

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14420

研究課題名（和文）光学的スピントロニクスの新展開：光誘起Barnett効果の実現

研究課題名（英文）New development of optical spintronics: Toward realization of optical Barnett effect

研究代表者

仲田 光樹 (Nakata, Koki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：20867105

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は反強磁性体およびフェリ磁性体中のマグノン（量子力学的なスピン波）に着目し、マグノンと光（電磁波）との相互作用や、両者の量子力学的類似性を活用することで、「光学的マグノン Barnett効果」「光学的マグノン Josephson効果」「マグノン Casimir効果」等の新たな量子光学物性を明らかにした。電子のもう一つの自由度であるスピンを有効活用し、電荷に基づくエレクトロニクス分野では見落とされていた磁性絶縁体の活用方法を明らかにした本研究成果は、従来のエレクトロニクスを凌駕する省エネルギー技術の開発を目指すスピントロニクス（スピン・エレクトロニクス）の基礎学理の構築に大きく貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反強磁性体では量子力学的なスピン交換相互作用が支配的となり、高周波のマグノン（スピン波）を励起させる事が可能である。そのため、反強磁性絶縁体中のマグノンの新たな光学物性や量子物性を理論的に明らかにした本研究成果は、超高速スピントロニクスおよび光学的スピントロニクスの基礎学理の構築に貢献し、物質の個性を活かすスピントロニクスと普遍性を追求する量子統計物理学とを紡ぐ架け橋となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Throughout this research project, we have studied quantum optical properties of magnons in insulating magnets (e.g., antiferromagnets and ferrimagnets) and theoretically proposed the optomagnonic Barnett effect, the optomagnonic Josephson effect, and the magnonic Casimir effect.

研究分野：物性理論

キーワード：マグノン スピントロニクス マグノニクス 磁性絶縁体 量子物性 光学物性 非平衡物性 物性理論

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子力学誕生前、スピンという概念すらなかった今から 100 年以上前の時代から角運動量、特に力学的回転運動と磁化との相互関係は人々を魅了してきた。1915 年に Barnett は磁性体の力学的回転運動により磁化が誘起されること (図 1) また同じ年に Einstein と de Haas は、その逆効果とされる、磁化誘起による力学的回転運動を観測した。前者は「Barnett 効果 (バーネット効果)」、後者は「Einstein-de Haas 効果」と呼ばれる。これらの現象の鍵はスピン回転結合であるとされている。この「力学的 Barnett 効果」は強磁性体で観測されたが、2015 年に常磁性状態の Gd 単体においても力学的 Barnett 効果が生じることが観測された。更に力学的 Barnett 効果は電子スピン系だけでなく、核スピン系においても発生することが実験的に確認された。このように、スピン回転結合を活用した「スピン物性の力学的制御方法」の発展は目覚ましく、「スピンメカトロニクス (Spin-mechatronics)」と呼ばれる新たな研究分野が築かれている。

一方、2018 年に量子光学分野の発展に対してノーベル物理学賞が与えられたことに象徴される通り、レーザー技術の進展は目覚ましい。しかしながら、「光がスピン物性にどのような影響を与えるか」については、研究開始当初、まだよくわかっていないことも多く残されていた。そこで、技術応用のみならず基礎物理の観点からも重要なこれらの事項について、その基礎学理を構築しようと研究を開始した。

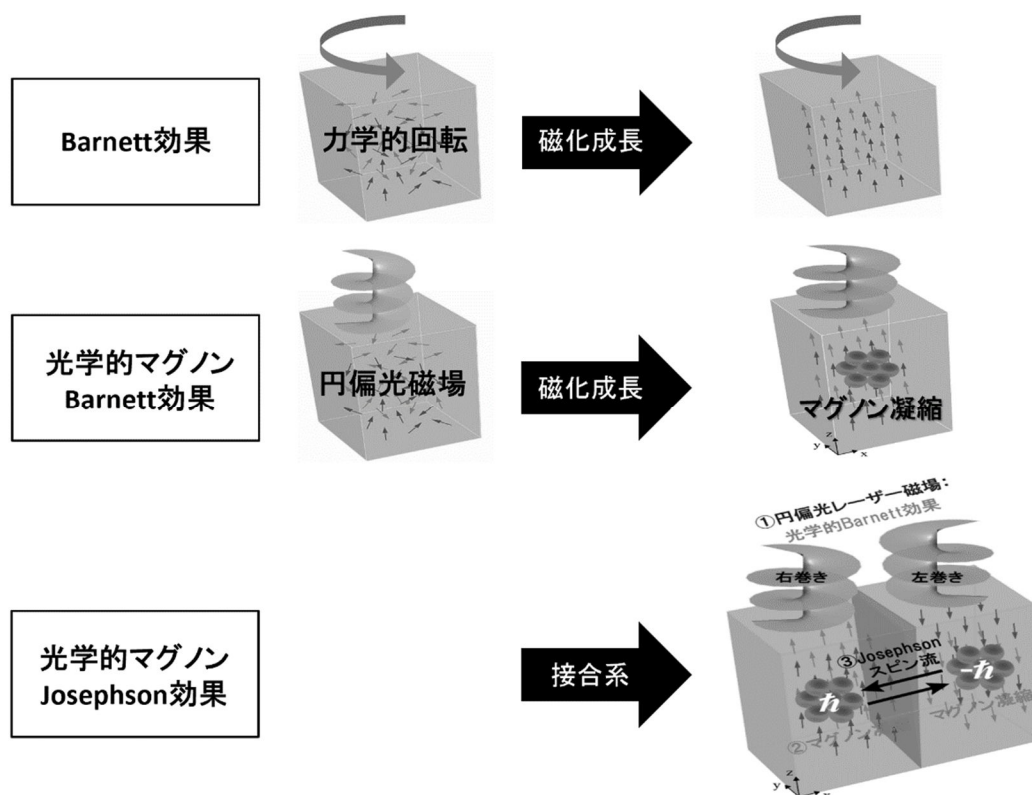


図 1 : Barnett 効果、光学的マグノン Barnett 効果、光学的マグノン Josephson 効果の模式図。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スピン物性のレーザー制御理論を構築し、光学的スピントロニクスの基礎学理を構築することである。そしてその理論基盤をもとに、マグノン (図 2) の新たな量子光学物性を解明することである。巨視的磁化を有する強磁性体では古典力学的な磁気双極子相互作用が支配的となるため、ギガヘルツ程度のマグノンしか励起できない。一方、反強磁性体では量子力学的なスピン交換相互作用が支配的となり、テラヘルツ領域のマグノンを励起させる事が可能であるため、反強磁性体は超高速スピントロニクスの絶好の舞台となることが期待される。

そこで、本研究では反強磁性絶縁体中のマグノンに着目し、光 (電磁波) とマグノン (スピン波) との相互作用や、両者の量子力学的類似性を活用することで、マグノンの新たな量子光学物性を明らかにすることを目指した。そして、反強磁性体の研究で得られた知見を活用し、反強磁性体のネール磁気秩序と同様に隣り合うスピン同士が互いに反平行の向きにそろっているフェリ磁性体の量子光学物性を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

非平衡 Green 関数法 (Schwinger-Keldysh Green 関数法) 半古典 Boltzmann 方程式、量子 Boltzmann 方程式、超対称量子力学といった解析的手法と数値計算を併用して研究を行い、下記「4. 研究成果」に記す通り、マグノンの量子光学物性を明らかにした(各々の研究の手法については下記「4. 研究成果」に記す)。

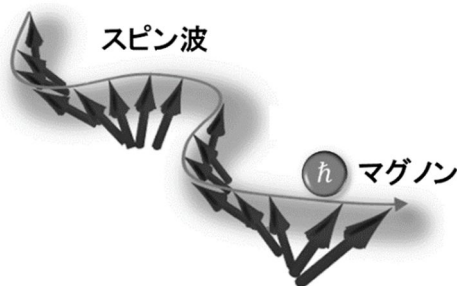


図2: マグノンとスピン波の模式図。

4. 研究成果

研究の主な成果(1): 光学的マグノン Barnett 効果

Optomagnonic Barnett effect

[[Kouki Nakata and Shintaro Takayoshi, Phys. Rev. B 102, 094417 \(2020\)](#)] ([Link](#))

スピン鎖のレーザー誘起磁化過程に関する研究知見を三次元フェリ磁性絶縁体に応用し、円偏光レーザー磁場による非平衡マグノン凝縮体の生成機構を解明した(図1)。Mermin-Wagnerの定理が示す通り、低次元スピン系では量子ゆらぎが強いため、マグノン描像が成立しない。そのため、この巨視的量子現象はスピン鎖では発生しない。さらに、従来のレーザー誘起磁化過程「逆 Faraday 効果」との違いを、「光学的 Barnett 磁場」と呼ばれる有効磁場描像の観点から整理・再考した。このように、本研究はフェリ磁性絶縁体を舞台とした巨視的量子光学物性の基礎学理の構築に貢献することが期待される。

研究の主な成果(2): 量子 Boltzmann 方程式に基づくマグノンの熱輸送理論

Magnonic thermal transport using the quantum Boltzmann equation

[[Kouki Nakata and Yuichi Ohnuma, Phys. Rev. B 104, 064408 \(2021\)](#)] ([Link](#))

従来の半古典 Boltzmann 方程式ではなく、量子 Boltzmann 方程式を用いて、マグノンの量子輸送物性を明らかにした。特に、従来の準粒子近似に基づく半古典 Boltzmann 方程式では記述することのできない量子性をスペクトル関数に取り込み解析を行った。そして、半古典 Boltzmann 方程式では記述することのできないマグノンの量子輸送物性を明らかにした。

研究の主な成果(3): 光学的マグノン Josephson 効果

Optomagnonic Josephson effect in antiferromagnets

[[Kouki Nakata, Phys. Rev. B 104, 104402 \(2021\)](#)] ([Link](#))

研究成果(1)「光学的マグノン Barnett 効果」を活用し、新たな巨視的量子輸送物性「光学的マグノン Josephson 効果」を明らかにした(図1)。光学的 Barnett 磁場を活用することにより、反強磁性絶縁体中のネール磁気秩序相をスピン偏極させることができる。そして光学的 Barnett 磁場の増加に伴い、対称性の自発的破れが生じ、レーザー照射中の非平衡定常下においてマグノンが凝縮する。するとマグノンは巨視的コヒーレンスを獲得する。このスピン偏極由来の高周波マグノン凝縮体を接合系で実現すると、非平衡マグノン凝縮体に特有の巨視的量子干渉効果によりスピン Josephson 効果が発生することを明らかにした。

研究の主な成果(4): 直線偏光レーザー照射下の直流・交流マグノンスピン流理論

Direct and alternating magnon spin currents across a junction interface irradiated by linearly polarized laser

[[Kouki Nakata and Yuichi Ohnuma, Phys. Rev. B 105, 144436 \(2022\)](#)] ([Link](#))

研究成果(1)(3)では、「円偏光レーザー」によりもたらされるマグノン物性を明らかにした。本研究では非平衡 Green 関数法 (Schwinger-Keldysh Green 関数法) を用いて、「直線偏光レーザー」によってもたらされるマグノン輸送物性を明らかにした。

研究の主な成果(5): 非線形領域におけるマグノン Wiedemann-Franz 則の破れ

Violation of the magnonic Wiedemann-Franz law in the strong nonlinear regime

[[Kouki Nakata, Yuichi Ohnuma, and Se Kwon Kim, Phys. Rev. B 105, 184409 \(2022\)](#)] ([Link](#))

Boltzmann 方程式を用いて、マグノン Wiedemann-Franz 則を非線形応答領域へ拡張した。そして、非線形応答領域では熱流の温度依存性が線形応答領域のものから劇的に変わる結果、線形応答領域で成立するマグノン Wiedemann-Franz 則が破れることを明らかにした。

研究の主な成果(6) : フェリ磁性体中のマグノン Casimir 効果

Magnonic Casimir Effect in Ferrimagnets

[Kouki Nakata and Kei Suzuki, Phys. Rev. Lett. 130, 096702 (2023)] (Link)

マグノン量子場の量子真空ゆらぎによる量子効果「マグノン Casimir 効果(マグノンカシミア効果)」を理論的に解明した(図3)。Heisenberg の不確定性原理に象徴される通り、量子ゆらぎは量子力学の重要な概念である。とりわけ、有限体積中の光子の量子場の量子真空ゆらぎを起源とするゼロ点エネルギーによって創発される Casimir 効果は、古典力学には対応物が存在しないという意味において量子効果である。これまで Casimir 効果は主に、光子系を舞台に研究されてきた。しかし、量子場の理論の観点から鑑みると、光子場誘起の Casimir 効果に類似の量子現象は、ゼロ点エネルギーを伴う他の量子場によっても創出されることが期待できる。特に光子場とは対照的に、マグノン量子場は格子上で定義・導入される。この格子正則化によりマグノン量子場は紫外発散の困難とは本質的に無縁であるため、有限サイズの磁性体は Casimir 効果と類似の量子現象を探索する上で絶好の舞台である。そこで本研究では、反強磁性体だけでなく、スピントロニクス研究で中心的な役割を果たしているフェリ磁性絶縁体「イットリウム鉄ガーネット(YIG)」中のマグノンの量子場に着目し、マグノン量子場の量子真空ゆらぎによる量子効果「マグノン Casimir 効果」を理論的に解明した。特に、酸化クロム(III)と YIG の薄膜に着目し、各々のマグノン Casimir 効果のふるまいを明らかにした。本研究は、Casimir 効果の制御・デザインを目指す「Casimir エンジニアリング」の基礎学理の構築に大きく貢献することが期待される。

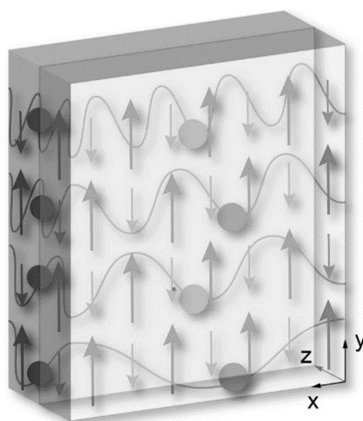


図3 : フェリ磁性薄膜中のマグノン Casimir 効果の模式図。

研究の主な成果(7) : 反強磁性スカーミオン構造を有する磁壁中のマグノン輸送理論

Magnon dynamics in a Skyrmion-textured domain wall of antiferromagnets

[Seungho Lee, Kouki Nakata, Oleg Tchernyshyov, Se Kwon Kim,

Physical Review B に掲載決定済 (Accepted 20 April 2023)] (Link)

超対称量子力学に基づき、反強磁性スカーミオン(Skyrmion)構造を有する磁壁中のマグノンのトポロジカル量子輸送物性を明らかにした。スカーミオン型の磁気構造を有する磁壁中を伝搬するマグノンは、一種のゲージ場として作用する有効磁場を獲得する。そこで、この有効磁場中でのマグノンの反射・屈折現象を超対称量子力学に基づいて解析し、その伝搬および束縛マグノン状態を明らかにした。そして、ランダウアー(Landauer)公式を用いて、磁壁のカイラリティが増加するにつれてマグノンによる熱流が減少することを明らかにした。本研究はスピンホール効果を活用した熱流の制御方法を理論的に提案した。

得られた研究成果(1)-(7)の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

国内外における位置づけ : 研究の主な成果(1)-(7)を各々まとめた7編の論文は、米国物理学会が刊行する国際学術雑誌「Physical Review B」及び「Physical Review Letters」からそれぞれ出版された[成果(7)は掲載決定済 : Accepted 20 April 2023]。さらに日本物理学会が刊行する学術雑誌「JPSJ」から招待され、「フェリ磁性体を舞台としたスピントロニクス研究の特集号(SPECIAL TOPICS: Renewed Interest in the Physics of Ferrimagnets for Spintronics)」にレビュー論文を寄稿・出版した[Kouki Nakata and Se Kwon Kim, J. Phys. Soc. Jpn. 90, 081004 (2021)]。また、和文雑誌「固体物理」から「マグノン Wiedemann-Franz 則」についての解説記事を出版した[仲田光樹, 固体物理, Vol.56 No.8 2021 P.35 (429)]。このように本研究成果は、マグノンを基軸としたスピントロニクス研究(マグノンスピントロニクス研究)の理論的基盤を充実させることに大きく貢献する意義深いものであると、国内のみならず国際的にも位置づけることができる。

インパクト：いずれの成果も米国物理学会が刊行する国際学術雑誌「Physical Review B」及び「Physical Review Letters」から出版されていることが物語る通り、本研究成果は光学的スピントロニクス基礎学理の構築において国際的なインパクトを与えることが期待される。さらに、物質の個性を活かすスピントロニクスと普遍性を追求する量子統計物理学とを紡ぐ架け橋に貢献する（インパクトを与える）ことが期待される。

今後の展望：今後は研究成果(5)(6)をそれぞれさらに発展させ、「(5')量子力学的マグノン Wiedemann-Franz 則」及び「(6')マグノン Casimir 効果の非エルミート理論」を構築し、マグノンを基軸としたスピントロニクス理論の基礎学理をより一層充実させる。特に、近年、目覚ましい発展を遂げている研究分野「非エルミート量子力学(物理)」で培われた研究知見をスピントロニクス研究に応用し、散逸下でのマグノンの量子物性を理論的に明らかにする。

<引用文献>

- S. J. Barnett, Phys. Rev. 6, 239 (1915).
- A. Einstein and W. J. de Haas, Verh. Dtsch. Phys. Ges. 17, 152 (1915).
- C. G. de Oliveira et al., Nuovo Cimento 24, 672 (1962).
- M. Ono et al., Phys. Rev. B 92, 174424 (2015).
- H. Chudo et al., Appl. Phys. Express 7, 063004 (2014).
- M. Matsuo et al., J. Phys. Soc. Jpn. 86, 011011 (2017).
- D. Bossini et al., ACS Photonics 3, 1385 (2016).
- T. Oka and S. Kitamura, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 10, 387 (2019).
- S. Takayoshi et al., Phys. Rev. B 90, 085150 (2014).
- S. Takayoshi et al., Phys. Rev. B 90, 214413 (2014).
- A. Rebei and J. Hohlfield, Phys. Lett. A 372, 1915 (2008).
- A. Rebei and J. Hohlfield, J. Appl. Phys. 103, 07B118 (2008).
- K. Nakata et al., Phys. Rev. B 92, 134425 (2015).
- H. B. G. Casimir, Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. 51, 793 (1948).
- H. Neuberger and T. Ziman, Phys. Rev. B 39, 2608 (1989).
- I. S. Tupitsyn et al., Phys. Rev. Lett. 100, 257202 (2008).
- K. A. van Hoogdalem et al., Phys. Rev. B 87, 024402 (2013).
- S. K. Kim et al., Phys. Rev. Lett. 122, 057204 (2019).
- S. K. Kim et al., Phys. Rev. B 90, 104406 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Seungho Lee, Kouki Nakata, Oleg Tchernyshyov, and Se Kwon Kim	4. 巻 掲載決定済 (Accepted 20 April 2023)
2. 論文標題 Magnon dynamics in a skyrmion-textured domain wall of antiferromagnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 (1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakata Kouki, Suzuki Kei	4. 巻 130
2. 論文標題 Magnonic Casimir Effect in Ferrimagnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 096702 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.096702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakata Kouki, Ohnuma Yuichi, Kim Se Kwon	4. 巻 105
2. 論文標題 Violation of the magnonic Wiedemann-Franz law in the strong nonlinear regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184409 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.184409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakata Kouki, Ohnuma Yuichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Direct and alternating magnon spin currents across a junction interface irradiated by linearly polarized laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144436 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.144436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Kouki	4. 巻 104
2. 論文標題 Optomagnonic Josephson effect in antiferromagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104402 (1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.104402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Kouki, Ohnuma Yuichi	4. 巻 104
2. 論文標題 Magnonic thermal transport using the quantum Boltzmann equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064408 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.064408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Kouki, Kim Se Kwon	4. 巻 90
2. 論文標題 Topological Hall Effects of Magnons in Ferrimagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 081004 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.081004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 仲田光樹	4. 巻 56
2. 論文標題 マグノン Wiedemann-Franz 則	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 429-439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Kouki, Takayoshi Shintaro	4. 巻 102
2. 論文標題 Optomagnonic Barnett effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094417 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.094417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 仲田光樹
2. 発表標題 マグノン量子場による非エルミートカシミア効果
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所セミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Seungho Lee, Kouki Nakata, Oleg Tchernyshyov, and Se Kwon Kim
2. 発表標題 Magnon dynamics in a Skyrmion-textured domain wall of antiferromagnets
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	KAIST			
ドイツ	Max Planck Institute (Dresden)			
米国	Johns Hopkins University			