

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01543

研究課題名（和文）海の幸の安全性を評価する数値モデル：「海洋環境リスクマップ」の実現

研究課題名（英文）Numerical model for evaluating the safety of products from the sea towards the realization of a marine environmental risk map

研究代表者

西 佳樹（Nishi, Yoshiki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70470052

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：海へ負荷された難分解性有機疎遠物質に起きる物理・化学・生物学的過程をモデル化し、それらを統合化したシミュレーション手法を構築した。その部品となる海洋物理モデルを数値計算安定性と精度の面から改良した。さらに、魚個体が汚染物質を取り込み、蓄積し、排出する現象を確率論的にモデル化し、その妥当性を検証し満足できる結果を得た。魚以外のプランクトン類も変数として加え、沿岸域における食物連鎖の中での汚染物質の移動についてもシミュレーションし、ヒトが摂取する海洋生物体内における汚染物質濃度の確率分布を出力する手法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、空間規模が大きな現象（潮流、物質の海水中の移流拡散など）と小さな現象（魚個体の運動や生理）とを統合させた視点を維持した。確率論を基盤として規模が異なる現象同士を統合する手法は本研究が創造したものである。また、ヒトが水産物として摂取する海洋生物体内に蓄積する汚染物質量をシミュレーションでできるにすれば、海洋環境リスクを定量的かつ合理的に提示することができるようになる。これにより、水産物の許容摂取の基準値に関して、従来よりも科学的根拠を備えた形で決めることを可能とする。

研究成果の概要（英文）：This study has constructed models for representing physical, chemical, and biological processes occurring in persistent organic pollutants loaded into the ocean, and developed a simulation method that integrated these processes. An ocean simulation model of physical oceanography, which is a module of the integrated model, has been improved in the stability and accuracy of numerical computations. A model for representing some phenomena around an individual fish including intake, accumulation and egestion of the pollutants has been built and validated through comparisons with observation, demonstrating satisfying performance. In addition, considering also planktons other than the fish, a new probabilistic model has been constructed for simulating the movement of the pollutants in a marine ecosystem comprising these organisms. These outcomes enable one to produce probabilistic distributions of dietary intake of the pollutants by human.

研究分野：海洋環境

キーワード：環境リスク 海洋環境 モデリング リスク評価

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は「ヒトの健康に影響する合成化学物質は沿岸海域でどの様にふるまうのか？そうした物質が漂う沿岸海域から取れる水産物を口にする行為は、どの程度リスクを伴うのか？」という問いに答える事業であった。海洋汚染は顕在化してから半世紀以上経過している。化学工業の発達とともに数多くの化学物質が開発・生産され、その中のいくつかは海洋の中で有害とされる現象を誘起した。現在、海洋汚染の主要な原因物質と考えられているのは難分解性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants (POPs)、例:PCB、DDT) である。既に使用が禁止されているものの、最近でも都市部内湾の海底汚泥中に高濃度で検出される。

沿岸域は今後、養殖を目的として益々利用されることが期待される空間である。沿岸域のどこが安全で、どこが危険か？地点ごとのリスクの大小を把握しなければならない。本研究は食の安全という側面からこの技術振興に貢献することを企図した。

本研究はモデリング(現象の数式化)と数値計算とによって上記目的の達成を目指した。リスク分布の作成にまで至るには大サイズ現象(沿岸域程度の空間内での移流拡散、魚類回遊)と、小スケール現象(魚類による物質の取り込み、身体内部での蓄積)とを両方加味することが欠かせない。大サイズ現象は海洋物理学におけるモデリング、小サイズ現象は生物学分野での室内実験によって別個に進められてきたものの、従来の大サイズ研究では微視化は不可能である一方、小サイズ研究は知見の広域展開性に欠ける。上記目的達成には、既存モデルの利用ではなく、異なる分野間をまたぐ新規の数値モデリングが必要かつ有効と考えた。とはいえ、この両分野には大きなスケール懸隔が存在し統合化は容易ではなかった。申請者はこの課題に対し、3年計画で一定の解決を見ることが出来る戦略を策定した。

この戦略の核となったのが確率論(確率過程論)である。特徴は次の通りである。

汚染物質濃度の移流拡散現象を大サイズで解くことに加え、この濃度の確率分布も同時に時間追跡することで、魚類の身体サイズにまで視点を微細化していった場合に、不確定性を許容しつつその濃度が取り得る値を求められるようにできる。

この手法は確率分布を決める点で生物実験によるリスク算定手法と調和性がよいため、空間離散化に伴う格子を大サイズに維持しながらも、生物学知見を活かせるモデルの作成が可能となる。

物理・化学・生物現象をモデリングし、確率過程を導入することで互いの現象を結びつけることが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、有害化学物質の海水中濃度および魚類体内濃度を出力できるようにすることを通じ、海洋環境リスクを定量的に示す手法を構築することである。この目標の成就のため、次に記す小目標を順次達成することを目指した。

- [1] 海水中濃度を正確に出力するために、大スケール現象を対象とするモデルの性能を向上させる。モデルの計算結果を観測結果と比較しモデルを検証・改良する。
- [2] 魚類体内濃度を理論的に求められる様にするために、魚類体内における化学物質の取込・蓄積・排出に関して確率過程論を用いて表現し、小スケールモデルとして提示する。その計算結果を観測結果との比較を通じて検証する。
- [3] 大スケールモデルと小スケールモデルとを統合するために、サンプリング手法を応用した計算法を構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大スケール現象モデルの改良

大スケール現象モデルの骨格は海洋物理モデルである。私達のグループは当モデルの計算コードを独自に開発してきたが、課題は残っていた。本事業ではそれら課題の一つである、時間発展スキームの改良に取り組んだ。最初に、支配方程式を2つのモードに分割する手法を取り入れ

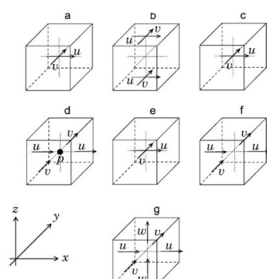


図1. 計算格子内の変数配置一覧。黒丸( )は水温・塩分などのスカラー変数、矢印は流速ベクトルを表す。

た。この手法は従来から Prince Ocean Model 等でも採用されてきたものであるが、本研究でも取り入れることとした。2つのモードは外部モード、内部モードと呼ばれる。前者は海の表面を速く伝搬する波動解、後者は海水密度場の変動を含みゆっくりと変動する解をもつ方程式群である。[1]では外部モードに対するコードを実装しその妥当性を検証した。さらに、支配方程式に含まれる各項(対流項・拡散項・圧力勾配項など)ごとに最適なスキームを選択できる手法を取り入れた。従来モデルは、1つの計算格子内において変数を配置する場所は固定されていたが、本研究ではそれを可変とした。これにより数値計算の効率性の向上を図った。

計算手法を検証する現場データを取得するため海洋観測を実施した。相模湾沿岸域の酒匂川河口周辺に観測点を設定した。船舶にて各観測点に移動しCTD(Conductivity Temperature Depth profiler)を投入し、0.2m刻みで水温・塩分の鉛直分布データを取得した。

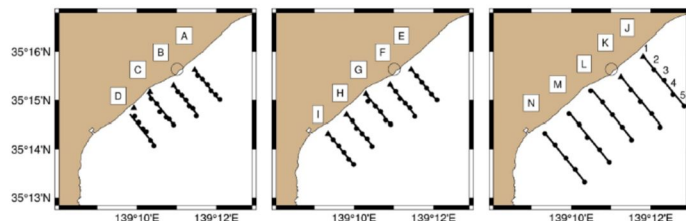


図2. 酒匂川河口(印)周辺で実施した観測の採水場所。観測日… 2022年6月9日(左)、6月28日(中央)、7月14日(右)。

この観測からは酒匂川から共有される淡水が沿岸域に広がる様子を捉えることができ、その広がり方は風の向きや強さにより変わることが分かった。この河川水の広がりを、改良した数値シミュレーション手法を用いて再現できるかを調べた。

### (2) 小スケール現象モデルの構築

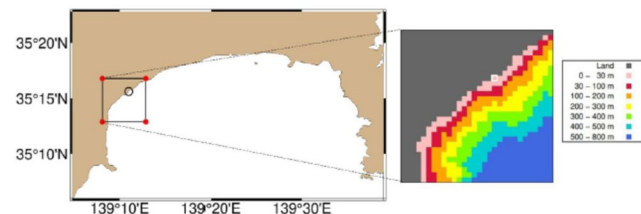


図3.(左)相模湾の地形図。四角印は酒匂川河口を含む、シミュレーション領域。(右)シミュレーション領域の海底深度分布図。

本研究で意味する「小スケール」は、海水中を泳ぐ魚体の空間規模を指す。その小スケールにまで視点を絞ることで魚が汚染物質を取り込み体内に蓄積する生物的過程をモデル化する。魚類体内にはエラ呼吸を通じて海水中汚染物質が侵入する。また、植物・動物両プランクトンを摂食することに伴う侵入がある。この二つの侵入過程を考慮して汚染物質の動態を理論化した。

この理論化においては確率過程論を応用した。取込、排出などの生物活動の多くは、広く知られた関数を用いて近似が可能であることが従来研究から判っている。しかし、この方法で用いる近似ではカバーできない事象が存在する。例えば、これまでの研究では見落とされている現象の存在や、様々な環境要因が関与することに伴う不規則変動存在がその事象の発生要因となるであろう。こうした事象を数学的に表現するために不確定性を取り入れた方程式(確率微分方程式)系を採用した。

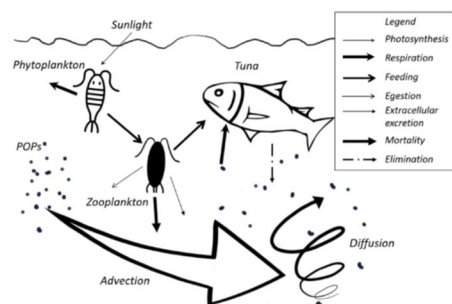


図4. 海洋生態系における汚染物質の動態に関する模式図。

小スケールモデルを大スケールモデルと統合する必要がある。大スケールモデルにおいて、海水中物質濃度は海洋モデルで用いている格子内での平均濃度として求まる。ここまでは従来モデルと同様である。本研究は平均からのずれに着目した。大から小へ焦点を絞っていくほど、大スケール現象が表現できない細部が見える様になり、そのずれが顕在化してくる、と考える。そのずれの程度を確率密度関数として表現する理論式を導出した。或る場所・或る時刻での確率密度関数が定まれば、その関数が表現する確率分布に従って魚(小スケール)が暴露する濃度を決めることができる方法を実装した。

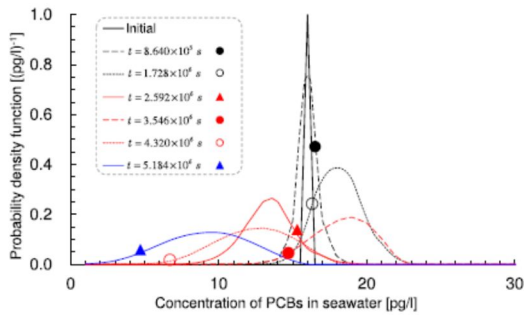


図5 . 海水中での汚染物質濃度の確率分布関数。  
 や は、ランダムサンプリングの結果として決定された、小スケールモデルに代入される濃度。

(3) 多量摂取リスクの計算

本事業が目指しているのは水産物中に含まれる汚染物質濃度をモデルで再現しリスクを算定することである。その最終目標に最も近い箇所で機能するサブモデルを構築した。沿岸域に海洋生物が織りなす食物連鎖系を設定し、浮遊系・底生系での汚染物質の動態を数学的に表現した。この表現には不確定性を取り入れた。海水、底泥、植物プランクトン、動物プランクトン、底生藻類、魚類(2区分)などを変数として設定し、これら変数間を移動する汚染物質のフラックスを計算した。モンテカルロシミュレーションを行い、各変数内の汚染物質濃度の確率分布を出力した。

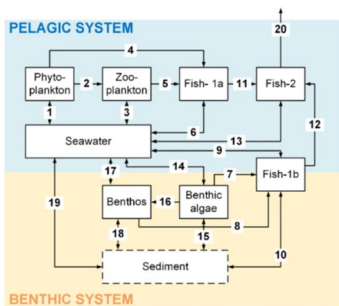


図6 . 浮遊系・底生系から成る食物連鎖系。四角はこの系を構成する変数、矢印は変数間の移動を表す。モデルは、この系における汚染物質の動態を計算した。

4 . 研究成果

(1) 大スケール現象モデルの改良

沿岸域の汚染を把握のためには、河川を通じた汚染物質負荷について正確に解明することが欠かせない。開発した海洋物理モデル(3章の(1))の性能を調べるために、シミュレーションのケースとして、河口からの低塩分水が潮流の影響を受けて輸送される様子を取り上げた。具体的にはオーストラリア東海岸に位置する Hinchinbrook Channel である。流速の時系列を図に示した。観測結果(赤丸)からは次の事が判る。日周潮が明瞭に卓越する海域であること、小潮時に振幅が約 1.0m/s におよび、大潮時には 2.0m/s を超過することである。数値計算結果(実線)は観測結果と概ね良好に一致した。また、同観測サイトにおける塩分の時系列を図に示す。計算結果(実線)では、当該海域の海水のもつ平均的な塩分 33psu から潮汐流の影響を受けながら徐々に塩分が低下した(図には示していないが要因は河川水の増量である)。塩分が 0 psu 近傍にまで低下しその状態が数日間持続した後に急激に塩分が回復し、その後は当初の 33psu 近くで横ばいとなった。観測結果はこれとほぼ同じ変化をしている。ただ、観測結果からは、塩分の急激な上昇後においても低塩分水の貫入とみられる現象が数回発生したことが示唆されるものの、計算ではこの現象が明瞭には発現しなかった。以上の結果を受け、本モデルは沿岸域における河川由来水の拡散の大部分を再現可能である。しかし不十分な部分があることが判明したので、境界条件の取り扱い方法などを検討し更に計算コードを整備する予定である。

海洋物理モデルを更に改良するため、別の海域にも適用した。相模湾の酒匂川河口周辺である。

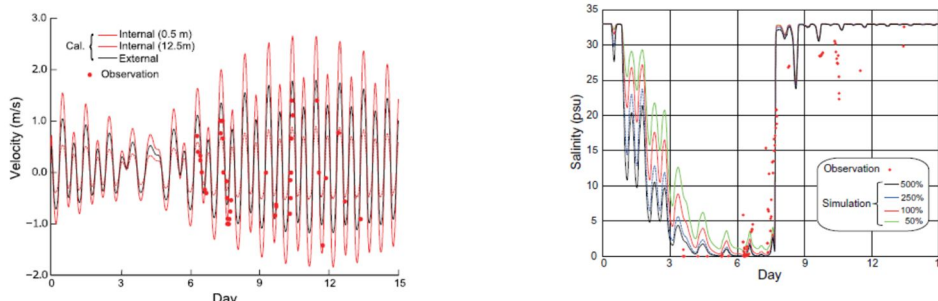


図7 . (左)流速の時間変化。(右)塩分の時間変化。実線は計算結果、点は観測結果を表す。

水温・塩分の現場観測値を計算値と比較した。水温の鉛直分布を比較した結果、モデルは水温鉛直分布をある程度再現できる。その反面、観測では水温躍層とみられる層構造が複数出現したが分かったが、モデルはこれを捉えられなかった。海表面での熱フラックス、風応力フラックスの入力の仕方に差異の要因があると思われるため今後はこの点の改善を試みていく。塩分については、河川水由来水の先端が到達したことによる極表層での塩分低下を一定程度再現できた。しかし、モデルによる低塩分化の度合いが観測によるものと比べ鈍い結果も見られたことから、モデルの解像度向上を含め、更なる検討を行っていく。

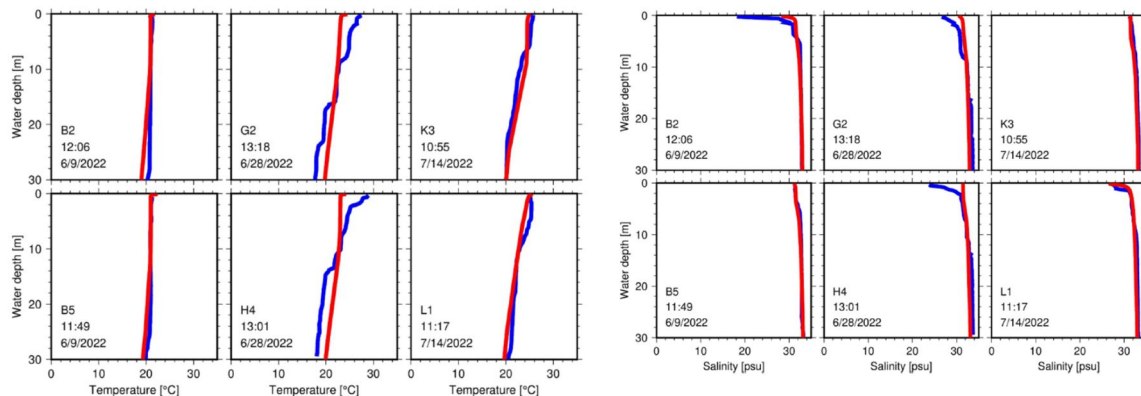


図8. (左)水温の鉛直分布。(右)塩分の鉛直分布。赤線は計算結果、青線は観測結果を表す。

## (2) 小スケール現象モデルの構築

3章の(2)で記述した小スケール現象モデルを用いて、マグロ体内の蓄積されるポリ塩化ビフェニル

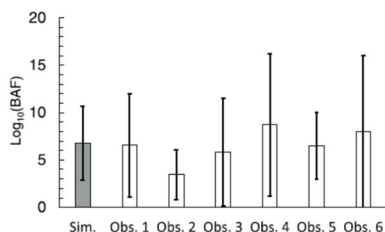


Fig. 6. Logarithms of BAF obtained from simulation (gray bar) and from observations (white bars) in Atlantic Ocean (Nicklisch et al. 2017) (Obs. 1), Indian Ocean (Nicklisch et al. 2017) (Obs. 2), North Pacific Ocean (Nicklisch et al. 2017) (Obs. 3), Black Sea (Stancheva et al. 2017) (Obs. 4), Mediterranean Sea (Stroelli et al. 2008) (Obs. 5), and Mediterranean Sea (Coronelli et al. 2005) (Obs. 6).

図9. 生物濃縮係数の計算結果(灰色)と観測結果(白)。

エニル (Polychlorinated biphenyl : PCB) の濃度をシミュレーションした。その結果を用いて生物濃縮係数 (Bioaccumulation factor) を求めた。

その結果を観測結果と比較した。観測結果は文献を調査することで獲得した。モデルは、BAFの平均値・標準偏差とともに観測から得られるBAFの統計値と大体一致した。したがって、魚による汚染物質を取り込む、蓄積、排出などの過程に関して良好に近似できており、また、不確定性の見積についても妥当に行われたことが確認できた。

## (3) 多量摂取リスクの計算

モンテカルロシミュレーションの結果を解析し高濃度汚染リスクを計算した。本研究では一日許容摂取量を超える摂取量を「多量摂取」と解釈した。PCB153の一日許容摂取量についてはWHOが提示している。本研究で構築したモデル(3章の(3))はヒトが摂取する汚染物質の量の確率分布を出力できる(図)。この確率分布関数を一日許容摂取量以上の範囲で積分することで、一日許容摂取量を超える確率を計算した(図の赤塗り部分)。この結果は、摂取量の個人間の異なりを確率分布で表現した初めてのものである。本研究は、モデルを用いるとこのような計算が可能になることを実証できた。

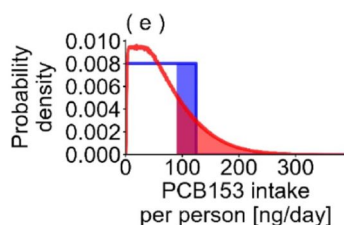


図10. PCB153の一日当たり摂取量の確率分布。赤線...本モデル、青線...従来モデル。色塗り部分は、WHOによる一日許容摂取量を超す確率を表す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Arai Riwa, Nishi Yoshiki	4. 巻 912
2. 論文標題 Biomass-based stochastic model for the transfer of polychlorinated biphenyls in a marine food web	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 169270 ~ 169270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2023.169270	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 Arai Riwa, Nishi Yoshiki, Fujiwara Yasunori, Zhao Jinrui, Jamil Muhammad Zeeshan	4. 巻 29
2. 論文標題 Sakawa River plume in Sagami Bay, Japan under weak wind condition: numerical simulation of coastal ocean dynamics and in situ observations for validation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 221 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-024-00985-6	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 Nishi, Y., Tabeta S., Fujiwara Y., Hatano T.	4. 巻 28
2. 論文標題 Ocean model with adjustable arrangements of discrete variables: application to strong tidal flows and low salinity water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 208-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-022-00920-7	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 Wang Z., Nishi, Y.	4. 巻 242(1)
2. 論文標題 Stochastic model for simulating levels of polychlorinated biphenyls in small tuna and planktons using Metropolis-Hastings algorithm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ecotoxicology and Environmental Safety	6. 最初と最後の頁 113941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecoenv.2022.113941	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Siwei Liu, Yoshiki Nishi
2. 発表標題 Simulation of polychlorinated biphenyls transfer during fish reproduction using dynamic energy budget theory
3. 学会等名 The 11th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jiunrui Zhao, Yoshiki Nishi
2. 発表標題 Estimation of human Polychlorinated biphenyls exposure via tuna consumption using a probabilistic approach
3. 学会等名 The 11th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Muhammad Zeeshan Jamil, Yoshiki Nishi
2. 発表標題 Human physiologically based pharmacokinetic model to predict the uptake and distribution of PCB-153 through tuna consumption
3. 学会等名 The 11th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Zhiyi Wang, Yoshiki Nishi
2. 発表標題 Stochastic modelling of persistent organic pollutants ingestion by fish using Metropolis-Hastings sampling
3. 学会等名 The 10th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reyana Islam ,Yoshiki Nishi
2. 発表標題 A small-scale model experiment on removal of microplastics from water flows using multiple floating filters
3. 学会等名 The 10th East Asian Workshop for Marine Environment and Energy ( 国際学会 )
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
---------------------------	-----------------------	----

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