

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01162

研究課題名(和文) 高頻度3次元雲・降水・雷観測による積乱雲の構造と発達プロセスの概念モデル再構築

研究課題名(英文) Reconstruction of a conceptual model for the structure and development process of cumulonimbus clouds by high-frequency 3-dimensional cloud, precipitation, and lightning observations

研究代表者

大東 忠保 (OHIGASHI, Tadayasu)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・特別研究員

研究者番号：80464155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高頻度の観測を実施し、積乱雲の構造と発生プロセスを高時間分解能データを用いて明らかにするための研究を行った。積乱雲の発生環境場については日中1時間毎の観測9日間を含むラジオゾンデ観測をつくばで行うとともに、これに同期して、雲レーダーやタイムラプスカメラを用い雲の構造の高頻度観測を行った。降水レーダーを用いた解析も追加し、強い降水をもたらす積乱雲が発生する時の特徴について、環境場、雲、降水の観点から明らかにした。また、雲レーダーの同化に取り組み、数値モデルへの雲レーダー観測値の取り込み方法を検討するとともに、雲の発達段階を考慮した同化手法の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高頻度の環境場観測からは、下層から中層の湿度場の変動が大きいことがわかり、カメラ観測と合わせると、積乱雲の発生に先行して、積雲の鉛直方向への進展と局所的な加湿が積乱雲の発達に重要なことを示唆している。一方で、雲が発達する時には障害要因が小さくなるように雲の水平スケールが大きくなっていることがわかった。これらの成果は強雨をもたらす雲の基本単位としての積乱雲の構造と発達プロセスの理解に寄与するものである。雲レーダーの同化については詳細な方法の検討が必要であるが、雲発生初期の情報を取り込むことによる積乱雲発達の短時間物理予測の可能性を示すものであり、局地的大雨の直前予測改善への波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, high-frequency observations were conducted to clarify the structure and development process of cumulonimbus clouds with high temporal resolution data. Radiosonde observations of the environmental field of cumulonimbus cloud development, including nine days of hourly observations during the daytime, were conducted in Tsukuba, and high-frequency observations of cloud structure were performed using cloud radars and time-lapse cameras. We also performed an analysis using precipitation radar to clarify the characteristics of cumulonimbus clouds that produce strong precipitation from the viewpoints of environmental fields, clouds, and precipitation. In addition, the assimilation of cloud radar data was studied. We have examined how to incorporate cloud radar observations into numerical models, and have shown the usefulness of an assimilation method that takes into account the development stages of clouds.

研究分野：気象学

キーワード：積乱雲 雲レーダー 雷 雲・降水同化 ゾンデ タイムラプスカメラ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

積乱雲は強雨をもたらす雲の基本単位であり、その構造と発達プロセスを理解し概念モデル化することは、学術的に重要であるとともに、対流雲システムが引き起こす大雨を理解するためにも重要である。しかし、この概念モデルの基本的な部分は、1940年代頃から大きくは変わっていない。地球温暖化の進行によるものと考えられる短時間大雨の増加が日本の気象庁の観測でも示されており、将来的な温暖化の進行によってさらにその頻度の増加が見込まれる。2008年には東京の雑司ヶ谷において下水道工事関係者5名が、また神戸の都賀川では子供を含む5名の人命が失われる事故が起きているが、この原因となったのは積乱雲に伴う激しい雨であった。このことから、積乱雲の構造と発生プロセスの解明、特に数多く存在する雲の中から発達する雲を抽出することは、防災上も重要である。

2010年代には、防災科学技術研究所(以下、防災科研)で3次元の雲観測が可能な世界で唯一の雲レーダーネットワークが構築され、偏波降水レーダー、雷放電観測などと合わせて、積乱雲を総合的に観測できる体制が整えられてきた。一方で、数値シミュレーションでは、観測データの同化により初期値の改善がはかられてきている。積乱雲の時間スケールは短く長時間の物理的予測は困難であるものの、雲の発達初期を観測でき、同化によって取り込めれば数十分程度の物理予測の改善を期待できる。しかしながら、雲の変動は激しく、効果的な同化方法を調べるために必要な高頻度の雲の3次元観測は実現できていなかった。

### 2. 研究の目的

強雨をもたらす雲の基本単位である積乱雲について、時間変動の大きな構造と発達プロセスを明らかにすることは、学術的に重要であるとともに、局地的大雨を理解するためにも重要である。また、雲の発達以前からの詳細な情報の観測が、防災上も求められている。そこで、防災科研が関東において構築してきた雲レーダーを含む積乱雲の観測ネットワークを利用するとともに、環境場等の高頻度観測も追加し、これまでにない高頻度観測データを用いて積乱雲の構造と発達プロセスを明らかにすることを目的とする。また、これまでに利用されていない雲レーダーによる雲の3次元観測データを同化して予測の改善をはかるために、雲レーダー観測値の同化手法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 環境場の観測

大気環境場を把握するため、気球に取り付けて飛揚させ、気温、相対湿度、高度、気圧、風向・風速を取得するラジオゾンデ観測を行った。気象庁等が実施する現業観測は通常1日2回(12時間間隔)であり、1時間程度の寿命しかもたない積乱雲の時間スケールと比較して時間分解能が粗い。そこで、本研究では高時間分解能の大気環境場を得るために高頻度のラジオゾンデ観測を行った。

観測は2022年8月18日から27日と、2023年8月22日から28日の盛夏期に2度設定し、つくば市の防災科研で行った。連続的な観測を行うため2台の受信機を用い、朝8時から夕方17時の間に放球を行った。放球の時間間隔は最短で1時間であった。1時間おきの観測の場合1日最大10回の放球となるが、このような連続1時間間隔における観測は9日間実施した。全部で132回の放球を行い、地面からの加熱の影響が大きい高度5km以下についてはこのほとんどでデータを取得した。

#### (2) 積乱雲の構造観測

関東地方に展開する防災科研のKaバンド(波長8mm)雲レーダー、Xバンド降水レーダー、走査型ライダー、雷放電経路3次元観測システムLMAといったリモセン機器を用いて、雲の内部構造や発達過程に関するデータを取得した。これに加えて、タイムラプスカメラを用いた観測を行った。タイムラプスカメラは雲の外形のみの観測となるが、スキャンに時間を要するレーダーと比較すると高頻度の観測が可能である。計6台のタイムラプスカメラを関東地方に設置し、通常30秒おきの観測を実施したことに加えて、最短で5秒おきの撮影を行った。また、国土交通省XRAINによる地上降水強度データを解析に利用した。

#### (3) 同化実験

名古屋大学で開発された雲解像モデルCReSSを用いて、雲レーダーの同化と数値シミュレーションを行った。先行研究から、雲レーダーのレーダー反射強度と雲水量との間には、いくつかの経験式が得られている。一方で、その関係は実際には大きな分散をもっており、また、-15dBZ程度より大きなレーダー反射強度になると、雲粒子より有意に粒径が大きなドリズル粒子の影響を無視できなくなることにより、純粋な雲粒のみの場合とは関係式が異なることが予想される。しかしながら、その関係は現状十分にはよくわかっていない。これらのことから雲レーダーの観測値を雲水量に変換して同化するのではなく、雲レーダーにより有意なレーダー反射強度が存在する部分は雲が存在し、飽和状態であると過程し、湿度のナッジングを行うことで同化を

行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高頻度ラジオゾンデ観測による積乱雲の発生環境場の特徴

1 時間毎に 1 日 10 回の放球を実施し、地上での日最高気温もほぼ同じであったが日射がかなり異なった 2022 年 8 月 23 日(日最高気温 33.4℃、8~17 時の相対湿度 62~87%、日照時間 0~0.8h)と、2022 年 8 月 27 日(日最高気温 33.6℃、8~17 時相対湿度 63~96%、11~17 時日照時間  $\geq 0.8$ )のゾンデ観測結果を示す。タイムラプスカメラや気

象庁の観測から 23 日は層状の雲が広い時間で覆っていたが、27日は昼前から日照も多く対流性の雲が多く見られた。

図 1 に 8 月 23 日(左)と 8 月 27 日(右)における、8 時から 17 時まで 1 時間ごとの温度と露点温度の高度分布を示す。23 日は高度 2km 以下で、27 日は 1km 以下で午前中、時間とともに温度が上昇し、これに伴って同高度が不安定化している。それより上空での温度の時間変化は大きくない。両日を比べると高度 1.5km よりも上空で 27 日の方が温度が低く不安定な成層を示す。このことが、27 日の方が対流性の雲が発達した原因と思われる。したがって、日射によって下層が暖められることが日変化を引き起こすものの、両日の対流の発生のしやすさについては変動の少ない中・上層の温度が重要であると考えられる。また、両日の違いとして 27 日のほうが 1.5~4km の露点温度の変動が大きい。これは対流活動と積雲の発生の結果であると考えられるが、新たに発生する対流に対しては湿度に対する環境場の違いを与えており、先に生じた積雲が後に生じる対流の発達のしやすさに影響を与えているものと考えられる。

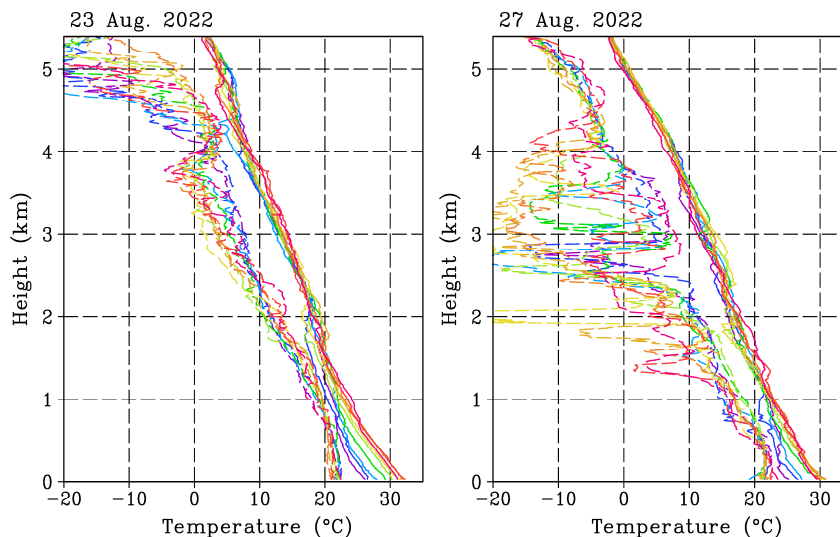


図 1 (左) 2022 年 8 月 23 日と(右) 2022 年 8 月 27 日の 8 時~17 時まで 1 時間ごとのゾンデ観測結果により得られた温度(°C、実線)、露点温度(°C、破線)、紫(8 時)から暖色系に向かって時間が進む。

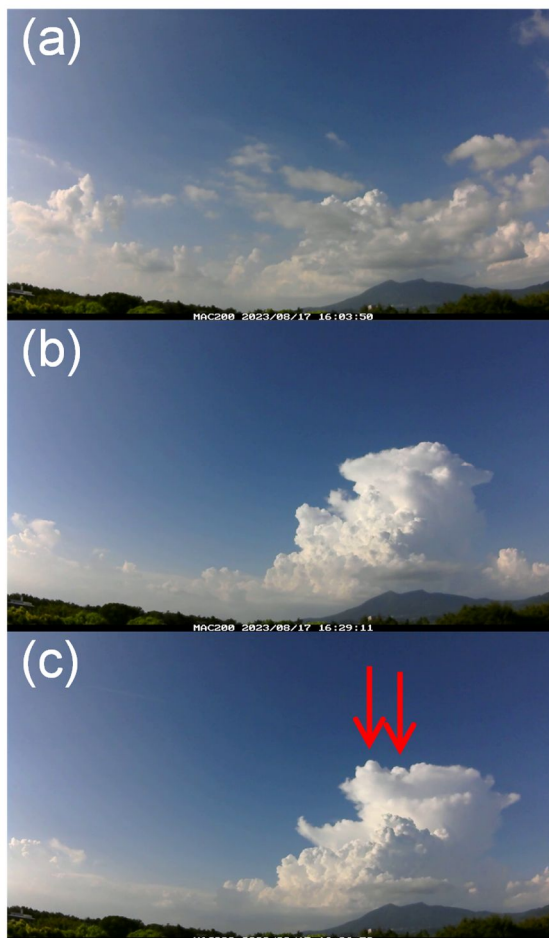


図 2 つくばの防災科研の屋上に設置したタイムラプスカメラにより撮影された、2023 年 8 月 17 日 (a) 16 時 03 分 50 秒、(b) 16 時 29 分 11 秒、(c) 16 時 36 分 53 秒の雲画像。北の方角が撮影された。

## (2) タイムラプスカメラを用いた積乱雲の高頻度画像観測

図2につくばの防災科研の屋上に設置したタイムラプスカメラにより撮影された、2023年8月17日の積乱雲の発達の様子を示す。この日は北の方角を約5秒おきに撮影した。16時03分(図2a)では、積乱雲はまだ発達しかけており、低層に多くの積雲が見られる。積乱雲が発達した16時29分(図2b)の画像を見ると、周囲の低層の雲は消散する傾向にあった。これは、積乱雲の強い上昇流の周辺部に補償下降流が生じたためと考えられる。その後、発達した雲に水平に接するように、また、発達した雲の中を上昇するように雲が発達した。図2cの2つの矢印で示した雲は、そのようにして発達し、図2bで示されるような既存の雲頂を突き抜けるようにして発達したものである。

雲頂よりも上方は未飽和であるため、上方に発達しようとする雲は未飽和の空気と混合しながら上昇する。そして、上昇する空気塊が取り込んだ空気のために未飽和になると雲は蒸発する。雲が蒸発すると、潜熱による大気の冷却が起こるため浮力を失う。一方で、雲の蒸発は周囲の空気を加湿し、その後、その高度では雲が発達しやすくなる。そのため、この加湿された空気が水平風によってそれほど遠くに流されない程度の時間間隔で、雲の上昇が繰り返し起これば、間欠的に雲頂は増加し雲は発達する。積乱雲へと発達する雲は雲の上方への盛り上がり短時間で繰り返される一方で、その間隔が長い場合や鉛直シアが強い場合は、加湿された空気は水平方向下流に流されてしまう。このように、先行する積雲が雲のごく周囲の大気場を変えることによって、積乱雲の発生・発達に有利な状況が生まれている可能性がある。

## (3) 雲レーダーの同化実験

複数台の雲レーダーを用いて、高頻度取得された雲の3次元観測データを用い、雲レーダーエコーの存在域において大気を加湿させる同化手法を用いて、積乱雲の発達の数値シミュレーションを実施した。様々な時間からの同化を試みると、積乱雲の発達の仕方は、同化を行う時間に非常に敏感であった。したがって、同化-シミュレーションのサイクルを短時間で繰り返し、絶えず最新の観測情報を同化することが、早期の積乱雲の発達予測に重要と考えられる。

雲レーダーエコー域を飽和させる同化手法では、通常同領域に積乱雲が発生・発達する。しかしながら、現実には衰弱期のエコーは、その後発達することはない。このことから、雲レーダーエコーを何の条件もなく同化させることは、数値シミュレーションにおいて偽の積乱雲を発達させることにつながる。これを防ぐためには、同化する雲レーダー観測域が発達する状態にあるのか、衰弱する方向にあるのかを判断し、選択的に同化させる必要がある。発達段階の識別として、同一と考えられる降水域を同定しながら時間方向に追跡することが考えられる。

走査型の雲レーダーは世界でもほとんど存在しておらず、3次元の雲分布データはほとんど無い。このことから、積乱雲を対象とした雲レーダーの同化例はこれまで全く存在しておらず、本研究は先駆的な研究成果を示した。

## (4) 降水レーダーを用いた雲のスケールと降水強度の関係の解析

積乱雲の発達や短時間強雨の直前予測を行うためには、直接的には浮力もしくは上昇流が大きいことが示される必要がある。しかしながら、観測において浮力を見積もることは難しい。上昇流については、2台以上のドップラーレーダーを用いれば、上昇流を含む気流3成分の3次元分布を導出することが原理的には可能であるが、雲の発達初期においてはレーダーエコーが散在し連続的でないことから正確な上昇流の見積もりは難しい。これらのことから、上昇流や浮力の大きさと関連があり、比較的観測値を得やすい物理量を指標として、物理メカニズムを通して積乱雲の直前予測を行う試みがなされている。例えば、鉛直渦度の強さ、最大エコー強度の時間増加率、ZDR カラムやKDP カラムの鉛直スケール、潜熱解放量と関連する鉛直積算の水の量などが浮力や上昇流の大きさと関連があることが予想される。これらのうちのいくつかについては先行研究による積乱雲の直前予測において、強雨に対して一定のリードタイムをもつことが示されている。

一方で、積乱雲の発達の阻害要因として、周囲の空気とのエントレインメントが考えられる。積乱雲の環境場は積乱雲の内部よりも低温で乾いている。積乱雲の発達時の上昇流が環境場をエントレインメントによって取り込むことによって、雲の内部は低温・低湿となる。乾燥空気を取り込みにより未飽和状態になれば雲粒は蒸発し、潜熱によって空気はさらに冷やされる。このことにより浮力は減少し、上昇流の発達が弱められるはずである。このエントレインメントは雲の表面積が大きいほど起こりやすい一方で、雲の体積が大きいほど希釈される割合は少なくなるはずである。すなわち、雲の水平スケールが大きいほど、エントレインメントによる雲発達の阻害の割合は小さくなることが予想される。

そこで、国土交通省の降水レーダー観測網XRAINにより推定された地上降水強度のデータを用い、降水域の水平スケールと内部の降水の強さの関係を調べた。本研究では、降水域を時間的に追跡することはせず、同じ時間における降水域のスケールと降水の強さの関係を調べた。2018年と2019年の8月のデータを解析したところ、地上降水域の面積が小さい時は内部に強い雨(>50mm/h)を含むことがほとんどなかった。このことから、大きな降水強度をもつためには一定以上の面積をもつ必要があることがわかった。このことを利用すれば、大きな降水強度をも

つ雲の候補を絞ることが可能である。一方、面積が大きい場合は降水強度が強い場合も弱い場合も存在した。面積がある程度大きいながら降水強度が弱い場合は、積乱雲の衰弱時を含んでいると考えられる。ある時間以降の雲の発達の可能性をより精度よく知るためには、時間変動を含む特徴をさらに調べる必要がある。

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 1件）

1. 著者名 Kato Ryohei, Shimizu Shingo, Ohigashi Tadayasu, Maesaka Takeshi, Shimose Ken-ichi, Iwanami Koyuru	4. 巻 37
2. 論文標題 Prediction of Meso-Scale Local Heavy Rain by Ground-Based Cloud Radar Assimilation with Water Vapor Nudging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Weather and Forecasting	6. 最初と最後の頁 1553 ~ 1566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/WAF-D-22-0017.1	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 NUGROHO Ginaldi Ari, YAMAGUCHI Kosei, IWAI Hironori, OHIGASHI Tadayasu, SHINODA Taro, TSUBOKI Kazuhisa, NAKAKITA Eiichi	4. 巻 77
2. 論文標題 CONVECTIVE INITIATION CHARACTERISTICS BY DOPPLER LIDAR OBSERVATION DURING KA-BAND RADAR FIRST ECHO : A CASE STUDY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1303 ~ I_1308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中澤利恵・篠田太郎・民田晴也・久島萌人・大東忠保・山口弘誠・中北英一
2. 発表標題 Ka バンド雲レーダを用いた発達する対流雲の早期識別手法の検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakazawa, R., T. Shinoda, T. Ohigashi, K. Yamaguchi, H. Minda, M. Kyushima, K. Tsuboki, and E. Nanakita
2. 発表標題 Early detection of rapidly developing convective echoes using a Ka-band radar
3. 学会等名 AOGS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤亮平・清水慎吾・大東忠保・前坂 剛・下瀬健一・岩波 越
2. 発表標題 局地的大雨予測に対する雲レーダー同化手法の高度化 積乱雲自動追跡による選択的同化手法の開発
3. 学会等名 日本気象学会2024年度春季大会講演予稿集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ohigashi, T, T. Maesaka, S Suzuki, Y. Shusse, N. Sakurai
2. 発表標題 Cloud radar observation of early development stage of summer convective clouds in the Tokyo metropolitan area, Japan
3. 学会等名 AOGS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前坂 剛, 大東忠保, 岩波 越, 鈴木真一, 出世ゆかり, 櫻井南海子
2. 発表標題 関東地方で降雹をもたらした降水システムの移動とガストフロント
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤亮平, 清水慎吾, 大東忠保, 前坂 剛, 下瀬健一, 岩波 越
2. 発表標題 局地的大雨予測に対する雲レーダー同化手法の高度化に向けて 同化窓の感度実験から得られた知見と課題
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中澤利恵, 篠田太郎, 民田晴也, 久島萌人, 大東忠保, 山口弘誠, 中北英一
2. 発表標題 ファーストエコー検出に関する指標の検証 Kaバンド雲レーダを用いた定量的アプローチ
3. 学会等名 令和4年度日本気象学会中部支部研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前坂 剛・大東忠保・岩波 越・鈴木真一・櫻井南海子・出世ゆかり・木枝香織・清水慎吾・宇治 靖・高橋暢宏・花土 弘・中川勝広・牛尾知雄
2. 発表標題 マルチセンシング観測による積雲から積乱雲への成長過程
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ohigashi, T., T. Maesaka, S. Suzuki, Y. Shusse, and N. Sakurai
2. 発表標題 Comparison between developed and non-developed summer convective clouds in the Tokyo metropolitan area observed by scanning cloud radars
3. 学会等名 International Conference on Clouds and Precipitation 2021 (ICCP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出世ゆかり, 安達聖
2. 発表標題 ひょう粒子の3次元X線CT撮像
3. 学会等名 日本気象学会2021年春季学会
4. 発表年 2021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
研究分担者	前坂 剛  (MAESAKA Takeshi)  (70450260)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・上席研究員   (82102)	
研究分担者	出世 ゆかり  (SHUSSE Yukari)  (80415851)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員   (82102)	
研究分担者	櫻井 南海子  (SAKURAI Namiko)  (30435846)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員   (82102)	
研究分担者	加藤 亮平  (KATO Ryohei)  (70811868)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員   (82102)	

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