

# 研究報告書

## 「超低電力マグノンデバイスの基盤技術創出」

研究タイプ：大挑戦型

研究期間：平成 23 年 12 月～平成 29 年 3 月

研究者：関口 康爾

### 1. 研究のねらい

本研究では、光・熱・電磁信号からスピン信号への高効率エネルギー変換機能および新規スピン機能界面の創出に挑戦する。半導体 IC の熱限界を突破し、革新的機能を創生するには発熱のないスピン信号、熱流を利用するスピン信号の活用が必須となっている。スピン信号は強磁性/非磁性界面におけるキャリア変換に支配され、これまで電子スピンへの変換が試みられてきた。しかし、現在でも変換効率が極めて小さく、スピントロニクス研究の爆発的成長に至っていない。そこで本研究では、これまで注目されていなかった、界面を超高速で伝搬する表面マグノンに着目し、全く新しい概念である超高速・超低電力マグノンデバイスの基盤技術を創出する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

スピントロニクス研究では、スピン信号伝達およびスピン信号制御が最も重要な研究課題である。マグノンはスピン信号として、磁性体試料中を長距離にわたって伝搬できるため、機能性デバイスの有望な信号キャリアとなる。さきがけ研究前半3年間では、マグノンデバイスを動作させるため、マグノン制御に適用できる基礎現象の発見・解明に取り組んできた。マグノン伝搬特性やマグノン論理演算などの基礎研究に十分な研究体制を確立し、面内磁化膜を使ってマグノン速度80%増大を実現し、アッテネーション機能および論理演算素子のプロトタイプ構築を実現し、基盤技術創出という大枠を形成することに成功した(主な研究成果リストを参照)。

さきがけ研究後半2年間では、論理演算素子プロトタイプの実現性を広げるため、中核となるマグノン信号増幅のための基礎現象の解明に取り組んだ。強磁性金属、重金属、絶縁体などの異種元素の組み合わせによるヘテロ界面を制御することで、マグノン信号増幅5%を達成し、これまでに強磁性単一層で得られていた0.1%マグノン増幅のおよそ50倍の増幅効果を実現した。この結果は界面制御によるマグノン制御の可能性を開拓したものである。

#### (2) 詳細

##### 研究テーマA: ヘテロ界面作製技術確立とスピン信号評価

さきがけ研究で導入したスパッタ装置を駆使して、ヘテロ界面(FeNi/Pt多層膜)を持つ金属膜を作製することに成功した。そして、さきがけ研究で導入した電気プローバを使用して、信号キャリアとしてのマグノン伝搬を計測した。その結果、多層膜の組み合わせである金属混合比によってマグノン強度を自由に調節できることがわかった(アッテネーション機能創出)。へ

テロ界面の作製技術とスピン信号の評価に成功した(APL論文発表:論文1)。

### 研究テーマB: 表面マグノン変換・輸送に対する界面相形態の最適化

表面マグノンへのスピン信号変換とスピン信号輸送を調べるために、アモルファス FeNi とエピタキシャル Fe 薄膜におけるマグノン伝搬を研究した。さきがけ研究で開発したマイクロブリルアン散乱分光装置によってアモルファス FeNi 合金での空間分布を可視化することに成功し、そのマグノン信号を詳細に調べることに成功した(招待講演 23 件発表、APEX 論文発表:論文4)。その結果、ミクロンスケールで加工した試料ではエッジ効果や界面効果によって、

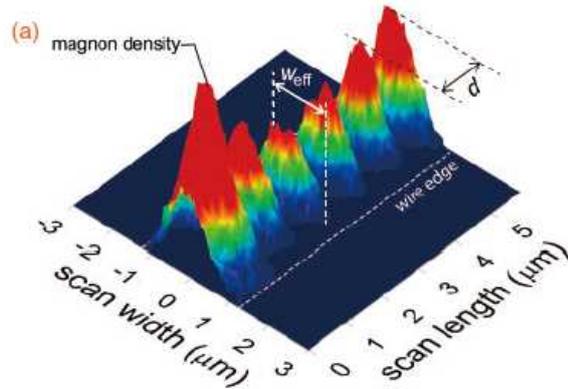


図1 マグノン分布の BLS 可視化

実際の試料幅ではない、マグノンが伝搬できる有効幅が存在することがわかった(図1)。またエピタキシャル Fe の成膜に成功し、電気信号測定によってアモルファス合金に比べて高速伝搬が実現していることがわかった。エピタキシャル Fe 薄膜の品質をさらに上げ、高精度電気・分光計測によって従来に比べて80%もマグノン伝搬速度を向上させることに成功した。

### 研究テーマC: 表面マグノンの電氣的位相制御の研究

マグノンは波の性質を保有しており、その位相がスピン偏極電流によって制御できることを証明することができた(招待講演 23 件、解説記事)。さきがけ研究で導入した電気プローバを駆使することによって、電子スピンを流した状態でアモルファス FeNi 合金でのマグノン伝搬を観測した。その結果、電子スピンの流れが持つスピントランスファートルクがマグノンに作用し、スピンの流れの方向に依存してマグノン位相が変化した。これは電氣的なマグノン制御の実現を意味し、マグノンデバイスを構築する基盤技術の創出に成功した。また、実際のナノスケールデバイスで位相制御を実現するには、磁性体の磁化が細線幅に沿う伝搬モードが重要となる。そのマグノン伝搬モードを、初めて実時間の電気波形として検出することができた。(APL 論文発表:論文3)。さらにスピントランスファートルクの効果を初めて詳細に調べ、バックワードモードでは内部磁場分布などがマグノン位相変化に複雑に寄与していることがわかり、結果として、これまでに得られているマグノン周波数シフト(位相変化)20 MHzに比べて10倍の200 MHzを実現した(図2)。

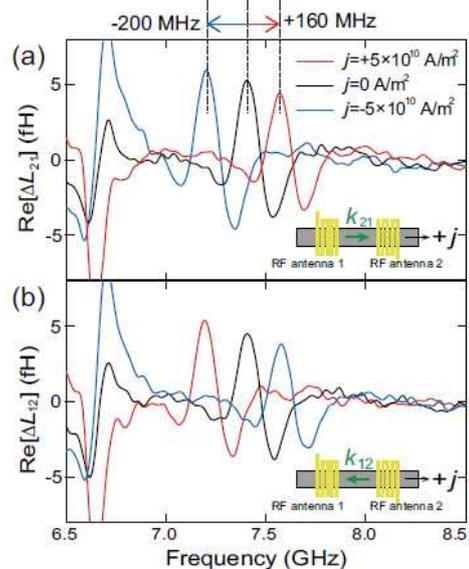


図2 バックワードモードでの電流によるマグノン共鳴周波数シフト

#### 研究テーマD: 重金属/強磁性/絶縁体界面に誘起される巨大電界効果の解明

マイクロブリルアン散乱分光測定を駆使して、磁性体の磁化を膜面垂直方向にそろえた状態でマグノン伝搬を測定した。その結果、重金属/強磁性/絶縁体界面を有する試料においてマグノンの振幅が増加・減少することを確認した(招待講演 23 件)。これはマグノン信号制御の上で、いまだなしていない増幅機能があることを意味する。この研究成果から重金属・強磁性金属・絶縁体の組み合わせを研究して、マグノン増幅機能を実現することを大挑戦の後半課題として設定し、研究加速支援を受けた。強磁性/重金属の二層界面をスパッタ装置により作製し、電流-スピン流変換を高効率で生じさせることでマグノン信号増幅5%を達成した。これは強磁性単一層で得られていた0.1%マグノン増幅のおよそ50倍の効果である。現段階での5%増幅では実用上は増幅とまでいえないが、基礎研究としての界面効果によるマグノン増幅機構を開拓した意義はあるといえる。

#### 研究テーマE: 表面マグノンによる超高速論理演算のプロトタイプ作製

当初の大挑戦目標であり、スピン信号の最大利点である「ジュール発熱ゼロ」を活用する論理演算素子のプロトタイプを考案し、その動作原理の実証に成功した。(図3, APEX 論文発表:論文3、プレスリリース:日本経済新聞など5紙掲載、招待講演 23 件, APEX 論文発表:論文4)。7GHzのマグノン信号(キャリア信号)を用いてマグノン干渉効果を制御した。その結果、1/0の論理演算ができることを初めて電氣的・分光的に実証した。また、金属に比べて、圧倒的にマグノン信号損失が少ない磁性絶縁体 YIG においてもこのプロトタイプが動作し、エネルギーをほとんど使用しない論理演算が可能であることがわかった(図4, Scientific Report 論文発表:論文5)。

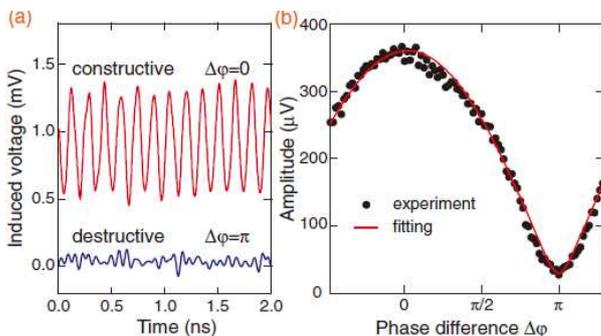


図3 磁性金属における論理演算動作

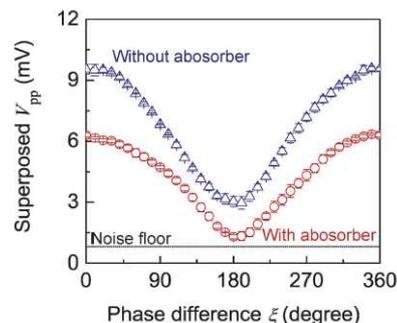


図4 磁性絶縁体における論理演算

### 3. 今後の展開

マグノンデバイス実現には100%増幅率をもつ増幅機能が必要であり、この研究課題については革新的な成果があがったとはいえるものではない。本研究で得られた成果の一つである界面効果を利用したマグノン増幅機構は、外部エネルギーである電流からマグノンへのエネルギー変換を効率化させたことに対応するが、今後、人工磁気格子など界面スピン制御をさらに発展させ、電流-スピン流変換および光-スピン流変換を組み合わせたマグノン増幅素子研

究に展開したいと考えている。また演算素子のプロトタイプとして1/0論理演算の原理実証を実現できたが、マグノンは多入力・多出力を可能にするため、多機能高周波デバイスとしてアナログデバイスとしての可能性も展開したい。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

マグノンを使って全く新しいデバイス原理を作るという大挑戦目標に向かって、基礎的データを見つけることに概ね成功したと評価する。さきがけ研究実施によって高速電気測定法と超高感度マイクロブリルアン散乱分光法の構築、超薄膜試料を作製する装置の立ち上げ、などトップレベル研究を行う基礎を形成することができた。これら研究体制によって得られた、論理演算の研究結果についてプレスリリースを行い、日本経済新聞など五紙に掲載され、社会・経済へ波及効果があつたものといえる。しかし、実用化には現段階では課題が多く、増幅率のさらなる向上が今後の課題として残った。マグノンデバイスが最高に成功した場合の見積もりでは、CMOS デバイスのエネルギーの 1/1000 を達成できるため、今後の新しく磁性体を活用する科学技術・産業の創出の可能性がある。さきがけ研究によって受賞をいただくことができ、自己満足で終わる可能性があつたが、さきがけ研究会・領域会議において、大きな視野から研究総括・総括補佐・研究ADからのフィードバックがいただけたため、エネルギー高効率利用という領域目標を達成するための覚悟が植え付けられた。たとえばマグノン増幅率に関しては、元が小さければ50倍を達成してもエネルギー問題への量的貢献への寄与は微々たるもの、と正鵠を射た評価をしていただき、さきがけ研究を通して、いかなる研究領域においても通用する本物の科学者になるためのご指導をいただいた。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

本研究は半導体 IC の熱限界を突破するために、新たなマグノンデバイスを創出することを目指す極めて挑戦的な課題である。そのなかで、マグノン制御に必要な基礎現象の発見・解明に取り組む、マグノン速度の80%増大を実現し、アッテネーション機能およびプロトタイプ論理演算素子の構築により、マグノンをを用いた演算素子を実現した。その後、異種の元素の組み合わせによるヘテロ界面を制御する方法を使い、マグノン信号を約5%増幅することに成功した。これは、従来の方法に比べて約 50 倍の効果であり、エネルギー高効率利用への量的貢献への寄与は未だ小さいものの、マグノンデバイスという未踏分野での基礎科学への貢献として、又今後の研究の広がりを呼び込むトリガーとして高く評価できる。現時点では実現性も含め社会実装への見通しは不明であるが、マグノンデバイスの研究は、サイエンスとして発展途上にあり、まだまだ基礎的知見を集積し、その進展が必要な領域である。この分野の研究が盛んになる中で、本研究者が中心的研究者として成長し、本学術領域の発展を牽引することを期待する。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. <u>K. Sekiguchi</u> et.al., Attenuation of propagating spin wave induced by layered nanostructures, Applied Physics Letters <b>100</b> , 132411(2012).
2. N. Sato, <u>K. Sekiguchi</u> , et.al., Electrical Demonstration of Spin-Wave Logic Operation, Applied Physics Express <b>6</b> , 063001 (2013).
3. N. Sato, N. Ishida, T. Kawakami, and <u>K. Sekiguchi</u> , Propagating spectroscopy of backward volume spin waves in a metallic FeNi film, Applied Physics Letters <b>104</b> , 032411 (2014)
4. N. Sato, S.J. Lee, S.W. Lee, K.J. Lee, and <u>K. Sekiguchi</u> , Phase stability of magnonic logic operation in microfabricated metallic wires, Applied Physics Express <b>9</b> , 083001 (2016)
5. N. Kanazawa, T. Goto, <u>K. Sekiguchi</u> , A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, and M. Inoue, Demonstration of a robust magnonic spin wave interferometer, Scientific Reports <b>6</b> , 30268 (2016)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

**招待講演(全 23 件)**

1. Spin-interchange between electron and magnon currents (招待講演); 関口康爾; WEH-Seminar on Magnonics: Spin Waves Connecting Charges, Spins and Photons, Badhonef Germany, 2016/1.
2. スピン波輸送とマグノンニック機能デバイス (招待講演); 関口康爾; 第76回応用物理学会秋季学術講演会”新規スピントロニクス現象と応用の可能性”, 名古屋, 2015/9
3. Control of Spin wave Interference in Metallic Nanostructures: Development of Magnon Spintronics (招待講演); 関口康爾; Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” Nanomagnetism (EASTMAG-2013), Vladivostok, Russia, 2013/09
4. Development of Magnon Spintronics: Spin-Wave Logic Operation in Metallic FeNi films (招待講演); 関口康爾; Donostia International Conference on Nanoscale Magnetism and Applications (DICNMA2013), San Sebastian Spain, 2013/09
5. Generation of Backward Volume Spin Wave in Metallic FeNi films (招待講演); 関口康爾; International Conference on Nanoscale Magnetism 2013 (ICNM-2013), Istanbul Turkey, 2013/09

(他 17 件)

**解説記事**

関口康爾、「スピン波ドップラー効果とマグノン制御」、応用物理 83 巻 3 号(2014 年)

**受賞**

関口康爾、「スピン制御技術の開拓と超低電力マグノンニック機能の研究」、平成27年度 文部科学大臣表彰若手科学者賞

## プレスリリース

1. 「磁気の波の重ね合わせを利用した新しい論理演算方式の原理を実証」、  
(記事掲載： 日本経済新聞、日本経済産業新聞、日刊工業新聞、化学工業日報、朝日新聞デジタル)

2. 「スピン波を使った最高性能の位相干渉器を開発」、  
(記事掲載： 日刊工業新聞、OPTRONICS Online)

## 6. その他関連の情報

(1)新たに構築した研究ネットワーク:

相手先分類	相手先名称	形態	概要
他研究機関	Dr. Hlemut Shultheiss, (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf)	研究交流・意見 交換	ブリルアン散乱分光法の高度化
他大学	Prof. K. J. Lee, Korea University	共同研究	マグノン伝搬に関する数値計算および理論的解析
他大学	後藤太一助教、 豊橋技術科学 大学	共同研究	磁性絶縁体におけるマグノン伝搬の研究
他研究機関	介川裕章主任 研究員, NIMS	共同研究	結晶性金属多層膜の作製

(2)研究会・領域会議での助言・指導による研究課題の進め方、方向修正等について

研究会と領域会議の指導はレベルがとても高い。研究者として、行っている研究と得た成果の意味を、うやむやに位置づけてしまうことがいかに多いかを気づかせていただいた。多方面のアドバイザーによって研究結果を眺められると、客観的にかつ批判的に見ることができ、大いに学ぶことができた。さきがけ研究は挑戦的であるため、ともすると目標方向を失いがちであったが、自分の長所をもっと生かせ、という方向修正を行っていただき、さきがけ研究課題の達成へアドバイスだけでなく、今後の研究者人生に必要な「ぶれない1本の芯」を入れていただいた。

(3)さきがけ期間を通じて研究手法、実用化への考え方、取組み方で学んだこと

実際の実験手法、発表技法、問題点把握の視点を学ぶことができたが、特に「やりたいことではなく問題の本質に切り込め」という考え方、および「ロードマップを自分で作成しその方向性を整理し問題の本質を知る」という指導に感銘を受けた。普通の研究生活では到達できない視点を得ることができ、研究の幅が格段に広がった。第一線で活躍するさきがけ研究仲間や超一流のアドバイザーと交流できたことに感謝を申し上げます。また、さきがけ研究をサ

ポートしていただいた JST 領域関係者の皆様方からは、研究体制とはどのように構築・運営し、どのようにそれを発展させていくか、とても貴重な取り組み方を学ぶことができた、ここに感謝申し上げます。