

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：55201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20453

研究課題名（和文）マルチスケールの気流解析に基づく構造物への塩分付着量推定手法の構築

研究課題名（英文）Estimation of amount of air-borne salt adhered to structural surface by multiscale airflow analysis

研究代表者

坪倉 佑太（TSUBOKURA, Yuta）

松江工業高等専門学校・環境・建設工学科・助教

研究者番号：40964846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：大気中の塩分粒子は、構造物に付着することで腐食を促進させるため、維持管理においては付着する塩分量を適切に評価することが求められる。本研究では大気中塩分濃度の評価手法の構築を目指し、領域気象モデルWRF/Chemによる大気中の塩分量予測を試みた。結果として、沿岸域および内陸の汽水湖での海塩粒子の発生条件を適切に考慮することで、大気中の塩分量を従来に比べ高精度で予測できることが明らかになった。また、構造物に付着する塩分量の推定手法の開発を目的として、構造物周囲の気流と粒子の連成解析を数値流体解析を用いて実施することにより、矩形断面および橋梁断面を模した断面における粒子の塩分付着分布を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼橋梁の維持管理においては、日本は島国であることから、特に海塩粒子の付着による鋼材の腐食が大きな懸念事項となる。したがって、橋梁各部位に付着する塩分量の評価が重要であるが、未だ手法の確立には至ってない。本研究では、領域気象モデルWRF/Chemおよび橋梁周囲のCFD解析により、一貫した解析のみによる付着量評価の可能性を示している。日本各地に存在する橋梁等の構造物は膨大であるから、現地観測ではなく、解析のみによる付着塩分量評価手法の確立は、維持管理の効率化の観点から、意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：Since atmospheric salts accelerate corrosion by adhering to structures, appropriate evaluation of the amount of salts adhering to structures is required in maintenance and management. In this study, the author attempted to predict atmospheric salinity using the meteorological model WRF/Chem to develop a method for evaluating atmospheric salinity. As a result, it was found that the atmospheric salt content can be predicted with high accuracy by appropriately considering the conditions for the generation of sea salt particles. Additionally, to develop a method for estimating the amount of salt deposited on structures, a coupled analysis of airflow and particles around structures was conducted using numerical fluid dynamics (CFD) to clarify the distribution of salt deposition on particles in a rectangular cross-section and a cross-section simulating a bridge.

研究分野：構造工学

キーワード：維持管理 海塩粒子 CFD WRF

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

沿岸域で生成した海塩粒子は、鋼橋の鋼材腐食やコンクリート橋の塩害を助長する。したがって、効果的な維持管理の実現のためには、橋梁の各部位に付着する塩分量を、橋梁の形状や架橋地点の腐食環境などに基づいて推定する手法の開発が期待される。このような背景から、近年の計算機性能の向上も相まって、大気中の海塩粒子濃度予測や、橋梁周りの気流解析および粒子飛散解析に基づく付着塩分量推定に関する研究がなされているが、推定精度は不十分であり、かつ計算負荷も極めて大きい。一方、実務に目を向けると、現状では、鋼道路橋における防錆塗装の有無や塗膜の厚さは、橋梁地点に飛来する塩分量（大気中の海塩粒子量）に基づいて規定されており、全部位を同様に処置している。しかし、既往の研究報告（野口ら、構造工学論文集 Vol. 59A, 2013）によって、橋梁へ付着する塩分量は部位ごとに大きく異なることが確認されており、やはり付着塩分量を踏まえて部位別に塗膜量や維持管理の度合いを決定すべきといえる。

数値解析による構造物への付着塩分量評価の課題としては、付着計算の入力値となる大気中の塩分量を如何にして与えるか、そして構造物へ付着する塩分量計算を如何にして精度よく、低負荷で行うかという課題が挙げられる。大気中の塩分量に関しては、大気化学プロセスを組み込んだ領域気象モデル WRF/Chem による予測がこれまでになされているが、計算負荷が高く、予測精度も十分とは言えない。また、構造物へ付着する塩分量推定に関しては、数値流体解析（Computational Fluid Dynamics; CFD）を用いて粒子をラグランジュ的に追跡し、評価するといった手法があるが、種々の形状の橋梁断面に対して逐一解析を行うのは現実的ではない。

以上まとめると、構造物へ付着する塩分量推定においては、付着計算の入力値となる大気中塩分濃度をいかにして評価するのか、そして、いかにして計算精度を保ったまま簡便に橋梁の各部位に付着する塩分量を評価するかという二つの課題があり、効果的・経済的な維持管理の実現といった観点から、これらの解決が期待されている。

### 2. 研究の目的

先述した背景を踏まえ、本研究の目的は、(1)付着量計算の入力値となる大気中塩分濃度の評価手法の構築、および(2)構造物へ付着する塩分量推定手法の開発を行うことである。これらの課題はいずれも、地球規模、橋梁スケールと空間的なスケールに大きな違いはあるものの、風の流れに関する課題といえる。そこで、本研究では領域気象モデル WRF/Chem、数値流体解析（CFD）を用いたマルチな空間スケールを対象とした流れの解析に基づいて、風工学的観点からこれらの課題解決を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究は、下記の(1)、(2)の検討内容からなる。

#### (1) 大気中塩分濃度の評価手法の構築

本研究では、領域気象モデル WRF/Chem による、大気中塩分量の広域的な推定を試みる。WRF/Chem は、大気化学プロセスを考慮した局地気象モデルであり、風速場や降水量、大気中の塩分濃度など様々な気象に関連する要素を推定することが出来る。ただし、大気中塩分量を推定する場合、計算精度を高く保つためには計算負荷が高くなるという課題がある。そこで本研究では、WRF/Chem の中でも比較的軽負荷とされている粉塵排出スキーム、Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) モデルを用いて、大気中塩分量の推定を行う。ただし、GOCART モデルは計算精度の面でその他モデルと比較して劣るという報告もあり（野口ら、土木学会論文集 A1, Vol. 73, 2017）、本研究では GOCART モデルを修正して計算精度の向上を図り、軽負荷で高精度な大気中塩分量推定の実現を目指す。

なお、当初予定では、既存の飛来塩分量の観測法であるドライガーゼ法と WRF/Chem を組み合わせ、両者の結果から大気中塩分量を簡便に算出するという手法の構築を考えていたが、上記の WRF/Chem の GOCART モデルの修正により、比較的計算負荷を抑えた推定が実現可能であると判断されたため、本研究では WRF/Chem のみによる大気中塩分量推定を行った。

#### (2) 構造物へ付着する塩分量推定手法の開発

基本形状を有する構造物を対象として、数値流体解析（CFD）を用いた流れ場および粒子挙動の評価を行う。具体的には、矩形断面、および実際の橋梁断面に即した形状である断面を対象とする。これらの検討により、種々の形状を有する断面周囲の流れ構造と付着分布の定性的な関係を明らかにする。なお、粒子は断面上流から飛来する場合と、冬季に路面に散布される凍結防止剤を想定して断面上面より飛来する場合の 2 パターンの解析を行った。これらの検討により、橋梁形状や風速と付着塩分量分布との関係が明らかとなり、将来的な付着分布推定モデルの確立への足掛かりとなることが期待される。

#### 4. 研究成果

##### (1) WRF/Chemによる大気中塩分濃度の推定

本研究ではWRF/Chem, GOCARTモデルを用いて、大気中塩分量の予測を行った。解析対象地点は図1に示す様に、松江工業高等専門学校（松江高専）地点を中心とした領域であり、解析期間は2015年10月である。また、WRF/Chem (GOCART Model)による大気中塩分濃度予測において、塩分粒子の発生に関する二つの問題点が確認され、これらが予測精度の低下に影響している可能性が考えられたため、モデルの修正を行った。具体的な修正点は以下の通りである。

##### ① 海岸線近傍の塩分発生について

一つ目の問題点として、海岸線近傍からの塩分の発生が考慮されていないという問題が確認された。WRF/Chem (GOCART Model)における水面からの塩分粒子の発生条件は、土地利用が水面となっていること、および標高が0mとなっていることである。この二つの条件に適合した地点は海面と判定され、粒子の発生関数に基づいて塩分粒子が生じるようになっている。一方、WRF/Chemには地形データとしてUSGS（米国地質調査所）によるものが標準搭載されている。USGSの地形データでは、海岸線近傍の海面の標高が完全には0mとなっておらず、例えば、本解析における日本海沿岸部では数kmに渡って海面と判定されず、塩分粒子が発生しない仕様となっている。そこで、本研究では、海岸線に基づいて海面を定義し、海面のすべての地点から塩分粒子が発生するよう修正を行った。

##### ② 汽水湖からの塩分発生について

二つ目の問題として従来のWRF/Chem (GOCART Model)では、汽水湖からの飛来塩分は考慮されていないということが挙げられる。これは、①の問題と根本的には同様の問題である。標準のGOCART Modelでは内陸部の山池、湖といった塩分が含まれていない水域を考慮して、このような地点から塩分粒子が発生しないよう、粒子の発生条件に、標高0m以下という判定を課しているものと推察される。松江市には、宍道湖、中海の2か所が汽水湖となっており、当然ながら、塩分濃度予測において影響を与える大きな要因になりうると考えられるが、USGSの地形データ上では、両者とも標高0m以上であり、塩分粒子は発生しない仕様となっている。そこで本研究では、①と同様の処置で、宍道湖・中海から塩分粒子が発生するよう修正した。なお、汽水湖の塩分濃度の再現方法としては、海面における粒子の発生関数の式にそれぞれの汽水湖の海水比を掛けた。具体的には、宍道湖、中海の塩分濃度の海水比については、島根県の調査による値を参照し、宍道湖の塩分濃度を海水の1/7、中海の塩分濃度を海水の1/2として粒子の発生関数を汽水湖ごとに設定し、解析を行った。

図2が、WRF/Chem (GOCART Model)の修正前後の予測値と実測値の比較である。なお、実測値はフィルターパック法によって計測されている。予測値は修正前後共に観測値の変動をかなりの精度で捉えていることが分かる。また、修正後については、海岸線近傍および汽水湖からの海塩粒子の発生を考慮したことで、修正前と比べて平均して1割程度値が大きくなり、粒子の発生条件を適切に考慮することで若干ではあるが予測精度が向上する結果となった。

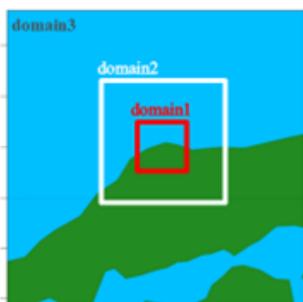


図1 解析領域

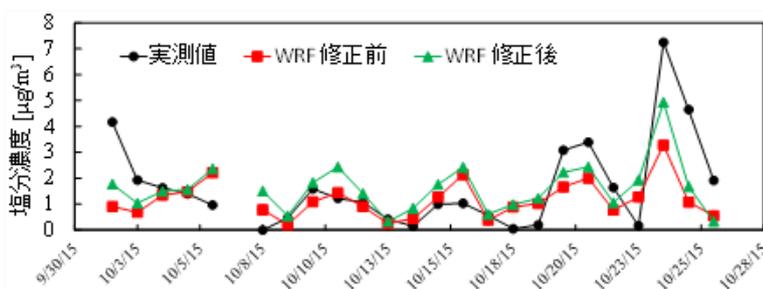


図2 WRF/Chemによる塩分濃度予測結果と実測値

##### (2) 構造物へ付着する塩分量推定手法の開発

CFDを用いて、構造物周囲の気流解析・粒子飛散解析に基づく、粒子の付着分布評価を行った。対象断面は図3に示す、矩形断面、および橋梁断面である。なお、橋梁断面の上面端部の突起は高欄を想定したものである。また、断面周囲の流れ場構造は、断面の断面辺長比(B/D)に応じて変化するため、本解析でもB/Dを数パターン変化させて解析を行った。なお、このとき断面高さD(=3m)を固定し、断面幅Bを変化させた。

解析においては、海塩粒子、および凍結防止剤を想定した場合について、それぞれ解析を行った。両者の違いとしては、海塩粒子は接近風とともに飛来するのに対し、凍結防止剤は路面上に散布され、通過車両によって大気中へ飛散する。これを再現するため、図4に示す様に、海塩粒子を想定した場合には、接近風とともに、凍結防止剤の場合には対象断面上から鉛直方向に飛来(初速10m/s)するよう設定した。以下にそれぞれの結果を示す。

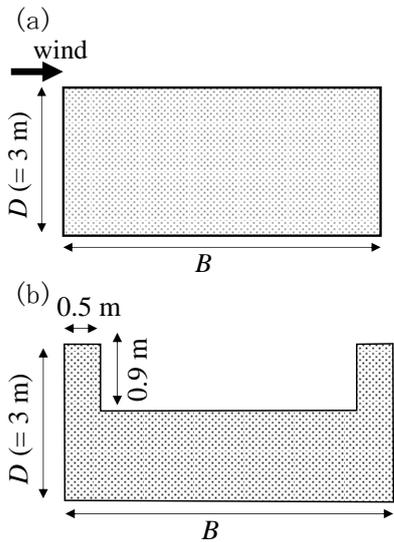


図3 対象断面 (a)矩形, (b)橋梁

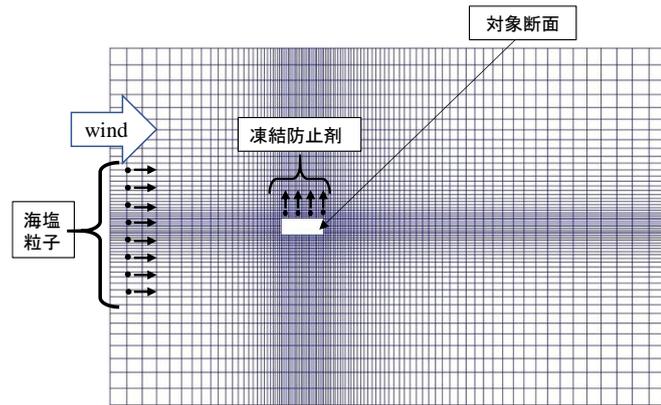


図4 解析領域

① 海塩粒子を対象とした場合

海塩粒子を対象とした場合には、矩形断面と橋梁断面で粒子の挙動に大きな違いは見られなかった。一方で、接近風速や粒径、断面辺長比の変化は粒子の飛散・付着挙動に大きく影響することが明らかとなった。

図5は  $B/D = 1$ 、風速  $5 \text{ m/s}$ 、粒径  $10 \mu\text{m}$  の場合の粒子挙動である。接近風とともに断面に飛来した粒子は、断面の風上面に一部が付着し、その他の粒子は断面後方に生じるカルマン渦に取り込まれ、断面の風下面に一部が付着することが明らかになった。また、接近風速や粒径が大きくなると、粒子に作用する慣性力が大きくなり、風上面に付着する粒子量が増加し、風下面に付着する粒子量は減少する。

図6は  $B/D = 6$ 、風速  $5 \text{ m/s}$ 、粒径  $10 \mu\text{m}$  の場合の粒子挙動である。断面辺長比が大きくなるにつれ、断面前縁で剥離した剥離流れの断面上下面への再付着が生じ、これに応じて粒子も上下面へ輸送される。また一部の粒子は断面の後流へ輸送されるものの、 $B/D = 1$  の様な断面辺長比が小さい場合と比べ、渦による巻きこみが弱いことから、風下面への付着量は極めて少ないことが明らかになった。

以上まとめると、海塩粒子の付着分布には、風速、粒径、断面辺長比が大きく影響する。風速および粒径が大きくなると、断面風上面への付着量が増加する。一方、断面辺長比が大きい場合、断面上下面への付着が促進されるとともに、風下面への付着量は減少することが明らかとなった。

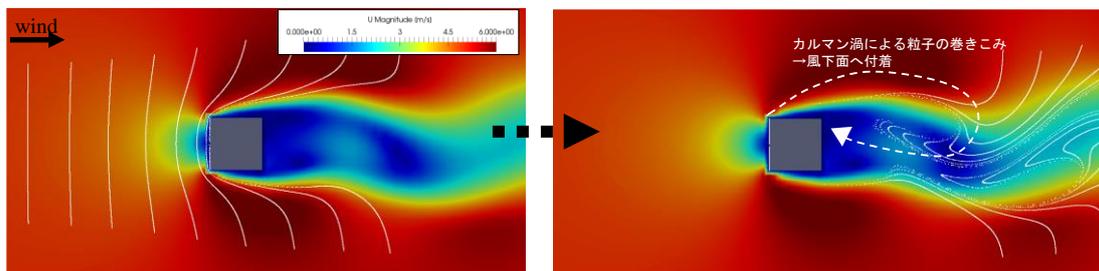


図5 粒子挙動 ( $B/D = 1$ , 風速  $5 \text{ m/s}$ , 粒径  $10 \mu\text{m}$ )

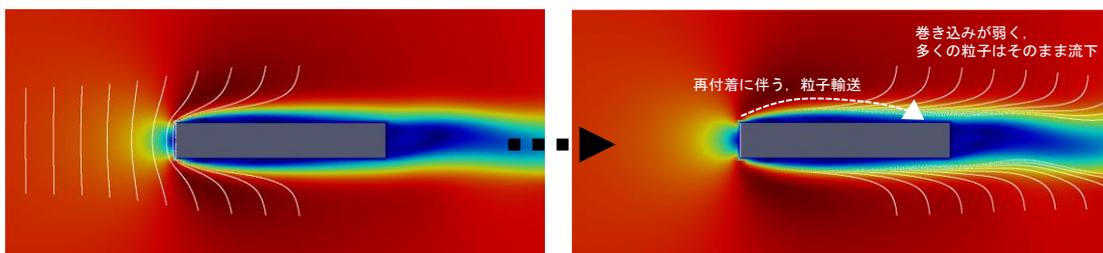


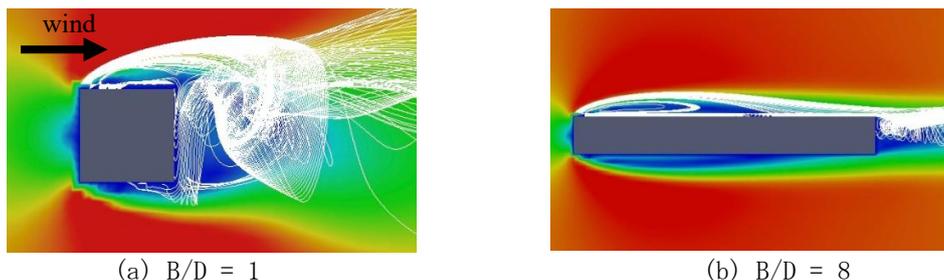
図6 粒子挙動 ( $B/D = 6$ , 風速  $5 \text{ m/s}$ , 粒径  $10 \mu\text{m}$ )

## ② 凍結防止剤を対象とした場合

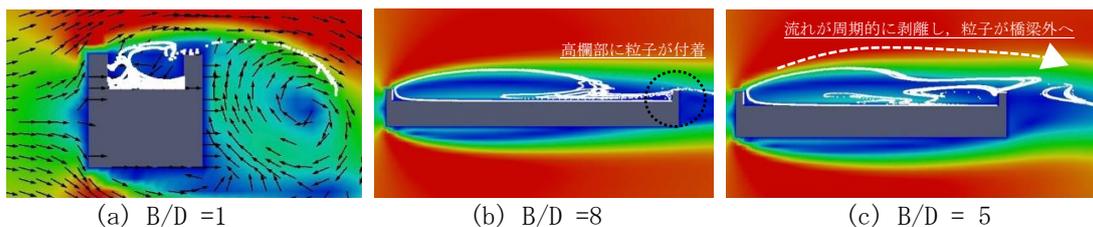
以下では、完全剥離型断面である  $B/D = 1$ 、定常的再付着型断面である  $B/D = 8$  の結果を示す。図 7(a), (b) は風速 5 m/s、粒径  $10 \mu\text{m}$  における  $B/D = 1$  と  $B/D = 8$  の時間平均風速分布と粒子の軌跡を示している。 $B/D = 1$  では、図 7(a) で示すように路面上から飛散した粒子が、循環流れによって前方に輸送され、前縁で剥離した流れに乗って断面後方に移動する。その後、断面背部に生じるカルマン渦に巻き込まれることで風下面に付着する。一方、 $B/D = 8$  では、図 7(b) のように、多くの粒子は断面上の循環流れに巻き込まれ、断面の後流へ輸送される粒子量は少ない。また、後流へ輸送された粒子も、海塩粒子の場合と同様に、渦の巻きこみが弱く、風下面へ付着する粒子量は、完全剥離型断面に比べ少ないことが明らかになった。これらは、基本的に、海塩粒子を対象とした解析と同様の結果と言える。

一方、橋梁断面では、高欄の存在が凍結防止剤の飛散挙動に大きく影響することが明らかになった。 $B/D$  が小さい場合には、高欄により前縁から剥離する流れの影響を受けなくなることで粒子が橋梁外へ殆ど飛散することなく、付着量が極めて低下する (図 8(a))。また、 $B/D$  が非常に大きい場合には、断面路面上を沿って流下した粒子が下流側高欄に付着し、背面への供給が阻害されことで風下面への付着量が減少する (図 8(b))。一方で、中間的な  $B/D$  の場合には、高欄の影響で断面路面上に発生する循環流れが矩形断面と比較して流下方向に拡大し、多くの粒子が巻き上げられ、さらに、剥離流れが周期的に剥離するようになったことで、断面背部への粒子の輸送量が大幅に増加し、風下面への付着量も増加する結果となった (図 8(c))。

また、粒径の影響についてまとめると、矩形・橋梁断面いずれの場合も、粒径が小さいほど気流に追従して、橋梁外へ飛散し、付着に至る。一方で、粒径が大きい場合には、粒子に作用する慣性力が大きく、初速で大きく鉛直方向に飛来し、主流の影響で断面後方へ輸送される。しかし、重量が大きいために、落下し、断面風下面への付着には至らない場合が多い。また、橋梁断面の場合には、路面上から剥離線までの距離が遠く、主流の影響を受けられないことから、橋梁外へ飛散することなく、路面上へ落下することが確認された (図 9)。



(a)  $B/D = 1$  (b)  $B/D = 8$   
図 7 粒子の軌跡 (風速 5 m/s, 粒径  $10 \mu\text{m}$ )



(a)  $B/D = 1$  (b)  $B/D = 8$  (c)  $B/D = 5$   
図 8 各  $B/D$  における粒子飛散挙動 (風速 5 m/s, 粒径  $10 \mu\text{m}$ )

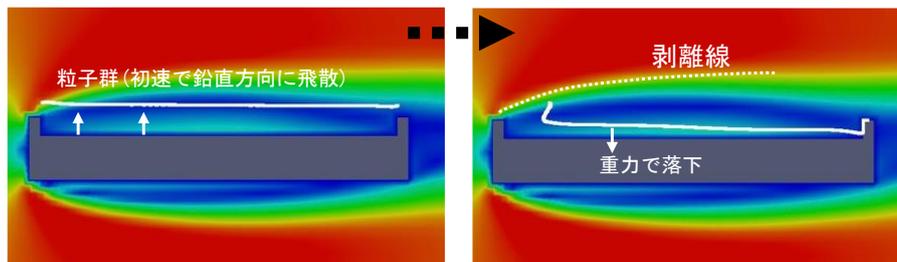


図 9 粒径  $100 \mu\text{m}$  の場合の粒子挙動

以上の様に、断面形状と粒子挙動の関係について、詳細に明らかにした。将来的には、こうした成果から、付着分布推定モデルを構築することで、任意形状の橋梁の各部位に付着する塩分量推定が可能となり、効率的かつ効果的な維持管理の実現が期待される。また、その際には、入力値として WRF/Chem による大気中塩分量予測値を使用することで、一貫した解析による付着量推定が実現し、構造物の維持管理実務に貢献できるものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坪倉佑太
2. 発表標題 橋梁形状と路面上から飛散した凍結防止剤の飛散・付着特性の関係
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会
4. 発表年 2023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
---------	---------