

平成 30 年 8 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26257208

研究課題名(和文) インドネシア多島海における乱流強度の定量化とその全球気候の形成に果たす役割の解明

研究課題名(英文) Quantification of tidal mixing in the Indonesian Archipelago and its impact on the global climate

研究代表者

日比谷 紀之 (HIBIYA, TOSHIYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：80192714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：インドネシア通過流(ITF)は、インドネシア多島海の海面水温や水塊の性質を大きく変化させることで、海盆規模の気候変動をコントロールすると考えられている。本研究では、高解像度数値実験を実施し、同海域における潮汐混合の定量化を行うとともに、そのITFへの影響を議論した。数値実験の妥当性は、既存の乱流観測との比較・検討を通じて検証した。数値実験の結果、ITFの東流路において海面水温や水塊の性質が著しく変化すること、さらにそれらの変化が多島海内の狭い海峡内で励起された内部潮汐波の碎波に伴う鉛直混合や、直径数キロメートルのサブメソスケール渦に伴う水平混合に起因するものであることなどが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The Indonesia Throughflow (ITF) is thought to induce changes of sea surface temperature (SST) and water-mass transformation in the Indonesian Sea and hence control the basin-scale climate change. In the present study, a high-resolution numerical experiment is carried out to quantify tidal mixing in the Indonesian Archipelago and its effect on the ITF. The validity of the calculated results is confirmed through the comparison with the results of previous microstructure observations. It is shown that significant changes of SST and water-mass transformation occur along the eastern route of the ITF caused by vertical mixing associated with breaking of internal tides near constricted channels as well as horizontal mixing associated with sub-mesoscale eddies with diameters of several kilometers.

研究分野：海洋物理学

キーワード：乱流混合 潮汐流 インドネシア通過流 全球気候 投下式乱流計

1. 研究開始当初の背景

インドネシア多島海は、その真上に熱帯域の大気大循環の心臓部ともいえる深い対流を発達させ、海盆スケールの大気海洋現象を強くコントロールしている。したがって、当該海域における海面水温の時空間分布の解明は、グローバルな気候形成を論じる上で必要不可欠な課題となっている。この海面水温の分布には、モンスーンに伴う風応力、海面熱フラックスとともに、当該海域を太平洋からインド洋へ抜けていくインドネシア通過流(Indonesian Throughflow; ITF)が大きく影響することが推察されているが、多島間での海峡部での強い乱流混合に伴う水塊特性の変化の実体がつかめていないため、海面水温の時空間分布は、未だ把握できていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究は、世界初となるインドネシア多島海の乱流ホットスポットの実地観測を行うことで、この不確定要素を解消し、数値モデルによるインドネシア通過流の現実的な再現を行うとともに、それに伴う海面水温の時空間分布の解明を通じて、インドネシア多島海がグローバルな気候形成に果たす役割を把握することを目的とした。

3. 研究の方法

最初に、インドネシア多島海の高解像度・領域数値モデルに、太平洋とインド洋の水位差によって駆動される一般流(インドネシア通過流: ITF)、潮汐流、モンスーン風、海面熱フラックスなどの外力を与え、「インドネシア通過流の再現の鍵となる乱流ホットスポットの同定」を行う。次に、この数値実験から同定された「鍵となる乱流ホットスポット」を中心に、インドネシア多島海において投下式乱流計 VMP-X を用いた乱流直接観測を実施し、長年謎であったインドネシア多島海における乱流混合の定量的な把握とそれに基づくパラメタリゼーションの定式化を行う。さらに、その情報をインドネシア多島海の領域モデルにフィードバックすることで当該海域における乱流強度の時空間マッピングを行う。最後に、こうして明らかになった乱流ホットスポットの時空間分布をグローバルな海洋大循環モデル/大気海洋相互作用モデルに組み込み、インドネシア多島海がグローバルな気候の形成に果たしている重要な役割を定量的に解明していく。

4. 研究成果

まず、インドネシア多島海において潮汐混合を発生させる要因となる内部潮汐波の励起・伝播・散逸過程を明らかにするため、多島海全域を対象とした高解像度の数値実験を行った。エネルギー収支解析の結果(図1)、内部潮汐波の顕著な励起源がスラウェシ海のサンギへ諸島、スルー諸島周辺海域や、

セラム海、ハルマヘラ海に集中していることが示された。これらの海域で励起された内部潮汐波の一部は励起源直上で散逸し、残りは鉛直低次モードの波として遠距離伝播した後に浅海域で散逸する。このため、多島海域外へ伝播する内部波エネルギーはほとんどなく、励起された内部波の大部分が多島海域内で散逸することが明らかになった。特に、スラウェシ海で発生した内部潮汐波はその伝播途上で内部波ソリトンに発達し、浅海域に到達して大部分のエネルギーを散逸するが、その伝播過程におけるエネルギー散逸も無視できないことがわかった。

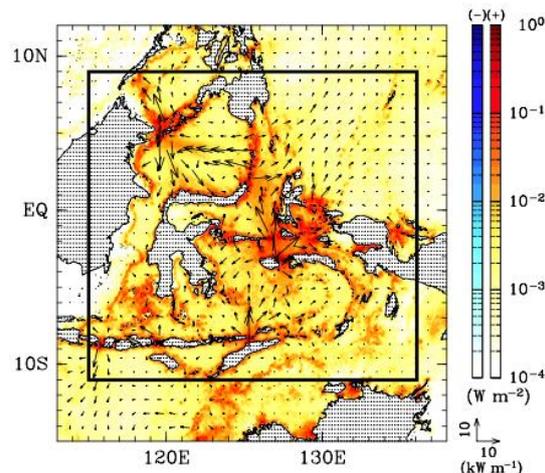


図1: 数値実験により見積もられた内部潮汐波のエネルギーフラックス(ベクトル)とそれに起因するエネルギー散逸率(カラー)の鉛直積分値

次に、エネルギー収支解析から得られたエネルギー散逸率 ε を Osborn (1980) の式に代入することで、インドネシア多島海における潮汐混合の強度分布を見積もった(図2a)。その結果、鉛直拡散係数の特に大きな「乱流ホットスポット」は、セラム海、ハルマヘラ海、スラウェシ海、フローレス海に存在し、特に、それらの海峡部においては $10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 以上もの強い混合が局所的に見られることがわかった。多島海域内における鉛直拡散係数の平均値は $2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ となり、領域平均値の観点からは、鉛直次元バランスやパラメタリゼーション(図2b)を用いた先行研究の推定値と同程度の結果となった。

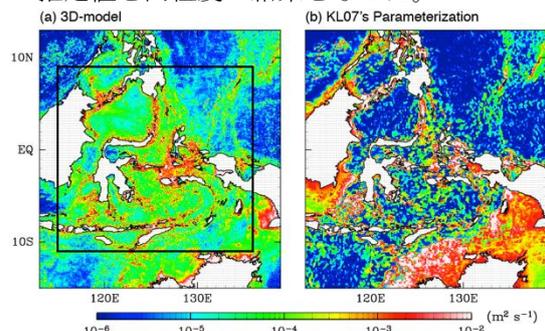


図2: 数値モデル(a)、パラメタリゼーション(b)から見積もられたインドネシア多島海域における水深平均の鉛直拡散係数

さらに、インドネシア多島海域の水塊変成や海面水温(SST)への影響を通じてグローバルな気候変動をコントロールしているインドネシア通過流(ITF)の力学を支配する物理機構について、主に、スーパーコンピュータによる高解像度数値実験を行うことにより調べた。パリ大学(フランス)のPascale Bouruet-Aubertot 博士から提供を受けたINDOMIX プロジェクトによる数地点での乱流直接観測データとも比較・検討(図3)を行った結果、太平洋からインド洋側へ高塩分水を輸送するITFの東ルートにおける水塊変成には、ハルマヘラ海海峡部などで励起された内部潮汐波の碎波による鉛直乱流混合や同海域で励起される直径数キロメートルのサブメソスケール渦による水平乱流混合の重要な役割が示唆された(図4、図5)。

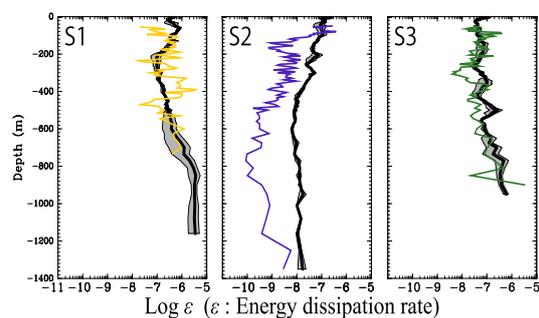


図3: ハルマヘラ海内の3地点におけるエネルギー散逸率の鉛直プロファイル(黒:モデル予測値、カラー:INDOMIXプロジェクトによる乱流直接観測結果)

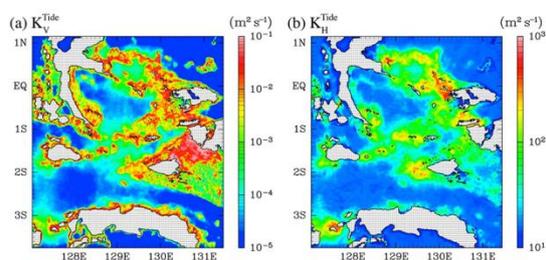


図4: 数値モデルにより見積もられたハルマヘラ海における水深平均の鉛直拡散係数(a)、水平拡散係数(b)の分布図。鉛直、水平拡散ともに、内部潮汐波の碎波や潮汐流と地形との相互作用によるサブメソスケール渦の励起が活発な多島海域で強化されていた。

最後に、この数値実験により示唆されたITF変成の鍵となる乱流ホットスポットを定量化するため、インドネシア国内において備船し、最新の投下式乱流計VMP-Xを用いた海底直上までの大規模な乱流直接観測を計画したが、最終的にインドネシア側の研究機関・研究協力者と備船の時期などに関する調整をつけることができず、残念ながら、観測の実施は次年度以降に見送りとなってしまった。

しかしながら、本研究の成果は、今後、インドネシア多島海域がITFを通じてグローバルな気候変動に果たす役割を議論する上

で、重要な基盤として位置付けることができると。

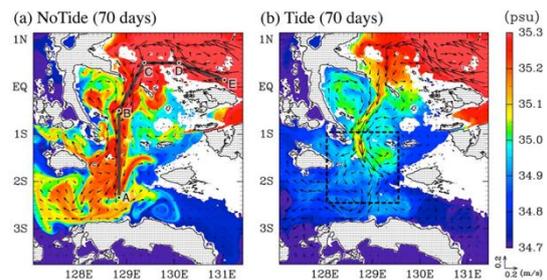


図5: 外力に潮汐を与えていない場合(a)と与えた場合(b)の塩分(カラー)、水平流速(ベクトル)の分布(150 m深)。塩分、水平流速ともに潮汐平均を施している。潮汐を考慮することで水塊が著しく変質していることがわかる。

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16件)すべて査読有

- ① Watanabe, M., and T. Hibiya (2018), A near-inertial current event in the homogeneous deep layer of the northern Sea of Japan during winter, *J. Oceanogr.*, 74, 209-218, doi:10.1007/s10872-017-0451-z.
- ② Endoh, T., D. Inazu, T. Waseda, and T. Hibiya (2018), A parameter quantifying radiation damping of bay oscillations excited by incident tsunamis, *Cont. Shelf Res.*, 157, 10-19, doi:10.1016/j.csr.2018.02.007.
- ③ Ijichi, T., and T. Hibiya (2017), Eikonal calculations for energy transfer in the deep-ocean internal wave field near mixing hotspots, *J. Phys. Oceanogr.*, 47, 199-210, doi:10.1175/JPO-D-16-0093.1.
- ④ Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson (2017), The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *J. Geophys. Res.*, 122, 5645-5651, doi:10.1002/2016JC012564.
- ⑤ Tanaka, Y. and T. Hibiya (2017), Effects of Kosu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the Kuroshio large meander, *J. Phys. Oceanogr.*, 47, 2563-2576, doi:10.1175/JPO-D-17-0050.1.

- ⑥ Nagai, T., T. Hibiya, and P. Bouruet-Aubertot (2017), Non-hydrostatic simulations of tide-induced mixing in the Halmahera Sea: A possible role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters, *J. Geophys. Res.*, 122, 8933-8943, doi:10.1002/2017JC013381.
- ⑦ Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya, and Y. Ohta (2016), Assessment of GNSS-based height of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, *Geosci. Lett.*, 3:25, doi:10.1186/s40562-016-0059-y.
- ⑧ Nishina, A., H. Nakamura, J.-H. Park, D. Hasegawa, Y. Tanaka, S. Seo, and T. Hibiya (2016), Deep ventilation in the Okinawa Trough induced by Kerama Gap overflow, *J. Geophys. Res.*, 121, 6092-6102, doi:10.1002/2016JC011822.
- ⑨ Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki (2015), Downward lee wave radiation from tropical instability waves in the central equatorial Pacific Ocean: A possible energy pathway to turbulent mixing, *J. Geophys. Res.*, 120, 7137-7149, doi:10.1002/2015JC011017.
- ⑩ Ijichi, T., and T. Hibiya (2015), Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 32, 1526-1535, doi:10.1175/JTECH-D-15-0031.1.
- ⑪ Matsuno, T., T. Endoh, T. Hibiya, T. Senjyu, and M. Watanabe (2015), Formation of the well mixed homogeneous layer in the bottom water of the Japan Sea, *J. Oceanogr.*, 71, 441-447, doi:10.1007/s10872-015-0303-7.
- ⑫ Nagai, T., and T. Hibiya (2015), Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, *J. Geophys. Res.*, 120, 3373-3390, doi:10.1002/2014JC010592.
- ⑬ Furuichi, N., and T. Hibiya (2015), Assessment of the upper-ocean mixed layer parameterizations using a large eddy simulation model, *J. Geophys. Res.*, 120, 2350-2369, doi:10.1002/2014JC010665.
- ⑭ Onuki, Y., and T. Hibiya (2015), Excitation mechanism of near-inertial waves in baroclinic tidal flow caused by parametric subharmonic instability, *Ocean Dyn.*, 65, 107-113, doi:10.1007/s10236-014-0789-3.
- ⑮ Falahat, S., J. Nycander, F. Roquet, A. M. Thurnherr, and T. Hibiya (2014), Comparison of calculated energy flux of internal tides with microstructure measurements, *Tellus A*, 66, 23240, doi:10.3402/tellusa.v66.23240.
- ⑯ Niwa, Y., and T. Hibiya (2014), Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions, *Ocean Modelling*, 80, 59-73, doi:10.1016/j.ocemod.2014.05.003.
- [学会発表] (計 106 件)
- ① Ijichi, T., and T. Hibiya: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.
- ② Nagai, T. and T. Hibiya: Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, The 2nd International Symposium on Western Pacific Ocean Circulation - Indonesian Through flow (WPOC-ITF) studies, 2017.
- ③ 伊地知 敬, 日比谷 紀之: 深海における乱流混合係数のパラメータ依存性, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017.
- ④ 小堀 笑理, 日比谷 紀之: 深海底凹凸地形上に形成される乱流ホットスポットに関する理論的・観測的研究, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017.
- ⑤ Hibiya, T., T. Ijichi, and E. Kobori: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, 2017.
- ⑥ Nagai, T., and T. Hibiya: The effects of tidally-induced mixing in the Halmahera Sea on the transformation of the Indonesian throughflow waters, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, 2017.

- ⑦ Ijichi, T., and T. Hibiya: Evaluation of Mixing Coefficients in the Deep Ocean, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ⑧ Nagai, T., and T. Hibiya: Non-hydrostatic simulations of tidally-induced mixing in the Halmahera Sea: A possible role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ⑨ Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson: Revisiting fine-scale parameterizations for enhanced tidal mixing over a rough ocean bottom, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ⑩ Hibiya, T.: What we have learned about deep ocean mixing in the past 20 years (Invited), Munk Centennial May Symposium, 2017.
- ⑪ Hibiya, T.: Revisiting fine-scale parameterizations for enhanced tidal mixing over a rough ocean bottom, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ⑫ Ijichi, T., and T. Hibiya: Estimating mixing efficiency in the deep ocean through microstructure measurements, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ⑬ Nagai, T., and T. Hibiya: The impacts of tidal mixing and sub-mesoscale eddies on the water-mass transformation of the Indonesian Throughflow Biogeochemistry, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ⑭ Shinichiro Kida: Freshwater balance and the impact of tidal mixing in the Indonesian Seas, 8th OFES International workshop, 2017.
- ⑮ Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, The Third Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences (XMAS-III), 2017.
- ⑯ 永井 平, 日比谷 紀之: インドネシア通過流の水塊変成に関する数値的研究, 2016年度海洋乱流研究会, 2017.
- ⑰ 升本 順夫: インド洋熱帯域のスケール間相互作用と分野連携研究, 日本海洋学会 2016年度秋季大会, 2016.
- ⑱ Nagai, T., and T. Hibiya: The impacts of tidal mixing and sub-mesoscale eddies on the water-mass transformation of the Indonesian Throughflow, The 13th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, 2016.
- ⑲ Masumoto, Y., R. R. Hood, N. D'Adamo, R. Sivaramakrishnan, W. Yu, L. Beal, J. Vialard, M. Roberts, and M. Ravichandran: The Second International Indian Ocean Expedition (IIOE-2), The 13th Annual Meeting of the Asia Oceania Geoscience Society, 2016.
- ⑳ Ijichi, T., and T. Hibiya: Eikonal Simulations for Energy Transfer in the Deep-Ocean Internal Wave Field near Mixing Hotspots, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ㉑ Hibiya, T., T. Ijichi, R. Robertson: Numerical Study of the Impacts of Ocean Bottom Roughness and Tidal Flow Amplitude on Abyssal Mixing, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ㉒ Nagai, T., and T. Hibiya: Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ㉓ 木田 新一郎, Kelvin Richards: インドネシア多島海域に降った雨はどこへ行くのか?, 日本海洋学会 2016年度春季大会, 2016.
- ㉔ 永井 平, 日比谷 紀之: 非静力学モデルを用いて再現されたインドネシア通過流 Eastern route の水塊変成過程, 日本海洋学会 2016年度春季大会, 2016.
- ㉕ Ijichi, T., and T. Hibiya: Eikonal simulations for the energy transfer in the deep ocean internal wave field near mixing hotspots, The 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.

- ②⑥ Hibiya, T., R. Robertson, and T. Takagi: Dynamical analysis of the enhanced turbulent mixing over a rough ocean bottom, The 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.
- ②⑦ Masumoto, Y., A. Tsuda, K. Ando, and I. Ueki: Observations and Modeling Research Activities in Japan for EIOURI and IIQE-2, International Symposium on the Indian Ocean "Dynamics of the Indian Ocean: Perspective and Retrospective", 2015.
- ②⑧ Masumoto, Y., W. Yu, and R. Hood: Eastern Indian Ocean Upwelling Research Initiative (EIOURI) -A flagship project of IIQE-2-, International Symposium on the Indian Ocean "Dynamics of the Indian Ocean: Perspective and Retrospective", 2015.
- ②⑨ Nagai, T., and T. Hibiya: Effects of tidally induced eddies on sporadic Kuroshio-water intrusion (Kyucho), The 12th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, 2015.
- ③⑩ Onuki, Y., and T. Hibiya: Estimates of the attenuation rates of baroclinic tidal waves caused by resonant interactions with the background internal wave continuum, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, 2015.
- ③⑪ Nagai, T., and T. Hibiya: Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian archipelago, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, 2015.
- ③⑫ Hibiya, T., and T. Takagi: Assessment of parameterization of enhanced turbulent mixing over rough topography in the abyssal ocean, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, 2015.
- ③⑬ Ijichi, T., and T. Hibiya: Frequency-based correction of fine scale parameterization of turbulent dissipation in the ocean interior, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, 2015.
- ③⑭ Masumoto, Y., W. Yu, and R. Hood: Eastern Indian Ocean Upwelling Research Initiative (EIOURI), The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, 2015.
- ③⑮ 横田 華奈子, 日比谷 紀之: 乱流ホットスポット域における海洋内部波スペクトル構造の歪みの評価, 日本海洋学会 2015 年度春季大会, 2015.
- ③⑯ 日比谷 紀之: VMP-5500 を用いた深海乱流の観測的研究, 日本海洋学会 2015 年度春季大会シンポジウム 「海洋乱流測定技術の変遷 — 過去・現在・将来」 (招待講演), 日本海洋学会 2015 年度春季大会, 2015.
- ③⑰ 永井 平, 日比谷 紀之: インドネシア多島海域における潮汐混合強度分布の見積もり, 日本海洋学会 2014 年度秋季大会, 2014.
- ③⑱ Hibiya, T., and T. Takagi: Assessment of parameterization of enhanced turbulent mixing over rough bottom bathymetry, The 11th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, 2014.

〔図書〕 (計 0 件)

〔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-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hibiya-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日比谷 紀之 (HIBIYA, Toshiyuki)
 東京大学・大学院理学系研究科・教授
 研究者番号: 80192714

(2) 研究分担者

木田 新一郎 (KIDA, Shinichiro)
 九州大学・応用力学研究所・准教授
 研究者番号: 50543229

升本 順夫 (MASUMOTO, Yukio)
 東京大学・大学院理学系研究科・教授
 研究者番号: 60222436