

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400414

研究課題名(和文)ポラリトン超流動体における量子散逸構造

研究課題名(英文)Dissipative structures in polariton superfluids

研究代表者

齋藤 弘樹 (Saito, Hiroki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：60334497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目標は、散逸とポンプのある量子系である励起子ポラリトン超流動体において、散逸構造などの散逸系特有の現象を見出すことであった。研究の結果、局所的にポンプされた系において、ポラリトン超流動体が回転対称性を破った独特の構造を獲得することが見出された。興味深いことに、この状態は自発的に回転運動を行う。これは自励振動の一種と考えることができる。さらにこの状態が複数個近接して存在する場合、回転運動が互いに同期することがわかった。これら自励回転や同期現象は散逸系特有の現象であると言える。

加えて、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における量子渦等の様々な構造に関して研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of the present study is to find dissipative phenomena in exciton-polariton superfluids, such as dissipative structures. In a locally pumped exciton-polariton superfluids, we found that the rotation symmetry is spontaneously broken and a localized structure is formed. Interestingly, this state rotates around the center of the system, which is regarded as the self-induced oscillation. If such two objects are produced by two external lasers with an appropriate distance, the frequency and phase of the two rotating polaritons are synchronized. Such self-rotation and synchronization are peculiar to open systems. In addition, in the present study, a variety of phenomena including vortex structures have been discovered in Bose-Einstein condensates of ultracold atomic gases.

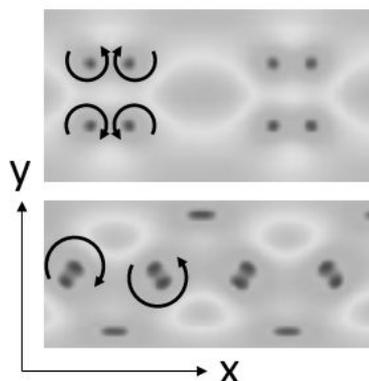
研究分野：Quantum physics

キーワード：Superfluid Polariton Quantized vortex Bose-Einstein condensate

### 1. 研究開始当初の背景

二次元半導体量子井戸を光共振器でサンドイッチ状にはさみレーザーを照射すると、光共振器に侵入した光子が量子井戸中の励起子と結合し、ポラリトンが生成される。ポラリトンはボース粒子であり、その質量は電子の数万分の一と軽いため、超低温に冷却せずとも超流動性を示す。このような励起子ポラリトン超流動体に関する実験的・理論的研究が今世紀に入って急速に進展しつつある。

本研究代表者は、研究開始当初までに、この系に関する理論的研究を進めており、興味深い現象を発見した。ポラリトン超流動体をレーザー光で励起すると、発生した量子渦が自発的に秩序を持って配置され、それが安定に維持されることである(下図、文献[1]より転載)。



この量子渦構造は、回転する超流動体における量子渦格子などとは本質的に異なり、散逸系でなければ安定に存在できない。つまり、量子系における、散逸が本質的な役割を果たす構造、いわば「量子散逸構造」と呼ぶことができる。

散逸構造とは、流入と散逸が釣り合った定常状態において自己組織化によって生まれる構造であり、プリゴジンらによって1970年代に提唱され、一大研究分野として発展してきた。しかしながら、その研究対象はこれまで古典的な物理系に限られている。その理由は量子系が一般に散逸に弱く、通常は散逸によって量子性が失われてしまうためだと考えられる。これに対して、励起子ポラリトン超流動体は外界と光子をやり取りしているにもかかわらず、超流動性は頑強に保たれており、量子性と散逸が見事に両立している。このような系が実験で実現され、盛んに研究され始めたというのが、研究開始当初の背景である。

[1] T. Aioi, T. Kadokura, and H. Saito, Phys. Rev. B **87**, 205312 (2013).

### 2. 研究の目的

上述のように、励起子ポラリトンの系は光共振器の鏡を通して外界と常に光子をやり取りする非平衡開放系である。本研究の目的は、励起子ポラリトン超流動体が必然的に散逸を内包した量子系であることに着目し、量

子系における散逸構造、いわば「量子散逸構造」など、散逸系に特有の種々の物理現象が量子力学系に出現するかどうかを明らかにすることである。

また、その目的のために、量子渦を始めとする、超流動体におけるトポロジカル励起の性質やその運動に関する理解を深める必要がある。これらの研究を通じて、散逸のある量子流体における新しい現象を見出し、知見を深めることを目的とする。

### 3. 研究の方法

計算機を用いて、励起子ポラリトン超流動体および原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体のダイナミクスの詳細な数値解析を行った。励起子ポラリトン超流動体のダイナミクスは励起子場と光子場の非線形シュレディンガー方程式に従うことが実験的に確かめられているため、この方程式を擬スペクトル法という高速フーリエ変換を駆使した方法を用いて数値的に解いた。

具体的には、実験的に妥当なパラメータ設定のもとで、非線形シュレディンガー方程式を数値的に時間発展させる。この方程式には散逸と外部レーザーによる励起子ポラリトンの損失と増幅の項が含まれている。また、これらの効果が小さい極限では、原子気体ボース・アインシュタインのダイナミクスを記述するグロス・ピタエフスキー方程式に帰着する。

これらの数値計算は、本研究資金で購入したGPU計算機によって効率的に行われた。GPUを用いると、同価格帯のCPUのみの計算機と比較して数倍の速度で計算することが可能であり、競合する研究グループに対して優位に研究を進めることができる。

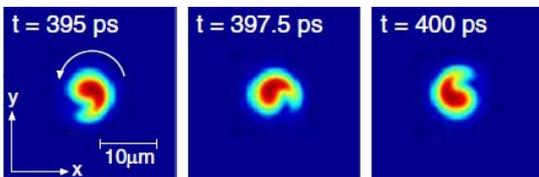
### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は主に二種類に大別することができる。一つ目は本研究目的と直接関係のある、励起子ポラリトンにおける構造形成やダイナミクスに関するものである。二つ目は、それに関係した現象を原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体の系で調べたものである。後者は、本研究目的とは直接的な関係は持たないものの、本研究を通じて着想を得ることにより、発展させることができた研究である。以下、これらについて詳細に述べる。

#### (1) 励起子ポラリトンにおける自励振動と励起

本研究の主な目的は、量子系における空間的な散逸構造を調べることであったが、当初予想された以上の興味深い結果が得られた。それは、空間的のみならず時空間的な、散逸に起因する構造が見出されたことである(論文リスト5)。

下図は励起子ポラリトンのある時刻の密度分布を示す。下図中央にガウス型のレーザ

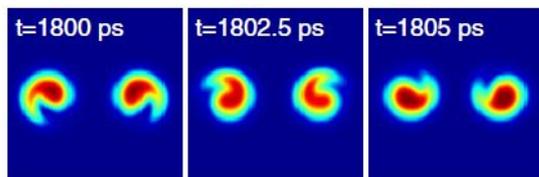


一光による励起子ポラリトンのポンプが行われている。通常であれば、ガウス型のポンプ形状に合ったガウス型の等方的な励起子ポラリトン密度の分布が得られるが、回転対称性が自発的に破れているのがわかる。

この状態の面白い点は、図中の奇妙な形状をした波束が図の中央を回転軸として一定の角周波数が回転するという点にある。外界からのポンプ強度は一定で系を振動・回転させる要素はない。従って、これは一種の自励振動と呼ぶことができる。

自励振動とは外界からのエネルギー注入と散逸のある系において、自発的に系が振動する現象である。我々の身の回りにもよく現れる現象であり、例えば、笛に空気を吹き込むと音波が発生するのは自励振動の一種と言える。自励振動は古典系では多様な例があるが、量子系の自励振動の例はそれほど多くはない。その理由は散逸によって量子性が壊れてしまう場合が多いからであると思われる。これに対して励起子ポラリトンの系は散逸と量子性が両立している系であり、まさに自励振動を見るのに都合が良い系であると言える。

さらに、上図の回転する波束が二つある場合、それらの距離を適当にとると、同期現象が起こることを見出した。下図は二つの励起子ポラリトンの波束が二つのポンプ光によって励起されている様子を示す。自発的に回転する二つの波束が揃って回転運動をしている様子がわかる。



この同期現象は、初期状態をどのように取っても、あるいは、二つのポンプ光のパラメータをずらして波束の回転数を僅かにずらしても起こる。すなわち、周波数引き込みおよび位相引き込みが起こっている。このような同期現象も、古典系での例は数多くあるが、量子系で議論された例はほとんどない。

以上のように、励起子ポラリトンの系において、自励振動および同期という、開放系ならではの現象を見出した。これは散逸系における時空間的な構造と呼べるだろう。散逸のある量子系において構造形成を見出すという本研究の当初の目的は達成できたと言える。

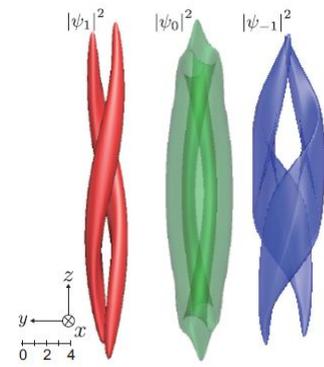
## (2) 原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における構造形成

本研究の目的からは若干外れるものの、

「構造形成」という観点から、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体に関する研究を行い、いくつかの成果を得た。考えた系は、原子のスピンの状態と運動状態がカップルした、いわゆるスピン軌道相互作用のある系である。

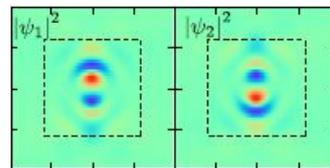
ある条件のもとで、この系の基底状態は自発的に発生したスピン渦が規則的に並んだ状態であることが知られていた。本研究ではこの系にさらに磁気双極子相互作用を取り入れて基底状態を調べた。磁気双極子相互作用は異方的長距離相互作用である。そのため、スピン軌道相互作用によって発生したスピン渦が磁気双極子相互作用によって三次元的な構造をつくる

ことが期待される。右図は得られたスピン構造の一例である（論文リスト4）。スピン1のそれぞれの成分の等密度面が示されている。左の2本の細長い構造がスピン渦



を表しており、2本のスピン渦が2重らせん構造を形成していることがわかる。これはスピン軌道相互作用と磁気双極子相互作用の両方がある系特有の構造である。

また、スピン軌道相互作用する系における量子渦対に関する研究も行った（論文リスト1）。通常の超流動体では、量子渦対は絶えず運動しており、静止した状態はない。本報告書の第一節に掲げた、量子渦群が散逸構造を作った状態は、特殊な定常状態の一例である。このような状態が、スピン軌道相互作用のある系でも存在することが明らかになった。下図はスピン軌道相互作用する二成分系における量子渦・半量子渦対の密度分布を示す。この状態は安定な定常状態であり、一度



形成されると静止したまま安定に存在し続ける。通常の量子渦対と違い、複雑な構造を持つことがわかる。スピン軌道相互作用は量子渦の周りの速度場に大きく影響を与えることが数値的に確かめられた。これによって、量子渦対が静止して安定化していると考えられる。

これらの成果によって、多成分系超流動体における量子渦に対する新たな知見が得られた。

## 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 20 件)すべて査読有り

1. Masaya Kato, Xiao-Fei Zhang, and Hiroki Saito, “Vortex pairs in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate”  
Phys. Rev. A 95, 043605 (2017) [7 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043605>
2. Xiao-Fei Zhang, Masaya Kato, Wei Han, Shou-Gang Zhang, and Hiroki Saito, “Spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensates held under toroidal trap”  
Phys. Rev. A 95, 033620 (2017) [7 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.95.033620>
3. Xiao-Fei Zhang, Wei Han, Hai-Feng Jiang, Wu-Ming Liu, Hiroki Saito, and Shou-Gang Zhang, “Topological defect formation in rotating binary dipolar Bose-Einstein condensate”  
Ann. Phys. 375, 368 (2016) [10 pages]  
DOI:<http://doi.org/10.1016/j.aop.2016.10.018>
4. Masaya Kato, Xiao-Fei Zhang, Daichi Sasaki, and Hiroki Saito, “Twisted spin vortices in a spin-1 Bose-Einstein condensate with Rashba spin-orbit coupling and dipole-dipole interaction”  
Phys. Rev. A 94, 043633 (2016) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.043633>
5. Hiroki Saito and Rina Kanamoto, “Self-rotation and synchronization in exciton-polariton condensates”  
Phys. Rev. B 94, 165306 (2016) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.165306>
6. Hiroki Saito, “Path-integral Monte Carlo study on a droplet of a dipolar Bose-Einstein condensate stabilized by quantum fluctuation”  
J. Phys. Soc. Jpn. 85, 053001 (2016) [4 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.053001>
7. Wei Han, Xiao-Fei Zhang, Shu-Wei Song, Hiroki Saito, Wei Zhang, Wu-Ming Liu, and Shou-Gang Zhang, “Double-quantum spin vortices in SU(3) spin-orbit coupled Bose gases”  
Phys. Rev. A 94, 033611 (2016) [9 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.033611>
8. Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Non-equilibrium dynamics induced by miscible-immiscible transition in binary Bose-Einstein condensates”  
New J. Phys. 18, 073029 (2016) [6 pages]
9. Tomoya Kaneda and Hiroki Saito, “Collision dynamics of skyrmions in a two-component Bose-Einstein condensate”  
Phys. Rev. A 94, 033629 (2016) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.033629>
10. Yujiro Eto, Masahiro Takahashi, Keita Nabeta, Ryotaro Okada, Masaya Kunimi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Bouncing motion and penetration dynamics in multicomponent Bose-Einstein condensates”  
Phys. Rev. A 93, 033615 (2016) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.93.033615>
11. Kui-Tian Xi and Hiroki Saito, “Droplet formation in a Bose-Einstein condensate with strong dipole-dipole interaction”  
Phys. Rev. A 93, 011604(R) (2016) [5 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.93.011604>
12. Hiroki Saito, “Can we swim in superfluids?: Numerical demonstration of self-propulsion in a Bose-Einstein condensate”  
J. Phys. Soc. Jpn. 84, 114001 (2015) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.114001>
13. Yujiro Eto, Masaya Kunimi, Hidekatsu Tokita, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Suppression of relative flow by multiple domains in two-component Bose-Einstein condensates”  
Phys. Rev. A 92, 013611 (2015) [5 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.92.013611>
14. Masaya Kunimi and Hiroki Saito, “Upper bound of one-magnon excitation and lower bound of effective mass for ferromagnetic spinor Bose and Fermi gases”  
Phys. Rev. A 91, 043624 (2015) [6 pages]  
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.043624>
15. Hiroki Saito and Masaya Kunimi, “Energy shift of magnons in a

ferromagnetic spinor-dipolar Bose-Einstein condensate”

Phys. Rev. A 91, 041603(R) (2015) [4 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.041603

16. Tomoya Kaneda and Hiroki Saito, “Dynamics of a vortex dipole across a magnetic phase boundary in a spinor Bose-Einstein condensate”

Phys. Rev. A 90, 053632 (2014) [7 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.053632

17. Tsuyoshi Kadokura, Jun Yoshida, and Hiroki Saito, “Hysteresis in quantized vortex shedding”

Phys. Rev. A 90, 013612 (2014) [5 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.013612

18. Yujiro Eto, Mark Sadgrove, Sho Hasegawa, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Control of spin current in a Bose gas by periodic application of pi pulses”

Phys. Rev. A 90, 013626 (2014) [6 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.90.013626

19. Yujiro Eto, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Observation of Dipole-Induced Spin Texture in an 87Rb Bose-Einstein Condensate”

Phys. Rev. Lett. 112, 185301 (2014) [5 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.185301

20. Hiroki Saito, “Comment on “Ground-state fragmentation phase transition for attractive bosons in anisotropic traps”

Phys. Rev. A 89, 067601 (2014) [2 pages]  
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.89.067601

〔学会発表〕(計 27 件)

1. 鳥居, 鍋田, 高橋, 柴山, 衛藤, 齋藤, 平野「RF スピン制御された 87Rb ボース・アインシュタイン凝縮体におけるスピン交換衝突」 日本物理学会第 7 2 回年次大会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月

2. 柴山, 岡田, 衛藤, 齋藤, 平野「ボース・アインシュタイン凝縮体相分離ダイナミクスの光トラップ形状依存性」 日本物理学会第 7 2 回年次大会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月

3. 衛藤, 柴山, 齋藤, 平野「スピン 1・ス

ピン 2 混合ボース凝縮体における rephasing の観測」 日本物理学会第 7 2 回年次大会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月

4. 加藤雅也, Xiao-Fei Zhang, 佐々木大地, 齋藤弘樹「スピン軌道相互作用するスピノール・ダイポール BEC の基底状態」 日本物理学会第 7 2 回年次大会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月

5. 齋藤弘樹, 金本理奈「励起子ポラリトン凝縮体における自励振動と同期」 日本物理学会第 7 2 回年次大会 大阪大学(大阪府豊中市) 2017年3月

6. 衛藤, 高橋, 國見, 齋藤, 平野「混和性制御による 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス」 日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学(石川県金沢市) 2016年9月

7. Xiao-Fei Zhang, Wei Han, and Hiroki Saito, “Double-quantum vortices in SU(3) spin-orbit coupled Bose gases” 日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学(石川県金沢市) 2016年9月

8. 齋藤弘樹, Kui-Tian Xi「ダイポール BEC におけるドロップレット形成」 日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学(石川県金沢市) 2016年9月

9. 岡田, 鍋田, 鳥居, 高橋, 衛藤, 國見, 齋藤, 平野「87Rb ボース・アインシュタイン凝縮体におけるゼーマン準位間のラビ振動」 日本物理学会第 7 1 回年次大会 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月

10. 齋藤弘樹「超流動体中の物体の自己推進」 日本物理学会第 7 1 回年次大会 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月

11. 金田知也, 齋藤弘樹「二成分 BEC における Skyrmion の衝突ダイナミクス」 日本物理学会第 7 1 回年次大会 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月

12. 金子聡史, 齋藤弘樹「励起子ポラリトン超流動体におけるコヒーレント・インコヒーレントポンプを組み合わせた量子渦対生成」 日本物理学会第 7 1 回年次大会 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016年3月

13. 齋藤弘樹, 國見昌哉「スピノール BEC のマグノン分散関係に対する磁気双極子相互作用の効果」 日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学(大阪府吹田市) 2015年9月

14. 國見昌哉, 齋藤弘樹「強磁性 spinor ガ

スにおける1マグノン励起の上限」日本物理学会2015年秋季大会 関西大学(大阪府吹田市)2015年9月

15. 衛藤, 高橋, 岡田, 鍋田, 國見, 齋藤, 平野「多成分ボース・アインシュタイン凝縮体間の衝突と振動の緩和」日本物理学会2015年秋季大会 関西大学(大阪府吹田市)2015年9月

16. Masaya Kkunami and Hiroki Saito, "Magnon excitations in spinor cold atomic gases" International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 京都大学(京都府京都市)2015年8月

17. Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano, "Coherent control and observation of spin dynamics in Bose-Einstein condensates of  $^{87}\text{Rb}$  atoms" International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 京都大学(京都府京都市)2015年8月

18. R. Okada, H. Tokita, M. Kunimi, K. Nabeta, Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano, "Suppression of relative current by spin domain formation in immiscible Bose-Einstein condensates" International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 京都大学(京都府京都市)2015年8月

19. K. Nabeta, Y. Eto, M. Takahashi, R. Okada, H. Tokita, M. Kunimi H. Saito, and T. Hirano, "Collision-induced dynamics in multi-component Bose-Einstein condensates" International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 京都大学(京都府京都市)2015年8月

20. Masaya Kunimi and Hiroki Saito, "Magnon Excitations in Spinor Cold Atomic Gases" International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 京都大学(京都府京都市)2015年8月

21. 金田知也, 齋藤弘樹「スピノールBECにおける磁性相間の量子渦対の透過」日本物理学会第70回年次大会 早稲田大学(東京都新宿区)2015年3月

22. 齋藤弘樹「トンネリングによる引力BEC崩壊の量子多体ダイナミクス」日本物理学会第70回年次大会 早稲田大学(東京都新宿区)2015年3月

23. 鴫田, 國見, 岡田, 鍋田, 衛藤, 齋藤, 平野「二成分ボース・アインシュタイン凝縮体におけるスピンドメインの安定性」日本物理学会第70回年次大会 早稲田大学(東京都新宿区)2015年3月

24. 門倉強, 吉田隼, 齋藤弘樹「障害物後方への量子渦生成における双安定性」日本物理学会2014年秋季大会 中部大学(愛知県春日井市)2014年9月

25. 衛藤雄二郎, 齋藤弘樹, 平野琢也「スピノールBECの磁気双極子相互作用による空間構造形成」日本物理学会2014年秋季大会 中部大学(愛知県春日井市)2014年9月

26. 齋藤弘樹「励起子ポラリトン超流動体における量子渦」日本物理学会2014年秋季大会 中部大学(愛知県春日井市)2014年9月

27. Hiroki Saito, Tomohiko Aioi, and Tsuyoshi Kadokura, "Order-disorder oscillations in an exciton-polariton superfluid" The 7<sup>th</sup> International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (Hakone, Japan) 2014年4月

〔その他〕  
特に無し。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 弘樹 (SAITO HIROKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 60334497