

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244010

研究課題名(和文) 2次元クーロンポテンシャルによって相互作用する無限粒子系の確率幾何と確率力学

研究課題名(英文) Stochastic geometry and dynamics of infinite particle systems interacting with two-dimensional Coulomb potential

研究代表者

長田 博文 (Osada, Hirofumi)

九州大学・数理学研究院・教授

研究者番号：20177207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,900,000円

研究成果の概要(和文)：統計物理に典型的に現れるような、対称性を持つ無限次元確率微分方程式を解く一般論を構築した。特に、解のパスワイズ一意性や強解の存在を、非常に一般的な枠組みで証明した。これは、新規な方法であり、配置空間の末尾事象をあたかも、無限次元確率微分方程式の境界条件のように見做し、それが平衡分布に関して自明であることが強解の存在を意味することを示した。無限次元確率微分方程式に対して、末尾事象が自明である状況の下で、確率1となる集合が一意であるとき、パスワイズ一意性が成り立つことを証明した。

この結果は、ランダム行列理論に現れる対数関数を干渉ポテンシャルとしてもつ無限次元確率微分方程式にも有効である。

研究成果の概要(英文)： We establish a general theory for solving infinite-dimensional stochastic differential equations (ISDE) with symmetry typically appearing in statistical mechanics. In particular, we prove the pathwise uniqueness and the existence of the strong solution under a very general framework. This method is novel, and regards the tail sigma field of the configuration space as a boundary of the ISDE. Furthermore, if the tail sigma field is trivial, then a strong solution exists. If the set of probability-one events is unique, then the pathwise uniqueness of solution holds.

The method is effective for the ISDE with logarithmic interaction potentials, which appear in random matrix theory.

研究分野：確率論

キーワード：無限粒子系 確率力学 確率幾何 ランダム行列 クーロンポテンシャル 行列式点過程 無限次元確率微分方程式 干渉ブラウン運動

1. 研究開始当初の背景

研究開始時は、無限次元確率微分方程式で、特に干渉ブラウン運動と呼ばれる対称性の高い方程式のクラスに関して、ディリクレ形式を用いた幾何的な手法を開発していた。この時点で、2次元空間のクーロンポテンシャルで相互作用して運動する「Ginibre 干渉ブラウン運動」を典型的な例として含んでいた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2次元クーロンポテンシャル(対数関数)によって相互作用する1次元および2次元空間の無限粒子系の確率幾何的および力学的性質を研究することである。

3. 研究の方法

研究代表者1名、研究分担者4名、連携研究者4名および研究協力者2名により研究組織を構成する。研究集会「大規模相互作用系の確率解析」、「無限粒子系、確率場の諸問題」および「確率論シンポジウム」以上の中核をなす研究集会を、それぞれ毎年開催する。前2者は研究テーマに応じた中規模の研究集会、最後は、広く確率論の話題に関する大規模な研究集会で、分野横断的に講演者を募り、当研究課題の成果を多数の確率論研究者に伝えると共に、他のテーマから刺激を受け当該研究の進展に繋げることを目的とする。

4. 研究成果

対称性をもつ無限次元確率微分方程式に関して、強解の存在とパスワイズ一意性を証明する新しい手法を開発した。この手法は、この種の無限次元方程式を有限次元の方程式で「両立性」を持つものと等価であり、無限次元方程式の解のパスワイズ一意性と強解存在という問題が、方程式の解の(パス空間の粒子のラベルについての)末尾事象の自明性と同値であり、その自明性の解析に話が帰着すること、更に、解の自明性は、合理的な仮定の下で、確率力学の背後にある点過程の空間の無限遠方に関する末尾事象の自明性という幾何的な条件に帰着する、というものである。更に、今回目標にしているクーロンポテンシャルと深い関係がある行列式点過程について、連続空間の行列式点過程は、すべて末尾事象が自明であることを証明した。そのことにより、Ginibre 干渉ブラウン運動や Airy 干渉ブラウン運動といった典型例に対して、無限次元確率微分方程式の強解の存在とパスワイズ一意性を証明した。無論、これらは例に過ぎずこの一般論の適用範囲は広大である。

理論の応用として1次元の典型例である Airy や Dyson 干渉ブラウン運動に関して、時空間相関関数の表現によって代数的に得られていた無限次元確率力学と、確率解析を用いて構成した確率力学が一致することを証明した。

対称性のある無限次元を扱う上で、適切な良い有限次元の列(スキームと呼ぶが)を構成し、証明するという手法は、きわめてロバストで、今後様々な形で発展させていけると思われ、実際、ジャンプタイプの無限次元確率力学に対しても応用されてきている。確率場に関して、今回の研究が契機になり Ginibre 点過程の縮約 Palm 測度に関するディコトミーという新しい現象を発見した。この結果は、ランダム行列に典型的に現れる点過程に共通すると思われ、海外の研究者によってその一般化がなされている。

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74件)

- 1 H.Osada, H.Tanemura, Strong Markov property of determinantal processes with extended kernels, *Stochastic Process. Appl.*, 126, 2016, 186-208, 査読有, DOI:10.1016/j.spa.2015.08.003
- 2 H.Osada, T.Shirai, Absolute continuity and singularity of Palm measures of the Ginibre point process, *Probab. Theory Related Fields* 165, no.3-4, 2016, 725-770, 査読有, DOI:10.1007/s00440-015-0644-6
- 3 R. Honda, H.Osada, Infinite-dimensional stochastic differential equations related to Bessel random point fields, *Stochastic Processes and their Applications*, 125, 2015, 3801-3822, 査読有 DOI:10.1016/j.spa.2015.05.005
- 4 T.Funaki, Lectures on random interfaces. SpringerBriefs in Probability and Mathematical Statistics. Springer, Singapore, 2016. xii+138 pp, 査読有,
- 5 E.Bolthausen, T.Chiyonobu, T.Funaki, Scaling limits for weakly pinned Gaussian random fields under the presence of two possible candidates, *J. Math. Soc. Japan* 67, no.4, 2015, 1359-1412, 査読有, DOI:10.2969/jmsj/06741359
- 6 T.Funaki, J.Quastel, KPZ equation, its renormalization and invariant measures, *Stoch. Partial Differ. Equ. Anal. Comput.* 3, no.2, 2015, 159-220, 査読有, DOI:10.1007/s40072-015-0046-x
- 7 T.Funaki, M.Ohnawa, Y.Suzuki, S.Yokoyama, Existence and uniqueness of solutions to stochastic Rayleigh-Plesset equations, *J. Math. Anal. Appl.*, 425, 2015, 20-32, 査読

- 有, DOI:10.1016/j.jmaa.2014.12.018
- 8 Boukhadra, T.Kumagai, P.Mathieu, Harnack inequalities and local central limit theorem for the polynomial lower tail random conductance model, *J. Math. Soc. Japan* 67, no.4, 2015, 1413-1448, 査読有, DOI:10.2969/jmsj/06741413
 - 9 Z.-Q.Chen, P.Kim, T.Kumagai, Corrigendum to "Global heat kernel estimates for symmetric jump processes". *Trans. Amer. Math. Soc.* 367, no.10, 2015, 7515, 査読有, <https://doi.org/10.1090/tran/6766>
 - 10 Z.-Q.Chen, D.A.Croydon, T.Kumagai, Quenched invariance principles for random walks and elliptic diffusions in random media with boundary, *Ann. Probab.*, Vol. 43, No.4, 1594-1642, 2015, 査読有, DOI:10.1214/14-AOP914
 - 11 K. Bogdan, T.Kumagai, M. Kwasnicki, Boundary Harnack inequality for Markov processes with jumps, *Trans. Amer. Math. Soc* 367, no.1, 2015, 477-517, 査読有, DOI:10.1090/S0002-9947-2014-06127-8
 - 12 T.Shirai, Trinh Khanh Duy, The mean spectral measures of random Jacobi matrices related Gaussian beta ensembles, *Electron. Commun. Probab.* 20, no.68, 13 pp., 2015, 査読有, DOI:10.1214/ECP.v20-4252
 - 13 T.Shirai, Ginibre-type point processes and their asymptotic behavior, *Journal of the Mathematical Society of Japan* 67, no.2, 763-787, 査読有, 2015, DOI:10.2969/jmsj/06720763
 - 14 M.Katori, Elliptic determinantal process of type A, *Probab. Theory Related Fields*, 162, no.3-4, 2015, 637-677, 査読有, DOI:10.1007/s00440-014-0581-9
 - 15 M.Katori, Determinantal martingales and correlations of noncolliding random walks, *J. Stat. Phys.* 159, 2015, 21-42, 査読有, DOI:10.1007/s10955-014-1179-4
 - 16 H.Osada, H.Tanemura, Cores of Dirichlet forms related to Random Matrix Theory *Proc. Japan Acad. Ser. A*, 2014, 145-150, 査読有, DOI:10.3792/pjaa.90.145
 - 17 T.Funaki, Equivalence of ensembles under inhomogeneous conditioning and its applications to random Young diagrams. *J. Stat. Phys.*, 154, 2014, 588-609, 査読有, DOI:10.1007/s10955-013-0841-6
 - 18 T.Shirai, N.Miyoshi, Cellular networks with β -Ginibre configured base stations, *The Impact of Applications on Mathematics, Math.Ind.* 1, 2014, 211-226, 査読有, DOI:10.1007/978-4-431-54907-9_16
 - 19 T.Shirai, N.Miyoshi, A cellular network model with Ginibre configured base stations, *Adv. in Appl. Probab.* 46, no.3, 2014, 832-845, 査読有
 - 20 T.Funaki, Award of the Spring 2014 Prize of the Mathematical Society of Japan to Yukinobu Toda for his work on "Researches on derived categories of algebraic manifolds", *Sūgaku* 66, no.4, 2014, 413-414, 査読有
 - 21 T.Funaki, Award of the Fall 2013 Prize of the Mathematical Society of Japan to Masato Tsujii for his work on "Functional analytic methods in the ergodic theory of differentiable dynamical systems". *Sūgaku* 66, no.2, 2014, 180-181, 査読有
 - 22 Y. Takahashi, M.Katori, Oscillatory matrix model in Chern-Simons theory and Jacobi-theta determinantal point process *J. Math. Phys.* 55, no.9, 2014, 24 pp, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4894235>
 - 23 M.Katori, Determinantal martingales and noncolliding diffusion processes, *Stochastic Process. Appl.* 124, no.11, 3724-3768, 2014, 査読有, <https://doi.org/10.1016/j.spa.2014.06.002>
 - 24 S.Andraus, M.Katori, S.Miyashita, Two limiting regimes of interacting Bessel processes, *J. Math. Phys.* 55, no.9, 2014, 24 pp, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4894235>
 - 25 H.Osada, Interacting Brownian motions in infinite dimensions with logarithmic interaction potentials II: Airy random point fields, *Stochastic Process. Appl.* 123, no.3, 2013, 813-838, 査読有, DOI:10.1016/j.spa.2012.11.002
 - 26 H.Osada, Interacting Brownian motions in infinite dimensions with logarithmic interaction potentials, *Ann. Probab.* 41, no.1, 2013, 1-49, 査読有, DOI: 10.1214/11-AOP736
 - 27 T.Funaki, M.Sasada, M. Sauer, B. Xie, Fluctuations in an evolutionary model of two-dimensional Young diagrams, *Stoch. Proc. Appl.*, 123, 2013, 1229-1275, 査読有, DOI:10.1016/j.spa.2012.12.005
 - 28 T.Kumagai, O.Zeitouni, Fluctuations of recentered maxima of discrete Gaussian Free Fields on a class of

- recurrent graphs. *Electron. Commun. Probab.*, 18, no.75, 2013, 1–12, 査読有, DOI:10.1214/ECP.v18-2632
- 29 D.A.Croydon, A.Fribergh, T.Kumagai, Biased random walk on critical Galton-Watson trees conditioned to survive, *Probab. Theory Relat. Fields*, 157, 2013, 453–507, 査読有, DOI:10.1007/s00440-012-0462-z
- 30 J.-D.Deuschel, T.Kumagai, Markov chain approximations to non-symmetric diffusions with bounded coefficients, *Comm. Pure Appl. Math.* 66, no.6, 2013, 821–866, 査読有, DOI:10.1002/cpa.21447
- 31 Z.-Q.Chen, P.Kim, T.Kumagai, Discrete Approximation of Symmetric Jump Processes on Metric Measure Spaces, *Probab. Theory Relat. Fields* 155, 2013, 703–749, 査読有, DOI:10.1007/s00440-012-0411-x
- 32 S.Matsumoto, T.Shirai, Correlation functions for zeros of a Gaussian power series and Pfaffians, *Electron. J. Probab.* 18, no.49, 2013, 18 pp, 査読有, DOI:10.1214/EJP.v18-2545
- 33 T.Osogami, T.Shirai, H. Waki, Remarks on β -determinants via SDP relaxation, *J. Math-for-Ind.* 5A, 2013, 1–10, 査読有
- 34 M.Katori, H.Tanemura, Complex Brownian Motion Representation of the Dyson Model, *Electron. Commun. Probab.* 18, no.4, 2013, 1–16, 査読有, DOI:10.1214/ECP.v18-2554
- 35 H.Osada, Infinite-dimensional stochastic differential equations related to random matrices, *Probab. Theory Related Fields* 153, no.3-4, 2012, 471–509, 査読有, DOI:10.1007/s00440-011-0352-9
- 36 T.Funaki, H.Izuhara, M.Miura, C.Urabe, A link between microscopic and macroscopic models of self-organized aggregation, *Networks and Heterogeneous Media*, 7, 2012, 705–740, 査読有, DOI:10.3934/nhm.2012.7.705
- 37 T.Funaki, Hydrodynamic limit for the β -interface model via two-scale approach. *Probability in complex physical systems*, 2012, 463–490, 査読有, DOI:10.1007/978-3-642-23811-6_19
- 38 M.T.Barlow, A. Grigor'yan T.Kumagai, On the equivalence of parabolic Harnack inequalities and heat kernel estimates. *J. Math. Soc. Japan*, 64, no.4, 2012, 1091–1146, 査読有, DOI:10.2969/jmsj/06441091
- 39 D.A.Croydon, B.M.Hambly, T.Kumagai, Convergence of mixing times for sequences of random walks on finite graphs, *Electron. J. Probab.*, 17, no.3, 2012, 1–32, 査読有, DOI:10.1214/EJP.v17-1705
- 40 F. Hiroshima, I.Sasaki, T.Shirai, A. Suzuki, Note on the spectrum of discrete Schrödinger operators, *J. Math-for-Ind.* 4B, 2012, 105–108, 査読有, <https://arxiv.org/abs/1209.0522>
- 41 Y. Takahashi, M.Katori, Noncolliding Brownian Motion with Drift and Time-Dependent Stieltjes-Wigert Determinantal Point Process *J. Math. Phys.* 53, 2012, 1–23, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4758795>
- 42 M.Katori, System of complex Brownian motions associated with the O'Connell process, *J. Stat. Phys.* 149, 2012, 411–431, 査読有, DOI:10.1007/s10955-012-0602-y
- 43 M.Katori, Reciprocal Time Relation of Noncolliding Brownian Motion with Drift, *J. Stat. Phys.* 148, 2012, 38–52, 査読有, DOI:10.1007/s10955-012-0527-5
- 44 S.Andraus, M.Katori, S.Miyashita, Interacting particles on the line and Dunkl intertwining operator of type A: application to the freezing regime, *J. Phys. A: Math. Theor.* 45, 2012, 1–26, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1088/1751-8113/45/39/395201>
- 45 M.Katori, Survival probability of mutually killing Brownian motions and the O'Connell process, *J. Stat. Phys.* 147, 2012, 206–223, 査読有, DOI:10.1007/s10955-012-0472-3
- 46 M.Katori, Determinantal process starting from an orthogonal symmetry is a Pfaffian process, *J. Stat. Phys.* 146, 2012, 249–263, 査読有, DOI:10.1007/s10955-011-0372-y
- [学会発表](計48件)
- 1 H.Osada, Random Matrix Theory and Infinite-dimensional Stochastic Differential Equations, School on Algebraic, Geometric and Probabilistic Aspect of Dynamical Systems and Control Theory, 2016.7.8, Trieste (Italy)
- 2 H.Osada, Stochastic dynamics in infinite dimensions related to random matrices, Beta Ensembles: Universality, integrability, and asymptotics, 2016.4.15, Banff (Canada)
- 3 H.Osada, Interacting Brownian motions in infinite dimensions related to

- random matrix theory, 38th Conference on Stochastic Processes and their Applications, 2015.7.14, Oxford (UK)
- 4 H.Tanemura, Infinite-dimensional stochastic differential equations and tail α -fields, 38th Conference on Stochastic Processes and their Applications, 2015.7.14, Oxford (UK)
 - 5 T.Shirai, Persistent homology and minimum spanning acycle for random simplicial complexes, A Midex School and Workshop on Group Representations in Dynamical Systems and Geometry, 2015.7.3, Marseille (France)
 - 6 H.Osada, 無限粒子系の確率力学と幾何, 日本数学会年会, 2015.3.21, 明治大学 (東京都千代田区)
 - 7 H.Osada, Cores of Dirichlet forms related to Random Matrix Theory, 確率論シンポジウム, 2014.12.19, RIMS(京都市)
 - 8 H.Osada, Cores of Dirichlet forms related to random matrix theory, 大規模相互作用系の確率解析, 2014.11.6, 東京大学(東京都文京区)
 - 9 H.Osada, ランダム行列と無限粒子系, 確率論サマースクール, 2014.9.9-9.12, 信州大学(松本市)
 - 10 H.Osada, Infinite dimensional stochastic differential equations arising from random matrix theory I, II, III., UK-Japan stochastic analysis school, 2014.9.1, 9.2, 9.4, Warwick (UK)
 - 11 T.Shirai, Absolute continuity and singularity for the Ginibre point process and its Palm measures, UK-Japan Stochastic Analysis School, 2014.9.1-5. Warwick (UK)
 - 12 H.Osada, Palm resolution and restore density formulae of the Ginibre random point field, 2014.8.16, Seoul ICM, Seoul (Korea)
 - 13 T.Kumagai, Anomalous random walks and diffusions: From fractals to random media with boundary, Seoul ICM, 2014.8.14, Seoul (Korea)
 - 14 H.Osada, Dynamical rigidity of Ginibre interacting Brownian motions, 7th International Conference on Stochastic Analysis and its Applications (7ICSAA), 2014.8.7, Seoul (Korea)
 - 15 T.Kumagai, Heat kernel estimates and local CLT for random walk among random conductances with a power-law tail near zero, ICSAA, 2014.8.6, Seoul (Korea)
 - 16 T.Kumagai, Heat kernel estimates and local CLT for random walk among random conductances with a power-law tail near zero, ASC-IMS 2014 Annual Meeting at Sydney, 2014.7.7, Sydney (Australia)
 - 17 T.Kumagai, Simple random walk on the two-dimensional uniform spanning tree and its scaling limits, 5th Cornell Conference on Analysis, Probability and Mathematical Physics on Fractals, 2014.6.11, Cornell (USA)
 - 18 T.Funaki, To choose a proper minimizer of variational problem derived from microscopic system, Mathematics and its applications to complex phenomena arising in biology, chemistry and medicine, 2014.6.4, Marseille (France)
 - 19 T.Kumagai, Simple random walk on the two-dimensional uniform spanning tree and its scaling limits, Warwick EPSRC Symposium on Statistical Mechanics: Gradient random fields, 2014.5.27, Warwick (UK)
 - 20 H.Osada, Dynamical rigidity of Ginibre interacting Brownian motions, Probability and Mathematical Physics Seminar, 2013.12.6, New York (USA)
 - 21 H.Osada, Strong solutions of infinite-dimensional stochastic differential equations, Probability and Mathematical Physics Seminar, 2013.12.4, New York (USA)
 - 22 H.Tanemura, Strong Markov property of determinantal processes associated with extended kernels, 12th Workshop on Stochastic Analysis on Large Scale Interacting System, 2013.11.21-11.23, 東京大学(東京都目黒区)
 - 23 T.Funaki, KPZ equation, its renormalization and invariant measures, Large Scale Stochastic Dynamics, 2013.10.30, Oberwolfach (Germany)
 - 24 H.Osada, Dynamical rigidity of stochastic Coulomb systems in infinite-dimensions, Random Media, 2013.9.17, Berlin (Germany)
 - 25 H.Osada, Ginibre random point field, Dirichlet Forms and Applications (German-Japanese Meeting on Stochastic Analysis), 2013.9.13, Leipzig (Germany)
 - 26 H.Osada, Infinite-dimensional stochastic differential equations arising from random matrices, The 36th Conference on Stochastic Processes and Their Applications, 2013.8.1, Boulder (USA)
 - 27 H.Tanemura, Strong Markov property of determinantal processes, 36th

- Conference on Stochastic Processes and Their Applications, 2013.7.29-8.2, Boulder (USA)
- 28 H.Osada, Strong solutions of infinite-dimensional stochastic differential equations, Oberseminar Stochastics, 2013.5.13, Bonn (Germany)
- 29 H.Osada, Geometric and dynamical properties of stochastic Coulomb systems in infinite dimensions, Markov chains on graphs and related topics, 2013.2.15, RIMS(京都市)
- 30 T.Kumagai, Fluctuations of recentered maxima of discrete Gaussian Free Fields on a class of recurrent graphs, 2012 Advances on fractals and related topics at CUHK, 2012.12.12, Hong Kong
- 31 H.Osada, Infinitely dimensional stochastic differential equations related to Airy random point fields, Stochastic Analysis and Applications 2012.9.25, 岡山大学(岡山大学)
- 32 H.Osada, Infinite-dimensional stochastic differential equations related to Airy random point fields--soft edge scaling limit, 8th World Congress in Probability and Statistics, 2012.7.7, Istanbul (Turkey)
- 33 H.Osada, Ginibre Random Point Field, The 2nd Institute of Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting, 2012.7.2, 筑波国際会議場(つくば市)
- 34 H.Tanemura, Stochastic differential equations associated with infinite particles with long ranged interaction, Institute of Mathematical Statistics, The World Congress in Probability and Statistics, 2012.6.13, Istanbul (Turkey)
- 35 T.Funaki, Invariant measure for SPDE related to the KPZ equation, Workshop in honor of Herbert Spohn and 11th Probability Day, 2012.6.29, Munchen (Germany)

[図書](計5件)

- 1 T.Funaki, Infinitesimal invariance for the coupled KPZ equations, S'eminare de Probabilit'es XLVII, Lect. Notes Math. vol. 2137, Springer, 2015, 10pp
- 2 M.Katori, Bessel processes, Schramm-Loewner evolution, and the Dyson model. SpringerBriefs in Mathematical Physics, 11. Springer, 2015. x+141 pp
- 3 T.Kumagai, Random Walks on Disordered

Media and their Scaling Limits. Lecture Notes in Mathematics, Vol. 2101, École d'Été de Probabilités de Saint-Flour XL--2010. Springer, 2014, 査読有 147pp

- 4 H.Osada, 確率論ハンドブック, 丸善出版, 2012, 6pp
- 5 T.Funaki, Probability in Complex Physical Systems, Springer, 2012, 28pp

6. 研究組織

(1)研究代表者

長田 博文 (OSADA, Hirofumi)
九州大学・大学院数理学研究院・教授
研究者番号: 201777207

(2)研究分担者

種村 秀紀 (TANEMURA, Hideki)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40217162

舟木 直久 (FUNAKI, Tadahisa)
東京大学・大学院数理科学研究科・教授
研究者番号: 60112174

白井 朋之 (SHIRAI, Tomoyuki)
九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授
研究者番号: 70302932

熊谷 隆 (KUMAGAI, Takashi)
京都大学・数理解析研究所・教授
研究者番号: 90234509

(3)連携研究者

小谷 眞一 (KOTANI, Shinichi)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 10025463

香取 真理 (KATORI, Makoto)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号: 60202016

篠田 正人 (SHINPDA, Masato)
奈良女子大学・理学部・教授
研究者番号: 50271044

乙部 巖己 (OTOBE, Yoshiki)
信州大学・理学部・准教授
研究者番号: 30334882