

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287084

研究課題名(和文) 超伝導渦系における極低温新秩序相と動的相転移

研究課題名(英文) Novel ordered phases at low temperatures and dynamic phase transitions in the superconducting vortex system

研究代表者

大熊 哲 (Okuma, Satoshi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50194105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：高速の渦系格子フローを従来より3桁以上低パワーで検出できるパルス・モードロック共鳴測定系を構築し、0.05 Kの極低温下で適用することにより、ピン止めゼロの極限における渦系格子の動的量子融解転移の観測に成功した。これにより絶対零度における磁場に対する静的渦系相図、すなわち磁場誘起量子相転移の相図を、ピン止めがない理想的な場合とある場合について初めて同時に決定した。一方、動的融解とは独立な動的相転移である可逆-不可逆転移の研究も進め、転移点前後での渦系配置に関する情報を得ると共に、微視的な交流せん断力のみが存在する並進系で初めて相転移の臨界現象を観測するなど、新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed a measurement system for a mode-locking resonance with pulsed currents that generate much less heat (by three orders of magnitude) than the previous one, which enables to detect the flow of fast driven vortex lattices. By employing it at low temperatures down to 0.05 K, we successfully observe the dynamic quantum melting of driven lattice in the limit of zero pinning. Thus, we complete static vortex phase diagrams at nearly zero temperature as a function of applied field, namely, the phase diagrams of the field-induced quantum phase transition simultaneously in the absence and presence of pinning. Also, we have performed studies on the reversible-to-irreversible flow transition (RIT) and obtained the following new results: We acquire information on the vortex configuration in the vicinity of RIT. Also, we observe the critical behavior of RIT in the translational motion system where only the local ac shear due to strong random pinning is present.

研究分野：数物系科学

キーワード：超伝導 渦系 量子相転移 非平衡ダイナミクス 動的相転移 超伝導絶縁体転移

## 1. 研究開始当初の背景

(1) [テーマ ] 乱れた 2 次元超伝導体の磁場誘起による超伝導-絶縁体転移点直上には、絶対零度でクーパー対が局在したボースグラス相と呼ばれる新奇絶縁体相[1]が存在し、ここでは渦糸固体が量子融解あるいはボース凝縮した量子渦糸液体 (QVL) 状態[2]が実現していることが理論的、実験的に提案されている。しかし、渦糸状態の観点からの実験検証はまだなく、その確証は得られていない。さらに近年、超絶縁体相[3]と呼ばれる新規絶縁体状態の存在が提案され、そこでも凝縮した渦糸の存在が指摘されている。これらの新奇絶縁体相の実験検証は固体物理学の重要テーマと考えられるが、2 次元超伝導体で期待されるこれらの現象は、絶対零度近傍でのみ現れると予想されているため、実験検証は容易ではない。これに対し 3 次元系では、超伝導転移温度直下の高温域から渦糸固体-液体転移が観測されるため、温度-磁場相図上で、熱ゆらぎによる融解から量子ゆらぎによる融解への変化を追っていくことが可能[1]である。このため、2 次元系と比べると実験がし易い。

これらの現象を研究する上では、ピン止めのない理想的な極限での渦糸格子の融解転移を調べ、ピン止めが相転移に及ぼす効果を明らかにすること、そして量子ゆらぎを支配する電子系の乱れとピン止めを決める渦糸系に対する乱れを区別することが重要である。一方、現実の試料には必ず欠陥等に由来するピン止め中心が存在し、さらに極低温域ではピン止め効果が強く効くため、通常的手法では、ピン止めの影響のない真の渦糸格子の融解転移を観測することは困難である[4]。

(2) [テーマ ] 上記テーマ では後述する動的融解という動的相転移を扱うが、これとは独立に、交流駆動されたコロイド粒子系において、可逆-不可逆転移と呼ばれる新しい動的相転移の存在が報告されている[5]。これは半径に依存するせん断力をコロイド粒子系に印加し、粒子を円周上で往復周期駆動させたときに見られる現象で、十分なサイクル経過後の定常状態において、駆動振幅  $d$  がある臨界値  $d_c$  以下 ( $/$ 以上) だと各サイクル後に粒子は元の位置に戻る ( $/$ 戻らない) こと、さらに定常状態へ至る緩和時間が存在し、それがこの臨界値  $d_c$  で発散するという2つの実験事実に基づく。可逆領域で見られる緩和現象は、粒子が次の衝突を避ける配置に自己組織化するランダム組織化の考えにより説明されている。我々は超伝導渦糸系を粒子とみなすことにより可逆-不可逆転移の普遍性を検証する実験を進め、その存在を示した[6]。

ところで理論的には、不可逆性の始まりを格子中に発生した格子欠陥の運動によって説明することもできる[7]。これは固体の塑性変形 (plastic flow) や破壊現象 (tearing) の

解明にも繋がる古くからの重要テーマである。渦糸系ではコロイド系に比べ制御可能なパラメタが多く、さらに格子性を実験的に制御できるため、可逆-不可逆転移が格子欠陥に起因する格子系に特有の現象か、それとも相互作用する多粒子系に共通に見られるより普遍性の高い現象かを調べることもできる。この研究成果はテーマ の渦糸格子の量子融解の理解にも生かされる。

## 2. 研究の目的

本研究は超伝導渦糸系を用いることにより、2 次元超伝導-絶縁体転移を含む、磁場誘起による渦糸固体相から液体相への量子相転移現象の解明、および渦糸系を粒子系とみなしたときの、新奇な非平衡ダイナミクスと動的相転移の探究を目的とする。

[テーマ ] 3 次元系の渦糸相図を全温度磁場域で決定する。特にピン止めの影響のない、絶対零度極限における真の渦糸格子の量子融解現象の観測を行う。さらに膜厚を薄くすることにより、3次元から2次元系への渦糸相図の変化を調べる。これにより2次元系で提案されている新奇絶縁体相の存否を明らかにしていく。

[テーマ ] 渦糸系を相互作用する多粒子系とみなすことにより、可逆-不可逆転移に代表される運動に起因する新しい動的相転移や新奇な非平衡ダイナミクスを探究する。この研究を通し、動的相転移の普遍性の探究、および渦糸格子の融解や塑性変形を、格子欠陥のダイナミクスの観点から理解できるかどうかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) [テーマ ] ピン止めの影響のない渦糸固体の融解磁場を求めめるため、高速駆動させ基板のピン止めポテンシャルからデカップルさせた渦糸格子の融解点を測定する。このため、高速駆動する渦糸の格子性を検出できるモードロック共鳴測定を実施する。本研究では絶対零度近傍での測定を可能とするため、発熱の影響を従来より大きく抑えられるパルスモードロック測定系を新たに構築し、希釈冷凍機内に導入する。試料は、強い量子ゆらぎと弱いピン止め中心をもつアモルファスの  $(a-)Mo_xGe_{1-x}$  3 次元膜 (膜厚 300 nm) および 2 次元超薄膜 (膜厚 5nm) を作製する。

(2) [テーマ ] 磁場や駆動速度、駆動方法を変化させ、異なる渦糸状態、すなわち異なる格子性、基板の実効的ランダムポテンシャルを準備し、可逆-不可逆転移の有無やこれらが臨界現象に及ぼす影響を調べる。この研究を通し、可逆-不可逆転移の普遍性や、格子欠陥がフローする渦糸格子の不可逆性や塑性変形・融解現象に果たす役割を明らかにする。得られる知見は、テーマ の渦糸格子の量子融解の理解にも生かされる。

#### 4. 研究成果

(1) 極低温におけるモードロック共鳴法とパルス法を基礎とした輸送現象測定系の構築、およびピン止めの弱い  $a\text{-Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$  の 3 次元膜試料の作製を完了した。これらの測定手法と試料を用い、まず、( )速度増大による渦糸格子方位の回転[8]、およびさらに高速域における格子フローの不安定化の観測に成功した。これらの現象は共に速度増大によって起こる動的相転移の一種であり、渦糸芯に存在する準粒子の有限な緩和時間-準粒子寿命-が重要な役割を果たしている。特に格子の不安定化の起こる特徴的電圧値は、低磁場と高磁場域ではその磁場依存性が大きく異なること、そして不安定化の機構は低磁場では単一渦糸フローのダイナミクスによって、高磁場では格子のフロー方向の隣接渦糸のダイナミクスによって説明できることを明らかにした。これらの実験結果から直ちに準粒子寿命が求まり、その値は理論値、および過去にトンネル実験から間接的に求められた値と近かった。本研究は、超伝導にとって重要な準粒子寿命を輸送現象測定によって比較的簡便に求める方法を提案したこと、および応用上も重要な渦糸フローの不安定化が起こる条件を明確にしたという意義をもつ。

つぎに、本研究で構築したパルスモードロック共鳴法を用い、絶対零度近傍の 0.05 K において、高速駆動され実効的ピン止め力がゼロの極限での渦糸格子の動的量子融解転移の観測に成功した。この融解転移点は、これまでディピンング電流のピークから得られた静的な渦糸格子-ガラス転移点とは一致せず、わずかに高磁場にシフトしていることがわかった。また動的融解磁場は極低温で温度依存性が弱くなり、静的融解磁場よりも低磁場側にシフトすることがわかった。これは強い量子ゆらぎの効果によるものと考えられる。本結果より、図 1 に示すように、ピン止めのない理想的な極限における絶対零度の静的渦糸相図を初めて決定することができた。さらにピン止めの導入により、渦糸格子相(OP)がわずかに減少し、その上に位置する量子渦糸液体(QVL)相は、ほとんどがガラス相(DP)に置き代わることもわかった[9]。

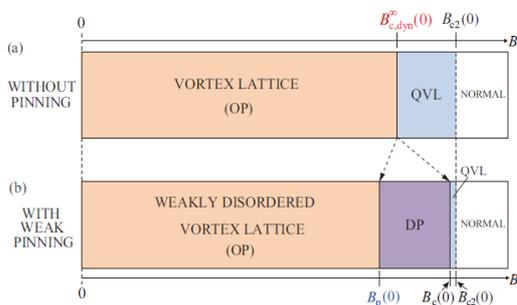


図 1 絶対零度における(上図)ピン止めのない理想的極限、および(下図)弱いピン止めのある場合の磁場に対する静的渦糸相図 [9].

ところで 2 次元薄膜については、絶対零度の極限において、磁場印加による超伝導-絶縁体転移ではなく、超伝導-金属-絶縁体転移が観測された[10]。すなわちこの系では、理論的に予想されていた超伝導-絶縁体転移の描像[1,3]は、そのままでは成り立たないことがわかった。渦糸固体状態を調べるために渦糸系を駆動させモードロック共鳴実験を行ったところ、格子性を示すモードロック信号は得られなかった。これは 2 次元超薄膜では試料に強いピン止め中心が存在しているため、あるいは 2 次元系には低次元系特有の強いゆらぎの効果が存在するためと考えられる。2 次元系も含めた超伝導体の静的および動的渦糸相図の全容解明は今後の課題である。

(2) 上記テーマで観測された動的相転移とは独立の動的相転移である、可逆-不可逆転移の研究も進展した。これは渦糸(粒子)系を交流駆動させると、衝突を繰り返すうちに次の衝突を避ける位置に自己組織化するランダム組織化が起こり、駆動振幅を変数として、すべての渦糸が元の位置に戻る可逆フローから、一部の渦糸が戻らなくなる不可逆フローへと動的相転移を起こすというものである。本研究では渦糸配置が予想できる渦糸系との比較実験により、可逆フローの渦糸配置は不可逆フローの渦糸配置に比べ秩序があること、しかし完全な格子配置をとるわけではなく、その配置には過去の駆動振幅の情報が記憶されている可能性を見出した。この結果は、不可逆性の始まりを格子中に発生した格子欠陥のダイナミクスによって説明する前述の理論予測[7]と近い。しかし、本実験で得られた可逆相の渦糸配置に関する知見は、この理論的描像だけでは説明できない。

ところで、これまでの我々およびコロイド系を用いた外国のグループの実験では、巨視的な交流せん断力を印加できるコルビノディスク(CD)あるいは円筒容器を用いた回転駆動系で実験が行われてきた。これに対し本研究では、ランダムなピン止めセンターに由来する微視的な交流せん断力のみが存在する並進運動系において、初めて可逆-不可逆転移の観測に成功した[11]。そのデータを図 2 に示す。フローノイズ  $S_V$  が立ち上がる臨界駆動振幅  $d_c$  が存在し、そこで定常状態へ向かう緩和時間  $\tau$  がべき乗で臨界発散している。そのときの臨界指数は  $\nu=1.3$  となり、CD[6]やコロイド系[5]で得られた値とほぼ一致する。ただし CD 試料の結果[6]と比べ  $d_c$  は減少し、可逆相での臨界現象は観測されなかった。これは用いた矩形試料のピン止め力が、これまでの CD 試料のピン止め力よりも大きかったためと考えている。

そこで、この矩形試料において渦糸系を直流駆動力で並進フローさせることによって、実効的ピン止め力が弱まった状態を実現し、そこに交流駆動力を重畳することにより、直流駆動(重心)系における可逆-不可逆転移の観測を試みた。その結果、可逆-不可逆転移の

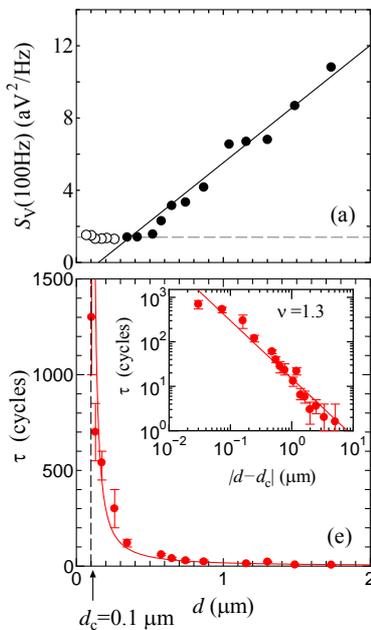


図 2 (a)フローノイズ  $S_V$  および (b)緩和時間  $\tau$  の駆動振幅  $d$  依存性 [11].

臨界現象が観測され、しかも直流でフローさせない実験室系のと比べ、緩和時間  $\tau$  は 1 桁以上減少し、 $d_c$  は 1 桁程度上昇することがわかった。本実験結果は、直流駆動（重心）系から見た可逆-不可逆転移の初の観測であり、また並進速度によって可逆-不可逆転移を制御できることを示したものである。ただし可逆-不可逆転移における緩和時間のべき乗発散の臨界指数  $\nu$  は 0.7 程度となり、直流駆動させないときの値の約半分となった。この理由として以下の 2 つの可能性を考えている。ひとつは、直流駆動状態では重心系で見るとピン止めサイトが時間的に変動しているため、ピン止めサイトが静止しているこれまでの可逆-不可逆転移の臨界現象とは異なる臨界現象が現れた。もうひとつは、 $\nu=0.7$  の臨界指数で特徴づけられる可逆-不可逆転移とは異なる動的相転移現象が観測された。

以上のように、本研究では新たに構築した渦系系に対する動的輸送測定を用い、渦系の運動によって誘起される新しい非平衡現象や動的相転移、あるいはこれらを絶対零度近傍で適用することにより、磁場誘起量子相転移を反映した新たな渦系相図・極低温秩序相を見出した。

#### <引用文献>

M. P. A. Fisher, “Quantum phase transitions in disordered two-dimensional superconductors”, Phys. Rev. Lett. **65** (1990) 923-926.

S. Okuma, Y. Imamoto, and M. Morita, “Vortex Glass Transition and Quantum Vortex Liquid at Low Temperature in a Thick  $a$ - $\text{Mo}_x\text{Si}_{1-x}$  Film”, Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 3136-3139.

Valerii M. Vinokur *et al.*, “Superinsulator and quantum synchronization”, Nature **452** (2008) 613-615.

S. Okuma, H. Imaizumi, and N. Kokubo, “Intrinsic quantum melting of a driven vortex lattice in amorphous  $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$  films”, Phys. Rev. B **80** (2009) 132503(1-6).

D. J. Pine, J. P. Gollub, J. F. Brady, and A. M. Leshansky, “Chaos and threshold for irreversibility in sheared suspensions”, Nature **438** (2005) 997-1000.

S. Okuma, Y. Tsugawa, and A. Motohashi, “Transition from reversible to irreversible flow: Absorbing and depinning transitions in a sheared-vortex system”, Phys. Rev. B **83** (2011) 012503 (1-4).

Paolo Moretti and M.-Carmen Miguel, “Irreversible flow of vortex matter: Polycrystal and amorphous phases”, Phys. Rev. B **80** (2009) 224513(1-12).

S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, “Transition from reversible to irreversible flow: Absorbing and depinning transitions in a sheared-vortex system”, Phys. Rev. B **83** (2011) 012503 (1-4)

A. Ochi, N. Sohara, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma, “Equilibrium and Dynamic Vortex States near Absolute Zero in a Weak Pinning Amorphous Film”, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 044701(1-7).

E. Murakami, A. Ochi, Y. Kawamura, S. Kaneko, and S. Okuma “Magnetic-Field-Induced Metallic Phase at Low Temperature in Two-Dimensional Superconductors” Phys. Procedia **65** (2015) 101-104.

R. Nitta, Y. Kawamura, S. Kaneko, and S. Okuma, “Reversible to irreversible flow transition of periodically driven vortices in the strip sample”, Phys. Procedia **65** (2015) 105-108.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9 件)

Aguri Ochi, Naoya Sohara, Shin-ichi Kaneko, Nobuhito Kokubo, and Satoshi Okuma, “Equilibrium and Dynamic Vortex States near Absolute Zero in a Weak Pinning Amorphous Film” J. Phys. Soc. Jpn. **85**, No.4 (2016) 044701(1-7); <http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.044701> 査読有。

Aguri Ochi, Yasuki Kawamura, Toshiki Inoue, Tetsuya Kaji, Dobroka Mihaly, Shin-ichi Kaneko, Nobuhito Kokubo, and Satoshi Okuma, “Dynamic Melting of Driven Abrikosov Lattices in an Amorphous  $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$  Film in Tilted Field” J. Phys. Soc. Jpn. **85**, No.3 (2016) 034712(1-6); <http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.034712> 査読有。

大熊哲, “磁束系の動的相図と非平衡ダイナミクス”; 超伝導磁束状態の物理, 裳華房

(2016) 査読有.

R. Nitta, Y. Kawamura, S. Kaneko, and S. Okuma, “Reversible to irreversible flow transition of periodically driven vortices in the strip sample” Phys. Procedia **65** (2015) 105-108; doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.145 査読有.

E. Murakami, A. Ochi, Y. Kawamura, S. Kaneko, and S. Okuma “Magnetic-Field-Induced Metallic Phase at Low Temperature in Two-Dimensional Superconductors” Phys. Procedia **65** (2015) 101-104; doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.143 査読有.

Y. Kawamura and S. Okuma, “Dynamics of Superconducting Vortices Driven by Periodic Shear in the Plastic-Flow and Flux-Flow Regimes” JPS Conf. Proc. **4** (2015) 011007(1-4); <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJCP.4.011007> 査読有.

Y. Kawamura, Y. Matsumura, Y. Yamazaki, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma, “Unusual current-voltage characteristics and dynamic correlation of rotating vortex-lattice rings” Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 045002 (1-7); <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/28/4/045002> 査読有.

K. Kamimura, K. Nagatani, and S. Okuma, “Rearrangement of the Fast Driven Abrikosov Lattice in a Superconducting Amorphous Film in Tilted Field”; JPS Conf. Proc. **2** (2014) 010203(1-6); <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJCP.2.010203> 査読有.

S. Okuma, A. Motohashi, and Y. Kawamura, “Critical dynamics associated with dynamic disordering near the depinning transition in different vortex phases” Phys. Lett. A **377** (2013) 2990-2994; <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2013.09.021> 査読有.

[学会発表](計 72 件)

大熊哲, “超伝導渦糸固体のプラスチックフローと動的相転移”: 日本物理学会 2015 年秋季大会 領域 11, 6, 12 合同シンポジウム「塑性固体のダイナミクス: その非線形応答, なだれとレオロジー」2015 年 9 月 19 日, 関西大学(大阪府吹田市) **(招待講演)**

井上俊規, 河村泰樹, 新田亮馬, 金子真一, 大熊哲, “直流駆動系から見た可逆不可逆転移”: 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 17 日, 関西大学(大阪府吹田市)

大熊哲, 河村泰樹, 井上俊規, 加治哲也, M. Dobroka, 金子真一, “渦糸系を舞台にした新規非平衡現象と相転移”: 第 2 3 回渦糸物理国内会議 2015 年 12 月 8 日, 志賀島休暇村(福岡県志賀島)

越智亜玖利, 曾原直也, 小久保伸人, 大熊哲, “極低温下のパルスモードロック共鳴法による渦糸ダイナミクスの観測”: 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学(東京都)

曾原直也, 越智亜玖利, 金子真一, 小久保

伸人, 大熊哲, “速度増大による渦糸の不安定化とその起源”: 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 8 日, 中部大学

村上瑛一, 越智亜玖利, 河村泰樹, 大熊哲, “2 次元超伝導体の極低温磁場誘起金属相”: 日本物理学会 2014 年年秋季大会 2014 年 9 月 8 日, 中部大学

大熊哲, “超伝導渦糸の非平衡現象”: 日本物理学会第 69 回年次大会 領域 6, 1, 8, 11 合同シンポジウム「モデル量子物質 - 量子凝縮系に現れる新しい自由度や構造が生む物理現象-」2014 年 3 月 29 日, 東海大学(神奈川県平塚市) **(招待講演)**

S. Okuma, “Plastic Flow and Dynamic Transitions of Vortex Solids in Superconductors” Int. Conf. on Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto (Japan) 7 March 2016 **(Invited talk)**

S. Okuma, Y. Kawamura, R. Nitta, A. Motohashi, S. Kaneko, “Non-equilibrium Phase Transitions in Driven Vortices” Int. Workshop on Vortex Matter (VORTEX 2015), El Escorial (Spain) 10 May 2015 **(Invited talk)**

S. Okuma, “Novel Dynamic Transitions and Non-equilibrium Phenomena in Driven Vortex Matter” Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), Seoul (South Korea) 25 June 2014 **(Invited talk)**

S. Okuma, Y. Kawamura, and N. Kokubo, “Novel Dynamic Transitions in Driven Vortices” 26th Int. Symposium on Superconductivity (ISS'13), Tokyo (Japan), 19 November 2013 **(Invited talk)**

S. Okuma, Y. Kawamura, and N. Kokubo, “Vortex Dynamics in Amorphous Superconducting Films: Novel Dynamic Transitions of Driven Abrikosov Lattice” Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR) 2013, Jeju (Korea) 26 June 2013 **(Invited talk)**

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcltp.titech.ac.jp/~okumalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大熊哲 (OKUMA Satoshi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 50194105

(2) 連携研究者

小久保 伸人 (KOKUBO Nobuhito)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 80372340

(3) 連携研究者

石田 武和 (ISHIDA Takekazu)

大阪府立大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 00159732