

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22103005

研究課題名（和文）トポロジカル凝縮系の理論

研究課題名（英文）Theory of topological condensed matter system

研究代表者

田仲 由喜夫（Tanaka, Yukio）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40212039

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 71,600,000 円

研究成果の概要（和文）：固体の超伝導、超流動ヘリウム3、冷却原子気体を横断的に研究してトポロジカル量子現象の理論構築に貢献した。既存の異方的超伝導が、対称性によって保護されたトポロジーによって理解されることが明らかになった。その結果、超流動<sup>3</sup>Heの磁場下相転移のような新奇な相転移の存在も明らかになった。さらに $Cu_xBi_2Se_3$ や $InSnTe$ のような新物質のトポロジカル超伝導も明らかにより、トポロジー概念を用いることで超伝導・超流動を俯瞰し、新奇な系をデザインできるような段階に到達した。また奇周波数クーパー対とマヨラナ型準粒子励起との関係も明確になり、エッジ状態としての局在したクーパーペアの性質の理解が深化した。

研究成果の概要（英文）：We have studied superconductivity, superfluid Helium 3 and cold atom from the view point of topological quantum phenomena. We have clarified the topological origin of surface Andreev bound state in unconventional superconductor and obtained the topological invariant in high  $T_c$  cuprate hosting flat band zero energy state. New type of twisted Andreev bound state has been predicted in doped topological insulator  $Cu_xBi_2Se_3$  or doped topological crystal insulator  $InSnTe$ . In these materials, remaining surface state with strong spin momentum locking seriously influences on the surface state. It is also clarified that Majorana fermion always accompany odd-frequency pairing. Also, we have clarified new type of topological excitation in cold atom system. Overlooking our obtained various results in superconductivity, topological insulator, cold atom and superfluid helium, we can design new exotic system hosting topological edge state based on the concept of topology in condensed matter system.

研究分野：凝縮系物理理論

キーワード：トポロジカル量子現象 トポロジカル超伝導 冷却原子気体 奇周波数クーパー対 トポロジカル絶縁体 超流動ヘリウム3

## 1. 研究開始当初の背景

空間反転対称性(もしくは並進対称性)の破れによって、超伝導・超流動体には界面・表面・磁束芯・欠陥近傍だけに局在する束縛状態(アンドレーエフ束縛状態)が発現する。特にアンドレーエフ束縛状態は異方的超伝導体においては、零エネルギーに現れて、輸送現象に顕著な影響を与えることが明らかになってきた。時間反転対称性のカイラル超伝導体ではアンドレーエフ束縛状態は分散のあるエッジ状態となり、マヨラナ型準粒子励起として認識され、量子ホール系におけるエッジ状態とのアナロジーも指摘されている。さらに空間反転対称性の破れた超伝導体(NCS 超伝導体)においては、アンドレーエフ束縛状態は、ヘリカルエッジ状態として現れる。ヘリカルマヨラナ型準粒子励起は、量子スピンホール系(2次元トポロジカル絶縁体)におけるヘリカルエッジ状態の超伝導・超流動版である。田仲(代表者)は、異方的超伝導体のエネルギーギャップ関数の符号変化を決定づけるアンドレーエフ束縛状態の形成を世界に先駆けて確立して、異方的超伝導のトンネル効果、ジョセフソン効果の理論を構築した(Rep. Prog. Phys. 63, 1641, 2000)。また常伝導金属と異方的超伝導体の接合の近接効果を研究して、スピン三重項奇パリティ超伝導体(p波)超伝導体接合においては、常伝導金属中にゼロエネルギーピークを持つ状態密度が現れる特異な近接効果が存在することを解明し(Phys. Rev. B 70, 012507, 2004)異常な近接効果の原因が、常伝導金属内に浸入する奇周波数電子対であることを理論的に明確にした(Phys. Rev. Lett. 98, 037003, 2007)。冷却原子の分野では、上田(分担者)は、結び目やカイラル対称性が破れたスピン渦などのトポロジカル励起、d波のボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)の崩壊など、世界の実験動向をも先導する予言を数多く行い、我が国の実験グループの育成にも貢献した。2010年当時トポロジカル絶縁体などの新物質が発見されトポロジカル量子現象を対称性の破れの観点から凝縮系全体に対して分野横断的に研究する必要が緊急の課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本計画研究「トポロジカル凝縮系の理論」の目的は、非自明なエッジ・表面状態を持つ、超伝導・超流動系、ボーズ・アインシュタイン凝縮体、トポロジカル絶縁体の研究を通じて、これらの異なった物理系に共通した普遍的な物理を探求し、トポロジカル量子現象に関する凝

縮系物理学の新概念の構築を目指す事である。対象とする主な系と研究の狙いは以下のとおりである。

- (1) 時間反転(空間反転)対称性の破れた超伝導体のエッジ状態と量子現象の解明
- (2) トポロジカル絶縁体やトポロジカル接合系における新奇現象の探求
- (3) 内部(スピン)自由度を持ったボーズ・アインシュタイン凝縮体におけるトポロジカル励起、および、結び目や非可換量子渦のダイナミクスとその物性の研究
- (4) 超流動における非自明な量子渦、マヨラナ型準粒子励起の研究
- (5) トポロジカル量子現象に内在する普遍的概念、数理構造の解明

## 3. 研究の方法

- (1) 時間反転対称性の破れた超伝導体のエッジ状態と量子現象の解明(田仲、A01班と連携)  
スピン3重項カイラル超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のエッジ状態を解明して新奇な量子効果を明らかにする。奇周波数電子対の近接効果を解明して、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  接合、磁性半導体接合における実験を解析する。
- (2) 空間反転対称性の破れた超伝導体(NCS超伝導体)量子現象の解明(田仲、佐藤、C01班と連携)  
電界制御界面超伝導の特性の解明、NCS超伝導体のエッジ状態と輸送現象の解明を目指す。
- (3) トポロジカル絶縁体の新奇現象の解明(田仲、佐藤、小口、井村、C01班と連携)  
トポロジカル絶縁体の輸送現象及び、トポロジカル絶縁体・超伝導接合におけるマヨラナ型準粒子励起と新奇な量子効果、電磁効果の解明を電子構造に基づいて目指す。
- (4) 内部(スピン)自由度を持ったボーズ・アインシュタイン凝縮体の理論(上田、川口、B01班と連携)  
トポロジカル励起の解明、結び目や非可換量子渦のダイナミクスやその物性の解明を行う。  
秩序パラメーター多様体を、群論的に分類し、各多様体上でどのような線欠陥(量子渦)、点欠陥(モノポール)、スカーミオンが存在するかを、ホモトピー理論を用いて解明する。
- (5) 超流動における非自明な量子渦、準粒子励起(水島、B01班と連携)  
超流動 $^3\text{He}$ における特異な量子渦、マヨラナ型準粒子励起を解明する。
- (6) トポロジカル量子現象に内在する普遍的概

念、数理構造の研究 (佐藤、押川、田仲)

アンドレーエフ束縛状態、奇周波数電子対、マヨラナ型準粒子励起などのエッジ状態に共通の数理構造を系の持つ対称性の観点から解明する。

#### 4. 研究成果

5年間の主な成果は以下の通りである。

##### (1) フラットバンドアンドレーエフ束縛状態 (佐藤、田仲)

銅酸化物超伝導体や反転対称性の破れた超伝導体で現れる零エネルギーフラットバンドアンドレーエフ束縛状態がトポロジカル不変量と結びつくエッジ状態であることを明らかにした。

##### (2) トポロジカル結晶超伝導体 (佐藤、田仲)

エネルギーギャップ関数のミラー変換に対する変換性によって、得られるギャップレス状態がマヨラナフェルミオンになるか、ディラックフェルミオンになるかを識別し、この理論を  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に応用して、トポロジカル量子転移を明らかにした。

##### (3) トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類理論 (佐藤)

佐藤らは、結晶対称性によって守られたトポロジカル相であるトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の研究を進め、鏡映対称性、2回回転対称性、空間反転対称性など2回の操作で元に戻る位数2の結晶対称性によって守られたトポロジカル相の分類を完全に与えることに成功した。

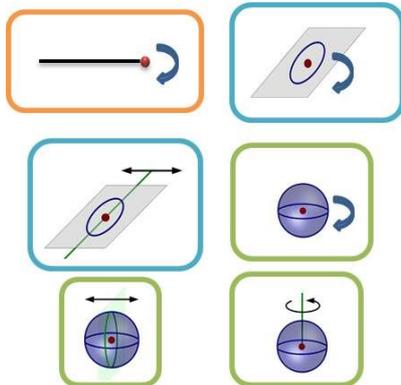


図1: 位数2の結晶対称性をもつトポロジカル物質の分類 [ ]

##### (4) ドープしたトポロジカル絶縁体のアンドレーエフ束縛状態 (田仲、佐藤、水島、C01 班との連携)

田仲・佐藤、水島は瀬川(C01 班)・安藤(C01 班連携)らの協力のもと、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  がエッジ状態をもつトポロジカル超伝導体であることを明らかにした。表面マヨラナフェルミオンのエネルギー分散関係が、トポロジカル絶縁体由来のエッジ状態、フェルミ面の形状により構造変化を起こし、トンネルコンダクタンスの STM の実験を系統的に説明することを明らかにした。

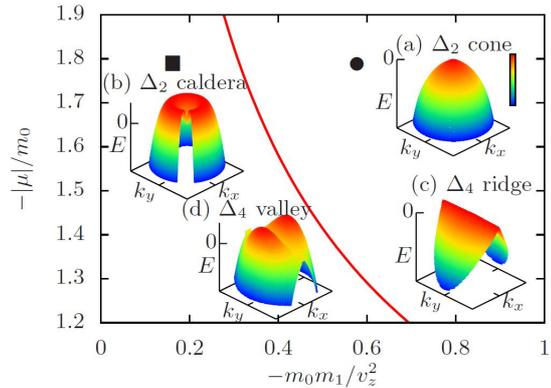


図2: 超伝導トポロジカル絶縁体における新奇なアンドレーエフ束縛状態 [ ]

##### (5) 超流動ヘリウム3のトポロジカル量子相転移 (水島・佐藤)

水島・佐藤は、 $^3\text{He-B}$  相に磁場が存在するときにおいても、その方向によっては「対称性によって守られたトポロジカル相」が存在することを明らかにした。また、対称性の自発的破れとトポロジカル相転移が同時に起こる臨界磁場の存在を定量的に示した。

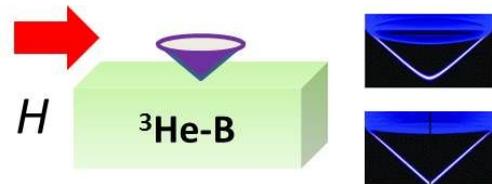


図3:  $^3\text{He-B}$  相表面アンドレーエフ束縛状態の磁場制御による量子相転移

##### (6) 奇周波数クーバーペアとトポロジカル超伝導 (田仲、A01 班との連携)

田仲、浅野(A01 班)は、従来型s波超伝導体の上に載せたナノワイヤーのエッジにおいて、マヨラナ型準粒子励起が存在するときには必ず奇周波数クーバー対が存在することを明らかにした。その結果、期待される異常な近接効果は、スピン3重項p波超伝導体接合で10年前から知られているスピン3重項超伝導体固有の異常近接効果に他ならないことを明確にした。

## (7) スピノール BEC とトポロジー (上田)

上田 川口は、BEC の基底状態、定常状態をマヨラナ表示と対称性を用いることで系統的に求めた。この方法によりスピン3の BEC に新量子状態が存在することが明らかになった。複数のトポロジカル励起が共存した場合の分類も行われた。

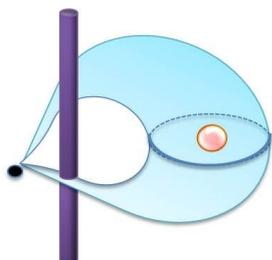


図4：量子渦と点欠陥が共存した場合の分類 [ ]

奇周波数超伝導とアンドレーエフ束縛状態、トポロジカル超伝導については 2012 年に総説記事として田仲、佐藤、永長により J. Phys. Soc. Jpn.より発表された[ ]。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 130 件) (査読あり)

- ”Axial current driven by magnetization dynamics in Dirac semimetals”,  
K. Tguchi and Y. Tanaka,  
Phys. Rev. B, Vol.91, 054422\_1-5, 2015,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.054422>.
- ”Crossed surface flat bands of Weyl semimetal superconductors”,  
Bo Lu, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka,  
Phys. Rev. Lett., Vol. 114, 096804\_1-4, 2015,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.096804>.
- ”Microscopic theory of tunneling spectroscopy in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”,  
K. Yada, Y. Tanaka, A.A. Golubov and S. Kashiwaya,  
J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 83, No. 7, 074706\_1-8, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.074706>.
- ”Dirac-fermion-induced parity mixing in superconducting topological insulators”,  
T. Mizushima, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka,  
Phys. Rev. B, Vol. 90, 184516\_1-11, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.184516>.
- ”Quasi-classical theory of tunneling spectroscopy in superconducting

- topological insulator”,  
S. Takami, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka,  
J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 83, No. 6, 064705\_1-10, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.064705>.
- ”Topological phase transition in a topological crystalline insulator induced by finite-size effects”,  
H. Ozawa, A. Yamakage, M. Sato, and Y. Tanaka,  
Phys. Rev. B, Vol. 90, 045309\_1-17, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.045309>.
- ”Topological Blount’s theorem of odd-parity superconductors”,  
S. Kobayashi, K. Shiozaki, Y. Tanaka and M. Sato,  
Phys. Rev. B, Vol. 90, 024516\_1-11, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.024516>.
- ”Consequences of bulk odd-frequency superconducting states for the classification of Cooper pairs”,  
Y. Asano, Y. V. Fominov, and Y. Tanaka,  
Phys. Rev. B, Vol. 90, 094512\_1-12, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.094512>.
- ”Topology of crystalline insulators and superconductors”,  
K. Shiozaki and M. Sato,  
Phys. Rev. B 90, 165114, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.165114>.
- ”Global phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields”,  
S. Furukawa and M. Ueda,  
Phys. Rev. A Vol. 90, 033602, 2014,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.033602>.
- ”Symmetry-Protected Majorana Fermions in Topological Crystalline Superconductors: Theory and Application to  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”,  
Y. Ueno, A. Yamakage, Y. Tanaka and M. Sato, Phys. Rev. Lett., Vol. 111, 087002\_1-6, 2013,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.087002>.
- ”Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates”,  
N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda,  
Phys. Rev. A 88, 043629, 2013,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.88.043629>.
- ” $\text{UPt}_3$  as a Topological Crystalline Superconductor”,  
Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida,  
J. Phys. Soc. Jpn. 82, 113707\_1-5, 2013,

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.113707>  
 ”Theory of tunneling conductance and surface-state transition in superconducting topological insulators”,  
 A. Yamakage, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka,  
 Phys. Rev. B **85**, 180509\_1-5, 2012,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.180509>  
9.  
 ”Evolution of Edge States and Critical Phenomena in the Rashba Superconductor with Magnetization”,  
 A. Yamakage, Y. Tanaka, and N. Nagaosa,  
 Phys. Rev. Lett. **108**, 087003\_1-5, 2012,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.087003>  
003  
 ”Symmetry and Topology in Superconductors –Odd-Frequency Pairing and Edge States”,  
Y. Tanaka, M. Sato, N. Nagaosa,  
 J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011013\_1-34, 2012,  
<http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.011013>  
 ”Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates”,  
Y. Kawaguchi, M. Ueda,  
 Physical Review A **84**, 053616-1-19, 2011,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.84.053616>  
6.  
 ”Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices”,  
 S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi,  
 M. Nitta, M. Ueda,  
 Nucl. Phys. B **856**, 577-606, 2011,  
[doi:10.1016/j.nuclphysb.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2011.11.003)  
 ”Topology of Andreev bound states with flat dispersion”,  
M. Sato, Y. Tanaka, K. Yada, T. Yokoyama,  
 Phys. Rev. B **83**, 224511-1-22, 2011,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.224511>  
 ”Surface density of states and topological edge states in noncentrosymmetric superconductors”,  
 K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, T. Yokoyama,  
 Phys. Rev. B **83**, 064505-1-9, 2011,  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.064505>  
5.

[学会発表] (計 97 件)

M. Ueda,  
 “Physical Origin of the Universality of the Three-Body Parameter in ultra cold atom“ Conference on Non-equilibrium Phenomena in Condensed Matter and String Theory (June 30-July 4, 2014), Trieste (Italy)  
 M. Ueda,  
 “Topological Excitations of Bose-Einstein Condensates“,  
 IAS/School of Science Joint Lecture, Hong Kong University of Science and Technology (September 18, 2014), Hong Kong  
 T. Mizushima,

“Confinement effect on Anderson-Higgs modes in superfluid  $^3\text{He-B}$ “  
 ULT2014-Frontiers of Low Temperature Physics ( August 14-19, 2014), San Carlos de Bariloche (Argentina)  
 T. Mizushima,  
 “Dirac-Fermion Induced Parity Mixing in Superconducting Topological Insulators“  
 Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated System (October 9-11, 2014), Chinese Academy of Science, Beijing (China)  
 M. Sato,  
 “Superconducting states in doped topological materials”,  
 27th International Symposium on Superconductivity (ISS2014) (November 26, 2014), Tower Hall Funabori (東京都)  
 Y. Tanaka,  
 “ Exotic Andreev bound states in topological superconductors”, International workshop SHYNED 2014, Physics and application of superconducting hybrid nano-engineered devices (August 31-September 4, 2014), Santa Maria di Castellabate (Italy)  
 Y. Tanaka,  
 “Exotic Andreev bound states in topological superconductors”,  
 Novel Quantum states in condensed matter 2014 (November 4-28, 2014), Yukawa Institute (京都府・京都市)  
 Y. Tanaka,  
 “Theory of superconducting topological insulator”,  
 The royal Society, Theo Murphy International Scientific meeting (March 27-28, 2014), Chicheley Hall, Chicheley (England)  
 T. Mizushima,  
 “Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors“, RIKEN-APW Joint Workshop “Highlights in Condensed Matter Physics” (January 23-25, 2014), Okochi Hall, RIKEN (埼玉県・和光市)  
 M. Sato,  
 “Majorana fermions in spinful crystalline superconductors”,  
 IAS Program on Topological Matter, Superconductivity and Majorana (January 6-30, HKUST, 2014 (invited)), Hong-Kong  
 Y. Tanaka,  
 “Theory of superconducting topological insulator”,  
 7th ISSP International Symposium EQPCM 2013, Emergent Quantum Phases in Condensed Matter –from topological to first principles approaches (June 12-14, 2013), University of Tokyo (東京都)  
 Y. Tanaka,  
 “Odd-frequency pairing and Majorana fermion in Nanowire proximity systems”  
 Quantum Science Symposium ASIA -2013

on Quantum Information on Communications, Graphenes, Quantum Systems to Spintronics, semiconductors (November 25-26, 2013), University of Tokyo, Sanjo Conference Hall, (東京都)

佐藤昌利,

“対称性によって守られたトポロジカル相に関する最近の話題”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 日(招待講演), 徳島大学(徳島・県徳島市)

M. Ueda,

“Topological Aspects in Ultracold Atoms“  
Aspen Center for Physics 2012 Winter Conferences: Condensed Matter Physics (January 8-14, 2012), Aspen (USA)

M. Ueda,

“Topological Aspects in Ultracold Atoms“  
34th International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT34)( November 7-11, 2011), Pohang (Korea)

M. Sato,

”Non-Abelian topological orders in superconducting states”

Topological Insulators and Superconductors (September 19-December 16, 2011), Santa Barbara (USA)

M. Ueda,

“Topological aspects in ultracold atoms“  
Annual Meeting of UK Cold-atom/ Condensed Matter Network (September 5-7, 2011), Nottingham (UK)

T. Mizushima, T. Kawakami, Y. Tsutsumi, M. Ichioka, K. Machida,

“Majorana Fermions Bound at Vortices and Surface of Superfluid  $^3\text{He}$ “

The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (August 10-17, 2011), Beijing (China)

M. Ueda,

“Topological aspects of spinor Bose gases“  
Quantum Magnetism in Ultracold Atoms (May 15-19, 2011), Haifa (Israel)

Y. Tanaka

“Interplay between superconductivity and ferromagnetism on a topological insulator”  
Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic phenomena

(September 5-11, 2010), Paestum (Italy)

[その他]

ホームページ

新学術領域研究「トポロジカル量子」ホームページ

日本語版 <http://www.topological-qp.jp/>

英語版

<http://www.topological-qp.jp/english/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田仲 由喜夫 (TANAKA, Yukio)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号:40212039

### (2) 研究分担者

佐藤 昌利 (SATO, Masatoshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号:30313117

上田 正仁 (UEDA, Masahito)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号:70271070

水島 健 (MIZUSHIMA, Takeshi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号:50379707

### (3) 連携研究者

川上 則雄 (KAWAKAMI, Norio)

[平成 25-26]

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号:10169683

押川 正毅 (OSHIKAWA, Masaki)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号:50262043

小口 多美夫 (OGUCHI, Tamio)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号:90253054

川口 由紀 (KAWAGUCHI, Yuki)

東京大学・工学系研究科・講師

研究者番号:00456261

井村 健一郎 (IMURA, Kenichiro)

[平成 25-26]

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号:90391870