

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247056

研究課題名(和文) Spin Mechanics

研究課題名(英文) Spin Mechanics

研究代表者

Bauer Gerrit (Bauer, Gerrit)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：10620213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,500,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケール物質において機械的自由度と相互作用する磁気秩序の物理学を記述する為「スピン・メカニクス」という用語を導入した。複雑なフェリ磁性体の磁化ダイナミクスの原子論的シミュレーションや、温度勾配や光パルスなどの摂動に対する応答を計算する為、マグノン伝導に対するバリスティック領域の理論や半古典理論、有効散逸方程式理論といった、理論模型と研究手法を実際に開発した。特に、スピンホール磁気抵抗、光ポンププローブのマグノンポーラロン、スピンゼーベック輸送実験、スピンペルチェ効果とスピンネルンスト効果の発見に理論的に貢献し、また磁化ダイナミクスによるフォノンポンピングの予測を行った。

研究成果の概要(英文)：We introduced the term “spin mechanics” to describe the physics of the magnetic order interacting with the mechanical degrees of freedom in nanoscale materials and devices, comprising the Barnett and Einstein de Haas effects, magnetoelasticity, and magnon-phonon interactions. We reported our progress in spin mechanics, spintronics, and spin caloritronics in many publications as well as invited conference talks. We pragmatically developed theoretical models that lead to testable results, from atomistic simulations of complex ferrimagnets, to ballistic and semiclassical calculations of the response to perturbations such as temperature gradients and optical pulses, and effective diffusion equations of magnon transport. Highlights are our contributions to the discoveries of the spin Hall magnetoresistance, magnon polarons in optical pump-probe and spin Seebeck transport experiments, spin Peltier and spin Nernst effects, and the prediction of phonon pumping by magnetization dynamics.

研究分野：物性理論

キーワード：スピンメカニクス スピントロニクス スピнкаロリトロニクス マグノン伝導

## 1. 研究開始当初の背景

本研究プロジェクトはスピンゼーベック効果の発見後のスピンカロリトロニクス全盛期に始まった。一方、電気化学系の研究は、巨視的な系の量子力学的基底状態を実現する事で冷却する新しい方法の開拓を目的に、多くの成果をあげていた。我々の磁性体におけるバーネット効果に関する先駆的研究に刺激され前川グループは回転の効果に着目した。我々はこれをナノ磁性とスピントロニクスの統合の時期と捉えスピンメカニクスと名付けた。2013年一回目のワークショップ「スピンメカニクス」を開催した(来年には齊藤英治氏によって「スピンメカニクス6」が仙台で開催される)。

## 2. 研究の目的

申請の時期にはナノ構造におけるスピンメカニクスはそれほど注目されていなかった。磁性およびスピントロニクスのコミュニティではバーネットやアインシュタイン・ドハースらによる昔の実験や数十年前のバルク物質におけるマグノン・フォノン結合の研究はほとんど忘れられていた。金属材料研究所および理化学研究所における草分的実験は顕著な、しかしよく理解されていない、イットリウム鉄ガーネット(YIG:極めて精度の高い磁化ダイナミクスをもつ物質)の光学特性および輸送特性における格子と磁化の相互作用効果を示した。これらは薄膜磁性体やナノ構造におけるスピンメカニクスについて再考する動機となった。本研究では、イットリウム鉄ガーネットなどの強磁性絶縁体における磁化とフォノンの相互作用効果を記述する理論を構築し、ナノ磁性体における新しいスピンメカニクス現象を予測し、実験を説明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

スピントロニクス物質とデバイスに関する物質系で実験された重要な現象の理論研究を実施した。久保公式のダイアグラム法を用いた計算や散乱理論、スピン・マグノン・ボルツマン散逸、磁化ダイナミクスの原子論的シミュレーションといった多くの方法を習得した。我々の主な目的は界面およびナノ構造によって引き起こされる新しい物理の理解である。ここ数年は金属と接触がある場合、およびない場合のイットリウム鉄ガーネット薄膜に着目してきた。

## 4. 研究成果

本プロジェクトの共同研究者である齊藤グループとGoennenweinグループ(ドレスデン)が、磁性絶縁体と近接したプラチナの磁気抵抗効果の実験を行い、我々がスピン散逸理論の解析をした共同論文は、Google Scholarで740回の引用件数となった。初めは理解されなかったこの現象に対して我々はスピンホ

ール効果、逆スピンホール効果、スピン移トルク概念を組み合わせることでモデル化し説明した。図1に記したように、系に印加した電流は、電流およびスピン偏極の両方に垂直な向きのスピン流をもたらす。界面では、磁化がスピンと平行な場合にはスピン流は大きく反射するが、一方、磁化がスピンと垂直な場合にはスピン流は強磁性体に吸収される。前者の場合、反射したスピン流は逆スピンホール効果によって電流をもたらす、これは系の抵抗を減少させるが、後者の場合はそれは起こらない。磁場によって磁化の向きを回転させると、電気抵抗が変調する。これがスピンホール磁気抵抗効果である。我々は金属に対しスピンディフュージョン方程式を、界面に対しスピンミキシングコンダクタンスを用いてこの現象を定式化し、実験的に知られているパラメータを用いることで、多くの実験を説明することに成功した。

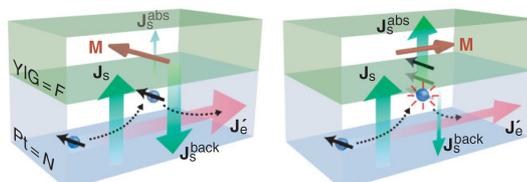


図1: ノーマル金属(N)と磁性絶縁体 YIG(F) 界面におけるスピンホール磁気抵抗効果の理論モデル。  $J_s$  は電流  $J_e$  によって生成されたスピンホール流である。  $J_s^{\text{back}}$  ( $J_s^{\text{abs}}$ ) は界面で反射した(吸収した)スピン流である。(左) 磁化  $M$  が電流に垂直な場合。(右) 磁化が電流に平行な場合。

我々は熱電能を計算する理論を拡張し、プラチナにおけるスピネルンスト効果の説明を与え、スピネルンスト効果は大きく、かつスピンホール角とは逆符号となるという結論に至った。一方、ガドリニウム鉄ガーネットで観測された負のスピンホール磁気抵抗比については、反強磁性体でしばしば観測される、保証点におけるスピフロップ転移によって説明した。

理研の小川らによるYIG薄膜の光学ポンブプローブ実験に刺激され、我々は結合方程式を直接解くことで格子と磁化の結合効果を調べた。この技術は金研の橋本氏によって完成されたもので、マグノンとフォノンの分散関係を明示することからスピン波トモグラフィと呼ばれる。我々の理論は局所レーザービームの照射で熱的に励起したフォノンによって磁化が駆動することを示唆する。

もう一つのセレンディピティー的発見は齊藤グループによるYIG薄膜におけるスピンゼーベック効果に関する実験である。かれらは熱的に誘起した電圧に謎めいたピーク構造を発見した。我々は磁気弾性系におけるスピン伝導のボルツマン方程式から出発したが、マグノンとフォノン分散曲線の接点での異常につまづいた。ユトレヒト大学のDuineグ

ループとの共同研究によってスピントロニクス係数を正確に計算する事で、異常は磁化と格子のマグノン・ポラロンによる混成励起によるものであることを示した。この結果は YIG の弾性クオリティーはその磁性クオリティーよりもはるかに高い事を示す。このことは磁性クオリティーを向上する物質科学において有益な知見を与えるはずである。

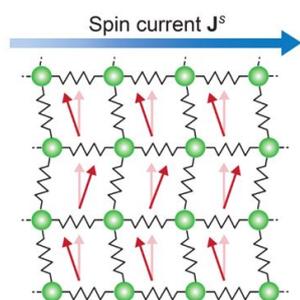


図 2 : スピン-格子相互作用の概念図。

本研究で明らかとなった、その他の格子とスピンの相互作用に関する側面は、散乱に理論によって計算された、熱伝導とスピン伝導の特性である。我々は磁気微粒子の磁気共鳴は剛性質量の歳差に大きく影響を受ける事を示した。磁化ダイナミクスはフォノン型の角運動量流を放射することが示され、我々はこれをフォノンスピンプングと名付けた。我々は、今後数年間集中的に推進する予定である、新しい分野「スピントロニクス」および「希土類スピントロニクス」の理論研究の初めのステップを構築した。「スピントロニクス」はマグノンと、(フォノンではなく)主にマイクロ波や赤外領域のフォトンの結合を扱う分野である。マイクロ波領域の強結合極限で構成される準粒子はマグノン-ポラロンであり、これは中村・宇佐見グループの実験においても確認された。後者のグループはまたイットリウム鉄ガーネットの球におけるウィスパリングギャラリモード(共振特性モード)と光の結合についても研究を行なった。これは弱結合でありピリルアン光散乱過程における摂動論によって記述される。我々は選択則を使う方法、およびデモン・エシュバツハ・カイラル表面モードを用いて結合を増強する方法を提案した。こうして、イットリウム鉄ガーネットを中心とする磁性絶縁体における磁化とフォノンの結合に対する理論は完成され、光応答やスピントロニクス効果など、スピントロニクス現象に関する多くの実験を説明することに成功した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

B. A. O. Leon, A. B. Cahaya, and G. E. W. Bauer, Voltage control of interface rare-earth magnetic moments, Phys.

Rev. Lett. 120, 027201 (2018), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.027201

B. Flebus, K. Shen, T. Kikkawa, K. Uchida, Z. Qiu, E. Saitoh, R.A. Duine, and G. E. W. Bauer, Magnon-polaron transport in magnetic insulators, Phys. Rev. B 95, 144420 (1-11) (2017), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.95.144420

S. Meyer, Y. Chen, S. Wimmer, M. Althammer, S. Geprägs, H. Huebl, D. Ködderitzsch, H. Ebert, G. E. W. Bauer, R. Gross, S. T.B. Gönnerwein, Observation of the spin Nernst effect, Nature Materials 16, 977-981 (2017), 査読有  
DOI: 10.1038/nmat4964

Oleg A. Tretiakov, M. Morini, S. Vasylykevych, V. Slastikov, Engineering curvature-induced anisotropy in thin ferromagnetic films, Physical Review Letters 119, 077203 (2017), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.077203

K. Litzius, I. Lemesh, B. Kruger, P. Bassirian, L. Caretta, K. Richter, F. Buttner, K. Sato, Oleg A. Tretiakov, J. Forster, R. M. Reeve, M. Weigand, I. Bykova, H. Stoll, G. Schutz, G. S. D. Beach, and Mathias Klaui, Skyrmion Hall Effect Revealed by Direct Time-Resolved X-Ray Microscopy, Nature Physics 13, 170 (2017), 査読有  
DOI: 10.1038/nphys4000

J. Barker and G. E. W. Bauer, Thermal Spin Dynamics of Yttrium Iron Garnet, Phys. Rev. Lett. 117, 217201 (1-5) (2016), 査読有  
DOI: 10.1038/nmat4964

T. Kikkawa, K. Shen, B. Flebus, R. A. Duine, K. Uchida, Z. Qiu, G. E. W. Bauer, and E. Saitoh, Magnon-Polarons in the Spin Seebeck Effect, Phys. Rev. Lett. 117, 207203 (1-5) (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.207203

T. Inoue, G. E. W. Bauer, and K. Nomura, Spin pumping into two-dimensional electron systems, Phys. Rev. B 94, 205428 - 1-7 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.205428

Sekine and K. Nomura, Chiral Magnetic Effect and Anomalous Hall Effect in Antiferromagnetic Insulators with Spin-Orbit Coupling, Phys. Rev. Lett. 116, 096401 - 1-5 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.096401

D. Kurebayashi and K. Nomura, “Voltage-driven magnetization switching and spin pumping in Weyl semimetals”, Phys. Rev. Applied 6, 044013 - 1-6 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.044013

R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, Spin hydrodynamic generation. Nature Physics 12, (2016) 52-56, 査読有  
DOI: 10.1038/nphys3526

J. Kim, P. Sheng, S. Takahashi, S. Mitani, and M. Hayashi, Spin Hall magnetoresistance in metallic bilayers, Phys. Rev. Lett. 116, (2016) 097201-1-097201-5, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.097201

J. Barker and Oleg A. Tretiakov, Static and Dynamic Properties of Antiferromagnetic Skyrmions in the Presence of Applied Current and Temperature, Physical Review Letters 116, 147203 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.147203

K. D. Belashchenko, O. Tchernyshyov, A. A. Kovalev, and Oleg A. Tretiakov, Magnetoelectric domain wall dynamics and its implications for magnetoelectric memory, Applied Physics Letters 108, 132403 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/10.1063/1.4944996

K. Shen and G.E.W. Bauer, Laser-induced spatiotemporal dynamics of magnetic films, Phys. Rev. Lett. 115, 197201 (2015), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.197201

K. Nomura and D. Kurebayashi, “Charge-Induced Spin Torque in Anomalous Hall Ferromagnets”, Phys. Rev. Lett. 115, 127201 - 1-5 (2015), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.127201

T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa and Y. Otani, Quasiparticle-mediated spin Hall effect in a superconductor, Nature Materials 14, (2015) 675-678, 査読有  
DOI: 10.1038/nmat4276

T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Current-Induced Spin-Torque Resonance of Magnetic Insulators, Phys. Rev. Applied 2, (2014) 034003-1-034003-6 T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.2.034003

Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S. T. B. Gönnenwein, E. Saitoh, G. E. W. Bauer, Theory of spin Hall magnetoresistance, Phys. Rev. B 87, 144411 (2013), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.144411

H. Nakayama, M. Althammer, Y.-T. Chen, K. Uchida, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, T. Ohtani, S. Geprägs, M. Opel, S. Takahashi, R. Gross, G. E. W. Bauer, S. T. B. Gönnenwein, E. Saitoh, Spin Hall Magnetoresistance Induced by a Non-Equilibrium Proximity Effect, Phys. Rev. Lett. 110, 206601 (2013), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.206601

[学会発表](計28件)

Oleg A. Tretiakov, “Hall Effects and Lifetime of Antiferromagnetic Skyrmions,” XXII International Symposium “Nanophysics & Nanoelectronics,” Nizhny Novgorod, Russia, March 12-15, 2018.

K. Nomura, “Anomalous Magnetotransport and Magnetization Dynamics in Magnetic Weyl Semimetals”, TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop: Topological Magnets and Topological Superconductors, Kyoto University, Japan, Jan. 11-14, 2018

Oleg A. Tretiakov, “Stability and Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmions,” Symposium “THz Spintronics with Ferrimagnets and Dirac/Weyl Materials” at PIERS 2017, Singapore, November 19-22, 2017.

Gerrit E. W. Bauer, “Dynamics of high-quality ferrimagnetic

insulators”, Gordon Godfrey Workshop 2017 on “Spins and Strong Electron Correlations”, University of New South Wales, Sydney, Australia, November 1, 2017.

高橋 三郎, 「超伝導体におけるスピン注入とスピン伝導」日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学, 日本, 2017 年 9 月 21 日.

Gerrit E. W. Bauer, “Device Prospects for Magnetic Insulators”, GRC on Spin Dynamics in Nanostructures, Les Diablerets, Switzerland, July 20, 2017.

Oleg A. Tretiakov, “Skyrmion Hall Effect in Antiferromagnets and Ferromagnets,” Gordon Research Conference (GRC) “Spin Dynamics in Nanostructures” 2017, Les Diablerets, Switzerland, July 16-21, 2017.

Oleg A. Tretiakov, “Skyrmion Hall Effect in Antiferromagnets and Ferromagnets,” plenary talk at the Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017), Moscow, Russia, July 1-5, 2017.

Gerrit E. W. Bauer, “Rotations and Vibrations”, Spin Mechanics 4, Lake Louise (Ca), February 24, 2017.

Oleg A. Tretiakov, “Stability and Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmions,” Joint European Magnetism Symposia (JEMS 2016), Glasgow, Scotland, UK, August 21-26, 2016.

Gerrit E. W. Bauer, “From Mesoscopic Thermoelectrics to Spin Caloritronics”, New Trends in Topological Insulators 2016 and 17th International Conference on Narrow Gap Systems (NGS17), Würzburg, Germany, July 28, 2016.

Gerrit E. W. Bauer, “Spin(calori)tronics with magnetic insulators”, MRS Spring Meeting Phoenix, Arizona, March 30, 2016.

Gerrit E. W. Bauer, “Elementary excitations of magnetic insulators and its heterostructures with normal metals”, Quantum Signatures in Magnetism Symposium, Spring Meeting of the Germany Physical Society,

Regensburg, Germany, March 6-11, 2016.

S. Takahashi, “S Fluid motion induced by spin injection”, International Workshop on Flow Dynamics and Spintronics, Stockholm, Sweden, Nov 12, 2015.

Gerrit E. W. Bauer, “Understanding bilayers of metals and magnetic insulators”, SPIE Optics & Photonics, San Diego, USA, August 8, 2015.

Gerrit E. W. Bauer, “Modelling and Simulation I&II”, IEEE Magnetism Society Summer School, Minneapolis, USA, 18 June, 2015.

Gerrit E. W. Bauer, “Theoretical insights in heterostructures with magnetic insulators”, INTERMAG, Beijing, China, May 11-15, 2015

K. Nomura, “Spintronics in topological materials”, Novel Quantum Materials and Systems, Lorentz Center, Universiteit Leiden, the Netherlands, Sep. 7-11, 2015.

Gerrit E. W. Bauer, “Onsager Reciprocity in Spin Caloritronics”, 8th International Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS VIII), Washington, DC, USA, July 28-31, 2014.

S. Takahashi, “Spin Hall magnetoresistance in a trilayer system with noncollinear magnetizations ICC-IMR”, 20th REIMEI International Workshop on Spin Mechanics 2, Sendai, Japan, June 21, 2014.

21 Gerrit E. W. Bauer, “Theory of spin Hall magnetoresistance (SMR) and related phenomena”, March Meeting of the APS 2014, Denver (USA), March 4, 2014.

22 K. Nomura, “Thermal current induced orbital angular momentum in topological states” 14th REIMEI Workshop on Spin Currents and Related Phenomena, Institut Laue-Langevin, Grenoble, France, Feb.10-13, 2014.

- 23 S. Takahashi, "Static and dynamic properties of spin transport in magnetic insulator/ metal/magnetic insulator trilayer systems", 14th REIMEI Workshop on Spin Currents and Related Phenomena, Institut Laue-Langevin, Grenoble, France, Feb.10-13, 2014.
- 24 Gerrit E. W. Bauer, "Spin and Heat Transport through Interfaces between Metals and Magnetic Insulators", 60th International Symposium and Exhibition of the American Vacuum Society, Long Beach, Oct 27-Nov 1, 2013.
- 25 Gerrit E. W. Bauer, "Spin Transfer - from Freshman Mechanics to Killer Application", Blackboard Lunch Seminar for KITP Program on "Spintronics: Progress in Theory, Materials, and Devices" at the Kavli Institute of Theoretical Physics at the UC Santa Barbara, 21 October 2013.
- 26 Gerrit E. W. Bauer, "Spin Caloritronics", Invited Short Course, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), 24-27 Sept. 2013.
- 27 Gerrit E. W. Bauer, "YIG|Pt heterostructures", Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2013, Rhodos, Greece, August 25-30, 2013.
- 28 Gerrit E. W. Bauer, "Spin Hall Dynamics", Gordon Research Conference (GRC) on Spin Dynamics in Nanostructures (Vice Chair & Discussion Leader), Hong Kong, August 22, 2013.

〔図書〕(計4件)

S. Takahashi and S. Maekawa, Oxford University Press, Chapter 12. Spin Hall effect, Spin Current (2nd edition), 2017, pp. 208-225.

野村 健太郎, 丸善出版、トポロジカル絶縁体・超伝導体 (現代理論物理学シリーズ)、2016、371

S. Takahashi, Springer Netherlands, "Physical Principles of Spin Pumping," Handbook in Spintronics, 2015, pp.1445-1480.

J. Xiao, Y. Zhou, G. E. W. Bauer, Academic Press, UK, Chapter 2. Spin-Wave Excitation in Magnetic Insulator Thin Films by Spin-Transfer Torque, Solid State Physics 64: Recent Advances in Magnetic Insulators - From Spintronics to Microwave Applications, 2013, pp.29-52.

6. 研究組織

(1)研究代表者

パウアー ゲリット (BAUER, Gerrit)  
 東北大学・金属材料研究所・教授  
 研究者番号： 1 0 6 2 0 2 1 3

(2)研究分担者

野村 健太郎 (NOMURA, Kentaro)  
 東北大学・金属材料研究所・准教授  
 研究者番号： 0 0 4 5 5 7 7 6

高橋 三郎 (TAKAHASHI, Saburo)  
 東北大学・金属材料研究所・准教授  
 研究者番号： 6 0 1 7 1 4 8 5

トレティアコフ オレグ (TRETIKOV, Oleg)

東北大学・金属材料研究所・助教  
 研究者番号： 5 0 6 4 3 4 2 5

(3)連携研究者

齋藤 英治 (SAITOH, Eiji)  
 東北大学・金属材料研究所・教授  
 研究者番号： 8 0 3 3 8 2 5 1