

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14381

研究課題名(和文) マグノン-ソリトンの電界生成と伝播の機構解明

研究課題名(英文) Mechanism of electric field generation of magnon-soliton and its transmission properties

研究代表者

谷山 智康 (TANIYAMA, Tomoyasu)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：10302960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：電界によるマグノン生成とその伝播特性制御技術の礎を構築することを目的として研究を行った。垂直磁化とスピン-格子結合を併せ持つマグノン伝播媒体として、垂直磁化[Cu/Ni]多層膜および[Co/Ni]多層膜を強誘電体BaTiO<sub>3</sub>基板上にエピタキシャル成長することに成功した。これらの垂直磁化多層膜に対して、BaTiO<sub>3</sub>の構造相転移および電界効果に伴う磁気異方性の変調効果を観測することに成功した。さらに、垂直磁化[Cu/Ni]多層膜と面内磁化Ni連続膜における強磁性共鳴の共鳴周波数とマグノン群速度が大きく異なることが示され、磁化配向の電界制御により、マグノン伝播特性を制御可能であることが実証された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a basis of generating magnons and controlling its transmission properties by an electric field. Epitaxial growth of perpendicularly magnetized [Cu/Ni] multilayers and [Co/Ni] multilayers was achieved on ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> substrates. We have observed clear effects of the structural phase transitions of BaTiO<sub>3</sub> and electric fields on the magnetic anisotropy of these perpendicularly magnetized multilayers. Moreover, we have shown distinct difference of the ferromagnetic resonance frequencies and the group velocities of magnons between perpendicularly magnetized [Cu/Ni] multilayers and in-plane magnetized Ni layers, demonstrating that the transmission properties of magnons can be manipulated by an electric field.

研究分野：ナノ磁性

キーワード：マルチフェロイクス マグノニクス スピントロニクス ナノ磁性

### 1. 研究開始当初の背景

強磁性マグノン(強磁性体中の歳差運動が伝播する磁気励起現象)の一つであり、スピントロニクスにおける新たな低消費電力情報伝送媒体として近年脚光を浴びている。一般に、強磁性体中にマグノンを生成するためにはマイクロ波交流磁場等を印加する必要があり、それに伴う電力消費がマグノン情報伝送技術の大きな課題となっている。一方、研究代表者らは、最近、強磁性体/強誘電体ヘテロ界面におけるスピン-格子結合効果を電界により制御することで、磁性薄膜の磁壁位置を可逆的に駆動したり、垂直磁化多層膜の磁化配向を電界により面直と面内とで切替えたりすることに成功し、磁化配向が界面スピン-格子結合の変調に極めて敏感に応答することを見出してきた。これらの研究成果は、スピン-格子結合を変調操作することで、励磁電流を用いずに強磁性体にマグノンを生成することが可能となり、消費電力を極限まで低減化した新たなマグノン情報伝送技術を構築することが可能であることを示している。

### 2. 研究の目的

本研究では、垂直磁化とスピン-格子結合を併せ持つマグノン伝播媒体に焦点を当て、電界で誘起される格子変調でスピン系を駆動することによりマグノンを電界で生成し、マグノン生成とその伝播制御技術の礎を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 垂直磁化薄膜および多層膜の作製

本研究では、垂直磁化膜におけるマグノン伝播特性について検討するため、種々の垂直磁化膜を MBE 法により作製した。具体的には、Cu/Ni 多層膜、Co/Ni 多層膜の成膜条件と垂直磁気異方性との関係を精査した。

#### (2) 垂直磁気異方性と格子歪みとの相関

成膜条件を精査し作製した垂直磁化薄膜をさらに強誘電体 BaTiO<sub>3</sub> 基板上に成膜することで、BaTiO<sub>3</sub> の構造相転移に伴う磁気異方性変調効果を検討した。

#### (3) 強磁性共鳴およびマグノン伝播

作製した垂直磁化膜における強磁性共鳴およびマグノン伝播特性を、ベクトルネットワークアナライザを用いた S<sub>11</sub>、S<sub>21</sub> パラメータ解析に基づいて検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 垂直磁化薄膜および多層膜の作製

[Cu(9nm)/Ni(2nm)]<sub>20</sub>/Fe(1nm)/SrTiO<sub>3</sub>(001) 多層膜の XRD パターンを図 1 に示す。界面が平坦な多層膜構造特有のフリッジ構造が明瞭に見られ、高品質な多層膜が作製されたことを示している。また、図 2 に示す磁化の磁場依存性に見られるように明瞭な垂直磁気異

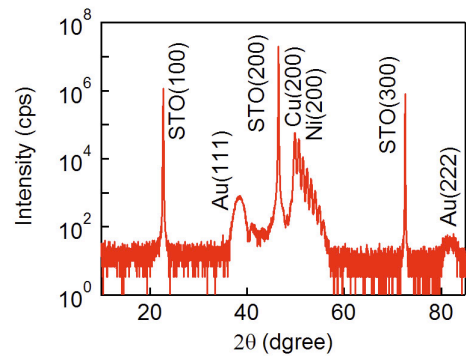


図 1 [Cu/Ni]<sub>20</sub> 多層膜の XRD パターン

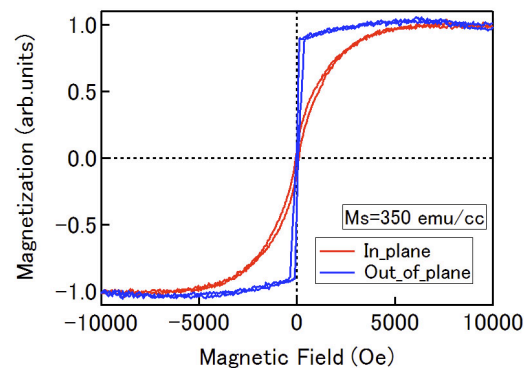


図 2 [Cu/Ni]<sub>20</sub> 多層膜の磁化曲線

方性が観測されている。同様に、BaTiO<sub>3</sub>(001) 基板上に [Cu/Ni]<sub>20</sub> 多層膜をエピタキシャル成長することに成功した。一方、[Co/Ni] 多層膜に対しては、Co 膜厚を最適化することで、[Co(0.4nm)/Ni(0.5nm)]<sub>8</sub>/Pt(5nm)/SrTiO<sub>3</sub>(10nm)/BaTiO<sub>3</sub>(001) 構造に対して、明瞭な垂直磁気異方性が観測された。

#### (2) 垂直磁気異方性と格子歪みとの相関

BaTiO<sub>3</sub> は室温における正方晶構造から、温度の低下に伴って 280K で斜方晶構造、183K で菱面体晶構造へと構造相転移する。これらの構造相転移に伴い圧縮歪みが垂直磁化膜へと伝達され、垂直磁気異方性と界面格子歪みとの相関を調査することが可能となる。図 3 に (1) にて作製した [Cu/Ni] 多層膜の磁化の温度依存性を示す。室温で垂直磁気異方性を示している一方で、BaTiO<sub>3</sub> の正方晶から斜方晶相への構造相転移に伴い、面内磁場における磁化の上昇が観測される。さらに、菱面体晶相への構造相転移温度においては、面内磁化が面直磁化を上回り、磁化配向が面直方向から面内方向にスイッチングしたことが理解される。BaTiO<sub>3</sub> の斜方晶相から菱面体晶相への構造相転移では、0.7% の面内圧縮歪みが界面に発現することが知られており、この磁化配向のスイッチング現象は、界面におけるスピン-格子結合の結果として理解される。

より、微視的な起源を調査するために、同様に垂直磁化を示す [Cu/Ni] 多層膜に対して、放射光を用いた Ni 吸収端における X 線磁気

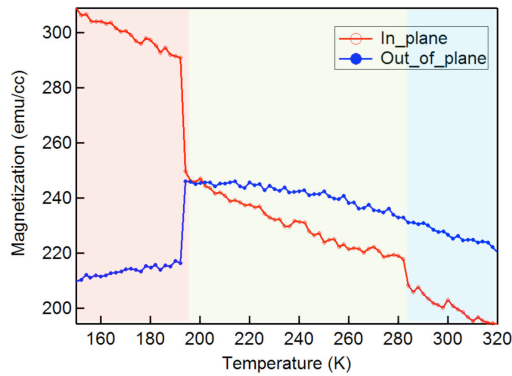


図3 [Cu/Ni]多層膜/BaTiO<sub>3</sub>の磁化の温度依存性

円二色性 (XMCD) 測定を行った。その結果、XMCD 強度の磁場依存性から、室温で Ni 層が面直磁気異方性を持つことが示され、さらに、電界を印加することで Ni 層が面内磁気異方性にスイッチングすることが示された。この電界に伴う磁気異方性の変化は、正方晶相における BaTiO<sub>3</sub> の a-ドメインから c-ドメインへのドメイン構造変化による界面圧縮歪みによって、前記の磁化の温度依存性と同様に理解される。さらに、磁気光学総和則を用いて電界の印加前、印加後におけるスピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントを算出した結果、スピン磁気モーメントに変化が見られなかったのに対して、軌道磁気モーメントが電界の印加により  $0.01\mu_B$  だけ小さくなることが示された。以上の結果は、界面格子歪みに伴う軌道磁気モーメントの変化が磁気異方性のスイッチング現象の起源であると解釈される。

一方で、[Co/Ni]多層膜の磁化の温度依存性では、温度の低下に伴う菱面体晶相への BaTiO<sub>3</sub> の構造相転移において垂直磁化の増大が観測された。この垂直磁化の増大は、面内圧縮歪みが [Co/Ni]多層膜の垂直磁気異方性を安定化したことを明示しており、[Co/Ni]多層膜の垂直磁気異方性の起源が(111)配向した構造由来であることから定性的に理解される。

### (3) 強磁性共鳴およびマグノン伝播

垂直磁気異方性を示す [Cu(9nm)/Ni(2nm)]<sub>20</sub> 多層膜に対して、種々の垂直磁場において強磁性共鳴測定を行った結果を図4に示す。共鳴周波数が磁場の増大とともに 9GHz から 12GHz まで変化している。一方、多層膜と同一の正味の Ni 膜厚をもつ Ni 単層膜 (面内磁気異方性) に対して種々の面内磁場に対して測定した強磁性共鳴測定の結果を図5に示す。多層膜の場合と同様に磁場の増大とともに共鳴周波数の増大が確認されるが、その周波数帯域は、3GHz から 6GHz までと垂直磁化膜の場合と大きく異なることが分かる。また、これらの結果に基づいて、マグノンの群速度が、[Cu/Ni]多層膜の場合に  $0.18\mu\text{m/nsec}$ 、Ni

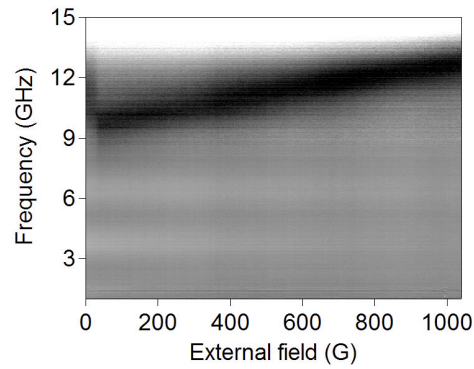


図4 [Cu/Ni]多層膜における強磁性共鳴測定結果

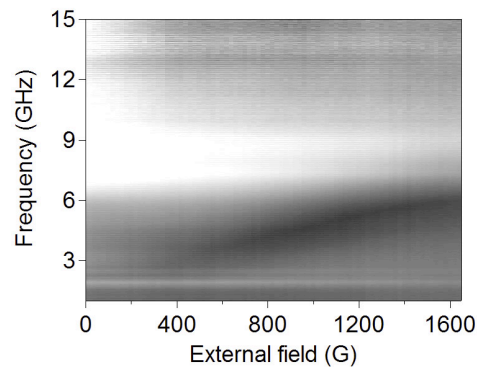


図5 Ni 薄膜における強磁性共鳴測定結果

連続膜の場合に  $5.5\mu\text{m/nsec}$  と算出された。以上の結果は、磁化配向を面直、面内とで切替えることでマグノン群速度を制御可能であることを示唆しており、(2)に記載の磁気異方性の電界切り替え技術を用いることで、マグノン伝播特性の電界制御が可能であることが示唆される。

### 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6件)

① Y. Ban, K. Komatsu, S. Sakuragi, T. Taniyama, H. Kageshima, and T. Sato, Change in magnetization of ferromagnetic Pd(001) ultrathin films induced by the strain effect of BaTiO<sub>3</sub>, Applied Physics Letters, 査読有、112 巻、2018、142409  
DOI: 10.1063/1.5020956

② Isogami and T. Taniyama, Strain mediated in-plane uniaxial magnetic anisotropy in amorphous CoFeB films based on structural phase transitions of BaTiO<sub>3</sub> single-crystal substrates, AIP Advances, 査読有、8 巻、2018、1700762  
DOI: 10.1002/pssa.201700762

③ A. Swain, K. Komatsu, M. Itoh, T. Taniyama,

and V. Gorige, Strain-mediated magnetic response in  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$  structure, *Physica Status Solidi (a)*, 査読有、215巻、2018、055808  
DOI: 10.1063/1.5006597

④ V. Gorige, A. Swain, K. Komatsu, M. Itoh, and T. Taniyama, Magnetization reversal in  $\text{Fe}/\text{BaTiO}_3(110)$  heterostructured multiferroics, *Physica Status Solidi (RRL)- Rapid Research Letters*, 査読有、11巻、2017、1700294  
DOI: 10.1002/pssr.201700294

⑤ T. Taniyama, Y. Shirahata, R. Shiina, E. Wada, and M. Itoh, Thermally driven magnetization switching of perpendicularly magnetized multilayers, *Proc. IEEE Nano 2017*, 査読有、11巻、2017、1023-1026

⑥ D. L. González, Y. Shirahata, B. Van de Wiele, K. J. A. Franke, A. Casiraghi, T. Taniyama, and S. van Dijken, Electric-field-driven domain wall dynamics in perpendicularly magnetized multilayers, *AIP Advances*, 査読有、7巻、2017、035119  
DOI: 10.1063/1.4979267

[学会発表] (計17件)

① T. Taniyama, Electric Field Control of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Multiferroic Heterostructures, 5th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS 2018), 2018年6月6日、(Jeju, Korea) (招待講演)

② 粉川 育也, 小松 克伊, 宇佐見 喬政, 伊藤 満, 谷山 智康, 磁気弾性効果による  $\text{Co}/\text{Ni}$  多層膜の磁気異方性変化、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月22日、(東京理科大・野田キャンパス)

③ 坂 裕介, 小松 克伊, 櫻木 俊輔, 谷山 智康, 影島 博之, 佐藤 徹哉,  $\text{BaTiO}_3$  を用いた歪み印加による  $\text{Pd}(100)$  薄膜の強磁性変調、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月22日、(東京理科大・野田キャンパス)

④ I. Kokawa, K. Komatsu, T. Usami, M. Itoh, and T. Taniyama, Magnetoelastic Modulation of Perpendicular Magnetic Anisotropy of  $\text{Co}/\text{Ni}$  Multilayer/ $\text{BaTiO}_3$ , Magnetic and Optics Research International Symposium (MORIS 2018), 2018年1月9日、(New York, USA)

⑤ T. Taniyama, Reversal Control of Magnetic Domain Walls in Perpendicularly Magnetized Multilayer/ Ferroelectric Heterostructures, NPG Asia Materials Future Materials Symposium, 2017年11月17日、(Beijing, China) (招待講

演)

⑥ A. Swain, K. Komatsu, M. Itoh, T. Taniyama, and V. Gorige, Strain Mediated Magnetic Response in  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$  Structures, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2017), 2017年11月7日、(Pittsburgh, USA)

⑦ Y. Ban, K. Komatsu, S. Sakuragi, T. Taniyama, H. Kageshima, and T. Sato, Magneto-elastic Effect on Ferromagnetism Induced by Quantum-well States in Pd Thin Film, International Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2017年10月10日、(London, UK)

⑧ 岡林 潤, 谷山 智康,  $\text{Ni}/\text{Cu}$  多層構造の電場誘起、第41回日本磁気学会学術講演会、2017年9月22日、(九州大学・福岡市)

⑨ 坂 裕介, 小松 克伊, 櫻木 俊輔, 谷山 智康, 影島 博之, 佐藤 徹哉,  $\text{BaTiO}_3$  が誘導する歪みを利用した電界印加による  $\text{Pd}$  薄膜の強磁性制御、日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月21日、(岩手大学・盛岡市)

⑩ J. Okabayashi, T. Taniyama, Relationship between Strain and Orbital Magnetic Moments in  $\text{Ni}/\text{Cu}$  Multilayers Studied by Electric-Field-Induced XMCD and First-Principle Calculation, 第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月5日、(福岡国際会議場・福岡市)

⑪ D. L. González, B. Van de Wiele, Y. Shirahata, K. Franke, A. Casiraghi, T. Taniyama, and S. van Dijken, Pure Electric-field Driven Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized Multilayers, IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2017, 2017年4月28日、(Dublin, Ireland)

⑫ S. Isogami and T. Taniyama, Manipulation of In-Plane Magnetic Anisotropy in Amorphous  $\text{CoFeB}$  Films Induced by Structural Phase Transitions of  $\text{BaTiO}_3$ , IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2017, 2017年4月25日、(Dublin, Ireland)

⑬ 宮内 拓也, 宇佐見 喬政, 伊藤 満, 谷山 智康, 垂直磁化異方性を有する強磁性薄膜におけるマグノン伝播、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月17日、(大阪大学・豊中市)

⑭ T. Taniyama, Multiferroic Heterostructures for Low-Energy Magnetism and Spintronics Applications, International Conference on

Magnetic Materials and Applications  
(ICMAGMA-2017)、2017年2月2日、  
(Hyderabad, India) (基調講演)

◎ 谷山 智康, 磁性の電界制御ーマルチフェロイクヘテロ構造を中心としてー、平成28年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会、2016年9月5日、(北九州市・九州工業大) (招待講演)

◎ T. Taniyama, Multiferroic Heterostructures for Low Energy Spintronics and Magnonic Applications、Distinguished Lecture, University of Hyderabad、2016年7月20日、(Hyderabad, India) (招待講演)

◎ T. Taniyama, Electric Field Control of Magnetism in Multiferroic Heterostructures、IEEE Magnetics Society Tokyo Chapter Seminar & Nano-Magnetics Seminar of Magnetics Society of Japan、2016年7月15日、(Tokyo, Japan) (招待講演)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.j-group.phys.nagoya-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

谷山 智康 (TANIYAMA, Tomoyasu)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号： 10302960