

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15640

研究課題名（和文）生物間相互作用強度の変化が媒介する農薬リスク評価に向けた基礎的研究

研究課題名（英文）Assessment of pesticide risks mediated by variability in biotic interactions

研究代表者

橋本 洸哉（Hashimoto, Koya）

弘前大学・農学生命科学部・助教

研究者番号：90832436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、野外人工生態系（メソコズム）を用いた操作実験データの解析により、生物間相互作用の変動性を介した農薬影響が、相互作用効果の密度依存性（interaction density-dependence, IDD）によって説明できることを示した。具体的には、負のIDDは水田生物の農薬感受性に負の影響を与える傾向があったが、正のIDDは農薬感受性に対して中立または正の影響を与える傾向があった。また、すべての農薬処理において密度非依存な相互作用効果の変動性が農薬感受性を上昇させていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、相互作用効果の変動がもたらす農薬の波及効果という、一見複雑な現象が、相互作用効果の密度依存性という普遍的かつ単純な原理によって説明可能であることを示した。このことは、相互作用効果の密度依存性を事前に知ることができれば、相互作用の変動性を介した農薬影響は予測可能であるという期待を抱かせるものである。一方で、本研究では、特に殺虫剤のみを散布した処理では必ずしも仮説通りのパターンは得られていない。今後は、どのような条件の下で相互作用効果の密度依存性が仮説通りに働くのかを明らかにする必要がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we demonstrated that the effects of pesticides mediated by the variability of biotic interactions can be explained by the interaction density-dependence (IDD) through the analysis of empirical data from manipulative experiments using outdoor mesocosms. Specifically, negative IDD tended to negatively impact the pesticide sensitivity of each member of the freshwater communities in the experimental paddies, while positive IDD tended to have a neutral or positive effect on the pesticide sensitivity. Additionally, the variability of density-independent interaction effects increased the pesticide sensitivity across all pesticide treatments.

研究分野：生態毒性学

キーワード：農薬の生態影響評価 生物間相互作用 人工生態系 非線形時系列解析（EDM） 水田生態系

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

農薬は農作物の安定的な栽培にとって重要な資材であるが、持続可能な農業の観点からは、周辺の環境や生物多様性に配慮した農薬の活用が望まれる。農薬施用は標的となる病害虫や雑草の制御が目的であるが、多くの種が存在する実環境下では時として、標的以外の生物の減少や別の病害虫の増加といった思いもよらない結果をもたらす。このような想定外の農薬の影響を生み出すメカニズムとして、捕食-被食関係・競争関係・共生関係といった生物間相互作用を介した、間接的な波及効果が挙げられる (Rohr et al. 2005)。この波及効果によって、農薬の影響は連鎖的に群集に拡散し、生物多様性に対して相互作用の考慮抜きには予測できない影響をもたらす恐れがある。

ところが、多くの農学者の努力にもかかわらず、生物間の相互作用を踏まえた農薬施用の影響の予測精度は未だ高いとはいえないのが現状である。この理由として挙げられるのが、従来の研究が「相互作用効果 (相互作用の強さや正負) が周囲の生物学的・非生物的要因によって変化する可能性」を見落としてきたことである。相互作用効果が農薬曝露された群集において変化する場合、相互作用を介して群集に広がる農薬の影響は、農薬曝露がない時の相互作用からは予測できない。しかし従来、こうした相互作用効果の変動性の検出には複雑な操作実験が必要だったため、多数の種が存在する野外において相互作用効果の変動性を検出すること、さらに相互作用効果の変動性が相互作用を介した農薬の波及効果をどう改変するか調べることは極めて困難だった。

2. 研究の目的

本課題では、群集生態学で最近登場した解析手法である、Empirical Dynamic Modeling (EDM, Chang et al. 2017 EcolRes) を農薬の群集レベル影響評価に応用することで、相互作用の変動性を考慮した農薬曝露後の生物多様性動態の理解と予測の高度化を目指すことを目的とした。群集生態学では近年、従来の「相互作用効果を状況によらず一定のものとして仮定する」考え方を見直し、巧妙な操作実験や新しい解析手法によって「変動する相互作用観」を群集動態に取り入れる試みが広まりつつある (Ushio et al. 2018)。EDMはこのような研究の発展を踏まえて登場した手法であり、(1)生物種ごとの密度の時系列データのみから群集内の相互作用強度を推定できる点と、(2)その時間変動も解析できる点で画期的である。

3. 研究の方法

(1) 人工生態系 (メソコズム) を用いた農薬散布実験

本研究では、水田人工生態系 (メソコズム) を用いた農薬影響評価プロジェクト「農薬によるトンボ類生態影響実態の科学的解明および対策 (環境研究総合推進費: 4-1701, H29-R1)」で得られたデータを用いた。以下にこの実験の方法を示す。

2017年3月に、近畿大学奈良キャンパス (奈良県) において、8つの独立した強化プラスチック製タンク (280 cm 長×120 cm 幅×40 cm 深) を設置した。各タンクの底には、奈良キャンパス近くの未汚染地域から採取した土壌を約 30 cm の深さまで敷設した。各タンクには、以下の4つの処理のいずれかをランダムに割り当てた (C: 無農薬区、I: 殺虫剤 (フィプロニル) 単独区、H: 除草剤 (ペントキサゾン) 単独区、I+H: 殺虫剤+除草剤混合区)。

農薬の施用は、各実験年 (2017-2019) の、イネの生育期の初めに1回行った。4月中旬に、メソコズムを抜気水で約 5 cm の深さまで満たした。5月末から6月初旬にかけて、農薬処理済みおよび無農薬処理のイネの苗 (ヒノヒカリ品種) を移植した。殺虫剤および除草剤は、市販の水田に推奨される方法で施用した。実験期間は約 140 日間とし、各年とも 10 月に実験を終了した。その後、群集内の 10 の機能群 (植物プランクトン、ワムシ類、甲殻類動物プランクトン、水草、デトリタス食性昆虫、草食性昆虫、水草上捕食性昆虫、底生捕食性昆虫、水面捕食性昆虫、軟体動物) の密度を、2週間ごとにモニタリングした。この方法により、8つのタンク×3年=24の時系列断片 (各断片の時間点数=10) を取得した。

(2) EDMによる相互作用効果の推定と、相互作用効果に対する農薬攪乱の影響

実験水田内の群集内での相互作用効果を推定するために、EDM解析を行った。まず、Convergence-Cross Mapping (CCM; Sugihara et al. 2012) によって、相互作用の存在する機能群のペアを特定した。次に、CCMによって決定された相互作用ペア間の個体あたり相互作用効果を、多変量 S-map (Deyle et al. 2016, Suzuki et al. 2017) によって推定した。そして、相互作用ペアごとに、推定した相互作用効果を処理間で比較した。

(3) 相互作用効果の変動性に関する仮説の構築

相互作用効果の変化を介した農薬の波及効果を左右する重要な要因として挙げられるのが、相互作用効果の密度依存性 (interaction density-dependence; IDD) である。本研究では、IDDに関して以下の3つの仮説を構築した。なお、本研究では、相互作用の受け手生物 (recipient) の密度に注目する。(1) 負の IDD は recipient に対する農薬影響を緩和する。なぜなら、recipient 密度

の減少または増加が、recipient に対して有益または有害な相互作用効果の変化によって補償されるからである (図 1a)。(2) 正の IDD は recipient に対する農薬影響を増幅させる。なぜなら、recipient 密度の減少または増加が、recipient に対して有害または有益な相互作用効果の変化によって拡大されるからである (図 1b)。(3) recipient 密度に依存しない相互作用の変動性は、recipient 密度に予測できない変動を引き起こすため、recipient に対する農薬影響を増幅させる (図 1c)。

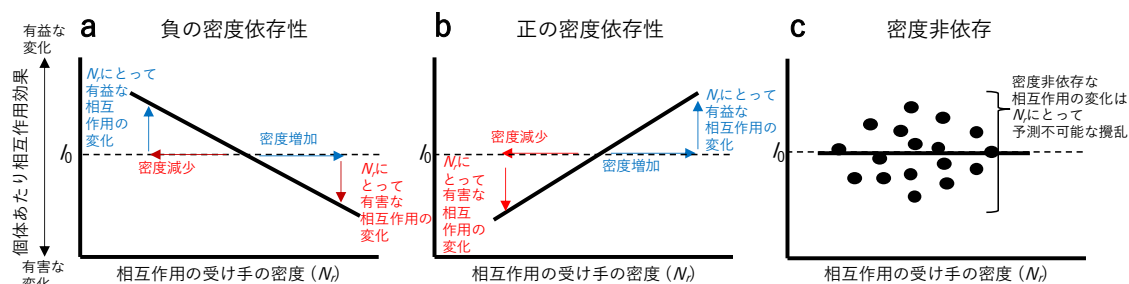


図 1. 相互作用効果の変動性に関する仮説。

(4) 相互作用効果の変動性に関する仮説の検証

上記 3 つの仮説を検証するため、(1) のデータを用いた重回帰分析を行った。まず、IDD の強さを、(2) で推定した相互作用効果を recipient 密度で回帰した傾き (回帰計数) の絶対値によって評価した。傾斜の方向が負であれ正であれ、回帰係数の絶対値が大きいほど、相互作用効果における密度依存性が強いことを示す。次に、農薬攪乱がないときの平均相互作用強度と相互作用の時間変動性を、無農薬処理区における相互作用効果の平均または標準偏差によって評価した。さらに、各機能群の農薬への感受性の指標として、3 つの農薬処理区と無農薬処理区との対数反応比の絶対値を算出した。最後に、recipient の農薬への感受性を目的変数、IDD の強さ、平均相互作用強度、相互作用の時間変動性、各機能群の機能 (生産者、被食者、捕食者) を説明変数として重回帰分析を行った。加えて、IDD の傾きの正負と、IDD の強さ×傾きの正負 (両者の交互作用) も説明変数に含めた。

仮説(1)と(2)が正しい場合、負の IDD が強いほど recipient の農薬への感受性が低くなり、正の IDD が強いほど農薬への感受性が高くなると予測される。また、仮説(3)が正しい場合、相互作用の時間変動性が高いほど農薬への感受性が高くなると予測される。これは、相互作用の時間変動性の効果は、IDD つまり相互作用の密度依存的な変動性で統制されており、相互作用の密度非依存的な変動性の効果を示していると解釈できるからである。

4. 研究成果

(1) 相互作用効果の変動性の評価

まず、相互作用効果の変動性の現象論的な評価として、相互作用効果の時間変動性 (調査期間を通した相互作用効果の標準偏差) を検出された 23 の相互作用ペアごとに算出した。その結果、相互作用効果の時間変動性は、相互作用ペアの間で大きく異なることが分かった。これは、対象の水生生物群集の中には、変わりやすい相互作用と変わりにくい相互作用が含まれていることを意味している。

相互作用効果の時間変動性には、recipient 密度に依存する変動と、それには依存しない変動の双方が含まれていると考えられる。そこで、相互作用ペアごとに、各時点の相互作用効果を、対応する時点の recipient 密度に対して回帰し、相互作用効果の密度依存性 (interaction density-dependence, IDD) を評価した。その結果、IDD は、相互作用ペアごとにその傾きの大きさと正負が大きく異なることが分かった。負の IDD は、正の IDD と比べて約 2 倍多かった。さらに、同じような傾きの大きさであっても、回帰線からの残差の大きさ (密度非依存な相互作用効果の変動性) には違いが見られた。

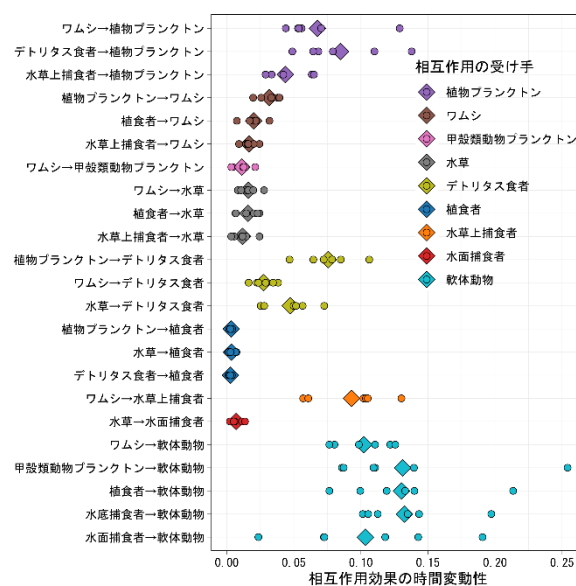


図 2. 相互作用効果の時間変動性。ひし形は平均値、丸点は生値データ。

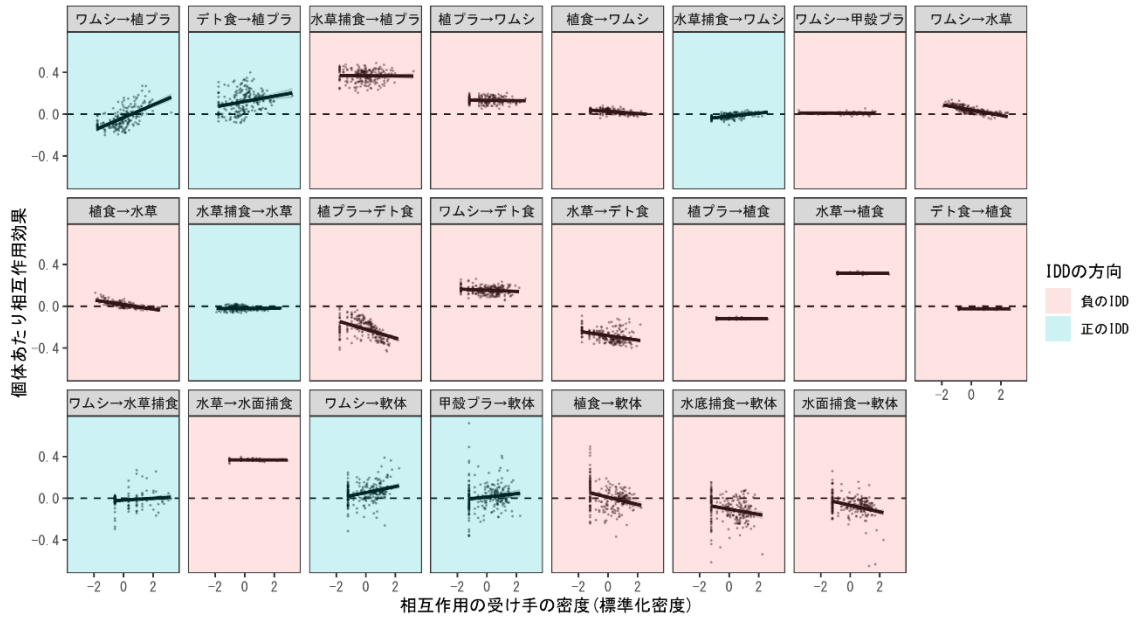


図 3. 相互作用効果の密度依存性。黒実線は回帰線を、灰色の影は 95%信頼区間を示す。各点は相互作用効果の生値データ。

(2) 相互作用効果の変動性が各生物群の農薬感受性に与える影響

仮説(1)と(2)のとおり、負の IDD は recipient の農薬感受性に負の影響を与える傾向があったが (図 4a, c, i)、正の IDD は農薬感受性に対して中立または正の影響を与える傾向があった (図 4a, e, i)。この傾向は特に殺虫剤と除草剤を双方散布した時 (I+H 処理) に最も顕著だった (図 4i)。また、すべての農薬処理において、相互作用の時間変動性が recipient の農薬感受性に対して正の影響を与えていた (図 4b, f, j)。時間変動性の効果は、IDD の効果の統制下で検証されているため、この結果は、密度非依存な相互作用効果の変動性が農薬感受性を上昇させるという仮説を支持している。いっぽう、群集の安定化に重要と考えられている、相互作用効果の平均的な強さは、農薬の感受性に影響を及ぼさなかった。

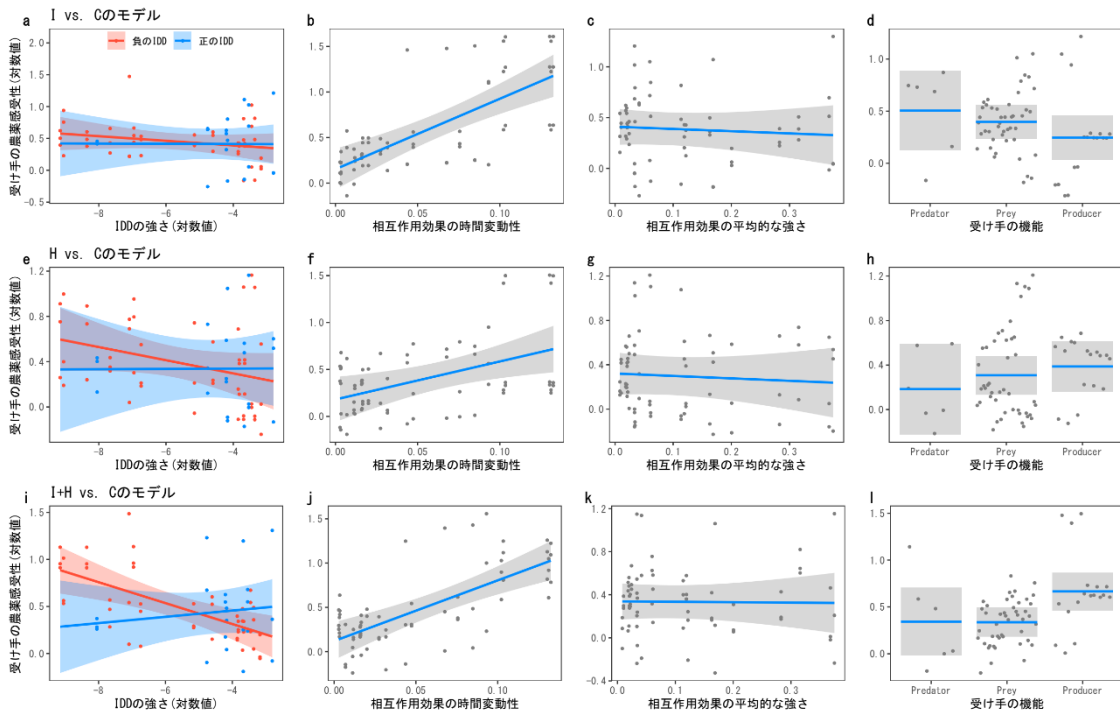


図 4. 相互作用効果の変動性 (interaction density-dependence, IDD の強さ、および、相互作用効果の時間変動性) と相互作用効果の平均的な強さ、受け手の機能が受け手の農薬感受性に与える影響。実線は共変量を中央値に固定した時の回帰線、影は 95%信頼区間を示す。各点は partial residual を表す。

(3) 今後の展望

本研究の結果は、相互作用効果の変動をもたらす農薬の波及効果という、一見複雑な現象が、相互作用効果の密度依存性という普遍的かつ単純な原理によって説明可能であることを示した。このことは、相互作用効果の密度依存性を事前に知ることができれば、相互作用の変動性を介した農薬影響が予測可能であるという期待を抱かせるものである。一方で、本研究では、特に殺虫剤のみを散布した処理では必ずしも仮説通りのパターンは得られていない。今後は、どのような条件の下で相互作用効果の密度依存性が仮説通りに働くのかを明らかにする必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Ishiwaka Naoto, Hashimoto Koya, Hiraiwa Masayoshi K., Sanchez-Bayo Francisco, Kadoya Taku, Hayasaka Daisuke	4. 巻 341
2. 論文標題 Can warming accelerate the decline of Odonata species in experimental paddies due to insecticide fipronil exposure?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Environmental Pollution	6. 最初と最後の頁 122831 ~ 122831
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.envpol.2023.122831	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 Hashimoto Koya, Hayasaka Daisuke, Eguchi Yuji, Seko Yugo, Cai Ji, Goka Koichi, Kadoya Taku	4. 巻 -
2. 論文標題 Severe disturbance overflows the stabilizing buffer of variable biotic interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2021.12.07.471695	査読の有無 無
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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 橋本洸哉
2. 発表標題 メソコズム試験による生物間相互作用を考慮した農薬の生態影響評価
3. 学会等名 第2回環境化学物質3学会合同大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本洸哉, 角谷拓
2. 発表標題 温暖化と殺虫剤が水田生物群集に与える複合的な影響
3. 学会等名 第39回個体群生態学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本洸哉, 角谷拓
2. 発表標題 温暖化と殺虫剤が水田生物群集に与える複合的な影響：相互作用ネットワークの視点から
3. 学会等名 第71回日本生態学会横浜大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 土屋健司, 角谷拓, 橋本洸哉, 石若直人, 平岩将良, 早坂大亮
2. 発表標題 殺虫剤と温暖化が水田微生物の生産動態に与える影響
3. 学会等名 2023年 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石若直人, 平岩将良, 橋本洸哉, 土屋健司, 角谷拓, 早坂大亮
2. 発表標題 温暖化下において殺虫剤はどの栄養段階の生物群集に影響するか
3. 学会等名 日本陸水学会第87回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石若直人, 平岩将良, 橋本洸哉, 土屋健司, 角谷拓, 早坂大亮
2. 発表標題 温暖化と殺虫剤の複合影響による上位捕食者の減少を介した生物群集と水質の反応
3. 学会等名 第71回日本生態学会横浜大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平岩将良, 石若直人, 秋山大樹, 太田貴生斗, 橋本洸哉, 土屋健司, 角谷拓, 早坂大亮
2. 発表標題 Deep learningを用いた生物多様性モニタリング手法は有用か? -学習コストと精度の検証-
3. 学会等名 第71回日本生態学会横浜大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 橋本洸哉
2. 発表標題 群集全体にもたらされる人為攪乱 ~ 農薬が水田生物間の相互作用を変える ~
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石若 直人, 橋本洸哉, 平岩将良, 角谷拓, 早坂大亮
2. 発表標題 農薬と水温上昇が水田生物群集に与える複合的な影響と捕食 - 被食を介した間接効果の可能性
3. 学会等名 第86回日本陸水学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本洸哉, 早坂大亮, 江口優志, 角谷拓
2. 発表標題 生物間相互作用の可変性は水田生物群集に対する農薬の影響を緩和するか?
3. 学会等名 第37回個体群生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石若直人, 橋本洸哉, 角谷拓, 早坂大亮
2. 発表標題 農薬曝露と田面水温上昇が水田生物群集に与える影響は経時的に変化するか?
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本洸哉, 池本美都, 横井智之
2. 発表標題 セイヨウミツバチは花を巡って他の訪花者と競争するか? 非線形時系列解析による検証
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本洸哉, 江口優志, 角谷 拓, 早坂大亮
2. 発表標題 農薬施用は水生生物群集の相互作用に影響するか? : 非線形時系列解析によるアプローチ
3. 学会等名 日本生態学会第68回全国大会
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
---------	---------