップコイルを用いる方法である。コイルの巻数が多いほど信号が強くなるが、100 T 超を発生可能な破壊型の一巻きコイル法に適用させる場合、単層的なピックアップコイルでは2つの問題から巻数の上限がある。(I)1つの問題はサイズである。一巻きコイルの直径および長さはともに10 mm程度であるため、磁場の不均一性を大きくしないためにピックアップコイルの長さは1~2 mm程度に押さえる必要がある。現在、標準的に用いているピックアップコイルは60 μm の直径の線材で20回巻いており、被覆の厚さがあるため、約1.4 mmの長さがある。サイズを抑えて巻き数を増やすためには、より細かい線材を用いることも選択肢の1つであるが、強度の観点から必ずしも有効ではない。(II)2つめの問題は誘導起電力であり、現在の並列型のピックアップコイルでは、となりに置いた同型のコイルによってパルス磁場によるバックグラウンドの誘導起電力を差し引く(補償する)。しかし、それぞれのコイル単独には、正負の誘導起電力が誘起されるため、局所的には1000 V程度の起電力が生じる。巻き数の増加によってこの起電力が大きくなるため、絶縁破壊の危険性が増える。これまで、標準型ピックアップコイルでは30回巻きまで実績があるが、それ以上の巻き数は試したことがない。

今回、多層にすれば、長さ方向はそのまま巻き数を増やせ、また、層毎に起電力を補償することで、絶縁破壊も抑えられるとの発想に至った。従って、上記(I)、(II)の問題を同時に解決する。ただし、ピックアップコイルの作製過程が複雑になるため、精巧なコイルをつくるには工夫が必要である。我々は、まずはじめに二層のピックアップコイルを作製した。巻数を従来の2.2倍に相等する44*2巻きピックアップコイルを実現した。ピックアップコイルの試験のための予備実験から、十分実際の測定に使用可能であることを確かめ、現在は、低温実験のための試料プローブにピックアップコイルを組み込むための作業を行っている。発表では、予備実験の結果やピックアップコイル及びプローブ製作の現状について報告する予定である。

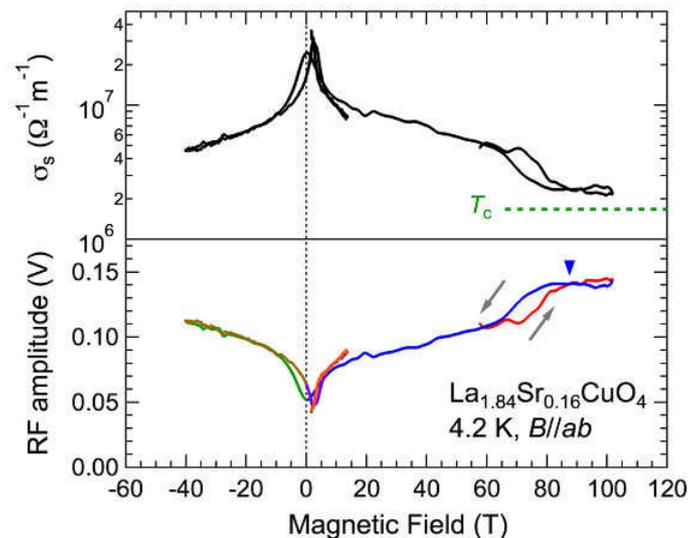
破壊型マグネット領域での高周波電気伝導度測定

東大物性研、Mu'tah University^A

中村大輔, M. M. Altarawneh^A, 嶽山正二郎

100 テスラを超える超強磁場領域での電気伝導度測定は、試料に生じる eddy 電流や、マグネットコイルに大電流を流すときに生じる電磁ノイズによって困難であるとされており、いまだ超強磁場領域の物性研究は数少ない。我々は、特に電磁濃縮装置を用いた極低温物性測定への適用をめざし、LCR 自己共振コイルを用いた、高周波電気伝導度測定系を構築した[1]。自己共振コイルの上に試料を置くと、試料の電気伝導度を反映して自己共振コイルの透過パワースペクトルが変化する。これを高周波信号の振幅の変化として検出した。

講演では、高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を用いた上部臨界磁場測定の結果を報告する。有限要素法による自己共振コイルの電磁界解析の結果と実験で得られた共振スペクトルとの比較から、自己共振コイルから戻ってきた高周波信号の振幅(図、下パネル)と試料の電気伝導度(図、上パネル)への変換が可能になった。また、物性研強磁場施設でのこれまでの電気伝導度測定系との比較を行う。



[1] D. Nakamura, M. M. Altarawneh, and S. Takeyama, arXiv:1408.3905.

パルス強磁場下における NiCrAl-DAC の

渦電流による発熱量の評価

阪大理、阪大強磁場^A、東大物性研^A

田原大夢, 木田孝則^A, 小濱芳允^B, 三宅厚志^B, 徳永将史^B, 金道浩一^B,
萩原政幸^A

我々は非破壊型パルスマグネットおよび NiCrAl 合金製ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた強磁場(~ 40 T) - 高圧力下(~ 10 GPa)での輸送現象測定装置の開発を行っている[1]。これまでに、パルス磁場中では DAC の金属部品を流れる渦電流によってジュール発熱がおき、磁場掃引中の温度が一定とならない問題があった。そこで、この発熱を抑制するために従来使用されてきた DAC(18×18×56 mm³)と比べて小型の NiCrAl 製 DAC(18×18×30 mm³)を制作し、パルス磁場中での試料空間の温度変化を調べた。温度計には熱容量および磁気抵抗の小さい炭素インクを用いた。ヘリウムガス雰囲気中(図 1 青線)ではパルス磁場中で 5.2 K から 7.2 K 程度までの発熱が確認されたのに対して、液体ヘリウムじゃぼづけ(図 2 赤線)では有意な発熱は確認できなかった。講演では開発の現状を報告し、開発した小型の DAC を用いた物性測定の例を示す。

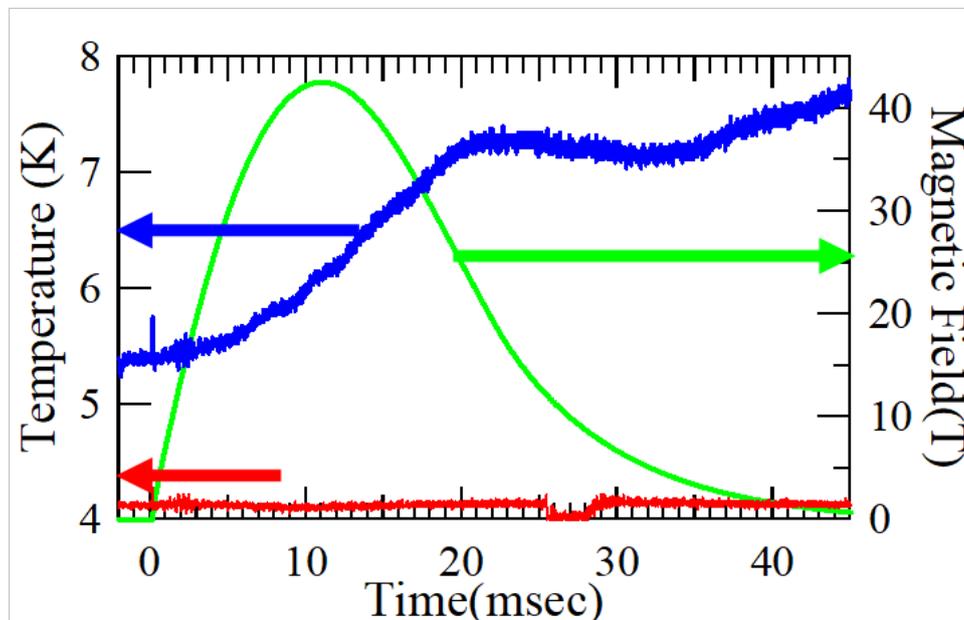


図 1:パルス磁場中での試料空間の温度の変化

参考文献

[1] M. Hagiwara *et al.*, J. Low Temp. Phys. **170** 531 (2013).

パルス強磁場下での低周波交流測定の開

東大物性研

三田村裕幸

パルス磁場中での交流物性測定では短時間での積算が重要であり、1変調周期の情報で復調ができる数値位相検波法は極めて強力な方法である。しかし積算振動回数の短縮とトレードオフの関係で位相検波の長所と言われるノイズ除去性能は極端に悪くなる(図1参照)。従って数値法でかつ積算振動回数が少ない場合にはノイズ除去の方法を別途考えなくてはならない。ノイズの原因は一般に様々であるが、パルス磁場中の有線測定では特定の周波数に局在している場合が少なくない。そこで変調周波数とは独立の任意の周波数成分をピンポイントに且つ限られた時間範囲のデータを使って除去する方法を新たに考案し国際特許出願した。

これは積算振動回数の違いによって通過利得の特性が異なることを利用し、複数の積算振動回数(例えば1周期と2周期)による検波結果の線形結合をとることで通過利得の零点を自在に移動させるものである。特許庁の見解書(予備審査に相当)では、該当する先行出願が確認されておらず、「新規性」、「進歩性」、「産業上の利用可能性」が全て「有り」と評価されている。講演ではこの手法を説明しこれを用いたパルス磁場中の輸送現象や磁歪の測定などの最近の結果を報告する。

この方法では、複数の変調周波数成分を分離するのに従来の直交周波数多重分割法(OFDM法/数値位相検波法)より短い時間で検波を完了することが可能であると理論上示されている。OFDM法は携帯電話や地上波デジタル放送、BS放送、無線LANなどのいわゆるブロードバンド通信で多岐にわたり利用されているが、出願された方法が実用化されたならば現在よりも格段に多くの情報を限られたチャンネルの中で送ることができるようになると考えられる。

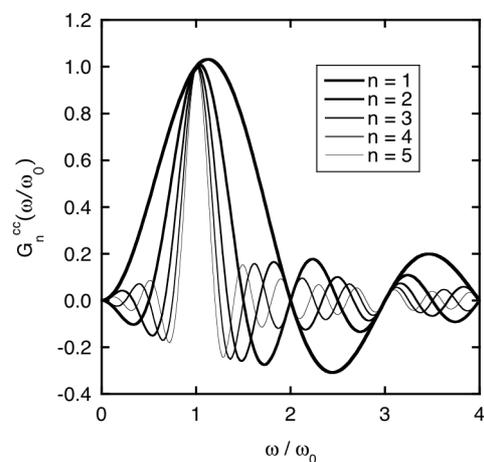


図1 数値位相検波における積算周期(n)ごとの実部通過利得。nによって通過利得は大きく異なりnが小さいほどノイズ除去性能は悪くなる。

BaHfO₃ ナノ粒子を添加した TFA-MOD-(Y, Gd)Ba₂Cu₃O_x 線材の磁束ピンニング特性 東北大金研、産総研^A

岡田達典, 今井悠斗, 淡路智, 中岡晃一^A, 町敬人^A, 和泉輝郎^A

トリフルオロ酢酸を主な溶媒として用いた金属有機化合物堆積 (TFA-MOD) 法は、 $REBa_2Cu_3O_x$ ($REBCO$ 、 RE :希土類) 線材の低コスト作製法として注目されている。これまでに $BaMO_3$ ナノ粒子 (M :金属) 添加によるピン止め中心の導入が精力的に研究され、ナノ粒子種・密度の変更や中間熱処理の導入による臨界電流密度 J_c の向上が報告されてきた[1]。ごく最近では、1回の溶液塗布膜厚を従来よりも薄くすることでナノ粒子を微小化・高密度化する手法が試みられ、 J_c 特性の更なる向上が報告された[2]。

これらナノ粒子添加 TFA-MOD- $REBCO$ 線材の J_c 特性は、液体窒素を中心とした高温・低磁場領域における幾つかの報告はあるものの、低温・強磁場下における報告は殆どなく、これら条件下における高密度・微小ナノ粒子のピン止め特性は明らかになっていない。本研究では、最近合成が進められる微小 BaHfO₃ ナノ粒子 (直径 10 nm 程度) を添加した TFA-MOD- $REBCO$ コート線材に着目し、広範な温度・磁場条件下での J_c 特性測定を行なった。

測定に用いた TFA-MOD-(Y, Gd)BCO コート線材は、約 30 nm (新手法[2]) と約 170 nm (従来手法) の 1 回塗布膜厚で成膜されたものを用いた。東北大金研強磁場センター所有の 25 T 無冷媒超伝導マグネット[3]等を用い、0 T-24 T、4.2 K-90 K の広い温度・磁場条件下にて J_c の温度・磁場・角度依存性を四端子法 ($E_c = 1 \mu Vcm$) にて測定した。

当日は、上記の測定結果について詳しく報告したい。

[1]M. Miura *et al.*, APEX 2 (2009) 023002., T. Izumi *et al.*, Physics C 463 (2007) 510. 等

[2]K. Nakaoka *et al.*, SuST 30 (2017) 055008. 等

[3]S. Awaji *et al.*, SuST 30 (2017) 065001.

高温超伝導コイルを利用した NMR マグネットの小型化

物材機構, JASTECA^A, 理研^B, JEOL RESONANCE^C

松本真治, 濱田衛^A, 齊藤一功^A, 柳澤吉紀^B, 朴任中^B, 前田秀明^B, 末松浩人^C

科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ) 研究課題名「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」において, 高温超伝導 (HTS) 材料を, 超伝導マグネットおよび NMR プローブに応用した, 次世代高温超伝導 NMR システム開発を行っている[1]. 本研究課題では, HTS コイルを利用することで, 従来の低温超伝導(LTS:Nb-Ti, Nb₃Sn) NMR マグネットに比べ, マグネットを小型化することを目的としている. また, HTS 材料より製作した NMR 検出コイルを組込んだ, HTS-NMR 低温プローブを開発し, 測定感度の向上も目指している. LTS/HTS マグネットと HTS-NMR 低温プローブを組み合わせた NMR システムを開発し, マグネットの小型化と測定感度向上の両立を図ることで, 研究・開発現場での, 強磁場 NMR システムの導入が加速されると期待されている.

現在, 600 MHz 級 LTS マグネットと同等のサイズの, 800 MHz 級 LTS/HTS マグネットを製作中である[2].

謝辞

本研究は, 科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ) の支援によって行われた.

参考文献

[1] 末松浩人, 田中良二, 高橋雅人, 前田秀明, 大嶋重利, 柳澤吉紀, 中込秀樹, 濱田衛, 松本真治, 木吉司: 「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」, 低温工学, Vol.48, No.1 p.31 (2)

[2] 「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」テーマ中間評価用資料,

http://www.jst.go.jp/s-innova/research/hyoka/theme_midterm_2016/theme_midtermH28.html

強磁場グリーンマグネット開発

物材機構、木戸義勇、今中康貴

物材機構のハイブリッドマグネットはその前身である科学技術庁金属材料技術研究所の強磁場ステーションに40Tの磁場を定常的に発生することを目的に設置され、1994年度には基本部分が完成した¹⁾。その構造は15Tの超伝導マグネット(400mm)の内側に定格25T(30mm)の水冷マグネットを組み合わせたものであり、最大磁場発生時にはコイル部分で15MW(430V×35kA)を消費する。水冷コイルは入口温度10℃以下の純水で冷却され、磁場発生に伴って昇温した純水はジュール熱をターボ冷凍機(6MW)によって連続的に除去する。その為、水冷マグネットの運転だけで21MWの必要となる。このほか超伝導マグネットの冷凍機、室内空調、照明と鉄損を加えると1MWは必要となる。物材機構に転換後、固体高分解能NMRなどの精密実験のためFETドロッパーを導入²⁾すると共に超伝導マグネットの冷却システム、水冷マグネットの冷却システム、運転監視システムを更新した³⁾。

一方、2001年の独法化以降、強磁場の運営費は年20%ずつ減額され、水冷マグネットの運転は不可能になりつつある。そこで、太陽電池と蓄電池などの利用で電力を購入することなく、どの程度の掃引時間で強磁場発生ができるかを検討した。その結果、強磁場グリーンマグネットともいえる装置が十分可能であることが分かった。そこで、検討した事項は以下の通りである。

- 太陽電池: 設置費用が低廉な平坦な空き地での発電量。
- 蓄電池: Liイオン電池の開発状況と利用上の問題点。
- 太陽光冷凍機: 集光機と吸着式冷凍機による冷凍能力。
- 電流掃引法の試験: 小規模の蓄電池を用いて電流掃引を行うPWM回路による実証試験

その結果、2分程度のパルス運転であれば1日20~40回程度は磁場発生でき、十分実用性のあることが分かった。

1) 木吉、浅野、井上、前田、和田: 応用物理 64 (1995) 364-367

2) G Kido et al.: J. Phys: Conference Series 51 (2006) 580-582

3) S. Nimori and G. Kido: J Low Temp Phys (2010) 159: 358-365

先端強磁場科学研究センターの施設紹介と

装置開発の現状

阪大強磁場

萩原政幸，鳴海康雄，木田孝則，赤木暢

先端強磁場科学研究センターの第一実験施設には、パルス磁場発生用のコンデンサ電源としては国内最大の蓄積エネルギーを誇る10MJ大型コンデンサ電源装置が設置されている。この電源は10個のユニットに分割して利用可能で、例えばそのうち4ユニットを用いることで、強相関電子系物質の磁化や輸送特性の測定に適した、最大55テスラと約35ミリ秒のパルス幅を持つ磁場（ミッドパルス）を発生する。また、絶縁体の磁化測定には、より小さなインダクタンスのコイルと2ユニットの組み合わせによる磁場（ショートパルス）も利用可能となっている。現在、図1で示すような、より長時間化を目指したロングパルス磁場の計画が進行中で、それに向けた実験環境の整備と、東大物性研と共同による大型コイルの開発が進められている。更に、時間軸の拡大だけでなく、磁場発生空間の拡大にも大型コンデンサ電源は重要な役割を担っている。この空間には金属製ダイヤモンドアンビル型高圧セルを挿入することが可能で、渦電流による発熱の悪影響を大きく抑えた、従来に無い高品質な強磁場-高圧複合極限環境が実現する。

本センターの第二実験施設では、1.5MJのコンデンサ電源を用いて電子スピン共鳴(ESR)測定が行われている。6テラヘルツの周波数帯をカバーする遠赤外レーザーとパルス強磁場の組み合わせは、世界に類を見ないESR測定の観測窓となっている。現在、光源の偏光制御の整備が進められており、電気磁気効果を示す磁性体の物性解明に威力を発揮すると期待されている。

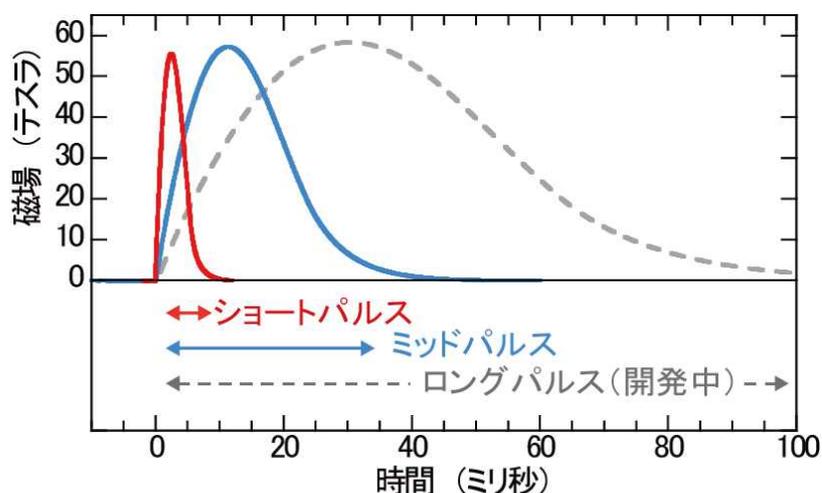


図1 阪大強磁場で利用可能な磁場の時間プロファイル

分子フォトサイエンス研究センターの

多重極限 THz ESR の開発と共同利用

神戸大分子フォトセ、神戸大院理^A、神戸大研基セ^B、神戸大先端融合^C

太田仁、大久保晋、大道英二^A、櫻井敬博^B、高橋英幸^C

【多重極限テラヘルツ ESR】我々は、これまでパルス強磁場を用いた強磁場テラヘルツ ESR を開発し、主に量子スピン系の研究に応用してきた。強磁場テラヘルツ ESR は、高いスペクトル分解能、線幅が広い共鳴の観測、ゼロ磁場分裂をこえた ESR 励起の観測、磁気相転移をこえた磁気相における ESR の観測など多くの利点[1]を持つ。近年、我々はそれに高圧[2]や、マイクロ計測[3]を組み合わせた多重極限テラヘルツ ESR 装置に発展させている。特に、高圧はハイブリッド圧力セルの採用で 2.5GPa を達成し[4]、マイクロカンチレバー ESR は 2015 年に 1.1 THz までの測定に成功し、文字通り世界初のマイクロカンチレバー「テラヘルツ」ESR が達成された[5]。最近、メンブレンセンサーを用いたマイクロ磁気測定[6]と ESR 測定にも成功した。そこで、多重極限テラヘルツ ESR 開発の現状について報告したい。

【共同利用の開始】分子フォトサイエンス研究センターは、2017年5月より福井大学遠赤外領域開発研究センターと連携し、テラヘルツ分子科学に関する共同利用・共同研究拠点としての活動の一層の充実を目指し、全国レベルでの共同利用・共同研究課題の公募を開始した[7]。特に、高圧下テラヘルツ ESR はユニークな装置なので共同利用の希望が多い。

[1] H. Ohta *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*: 72, Suppl. B pp. 26-35, 2003

[2] T. Sakurai *et al.*, *J. Mag. Res.*, 280, pp.3-9 2017 (Invited Review)

[3] E. Ohmichi *et. al.*, *J. Inorganic Biochemistry* 162, pp.190-193, 2016 (Invite paper)

[4] T. Sakurai *et al.*, *J. Mag. Res.* 259, pp.108–113, 2015

[5] H. Takahashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 107, 182405, 2015

[6] H. Takahashi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 063002/pp.1-4, 2017 (Editor's Choice)

[7] <http://www.research.kobe-u.ac.jp/mprc/joint/index.html>

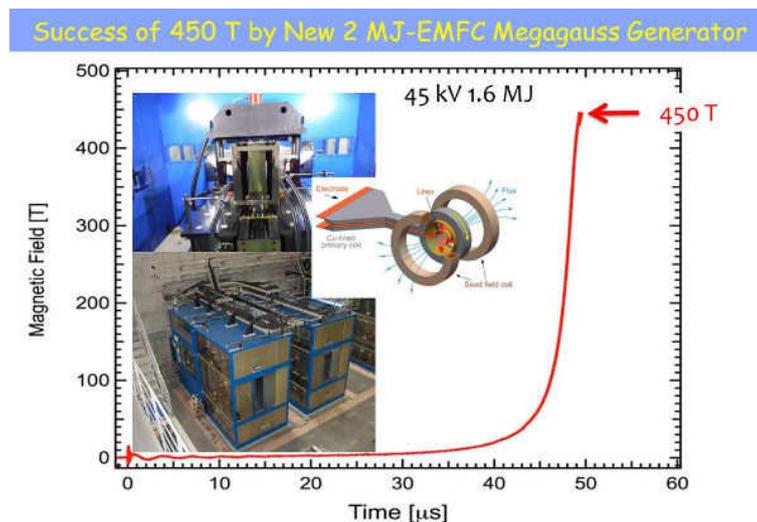
物性研新型 2MJ 電磁濃縮超強磁場発生装置開発の現状

東大物性研

中村大輔, 池田暁彦, 澤部博信, 松田康弘, 嶽山正二郎

物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設では、5MJ 超高速コンデンサ蓄積エネルギーを用いた電磁濃縮法による超強磁場発生技術開発とこれを用いた超強磁場極限物性研究の展開を行ってきた。1999年に更新されたニチコン社製電源と超強磁場発生装置を用いて 730 T の室内世界最高の超強磁場発生記録を達成し[1]、600 T に至る極限環境下での物性研究を推進してきた。その後、物性研究に供することのできる磁場を 1000 T 級に引き上げることを目指して、2010 年度の文科省最先端研究基盤事業により 1000 T 超強磁場発生装置の建設を開始した。その概要は 2MJ, 50kV 主電源と超強磁場発生装置、2 MJ, 20 kV 種磁場発生用副電源と 1000 T の発生のための 5MJ, 50 kV 主電源からなる。超高速電源は米国 L3 アプライド・テクノロジー社から調達、超強磁場発生装置は独自に開発した。

この度、2MJ 主電源とこれを用いた電磁濃縮超強磁場発生装置(下図)が完成に至ったので、開発の経緯と現状、および物性測定への応用例を報告する。



図：2MJ 電磁濃縮超強磁場発生装置と磁場波形

[1] S. Takeyama and E. Kojima, J. Phys. D 44, 425003 (2011).

ラインノードディラック半金属候補物質 CaAgAs の

強磁場量子振動

物材機構、名大院工^A、名大高等研究院^B、NHMFL^C

廣瀬陽代, 寺嶋太一, 松下能孝, 和田泰地^A, 岡本佳比古^{A,B},
David Graf^C, 宇治進也

トポロジカルラインノード半金属 (TLNS) は、結晶の対称性によってラインノード状に縮退したバンドをバルクの電子状態にもつ物質である。これまでに WSiS ($W = \text{Hf}, \text{Zr}$)[1-4]、PbTaSe₂[5]、InBi[6]、CaAgAs[7-10]などが第一原理計算と ARPES の測定から TLNS として報告されている。この中でも CaAgAs は、フェルミ準位 (E_F) にラインノード以外のバンドが存在しない点で、TLNS のモデル物質として特に注目されている。しかし、CaAgAs で測定された ARPES の結果[8-10]は、結晶の特性のために不鮮明であり、より高い精度で電子状態を観測することが望まれている。そこで、強磁場で量子振動を測定し、フェルミ面の形状を高い精度で決定することを目指した。

CaAgAs の結晶において ac 面内の様々な磁場角度で磁気トルクの磁場依存性を測定した。図 1 は、磁気トルクに現れた量子振動成分の FFT スペクトルを、磁場方位 (右軸) に対して示している。量子振動の振動数 F は、フェルミ面の磁場に垂直な極値断面積に比例する。そのため、FFT スペクトルのピーク位置 (F) の磁場方位依存性は、フェルミ面の形状の特徴を反映している。図 1 に破線で重ねたのは、WIEN2k[11]と SKEAF[12]を用いて、ラインノード状のフェルミ面から期待される F を $E_F = -0.16$ eV (赤), -0.53 eV (青) において算出したものである。

100-150 T および 250-350 T にみられる a 軸に対して対称な F は、 $E_F = -0.16$ eV の計算結果と非常によく一致する。このことは、CaAgAs において TLNS 状態が実現していることを強く示している。一方で、これ以外にも、 $E_F = -0.53$ eV の F を含む多数の F が観測されている。これらは、欠損によるキャリア濃度の高い領域や、ツインが結晶に内包されているものと考えられる。

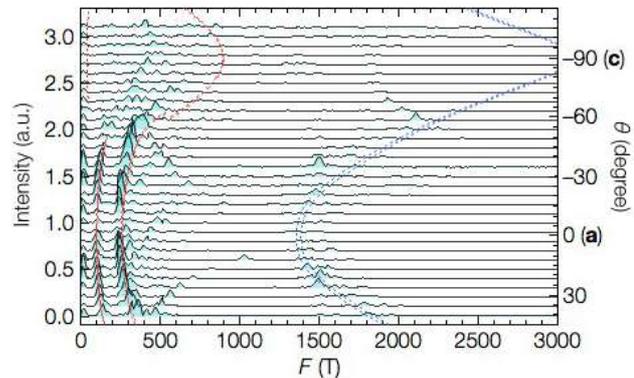


図 1 CaAgAs の磁気トルクに生じた量子振動成分の FFT スペクトル。磁場角度 (右軸) に対してシフトして示している。破線は $E_F = -0.16$ eV (赤) と -0.53 eV におけるシミュレーション。

- [1] C. Chen *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 125126 (2017).
- [2] D. Takane *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 121108(R) (2016).
- [3] L. M. Schoop *et al.*, Nat. Commun. **7**, 11696 (2016).
- [4] M. M. Hosen *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 161101(R) (2017).
- [5] G. Bian *et al.*, Nat. Commun. **7**, 10556 (2016).
- [6] S. A. Ekahana *et al.*, New J. Phys. **19**, 065007 (2017).
- [7] A. Yamakage *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 013708 (2016).
- [8] X-B Wang *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 161112(R) (2017).
- [9] arXiv:1708.06874v1.
- [10] arXiv:1708.07814v2.
- [11] P. Blaha *et al.*, (Technische Universität Wien, Austria, 2001).
- [12] P.M.C. Rourke *et al.*, Comput. Phys. Commun. **183**, 324 (2012).

最大エントロピー法やスパースモデリングによる

磁気エネルギー準位の推定

東大物性研

秋元昂, 小濱芳允, 松田康弘

磁性体の固有エネルギーは外部磁場に対し有意な依存性を示す。そのような固有エネルギーの磁場依存性は電子スピン共鳴(ESR)や中性子散乱によって測定することが可能であるが、パルス磁場が必要となるような強磁場下ではそれらの測定は困難さを伴う。

一方で、熱測定などにより観測可能なエネルギーは、ボルツマン分布に従った固有エネルギーの期待値として観測される。ゆえに、ボルツマン分布関数の逆関数を求めるところができれば固有エネルギーを求めることが可能であるが、劣決定性により逆関数は求まらない。

そこで、逆関数を用いずに逆問題を解く必要がある。最も原始的な手法の1つとして最小二乗法が挙げられるが、ノイズに対して敏感に応答するようなオーバーフィッティングが起こりやすいという問題がある。

最大エントロピー法は、最小二乗法に情報エントロピーを最大化するような正則化項を加えることで、平坦な状態密度分布を好むようになりノイズに対する過敏性を軽減することができ、分散のある状態密度分布に対しては有効であるが、離散的な状態密度分布を再現するには適していない。

スパースモデリングは、最小二乗法に状態密度の非ゼロ成分の個数を最小化するような正則化項を加えることで離散的な解(≡スパースな解)を好むようになる。量子力学からの要請により、分散のない場合、低励起のエネルギー準位は離散的になるべきであるため、スパースモデリングは本研究に用いる手法として適していると考えられる。

本発表では試行問題における結果と併せて各手法の特徴と本研究に対する有用性を議論する。