

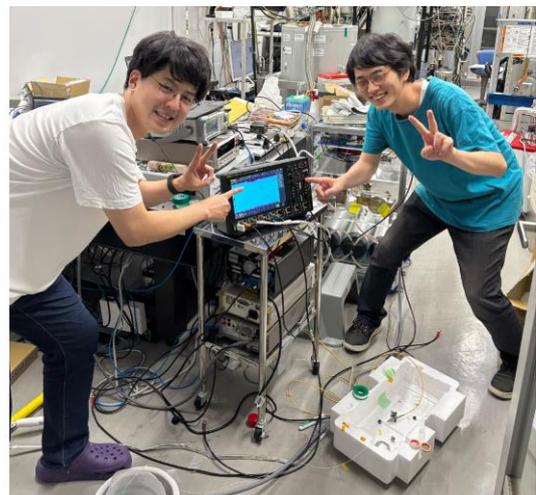
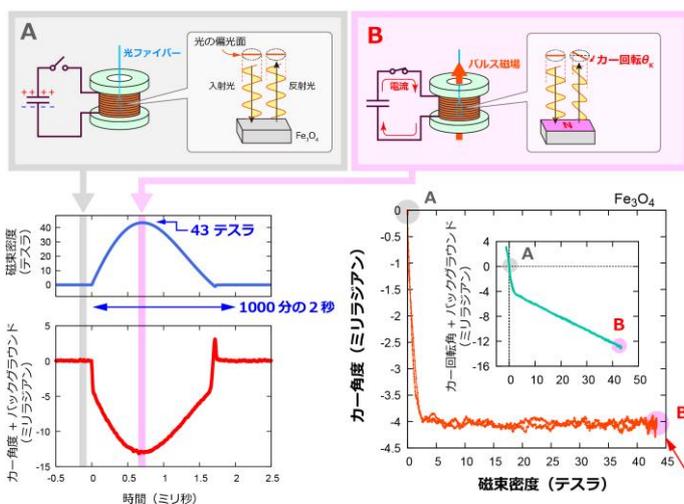
40 テスラ超のパルス磁場中で磁気光学カー効果測定に成功

— わずか 1000 分の 2 秒で磁石の性質を明らかに —

概要

磁気光学カー効果は、磁石表面で光が反射した際に偏光がわずかに変化する効果であり、これを利用すると非接触に磁気特性を検出できます。一方、近年、極めて短時間に非常に強い磁場を発生させるパルス磁場技術が発展しています。もしパルス磁場中で磁気光学カー効果を測定できれば、強磁場中の磁気特性を簡便かつ短時間に明らかにでき、基礎・応用研究の両面で大きなインパクトがあります。京都大学大学院工学研究科 米澤進吾 教授、池田敦俊 同助教、中村颯汰 同修士課程学生、山根聡一郎 同博士後期課程学生の研究グループは、電気通信大学大学院情報理工学研究科 池田暁彦 准教授、野田孝祐 同博士後期課程学生と共同で、1000 分の 2 秒以下の長さのパルス磁場中で磁気光学カー効果を簡便かつ高感度に測定する技術を開発し、43 テスラもの強磁場中での磁気光学カー効果測定に世界で初めて成功しました。また、正負両方の磁場をもつ双極性パルス磁場を用い、磁性体のヒステリシス性能の研究に使えることも実証しました。

これらの成果は、本技術が強力な新規磁性材料研究手法になることを示しています。これらの研究成果は、アメリカ合衆国の国際学術誌「Physical Review Research」（2026 年 2 月 13 日にオンライン掲載）、および日本の国際学術誌「JJAP Conference Proceedings」誌（近日掲載予定）にそれぞれ掲載されます。



2025/07/03: 43 テスラでの磁気光学カー効果測定に成功

概念図: 1000 分の 2 秒以下の間に 43 テスラの強さのパルス磁場を発生させ、その中でフェリ磁性体 Fe_3O_4 の磁気光学カー効果を測定することに成功しました。本成果は、パルス磁場中における磁気光学カー効果測定の従来の限界を大幅に更新するものです。

1. 背景

あらゆる科学・技術分野において、磁場は最も基本的なパラメータの一つですが、強い磁場を発生させるのには大きな困難が伴います。そのような状況を変革する手段として、ミリ秒からマイクロ秒という極めて短時間のあいだだけ強力な磁場を発生させるパルス磁場¹技術が注目されています（参考図表 1）。最近、実験室レベルで使えるほど小型でありながら 40 テスラ²を超えるような磁束密度を持つパルス強磁場を発生できる装置がつくられ、大きな実験施設に赴かずとも気軽に強磁場を研究に使えるという状況が実現しつつあります。

パルス磁場を用いた研究における重要な課題の一つは測定手段が限られるという点です。上述のようにパルス磁場の持続時間は極めて短いため、このような短時間で行える測定手法しか使えません。さらに、パルス磁場はその発生時に電磁ノイズや機械的振動を引き起こします。したがってノイズや振動に対して強い測定方法が強く望まれます。

そのような要求を満たしうるパルス磁場中での強力な研究手法として新たに期待されるものとして、磁気光学カー効果³があります。磁気光学カー効果とは、磁石などの磁性体の表面で光が反射された際に光の偏光が磁性の強さや極性に依って回転する現象のことです。例えば、参考図表 2 のように直線偏光を持つ光を磁石に当てることを考えましょう。この時、N 極で反射された光の偏光は時計回りである角度 θ_k だけ回転しますが、S 極で反射された光は反時計回りに同じだけ回転します。この角度 θ_k をカー角度と呼びます。磁気光学カー効果は光を使った測定であるため、原理的にはかなり高速の測定が可能で、さらに電磁ノイズの影響を極めて受けにくいという性質を持っています。したがって、もし磁気光学カー効果をパルス磁場中で測定することができれば、強磁場中で起こる様々な興味深い現象を検出するための有力な手段となるはずです。

しかし、磁気光学カー効果のパルス強磁場中測定の実現に向けてはいくつかの問題点がありました。まず、磁気光学カー効果は多くの場合非常に小さい効果であり、短時間で測定を行うにはそれだけ高感度の測定手法が必要になるという課題があります。比較的大きい効果を示す鉄などの強磁性体であっても、カー角度は 10 ミリラジアン（角度にして約 0.6 度）程度です。定常磁場中ではデータを長時間積算するなどして感度を向上できますが、パルス磁場中の測定ではわずかな偏光の変化を積算などに頼らずに高速かつ高感度に検出する必要があります。また、パルス磁場実験に使われるコイルは、内径 10 ミリメートル以下と非常に小さいことが多いので、そのような小さな空間に試料を置き、光を当て、反射光を測定装置に戻すためのコンパクトなセットアップが必要になります。さらに、そのセットアップは機械的振動に対して強いことも望まれます。実際、パルス磁場下における磁気光学カー効果測定の先行研究例はわずか数例で、室温において 11 テスラというのが従来の最高記録でした。

2. 研究手法・成果

(1) パルス磁場中磁気光学カー効果測定実現に向けた技術開発

我々はいくつかの技術的ブレイクスルーによって、上記の問題点を解決し、40 テスラ超のパルス磁場中での磁気光学カー効果測定に世界で初めて成功しました。

まず、高感度測定が必要という点については、我々の研究室で用いていたループレス・サニャック干渉計⁴を用いることを着想しました。これはもともと定常磁場中で特殊な超伝導体が自発的に発生させる極めて小さい磁場を測るために開発された装置です。この装置を当グループでも 2020 年ころから導入しはじめていたのですが、高速測定が可能のように改良すれば一つ目の問題点を解決できることに気づきました。本研究では、2 ミリ秒の間の光検出器からの電圧シグナルをすべてオシロスコープで取得し、そのデータに対してパソコン上で数値処理を行う、という新しい解析手法を用いることで高速測定を可能としました。

また、コンパクトかつ安定な試料固定法については、参考図表 3 に示すように、gradient index (GI) レンズという極めて小型のレンズをファイバーの先端に一体化させたものを用いることを着想しました。レンズはファイバー先端に取り付けられたフェルールという部品の中に埋め込まれており、ファイバーに対してずれたりすることはありません。また、フェルールは光ファイバー用のコネクタに使われる部品であり、安価でありながら高精度で作られています。さらに、フェルールを固定するためのフェルールスリーブという部品を用いれば、フェルールをスリーブに差し込むだけで精度よく安定的な固定ができます。最終的に、図に示すように、試料を、レンズ付きフェルールと何もついていないブランクのフェルールでサンドイッチすることで、試料で反射された光を高効率に光ファイバーに戻せることを実証しました。開発した試料固定部はわずか直径 4 ミリメートルに収まるサイズであり、パルス磁場実験に使用するのに十分なコンパクトさです。また、この方法は振動に強く、試料を挟み込むだけで実験の準備が終了するという簡便性も持ちあわせています。

パルス磁場の発生には、電気通信大学の池田暁彦准教授らが作製したポータブルパルス磁場発生装置を用いました。この装置は、参考図表 4 に示すように 50 センチメートル四方に収まる小型サイズながら、室温で 20 テスラ、液体窒素でコイルを冷却すれば 40 テスラ超の磁場を発生させることができます。

(2) 40 テスラ超パルス磁場下における磁気光学カー効果測定成功

冒頭概念図にフェリ磁性体⁵である酸化鉄 (Fe_3O_4) に対するパルス磁場下磁気光学カー効果測定で得られたデータを示します。左中央の青線で見られる磁場波形を見ると約 1.7 ミリ秒の間に最大 43 テスラの磁場が発生していることがわかります。その下の赤線で示されたのが磁気光学シグナル (バックグラウンドを含む) であり、磁場の高速な増減に追従してシグナルも変化していることがわかります。これらのデータを、磁場を横軸としてプロットしたのが中央のグラフです。挿入図は生データの磁場依存性であり、磁気光学シグナルが急激に負の方向に立ち上がった後、緩やかに 43 テスラまで磁場に比例しながら変化していることがわかります。低磁場の急激な立ち上がりはフェリ磁性の磁化の飽和に起因するもので、その後の線形な変化はレンズ等の影響 (磁気光学ファラデー効果³) に起因するバックグラウンドであると考えられます。高磁場側の変化を差し引いたものがメインのグラフです。数テスラまでカー角度が急激に立ち上がり、その後は -4.0 ミリラジアン付近で一定値をとります。 Fe_3O_4 の磁化飽和後のカー角度の文献値は室温で -4.36 ミリラジアンであり、温度などの測定条件の違いも考慮すれば、今回の実験値とは十分一致しています。このことから、 Fe_3O_4 の磁気光学効果を 40 テスラ超のパルス強磁場中で正しく測定できたと結論付けられます。

(3) 双極性パルス磁場下の磁気光学カー効果測定による磁気ヒステリシスの高速評価

応用的な観点では、本技術は磁性体の評価にも大きな力を発揮すると期待しています。磁性体の磁化と磁場の関係は磁場の増加過程と減少過程が異なる軌跡を描くヒステリシス曲線⁶を描きますが、このヒステリシス曲線の性質、例えば囲まれる部分の面積が広いのか狭いのか、などは磁性体応用の重要な基礎データになります。したがって、このようなヒステリシスの測定が磁性体の評価において極めて重要です。

パルス磁場発生装置にダイオードを挿入することで、参考図表 5(a) に示すような、正負の磁場を交互に生じる双極性パルスを発生させることができます。そのもとでサマリウムコバルト磁石の磁気光学カー効果を測定した結果が図(b)です。カー角度が明瞭なヒステリシス曲線を描くことがわかります。特筆すべきは、この測定にかかる時間がわずか数ミリ秒 (解析を含めても 5 分程度) である点です。このようにわずかな時間でヒステリシス曲線の評価ができる本技術は、磁性体応用においても重要なツールになりえると期待しています。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は従来のパルス磁場下磁気光学カー効果測定の限界を大幅に更新するものです。この成功により、従来難しいと考えられていたパルス磁場中での磁気光学カー効果測定の新たな可能性が実証されました。本技術が、磁場中での物質の性質を見る新しい「目」として、基礎的な物性物理学や物性科学はもちろんのこと、応用磁性などの分野にも大きなインパクトを与えると期待しています。

また、今回開発した技術は、より大きい磁場を発生させることのできる強磁場施設のパルス磁場装置に組み込んで利用することも容易であり、100 テスラや 1000 テスラ級の磁場中での磁気光学カー効果測定への道も大きく切り開かれました。実際、そのような研究も進めており、近い将来パルス強磁場中の磁気光学カー効果測定を用いた新奇な現象の発見につなげたいと思っています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究を行うにあたり、学術変革領域研究 A「1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」をはじめとする日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号 JP23H04859、JP23H04861、JP24H00194、JP24K17011、JP23K17670、JP23K1362、JP22H01168）、科学技術振興機構（JST）の創発的研究支援事業（課題番号 JPMJFR222W）、京都大学の研究費獲得支援事業いしずえ（2023 年度）、公益財団法人池谷科学技術振興財団（課題番号 0361078-A）、公益財団法人三菱財団（課題番号 202410051）の支援を受けました。本研究で用いた実験装置の一部は京都大学理学研究科研究機器開発支援室に作製いただいたものです。また、実験に用いる寒剤供給について、京都大学低温物質管理部門のサポートを受けました。

<用語解説>

1. パルス磁場

コンデンサにためた電荷を一気にコイルに流すことで、瞬間的に大きな電流を得て、巨大な磁場を発生させる手法。特に大きな実験施設では、巨大なコンデンサを使い、磁場の発生手法を工夫することで 100~1000 テスラを超えるような磁場を発生させることができるようになってきています（参考図表 1）。また、近年電気通信大学の池田暁彦准教授のグループによって実験室レベルで 40 テスラ程度の磁場を発生させることができる、組み立てや操作が容易なポータブルパルス磁場発生装置（参考図表 4）が開発され、パルス磁場技術のすそ野が広がりつつあります。このような背景の下、科学研究費補助金の学術変革領域研究 A「1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」（2023~2027 年度；代表 松田康弘 東京大学教授）が現在実施されており、磁場エネルギーが非摂動的な役割を果たす新奇磁場効果の探索と解明を目的にしつつ、物理だけでなく化学・生物学・天文学などにおける磁場の効果を分野横断的に研究することも目指しています。また、パルス磁場実験のすそ野を広げるため、上述の小型のパルス磁場発生装置を配布するなどの取り組みも行っています。本研究はこのプロジェクトの一部として行われました。

2. テスラ

磁場によって生じた磁束密度の大きさを示す単位（参考図表 1）。地磁気は 0.00005 テスラ程度であるといわれており、店で売られているネオジム磁石の発生する磁場は 0.1~0.5 テスラ程度、病院等にある MRI 装置の内部の磁場は 1~3 テスラ程度、JR 東海の超電導リニアで使われる超伝導電磁石の作る磁場も 1 テスラ程度になります。本研究で到達した 43 テスラという磁場はこれらに比べて極めて大きい磁場です。なお、パルスでない定常磁場として発生させられる磁場の世界最高値は 45.5 テスラであり、世界中でもフロリダにある強磁場

施設のみで達成できます。

3. 磁気光学カー効果・磁気光学ファラデー効果

磁気光学カー効果は、磁石をはじめとする磁性体の表面で光が反射した際に光の偏光面が回転する現象であり、非接触に磁石の性質を研究できる手法として知られています。例えば、N極で光が反射した場合とS極で光が反射した場合は、逆符号の偏光回転が起こります（参考図表2）。偏光がカー効果によって回転した角度をカー角度と呼びます。この効果は90年代から2000年代初頭に使われていたMOディスクやMDといった光磁気ディスクの記憶読み取りに使われるなど、実社会でも応用されています。一方、磁気光学カー効果は多くの場合非常に小さい効果で測定が難しいという側面もあります。比較的大きい効果を示す鉄などの強磁性体であっても、カー角度は10ミリラジアン（角度にして約0.6度）程度です。磁気光学カー効果を測定するためには、このようなわずかな偏光の変化を高感度に測定する必要があります。なお、N極での反射時のカー角度が正になるか負になるかは物質や光の波長に依存します。本資料で紹介している Fe_3O_4 やサマリウムコバルト磁石の例では、ともに負のカー回転を示します。

また、類似の効果として、光が磁性体を透過する際に偏光が変化する磁気光学ファラデー効果という効果もあります。こちらは、試料を厚くすれば偏光の変化を大きくすることができるため、測定も容易ですし、様々な光学部品に応用されています。本研究では、レンズ等の光学部品に起因するファラデー効果がバックグラウンドとしてカー効果とともに観測されています（概念図）。

4. ループレス・サニャック干渉計

磁気光学カー効果を高感度に測定するための光学装置。もともと、回転運動を測ることができる光学装置であるサニャック干渉計というものが知られており、これは光ファイバーベースのジャイロスコープにも使われている技術です。これを改造し、磁気光学カー効果測定に使えるようにしたのがループレス・サニャック干渉計です。これは、当初は特殊な超伝導体が発生的に発生させる極めて小さい磁場を測るために開発された装置で、1マイクロラジアン程度の分解能を容易に達成でき、データ積算などの工夫を行えば数十ナノラジアンの変化も検出できます。しかし、従来は定常磁場下の実験にのみ使われており、パルス磁場下で使われた例はこれまでありませんでした。

なお、本研究では1550ナノメートルの波長の赤外光を用いています。

5. フェリ磁性体

物質の中で大きさの違う磁気モーメントが交互に配列した物質。ある向きの磁気モーメントのほうがその逆向きの磁気モーメントより大きいため、全体として強磁性体と同じような性質を持ちます。身近にあるフェライト磁石は、このフェリ磁性体である Fe_3O_4 を利用した磁石です。

6. 磁性体のヒステリシス曲線

強磁性体やフェリ磁性体の磁化を外部磁場の関数としてプロットした曲線。多くの場合、磁場を上昇させていく過程と下降させていく過程で異なる軌跡を描きます。曲線の形状や、上昇過程と下降過程の違いが磁性材料に関する多くの情報を含んでおり、磁性材料の用途に応じてこれらの性質を最適化する必要があります。したがって、ヒステリシス曲線の評価は磁性応用において重要な役割を果たします。強磁性体において、磁気光学カー効果は磁化に比例するため、参考図表5(b)に示すように、磁気光学カー効果を用いてもヒステリシス曲

線を評価することが可能です。

<研究者のコメント>

まばたきよりも速く終わってしまう、ある意味あっけない実験ですが、実験データのグラフを見たときは新時代を感じました。この手法を使っておもしろい成果が次々得られることを期待しています。また、私にとっては助教として着任してから着手した新しい研究テーマなので、初めてのテーマが世界記録につながって驚いています。一緒に勉強したり試行錯誤したり喜んだり愚痴を言いあったりしてくれた皆さんに感謝しています。

(助教 池田)

低温かつ強磁場下という試料空間、測定時間共に制約され、外乱も多い環境下で磁気光学カー効果という微少な効果の測定を行うためには様々な技術的課題を乗り越える必要がありました。とりあえずやってみようの精神で試行錯誤を重ねることで困難な実験に成功し、今回こういった結果を報告することができたので非常にうれしく思っています。(M1 中村)

定常磁場では到達不可能な高磁場・低温における磁気光学カー効果の観測という未踏領域を切り拓く成果を達成できたことを、大変嬉しく思っております。本成果は、本チームであったからこそ成し遂げられたものと感じております。今後、本測定手法は、非摂動論的物性物理学の基盤研究から応用である磁性体評価などを飛躍的に加速・推進する揺るぎない技術になると確信しています。(D3 山根)

研究当初はかなり挑戦的な課題だと思って研究してきましたが、様々な新しいアイデアやチームの協力のおかげで、思っていたよりも短い期間でパルス磁場下における磁気光学カー効果測定を実現することができました。今後、さらに強磁場における測定や、バックグラウンドを減らす取り組みなど、研究を大きく展開していきたいと考えており、非常に楽しみです。(教授 米澤)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Magneto-optical Kerr-effect measurements under pulsed magnetic fields over 40 T using a compact sample fixture

(コンパクトな試料固定部を用いた 40 テスラ超のパルス磁場中における磁気光学カー効果測定)

著者：Atsutoshi Ikeda, Sota Nakamura, Soichiro Yamane, Kosuke Noda, Akihiko Ikeda, and Shingo Yonezawa

掲載誌：Physical Review Research

DOI：https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/vy7j-ylb4

タイトル：Magneto-optical Kerr effect measurements under bipolar pulsed magnetic fields

(双極性パルス磁場中における磁気光学カー効果測定)

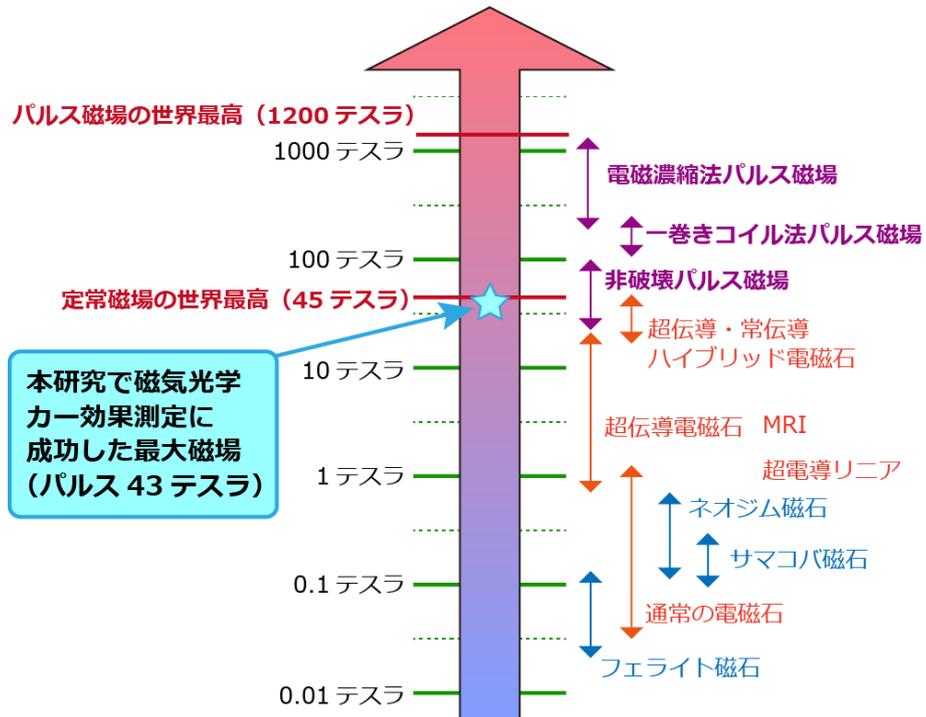
著者：Soichiro Yamane, Sota Nakamura, Atsutoshi Ikeda, Kosuke Noda, Akihiko Ikeda, and Shingo Yonezawa

掲載誌：JJAP Conference Proceedings

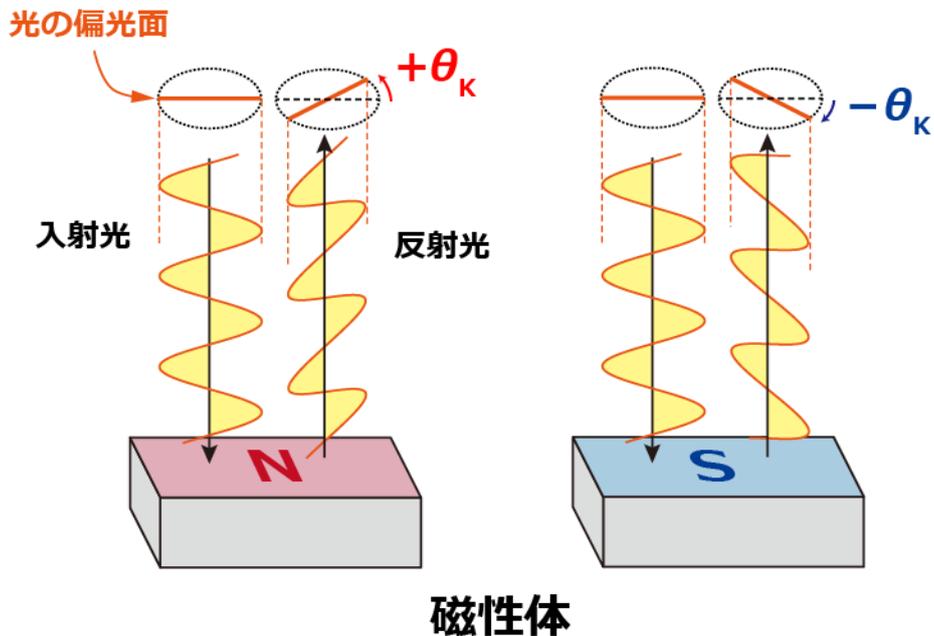
DOI：https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjapcp/12/0/12_011011/_article

プレプリント：https://arxiv.org/abs/2601.09221

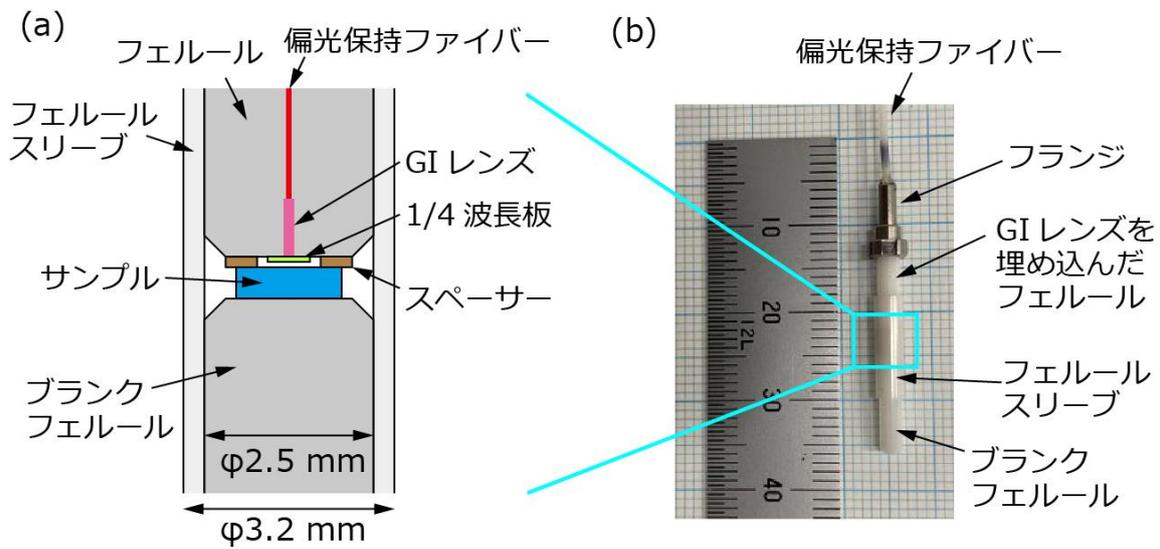
< 参考図表 >



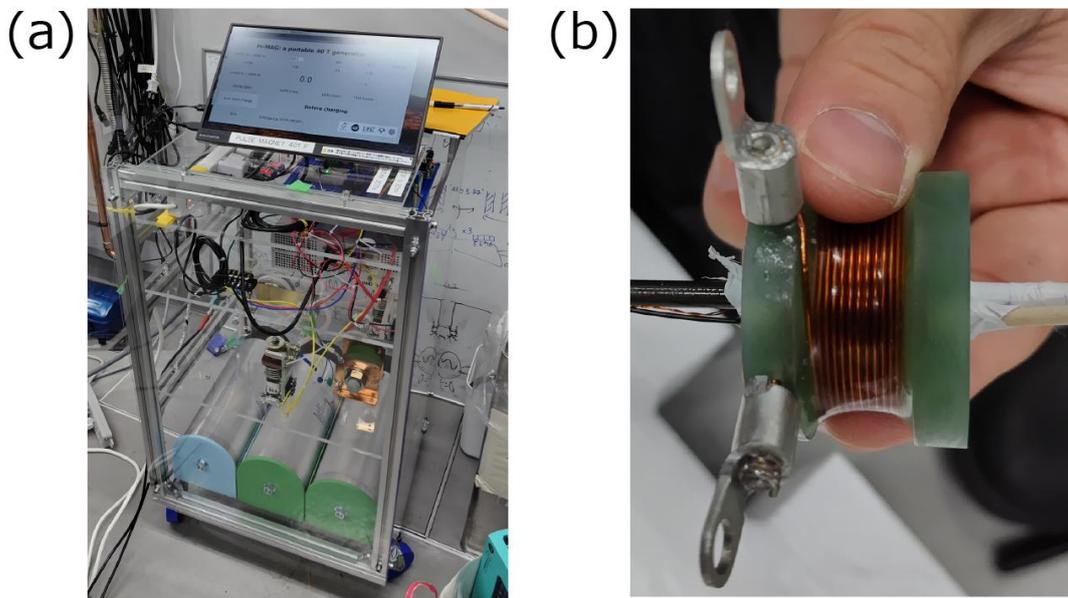
参考図表 1: 様々な手段で発生しうる磁場の大きさの比較。永久磁石や電磁石に比べ、パルス磁場を用いると桁違いに大きい磁場を発生させることができます。本研究では、パルス磁場を使うことで、定常磁場の世界最高値である 45 テスラに迫るような大きさの磁場において磁気光学カー効果を測定できました。



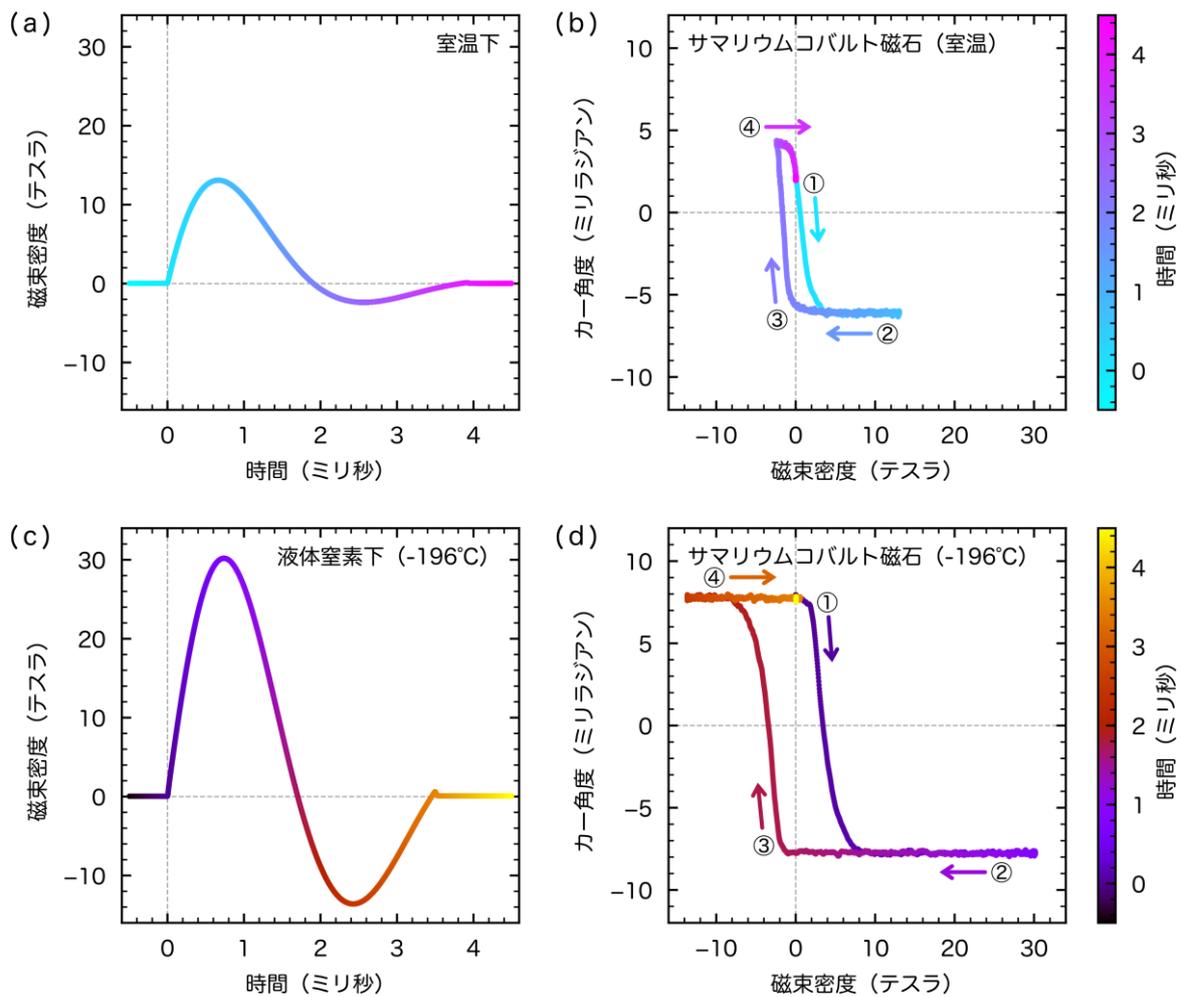
参考図表 2: 磁気光学カー効果の模式図。直線偏光を試料に当てた場合、N 極で反射された光の偏光は時計回りである角度 θ_K だけ回転しますが、S 極で反射された光は反時計回りに同じだけ回転します。この角度 θ_K をカー角度と呼びます。なお、N 極での反射時のカー角度が正になるか負になるかは物質や光の波長に依存します。



参考図表 3: 本研究で開発したパルス磁場下磁気光学カー効果測定用の試料固定部分。(a)が模式図で(b)は実際の写真。(a)に示すように、超小型の gradient index (GI) レンズをフェルールに埋め込んだものを利用しています。試料をフェルール同士でサンドイッチし、フェルールスリーブで高精度に固定することで、コンパクトでありながら安定的な磁気光学効果測定を可能としています。



参考図表 4: 本研究で用いたポータブルパルス磁場発生装置。(a) 装置全体の写真。電気通信大学の池田准教授のグループで作られたもので、電源やコンデンサ等が 50 センチメートル四方に収まるサイズに組み立てられています。このようにコンパクトでありながら、条件によっては 40 テスラを超えるようなパルス磁場を発生させることが可能です。(b) パルス磁場発生用コイルの写真。



参考図表 5: 双極性パルス磁場を用いた磁気光学カー効果によるヒステリシス性能評価。(a) 双極性パルス磁場の磁場波形。パルス磁場発生装置にダイオードを追加することで、正の磁場に引き続いて負の磁場を印加する双極性パルス磁場を生成することができます。(b) 双極性パルス磁場下において測定した、サマリウムコバルト磁石の室温における磁気光学カー効果の磁場依存性 (バックグラウンドは差し引き済み)。カー角度に明瞭なヒステリシスが観測されました。なお、(b)のヒステリシスが非対称に見えるのは、室温の測定ではマイナス側の磁場の大きさが不十分だったためです。実際、ごく最近測定した液体窒素下 (-196°C) での測定データ(c)(d)ではマイナス側にも十分大きい磁場をかけることができたため対称的なヒステリシスが観測できています。