

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360068

研究課題名(和文)乱流混合と雲マイクロ物理素過程の大規模並列数値計算による解明

研究課題名(英文)Turbulent mixing and cloud microphysical processes by large scale parallel numerical computation

研究代表者

後藤 俊幸(Gotoh, Toshiyuki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70162154

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文):雲粒子が雨粒子にまで成長する雲マイクロ物理過程を第1原理から計算する雲マイクロ物理シミュレータを開発し,上昇気流とともに移動する系内での乱流と雲粒子の成長を約20分にわたりシミュレートできた.平均雲粒子半径の成長,粒径分布の広がり,逆転層近傍での系の上下振動,乱流効果などを解析した.乱流混合における温度などの強い揺らぎのモーメントのスケール指数が普遍的ではないこと,普遍性は規格化されたモーメントのスケール指数にあることを発見した.雲粒子の核となるエアロゾルなどの高シュミット数のスカラーのスペクトルを計算し理論との一致を見,乱流の間欠性の影響を明らかにした.

研究成果の概要(英文):Cloud microphysical simulator has been developed which computes growth of cloud droplets to rain drops under the action of condensation, collision and turbulent mixing from the view point of the first principle. Evolution of cloud droplets and turbulence inside a parcel which is convected by the updraft has successfully been computed for 20 minutes. Growth of mean droplet radius and expansion of the droplet spectrum are analyzed. The scaling exponents of the moments of passive scalar fluctuations in turbulence have been examined by the large scale computation. It is found that the scaling exponents are not universal but those of the normalized moments are universal. Spectrum of the scalar fluctuations at very high Schmidt number such as aerosols which are essential to nucleation of cloud droplets has been examined. The spectrum is found to agree with the theoretical prediction and the effects of the velocity intermittency on the spectrum in the far diffusive range is also studied.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流混合 雲マイクロ物理 大規模計算 スカラー 異常揺らぎ 雲粒子

1. 研究開始当初の背景

雲は日照や降雨を通して食料生産や経済活動に影響を及ぼすだけでなく、集中豪雨や台風などによる自然災害により生命の安全にも直接かかわる自然現象である。雲は、半径約 $10\mu\text{m}$ 程度の水滴の巨大集団であり、雲中の乱流（雲乱流）により周囲の乾燥・湿潤空気と混合・輸送され、適切な条件のもとで凝結（蒸発）、衝突・併合を経て雨粒に成長する。しかし、実験や観測の困難さから雲粒子から雨粒子形成過程についての理解は極めて不十分であり、雲と乱流は気象予報、気候予測において最大の未確定要因となっている。そのため、現在の気象・気候予測において雲は経験的パラメータで表わされることが多い。より確度の高い気象・気候予測には乱流による混合輸送と雲の発生、成長、消滅の理解が必要である。この認識のもと、乱流により輸送され雲粒子の生成核となるエアロゾルおよび温度や水蒸気の激しい揺らぎの特性、蒸発・凝結・衝突などの複雑な雲マイクロ物理過程の解明とこれらマイクロ粒子と乱流との相互作用の解明は重要な研究と国際的にも位置付けられていた。

申請者は世界最大規模の DNS を駆使して乱流スカラー場の統計法則の普遍性や異常スケールリングなどについて研究を行い、論文や国際会議での招待講演やレビューを通して研究の進展に貢献してきた。特に、ヨーロッパや米国の研究者と連携して、最新スパコンを念頭に置いた乱流と粒子系の相互作用解析のための大規模並列計算コード開発、その延長としての雲マイクロ物理解明に向けての研究を進めてきた。国内では最新スパコン「京」を念頭においた研究開発が進んでおり、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）に参画し、後に「京」を中心とする HPCI (High Performance Computing Initiative) に採択されるなど、スパコンによる本研究の環境が整いつつあった。

2. 研究の目的

本研究では、乱流の研究で培ってきた大規模数値計算法をさらに発展させ、乱流中におけるエアロゾルや温度、水蒸気などの乱流混合における激しい揺らぎの特性を解明すること、乱流と雲粒子の巨大集団との相互作用による雲粒子成長過程の大規模シミュレーションを行うこと、これにより雲粒子成長のメカニズム解明を迫ること、そして乱流と粒子の相互作用のプログラムを工学上の問題に応用することを目的とする。

具体的には（１）内部自由度を持った極めて多数 ($0(10^9)$) のマイクロ粒子（系）と乱流との相互作用を記述するシミュレーションコードを開発し大規模計算に向けて効率の良いものにする、（２）同一の乱流により輸送され、異なる仕方で励起される２つのスカラー場の微細スケールでの統計法則（スケールリング指数とその普遍性）の解明をめざすこと、（３）雲マイクロ物理過程と乱流混合輸送の相互作用を解析し、雲粒子の成長の速さや粒径分布、衝突・合併の効果、乱流による雲粒子、温度、水蒸気の混合輸送特性や揺らぎの効果を調べる、そして、（４）鎖状高分子と乱流との相互作用を解析し、乱流抵抗低減のメカニズム、高分子の破壊による高分子溶液劣化やマイクロ流動における混合現象の解明を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

最初に行うべきことは、乱流により輸送されるスカラー場と、それと相互作用する巨大な数の雲粒子の動力学を同時に解析する乱流スカラー・粒子輸送ハイブリッドコードをペタフロップス級スパコンに向けて開発することである。領域 2 次元分割による 3 次元 FFT、領域 3 次元分割による結合コンパクト差分ソルバー、雲粒子追跡と衝突計算コードを、通信コスト最小化、並列効率最大化に重点を置いて開発する。

第 2 は、これを駆使して、エアロゾルや温

度、水蒸気などの乱流混合を微小スケールまで乱流モデルを導入することなく方程式に忠実に大規模直接数値計算 (DNS) を行い、乱流とスカラーの激しい揺らぎのモーメントのスケール指数を調べる。

浮力をブシネスク近似で取り入れた流体方程式と温度、水蒸気混合比という2つのスカラー場、雲粒子の位置、速度および粒子半径に関する方程式を結合させた、雲マイクロ物理モデル方程式を構成し、微小雲粒子集団の動力学を大規模直接数値計算により解析する。乱流エネルギーと熱エネルギーの交換、湿潤空気と乾燥空気の混合と界面形成、雲粒子の空間分布および粒径分布などを調べる。

第4には雲マイクロ物理シミュレータコードを流れ場中の高分子鎖の粒子モデルに応用する。乱流中に大多数の高分子鎖を分散させるオイラー・ラグランジュ並列数値計算を実施し、高分子鎖が乱流場の統計性に及ぼす影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 雲マイクロ物理素過程の研究

まず、基本となる乱流混合輸送コードのハイブリッド並列化とその高効率化を進めた。領域2次元分割による3次元高速フーリエ変換の高速化、結合コンパクト差分の高効率化を達成した。これにより、空間格子点数 4096^3 という高解像度の乱流計算が可能になり、さらに「京」での計算資源獲得に至った。

乱流コードに雲粒子追跡と凝結に伴う雲粒子成長メカニズムを組み込んだ雲マイクロ物理シミュレータを開発し、これを用いて雲粒子の乱流による分散や平均粒径と粒径分布および空間分布を解析した。図1は、乱流レイノルズ数 $R_\lambda=252$ 、雲粒子数約1.3億個の巨大計算の例である。雲粒子は乱流中で急速に分散し、フラクタル的な空間配置を取る。この分布は雲粒子衝突頻度に大きな影響を与える。雲粒子の平均半径や半径分布など

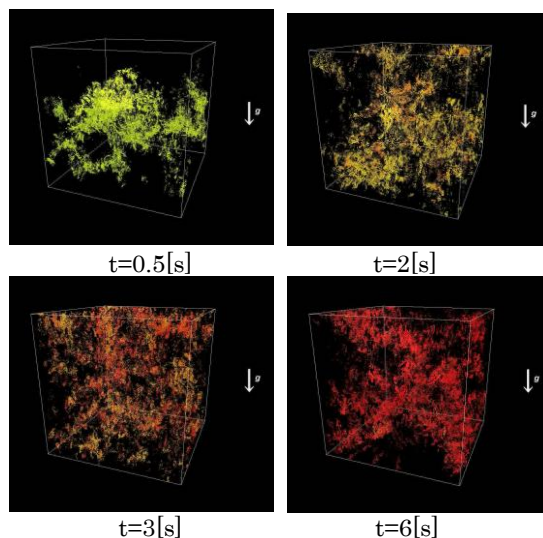


図1 乱流中における雲粒子の成長と分散の時間発展. 初期に雲粒子は中央の1/3の層内に分布. 初期半径は $20\mu\text{m}$. 半径の増大とともに黄緑 ($R < 19.8[\mu\text{m}]$) から黄色そして赤 ($20.2[\mu\text{m}] < R$) に彩色. $R_\lambda=252$. 2^{27} 個のうち10万個を可視化. 空間分布には偏りが見られる.

の有用なデータが得られた。しかし、雲中に固定した立方体領域内での計算では、雲粒子の成長が遅く、衝突が起こるようになる $30\mu\text{m}$ までに成長するには、初期の過飽和度を異常に高く設定するか、常に水蒸気を外部から供給するなどのメカニズムを導入する必要があることが分かった。実際の雲中では、雲粒子は凝結に伴う潜熱放出による上昇気流により上空に運ばれ、温度低下により過飽和状態が維持されて凝結成長が維持される。この物理機構を取り入れるために、雲中を浮力による上昇気流 $W(t)$ で移動する立方体領域(パーセル)を導入した(図2)。この浮力は、雲周囲の平均気温 $T_e(z)$ と立方体内の平均温度 $T(t)$ の差により発生する。雲粒子が雨粒子にまで成長する時間は約20分程度で、1ステップの時間幅を1msecとすると120万ステップの時間積分が必要となる。1辺25.6cmの立方体内に約200万個の雲粒子を分散させ、乱流 ($R_\lambda=86$) により温度、水蒸気と混合輸送される系の時間発展を雲マイクロ物理シミュレータにより計算を行った。ハワイで観測された温度と水蒸気混合比の鉛直分布を参考に、初期に500mの高さにある計算領域内温度を周囲より 0.25°C だけ高くした。初期

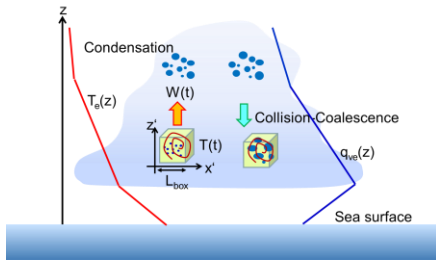


図2 上昇気流 $W(t)$ で移動するパーセル. $T_e(z)$ は雲周囲の大気の基本温度

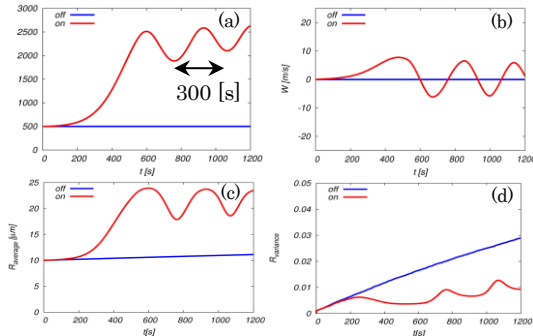


図3 パーセルの(a) 高度, (b) 上昇気流, (c) 平均雲粒子半径, (d) 雲粒子半径の揺らぎの標準偏差の時間変化. 青(off): 上昇気流なし, 赤(on): 上昇気流あり.

の雲粒子半径はすべて $10 \mu\text{m}$ で, 平均粒子数密度 $125/\text{cm}^3$ と典型的な雲での観測値として, 約 20 分間の積分を行った. 図3に示すように, パーセルは最大 $8[\text{m/s}]$ の速度で約 2500m まで急速に上昇し, 平均雲粒子半径は約 $24 \mu\text{m}$ まで成長する. その後, 高度の上下動とともに平均半径も約 300 秒の周期で変動する. 周期の理論値は高度にもよるが 200-400 秒であり, 計算結果は十分納得のいくものである. また, 上昇気流により, 粒子半径の分布の広がりには抑えられること, 乱流によるエントレインメントの効果は, 凝結による雲粒子成長に大きな影響をおよぼすことが分かった.

雲粒子はその半径が約 $30 \mu\text{m}$ 以上になると衝突するようになる. 衝突で重要なパラメータはストークス数 St (=粒子の特性時間/流れの特性時間) である. St が小さいとき, 非圧縮流体中では粒子はほとんど衝突せず, St が 1 より大きいときには, 渦があってもそれをほとんど感ずることなく移動し粒子間の相対速度に比例して衝突頻度が増加するといわれている. 衝突計算はかなり手間がかかるので, プログラムの高速化が必須である.

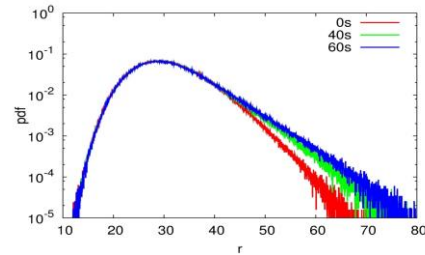


図4 衝突による雲粒子半径分布の変化. 初期に対数正規分布を仮定すると, 急速に分布は広がる.

ハイブリッド並列化だけでなく, 領域をさらに小さなセルに分割して衝突計算の高速化に成功した. 衝突計算の検証を行い, St が小さい場合には Saffman-Turner の理論と一致し, St (粒子半径) の増大と共に衝突頻度が増大することが分かり, この傾向は他のシミュレーションとも一致していることが分かった. これを踏まえて, 雲粒子衝突計算においては, 初期雲粒径分布に観測データに近い対数正規分布を導入した (図4). 乱流速度場が高波数側で十分解像されていないと粒径分布の広がりが必要になるため, レイノルズ数をやや低くして十分解像されるようにした. その結果, $100 \mu\text{m}$ の雲粒子が短時間に(数分)で生成されることが分かった.

これらの成果の発表と国内外の研究者との交流とネットワーク形成を意図して, 平成 27 年 3 月 4-6 日に本科研費により

International Workshop on Cloud Turbulence

<http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloud.html>

を名工大で開催した. 雲物理, 気象, 乱流の研究で著名な研究者を海外から 6 名, 国内から 7 名招待し, 各 1 時間の講演と交流を行った. これまで, 乱流分野と気象分野の交流は十分ではなく, 参加者からはこのワークショップが新しい研究分野の開拓を目指すものとして受け入れられ, 次回開催も期待しているとの激励を受け勇気づけられた.

(2) 雲乱流混合輸送の研究

水蒸気, 温度などのスカラーの乱流混合輸送は, 雲粒子の成長に影響を与えるので, 微細スケールでの揺らぎの統計法則の解明は

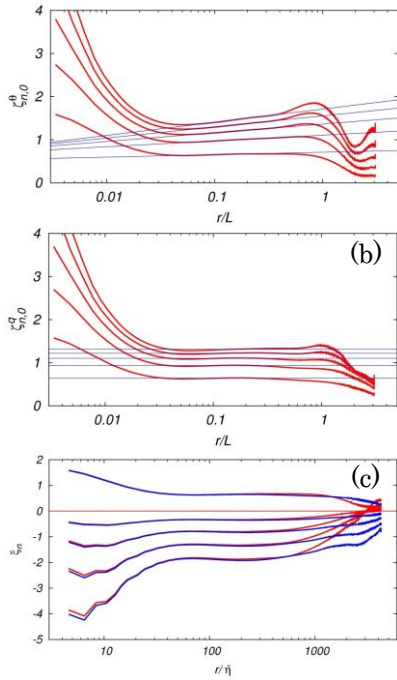


図5 スカラー差分のモーメントの局所スケールリング指数. 下から2, 4, 6, 8, 10次 (a) 低波数でランダムなスカラー揺らぎを注入した場合, (b) 一様な平均温度勾配により揺らぎを注入した場合. (c) 規格化されたモーメントの局所スケールリング指数. 上から2, 4, 6, 8, 10次.

必須である. 一般に, 乱流ではスケールの減少とともに相対的に強い揺らぎが出現するようになり, 間欠性と呼ばれている.

速度場に比べてスカラー場の揺らぎはより強い間欠性を示すことが知られている. クラウドシミュレータを活用して, 同一の乱流により輸送され, かつ低波数で時間的にホワイトで正規分布に従うランダム揺らぎを注入された水蒸気 q と鉛直方向に一様な平均温度勾配により励起された温度 θ の揺らぎのモーメント $S_q^n(r) = \langle |q(x+r) - q(x)|^n \rangle \propto r^{\xi_n}$ と $S_\theta^n(r) = \langle |\theta(x+r) - \theta(x)|^n \rangle \propto r^{\zeta_n}$ のスケールリング指数 ζ_n と ξ_n を, 世界最大規模の空間解像度 4096^3 の計算により求め, 慎重な解析を行った. 図5は2次から10次までのモーメントの局所スケールリング指数 $d \log S_{q,\theta}^n(r) / d \log r$ である. (a)では有限の傾きを持つ直線部分があるが, (b)では水平部分が明瞭に見いだされる. 数学的には

$$S_q^n(r) = A_n \left(\frac{r}{r_*}\right)^{\xi_n + \beta_n \log(r/r_*)}$$

$$S_\theta^n(r) = B_n \left(\frac{r}{r_*}\right)^{\zeta_n}$$

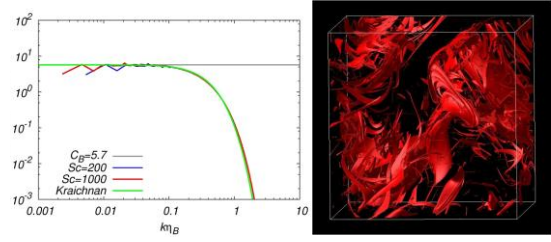


図6. 左: 遠拡散領域におけるスカラースペクトル $k E_\theta(k)$ の指数的減衰. $R_\lambda=42$. 右: $Sc=1000$ のスカラーの等値面.

と表され, 前者には単純なべき法則は成り立たず対数関数による補正が加わるという, これまでの乱流混合輸送理論を覆すような大きな発見に至った. 一方, 普遍性は規格化されたモーメント

$$F_q^n = S_q^n(r) / [S_q^2(r)]^{n/2} \propto r^{\bar{\xi}_n},$$

$$F_\theta^n = S_\theta^n(r) / [S_\theta^2(r)]^{n/2} \propto r^{\bar{\zeta}_n}$$

のスケールリング指数はスカラー揺らぎの注入方法によらず, 普遍性が見いだされることがわかった.

エアロゾルなどは高シュミット数 (分子粘性/分子拡散) のスカラーである. 雲乱流における雲粒子核の空間揺らぎ, 特に速度スケールよりも小さいスケールでの揺らぎは, 初期の微小雲粒子生成と空間分布に影響を与える. 乱流統計理論によるスペクトルは $E_\theta(k) = C_B \chi (\epsilon/\nu)^{-1/2} k^{-1} e^{-c(k/k_B)}$ であり, これを大規模計算により検証した. その結果理論のスペクトルを確認し (図6左図) 普遍定数 $C_B = 5.7$ を得た. また, 指数関数の減衰率 c は速度場の間欠性により小さくなることを理論および数値計算により示した. 図6右図に見るようにスカラー場は空間的に薄い層がある軸 (渦中心線) を中心に幾重にも巻き付いていることがわかる.

(3) 高分子と流れ場との相互作用

雲マイクロ物理シミュレータコードを流れ場中の高分子鎖の粒子モデルに応用して, 乱流中に大多数の高分子鎖を分散させるオイラー・ラグランジュ並列数値計算コードを開発した. テイラー・グリーン流れと呼ばれ

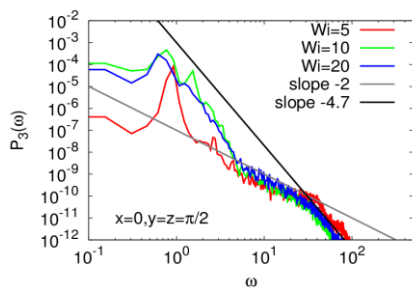


図8 速度変動のパワースペクトル。弾性乱流に特徴的なスペクトルの冪減衰が存在 (Re=2)。

る定常な渦流れに多数の高分子鎖を分散させると、ワイセンベルグ数（高分子の緩和時間/流れ場の特性時間）が増大するにつれて流れ場は非定常な乱流運動へと遷移すること、また速度揺らぎのパワースペクトルは弾性乱流に特徴的な冪的減衰を示すこと（図8）が明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計5件）すべて査読有

- ① T. Gotoh, T. Watanabe, and H. Miura, "Spectrum of passive scalar at very high Schmidt number in turbulence", Plasma Fusion Res. **9**, 3401019 (2014).
- ② T. Watanabe and T. Gotoh, "Power-law spectra formed by stretching polymers in decaying isotropic turbulence", Phys. Fluids **26** 035110 (2014).
- ③ T. Watanabe and T. Gotoh, "Hybrid Eulerian-Lagrangian simulations for polymer-turbulence interactions", J. Fluid Mech. **717**, pp. 535--575 (2013).
- ④ T. Watanabe and T. Gotoh, "Kinetic energy spectrum of the low Reynolds number turbulence with polymer additives", Journal of Physics: Conference Series 454 (2013) 012007 (8 pages).
- ⑤ 三浦英昭, 藤堂泰, 後藤俊幸, 「MHD シミュレーションのコーディング技法」 J. Plasma Fusion Res. **89**, 119-127 (2013).

〔学会発表〕（計37件）

- ① T. Suehiro, T. Ichikawa, T. Watanabe, and T. Gotoh "Cloud droplet growth and updraft in cloud microphysics simulator", International Workshop on Cloud Turbulence, NIT, Nagoya, Japan, March 6, (2015) (invited).
- ② T. Gotoh and T. Watanabe, "Intermittency and universality of small scales of passive scalar in turbulence", APS, San Francisco, USA, Nov. 24, (2014).

③ T. Gotoh and T. Watanabe, "Universality of small scale statistics of passive scalar in turbulence", ICTP, Trieste, Italy, Aug.6, 2014 (Invited)

④ T. Gotoh, T. Watanabe, Y. Kozaki, Y. Suzuki, and K. Yamamoto: "Turbulence and droplets in cloud simulator", Conference on Dynamics of Particles in Flows, Nordic Institute for Theoretical Physics, Stockholm, Sweden, June 12, 2014 (Invited)

⑤ T. Gotoh, T. Watanabe, Y. Kozaki, Y. Suzuki, and K. Yamamoto, "Turbulence and cloud droplet interaction", Workshop on Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence, Nagoya Japan, March 10, (2014) (Invited).

⑥ T. Gotoh, "Spectrum and intermittency of passive scalar in turbulence", The 2nd international workshop on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics in 2014, Nara, Japan, March 3, (2014) (Invited).

⑦ T. Gotoh, "Velocity intermittency and Lagrangian correlation for scalar spectrum at high Schmidt number", Workshop on Turbulence and Amorphous Materials, Eilat, Israel, Nov. 13, (2013) (Invited).

⑧ T. Gotoh, T. Watanabe, Y. Kozaki, and Y. Suzuki, "Interaction between cloud droplets and decaying turbulence", European Turbulence Conference, Lyon, France, Sept. 1, (2013).

⑨ T. Gotoh, "Universality of spectrum of passive scalar variance at very high Schmidt number in isotropic steady turbulence", APS meeting, San Diego, USA, Nov.20, 2012.

〔その他〕

International Workshop on Cloud Turbulence
<http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloud>

後藤俊幸「雲マイクロ物理シミュレータ」（スパコンの中の風と雲，雨粒成長過程解明へ）中部経済新聞 1月9日（2014）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤俊幸 (GOTOH Toshiyuki)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70162154

(2) 研究分担者

渡邊威 (WATANABE Takeshi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30345946

(3) 研究分担者

三浦英昭 (MIURA Hideaki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号：40280599