

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01969

研究課題名（和文）衛星搭載降水レーダと雲解像度モデルによる小規模急峻地形の降雨への影響解明

研究課題名（英文）Study of the effect of small-scale steep terrain on precipitation using satellite-borne precipitation radars and cloud-resolving models

研究代表者

重 尚一（Shige, Shoichi）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60344264

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

研究成果の概要（和文）：山岳域で高解像度な降水分布を得る唯一の手段と考えられている熱帯降水観測衛星搭載降水レーダ（TRMM/PR）および全球降水観測計画二周波降水レーダ（GPM/DPR）を用いて、降水量の多い熱帯および高緯度沿岸域の降水分布を明らかにし、そのメカニズムをモデルも用いて明らかにした。また、山岳域で高高度まで広がって、降水量推定の大きな誤差の要因となるブラインドゾーン（衛星降水レーダが降水を捉えることができない地表近くの高度層）の問題を低減する手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱帯沿岸降水の日周期が環境場の下層風でどのように変わるのかを示し、とくに強風時における海陸間の加熱差によって励起された重力波の役割をモデルで明らかにした。高緯度高緯度沿岸山岳域では、発生頻度は極めて小さい豪雪がもたらす降雪量は、衛星搭載雲レーダが検出した全降雪量の半分近くを占めており、豪雪が気候値に重要な貢献をしていることがわかった。ブラインドゾーンの問題を低減することにより、これまで見逃されていた浅い降水の検出を可能にするとともに、および地面付近で増加する降水量の推定を可能にした。手法の一部は、データ生成のために運用されているアルゴリズム最新版の実験的な変数として組み込まれた。

研究成果の概要（英文）：The Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar (TRMM/PR) and the Global Precipitation Measurement Project Dual-frequency Precipitation Radar (GPM/DPR), which are considered the only means to obtain high-resolution precipitation profiles in mountainous regions, were used to clarify precipitation distributions in tropical and high latitude coastal regions with high precipitation amounts. The mechanism of precipitation distribution was also clarified using models. We also developed methods to reduce the problem of blind zones (low altitude layers near the ground surface where satellite precipitation radar cannot detect precipitation), which extend to high altitudes in mountainous regions and cause large errors in precipitation estimation.

研究分野：気象学

キーワード：地形性降雨 衛星搭載降水レーダ

1. 研究開始当初の背景

豪雨災害の多くは地形で強化・集中化された地形性降雨によってもたらされており、地形性降雨メカニズムの解明は科学的・実用的に非常に重要である。広島で最大1時間101mmの降雨量が局所的に観測された「平成26年8月豪雨」では、高さ1000m、幅5km程度、斜度30°程度の小規模急峻山岳が重要な役割を果たしたと考えられている。しかし、小規模急峻山岳の降雨への影響を捉える事ができる数kmの水平分解能での降水分布を得ることは極めて難しく、気候学的描像すら得られていない。日本のアメダス雨量計ですら約20km間隔の配置で、さらに山岳域では雨量計の設置・維持が難しいため配置数は極めて限られる。地上気象レーダも山が影となって観測できない場合が多い。

日本が世界に先駆けて開発した熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダ (TRMM/PR) および2014年2月に打ち上げられた後継の全球降水観測計画主衛星搭載二周波降水レーダ (GPM/DPR) は、衛星からマイクロ波パルスを発射して降水粒子からの反射波を観測する。このため、山岳域でも上空から降雨を観測できるという強みがあり、山岳域で高解像度な降水分布を得る唯一の手段と考えられている。GPM/DPRによって高緯度まで観測範囲となり、全球的に山岳域の降水分布の把握が求められていた。特に降水量の多い沿岸の山岳域への関心が集まっていた。

2. 研究の目的

衛星搭載降水レーダは山岳域でも上空から降雨を観測できるという強みを持つ一方、地表で散乱されたエコー (グラウンドクラッタ) が混入する地表近くの高高度層では降水を捉えることができない弱点がある。この層はブラインドゾーンと呼ばれている (図1)。TRMM/PR や GPM/DPR は、衛星進行方向に直交してレーダビームを走査して降水を観測しており、この走査角によってブラインドゾーンの範囲は変化する。衛星直下付近の走査角ではブラインドゾーンは比較的狭いが、衛星直下から外れた走査角では高高度まで広がる。特に山岳域ではブラインドゾーンが高高度まで広がり、降水量推定の大きな誤差の要因となる。

本研究は、降水量の多い沿岸域に着目して山岳に関係した降水メカニズムを解明するとともに、ブラインドゾーン課題の改善を主な目的とした。また、衛星搭載降水レーダの感度と水平分解能に起因する降水検出率についても調べた。

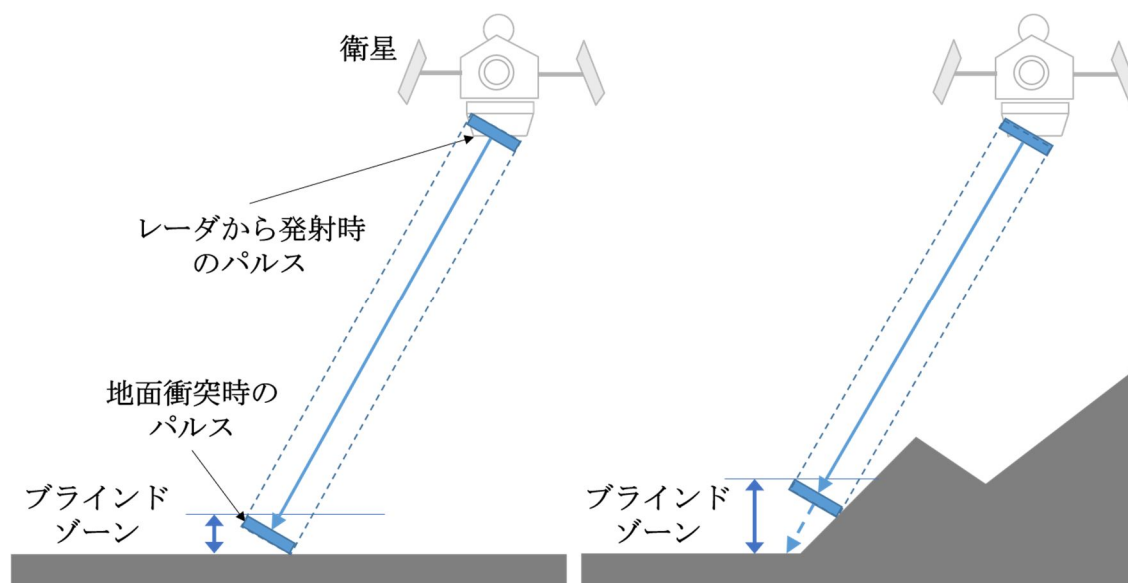


図1 衛星搭載降水レーダの大きい走査角でのブラインドゾーンの概念図
(左) 平地、(右) 山岳域

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の4つの研究項目に取り組んだ。研究項目A)とB)は降水量の多い沿岸域に着目して山岳に関係した降水メカニズムの解明を目的としており、研究項目C)とD)はブラインドゾーン課題の改善を目的としている。研究項目B)では、衛星搭載降水レーダの感度と水平分解能に起因する降水検出率についても調べた。

A) 熱帯沿岸域の降水分布とメカニズムの解明

熱帯沿岸域における降水は太陽放射による地表面加熱を駆動源とした日変化を伴う。近年、下層風の強さによって沿岸降水の日変化の振る舞いが変わることが指摘されているが、そうした

報告の多くは特定の地域・季節に限定した解析に留まっていた。そこで、本研究では、TRMM/PR による観測データを用いて、熱帯全域にわたる沿岸降水の日周期が、環境場の下層風によってどのように変わるのかを調べた。また、そのメカニズムをモデルによって明らかにした。

B) 高緯度沿岸域の降水分布とメカニズムの解明

高緯度の沿岸域のうち、海岸沿い1000kmを超える範囲にわたって降水が集中しているアラスカ南岸を解析対象に、GPM/DPR を構成する Ku 帯降水レーダ(GPM/KuPR)と CloudSat 衛星搭載の雲プロファイリングレーダ(CPR)を用いて降水気候値の空間分布とメカニズムの解明を行った。

C) 衛星搭載レーダ降雨推定値の走査角依存性の低減

TRMM/PR と GPM/KuPR の走査角に依存する降雨推定値の系統的な偏りを明らかにするとともに、衛星直下付近のデータを利用して走査角依存性の低減に取り組んだ。

D) 二周波レーダの特性を生かしたブラインドゾーンの低減

衛星搭載降水レーダのアルゴリズムは、グランドクラッタの混入がない高度である CFB (Clutter Free Bottom) を観測データから推定し、CFB より下層をブラインドゾーンとしている。本研究は、周波数の異なる2つのレーダで構成されている GPM/DPR の特性を生かした CFB 推定アルゴリズムを開発することによって、ブラインドゾーンの低減に取り組んだ。

4. 研究成果

A) 熱帯沿岸域の降水分布とメカニズムの解明

TRMM PR の 17 年間の観測データを、海岸線からの距離と、大気再解析データ ERA5 より得られた日平均の 850hPa 水平風の向き(陸向き or 海向き)および強さを基に、5 つのレジームに分類した。降水量の日平均からの偏差の日内時系列変化を確認すると、いずれのレジームでも、おおむね早朝に海上・午後に陸上でピークをとり、両ピークは時間を経るにつれて海岸から遠ざかる方向へ伝播していた。しかし、ピークをとる時間やその伝播パターンはレジームごとに異なっており、背景風の風下側ではピークと伝播の時刻が早まり、風上側では遅れるという傾向が見られた。その結果、弱風時には海岸線を境に左右対称な伝播パターンを示す一方で、強風時には左右非対称な伝播パターンを示していた。

ERA5 鉛直速度の日平均からの偏差を確認すると、降水量偏差と同様の日変化を示しており、この鉛直流が降水日変化の引き金となっていると考えられた。沿岸域においては、海陸間の加熱差によって励起された重力波の伝播によって、こうした鉛直流の日変化が現れることから、海陸風循環の線形モデルを用いて、各レジームに対応する背景風を与えたときの大気重力波応答を調べた。すると、TRMM PR で見られた降水日変化とよく似た、弱風時の対称・強風時の非対称な鉛直流の日変化パターンが得られた。弱風時の重力波は、海側へ向けた位相速度を持つモードと、陸側へ向けた位相速度を持つモード(第1および第2モード)で構成され、これらは海岸線を挟んで対称に伝播することから、対称な日変化パターンをもたらしていた。一方、強風時には、上記のモードは弱風時のものからドップラーシフトして、海岸線の風上側の第1モードはより遅い位相速度、風下側の第2モードはより速い位相速度を持つ。この結果、沿岸風上側での位相の遅れと、風下側の沿岸から離れたところでの位相の早まりを引き起こしていた。さらに、強風時には上記のモードに加え、風下側へ向けた背景風よりも遅い位相速度をもつモード(第3モード)が沿岸部に現れた。このモードは、第2モードよりも早い時間帯に沿岸で最大値をもつため、第2モードの振幅の小さい風下側の沿岸付近において、位相の早まりをもたらしていた。このように、強風時の非対称な日変化パターンは、位相速度と振幅の大きい領域が互いに異なる複数のモードが重なることで現れていたことが分かった。

B) 高緯度沿岸域の降水分布とメカニズムの解明

熱帯地域では降水量のみが重要であるのに対し、高緯度地域では、地上に降った降水粒子の相を識別することも、その地域の水循環を把握する上で重要である。CPR と KuPR を比較した多くの研究により、CPR は KuPR よりも高感度で、かつ水平分解能が高い(CPR は約 1km、KuPR は約 5km)ため、弱～中程度の降雨や降雪を測定できることが分かっている。一方、KuPR は衛星進行方向に直交してレーダビームを走査して降水を観測しているため、衛星直下しか観測していない CPR に比べてサンプリングの面で優れている。このように GPM KuPR と CloudSat CPR という相補的なデータセットを用いて、降水の水平・鉛直分布が海岸線とどのように関係しているかを調べ、以下の結論を得た：

KuPR と CPR は波長が異なるため、異なる降水粒子を検出することが可能である。KuPR は CPR が検出した高いレーダ反射率(具体的には CPR のレーダ反射率 7dBZ 以上)の降雨や混合相降水を捕捉しており、KuPR の捕捉率は CPR による液体降水検出全体の約 50%に相当することが分かった。しかし、KuPR は CPR が検出した降雪をわずかしか捉えておらず(CPR が検出した降雪の約 15%)アラスカの沿岸山岳域で多く見られる弱～中程度の降雪を見逃していた。ただし、KuPR は CPR のレーダ反射率が 11dBZ 以上に相当する豪雪は捉えていた。一方、KuPR は比較的強い降雨を測定できるが、CPR は信号が減衰してしまって低高度における強い降水強度の統計が得られにくいことを確認した。

沿岸山岳域では、混合相降水の頻度は低いものの、降雪の頻度が極めて高く、KuPR ではほとんど観測されない。豪雪（CPR 反射率 11dBZ 以上）の発生頻度は極めて小さいが、数少ない豪雪がもたらす降雪量は CPR が検出した全降雪量の半分近くを占めており、豪雪がアラスカの降水気候値に重要な貢献をしていることがわかった。沿岸山岳域の降雪は、海岸線沿いで生成または増強され、その後、対流圏中層の風の沿岸山岳に直交する成分によって流されて内陸へと移流される乱層雲によってもたらされていた。

KuPR を用いた降水観測では、レーダ反射率（降水強度）は一般に下方に向かって増加し、この特徴は特にアラスカ南岸周辺の沿岸海域や低地において明瞭であることが明らかになった。一方、衛星直下付近の観測でも、地表から約 1km 以下の高度はブラインドゾーンとなって降水粒子からのエコーを観測できず、特に山岳ではブラインドゾーンは高高度まで広がっており、浅い降水の見逃し等によって、実際の地表降水量が衛星搭載レーダで得られたものと異なる可能性が示された。

C) 衛星搭載レーダ降雨推定値の走査角依存性の低減

GPM/KuPR の全走査角データを用いた降水量は、衛星直下付近の走査角のみを用いた参照値に比べて、陸上で 7%と海上で 2%低かった。緯度 35 度以上では過小評価バイアスは 9%に増加した。衛星直下付近の観測から参照データセットを作成し、下層降水プロファイルの補正手法を提案し、浅い降水（降水頂 2.5 km 以下）の見逃しによる影響を推定した。

まず、降水の構造的特徴を示す変数や環境パラメータから作成した先験的な衛星直下付近データベースを用いて、下層降水プロファイル(LPP)を補正した。LPP 補正は、標高の高い場所や中高緯度地域など、高度 2 km 以下で下方に向かって増加する降水プロファイルが支配的な領域で降水量を増加させた。全球的には、LPP 補正は降水量を 5%増加させた。

次に、浅い降水の欠損の降水量推定への影響を、降水頂 2.5 km 以下の浅い降水の検出率の走査角による差を使って推定した。浅い降水の欠損(SPD)の影響は、LPP 補正の影響と同程度の大きさであった。SPD 補正のための参照テーブルは、CFB と空間平均された浅い降水量の割合によって制約され、3 ヶ月毎 0.1°格子の統計に補正を適用するように作成した。SPD 補正は、浅い降水が卓越する亜熱帯における降水量の少ない一部海域や高緯度の降水量を 50%増加させた。

これら 2 つの補正によって、降水量が陸上と海洋でそれぞれ 8%と 11%増加した。北緯 60 度から南緯 60 度の緯度で、衛星と雨量計を複合利用した推定値に対する KuPR の差は -17%から -9%に減少し、雨量計の推定値に対する差は陸上で -19%から -15%に減少した。

上記 LPP 補正は最新版のアルゴリズムの実験的な変数として組み込まれた。さらに、台湾などいくつかの領域で 0.01 度の CFB データを作成し、CFB が急峻な谷で深くなることが分かった。また、SPD 補正は季節依存性が強いこと（浅い降水の割合に対応）が明らかになった。

D) 二周波レーダの特性を生かしたブラインドゾーンの低減

台湾北部大屯山周辺には高密度な雨量計網が設置されており、これらの雨量計データと S バンド地上ドップラーレーダのデータを GPM/KuPR のデータと比較した。2014 年 3 月から 2020 年 2 月までの期間で KuPR が大屯山周辺を観測した 426 事例のうち、雨量計が捉えていた 10mm/h 以上の強い降水を見逃している 12 事例を検出した。地上レーダのレーダ反射率プロファイルから、KuPR が降水エコーを地表面クラッターと誤判定し、グランドクラッタの混入がない高度である CFB を実際よりも高く推定することでブラインドゾーンが高高度まで広がり、浅い降水が検出できていないことが判明した。

レーダの受信電力 (P_r) は、送信電力 (P_t)、波長 (λ)、減衰量 (A)、散乱断面積に依存するため、KuPR (1012.0W、13.6GHz) と KaPR (146.5W、35.5GHz) で異なる。降水粒子による散乱の場合、散乱断面積 (σ_{0}) は λ に依存する。したがって、 P_r (Ku) と P_r (Ka) の比である受信電力値差 (DFRP) は、降水エコーでは λ に依存する。一方、グランドクラッタに対する DFRP は、地表の散乱断面積 (σ_{0}) が λ に依存しないため、 λ に依存しない。このような散乱断面積依存性の違いから、地表の DFRP ($DFRP_{Srf}$) は降水の DFRP ($DFRP_{Precip}$) より大きくなる。この関係から、グランドクラッタの影響を受ける高度では、DFRP の値が急激に大きくなることが確認された。そこで、隣接する 2 つのレンジビン間の DFRP が閾値である 2.3dB 以上に増加する高度で CFB を推定した (DFRP アルゴリズム)。

DFRP アルゴリズムの適用により、現在運用されている KuPR アルゴリズムが降水を見逃していた大屯山で CFB が約 500m 低下し、台湾北部の海洋など一部の地域では地上レーダより低い値を示すようになった。DFRP アルゴリズムは、降水の検出を改善し、降水量の過小評価を緩和した。KuPR と KaPR の両方が大屯山を観測した全 216 ケースについて、DFRP が推定した CFB での KuPR 降水量を元の CFB での KuPR 降水量と比較したところ、threat score (TS)、probability of detection (POD)、相関係数の値が改善された。一方、false alarm ratio (FAR) と frequency bias (FB) の値が悪化した。DFRP が推定した CFB が地上レーダの CFB よりも低い地域があり、地上レーダが見逃していた浅い降水を KuPR が捉えるようになったためだと推測された。地上レーダと比較した結果、DFRP アルゴリズムが CFB を低く推定しすぎてグランドクラッタを降水エコーと誤判定した事例がないことを確認した。逆に、現在運用されている KuPR アルゴリズムがサイドローブクラッタを降水エコーと誤判定し、大雨と誤推定した事例があり、この事例は最新版の KuPR アルゴリズムでも修正されていない事がわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aoki, S., S. Shige	4. 巻 99
2. 論文標題 Large precipitation gradients along the south coast of Alaska revealed by spaceborne radars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Meteor. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 5-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/jmsj.2021-001	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 Hirose, M., S. Shige, T. Kubota, F. A. Furuzawa, H. Minda, H. Masunaga	4. 巻 99
2. 論文標題 Refinement of surface precipitation estimates for the dual-frequency precipitation radar on the GPM Core Observatory using near-nadir measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Meteor. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 1231-1252
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/JMSJ.2021-060	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16件（うち招待講演 5件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Shige, S.
2. 発表標題 Improvement of the Heavy Orographic Rainfall Retrievals for Microwave Radiometers
3. 学会等名 2019 PMM Science Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shige, S.
2. 発表標題 The Importance of Warm-Rain Processes in Heavy Rainfall Events: Lessons Learned from the Development of Satellite Rainfall Retrievals
3. 学会等名 IP4 (International Workshop on Prediction skill of extreme Precipitation events and tropical cyclones: Present status and future Prospects) and Annual Climate Change Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shige, S.
2. 発表標題 Improvements of GSMaP and SLH algorithms for the GPM era
3. 学会等名 Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Mission FY2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木俊輔, 重尚一
2. 発表標題 衛星搭載レーダを用いた高緯度海岸域での降水特性の解析
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木俊輔, 重尚一
2. 発表標題 衛星搭載レーダでとらえたアラスカ湾岸での降水勾配と地形効果の寄与
3. 学会等名 第22回CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武村一史, 重尚一
2. 発表標題 重合格子法における単調性及び保存性を持つ補間法の開発
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 広瀬正史
2. 発表標題 低高度の降水鉛直分布
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 Uncertainties in gridded precipitation products derived from spaceborne radars
3. 学会等名 AsiaPEX kickoff conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 From a satellite perspective
3. 学会等名 International workshop on decadal challenges in Asian monsoon process studies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 広瀬正史
2. 発表標題 衛星搭載降水レーダによる降水気候プロダクトの評価と拡張
3. 学会等名 降水観測ミッションサイエンスチーム国内キックオフ会合
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 Assessing climatological precipitation gradients in mountainous regions derived from spaceborne radars
3. 学会等名 Proc. of AMS 39th international conference on radar meteorology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 Spatial rainfall uncertainty observed using spaceborne radars
3. 学会等名 Proc. of 2019 Joint satellite conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 Effect of clutter interference in surface rainfall estimates at off-nadir scan angles
3. 学会等名 NASA PMM science team meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose, M.
2. 発表標題 Assessing and enhancing climate precipitation products derived from spaceborne radars
3. 学会等名 JAXA Joint PI workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shige, S.
2. 発表標題 Improvement of the Heavy Orographic Rainfall Retrievals in the GSMaP Algorithm for Microwave Radiometers
3. 学会等名 NASA Jet Propulsion Laboratory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shige, S.
2. 発表標題 Characteristics of precipitation systems over Asia from a TRMM PR observation data set spanning 16 years
3. 学会等名 Workshop on Atmospheric Satellites for Asian Monsoon cloud-precipitation Science and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高解像度降水データベースウェブサイト https://www.rain-clim.com

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	広瀬 正史 (Hirose Masafumi) (40392807)	名城大学・理工学部・准教授 (33919)	

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