



東北大学

2015年3月31日

報道機関 各位

東北大学大学院理学研究科

光パルスにより超高速で磁気秩序を制御することに成功
—スピントロニクス応用へ道を拓く—

【ポイント】

- 光により直接スピン間の相互作用を制御することができる。
- 時間的に極めて短い光パルスを用いることにより、従来の手法に比べ圧倒的に速いスピン制御が可能になる。
- キャリア密度の制御により、光照射による磁気相互作用の大きさを増減できる。

<概要>

東北大学大学院理学研究科の松原正和准教授らは、光パルス^{注1)}の照射により磁性体の磁気秩序を超高速で制御することに成功しました。

現在のエレクトロニクスは、電子の持つ「電気を流す性質（電荷）」によって機能しています。近年、電荷に加えて電子の持つ「磁石になる性質（スピン^{注2)}）」も積極的に利用する「スピントロニクス」が次世代エレクトロニクスとして注目を集めています。スピントロニクス技術は、既にハードディスクなどで実用化されており、また将来的にも低消費電力・高密度のデバイスを目指す際の基本原理として、近年盛んに研究されています。ここでは、主役となるスピン（磁気）をいかに自由に高速で制御できるかが新規デバイス性能の鍵を握っています。

今回、松原准教授らは、ある種の磁性体に超短光パルス^{注3)}を照射することで、磁気的な相互作用を1ピコ秒（ピコは1兆分の1）程度の超短時間で制御することに成功しました。この成果は、磁性体の性質を決める最も重要なスピン間の相互作用を、光により直接瞬時に制御する新たな方法として、将来における超高速光スピントロニクスなどへの応用が期待されます。

本研究は、スイス連邦工科大学チューリッヒ校のManfred Fiebig教授、ドイツ・ボン大学のJohann Kroha教授、ドイツ・マックスプランク研究所のJochen Mannhart教授、アメリカ・コーネル大学のDarrell Schlom教授らと共同で行ったものです。

本研究成果は、2015年4月2日10時（英国時間）に英国科学雑誌「Nature Communications」においてオンライン公開されます。

<背景>

現代のエレクトロニクスの代表である半導体は、電化製品やパソコンの集積回路など身近に存在し、その応用は非常に多岐にわたります。一方で、ハードディスクなどの記録媒体には、磁石の性質を示す磁性材料が用いられています。物質を構成する電子は電荷を持つとともにミクロな磁石の性質（スピン）も持ち合わせており、半導体は電荷の、磁性体は磁石の性質を利用しています。近年、既存デバイスの限界打破と新機能実現の観点から、従来のエレクトロニクスに磁石の性質を取り入れる「スピントロニクス（スピンエレクトロニクス）」技術の研究が、世界中で盛んに行われています。

このスピントロニクスの分野では、半導体の持つ電気的な性質と磁性材料が持つ磁石の性質を併せ持った物質である「磁性半導体」が次世代スピン機能物質の有力候補として注目を集めています。磁性半導体の特徴は、磁氣的性質が電氣的・光学的性質にも影響を及ぼすため、磁氣的性質を自由に高速で制御することが画期的な機能の実現に向けて重要となります。

<研究内容>

今回、松原准教授らは、EuO という強磁性^{注4)}半導体が、電気伝導を担うキャリア（ここでは電子）の密度に応じて磁気相互作用を大きく変化させる点に着目しました。EuO に不純物（今の場合はGd）をドーピングすることによりキャリア密度を増加させると、強磁性転移温度（キュリー温度）^{注5)}が上昇します（図1）。強磁性転移温度はスピン間の相互作用（磁気相互作用）の大きさに関係しており、このためキャリア密度を変化させることにより磁気相互作用の大きさや、その結果として電氣的・光学的性質を変化させることができます。もし何らかの方法で瞬時にキャリア密度を変化させることができれば、高速の磁気変調デバイスやそれを利用したスピントロニクスデバイスへの応用が期待されます。

本研究では、約100フェムト秒（フェムトは1000兆分の1）という極めて短い光パルスを用いることでEuOに瞬間的にキャリアを導入し、超高速で磁気相互作用を制御（図2(a))できるかを検証するために、ポンプ・プローブ非線形磁気光学分光^{注6)}（図2(b))と呼ばれる測定手法を用いて光パルス照射後の磁気秩序の変化を測定しました。実験では、Gd濃度（キャリア密度）の異なるいくつかの試料を作製し、光パルスの照射がキャリア密度や磁気相互作用にどのような影響を与えるかを系統的に調べました（図3）。

その結果、Gd濃度が低い（キャリア密度が低い）試料では光パルスの照射が磁気相互作用を強め、光照射によるキャリア密度の増加が磁気相互作用を強めるという予想（図1）と合致した結果が得られ、逆に、Gd濃度が高い（キャリア密度が高い）試料では光パルスの照射が磁気相互作用を弱めるという結果が得られました。この結果は、キャリア密度を精密に制御することにより、磁気相互作用を意図的に増強することも減少させることもできることを示唆しています。さらに、いずれの場合においても、磁気秩序の変化は1ピコ秒程度の非常に早い時間で起こることが明らかになりました（図3：挿入図）。この時間は、現在ハードディスクなどで磁気を制御する際に必要な時間よりも3桁程度早く、超短光パルスを利用することで従来の操作速度を大幅に短縮できることが期待されます。今回得られた結果は、理論的な考察によりそのメカニズムが解明され、今後、光による超高速磁気制御を実現するための物質設計や材料開発に向け新たな指針を与えるものです。

＜今後の展開＞

ハードディスクに代表される磁気媒体の記録密度は絶えず増大し続けることが要求されるため、それに応じて磁気操作速度の高速化が今後ますます強く望まれます。今回得られた結果は、光により瞬時に磁気を制御する新たな手法として、今後、フェムト秒レーザー^{注7)}技術や近接場光学^{注8)}技術との組み合わせによる次世代の超高速高密度記録技術への応用が期待される他、光によるスピン制御を利用した超高速光スピントロニクスなど 21 世紀の高度通信・情報化社会構築への鍵となるかもしれません。

＜お問い合わせ先＞

＜研究に関すること＞

松原 正和 (マツバラ マサカズ)

東北大学大学院理学研究科 准教授

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

Tel: 022-795-6421 Fax: 022-795-6425

E-mail: m-matsubara@m.tohoku.ac.jp

URL: <http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/matsubara/>

＜報道に関すること＞

東北大学大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

Tel: 022-795-6708 Fax: 022-795-5831

E-mail: sci-koho@mail.sci.tohoku.ac.jp

<参考図>

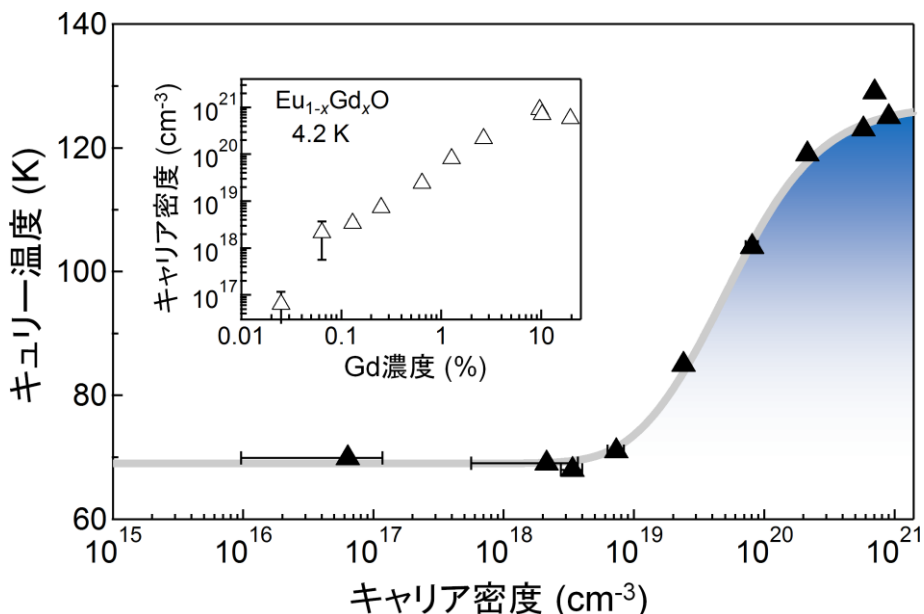


図1 強磁性半導体 $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}$ におけるキャリア密度とキュリー温度の関係

EuO に Gd をドーピングすることによりキャリア密度が増加する（挿入図）。また、キャリア密度の増加に伴い強磁性転移温度（キュリー温度）が上昇する。つまり、キャリア密度と磁気相互作用の大きさに相関がある。

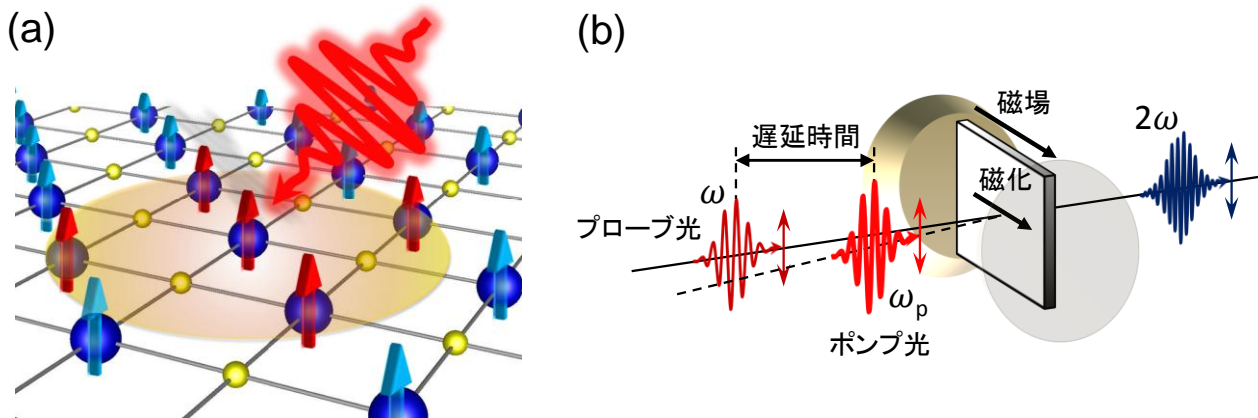


図2 光パルスの照射による超高速磁気制御の概念図とその検出法

(a) 超短光パルスの照射によりスピン間の相互作用が瞬時に変化することを示す概念図。
 (b) ポンプ・プローブ非線形磁気光学分光の模式図。強いポンプ光（励起光）を試料に照射し、光励起された後の磁気秩序の変化を非線形磁気光学効果を用いてプローブ光（計測光）で検出する。

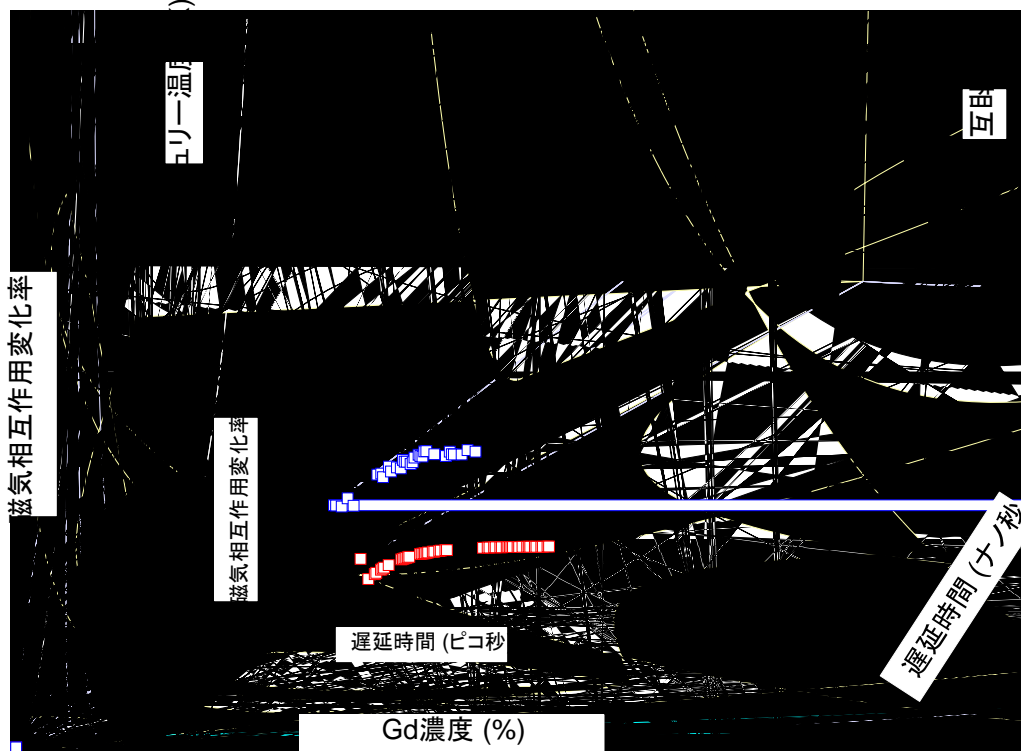


図3 光パルスの照射による磁気秩序変化のダイナミクス

強磁性半導体 $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{O}$ において、ポンプ・プローブ非線形磁気光学分光法により得られた磁気秩序変化の超高速ダイナミクス。ポンプ光照射後、1.5 ナノ秒（ナノは10億分の1）までの時間における変化を示している。Gd濃度（あるいはキャリア密度）を変化させることにより、磁気相互作用の大きさを増強あるいは減少させることができる。

挿入図：ポンプ光照射後5ピコ秒（ピコは1兆分の1）までのダイナミクスの拡大図。1ピコ秒以下の時間で磁気相互作用に変化が起こる。

<用語解説>

注 1) 光パルス

短時間のみ ON となる光。通常の光（連続光）は時間的に一定の強度を持つのに対して、パルス光の強度は短い時間に集中している。

注 2) スピン

電子が持つ自転のような性質で、電子スピンは磁気（微小な磁石）を帯びている。電子スピンは物質の磁性の源であり、スピンには上向きスピンと下向きスピンの二つの状態がある。

注 3) 超短光パルス

光パルスのパルス幅（時間幅）が極めて短いもの。通常、数百～数フェムト秒のパルス幅を持つ光パルスが超短光パルスと呼ばれる。

注 4) 強磁性

物質中で隣り合うスピンの同じ方向に揃った状態のこと。

注 5) 強磁性転移温度

一般に、強磁性を示す物質はある温度以上では強磁性の性質を失う。この温度を強磁性転移温度（キュリー温度）という。例えば、鉄は 770°C 以上では磁石の性質を失う。

注 6) ポンプ・プローブ非線形磁気光学分光

ポンプ光（励起光）を物質に照射することで過渡的に引き起こされる電子状態やスピン状態の変化を、プローブ光（計測光）を用いて観測する手法をポンプ・プローブ分光法と呼ぶ。プローブ光で何を調べるかにより得られる情報が変わる。本研究では、磁気秩序を検出するために非線形磁気光学効果を用いた。極めて短いパルス幅を持つポンプ光とプローブ光を用い、ポンプ光の照射からプローブ光の照射までの時間差（遅延時間）を変化させ様々な遅延時間で試料を観察することにより、超高速現象の時間発展を調べることができる。

注 7) フェムト秒レーザー

数百～数フェムト秒のパルス幅を持つレーザーのこと。

注 8) 近接場光学

光の波長よりも小さな物体に光を当てた時に、表面近くに発生する伝搬しない特殊な光のことを近接場光と呼ぶ。これを利用して研究する学問が近接場光学で、近接場光を使うと通常の光とは異なり波長よりも小さな領域に光を絞り込むことが可能になるため、光学顕微鏡の分解能や光ディスクの記録密度を飛躍的に高める有力手段として研究されている他、様々な応用が期待されている。

<発表雑誌>

雑誌名 : Nature Communications

論文タイトル : Ultrafast optical tuning of ferromagnetism via the carrier density

論文タイトル訳 : キャリア密度を介した強磁性の超高速光制御

著者 : Masakazu Matsubara, Alexander Schroer, Andreas Schmehl, Alexander Melville, Carsten Becher, Mauricio TrujilloMartinez, Darrell G. Schlom, Jochen Mannhart, Johann Kroha, and Manfred Fiebig

DOI : 10.1038/ncomms7724