

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月27日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220711

研究課題名(和文)メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の微視的理解とその制御

研究課題名(英文) Microscopic Understanding and Control of Nonequilibrium Spin Transport in Mesoscopic Systems

研究代表者

小林 研介 (KOBAYASHI, Kensuke)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：10302803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 152,600,000円

研究成果の概要(和文)：微細加工技術を駆使して作製される微小な固体素子は、非平衡状態を定量的に観測・制御することのできる理想的な舞台の一つである。本研究では、精密な伝導度・ゆらぎ測定と種々の理論的アプローチを組み合わせることによって、固体中を電荷とスピンの輸送される微視的な過程を研究した。近藤効果・スピン流・熱流・ゆらぎの定理・端状態・超伝導接合などに対して本質的な新展開をもたらす多彩な成果を上げた。特に、非平衡状態における近藤効果の研究によって、強相関量子液体の非平衡挙動を定量的に解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、固体中における電荷とスピンの様々な振る舞いを実験的・理論的に解明した。中でも近藤状態の最新の理論を定量的に検証した成果は、これまでの非平衡量子多体系の実験的研究の中で、最も定量性の高い精密なものであり、普遍的な学術的意義を持つ。「非平衡」は現代物理学における最大の難問の一つである。近藤効果は代表的な量子多体効果であり、平衡状態における理解が確立している点で、非平衡を研究する格好の舞台である。その振る舞いを定量的に理解できたことは、今後の非平衡研究の重要な基盤となる。

研究成果の概要(英文)：Solid-state devices fabricated by using nanofabrication techniques offer us an ideal test bed for quantitatively addressing non-equilibrium quantum many-body physics. In this research, using the high precision fluctuation measurement, with close cooperation between experiment and theory, we have successfully achieved various results regarding Kondo effect, spin current, heat flow, fluctuation theorem, superconducting junction, and so on. In particular, by investigating the Kondo effect in the non-equilibrium regime, we established a route to quantitatively elucidate the non-equilibrium behavior of strongly-correlated quantum liquids.

研究分野：物性物理学

キーワード：メゾスコピック系 スピントロニクス 非平衡 ゆらぎ 近藤効果 超伝導 スピン流 熱流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

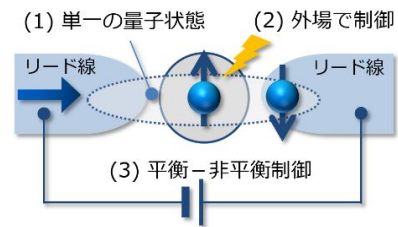
物性物理学は、磁性・超伝導など、多電子系のおりなす多彩な現象を扱う学問である。なかでも、電荷とスピンの自由度が絡み合う多体効果の発現様態に関する理解が物性物理学の本質の一つであるといっても過言ではない。特に、近藤効果や巨大磁気抵抗効果に代表されるスピン依存伝導の研究が物性物理学において果たしてきた役割は、極めて大きい。

これまで、スピン依存伝導の研究は、主にバルク物性の評価を通じて行われてきたが、微細加工技術の発展により、新しい研究手法が現れてきた。それは微小な固体素子（メゾスコピック系）を舞台とする研究手法であり、1998年の量子ドットにおける近藤効果の発見 [Goldhaber-Gordon *et al.*, *Nature* **391**, 156(1998)] がその傾向に大きく弾みをつけた。メゾスコピック系を対象とする研究は、

- (1) 単一の量子状態に対する測定が可能
- (2) 外場により量子状態の制御が可能
- (3) 平衡状態から非平衡状態まで連続的に制御可能

であるため(図)、輸送現象の素過程を直接取り扱える点に大きな特色を持つ。

一方、長年にわたるスピン依存伝導の研究の蓄積は、近年のスピンロニクス研究の興隆に結実し、その研究は、基礎研究が応用研究に直結する新たな段階に入っている。注目すべき点は、スピン注入など、系を非平衡にすることによって多彩な現象が見いだされていることである。しかしながら、非平衡スピン輸送の素過程そのものを理解し制御するという研究は、世界的にも緒についたばかりであり、広大な未踏領域が残されている。



図：メゾスコピック系の利点。例として量子ドットにおける近藤状態の場合を示す。

2. 研究の目的

本研究の目的は固体素子における非平衡スピン輸送過程を微視的に明らかにし制御することにある。代表者は、これまでのメゾスコピック系とスピンロニクスの研究を融合させることによって、このような研究が可能になると考え、本研究提案を行った。本研究では、メゾスコピック系における高精度な「ゆらぎ」測定を得意とする代表者が、5名の理論家（分担者および連携研究者）と包括的な共同研究を行うことによって、非平衡スピン輸送の研究を加速させることを目指した。具体的には相互に密接な関連を持つ3つのテーマを設定した。

- (1) 非平衡近藤状態の解明
- (2) 新規非平衡スピン輸送の開拓
- (3) 実時間ダイナミクス研究への展開

テーマ(1)の非平衡近藤効果は非平衡スピン輸送過程の典型例であり、理論の定量的な検証は、精密科学としての物性物理学の将来を占う上でも大きな意味を持つ。本研究の中心的な柱である。テーマ(2)は、スピン流などに関する新規非平衡スピン輸送の開拓を目指した。テーマ(3)は、非平衡スピン輸送の実時間測定の手法を実験的・理論的に開拓することを目指した。

3. 研究の方法

本研究計画の鍵となる実験手法は電流ゆらぎ測定である。電流ゆらぎ測定は、ゆらぎの平均値を測定するものであり、時間平均された伝導度測定では原理的に分からない、非平衡状態にある系のダイナミクスを定量的に知ることができる。代表者は、このようなユニークな情報を与える電流ゆらぎの有用性に注目し、2005年からその測定手法の開発に取り組んできた。その結果、電流ゆらぎ測定を用いて、非平衡近藤状態に関する理論を検証した最初の例を報告した [Phys. Rev. Lett. **106**, 176601 (2011)]。本研究は、このような研究実績に基づき、上に述べたテーマ(1)(2)(3)に取り組んだ。

4. 研究成果

以下に、本研究の成果を上記(1)、(2)、(3)に沿って述べる。さらに、(4)において成果の位置付けと今後の展望、(5)では当初予期しなかった展開によって得られた知見について述べる。

(1) 非平衡近藤状態の解明

近藤効果はスピンの中心的な役割を果たす代表的な量子多体効果であり、その振る舞いを研究することは、強相関量子液体（局所フェルミ液体）を研究することと等価である。

非平衡近藤状態の解明 [Nat. Phys. **12**, 230(2016)]

小林は、カーボンナノチューブ量子ドットにおいて、通常近藤効果 (= SU(2)近藤効果) と、スピンと軌道の両方の自由度を反映した SU(4)近藤効果の両方を実現した。しかも、どちらの場合においても、ほぼユニタリ極限に達する、これまでに報告された中で最も理想的な近藤状態を得た。高精度電流ゆらぎ測定の結果を理論（小栗・阪野）と精密に比較し、ウィルソン比の定量的な議論によって、観測された近藤状態が強相関極限（ウィルソン比=2）にあることを実証した。さらに、新しい非平衡スケールング則を実験的に確立した。

近藤効果における対称性の制御 [PRL 118, 196803(2017); JPSJ 85, 094718(2016)]

軌道の自由度が入ることによって、対称性の異なる多彩な近藤効果が生じる。小林・小栗・阪野は、SU(2) - SU(4)対称性クロスオーバーの理論を構築した。磁場印加によってスピンと軌道の縮退度を制御することによって、対称性クロスオーバーを実験的に実現し、基底状態の対称性の低下にともなう量子ゆらぎの増大を実験的に観測することに成功した。

三体相関 [PRL 120, 126802(2018); PRB 97, 045406(2018); PRB 97, 035435(2018)]

小栗は、非平衡近藤状態における伝導度から、非線形非平衡感受率における主要項となる三体相関を抽出できることを理論的に示した。現在、小林・小栗・阪野は共同で実験データの解析を進めており、有望な結果を得ている。

非平衡極限での輸送過程 [J. Phys.: Conf. Ser. 864, 012034(2017); PRB 91, 115429(2015)]

江藤は、より非平衡性が強い場合の高次トンネル過程を調べた。小栗・阪野も厳密解と既存の近似法を組み合わせ非平衡極限を調べた。現在、実験結果との比較を進めている。

(2) 新規非平衡スピン輸送の開拓

スピン流・熱流・ゆらぎの定理・エッジ状態・超伝導接合などに関して、様々な実験的・理論的成果を得た。以下に成果を述べる。

アンドレーフ・近藤効果 [PRL 121, 247703(2018)]

小林は異なる対称性を持つ近藤状態が超伝導と共存する状況を実現した。クーパー対と近藤一重項という2種類の電子対が競合する特異な量子状態におけるゆらぎの増大を実証した。

スピン流・熱流 [PRB 99, 115310(2019); PRL 120, 037201(2018); NJP 20, 093014(2018); PRB 98, 245412(2018); PRB 97, 045127(2018); PRB 93, 195411(2016); PRL 114, 016601(2015)]

小林は、スピン流に伴うショット雑音を検出することに成功した。また、小林は、量子ポイントコンタクトにおいて、これまでで最も高精度な電流ゆらぎ測定を行い、熱流の役割の重要性を示した。内海は熱電効果を利用した微小冷却器における電流と熱流の振る舞いを調べ、効率のゆらぎを完全計数統計理論によって解析した。加藤は、メゾスコピック二準位系を介した熱輸送と相転移の理論を構築した。

ゆらぎの定理の拡張と深化 [PRB 96, 064302(2017); Proc. Jpn. Academy, Ser. B 92, 204(2016); PRB 96, 085304(2017); PRB 91, 184515(2015); PRB 92, 165312(2015); PRL 114, 186601(2015)]

小林は量子系におけるゆらぎの定理を軸とすることによって、メゾスコピック非平衡統計物理学と呼ぶべき新しい研究領域が創出されることを議論した。内海はゆらぎの定理を用いることで、スピン流の非平衡ゆらぎがナノ磁性体に及ぼす新たな非平衡効果を予言した。内海は、エンタングルメント情報量のゆらぎについても議論した。

端状態の非平衡ダイナミクス [Sci. Rep. 5, 11723(2015); Nat. Comm. 6, 8066(2015)]

小林はトポロジカル絶縁体端状態におけるスピン輸送を研究するための第一歩として、グラフェンにおける端状態を研究した。キラリティの異なる端状態の生成に成功し、さらに、端状態の非平衡性に基づくゆらぎを検出した。理論[Abanin&Levitov, Science 317, 641(2007)]で予想されていた端状態混合を証明した初の実験であり、今後の端状態の研究に進展をもたらす。

多彩なコヒーレント伝導・スピン伝導の解明

さらに以下の関連研究を行った：超伝導/絶縁体界面におけるスピン輸送[PRB 99, 144411(2019)]、量子液体におけるベル相関[PRB 99, 155106(2019)]、スピン流誘起力学的トルク[JPSJ 88, 064702(2019)]、量子ホール効果ブレークダウンにともなうゆらぎ[PRB 89, 235318(2014)]、グラフェンにおける異常な $1/f$ 雑音[APL 108, 103106(2016)]、カーボンナノチューブにおけるトポロジカル相転移[PRB 99, 115409(2019); JPSJ 86, 013702(2017)]、分子接合におけるスピン輸送[PRB 93, 075407(2016); JPSJ 87, 043703(2016)]、カイラル p 波超伝導での電流誘起ドメイン[JPSJ 87, 094705(2018)]。

(3) 実時間ダイナミクス研究への展開

単電子ポンプの動作実証やスピン波の実時間観測や種々の理論構築により、今後のダイナミクス研究の発展につながる重要な成果を得た。

単電子ポンプの技術開発

与えられた周波数 f に応じて精密な電流 ef を生み出す単電子ポンプの作製技術を確立した。これは今後の一電子量子光学実験におけるポンププローブ法の基盤となる。

スピンダイナミクス [PRL 117, 037204(2016); Phys. Stat. Sol. (b) 253, 783(2016)]

スピン波は、非平衡スピン輸送の一形態である。小林は、スピン波の伝播に伴うホール効果

を実証した。また、スピン波の伝搬を追跡しスネルの法則を実証した。

ダイナミクス理論 [*JPSJ* 87,044709(2018);*APEX* 10,053001(2017);*PRB* 96,024406(2017);*JPSJ* 86,024007(2017);*JPSJ* 86,024710(2017);*PRB* 91,165302(2015);*PRB* 90,165411(2014)]

小林は、スピン流におけるパウリの排他律や量子コヒーレンスの役割を解明する手法として実時間測定理論を構築した。加藤は、小林が開発を進めている単電子ポンプ実験に対応して、強い交流外場下での輸送理論や時間依存外場中の断熱ポンプの理論を構築した。

(4) 得られた成果の国内外における位置付けとインパクトおよび今後の展望など

上記(1) と に述べた非平衡近藤状態の精密な定量化に成功した結果は、本研究で最大の成果である。非平衡状態にある量子多体系は、近年大きな注目を集めるトピックである。メゾスコピック分野のみならず、強相関電子系・冷却原子ガス・スピントロニクスなどの分野においても、その最先端トピックの多くに「非平衡」が関わっている。近藤効果は、最も典型的な量子多体現象であるため、非平衡近藤効果の研究は、より広範な非平衡量子多体効果の理解への試金石となる。我々の知る限り、本成果は、非平衡量子多体系における、これまでで最も定量的性の高い精密な実験であり、フェルミ液体論を非平衡領域に拡張する方法論の正当性を世界で初めて確証したものである。

上記(2) で述べたスピンショット雑音の観測もスピン流の実体に関わる成果である。この成果は、小林や加藤によって、ダイナミクス研究へと拡張された[*PRL* 120,037201(2018);*APEX* 10,053001(2017)]。さらに、海外のグループからも、スピン流の雑音に関する新理論が報告された[例えば Kamra-Belzig, *PRL* 116,146601(2016)]。また、小林はゆらぎの定理を軸とすることによりメゾスコピック非平衡統計物理学が創出されることを議論した。内海によるゆらぎの定理とその拡張に関する一連の研究は、今後の格段の発展をもたらす可能性を持つ。

本研究の成果は現時点で計 76 報の論文として報告されている。内訳としては、*Nat. Phys.* 1 報、*Nat. Comm.* 1 報、*Sci. Rep.* 1 報、*Phys. Rev. Lett.* 誌 7 報、*Phys. Rev. B* 誌 22 報、*J. Phys. Soc. Jpn.* 誌 8 報のように、国際的に定評ある学術誌に数多く掲載された。

以上のように、「ゆらぎ」という新しい観点から輸送の素過程を解明し制御することによって、スピン依存伝導とスピントロニクス分野に実験的・理論的に本質的な新展開をもたらすという本研究の目的は当初の想定以上に達成された。本研究は、広大な未踏領域である非平衡研究への重要な礎となるものである。今後の展望としては、実験的・理論的に非平衡近藤状態の理解をさらに精緻化することを通じて非平衡量子多体系の物理の基盤を完成させること、一電子ダイナミクスの実験をさらに発展させること、スピン流・熱流に対する新しいアプローチを開拓することを挙げたい。このような方向性で研究を追求することによって、量子系における非平衡という豊かな新領域が切り拓かれていくと期待される。

(5) 当初予期していなかった展開によって得られた知見

実験では $SU(2)$ ・ $SU(4)$ 近藤効果に対して、これまでに報告例のないほぼ完全に理想的な近藤状態が得られ、膨大な非平衡輸送の実験データが得られた。しかし、それを解析するための理論が追いついていない状況が 1 年ほど続いた。ところが、2017 年以降、理論研究が世界的に急速に進み[Filippone *et al.* *PRB* 95,165404(2017)他]、我々の実験結果から非線形帯磁率を特徴づける三体相関を抽出できる見込みが出てきた[上記(1)]。この展開は本研究遂行にとって幸運なものであり、新しく得られた知見は当初の期待を上回るものとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 76 件)

R. Sakano, A. Oguri, Y. Nishikawa, and E. Abe, “Bell-state correlations of quasiparticle pairs in the nonlinear current of a local Fermi liquid”, *Physical Review B* 99, 155106/1-7 (2019). doi:10.1103/PhysRevB.99.155106 査読有

T. Kato, Y. Ohnuma, M. Matsuo, J. Rech, T. Jonckheere, and T. Martin, “Microscopic theory of spin transport at the interface between a superconductor and a ferromagnetic insulator”, *Physical Review B* 99, 144411/1-8 (2019). doi:10.1103/PhysRevB.99.144411 査読有

T. Yamamoto, M. Kato, T. Kato, and K. Saito, “Heat transport via a local two-state system near thermal equilibrium”, *New Journal of Physics* 20, 093014/1-20 (2018). doi:10.1088/1367-2630/aadf09 査読有

A. Oguri, and A. C. Hewson, “Higher-Order Fermi-Liquid Corrections for an Anderson Impurity Away from Half Filling”, *Physical Review Letters* 120, 126802/1-6 (2018). doi:10.1103/PhysRevLett.120.126802 査読有

M. Matsuo, Y. Ohnuma, T. Kato, and S. Maekawa, “Spin Current Noise of the Spin Seebeck

Effect and Spin Pumping”, *Physical Review Letters* **120**, 037201/1-5 (2018). doi:10.1103/PhysRevLett.120.037201 査読有

T. Jonckheere, and T. Kato, “DC-Current Induced Domain Wall in a Chiral p-Wave Superconductor”, *Journal of the Physical Society of Japan* **87**, 094705/1-6 (2018). doi:10.7566/jpsj.87.094705 査読有

T. Hata, R. Delagrangé, T. Arakawa, S. Lee, R. Deblock, H. Bouchiat, K. Kobayashi, and M. Ferrier, “Enhanced Shot Noise of Multiple Andreev Reflections in a Carbon Nanotube Quantum Dot in SU(2) and SU(4) Kondo regimes”, *Physical Review Letters* **121**, 247703/1-5 (2018). doi:10.1103/PhysRevLett.121.247703 査読有

S. Iwakiri, Y. Niimi, and K. Kobayashi, “Dynamics of pure spin current in high-frequency quantum regime”, *Applied Physics Express* **10**, 053001/1-4 (2017). doi:10.7567/APEX.10.053001 査読有

M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi, “Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-Correlated Quantum Dot”, *Physical Review Letters* **118**, 196803/1-5 (2017). doi:10.1103/PhysRevLett.118.196803 査読有

Y. Teratani, R. Sakano, R. Fujiwara, T. Hata, T. Arakawa, M. Ferrier, K. Kobayashi, and A. Oguri, “Field-Enhanced Kondo Correlations in a Half-Filling Nanotube Dot: Evolution of an SU(N) Fermi-Liquid Fixed Point”, *Journal of the Physical Society of Japan* **85**, 094718/1-18 (2016). doi:10.7566/JPSJ.85.094718 査読有

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**, 037204/1-5 (2016). doi:10.1103/PhysRevLett.117.037204 査読有

K. Kobayashi, “What can we learn from noise? – Mesoscopic nonequilibrium statistical physics –”, *Proceedings of the Japan Academy, Series B* **92**, 204-221 (2016). doi:10.2183/pjab.92.204 査読有

M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi, “Universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids”, *Nature Physics* **12**, 230-235 (2016). doi:10.1038/nphys3556 査読有

Y. Utsumi, and T. Taniguchi, “Fluctuation theorem for a small engine and magnetization switching by spin torque”, *Physical Review Letters* **114**, 186601/1-5 (2015). doi:10.1103/PhysRevLett.114.186601 査読有

A. Oguri, and R. Sakano, “Exact Green's function for a multi-orbital Anderson impurity at high bias voltages”, *Physical Review B* **91**, 115429/1-14 (2015). doi:10.1103/PhysRevB.91.115429 査読有

S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, and K. Kobayashi, “Edge mixing dynamics in graphene p-n junctions in the quantum Hall regime”, *Nature Communications* **6**, 8066/1-6 (2015). doi:10.1038/ncomms9066 査読有

S. Matsuo, S. Nakaharai, K. Komatsu, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, and K. Kobayashi, “Parity effect of bipolar quantum Hall edge transport around graphene antidots”, *Scientific Reports* **5**, 11723/1-7 (2015). doi:10.1038/srep11723 査読有

T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, “Shot noise induced by nonequilibrium spin accumulation”, *Physical Review Letters* **114**, 016601/1-5 (2015). doi:10.1103/PhysRevLett.114.016601 査読有

[学会発表](計 467 件)

K. Kobayashi: “Non-equilibrium Fluctuations in Strongly Correlated Quantum Liquids”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics (Osaka City University, Japan, December 12-13, 2018) **[招待講演]**

K. Kobayashi: “Shot Noise Induced by Nonequilibrium Spin Accumulation”, Nanophysics, from Fundamentals to Applications: Reloaded (Quy Nhon, Vietnam, July 30 - August 5, 2017) **[招待講演]**

K. Kobayashi: “Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-correlated Quantum Dot”, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2017 (FQMT'17) (Prague, Czech Republic, July 9 - July 15, 2017) **[招待講演]**

K. Kobayashi: “Spin-dependent Current Fluctuations in Mesoscopic Conductors”, 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information

Technology (Spintech IX) (Fukuoka, Japan, June 4-8, 2017) **[招待講演]**
K. Kobayashi: "Current Fluctuations in Mesoscopic Systems", 45th International Conference on the Physics of Semiconductors, Jaszowiec 2016 Conference (Szczyrk, Poland, June 18-24, 2016) **[招待講演]**
K. Kobayashi, M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, and A. Oguri: "Non-equilibrium Fluctuations of Quantum Liquids in the Kondo Regime", China-Japan International Workshop on Quantum Technologies 2016 (QTech2016) (Beijing, China, May 13-14, 2016) **[招待講演]**

[その他]

新聞・メディア報道 (計 25 件)

マイナビニュース「阪大など、CNT の構造を利用して近藤状態の種類と量子ゆらぎの関係を解明」[2017 年 5 月 1 日] <http://news.mynavi.jp/news/2017/05/01/166/>
「不思議な量子液体の挙動 世界最高水準技術で解明 - 阪大などの研究グループが世界初 - 」科学新聞 (2015 年 12 月 11 日 1 面)

アウトリーチ活動 (計 21 件)

小林研介、「電子をあやつる 量子力学とエレクトロニクス」、大阪大学大学院理学研究科 公開講座 サイエンスナイト 2018 (大阪大学、2018 年 10 月 17 日)
小林研介、「ゆらぎは語る - 人工量子系における非平衡物理学」、第 56 回玉城嘉十郎教授記念公開学術講演会 (京都大学、2017 年 10 月 27 日)

ホームページ

大阪大学 小林グループ <http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小栗 章
ローマ字氏名：(OGURI, Akira)
所属研究機関名：大阪市立大学
部局名：大学院理学研究科
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：10204166

研究分担者氏名：江藤 幹雄
ローマ字氏名：(ETO, Mikio)
所属研究機関名：慶應義塾大学
部局名：理工学部 (矢上)
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：00221812

研究分担者氏名：内海 裕洋
ローマ字氏名：(UTSUMI, Yasuhiro)
所属研究機関名：三重大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：10415094

研究分担者氏名：加藤 岳生
ローマ字氏名：(KATO, Takeo)
所属研究機関名：東京大学
部局名：物性研究所
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：80332956

連携研究者氏名：阪野 隼
ローマ字氏名：(SAKANO, Rui)
所属研究機関名：東京大学
部局名：物性研究所
職名：助教
研究者番号 (8 桁)：00625022