

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K15610

研究課題名（和文）脳機能ネットワークの大域的状態変化を引き起こす脳活動時空間パターンの同定

研究課題名（英文）Identification of spatiotemporal brain activity patterns triggering global state changes in functional brain networks

研究代表者

福島 誠（Fukushima, Makoto）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：70836452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脳機能ネットワークを導出する際に用いられる脳活動の時空間ダイナミクスに着目し、分離・統合状態間の切り替わりとして特徴づけられる脳機能ネットワークの大域的状態変化の背後にある脳活動ダイナミクスがもつべき性質を、脳構造ネットワークに基づくシミュレーション解析を通して明らかにした。具体的には、領野間での情報のやりとりを大域的なレベルで効率的に実行するためには、脳活動ダイナミクスにパケットベースの通信方式が組み込まれることが必要であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分離状態と統合状態の切り替わりによって特徴づけられる脳機能ネットワークの大域的状態変化は、これまで実世界のさまざまな行動・生理指標との関連が報告されているものの、その生成メカニズムはよくわかっていない。本研究において、その背後にある脳活動ダイナミクスが効率のよい領野間情報通信のためにもつべき性質を明らかにしたことは、脳機能ネットワークの大域的状態変化の生成メカニズムの候補をしぼることを可能にした点において学術的・社会的意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the spatiotemporal dynamics of brain activity used to derive functional brain networks, and clarified the nature of the brain activity dynamics behind global state fluctuations in functional brain networks, characterized as switching between segregated and integrated states, through simulation analysis based on structural brain networks. In particular, we found that packet-based communication must be incorporated into the brain activity dynamics to efficiently exchange information between regions at the global level.

研究分野：脳計測科学

キーワード：脳機能ネットワーク 安静時脳活動 時変ネットワーク モジュラリティ 機能的分離・統合

1. 研究開始当初の背景

脳内においては、領野間の活動時系列関連の強さをエッジ重みとする脳機能ネットワークが大域的に状態変化していること、特にネットワーク内でそれぞれの脳領野がモジュールごとに「分離」している状態と全脳にわたって「統合」している状態の間で絶え間なく切り替わっていることが知られている (Betzel, Fukushima, ..., Sporns, *NeuroImage* 127, 287-297, 2016; Fukushima et al., *NeuroImage* 180, 406-416, 2018; Shine et al., *Neuron* 92, 544-554, 2016). しかしながら、この脳機能ネットワークの大域的状態変化が生じる現象の生成メカニズムはよくわかっていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、脳機能ネットワークの導出元である脳活動の時空間ダイナミクスに着目し、分離・統合状態間の切り替わりに代表される脳機能ネットワークの大域的な状態変化の背後にある脳活動ダイナミクスがもつ性質を明らかにすることを目指した。ここでは特に、脳構造ネットワークから脳活動ダイナミクスが生じる過程をモデル化した上でシミュレーション解析を実施し、得られた結果から効率のよい領野間通信のために脳活動ダイナミクスがもつべき性質を明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

研究代表者はこれまで、脳構造ネットワークによって結合された非線形ダイナミクスモデルを用いて安静時における脳活動を生成し、脳機能ネットワークの大域的状態変化が生じるメカニズムを探る研究を行ってきた (Fukushima and Sporns, *PLoS Computational Biology* 14, e1006497, 2018, Fukushima and Sporns, *Communications Biology* 3, 606, 2020, Pope, Fukushima, ..., Sporns, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 18, e2109380118, 2021).

本研究 (Fukushima & Leibnitz, *Network Neuroscience*, doi:10.1162/netn_a_00360, 2024) では、これらの研究で用いてきたものとはまた別のアプローチを取り、脳構造ネットワーク上の通信モデリング (Avena-Koenigsberger et al. *Nature Reviews Neuroscience* 19, 17-33, 2018) と離散事象シミュレーション技術 (Misić et al., *PLoS Computational Biology* 10, e1003982, 2014) を用いて、脳構造ネットワーク (図 1A) 上の脳活動ダイナミクスをモデリング・シミュレートした (図 1B, C). 本シミュレーション実験系においては、脳活動は抽象的な離散信号を用いてモデル化される。この信号の領野間通信ダイナミクスを、さまざまな通信則を用いて近似し、それぞれの通信則から得られる脳構造ネットワーク上の通信結果の性質をもとに、脳構造ネットワーク上で仮定することが妥当な通信則を導出した。

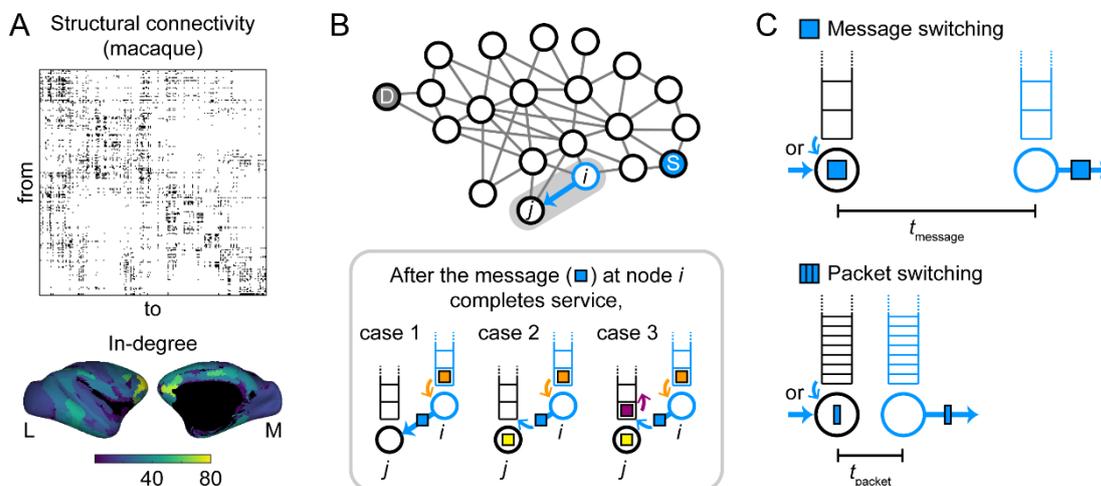


図 1: 脳構造ネットワーク上のダイナミクスのモデリングとシミュレーション. (A) 本研究で用いたマカクザルの脳構造ネットワーク. (B) シミュレーションにおけるネットワーク上の信号の流れ. (C) シミュレーション設定の違いの概要. 出典: Fukushima and Leibnitz, 2024, Fig. 1.

シミュレーションにおいて用いる通信則に関して、信号の伝播戦略としては、ランダムウォーク (RW), 最短経路ルーティング (SP), インフォームド・ランダムウォーク (iRW), バイアスド・ランダムウォーク (bRW) を用い、通信のスイッチングアーキテクチャーとしては、メッセージスイッチング (MS), パケットスイッチング (PS) を用いた。これらの伝播戦略とスイッチングアーキテクチャーの組み合わせのそれぞれについて、脳構造ネットワーク上の領野間通信速度を定量化した。

4. 研究成果

脳構造ネットワークを構成する領野間で一定量の信号伝達に要する時間を定量化し、各伝播戦略を用いたときの時間をスイッチングアーキテクチャーMS と PS の間で比較した。その結果、通信速度と伝播に必要な情報コストがどちらもバランスされている iRW の各バージョンやコントロールパラメータ c を中間値としたときの bRW を伝播戦略として用いた際において、MS よりも PS の方が信号伝達に要する時間が短くなることがわかった (図 2 および図 3)。本結果はマカザルの脳構造ネットワークデータを用いて見出したものであったが、同様の傾向はマウス

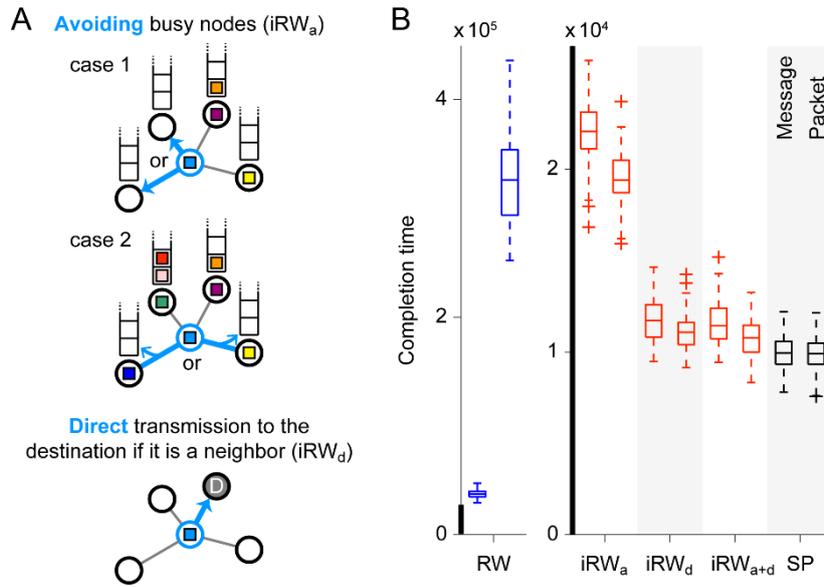


図 2 : (A) iRW の概要. (B) マカザル脳構造ネットワークの領野間で一定量の信号伝達に要する時間の比較 (RW, iRW, SP). 出典 : Fukushima and Leibnitz, 2024, Fig. 2.

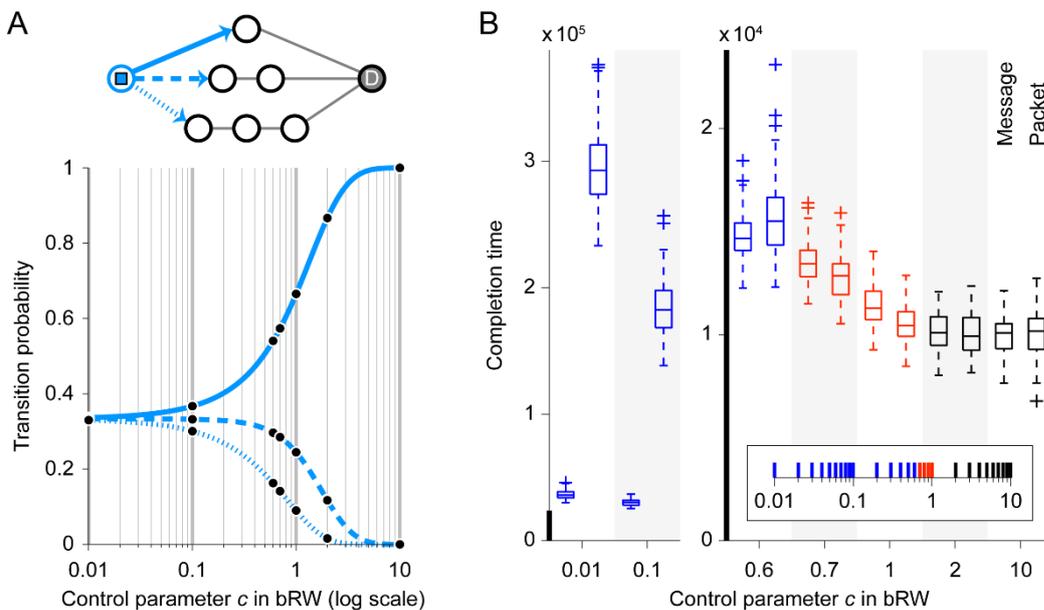


図 3 : (A) bRW を用いた際の遷移確率. (B) マカザル脳構造ネットワークの領野間で一定量の信号伝達に要する時間の比較 (bRW). 出典 : Fukushima and Leibnitz, 2024, Fig. 3.

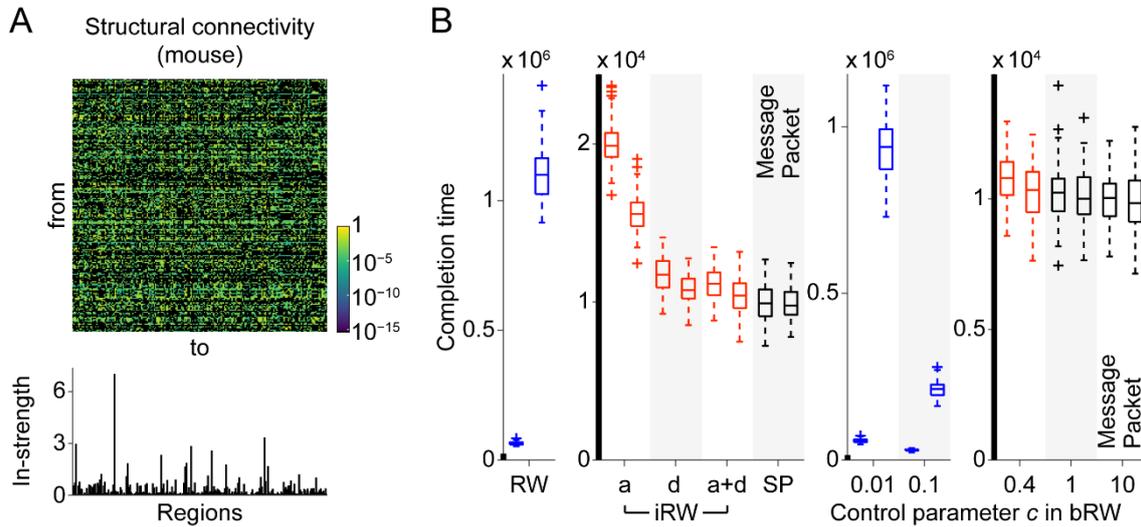


図 4: (A) マウスの脳構造ネットワーク. (B) マウス脳構造ネットワークの領野間で一定量の信号伝達に要する時間の比較. 出典: Fukushima and Leibnitz, 2024, Fig. 6 を改変.

の脳構造ネットワークデータを用いた場合においても確認できた (図 4).

通信速度と伝播に必要な情報コストがバランスされた伝播戦略は、それぞれ片方だけに特化した SP (速いがネットワーク構造全体の情報が信号伝播に必要) や RW (ネットワーク構造に関する情報は信号伝播に必要ないが遅い) に比べ、生理学的な妥当性に優れることから、そのような伝播戦略である iRW, 中間値の c を用いた bRW に対して相対的に高い通信効率性をもつ PS は、モデル内で仮定することが妥当なスイッチングアーキテクチャーとしてみなすことができる. PS のシミュレーションにおいては、信号はより小さな単位 (パケット) に区分化されてネットワーク上を伝播することが仮定されていたことから、ここで得られた結果は、このようなパケットベースのダイナミクスが脳構造ネットワーク上において生成することの利点を示している. 本研究により、脳機能ネットワークにおいて生じる大域的状態変化の背後にある脳活動ダイナミクスに関して、効率のよい領野間情報通信のためにもつべきダイナミクスの性質がシミュレーション解析を通して明らかにされた.

参考文献

Avena-Koenigsberger, A., Misic, B., & Sporns, O. (2018). Communication dynamics in complex brain networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 19, 17-33.

Betzell, R. F., Fukushima, M., He, Y., Zuo, X. N., & Sporns, O. (2016). Dynamic fluctuations coincide with periods of high and low modularity in resting-state functional brain networks. *NeuroImage*, 127, 287-297.

Fukushima, M., Betzell, R. F., He, Y., de Reus, M. A., van den Heuvel, M. P., Zuo, X. N., & Sporns, O. (2018). Fluctuations between high-and low-modularity topology in time-resolved functional connectivity. *NeuroImage*, 180, 406-416.

Fukushima, M. & Sporns, O. (2018). Comparison of fluctuations in global network topology of modeled and empirical brain functional connectivity. *PLoS Computational Biology*, 14, e1006497.

Fukushima, M. & Sporns, O. (2020). Structural determinants of dynamic fluctuations between segregation and integration on the human connectome. *Communications Biology*, 3, 606.

Fukushima, M. & Leibnitz, K. (2024). Effects of packetization on communication dynamics in brain networks. *Network Neuroscience*, doi:10.1162/netn_a_00360.

Mišić, B., Sporns, O., & McIntosh, A. R. (2014). Communication efficiency and congestion

of signal traffic in large-scale brain networks. *PLOS Computational Biology* 10, e1003427.

Pope, M., Fukushima, M., Betzel, R. F., Sporns, O. (2021), Modular origins of high-amplitude co-fluctuations in fine-scale functional connectivity dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118, e2109380118.

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Makoto Fukushima, Kenji Leibnitz	4. 巻 in press
2. 論文標題 Effects of packetization on communication dynamics in brain networks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Network Neuroscience	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） 10.1162/netn_a_00360	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 Maria Pope, Makoto Fukushima, Richard F. Betzel, Olaf Sporns	4. 巻 118
2. 論文標題 Modular origins of high-amplitude cofluctuations in fine-scale functional connectivity dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 e2109380118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2109380118	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 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 福島 誠・ライプニッツ 賢治
2. 発表標題 パケット化がヒトコネクトーム上でシミュレートされた信号伝播に与える影響
3. 学会等名 第47回日本神経科学大会，第67回日本神経化学会大会，第46回日本生物学的精神医学会年会，第8回アジアオセアニア神経科学連合コンgres合同大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Makoto Fukushima, Kenji Leibnitz
2. 発表標題 Comparison of message-switched and packet-switched communication simulated on the human connectome
3. 学会等名 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2024)（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryo Nishimura, Makoto Fukushima
2. 発表標題 Comparing connectivity-to-reservoir conversion methods for connectome-based reservoir computing
3. 学会等名 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Makoto Fukushima, Ryusuke Nakamura, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Evaluating the repeatability and validity of community detection in functional brain networks
3. 学会等名 30th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (OHBM 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西村 涼・福島 誠
2. 発表標題 コネクトームに基づくリザーバーコンピューティングにおいて脳構造結合・リザーバー重みの変換が学習性能に与える影響について
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 (第38回)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐谷 拓海・福島 誠
2. 発表標題 コネクトームに基づくリザーバーコンピューティングの手書き数字認識への適用
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤木 未来・福嶋 誠
2. 発表標題 蔵本モデルによる結合振動子系を用いたリザーバーコンピューティング
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西村 涼・福嶋 誠
2. 発表標題 脳構造結合からリザーバー重みへの変換がコネクトームに基づくリザーバーコンピューティングの性能に与える影響について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福嶋 誠・中村 隆亮・池田 和司
2. 発表標題 脳機能ネットワークにおけるコミュニティ検出の再現性と妥当性の評価
3. 学会等名 第26回日本ヒト脳機能マッピング学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 福嶋 誠
2. 発表標題 脳機能ネットワークの大域的状態変化の分析
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会 (CQ)・通信行動工学研究会 (CBE) (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Makoto Fukushima, Kenji Leibnitz
2. 発表標題 Effects of signal packetization on whole-brain communication dynamics simulated in the connectome
3. 学会等名 52nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福嶋 誠・ライプニッツ 賢治
2. 発表標題 Effects of packetization on cortical communication dynamics simulated in the connectome
3. 学会等名 第7回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福嶋 誠・ライプニッツ 賢治
2. 発表標題 Relating switching architectures to propagation strategies in network communication models for the connectome
3. 学会等名 日本神経回路学会第33回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福嶋 誠・中村 隆亮・池田 和司
2. 発表標題 Evaluating the stability and validity of communities detected in human functional brain networks
3. 学会等名 第6回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋 誠
2. 発表標題 時変脳機能ネットワークの分析
3. 学会等名 ネットワーク科学研究会2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋 誠・ライブニッツ 賢治
2. 発表標題 脳構造ネットワーク上のパケット通信ダイナミクスにおけるハブ領域の役割
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会, 第65回日本神経化学学会大会, 第32回日本神経回路学会大会合同大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 隆亮・福嶋 誠・池田 和司
2. 発表標題 パーセレーションの空間解像度の選択がヒト脳機能ネットワークのコミュニティ検出解に与える影響について
3. 学会等名 第24回日本ヒト脳機能マッピング学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋 誠
2. 発表標題 脳機能ネットワークの大域的状態変化の特徴づけとその生成機構解明に向けた計算論的研究
3. 学会等名 第33回東京臨床脳画像解析研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福嶋 誠・ライプニッツ 賢治
2. 発表標題 パケットベースの通信に適した脳構造ネットワーク上の信号伝播モデル
3. 学会等名 日本神経回路学会第31回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福嶋 誠・ライプニッツ 賢治
2. 発表標題 パケットベースの脳情報通信に適したマクロスケールコネクトーム上の経路選択戦略
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maria Pope, Makoto Fukushima, Richard F. Betzel, Olaf Sporns
2. 発表標題 Modular origins of high-amplitude co-fluctuations in fine-scale functional connectivity dynamics
3. 学会等名 Networks 2021 Satellite Conference: Network Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Fukushima, Kenji Leibnitz
2. 発表標題 Routing strategies for packet-based communication in brain networks
3. 学会等名 Networks 2021 Satellite Conference: Network Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kirsten Hilger, Maren Wehrheim, Makoto Fukushima, Josh Faszkwitz, Olaf Sporns
2. 発表標題 Intrinsic brain network dynamics and general intelligence
3. 学会等名 46. Jahrestagung Psychologie und Gehirn
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人webページ https://sites.google.com/site/mfukushimawebjp 研究グループwebページ https://sites.google.com/view/netneurojp
--

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		
米国	インディアナ大学		