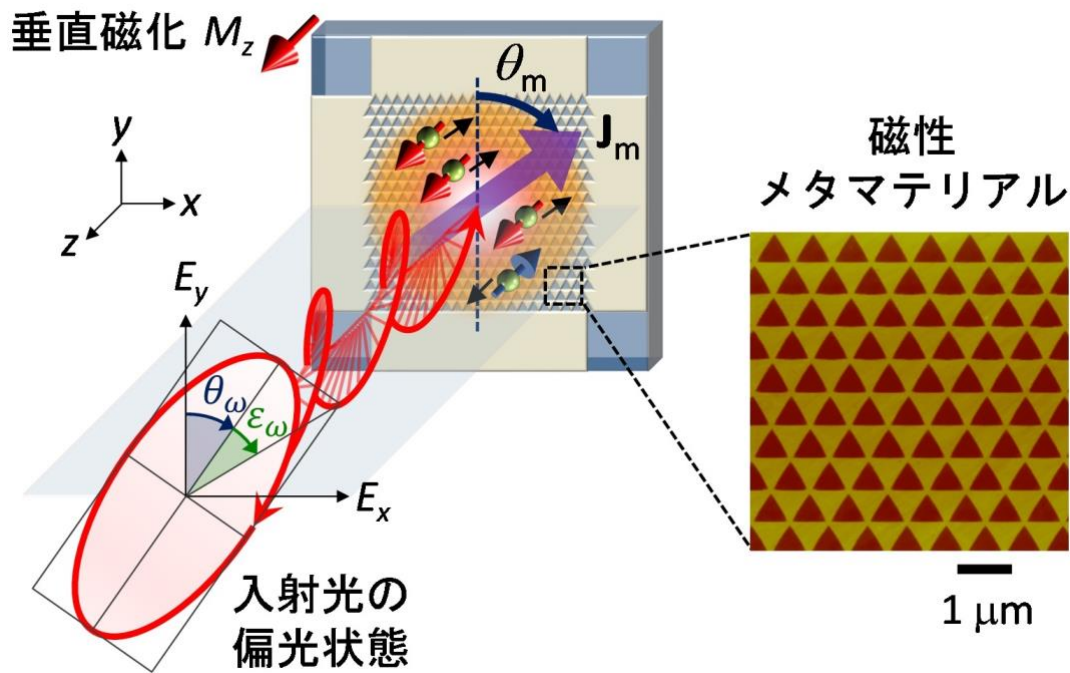




スピン流を光で完全に制御する新原理を開拓
超高速・高性能な光スピントロニクスデバイスの実現に期待

【発表のポイント】

- ナノ空間（ナノは 10 億分の 1）の対称性を人工操作した磁性メタマテリアル^{注1)}を新たに開発
- 電子スピン^{注2)}の流れ（スピン流^{注3)}を光の偏光^{注4)}状態により超高速で完全制御する新原理を開拓
- 次世代のスピントロニクス^{注5)}デバイス設計の自由度を飛躍的に向上、超高速光スピントロニクスへの応用に期待

【概要】

近年、電子が持つ小さな磁気の性質（スピン）を積極的に利用するスピントロニクス技術が、低消費電力・高密度なデバイス実現の観点から注目を集めています。スピントロニクス機能の多くは、電流（電荷の流れ）のスピン版であるスピン流（スピンの流れ）によって駆動されるため、スピン流の革新的な生成・制御手法の開拓が求められていました。

今回、国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学未来材料・システム研究所の加藤剛志 教授と岩田聡 教授（当時）は、ナノ空間の対称性を人工操作した磁性メタマテリアルを新たに開発し、室温かつ超高速で、スピン流の伝搬方向や大きさを光パルス^{注6)}の偏光状態により完全制御する新原理を開拓しました（図 1）。この成果は、次世代のスピントロニクスデバイス設計の自由度を飛躍的に向上させるだけでなく、従来の光科学技術・スピントロニクス技術をナノテクノロジー

一により横断的かつ重層的に集積・発展させる超高速光スピントロニクスへの応用が期待されます。

本研究は、東北大学大学院理学研究科の松原正和 准教授、京都大学理学研究科の柳瀬陽一 教授、東京大学先端科学技術研究センターの渡邊光 助教らと共同で行ったものです。

本研究成果は、2022 年 11 月 7 日（英国時間）発行の英国科学雑誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

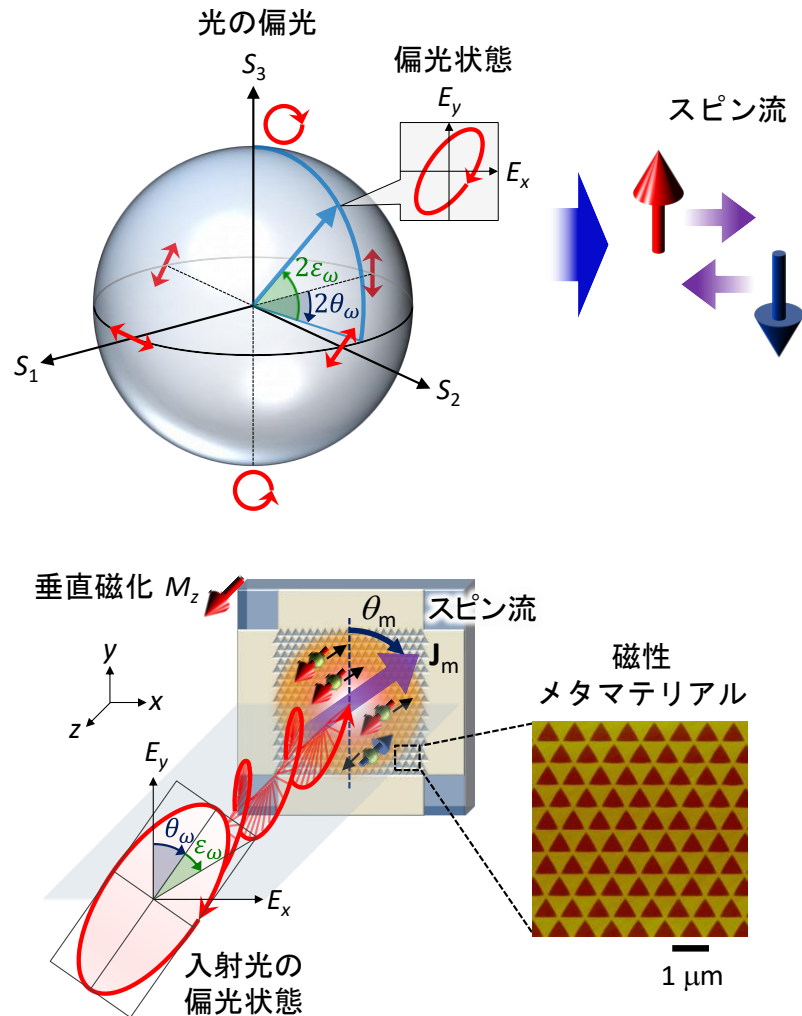


図1 研究の概念図

上段：光の偏光状態を表すポアンカレ球。光の任意の偏光状態は、ポアンカレ球上のある1点に対応する。赤道上の点はすべて直線偏光、北極と南極は左右円偏光、それ以外の点は楕円偏光に対応する。緯度によって偏光方向 θ_ω を表し、経度によって楕円率角 ϵ_ω を表すことで、光の任意の偏光状態を表すことができる。

下段：ナノ空間の対称性を人工操作した磁性メタマテリアルを用い、非接触かつバイアス印加無しで、光の偏光自由度（偏光方向 θ_ω 、楕円率角 ϵ_ω ）の利用によりスピンの伝搬方向 θ_m や大きさ $|J_m|$ を超高速で完全制御する。

【詳細な説明】

<背景>

物質の構成要素の1つである電子は、マイナス符号の電荷を持っているだけでなく、小さな磁気の性質（スピン）を持っています。近年、電子が持つ電荷の自由度に加えてスピンの自由度を積極的に利用するスピントロニクス技術が、電気・磁気デバイスの新しい駆動原理の創出や省エネルギー化技術の観点から注目を集め、これらに関する研究が世界的規模で進められています。スピントロニクス機能の多くは、電流（電荷の流れ）のスピン版であるスピン流（スピンの流れ）によって駆動されます（図2）。スピン流を用いれば、超低損失な不揮発性磁気メモリーや量子情報伝送などが実現可能になると期待されており、スピン流の革新的な生成・制御技術の開拓が急務となっています。

<研究内容>

今回、松原准教授らは、ナノテクノロジーを用いた微小な空間制御、とりわけナノ空間における「物質の対称性の人工操作」により、スピン流を完全光制御する新原理の開拓を目指しました。また、光による非接触かつ超高速のスピン流の自在制御を行うために、光ガルバノ効果^{注7)}に着目しました。光ガルバノ効果は、物質に外部電場などのバイアスを印加することなしに、光照射のみにより方向性を持つ直流電流が流れる現象です。この電流にスピンの自由度を付与することができれば、光によりスピン流（以後、スピン偏極電流も含む）を生成・制御することが可能になると期待されます。対称性を用いた考察から、3回回転対称性^{注8)}と垂直磁化^{注9)}を同時に持つ特殊な物質がスピン流の完全光制御に適していることが分かりました。加藤教授、岩田教授（当時）らは、室温で磁石の性質（強磁性）を示す、コバルト（Co）と白金（Pt）から成るCo/Pt多層膜に、一辺の長さが数百ナノメートル（ナノは10億分の1）の正三角形の微小な穴を周期的に空けることで、3回回転対称性と垂直磁化を同時に持つ「対称性を人工操作」した磁性メタマテリアルを実現しました（図1下段）。

作製した磁性メタマテリアルに光パルス照射したところ、i) バイアス印加なしで超高速のスピン流が流れる[超高速応答機能]、ii) スピン流の伝搬方向およびスピンの向きを、磁性メタマテリアルの垂直磁化の向きにより反転できる[磁気スイッチ機能]、iii) 光パルスの偏光方向を変えると、スピン流を意図する方向に伝搬させることができる[伝搬方向制御機能]、iv) 光パルスの楕円率角を変えると、スピン流の大きさを制御できる[強度制御機能]、ことなどが分かりました（図3）。これらの振る舞いは、人工的に操作された対称性から予想される振る舞いと完全に一致し、これにより、スピン流を完全光制御する革新的な光スピントロニクス機能の基礎原理を開拓しました。

<今後の展開>

スピン流の制御は、革新的スピントロニクス機能を実現するための中心的課題です。これまで、スピン流の生成・制御手法として、電流・熱・音波・光・マイクロ波・機械的振動などが知られていますが、室温かつ超高速で、伝搬方向や大きさを完全制御できるのは本手法のみです。今回得られた結果は、スピントロニクス技術の根幹を成すスピン流の生成・制御に対して、ナノテクノロジーを用いた「物質の対称性の人工操作」により、多くの既存物質をも機能化する普遍的な新原理・新機能を開拓するモデルとなるものであり、次世代のスピントロニクスデバイス設計の自由度を飛躍的に向上させるものです。さらに、今回新たに開発した磁性メタマテリアルは、従来の光科学技術・スピントロニクス技術をナノテクノロジーにより横断的かつ重層的に集積・発展させる超高速光スピントロニクスへの応用が期待される他、新しい光－電気－磁気融合変換技術の開拓など、学術的・産業的に重要な多くの新機能創出が期待されます。

<付記>

本研究は、東北大学大学院理学研究科の小林隆嗣 大学院生（当時博士課程前期）の修士論文研究の一環として行われたものです。本研究を遂行するにあたり、東北大学高等研究機構先端スピントロニクス研究開発センター（CSIS）の支援を受けました。また、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金・基盤研究（A）[課題番号：21H04649]、挑戦的研究（萌芽）[課題番号：22K18962]、若手研究（A）[課題番号：17H04844]、および挑戦的萌芽研究[課題番号：16K13658]などの助成を受けて行われました。

【論文情報】

雑誌名：*Nature Communications*

論文タイトル：Polarization-controlled tunable directional spin-driven photocurrents in a magnetic metamaterial with threefold rotational symmetry

著者：Masakazu Matsubara, Takatsugu Kobayashi, Hikaru Watanabe, Youichi Yanase, Satoshi Iwata, and Takeshi Kato

DOI 番号：10.1038/s41467-022-34374-7

URL：<https://doi.org/10.1038/s41467-022-34374-7>

【用語解説】

注1）（磁性）メタマテリアル

自然界の物質では不可能な光応答を可能とする、光（電磁波）の波長よりも小さな構造を持つサブ波長人工物質のこと。メタマテリアルを使うと、例えば、負の屈折、完全レンズ、クローキング（透明マント）など、これまで不可能だった新

しい技術の開発が期待されている。メタマテリアルを磁性体で作製したものは磁性メタマテリアルと呼ばれる。

注2) (電子) 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る。

注3) スピン流

電荷の流れである電流と対比して、電子スピンの流れをスピン流と呼ぶ。特に、電荷とスピンの両者が流れる場合はスピン偏極電流と呼ばれ、電荷の流れを伴わない純粋なスピンの流れは純スピン流と呼ばれる。

注4) 偏光

光は電場と磁場（電磁場）の振動が空間を伝わる波であり、この振動方向が揃ったものを偏光と呼ぶ。光の伝搬方向と垂直面内での電磁場の振動を見るとき、振動方向の軌跡が直線的な場合を直線偏光、振動方向の軌跡が円を描く場合を円偏光と呼ぶ。

注5) スピントロニクス

従来のエレクトロニクス（電子の電荷としての性質を利用する技術）に、電子が持つ磁石の性質（スピン）を取り入れる技術のこと。既存エレクトロニクスデバイスの限界打破と新機能の実現が期待されている。

注6) 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。特に、パルス幅（時間幅）が極めて短く、数百フェムト～数フェムト秒（フェムトは 1000 兆分の 1）のパルス幅を持つ光パルスは超短光パルスと呼ばれる。

注7) 光ガルバノ効果

物質に光を照射した際に、外部電場を印加しなくても方向性を持つ直流電流（光電流）が発生する現象のこと。発生した光電流のスピンの揃っている場合はスピン偏極光電流となる。

注8) 3 回回転対称性

ある軸のまわりに 3 分の 1 回転（120° 回転）させると、元の状態に戻る性質のこと。

注9) 垂直磁化

物質中で特定の方向にスピンの揃った状態を強磁性と呼び、そのような性質を持つ材料は強磁性体と呼ばれる。強磁性体はマクロにスピンの揃った磁化を持っており、ハードディスクのような記録媒体などで利用されている。強磁性体薄膜では、磁化の向きやすい方向が膜面内方向と膜垂直方向の2種類があり、膜垂直方向を向いている磁化を垂直磁化と呼ぶ。

【参考図】

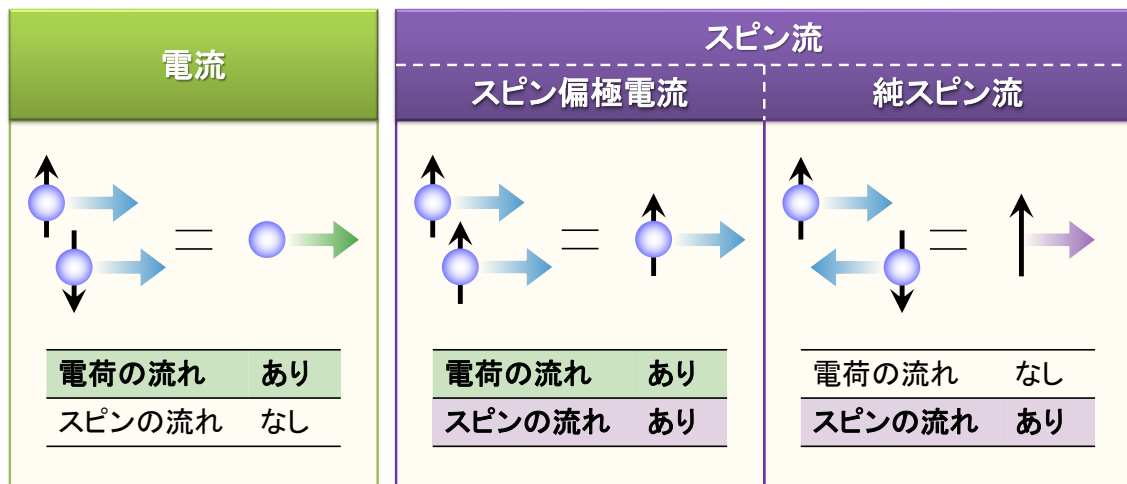


図2 電流とスピン流

(左) 電流：電荷は流れるが、スピンは流れない。(中央) スピン偏極電流：電荷もスピンの両方とも流れる。(右) 純スピン流：電荷は流れないが、スピンは流れる。

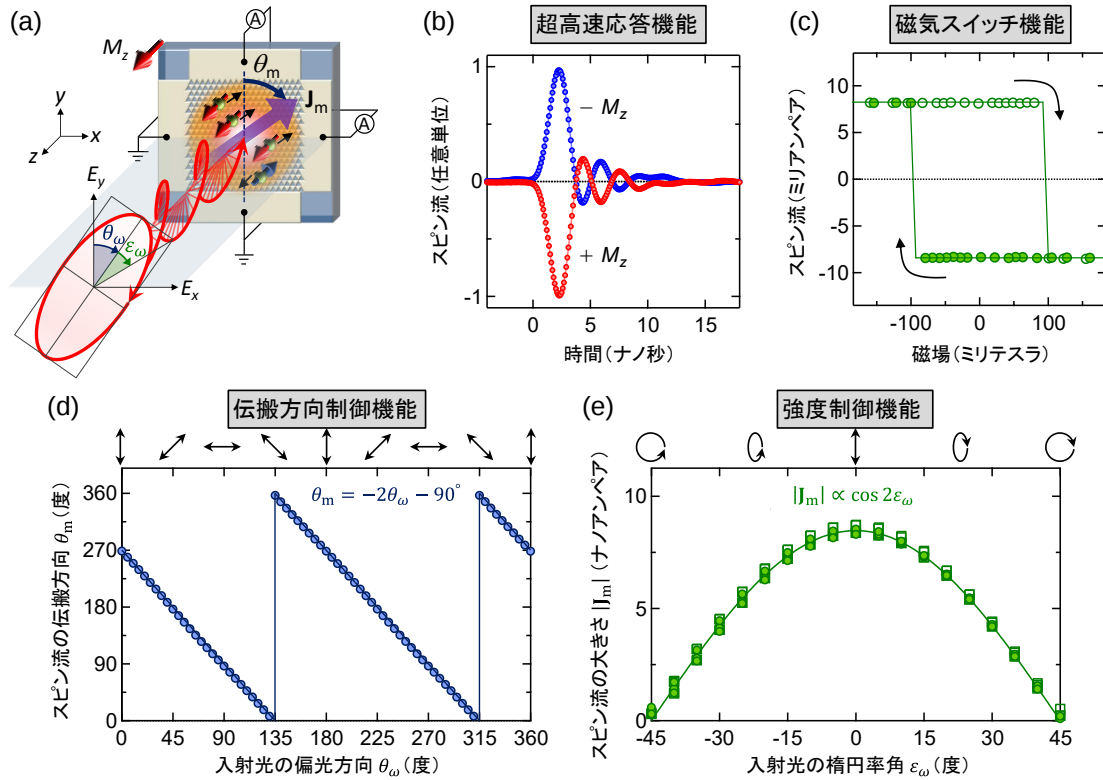


図3 磁性メタマテリアルを用いた、スピン流の完全光制御の実現

(a)実験配置。(b) 超高速応答機能：光パルスの照射により、瞬時にスピン流が流れる。スピン流の流れる方向は、垂直磁化 M_z の反転により向きが反転する。(使用した装置の時間分解能により制限されているが、実際にはナノ秒よりはるかに高速な応答の実現が期待されている)。(c) 磁気スイッチ機能：外部磁場により磁性メタマテリアルの垂直磁化の向きを反転すると、スピン流の伝搬方向およびスピンの向きが反転する。つまり、スピン流が磁気と直接結合し、磁気によりスイッチできる。(d) 伝搬方向制御機能：光パルスの偏光方向 θ_ω により、スピン流の伝搬方向 θ_m を自在に制御できる ($\theta_m = -2\theta_\omega - 90^\circ$)。(e) 強度制御機能：光パルスの楕円率角 ϵ_ω により、スピン流の大きさ $|J_m|$ を自在に制御できる ($|J_m| \propto \cos 2\epsilon_\omega$)。実験では、波長 800 nm (ナノメートル)、パルス幅 100 fs (フェムト秒)、繰り返し周波数 80 MHz (メガヘルツ) のレーザー光を照射し、スピン偏極電流を生成している。そのため、スピンの流れ (スピン流) を電荷の流れ (電流) として検出することができる。