

# Session 1-1

第二回西日本強磁場科学研究会 (2015年11月24日 神戸大学)

## タイトル：1 THzを超えたマイクロカンチレバーESRの開発

講演者：高橋 英幸<sup>A</sup>，大道英二<sup>B</sup>，太田仁<sup>C</sup>

所属：<sup>A</sup>神戸大学自然科学系先端融合研究環，<sup>B</sup>神戸大学大学院理学研究科，<sup>C</sup>神戸大学分子フォトサイエンス研究センター

要旨：電子スピン共鳴測定 (ESR) は、通常、共振器法や透過法のような電磁波の吸収測定により行われる。これに対し、マイクロカンチレバーを用いた測定法では、試料をカンチレバーの上に乗せ、共鳴に伴う磁化変化を磁気トルクや磁場勾配力の変化として検出する。100 GHz 以上の高周波では通常的手法よりも3桁以上高いスピン感度で測定を行うことができ、測定に用いる試料の量も ng- $\mu$ g 程度のため、希少な試料や生体試料への応用が期待される。ただし生体金属タンパク質のように、数百 GHz の零磁場ギャップが存在する物質へ適用するためには、測定周波数をテラヘルツ領域まで拡張する必要がある。本研究では、後進行波管を光源とした測定系を用いて、カンチレバーESR の周波数拡張を試みた。

後進行波管の出力強度は数 mW 程度と高くないものの、カソード電圧を調整することにより、準連続的に発振周波数を変化させることができる。後進行波管から出力された電磁波はライトパイプで 15T マグネット内に導入され、ピエゾ抵抗検知型カンチレバー (PRC-400、日立ハイテクノロジーズ) 上の試料に照射される。試料が磁気異方性を持つ場合、ESR が起こるとカンチレバーにはたらく磁気トルクが変化するが、これはピエゾ抵抗の変化として検出される。

図1は  $T = 4.2$  K での Co タットン塩の微小単結晶 ( $230 \times 200 \times 40 \mu\text{m}^3$ ) の ESR スペクトルである。非等価な2つの  $\text{Co}^{2+}$  サイトに由来する2本のピークが、1.1 THz までの周波数で観測された [1]。これはこれまでの報告を3倍更新する、機械検出としては最高の周波数である。1.1 THz においては S/N 比が約5であることから検出可能なスピン数は約  $10^{15}$  と見積もられた。これは  $10^{11}$ - $10^{12}$  spins/Gauss のスピン感度に相当する。

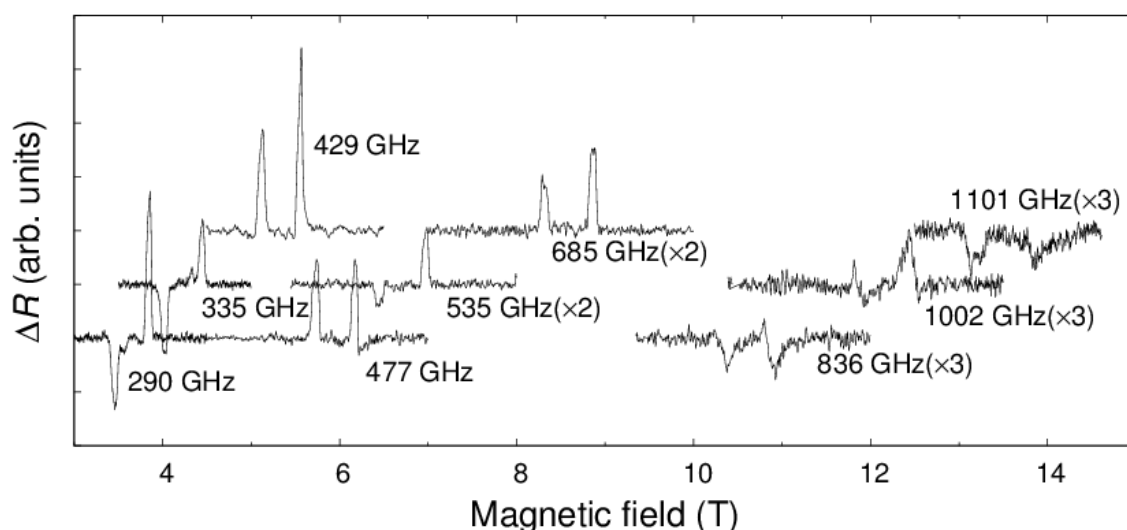


図1. 290 GHz から 1.1 THz の周波数領域における Co タットン塩の ESR スペクトル。

[1] H. Takahashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. 107 (2015) 182405.

## 高圧下強磁場 THz ESR の開発とその応用

櫻井敬博<sup>A</sup>, 平尾祐樹<sup>B</sup>, 肘井敬吾<sup>C</sup>, 大久保晋<sup>C</sup>, 太田仁<sup>C</sup>,  
松林和幸<sup>D</sup>, 上床美也<sup>D</sup>, 工藤一貴<sup>E</sup>, 小池洋二<sup>F</sup><sup>A</sup>神戸大学研究基盤センター, <sup>B</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>C</sup>神戸大学分子フォトサイエンス研究センター, <sup>D</sup>東京大学物性研究所, <sup>E</sup>岡山大学大学院自然科学研究科, <sup>F</sup>東北大学工学部

我々はこれまで THz 領域における電磁波透過型の圧力セルを開発してきた(図)。圧力セルの全ての内部部品をジルコニア等のセラミクスにすることで、荷重に抗する靱性だけでなく、THz 波に対する透過性も持たせている。パルス磁石[1]あるいは超伝導磁石[2]を利用した強磁場 ESR 装置に組み込むことで、圧力下での強磁場多周波数 ESR が可能となる。発生圧力に関しては、二層式のシリンダーを用いることにより単層シリンダーでは実現不可能な 2 GPa を超える圧力にまで拡張されている[2]。ただし同圧力セルは径が大きく、現状では超伝導磁石との組み合わせのみである。

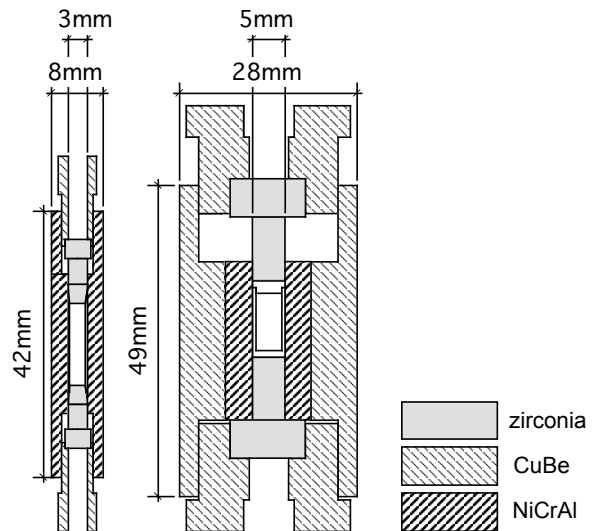


図. パルス磁石用(左)及び超伝導磁石用(右)圧力セル。

このような圧力下 ESR 装置の応用例として二次元直交ダイマー系である  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  の例を紹介する。同物質の ESR 測定では基底状態である非磁性一重項から第一励起状態である三重項への直接遷移が観測される。これまでにパルス強磁場下、温度 2 K 程度、1 GPa 程度までの ESR 測定により、両状態間のエネルギーギャップが圧力と共に低下することを観測していた[1]。ごく最近、同物質の 2 GPa を超える圧力下までの ESR 測定を行い、詳細なギャップの圧力依存性を得ることに成功した。そして 1.85 GPa 付近で相転移を示唆する飛びを見出した。既に報告されていたギャップの圧力依存性[3]との大きな違いは、我々の結果では転移圧力においてもギャップが開いたままであるという点である。我々はギャップの大きさを直接的に決めており信頼性は高く、転移圧力でギャップが潰れる[3]という可能性は否定される。より詳細な情報を得るため、有限サイトの二次元直交ダイマーモデルに対して厳密対角化を行い、実験結果との比較を行った。これによりダイマー内、及びダイマー間の交換相互作用の圧力依存性を求めることに成功した。ダイマー内交換相互作用は圧力と共に低下し、ダイマー間のそれはあまり変化しないことが分かった。更に、理論計算で得られた転移点と同程度の値で転移していることが示された。講演ではこれらの詳細について報告する。

[1] T. Sakurai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78** (2007) 065107. T. Sakurai *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **150** (2009) 042171.

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

[3] S. Haravifarda *et al.*: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **109**, 2286 (2012).

# Session 2-1

## タイトル：トンネルダイオード振動法による複合極限下物性測定の現状と展望

講演者：木田孝則<sup>A</sup>，田原大夢<sup>A</sup>，金澤順二<sup>A</sup>，三宅厚志<sup>B</sup>，加賀山朋子<sup>C</sup>，清水克哉<sup>C</sup>，  
谷口一也<sup>A</sup>，金道浩一<sup>B</sup>，萩原政幸<sup>A</sup>

所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター，<sup>B</sup>東京大学物性研究所，  
<sup>C</sup>大阪大学大学院基礎工学研究科附属極限科学センター

要旨：強磁場・超高压・極低温を組み合わせた複合極限環境下では、強相関電子系物質に代表されるように圧力誘起の興味深い臨界現象が観測される。我々は複合極限下での物性測定を目指して、非破壊型パルスマグネット(ボア径:φ48 mm, 最大磁場:40 T)とダイヤモンド圧力セル(DAC)を用いた強磁場・高圧力下電気抵抗測定装置の開発を進めてきた[1]。これまでのところ、図1に示すような30 GPa級のNi-Cr-Al合金製および6 GPa級の高強度プラスチックPBI(ポリベンゾイミダゾール)製のDACを用いたパルス磁場・高圧力下電気抵抗測定に成功している。また最近では、Proximity Detector Oscillator(PDO)を組み込んだLC発振回路を用いて、トンネルダイオード振動(TDO)法と同様の測定方法によるパルス強磁場中表面インピーダンス測定装置を開発し、鉄系超伝導体 $\text{Fe}_{1+\delta}(\text{Te}, \text{Se})$ の上部臨界磁場の圧力依存性を調べることに成功している[2]。TDO法の利点は、輸送現象における磁場変化あるいは温度変化に伴う相転移現象を非接触で測定できること、またセンサーコイルの巻き数がわずか数ターンで十分な測定感度を得られることである。これは極めて狭い空間での測定が可能であることを意味しており、DACを用いた測定に適している。講演では、本装置開発の現状を中心に最近の取り組みについて報告する。

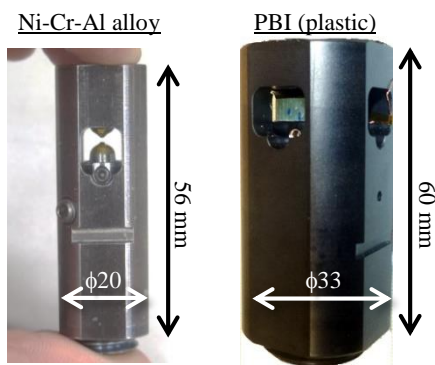


図1：Ni-Cr-Al合金製(左)およびPBI製(右)のDAC

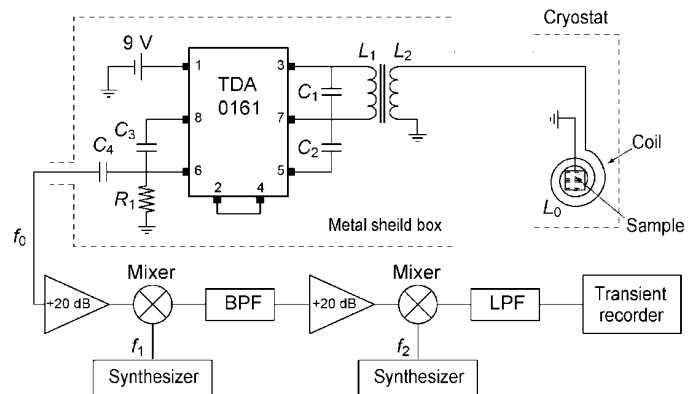


図2：トンネルダイオード法の測定回路図

[1] 明石孝一 他, 日本物理学会講演概要集 67(2-3), 374, 2012-08-24.

[2] 金澤順二 他, 日本物理学会講演概要集 69(1-3), 472, 2014-03-05.

## Session 2-2

第二回西日本強磁場科学研究会 (2015年11月24日 神戸大学)

### タイトル：ジャイロトロン強光源を用いた高圧下強磁場電子スピン共鳴装置の開発の現状

講演者：赤木暢<sup>A</sup>、高田篤<sup>A</sup>、木田孝則<sup>A</sup>、両条玲児<sup>A</sup>、出原敏孝<sup>B</sup>、小川勇<sup>B</sup>、光藤誠太郎<sup>B</sup>、藤井裕<sup>B</sup>、萩原政幸<sup>A</sup>

所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター、<sup>B</sup>福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨：物質内のスピンの励起を観察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。最近では、磁性と誘電性の相関を持つマルチフェロイック物質におけるエレクトロマグノン (光の電場成分によるスピン波励起) の観察も可能であることから ESR 測定の重要性は、さらに増していると言える。また、パルス強磁場との親和性もよく、60 T 級の強磁場領域の磁気状態の観察ができることも ESR 測定の利点の一つである。

一方、物性を大きく変えることが可能であるため、圧力は磁性体研究において効果的な外場の一つである。実際、多くの物質でダイヤモンドアンビルセルを用いた高圧力下での物性測定が行われている。しかしながら、パルス強磁場下での高圧力実験は、強磁場印加時の圧力セルによるジュール発熱の影響など多くの問題があり、あまり進んでおらず、電気抵抗や磁化といったマクロな物性の測定でも大変な困難を伴う。

もし、ダイヤモンドアンビルセルを用いて 2GPa 以上の高圧力下でのパルス強磁場下 ESR 測定ができれば、高圧力下磁気状態の微視的磁気情報が得られるだけでなく、高圧力・強磁場下での新たな磁気転移の発見も期待できる。

高圧下強磁場 ESR 装置の開発において、圧力セルによる光の減衰が大きな問題であると予想される。本研究では、光源にジャイロトロン強光源を用いることで精密実験の実現を目指す。

講演では、現在の開発状況の報告、及び今後の開発についての議論を行う。

# Sesson 3-1

第二回西日本強磁場科学研究会 (2015年11月24日 神戸大学)

## タイトル：ジャイロトロン光源を用いた最近の応用研究

講演者：光藤誠太郎, 藤井裕, 立松芳典

所属：福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨：ミリ波・サブミリ波領域の連続発振で数十キロワットの電磁波を発生することができる発振器としてジャイロトロンの開発は進められてきた。福井大学ではジャイロトロンの高出力特性と合わせて、高周波化に取り組んできた。ジャイロトロンは磁場中でサイクロトロン運動する電子と空洞共振器内の電磁波の定在波(TEnmモード)との相互作用を利用して発振しており、電子のサイクロトロン周波数または、その高次周波数で発振が可能である。高周波化には超伝導磁場やパルス強磁場を用いてサイクロトロン周波数を上げることによる高周波化と、高次の発振条件を用いることにより行われ、20 Tの超伝導磁場を用い2次の発振条件を用いることでジャイロトロンとしては1T Hzを超える連続発振が達成されている。[1]

福井大学でのジャイロトロン応用として初期の段階から電子スピン共鳴とプラズマ計測への応用が進められている。ジャイロトロン光源の ESR 計測応用は福井大学で初めて行われた。[2] その後パルス強磁場と組み合わせることにより強磁場・高周波での ESR 計測への応用がなされた。[3-5] また、米国の MIT のジャイロトロン開発グループは、ジャイロトロンの高出力特性を利用し、電子スピンを大きく偏極し、この偏極を核スピンの核スピンに移すことにより NMR の信号強度を増強する DNP-NMR に応用した。[6] 福井大学でも DNP-NMR に向けたジャイロトロン開発がすすめられ、安定性や直線偏光性、周波数の連続可変性(ジャイロ BWO) [7]等を付加したジャイロトロン(高度化ジャイロトロン)が開発されている。

一方、高出力・高周波電磁波の ESR 応用として、高周波パルス ESR の開発を行っている。NMR においては、1964年に Pulse Fourier Transfer NMR が導入され NMR 感度が10倍向上し、後にノーベル賞につながった。ESR のパルス法については、必要なパルス幅や電磁波の強度の要請から NMR に比べて簡単ではなく、光源の不足からほとんど利用されていない。しかしながら遠赤外分子レーザー[8]や自由電子レーザー[9]を用いて高周波パルス ESR が開発されている。我々は、ジャイロトロンを光源としてよりコンパクトで、広範に適応できるパルス ESR の開発を行っており、このシステムを用いて、固体量子コンピューターや DNP-NMR 用のラジカルのダイナミックスの直接計測を計画している。講演では、その他高エネルギー科学等への応用例についても紹介する予定である。

[1] T. Idehara et al., *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves* **29**, No. 2, pp.131-141 (2008).

[2] T. Tatsukawa, T. Maeda, H. Sasai, T. Idehara, M. Mekata, T. Saito, T. Kanemaki *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 1995, pp 293-305.

[3] Aripin, S. Mitsudo, T. Shirai, K. Matsuda, T. Kanemaki, T. Idehara, T. Tatsukawa, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 1999, pp 1875-1888.

[4] S. Mitsudo, Aripin, T. Shirai, T. Matsuda, T. Kanemaki, T. Idehara, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 2000, pp 661-676.

[5] Seitaro Mitsudo, Tomoyuki Higuchi, Kazuaki Kanazawa, Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, and Meiro Chiba, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) pp. 172-176.

[6] G.J. Gerfen, L.R. Becerra, et. al, *J. Chem. phys.* **102** (1995) 9494-9497.

[7] T. H. Chang, T. Idehara et al., *Journal of Applied Physics*, **105**, 063304 (2009).

[8] C. Kutter, H. P. Moll, et. al, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 2925.

[9] S. Takahashi, L.C. Brunel, et. al., *NATURE* **1143** (2012).

## Session 3-2

第二回西日本強磁場科学研究会 (2015年11月24日 神戸大学)

### タイトル：超低温強磁場における動的核偏極を利用した磁性研究

講演者：藤井裕

所属：福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨：動的核偏極 (Dynamical Nuclear Polarization, 略して DNP) とは、ESR 周波数付近のマイクロ波を強力に照射することで、エネルギー差の大きく異なる核スピン系の分極を変化させようとする、磁気共鳴法の実験技術である。動的核偏極がオーバーハウザーによって予見され[1]、実験的に Carver らによって確認された[2]のは、1950年代である。しかし、ここ最近に至るまで、電子スピン-核スピン系の DNP は広く知られた研究テーマではなく、原子核科学などにおいて利用されている、基礎的で、むしろマイナーな研究手法であった。しかし近年、固体高分解能 NMR の測定感度を向上させる手段として DNP を利用した測定手法 (DNP-NMR 測定) が多くの研究者の耳目を集めている。最近では、より高周波、高出力が可能なジャイロトロンが開発が福井大学や MIT で進められ、400 MHz 以上の汎用の高分解能 NMR 装置とジャイロトロンを組み合わせた DNP-NMR 装置が開発されている[3,4]。現在、NMR 分析業界では DNP-NMR が最先端の研究テーマの主流をなしており、Bruker 社や JEOL RESONANCE 社も高分解能 DNP-NMR 装置を開発している。

一方、これまで磁性研究における DNP 現象の活用例は少ない。しかし、希薄だったり分極が小さかったりするために見えなかったような核スピンの状態を、DNP を用いて観測することが可能な場合がある。スピン系の研究では、量子効果等を観測するために超低温・強磁場域まで測定することがよくあるが、低温では電子スピンの緩和時間が一般には長くなることから、ジャイロトロンのようなキロワットクラスの出力がなくとも、DNP が比較的小さいパワーで生じる。さらに磁化の大きくなる強磁場域では、DNP によって得られる核スピン偏極もより大きくなると期待される。そのような極限環境における DNP 測定を行う候補として、リンを希薄にドーピングしたシリコン[5]がある。講演では、これまでの測定例と福井大学で行っている実験の現状を報告する予定である。

[1] A. W. Overhauser, Phys. Rev. 92 (1953) 411.

[2] T. R. Carver, C. P. Slichter, Phys. Rev. 102 (1956) 975.

[3] V. S. Bajaj *et al.*, J. Magn. Reson. 160 (2003) 85.

[4] Y. Matsuki *et al.*, J. Magn. Reson. 225 (2012) 1.

[5] B. E. Kane, Nature 393 (1998) 133.

## Session 3-3

第二回西日本強磁場科学研究会 (2015年11月24日 神戸大学)

### タイトル：新規フラストレート格子磁性体の強磁場磁化過程

講演者：菊池彦光

所属：福井大学大学院工学研究科物理工学専攻

要旨：三角格子やかごめ格子といったフラストレートスピン系としてこれまでよく研究されたスピン系とは異なる新規フラストレート格子の磁性を探求している。スピン格子面内に五角形を含む  $\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$  (擬孔雀石)や四面体が点共有して配列する  $\text{KCu}_3(\text{SO}_4)_2\text{OCl}$  などの新規磁性体の磁性について強磁場磁化を中心に紹介する。 $\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$  については、以前行った 60T までの磁化に関する簡単なモデルに基づく解析から多段磁化過程を予測した[1]。最近 70T までの測定を行ったところ、予測を定性的に支持する結果が得られた。磁化は物性研パルス強磁場を用いて測定した。

[1] H. Kikuchi *et al.*, J. Kor. Phys. Soc. 62 (2013) 2037.

**タイトル：擬一次元反強磁性体  $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  の強磁場磁性**講演者：奥谷顕<sup>A</sup>, 木田孝則<sup>A</sup>, 薄井智靖<sup>B</sup>, 木村剛<sup>B</sup>, 奥西巧一<sup>C</sup>, 萩原政幸<sup>A</sup>所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター, <sup>B</sup>大阪大学基礎工学研究科, <sup>C</sup>新潟大理学部

要旨： $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  は磁性を担う  $\text{Co}^{2+}$  イオンからなる  $\text{CoO}_6$  が結晶  $c$  軸方向に 4 回周期でらせんを描くように配列し、その鎖間は非磁性の  $\text{V}^{5+}$  イオンと  $\text{Sr}^{2+}$  イオンで隔てられた構造を持つ擬一次元反強磁性体である。同様の構造を持つ物質として  $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  があるが、 $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  は空間群が  $I4_1/acd$  であるのに対し、 $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  は空間群が  $I4_1cd$  であり中心反転対称性が破れている。このことが電気特性や磁気特性に影響を及ぼすのではないかとという観点から現在研究を進めている。 $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  の帯磁率の温度依存性には、 $H \parallel c$  のときに 40 K 付近に低次元磁性体特有のブロードなピークが見られる。また、ネール温度 (4.8 K) より低い 1.8 K での磁化曲線には、 $H \parallel c$  のとき 3.7 T 付近で、 $H \parallel a$  のとき 6.5 T 付近で磁化の跳びや折れ曲がりが見られる [1, 2]。我々が行ったパルス強磁場中での磁化測定でも同様の振る舞いが観測された。また、 $H \parallel [110]$  では磁化曲線にアノマリーは見られなかった。 $H \parallel c$  での磁化曲線は  $S=1/2$  XXZ モデルを用いた理論計算によって飽和に達するまでの実験結果がよく再現されたことから、 $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  も  $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  と同様に  $S=1/2$  XXZ モデルの良いモデル物質ではないかと考えられる。本発表では、上述の磁化曲線に見られたアノマリーについて磁気励起の観点から調べるために ESR 測定を行ったので、その結果について報告する。

試料は Floating-zone 法によって育成した  $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  の単結晶を用い、超伝導磁石やパルス磁石とガン発振器や FIR レーザー、後進行波管といった光源に自作 ESR クライオスタットを組み合わせた装置を用いて ESR 測定を行った。

$H \parallel c$  の場合、360 GHz のエネルギーギャップから生じる ESR モードのうちの 1 つが 3.8 T でソフト化するような振る舞いが観測された。この磁場では磁化曲線に跳びが観測されており、ESR モードのソフト化によって磁気相転移が生じていることが示唆される。また、飽和磁場である 28.3 T までに様々な ESR モードが観測された。 $H \parallel a$  の場合においても 360 GHz のエネルギーギャップから生じる ESR モードのうちの 1 つが、磁化曲線にアノマリーが見られる 6.5 T 付近でソフト化するような振る舞いが観測された。一方、 $H \parallel [110]$  では磁化曲線にアノマリーは存在せず、ESR モードがソフト化するような振る舞いも観測されなかった。このような振る舞いは  $\text{BaCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$  でも観測されている。4 倍周期で  $\text{CoO}_6$  八面体が螺旋を描きながら鎖を形成していることで、外部磁場の印加方向の違いで生じる鎖に垂直なスタaggerド磁場の有無 [3] が原因ではないかと考えている。

[1] Z. He *et al.*, Phys. Rev. B **73**, 212406 (2006).[2] A. K. Bera *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 094402 (2014).[3] S. Kimura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 033706 (2013).



タイトル：シングルキラリティをもつ CsCuCl<sub>3</sub> の電子スピン共鳴講演者：吉澤大智<sup>A,B</sup>, 高阪勇輔<sup>B,C</sup>, 井上克也<sup>B,C</sup>, 秋光純<sup>B,C</sup>, 萩原政幸<sup>A,B</sup>,所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター, <sup>B</sup>広島大学キラル物性研究拠点, <sup>C</sup>広島大学大学院理学研究科

要旨:  $ABX_3$  型化合物 ( $X = \text{Cl, Br}$ ) は典型的な擬一次元磁性体として長い間研究が行われてきた系である。CsCuCl<sub>3</sub> はその一つであるが、 $T_c = 423 \text{ K}$  で結晶空間群が  $P6_3/mmc$  から  $P6_122$  あるいは  $P6_522$  へ変わる構造相転移が起こる[1]。これにより結晶構造にキラリティが生じ、 $c$  軸に平行なジャロシンスキー・守谷(DM)相互作用が発現する。この DM 相互作用と鎖内強磁性交換相互作用、鎖間の反強磁性交換相互作用によって  $T_N = 10.5 \text{ K}$  以下で  $c$  軸をらせん軸としたヘリカル磁気構造を形成する。また、このとき  $ab$  面内には  $120^\circ$  磁気構造を形成する[2]。この物質に  $c$  軸に垂直な磁場をかけると  $H_{C1}^\perp = \sim 10 \text{ T}$  で 3 副格子整合磁気構造への磁場誘起相転移が起こり[3]、 $H_{C2}^\perp = \sim 14 \text{ T}$  で強誘電分極相、 $H_{C3}^\perp = \sim 16 \text{ T}$  で傾角 3 副格子磁気構造に転移すると考えられている[4]。これまでに行われた電子スピン共鳴(ESR)測定の結果は、 $H//c$  に関しては上記のスピモデルで説明が成されてきた。しかし、 $H \perp c$  に関してはこれまでに測定されてきた試料がラセミ双晶であるために多数のシグナルが観測されており、共通した見解が得られていない[5, 6]。そこで今回この物質の磁場中での振る

舞いを明らかにすることを目的に、結晶空間群  $P6_522$  のシングルキラリティをもつ CsCuCl<sub>3</sub> 単結晶試料について ESR 測定を行った。その結果、 $H \perp c$  については図 1 に示すようにシンプルな共鳴モードが観測された。ここから以前の実験で観測された複雑な共鳴シグナルの多くが結晶キラリティによって生じたドメイン構造に由来するものと考えられる。

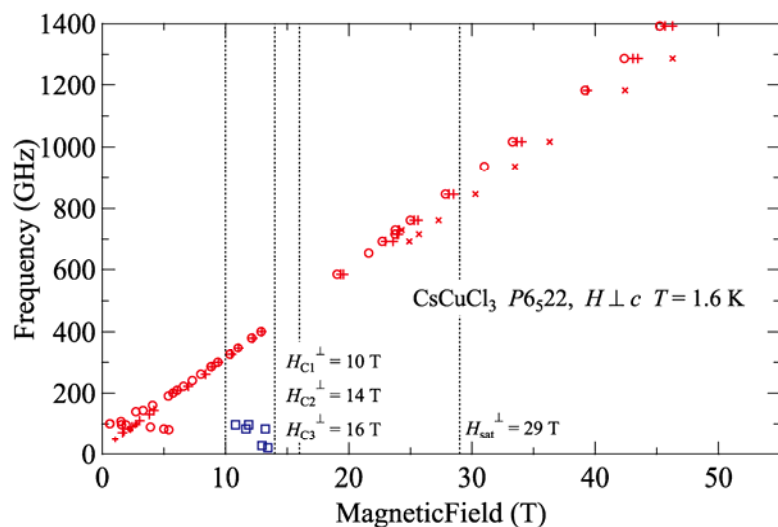


図 1.  $H \perp c$  での周波数 - 磁場プロット。図の点線は磁場誘起相転移点に対応している[4]。

- [1] A. W. Schlueter *et al.*, *Inorg. Chem.* **5** (1966) 2777.
- [2] K. Adachi *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **49** (1980) 545.
- [3] A. Hoser *et al.*, *Appl. Phys. A* **74** (2002) S707.
- [4] A. Miyake *et al.*, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 100406.
- [5] H. Ohta *et al.*, *Physica B* **201** (1994) 208.
- [6] S. Schimidt *et al.*, *Solid State Commun.* **108** (1998) 509.

## タイトル： $S=1/2$ 擬一次元鎖フラストレーション系 $A_2Cu_2Mo_3O_{12}$ ( $A=Rb, Cs$ ) の多周波 ESR 測定

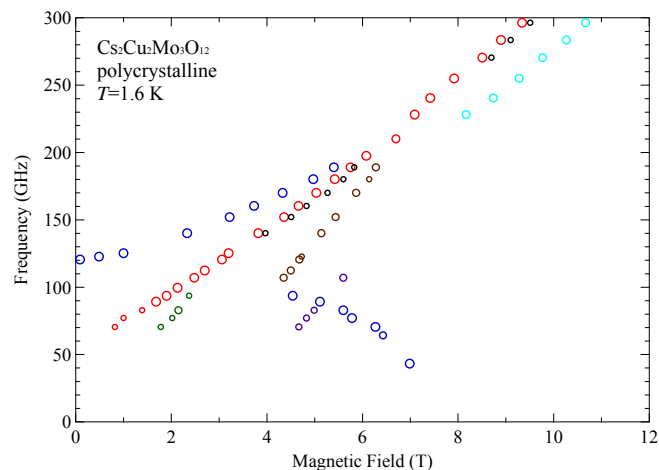
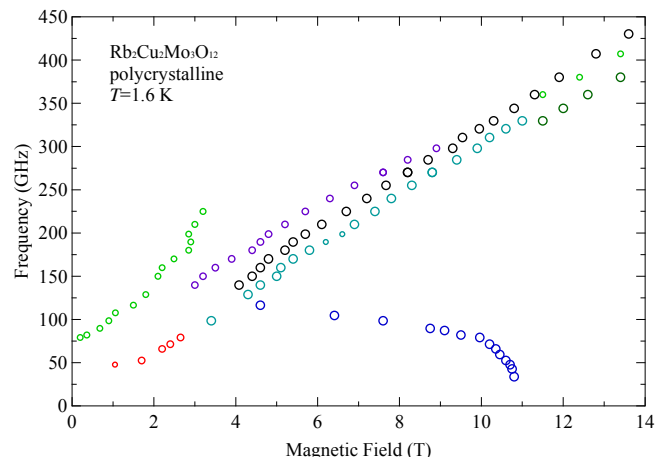
講演者：森岡俊晶<sup>A</sup>、吉澤大智<sup>A</sup>、赤木暢<sup>A</sup>、藤村明央<sup>B</sup>、安井幸夫<sup>B</sup>、萩原政幸<sup>A</sup>

所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター、<sup>B</sup>明治大学理工学部量子固体物性研究室

要旨：最近接相互作用( $J_1$ )が強磁性的に働き、次近接相互作用( $J_2$ )が反強磁性的に働く一次元磁性体では磁気フラストレーションが発生するため、特異な磁気状態や性質を持つことがある。CuO<sub>2</sub>リボン鎖はその代表的な一例である。このCuO<sub>2</sub>リボン鎖は、Cu<sup>2+</sup>( $S=1/2$ )イオンを中心に配置したO<sup>2-</sup>イオンの四角形が辺共有している1次元鎖であり、近年盛んに研究されている。中でも $S=1/2$ の $J_1$ - $J_2$ 一次元フラストレート磁性体の理論研究<sup>[1][2]</sup>によると基底状態は、ハルデンダイマー相やカイラル相といった量子相、高磁場中ではSDW相やネマティック相といった2つのマグノンが束縛される磁気状態の出現が予想されている。

$A_2Cu_2Mo_3O_{12}$  ( $A=Rb, Cs$ )はこの磁性体のモデル物質の一つであり、 $A=Rb$ では過去の研究<sup>[3]</sup>により極低温下でシングレットダイマーを形成することが確認されている。一方、 $A=Cs$ では $T_N=1.85$  K<sup>[4]</sup>で長距離秩序することが分かっている。

我々はAサイトによる違いを探るため、電子スピン共鳴(ESR)測定を行った。その結果、反強磁性的な共鳴モードの観測と零磁場において複数のエネルギーギャップが観測された。そして $A=Rb$ では単一のマグノンによる励起では説明できない共鳴モードが観測された。当日はこれらの実験結果と解析結果の詳細について報告する。



[1] S. Furukawa *et al.*, Phys. Rev. Lett.

**105**, 257205 (2010).

[2] T. Hikihara *et al.*, Phys. Rev. B. **78**, 144404 (2008).

[3] Y. Yasui *et al.*, JPS Conf. **3**, 014014 (2014).

[4] A. Fujimura *et al.*, Sectional Meeting Phy. Soc. Jpn., 27aPS-74 (2014).

## 擬一次元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 THz ESR 測定

北原遥子<sup>A</sup>, 原茂生<sup>B</sup>, 櫻井敬博<sup>C</sup>, 大久保晋<sup>D</sup>, 太田仁<sup>D</sup>

木村史子<sup>E</sup>, 木村恒久<sup>E</sup>, 那波和宏<sup>F</sup>, 岡本佳比古<sup>G</sup>, 廣井善二<sup>F</sup>

<sup>A</sup>神戸大学 大学院理学研究科, <sup>B</sup>島根大学 研究支援センター, <sup>C</sup>神戸大学 研究基盤センター

<sup>D</sup>神戸大学 分子フォトサイエンス研究センター, <sup>E</sup>京都大学 大学院農学研究科

<sup>F</sup>東京大学 物性研究所, <sup>G</sup>名古屋大学 大学院工学研究科

最近接サイト間の強磁性相互作用  $J_1$  と次近接サイト間の反強磁性相互作用  $J_2$  が競合するようなフラストレート一次元磁性体では、近年飽和磁場近傍においてスピネマチック相等の量子状態の実現が理論的に予測され注目を集めている[1,2]。 $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$  の結晶構造を図 1 に示す。この物質は磁性イオン  $\text{Cu}^{2+}(3d^9, S=1/2)$  が  $b$  軸方向に  $\text{CuO}_6$  八面体の一次元鎖を形成するため、 $J_1$ - $J_2$  鎖のモデル物質と考えられている。那波らによれば磁化率は 15K に低次元性を反映したブロードなピークを示す。 $J_1$ - $J_2$  モデルフィッティングから  $J_1=-51\text{K}$ ,  $J_2=36\text{K}$  と報告されている。磁化測定から飽和磁場は 26T であると報告されている[3]。

磁気異方性を調べるために必要となる  $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$  の大型単結晶は得られていないため、今回磁場中配向試料を作製し[4]、異方性を調べるためにテラヘルツ ESR 測定を行った。測定温度範囲は 1.9K~265K、光源周波数は 550GHz までの測定を試みた。図 2 に 1.9K、354GHz での粉末試料と擬単結晶試料に対して  $H//a$ ,  $H//b$  に磁場をかけた場合のスペクトルの比較を示す。粉末試料では複数の吸収を含んだスペクトルだったのに対して、擬単結晶試料のスペクトルは単一のピークを示し、粉末試料で観測された複数の吸収位置に近いものとなった。詳細な結果は当日報告する。

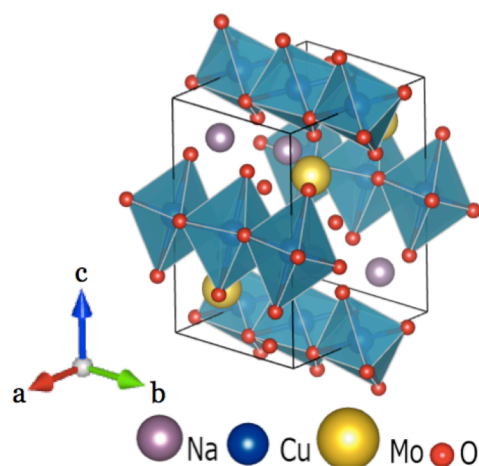


図 1  $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$  の結晶構造

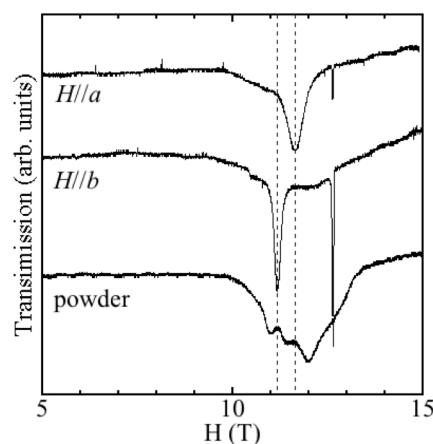


図 2 1.9K, 354GHz の波形比較

- [1] T.Vekua, *et al.*, Phys. Rev. B, 76 (2007) 174420
- [2] M. E. Zhitomirsky, *et al.*, Europhys. Lett. 92 (2010) 37001
- [3] K.Nawa, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 103702
- [4] F.Kimura, *et al.*, Cryst. Eng. Comm. 16 (2014) 103702

## Title : Magnetic and Transport Properties of the Metallic Two-dimensional Triangular Antiferromagnet $\text{Ag}_2\text{CrO}_2$ in High Magnetic Fields

Speaker: Shunsuke Asaoka<sup>A</sup>, Takanori Kida<sup>A</sup>, Akira Okutani<sup>A</sup>, Hiroyuki Yoshida<sup>B</sup>, Masayuki Hagiwara<sup>A</sup>

Affiliation: <sup>A</sup>Center for Advanced High Magnetic Field of Science, Graduate School of Science, Osaka University,

<sup>B</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University

$\text{Ag}_2\text{CrO}_2$  consists of triangular lattice planes of  $\text{CrO}_2$ , which are well separated by the metallic  $\text{Ag}_2$  layers (1). This compound is regarded as an  $S = 3/2$  ( $\text{Cr}^{3+}$  ion) frustrated triangular lattice antiferromagnet ( $T_N \sim 24$  K) without orbital degrees of freedom, and exhibits a structural transition from a trigonal phase (high- $T$ ) to a monoclinic one (low- $T$ ) at  $T_N$ . Recently, Matsuda *et al.* (2) reported that a partially disordered state with five sublattices abruptly appears at  $T_N$ , accompanied by a structural distortion, and found anomalous magnetic excitations, which cannot be explained simply by the linear spin-wave theory. In this study, we have measured magnetization, electrical resistivity, magnetoresistance (MR), and Hall resistivity of polycrystalline samples of  $\text{Ag}_2\text{CrO}_2$ . Figure 1 shows the high-field magnetization curve of the polycrystalline samples of  $\text{Ag}_2\text{CrO}_2$  at  $T = 1.4$  K. The magnetization curve exhibits large hysteresis and plateau-like behavior with spontaneous magnetization. Figure 2 shows the MR curves for  $H \parallel I$  (transverse configuration) at designated temperatures. Below  $T_N$ , the MR curves exhibit positive and almost linear behavior, and the MR ratio decreases with increasing temperature. In contrast, at  $T = 25$  K (just above  $T_N$ ), the large negative MR of  $-38\%$  at 8 T is observed. The MR was isotropic between the longitudinal and the transverse configurations (not shown). This suggests that the large negative MR does not arise from the orbital contribution due to the Lorentz force, but from the spin contribution (spin fluctuations). In the presentation, we demonstrate the results of the high-field MR on  $\text{Ag}_2\text{CrO}_2$  and discuss the relationship between magnetic and transport properties of this compound.

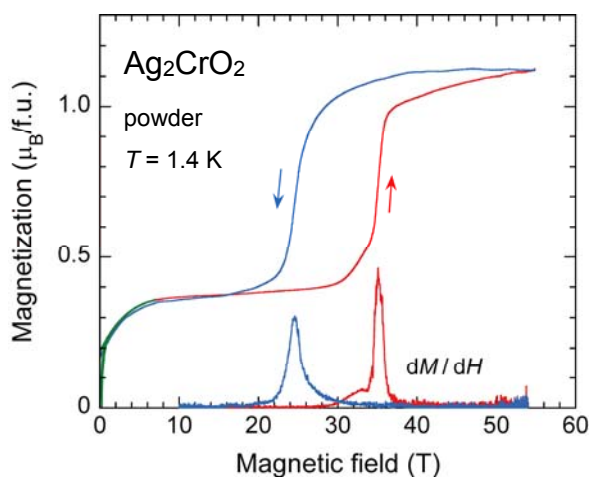


Fig. 1: High-field magnetization curve at  $T = 1.4$  K.

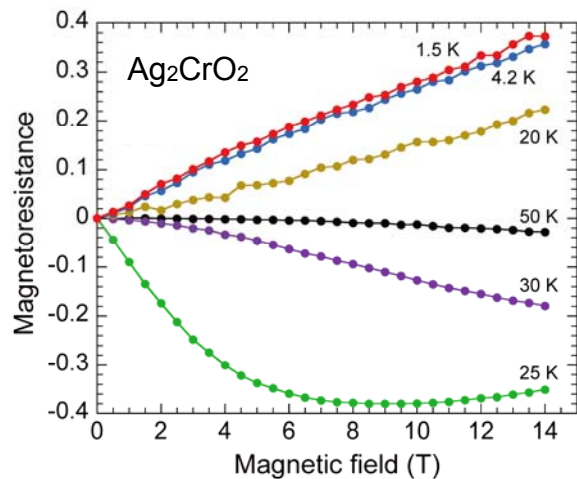


Fig. 2: Magnetoresistance on polycrystalline samples of  $\text{Ag}_2\text{CrO}_2$  at various temperatures.

(1) Yoshida, H.; Takayama-Muromachi, E.; Isobe, M. *J. Phys. Soc. Jpn.* **2011**, *80*, 123703.

(2) Matsuda, M.; De la cruz, C.; Yoshida, H.; Isobe, M.; Fishman, R. S. *Phys. Rev. B* **2012**, *85*, 144407.

## タイトル：2次元反強磁性体 $\text{ScCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$ の磁場中配向試料を用いた強磁場 ESR 測定

講演者：吉田翔太<sup>A</sup>，櫻井敬博<sup>B</sup>，大久保晋<sup>C</sup>，太田仁<sup>C</sup>，原茂生<sup>D</sup>，Alexei A. Belik<sup>E</sup>

所属：<sup>A</sup>神戸大院理，<sup>B</sup>神戸大研究基盤セ，<sup>C</sup>神戸大分子フォトセ，

<sup>D</sup>島根大総合科学研究支援セ，<sup>E</sup>物材機構

低次元磁性体は隣り合う格子点の数が少ないため、量子力学的効果が顕著となると考えられており大変興味が持たれている。特にハニカム格子の結晶構造を持つ物質は、2次元系の中で最も少ない結合手の数3を持つため特に注目を集めている。 $\text{ScCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$  は磁性を担う  $\text{Cu}^{2+}$  イオンが  $ab$  面内でハニカム格子状に並んでおり、また面間是非磁性の Sc で隔てられているためよい2次元ハニカム格子のモデル物質になると期待されている。また磁化率測定の結果より弱強磁性的な振る舞いを見せており、 $T_N=33\text{K}$ 、 $\theta=-488.5\text{K}$  であると報告されている。そこで今回  $\text{ScCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$  の粉末試料、配向試料の強磁場 ESR による測定を行った。 $ab$  面内の配向試料の作成方法は、粉末状の  $\text{ScCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$  をスタイキャストに混ぜ、室温で12時間固定することにより作成した。また今回の試料が  $\chi_c < \chi_a = \chi_b$  であるため、 $c$  軸方向の配向試料には10Tの磁場中で24時間磁場垂直方向に回転させるとにより作成を行った。マグネットにはヘリウムフリーマグネットを使用した。

図1は160GHzにおける粉末試料と配向試料の ESR スペクトルを比較した物である。シャープな吸収線は磁場校正のための DPPH による吸収線 ( $g=2.0$ ) である。図2は160GHzにおける1.8Kから265Kまでの ESR スペクトルの温度依存性である。78K以下の温度でノイズが増加したのはクライオスタットの変更に伴い感度が下がったためである。発表当日は  $g$  値の温度変化、265K付近とネール温度より下の温度領域における、周波数—磁場プロットの結果等を報告し、スピンドYNAMIXについて述べる。

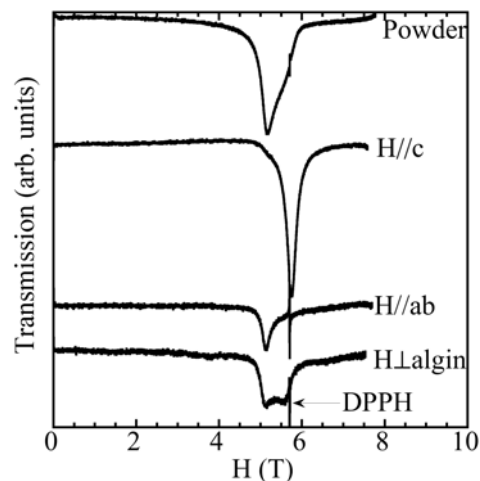


図1 160GHzにおける粉末試料、配向試料の ESR スペクトル

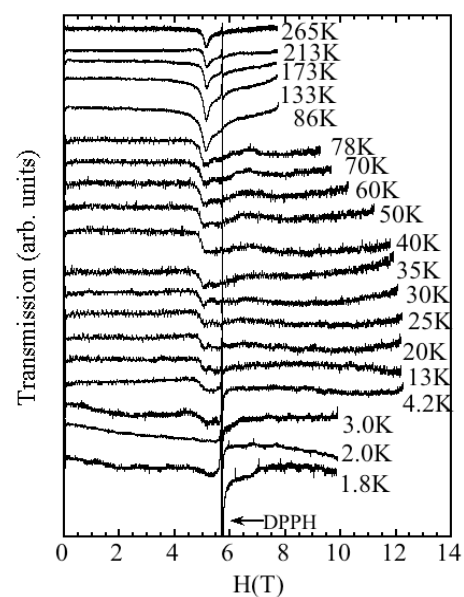


図2 160GHzにおける H//align の温度変化



## タイトル：2次元正方格子磁性体 $\text{Sr}_2\text{MnO}_2\text{Cl}_2$ の強磁場 ESR 測定

講演者：高橋昭彦<sup>A</sup>，櫻井敬博<sup>B</sup>，大久保晋<sup>C</sup>，太田仁<sup>C</sup>，辻本吉廣<sup>D</sup>，Su Yu<sup>D</sup>，山浦一成<sup>D</sup>

所属：<sup>A</sup>神戸大学大学院理学研究科，<sup>B</sup>神戸大学研究基盤センター、<sup>C</sup>分子フォトサイエンス研究センター、<sup>D</sup>物質・材料研究機構

要旨：多くの配位構造がある中で、正方平面配位は超伝導性や低次元磁性の観点から注目を集めている[1]。 $\text{Sr}_2\text{MnO}_2\text{Cl}_2$ は新しい正方平面配位の層状ペロブスカイト物質である。X線回折測定により、結晶構造は正方晶で、図1のように $\text{O}_4$ が作る正方形の中心に磁性イオン $\text{Mn}^{2+}(3d^5)$ が位置する正方格子を作り、各平面はSrとClの層で隔てられていることが知られている[2]。先行研究から帯磁率測定でワイス温度が+1.5Kであると報告されており、ミュオン実験で100K付近から短距離秩序が観測されるにも関わらず、2Kまで長距離秩序に発達しないことから、正方格子物質で長距離秩序化しない初めての例と考えられている。本研究の目的は強磁場 ESR 測定から温度依存性を調べ、 $\text{Sr}_2\text{MnO}_2\text{Cl}_2$ のスピンドYNAMICSを明らかにすることである。

試料は、NIMSのベルト式高圧装置で合成された粉末試料を用いた。試料には不純物としてわずかにMnOが混ざっている。ESR測定温度領域は1.8Kから265K、周波数範囲は50GHzから445GHzである。磁場はパルス強磁場を用いて最大17.3Tの範囲で行った。試料を透過した電磁波をInSb検出器で検出する透過光法のESR測定方法で測定した。装置については[3]の文献に詳しい。

得られたESRスペクトルを図2に示す。測定温度が265Kにおいて比較的シャープな吸収が観測され、周波数-磁場プロットから $g=2.00$ が得られた(図2(a))。また、1.8Kのときは160GHz以上の領域で吸収スペクトルが低磁場に広がっている(図2(b))。このことから1.8Kでは短距離相関が発達していると考えられる。不純物として含まれるMnOは $T_N=118\text{K}$ の反強磁性体として知られている。本測定の不純物の寄与を見積るため、MnOのESR測定も行ったが、MnOは反強磁性ギャップが約1THzと大きく、 $T_N$ 以下では測定周波数領域でMnOによる吸収は現れない。

[1] E. Dagoto, Rev. Mod. Phys. **66**, 763-764 (1994)

[2] Y. Tsumimoto *et al.*, Chem. Commun. **50**, 5915-5916 (2014)

[3] H. Ohta *et al.*, J. Phys.: Conf. Serie. **51**, 611-614 (2006)

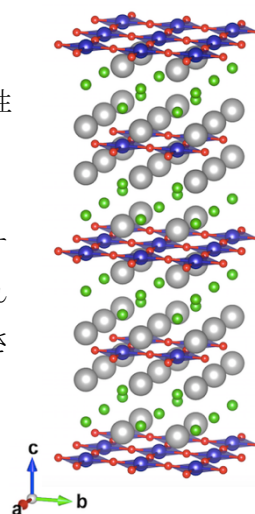


図1  $\text{Sr}_2\text{MnO}_2\text{Cl}_2$ の結晶構造

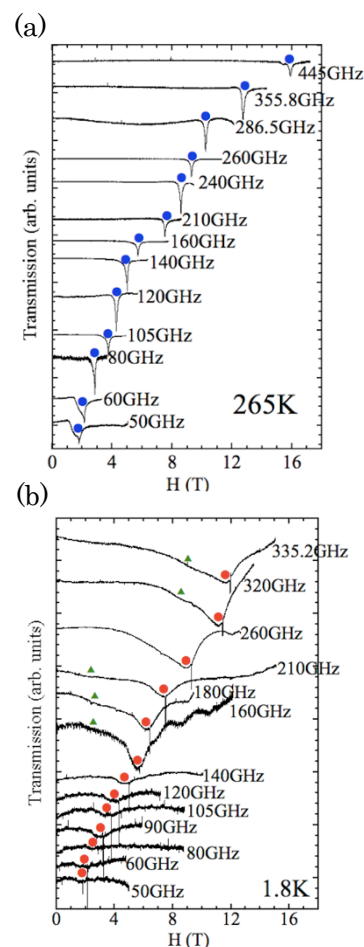


図2 ESRの周波数依存性  
(a)265K (b)1.8K

SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>における THz 領域での圧力下 ESR 測定

平尾祐樹, 櫻井敬博<sup>A</sup>, 太田仁<sup>B</sup>, 大久保晋<sup>B</sup>, 原茂生<sup>A</sup>, 松岡英一,  
菅原仁, 松林和幸<sup>C</sup>, 上床美也<sup>C</sup>, 工藤一貴<sup>D</sup>, 小池洋二<sup>E</sup>  
神戸大院理, 神戸大研究基盤セ<sup>A</sup>, 神戸大分子フォトセ<sup>B</sup>,  
東大物性研<sup>C</sup>, 岡大院自然<sup>D</sup>, 東北大工<sup>E</sup>,

本研究では圧力下強磁場ESR装置[1]を用いて、SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の圧力効果について研究を行っている。SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>はShastry-Sutherland格子を有する二次元スピンギャップ系である。ダイマー内(J)及びダイマー間(J')相互作用の比 $\alpha = J' / J$ が0.64程度であると考えられており、plaquette相への転移点 $\alpha = 0.68$ 近傍であるため、圧力によりこの比を変えることで転移が誘起されると期待される。2 GPa付近でNMR[2]により2種類のギャップの大きさの異なるダイマーの共存が示唆され、一方X線[3]では2 GPa付近でギャップが完全に閉じると示唆されている。そこで我々は相転移近傍と予想される2 GPa以上までの圧力下ESR測定を行った。

図に例として1.25 GPa、2 K、H/aでのESR吸収の周波数依存性を示す。赤印で示すように、周波数の増加に伴い低磁場側にシフトするモードと、高磁場側にシフトする二つのモードがある。これらは基底状態であるシングレットからトリプレット $S_z = -1, 1$ への励起に起因する吸収に対応する。図より、この圧力下ではゼロ磁場でのシングレット、トリプレット間のギャップエネルギーは500 GHz程度であることが分かる。同様の測定を様々な圧力下で行い、精密なギャップエネルギーの圧力依存性を求めた。その結果、圧力によりギャップは減少し、1.8 GPa付近でとびが生じることが分かった。我々はこのとびが相転移に対応すると考えている。現状の装置では、透過光強度を検出するInSb検出器が磁場に近いために、マグネットからの漏れ磁場が検出器の位置で数100 Gauss程度存在する。この検出器は磁場の影響を受けやすく、図に示すようにそれぞれの周波数で強度が磁場の増加に伴って減少し、8 T付近で増加に転じる様な振舞いを示す。現在、検出器付近の漏れ磁場を打ち消すコイルを設置し、バックグラウンドの影響を小さくする試みを行っている。講演ではこれらについて詳細に報告する。

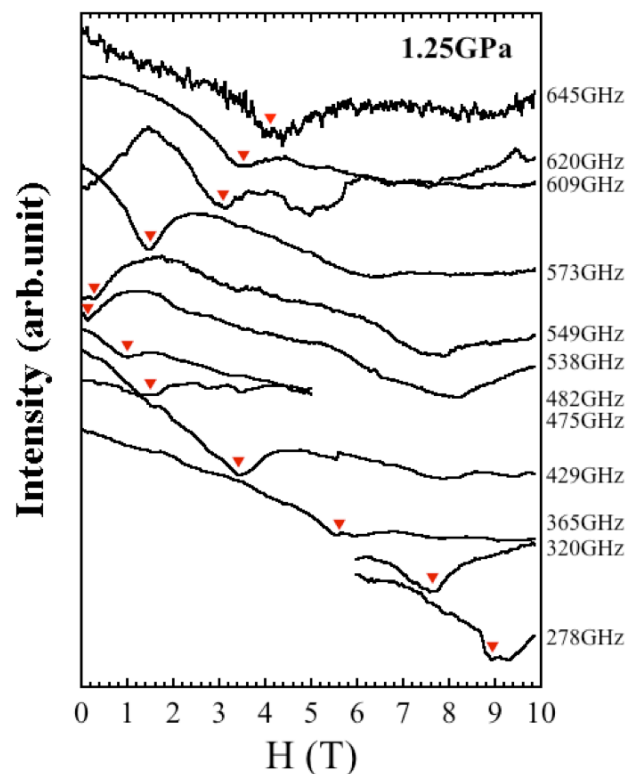


図 1.25 GPa、2 K、H/a での SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> の ESR 吸収波形

[1] T. Sakurai *et al.*, J. Magn. Reson. 259 (2015) 108-113

[2] T. Waki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 073710

[3] S. Haravifard *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 14 (2012) 2286

**Title : Magnetic properties of the åkermanite  $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$  in high magnetic fields**

Speaker : Y. Aoki, M. Akaki, T. Kida, A. Okutani, D. Yoshizawa, T. Morioka, and M. Hagiwara

Affiliation : Center for Advanced High Magnetic Field Center, Graduate School of Science, Osaka University

Abstract : Multiferroic materials have attracted considerable attention because of their interplay between magnetism and dielectricity. The åkermanite  $\text{Sr}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$  is one of such materials which exhibits spin-driven ferroelectricity not only below but also above the magnetic transition temperature. [1] This compound has a tetragonal crystal structure without centro-symmetry, and belongs the space group  $P42m$  at room temperature. The electric polarization emerges by  $p$ - $d$  hybridization mechanism which can be explained by the spin dependent change in hybridization of the  $d$  orbitals in the magnetic ions and the  $p$  orbitals in the ligand ions. The antiferromagnetic long-range ordering is observed below  $T_N=7$  K, and neighboring spins are directed antiparallel to each other with a slightly tilting angle because of a DM interaction. Although this material absorbs a light in the THz region, the data are not explained by a conventional spin wave theory. A similar compound,  $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$  was measured with FTIR [2] and the inelastic neutron scattering techniques [3]. From these studies, the in-plane gap, the behavior of magnon branches and the existence of electromagnon have been revealed. However, there still remained incomprehensible things. In this work, we have measured ESR signals of this material in pulsed high magnetic fields of up to 55 T. As a result, electromagnon was observed in this material as well. In addition, we found a gap in the low energy range which had not been observed in  $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ , and other ESR branches in high magnetic fields above 36 T for  $H// [001]$ .

[1] M. Akaki *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 060413(R) (2012).

[2] K. Penc *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 257203 (2012).

[3] M. Soda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 137202 (2010)



### タイトル：マルチフェロイック物質 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ のパルス強磁場 ESR 測定

講演者：森満新<sup>A</sup>, 大久保晋<sup>B</sup>, 櫻井敬博<sup>C</sup>, 原茂生<sup>D</sup>, 太田仁<sup>B</sup>, 山本孟<sup>E</sup>, 東正樹<sup>F</sup>

所属：<sup>A</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>B</sup>神戸大学分子フォトサイエンス研究センター, <sup>C</sup>神戸大学研究基盤センター, <sup>D</sup>島根大学総合科学研究支援センター, <sup>E</sup>東京工業大学大学院総合理工研究科, <sup>F</sup>東京工業大学応用セラミックス研究所

要旨：マルチフェロイック物質として期待される  $\text{BiFe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$  の電子状態を調べるためにパルス強磁場を用いて粉末試料の ESR 測定を行った。

$\text{BiFeO}_3$  はバルクのままで反強磁性と強誘電性の共存が知られている物質でマルチフェロイック物質を生み出す可能性ある母物質として知られている。強誘電転移温度  $T_C=1103\text{K}$ 、反強磁性転移温度  $T_N=634\text{K}$  と室温より高い温度でこれらの状態が共存するため応用に期待されている[1]。

一方、Fe を Co で置換した  $\text{BiCoO}_3$  では常圧相で Co が  $\text{CoO}_6$  八面体の中心から大きく偏心しているが高圧相では八面体内に存在するため、圧力誘起のスピ状態の変化が観測されている[2]。 $\text{BiFeO}_3$  の Fe を Co に置換していくことで、常圧相から高圧相への変化と同様な化学圧力が期待される。混晶物質のスピ状態を調べる目的で今回測定した  $\text{BiFe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$  では結晶構造  $R3c$  をもち、室温から 120K までは G-type の反強磁性秩序をとり、120K 以下では空間変調したスパイラル配置になると報告されている[1]。本研究では、粉末試料の  $\text{BiFe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$  のパルス強磁場 ESR 測定を行い、スピダイナミクスを調べた。温度範囲は 4.2K-265K、周波数範囲は 50GHz-500GHz、最大磁場は 23T でおこなった。用いた試料は高圧合成されたものである。

図 1 は 160GHz における ESR スペクトルの温度依存性である。シャープな吸収線は磁場校正のための DPPH( $g=2.0$ )の吸収線である。スパイラル磁性状態に転移する 120K を境に明瞭なスペクトルの変化と共鳴吸収の磁場が大きく変化することが観測された。各々の温度領域における磁気状態を広範囲な周波数-磁場領域で調べた結果を報告する。

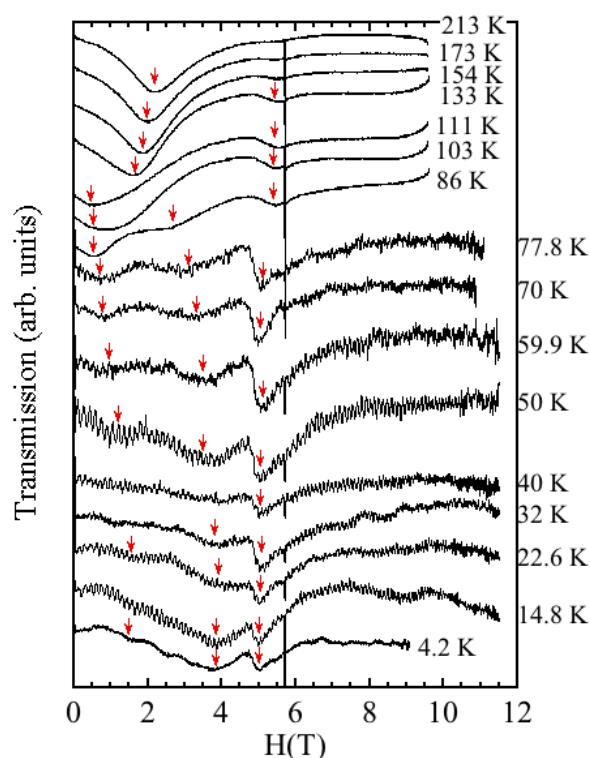


図 1 160GHz における  $\text{BiFe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$  粉末試料の ESR スペクトル

[1] I. Sosnowska, et al., Inorg. Chem. 52 (2013) 13269

[2] K. Oka, et al., J. Am. Chem. Soc. 132 (2010) 9438

## タイトル：希土類金属間化合物 $\text{EuRhSi}_3$ , $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ の強磁場磁性

講演者：名田将人<sup>A</sup>, 杉山清寛<sup>A</sup>, 竹内徹也<sup>B</sup>, 仲村愛<sup>C</sup>, 辺土正人<sup>C</sup>, 仲間隆男<sup>C</sup>, 大貫惇睦<sup>C</sup>, 萩原政幸<sup>A</sup>

所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター, <sup>B</sup>大阪大学低温センター, <sup>C</sup>琉球大学理学部

要旨：今回我々は、正方晶  $I4mm$  結晶構造<sup>[1]</sup>を成す  $\text{EuRhSi}_3$  及び斜方晶  $Ibam$  結晶構造<sup>[2,3]</sup>を成す  $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  の単結晶試料を用いて、各主軸方向の強磁場磁化 ( $B < 45$  T,  $T = 1.5$  K, 4.2 K) を調べた。

過去の磁化率の温度依存性の測定結果<sup>[4]</sup>によれば、 $\text{EuRhSi}_3$  では  $T_N = 47.7$  K,  $T'_N = 44.2$  K において、 $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  では  $T_N = 18.6$  K,  $T'_N = 17.1$  K において、それぞれ2段の逐次相転移を観測している。また高温側ではキュリー・ワイス的な振る舞いを示し、有効磁気モーメントの値から Eu イオンはほぼ2価であることが示唆される。

$\text{EuRhSi}_3$  の強磁場磁化過程 ( $T = 1.5$  K) を図1 (a) に示す。磁化曲線は容易軸異方性を考慮した2副格子の反強磁性体<sup>[5]</sup>として説明できる。しかし、飽和直前に磁化の小さな跳びがあり、更に  $\text{Eu}^{2+}$  (軌道角運動量  $L = 0$ ) にもかかわらず大きな異方性が観測されるなど、単純なモデルでは説明できない点もある。これは、空間反転対称性の破れによる何らかの影響があるものと考えられる。

$\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  の強磁場磁化過程 ( $T = 1.5$  K) を図2 (b) に示す。 $H // a, c$  では多段の転移が見られ、 $H // b$  では飽和直前で僅かに折れ曲がる振る舞いが観測された。磁化曲線及び過去の磁化率の温度依存性は、異方的な振る舞いを無視すれば等構造物質  $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ <sup>[6]</sup> に似た振る舞いである。このことから、 $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  の磁気モーメントは  $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  のような複雑な磁気構造<sup>[7]</sup> を形成していることが考えられる。

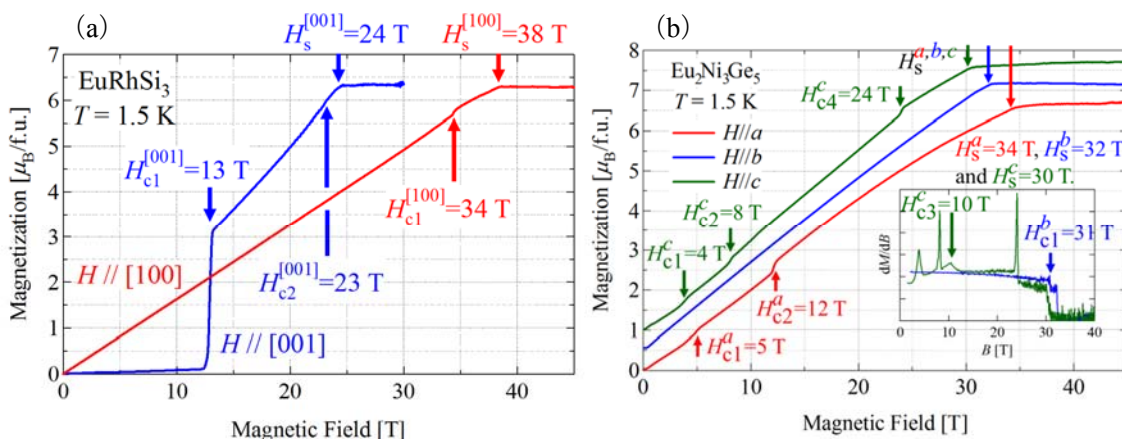


図1 (a)  $\text{EuRhSi}_3$  及び (b)  $\text{Eu}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$  の強磁場磁化過程 ( $T = 1.5$  K)

- [1] O. Bednarchuk *et al.*, *J. Alloys Comp.*, **622**, 432(2015).  
 [2] L. Durivault *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **246**, 366(2002).  
 [3] R. Settai *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76**, 051003(2007).  
 [4] A. Nakamura *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 053701(2015).  
 [5] A. Herpin, *Théorie du magnétisme*(Universitaires de France, 1968).  
 [6] A. Thamizhavel *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **74**, 2843(2005).  
 [7] F. Honda *et al.*, *J. Alloys Comp.*, **451**, 504(2008).

## 50T パルス強磁場発生用電源制御部の自作

飯田賢斗<sup>A</sup>, 石打翔馬<sup>A</sup>, 野口悟<sup>A,B</sup>, 石田武和<sup>A</sup><sup>A</sup>大阪府立大学工学研究科, <sup>B</sup>大阪府立大学 21 世紀科学研究機構

我々は、2013 年末に 15 kV, 250 kJ のコンデンサバンクとサイリスタスタックが移設されたのを機に、内径 30Φ、温度 0.1 K、最高磁場 50 T を目標とするパルス強磁場装置のスケールアップに着手し、ピーク磁場に到達する立ち上がり時間 1 ms、最大磁場 42.8 T のパルス磁場を 7.2 kV 充電にて発生させることに成功した[1]。その際、移設電源は充電回路、接地回路、放電回路が整備されていなかったため、これらの必要不可欠な回路を自作し、パルス強磁場発生電源として完成させた。本講演ではこれらの詳細について発表する。

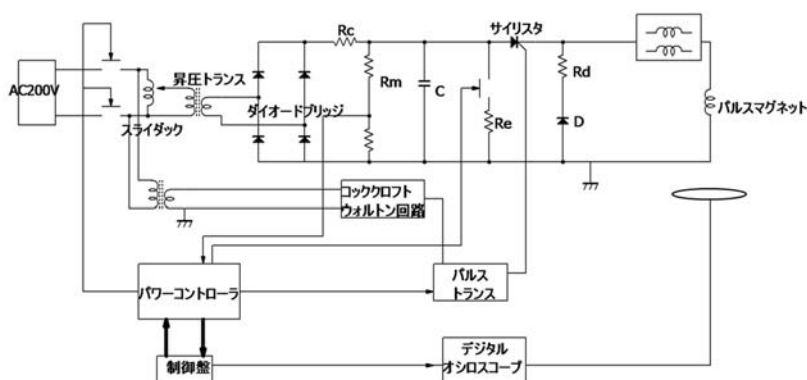
充電回路はスライダック、昇圧トランス（治部電機製、15 kV, 4 kVA）、ダイオードブリッジ（RS4FS 20ヶ直列×4）、充電抵抗（エレマ 25 kΩ）からなる。充電抵抗のエネルギー容量が小さく充電時の発熱が大きいため、現在、放射温度計を用いて非接触で充

電抵抗の温度を随時モニターしている。接地回路の高圧リレーは Ross 社製（E-25-NC）を用いている。放電回路はサイリスタとトリガパルス回路およびクローバ回路が移設されていたが、パルストランスを駆動するための充電回路（200 V, 300 V）がなかった。そこで、コッククロフトウォルトン回路を自作した。トリガ信号回路は矩形パルス発生 IC（TC4538BP）を組み込んだ。充電電圧モニタは高圧抵抗（SRT 社製 HVR40 10MΩ×10+100 kΩ）で 1/1000 倍した電圧をメータリレー（敦賀電機製）でモニターしている。これら回路の制御をユニットにまとめコンデンサバンクの一角に設置した。このユニットは 10 m の光ファイバー 5 本を用いて、人が操作する制御盤と接続されるが、電気的には絶縁される。現在、制御盤は旧電源用のものを使用している。

今回の移設電源には保護回路用にインダクタ（0.68 mH×2）が付属されている。これを直列、並列、短絡接続することによって、主回路のインダクタンスを変え、パルス幅を変えることが容易になった。これにより、SUS クライオスタットを挿入する際はパルス幅を長くするなどのオプションを選択でき、測定信頼性も増すと考えられる。

現在、40 T の磁場発生を連発したため、コイルの上端部が切れ、壊れてしまっている。物性研の協力を得て、新たにコイルを作製し、50 T の磁場達成を目指しているところである。

[1] 飯田賢斗、他 日本物理学会 2015 年秋季大会 16aPS-116.

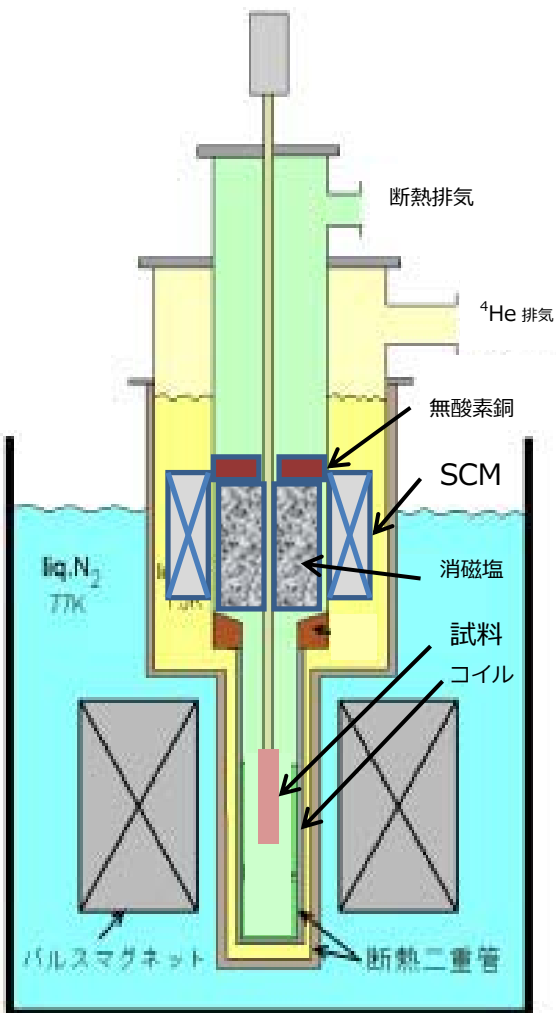


## 50T パルス強磁場用断熱消磁クライオスタットの設計、試作

石打翔馬<sup>A</sup>, 飯田賢斗<sup>A</sup>, 野口悟<sup>A,B</sup>, 石田武和<sup>A</sup><sup>A</sup>大阪府立大学工学研究科, <sup>B</sup>大阪府立大学 21 世紀科学研究機構

パルス強磁場実験は誘導電流や磁気熱量効果による温度変化などの副次効果があり、特に 1 K 以下の極低温データが極端に少ない。希釈冷凍機とパルス強磁場との組み合わせは、万一破壊した時の損失が極めて大きいという事情もある。一方、20 テスラ以上の磁場を「手軽」に得るためにはパルス強磁場しかなく、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。我々はこれまで  $^3\text{He}$  とパルス磁場を組み合わせ、37 テスラ、0.4 K の極限環境で磁化測定を行ってきたが、最近 250 kJ コンデンサバンクを入手し、内径 30  $\Phi$ 、温度 0.1 K、最高磁場 50 T を目標とするパルス強磁場装置のスケールアップに着手した[1]。本講演では特に、常磁性塩の断熱消磁法により  $^3\text{He}$  を使用しないで 0.1 K を実現するクライオスタットの設計、試作について発表する。

ミリ秒以下のパルス強磁場は 40 T 以上を目安に強磁場発生空間には金属材料が使えないため、クライオスタット胴体部はステンレスを用い、パルスコイルに挿入する先端部は FRP とする。断熱消磁部とパルスマグネットは磁氣的に干渉しないように距離 (~300 mm) を取る必要がある。そのため消磁塩と試料部の冷熱伝達技術を開発しなければならない。これらの課題を念頭に概略図に示すようなクライオスタットを設計しているところである。現在、超流動ヘリウムがリークしない FRP とステンレス管の気密接合を設計、試作している。外径 10  $\Phi$  内径 5  $\Phi$  の FRP パイプの断面をゲージポート状のステンレスフランジにインジウムシールで圧着した断熱管を作製し、液体ヘリウム中で気密を調べたところ、1.5 K まで漏れず、即ち、この方式でスーパーリークがないことを確認した。今後は熱サイクルにおける信頼性などのデータを積み上げる予定である。



[1] 飯田賢斗、他 日本物理学会 2015 年秋季大会 16aPS-116.

## タイトル：ジャイロトロン光源を用いた強磁場パルス ESR の開発

講演者：梅垣知弘, 成岡夢有, 柘木健志, 光藤誠太郎, 立松芳典

所属：福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨：パルス ESR (Electron Spin Resonance) は電子スピンの動的性質を調べるために有効な手法である。近年、電子スピンの動的性質は量子コンピュータや巨大タンパク質の構造解析などにとって重要な情報となっている。そこで、より高度な解析を可能とするためにパルス ESR の高周波化が進められている。本研究では、パルス ESR に必要な高出力・高周波光源としてジャイロトロン(Gyrotron FU CW VIIA)を用いることにより、研究室レベルで利用可能な高周波パルス ESR 装置の開発を行っている。

ジャイロトロンの高出力ミリ波をパルス ESR に必要な、数ナノ秒程度のコヒーレントな超短パルスとして取り出す光駆動半導体スイッチを開発した。次にこの成形したパルスを超伝導磁石(17 T 超伝導マグネット)に設置された ESR プロブまで伝送する準光学伝送システムの設計を行った。図 1 に設計した準光学伝送系を示す。MOU-I(Matching Optics Unit)により長距離伝送に有利なビーム形状に変換し、QOT(Quasi-Optics Transmission line)により同形状の楕円体鏡でビームを伝送する。MOU-II を用いて ESR プロブとの結合に適した形に変換するシステムとなっている。

光駆動半導体スイッチから出力される超短パルスは、ウエストサイズ  $W_0 = 11.8$  mm のガウシアンビームであり、MOU-I によって  $W_0 = 15.0$  mm のビーム径にすることで、QOT では 5×7 インチの大きさのミラー一枚でビームを 70 cm 飛ばすことができるように設計されている。

MOU-II は QOT により伝送されたビームを ESR プロブである  $\phi = 18$  mm の円形コルゲート導波管に結合し、17 T 超伝導マグネット内に電磁波を導く構造になっている。MOU-II の設計には QOT から出力されるビームを IR カメラにより測定し、実測結果から行う必要がある。

そこで、QOT の最終ミラーからのガウシアンビームを測定した様子を図 2 に示す。設計値  $W_0 = 15.0$  mm,  $d = 350$  mm に対して、実験結果から x 軸方向  $W_0 = 15.4$  mm,  $d = 301$  mm, y 軸方向  $W_0 = 14.9$  mm,  $d = 323$  mm を得た。ほぼ設計通りのビーム伝送が行われていることがわかる。この計測結果から MOU-II の鏡面設計を行い、ESR プロブ結合時に修正を行う。

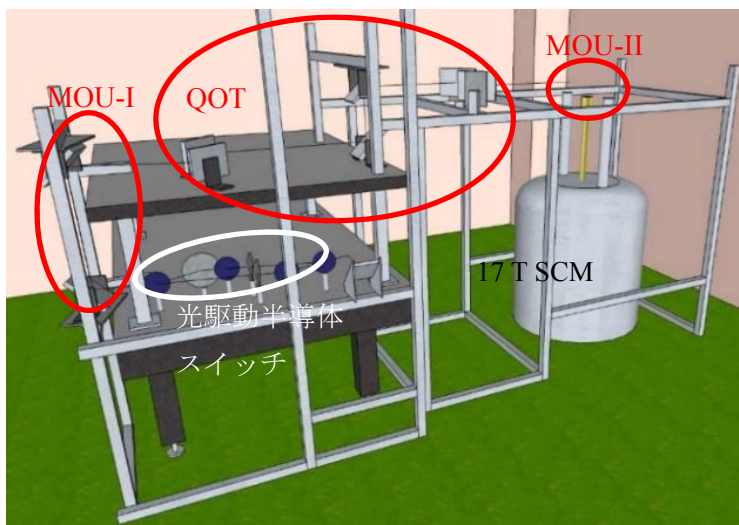


図 1 光駆動半導体スイッチから ESR プロブまでの伝送系。

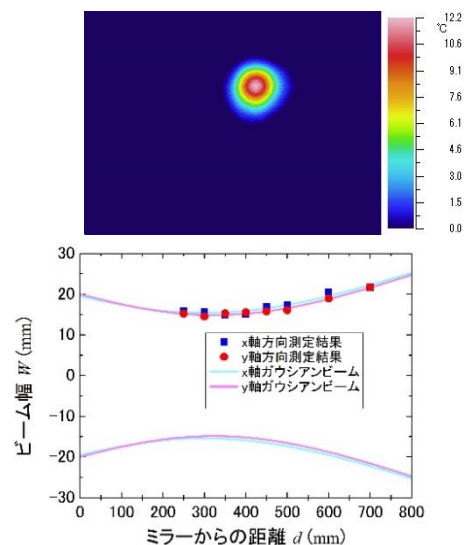


図 2 QOT の最終ミラーからのガウシアンビームの様子。



**タイトル：高強度光源ジャイロトロンを用いた高圧下強磁場 ESR 装置開発の現状**  
**Present status of high-field ESR apparatus under high pressure using a Gyrotron**

講演者：高田篤<sup>A</sup>, 両条玲児<sup>A</sup>, 赤木暢<sup>A</sup>, 木田孝則<sup>A</sup>, 小川勇<sup>B</sup>, 出原敏孝<sup>B</sup>, 光藤誠太郎<sup>B</sup>, 藤井裕<sup>B</sup>, 萩原政幸<sup>A</sup>

所属：<sup>A</sup>大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター,<sup>B</sup>福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨：

強磁場、超高圧、極低温などの極限環境を組み合わせた複合極限環境下では、常圧、低磁場では予想もしなかった磁気状態や相の発現が期待される。電子スピン共鳴(ESR)測定では物質の電子状態や磁気状態について多くの情報を得ることができる。これまでにピストンシリンダーを用いた圧力下での ESR 測定装置が神戸大の太田グループで開発されて 2.5 GPa までの圧力下での測定が可能となっている。しかし、ダイヤモンドアンビル型圧力セルを用いた 3 GPa 以上の高圧力下での ESR 測定は、その小さな試料空間のために弱い電磁波では測定が困難であり、未踏の領域である。そのため高強度・多周波数光源として使用できる遠赤外領域光源ジャイロトロンを用いた高圧下強磁場 ESR 測定装置の開発を目指している。図 1 が開発する装置の概略図である。高出力遠赤外領域光源ジャイロトロンからの電磁波をワイドボアパルスマグネット内に設置したダイヤモンドアンビル型圧力セル内に導入し検出するというものである。図 2 には福井大より借りて設置したジャイロトロン FU II での超伝導マグネットの磁場をスイープして行った発振テストの結果を示す。これまでの開発の現状を報告する。

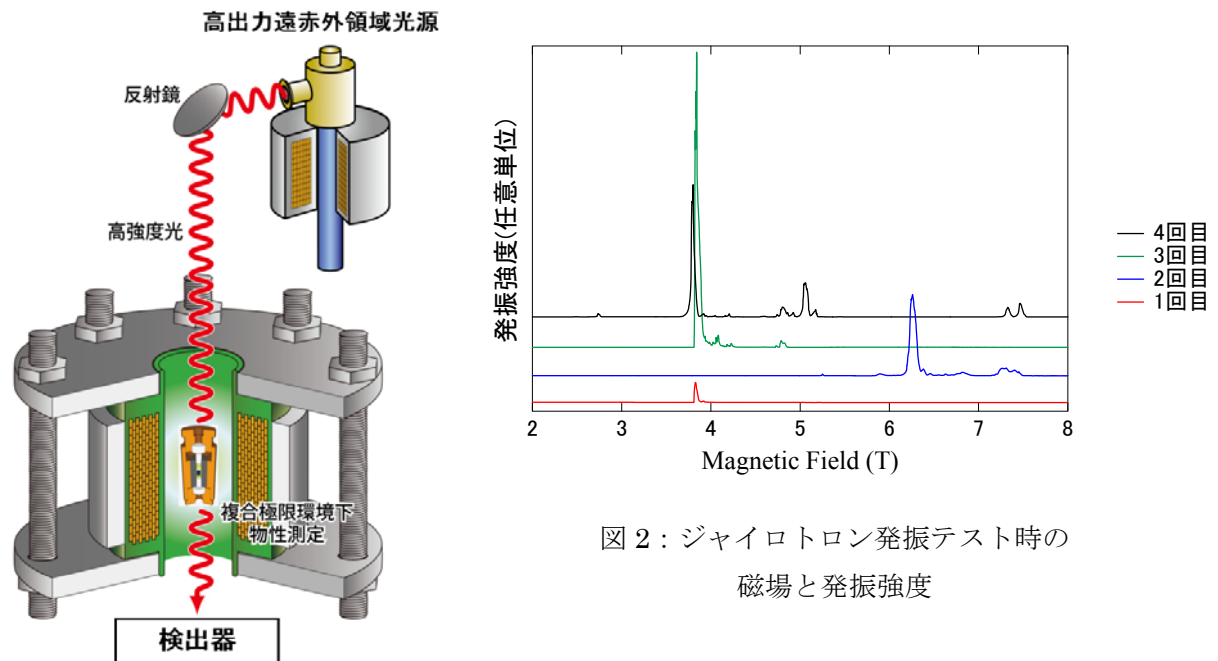


図 2：ジャイロトロン発振テスト時の磁場と発振強度

図 1：複合極限環境下での物性測定概略図

**Si:Pの動的核偏極 NMR 測定を目指した装置開発**

講演者：小森剛<sup>A</sup>, 森本和也<sup>A</sup>, 藤井裕<sup>B</sup>, 光藤誠太郎<sup>B</sup>, 水崎隆雄<sup>B</sup>, 石川裕也<sup>A</sup>, 大矢健太<sup>A</sup>, 菊池彦光<sup>A</sup>, 福田昭<sup>C</sup>, 松原明<sup>D</sup>, Soonchil Lee<sup>E</sup>, Sergey Vasiliev<sup>F</sup>

所属：<sup>A</sup>福井大学工学部, <sup>B</sup>福井大学遠赤外領域開発研究センター, <sup>C</sup>兵庫医科大学物理, <sup>D</sup>京都大学低温物質科学研究センター, <sup>E</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), <sup>F</sup>University of Turku, Finland

要旨：現在、数ある量子コンピューターのモデルの中でも量子ビットのコヒーレンス時間と拡張性の点で有利とされているのがシリコン結晶中に希薄ドーパされた<sup>31</sup>Pを量子ビットとするKaneのモデルである [1]。モデル実現のためには、数テスラ程度の強磁場かつ0.3 K以下の超低温で電子スピンを完全に偏極させなければならない。希薄リンドーパシリコン(Si:P)に関する多くの研究がなされてきているが、Kaneモデルの実験的デモンストレーションには成功していない。現在の問題点は、<sup>31</sup>P核スピンの希薄で極低温での核スピン緩和時間が長いために、<sup>31</sup>Pの核磁気共鳴(NMR)の信号がこれまで検出されておらず、強磁場・極低温で電子スピンを完全に偏極する条件での動的核偏極(DNP, Dynamic Nuclear Polarization)を含むスピンドYNAMICSを支配する機構について未解明な部分が多いことである。

最近、我々はミリ波帯の電子スピン共鳴(ESR)測定から、DNP効果により<sup>31</sup>P原子核スピンの偏極の大きさが数百倍増大することを発見した[2]。このことは数百倍のNMR信号の増大を意味し、DNPを用いてSi:Pの<sup>31</sup>P-NMR信号を検出できる可能性がある。そこで、我々は液体ヘリウム温度でESRとNMRを同時に測定できる二重磁気共鳴装置を開発した。これを用いてESR測定中にNMRパルス照射して、核スピン偏極が変化することを観測した[3]。我々はさらに超低温下で<sup>31</sup>P-NMRを直接測定するために、福井大学において<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He希釈冷凍機を用いた高周波ESR/NMR装置の開発を行っている。ESR測定のため、ホモダイン検波システムを構築した。発振源としてBWOおよびGunn発振器を用い、約1.5 Kに冷やされたInSb検出器で検出する。試料はフアブリ・ペロー型共振器に入れられる。

準備実験として、このシステムを用いて、リン濃度 $6.52 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ のSi:PのESR測定を行ったところ、よく知られた約4 mTに分裂した2本のESR吸収線が得られたが、S/N比が悪かった。共振器の共振を希釈冷凍機中で正確にあわせられなかったことが要因のひとつであろうと考え、ヘリウム温度で共振器のQ-dipを正確に捉えるために、カラスデュワーを用いて液体ヘリウム温度まで測定可能な簡易測定システムを作製し、低温まで共振特性の変化を調べた。本講演では、装置の性能を評価するためにDPPHのESR測定を行った結果も示す。

[1] B. E. Kane, *Nature*, **133**, (1998) 393.

[2] M. Song *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter*, **22**, (2010) 206001.

[3] Y. Fujii *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **568**, (2015) 042005.

**Title :** Development of an Apparatus for Contactless Transport Measurement using Proximity Detector Oscillator under High Pressure and High Magnetic Fields

Presenter: Time Tahara<sup>1</sup>, Junji Kanazawa<sup>1</sup>, Takanori Kida<sup>1</sup>, Tomoko Kagayama<sup>2</sup>, Katsuya Shimizu<sup>2</sup>, Yoshizaki Mizuguchi<sup>3</sup>, Yoshihiko Takano<sup>4</sup>, Masayuki Hagiwara<sup>1</sup>  
 Affiliation: <sup>1</sup>AHMF; <sup>2</sup>Kyokugen Center, Osaka Univ.; <sup>3</sup>Electrical & Electronic Eng., Tokyo Metropolitan Univ.; <sup>4</sup>NIMS.

Abstract : Radio frequency (rf) techniques utilizing a simple LCR circuit is quite useful in transport measurements under high pressure due to the contactless configuration of a compact searching coil and the extremely high sensitivity (1). In the present study, we have developed a contactless conductivity measurement apparatus utilizing an rf oscillator based on a proximity detector circuit (2) under high pressure and high magnetic fields. High pressures of up to 6 GPa are generated with a diamond anvil cell (DAC) made of Ni-Cr-Al alloys with a stainless steel gasket. High magnetic fields of up to 40 T are generated with a non-destructive pulse magnet (duration time  $\sim 40$  ms). Utilizing this apparatus, we measured the frequency change to determine the upper critical fields ( $H_{c2}$ ) of the 11-type iron-based superconductors  $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ . At ambient pressure,  $H_{c2}(T)$  for  $H \parallel c$  was almost linear against  $T$  near  $T_c$  ( $\sim 14$  K). Similar results of  $H_{c2}(T)$  have been reported for other 11-type iron-based superconductors. Under high pressure, suppression of the  $H_{c2}(T)$  at low temperatures became more pronounced. However, we found that the effect of the eddy current heating from the gasket cannot be negligible during field descending process. In Fig.1(b), the large hysteresis loops and anomalous vibrations which are not seen in Fig.1(a) are appeared. It is necessary to develop non-metallic gaskets for preventing the Joule's heating.

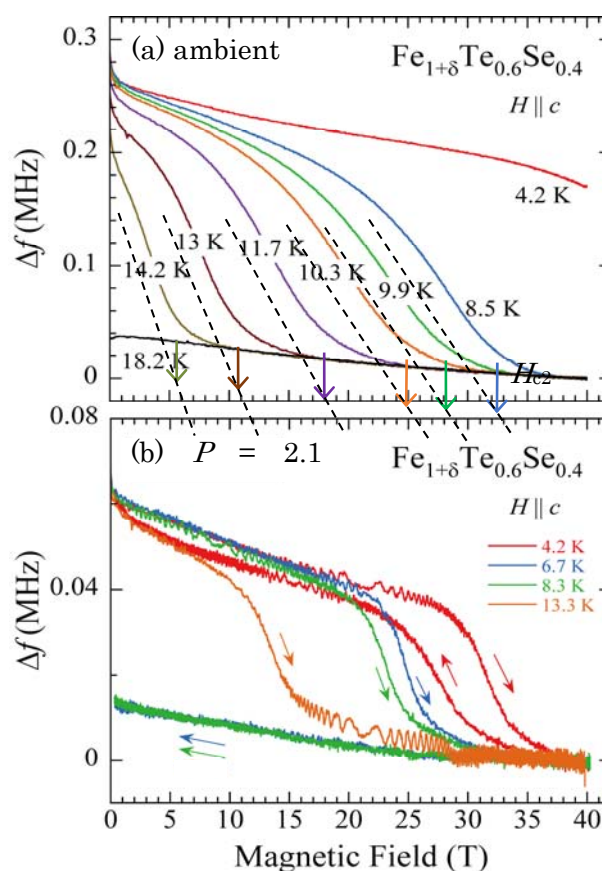


Fig. 1: Frequency response for the critical magnetic field behavior of  $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  at (a) ambient pressure (arrows show  $H_{c2}$ ), and (b)  $P = 2.1$  GPa.

(1) Kanazawa, J. *Master's thesis*, Osaka University 2015.

(2) Altarawneh, M. M.; Mielke, C. H.; Brooks, J. S. *Rev. Sci. Instrum.* **2009**, *80*, 066104.



**タイトル：磁化検出高周波 ESR 測定法の高感度化**講演者：岡本翔<sup>A</sup>，高橋英幸<sup>B</sup>，櫻井敬博<sup>C</sup>，大道英二<sup>A</sup>，太田仁<sup>D</sup>所属：<sup>A</sup>神戸大学大学院理学研究科，<sup>B</sup>神戸大学自然科学系先端融合研究環，<sup>C</sup>神戸大学研究基盤センター，<sup>D</sup>神戸大学分子フォトサイエンス研究センター

要旨：ミリ波、テラヘルツ波領域における高周波 ESR 測定には高い  $g$  値分解能、ゼロ磁場ギャップの観測等の大きな利点がある。また、多周波数測定からスピン系のミクロスコピックな情報をより詳細に得ることができる。高周波 ESR 法では通常、透過法が用いられているが、我々のグループでは磁化検出型の高周波 ESR 測定装置の開発も進めている。この方法では、ESR 吸収に伴う測定試料の縦磁化の変化を検出することにより ESR 信号の観測を行うものである。現在、我々のグループでは、2 種類の磁化検出型測定装置を開発している。本講演では、我々の磁化検出高周波 ESR 測定装置の詳細や、特に最近取り組んだマイクロカンチレバーを用いた手法の高感度化について報告する。

ミリ波、テラヘルツ波の高周波数領域では強い電磁波の強度を得ることが難しい。そのため、スピン濃度の薄いタンパク質等の試料を ESR 測定する場合は、スピン数を稼ぐために 10 mg オーダー程度の多量の試料が必要である。このような問題を解決するため、我々のグループではマイクロカンチレバーを用いた高周波 ESR 測定法を開発を進めている[1-3]。この手法を用いることで、これまでに  $10^9$  spins/gauss という高いスピン感度を得ている。また最近では、およそ 1.1 THz までのテラヘルツ領域における ESR 測定にも成功している[4]。この手法では、10 ng ~ 10  $\mu$ g オーダーの微量試料をマイクロカンチレバーの先端に載せ、温度 4.2 K の磁場中で高周波電磁波を照射する。ESR 吸収が起こると試料の縦磁化成分が変化するため、試料付近に設置した勾配磁石により磁場勾配力が試料にはたらく。この微小な力をマイクロカンチレバーのたわみの変化に変換して ESR 信号を検出することができる[5]。

また、もう一つの磁化検出型の測定法として、SQUID 磁束計を用いた高周波 ESR 測定法を開発している[6]。この手法では、試料に磁場中で電磁波を照射しながら、ESR 吸収に伴う磁化の変化を SQUID 磁束計により検出するものである。この手法の特長は、磁化の絶対値を測定できることにあり、共鳴時のスピンの分布数変化を容易にかつ定量的に知ることができる。

SQUID 磁束計を用いた高周波 ESR 測定装置を用いて、Fe<sup>3+</sup>イオンを持つヘミンの粉末試料の ESR 測定を行った。測定温度は 4.2 K であり、70 GHz ~ 160 GHz の周波数範囲で多周波数測定を行った。 $g \sim 6$  付近にメインのピークをもち、 $g$  値が 2~6 に分布するパウダーパターンが得られた。スピン感度は 130 GHz において  $10^{12}$  spins/gauss と見積もられた。

また、マイクロカンチレバーを用いた ESR 測定では、より微量のヘミンおよび他の金属ポルフィリン錯体に対して適用し、ESR 信号の検出に成功した。講演ではその結果について詳細に報告する予定である。

[1] E. Ohmichi, N. Mizuno, M. Kimata, and H. Ohta, Rev. Sci. Instrum., **79**, 103903/1-5 (2008).

[2] E. Ohmichi, N. Mizuno, M. Kimata, H. Ohta, and T. Osada, Rev. Sci. Instrum., **80**, 013904/1-5 (2009).

[3] E. Ohmichi, S. Hirano, M. Kimata, and H. Ohta, J. Mag. Res., **227**, 9-13 (2013).

[4] H. Takahashi, E. Ohmichi, and H. Ohta, Appl. Phys. Lett., **107**, 182405 (2015).

[5] Y. Tokuda, D. Tsubokura, E. Ohmichi, and H. Ohta, J. Magnetism, **18**(2), 173-177, (2013).

[6] T. Sakurai, K. Fujimoto, S. Okubo, H. Ohta, and Y. Uwatoko, J. Magnetism, **18**(2), 168-172, (2013).

## タイトル：Magnet on cantilever 型 ESR 測定装置の改良

講演者：宮崎 晃和<sup>A</sup>、大道英二<sup>A</sup>、太田仁<sup>B</sup>、

所属：<sup>A</sup>神戸大学大学院理学研究科物理学専攻、<sup>B</sup>神戸大学 分子フォトサイエンス研究センター

要旨：我々のグループではカンチレバーを用いた高周波 ESR 測定装置の開発を行っている。これまでの測定ではカンチレバー上にのせた試料の ESR 吸収に伴う磁化変化をカンチレバーのたわみとして検出していた。しかし、磁気共鳴力顕微鏡 (MRFM) のように空間分解能を有した顕微鏡としての動作を行う場合には、磁場勾配を発生する磁気チップをカンチレバー上に配置し、そのカンチレバーを試料上で走査する必要がある。そのため、本研究では高周波領域で動作する MRFM の開発を念頭に置き、磁気チップをカンチレバーに載せる配置 (Magnet-on-cantilever 配置) における ESR 測定法の開発を行った。

高磁場領域ではカンチレバーに付けた磁気チップが磁場から強い力を受けカンチレバーの機械的特性に影響を及ぼすことが知られている。そのため、本研究はまず磁気チップの性能評価を行った。本研究では磁気チップの材料としてストロンチウムヘキサフェライト、ネオジム磁石の二種について着目した。それぞれの材料について異なる大きさの磁気チップをカンチレバーに取り付けて磁気トルク測定を行い、磁場中でカンチレバーに与える影響について調べた。また、それぞれの材料について SQUID 磁束計を用いて磁化曲線を測定した。

また、図 1 のように Magnet-on-cantilever 配置における ESR 測定用カンチレバーホルダーを作製した。カンチレバーの変位は光ファイバー光学系を用いた Fabry-Perot 干渉計により高い感度で測定を行うことができる。また、光源として波長可変レーザーを用いており波長を変えることでキャビティ長を実効的に変えることが可能となっている。そのため、駆動部分がなく  $\phi 17$  の試料空間に収まるサイズにまで省スペース化することに成功した。

これらの装置を用いて ESR の標準試料である DPPH(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)を用いた ESR 測定を行った。その結果、80,90,105 GHz において DPPH に起因する ESR 信号の検出に成功した。

今後は MRFM としての動作を目指して、ピエゾアクチュエータを用いた xyz 軸可動カンチレバーステージと組み合わせる予定である。本講演では実際に作成した装置についての詳細な説明及び実験の結果、今後の展望について紹介する。



図 1 Magnet-on-cantilever 配置における ESR 測定用カンチレバーホルダー

**タイトル：超高感度 ESR 測定に向けたカスタムカンチレバーの作製と性能評価**講演者：三木俊裕<sup>A</sup>，岡本翔<sup>A</sup>，大道英二<sup>A</sup>，太田仁<sup>B</sup>所属：<sup>A</sup>神戸大学大学院理学研究科，<sup>B</sup>神戸大学分子フォトサイエンス研究センター

要旨：ESR 測定法の一つにマイクロカンチレバーを用いた測定法がある。ESR 吸収に伴う磁化の変化によってカンチレバーに作用するトルクや力が変化し、カンチレバーは変位する。この変位を測定することによって高感度の ESR 測定が可能になる。

本研究では超高感度 ESR 測定に向けて、微細加工技術を用いてマイクロカンチレバーを自作した。市販のカンチレバーには固有振動数やバネ定数に制限があるが、測定に応じたカンチレバーを自作することでさらなる高感度測定が可能となる。本研究ではレーザーとの干渉によりカンチレバーの変位を検出する Fabry-Perot 型 (図 1) とキャパシタンスの変化によって変位を検出する静電容量型 (図 2) の 2 種類のカンチレバーを作製した。SOI(silicon-on-insulator)基板を両面加工プロセスで加工することにより、これらのカンチレバーは作製される。

Fabry-Perot 型については厚さが 2  $\mu\text{m}$  と 0.3  $\mu\text{m}$  の種類のカンチレバーを作製した。一般にカンチレバーは薄いほどバネ定数が小さくなるので高感度の測定が期待される。厚さ 2  $\mu\text{m}$  のカンチレバーでは熱振動スペクトルの観測に成功し、Fabry-Perot 型カンチレバーとして機能することを確認した。また DPPH をサンプルとして実際に 4.2 K で ESR 測定を行い、80、90、105GHz の周波数で ESR スペクトルの測定に成功した。一方、0.3  $\mu\text{m}$  のカンチレバーは薄すぎるためにレバーが大きく反っており Fabry-Perot 型としての実装には更なる改良が必要である。

本研究会では自作カンチレバーの開発について現状と今後の方向性について発表する。

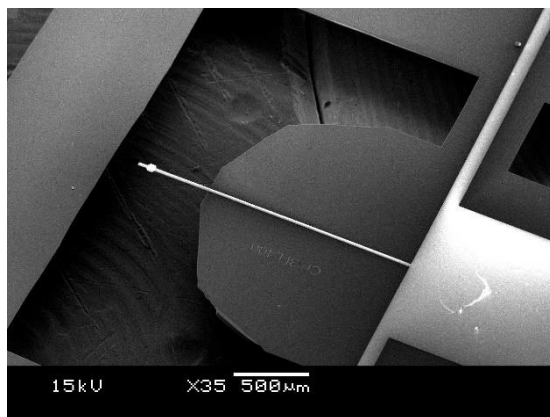


図 1：Fabry-Perot 型カンチレバー

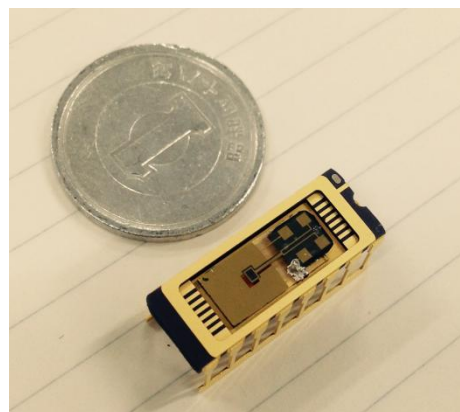


図 2：静電容量型カンチレバー