

## 人工スピナイスの三次元化によるスピン波特性の向上 ～高性能な学習型演算素子の実現に向けて～

### ポイント

- ① ナノスケールで形状制御された人工磁石を周期的に近接して配置させた人工スピナイス (※1)が次世代の情報記録素子や学習型演算素子として注目されている。
- ② ナノ磁石を三次元的に制御することで、単一の磁石内に 16 個の状態を実現。更に、強磁性層間の極めて強い磁気相互作用により、各状態間のエネルギー分裂を飛躍的に増大。
- ③ ナノ磁石の優れた熱安定に加え、N 個の磁石を配置することで、 $16^N$ 状態に拡張することで、多数の状態を利用した高機能な学習型演算素子としての実用化が期待。

### 概要

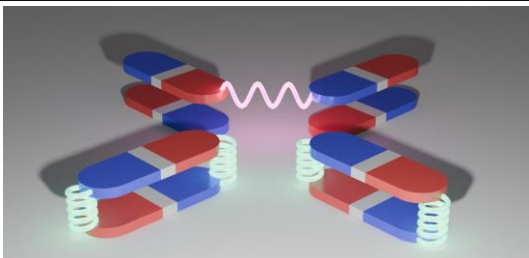
磁石の中でねじれたスピンの波として伝搬するスピン波(※2)は、伝搬時に電流が流れないため、情報担体として利用することで、消費電力の低減が期待できるとともに、10 GHz を超える高周波領域でも動作するため、スピン波トランジスタ(※3)やスピン波ロジック回路(※4)などへの応用が期待されています。更に、近接したナノ磁石を二次元周期的に配置させることでスピン波の伝搬を制御するマグネティック結晶や人工スピナイスなどが知られており、これらの特性を活用した新しい脳型学習演算回路(ニューロモルフィックチップ)(※5)の実現が期待されています。しかしながら、ナノ磁石間に働く相互作用が強くないため、変調効果やエネルギーの分裂幅が十分でないことが問題となっていました。

本研究では、従来、単一の強磁性層で構成されていたナノ磁石を、2つの強磁性層と層間を分離する非磁性体からなる三層構造で構成し、極めて強力な磁気相互作用を実現することに成功しました。

九州大学大学院 理学研究院の Troy Dion 助教(プロジェクト教員)と同 木村崇 教授らの研究グループは、英国の Imperial College London と University College London のグループ及び米国の University of Delaware と University of Colorado Colorado Springs らと共同で、強磁性/非磁性/強磁性の三層構造で構成されたサブミクロンサイズのナノ磁石からなる人工スピナイスを絶縁体基板上に作製し、それらの磁気特性を詳細に調べました。その結果、単一のナノ磁石は、各磁性層のスピンの向きや旋回方向に応じて 16 個の状態を構成できること、また、強磁性層間の強い磁気相互作用により、6 GHz を超える強いスピン波モードの結合が生じることを実証しました。

本成果は、これまで二次元的に構成されてきた人工スピナイスを三次元化することで、性能が大きく向上することを示した結果であり、より高性能な磁気情報デバイスやより高機能なスピン波脳型学習演算デバイスなどへの応用が期待できます。

本成果は、2024 年 05 月 14 日(現地時間)に英国の科学誌 Nature Communications のオンライン版に掲載されました。



(図)三次元人工スピナイスにおける強い磁気相互作用と弱い磁気相互作用の概念図

**研究者からひとこと：**人工スピナイスの研究は、今回の共同研究者である英国グループが世界を先導する成果を次々に発表しています。今後、九州大学グループが得意とする電氣的・熱的スピン注入法等を人工スピナイス構造に適用することで、更なる高性能化に貢献していきたいと思ひます。

## 【研究の背景と経緯】

スピン波とは、磁石の中でねじれたスピンの波として伝搬する磁気波のことで、マグノン(※2)とは、このスピン波を量子化した物理量です。マグノンは電荷を持たず、伝搬する際に電流が流れないため、情報担体として利用することで、消費電力の低減が期待できるとともに、絶縁体中も伝わるのが可能で、10 GHz を超える高周波領域でも動作するため、マグノントランジスタやマグノンロジック回路などの実現が期待されています。更に、近接したナノ磁石を周期的に配置させ、マグノンの波数と角周波数(エネルギー)の関係を調整することで、マグノンの伝搬を制御するマグノニック結晶や人工スピンアイスなどが知られており、これらの特性を活用して新しい脳型学習演算回路(ニューロモルフィックチップ)を実現する研究が行われています。しかしながら、隣接したナノ磁石間に働く相互作用が十分でないため、変調効果や異なるスピン波モード間の結合強度が十分でないことが問題となっていました。

## 【研究の内容と成果】

本研究では、これまで、単一の強磁性層で構成されていたナノ磁石を、膜厚の異なる2つの強磁性NiFe層(※6)と層間を分離する非磁性アルミニウム層からなる三層構造で構成して、二次元人工スピンアイスを作製しました。ここで、各強磁性層は、向きが異なる単一磁区状態と巡回方向の異なる磁気渦状態の合計4つの状態が形成されるため、二層で構成された場合、 $4 \times 4 = 16$ 個の状態が実現できます。このようなナノ磁石をN個配置することで、 $16^N$ 個の状態を実現できます。

研究グループは、このような多層ナノ磁石で構成された人工スピンアイスの静的、及び動的磁気特性を詳細に調べたところ、2つのNiFe層間に作用する極めて強力な磁気相互作用に起因する特徴的なスピン波特性を発現することを見出しました。

具体的には、2つの磁性体のスピンの位相が同一の位相で歳差運動する音響モードと逆位相で歳差運動する光学モードが、ある磁場強度になると強く結合し、反交差特性が誘起されることを明らかにしました。この結合強度は、中間層のAlの膜厚により調整可能であり、膜厚が20 nmの時に、6GHzを超える大きなエネルギー分裂を引き起こすことを示しました。

## 【今後の展開】

人工スピンアイスは、以前は、フラストレーション系の研究などが主流でしたが、人工知能技術の発展に伴い、脳型の学習演算を実施できるハードウェアの必要性が高まり、近年、ニューロモルフィックチップとしての利用が精力的に検討されています。人工スピンアイスは、ナノ磁石の形状や配列を調整するだけで、マグノンの伝搬特性を容易に変調させることができるため、高い制御性と柔軟性を兼ね備えています。これらを実用化するには、人工スピンアイス状態を低消費電力で簡便に制御できる入力方法、また、人工スピンアイス状態を高感度・高精度かつ簡便に検出する方法などの開発が必要不可欠であり、そのためにはスピン流の利用がカギになると考えています。

【参考図】

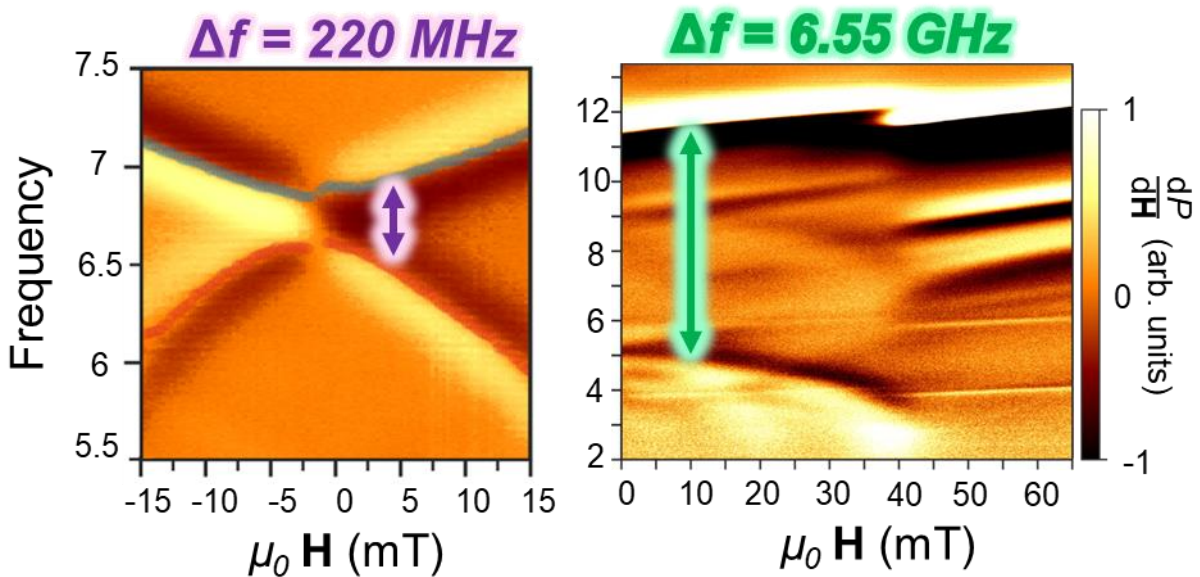


図1.これまでの単層型二次元人工スピンアイスと今回開発した三層型人工スピンアイスにおけるスピン波共鳴特性の外部磁場依存性

【用語解説】

(※1) 人工スピンアイス

スピンアイスとは、基底状態において、隣接間の相互作用のフラストレーションが原因となって、氷と同様の法則であるアイスルールが成立する磁気秩序を持つ物質です。通常は、スピンアイスは、特殊な三次元結晶構造内において発現する。人工スピンアイスでは、二次元的周期的に配列したナノ磁性体間の相互作用において、同様のアイスルール的なフラストレーションが発現する構造である。

(※2) スピン波、マグノン

全てのスピが一方向に揃った状態からスピンを励起したとき、その励起が交換相互作用や静磁気的な相互作用によって物質中を波として伝播したもの。磁気秩序が存在する強磁性体、反強磁性体、フェリ磁性体中で生じる。マグノンとは、このスピン波を量子化したものである。

(※3) トランジスタ

固体中の電子の流れを電氣的に制御して、スイッチや増幅機能を持たせた電子デバイスで、通常は、半導体で構成される。近年の微細化限界や消費電力の観点から、半導体以外の材料でトランジスタと同様の機能を持たせた電子デバイスの開発が行われている。

(※4) ロジック回路

前述のトランジスタやその他の電子デバイスを組み合わせ、デジタル信号を電氣的に処理して、論理演算をIC 部品で、こちらも通常、半導体で構成されているが、他の材料や物理原理に基づくロジック回路の開発も行われている。

(※5) ニューロモルフィックチップ

人間の脳と同様の働きを持つ物理的な現象を利用して、人間と同じような働きを持つ物理的電子回路を実現しようとする演算素子のこと。

(※6) 強磁性 NiFe 層

鉄-ニッケルの合金からなる強磁性体(磁石)を薄膜化したもの。透磁率が極めて高く、また、酸化反応が起こりにくいため、人工スピナイス構造の作製に極めて適した材料である。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (21F20790) の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Nature Communications, 15, 4077 (2024)

タイトル：Ultrastrong magnon-magnon coupling and chiral spin-texture control in a dipolar 3D multilayered artificial spin-vortex ice

著者名：Troy Dion, Kilian D. Stenning, Alex Vanstone, Holly H. Holder, Rawnak Sultana, Ghanem Alatteili, Victoria Martinez, Mojtaba Taghipour Kaffash, Takashi Kimura, Rupert F. Oulton, Will R. Branford, Hidekazu Kurebayashi, Ezio Iacocca, M. Benjamin Jungfleisch and Jack C. Gartside

D O I : 10.1038/s41467-024-48080-z

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院 理学研究院 教授 木村 崇 (キムラ タカシ)

TEL : 092-802-4082 FAX : 092-802-4107

Mail : t-kimu@phys.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp