

2025年2月4日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

## 磁石での波と光が強結合した状態を 室温で実現することに成功 量子コンピューターの操作に期待

### 【発表のポイント】

- 金属のらせん構造と磁石で構成されるメタマテリアル<sup>(注1)</sup>を用いて、室温で光（マイクロ波）と磁石が極めて強く結合した状態を実現しました。
- 量子コンピューターの操作、表裏が決まったマジックミラーの開発に繋がると期待されます。

### 【概要】

光と磁石が結合した状態はマグノンポラリトン<sup>(注2)</sup>と呼ばれ、超伝導量子ビットを用いた量子コンピューターの操作に繋がるために、多方面から研究されています。これまでの研究では、金属の箱（マイクロ波にとっての共振器）に磁石を入れ、マイクロ波を当てることで強い結合が実現されてきました。これを超える結合比を持つ極めて強い結合（超強結合、結合比 0.1 以上）を実現するためには、低温の超伝導体が共振器として用いられています。しかし室温で安定した超強結合マグノンポラリトンを作ることができれば、量子コンピューターの操作を室温で実現できる可能性があります。

東北大学大学院理学研究科の三田健太郎大学院生、同大学学際科学フロンティア研究所（大学院工学研究科兼務）の千葉貴裕助教、同大学高度教養教育・学生支援機構の児玉俊之特任助教と冨田知志准教授（大学院理学研究科兼務）、京都工芸繊維大学電気電子工学系の上田哲也教授、京都大学大学院工学研究科の中西俊博講師、理化学研究所放射光科学研究センターの澤田桂研究員は、金属のらせん構造のカイラルメタ原子と絶縁性の磁石の磁性メタ原子からなる人工構造体、磁気カイラルメタ分子を作製し、マイクロ波に対する応答を調べました。その結果、メタ分子では室温で結合比 0.22 の超強結合マグノンポラリトンが実現していることが明らかになりました。そのみならず光の透過が表と裏とで異なる方向非相反性<sup>(注3)</sup>も実現していました。本研究では、カイラルメタ原子を共振器としてメタ分子に取り込むことで、金属箱や冷却を必要とせず、コンパクトで室温動作するマグノンポラリトン媒体の開発に成功しました。

本成果は1月17日、米国物理学会による学術誌 Physical Review Applied に速報論文（Letter）として掲載されました。

## 【詳細な説明】

### 研究の背景

超伝導量子ビットを用いた量子コンピューターとの情報のやりとりでは、携帯電話で用いられるマイクロ波と呼ばれる、波長が数センチメートル程度の光が用いられます。具体的にはマイクロ波を磁石での波（マグノン）に結合させることで、量子コンピューターと計算の命令や結果をやり取りすることができるようになります。このようなハイブリッド量子系には、マイクロ波とマグノンが強く結合した状態（強結合状態）を作り出すことが重要です。

これまでの研究では、金属の箱（マイクロ波にとっての共振器）に磁石を入れ、マイクロ波を当てることで強結合が実現されてきました。これを超える極めて強い結合（超強結合状態、結合比 0.1 以上）を実現するためには、低温の超伝導体が共振器として用いられてきました。よって室温で光と磁石が極めて強く結合した超強結合マグノンポラリトンを実現することは、まだまだ挑戦的です。そこで本研究グループでは、天然には存在しない性質を示す人工構造物質（メタマテリアル）を用いて、超強結合マグノンポラリトンを室温で実現することに取り組んできました。

### 今回の取り組み

本研究グループは、メタマテリアルを舞台としてスピントロニクス<sup>(注4)</sup>とマイクロ波光学の知見を融合し、磁石と光の結合状態を調べました。絶縁性の磁石であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）の円柱である「磁性メタ原子」を、銅のらせん構造の「カイラルメタ原子」に挿入し、「磁気カイラルメタ分子」を作製しました。

周波数 10GHz 程度（X バンド領域）のマイクロ波の透過を測定した結果、カイラルメタ原子に共鳴したマイクロ波と磁性メタ原子のマグノンが結合比 0.22 で極めて強く結合し、室温で超強結合マグノンポラリトンが実現していることが明らかになりました。この結果は、これまで金属箱や低温を必要としていた超強結合マグノンポラリトンの新しい実現方法として注目されます。そして量子コンピューターの室温での操作手法の開発に繋がります。

さらにカイラルメタ原子と磁性メタ原子での対称性の破れに起因して、メタ分子の上からマイクロ波を照射した場合と、下から照射した場合で透過係数（つまり屈折率）が異なる方向非相反性が確認されました。このような方向非相反性は、光の伝搬方向に依存して屈折率が変化するという意味で、方向依存複屈折と呼ばれます。これはマイクロ波にとって表裏の決まったマジックミラーの実現に繋がります。

### 今後の展開

今後は、更なる強結合（深強結合と呼ばれる、結合比 1 以上）状態を目指し

ます。これにより量子コンピューターの操作や新たな量子状態の実現が可能になります。またより強い非相反性を実現することを目指します。これによりマイクロ波の一方向透過が可能になります。さらに我々のメタ分子は、金属の箱から出しても自立的にマグノンポラリトンを実現できるため、空気中にメタ分子を並べることでマイクロ波にとっての「磁場」のようなものを実現することができると期待されます。今回はマグノンとマイクロ波が結合したポラリトンを研究対象としましたが、マグノン以外の準粒子（フォノン、エキシトン、プラズモンなど）もポラリトンを形成します。メタ原子を組み合わせてメタ分子を作製し、そのメタ分子を並べてメタ材料を実現することで、まるで化学のように新しい準粒子を「合成」することができます。

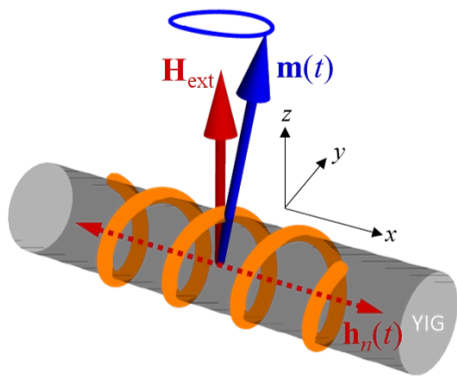


図 1. 磁気カイラルメタ分子でのマグノンポラリトンの概念図。外部磁場  $H_{\text{ext}}$  の元で、磁性体での磁化  $m(t)$  の歳差運動とマイクロ波の磁場  $h(t)$  が結合し、マグノンポラリトンが生成される。

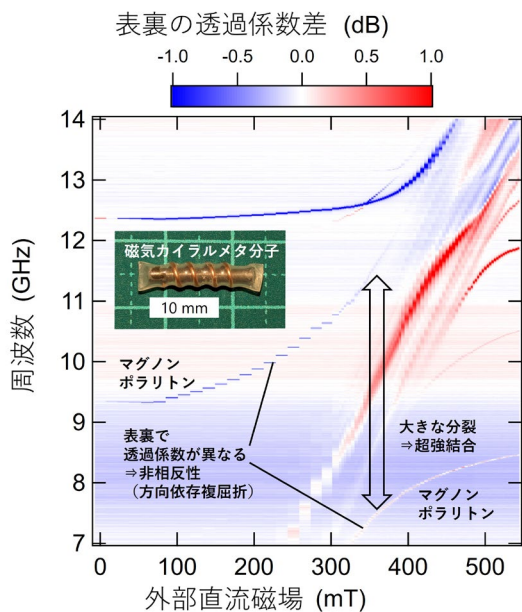


図 2. 磁気カイラルメタ分子の写真と実験結果。マグノンポラリトンが大きく分裂していることが、超強結合状態を示す。結合比は 0.22。また表裏の透過係数が異なることが、非相反性（方向依存複屈折）を示している。

#### 【謝辞】

本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金（JP24H02232「キメラ準粒子」、23K13621、22K14591）と科学技術振興機構 CREST（JPMJCR2102）の支援を受けて行われました。

#### 【用語説明】

##### 注1. メタマテリアル

天然物質では困難な物性を実現することができる人工構造物質。マイクロ波領域での負屈折率メタマテリアル、メタマテリアル不可視化クローク（透明マント）などが有名。

##### 注2. マグノンポラリトン

磁石は電子のスピンが揃った状態と考えられる。このスピンの波であるマグノンと呼ばれる準粒子が、マイクロ波などの光が結合した状態（ポラリトン）をマグノンポラリトンと呼ぶ。ポラリトンにはこの他にも、格子振動（フォノン）と結合したフォノンポラリトン、電子と正孔のペアである励起子と結合した、励起子ポラリトン、金属表面に局在化した自由電子の集団振動（表面プラズモン）と結合した表面プラズモンポラリトンなどがある。

##### 注3. 方向非相反性

表から見た場合と裏から見た場合で、物質の屈折率が異なる現象。磁気光学（MO）効果による一般的な非相反性とは異なり、偏光に依存せず、光の進行方向に依存して透過係数や屈折率が異なる現象。表裏の決まったマジックミラーの実現に繋がる。

##### 注4. スピントロニクス

電子の電荷を基本とした従来の半導体デバイスにかわり、電子の磁氣的性質（スピン）も利用する新たなエレクトロニクス技術。低消費電力かつ高密度な磁気記録素子などの幅広い応用が期待される。

#### 【論文情報】

タイトル：Ultrastrongly coupled and directionally nonreciprocal magnon polaritons in magnetochiral metamolecules

著者： Kentaro Mita, Takahiro Chiba, Toshiyuki Kodama, Tetsuya Ueda, Toshihiro Nakanishi, Kei Sawada, Satoshi Tomita\*

\*責任著者：東北大学高度教養教育・学生支援機構（兼務：大学院理学研究科

物理学専攻) 准教授 富田知志

掲載誌 : Physical Review Applied

DOI : 10.1103/PhysRevApplied.23.L011004

URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.L011004>

**【問い合わせ先】**

(研究に関すること)

東北大学 高度教養教育・学生支援機構

准教授 富田 知志

TEL:022-795-7667

Email: [tomita@tohoku.ac.jp](mailto:tomita@tohoku.ac.jp)

(報道に関すること)

東北大学教育・学生支援部

学務課 学務企画係

TEL: 022-795-3819

Email: [gaku-kikaku@grp.tohoku.ac.jp](mailto:gaku-kikaku@grp.tohoku.ac.jp)