

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17436

研究課題名(和文) マグノニクス創出に向けたマグノンの2次元制御

研究課題名(英文) Two-dimensional control of magnons toward magnonics

研究代表者

田辺 賢士 (Tanabe, Kenji)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：00714859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：マグノニックデバイスの実現のため、波動描像、粒子描像のそれぞれの観点から研究を行った。まずスピン波のスネルの法則の研究を行い、異なる分散関係を持つ領域の界面でスピン波の屈折を確認した。さらに粒子描像の観点からマグノンホール効果の研究を行い、マグノンが素子の端で散乱される際に横方向にずれる現象を発見した。これらの成果はマグノンを2次元的に制御できる可能性を示している。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the propagation of magnons (quanta of spin waves) in terms of the wave and particle pictures for achieving a magnonic device. In the terms of the wave picture, we have demonstrated the Snell's law for spin waves, which indicates that the propagation direction of the spin waves is refracted at a step structure in thin ferromagnetic films. On the other hand, we find that the position of the magnons is changed owing to the Berry's phase in the magnon band structure when they are scattered by the edge of the sample. Our results may lead to two-dimensional control of the magnons.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス マグノニクス マグノン スピン波 スネルの法則 ホール効果

1. 研究開始当初の背景

スピン波の素励起であるマグノンに制御する試みは、低消費電力かつサブテラヘルツ領域のデバイスへの応用が期待され、新しいエレクトロニクス(マグノニクス)の研究として注目されている。マグノンはこれまで1次元的に伝搬する平面波として研究されてきた。しかしながらマグノニクス分野の発展やマグノニックデバイスの集積化のためにはマグノンの2次元的制御が不可欠である。

2. 研究の目的

研究代表者はマグノンの2つの側面から、すなわち波動性と粒子性の観点から、マグノンの2次元的制御の研究を行う。波動性の観点から段差を有する薄膜におけるスネルの法則の研究を行い、スピン波のメタマテリアル分野を創出する。粒子性の観点からベリー位相を用いたマグノンのホール効果の研究を行い、幾何学的概念をマグノニクスに導入する。以上の2つのユニークな試みによってマグノニクスの発展に貢献する。

3. 研究の方法

(1) スピン波のスネルの法則

軟磁性体として知られるパーマロイ(ニッケルと鉄の合金)を用いて、スピン波の伝播デバイスを作製した。測定はブリルアン光散乱法と磁気光学カー効果顕微鏡を用いてスピン波の実時間、実空間測定を行った。京都大学化学研究所の小野研究室所有のスパッタ装置、電子線リソグラフィ、アルゴンミリング装置を利用してデバイス作製は行われた。またブリルアン光散乱法はイタリアのペルージャ大学のG. Gubbiotti博士の下で、磁気光学カー効果顕微鏡測定はドイツのレーゲンスブルグ大学のC. Back教授の下でそれぞれ行われた。

(2) マグノンのホール効果

実験は購入したバルクの単結晶 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)を用いて行われた。京都大学化学研究所の小野研究室所有のサーモグラフィを用いてサンプルの内部の温度勾配の実空間測定を行った。

4. 研究成果

(1) スピン波のスネルの法則について

スネルの法則は異なる屈折率を有する物質の界面を光が通過する際に、伝播方向が屈折する現象を指す。この現象は波の普遍的な性質であり、スピン波でも生じることが期待される。

まず光の屈折率に習って、スピン波の屈折率を定義する。屈折率は波数に比例し、分散関係によって決められる。そこで強磁性薄膜におけるスピン波の屈折率が薄膜の膜厚に依存することを考慮して、異なる膜厚を有する薄膜の接合を作製した(図1)。この接合面はスピン波にとって、異なる屈折率を有する

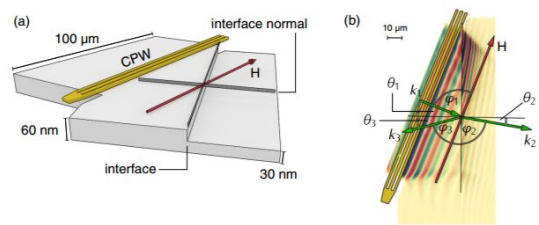


図1. 実験セットアップの概念図

スピン波はウェブガイド(黄色)で励起され、ウェブガイドに対し垂直方向に伝播する。

領域の界面と見なせる。

この界面に対して任意の入射角で伝播するスピン波を励起するために、接合面に対し様々な角度を持つコプレーナウェブガイドを作製した。

図2が実験結果である。磁場はウェブガイドに平行になるように印加し(54 mT)、入射角は20度と40度になるデバイスを用いた。グレーの線が段差の界面を表している。図の赤と青の縞模様がスピン波を表しており、左右で明らかに波長が変調されている。また波の伝播方向も界面通過前と後で方向が曲げられている様子も見取れる。図2e-fは図2a-bの青線のラインスキャンであり、わずかに波打っているのがわかる。この原因は界面に入射したスピン波の反射波である。

図3は入射角に対する透過波の屈折角、波数、反射波の反射角、波数を表す。オレンジ色の曲線が光のスネルの法則から予想され

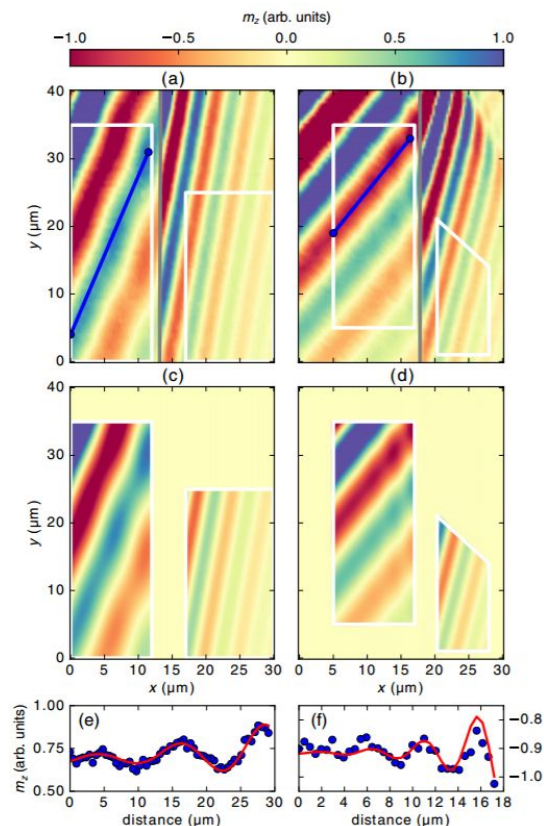


図2 a-b. 磁気光学カー顕微鏡によって測定されたスピン波の生データ(入射角20度a, 入射角40度b)。c-d. 2次元フィッティングの結果。e-f. 図2a-bの青線のラインスキャン。

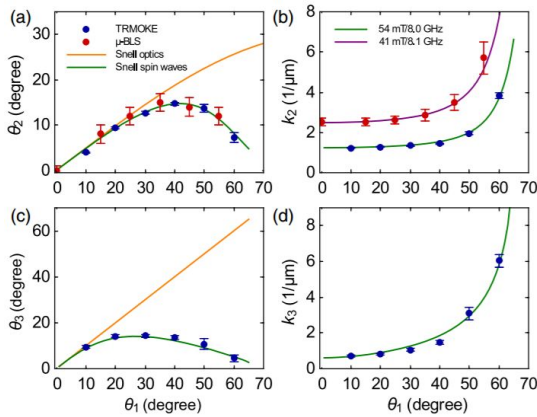


図 3. 入射角と屈折角(a)、透過波の波数(b)、反射角(c)、反射波の波数(d)の関係。

る屈折角の予想結果であり、入射角が大きくなるほど、実験結果と合わなくなるのがわかる。光の分散関係は空間が等方である限り、全方向に対して一つの屈折率で表現できる。しかしスピン波は磁場が印加されているために異方的な分散関係を持つ。それ故、スピン波の屈折率はスピン波の伝播方向に応じて変化し、図 3 の緑色の曲線のようになる。実験結果はこの曲線と一致しており、屈折率の定義の正しさと、スピン波の新しい制御方法が見出されたことを表している。この成果は Physical Review Letters に報告された。

(2) マグノンホール効果について

近年、外部磁場ではなくバンド構造で決まる有効磁場によって生み出されるホール効果がいくつか報告されており、マグノンでもホール効果が生じることが理論的に予想されている。ホール効果が生じるためには一般に有効磁場の存在と粒子の運動、つまり粒子の波数の変化が必要条件である。しかしマグノンは電子とは異なり電荷を持たないため電場によって制御することができない。そこで我々は電場ではなく、強磁性体のエッジでのマグノンが散乱現象を利用して波数の変化を誘起することでホール効果が実現するのではないかと考えた。

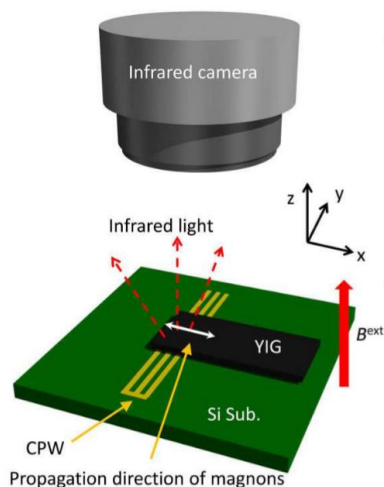


図 4 測定概念図

実験にはバルクのイットリウム鉄ガーネット単結晶を用い、ウェブガイドから誘起されるマイクロ波磁場によるマグノン励起を試みた。マグノンの観測にはマグノンの散乱による発熱現象をサーモグラフィーによって検出する手法をとった(図 4)。

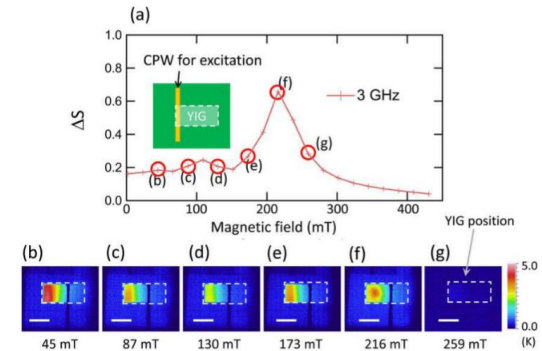


図 5(a) マイクロ波の吸収ピーク。(b-g)サーモグラフィーで測定された素子の温度上昇。白色点線が素子の位置を表す。

図 5(a)は 3 GHz のマイクロ波を印加した際の吸収係数の磁場依存性である。ピーク状の構造が現れており、コヒーレントなマグノンの励起を示唆している。また同時にサーモグラフィーによる温度測定を行った(図 5(b)-(g))。ピーク磁場に対応する図 5(f)において発熱が起きており、また高磁場領域である図 5(g)においては発熱が起きている。この現象はマイクロ波吸収が予想する結果と矛盾しない。一方で低磁場領域に着目すると本来マグノンが励起されない領域でも発熱が生じているのがわかる。この領域は飽和磁

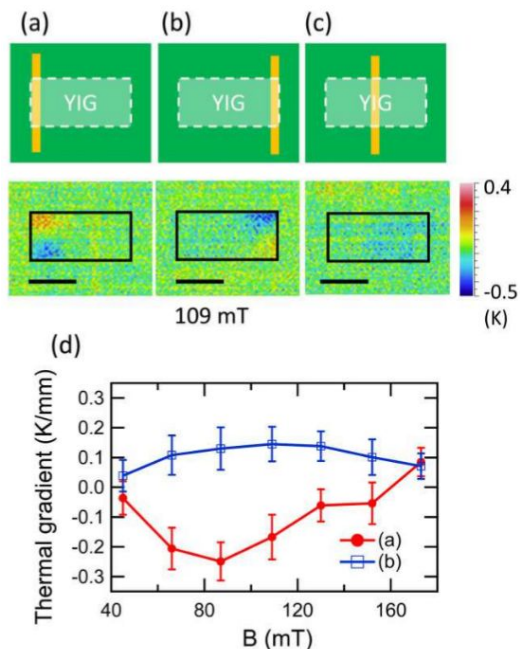


図 6(a)-(c) 外部磁場を反転させた際の温度勾配データ (d) 温度勾配の磁場依存性

化の大きさよりも低い磁場領域であり、磁化構造が多磁区化しランダムなマグノンが励

起されているのではないかと考えられる。

図 6(a)-(c)は外部磁場を正負反転させた際の温度勾配の差分データである。0.1 K 程度の温度勾配が現れているのがわかる。またこの温度勾配はエッジの向きが逆転すると温度勾配の符号が反転し、さらにエッジのないサンプル中を部分でマグノンを励起すると温度勾配は生じない。これらの結果は単に外因性の由来のものではないことを示唆している。またこの温度勾配はマグノンホール効果で予想される振る舞いと一致している。図 6(d)は温度勾配の磁場依存性を表しており、90 mT 程度で最も温度勾配が強められることがわかる。この磁場領域は磁場が十分弱いために多磁区化しており、励起されたランダムなマグノンやスピン揺らぎがマグノンホール効果に関係することを示唆している。この成果は Physica Status Solidi B に報告された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件) 全件査読あり

[1] H. Hata, T. Moriyama, **K. Tanabe**, K. Kobayashi, R. Matsumoto, S. Murakami, J. Ohe, D. Chiba and T. Ono

Micromagnetic simulation of spin wave propagation in a ferromagnetic film with different thicknesses

Journal of the Magnetics Society of Japan **39**, 151 (2015).

[2] M. Nagata, T. Moriyama, **K. Tanabe**, K. Tanaka, D. Chiba, J. Ohe, Y. Hisamatsu, T. Niizeki, H. Yanagihara, E. Kita and T. Ono
Spin motive force induced in Fe_3O_4 thin films with negative spin polarization
Applied Physics Express **8**, 123001 (2015).

[3] **K. Tanabe**, R. Matsumoto, J. Ohe, S. Murakami, T. Moriyama, D. Chiba, K. Kobayashi and T. Ono

Observation of magnon Hall-like effect for sample-edge scattering in unsaturated YIG
Physica Status Solidi B **253**, 783 (2016).

[4] **K. Tanabe**, R. Okazaki, H. Taniguchi and I. Terasaki

Optical conductivity of layered calcium cobaltate $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$

Journal of Physics: Condensed Matter **28**, 085601 (2016).

[5] J. Stigloher, M. Decker, H. S. Körner, **K. Tanabe**, T. Moriyama, T. Taniguchi, H. Hata, M. Madami, G. Gubbiotti, K. Kobayashi, T. Ono and C. H. Back

Snell's law for spin waves
Physical Review Letters **117**, 037204 (2016).

[6] **K. Tanabe**, H. Taniguchi and I. Terasaki
Optical sheet conductivities of layered oxides

Journal of Physics: Condensed Matter **28**, 325501 (2016).

[7] T. Wakamatsu, **K. Tanabe**, I. Terasaki, and H. Taniguchi

Improper ferroelectrics as high-efficiency energy conversion materials

Physica Status Solidi RRL 1700009 (2017).

[8] **K. Tanabe** and K. Yamada

Electrical detection of magnetic states in crossed nanowires using the topological Hall effect

Applied Physics Letters **110**, 132405 (2017).

[9] T. Nagai, H. Takahashi, R. Okazaki, **K. Tanabe**, I. Terasaki, and H. Taniguchi.

Optical control of dielectric permittivity in $\text{LaAl}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{O}_3$.

Applied Physics Letters **110**, 172901 (2017).

[10] Y. Maeda, T. Wakamatsu, A. Konishi, H. Moriwake, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, **K. Tanabe**, I. Terasaki, and H. Taniguchi

Improper ferroelectricity in stuffed aluminate sodalites for pyroelectric energy harvesting

Physical Review Applied **7**, 034012 (2017).

[11] I. Terasaki, T. Igarashi, T. Nagai, **K. Tanabe**, H. Taniguchi, T. Matsushita, N. Wada, A. Takata, T. Kida, M. Hagiwara, K. Kobayashi, H. Sagayama, R. Kumai, H. Nakao, and Y. Murakami

Absence of magnetic long range order in $\text{Ba}_3\text{ZnRu}_2\text{O}_9$: A spin-liquid candidate in the $S = 3/2$ dimer lattice

Journal of the Physical Society of Japan **86**, 033702 (2017).

〔学会発表〕(計 33 件) [1]-[3]のみ査読あり

[1] J. Stigloher, M. Decker, H. S. Körner, **K. Tanabe**, T. Moriyama, T. Taniguchi, H. Hata, M. Madami, G. Gubbiotti, K. Kobayashi, T. Ono and C. H. Back

Snell's Law for Spin Waves
The 22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS), Cracow, Poland, July 12-17 2015

[2] **K. Tanabe**, R. Okazaki, H. Taniguchi and I. Terasaki

Optical sheet conductivities of thermoelectric Co oxides

The 35th International Conference & the 1st Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT 2016), Wuhan, China, May 29 - June 2, 2016

[3] T. Nagai, **K. Tanabe**, I. Terasaki and H. Taniguchi

Photo-dielectric effect in Zn:LaAlO_3
13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity and 8th International Workshop on Relaxor Ferroelectrics (Joint

RCBJSF-IWRF), Shimane, 19 - 23 June, 2016
[4] T. D. Yamamoto, R. Yatagai, **K. Tanabe**, R. Okazaki, H. Taniguchi, Y. Yasui, S. Iguchi, T. Sasaki, and I. Terasaki
Enhanced thermopower and ferromagnetic fluctuations in Sc-substituted CaRuO_3 : An experimental study of the Kelvin formula
APS March Meeting 2017, New Orleans, 13-17 March 2017
[5] 白石祐芽, **田辺賢士**, 谷口博基, 寺崎一郎, 岡崎竜二, 鈴木祥一郎
Al ドープ SrTiO_3 単結晶における光ゼーベック効果
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 13 - 16 日
[6] 五十嵐太一, **田辺賢士**, 谷口博基, 小林賢介, 佐賀山基, 中尾裕則, 熊井玲児, 村上洋一, 寺崎一郎
ルテニウムの二量体構造を持つ $\text{Ba}_3\text{Ca}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Ru}_2\text{O}_9$ の基底状態
日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 - 19 日
[7] 山本貴史, **田辺賢士**, 谷口博基, 寺崎一郎
 CaRuO_3 における非磁性元素置換効果の一般的性質
日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 - 19 日
[8] **田辺賢士**, 岡崎竜二, 谷口博基, 寺崎一郎
 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 単結晶の光学伝導度
日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 - 19 日
[9] 永井隆之, 高橋英史, **田辺賢士**, 岡崎竜二, 寺崎一郎, 谷口博基
 $\text{LaAl}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{O}_3$ における光誘電率効果
日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 - 19 日
[10] 五十嵐太一, **田辺賢士**, 谷口博基, 寺崎一郎
 $\text{Ba}_3\text{M}\text{Ru}_2\text{O}_9$ ($M = \text{Ca}_{1-x}\text{Zn}_x, \text{Sr}^{2+}$) の磁化率と基底状態
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 - 22 日
[11] 谷田貝亮, **田辺賢士**, 谷口博基, 森初果, 佐々木孝彦, 寺崎一郎
-(BEDT-TTF) $_2$ CsM(SCN) $_4$ の磁場中非線形伝導
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 - 22 日
[12] 戸田康介, **田辺賢士**, 谷口博基, 岡崎竜二, 中村文彦, 寺崎一郎
 Ca_2RuO_4 の圧力下非線形伝導における試料温度計測
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 - 22 日
[13] 永井隆之, 高橋英史, **田辺賢士**, 岡崎竜二, 寺崎一郎, 谷口博基
 $\text{LaAl}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{O}_3$ における光誘電効果
公益社団法人日本セラミックス協会 2016 年

年会, 早稲田大学, 2016 年 3 月 14 日-16 日
[14] 帯刀信吾, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 谷口博基
 Bi_2O_3 - SiO_2 ガラスの結晶化による強誘電性シリケート Bi_2SiO_5 の合成と誘電特性
公益社団法人日本セラミックス協会 2016 年年会, 早稲田大学, 2016 年 3 月 14 日-16 日
[15] 若松徹, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 谷口博基
リラクサー強誘電体 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ における光誘電効果
公益社団法人日本セラミックス協会 2016 年年会, 早稲田大学, 2016 年 3 月 14 日-16 日
[16] 永井隆之, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 桑原彰秀, 谷口博基
還元 LaAlO_3 における光誘電効果
日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 - 16 日
[17] 戸田康介, **田辺賢士**, 谷口博基, 岡崎竜二, 中村文彦, 寺崎一郎
 Ca_2RuO_4 の非線形ゼーベック効果
日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 - 16 日
[18] 原佑樹, 松下琢, 和田信雄, 五十嵐太一, 谷田貝亮, **田辺賢士**, 谷口博基, 寺崎一郎
新規量子磁性体 $\text{Ba}_3\text{Zn}_1\text{Ru}_2\text{O}_9$ にドープされた Co の超低温磁化率
日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 - 16 日
[19] 三澤一輝, **田辺賢士**, 谷口博基, 寺崎一郎
 $\text{CaPd}_{3-x}\text{Cu}_x\text{O}_4$ ($0 < x < 2.4$) における輸送特性と磁気特性
日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 - 16 日
[20] 山本貴史, 谷田貝亮, **田辺賢士**, 岡崎竜二, 谷口博基, 安井幸夫, 井口敏, 佐々木孝彦, 寺崎一郎
 $\text{CaRu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{O}_3$ の輸送特性における磁気ゆらぎの効果
日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 - 16 日
[21] 永井隆之, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 谷口博基
 $\text{LaAl}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{O}_3$ における光誘電効果
第 52 回 東海若手セラミスト懇話会 2016 年夏期セミナー
岐阜, 2016 年 6 月 23 - 24 日
[22] 帯刀信吾, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 谷口博基
 Bi_2O_3 - SiO_2 ガラスの結晶化による強誘電性シリケート Bi_2SiO_5 の合成と誘電特性
第 52 回 東海若手セラミスト懇話会 2016 年夏期セミナー
岐阜, 2016 年 6 月 23 - 24 日
[23] 若松徹, **田辺賢士**, 寺崎一郎, 谷口博基
リラクサー強誘電体 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ における光誘電効果

第 52 回 東海若手セラミスト懇話会 2016 年夏期セミナー
 岐阜、2016 年 6 月 23 - 24 日
 [24] 若松徹、**田辺賢士**、寺崎一郎、谷口博基
 リラクサー強誘電体 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ における光誘電効果
 誘電体・磁性体若手夏の学校 2016 ~強制的秩序材料のマルチプローブ計測に関わる最先端技術~
 山形、2016 年 8 月 27 - 28 日
 [25] **田辺賢士**、谷口博基、中村文彦、寺崎一郎
 非線形伝導体における巨大なインダクタンス
 第 64 回応用物理学会春季学術講演会
 パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14 - 17 日
 [26] 永井隆之、**田辺賢士**、寺崎一郎、谷口博基、桑原彰秀、山田保誠
 還元 $LaAlO_3$ における光誘電効果
 日本セラミックス協会 2017 年年会
 日本大学、2017 年 3 月 17 - 19 日
 [27] 若松徹、**田辺賢士**、寺崎一郎、谷口博基
 高効率熱-電気エネルギー変換素子としての間接型強誘電体の新規開発
 日本セラミックス協会 2017 年年会
 日本大学、2017 年 3 月 17 - 19 日
 [28] 河原崎賢、安藤佳子、**田辺賢士**、寺崎一郎、谷口博基
 Nb^{5+} と In^{3+} の共ドーブによる TiO_2 単結晶の誘電率増強
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17 - 20 日
 [29] 戸田康介、**田辺賢士**、谷口博基、岡崎竜二、中村文彦、寺崎一郎
 Ca_2RuO_4 の圧力下非線形伝導のスケーリング
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17 - 20 日
 [30] 帯刀信吾、酒井雄樹、藤井康裕、是枝聡肇、安井伸太郎、東正樹、**田辺賢士**、寺崎一郎、谷口博基
 強誘電性シリケート Bi_2SiO_5 の La 置換効果
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日
 [31] 三澤一輝、**田辺賢士**、谷口博基、寺崎一郎
 $PbPdO_2$ の元素置換効果と電子状態
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17 - 20 日
 [32] 寺崎一郎、谷田貝亮、五十嵐太一、**田辺賢士**、谷口博基、安井幸夫、松下琢、和田信雄
 スピン液体候補物質 $Ba_3MRu_2O_9$ の磁性と帯磁率
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17 - 20 日
 [33] 原佑樹、松下琢、和田信雄、五十嵐太一、谷田貝亮、**田辺賢士**、谷口博基、寺崎一郎

新規量子磁性体 $Ba_3MRu_2O_9$ にドーブされた磁性イオンの超低温磁化率
 日本物理学会第 72 回年次大会
 大阪大学、2017 年 3 月 17 - 20 日

〔図書〕(計 1 件)

[1] 物性物理 100 問集、大阪大学出版会

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 (計 3 件)

[1] Physical Review Letters 誌の注目論文を解説する "Physics" に掲載。(2016 年 7 月 12 日)

"How Spin Waves Bend"

[2] IOP の physicsworld.com に掲載。(2016 年 7 月 21 日)

"Snell's law for spin waves measured at long last"

[3] Nature Physics の Research Highlights に掲載。(2016 年 8 月 2 日)

"Law and order"

新聞等 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田辺 賢士 (TANABE Kenji)

名古屋大学 大学院理学研究科物質理学専攻 (物理系) 助教

研究者番号：00714859

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者 ()