

酸化物薄膜における超高速な強磁性の実現 - 光による新しいスピン操作の可能性を示唆！ -

1. 発表者：

和達 大樹（兵庫県立大学大学院理学研究科 教授）

Yujun Zhang（研究当時：兵庫県立大学大学院理学研究科 研究員／現：中国科学院 研究員）

片山 司（研究当時：東京大学大学院理学系研究科 助教／現：北海道大学 准教授）

近松 彰（研究当時：東京大学大学院理学系研究科 助教／現：お茶の水女子大学 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆軟 X 線（注 1）の反射率の磁気円二色性（注 2）と共鳴磁気回折（注 3）を用いて、コバルト酸化物の薄膜において、超高速な強磁性の実現の観測に成功しました。
- ◆レーザー（注 4）をあてることで反強磁性であった薄膜が強磁性となり、磁化を増やすことができるという画期的な成果を挙げました。
- ◆レーザーにより強磁性を実現できるという本成果は、将来の超高速スイッチング素子につながる事が期待されます。

3. 発表概要：

兵庫県立大学大学院理学研究科の和達大樹教授と Yujun Zhang 研究員らは、東京大学大学院理学系研究科の片山司助教（研究当時、現：北海道大学 准教授）と近松彰助教（研究当時、現：お茶の水女子大学 准教授）らと、ドイツの Helmholtz-Zentrum Berlin の研究グループと共同で、コバルト酸化物 $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5.5}$ の薄膜における磁気構造の超高速な変化を、軟 X 線の反射率の磁気円二色性と共鳴磁気回折の時間分解測定（注 5）により観測に成功しました。その結果、レーザー照射してピコ秒（=1 兆分の 1 秒）という超高速な時間の後に、反強磁性であった薄膜が強磁性となり、磁化が増加するというスピンのダイナミクスを明らかにしました。

超高速なスピンのダイナミクスは、レーザー光の照射による将来の超高速メモリーなどにつながるため、基礎学理および応用の観点から大きな注目を集めています。今回の発見により、レーザーが薄膜の磁気構造を瞬間的に変える新しい操作手段になることを実証しました。今後、光を利用したスピン操作やさまざまな物質の研究がさらに盛んになり、それを応用した次世代の光素子の開発が促進されることが期待されます。

本成果は、英国科学誌『Communications Physics』に 3 月 7 日午前 10 時（現地時間）にオンライン掲載されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

これまでの物質科学では、物質内の電子の自由度のうち電荷を用いるものが主流であり、これが半導体などのエレクトロニクスでした。21 世紀に入り、電子の自由度のうちスピンを用いるスピントロニクスが大いに研究されています。特にスピンの操作により、超高速でエネルギー効率のよいデータ処理が可能となることが期待されています。ここで、超高速とはピコ秒やそれ以下の時間スケールであり、超短パルスのレーザーを用いたスピン操作が不可欠となっています。

レーザー照射を磁性体に行う研究としては、強磁性体の磁化を消す「消磁」が主であり、レーザー照射によって磁化を増やし強磁性を作り出す研究は、ほとんど行われていませんでした。ところがごく最近、温度上昇によって反強磁性(低温)から強磁性(高温)に転移する性質を持つ鉄ロ

ジウム合金で、レーザー照射により反強磁性—強磁性転移が実現されました。今回我々は、このような現象を合金でなく酸化物薄膜で実現したいと考え、鉄ロジウム合金同様の反強磁性から強磁性への転移があるコバルト酸化物 $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5.5}$ の薄膜に対して、レーザー照射によって強磁性の実現を試みました。

② 研究内容と成果

軟 X 線時間分解測定はドイツの放射光施設 BESSY II で行いました。測定に用いたコバルト酸化物の薄膜は、 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の基板上に膜厚 35 ナノメートルで作製されました。図 1 に示す実験配置によって軟 X 線時間分解測定を行い、図 2 に示した磁化の時間変化の様子が観測されました。3 種類のレーザー強度の照射結果を示していますが、どの場合もレーザー照射 (0 秒) の後、磁化が増える様子が見られています。この結果より、図 3 のように、コバルトのスピン光励起状態のイメージ図が得られました。反強磁性状態に対するレーザー照射により、水平軸方向の磁化が増大しています。このように、コバルト酸化物の薄膜において、超高速な強磁性の実現に成功しました。

③ 社会的意義・今後の予定

本研究により、反強磁性であった酸化物薄膜がレーザー照射で強磁性になることが明らかになったとともに、ピコ秒スケールで超高速なスピン操作が可能であることが示されました。さらに、この方法は超高速で行えるため、今後の光を利用したスピン操作やさまざまな物質の研究を通じ、それを応用した次世代の光素子の開発につながることを期待されます。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域 (研究領域提案型) 「量子液晶の物性科学」 (JP19H05824)、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」 (JPMXS0118068681)、JSPS 科研費 (JP19H01816, JP19H02594, JP17F17327)、および日本板硝子材料工学助成会の助成のもとに行われました。

5. 発表雑誌:

雑誌名: Communications Physics

論文タイトル: Photo-induced Antiferromagnetic-ferromagnetic and Spin-state Transition in a Double-perovskite Cobalt Oxide Thin Film

著者: Yujun Zhang, Tsukasa Katayama, Akira Chikamatsu, Christian Schuessler-Langeheine, Niko Pontius, Yasuyuki Hirata, Kou Takubo, Kohei Yamagami, Keisuke Ikeda, Kohei Yamamoto, Tetsuya Hasegawa, Hiroki Wadati

DOI 番号: 10.1038/s42005-022-00823-4

6. 問い合わせ先:

【研究内容に関すること】

兵庫県立大学大学院理学研究科 教授 和達 大樹 (わだち ひろき)

TEL: 0791-58-0509

E-mail: wadati@sci.u-hyogo.ac.jp

【報道に関すること】

兵庫県立大学播磨理学キャンパス経営部総務課

TEL : 0791-58-0101

E-mail : soumu_harima@ofc.u-hyogo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

TEL : 03-5841-8856

E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説 :

注1 : 軟 X 線

X 線のうちでも比較的波長の長いもの。硬 X 線は原子間距離である 0.1 ナノメートル(1 ナノメートルは 10 億分の 1 メートル) 程度より波長が短い領域であるが、軟 X 線は 1 ナノメートル程度と、波長がその 10 倍程度長い。

注2 : 磁気円二色性

物質が磁化を持つ場合、その物質に光をあてるとその吸収率や反射率は、光の偏光が左右の円偏光で差が生じる。この性質が磁気円二色性である。特に、元素ごとに固有のエネルギーの X 線を用いると磁気円二色性が大きくなり、元素ごとの磁化の大きさを知ることができる。

注3 : 共鳴磁気回折

X 線は波の性質を持つため、物質に当てると結晶格子によって折れ曲がり、干渉効果によって強いピーク点が現れる。これは物質中の周期構造の情報を持っている。特に、元素ごとに固有のエネルギーの X 線を用いると、共鳴増大により磁気構造の情報を得ることができる。

注4 : レーザー

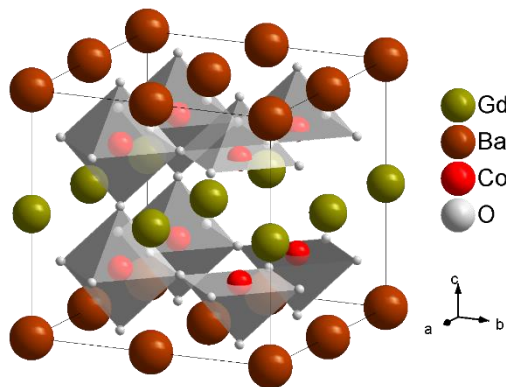
光を増幅してコヒーレントな光を発生させる発振器を用いて人工的に作られる光である。強度や指向性が非常に強く、超短パルス光を作ることにもできる。本研究ではチタンサファイアレーザーを用いており、波長は 800 ナノメートル程度である。

注5 : 軟 X 線時間分解測定

物質にレーザーパルス照射して励起した後、遅延時間をつけた軟 X 線パルス照射して、軟 X 線の反射率の磁気円二色性と共鳴磁気回折の測定を行うこと。特に本研究では、磁気円二色性により強磁性、共鳴磁気回折により反強磁性のダイナミクスを観測することができる。

8. 添付資料：

(a)



(b)

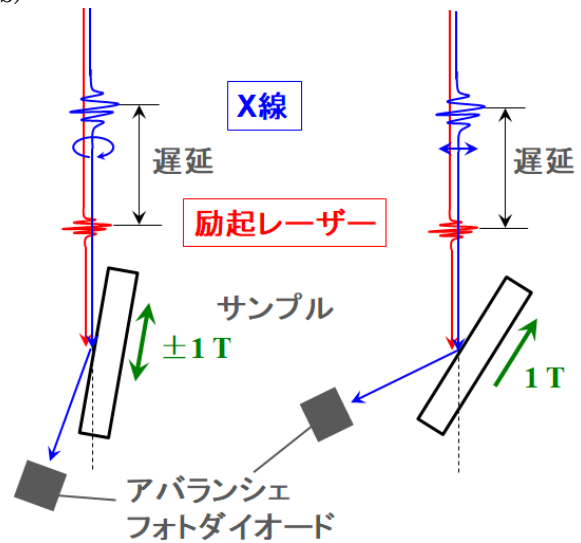


図1：(a) $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5.5}$ の結晶構造。(b) 軟 X 線時間分解測定の設定アップ。反射率の磁気円二色性（左）と共鳴磁気回折（右）。軟 X 線（図中青色の線）とレーザー光（赤線）を同時に試料に照射し、レーザー光によって引き起こされる磁性の変化を軟 X 線により測定する。検出器はアバランシェフォトダイオードである。

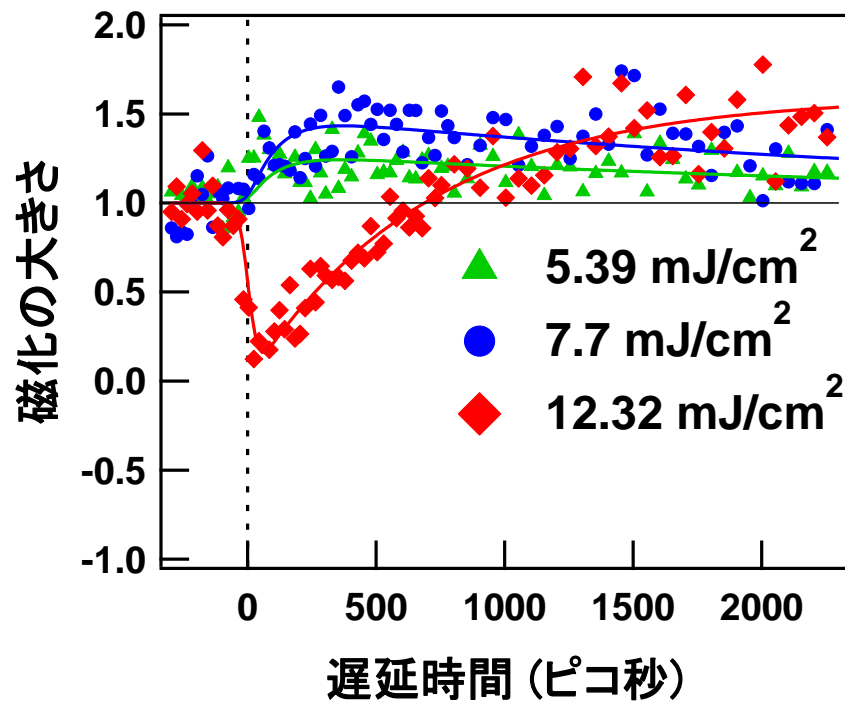


図2：軟 X 線時間分解測定で観測された磁化の時間変化の様子。横軸の単位はピコ秒：1兆分の1秒である。反強磁性状態に対して、レーザー照射（0秒）の後に磁化が増える様子が見られる。

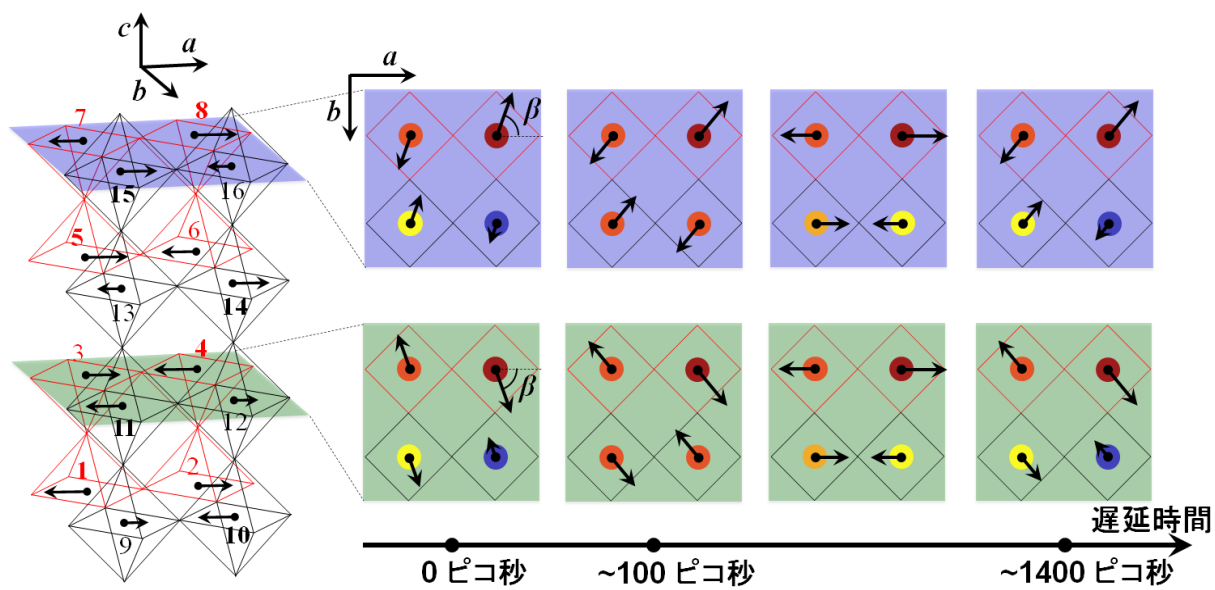


図3：コバルトのスピンの光励起状態のイメージ図。レーザー照射により、水平軸方向の磁化が増大している。