

47. 超高感度バックグラウンドフリー磁気光学カー効果測定による量子振動の光観測

京都大学大学院工学研究科 電子工学専攻 教授 米澤 進吾

概要

磁気光学カー効果は、磁性を持つ物質の表面で光が反射された際に、光の偏光状態が変化する効果のことで、磁性の高感度な光プローブとして有用である。この磁気光学カー効果を用い、低温強磁場で起こる量子振動現象を観測することは、基礎・応用の両面で非常に興味深い。しかし、磁気光学カー効果を低温・強磁場条件下で測定する際には、磁場中に置かれた光学部品を光が透過する際に生じる磁気光学ファラデー効果によるバックグラウンドがカー効果のシグナルに重畳してしまい、カー効果の詳細な変化を観測するうえでの大きな障壁となる。その課題を解決するため、本研究では、中空コア光ファイバーを用いた「バックグラウンドフリー」な磁気光学カー効果測定技術を開発した。我々は、光ファイバーコネクタの部品であるセラミックフェルールを利用することで、中空コア光ファイバーと試料表面を安定的に光結合させる技術を開発した。また、パルス強磁場中で磁気光学カー効果を測定する新手法を開発し、それを用いて中空コアファイバーが大幅にバックグラウンドを低減することを実証した。さらに、室温ではありながら、高感度に磁気光学カー効果をマッピングする技術も開発し、交替磁性体の磁気ドメイン観察に成功した。これらの成果により、量子振動の光検出やその空間分解測定に向けた重要な基礎技術が確立できた。

背景および目的

金属物質の電子状態を直接的に研究する強力な手法として、量子振動が挙げられる。量子振動とは、フェルミ面上の電子が低温かつ強磁場中で起こすサイクロトロン運動エネルギーの量子化に起因して、各種物理量が磁場 H の逆数 $1/H$ の関数として振動する効果のことである[文献 1] (図 1)。これを利用すれば伝導キャリアのフェルミ面の形状を得ることができるだけでなく、キャリア散乱時間や有効質量といった情報も得ることができるなど、物性物理・材料科学において不可欠のプローブである。これまで、磁化の磁場振動であるドハース・ファンアルフェン効果や、電気抵抗の磁場振動であるシュブニコフ・ドハース効果などが知られており、他にも、比熱やホール係数といった多くの物理量が同様の振動を示す。

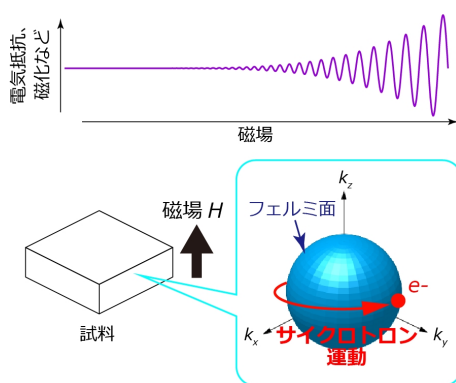


図 1. 量子振動の模式図。

サイクロトロン運動の量子化に起因して、様々な物理量が磁場に対して振動する。この振動は磁場の逆数に対して周期的である。

しかし、これまでに知られている量子振動現象のほとんどは電気抵抗や磁化といったバルクの物理量に対して観測されており、特に赤外やそれ以上のエネルギーの光学領域における観測例は私の知る限り存在しない。その理由としては、光学領域で金属の光測定を行うには反射配置を取る必要があるが、そのような配置で数ケルビン以下という温度領域かつ磁場中における光学測定を高感度で行うことが極めて難しいことが挙げられる。一方、もし光学領域において量子振動が光検出できれば、非接触・高速測定可能・空間分解可能な全く新しい量子振動プローブとなる。

本研究の目的は、反射光を用いた磁性的の光学的プローブとして知られている磁気光学カー効果（図 2）を用いて量子振動を検出することを念頭に、バックグラウンドの極めて小さい磁気光学カー効果測定を開発し、量子振動の光検出を試みることである。

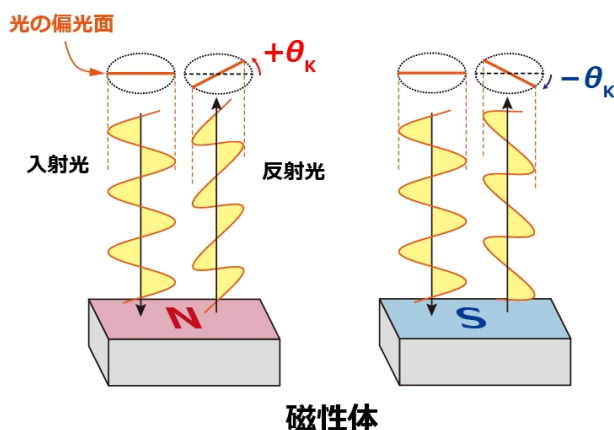


図 2. 磁気光学カー効果の模式図。

磁気光学カー効果は、反射光の偏光面が磁性的の極性に応じて正または負に回転する効果である。

方法

申請者らはこの数年、新奇な秩序状態の示す非自明な磁性的性質の検出を目指し、超高感度の磁気光学カー効果測定技術である、ループレスサニャック干渉計[文献 2]を導入してきた。磁気光学カー効果とは、光の反射に伴う偏光の変化を通じて磁性的性質を明らかにできる手法である（図 2）。ループレスサニャック干渉計は、波長 1500 ナノメートルの赤外光を用い、変更の回転角であるカー角度を 1 マイクロラジアンを切るような分解能で測

定可能な手法である。また、光ファイバーを主に用いているため、既存のクライオスタット中で測定ができる点も大きな特徴である。これらのメリットを生かし、この手法を低温・強磁場中での測定に拡張することを目指している。しかし、そのためには、磁場中に置かれた光学部品を光が透過する際に引き起こされる磁気光学ファラデー効果によるバックグラウンドを大きく低減することが必要である。

この課題を解決するため、我々は、中空光ファイバーを用いた「バックグラウンドフリー磁気光学カー効果測定手法」を着想した。この中空ファイバーはもともとは高強度のレーザーを伝送するために考案されたものである。この中空ファイバーを試料付近の光路に用い、レンズや1/4波長板を排除する図3のような構成とすることで、磁場中での光は常に真空中を通過することになり、バックグラウンドを大幅に低減した磁気光学カー効果測定が可能となる。

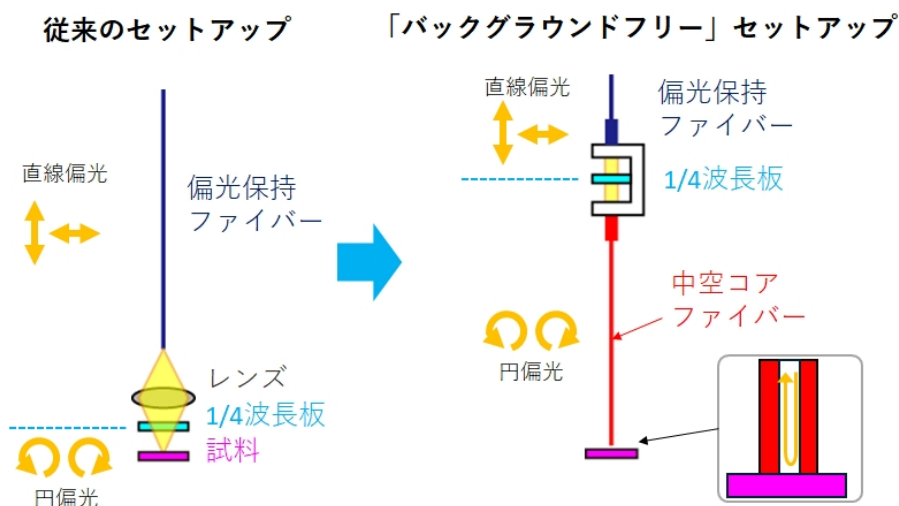


図3. 中空コアファイバーを用いた「バックグラウンドフリー」磁気光学カー効果測定技術の模式図。

従来のセットアップ（左）では、試料周辺にファイバー、レンズ、1/4波長板といった光学部品があり、これらが磁気光学ファラデー効果を生じ、シグナルにバックグラウンドを重畳していた。新しいセットアップでは、中空ファイバーを用い、レンズをなくし、1/4波長板を磁場の外に出すことでファラデー効果を大きく低減できるようにした。

結果および考察

1. 利用する中空コアファイバー（Hollow-core fiber; HCF）の検討

当初、我々は微細な周期構造によって光を中空コアに閉じ込めるフォトニック結晶中空コアファイバー（PCHCF）を用いたが、PCHCFは汚れに弱いなど取り扱いが難しく、さらに光をコアに導入するのが非常に難しいことが明らかになった。一方、より最近着目した反共鳴型中空コアファイバー（ARHCF）は、PCHCFよりも大きい構造で光を閉じ込めるため取り扱いが比較的容易であり、光を導入することにも成功した[発表論文等1-4]。さらに、ファイバーから出た光の広がり角を示す Numerical Aperture (NA) が0.03と、通常のファイバー（典型的に $NA = 0.2$ 程度）や PCHCF（同じく $NA = 0.2$ ）のNAに比べて極めて小さく、試料からの反射光をファイバーに戻す効率を高めるためにも有利であった。したがって、以降の実験では ARHCF を用いた。

2. HCF と試料の結合方法の検討

試料に光を照射し、反射された光をファイバー内に戻すためには試料と HCF 端面を十分に近接させる必要がある。一方、量子振動を含む低温や高磁場環境下での実験に用いるには、小型で安定性が高く、容易に準備が可

能な方法が望まれる。我々は、まず HCF を用いない場合について、光ファイバーコネクタの部品として使われるフェルールという円筒状の部品内にレンズを組み込んだ構造を採用し、試料をレンズ付きフェルールとブランクフェルールで挟み込むことで、外径 4 ミリメートル以下のサイズでありながら極めて安定的に試料と光学系を結合できることを明らかにした[発表論文等 5,6] (図 4)。

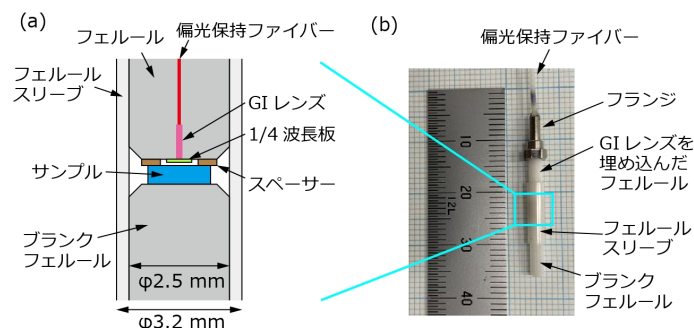


図 4. セラミックフェルールを利用した磁気光学カー効果の新しい試料固定法[発表論文等 5]。

左に模式的に示すように、光ファイバー用のセラミックフェルールにレンズを組み込み、それで試料を挟み込むことで安定的な光学結合を達成した。右は実際の固定部の写真。

我々は、さらにこの方法が HCF にも応用できることを着想し、HCF をブランクフェルール内に挿入し、端面をそろえて固定する技術を開発した。また、その HCF 付きフェルールとブランクフェルールで試料を挟み込むことで、試料からの反射光を高効率に HCF に戻せることも明らかにした[発表論文等 1-4]。

3. パルス磁場中での磁気光学カー効果測定手法の開発

極めて強い磁場を発生させるには、ミリ秒からマイクロ秒程度の短い時間のみコイルに電流を流すことで磁場を発生させる、パルス磁場発生技術が有効である。しかし、パルス磁場中での磁気光学カー効果の測定例はこれまでに非常に限られており、室温において最大 11 テスラの実験が報告されているのが上限であった[文献 3,4]。我々は、ループレスサニャック干渉計に、フェルールベースの試料固定機構を組み合わせ、さらにオシロスコープで取得したデータに数値ロックイン解析を施すという技術開発によって、磁気光学カー効果を 43 テスラ物高磁場中で測定することに世界で初めて成功した[発表論文等 5,6] (図 5)。さらに、正の磁場に引き続いて負の磁場を発生させるという双極性磁場パルスを用いることで、磁性材料のヒステリシスの測定を磁気光学カー効果を用いて行えることを実証した[発表論文等 6,7]。

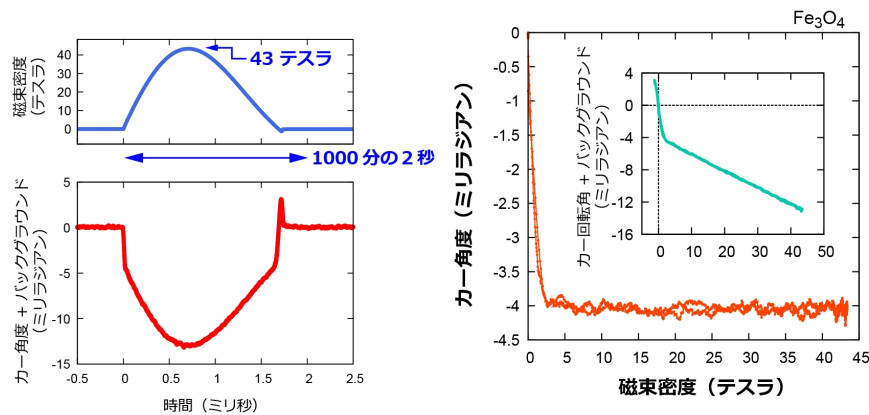


図 5. 40 テスラ超のパルス磁場下での磁気光学カー効果測定の結果。

フェリ磁性体 Fe_3O_4 に対して、2 ミリ秒、43 テスラのパルス磁場中で磁気光学カー効果を測定することに成功した。右は測定した磁気光学カー効果の磁場依存性。挿入図が生データで、高磁場領域での線形な変化はファラデー効果に起因するバックグラウンドである。これを差し引くと、メインのグラフのようにカー回転角が得られる。

4. パルス磁場を利用したバックグラウンドフリー磁気光学カー効果測定技術の実証

3 の実験では、レンズや 1/4 波長板といった光学部品が磁場中に置かれているため、これらのファラデー効果に起因する磁場に線形なバックグラウンドが測定データに重畳していた。正しい磁気光学カー効果を得るには、そのバックグラウンドを差し引く必要があった (図 5 右)。

そこで、3 と同様の実験を、HCF を固定したフェルールを用いて行った。その結果、バックグラウンドを一切差し引くことなく、磁性が飽和した後の磁場依存性がほぼフラットなデータを得ることができた。データの解析により、バックグラウンドは 3 の手法に比べ、約 1/20 以下に低減できていることが分かり、バックグラウンドフリー磁気光学カー効果測定技術が実際に可能であることを実証した[発表論文等 1-4] (論文未発表のため図は掲載せず)。

5. 磁気光学カー効果による量子振動検出の試み

当初、HCF をヘリウム冷凍機内で使うために、円偏光保持ファイバーを用いたフィードスルーを利用することを想定していた。しかし、実験の結果、HCF と円偏光保持ファイバーの間で光を通すことができなかったため、現在別の方法を検討している。

そのため、HCF ではなく、レンズ付きフェルールを用いた方法で磁気光学カー効果の磁場依存性の測定を試みた。具体的には、 $(\text{Ba,K})\text{BiO}_3$ 単結晶に対して 2 ケルビンで磁場スイープを行ったが、やはりバックグラウンドが大きく、ノイズ以上の明確な振動を観測することはできなかった。現在、より低磁場で量子振動を示す物質を用いた実験を計画中である。

6. 走査型磁気光学カー効果測定装置の開発

量子振動の空間分布を測定することが本プロジェクトの究極目標の一つであるが、そのための準備として、まずは室温において磁気光学カー効果の走査型測定を行える装置を開発した。電動の XY スキャナーを用いることで、約 2 マイクロメートルの空間分解能で走査型測定を行うことに成功し、第 3 の磁性体とも呼ばれて最近世界的に注目されている「交替磁性体」[文献 5]の磁気ドメイン構造の可視化に成功した[発表論文等 8-12]。

まとめと今後の展望

上述のように、本研究では、パルス磁場を用いた磁気光学カー効果測定を開発し、それを用いて中空コアファイバーを用いたバックグラウンドフリーの磁気光学カー効果測定の原理実証を達成することができた。また、走

査型測定に向けた室温プロトタイプも作製し、実際に交替磁性体の非自明な磁気ドメイン構造の可視化にも成功した。また、レンズを用いた方法ではあるが、量子振動の磁気光学カー効果測定を試行することもできた。

今後、中空コアファイバーを用いた測定技術とヘリウム冷凍機に導入することが必要であるが、そのためには真空封止をどのようにするかが問題となる。当初は、1/4 波長板を冷凍機の外に置き、円偏光保持ファイバーを用いたフィードスルーを利用することを想定していた。しかし、実験の結果、円偏光保持ファイバーと HCF との間で光を通すことができなかつたため、現在別の方法を検討している。その技術開発に成功すれば、バックグラウンドフリー磁気光学カー効果測定手法を量子振動の測定を含めた低温物性研究に用いていくことが可能である。

(完)

発表論文等

- 1) 鈴木秀弥ら「フォトニック結晶中空ファイバーを用いた磁場中磁気光学 Kerr 効果測定手法の開発」日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年)、2025 年 9 月、(ポスター発表)。
- 2) S. Suzuki *et al.*, "Fiber-based background-free magneto-optical Kerr effect measurement technique" The 17th TOYOTA RIKEN International Workshop Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025)、2025 年 12 月、(ポスター発表)
- 3) S. Suzuki *et al.*, "Development of an interferometer using the hollow fiber to measure magneto-optical Kerr effect in high magnetic fields" 国際ワークショップ Quest For The Non-Perturbative Magnetic Field Effects In The 1000-Tesla Magnetic Field Region, 2025 年 12 月, ポスター発表。
- 4) 鈴木秀弥ら「ファイバーベース光学系における磁気光学 Kerr 効果のバックグラウンドフリー計測」日本物理学会 2026 年春季大会、2026 年 3 月、口頭発表。
- 5) A. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. Research **8**, 013169 (2026).
- 6) S. Yonezawa "Magneto-optical Kerr effect measurements under pulsed magnetic fields" 国際ワークショップ Quest For The Non-Perturbative Magnetic Field Effects In The 1000-Tesla Magnetic Field Region, 2025 年 12 月, 口頭発表。
- 7) S. Yamane *et al.*, JJAP Conf. Proc. **12**, 011011 (2026).
- 8) 米澤 進吾、「新規磁気光学カー効果測定技術の開発とそれらを用いた物性測定」、AFT 第 2 回量子物質研究会、2026 年 3 月、口頭発表 (招待講演)。
- 9) 渡辺岳斗ら、「空間分解磁気光学カー効果による MnTe 磁気ドメインの観測」、日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年)、2025 年 9 月、口頭発表。
- 10) G. Watanabe *et al.*, "Altermagnetic domains of MnTe observed by scanning magneto-optical Kerr effect" The 17th TOYOTA RIKEN International Workshop Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025), 2025 年 12 月, ポスター発表 (最優秀ポスター受賞)。
- 11) 米澤 進吾、「走査型の高感度磁気光学カー効果測定による MnTe の交替磁性ドメインの観測」、学術変革領域研究(A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」令和 7 年度 領域全体会議・成果報告会、2026 年 1 月、口頭発表。
- 12) S. Yonezawa, "Advancements in measurement techniques based on the magneto-optical Kerr effect", The 6th Joint Workshop between Kyoto University and Victoria University of Wellington, 2026 年 3 月, 口頭発表。

引用文献

- 1) D. Shoenberg "Magnetic Oscillation in Metals" Cambridge University Press (1984).

- 2) J. Xia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).
- 3) X. Chen *et al.*, Measurement **46**, 52 (2013).
- 4) S.-Y. Lin *et al.*, Chin. J. Phys. **55**, 698 (2017).
- 5) L. Šmejkal, *et al.*, Phys. Rev. X **12**, 040501 (2022).