

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01712

研究課題名（和文）量子渦動力学の可視化技術とナノ組織制御技術との融合

研究課題名（英文）Integration of visualization technology of quantum vortex dynamics and nanostructure control technology

研究代表者

松本 要（Matsumoto, Kaname）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10324659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：ゼロ抵抗超伝導電流の増大には量子渦糸のピン止めに最適なナノ組織を材料中に導入する必要がある。本研究では、超伝導材料中のナノ組織データを組織観察によって採取して計算機に取り込み、時間依存Ginzburg-Landau（TDGL）方程式に基づくピン止め数値シミュレーションを実行し、超伝導臨界電流密度を予測した。実測値との対応関係を詳細に調べた結果、高温超伝導薄膜のJcの実験結果をほぼ正確にシミュレートできることが今回初めて明らかになった。こうして、従来の試行錯誤的実験アプローチを超え、ナノ組織デザインによって超伝導材料開発を加速する新手法を創出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算材料科学の進展と、材料の微細構造解析における3Dデータ取得技術の発展は材料開発において新たな地平を開きつつある。超伝導材料分野では、超伝導の動的現象を記述するために見いだされたTDGL方程式の材料開発への応用が期待できる。TDGL方程式に含まれるパラメータは微視的理論と直接つながっており、現実のナノ組織に対してTDGLシミュレーションを実行することで多体問題をまるごと数値的に解いて現実に近いJcの予測ができる。新たな材料開発を加速する手法を生み出すことは、超伝導分野の理論や応用を刺激すると共に、他の構造材料・機能性材料への展開にも有効であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to increase the zero-resistance superconducting current, it is necessary to introduce the optimum nanostructure for pinning the quantum vortex thread into the material. In this study, nanostructure data in superconducting materials were collected by microstructure observation and incorporated into a computer, and a pinning numerical simulation based on the time-dependent Ginzburg-Landau (TDGL) equation was executed to predict the superconducting critical current density. As a result of investigating the correspondence with the measured values in detail, it became clear for the first time that the experimental results of Jc of the high-temperature superconducting thin film can be simulated almost accurately. In this way, we succeeded in creating a new method for accelerating the development of superconducting materials by nanostructure design, going beyond the conventional trial and error experimental approach.

研究分野：材料物理学

キーワード：超伝導 臨界電流 磁束ピンニング 薄膜 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

超伝導材料の開発は、Ginzburg-Landau (GL) 方程式に基づいた Abrikosov による量子渦糸の予言 (1957 年) によって急速に進歩した。初期の超伝導材料の代表は NbTi 合金や Nb₃Sn 化合物であり、その渦糸ピン止め力に支えられ、すでに医療診断用 MRI、超伝導リニア、素粒子加速器、実験用核融合装置などが実現している。その後も T_c の高い銅酸化物超伝導体や MgB₂、鉄系超伝導体とバリエーションが増え、各材料の J_c 特性の向上のためにナノ組織と渦糸とのピン止めに関する研究が世界中で盛んに行われている。しかしながらその手法は試料作製条件を少しずつ変えて測定を繰り返し、最適値を探す試行錯誤的なアプローチから抜け出せていないのが現状である。その理由としては、

- 1) 量子渦糸は巨視的波動関数とよばれる超伝導秩序パラメータ Ψ の量子流体からなるため観測手段が限られること
- 2) ナノ組織と強く相互作用する量子渦糸の直径は数 nm と大変小さいこと
- 3) ピン止め相互作用は材料内部で起こるためナノスケールのピン止め状態の直接的観察手段がないこと

等々により、渦糸ピン止め状態を鮮明に可視化しながらナノ組織を改良していくことが困難なことがあげられる。そのため、重要なピン止め素過程の部分をブラックボックスとしたまま試行錯誤的なアプローチに頼らざるを得ないのがこれまでの現状であった。

2. 研究の目的

本研究では、従来の超伝導材料開発において困難であった量子渦糸ピン止め相互作用の直接的な評価について、TDGL (Time Dependent Ginzburg-Landau) 数値シミュレーションを用いて打開策を切り開いていくことを目指す。GL 方程式および TDGL 方程式は長年の研究の中で超伝導を記述する信頼性の高いモデルとして認められているが、複雑な非線形方程式であるため大規模系において数値解を求めるには多くの計算パワーを必要としていた。しかし、近年の計算機の高速度・大容量化によって、ようやく議論に耐えうる大規模系のシミュレーションが射程に入ってきている。加えて、われわれは長年にわたって、超伝導薄膜中へ人工的なナノ組織を導入する人工ピン (Artificial Pinning Center) 法を開発してきた。効果的なナノ組織の 3D データ取得技術の開発や人工ピン法の開発も含めて、本研究では、① 実際に人工ピンを含む超伝導薄膜を種々作製してその微細組織と超伝導特性の関係を調べ、② 計算機内に、得られた微細組織を構築して大規模 TDGL シミュレーションを実行し、実験とシミュレーションの両面からブラックボックスとなっていた重要なピン止め素過程の部分を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

これまで開発してきた最新の超伝導薄膜のナノ組織と超伝導臨界電流密度 J_c 特性について詳細な研究を行った。本研究では、現在開発が進んでいる銅酸化物超伝導体、特に REBa₂Cu₃O_x (REBCO: RE=Y, Sm, Gd 等の希土類元素) 超伝導体に着目した。まず、そのエピタキシャル薄膜中で強い人工ピン止め点として作用するナノロッド状析出物 BaMO₃ (M=Zr, Hf, Sn 等) やナノ粒子状析出物 RE₂O₃ (RE=Y, Sm, Gd 等の希土類元素) を系統的に導入した薄膜試料をパルスレーザー堆積法によって作製した。ナノロッドは連続した直径数 nm の柱状の析出物が基板表面から薄膜表面に向けて垂直に高密度の状態でも成長したものである。独自開発してきた TDGL 計算コードを用いて、材料微細組織データを計算機に取り込み、ナノロッドやナノ粒子人工ピンを含んだ REBCO 超伝導薄膜に関する渦糸ピン止めシミュレーションを実行した。ナノ組織は薄膜中の物性値の局所的変化に伴う Ψ の変化を通じてピン止め力を与える。具体的には析出物や格子欠陥近傍で生じる T_c や電気伝導率等の局所的変化、あるいは有効質量の空間変化があげられる。ナノ組織に対応する部分に、TDGL 方程式における揺らぎとして物性パラメータの局所変化を与えて計算を実行した。このため、従来の理論解析では難しかった多体効果を丸ごと含んだシミュレーションが可能となっている。実測 J_c と比較することで、渦糸ピン止め理論との対応やシミュレーションがうまく機能しているか等々を詳細に検討した。

4. 研究成果

与えられた温度 T と磁場 B における REBCO 超伝導薄膜の臨界電流密度 J_c を最適化していくことは、高磁場コイル等の応用において大変重要である。そのためには導入された人工的な結晶欠陥がどのようにして量子化渦糸の運動をピン止めするかについて、より深く知ることが必要である。本研究では、この課題の解決のため REBCO 薄膜中に BaMO₃ ナノロッド人工ピンを導入した試料を種々作製し、 $T=4.2\text{K}$ 、 $B=0\sim 25\text{T}$ における J_c 特性に与える影響を詳しく調べた。この際、薄膜作成条件を調整して、ナノロッドのサイズと密度等を変化させた。また、ナノ粒子や酸素欠損などのランダムピン止め点の濃度を制御したものも作製した。得られた REBCO 試料からは、インプットパラメーターとして、BaMO₃ 人工ピンを含むナノ組織情報を TEM による

細組織観察によって取得した。これらの情報を元に大規模 TDGL 方程式による渦糸ピン止めシミュレーションを実施し、予測 J_c と実測 J_c との比較を行った (図 1)。実験結果によれば、試料の巨視的ピン止め力 F_p の ($=J_c \times B$) 最大値は、 $BaMO_3$ の濃度に依存して 0.5 から 1.6 TN/m^3 の範囲で変化した。 $BaMO_3$ の濃度が高い場合、 F_p 値は約 8 T でピークに達してプラトーを形成した。このプラトー領域は 25 T の高磁場領域まで続いた。 $BaMO_3$ ナノロッドの濃度が低い場合は、 F_p の最大値は半分程度に低下し、高磁場側に向けて漸増していった。一方、TDGLシミュレーションによれば、 $BaMO_3$ の濃度が高い場合、 F_p は 8 T 近傍で 1.6 TN/m^3 に達し、その後、 F_p 値は飽和して実験結果と同様にプラトー領域を形成した。また $BaMO_3$ 濃度を半分にすると F_p 値も半分程度に低下し、実験結果をほぼ正確に再現することに成功した (図 2)。大規模 TDGL シミュレーションは J_c の予測パワーを秘めていることが期待されていたが、REBCO 超伝導薄膜の J_c の実験結果をほぼ正確にシミュレートできることが今回初めて明らかになった。シミュレーションでは付加的なランダムピンの効果も取り込むことが可能であり、この手法を用いることで、与えられた温度と磁場の条件下において、 J_c を最大化する最適な人工ピン構造を今後明らかにしていくことが期待される (図 3)。

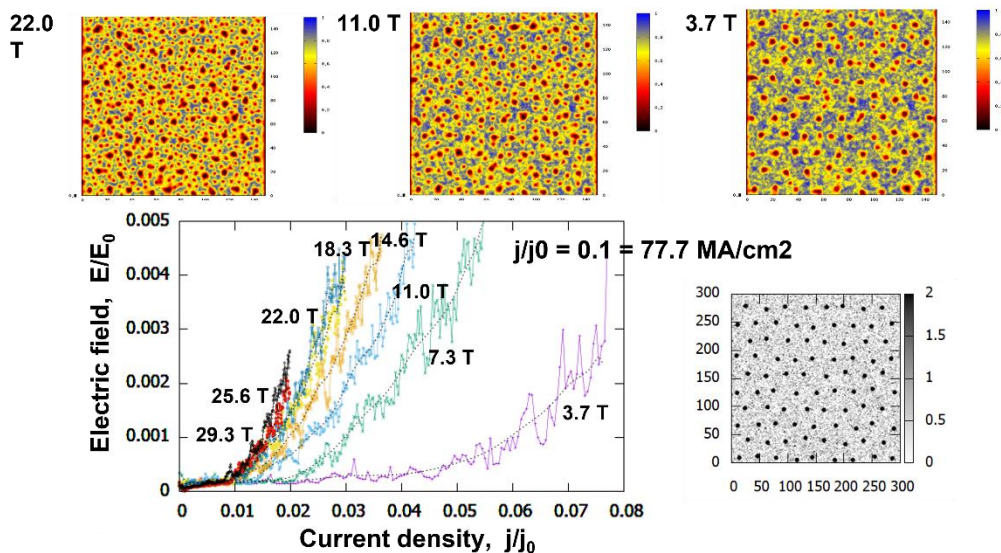


図 1 実測 J_c との比較のために開発した大規模 TDGL シミュレーション結果の例

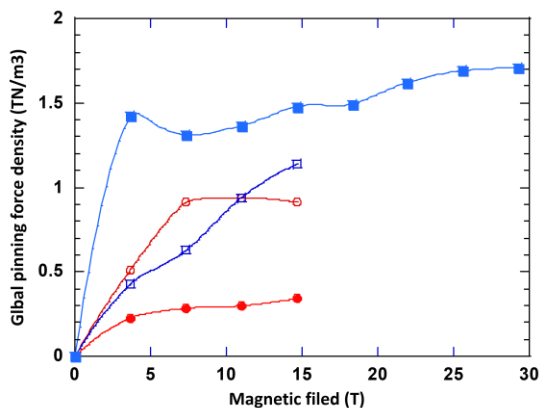


図 2 大規模 TDGL シミュレーションによる F_p 特性の計算結果は実験結果を精度良く再現できる

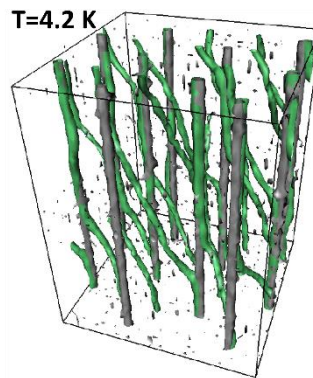


図 3 実際の欠陥を含む微細組織を反映した 3 次元 TDGL モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Horide, T., Torigoe, K., Kita, R., Awaji, S., Matsumoto, K.	4. 巻 60
2. 論文標題 Overcoming optimization constraint for Jc by hybrid pinning in YBa2Cu3O7 films containing nanorods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 23001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abdc32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horide, T., Ishimaru, M., Sato, K., Matsumoto, K.	4. 巻 33
2. 論文標題 Combined effect of nanorod and stacking fault for improving nanorod interface in YBa2Cu3O7-nanocomposite films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 abaebf
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abaebf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horide, T., Torigoe, K., Ishimaru, M., Kita, R., Awaji, S., & Matsumoto, K	4. 巻 33
2. 論文標題 Simultaneous achievement of high Jc and suppressed Jc anisotropy by hybrid pinning in YBa2Cu3O7 three-phase-nanocomposite film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aba544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hagan, T.J., Puig, T., Matsumoto, K., Wu, J.	4. 巻 33
2. 論文標題 Artificial pinning centers in (Y, RE)-Ba-Cu-O superconductors: Recent progress and future perspective	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab4ccd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Horide, T., Torigoe, K., Kita, R., Nakamura, R., Ishimaru, M., Awaji, S., Matsumoto, K	4. 巻 44
2. 論文標題 Deposition-temperature dependence of vortex pinning property in YBa2Cu3O7+BaHfO3 films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 449-454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019303	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 Jha, Alok K., and Kaname Matsumoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Control of Vortex Pinning in YBCO Thin Films by Incorporating APCs Through Surface Modified Target Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductivity. Springer, Cham	6. 最初と最後の頁 53-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-23303-7_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horide, T., Torigoe, K., Kita, R., Awaji, S., Matsumoto, K.	4. 巻 60
2. 論文標題 Overcoming optimization constraint for Jc by hybrid pinning in YBa2Cu3O7 films containing nanorods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 023001-023006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abdc32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horide, T., Ishimaru, M., Sato, K., Matsumoto, K.	4. 巻 33
2. 論文標題 Combined effect of nanorod and stacking fault for improving nanorod interface in YBa2Cu3O7-nanocomposite films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115001-115011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abaebf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haugan, T.J., Puig, T., Matsumoto, K., Wu, J.	4. 巻 33
2. 論文標題 Artificial pinning centers in (Y, RE)-Ba-Cu-O superconductors: Recent progress and future perspective	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 040301-040306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab4ccd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Horide, T., Torigoe, K., Kita, R., Awaji, S., Matsumoto, K.	4. 巻 44
2. 論文標題 Deposition-temperature dependence of vortex pinning property in YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} /BaHfO ₃ films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 449-454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019303	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 Jha, Alok K., and Kaname Matsumoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Control of Vortex Pinning in YBCO Thin Films by Incorporating APCs Through Surface Modified Target Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductivity. Springer, Cham	6. 最初と最後の頁 53-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-23303-7_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Horide, S. Nagao, R. Izutsu, M. Ishimaru, R. Kita, K. Matsumoto	4. 巻 31
2. 論文標題 Geometric and compositional factors on critical current density in YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} films containing nanorods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. and Technol.	6. 最初と最後の頁 065012(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aabe68	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Deguchi, A. Harada, T. Yamada, M. Mito, T. Horide, K. Matsumoto	4. 巻 1054
2. 論文標題 Paramagnetic and Glass States of a YBCO Film Containing Nanorods at Low Magnetic Fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012026(5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Miura, Y. Tsuchiya, Y. Yoshida, Y. Ichino, S. Awaji, A. Ichinose, K. Matsumoto, A. Ibi, T. Izumi, M. Iwakuma	4. 巻 28
2. 論文標題 Improved Flux Pinning for High-Field Applications in BaHfO ₃ -Doped SmBa ₂ Cu ₃ O _y -Coated Conductors With High Density of Random Pinning Centers Induced by BaHfO ₃ Nanorods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2018.2804667	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Kaname Matsumoto
2. 発表標題 Optimizing critical currents of APC-doped REBCO coated conductors in the Ginzburg-Landau formalism
3. 学会等名 ASC 2020 Virtual Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 要, 堀出朋哉
2. 発表標題 ギンツブルグ・ランダウ方程式によるAPCドープレBCO線材の臨界電流の最適化
3. 学会等名 2021年応物春季学術講演会 オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 要
2. 発表標題 ナノ組織制御による 高臨界電流超伝導材料の開発
3. 学会等名 2020年度 日本鉄鋼協会 日本金属学会 九州支部 湯川記念講演(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaname Matsumoto
2. 発表標題 Optimizing critical currents of APC-doped REBCO coated conductors in the Ginzburg-Landau formalism
3. 学会等名 ASC 2020 Virtual Conference(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 要, 堀出朋哉
2. 発表標題 ギンツブルグ・ランダウ方程式によるAPCドープレBCO線材の臨界電流の最適化
3. 学会等名 2021年応物春季学術講演会 オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 要
2. 発表標題 ナノ組織制御による 高臨界電流超伝導材料の開発
3. 学会等名 2020年度 日本鉄鋼協会 日本金属学会 九州支部 湯川記念講演(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Matsumoto, T. Horide, A. K. Jha
2. 発表標題 Microstructure Control of REBCO Thin Film for Magnetic Flux Pinning
3. 学会等名 Shanghai High-Temperature Superconductor Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Matsumoto
2. 発表標題 Flux pinning of REBCO coated conductors with segmented BHO nanorods
3. 学会等名 Coated Conductors for Applications 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 要
2. 発表標題 ピンニングメカニズムから実際のピンデザインに関するレビュー
3. 学会等名 低温工学超電導学会・第4回材料研究会九州・西日本支部合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Matsumoto, Tomoya Horide, Alok Jha, Yutaka Yoshida, Yusuke Ichino, Yuji Tsuchiya, Satoshi Awaji, Ataru Ichinose
2. 発表標題 Cost Reduction of REBCO Coated Conductor by Artificial Pinning Centers and Its Performance
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Yoshida, Shuya Tajiri, Yusuke Ichino, Yuji Tsuchiya, Tomohiro Ito, Ataru Ichinose, Kaname Matsumoto, Satoshi Awaji, Teruo Izumi
2. 発表標題 Fabrication of REBCO coated conductor doped with BaHfO3 nanorod as artificial pinning center using liquid-phase in the PVD growth
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	堀出 朋哉 (Horide Tomoya) (70638858)	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授 (17104)	

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
---------	---------