

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14798

研究課題名（和文）成層圏を介した太陽活動変動の地球気候への影響過程における遅延メカニズムの解明

研究課題名（英文）Elucidation of the Delay Mechanism in the Influence of Solar Activity Variations on Earth's Climate through the Stratosphere

研究代表者

野口 峻佑 (Noguchi, Shunsuke)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：90836313

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：太陽活動変動の地球気候への影響を考えるにあたり、成層圏周極渦の変動を起点とした下方影響過程は重要な役割を担っている。本研究は、太陽の11年周期変動の地表への影響が、数年の遅れを持って顕在化する過程の詳細を、地球システムモデルを用いた一連の数値実験によって調査した。高エネルギー粒子降り込みの効果や大気海洋相互作用の効果も、成層圏循環場を部分的に拘束する技術等を活用したアンサンブル比較実験によって、定量的に評価した。その結果、特に、成層圏周極渦の極端変動が、海洋循環を駆動することで有意な越年影響を生み出す様子を、明瞭に描き出すことに成功した。これは、遅延応答の素過程の実証に相当する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽活動と地球気候との関係は複雑であり、よく知られた太陽11年周期変動の影響も、単純には現れない。その間の物理過程を明確にしていくことは、現在、学術的にも社会的にも重要な課題となっている。本研究では、太陽活動の影響を受けた成層圏の変動が、数年遅れて地表応答を引き起こす様子を、因果関係の明確な数値実験の枠組みを構築して、示すことに成功した。成層圏から対流圏への下方影響過程の、大気海洋相互作用の変調や上空の化学組成の変化を通じた、よりスケールの大きな地球システム変動との繋がりを、実事例で明らかできたことは、当該分野の視野拡大という点でも意義深い。

研究成果の概要（英文）：In considering the influence of solar activity variations on Earth's climate, the downward influence processes originating from stratospheric polar vortex variations play an important role. This study investigated the details of the processes by which the effects of the solar 11-year cycle on the surface manifest with a delay of 2-4 years through a series of numerical experiments using an Earth system model. The effects of energetic particle precipitation and atmosphere-ocean interactions were quantitatively evaluated through ensemble comparison experiments utilizing techniques such as partial constraint of stratospheric circulation variations. As a result, this study successfully illustrated how extreme variations in the stratospheric polar vortex drive ocean circulation, producing significant cross-year effects. This corresponds to the demonstration of the fundamental processes of the delayed response.

研究分野：大気科学

キーワード：太陽活動 北大西洋振動 北極振動 環状モード 成層圏-対流圏結合 地球システムモデル 高エネルギー粒子降り込み 大気海洋相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

太陽活動変動の地球気候への影響を把握・理解することは、気候システム研究の根幹をなす。気候システムがその最大の制御要因である太陽からのエネルギー入力に対してどのように応答するかを解明することは、例えば太古の気候状態の推定・復元のみならず、温室効果ガスの増加等の人為的要因による気候変化を正しく捉えて今後の適応策に活かしていくためにも、重要な課題である。

近年の研究により、太陽の11年周期変動のピークに対して、その影響が顕著な北大西洋域の応答が、2-4年遅れて現れることが指摘されてきた。この応答には、太陽活動の影響が成層圏を介して力学的に増幅・下方伝播する過程の存在が重要であるとされる。これは、太陽放射変動が、赤道域の成層圏界面付近の温度変化（ひいては南北温度勾配に伴う冬半球中緯度東西風の変化）を引き起こすことが起点となり、極夜ジェットの強弱のシグナルがその後下方へ伝播していくというものである。しかし、この成層圏を介した過程の駆動は、太陽活動の極大/極小期に顕著となるはずであり、それ単体では、太陽活動周期と同期すると考えられる。すなわち、実際の太陽活動変動の地球気候への影響を理解するためには、地表応答の遅れを生み出すなんらかの遅延増幅過程を提示し、検証を進めていく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、太陽活動変動の地球気候への影響の遅延過程の存在を確かめ、そのメカニズムを明らかにすることを目的とした。特に、大気海洋相互作用の効果や、高エネルギー粒子の降り込みの効果も、この過程において果たす役割を、数値実験により確認し、従来よりも精緻かつ包括的な知見を獲得することを目指した。

3. 研究の方法

気象庁気象研究所の地球システムモデル (MRI-ESM) を用いて一連の数値実験を行った。モデルの設定は、第6期結合モデル相互比較実験 (CMIP6) のものに準拠している。この設定では、大気・海洋・化学・エアロゾルの各コンポーネントが結合されており、CMIP6 で新たに導入が推奨された高エネルギー粒子の降り込みの効果も、半経験スキームにより作成される上空の境界条件を取り込む形で、組み込まれている。また、同設定で実施された既存の長期シミュレーションデータを活用した解析も行った。

4. 研究成果

(1) 長期シミュレーション結果を用いた統計解析

まず、理想的な条件下で、本研究が注目する遅れ応答が存在することの確認作業を行った。MRI-ESM による、太陽活動度の変化のみが外力強制として取り入れられた長期間積分実験データを解析した結果を、図1に示す。極夜ジェットの強弱のシグナルの起点となる赤道域成層圏界面においては、太陽紫外線放射指数と同期した変動が生じている。その一方で、地表の北大西洋振動 (NAO) 指数としては、太陽紫外線放射指数のピークに対して2-4年ほど遅れて、変動のピークが現れている。同設定での複数の並行ランにおいて、同様の遅れ応答がみられることが確認でき、本研究の検証対象過程は虚像ではない可能性が高い、という結論が得られた。

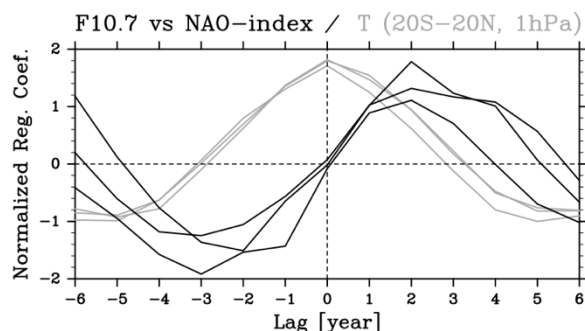


図1: 太陽11年周期変動に対するラグ回帰係数の計算結果。Lag=0が太陽活動極大期に相当。NAO指数とF10.7指数との規格化回帰係数を黒線で示す。合わせて、赤道域成層圏界面の温度とF10.7との規格化回帰係数を灰線で示す。それぞれ、MRI-ESMによる長期シミュレーションの独立な3アンサンブル分から計算。

(2) 高エネルギー粒子の降り込みの影響評価

ついで、太陽紫外線放射指数に対して近年数年遅れてピークを示す傾向にある、高エネルギー粒子の降り込み (EPP) の効果に関する実験を行った。EPPは、極域の大気組成を変化させることで、赤道域-亜熱帯を起点とする紫外線の効果とは独立に、極夜ジェットの強弱のシグナルを発生させて、下方影響を生み出しうる。すなわち、この過程の影響が十分に大きく、頑健であ

と示すことができれば、遅れ応答が説明される。そこで、晩秋に顕著な EPP が起こった際の上空での化学組成変化とそれに伴う成層圏-対流圏結合変動の変調を、MRI-ESM によるアンサンブル実験によって調査した。その結果、EPP の効果により生じる大気循環変動は、上述の NAO 傾向と符号としては整合的ではあるが、地表まで達して卓越するには十分とは言い難い大きさの偏差形成にとどまることがわかった。上記では、力学的な増幅が最も期待できるタイミングでの EPP シナリオを想定したが、それは同時に内部変動も大きいことを意味し、頑健性にも問題が出てきてしまうため、この過程で遅れ応答の全ての説明するのは、難しいと考えられる。

(3) 成層圏循環場の部分拘束実験による成層圏-対流圏-海洋結合過程の調査

そこで、太陽紫外線等の効果で生じた極夜ジェットの強弱シグナルが下方へ伝播した後の、対流圏以下でのフィードバック過程に着目し、成層圏周極渦の極端変動が生じた後の海洋循環駆動とそれによってもたらされる越年影響の調査を行った。ここでは、成層圏からの影響の詳細を定量的に把握するために、成層圏以高の循環のみを部分拘束した擬似予測ラン (NUDGE 実験) と、成層圏のイベントを再現できない (ほど早めに初期値化した) 予測ラン (FREE 実験) の、2 種類のアンサンブル積分を MRI-ESM を用いて実施し、両実験のアンサンブル平均差を追跡した。直近のイベント (2019/2020 年冬季の極渦強化事例) を対象に、成層圏の強風偏差が対流圏・地表へ伝わり、海洋にまで影響を及ぼす過程を解析したところ、図 2 (a) に示すように、地表では南北の高低気圧偏差 (海上の西風強化) で特徴づけられる、正の北極振動 (AO) および NAO が卓越し、その後の大気海洋相互作用が変調することが確かめられた。すなわち、正の NAO の卓越により、北大西洋亜表層の水温が有意に低下するが、形成された水温偏差は、図 3 に示すように、下方へ拡がりながらも、混合層の季節変化に伴い、翌冬季の海面に再出現することがわかった。これは、大気状態に有意な影響をもたらし、図 2 (b) でみられるように、年を跨いで、正の AO/NAO 状態が発現するように作用することが確かめられた。

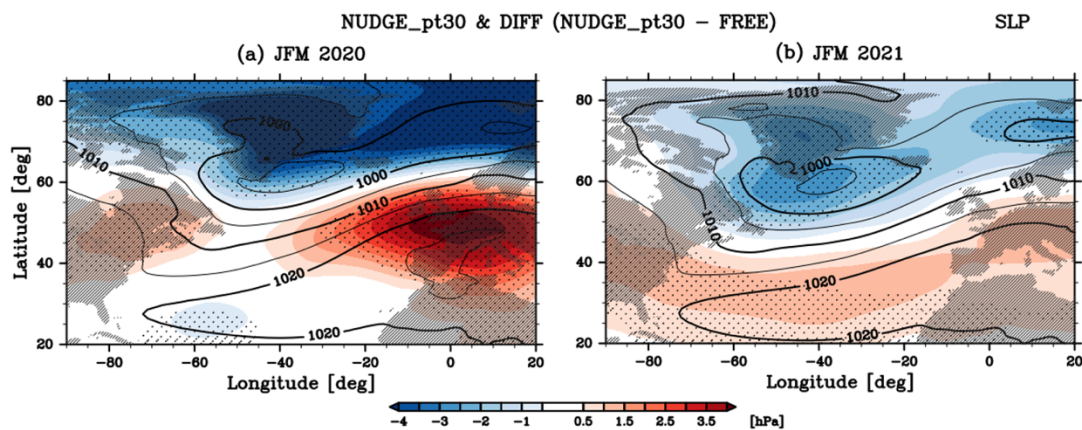


図 2: 北大西洋域における海面更正気圧の水平分布. NUDGE 実験のアンサンブル平均 (等値線) とその FREE 実験のアンサンブル平均からの偏差 (色) を表示. (a) 1 年目 (2020 年) および (b) 2 年目 (2021 年) の晩冬 (1-3 月) 期間平均について表す. 偏差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 90% 以上) な領域をドットで示す.

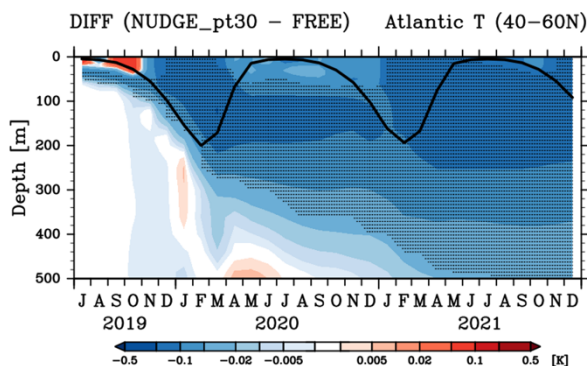


図 3: 北大西洋亜表層における海水温偏差の時間高度断面. 北大西洋域の北緯 40 度から 60 度で領域平均した月平均海水温 (温位) について、NUDGE 実験の FREE 実験からのアンサンブル平均偏差を色で表示. 偏差が統計的に有意 (Welch の t -検定で 90% 以上) な領域をドットで示す. 合わせて、NUDGE 実験における混合層深度のアンサンブル平均を黒太線で表示.

なお、発現した地表応答は、その後、海洋前線帯等との位置関係により、フェードアウトしていく。太陽活動の極大期後に上述の過程が頻発 (いきなりここで取り扱った極端イベントほどの強度とまではいかなくとも、強風偏差の下方伝播が徐々に発現) し、地表偏差が 1-2 年の遅れを持って増幅されると考えると、遅れ応答はうまく説明される。以上のように、循環場部分拘束技術を駆使した実験により、遅れ応答をもたらす過程を精彩に描くことに成功した。今後、各種の太陽活動変動の影響の把握・解明が、11 年周期変動に限らず、進展することが望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 中村遥暉, 野口峻佑	4. 巻 -
2. 論文標題 成層圏突然昇温に伴う熱帯対流圏循環場変化の季節予報データを用いた検証	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 令和5年度 異常気象と長期変動 研究集会報告	6. 最初と最後の頁 6 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 野口峻佑	4. 巻 -
2. 論文標題 南半球成層圏における極渦弱体化イベントの統計的特徴とその熱帯循環との関係	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 令和4年度 異常気象と長期変動 研究集会報告	6. 最初と最後の頁 7 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 中村遥暉, 野口峻佑, 廣岡俊彦	4. 巻 -
2. 論文標題 2021年に発生した成層圏突然昇温に伴う対流圏循環場の変化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 令和4年度 異常気象と長期変動 研究集会報告	6. 最初と最後の頁 6 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Scaife A. A., Baldwin M. P., Butler A. H., Charlton-Perez A. J., Domeisen D. I. V., Garfinkel C. I., Hardiman S. C., Haynes P., Karpechko A. Y., Lim E.-P., Noguchi S., Perlwitz J., Polvani L., Richter J. H., Scinocca J., Sigmund M., Shepherd T. G., Son S.-W., Thompson D. W. J.	4. 巻 22
2. 論文標題 Long-range prediction and the stratosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 2601 ~ 2623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-22-2601-2022	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

1. 著者名 野口峻佑, 小寺邦彦, 水田亮, 行本誠史	4. 巻 -
2. 論文標題 2019/2020年冬季の成層圏周極渦強化状態とその対流圏・海洋への影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 令和3年度 異常気象と長期変動 研究集会報告	6. 最初と最後の頁 70~76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Noguchi S., Kuroda Y., Kodera K., Watanabe S.	4. 巻 47
2. 論文標題 Robust Enhancement of Tropical Convective Activity by the 2019 Antarctic Sudden Stratospheric Warming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL088743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL088743	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 Noguchi S., Kuroda Y., Mukougawa H., Mizuta R., Kobayashi C.	4. 巻 47
2. 論文標題 Impact of Satellite Observations on Forecasting Sudden Stratospheric Warnings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2019GL086233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL086233	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 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Shunsuke Noguchi, Kunihiko Kodera, Ryo Mizuta, Seiji Yukimoto
2. 発表標題 Ocean Circulation Responses in a Stratospheric Nudging Experiment by an Earth System Model: A Case Study for the Abnormal 2019-2020 Season
3. 学会等名 A Joint Workshop of DynVar and SNAP (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平信海成, 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温の太平洋海面水温変動に対する応答
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 野口峻佑, 小寺邦彦, 水田亮, 行本誠史
2. 発表標題 成層圏周極渦の極端変動による海洋循環駆動とそれによりもたらされる越年影響
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村遥暉, 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温に伴う熱帯域対流圏循環場変化の季節予報データを用いた検証
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平信海成, 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温の発生頻度の太平洋海面水温変動に対する応答とその将来変化
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村遥暉, 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温に伴う熱帯域対流圏循環場変化の季節予報データを用いた検証
3. 学会等名 異常気象研究会2023/第11回観測システム・予測可能性研究連絡会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Noguchi, Y. Kuroda, K. Kodera, S. Watanabe
2. 発表標題 Tropical Convective Responses to Weakening Events of the Southern Hemisphere Stratospheric Polar Vortex
3. 学会等名 SPARC 2022 General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Noguchi, K. Kodera, R. Mizuta, S. Yukimoto
2. 発表標題 A Stratospheric Nudging Experiment for the Abnormal 2019-2020 Season by the Earth System Model of Meteorological Research Institute
3. 学会等名 QBO Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温が熱帯対流活動および台風に与える影響についての数値実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口峻佑
2. 発表標題 南半球成層圏における極渦弱体化イベントの統計的特徴とその熱帯循環との関係
3. 学会等名 異常気象研究会2022/第10回観測システム・予測可能性研究連絡会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村遥暉, 野口峻佑, 廣岡俊彦
2. 発表標題 2021年に発生した成層圏突然昇温に伴う対流圏循環場の変化
3. 学会等名 異常気象研究会2022/第10回観測システム・予測可能性研究連絡会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏循環の極端変動が熱帯域の対流活動に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 九州台風セミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口峻佑
2. 発表標題 太陽からの高エネルギー粒子の降り込みによる成層圏-対流圏結合過程の変調
3. 学会等名 海洋研究開発機構MATセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口峻佑, 小寺邦彦, 水田亮, 行本誠史
2. 発表標題 成層圏周極渦極端変動による海洋循環駆動 成層圏規定アンサンブル実験による2019/2020年の影響評価
3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口峻佑, 小寺邦彦, 水田亮, 行本誠史
2. 発表標題 2019-2020年冬季の成層圏周極渦強化状態とその対流圏への下方影響
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 野口峻佑, 小寺邦彦, 水田亮, 行本誠史
2. 発表標題 2019/2020年冬季の成層圏周極渦強化状態とその対流圏・海洋への影響
3. 学会等名 異常気象研究集会 (変容する気候系における気象・気候災害の予測とその発現過程の理解)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Noguchi, Y. Kuroda, H. Mukougawa, R. Mizuta, C. Kobayashi
2. 発表標題 Impact of Satellite Observations on Forecasting Sudden Stratospheric Warmings
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野口峻佑, 黒田友二, 小寺邦彦, 渡邊真吾
2. 発表標題 2019年南極成層圏突然昇温の熱帯対流圏への影響 成層圏規定アンサンブル予測実験による評価
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野口峻佑, 黒田友二, 小寺邦彦, 渡邊真吾
2. 発表標題 成層圏突然昇温に伴う熱帯対流活動の活発化 成層圏循環規定実験による2019年南極昇温事例の影響
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Noguchi, Y. Kuroda, H. Mukougawa, R. Mizuta, C. Kobayashi
2. 発表標題 Impact of Satellite Observations on Forecasting Sudden Stratospheric Warmings
3. 学会等名 ECMWF Workshop on "Stratospheric predictability and impact on the troposphere" (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 S. Noguchi, K. Yoshida, M. Deushi, Y. Kuroda
2. 発表標題 Assessment of Energetic Particle Precipitation Indirect Effects Associated with Elevated Stratopause Events
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 S. Noguchi, Y. Kuroda
2. 発表標題 On the Response of Tropical Convective Systems to the 2019 Sudden Warming Event in the Antarctic Stratosphere
3. 学会等名 WCRP/SPARC SATIO-TCS joint workshop on Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in the Tropics (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 野口峻佑
2. 発表標題 成層圏突然昇温期における気象庁全球アンサンブル予報システムの初期摂動特性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>南極成層圏の大気の乱れが日本の南海上の台風発生域に影響することを証明 https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20200807/</p>
--

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