

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740149

研究課題名(和文) 銀河系中心部における磁気浮上ループの観測的研究

研究課題名(英文) An observational study of the Magnetically floating loops in the Galactic center

研究代表者

鳥居 和史 (TORII, KAZUFUMI)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：20444383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、銀河系中心部に発見された磁気浮上ループの統一的な理解の確立を目的とする。まず銀河系中心部の広域のCO輝線観測を実施し、磁気浮上ループを詳細に同定した。結果、10本以上の新たなループを発見すると共に、多数の高銀緯フィラメント、分子雲ハローの存在が明らかにした。また、銀河系中心部の二重らせん星雲に付随する分子雲成分を検出し、中心部巨大ブラックホールからの磁気ジェットに由来することを示した。磁気浮上ループが周辺環境に与える影響として、衝撃波によるダストの破碎、宇宙線陽子の加速があることを示した。以上は、磁気浮上ループが銀河系中心部の状態・進化に強い影響を及ぼすことを示す新しい結果である。

研究成果の概要(英文)：The present study aims to establish the understanding of the Galactic center magnetically floating loops. We carried out detailed and large scale molecular observations toward the Galactic center to identify individual magnetic loops, resulting discoveries of a dozen new loops, many vertically elongated filaments and molecular halo. In addition, we found the molecular counterparts of the Double Helix Nebula likely supported by the strong magnetic field, using the observed data sets, and discussed that the DHN was formed as the result of the magnetic jet emitted from the super massive black hole in the Galactic center "Sgr A\*". The impacts on the surrounding medium by the magnetic loops were also studied; e.g., Destructive effects on the small scale grains, and acceleration of the cosmic-ray proton by the second order of the Fermi acceleration, strongly indicating that the magnetically floating loops provide significant impacts on the environment and evolution of the Galactic center.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：銀河系中心部 電波天文学 磁気流体力学 星間物理学

1. 研究開始当初の背景

(1) 銀河の中心部に対する理解は銀河の進化を理解する上で重要である。我々の銀河系の中心部は円盤部と大きく異なる環境(圧力、運動、磁場)を持ち、銀河の主成分たる恒星の形成過程も大きく異なると考えられる。銀河系中心部の特徴的な構造・性質は中心 1kpc の範囲内に広がっているが、研究は主に中心 300pc の Central Molecular Zone (CMZ) を中心に実施されており、この点で、銀河系中心部の大局的理解に欠けがあると懸念があった。

(2) 2006 年、我々は中心から約 700pc の位置に 2 本の高さ 200pc の巨大なループ状の分子雲(ループ 1、2)を発見し、銀河系中心部の強い磁場・強い重力に駆動されたパーカー不安定性による磁気浮上ループであると提案した(Fukui et al. 2006, Science, 314, 5796, 106; Torii et al. 2010b, PASJ, 62, 1307 他)。磁気浮上ループは普遍的な現象であるため、銀河系中心部に数多くのループが埋もれている可能性が高い。また、磁気浮上ループは kpc の規模で衝撃波を伴い分子雲を駆動するため、磁気浮上ループが周辺環境へ与える影響の調査も重要な課題であり、現在までに根元領域での強い衝撃波の存在が明らかにされている(Torii et al. 2010a, PASJ, 62, 675 など)。

2. 研究の目的

本研究では 2006 年からの一連のループ 1、2 の研究を受け、銀河系中心部半径 1 kpc 以内における磁気浮上ループの分布を明らかにすると共に、その物理状態を詳細に調べることで、分子雲ループの形成・進化モデルを確立することを目指す。これにより、銀河系中心部の大局的な分子雲の動力学を解明し、それらを母体とする星形成を解明するための端緒とすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 南米チリ、アタカマ高地に設置されている名古屋大学の NANTEN2 望遠鏡を用い、115 GHz の CO 分子の J=1-0 回転遷移輝線の観測を、中心部広域 2kpc に対し実施する。この結果を用い、磁気浮上ループの候補天体をリストアップする。

(2) CMZ に対し CO J=2-1 輝線(230 GHz)を用いた詳細観測を実施する。計画(1)の半分の分解能で実施可能であり、狭い範囲により複雑な成分が集中する CMZ におけるループ研究に力を発揮する。また、CO J=1-0 輝線の強度と比較することで、分子雲の温度・密度の推定が可能となり、ループに誘発された衝撃波の影響を探ることができる。

計画(1) および(2)から得られた広域詳細データは磁気浮上ループにとらわれずに解析を実施し、銀河系中心部広域の新たな理解を提示することを心がける。

(3) (1)および(2)から同定されたループを

中心とする個々の成分に対し追観測も含めた詳細解析を実施する。その成分自体の性質を明らかにするだけでなく、周辺環境、さらには銀河系中心部全体にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

(4) 磁気浮上モデルの確立に際し、磁場強度は基本的情報を与えるが、銀河系中心部では長らくこの数値が不明であった。これを 1665MHz および 1667MHz の OH 分子吸収線のゼーマン効果の直接観測により、世界ではじめて明らかにする。

以上をとおり、銀河系中心部における分子雲ループの全体像とその形成・進化の由来、加えて銀河系中心部分子雲の大局的な運動状態を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 2012 年~2013 年にかけて、銀経 ±10 度、銀緯 ±1 度の範囲に対し、<sup>12</sup>CO と同位体である <sup>13</sup>CO の J=1-0 輝線の観測を完遂した(計画 1)。このデータを用い、特にガスが複雑に分布している銀経正方向に対し磁気浮上ループの探査を行い、およそ 10 個の候補天体を同定した(臼井他日本天文学会 2014 年春季年會)。結果、ループの分布が銀経の正方向・負方向で非対称であることを明らかにした。この結果は、町田らによる 3 次元数値計算を指示する結果であり(Machida et al. 2009, PASJ, 61, 411)、銀河系中心部で磁気流体力学の効果が大きく作用していることを示すものである。また、銀経正方向では、ループの根元部分によりガスがたまっている傾向があり、これはガスの落下が長期間続いている = より年老いたループであることを

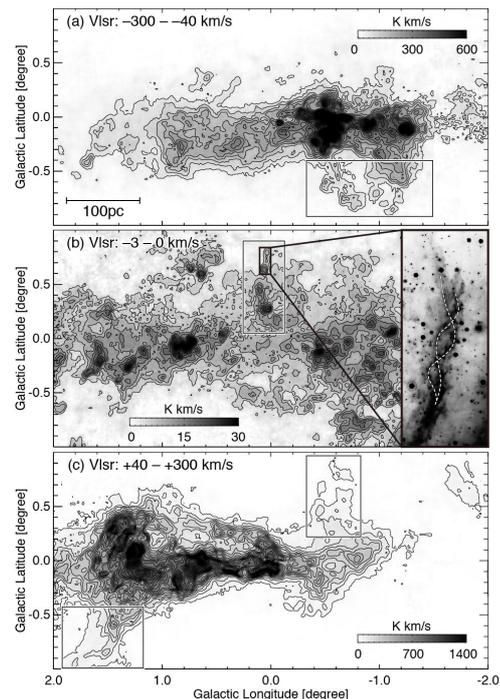


図 1: CMZ の CO J=2-1 分布。3 つの異なる速度範囲を (a)~(c) に示した。図 (b) 右は DNH の赤外線の写真。

示唆している。この結果も町田らの数値計算と一致する。

(2) 2011年~2012年に、CMZのCO J=2-1輝線観測を完了した(計画2)。この結果、CMZの南北方向に多くの高く伸び上がった構造を検出した(図1)。これらの多くは磁気浮上ループと解釈できる(図1a、図1c)。一方、図2bの中央に見られる成分は、Double Helix Nebula = DHN(二重らせん星雲)への付随が判明した。

DHNはMorris et al. 2006, Nature, 440, 308によって発見され、銀河系中心部の巨大ブラックホールSgr A\*周囲のガス円盤による形成が提案されていたが、赤外線観測だけでは速度が分離できず詳細は不明であった。今回、我々の観測によりDHNに付随する成分が明らかとなり、またこの付随分子雲がSgr A\*方向に根を持つ柱状の構造をしていることから、巨大ブラックホールとの関連が強く示唆された(図2a; Enokiya, Torii et al., 2014, ApJ, 780, 72)。

また、アメリカのCSOおよびオーストラリアのMopra望遠鏡を用い、DHNへの高分解能観測をCO J=1-0, J=2-1輝線で実施することで(図2b-c)、付随分子雲の詳細な分布と速度構造を世界ではじめて明らかにした(Torii et al. 2014, ApJ, 印刷中)。また、CO J=2-1/J=1-0輝線強度比から、DHN付随分子雲がおよそ30Kと加熱されていることが分かった(円盤部の典型的な分子雲の温度は10K)。これはCMZ分子雲の典型的な温度であるが、一方、この高温状態はCMZの長年の謎のひとつであった。本観測の結果から、この高温は星からの紫外線加熱か、高い宇宙線密度による過熱か、どちらかであると考えられる。この結果は、低銀緯領域にあるCMZ本体領域においても示唆に富む結果である。

以上の結果から、我々はこのDHNがSgr A\*の過去の活動性による磁気ジェットの残骸

であると提案した。これは巨大ブラックホールの活動性を知る非常に有意義な手がかりである。また、この結果は、磁気浮上ループ以外にも銀河系中心部には高く浮かび上がる構造が存在し、それらの研究を通じて銀河系中心部そのものを理解する手がかりを与えることができるという点で重要である。

(3) 計画(1)および(2)で得られたデータを元に、CMZの高銀緯領域(|銀緯|>0.5度)に薄く広がった分子雲ハローが存在することを明らかにした(Torii et al. 2011, The Emerging, Multi-Wavelength Picture of the Galactic Center Environment)。このハロー成分はCMZの本体とは明らかに不連続な分布を持つ一方、質量でCMZの1割相当にも及ぶ。速度構造解析の結果、このハローはCMZの主要な大質量星形成領域とは無関係であることが分かった。この結果は、近年注目されているCMZの星形成活動による円盤垂直方向へのフィードバック効果とは矛盾する結果である(Crocker et al. 2011, MNRAS, 411, 11など)。他にこのような大規模かつ広範な高銀緯成分の起源としては、磁気浮上ループが考えられる。実際、これらハローと計画(2)から明らかになった磁気浮上ループ候補の速度分布は一致している。これは、磁気浮上ループは固まった分子雲構造だけでなく、薄く広がったガスも同時に形成することを意味する新しい結果である。研究(1)-(3)については、名古屋大学の大学院生 榎谷玲依氏、臼井僚氏、また名古屋大学教授 福井康雄氏を主とする共同研究として実施した。大学院生の両名については私の指導の下で実施した。

(4) 日本の赤外線天文衛星あかりによるループ1、2の観測から、ループの根元部分で微細なダスト(微粒子)成分の破壊が見られた(Kaneda et al. 2012, PASJ, 64, 25)。これはTorii et al. 2010aにおける根元部分での非常に強い衝撃波の存在を裏付けるものであり、磁気浮上ループが銀河系中心部似広く分布する衝撃波領域と乱流構造を励起することを裏付けるものである。この研究は名古屋大学の金田英宏教授との共同研究として実施した。

(4) 銀河系中心部でのゼーマン効果の測定を困難にしているのは、銀河系中心部特有の分子雲の大速度分散に起因する、輝線プロファイルの複雑な形状である。これをクリアするために、本計画では2008年にアメリカのGBT望遠鏡を用いて得たOH吸収線の広域観測のデータを用い、よりシンプルでゼーマン効果の検出に適切な領域を選択し、そこに対し、アメリカのEVLA干渉計を用いた偏波観測を実施した。スペクトルに対し偏波観測を実施できる観測装置は世界的にも少なく、EVLAは2013年度から本格的に運用が開始された。

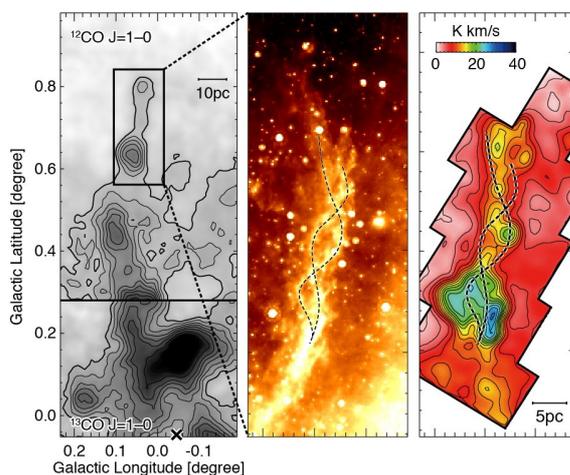


図2 : (a) NANTEN2 CO J=1-0輝線の分布。銀緯=0.3度を境に上が<sup>12</sup>CO,下が<sup>13</sup>COを示す。(b) DHNの赤外線の写真(Morris et al. 2006)。(c) CSO望遠鏡で取られたDHN方向のCO J=2-1分布。点線はDHNのらせん構造を示す。

我々はこの EVLA に対し CMZ の Sgr B2 領域周辺の 0.5 度の範囲の偏波観測を提案し、2013 年、観測が実施された。現在、データ運搬が完了し、解析を進めている。この結果を元に、銀河系中心部の磁場強度が世界ではじめて明らかになると期待される。本研究はアメリカの UCLA 教授 Mark MORRIS 氏との共同研究として実施している。

(5) 銀河系中心部では CMZ に一致する形で広がった TeV ガンマ線の起源に注目が集まっている (Aharonian et al. 2006, Nature, 439, 695)。磁気浮上ループは銀河系中心部の分子雲を駆動し、局所的に衝撃波を励起すると共に分子雲の大きな速度分散=乱流を引き起こすと予想される。ここで、宇宙線の粒子加速にも寄与する可能性がある。そこで、本研究では、まず CMZ の分子雲の乱流状態が粒子加速およびガンマ線放射にどのような影響を与えるかを理論と観測の両面から検証した。

理論研究は現東京大学助教の天野孝伸氏との共同研究として実施した。結果、銀河系中心部の分子雲乱流のパラメータを用いた解析から、フェルミ 2 次加速により宇宙線陽子が 100TeV まで加速可能であることが示された。(Amano et al. 2011, PASJ, 63L, 63)。

また、観測面では、CMZ からやや浮いた領域にある HESS J1745-303 に着目し、NANTEN2 で取られた CO 輝線データに原子ガス (HI) データを含めた解析を実施し、ガンマ線分布と星間プロトン分布が一致していること、つまり、TeV ガンマ線の起源は、加速された宇宙線陽子と分子 (原子) 雲中の星間プロトンとの衝突であることを示した (Hayakawa et al. 2011, PASJ, 64, 8)。本研究は名古屋大学の研究員 早川貴敬氏との共同研究として実施した。

以上の 2 つの結果は、銀河系中心部の乱流により宇宙線陽子が加速され、その結果、ガンマ線を放射することを示唆するものである。今後、さらに磁気浮上ループの分布と比較することで、ループのこの現象への関与を調査することが重要である。

以上、全ての結果を以下にまとめる。

- (1) 銀河系中心部の広範な CO J=1-0, J=2-1 輝線観測を実施し、多数の磁気浮上ループ候補天体を同定し、これが理論数値計算の結果とも一致することを示した。
- (2) 得られた CO J=2-1 輝線を元に、CMZ の浮上成分を解析した結果、特異な磁場構造である二重らせん星雲 (DHN) に付随する成分を発見し、詳細な追観測の結果、これが巨大ブラックホール Sgr A\* からの磁気ジェットの残骸であることを示した。
- (3) また、磁気浮上ループの新たな性質として薄く広がった分子雲構造を形成す

ることを発見した。

- (4) 赤外線観測の結果から磁気浮上ループの根元部分で強い衝撃波が存在することが裏付けられ、磁気浮上ループによる周辺環境への影響が明らかになった。
- (5) 銀河系中心部の磁場強度の解明に向け、ゼーマン効果の観測を EVLA 干渉計により実施した。
- (6) 銀河系中心部の分子雲の乱流が宇宙線陽子を加速すると共に、広がった TeV ガンマ線を放射することを示す結果を得た。
- (7) 以上により、磁気浮上ループの銀河系中心部広域の分布を明らかにすると共に、その形成により周辺環境へと及ぼされる影響が詳細に明らかになった。今後さらに個別の要素について理論との詳細な比較や、新たな高分解能観測の実施により、詳細に明らかにすることが重要である。

## 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 8 件)

Kazufumi TORII et al. "Detailed molecular observations toward the Double Helix Nebula" 2014, ApJ, 査読有, 印刷中

Rei ENOKIYA, Kazufumi TORII et al. "Discovery of Possible Molecular Counterparts to the Infrared Double Helix Nebula in the Galactic Center" ApJ, 査読有, 2014, 780, 72, DOI: <http://10.1088/0004-637X/780/1/72>

Yasuo FUKUI, Akiko OHAMA, Yoichiro HANAOKA, Naoko FURUKAWA, Kazufumi TORII et al. "Molecular Clouds toward the Super Star Cluster NGC 3603 Possible Evidence for a Cloud-Cloud Collision in Triggering the Cluster Formation" 2014 ApJ, 査読有, 780, 36, DOI: <http://10.1088/0004-637X/780/1/36>

Hidehiro KANEDA, Daisuke ISHIHARA, Akio MOURI, Shinki OYABU, Mitsuyoshi YAMAGISHI, Toru KONDO, Takashi ONAKA, Yasuo FUKUI, Akiko KAWAMURA, Kazufumi TORII "Processing of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Molecular-Loop Regions near the Galactic Center Revealed by AKARI" PASJ, 査読有, 64, 25, DOI: <http://10.1093/pasj/64.2.25>

Takahiro HAYAKAWA, Kazufumi TORII, Rei ENOKIYA, Takanobu AMANO, Yasuo FUKUI, "Molecular

and Atomic Gas toward HESS J1745-303 in the Galactic Center: Further Support for the Hadronic Scenario”, ApJ, 査読有, 64, 8, DOI: <http://10.1093/pasj/64.1.8>

Takanobu AMANO, Kazufumi TORII, Takahiro HAYAKAWA, Yasuo FUKUI, “Stochastic Acceleration of Cosmic Rays in the Central Molecular Zone of the Galaxy” PASJ, 査読有, 63L, 63, DOI: <http://10.1093/pasj/63.6.L63>

Kazufuku TORII, Rei ENOKIYA, Hidetoshi, SANO, et al. “Molecular Clouds in the Trifid Nebula M20: Possible Evidence for a Cloud-Cloud Collision in Triggering the Formation of the First Generation Stars” ApJ, 査読有, 2011, 738, 46, DOI: <http://10.1088/0004-637X/738/1/46>

Kazufumi TORII, Yasuo FUKUI, Natsuko KUDO et al. “Molecular Loops in the Galactic Center: Detailed Observations of the Footpoint of the Loops” 2011, Proceedings of a workshop held at Shanghai, China on October 19-23, 査読無, 2009. Edited by Mark R. Morris, Q. Daniel Wang, and Feng Yuan. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2011, p.71 DOI:無し

[学会発表](計 20 件)

国際会議

Kazufumi TORII et al. “High mass star formation in M20 triggered by cloud-cloud collisions” The Impact of Galactic Structure on Star Formation, 査読無, Sapporo, Japan, February, 2014 (口頭発表)

Kazufumi TORII et al. “Detailed Distributions of the CO J=2-1/J=1-0 Intensity Ratios towards a Large Area of the Central Molecular Zone” IAU 303 Symposium - The Galactic Center: Feeding and Feedback in a Normal Galactic Nucleus, 査読無, Santa Fe, USA, September, 2013 (ポスター発表)

Kazufumi TORII et al. “High mass star formation in M20 triggered by cloud-cloud collision” The National Astronomy Meeting of the Royal Astronomical Society, 査読無, St. Andrews, UK, July, 2013 (口頭発表)

Kazufumi TORII et al. “A new CO survey of the nearby galaxies with NANTEN2” The National Astronomy Meeting of the Royal Astronomical Society, 査読無, St. Andrews, UK, July, 2013 (ポスター発表)

Kazufumi TORII et al. “Molecular

observations of the Spitzer bubbles: High-mass star formation via cloud-cloud collision” Workshop “Cloud collisions and triggered high-mass star formation”, Nagoya University, Japan, December, 2012 (口頭発表)

Kazufumi TORII et al. “Triggered star formation via cloud-cloud collision” Global COE program “Quest for Fundamental Principles in the Universe” Annual Meeting, 査読無, Nagoya University, Japan, March, 2011 (口頭発表)

Kazufumi TORII et al. “Large scale sensitive CO observations of the CMZ with NANTEN2” The Emerging, Multi-wavelength Picture of the Galactic Centre Environment, Max-Planck Haus, Germany, December, 2011 (口頭発表)

Kazufumi TORII et al. “Dark Gas: A New Possible Link Between Low And High-Energy Phenomena” IAU Symposium 284: SED2011, the University of Central Lancashire, UK, September, 2011 (口頭発表)

国内会議

鳥居和史他 “銀河系中心部いて座 A 領域南の高銀緯・高速度分子雲の発見” 日本天文学会 2014 年春季年会, 査読無, 国際基督教大学, 2014 年 3 月(口頭発表)

臼井僚, 古橋絵利, 榎谷玲依, 鳥居和史他 “銀河系中心部銀経正方向の分子雲ループ探査” 日本天文学会 2014 年春季年会, 査読無, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 (口頭発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “銀河系中心部いて座 A 領域南の高銀緯・高速度分子雲の発見” 日本天文学会 2014 年春季年会, 査読無, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 (口頭発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “NANTEN2 の広域観測による Central Molecular Zone の詳細解析 3” 日本天文学会 2013 年秋季年会, 査読無, 東北大学, 2013 年 9 月 (口頭発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “NANTEN2 の広域観測による Central Molecular Zone の詳細解析 2” 日本天文学会 2013 年春季年会, 査読無, 埼玉大学, 2013 年 3 月 (口頭発表)

鳥居和史他 “分子雲衝突によって誘発された大質量星形成 1: 全体像” 日本天文学会 2012 年秋季年会, 査読無, 大分大学, 2012 年 9 月 (口頭発表)

鳥居和史他 “NANTEN2 を用いた銀河面サーベイ計画” 天の川銀河研究会, 査読無, 2012 年 9 月 (口頭発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “NANTEN2 の広

域観測による Central Molecular Zone  
の詳細解析” 日本天文学会 2012 年秋季  
年会, 査読無, 大分大学, 2012 年 9 月  
(口頭発表)

鳥居和史他 “三裂星雲 M20 に付随する  
分子雲: 分子雲衝突による大質量星形  
成” 日本天文学会 2012 年春季年会, 査  
読無, 龍谷大学, 2012 年 3 月(口頭発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “銀河系中心部  
の Double Helix Nebula に付随する分子  
雲の発見 2 ” 日本天文学会 2012 年春季  
年会, 査読無, 龍谷大学, 2012 年 3 月  
(口頭発表)

早川貴敬, 鳥居和史他 “銀河系中心  
CMZ の TeV 線天体と分子雲・原子雲の  
比較” 日本天文学会 2011 年秋季年会,  
査読無, 鹿児島大学, 2011 年 9 月(口頭  
発表)

榎谷玲依, 鳥居和史他 “銀河系中心部  
の Double Helix Nebula に付随する分子  
雲の発見” 日本天文学会 2011 年秋季年  
会, 査読無, 鹿児島大学, 2011 年 9 月  
(口頭発表)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鳥居 和史 (TORII, Kazufumi)  
名古屋大学・大学院理学研究科・研究員  
研究者番号: 20444383