

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02251

研究課題名(和文)日本の前線性降雨に対する物理的 maximum 規模降水量推定手法の適用

研究課題名(英文) Estimation of Physical Upper Bound of Precipitation Caused by Weather Front in Japan

研究代表者

石田 桂 (ISHIDA, KEI)

熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・准教授

研究者番号：70800697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：想定最大規模降水量の推定における既存の手法の問題点を克服するため、領域大気モデルによる数値実験を用いた手法がアメリカ合衆国の西海岸を対象として開発された。本研究ではこの手法を過去に前線性降雨による豪雨災害が発生した福岡県の朝倉地域を日本における対象地とし改良を行い、実際に想定最大規模降水量の推定を行った。具体的には、前線の影響により引き起こされた降水イベントの選定し、選定し各降水イベント毎に領域大気モデルの力学スキームを調節し再現計算を行った。その後、各降水イベントにおける降水量を対象値において最大化し、その中から最も大きな値を想定最大規模降水量の推定値とした。そして物理的解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により領域大気モデルを用いたMP Estimation法による想定最大規模降水量の推定が日本における前線性降雨にも有効であることが示された。さらには、本手法で得られたデータを用いた物理的考察により対象地において豪雨が発生しやすい大気状況の推定も可能であることが分かった。これらは日本においても水利構造物等やハザードマップ作製等に対してより信頼性のある想定最大規模降水量を提供できる可能性を示しており、本研究は今後の防災・減災において有用な知見を与えるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：An approach to estimate the physical upper bound of precipitation by means of a regional atmospheric model was previously developed in the United States in order to overcome weaknesses of the traditional approaches. This research study investigated the applicability of the proposed approach to frontal precipitation in Japan. The target area is the Asakura area where there was a severe precipitation in the past. First, precipitation events were extracted. Second, parameterization schemes of the regional atmospheric model were optimized. Then, the precipitation depth at each event was maximized by means of numerical experiments. Finally, the largest value of the maximized precipitation depths was selected as the physical upper bound of the precipitation at the target area. In addition, the causes of severe precipitation were investigated.

研究分野：水工学

キーワード：想定最大規模降水量 領域大気モデル 力学的ダウンスケーリング 前線性降雨

1. 研究開始当初の背景

近年日本各地で豪雨が頻発・激甚化しており、豪雨による深刻な人的・物的被害が生じている。豪雨災害に対し防災・減災を図るには、まず対象とすべき降水規模の算定が必要となる。従来、降水規模として再現期間が最大で 200 年程度の「計画降水量」が用いられてきた。しかしながら、昨今の豪雨時にはしばしば計画降水量を超える降水が観測されており、2015 年の水防法改正後、日本において想定し得る最大規模の降水量(想定最大規模降水量)の算出が求められている。

現在実務レベルでは、想定最大規模降水量の推定に頻度解析もしくは Probable Maximum Precipitation (PMP) といった手法が用いられている。しかしながら、両手法とも観測データを元にした推定手法であり、推定値の信頼性は観測データの質と量に大きく影響される。また、気候の定常性を仮定しており、地球温暖化の豪雨への影響が明らかとなっている現在、推定値の信頼性が低下してきている、といった問題点が知られている。

従来手法にある問題点を克服するため、本課題代表者らは領域大気モデルを用いた数値実験により想定最大規模降水量を推定する手法、Maximum Precipitation (MP) Estimation 法の開発を行ってきた。ここに、領域大気モデルは物理法則に基づいた数値モデルである。MP Estimation 法では、過去に生じた気象場を元に領域大気モデルの初期・境界条件を現実的な範囲で変化させた数値実験を行い、対象地域における物理的に可能な降水量の最大値を模索する。そのため、MP Estimation 法では観測データはモデル精度の検証にのみ用いられ、推定結果の観測データに対する依存性が低い。また、気候の定常性を仮定しないなど既存の手法にある問題点を克服する。さらには、想定最大規模降水量をもたらす気象場の物理的メカニズムを解析、及び推定値の現実性に関する物理的な議論が可能であるといった利点を有する。

本課題代表者が筆頭著者として、アメリカ合衆国カリフォルニア州の流域を対象に本手法を開発しとり纏めた論文(編 1)に対し、従来の水利構造物設計に変革をもたらす可能性があるとして、アメリカ土木学会から 2016 年 9 月に J. James R. Croes Medal, 2016 が授与された。本手法は受賞後水工学分野において世界的な知名度が高まっており、想定最大規模降水量の推定が求められている日本でも有用であると考えられる。ただし、カリフォルニアと日本では気象・地形的条件が異なるため、日本でも適用可能か試みる必要がある。

2. 研究の目的

実際に日本での MP Estimation 法の適用を試みる。近年、日本において平成 29 年 7 月九州北部豪雨(以下、H29 豪雨)、平成 26 年 8 月豪雨、平成 24 年 7 月九州北部豪雨など、前線性降雨により深刻な人的・物的被害が頻発している。このことから、本研究では、日本における前線性降雨を対象とした MP Estimation 法の適用を行うことを目的とする。MP Estimation 法を適用する上で、対象に合わせ設定や手順の改良を提案し、実行する。

本研究では、対象とする大気現象及び考慮すべき地域などの規模が先行研とは大きく異なる。先行研究で対象としたカリフォルニアでは、豪雨は太平洋から Atmospheric River と呼ばれる大規模な(総観スケールの)高湿度の大気の流れ込み山脈に衝突することによりもたらされる。また、カリフォルニアは広大であり防災・減災を図る上で考慮すべき流域の規模も大きい(数千 km² 以上)。一方、日本において、上記豪雨時には前線性降雨により地域スケール(数十~数百 km²)規模の集中豪雨が発生し甚大な被害をもたらした。これらの豪雨に対する防災・減災を図るには、集中豪雨と同等スケールでの対策が必要である。また、日本の複雑な地形が大気中水分の収束を促し、降水強度を強めていることが指摘されている。

以上を踏まえ、本研究では MP Estimation 法において先行研究とは異なる設定や改良を行う。まず、上記の規模の違いを考慮し、想定最大規模降水量の推定を行う対象を数百 km² 規模の地域とする。対象とする地域及び大気現象が小規模であること、また複雑な地形が豪雨に影響を与えていることから、領域大気モデルによる数値計算において高解像度(数百 m 規模)の計算領域を用いる。さらに、MP Estimation 法における降水イベントの選定方法、モデル精度の検証方法、降水量最大化手法などに対して、対象の違いを踏まえた改良を行う。

3. 研究の方法

本研究では、実際に日本における対象地域を選定したうえで、前線性降雨を対象として MP Estimation 法により対象地域における想定最大降水量を求める。MP Estimation 法の手順において、まず、1)対象地域及びその周辺の過去の降水量や気象条件をもとに複数の降水イベントを選定する。2)領域大気モデルにより各降水イベントの再現計算を行う。ここで、観測データとの比較により再現性を検証する。十分な再現性を確認後、3)各降水イベントに対し領域大気モデルを用いた数値実験により対象地域における降水量の最大化を行う。最後に、4)最大化された降水イベントの中から最も大きい降水量を想定可能最大降水量として選定する。

本研究では対象地域として 1 級河川筑後川中流域に位置する福岡県の朝倉地域(図 1)を取り

扱う。朝倉地域はH29 豪雨時に前線性降雨により生じた集中豪雨により甚大な人的・物的被害を受けた、日本における防災・減災を考える上で重要な地域である。また、本豪雨時に AMeDAS の朝倉観測所で過去最大値の2倍を超える降水量が観測されており、観測データに依存する従来の想定最大規模降水量の推定手法では予測することが困難な豪雨が発生した地域である。

MP Estimation 法で使用する領域大気モデルとして、現在世界的に研究分野で最も用いられている Weather Research and Forecasting Model (WRF) を採用した。領域大気モデルに必要な初期・境界条件は、大気再解析データの中で時空間解像度が高い(空間解像度が0.25度、時間解像度が1時間)ERA5より得た。ここに、大気再解析データとはデータ同化手法により各種観測データに同化された全球大気モデルによる数値シミュレーション結果である。これらを用いて、MP Estimation 法により朝倉地域における想定最大規模降水量の推定を行った。

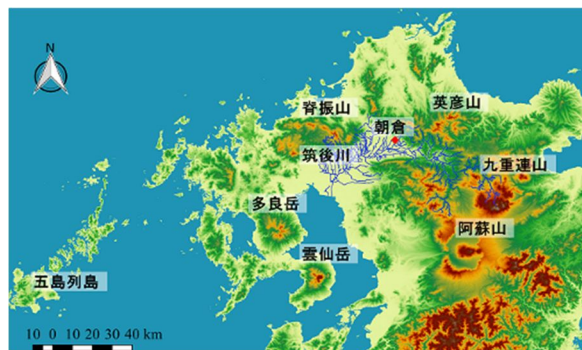


図 1 朝倉周辺の地形

手順1：降水イベントの選定

まず、降水量を最大化する対象となる降水イベントの選定した。対象とする大気現象の規模が大きい先行研究では対象流域における流域平均降水量が大きい降水イベントから対象を選定した。対して、本研究では対象とする前線性降雨は通常強い降水域の範囲が小規模であることから1)前線性降雨により朝倉地域及びその周辺で豪雨が発生した降水イベント、降水強度は地形の影響を受けるため、2)九州北部周辺に前線が停滞し、高湿度の大気が前線に向かい流れ込んだ降水イベントの2種類から対象とする降水イベントを選定した。選定方法2では定量的に選定するために機械学習を用いた。昨今しばしば用いられる Convolutional Neural Network(CNN)等の深層学習手法での選定を試みたが目的にあった降水イベントの抽出ができなかったため、大気状況の分類などにも用いられている自己組織化マップ(SOM)を用い、本研究に合わせ大気データをシフトさせたものも入力として用いて降水イベントの抽出を行った。選定方法2に関して当初の予定では精度評価には衛星画像等を用いる予定だったが予算削減の都合上、選定方法1と同様観測降水量(気象庁の解析雨量)を用いて精度評価を行うこととした。

手順2：各降水イベントの再現計算

領域大気モデルの精度検証のため、選定した各降水イベントの再現計算を行った。前線性降雨の空間的規模や九州の複雑な地形を考慮し、水平解像度8,100m, 2,700m, 900m, 300mのネストした計算領域を設定した。精度の高い再現計算を行うためには領域大気モデルの各種力学スキームの選定が重要となる。そこで、各降水イベントに対し十分な計算精度が得られるまで力学スキームの組み合わせを試した。ここに、300m解像度での計算は非常に計算負荷が大きいため、まず900m解像度までの計算領域を用いて大まかに力学スキームを選定し、その後300m解像度を含めた計算をもちいて力学スキームを最終決定した。ここに、平成29年7月九州北部豪雨において強い降水域がすでに朝倉地域周辺に集中しているため選定する降水イベントには含めず、想定最大規模降水量との比較に用いることとした。

手順3：各降水イベントにおける降水量の最大化

再現計算を行った各降水イベントを対象に、数値実験により朝倉地域での降水量の最大化を行った。本研究では降水量最大化手法として先行研究において開発した Atmospheric Boundary Conditions Shifting (ABCS) 法と用いる。ABCS法は、過去に生じた気象場はもしそのときの周辺大気の状態がわずかに異なっていれば発生位置が異なっていた可能性があるという仮定のもと、過去の気象場を元にした大気境界条件を水平方向に変位させた数値実験により、対象流域での降水量を試行錯誤的に最大化させる手法である。先行研究では総観スケールの高湿度大気の流れに注目したが、本研究で対象とする前線性降雨では前線位置及び大気中水分の収束が重要となる。また、九州地域では降水は地形の影響を強く受ける。先行研究とは降水域の規模も違うことから、ABCS法による境界条件のシフト量は先行研究では東西南北方向に1.0度刻みであったが、本研究では0.2度刻みとした。

手順4：想定最大規模降水量の推定

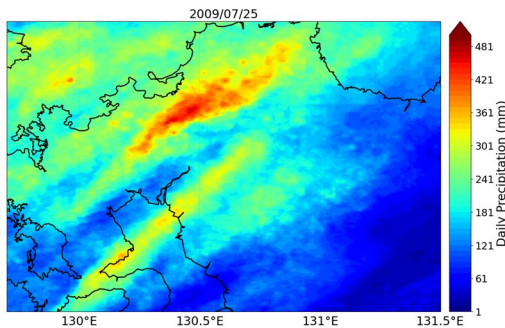
最後に各降水イベントに対して朝倉地域での最大化された降水量の中から最も大きい値を、朝倉地域における想定最大規模降水量として選択した。そして、防災・減災に有用な知見となるよう、想定最大規模降水量を生じた降水イベントの物理的メカニズムを解析した。

(1) 想定最大規模降水量の推定

まず、前線性降雨により朝倉地域及びその周辺で豪雨が発生した降水イベント、及び九州北部周辺に前線が停滞し、高湿度の大気が前線に向かい流れ込んだ降水イベントの2種類から対象とする降水イベントを選定した。その後、選定した各降水イベントに対してWRFを設定し、試行錯誤的に各種力学スキームの選定を行った。ここに、各降水イベントにおいて精度が最も高くなるように力学スキームの選定を行ったため、降水イベント毎に使用した各種力学スキームは異なる結果となった。そして、各降水イベントに関し選定した力学スキームを用い再現計算を行った。

各降水イベントに対し ABCS 法を用いて対象地（朝倉地点）における降水量の最大化を行った結果、最も降水量が大きくなったのは 2009 年 7 月降水イベントであった。図 2 に 2009 年 7 月降水イベントにおける気象庁の解析雨量から得られた観測 24 時間積算降水量（左図）と ABCS 法により最大化された降水量（右図）を示す。2009 年 7 月降水イベントにおいて実際には背振山付近から北東に強い降水域が観測されている。強い降水域は朝倉地点から見て北西に位置している。そのため、2009 年 7 月降水イベントにおいて ABCS 法により境界条件を南に 0.2 度かつ東に 0.2 度シフトさせたときに朝倉地点での降水量が最大となった。しかしながら、平成 29 年 7 月九州北部豪雨時に朝倉地点における 24 時間降水量（気象庁解析雨量）は 516mm であり、本研究で得られた想定最大規模降水量との差はあまり見られなかった。

a) 観測データ（解析雨量）



b) 最大化結果

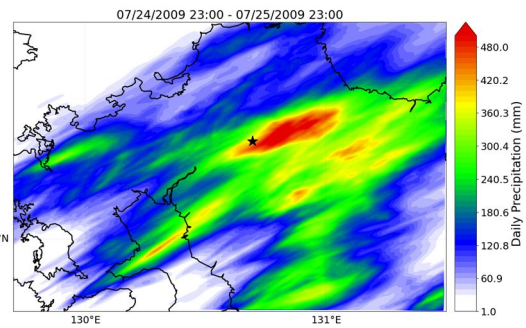
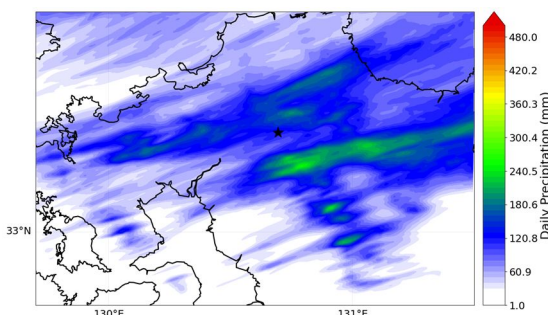


図 2 2009 年 7 月降水イベントにおける観測降水量と最大化降水量

(2) 物理的考察

上記のように 2009 年 7 月の降水イベントは ABCS 法により境界条件をシフトさせることにより対象地（朝倉地点）において降水量を最大することが可能であった。しかしながら、ABCS 法により対象地において降水量が最大化されなかった降水イベントも存在した。2009 年 6 月降水イベントの例を図 3 に示す。左側の図が境界条件を北へ 0.2 度シフトさせた場合、右側の図が境界条件を北へ 0.4 度シフトさせた場合の結果である。2009 年 6 月降水イベントはもともと阿蘇北側で大きな降水量を観測した。0.2 度北側に境界条件をシフトさせることにより（図 3a）降水域が北側に移動した。また、部分的に朝倉地点より北側に強めの降水域が発生した。次に 0.4 度北側に境界条件をシフトさせた場合（図 3b）強い降水域は完全に朝倉地点より北側に移動した。境界条件を北にシフトさせる大きさに合わせて強い降水域が移動したわけではなく、阿蘇北側から朝倉地点北側に降水が量的に移動している。これは朝倉地点周辺の地形が関係していると考えられる。九州北部において強い降水の発生にはしばしば周辺地形が大きく影響する。0.2 度北側にシフトさせたときは阿蘇北西の山地周辺に強い降水域が発生している。対して、0.4 度北側にシフトさせた場合は背振山で湿った大気が上昇し、朝倉地点北側の山地で降水が発生して

a) 北へ 0.2 度



b) 北へ 0.4 度

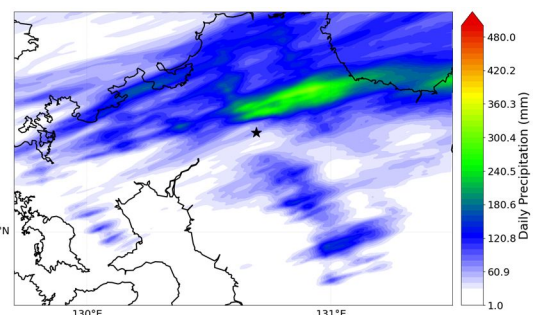
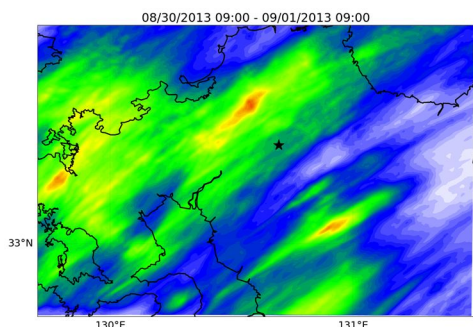


図 3 2009 年 6 月降水イベントの ABCS 法適用例

いると考えられる。

次に 2013 年 8 月降水イベントの例を図 4 に示す。左図は 2013 年 8 月降水イベントにおいて ABCS 法により境界条件を南へ 0.4 度かつ東へ 0.2 度シフトさせた場合であり、右図は南へ 0.4 度かつ東へ 0.8 度シフトさせた場合である。南へ 0.4 度かつ東へ 0.2 度シフトさせた場合において、強い降水域は朝倉地点より北西の背振山付近に見受けられる。対して、境界条件をさらに 0.6 度東へシフトさせた場合には、強めの降水域が朝倉地点付近にも見受けられるが最も強い降水域は南西側の長崎県や有明海北部に移動している。有明海北部の降水域は多良岳付近から発生しており、湿った大気が多良岳により持ち上げられ山岳効果により降水が発生したと考えられる。これらの事例が示すように、ABCS 法により境界条件をシフトさせた場合シフトさせた方向に常に降水域が移動するわけではない。ABCS 法を含め領域大気モデルを用いる MP Estimation 法によって前線性降雨に対しても周辺地形を考慮した想定最大規模降水量の推定が行えることが分かる。既存の統計的手法や PMP では考慮できないものであり、MP Estimation 法は前線性降雨に対しても有効であると言える。

a) 南へ 0.4 度 + 東へ 0.2 度



b) 南へ 0.4 度 + 東へ 0.8 度

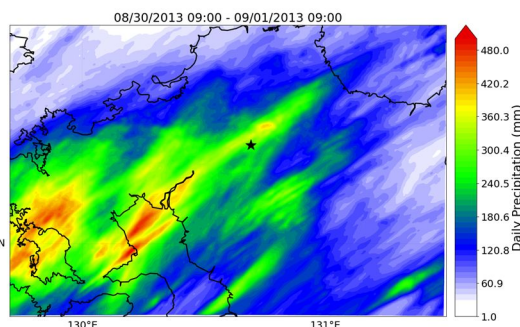


図 4 2013 年 8 月降水イベントの ABCS 法適用例

図 2b に示す降水量が最大化された時の 2009 年 7 月降水イベントにおいて、湿った大気は南西方向から流れ込んでいる。これは朝倉地域に甚大な被害をもたらした平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の湿った大気の流れと類似している。想定最大規模降水量を示した 2009 年 7 月降水イベントと比べ、2009 年 6 月降水イベントにおいては湿った大気の流れはより東向きであり、2013 年 8 月降水イベントはより北向きである。朝倉地域は比較的奥まった場所にあり、南西方向以外ほぼ山々に囲まれている。平成 29 年 7 月九州北部豪雨時において周辺に比べ標高が低い筑後川にそって南西側から多量の湿った大気の流れ込んできて朝倉地域における豪雨の一因になったと考えられている。最大化後の 2009 年 7 月降水イベントにおいても同様の事象が生じていると考えられる。一方で、2009 年 6 月及び 2013 年 8 月降水イベントは湿った大気の流れの向きがずれているため、ABCS 法により境界条件をシフトさせた後でも周辺の山地により流れを遮られもしくは山岳効果により先に降水を発生させることにより、朝倉地点で強い降水域が発生しづらかったものと考えられる。つまり、湿った大気が南西から流れ込んできた場合に朝倉地域において豪雨が発生する可能性があり、他の状況では発生しづらいと考えられる。また、上述の様に平成 29 年 7 月九州北部豪雨時に朝倉地点において過去の 2 倍を超える降水量が観測されている。豪雨を発生させやすい湿った大気の流れの方向が限定されているため豪雨の発生確率が低く、豪雨が発生した場合には過去の降水量に比べ大きくなりやすい状況にあった可能性がある。

本研究により MP Estimation 法による想定最大規模降水量の推定が日本における前線性降雨にも有効であることが示された。さらには、物理的考察により対象地において豪雨が発生しやすい大気状況の推定も可能であることが分かった。これらは日本においても水利構造物等やハザードマップ作製等に対してより信頼性のある想定最大規模降水量を提供できる可能性を示しており、本研究は今後の防災・減災において有用な知見を与えるものと考えられる。

本研究で取り扱った降水イベントは過去に発生したもののみである。地球温暖化により豪雨を発生させる大気条件の変化や湿った大気の流れ込んでくる回数の増加等も知られている。一方で、本研究における対象地の想定最大規模降水量は平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の降水量と同程度であった。本研究における想定最大規模降水量も過去の大気状況を基としており、地球温暖化を考慮すると増加する可能性が高い。本研究では過去の状況のみを取り扱ったが、実際に水利構造物の設計等に想定最大規模降水量を用いる場合には今後地球温暖化の影響も考慮していく必要がある。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1 . 発表者名 Takeyoshi Nagasato, Kei Ishida, Kazuki Yokoo, Masato Kiyama and Motoki Amagasaki
2 . 発表標題 Comparison between 2D-CNN a 3D-CNN for precipitation downscaling
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takeyoshi Nagasato, Kei Ishida , Kazuki Yokoo, Masato Kiyama and Motoki Amagasaki
2 . 発表標題 Effects of the spatial and temporal resolution of meteorological data on the accuracy of precipitation estimation by means of CNN
3 . 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOLOGICAL ENGINEERING AND GEOSCIENCES 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Kei Ishida, M.L. Kavvas, Z.Q. Chen, M.L. Anderson, A. Dib, A. Diaz, A. Ercan, and T. Trinh
2 . 発表標題 Maximum Precipitation Estimation under Future Climate Conditions by Means of Regional Atmospheric Model
3 . 学会等名 ASCE EWRI Congress 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kei Ishida, M.L. Kavvas, Z.Q. Chen, A. Ercan
2 . 発表標題 Physically-based Estimation of Probable Maximum Precipitation under a Changing Climate
3 . 学会等名 The Fourth International Conference on Computational Science and Engineering (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------