Session 1-1 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016 年 9 月 12 日 福井大学)

タイトル:福井大学における遠赤外ジャイロトロン開発とその応用

講演者: 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:福井大学遠赤外領域開発研究センター(以下遠赤センター)で開発したジャイロトロンと、 それを用いた応用研究のいくつかを紹介する。

ジャイロトロンは、相対論的効果による電子の質量変化を利用したサイクロトロン共鳴メ ーザー原理を応用した発振管であり、元々はプラズマ科学・核融合分野における電子加熱の 手段として開発され、周波数 100 GHz 程度で出力が 1MW にも達する大電力ジャイロトロン が実現された。一方、遠赤センターでは、核融合への応用とは別に、独自に高周波数ジャイ ロトロンの開発を行い、世界で初めてジャイロトロンで 1 THz のブレークスルーを達成し た。その後、ジャイロトロン開発の目的を、単なる高周波数化から、いろいろな分野への応 用を見据えたジャイロトロンの開発へと舵を切り、ジャイロトロンの高出力化・高効率化、モ ードコンバータ内蔵によるガウスビーム出力、周波数の連続可変、長時間の出力安定化等を実現 してきた。

ジャイロトロンの特徴は、ミリ波・サブミリ波を含む遠赤外領域での他の発振器に比べて 発振出力が桁違いに大きいことである。通常の電子デバイスではせいぜい 1W 程度の出力し か出ないのに対し、ジャイロトロンは kW、MW を達成できる。このような大電力光源は、 いろいろな研究に応用できる。電磁波応用の特徴は、迅速に加熱できること、表面からの加 熱ではなく物質の内部から直接加熱できること、用いる周波数を選ぶことにより物質を選択 的に加熱できること等がある。また、加熱の方法も、誘電損失、磁気損失、ジュール損失な どがあり、応用対象によって、電磁波の電気的作用が寄与するもの、磁気的作用が寄与する ものに分けられる。遠赤センターで開発したジャイロトロンは、すでにいろいろな分野での 応用に利用されている。加熱効果を用いた新素材開発や医療応用や、スピン共鳴やエネルギ 一準位間遷移といった量子力学の世界での応用もある。特に 300 GHz の発振を用いて ESR 信号を得た他、ESR を引き起こす周波数をもつ大電力電磁波を照射して、電子スピン系を飽 和近くまで励起し、電子スピン系の大きな偏極を核スピンに移すことで核磁気共鳴(NMR) の感度を大幅にあげる DNP-NMR の実験や、世界で初めてのポジトロニウムの超微細構造の エネルギー準位の直接計測は、ジャイロトロンならではのユニークな応用研究である。現在 準備研究が進行中の応用課題として、ジャイロトロンを光源としたパルス ESR や、核融合 研究所の大型ヘリカル装置(LHD)での協同トムソン散乱計測がある。

Session 1-2 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016 年 9 月 12 日 福井大学)

タイトル:ジャイロトロン制御の自動化へ向けた遠隔操作および監視機器の 開発

講演者:山口裕資

所属:福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨:福井大学において、サブテラヘルツ~テラヘルツ帯で動作する高周波ジャイロトロンの研 究開発が進められている.近年、高周波数化や高出力化に加え、ガウスビームを出力するモード 変換器の内蔵、周波数の連続的あるいは段階的可変性の付加、電子ビームの高性能化、また出力 の安定化等を目指した要素技術の研究に大きな進歩が得られている.これらのジャイロトロンの 高度化に伴い、応用展開も進展しつつある.

今後,ジャイロトロンを様々な応用分野へ浸透させる為には,より使い勝手の良い装置とする ことが求められる.ジャイロトロンの運転には,電子管の排気,強磁場の発生,電子ビームの生 成と加速,コレクタの除熱,パルス形成,出力波の制御が必要となる.特に,運転状況によって 大きく変化しうる状態量の遷移を適切に管理するためには,状態量の理解に加え,複雑な運転操 作への熟練が求められる.現状では,複数の運転員が,協力して操作を行うことが多い.それで も,わずかな操作ミスや,予見の困難な不安定性等の発生により,発振管の損傷を完全に回避す る事が難しい場合もある.

この様な状況に鑑みて、本研究では、ジャイロトロンを簡単かつ安全に運転するために、系の 状態遷移の監視と合理性の評価、ならびに運転操作の自動化を可能とする機器の開発を目的とし た.まず、現場での単独操作に限られていた電源装置群を、計算機により統括的に遠隔操作でき る制御系統を整備した.具体的には、制御・計測システム構築の統合環境 LabVIEW を導入し、 アナログーデジタル (AD) 変換器を介して電源装置の動作を制御可能とした.また、AD 変換 器により状態量を計測・収集し、安全に運転するためのインタロックや操作量を制限する機能も 備えた.ほぼ全ての操作量と状態量について、その時間変化を計算機のモニタ上に集約表示し、 視認性を高めた.加えて、簡単なマウス操作とキーボードの数値入力によりジャイロトロンの運 転を可能とする、インタフェースを構築した.

多くの操作を要するジャイロトロンの起動時には、フィードフォワード制御により、操作量の 調節を補助する.また定常運転時には、フィードバック (PID) 制御 [1-2] により、系の安定性 を確保する.異常(真空劣化、冷却水の不足、電子ビーム不安定性等)の発生に際しては、発振 パルスを自動停止し管の損傷を防止するとともに、異常個所を明示する.ジャイロトロンの停止 操作については、発振管によらず共通操作が多いため、ほぼ自動化することに成功した.また全 ての操作量と状態量の時間変化は、モニタ表示とともにテキスト形式でも記録されるため、発振 特性の解析にも有用である.

これまで運用試験を行い,上記すべての動作を確認した.今後は,高速の AD 変換器の導入, PID 制御の最適化により,制御の高速化を図る計画である.

[1] T. Idehara, et al., J. Infrared MilliTerahz Waves 35, 159-168 (2014)

[2] E. M. Khutoryan, et al., J. Infrared MilliTerahz Waves 36, 1157-1163 (2015).

Session 2-1 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016 年 9 月 12 日 福井大学)

タイトル:カンチレバーを用いた磁気共鳴法の現状

講演者:大道英二

所属:神戸大学大学院理学研究科

要旨:神戸大学では、微小試料の高周波 ESR 測定を可能にするという目的でマイクロカンチレ バーを用いた新しい測定法の開発を進めてきた [1]。これまでにトルク検出による測定では 1.1 THz [2]、磁化検出による方法では 0.5 THz [3,4]にまで周波数領域を拡張することに成功してきた。 目的とするヘモグロビンなど金属タンパク質の検出には未だ至っていないが、大きなダイナミッ クレンジを持った測定系を構築し[5]、モデル物質である金属ポルフィリン錯体での ESR 信号の 検出には成功している。これらの錯体は金属タンパク質に比べると 100 倍程度分子量が小さいこ とから、金属タンパク質の信号検出にはあとさらに 1-2 桁の感度向上が必要である。我々のグル ープでは以前から半導体微細加工技術を用いてマイクロカンチレバーを自作しており、すでに厚 さが 300 nm のカンチレバーの作製にも成功している[6]。今後は、こういった超低バネ定数カン チレバーを実際の測定に導入していくことを予定している。

また、核磁気共鳴(NMR)は電子スピン共鳴と同様の原理で信号が検出できることから、最 近、マイクロカンチレバーを用いた NMR 測定の開発にも着手している[7]。核スピンは電子スピ ンに比べ低温での緩和時間が長いことから、ESR 測定とは異なり RF 周波数を共鳴磁場付近で素 早く掃引することにより断熱的にスピン反転させることで磁化の変化を検出する。任意波形 RF 信号発生モジュールや信号検出系についてはすでに構築済であり、今後は適当な試料に対して、 NMR 信号の検出を行う予定である。また、我々のグループではミリ波と RF の両方を用いた測 定系を構築できることから、将来的には動的核偏極 (DNP)による NMR 信号の増強を可能にし たいと考えている。

講演では、神戸大学におけるカンチレバーを用いた新しい磁気共鳴手法開発の現状について報告し、現時点での課題や今後の展望について議論したい。

- [1] E. Ohmichi et al., Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 073904/1-8.
- [2] H. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett. 107 (2015) 182405/1-3.
- [3] E. Ohmichi et al., to appear in J. Inorg. Biochem. (2016).
- [4] T. Okamoto et al., to appear in J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (2016).
- [5] H. Takahashi et al., arXiv:1607.06112.
- [6] E. Ohmichi et al., Journal of Magnetics 18 (2013) 163-167.
- [7] H. Takahashi, unpublished.

Session 3-1 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016 年 9 月 12 日 福井大学)

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開発の 現状

講演者:^A萩原政幸、A高田篤、A木田孝則、A赤木暢、B櫻井敬博、C大木瑛登、C太田仁 所属:A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、B神戸大学研究基盤セン ター、C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(ESR)は、磁性体の研究において異方性、g 値、磁気秩序状態などに関 して微視的情報を与えることのできる測定手法の一つである。一般に磁場をパラメーターにして 磁性を研究するという観点から ESR は考えられてきたが、最近では、磁場を変化させて誘電性 を調べる事が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いて行われており、また、 エレクトロマグノン励起(光の電場成分によるスピン波励起)も盛んに研究されている。このよ うに新たな研究対象も増えて ESR 測定の重要性は、さらに増していると言える。また、一般に 核スピン共鳴(NMR)に比べてパルス強磁場下でも十分な信号強度を有し、50 T を超える強磁場領 域の磁気状態の観察ができる、すなわち磁場誘起の相転移現象の研究ができることも ESR 測定 のもう一つの利点である。

一方、物質中の劇的な電子状態変化は通常 0.1~1 eV (10³~10⁴ K)オーダーのエネルギー変化に対応するが、10 GPa を超える圧力はそのような電子状態変化を可能にして磁性体研究において効果的な外場の一つである。しかしながら、パルス強磁場下での高圧力実験は、圧力セルのジュール発熱の影響などもあってあまり進んでいない。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現象の発見も期待できる。

前回の研究会において共同講演者の赤木より同じタイトルで1回目の報告を行った。今回、その後の開発状況の報告、及び、今後の研究開発の展望についてお話しする。

Session 3-2 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016 年 9 月 12 日 福井大学)

タイトル: 軟 X 線磁気円二色性を用いたマルチフェロイック物質の研究 講演者:鳴海康雄

所属: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

要旨:X線磁気円二色性(以下 XMCD もしくは X線 MCD と略す)は、左右異なる円偏光 X線 の物質に対する吸収係数の差として定義され、その大きさが物質の持つ磁化に比例することから、 分光学的磁化測定法の1つとして利用されている。その際重要になるのが、XMCD は元素固有 の吸収端においてのみ観測される、ということである。このことは、XMCD 測定によって得ら れる磁化が元素・軌道選択的情報であることを意味する。さらに軟 X 線のエネルギー領域には、 磁性の主たる担い手となる遷移金属元素の 3d 軌道、もしくは希土類金属元素の4f 軌道を終状態 とする吸収端が存在するため、軟 X 線領域の XMCD 測定は磁性体の研究に極めて有用と言える。 このような、マクロな磁気測定法には無い XMCD 測定の特性を生かして、永久磁石材料や磁性 薄膜などに対する軟 X線 MCD を用いた応用研究が盛んに行われている一方で、より高い磁場が 必要な反強磁性体に対する適用例は少ない。その障害となっているのが、超高真空環境や全電子 収量法による信号検出技術など、軟X線 MCD 測定に不可欠な基盤技術を強磁場環境に導入する 困難さである。このような背景のもと、我々は 2008 年よりパルス強磁場発生装置を備えた軟 X 線 MCD 装置の開発に着手し、世界で初めてのパルス強磁場軟 X 線 MCD 測定に成功した[1]。そ の後、電源の増強やパルスマグネットの改良を重ね、現在では自動磁場反転機構も備えた正負 40Tの磁場発生を実現している。この講演では、我々が開発したパルス強磁場軟 X 線 MCD 測定 装置を例に挙げて、軟 X 線 MCD 測定を実施する上での、課題申請手続きから試料準備、実験方 法など、XMCD に関するイロハを詳しく解説する。また具体的な応用例として、最近行った2 種類のマルチフェロイック物質、電子誘電体 LuFe₂O₄[2]、および三角格子反強磁性体 CuFeO₂[3] の研究に関しても紹介する。

謝辞:本研究は、SPring-8/JASRI・分光物性 II グループ、東北大学金属材料研究所・野尻グループ、東京大学・物性研究所の金道グループ、岡山大学理学部・池田グループ、そして物質材料研究 機構・北澤グループとの共同研究である。

- [1] T. Nakamura & Y. Narumi et al., Appl. Phys. Exp., 4 066602 (2011).
- [2] Y. Narumi et al., PRB, 91, 014410 (2015).
- [3] Y. Narumi et al., submitted to JPSJ

タイトル: S=1/2 J₁-J₂フラストレート磁性鎖 NaCuMoO₄(OH)のスピンネマ チック相の探索

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

所属:^A神戸大学分子フォトサイエンス研究センター,^B神戸大学大学院理学研究科,^C神戸大学 研究基盤センター,^D大阪大学先端強磁場科学研究センター,^E京都大学大学院農学研究科,^F東 北大学多元研究所,^G名古屋大学大学院工学研究科,^H東京大学物性研究所

要旨: 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ンネマチック相の出現が 理論的に予想されている [1]。NaCuMoO4(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 $J_1=-51K$, $J_2=36K$ 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 らスピン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



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

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。スピン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

タイトル:マルチフェロイクス物質 BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃のテラヘルツ ESR 測定 講演者:森満新^A,大久保晋^{A,B},櫻井敬博^C,原茂生^C,太田仁^{A,B},山本孟^D,東正樹^E 所属:神戸大学大学院理学研究科^A,神戸大学分子フォトサイエンス研究センター^B,神戸大学研 究基盤センター^C,東京工業大学大学院総合理工学研究科^D,東京工業大学フロンティア材料研究 所^E

要旨: BiFeO₃はペロブスカイト型化合物であり、 $T_N \sim 650 \text{K} T_C \sim 1100 \text{K}$ の反強磁性強誘電体である ことが知られている[1]。FeをCoに置換したBiFe_{1-x}Co_xO₃の磁性イオンはFe³⁺であり、Co³⁺は低 スピン状態をとるため磁性を持たないとされている[2]。BiFe_{1-x}Co_xO₃ではFeの置換の割合、温

度、磁場によって磁気構造がサイクロイド構造から G型反強磁性に変化すると報告されている[2]。 BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃の結晶構造は rhombohedral であり、磁 気構造はゼロ磁場下 220K 以上でサイクロイド構造 から反強磁性構造に変化し、4.2K では 11T 以上でサ イクロイド構造から反強磁性構造に変化すること が報告されている[2]。

今回 Fe³⁺の電子状態を明らかにする目的で BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃のテラヘルツ ESR 測定を行った。高圧 合成された BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃の粉末試料を用いて、温度 範囲は 4.2K~265K、周波数範囲は 60GHz~445GHz、 最大磁場は 17T で行った。

図1は4.2KにおけるESRスペクトルの周波数依存性である。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。408GHzを境に高磁場側でスペクトルの変化が観測された。図2は4.2Kにおける吸収を周波数 – 磁場プロットしたものである。 11Tにサイクロイド構造相と反強磁性相の境があり、 11T以上では低磁場領域で現れなかった吸収が観測された。各々の温度領域における電子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。

[1] I. Sosnowska, *et al.*, Inorg. Chem. **52** (2013) 13269
[2]H. Yamamoto, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 064704



図2 4.2Kにおける周波数-磁場プロット

タイトル:マルチカゴメストライプ構造を持つ磁性体 K₂Mn₃(OH)₂(VO₄)₂の ESR 測定

講演者:藤本雅哉^A,大久保晋^{A,B},原茂生^C,櫻井敬博^C,太田仁^{A,B},大塚大祐^D,佐藤博彦^D 所属:^A神戸大学大学院理学研究科,^B神戸大学分子フォトサイエンス研究センター,^C神戸大学研 究基盤センター、^D中央大学理工学研究科物理学専攻

要旨:K₂Mn₃(OH)₂(VO₄)₂はMn²⁺(S=5/2)の2次元格子反強磁性体である。本物質のMn²⁺のネ ットワークは、ダイヤモンド鎖とカゴメ格子に似た特徴を含んでいることからマルチカゴメスト ライプ(Multi-Kagome-Strip)構造(図1)と呼ばれ、磁気的フラストレーションが期待される[1]。 またこの物質は古典スピン系のXYモデルに限定すると、Mn²⁺に注目した結晶格子には3種類の 交換相互作用が働いており、その内の2つの相互作用の強さによって3つの異なる磁気構造を持 つことが期待される。大塚らによって、この物質の磁化率の温度依存性は報告されている[2]。 3Tにおける測定で、50Kで反強磁性転移すること、磁化率が80Kで幅の広い極大を示すこと、 逆磁化率の温度依存性より Weiss 温度は-375K と見積もられていることなど、フラストレート反 強磁性体に特有の磁性を示すと報告されている。また転移温度以下では、容易軸を a*軸とする Néel 秩序となっていると報告されている。

我々は本物質の磁気異方性を調べる目的で、単結晶試料を用いた X-band ESR 測定を行い、室 温における吸収線幅とg値の角度依存性を測定した。その結果、2次元磁性体に特有な角度依存 性を持つ線幅の振舞いが観測された(図2)。また bc 面内に磁場を印加し、4.2K から 300K まで温 度依存性を測定したところ、56K付近で吸収が消失した。これは50Kの反強磁性転移に伴い、 内部磁場の発達によって共鳴磁場のシフトが起こったものと考えられる。そこで、サブミリ波 ESR を用いて温度依存性の測定を行った。測定は周波数帯 40 から 550GHz と磁場 16T で行った。 発表では、より詳細なスピンダイナミクスと磁気異方性について報告する。



図 1: Mn²⁺の2次元格子

[1]J-H Liao, et al., Acta Crystallogr. C52, 284(1996) [2]大塚大祐ら、2014年 日本物理学会秋季大会 講演概要集 第3分冊 p312

タイトル:反射型圧力下 ESR 装置の開発

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

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

要旨: 現在、我々が使用している圧力下 ESR 装置では、内部部品にセラミクスを用い た電磁波透過型の圧力セル用いており、圧力セル下部に設置した検出器で透過光強度を 検出している。検出器には InSb を用いているが、磁場中では利用できないため磁場中 心から下側にスペースを有するクライオスタットを必要とする。最大圧力は 2.5 GPa、 磁場は無冷媒型の超伝導マグネットにより発生し、最大磁場は 10 T である。現在、圧 力下で 1/3 プラトーを示す CsCuCl₃への応用を目指しているが、そのためには磁場領 域の拡張が必須である。

磁場領域の拡張等を念頭に、本研究では上記の方法とは異なる検出方法を試みている (図1参照)。図中、赤色の実線が入射光、点線が反射光の経路を表す。圧力セル内で 試料を透過した電磁波を、セル下部のミラーで反射させ、その反射光をクライオスタッ ト外のミラーでさらに 90°反射させ、検出器に送る仕組みとなっている。検出をこの 「反射型」にすることで、磁場中心から下部に離れた位置に検出器を設置するためのス

ペースを必要とせず、様々 なクライオスタット、マグ ネットとの組み合わせが 可能になる。例えば、通常 の超伝導マグネットはク ライオスタットの底部に マグネットがあるがこれ との組み合わせが可能で、 更には大阪大学所有の強 磁場パルスマグネットと の組み合わせも可能であ る。講演では、反射型シス テムの開発状況や問題点 等について報告する。



図1 反射型 ESR 装置の模式図.

タイトル:ファイバー干渉光学系を用いた力検出型高周波 ESR 測定系の改良

講演者:高橋英幸^A,岡本翔^B,大道英二^B,太田仁^C

所属:^A神戸大学先端融合研究環,^B神戸大学大学院理学研究科、^C神戸大学分子フォトサイエン ス研究センター

要旨:マイクロカンチレバーの変位検出法として、ファイバー干渉光学系を用いる方法は約 10 pm の分解能を持つ非常に高感度な手法である。しかし干渉強度の変化 ΔV が変位 Δd に対して線 形に変化する領域は狭く($\Delta d < \lambda/4$)、それ以上の変位に対しては正弦的に変化するため、1 μ m を 超える大きな変位の測定にはあまり用いられない。実際、磁気トルク測定ではピエゾ抵抗検出型 や静電容量検出型カンチレバーが好まれる傾向にある。また、光変調法を用いた力検出型高周波 ESR 測定においても、DC 磁化の影響で干渉計のキャビティ長が変化し、チューニングが変化す ることが問題となる。これは信号検出感度を変動させ、ESR スペクトルの歪みや不規則なバッ クグラウンドを生じさせてしまう。また、特定のチューニング領域においては、干渉計内の光子 から受ける力により、カンチレバーの振動が不安定になり、熱振動ノイズを増幅させたり自励発 振を誘発したりする [1]。

今回我々は、波長可変レーザーを用いて干渉計を動的にチューニングすることで、これらの問題を解決することを試みた [2]。図は測定のセットアップである。試料が載せられたマイクロカ

ンチレバーは、光ファイバー端面との 間で Fabry-Perot 共振器 (キャビティ 長 $d \sim 100 \mu m$)を構成する。通常は変 位による $\Delta V \varepsilon$ 測定するが、干渉強度が 一定になるように $\lambda \varepsilon$ 制御すると、 d/λ は一定に保たれる。すなわち、この制 御の下では変位は λ の変化に比例し、絶 対値を正確に測定することができる。 また、チューニングが一定に保たれる ため、力検出型 ESR の抱えていた問題 が解決された。我々はこの測定系を用



いて、Hemin の ESR 信号を 0.5 THz 図 1. Fabry-Perot 干渉計のチューニング機構を導入し まで観測することに成功している [3]。た力検出型高周波 ESR 測定系の模式図

- [1] C. H. Metzger and K. Karrai, Nature 432, 1002 (2004).
- [2] H. Takahashi et al., arXiv:1607.06112
- [3] 岡本翔他、第三回西日本強磁場科学研究会、ポスター発表

タイトル:カンチレバーを用いた金属ポルフィリン錯体の強磁場 ESR

講演者:岡本翔^A,髙橋英幸^B,大道英二^A,太田仁^C

所属: ^ 神戸大学大学院理学研究科物理学専攻, ^B 神戸大学先端融合研究環, ^c 神戸大学分子フォトサイエンス研究センター

要旨:強磁場 ESR 測定には、高いg値分解能に加えて、高周波光源との組み合わせによる 100 GHz を超える大きなゼロ磁場分裂を持つ系の ESR 信号の検出が可能になる等の利点がある。さらに、 多周波数 ESR 測定をおこなうことで分光的な観点からミクロスコピックにスピン系の性質を調 べることができる。しかし一方で、100 GHz を超える高周波数領域では光源の出力が低いため、 高いスピン感度を得ることが困難である。

このような背景から、我々はマイクロカンチレバーを用いた強磁場・高周波 ESR 測定法の開発を進めている[1,2]。この測定法では、マイクロカンチレバーの先端にマイクログラムオーダーの微量試料を搭載し、ESR 吸収に伴う試料の磁化変化をカンチレバーのたわみの変化として検出する。これまで我々のグループでは Fabry-Perot 干渉計を組み込んだカンチレバーESR 測定装置を開発し、力検出による強磁場・高周波 ESR 測定法の高周波化、高感度化を進めてきた[3]。

本研究では、ヘムタンパク質のモデル物質である金属ポルフィリン錯体の Cu-TPP と Hemin に 対して強磁場 ESR 測定を行い、温度 4.2 K でテラヘルツ領域における ESR 信号検出に成功した ので報告する[4,5]。特に Hemin の磁性サイトは Fe³⁺, S = 5/2 であるため、DPPH や Cu-TPP(Cu²⁺) など S = 1/2 の系に比べて磁化によるカンチレバーのたわみが大きく、磁場に対するダイナミッ クレンジを広げにくいという問題点があった。そこで本研究ではダイナミックレンジを拡張した 測定系を構築し、広い磁場範囲で安定した磁化検出の実現と、S/N 比の向上を図った。本研究に より、Cu-TPP に対しては 0.4 THz まで、Hemin に対しては 0.5 THz までの高周波数領域、15T ま での強磁場領域において多周波数での ESR 信号検出に成功した。また、Hemin の ESR 信号から、 結晶場に由来するゼロ磁場分裂定数の見積もりを行った。本講演では改良した測定装置の詳細お よび金属ポルフィリン錯体に対して行った強磁場・高周波 ESR 測定の結果・考察について発表 する。

- [1] E. Ohmichi et al., Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 103903/1-7.
- [2] E. Ohmichi et al., Rev. Sci. Instrum. 80 (2009) 013904/1-6.
- [3] E. Ohmichi et al., Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 073904/1-8.
- [4] E. Ohmichi et al., to appear in J. Inorg. Biochem. (2016).
- [5] T. Okamoto et al., to appear in J. Infrared Millimeter and Terahertz Waves (2016).

タイトル: 遍歴反強磁性体 FeSn2 の磁気輸送現象

講演者:木田孝則 ^A,田原大夢 ^A,大貫惇睦 ^B,萩原政幸 ^A 所属:^A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,^B琉球大学理学部

要旨:FeとSnを構成元素とする遍歴磁性体の中には反強磁性を示すFeSnや強磁性を示すFe₃Sn₂ があり、これらは両者とも磁性元素のFeがカゴメ格子を形成することから「遍歴電子系の磁気 フラストレーションの研究」の対象物質として期待される。Fe₃Sn₂ではFe原子の磁気モーメン トがカゴメ格子面内で強磁性的に結合しているが、多結晶試料を用いたホール効果測定において 異常ホール係数が従来の遍歴強磁性体よりも二桁程度大きな値を示すことが報告されており[1]、 カゴメ格子のもつ特異な磁気状態とそれに由来する異常な磁気輸送現象の発現が期待される。こ れらのFe-Sn化合物を合成する際、副産物としてFe/Sn比の異なる幾つかの化合物が同時に合成 される。その一つのFeSn₂は正方晶の結晶構造を有し、[001]方向に伸びた針状の結晶である。磁 性は 378 K以下で反強磁性を示し、更に 93 K でFe スピンが[100]軸を向いたコリニアな磁気構 造から(001)面内で[110]方向へ傾いたノンコリニアな磁気構造へ変わることが報告されている[2]。 一方、輸送特性についてはあまり報告がない。本研究では、この物質の磁性と輸送現象の関係を 明らかにする目的で磁気抵抗の測定を行った。試料は自己フラックス法で作成し、磁気抵抗は*B* ≤14 T の磁場範囲で超伝導マグネットを用いて測定した。

図1に磁場中電気抵抗率の結果を示す。ゼロ磁場の電気抵抗率は温度の低下とともに単調に減少し、残留抵抗比は*RRR*~900であった。[100]方向に磁場を印加した場合の電気抵抗率は低温で極小を示し、温度の低下とともに-log*T*に比例して上昇した後ある一定値に漸近する、いわゆる近藤効果に似た振る舞いを示す。しかし、この現象は印加磁場の増大とともに顕著になり、電気抵抗極小を示す温度は高温側へシフトした。図2に様々な温度における磁気抵抗の結果を示す。1.5K、14Tで5000%を超える巨大な正の磁気抵抗が観測され、温度上昇とともに磁気抵抗比は減少した。講演ではこの物質の磁気輸送現象について議論する。



- [1] T. Kida et al., J. Phys.: Condens. Matter 23, 112205 (2011).
- [2] G. Venturini et al., J. Phys. F: Met. Phys. 15, 427 (1985).

タイトル: Sr₂CoGe₂O₇の強磁場電子スピン共鳴

講演者:赤木暢、奥谷顕、吉澤大智、木田孝則、萩原政幸 所属: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

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。さらに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、電気磁気マルチフェロイック物質の研究に重要な知見をもたらすことが期待できる。オケルマナイト構造を持つ物質では、*pd* 混成機構によりスピン誘起の電気分極が発現する。Ba₂CoGe₂O₇では、テラヘルツ分光実験からエレクトロマグノンが観測されており、方向二色性もみられる。Ba₂CoGe₂O₇は、大きな容易面型の磁気異方性を示す。これにより、*S₂*=3/2のスピン状態が抑制され、スピンの長さが縮むことが理論研究から予想されている。このため、磁気励起が複雑になっていると考えられる。そこで本研究では、オケルマナイト構造を持ち磁気異方性の小さい Sr₂CoGe₂O₇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。

FZ 法で成長させた Sr₂CoGe₂O₇単結晶を結晶軸に沿って切り出した後、定常磁場及びパルス強 磁場下での ESR、磁化、電気分極測定を行った。磁化測定から飽和磁場は、約 20T であり、そ れ以上の磁場下では強制強磁性状態になっている。ファラデー配置での ESR 測定から、磁化飽 和後に *H*//[100]でのみ 2-マグノン励起が観測された。また、同時に 1-マグノン励起が抑制されて おり、2-マグノン束縛状態が実現していることがわかった。当日は、フォークト配置での実験結 果を含め、Sr₂CoGe₂O₇の磁気励起の詳細について報告する。 タイトル:ハニカム格子反強磁性体 M₂(pymca)₃(ClO₄) (M = Cu, Ni, Co, Fe)の強磁場 磁性

講演者:奥谷顕 A,木田孝則 A,本多善太郎 B,萩原政幸 A

所属:^A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,^B埼玉大学大学院理工学 研究科

要旨:ハニカム格子反強磁性体は等しい最近接相互作用のみを考えた場合、基底状態は絶対零度 で反強磁性秩序状態だと考えられているが、次近接相互作用が存在する場合は幾何学的フラスト レーションが生じることにより様々な基底状態を取りうることが理論的に指摘されており興味 が持たれている [1,2]。また格子の歪によって最近接相互作用の大きさが変化した場合にも基底 状態が変わると予想されている [3]。このような状態が磁場中でどのように変化するかは自明で はない。このようにハニカム格子反強磁性体は興味深い舞台であるが、実際に実験を行うとなる とモデル物質があまり多くはないため、新たな物質が望まれている。*M*₂*X* (*X*=(pymca)₃(ClO₄))は pymca(pyrimidine-2-carboxylate)で架橋された 2 価の *M* イオン(Cu²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Fe²⁺)がハニカム格 子構造を組む新規に合成された金属錯体化合物である。ネール温度は Ni₂*X*, Co₂*X*, Fe₂*X* ではそれ

ぞれ 28.0 K, 8.9 K 17.5 K である [4]。 Cu₂X では 0.6 K までの範囲で相転移は 観測されていない。本講演では、水熱合 成法によって作成した *M*₂X の粉末試料 を用いたパルス強磁場中での磁化測定 等の結果について報告する。

図1はNi₂Xの温度1.4 K でのパルス強 磁場中での磁化過程である。磁化は50 T でも飽和には達していないが、12T付 近に小さなアノマリーが見られ、磁気 相転移が生じていることが示唆される 結果となった。講演では他の M_2X の結 果についても報告する。



- [1] S. Okumura et al., J. Phys. Soc. Jpn. 79, 114705 (2010).
- [2] P. H. Y. Li et al., Phys. Rev. B 86, 144404 (2012).
- [3] K. Takano, Phys. Rev. B 74, 140402(R) (2006).
- [4] Z. Honda et al., preprint.

タイトル:パルス強磁場下における極低温電子スピン共鳴測定プローブの開発 講演者:吉澤大智,竹内徹也^A,谷口一也,萩原政幸 所属:阪大先端強磁場,^A阪大低温セ

要旨:スピンフラストレーション系や量子スピン系などの特異な物性は1K以下の極低温で現れ ることがある。例えば、希土類パイロクロア化合物では quantum order-by-disorder 転移[1]やヒッ グス転移[2]などの特異な振る舞いが1K以下の極低温で観測されている。これらの磁性体では磁 性イオン間の相互作用は転移温度をエネルギーに換算したものより十分大きいことが多いため、 飽和磁場は数十テスラになることがある。そのため、磁場誘起相転移なども考慮すると極低温と 強磁場を組み合わせた研究が必要になってくると考えられる。当研究室でも以前にヘリウム3を 用いた電子スピン共鳴(ESR)測定プローブの作製が行われたが、測定温度が~0.7 K までしか下が らず、また反射型のプローブであったためにベースラインの変動が大きく、S/N 比が良くないな どの問題があった[3]。

そこで今回より低温での測定と測定感度の向上を目的として新たに極低温下 ESR 測定用プロー ブの開発を行った。図1には作製したヘリウム 3ESR クライオスタットの冷却時の内部温度の変 化を示している。最低到達温度は 303 mK であり、ESR プローブ用のクライオスタットとしては 十分な極低温が得られていることがわかる。現在透過型測定用のプローブを制作している。これ により反射型測定でみられる試料の厚みによる干渉などを抑制することが期待される。当日は作 製した透過型プローブを含めた測定系とそれらを用いた実験結果の詳細について報告する。



図 1. 冷却テスト時のクライオスタット内の温度

- [1] L. Savary et al., Phys. Rev. Lett. 109,167201 (2012).
- [2] L. J. Chang et al., Nature Comunications 3, 992 (2012).
- [3] H. Yamaguchi, Doctoral thesis.

反強磁性金属 FeSn2の巨大な磁気抵抗

阪大先端強磁場 A, 琉球大理 B

田原大夢^A, 佐藤和樹^A, 木田孝則^A, 大貫惇睦^B, 萩原政幸^A Large magnetoresistance of the antiferromagnetic metal FeSn₂ ^AAHMF. Grad. Sch. Sci. Osaka Univ., ^BDept. Phys. Univ. Ryukyus. T. Time^A, K. Sato^A, T. Kida^A, Y. Onuki^B and M. Hagiwara^A

FeSn2は、正方晶 CuAl2型(*l4/mcm*)の結晶構造を持つ、ネール温度 *T*N=378K を持つ反強 磁性金属である。中性子回折実験の結果から、*T*N以下ではスピンが[100]方向に向いたネー ル秩序をしているが、93K 以下では[110]方向からわずかに傾いたノンコリニアな磁気構造 を持つことが示唆されており[1]、これを反映した磁気輸送特性は結晶の4回対称性を破る ことが期待されるなど興味深い。超伝導マグネットを用いた *RRR*~1100の純良な試料での 予備実験では、1.4K、*H*//[100],*I*//[001]において 14T で 50000%を超える巨大な磁気抵抗 が観測されている。今回、*RRR*の異なる試料においてパルス強磁場を用いて 51T までの磁 気抵抗を測定した。測定したすべての試料について、測定した温度・磁場範囲では磁気抵抗 抗は飽和せず、高い移動度を持ち、巨大なフェルミ面を持っていることが示唆された。た だし、磁気抵抗は *RRR* に依存しており、たとえば *RRR*~90の試料では 14T で 3000%,51T で 15000%程度である。講演ではこの磁気抵抗の角度依存性の結果を示すとともに、この物 質のフェルミオロジーについて議論する。



[1]G. Venturini et al., J. Phys. F: Met. Phys. 15, 427 (1985).

50T 級パルス強磁場装置の断熱消磁による超低温域への展開

飯田賢斗^A,石打翔馬^A,野口悟^{A,B,C},石田武和^{A,C}

^A大阪府立大学工学研究科, ^B大阪府立大学 21 世紀科学研究機構, ^C大阪府立大学ナノ研

Development of 50 T pulsed magnetic field apparatus for extremely low temperature range by using an adiabatic demagnetization

Grad. School of Engineering, Osaka Pref. Univ, N2RC, Osaka Pref. Univ.

Kento Iida, Shoma Ishiuchi, Satoru Noguchi, Takekazu Ishida

要旨:我々は15 kV、250 kJのコンデンサバンクを用いて、内径30[®]、温度0.1 K、最高磁場50 T を目標とする極低温パルス強磁場磁化測定装置の開発を進めている。パルス強磁場については 250 kJ電源と金道式マグネットにより、立ち上がり2.79 ms、最大磁場50.2 Tのパルス磁場発生 に成功し、一方、鉄ミョウバンを用いた断熱消磁クライオスタットでは、Heを用いず1 Kの極 低温を達成した[1]。断熱消磁部とパルスマグネットは磁気的に干渉しないように距離(~300 mm) を取る必要があるが、十分試料が冷却されると思われる。前回、1 K までしか温度が下がらなか ったのは、細く長い銅線束が壁に接触していた可能性があると考えた。そこで今回、冷却を試料 に伝えるために使用している被覆銅細線束と周囲の FRP 管との熱接触を防ぐため FRP 管の内径 を 8[®]に拡張し、クライオスタット上部からの熱流入を抑えるためアルミ製のシールドも取り付 けた。また、ソルトピルは新たに作製し、上部にネジを切ることで高さ調節と固定を両立させた。 これらの改良後、断熱消磁冷却を行ったところ、0.4 K 未満まで冷却されていることを確認した。

その結果を図に示す。最低到達温度 は 0.337K(測定器の抵抗測定上限が 30kΩであるため)とプロットされて いるが、冷却曲線を直線で外挿近似 すると、0Tで 0.1Kまで冷却された と推定できる。一方、ゼロ磁場到達後 20秒程度で温度上昇し始め、30秒後 には消磁前の温度まで上昇した。こ れはクライオスタット内への熱流入 がまだ十分に取り除けていないた め、今後の改良が必要である。

パルスマグネットについては、物



図: 断熱消磁特性

性研の協力により、内径 18^Φのマグネットに加え、内径 30^Φのマグネットも入手した。現在、内 径 18^Φのマグネットを用いて磁場および磁化測定を行っている。今後は、内径 30^Φのクライオス タットの作製も進め、また、被覆銅細線束を実際のパルス強磁場中に挿入し、その渦電流発熱に よる温度上昇を評価する予定である。50 T パルス強磁場装置と断熱消磁クライオスタットを組 み合わせ、これらの 2 重極限の両立を目指し、引き続き実験を行っていく。

[1]飯田賢斗、他、日本物理学会第71回年次大会 19aPS-98(2016).

タイトル:ジャイロトロンによる大気圧ミリ波放電を用いたロケット推進手法 "マイクロ波ロケット"

講演者:福成雅史^A,小紫公也^B,小田靖久^C,池田亮介^C,梶原健^C,高橋幸司^C,坂本慶司^C 所属:^A福井大学遠赤外領域開発研究センター,^B東京大学工学系研究科航空宇宙工学科,^C量子 科学技術研究開発機構

要旨: 遠隔からレーザーやミリ波を用いて飛行に必要なエ ネルギーをロケットに伝送する推進手法をビーミング推進 という。今回紹介する"マイクロ波ロケット(図 1)"とはジ ャイロトロンからのミリ波を用いたビーミング推進ロケッ トである。マイクロ波ロケットの推進機は片端が閉じた円筒 形で、閉管端に集光器が搭載されている.マイクロ波が入射 すると集光器で着火したプラズマの電離波面がマイクロ波 エネルギーを吸収しながら衝撃波を伴い伝播していき、その 際の高圧により機体は推力を得る. 図2は推進機内部を伝播 する電離波面の積分画像であり、フィラメント状の特異な構 造をもつミリ波放電プラズマを介してエネルギー変換が行 われている。通常の化学ロケットは単位質量当たりの推進剤 が持つ化学エネルギーに性能が制限されるため、貨物に対し て大量の推進剤が必要なうえ、衛星軌道への投入にさえ複数 段のロケットが必要となる.マイクロ波ビームにより遠隔か らエネルギーを供給する試みはその制約から解放される有 力な手段であり、既存ロケットの1段目としてマイクロ波ロ



図1 マイクロ波ロケット.



図2 推進機内部に発生するマイク ロ波放電の積分画像.フィラメン ト状の電離波面が伝播していく.

ケットを用いた場合では宇宙への物資輸送費用が既存の 1/3 程度になると試算されている[1]。 マイクロ波ロケットの最初の打ち上げ試験は 2003 年に中川らによって行われ、短パルスのミリ 波を用いて運動量結合係数 C_m (投入エネルギーと発生力積の比)にして 395 Ns/MJ の推力性能を 達成した[2].また 2009 年にはマルチパルスでの打ち上げ試験が行われ、持続的な推力発生に成 功している[3]。現在、いくつか実現に向けた課題が残っているが、その中でも長距離ミリ波伝 送と、それに伴う放電の変化が特に重要である。ミリ波を長距離伝送するには、伝送側でビーム 径を広げ、機体側で再集光する必要がある。そのビーム径の変化に伴うビーム電力の変化によっ てプラズマの消炎時間が大きく変化し、本来の着火点以外での異常放電につながってしまう。研 究会では、大まかな概要や、これまでの研究結果に加え、こうした現状抱えている課題などをポ スターで紹介する。

[1]Fukunari M., Arnault A., Yamaguchi T., Komurasaki K., Applied Optics, The optical society, Vol. 53, Issue 31, pp. 116-122, 2014

[2] Nakagawa, T., Mihara, Y., Komurasaki, K., Takahashi, K., Sakamoto, K., Imai, T., Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41, No. 1, 2004, pp. 151-153.

[3] Oda Y., Shibata T., Komurasaki K., Takahashi K., Kasugai A., and Sakamoto K., J. Propulsion and Power, Vol. 25, No. 1, 2009, pp118-122.

タイトル: フラストレート磁性体 KCu₃0C1(SO₄)₂の逐次転移と ESR 講演者:菊池彦光^A、国枝賢治^A、藤井裕^B、松尾晶^c、金道浩一^c 所属:^A福井大学大学院工学研究科物理工学専攻、^B福井大学遠赤外領域開発研究センター,^c東 京大学物性研究所

要旨:KCu₃OCl(SO₄)₂(鉱物名:カムチャッカ石、結晶構造:斜方晶系、空間群:Pna21)のCu²⁺(S=1/2) は四面体を形成し、その四面体が頂点を共有する形でc軸方向に一次元的に配列している。スピ ン間に反強磁性的相互作用が働けば幾何学的スピンフラストレーション効果による豊富な磁性 が期待される。天然鉱物に対して結晶構造は報告されているが、試料の合成方法や磁気的、物理 的な性質については全く調べられていなかった。

我々は KCu₃OCl(SO₄)₂の試料の合成を試み、既報の結晶構造とほぼ一致する多結晶試料を得る ことができた[2]。構造評価は粉末 X 線回折を用いた。得られた粉末試料を用いて磁化率、比熱、 強磁場磁化測定を行なった。磁化率の測定では 15 K 付近で弱強磁性転移とみられる磁化率の急 激な上昇が見られた。また低温ではヒステリシスを伴う磁化曲線が観測された。比熱測定では零 磁場において 3 K、11 K、15 K において異常が見られ、逐次相転移を示唆する興味深い結果が得 られた。3、15K のピークは印加磁場増加とともにピークがブロードになったが、11 K のピーク はほとんど磁場に依存しない。このような逐次相転移はスピンフラストレーションに起因すると 考えられる。15 K 以下での秩序相(高温相) はキャントした反強磁性相、3 K 以下の低温相では 転移温度以下で磁化率が減少することから高温相とはスピン配位が異なる反強磁性相と考えら れる。11 K の転移は磁気的な異常が見られないことから軌道あるいは構造転移の可能性があるが 詳細は不明である。強磁場磁化曲線をパルス磁場を用いて約 70 T まで測定した。磁化は 2.0 μ_B/f.u.(飽和磁場は 3.0 μ_B/f.u.)まで増加したが、飽和には至らず比較的大きなスピン間相互作用の 存在が示唆される。

KCu₃OCl(SO₄)₂の ESR 測定を 35.5~38 GHz の周波数域で測定した。高温域では線幅が広い多ためか、信号は観測できなかったが、約 15 K 以下で Cu イオンに由来する g \approx 2.2 の信号が観測できた。約 6K 以下の温度域で低磁場域に新たな信号が観測された。温度低下とともにこの新しい信号の線幅は鋭くなった。一方、新信号の共鳴磁場は温度低下とともに低磁場シフトを示したが、低温相では温度変化せず、g \approx 6 の一定値をとった。この結果は低温相において S=3/2 の強磁性的トライマーが実効的に形成されている事を示唆する。

[1] T. V. Varaksina, et al. Mineralogical Magazine 54 (1990) 613-616.

[2] 国枝賢治、他、物理学会 2015 秋季大会(関西大、2015, 9.16) 16aPS96.

タイトル:ミリ波帯 ESR/NMR 二重磁気共鳴に用いるミラー型共振器の製作 と磁気共鳴測定

講演者:大矢健太^A,三浦俊亮^B,小泉優太^A,石川裕也^B,藤井裕^A,光藤誠太郎^A,菊池彦光^B 所属:^A福井大学遠赤外領域開発研究センター,^B福井大学工学研究科

要旨:二重磁気共鳴法とは、電子スピン共鳴(ESR)と核磁気共鳴(NMR)を同時に行う磁気共鳴法 で、動的確偏極(DNP)-NMR や電子-核二重共鳴(ENDOR)等により、NMR の感度が格段に向上し たり、電子と核スピンの結合についての情報が得られたりする手段である。我々は、強磁場・超 低温域で DNP-NMR や ENDOR 測定を行える装置の開発を目指している。現在までに、希釈冷凍 機に NMR 測定および 128GHz 前後のミリ波帯 ESR 測定のための素子・配線等を組み込み、ESR, NMR それぞれの試験測定を行った[1]。

希釈冷凍機を用いた場合、発振器から試料部までの伝 送経路が長くなってしまうために導波管内でミリ波の減 衰が大きくなる。そこで、ESR 感度を向上させる一つの 手段として、試料部に高感度かつ効率良く電磁波を照射 できる共振器を用いることにした。共振器には、球面ミ ラーと平面ミラーを対に組み合わせ空間的に開いた Fabry-Perot 型を用いている。また、この共振器で NMR を行うためには、試料を置く平面ミラー側に MHz 帯の電 磁波を発生させるための NMR コイルを設置する必要が ある。共振モードと干渉しないようにするために、この コイルはヘルムホルツ型とした。また、平面ミラーは、 MHz 帯が透過し、ミリ波帯が反射する必要がある。そこ で、絶縁体である Stycast1266 の表面に金のスパッタした





薄膜平面ミラーを用いることとし、Skin depthの周波数依存性を利用して、上記の条件を満たす 膜厚を探索した。開発した共振器を希釈冷凍機 ESR 測定装置に組み込み、ESR 測定等を行った 結果を講演する。

[1] 石川ら, 第三回西日本強磁場科学研究会, (2016)

タイトル: 超低温・高周波域における動的核偏極 NMR 測定のための 二重磁気共鳴装置の開発

講演者:石川裕也,大矢健太^A,三浦俊亮,小泉優太,藤井裕^A,光藤誠太郎^A,水崎隆雄^A, 菊池彦光,福田昭^B,松原明^C,山森英智,小森剛,S. Lee^D,S. Vasiliev^E

所属:福井大工,^A福井大遠赤セ,^B兵庫医大物理,^C京大低温セ,^D韓国科学技術学院,^ETurku大

要旨:固体量子コンピュータモデルの中でも量子ビットの長いコヒーレンス時間と 量子ビット数の拡張性を共に備えているものとして、リン原子を希薄にドープした 試料(以下 Si:P)を用いたモデルが B. Kane によって提唱され、注目されている[1]。 本モデルは³¹P 核スピンを量子ビットとしているが、³¹P が希薄な為に核磁気共鳴

(NMR) 信号の測定例が無い。そこで、我々は動的核偏極 (DNP)効果を用いて³¹P の NMR 信号を得る事を目指して、Kane モデルで要求される超低温・高周波で測定 可能な ESR/NMR 二重磁気共鳴装置の開発を行っている。これまでに、二重磁気共 鳴が可能なシステムを希釈冷凍機に構築し、これを用いた $Mn_xMg_{1-x}O(x = 1/10000)$ の ESR 測定から、Si:P の ESR 信号検出にも十分な感度がある事を示した[2,3]。

これまで、誘電率が高く室温では金属的伝導性のある Si:P 試料を共振器内に設置 したときに、共振器の共振周波数を低温でしか確認できず、共振周波数の制御が困 難であったが、高抵抗 Si 試料による実測と計算により比較的精度良く共振周波数を

制御できるようになった。そこで、開発 した二重磁気共鳴システムを用いて Si:P の ESR 測定(127GHz 前後)を行い、0.1 K 以下までの ESR 信号検出に成功した。さ らに、DNP によって通常の磁場スイープ に比べ、より核偏極の高い非対称な ESR スペクトル(右図)を確認した。本講演で は Si:P の ESR 測定及び DNP 偏極度、二 重磁気共鳴システムの開発状況を報告 する。

- [1] B. E. Kane, Nature, **133**, 393 (1998).
- [2] Y. Fujii *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser., 568, 042005 (2015).
- [3] 石川裕也 et al.,: 日本物理学会 第71 回年次大会, 19aPS-84, (2016).



図. Si:P の DNP による ESR 信号強度の比較。 通常の磁場スイープ測定(青)と、測定前に高磁 場側ピークに合わせミリ波を 20 分照射したス ペクトル(赤)。通常の磁場スイープも DNP に より偏極した状態となっている。

タイトル:ミラー型共振器の共振周波数調整機能の製作

講演者:三浦俊亮^A,大矢健太^B,石川裕也^A,藤井裕^B,光藤誠太郎^B,菊池彦光^A 所属:^A福井大院工,^B福井大学遠赤外領域開発研究センター

要旨:最近我々は超低温・高磁場で ESR と NMR の二重磁気共鳴が可能なシステムを希釈冷凍器 に構築した。それを用いて、感度を見積もるためのテスト試料 Mn_xMg_{1-x}O(x=1/10000)の ESR 信 号を観測し、さらに、希薄リンドープシリコン(Si:P)の ESR 測定から動的核偏極(DNP)効果によ る核偏極を観測した[1-3]。

この DNP を引き起こす際に重要な要素は、ESR 遷移を強く引き起こすためのマイクロ波強度 を大きくすることである。そのために我々は上記システムにおいてキャビティを用いている。し かし、キャビティの共振周波数は、システムを構成する材料の温度変化、試料のサイズと位置、 試料の誘電率や透磁率等に依存する。実験の際は、キャビティ周波数に発振器の周波数をあわせ ることになるが、その周波数においてほかの素子や共振器との coupling が良い状態であるかどう かは、冷やしてみないとわからない。これを解決するためには、キャビティ周波数を外部から調 整できる機構があればよい。これにより希釈冷凍器内に試料を入れた後に、低温で、十分にチュ ーニングできるようになる。

そこで我々は、共振周波数調整機能を持ったキャビティの製作を行った。上記の我々の装置で は、試料のハンドリング等の理由でファブリ・ペロー型共振器を採用している。ファブリ・ペロ ー型共振器は2枚のミラーによって構成されており、ミラー間の距離によって共振周波数を変え ることが可能である。今回我々はこのミラー間距離の微調整のためにピエゾ素子を採用し、ピエ ゾ素子を用いた超低温域で使用可能な周波数可変キャビティの製作を目指して評価を行った。講 演ではこれらの可動機構の評価および現状を報告する。



図 1.ピエゾ素子によるミラー位置変化に ともなう共振周波数の変化



図 2.共振周波数可変キャビティ

- [1] 石川ら: 本研究会ポスター講演
- [2] Y. Fujii et al.: J. Phys.: Conf. Ser., 568 ,042005 (2015).
- [3] 石川裕也ら: 日本物理学会 第 71 回年次大会, 19aPS-84(2016).

P-18 第三回西日本強磁場科学研究会 (2016年9月12日 福井大学)

高圧下 ESR 測定用セルのためのセラミックス材料の電磁波焼結

講演者: 蟹江良尚^A, 西脇拓生^A, 光藤誠太郎^A, 櫻井敬博^B 所属:^A福井大学遠赤外領域開発研究センター, ^B神戸大学・研究基盤センター

強磁場・低温・高圧の多重極限の幅広い実験環境を実現する計測システムの一つとして KOFUC ネットワークでは強磁場・低温・高圧下の高周波電子スピン共鳴(ESR)装置の開発を進めている. 高圧環境を実現するには,試料に力を集中する必要があり試料サイズ(ボリューム)は小さくした 方が有利である.しかし,試料ボリュームの減少は, ESR 感度の減少に直結する.また,試料は 圧力セルに覆われ, ESR に用いる電磁波は圧力セルを透過して試料に照射される.この時電磁 波が圧力セル部材に吸収されると,試料に届く電磁波は減少し, ESR 感度の減少につながる.

本研究では、圧力セルに用いるセラミックス部材を新しい材料プロセッシング技術である、電磁波加熱技術を用いることで、ミリ波・サブミリ波領域で電磁波の減衰が少なく、圧力セルの構造材料として必要な、硬さと靭性値を持ったセラミックス材料の開発に取り組んでいる.

本研究で用いる,アルミナセラミックスの特徴は機械的強度,電気絶縁性,高周波損失性,熱伝 導性,耐熱性,耐摩耗性,耐食性が良好な材料である.特に単結晶はサファイアと呼ばれ,ミリ 波・サブミリ波帯の窓材として用いられるように,誘電損率の小さな材料である.また,その硬 さはモース硬度9でダイヤモンドに次ぐ硬さである.しかしながら,靭性値は極めて小さく,破 壊靭性値としてはあまり大きな値ではない.靭性値を向上し破壊靭性値を高くするために,一般 的にはアルミナにジルコニアやイットリアを添加してその靭性を向上するが,ミリ波・サブミリ 波帯の電磁波の透過の観点からは,これらの添加によりミリ波・サブミリ波の吸収が増加し,ESR 測定用の圧力セル部材としては好ましくない.もう一つの靭性値の向上方法はセラミックスの 粒径を小さくしていくことで,応力ひずみを分散し,亀裂の進展を妨げることで靭性値を高める ことである.しかし,微粉末を用いた焼結においても,焼結温度を高くすると粒成長が起こり, 焼結後の粒径は大きなものになる.靭性値の向上を狙い低温で焼結をした場合は、セラミックス の密度が下がりセラミックス内に空亡が多く存在する状態になる.密度の低下はセラミックス の硬度の低下を招き,靭性値は向上するものの,結局,破壊靭性値は低下する.このようにセラ ミックスにおいて硬さと靭性値はトレードオフの関係となっており通常の電気炉等による熱平 衡プロセスでは限界がある.

一方 28 GHz のミリ波プロセスでは電磁波効果と呼ばれる熱平衡系の材料プロセスでは説明で きない低温での緻密化,言い換えると粒成長の小さな緻密化効果や,ある種の拡散効果の増加が みられる.我々はこれまでに高純度セラミックスを用いて焼結に用いる電磁波周波数(2.45 GHz ~300 GHz)にわたり,電磁波プロセッシングにおける特殊な効果について研究を行ってきた.本 研究ではそれらの知見を活かしミリ波・サブミリ波帯の透過性能が高く破壊靭性値の高いセラミ ックスの焼成を試みる.ここではアルミナセラミックスのミリ波焼結で得られた,密度や粒径, また機械的特性である,硬さや靭性について紹介し, ESR 用圧力セルに対する最適条件を述べ るとともに,今後の計画について説明する.