

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月 19日現在

機関番号：11301  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23656003  
 研究課題名（和文） 電流誘起マグノニック結晶

研究課題名（英文） Current induced magnonic crystal

## 研究代表者

新田 淳作（NITTA JUNSAKU）  
 東北大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00393778

## 研究成果の概要（和文）：

スピン整流効果を用いることにより、パーマロイ細線中でスピン波の電気的な生成・制御・検出が可能であることを確認した。ホイスラー合金は、パーマロイに比べギルバートダンピング係数が小さくスピン波伝搬に適していることを確認した。また、繰り返し周期構造を有する制御線による周期的な磁場ポテンシャルを形成しスピン波にとって伝搬モードの存在しないマグノニック結晶が可能であることを確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

We have confirmed electrical generation, control and detection of spin wave in NiFe strip lines from a spin rectification method. It is found that a Heusler alloy has a lower damping coefficient than that of NiFe. Spin wave coupling can be controlled by a periodic magnetic potential, which can be used as a tunable spin wave filter. This is a basis of magnonic crystal.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：応用物理学・応用物性

キーワード：スピントロニクス、スピン波、磁性体、マグノニック結晶

## 1. 研究開始当初の背景

電子スピンは電荷と異なり保存量でないためスピン緩和を抑制する必要がある。磁性体は、スピンの向きがそろっているがスピンの拡散長は、極めて短く 10-100 nm のスケールでありスピン情報を短距離で失ってしまう。スピン波は、磁性体中のスピンの歳差運動が波動として結晶全体に伝わる現象であり、低エネルギーで励起が可能でありスピン角運動量が長距離にわたって伝搬する。このスピン波を情報の担体とするには電気的に生成・制御・検出する手法を開拓する必要がある。

## 2. 研究の目的

スピン波を情報の担体とするスピントロニクスの新たな展開に向けて、局所的かつ電気的に生成・伝搬制御・検出する手法を開拓することを目的とする。具体的には、周期的な磁気構造をもちいて人工的に制御可能なマグノニック結晶を形成し、スピン整流効果によってスピン波を高感度にかつ電気的に検出することを試みる。

## 3. 研究の方法

外部から制御可能なマグノニック結晶の形成とその中を伝搬するスピン波をスピン整流法により電気的に高感度で検出する。マ

グノンニック結晶形成による外部制御可能なスピン波ギャップを観測し、スピン波の様々なモードの違いによるギャップの形成条件を求める。さらに、スピン波の局所的な生成・マグノンニック結晶によるスピン波伝搬制御・局所的検出可能なスピン波デバイスを実現しスピン波エンジニアリングとしての設計指針を構築する。

#### 4. 研究成果

磁性体中のスピンの反転をすべてのスピンのみに分配して受け持たせようとするにより、低いエネルギー励起が可能となりスピン波を形成する。このスピン波伝搬は、一種のスピン流と見なすことができるが一般のスピン偏極電流に比べて伝搬距離が格段に長くスピン情報を伝える通信手段として着目されている。このスピン波を情報の担体として用いるには、局所的なスピン波生成、伝搬制御、電気的な検出方法を確立する必要がある。そこでまず、スピン波の電気的な励起（生成）と制御、電気的な検出を同時に確認することを試みた。次に、繰り返し周期構造を有する制御線による周期的な磁場ポテンシャルを形成しスピン波にとって伝搬モードの存在しないマグノンニック結晶が可能であることを確かめた。特に磁気ポテンシャル周期を短くした試料は、スピン波伝搬制御可能なスピン波のフィルターとして動作する。また、スピン波のより長距離伝送が期待できる、ホイスラー合金のダンピング係数の測定を行った。

##### (1) 局所磁場によって制御されたスピン波伝搬の電気的な検出

パーマロイ (NiFe) は比較的ダンピング係数が小さくスピン波の長距離伝搬が可能である。本実験では、局所磁場によって制御されたスピン波伝搬の電気的な生成・制御・検出を試みた。図1に作製した試料の写真とその模式図を示す。NiFe (長さ 1.8 mm, 幅 20  $\mu\text{m}$ , 膜厚 50 nm) をスピン波の伝送線として作製し、スピン波を励起するためのコプレーナ導波路 (CPW) を Py(NiFe)線にクロスして配置した。また、スピン波の電気的な検出は、C.-M. Hu らによって確立したスピン整流効果(Phys. Rev. Lett. **98**, 217603 (2007))により Py(NiFe)線上に配置した電圧端子により DC 電圧として検出することが可能である。スピン波の伝搬制御は、スピン波励起の CPW と電圧端子(b-c)の間に、局所磁場を印加するための制御線  $I_{dc}$  を配置しスピン波の伝搬が制御できるかを確かめた。

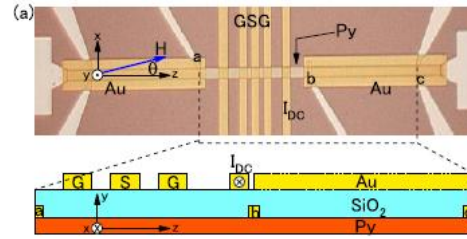


図1. 作製したスピン波生成・制御・検出用試料

図2には、スピン整流効果によって電気的に検出したスピン波の強度を示す。制御線に流す電流  $I_{dc}$  が作る局所磁場の大きさによりスピン波の振幅が徐々に小さくなる様子が観測された。これは、局所磁場がスピン波の局所ポテンシャルとして作用し伝搬を妨げること示している。従って、この局所ポテンシャルを周期的にすることにより、固体中の電子が感じるエネルギーギャップやフォトンニック結晶のようにスピン波の伝搬を完全に押さえるモードを作ることが可能となることを示唆している。

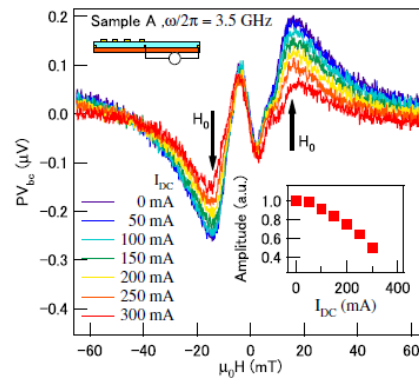


図2. スピン波強度の局所磁場依存性

##### (2) ホイスラー合金 CoFeAlSi の磁気異方性とダンピング係数

ホイスラー合金はスピン偏極率が通常の磁性体に比べて高く、スピントロニクス材料として注目されている。また、ギルバートダンピング係数も小さいことが期待され、スピン波のより長距離伝送が期待できる材料である。そこで、ホイスラー合金 CoFeAlSi (CFAS) のスピンダイナミクスについてダンピング係数と磁気異方性エネルギーをスピン整流効果により電気的に測定することを試みた。

CFASは(001)MgO基板上にスパッタによって30 nm成膜し、760  $\mu\text{m}$ 長で5  $\mu\text{m}$ から40  $\mu\text{m}$ 幅の線路を作製した。スピン波励起はCFAS線上に配置したCPWにより行い、強磁性共鳴はスピン整流効果により電気的に検出した。強磁性共鳴の共鳴線幅と共鳴周波数の関

係からダンピング係数を求めたところ 0.005 が得られた (図 3)。この値は、NiFe の値 0.02 に比べて小さくスピン波伝送に適していることが確認された。一方、CFAS の結晶構造は主に B2 構造であり、結晶構造を L2<sub>1</sub> 構造に近づけることにより、より小さなダンピング係数が得られると期待される。

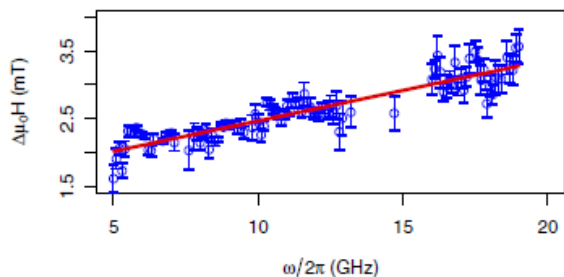


図 3. 強磁性共鳴の線幅と共鳴周波数の関係

また、CFAS 線幅を小さくすることにより磁気異方性が 4 回対称から 2 回対称へと変化し形状磁気異方性を付加することが可能であることが確認された(図 4)。

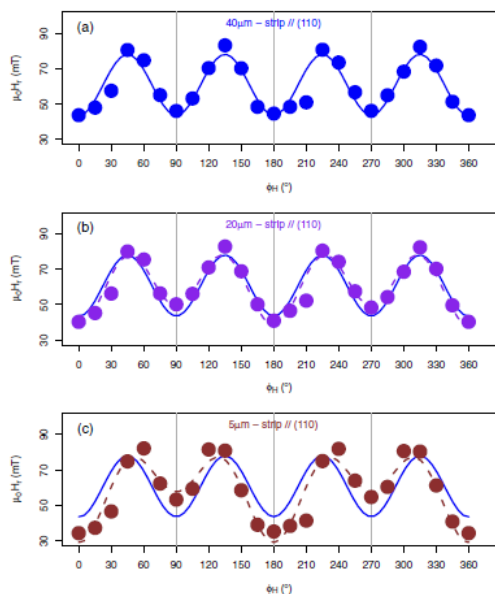


図 4. 共鳴磁場の角度依存性

### (3) 磁氣的周期ポテンシャルによるマグノニック結晶の作製

これまでに、実験 1 により局所磁場がスピン波の伝搬に対してポテンシャルとして作用することを確認してきた。そこで磁性体 NiFe(Py) 細線上を左右に繰り返し横切る制御線を配置し周期的な磁場を印加することにより、スピン波を閉じ込めたり、結合したりすることができることを試みた。フォトニクス結晶とのアナロジーにより、この周期的な磁場を用いることによりマグノニック結晶が形成されると期待できる。

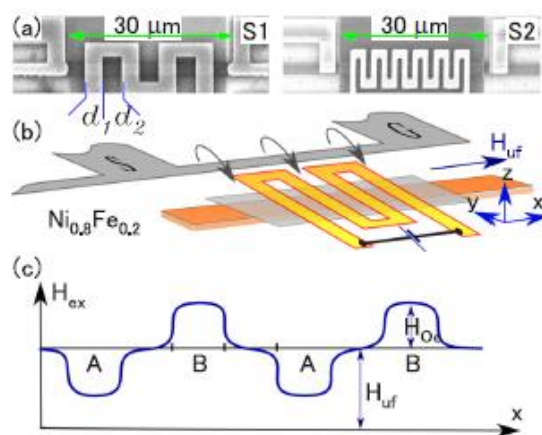


図 5. 作製したマグノニック結晶の SEM 写真とその模式図

図 5 には作製した、作製したスピン波伝搬制御実験用の素子の SEM 写真(a)と素子の模式図(b)を示す。Py 細線上には周期的な磁場を印加するための制御線を設けている。局所磁場周期が 3 μm と 1 μm の 2 つの試料を作製した。また、この制御線に流す DC 電流により、Py 線の磁化方向を反平行と平行に制御することができることを異方性磁気抵抗効果により確認した。また、スピン波の観測は、スピン波によるスピン歳差運動とマイクロ波の電場によって誘起される電流により発生する DC 電圧成分(スピン整流効果; PV)を測定することによりおこなった。図 7 は局所磁場周期が 1 μm の試料の結果に対応し、外部磁場と制御線に流す DC 電流により形成される周期的な磁場を変化させながら PV を測定した結果を示している。図 7 下のドットは、スピン波の共鳴ピークが局所周期磁場により発展していく様子を示している。局所磁場周期が 3 μm の時は観測されなかった共鳴ピークのレベル反発が 1 μm 周期では生じることが明らかになった。これは、磁気ドメイン間でスピン波の協同的な結合が生じていることを示している。以上の結果よりスピン波の伝搬モードは磁氣的なポテンシャル周期に強く依存し制御することが可能であることを示している。本実験では明瞭なスピン波ギャップを観測するに至っていないが、短周期ポテンシャルの試料においては、制御可能なスピン波のフィルターとして用いることが可能でありマグノニック結晶の特徴を示している。

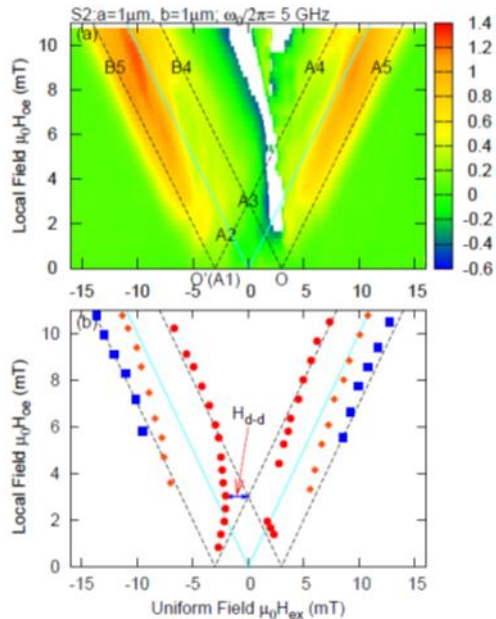


図6. 磁場周期が1  $\mu\text{m}$  の試料の結果。PVの周期磁場依存性。共鳴ピークが制御線に流す電流によって発展していく様子が観測される。局所周期磁場間隔が1  $\mu\text{m}$  の場合、共鳴ピークにレベル反発が生じている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- (1) Lihui Bai, M. Kohda, and J. Nitta, “Observation of spin wave modes depending on a tunable periodic magnetic field”, Appl. Phys. Lett. **98**, 172508-172510 (2011). (査読有)  
DOI: 10.1063/1.3584032
- (2) Lihui Bai, Y. S. Gui, Z. H. Chen, S. C. Shen, J. Nitta, C.-M. Hu, L. E. Hayward, M. P. Wismayer, and B. W. Southern, “Spin wave hybridization via direct mapping of spin wave evolution in ferromagnetic microstructures”, J. Appl. Phys. **109**, 093902-1 -6 (2011). (査読有)  
DOI: 10.1063/1.3583566
- (3) Lihui Bai, N. Tezuka, M. Kohda, and J. Nitta, “Anisotropy and Damping in CoFeAlSi via Electrical Detection of Ferromagnetic Resonance”, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 083001-1 -5 (2012). (査読有)  
DOI: 10.1143/JJAP.51.083001

[学会発表] (計1件)

柏 利慧, 好田 誠, 新田淳作, 「パーマロイ細線中のスピン波伝搬に関する電氣的制御」第72回応用物理学会学術講演会、2011年8月29日—9月2日、山形大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotai/b/top.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新田 淳作 (NITTA JUNSAKU)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00393778

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

好田 誠 (KOHDA MAKOTO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：00393778

柏 利慧 (BAI LIHUI)

東北大学・大学院工学研究科 ポストドク (H22-H23)