

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21241001

研究課題名（和文）トレーサーによる湖沼と流域での物質循環定量化と診断：時間軸と起源・過程情報の活用

研究課題名（英文）Quantification and evaluation of material dynamics in lakes and their watersheds using tracers on time scales, sources and processes

研究代表者

福島 武彦 (FUKUSHIMA TAKEHIKO)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：90124354

研究成果の概要（和文）：湖沼底質中の各種物質や同位体の鉛直分布、流域からの降雨時に流入する懸濁物、流域での表流水、地下水の同位体濃度などをトレーサーとして活用することで、時間軸、起源や過程情報等を明らかにすることから、流域、湖内での物質循環を定量化し、評価する手法を開発した。また、霞ヶ浦を対象に、水質や生態系のレジームシフトを検出し、その原因などを議論した。

研究成果の概要（英文）：Methods for quantifying and evaluating the material dynamics in lakes and their watersheds were developed using the vertical distributions of materials and isotopes, the contents of particulate matter in inflowing rivers during rainfall periods, the isotopes in surface and groundwater as the tracers on time scales, sources, and processes. The regime shifts in water quality and ecosystems were detected in Lake Kasumigaura and then their causes were discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	29,200,000	8,760,000	37,960,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：トレーサー、湖沼・流域、物質循環、時間軸、起源・過程

1. 研究開始当初の背景

日本の多くの湖沼では有機物、栄養塩の負荷削減対策を実施しているにもかかわらず、水質改善が進んでいない湖沼が多く、社会的にも大きな問題となっている。真に湖沼環境保全を図るためには、湖沼とその流域で生じている様々な物質循環を定量的に把握する必要がある。

湖沼物質循環は生態系のレジームシフトにより、大きく影響を受けることが近年わかってきた。すなわち、水草の有無等の生態系構造の違いが湖沼水質を大きく支配するというものである。また、湖沼物質循環は流域のランドスケープや物質循環の特性とその変化によっても大きく影響されている。すなわち、流域における水の流下経路や土地被

覆・利用の特性とその変化が、水質形成、ひいては湖沼物質循環に大きく影響している。

2. 研究の目的

(1) 霞ヶ浦などの湖沼において、過去 100 年程度の流域変化を定量的に明らかにするとともに、生態系構造変化の情報を収集する。また、底質コアサンプルを採取し、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、見かけ密度などで dating するとともに、各種トレーサー濃度を測定する。両者の結果をもとに、ランドスケープや負荷発生特性の変化や生態系構造変化の情報が底質コアの中に残されているか、を解析する。

(2) 霞ヶ浦流域を例に、流域特性に特徴が見られる数河川を選び、その流域で深度の異なる地下水と河川水、降水を採取する。水に関連するトレーサー濃度と質に関わるトレーサー濃度を測定し、降雨降下後の経過時間と流入河川水に占める経路割合を推測する。また、そうした経路と通過時間により水質形成モデルを作成する。

(3) 湖水質、湖沼底質は大雨などのイベント時に大きく変化する。こうした期間での各種トレーサー濃度、フラックス変化を実測し、モデル化することから、こうしたイベントの湖水質、湖沼底質形成への寄与を定量的に推測可能なものとする。特に、各河川でイベント時の懸濁物質を採取し、それらの特徴から、湖沼各地点での底質形成を考える。

(4) 以上のような解析、検討結果をベースにして、様々なトレーサーによる時間軸情報、起源・過程情報を湖沼とその流域での物質循環の総合的な解析と評価に利用するスキームを提示する。

3. 研究の方法

(1) 霞ヶ浦、諏訪湖、木崎湖、琵琶湖、猪苗代湖、池田湖、鰻池、湯の湖、曾原湖、小野川湖など 10 以上の湖沼で底質コアサンプルを採取し、各種トレーサー濃度（放射性核種、色素、ケイ素、リン分画、硫黄同位体、等）の鉛直分布測定を測定した。また、底質中での栄養塩、酸化-還元物質の移動、変化などに関するモデルを作成し、実測値との比較検証を行った。

(2) 霞ヶ浦流域を対象に、同位体やフロンなどをトレーサーとして活用するとともに、数値モデル手法などを利用して、湖沼流域内での水、物質の流下経路、水質形成機構に関しての情報解析を行った。また、湖沼

流域環境変化の解析を各種資料やリモートセンシング観測により行った。

(3) 霞ヶ浦、ダム湖などの流入河川に浮遊砂サンプラーを設置して、定期的に回収、分析を行い、また濁度、流速を連続測定することから、降雨時を含めて湖内へ流入する懸濁物質負荷量を定量的に推定した。

(4) 霞ヶ浦を例として、約 40 年間にわたる水質、生態系情報や流域情報を整理した。それらのデータに対してレジームシフト解析を適用し、シフトの時期、内容を明らかにするとともに、そのトリガーを考察した。

4. 研究成果

(1) 採泥手法の検討

2012 年夏に霞ヶ浦湖心において 4 つの方法で採泥し、放射性セシウムの鉛直分布を比較することから、採泥手法の問題点を検討した。その結果、ダイバー採泥、不攪乱底泥採取器ではほぼ同一の鉛直分布を示すが、簡易重力式コアサンプラー、エクマンバージ型採泥器では表層部分が一部失われることがわかった。福島第一原発由来の放射性核種をトレーサーとして有効活用することができたといえる。なお、こうした表層部分が失われるのは、霞ヶ浦など極めて含水率が高い底質で見られる現象と考えられた。

(2) 様々な湖沼での放射性セシウム鉛直分布

霞ヶ浦、湯の湖、曾原湖、小野川湖、諏訪湖などの底質での放射性セシウム鉛直分布から、霞ヶ浦では表層 10cm 程度までかなり均一に分布し、降下後 15 カ月程度であることから表層泥の混合が激しいこと、その他の湖沼では表層 0-2cm に高濃度が見られることから、あまり混合させていないことがわかった。

(3) 色素分布を用いた過去の藻類情報解析

霞ヶ浦、琵琶湖の湖水中藻類変化情報と底質中の色素濃度から推定される藻類変化を比較することから、底質中での色素ごとの分解速度を求め、底質中の色素濃度をそれで補正することから過去の藻類情報を推定することが可能であることを示した。ここで、珪藻は diatoxanthin、藍藻は zeaxanthin、クリプト藻は alloxanthin、緑藻は lutein を指標とした。また、生物由来のケイ素濃度を測定し、珪藻を示す色素量と比較したところ、かなり良好な一致が見られた。

(4) ケイ素物質循環とその藻類変化への影響

霞ヶ浦では2000年以降、卓越藻類種が藍藻から珪藻に変化したことが、その原因が底質の巻上量の増加とそれに伴うケイ素の溶出が原因であることを数十年間の現地データの解析、底質を用いた室内溶出実験と溶出モデルの構築、これらを組み込んだ数値シミュレーションにより明らかにした。すなわち、底質巻き上げ量変化によりケイ素の溶出量が変わり、その結果として水中ケイ素濃度が変化して藻類種に影響が出たことを定量的に解明した。

(5) 様々な湖沼底質でのリンなどの鉛直分布

霞ヶ浦、諏訪湖を対象に、数十年にわたる底質を含めた物質収支を計算したところ、リンでは収支が取れていること、窒素では脱窒による減少が見られることがわかった。底質中のリンの溶出による減少は主に鉄結合リンであることをリンの分画実験により明らかにした。また、底質中の栄養塩、酸化-還元に関係する物質群などを変数とした数理モデルを構築し、湖水中生態系モデルと結合させることから、リンの底質からの回帰現象を再現するとともに、底質中のリンの変化を予測可能とするモデルを構築した。さらに、霞ヶ浦、諏訪湖、木崎湖、宍道湖での代表的な PAHs 物質の底質鉛直分布から、それらの起源が燃焼由来であることを明らかにするとともに、堆積量の時間変化に関して考察を行うとともに、諏訪湖や木崎湖では洪水の影響が明確に表れることを示した。

(6) リモートセンシングを用いた流域解析

分光反射率を用いて流域の不浸透域 (ISA)、土壌、植生を分離する方式、植生指数の季節変化を用いて ISA、農地、森林に分離する方式を開発し、霞ヶ浦流域で検証した。それらを用いて、霞ヶ浦などの湖沼流域を対象に1980年代からの流域変化を定量的に明らかにした。

(7) 同位体、フロンなどを用いた流域水循環の推定

同位体、フロンなどをトレーサーとして、水、特に地下水の流動現象を検討することから、霞ヶ浦湖岸流域における地下水と湖水の交流関係をモデル化する上での課題を明らかにした。これにより、流域、湖内での長期にわたる物質動態をモニターする技術が確立された。同時に、霞ヶ浦流域源流の筑波山流域を対象に、マルチ・トレーサー手法、数値モデル手法を併用し、湧水・地下水の平均滞留時間が数年から40年程度であること、筑波山体の水貯留量が霞ヶ浦におけるその約半分程度であることを明らかにした。

(8) 浮遊砂サンプラーを用いた懸濁態物質流入量の推定

霞ヶ浦流入河川において、浮遊砂サンプラーを用いて、懸濁物の流入量を推定し、濁度と流量から推測される流入量と比較したところ、約10%程度となった。一方、サンプラーで採取された懸濁物の分析を行ったところ、流量の増加に伴い、強熱減量、リン含量は低下すること、河川水の粒径分布と近い分布を有することから、流入濁質の平均的な特性を有していることがわかった。すなわち、流入フラックスを濁度、流量で推定し、懸濁物の組成はサンプラーに貯まった物質の組成で近似することから、流入河川からの懸濁物フラックスを連続的に推定できる。

(9) 水質、生態系のレジームシフト解析

40年にわたる霞ヶ浦の水質、生態系情報を解析した結果、卓越藻類種、主要水質の値、変化特性などが急激に変化する時期が存在することがわかった。こうした時系列データに対して regime shift detector を適用し、統計的に有意なシフトの時期、前後の値の変化などを求めた。大きくは1990年、2000年あたりにいろいろな特性が変化したことが明らかになった。その変化要因として、気象、流入栄養塩濃度、水位・滞留時間、魚、水草などを考えてみたが、それらではうまく説明できなかった。1990年あたりでの変化は、その前に生じた動物プランクトンの異常増殖、2000年あたりの変化は藻類組成変化にともなう底質変化等が契機と考えられた。

(10) 堆積物中硫化鉱物の評価方法の確立

湖底堆積物の炭素・硫黄同位体比分析を進めた。湖底堆積物の硫黄は一般的に濃度が低く、これまでの測定では測定前に濃縮が必要となり、測定に時間がかかった。濃縮なしに測定ができるように、助燃材の検討などにより高感度化を試みた。これにより低濃度試料においても完全燃焼が可能になり、事前濃縮なしで高精度の硫黄同位体比分析が可能となった。また、堆積物に含まれる硫化鉱物の微量元素測定を行うために、放射光実験施設 SPring-8 の利用によるマイクロビーム蛍光 X 線分析法 (XRF) を導入した。これから微小硫化鉱物の微量元素濃度分析が可能になった。

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30件)

すべて査読有

- ① T. Mstumoto, T. Maruoka, G. Shimoda, H. Obata, H. Kagi, K. Suzuki, K. Yamamoto, T. Mitsuguchi, K. Hagino, N. Tomioka, D. Brummer, P. M. Klaus and P. Aggarwal:

- Tritium in Japanese precipitation following the March 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Plant accident. *Sci. Tot. Environ.*, 445-446, 365-370, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.069.
- ② T. Fukushima, S. Watanabe, K. Kamiya and N. Ozaki: Vertical distribution of PAHs in the sediments of four lakes in Japan. *J. Soil Sediments*, 12, 1530-1540, 2012. DOI: 10.1007/s11368-012-0598-6
- ③ H. Arai and T. Fukushima: Silicon budget of eutrophic Lake Kasumigaura, Japan. *J. Soil Sediments*, 12, 1501-1507, 2012. DOI: 10.1007/s11368-012-0603-0
- ④ Ozaki, S. Takeuchi, K. Kojima, T. Kindaichi, T. Komatsu and T. Fukushima: PAHs concentration and toxicity in organic solvent extracts of atmospheric particulate matter and sea sediments. *Water Sci. Tech.*, 66.5, 983-992, 2012. DOI: 10.2166/wst.2012.268
- ⑤ F. Ahmed, M. H. Bibi, T. Asaeda, C. P. J. Mitchell, H. Ishiga and T. Fukushima: Elemental composition of sediments in Lake Jinzai, Japan: Assessment of sources and pollution. *Environ. Monitoring & Assessment*, 184, 4383-4396, 2012. DOI 10.1007/s10661-011-2271-8
- ⑥ H. Arai, T. Fukushima, and K. Komatsu: Increase in silicon concentrations and release from suspended solids and bottom sediments in Lake Kasumigaura, Japan, *Limnology*, 13, 81-95, 2012. DOI: 10.1007/s10201-011-0358-0
- ⑦ G. Dercon, Y. Onda, 他 23 名 : Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality : an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *J. Environmental Radioactivity*, 107, 75-85, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.008
- ⑧ H. Kato, Y. Onda, Y., M. Tesfaye: Depth Distribution of ¹³⁷Cs, and ¹³¹I in Soil Profile after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *J. Environmental Radioactivity*, 107, 59-64, 2012. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.003
- ⑨ M. Hiraoka and Y. Onda: Factors affecting the infiltration capacity in bamboo groves. *J. Forest Research*, 17, 403-412, 2012. DOI: 10.1007/s10310-011-0311-4
- ⑩ F. Yang, B. Matsushita, T. Fukushima and W. Yang: Temporal Mixture Analysis for Estimating Impervious Surface Area from Multi-temporal MODIS NDVI Data in Japan. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 72, 90-98, 2012. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.05.016
- ⑪ S. Gmati, N. Tase, M. Tsujimura, and Y. Tosaki: Aquifers interaction in the southwestern foot of Mt. Fuji, Japan, examined through hydrochemistry and statistical analyses. *Hydrological Research Letters*, 5, 58-63, 2011. DOI: 10.3178/HRL.5.58
- ⑫ Y. Sekine, T. Maruoka, 他 9 名 : Osmium evidence for synchronicity between a rise in atmospheric oxygen and Palaeoproterozoic deglaciation, *Nature Communication*, 2, 1-6, 2011. 10.1038/ncomms1507
- ⑬ F. Ahmed, M. H. Bibi, K. Seto, H. Ishiga, T. Fukushima, and B. P. Roser: Recent sedimentary environment of coastal lagoon in southwestern Japan: evidence from major and trace elements. *Environ. Monitoring & Assessment*, 173, 167- 180, 2011. DOI: 10.1007/s10661-010-1379-6
- ⑭ A. Kohzu, A. Imai, N. Ohkouchi, T. Fukushima, K. Kamiya, K. Komatsu, N. Tomioka, N. Kawasaki, S. Miura, and T. Satou: Direct evidence for the alternation of ¹³C natural abundances during early diagenesis in Lake Kasumigaura, Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, 10, 1-14, 2011. DOI: 10.1029/2011GC003532
- ⑮ A. Kohzu, A. Imai, T. Miyajima, T. Fukushima, K. Matsushige, K. Komatsu, N. Kawasaki, S. Miura: Direct evidence for nitrogen isotope discrimination during sedimentation and early diagenesis in Lake Kasumigaura, Japan. *Organic Geochemistry*, 42, 173-183, 2011. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2010.10.010
- ⑯ Z. Sun, Q. Wang, B. Matsushita, T. Fukushima, Z. Ouyang and M. Watanabe: Evaluation of the VI-Ts method for estimating land surface moisture index and air temperature using ASTER and MODIS data in the North China Plain. *Int. J. Remote Sensing*, 32, 7257-7278, 2011. DOI: 10.1080/01431161.2010.519743
- ⑰ T. Ito, H. Iwamoto, K. Kamiya, T. Fukushima and F. Kumon: Use of flood chronology for detailed environmental analysis: a case study of Lake Kizaki in the northern Japanese Alps, central Japan. *Environ. Earth Sci.*, 60, 1607-1618, 2010. DOI: 10.1007/s12665-009-0295-y
- ⑱ F. Ahmed, M. H. Bibi, H. Ishiga, T. Fukushima, and T. Maruoka: Geochemical study of arsenic and other trace elements in groundwater and sediments of the old Brahmaputra River Plain, Bangladesh. *Environ. Earth Sci.*, 60, 1303-1316, 2010. DOI: 10.1007/s12665-009-0270-7
- ⑲ F. Ahmed, M. H. Bibi, K. Seto, H. Ishiga, T. Fukushima, and B. P. Roser: Abundances, distribution and sources of trace metals in Nakaumi-Honjo coastal lagoon sediments,

- Japan. Environ. Monitoring & Assessment, 167, 473-491, 2010. DOI: 10.1007/s10661-009-1065-8
- ⑳ T. Fukushima, K. Kamiya, Y. Onda, A. Imai and K. Matsushige: Long-term changes in lake sediments and their influences on lake water quality in Japanese shallow lakes. *Fundamental and Applied Limnology*, 177, 177-188, 2010. DOI: 10.1127/1863-9135/2010/0177-0177
- ㉑ Y. Yakiyama, Y. Onda, S. Mizugaki, H. Asai and S. Hiramatsu: Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated 137Cs and 210Pb. *Geoderma*, 159, 39-52, 2010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.06.012
- ㉒ H. Kato, Y. Onda and Y. Tanaka: Using 137Cs and 210Pbex measurements to estimate soil redistribution rates on semi-arid grassland in Mongolia. *Geomorphology*, 114, 508-519, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.08.009
- ㉓ S. Iwagami, M. Tsujimura, Y. Onda, J. Shimada and T. Tanaka: Role of bedrock groundwater in the rainfall-runoff process in a small headwater catchment underlain by volcanic rock. *Hydrological Processes*, 24, 2771-2783, 2010. DOI: 10.1002/hyp.7690
- ㉔ T. Itai, T. Maruoka、他3名: Variations in the redox state of As and Fe measured by X-ray absorption spectroscopy in aquifers of Bangladesh and their effect on As adsorption. *Applied Geochemistry*, 25, 37-47, 2010. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.09.026
- ㉕ T. Gomi, Y. Onda, T. Fukushima、他6名: Evaluation of storm runoff pathways in steep nested catchments draining a Japanese cypress forest in central Japan: a hydrometric, geochemical, and isotopic approaches. *Hydrological Processes*, 24, 550-566, 2010. DOI: 10.1002/hyp.7550
- ㉖ P. Kumar, M. Kumar, A. L. Ramanathan and M. Tsujimura: Tracing the factors responsible for arsenic enrichment in groundwater of the middle Gangetic Plain, India: a source identification perspective. *Environmental Geochemistry and Health*, 32, 129-146, 2010. DOI: 10.1007/s10653-009-9270-5
- ㉗ F. Yang, B. Matsushita and T. Fukushima: A pre-screened and normalized multiple endmember spectral mixture analysis for mapping impervious surface area in Lake Kasumigaura Basin, Japan. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, 65, 479-490, 2010. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.004
- ㉘ K. Asai, H. Satake and M. Tsujimura: Isotopic approach to understanding the groundwater flow system within an andesitic stratovolcano in a temperate humid region: case study of Ontake volcano, central Japan. *Hydrological Processes*, 23, 559-571, 2009. DOI: 10.1002/hyp.7185
- ㉙ T. Echigo, T. Maruoka、他3名: The crystal structure, origin, and formation of idrialite (C₂₂H₁₄): Inferences from the microbeam and bulk analyses. *American Mineralogist*, 94, 1325-1332, 2009. DOI: 10.2138/am.2009.3055
- ㉚ A. S. Shannigrahi, G. Fang, T. Fukushima, N. Ozaki and Y. Wu: Apply appropriate models in the study of dry deposition fluxes of particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Tsukuba, Japan. *Int. J. Environ. Poll.*, 37, 70-85, 2009. DOI: 10.1504/..024472N.
- [学会発表] (計 7 件)
国際会議発表のみ記載
- ① T. Fukushima and H. Arai: What are the triggers for the regime-shifts occurred in a large shallow lake: analysis on a 40-year limnological record. 3rd European Large Lakes Symposium. Konstanz, Germany, Oct. 8-12, 2012.
- ② H. Arai and T. Fukushima: Impacts of long-term silicon increase on diatom blooms in Lake Kasumigaura, Japan. 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Jul. 8-13, 2012.
- ④ E. Komatsu, T. Fukushima, S. Yuichi, N. Hideaki, T. Okamoto and T. Hirata: Influence of accumulation of nutrients in watershed and lake on the long-term change of lake water quality and aquatic ecosystems. 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Jul. 8-13, 2012.
- ⑤ H. Arai and T. Fukushima: Silicon concentration increase in Lake Kasumigaura, Japan: release from suspended solids and bottom sediments and impacts on phytoplankton dominance. 12th International Symposium on the interactions between water and sediments, Dartington, GB, Jun. 21, 2011.
- ⑥ T. Fukushima, S. Watanabe, K. Kamiya and N. Ozaki: Vertical distributions of PAHs in the sediments of four lakes in Japan. 12th International Symposium on the interactions between water and sediments, Dartington, GB, Jun. 21, 2011.
- ⑦ Y. Onda, T. Fukuyama, C. Takenaka and Y. Hamajima: Use of fallout radionuclides for investigating soil erosion rates and sediment fingerprinting in forested environment. International Workshop on Low-level measurement of radionuclides and its application to Earth and environmental sciences, Kanazawa, Nov. 6, 2009.
- ⑦ T. Maruoka and S. Galdenzi: Sulfur isotope geochemistry relating to the Frasassi cave system. The Frasassi Stygobionts and their

Sulfidic Environment, Genga, Italy, Sep. 10, 2009.

〔図書〕（計 3 件）

- ① Y. Onda, S. Mizugaki, H. Kato: Assessment of the contribution from surface erosion of forest floors to suspended sediment in mountainous forested catchments in the Tsuzura watershed, southern Japan. IAEA TECDOC, 1665, 61-72, 2011.
- ② Y. Onda, T. Fukuyama, C. Takenaka, Y. Hamajima: Low-level measurement on radionuclides and its application to earth and environmental sciences. K-INET, Kanazawa, 59-67, 2010.
- ③ T. Fukuyama, M. Inoue, M. Yamamoto, Y. Onda, T. Nakashima: Low-level measurement on radionuclides and its application to earth and environmental sciences, K-INET, Kanazawa, 152-157, 2010.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ies.life.tsukuba.ac.jp/~modeling/works.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福島 武彦 (FUKUSHIMA TAKEHIKO)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：90123354

(2) 研究分担者

恩田 裕一 (ONDA YUICHI)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：00221862

辻村 真貴 (TSUJIMURA MAKI)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：10273301

丸岡 照幸 (MARUOKA TERUYUKI)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：80400646