

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220910

研究課題名(和文)規則合金スピントロニクス材料の新展開

研究課題名(英文)New development of ordered-alloy materials for spintronics

研究代表者

高梨 弘毅 (TAKANASHI, Koki)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：00187981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 172,400,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の情報通信技術を担う新しいエレクトロニクスとしてスピントロニクスが注目されている。我々は、高スピン分極材料としてL21およびC1b型ホイスラー合金、高磁気異方性材料としてL10およびL11型規則合金を用いて、スピントロニクス機能の探求を行ってきた。主な成果として、L21型Co<sub>2</sub>(FeMn)Siを有するGMR素子の特性向上、C1b型NiMnSbを用いた室温でのGMR効果の観測、およびL11型に積層制御されたCoNi薄膜において高磁気異方性と低ダンピングの両立に成功した。さらに、異常ネルンスト効果の材料依存性を明らかにし、高いスピンカロリトロニクス機能を得るための指導原理を得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project was the development of ordered alloys for high performance and multi-functional spintronics devices and their application to spin caloritronics. We successfully improved the giant magnetoresistance (GMR) effect for the device with L21-ordered Co<sub>2</sub>(FeMn)Si full-Heusler alloy, and observed room temperature GMR using C1b-ordered NiMnSb half-Heusler alloy. We also achieved high magnetic anisotropy and low magnetic damping simultaneously for L11-type-stacked CoNi. In addition, we revealed the material dependence of anomalous Nernst effect, leading to the guiding principle for high spin caloritronic functionality.

研究分野：磁性材料学

キーワード：磁性材料 スピントロニクス ホイスラー合金 高磁気異方性 スピンカロリトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

次世代の情報通信技術を担う新しいエレクトロニクスとしてスピントロニクスが注目されている。スピントロニクスで使用されている磁性材料は、Fe, Co, Ni 系のランダム合金が依然として圧倒的に多い。しかし、それでは性能に限界があることは明らかで、新たな材料の探索が求められている。我々は規則合金に着目し、スピン分極率が高い材料としてホイスラー合金、磁気異方性が高い材料として  $L1_0$  型規則合金を用いて、スピントロニクス機能に関する研究を行ってきた。

伝導電子のスピン分極率はスピントロニクス素子の性能を決める最も重要な因子であり、スピン分極率が高いほど、磁気抵抗効果などの特性は向上する。ホイスラー合金の一部はハーフメタルと呼ばれ、理論的にはスピン分極率が 100% になると期待されている。近年、デバイスに適合した低抵抗で大きな磁気抵抗変化率 (MR 比) が得られる膜面垂直通電型巨大磁気抵抗効果 (CPP-GMR) において、より大きな CPP-GMR を得る競争が激化している。例えば、ハードディスクドライブの読み出しヘッドとして CPP-GMR 素子を応用するためには、室温で 100% 以上の大きな MR 比が求められると同時に、適切な面積抵抗 ( $RA$ ) が不可欠となる。MR 比は大きな温度変化が深刻な問題であり、 $RA$  の低い素子においてもまだ 70% 程度の値に留まっているのが現状である。

スピン分極率に加えて、磁気異方性も重要な因子である。高集積可能なスピントロニクス素子への応用のためには、高い磁気異方性と同時に、小さな電流でスピン注入磁化反転を実現させる必要があり、磁化のダンピング定数の小さい材料が反転電流を低減させる観点で有効である。 $L1_0$  型規則合金の多くは Pt や Pd などの重い金属を含むためスピン軌道相互作用が大きく、磁化のダンピング定数も大きい。したがって、高い磁気異方性と低い磁気ダンピング定数を両立させた規則合金材料の開発が重要となる。

また、最近のスピントロニクスの新たな展開として、スピンゼーベック効果の発見を契機に、熱磁気効果と融合したスピントロニクスが注目され、新しい熱電素子や冷却素子としての応用が期待されている。規則合金は、スピントロニクスにとっても有用な材料であることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、規則合金スピントロニクス材料の新たな展開として、「高機能化」「多機能化」「スピントロニクスへの展開」の研究課題に取り組む。

(1) 高機能化: ホイスラー合金を用いて、さらなる CPP-GMR の向上 (室温 100% 以上) と高いスピン注入効率を実現させる。また、高 MR 比と適切な  $RA$  を兼ね備えた素子を開発する。そのために、 $L2_1$  型のみならず、

$C1_b$  型に材料系を拡張する。 $C1_b$  型ホイスラー合金は良質な薄膜作製が困難であることから、これまであまり注目されてこなかったが、大きなバンドギャップを有し優れたハーフメタル特性が期待される。我々がこれまで培った成膜技術を用いて良質な薄膜を作製し、高機能化を実現する。

(2) 多機能化: 高い磁気異方性に加えて、高いスピン分極率と低い磁気ダンピング定数を有する多機能合金を開発する。そのために、Pt 等の重い元素は使用せず、あくまで Fe, Co, Ni 等の 3d 遷移金属を用いた規則合金を作製する。もともと結晶対称性の低い  $L1_1$  型規則構造に着目し、我々が開拓してきた単原子層積層技術によって FeCoNi 系  $L1_1$  型規則合金薄膜を作製し、多機能化を実現する。

(3) スピントロニクスへの展開: これらの規則合金を用いて、従来のスピントロニクスのみならず、熱磁気効果と融合したスピントロニクス機能の創出に展開する。優れたスピントロニクス機能を示す規則合金材料について、異常ネルンスト効果やペルチエ効果などのスピントロニクス機能も併せて調べ、高いスピントロニクス機能を得るための材料創製の指導原理を明らかにする。

### 3. 研究の方法

高機能化に関しては、当該研究を開始する以前から実績のある  $L2_1$  型フルホイスラー合金の  $Co_2MnSi$  系について、CPP-GMR 特性を向上させるところから着手する。その知見をもとに、NiMnSb などの  $C1_b$  型ハーフホイスラー合金への展開を図る。超高真空対応スパッタリング装置を用いて、単結晶基板上にホイスラー合金層と非磁性中間層から成る GMR 積層構造のエピタキシャル薄膜を作製する。その薄膜試料をナノサイズの柱状素子へと微細加工することで、CPP-GMR 特性を評価する。また、第一原理計算の結果と比較することで伝導メカニズムを解明する。

多機能化に関しては、分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた単原子層積層制御によって、単結晶基板上に  $L1_1$  型 Fe-Co-Ni 系合金のエピタキシャル薄膜の作製を試みる。構造解析には X 線回折法を用い、超伝導量子干渉素子磁束計および振動試料型磁力計を用いて磁気特性を評価する。また、時間分解カー効果測定を利用することで磁化ダンピング定数を見積もる。実験と並行して磁気異方性エネルギーおよび磁化ダンピング定数の理論計算を行い、実験結果と比較することで、磁気異方性および磁化ダンピングの起源を明らかにする。また、MBE を用いた基礎研究を続けつつ、一方で実用的な観点からスパッタ法を用いた作製にも取り組む。

スピントロニクスに関しては、上記の規則合金試料を用いて、ペルチエ冷却効果および異常ネルンスト効果の測定を行う。具

体的には、ペルチエ冷却効果の材料依存性、異常ネルンスト効果の材料依存性および温度依存性を系統的に調べる。さらに、他の物理量や理論計算との比較から、材料創製の指導原理を確立する。

#### 4. 研究成果

研究目的で掲げた高機能化、多機能化、スピнкаロリトロニクスへの展開の3つの課題について、相互に関連させながら、並行して研究を進めた。

(1) 高機能化：平成25年度は、当該研究課題開始以前から組んできた  $L2_1$ - $\text{Co}_2\text{MnSi}$  系の CPP-GMR の向上を図った。平成26年度は、非磁性中間層として新規材料である Ag-Mg 合金層を採用することにより、CPP-GMR 特性の向上を実現した。平成27年度は、 $L2_1$ 型から  $C1_b$ 型への展開を図り、NiMnSb / Ag / NiMnSb のエピタキシャル積層構造を作製し、CPP-GMR の室温観測 (図1) に成功した。平成28年度は、 $L2_1$ 型  $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$  合金において、Ag-Mg 非磁性中間層の組成や膜厚などの最適化を行うことで、CPP-GMR 特性を増大させることに成功し、第一原理計算との比較から伝導機構を解明した。また  $C1_b$  型

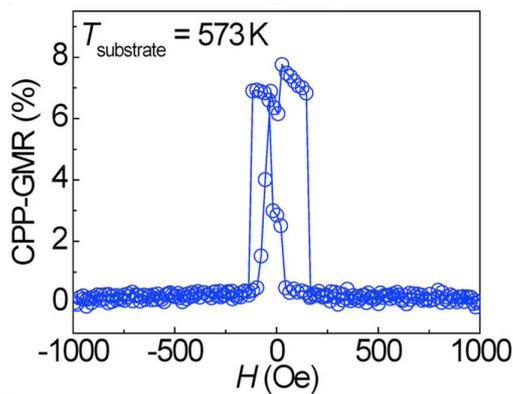


図1  $C1_b$ 型ハーフホイスラーNiMnSb / Ag / NiMnSb層を有するCPP-GMR素子における室温のMR曲線。

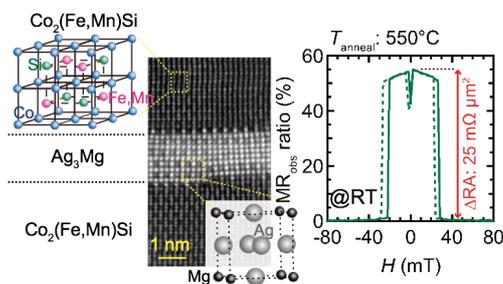


図2  $L2_1$ 型フルホイスラー $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ 層とAg-Mg非磁性中間層をエピタキシャル成長させた薄膜の高分解能電子顕微鏡像、およびその薄膜を用いて作製したCPP-GMR素子におけるMR曲線。

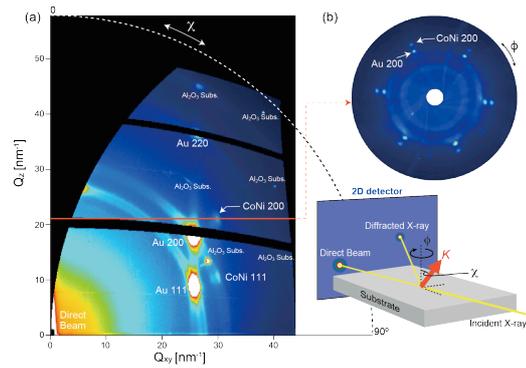


図3  $\text{Al}_2\text{O}_3(11-20)$ 基板上的V/Au下地層の上にCo 1原子層およびNi 1原子層を単原子交互積層させた試料の精密構造解析結果。(a) 二次元の回折強度マッピングおよび(b) Co 200およびAu 200回折における逆空間の断面。

NiMnSb 合金に関しては、複数のNiMnSb層を有する多層構造化の試料によってCPP-GMR比の増大を実現した。最終年度となる平成29年度は、図2に示した $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ と $\text{Ag}_3\text{Mg}$ 非磁性中間層の組み合わせにおいてMR特性を改善することに成功した。室温で最大63%のCPP-GMR比を達成すると同時に、RAを適切な値まで増加させ、 $25\text{m}\Omega\mu\text{m}^2$ の高い抵抗変化量が得られた。加えて、ホイスラー合金を用いたCPP-GMR研究の新展開として、窒素濃度で格子定数を制御可能なCuN中間層を用いたCPP-GMR素子の開発に成功した。

(2) 多機能化：平成25年度および平成26年度は、MBEによる単原子層積層制御によって単結晶基板上に $L1_1$ -CoNiエピタキシャル薄膜の作製を試みた。Co/Ni多層膜をエピタキ

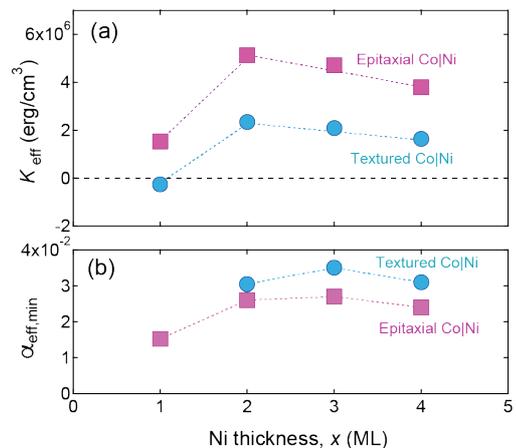


図4  $\text{Al}_2\text{O}_3(11-20)$ 基板上にエピタキシャル成長させたCo/Ni多層膜と熱酸化Si基板上に多結晶成長させたCo/Ni多層膜における(a)磁気異方性エネルギー $K_{\text{eff}}$ と(b)実効的なダンピング定数 $\alpha_{\text{eff}}$ のNi層厚依存性。ここで、Co層厚は1原子層に固定した。

シャル成長させるために、 $\text{Al}_2\text{O}_3(11-20)$  基板上の  $\text{V}/\text{Au}$  下地層が有効であることを見出した (図 3)。平成 27 年度および平成 28 年度は、主に  $L1_1$ - $\text{CoNi}$  エピタキシャル薄膜の特性評価に取り組んだ。精密構造解析により規則度や結晶配向を調べたところ、成膜温度を  $200^\circ\text{C}$  とした試料において  $L1_1$  規則相の形成を示唆する超格子反射が観測された。加えて、磁化測定および強磁性共鳴測定を行い、薄膜の構造と磁気異方性や磁気ダンピングの相関について調べた。図 4 にエピタキシャル成長した  $\text{Co}/\text{Ni}$  多層膜と多結晶成長の  $\text{Co}/\text{Ni}$  多層膜における磁気異方性エネルギー  $K_{\text{eff}}$  と実効的なダンピング定数  $\alpha_{\text{eff}}$  の  $\text{Ni}$  層厚依存性を示す。 $\text{Co}/\text{Ni}$  エピタキシャル多層膜において高い  $K_{\text{eff}}$  と低い  $\alpha_{\text{eff}}$  を両立することに成功した。以上の  $L1_1$ - $\text{CoNi}$  の作製を行いつつ、 $\text{FeCo}$  系への展開にも取り組んだ。また、これら実験と並行して第一原理計算を行い、磁気異方性エネルギーとダンピング定数の理論値を算出した。理論計算結果より、fcc 積層した  $L1_1$  型規則構造の  $\text{CoNi}$  では  $K_u = 6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、 $\alpha = 0.007$ 、hcp 積層した  $B_h$  型規則構造の  $\text{CoNi}$  では  $K_u = 1.9 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 、 $\alpha = 0.007$  が得られる可能性が示された。そこで、最終年度となる平成 29 年度では、fcc 積層よりも高い  $K_u$  が期待される hcp 積層を安定化させるために、hcp- $\text{Ru}$  下地層の成長条件の最適化を行い、また  $\text{CoNi}$  層厚依存性を系統的に調べ、hcp 型の  $\text{CoNi}$  規則構造を形成するための指針を得ることに成功した。

(3) スピンカロリトロニクスへの展開：平成 25 年度は、 $\text{CPP-GMR}$  素子を用いたペルチエ冷却効果のサイズ依存性を明らかにした。特に、ホイスラー合金を用いたナノピラー素子における巨大ペルチエ冷却効果を調べ、ペルチエ冷却効果の大きさとスピン分極率には直接の相関がないことを明らかにした。平成 26 年度および平成 27 年度は、様々な規則合金における異常ネルンスト効果の測定を行い、磁気異方性や異常ホール効果などの他の物理量や理論計算との系統的比較から、メカニズムに関する重要な知見を得た。特に、図

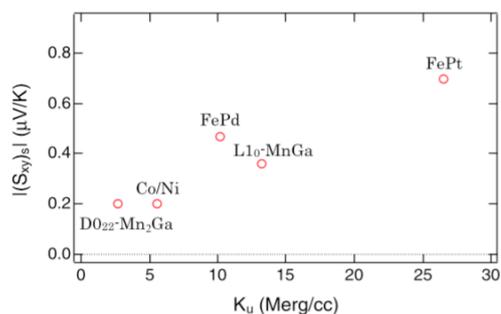


図 5 横ゼーバック係数の異常項と磁気異方性エネルギーの関係。様々な材料において異常ネルンスト効果を測定することで、横ゼーバック係数を見積もった。測定温度は室温である。

5 に示すように、ネルンスト効果の大きさは磁気異方性とおおむね正の相関を示すことを明らかにした。また、 $\text{Co}/\text{Ni}$  多層膜における熱磁気効果の測定に着手し、平成 28 年度は多層膜の層厚や測定温度に依存した異常ネルンスト効果の変化を観測することに成功した。最終年度となる平成 29 年度では、 $\text{FePt}$  規則合金における異常ネルンスト効果に関して、特徴的な温度依存性が観測され、スピン波励起を考慮することで実験結果を説明できることがわかった。また、異常ネルンスト効果の相反効果である異常エッティンクスハウゼン効果を可視化することに成功し、規則合金スピントロニクスの新しい展開を拓くことに成功した。

## 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 65 件)

- ① T. Seki, R. Iguchi, K. Takanashi, and K. Uchida, Visualization of anomalous Ettingshausen effect in a ferromagnetic film: Direct evidence of different symmetry from spin Peltier effect, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 112, (2018) pp.152403-1-5, DOI: 10.1063/1.5022759
- ② Z. Wen, T. Kubota, and K. Takanashi, Epitaxial CuN Films with Highly Tunable Lattice Constant for Lattice-Matched Magnetic Heterostructures with Enhanced Thermal Stability, *Adv. Elec. Mater.*, 査読有, Vol. 4, (2017) pp. 1700367-1-7, DOI: 10.1002/aelm.201700367
- ③ T. Kubota, Y. Ina, Z. Wen, H. Narisawa, and K. Takanashi, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices using an  $L1_2$   $\text{Ag}_3\text{Mg}$  spacer and  $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$  Heusler alloy electrodes: Spacer thickness and annealing temperature dependence, *Phys. Rev. Materials*, 査読有, Vol. 1, (2017) pp. 044402-1-7, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.044402
- ④ Takeshi Seki, Junpei Shimada, Satoshi Iihama, Masahito Tsujikawa, Tomoyuki Koganezawa, Akihiro Shioda, Takayuki Tashiro, Weinan Zhou, Shigemi Mizukami, Masafumi Shirai, and Koki Takanashi, Magnetic Anisotropy and Damping for Monolayer-Controlled  $\text{Co} | \text{Ni}$  Epitaxial Multilayer, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 86, (2017) pp. 074710-1-10, DOI: 10.7566/JPSJ.86.074710
- ⑤ Z. Wen, T. Kubota, Y. Ina, and K. Takanashi, Dual-spacer nanojunctions exhibiting large current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance for ultrahigh density magnetic recording, *Appl.*

- Phys. Lett., 査読有, Vol. 110, (2017) pp. 102401-1-4, DOI: 10.1063/1.4977948
- ⑥ T. Kubota, Y. Ina, M. Tsujikawa, S. Morikawa, H. Narisawa, Z. Wen, M. Shirai and K. Takanashi, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices using half-metallic  $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$  electrodes and a Ag–Mg spacer, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 50, (2017) pp. 014004-1-8, DOI: 10.1088/1361-6463/50/1/014004
- ⑦ Z. Wen, T. Kubota, T. Yamamoto and K. Takanashi, Enhanced current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance effect in half-metallic NiMnSb based nanojunctions with multiple Ag spacers, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 108, (2016) pp. 232406-1-5, DOI: 10.1063/1.4953403
- ⑧ I. Juarez-Acosta, M. A. Olivares-Robles, S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, S. Takahashi, K. Takanashi and G. E. W. Bauer, Modelling of the Peltier effect in magnetic multilayers, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 119, (2016) pp. 073906-1-11, DOI: 10.1063/1.4942163
- ⑨ Z. Wen, T. Kubota, T. Yamamoto and K. Takanashi, Fully epitaxial  $\text{Cl}_b$ -type NiMnSb half-Heusler alloy films for current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices with a Ag spacer, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 5, (2015) pp. 18387-1-10, DOI: 10.1038/srep18387
- ⑩ K. Uchida, T. Kikkawa, T. Seki, T. Oyake, J. Shiomi, Z. Qiu, K. Takanashi and E. Saitoh, Enhancement of anomalous Nernst effects in metallic multilayers free from proximity-induced magnetism, *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol. 92, (2015) pp. 094414-1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.92.094414
- ⑪ S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, I. Juarez-Acosta, T. Sugiyama, K. Saito, M. A. Olivares-Robles, S. Takahashi, G. E. W. Bauer and K. Takanashi, Size dependence of Peltier cooling in ferromagnet/Au nanopillars, *Appl. Phys. Exp.*, 査読有, Vol. 8, (2015) pp. 063008-1-4, DOI: 10.7567/APEX.8.063008
- ⑫ K. Hasegawa, M. Mizuguchi, Y. Sakuraba, T. Kamada, T. Kojima, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki, and K. Takanashi, Material dependence of anomalous Nernst effect in perpendicularly magnetized ordered-alloy thin films, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 106, (2015) pp. 242405-1-4, DOI: 10.1063/1.4922901
- ⑬ H. Narisawa, T. Kubota, and K. Takanashi, Current perpendicular to film plane type giant magnetoresistance effect using a Ag–Mg spacer and  $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$  Heusler alloy electrodes, *Appl. Phys. Exp.*, 査読有, Vol. 8, (2015) pp. 063008-1-4, DOI: 10.7567/APEX.8.063008
- ⑭ A. Shioda, T. Seki, J. Shimada, and K. Takanashi, Interface Magnetic Anisotropy for Monatomic Layer-Controlled Co / Ni Epitaxial Multilayers, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 117, (2015) pp. 17C726-1-4, DOI: 10.1063/1.4905106
- [学会発表] (計 140 件)
- ① Koki Takanashi, Advanced spintronic materials based on ordered alloys, IUMRS-ICA, 2017 年 11 月 6 日, Taipei (Taiwan).
- ② 窪田崇秀, 高梨弘毅, スピントロニクス分野におけるホイスラー合金薄膜, 日本金属学会 2017 年 秋期講演大会, 2017 年 9 月 7 日, 北海道大学 (北海道・札幌市) .
- ③ M. Mizuguchi and K. Takanashi, Spin caloritronics in energy conversion materials, 4th JSPS Core-to-Core Workshop on “New-Concept Spintronic Devices”, 2016 年 11 月 20 日, 東北大学 (宮城県・仙台市) .
- ④ Koki Takanashi, Advanced Spintronic Materials Based on Ordered Alloys, 4th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS), 2016 年 8 月 1 日, Tainan (Taiwan) .
- ⑤ 高梨弘毅, 窪田崇秀, 関 剛斎, 水口将輝, 規則合金スピントロニクス材料の最近の発展, 電気学会マグネティックス研究会, 2015 年 12 月 7 日, 秋田大学 (秋田県・秋田市) .
- ⑥ 白井正文, ホイスラー合金磁気抵抗素子の界面の電子論, 日本金属学会 2015 年 秋期 (第 157 回) 講演大会, 2015 年 9 月 17 日, 九州大学 (福岡県・福岡市) .
- ⑦ Takahide Kubota, Hiroyuki Narisawa, Koki Takanashi, CPP-GMR effect using Ag-Mg ordered alloy spacer layer and Heusler alloy  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$  electrodes, The 26th Magnetic Recording Conference, 2015 年 8 月 18 日, Minneapolis (USA) .
- ⑧ K. Takanashi, M. Mizuguchi, T. Kojima and T. Tashiro, Artificial fabrication and characterization of  $\text{L1}_0$ -ordered FeNi thin films, IEEE International Magnetism Conference: Intermag 2015, 2015 年 5 月 14 日, Beijing (China) .
- ⑨ Koki Takanashi, Advanced Spintronic Materials Based on Ordered Alloys, 19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, 2014 年 9 月 4 日, 新潟コンベンションセンター (新潟県・新潟市) .

- ⑩ M. Mizuguchi, Y. Sakuraba, K. Hasegawa, and K. Takanashi, Anomalous Nernst effects in ferromagnetic metallic thin films and their thermoelectric application, IEEE International Nanoelectronics Conference, 2014年7月29日, 北海道大学(北海道・札幌市) .
- ⑪ G. E. W. Bauer, Spin Caloritronics, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), 2013年9月24日, Hilton Fukuoka Sea Hawk (福岡県・福岡市) .
- ⑫ Koki Takanashi, High magnetic anisotropy materials for spintronics, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013), 2013年7月21日, Taichung (Taiwan) .

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：磁性薄膜および磁性薄膜の製造方法  
発明者：関剛斎、高梨弘毅、辻川雅人、白井正文

権利者：同上

種類：特許

番号：特許願 2016-245883

出願年月日：2016年12月19日

国内外の別：国内

名称：膜面垂直通電型巨大磁気抵抗素子及び磁気デバイス

発明者：窪田崇秀、成澤寛行、高梨弘毅

権利者：同上

種類：特許

番号：特許願 2015-120250

出願年月日：2015年6月15日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：熱電発電デバイス

発明者：桜庭裕弥、長谷川浩太、水口将輝、高梨弘毅

権利者：同上

種類：特許

番号：特許第 6079995 号

取得年月日：2017年1月27日

国内外の別：国内

[その他]

ウェブアーカイブ公開論文

M. Mizuguchi, K. Hasegawa, J. Ohe, M. Tsujikawa, M. Shirai, and K. Takanashi, Conversion of Heat into Charge Current by the Spin Wave Anomalous Nernst Effect,

arXiv:1804.03751

ホームページ等

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高梨 弘毅 (TAKANASHI, Koki)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：00187981

(2)研究分担者

バウアー ゲリット (BAUER, Gerrit)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：10620213

白井 正文 (SHIRAI, Masafumi)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：70221306

(3)連携研究者

水口 将輝 (MIZUGUCHI, Masaki)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：50397759

桜庭 裕弥 (SAKURABA, Yuya)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：10451618

関 剛斎 (SEKI, Takeshi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40579611

窪田 崇秀 (KUBOTA, Takahide)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：00580341