

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22740265

研究課題名(和文) 双極子相互作用が拓く冷却原子気体の新現象

研究課題名(英文) Magnetic properties of a spinor dipolar Bose-Einstein condensate

研究代表者

川口 由紀 (Kawaguchi, Yuki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00456261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン内部自由度を持った原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体(スピノールBEC)において、双極子相互作用がスピンと軌道の自由度を結合することによりスピホール効果が起こることを示した。また、スピノールBECにおける量子多体効果を調べ、磁気相図や相転移の次数、励起スペクトルの変化を定量的に評価した。強磁性相互作用するスピノールBECにおいて、磁区ドメインの成長則を古典系と比較し、超流動速度場の影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the magnetic property of Bose-Einstein condensates with spin internal degrees of freedom (spinor BECs). We have shown that the magnetic dipole-dipole interaction in spinor BECs causes the spin Hall effect. The changes in the magnetic phase diagram, phase transition, and the excitation spectrum due to the many-body effect are evaluated by using the perturbation theory. The effect of the superfluid current on the domain growth dynamics in a ferromagnetic BEC is investigated.

研究分野：物性理論

キーワード：物性理論 量子エレクトロニクス 冷却原子気体

## 1. 研究開始当初の背景

希薄な原子気体に働く磁気的双極子相互作用は非常に微弱であるが、原子気体がひとたびボース凝縮すれば粒子数の分だけ増幅されて巨視的な現象を起こしうる。特に内部自由度を持ったボース・アインシュタイン凝縮体(スピノール BEC)では、スピンの空間構造の形成を通して超流動やスピン流を生じさせることがこれまでの研究でわかってきた。実験的にも双極子相互作用による異方的な崩壊ダイナミクスや、双極子相互作用由来と思われる磁区パターンが観測され、双極子相互作用が原子気体にもたらす静的・動的物性を、定量的に実験と比較しつつ研究する道が開けてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、双極子相互作用するスピノール BEC(スピノール・ダイポール BEC, SD-BEC)に関して、双極子相互作用によるスピン構造形成の機構やダイナミクス、多体効果の研究を通して、双極子相互作用が原子気体 BEC にもたらす新奇な物性を解明することを目的とした。具体的には、

- (1) SD-BEC における磁性
- (2) SD-BEC における多体効果
- (3) トポロジカル励起間に働く相互作用の解明に取り組んだ。

## 3. 研究の方法

- (1) Gross-Pitaevskii (GP) 方程式と呼ばれる凝縮体の基礎方程式、および、その低エネルギー有効理論である流体方程式の数値シミュレーションにより磁化ダイナミクスの研究を進めた。
- (2) 変分法により原子対の凝縮した状態として多体の波動関数を構成し多体効果を調べた。当初の予定に加えて摂動展開の手法を用い、Hartree-Fock 近似および Beliaev 近似を用いて多体効果を定量的に評価した。
- (3) 磁壁や量子渦といったトポロジカル励起を数値的に構成し、数値シミュレーションにより相互作用を調べた。当初の予定に加えて、数学的に厳密にホモトピー論の拡張を行い、トポロジカルな相互作用の解明に取り組んだ。

## 4. 研究成果

当初の研究(1)-(3)に加え、その拡張として、(4)-(6)の研究も行った。

### (1) SD-BEC における磁性

強磁性相互作用するスピノール BEC において細かい磁区構造が形成される様子が 2008 年に UC バークレーのグループにより観測された。この磁区構造の起源を解明するために、平均場理論を用いて励起スペクトルとスピンの非線形ダイナミクスを調べた。その結果、定性的には実験と同様に細かい磁区構

造ができるものの、磁区構造の空間スケールは 3 倍、構造の現れる時間スケールは 10 倍実験で観測されたものより大きく、平均場理論では定量的に実験を説明できないことが分かった。なお、この研究で得られた平衡状態は、上記の実験グループにより 2011 年に観測された。[雑誌論文]

一般にスピノール BEC の秩序変数はスピン  $F$  の場合に  $2F+1$  個の複素変数となりスピンの大きくなるほど複雑になる。しかし、強磁性 BEC の場合、低エネルギー有効理論として、実質スピンの方位と凝縮体全体の位相という 3 つの変数で記述することができる(流体近似)。そこで、強磁性 BEC に対する GP 方程式を流体近似を用いて書き下し、スピン期待値に対する運動方程式を導出した。さらに、前述の系に対して流体方程式を用いて安定性解析を行ない、と定性的に一致する結果を得た。[雑誌論文]

の研究をエネルギー散逸のある場合に拡張し、スピンの運動が古典スピンの運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に従うことを見出した。ただし古典系と異なり、強磁性 BEC ではスピングージ対称性から時間微分が超流動の速度場を含んだ物質微分として記述される。我々は双極子相互作用によるパターン形成のダイナミクスを数値的に調べ、古典系に比べて超流動カレントがスピンのダイナミクスを加速させることを明らかにした。[雑誌論文]

### (2) SD-BEC における多体効果

多体効果の研究において、長距離力である双極子相互作用を扱うのは困難であり、今回の研究期間ではスピノール BEC における多体効果の研究に専念した。しかし、その範囲でも下記の通り様々な新しい発見が得られた。

1 スピン 1 の強磁性 BEC は、磁場を変えることで磁化ゼロの相から部分的に磁化した相へと相転移を起こす。この臨界磁場が熱/量子揺らぎにより大きく変化することを見出した。これは、凝縮体との散乱によって非凝縮成分にもスピンコヒーレンスが生じ、それが平均場として凝縮相の状態を変えるためである。特に、量子揺らぎによる寄与は大きく、通常実験で用いられている希薄なガスであっても、平均場近似による臨界磁場から大きくずれることがわかった。[雑誌論文]

の拡張として、1 次・2 次ゼーマンエネルギーを変えて有限温度での磁性相図を Hartree-Fock 近似により調べた。その結果、非凝縮成分のスピンコヒーレンスが相図を決定する上で重要であることがわかった。[雑誌論文]

スピン 1 のスピノール BEC に対して、より高次の摂動展開である Beliaev 理論を適用した結果、マグノンの有効質量が量子揺らぎによって増大し、その増大率は強磁性相とボ

ーラー相で同一であることがわかった。また、マグノンの寿命はフォノンの寿命に比べて非常に長いことがわかった。[雑誌論文]

に引き続き、Beliaev 理論をスピン 2 の BEC に適応した結果、基底状態において、異なる磁性相間の相転移点が量子揺らぎによりシフトすることがわかった。これらは一次相転移であるが、準安定状態は低次の近似では出現せず、この計算で初めて、準安定状態の存在領域が定量的に明らかになった。特に相転移点で対称性が高くなると、準安定状態のない新しいタイプの一次相転移が出現するという点が大きな発見であり、これは摂動展開の次数に依らない普遍的な結果となっている。[雑誌論文]

スピン 2 のネマティック相では、対称性の自発的破れを由来としない擬南部・ゴールドストーン(qNG)モードが存在することが知られていたが、量子揺らぎにより qNG モードにギャップが生じることを定量的に示した。通常の qNG モードでは、エネルギーギャップは零点エネルギーと同程度と考えられるが、スピノール BEC の場合は零点エネルギーよりも二桁も大きいことが明らかになったため、今後実験で観測される可能性がある。[雑誌論文]

スピンの回転対称性が自発的に破れたスピノール BEC で、ゼロエネルギーのマグノンが対称性を回復させるような不安定性を引き起こすことを明らかにした。通常の Bogoliubov 理論では南部・ゴールドストーン(NG)マグノンは安定性に関して中立であるが、粒子数保存の Bogoliubov 理論を用いることで不安定性が説明できる。その結果、動的不安定なモードが時間の指数関数で増大するのに対し、NG モードは時間の 2 乗に比例して増大することがわかった。特に、NG フォノンと異なり、NG マグノンは凝縮体の波動関数と直交しているため、初期状態における NG マグノンの占有数を実験的に制御することができる。この初期状態における割合が不安定化のダイナミクスを加速させることを明らかにした。[雑誌論文]

### (3) トポロジカル励起間に働く相互作用

通常、トポロジカル励起は、その空間構造の次元によって、渦、モノポール、スカームイオンなどと分類され、その量子数はホモトピー群によりそれぞれ独立に定義される。しかし、スピン 1 のポラー相のように、半整数量子渦が存在する場合にはモノポールの量子数は渦の存在によって影響を受ける。我々はその代数構造がアベホモトピーという新しいホモトピーで与えられることを示し、トポロジカルな相互作用を数学的に厳密に定義した。[雑誌論文]

強磁性体中の磁区パターンの成長ダイナミクスにおいては、磁壁や磁気渦といったトポロジカル構造の散乱・対消滅により磁区ド

メインが成長する。このようなダイナミクスを調べるため、2次元強磁性 BEC におけるドメイン成長のダイナミクスを考察した。イジング模型的な場合、ドメインサイズ  $l$  の時間  $t$  依存性が、粘性のない超流動流(すなわち慣性流)の成長則  $l \sim t^{2/3}$  と一致することがわかった。一方、超流動の速度場を強制的にゼロにして LLG 方程式を解くと  $l \sim t^{1/3}$  という結果が得られ、流れのない場合に一致した。[雑誌論文]

磁化の自由度が XY 模型的な場合には渦の対消滅がドメイン成長過程で重要となる。通常の XY 模型や一成分の超流動体では量子数  $\pm 1$  の渦が存在し、これらが対消滅を起こすことでドメインが成長する。それに対し、強磁性 BEC では磁化と超流動の自由度を併せ持ち、磁化の量子数と超流動の量子数がそれぞれ  $\pm 1$  の値をとりうるので合計 4 種類の渦が出現する。対消滅は磁化と超流動の量子数が共に逆符号となるような渦対に対して可能で、2 種類の渦対が存在することとなる。しかし、対消滅を起こさない渦に対しても相互作用は働き、そのためにドメインの成長則が単純な XY 模型 [ $l \sim (t/\ln t)^{1/2}$ ] に比べて補正を受けることが分かった。[雑誌論文]

### (4) 対称性による基底状態の探索

磁気的雙極子相互作用が大きい原子では必然的にスピンが大きくなる。スピン内部自由度が大きいと、ゼロ磁場下であっても基底状態の相図は非常に複雑になる。我々は、系の対称性から基底状態を求める方法をスピノール BEC に対して構築し、具体的にスピン 3 の BEC の基底状態相を同定した。これにより、先行研究では見落とされていた相を発見した。[雑誌論文]

### (5) スピン軌道相互作用する BEC における基底状態の解明

人工ゲージ場によりスピン軌道相互作用する BEC の基底状態を対称性の考察により求めた。2次元の SO(2)対称性を持った系では、その部分群であるサイクリック群の対称性を持った状態が実現する。具体的にスピン 1/2, 1, および 2 の BEC に対して基底状態を求めた結果、三角格子、四角格子、六角格子、カゴメ格子といった様々な渦格子状態が現れることがわかった。[雑誌論文]

### (6) SD-BEC におけるスピンホール効果

雙極子相互作用は散乱過程において、衝突する 2 原子の全スピン角運動量と相対軌道角運動量の間で結合を引き起こし、スピン軌道相互作用の一種となっている。このことから、磁気副準位  $m=0$  に凝縮した BEC において、スピンホール効果が起こることを示した。つまり、ポテンシャル勾配により粒子流を流すとそれと垂直方向にスピンの流れが生じる。線形応答理論により計算したスピンホール係数は一般には非常に小さく、スピン波のエネ

ルギーギャップに非常に敏感で、ギャップを高精度で制御することにより観測できる可能性がある。[雑誌論文]

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 24 件)

T. Oshima and Y. Kawaguchi, "Spin Hall Effect in a Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate", *Physical Review A* **93**, 053605 (2016).  
doi: 10.1103/PhysRevA.93.053605

Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, "Skyrmionic magnetization configurations at chiral magnet/ferromagnet heterostructures", *Physical Review B* **93**, 064416 (2016). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevB.93.064416

N. T. Phuc, G. Tatara, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Controlling and probing non-abelian emergent gauge potentials in spinor Bose-Fermi mixtures", *Nature Communications* **6**, 8135 (2015). [査読有]  
doi:10.1038/ncomms9135

K. Kudo and Y. Kawaguchi, "Coarsening dynamics driven by vortex-antivortex annihilation in ferromagnetic Bose-Einstein condensates", *Physical Review A* **91**, 053609 (2015). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.91.053609

N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Quantum Mass Acquisition in Spinor Bose-Einstein Condensates", *Physical Review Letters* **113**, 230401 (2014). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevLett.113.230401

Y. Kawaguchi "Goldstone-mode instability leading to fragmentation in a spinor Bose-Einstein condensate", *Physical Review A* **89**, 033627 (2014). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.89.033627

N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates", *Physical Review A* **88**, 043629 (2013). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.88.043629

H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Kibble-Zurek mechanism in a trapped ferromagnetic Bose-Einstein condensate", *Journal of Physics: Condensed Matter* **25**, 404212 (2013). [査

読有]  
doi:10.1088/0953-8984/25/40/404212

K. Kudo and Y. Kawaguchi, "Magnetic domain growth in a ferromagnetic Bose-Einstein condensate: Effects of current", *Physical Review A* **88**, 013630 (2013). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.88.013630

N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates", *Annals of physics* **328**, 158-219 (2013). [査読有]  
doi:10.1016/j.aop.2012.10.004

Y. Kawaguchi and M. Ueda, "Spinor Bose-Einstein Condensates", *Physics Reports* **520**, 253-381 (2012). [査読有]  
doi:10.1016/j.physrep.2012.07.005

Z. F. Xu, Y. Kawaguchi, L. You, and M. Ueda, "Symmetry classification of spin-orbit coupled spinor Bose-Einstein condensates", *Physical Review A* **86**, 033628 (2012). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.86.033628

S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, "Topological classification of vortex-core structures of spin-1 Bose-Einstein condensates", *Physical Review A* **86**, 023612 (2012). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.86.023612

Y. Kawaguchi, N. T. Phuc, and P. B. Blakie, "Finite temperature phase diagram of a spin-1 Bose gas", *Physical Review A* **85**, 053611 (2012). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.85.053611

S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, "Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices", *Nuclear Physics B* **856**, 577 (2011). [査読有]  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2011.11.003

Y. Kawaguchi and M. Ueda, "Symmetry Classification of Spinor Bose-Einstein Condensates", *Physical Review A* **84**, 053616 (2011). [査読有]  
doi:10.1103/PhysRevA.84.053616

N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, "Effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a spin-1 <sup>87</sup>Rb Bose-Einstein condensate", *Physical Review A* **84**, 043645 (2011). [査読有]

doi:10.1103/PhysRevA.84.043645

K. Kudo and Y. Kawaguchi, "Dissipative hydrodynamic equation of a ferromagnetic Bose-Einstein condensate: Analogy to magnetization dynamics in conducting ferromagnets", *Physical Review A* **84**, 043607 (2011). [査読有]

doi:10.1103/PhysRevA.84.043607

K. Kudo and Y. Kawaguchi, "Hydrodynamic equation of a spinor dipolar Bose-Einstein condensate", *Physical Review A* **82**, 053614 (2010). [査読有]

doi:10.1103/PhysRevA.82.053614

Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda, "Spontaneous Magnetic Ordering in a Ferromagnetic Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate", *Physical Review A* **82**, 043627 (2010). [査読有]

doi:10.1103/PhysRevA.82.043627

その他、査読なし論文 2 件、日本語による解説 2 件

[学会発表](計 4 8 件)

川口 由紀, "内部自由度を持った BEC における磁化ダイナミクス", 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

川口 由紀, "スピノール・ダイポール BEC におけるスピンホール効果", 物性研短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」, 2016 年 1 月 5 日, 東京大学物性研究所 (千葉県柏市)

川口 由紀, 大嶋俊之, "スピノール・ダイポール BEC におけるスピンホール効果", 学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」 第一回領域研究会, 2015 年 12 月 12 日, 京都大学 (京都府京都市)

川口 由紀, 田仲 由喜夫, 永長 直人, "カイラル磁性体/強磁性体接合におけるスキルミオン構造", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 18 日, 関西大学 (大阪府吹田市)

川口 由紀, "内部自由度を持った BEC における量子渦", 数理解析所共同研究「非線形現象のモデルに潜む未踏査数理構造の探求 - 基礎数理と応用の協働 - 」, 2015 年 7 月 28 日, 京都大学数理解析研究所 (京都府京都市)

T. Oshima and Y. Kawaguchi, "Bosonic Inverse Spin Hall Effect in a Spinor Dipolar BEC", International Symposium on Fluctuation and Structure out of

Equilibrium 2015, 2015 年 8 月 21 日, 京都大学 (京都府京都市)

Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, "Skyrmionic spin textures at chiral magnet/ferromagnet heterostructures", Workshop on "Topological Magnets", 2015 年 5 月 26 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)

川口 由紀, "内部自由度を持った BEC における量子渦", 研究会「量子渦と非線形波動」, 2015 年 1 月 26 日, 東京理科大学神楽坂キャンパス (東京都新宿区)

T. Oshima and Y. Kawaguchi, "Off-diagonal current-current correlation in a spinor dipolar Bose-Einstein Condensate", International conference on topological quantum phenomena (TQP2014), 2014 年 12 月 17 日, 京都大学 (京都府京都市)

Y. Kawaguchi, "Goldstone-mode Instability in a Spinor Bose-Einstein Condensates", International conference on topological quantum phenomena (TQP2014), 2014 年 12 月 17 日, 京都大学 (京都府京都市)

川口 由紀, "スピノール BEC におけるゴールドストーンマグノンの不安定性", 新学術領域「揺らぎと構造」冷却原子研究会, 2014 年 11 月 3 日, 学習院大学 (東京都豊島区)

川口 由紀, "スピノール BEC におけるゴールドストーンマグノンの不安定性", 日本物理学会 秋季大会, 2014 年 9 月 8 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

Y. Kawaguchi, "Goldstone-mode instability in a spinor Bose-Einstein condensate", The ISSP International Workshop "New Horizon of Strongly Correlated Physics" (NHSCP2014), 2014 年 7 月 4 日, 東京大学物性研究所 (千葉県柏市)

Y. Kawaguchi, "Symmetry Classification of Spinor Bose-Einstein Condensates", QS2C Theory Forum: International Symposium on Strongly Correlated Quantum Science, 2013 年 1 月 28 日, 東京大学 (東京都文京区)

川口 由紀, 上田 正仁, "スピントクスチャのつくる有効ゲージ場の理論", 日本物理学会 秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市)

Y. Kawaguchi, "Multiple-collapse of a

dipolar Bose-Einstein condensate", Swiss-Japan Workshop 2012, Current Topics in Theory of Correlated Materials, 2012年9月12日, 理化学研究所(埼玉県和光市)

川口 由紀, "スピノールBECの流体力学的記述", 科研費新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第8回集中連携研究会「冷却原子気体とトポロジー」, 2012年6月4日, 東京大学(東京都文京区)

川口 由紀, "スピン3スピノールBECにおける自発的対称性の破れとトポロジカル励起", Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012), 2012年1月11日, 東京理科大学神楽坂キャンパス(東京都新宿区)

川口 由紀, "スピン3BECにおける自発的対称性の破れと量子渦", ISSP 短期研究会「量子凝縮系における defect と topology」, 2012年1月5日, 東京大学物性研究所(千葉県柏市)

川口 由紀, "スピン3スピノールBECにおける自発的対称性の破れとトポロジカル励起", 科研費新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第2回領域研究会, 2011年12月19日, 岡山大学(岡山県岡山市)

21 Y. Kawaguchi, "Topological Excitations in Quantum Gases", 8th Japan-German Frontiers of Science Symposium, 2011年10月29日, ホテルニューオータニ(東京都千代田区)

22 川口 由紀, 上田 正仁, "微小スピノールBECにおける対称性回復のダイナミクス", 日本物理学会 秋季大会, 2011年9月21日, 富山大学(富山県富山市)

23 Y. Kawaguchi and M. Ueda, "Spin Dynamics of a fragmented spinor BEC", Bose-Einstein Condensation 2011; Frontiers in Quantum Gases, 2011年9月15日, Sant Feliu de Guixols (Spain)

24 Y. Kawaguchi, "Spin Dynamics and Pattern Formation of a Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate", 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011年8月12日, Beijing (China)

25 Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda, "Spontaneous Magnetic Ordering in a Ferromagnetic Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate", ERATO Macroscopic Quantum Control Conference

on Ultracold atoms and molecules, 2011年1月24日, 東京大学(東京都文京区)

26 Y. Kawaguchi, "Quantum Ferrofluid: Bose-Einstein Condensate of Tiny Magnets", 7th Japanese-German Frontiers of Science Symposium, 2010年11月12日, Potsdam, (Germany)

27 Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda, "Spin Dynamics in Spinor Dipolar BECs", 2010 SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures(NW10) Minisymposium: Bose-Einstein Condensation: Modelling, Analysis and Simulation, 2010年8月16日, Philadelphia(USA)

28 Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda, "Spin Dynamics in Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates", International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems, 2010年8月3日, 東京大学駒場キャンパス(東京都目黒区)

29 Y. Kawaguchi and M. Ueda, "Symmetry classification of the ground states of a spin-3 spinor Bose-Einstein condensate", 19th International Laser Physics Workshop, 2010年7月6日, Foz do Iguazu (Brazil)

他19件

〔図書〕(計 1件)

Y. Kawaguchi and M. Ueda, "Understanding Quantum Phase Transitions", Ed. L. D. Carr, Taylor and Francis, 2011.

Cp.10 "Topological Excitations in Superfluids with Internal Degrees of Freedom" (pp. 241-264)を執筆.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rover.nuap.nagoya-u.ac.jp/kawaguchi/indexJ.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川口 由紀 (KAWAGUCHI, Yuki)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00456261