

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：55502

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14114

研究課題名（和文）磁化歳差運動の位相同期現象を利用した高コヒーレントスピン波発振源の開発

研究課題名（英文）Development of highly coherent spin waves oscillator using mutual phase locking of spin dynamics

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・准教授

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）：スピン波を介した複数の磁化歳差運動位相同期制御手法の開発と高コヒーレントなスピン波発振源の創製を目指した。スピン波を励起する高周波電極として同一の幅の信号線とグランド線からなるスロット線路を用いたスピン波発生を検討した。高周波応答は大きな伝送線路形状依存性を示し、数値計算との比較からスピン波の位相同期現象によって磁化ダイナミクスが共鳴励起されることが示唆される結果を得た。さらに、素子から発生するスピン波の実験的な検出に成功し、スピン波干渉効果に起因すると考えられる特徴的な出力変化を検出した。これらの成果により、高コヒーレントスピン波発振源の設計指針が得られたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では高周波電極としてスロット伝送線路を用いることで複数の局所歳差運動領域同士を互いにそれぞれから発生するスピン波で同期させることで磁化歳差運動の共鳴励起ができることを実験的に示した。この位相同期現象に起因する非線形現象は従来見逃されていたマイクロサイズ領域の歳差運動に焦点を当てた成果として、学術的意義がある。さらに、この成果は任意の周波数発生を人為的に制御する指針を与える成果であり、スピン波発振源を始めとする高周波素子の開発に対する設計指針を与える。したがって、産業的意義のある成果である。

研究成果の概要（英文）：We aim to develop a method for phase-locked control of multiple magnetization precession motions via spin waves and to create a highly coherent spin-wave oscillation source. We investigated spin wave generation using a slot line consisting of a signal line and a ground line of the same width, instead of a coplanar line, which is commonly used as a high-frequency electrode to excite spin waves. The high-frequency response shows a large dependence on the transmission line geometry, and a comparison with numerical calculations suggests that the magnetization dynamics is resonantly excited by the phase-locked phenomenon of spin waves. Furthermore, we succeeded in experimentally detecting the spin waves generated by the device, and detected a characteristic output change that is thought to be caused by the spin wave interference effect. These results provide a guideline for the design of high-coherent spin-wave oscillation sources.

研究分野：磁気物性

キーワード：磁化歳差運動 スピン波 強磁性共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

強磁性共鳴に代表される磁化の歳差運動を磁性体の局所領域で誘起すると、隣接する領域には磁化の交換結合を通じて磁化の歳差運動が伝搬しスピン波とよばれる磁化歳差運動の波が生成される。スピン波は他の波と同様に重ね合わせの原理が成り立つため、その干渉効果を利用した超高感度磁気センサや、新たな信号伝達手法、論理演算素子としての応用展開が提案されており、現在、注目を集めている。干渉効果を十分に引き出してこのような用途を満たすためには、位相の揃った、即ち、高コヒーレントスピン波の形成技術が重要となる。

スピン波を励起する一般的な方法では、磁性薄膜上に配置された高周波電極に高周波電力を入力して磁性体の局所的な位置に高周波磁場を発生させる。現状の課題は、高周波電極から発生される高周波磁場の大きさや方向が電極近傍で不均一なため、磁化歳差運動の不均一性に起因して、励起されるスピン波のコヒーレンスが低いことである。

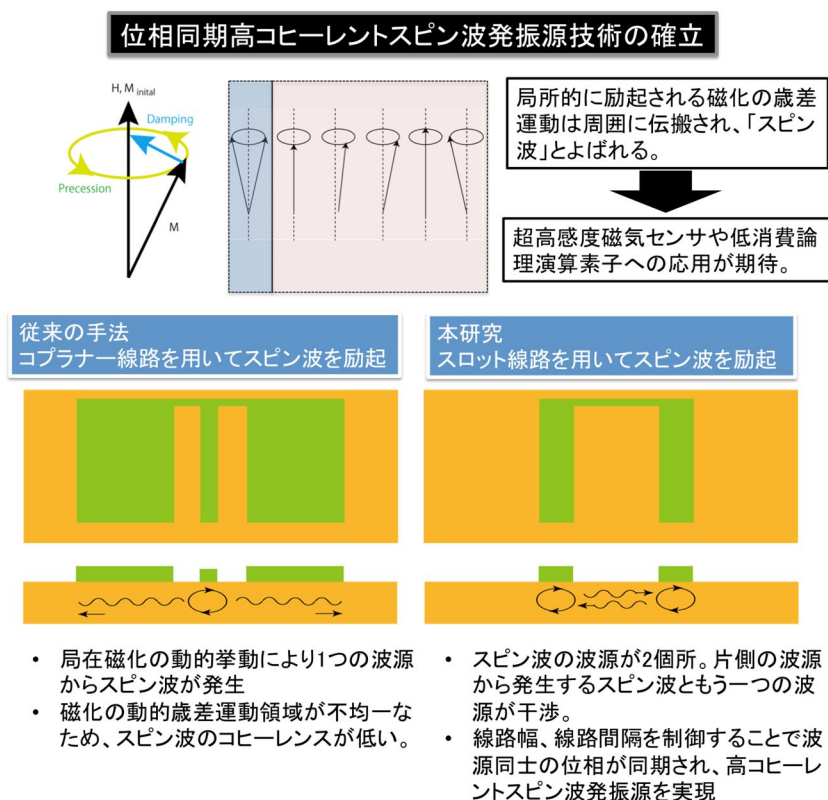


図1 局所磁化歳差運動とスピン波の干渉効果を利用した位相同期スピン波発振源の構想

### 2. 研究の目的

前述のようにスピン波は一般的な波と同様に重ね合わせの原理や干渉効果が起こる。この干渉効果はスピン波同士のみならず、局在磁化の歳差運動とスピン波間でも生じる。研究代表者は、この現象を利用してスピン波を通じて2つの局在磁化歳差運動を位相同期させる高コヒーレントスピン波発振源の創製方法を着想した。本研究ではこの課題を解決するために新規構造を利用した位相同期現象を利用した高コヒーレントスピン波発振源の創生を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究ではスピン波干渉効果を利用した高コヒーレントスピン波発振源の創製を数値シミュレーションと実験による検証に基づいて検討した。具体的な内容は下記の通りである。

【数値シミュレーション】磁化の歳差運動を記述するランダウリフシッツギルバート (LLG) 方程式に基づく数値シミュレーションを用いて、外部印加磁場、高周波電力条件 (周波数) 等の磁化歳差運動励起条件と電極間距離、位相の関係を検討した。

【実験による検証】数値シミュレーション結果に基づいて、一端が短絡 (ショート) し、線路幅、及び、線路間隔を系統的に変化させたスロット線路を強磁性薄膜上に形成された試料を作製した。このスロット線路を用いて入力周波数、印加磁場を変えながら高周波応答をネットワークアナライザにより評価した。スロット線路に入力された高周波電力の反射波は、磁化ダイナミクスが誘起されるとスロット線路のインピーダンス変化や電力が消費されるために反射電力強度が

変化する。コヒーレンスの高い磁化ダイナミクスが励起されると低い場合に比べて反射強度の変化量が大きくなり、且つ、磁場掃引によって評価した場合の変化率が大きくなることから、磁化歳差運動の状態を定量的に評価することができる。この手法を用いて、磁化歳差運動の系統的な評価を実施した。

#### 4. 研究成果

高コヒーレントなスピン波発生を目指して、スピン波を励起する高周波電極として一般的に用いられているコプラナー線路ではなく、同一の幅の信号線とグランド線からなるスロット線路を用いたスピン波発生を検討した。図2に示すように、信号線の間隔を系統的に変化させた素子を作製してその高周波応答を評価した結果、スピン波の生成に必要な磁化歳差運動の励起は素子構造に強く依存することを明らかにした。この原因を調べるためにマイクロマグネティクスに基づく数値シミュレーションを実施した結果、高周波電極周囲に局所的な磁化歳差運動が生じて2つの波源からスピン波が発生・伝搬が生じており、スピン波の位相と局所歳差運動の位相がそろった条件においては共鳴的に局所磁化歳差運動を増幅させることを明らかにした。特に、外部磁場の大きさで変化するスピン波の波長が関係していることがわかった。この新規に見出した現象は従来の磁性体の物性値によって決まる強磁性共鳴条件とは異なり、人為的に制御可能であることからスピン波発生素子設計に重要な指針を与える結果である。さらに、図3に示すように、スロット線路から1mm離れた場所に高周波電極を配置することでスピン波の直接計測にも成功した。本素子におけるスピン波の特徴は、その磁化歳差運動が素子サイズに依存すること起因してスピン波の強度が明瞭な磁場依存性を示すことで、スピン波干渉効果に起因すると考えられる特徴的な出力変化が現れた。このことは本研究において見出した磁化歳差運動の励起機構にスピン波干渉効果が大きく関与することを示す直接的な証拠であるといえる。

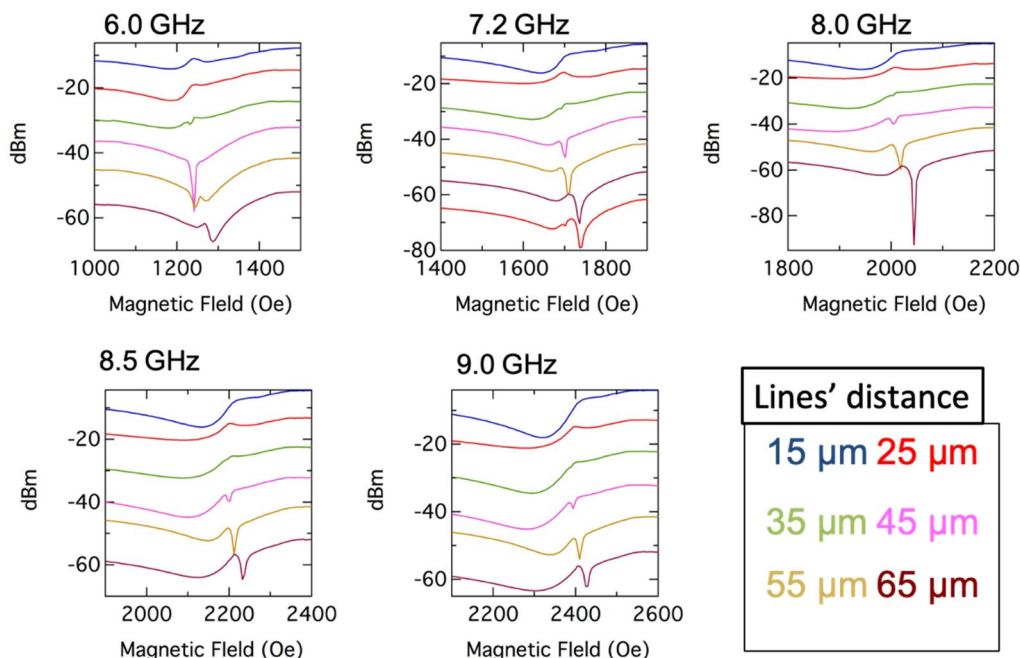


図2 伝送線路幅 10  $\mu\text{m}$  の素子における反射電力の磁場依存性と伝送線路間隔の関係

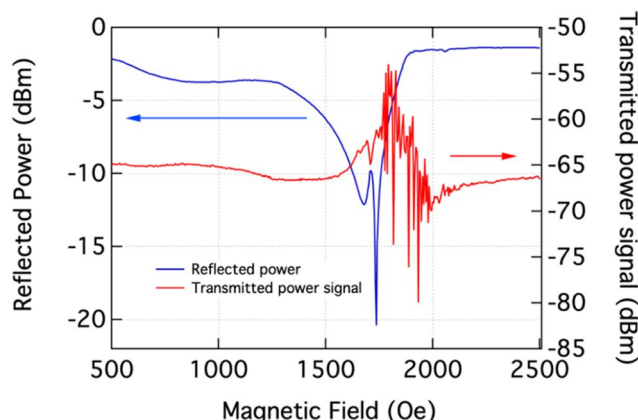


図3 スロット線路素子から発生したスピン波信号と磁化ダイナミクスの関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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, Muroga Sho, Endo Yasushi	4. 巻 116
2. 論文標題 Synchronized excitation of magnetization dynamics via spin waves in Bi-YIG thin film by slot line waveguide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 102403 ~ 102403
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5143519	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 Highly Sensitive Magnetic Field Sensing Using Magnetization Dynamics in Yttrium Iron Garnet Single-Crystal Thin Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	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/TMAG.2019.2895470	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Koda Tetsunori, Muroga Sho, Endo Yasushi
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 スロット線路を用いたイットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクス励起とスピン波の検出
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神田哲典、室賀翔、遠藤恭
2. 発表標題 スピン波干渉効果に起因する磁化歳差運動の増幅現象
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koda Tetsunori, Muroga Sho, Endo Yasushi
2. 発表標題 Artificial control of magnetization dynamics via spin waves by slot line waveguide
3. 学会等名 Intermag 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koda Tetsunori, Muroga Sho, Endo Yasushi
2. 発表標題 Magnetization dynamics in yttrium iron garnet single crystal thin films induced by slot line waveguides
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Tetsunori Koda, Sho Muroga, Yasushi Endo
2. 発表標題 Highly sensitive magnetic field sensing using magnetization dynamics in yttrium iron garnet single crystal thin films
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神田 哲典、室賀翔、遠藤恭
2. 発表標題 イットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクス励起における 高周波伝送線路形状依存性の検討
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮尾 康平、室賀 翔、遠藤 恭、神田 哲典
2. 発表標題 マイクロマグネティクスシミュレーションを用いた高コヒーレントスピン波形成条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------