

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02251

研究課題名（和文）衛星地表水観測を活用した地球規模での河川水動態シミュレーションの高度化

研究課題名（英文）Advancing global river hydrodynamic simulations using satellite surface water observations

研究代表者

山崎 大（Yamazaki, Dai）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70736040

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、全球河川モデルをより高度化して地球水循環の定量的解明につなげるために、以下の3つを実現した。

[1] 異なる特徴を持つ多様な衛星地表水観測データにそれぞれ対し、不確実性を考慮しつつ全球河川モデルの計算値と妥当に比較する手法を確立した。[2] 衛星観測データとモデル推定値の誤差情報を用いて、河道断面パラメータを逆推定するアルゴリズムを構築した。河川流出量にバイアスがある場合でもロバストなパラメータ推計が行えることを示した。[3] 地球全域で衛星と現地観測データによる河川シミュレーションの評価をシステムティックに実行する「全球河川モデル精度ベンチマークシステム」を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球規模での河川流れをシミュレーションする全球河川モデルは、広域を対象にした洪水予測警報システムや洪水リスク評価に用いられるほか、気候モデルの一要素として陸域の水循環・物質循環を表現する役割を担うなど、幅広い学術研究で用いられる地球科学の基盤的ツールである。一方で、グローバル洪水モデルの精度評価は十分行われておらず、計算はできるが信頼性が不明という状況が長く続いていた。本研究で衛星観測データによってグローバル洪水モデルの性能を評価する手法を確立し、システムティックな精度ベンチマークを実現したこと、より精緻な洪水予測や気候変動予測の実現につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we accomplished the following three things in order to further improve the global river model and lead to quantitative elucidation of the global water cycle.

[1] We established a method for validly comparing a variety of satellite surface water observation data with different characteristics with calculated values from a global river model while taking uncertainty into account. [2] We constructed an algorithm to inversely estimate river channel cross-section parameters using satellite observation data and error information of model estimates. It was shown that robust parameter estimation can be performed even when there is bias in river runoff. [3] We have developed a "Global River Model Benchmark System" that systematically evaluates river simulations using satellite and field observation data across the globe.

研究分野：グローバル水文学

キーワード：グローバル河川モデル 衛星観測 精度評価 モデルベンチマーク

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球規模での河川流れをシミュレーションする全球河川モデルは、広域を対象にした洪水予測警報システムや洪水リスク評価に用いられるほか、気候モデルの一要素として陸域の水循環・物質循環を表現する役割を担うなど、幅広い学術研究で用いられる地球科学の基盤的ツールである。より精緻な洪水予測や気候変動予測の実現に向けて、全球河川モデルによる河川流量・水位・浸水域の再現精度の向上が求められている。

これまで全球河川モデルの再現精度は、主に現地観測による河川流量を用いて検証され、洪水のピーク流量やタイミングを合わせるように河道断面などのパラメータが調整されてきた(例: Yamazaki et al. 2011)。全球河川モデルの高度化が進み水位や浸水域の表現が可能になると、モデルが再現した地表水動態を衛星観測データと比較することが可能になった(例: Yamazaki et al. 2012)。しかし、モデルと衛星観測の両方に様々な不確実性が含まれるため、シミュレーション値と観測値との誤差がモデルのどの要素に起因するのかを特定することが非常に難しく、衛星による地表水観測データは全球河川モデルの精度向上に十分に活用されてこなかった。

一方で近年、河川水動態計算の基礎情報となる高解像度水文地形データの精度が大幅に向上し(例: Yamazaki et al. 2017, 2019)、全球河川モデルの不確実性が大幅に低減した。また、高解像度衛星ビッグデータを地球全域で解析できる IT 基盤の整備や、河川の水面標高を直接計測できる衛星レーザー高度計の登場など、衛星による地表水観測データは近年著しく進展し、その不確実性についても定量化が進んでおり、河川モデルと直接比較を行う準備が整ってきた。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では、全球河川モデルをより高度化して地球水循環の定量的解明につなげるために、以下の3項目の実現を目的とする。

- [1] 異なる特徴を持つ多様な衛星地表水観測データにそれぞれ対し、不確実性を考慮しつつ全球河川モデルの計算値と妥当に比較する手法を確立する。
- [2] 衛星観測データとモデル推定値の誤差情報を用いて、河道断面や粗度係数などのモデルパラメータを逆推定するアルゴリズムを構築する。
- [3] 地球全域で衛星と現地観測データによる河川シミュレーションの評価および最適化を半自動的に実行する「全球河川モデル精度ベンチマークシステム」を開発する。

### 3. 研究の方法

#### [1A] 衛星浸水域データとの比較

浸水域の拡大縮小は、洪水リスク水系や水域メタン排出など様々な研究で必要とされる重要なデータであり、多様な衛星観測機器を用いた浸水域マップが多数構築されている。しかし、浸水域プロダクトで用いられる各衛星センサーには得意不得意があり、全球河川モデルが計算した浸水域とそのまま比較することは妥当ではない。本研究では、各センサーによる浸水域プロダクトがどのような水面を捉えているかを精査し、河川モデルと比較検証するために必要な手順を明らかにする。例えば、植生下の水面が検出できない可視/近赤外衛星による浸水域データに対しては全球森林密度マップを用いて比較すべきでないピクセルを除外する、など、様々なデータ・手法を駆使して衛星-モデル間で浸水域を妥当に比較する手法を確立する。

#### [1B] 衛星高度計水位データとの比較

衛星高度計による水位観測は河川の一部のみを捉えた地点データであり、また現地観測と異なり数週間~数ヶ月に一度しか水位データが手に入らない。本研究では、空間解像度約 10km の全球河川モデルとの妥当な水位比較を実現するため、モデル推計水位の空間内挿手法を確立するとともに、低頻度観測データを活用するために平均値の計算が必要な相対的な水位変動ではなく、海拔からの絶対的な水面標高の衛星-モデル比較を実現する。具体的には、広域河川モデルのサブグリッド河川ネットワークデータを用い、衛星高度計観測点の位置を特定し、上流と下流の水位を必要に応じて内挿する手法を用いた。

#### [2] 衛星観測データを用いた河道パラメータの推定

本研究では、河道幅や氾濫原地形と比べて不確実性が大きく、かつ水位と浸水域のシミュレーションに大きな影響を与える河道深さパラメータに着目した。流域面積や上流下流の連続性などの広域情報および狭窄部や河川蛇行など局所的情報も考慮して、水位と浸水域の誤差情報から河道深さパラメータを最適化した。ここでは、河川モデルへの入力外力となる流出量データの不確実性も水位と浸水域の誤差に繋がるため、水面標高の時系列データの誤差低減を目的とするのではなく、河川水面標高と河川流量の関係式の誤差が最小となるような、外力データ不確実

性への依存が少ないモデル更正方法を開発した。

[3] 全球河川モデル精度ベンチマークシステムの開発

上述した衛星-モデル比較検証に必要なワークフローとモデル更正アルゴリズムを統合し、半自動的にモデル検証/更正を実施する「全球河川モデル検証/更正システム」を開発した。現地観測流量・衛星観測による水位と浸水域のデータを収集・整理して、モデル計算グリッドと観測点を半自動的に対応づけるアルゴリズムを構築し、全球河川モデルによるシミュレーションの精度を包括的かつシステムティックに評価できる「全球河川モデル精度ベンチマークシステム」を開発した。

4. 研究成果

[1a] 衛星浸水域データとの比較

衛星観測による浸水域による河川モデルの精度検証では、モデル計算と衛星観測データでは異なる水面を表現していることが問題となった。例えば、モデルは湿地などの植生下の水面を表現しているが光学衛星では植生キャノピーを透過した観測はできない、衛星は丘の上にある湖沼なども捉えているがモデルでは計算格子内の谷部にある水面しか表現していない、といった差異が存在するため、衛星データとモデル計算値をそのまま比較することは適切でないことが明らかになった。そこで、森林データや比高データをマスクとして用いることで、両者が共通で表現する水面でのみ浸水域を比較するアルゴリズムを開発した。

特に森林マスクと比高データによる氾濫原マスクを導入することにより、全球河川モデル CaMa-Flood がシミュレーションした浸水域と、光学衛星 Landsat がとらえた浸水域の一致度が大幅に向上することが確認された (図 1)。このマスク手法を用いたモデル浸水域の評価については学術論文にまとめ Water Resources Research 誌に発表した (Zhou et al. 2021)。

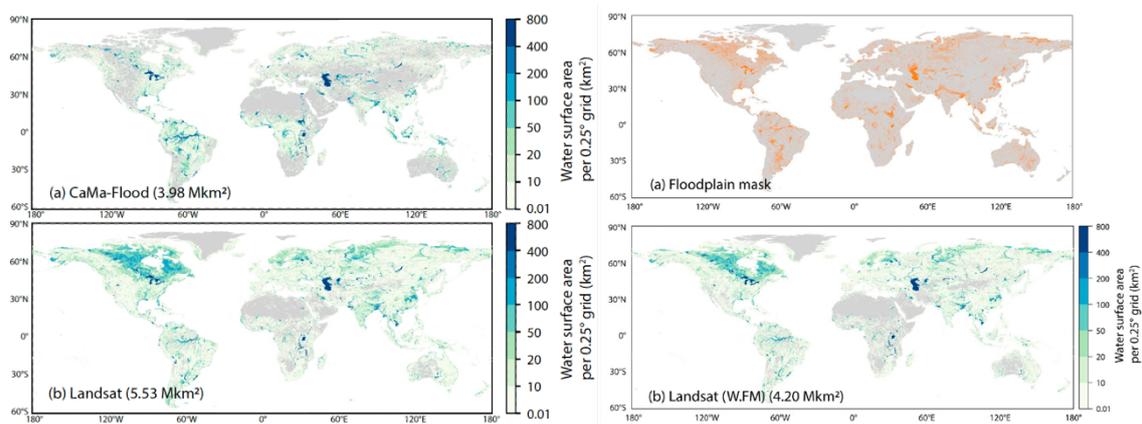


図 1：モデルと衛星による浸水域データの比較例。(左上) 全球河川モデルCaMa-Floodによる浸水域、(左下) Landsat衛星による浸水域、(右上) 地形データから求めた氾濫原マスク、(右下) 氾濫原マスクを適用したLandsat浸水域。マスク適用によりモデルとの一致度が向上

[1b] 衛星高度計水位データとの比較

衛星高度計による河川水位の観測データの分析により、河川が観測フットプリントの中心にない場合、河川以外の水体が観測フットプリント内に存在する場合などに、適切に河川の水面標高を捉えられていないケースが多数存在することが判明した。またモデル検証に用いる際には、計算解像度の影響によりモデル格子内で河川水面勾配が大きな場合も、衛星高度計との水位比較が難しいことがわかった。そこで、衛星高度計の観測点を高解像度水文地形データ MERIT Hydro 上に配置して、観測点の上下流を含めて水文地形データにおける標高と比較することで、モデル検証に不適合な水位観測データを自動的に除外した。また、モデル格子点内の河川水面勾配も考慮して、検証に不向きな衛星高度計データを除外した。また、必要に応じて上流側と下流側の講師点の内挿による水位を推定するように設定した。これにより、観測データの誤差によって河川モデルの精度が不適切に評価されるのを防げるようになった (図 2)。衛星高度計観測点の高解像度河道ネットワークデータへの配置については、学術論文としてまとめ Earth System Science Data 雑誌に発表した (Revel et al. 2024)。

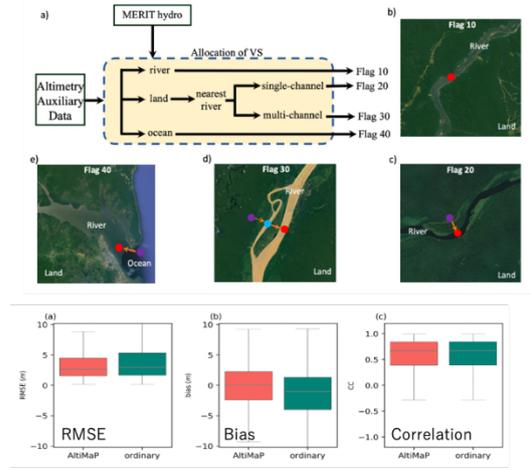


図2: (上) 衛星高度計観測点の配置、(下) モデル水位の精度 [赤] サブグリッド配置を考慮して比較、[緑] 既存手法

## [2] 衛星観測データを用いた河道パラメータの推定

グローバル河川モデルを用いたシミュレーションにより、流出量にバイアスがある場合でも、水位流量曲線は一意に定まることを確認した。既往研究のように水位の時系列の誤差を修正するのではなく、2変数の関係である水位-流量曲線の誤差を最小化するようなパラメータ補正を行うことによって、全球河川モデルへの入力データとなる流出量データにバイアスがあった場合にもロバストに河道深さパラメータを推定することが可能になった(図3)。一方で、背水効果のために水位と流量の関係が一意に定まらない区間では、提案手法では河道深さパラメータの推定値の不確実性が大きくなることがわかった。本成果は学術論文として Water Resources Research 誌に発表した (Zhou et al. 2022)。

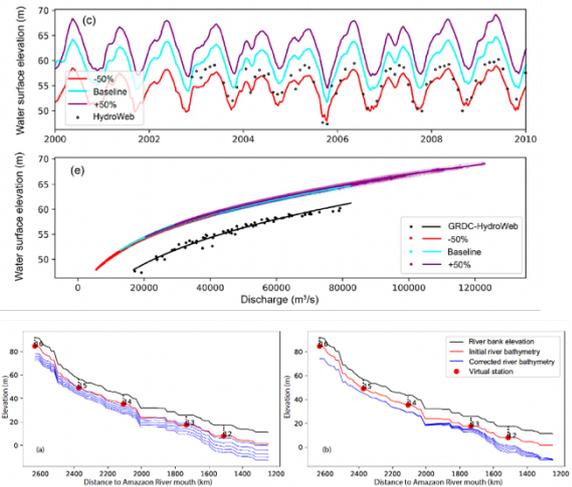


図3: 流出量にバイアスがある場合の水位時系列データ(上段)と水位流量曲線(中段)の比較。水位誤差を元に推計した河道深さ(下段)。  
[左] 水位時系列の誤差を利用、[右] 水位流量曲線の誤差を利用

## [3] 全球河川モデル精度ベンチマークシステムの開発

上記の研究で現地観測河川流量データ・衛星による水面標高と浸水域データを全球河川モデルのシミュレーションと比較する手法が確立されたため、これらを統合してシミュレーションの精度を包括的かつシステムティックに評価する「全球河川モデル精度ベンチマークシステム」を開発した。観測データとモデル計算グリッドとの対応づけを半自動化して、モデルと観測での時系列データ比較、評価指標の地図表示による空間分布評価、評価指標のスコア化によるモデル間比較など、多様な精度評価を効率的に実施できるようになった(図4)。評価指標のスコア化については、変数ごと・評価指標ごとに異なる特徴を持つため、絶対スコア・相対スコア・順位スコアといった異なるスコア化手法を提案し、モデルアップデート時の性能変化などの詳細な分析が可能になった。開発したベンチマークシステムは学術論文にまとめてプレプリントに公開 (Zhou et al. 2024) して査読中である。今後は、河川モデリングコミュニティに精度ベンチマークシステムを公開して、河川モデル精度評価の標準的ツールとして採択されることを目指す。

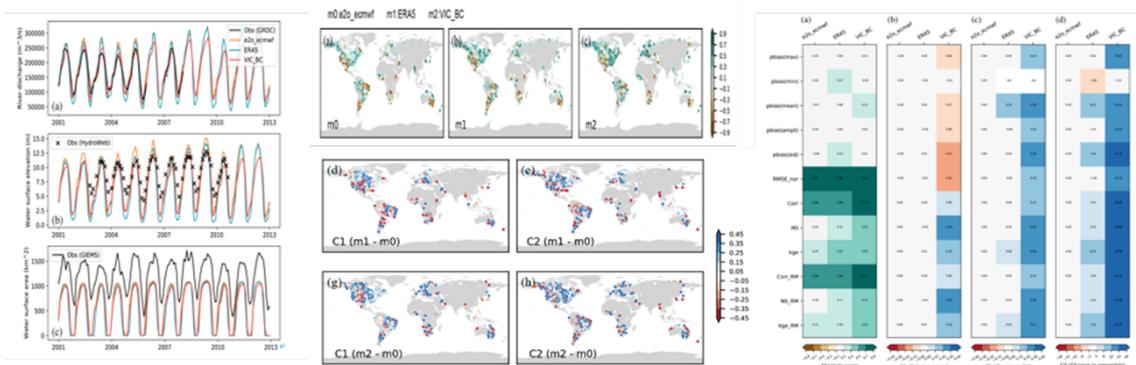


図4: 河川モデル精度ベンチマークシステムの出力結果の例(時系列、スコア地図表示、平均スコア比較)

## [引用文献]

- Yamazaki D., S. Kanae, H. Kim, T. Oki, (2011) A physically-based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, Water Resources Research, vol. 54, W04501, DOI 10.1029/2010WR009726
- Yamazaki D., H. Lee, D.E. Alsdorf, E. Dutra, H. Kim, S. Kanae, T. Oki (2012), Analysis of the water level dynamics simulated by a global river model: A case study in the Amazon River, Water Resources Research, vol. 48, W09508, DOI 10.1029/2012WR011869
- Yamazaki D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O' Loughlin, J.C. Neal, C.C. Sampson, S. Kanae, P.D. Bates (2017) A high-accuracy map of global terrain elevations Geophysical Research Letters, vol. 44, pp. 5844-5853, DOI 10.1029/2019WR024873
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, J. Sosa, P.D. Bates, G.H. Allen, T.M. Pavelsky (2019) MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets, Water Resources Research, vol. 55, pp. 5053-5073, DOI 10.1029/2019WR024873

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Revel Menaka, Zhou Xudong, Yamazaki Dai, Kanae Shinjiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Assimilation of transformed water surface elevation to improve river discharge estimation in a continental-scale river	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Hydrology and Earth System Sciences	6. 最初と最後の頁 647 ~ 671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/hess-27-647-2023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Zhou Xudong, Revel Menaka, Modi Prakat, Shiozawa Takuto, Yamazaki Dai	4. 巻 58
2. 論文標題 Correction of River Bathymetry Parameters Using the Stage?Discharge Rating Curve	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 e2021WR031226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021WR031226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Zhou Xudong, Prigent Catherine, Yamazaki Dai	4. 巻 57
2. 論文標題 Toward Improved Comparisons Between Land Surface Water Area Estimates From a Global River Model and Satellite Observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 e2020WR029256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020WR029256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhou Xudong, Ma Wenchao, Echizenya Wataru, Yamazaki Dai	4. 巻 21
2. 論文標題 The uncertainty of flood frequency analyses in hydrodynamic model simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Natural Hazards and Earth System Sciences	6. 最初と最後の頁 1071-1085
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/nhess-21-1071-2021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Revel Menaka, Ikeshima Daiki, Yamazaki Dai, Kanae Shinjiro	4. 巻 57
2. 論文標題 A Framework for Estimating Global Scale River Discharge by Assimilating Satellite Altimetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 e2020WR027876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020WR027876	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 1件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Menaka Revel, Xudong Zhou, Dai Yamazaki, Shinjiro Kanae
2. 発表標題 Global Discharge Estimation by Assimilating Satellite Altimetry with the Current Limitations of the Hydrodynamic Models in the perspective of SWOT mission
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Menaka Revel, Xudong Zhou, Dai Yamazaki, Shinjiro Kanae
2. 発表標題 Prospects of Assimilating Remote Sensing Data into a Hydrodynamic Model in Amazon Basin
3. 学会等名 JpGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xudong Zhou, Menaka Revel, Prakat Modi, Dai Yamazaki
2. 発表標題 A framework for benchmarking global flood models.
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Menaka Revel and Dai Yamazaki
2. 発表標題 Potential of Assimilating Satellite Altimetry Data in to a Continental-Scale River Routing Model
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dai Yamazaki, Xudong Zhou, Menaka Revel, Prakat Modi
2. 発表標題 Direct comparison of surface water dynamics between models and satellites achieved by the latest global river model [CaMa-Flood ver.4]
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dai Yamazaki
2. 発表標題 Recent advances in global-scale surface water hydrodynamics modelling
3. 学会等名 AGOS Kamide Distinguished Lecture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Menaka Revel, Dai Yamazaki
2. 発表標題 Estimating River Discharge by Assimilating SWOT Observations using a Physically Based Empirical Localization Method
3. 学会等名 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Prakat Modi, Menaka Revel, Dai Yamazaki
2. 発表標題 MERIT DEM Performs Better for Hydrodynamic Flood Model in Amazon Basin
3. 学会等名 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xudong Zhou, Dai Yamazaki
2. 発表標題 How can we reasonably compare the water surface area between models & satellites
3. 学会等名 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

全球河川モデルCaMa-Floodwebページ <a href="http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/cama-flood/CaMa-Flood_version_4">http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/cama-flood/CaMa-Flood version 4</a> <a href="https://github.com/global-hydrodynamics/CaMa-Flood_v4">https://github.com/global-hydrodynamics/CaMa-Flood_v4</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木田 新一郎  (Kida Shinichiro)  (50543229)	九州大学・応用力学研究所・准教授    (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------