

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04870

研究課題名（和文）複数の局所スピン軌道トルク励起によるスピン波共振器の創製と高周波デバイスへの展開

研究課題名（英文）Development of spin-wave resonators by multiple local spin-orbit torque excitations and their application to high-frequency devices

研究代表者

神田 哲典（Koda, Tetsunori）

大島商船高等専門学校・電子機械工学科・教授

研究者番号：80616079

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では非磁性金属に直流電流を流すことで生じる非磁性金属・強磁性体薄膜界面に生じるスピン軌道トルクを利用した複数箇所の磁化歳差運動励起源を波源とするスピン波と磁化歳差運動間の位相同期現象を利用したスピン波共振器の創製を目指した。局所歳差運動とスピン波間相互作用をST-FMR法により評価し、相互作用の定量評価の指針を得ることができた。さらに、局所領域に加わるトルク量を決める電流密度依存性を数値シミュレーションにより詳細に調べたところ、その歳差運動周波数が電流密度によって大きく変化することを見出し、この現象が局所領域間の磁化方向のねじれが原因であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られたスピン波と局所磁化歳差運動間相互作用の評価はそのトルク成分の特徴を捉えられたことはスピン波間相互作用を活用する高周波デバイスの高効率励起を設計する評価方法を付与する重要な成果であるといえる。さらに、数値シミュレーションからは条件によっては磁化が膜厚方向にねじれる現象が生じる可能性があることが示唆され、それに伴い、スピン波の波長が大きく変化することが示唆された。本研究で得られたこれらの成果を活用することで、大きな非線形変化を本系に付与することが可能であり、高周波デバイスのみならず、物理リザパーコンピューティングに代表されるエッジコンピューティングへの応用展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to create a spin-wave resonator utilizing the phase-locking phenomenon between spin waves and locally excited magnetization precession motion using the spin-orbit torque at the interface between a nonmagnetic metal and a ferromagnetic thin film caused by applying a DC current to a nonmagnetic metal. The interaction between local precession and spin waves was evaluated by the ST-FMR method, and a guideline for the quantitative evaluation of the interaction was obtained. Furthermore, the current density dependence, which determines the amount of torque applied to the local region, was investigated in detail by numerical simulation, and it was found that the frequency of the precessional motion varies significantly with the current density, indicating that this phenomenon is caused by the twist in the magnetization direction between the local regions.

研究分野：磁気物性

キーワード：スピン波 磁化歳差運動 スピン軌道トルク 位相同期

### 1. 研究開始当初の背景

非磁性金属中に電流を流すと、伝導電子にはたらくスピン軌道相互作用のはたらきによって電流と垂直方向にスピン角運動量の流れ(スピン流)が発生する。そのため、Pt や Ta に代表されるスピン軌道相互作用の大きな非磁性金属と強磁性薄膜を積層させると、非磁性層に形成されたスピン流は強磁性層に流れ込むために強磁性層の磁化に対してトルクを与える効果が生じ、スピン軌道トルク(SOT)とよばれる。

強磁性体の磁化は外場によってその方向を変化させると、歳差運動を伴いながら終状態方向へ減衰する。SOT の大きさと方向は非磁性体を通る電流量と向きで決まる。磁化方向が変化するトルクを与える条件において、その電流量を大きくすると磁化の終状態に向かう減衰運動よりも歳差運動が大きくなり、自励発振が生じる。この発振周波数はマイクロ波帯域であることから直流電流励起による新規高周波発振素子への応用展開が検討されている。発振周波数は強磁性体にはたらく有効磁場の大きさと方向によって決まる。磁化歳差運動を利用する発振素子を実用化するための技術課題として、

1. 発振周波数の幅を少なくするために有効磁場を均一にする。

2. 消費電力を下げるため、自励発振に必要な電流量の低減。

がある。1の解決方法として従来手法では強磁性体をナノサイズにする方法が取られている。しかしながら、その形状に起因する局所的な反磁場の不均一性によってその発振周波数に幅があるので期待される自励発振特性が得られないことが問題となっている。また、2については材料探索やデバイス構造の最適化の探索が図られている状況にある。

### 2. 研究の目的

図1に本研究で検討するスピン波共振器の構造を示す。強磁性薄膜上にPtに代表される大きなスピン軌道相互作用を示す非磁性金属からなる平行な2本以上の複数の線路から構成される。動作原理は次の通りである。非磁性金属線路に電流を流すことでスピン軌道トルクを強磁性薄膜に付加することで局所的な磁化歳差運動を励起する。磁化歳差運動の励起に伴って発生するスピン波は周囲に伝搬する。スピン波の波長で決まる前述の位相同期現象が生じる条件では、磁化歳差運動を共鳴増幅が生じる。

スピン波共振器によって共鳴励起された磁化歳差運動は局所的な磁場変動を生じるので高周波が発生する。この素子の特徴は強磁性薄膜を加工せずに用いるため内部磁場を均一にできること、さらに、スピン波と磁化歳差運動の位相が同期する周波数条件で両者の相互作用によって共鳴励起されるため、従来の強磁性共鳴現象を利用する場合とは全く異なる励起手法であるところである。本研究は複数の局所歳差運動の位相同期を利用した高周波発振源の開発を最終目的としている。

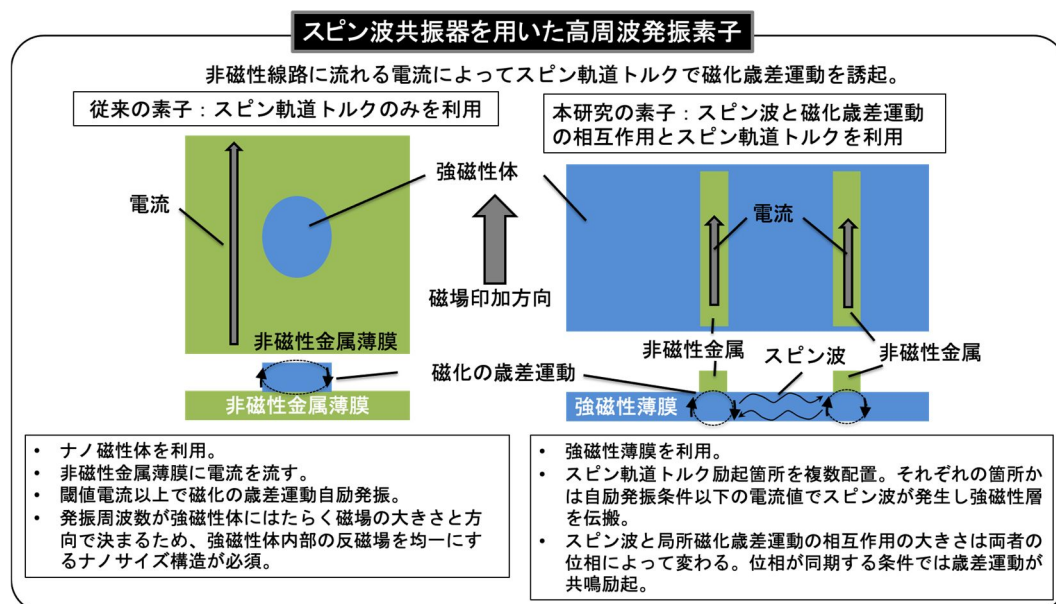


図1. スピン波共振器の構造とそれを用いた自励発振素子

### 3. 研究の方法

ST-FMR 測定を用いたスピン波と局所磁化歳差運動の定量評価  
 本研究の基幹技術となるスピン波と局所磁化歳差運動の相互作用の定量評価が必要となる。そ

ここで、SOT を利用した強磁性共鳴評価、すなわち、ST-FMR から検討し、その評価を通じて、スピン波と局所磁化歳差運動が位相同期条件を検討した。研究に用いる強磁性絶縁薄膜として、スピン波伝搬距離が数 mm と長いイットリウム鉄ガーネット (YIG) 薄膜、非磁性金属としてスピン軌道相互作用の大きい Pt を用いた。

数値シミュレーションによる検討およびスピン波共振器の試作とアンテナ法による特性評価マイクロマグネティクスによる数値シミュレーションにより、位相同期条件の検討を実施した。具体的には SOT 印加領域間隔および SOT の大きさに影響を与える入力電流密度依存性を中心に検討した。計算プログラムには Mumax3 および oomf を使用した。スピン波共振器の作製には ST-FMR 測定に使用した試料と同一の膜構造を用い、ST-FMR 評価に用いる素子に直流電流を印加することで評価した。励起状態の評価は素子から発生することが期待されるマイクロ波を素子上に配置したコプレーナウェイブ線路によって検波し、スペクトラムアナライザーに取り込むアンテナ法により実施した。

#### 4. 研究成果

本研究の期間では主に本目的を達成するために必要な要素技術であるスピン波と局所歳差運動の相互作用評価と歳差運動励起条件をマイクロマグネティクスによる数値計算により詳細に検討した。

本手法で重要な局所歳差運動とスピン波間相互作用を評価する手法として ST-FMR 法による評価を実施した。図 2 に示すように、従来のスペクトルに加えて、磁場の掃引に対して、より低磁場側に周期的に変動する信号を検出した。マイクロマグネティクスによる数値解析を実施したところ、実験結果から得られたスペクトルを再現することに成功し、この信号が上述の相互作用に起因する信号であることを強く示唆された。すなわち、膜構造の最適化で SOT のトルク量を今後上げることでスピン波励起を行うことで上述の共振構造が可能であることを示す結果であるといえる。

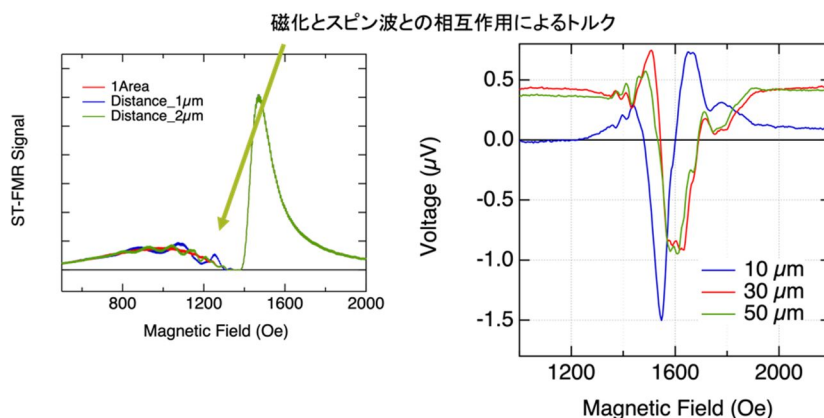


図 2 .ST-FMR 評価による局所磁化歳差運動とスピン波の相互作用評価結果

さらに、局所領域に加わるトルク量を決める電流密度依存性をシミュレーションにより詳細に調べた。図 3 に示すように、その歳差運動周波数が電流密度によって大きく変化することを見出し、この現象が局所領域間の磁化方向のねじれが原因であることを明らかにした。この結果は歳差運動を空間的に変調できることを意味しており、新たな展開が期待される成果であるといえる。

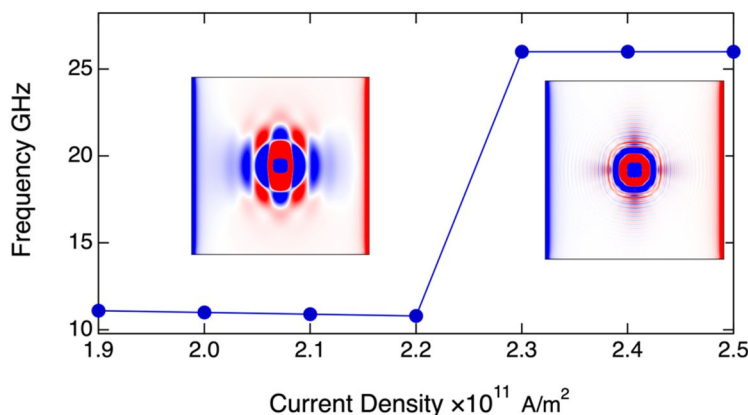


図 3 .SOT により誘起された局所領域磁化歳差運動周波数の直流電流密度依存性の数値計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koda Tetsunori, Nakagawa Ao, Muroga Sho, Endo Yasushi	4. 巻
2. 論文標題 Control of Magnetization Precession Frequency Using Current Density of Spin-Orbit Torque Applied to Local Area	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers)	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/intermagshortpapers58606.2023.10228553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koda Tetsunori, Muroga Sho, Endo Yasushi	4. 巻
2. 論文標題 Micromagnetics Simulation of Highly Efficient Oscillation of Magnetization in a Ferromagnetic Local Areas via Spin Waves Induced by Spin-Orbit Torque	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers)	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/intermagshortpapers58606.2023.10228207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koda Tetsunori, Muroga Sho, Endo Yasushi	4. 巻 58
2. 論文標題 Slot Line Waveguide Induced Magnetization Dynamics of Perpendicularly Magnetized La-YIG Thin Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmag.2021.3089769	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tetsunori Koda, Sho Muroga, Yasushi Endo
2. 発表標題 Evaluation of local magnetization precession and spin-wave interaction using ST-FMR
3. 学会等名 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ao Nakagawa, Kento Kawahara, Sho Muroga, Takayuki Ishibashi, Yasushi Endo, Tetsunori Koda
2. 発表標題 Micromagnetics Simulation of Current Density Dependence on Magnetization dynamics in Local Area Excited by Spin-Orbit Torque
3. 学会等名 7th STI-Gigaku 2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuki Hamada, Sho Muroga, Takayuki Ishibashi, Yasushi Endo, Tetsunori Koda
2. 発表標題 Study on Numerical Simulation of ST-FMR signal for the evaluation of the interaction between local magnetization dynamics and spin waves
3. 学会等名 7th STI-Gigaku 2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsunori Koda, Sho Muroga Shuichiro Hashi, Yasushi Endo
2. 発表標題 Evaluation of interaction between local magnetization dynamics and spin waves measured by ST-FMR
3. 学会等名 Intermag 2021 ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tetsunori Koda, Sho Muroga, Yasushi Endo
2. 発表標題 Enhancement of magnetization dynamics via spin waves by slot line waveguide for perpendicularly magnetized yttrium iron garnet
3. 学会等名 Intermag 2021 ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田哲典、室賀翔、遠藤恭
2. 発表標題 スピン軌道トルクを利用した局所領域における磁化ダイナミクスの共鳴励起に関するマイクロマグネティクスシミュレーション
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 恭 (Endo Yasushi) (50335379)	東北大学・工学研究科・教授  (11301)	
研究分担者	室賀 翔 (Muroga Sho) (60633378)	東北大学・工学研究科・准教授  (11401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------