

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02231

研究課題名（和文）水分変動増大とプライミング効果：森林土壌の炭素動態予測高度化へ向けた影響評価

研究課題名（英文）Increased moisture fluctuation and priming effect: Impact assessment for advancing the prediction of forest soil carbon dynamics

研究代表者

永野 博彦 (Nagano, Hirohiko)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：40758918

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：国内の森林・草地で採取した10土壌を水分変動増大を模した乾湿サイクル条件で培養し、CO₂放出増大現象の解明に挑んだ。いずれの土壌でも、乾湿サイクル区におけるCO₂放出速度は水分変動の無い対照区の放出速度よりも大きかった。但し、高温環境では、乾湿サイクル条件に伴うCO₂放出増大が鈍化し、Q₁₀が低下する傾向があった。CO₂放出増大率の土壌間での違いを予測する土壌理化学性として、土壌中の金属-有機物複合体量が示唆された。水分変動増大による微生物バイオマスの減少も示唆された。これらの土壌理化学性が、土壌有機物分解のQ₁₀低下、そこから示唆されるプライミング効果の発現などに関わっている可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで土壌炭素濃度を高める働きがあるとして注目されてきた金属-有機物複合体について、水分変動増大環境に対する脆弱性を示唆できた点において、本研究成果は独自性が高く、森林土壌の炭素動態予測高度化に対しても大きな意義を有している。また、乾湿サイクル条件における有機物分解の温度感受性（Q₁₀）の低下も興味深い。本研究成果により、炭素動態予測モデルやこうしたモデルに基づいた地球環境変化の将来予測に潜む不確実性の低減につながる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：Ten soils collected from forests and grasslands in Japan were incubated under wet-dry cycle conditions (DWC) that simulated increased moisture fluctuations, in an attempt to elucidate the phenomenon of soil CO₂ release increase. In all soils, the CO₂ release rate in the DWC treatment was greater than that in the control treatment with no moisture fluctuations. However, in high-temperature conditions, the increase in CO₂ release due to the DWC was mitigated, and Q₁₀ tended to decrease. The abundance of organo-metal complexes in the soil was suggested as a soil physicochemical property that predicts differences in the increased rate of CO₂ release among soils. A decrease in microbial biomass due to increased moisture fluctuations was also suggested. These soil physicochemical properties may be related to the reduction of Q₁₀ for soil organic matter decomposition and the occurrence of the priming effect suggested by this.

研究分野：陸域環境動態

キーワード：土壌炭素動態 水分変動 プライミング効果 火山灰土壌 気候変動 土壌有機物分解 降水パターン
気象激甚化

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

森林土壌などに有機物として貯留する炭素の量は大気 CO₂ の 3 倍多く、微生物による分解を介し大気へと放出される CO₂ 量は化石燃料の燃焼で放出される CO₂ 量の 5~7 倍程度である。現状、土壌有機物分解に伴う CO₂ 放出量は、樹木などの光合成による正味の CO₂ 吸収量とほぼ釣り合っているが、地球温暖化に伴う気温上昇によって増加する可能性が指摘されている (IPCC, 2013)。さらに温暖化では、一回当たりの降雨量が増加する一方、降雨日が減少することで、森林土壌の水分変動も大きく増大する (Pfleiderer et al., 2019)。降雨日の減少に伴い乾燥した土壌へ大量の雨が降ると、土壌水分が急激に上昇し、団粒構造や微生物細胞などが破壊される。その結果、利用可能な有機物の増加や微生物群集構造の変化などが発生し、分解活性と CO₂ 放出速が爆発的に増大する。研究開始当初までに我々は、北茨城市小川の森林で採取した火山灰土壌を 20 の水分変動再現実験で培養し、水分変動条件で CO₂ 放出が 20% 以上増大したことを見出した (Nagano et al., 2019)。しかし、水分変動増大に伴う CO₂ 放出増大のメカニズムおよび異なる土壌型での放出増大規模は未解明であり、水分変動増大影響を CO₂ 放出モデルおよび温暖化の将来予測に組み込むことは困難なままである。

水分変動増大に伴う CO₂ 放出増大メカニズムの一つとして、特に易分解性有機物の供給が難分解性有機物の分解を変化させるプライミング効果 (Kuzyakov et al., 2000) がある。我々が上記の水分変動再現実験を 30 で実施した際には、20 の場合と異なり、水分変動増大による CO₂ 放出増大が起こらなかった。この予備実験に基づく、通常の土壌環境で主要な CO₂ 放出源となっている難分解性有機物の分解が水分変動増大で新たに利用可能になった易分解性有機物の供給により抑制される負のプライミング効果の発現が示唆される。しかし、易分解性有機物の増加により難分解性有機物の分解が加速される正のプライミング効果に比べ、CO₂ 放出が増加しない負のプライミング効果の調査事例は少なく、水分変動増大による負のプライミング効果の発現を検証した研究は皆無である。

2. 研究の目的

- ・水分変動増大環境における負のプライミング効果の発現可能性を複数の土壌で検証する。
- ・水分変動増大による CO₂ 放出増大規模を規定する土壌理化学性を探索する。

3. 研究の方法

負のプライミング効果の発現可能性を複数の土壌で検証するため、北茨城市小川の森林内の 2 か所および大分県久住の森林と牧草地で採取した計 4 土壌 (図 1) を、水分変動増大環境を再現した乾湿サイクル条件および対照区としての水分一定条件、さらに 2 種類の培養温度 (20、30) を組み合わせた計 4 条件で 84 日間培養した。培養中、CO₂ 放出速度を定期的に計測し、水分一定条件に対する乾湿サイクル条件の CO₂ 放出増大率を 20 と 30 で比較した。また、20 と 30 における CO₂ 放出速度の比 (Q₁₀) を水分一定条件と乾湿サイクル条件で比較した。

さらに、水分変動増大による CO₂ 放出増大規模を規定する土壌理化学性を探索するため、北茨城市小川および大分県久住の計 4 土壌に加え、新潟県内の 4 つの森林から採取した計 6 土壌 (図 1) も、乾湿サイクル条件および水分一定条件で培養した。培養温度は、20 とした。培養実験で得られた水分一定条件に対する乾湿サイクル条件の CO₂ 放出増大率と各種土壌理化学性との相関性を検証した。

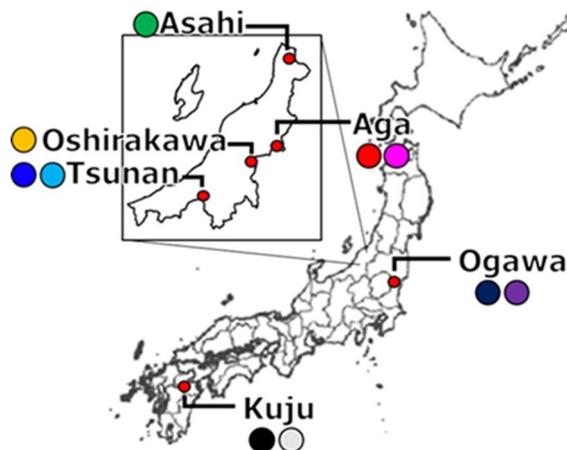


図 1. 本研究で使用した計 10 土壌の採取地。北茨城市小川の森林から計 2 土壌、大分県久住の森林および牧草地から各 1 土壌、また新潟県朝日、阿賀、大白川、および津南の各森林から計 6 土壌を採取した。深さ 0-5 cm または 0-10 cm の表層土壌を使用した。

4. 研究成果

北茨城市小川と大分県久住で採取した計4土壌では、培養温度に関わらず、培養中の積算CO₂放出速度は、水分一定条件よりも乾湿サイクル条件で大きかった(図2; 水分一定条件の1.5から3.7倍)。一方、Q₁₀は、水分一定条件よりも乾湿サイクル条件で低く(図3)、水分変動増大に伴うCO₂放出増大の高温環境による鈍化が示唆された。この現象を引き起こすメカニズムの1つとして、水分変動増大環境における負のプライミング効果の発現が想定される。

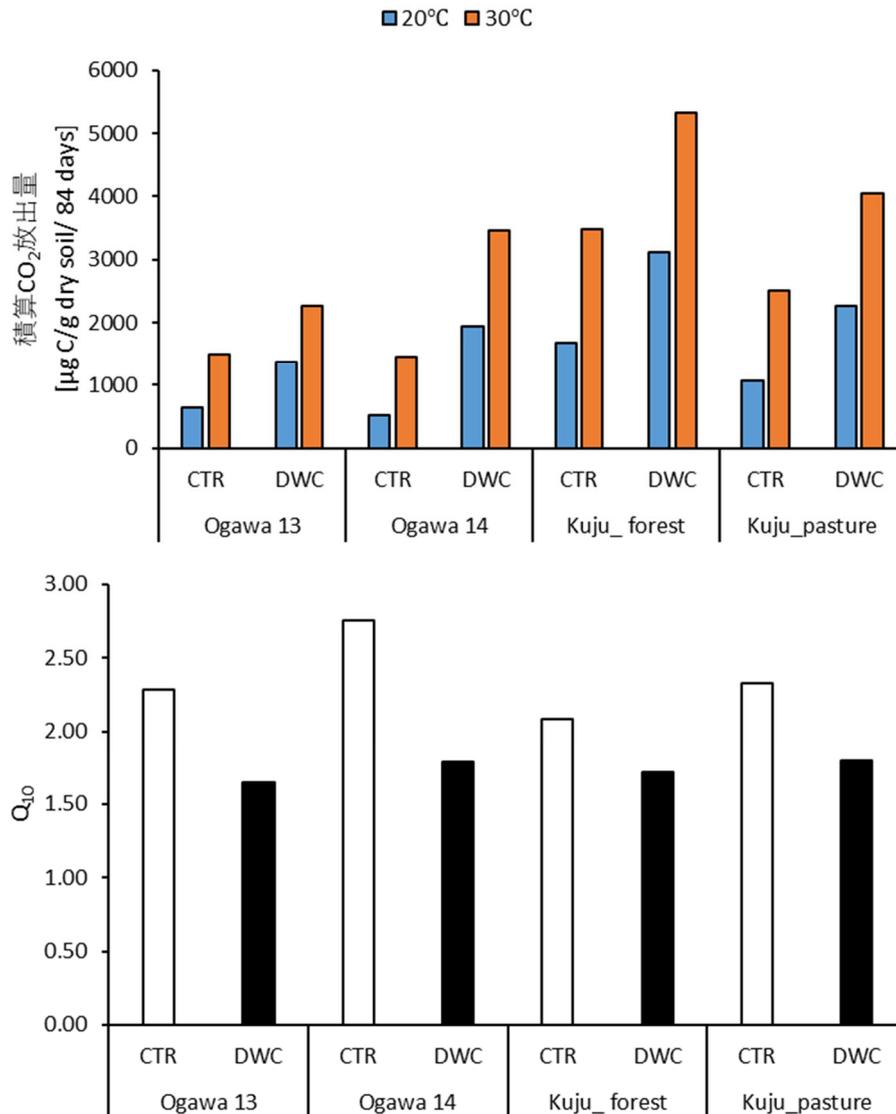


図2. 温度2条件(20、30)と水分2条件(乾湿サイクル(DWC)と水分一定(CTR))を組み合わせた4条件で84日間培養した時の積算CO₂放出量(上)とQ₁₀値(下)。

新潟県の計6土壌も含めた20の培養実験では、乾湿サイクル条件のCO₂放出速度は水分一定条件よりも大きかった(図3)。但し、水分変動増大によるCO₂放出増大率は、1.3から3.7倍と様々であった。そこで、各種土壌理化学性との関係を解析したところ、CO₂放出増大率の土壌間での変動を予測する土壌理化学性因子として、アルカリ性溶液(ピロリン酸ナトリウム溶液)で選択的に溶解され抽出されるアルミニウムや鉄として測定される土壌中の金属-有機物複合体量が示唆された。特に、金属-有機物複合体量は乾湿サイクル処理によるCO₂放出増大率に対し統計的に有意な正の相関を示したことから(図4)、有機物を微生物分解から保護してきた金属-有機物複合体が乾湿サイクルによって破壊されたことで、乾湿サイクルを生き残った微生物に分解可能な基質炭素源が増大し、CO₂放出増大につながった可能性が示唆された。また、乾湿サイクル処理に伴う微生物バイオマスの減少を示唆するデータも取得できた(図5)。乾湿サイクルを伴う水分変動増大に敏感なこれらの土壌理化学性が、水分変動増大環境におけるCO₂放出増大や付随して観測されたQ₁₀の低下、そこから示唆されたプライミング効果の発現などと関わっている可能性がある。

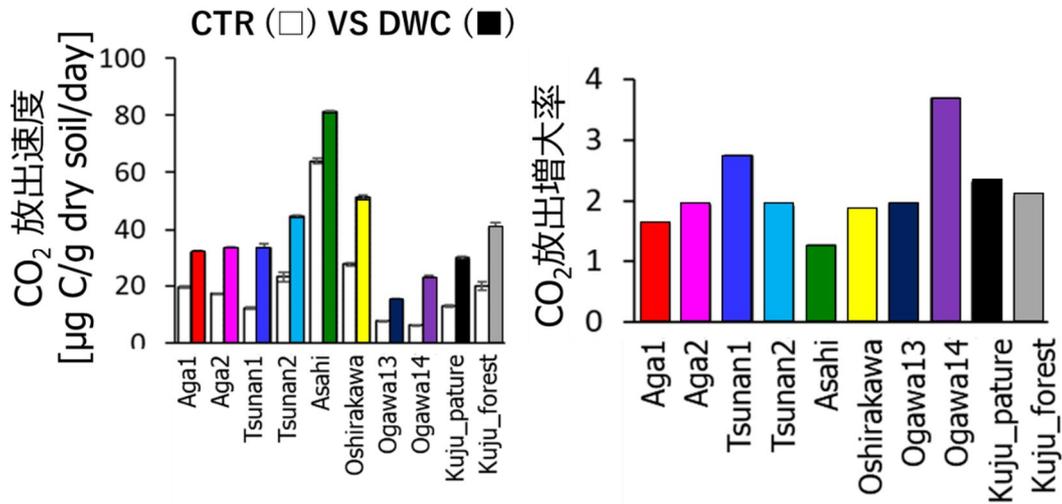


図 3. 培養温度 20 の乾湿サイクル条件 (DWC) および水分一定条件 (CTR) で 84 日間培養した時の平均 CO₂ 放出速度 (左) と乾湿サイクル条件における CO₂ 放出増大率 (右)。

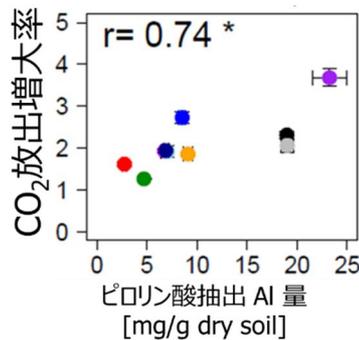


図 4. 水分一定条件に対する乾湿サイクル条件の CO₂ 放出増大率と土壌のピロリン酸抽出アルミニウム (Al) 量との関係。図中の相関係数 (r) に付記されたアスタリスク (*) は、 $p < 0.05$ で有意であったことを示す。

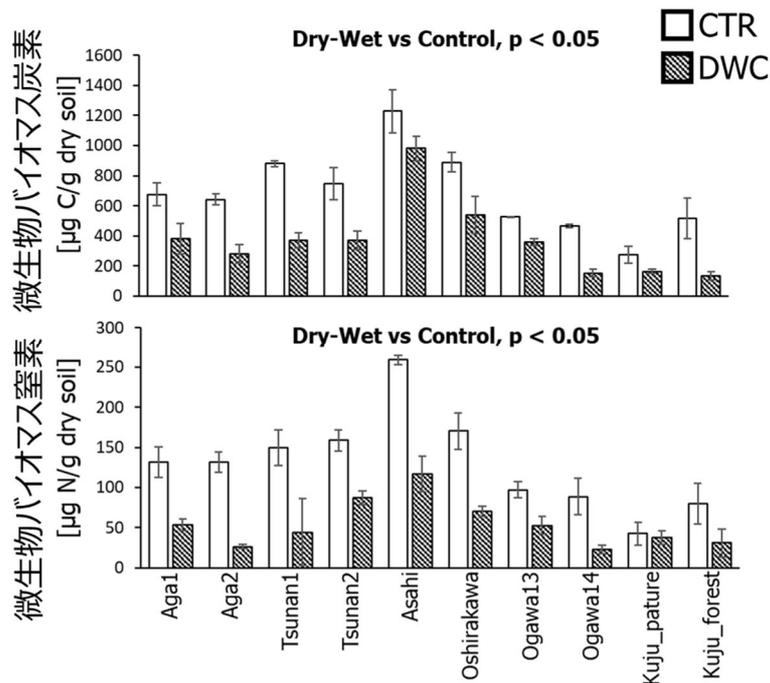


図 5. 水分一定条件 (CTR) と乾湿サイクル条件 (DWC) における微生物バイオマス炭素および窒素。二つの処理の間には、 $p < 0.05$ で統計的に有意な差があった。

これまでに得られた成果の一部については、査読付き論文 1 報が国際専門誌 (Frontiers in Forests and Global Change 誌) に掲載され、別の論文 1 報も国際専門誌で査読中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 1件）

1. 著者名 Nagano Hirohiko, Atarashi-Andoh Mariko, Tanaka Sota, Yomogida Takumi, Kozai Naofumi, Koarashi Jun	4. 巻 6
2. 論文標題 Stable C and N isotope abundances in water-extractable organic matter from air-dried soils as potential indices of microbially utilized organic matter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Forests and Global Change	6. 最初と最後の頁 1228053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/ffgc.2023.1228053	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15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hirohiko Nagano, Mariko Atarashi-Andoh, Sota Tanaka, Syuntaro Hiradate, Kazumichi Fujii, Jun Koarashi
2. 発表標題 Rewetting dried soils for elucidating SOM dynamics in andic soils of a Japanese temperate forest
3. 学会等名 8th International Symposium on Soil Organic Matter: SOM 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirohiko Nagano, Mariko Atarashi-Andoh, Sota Tanaka, Jun Koarashi
2. 発表標題 Stable carbon and nitrogen isotopes in water-extractable organic matter from air-dried soils to elucidate microbial utilization of substrate organic matter in a Japanese temperate forest
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永野 博彦、田中 草太、安藤 麻里子、小嵐 淳
2. 発表標題 風乾土壌から水抽出した有機物の安定同位体分析による土壌有機物分解動態の推定
3. 学会等名 日本土壌肥料学会 2022年度東京大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 優里、永野 博彦、神田 裕貴、平舘 俊太郎、安藤 麻里子、小嵐 淳
2. 発表標題 水分変動増大が土壌の二酸化炭素放出に及ぼす影響：国内6カ所10土壌の培養実験による検証
3. 学会等名 日本農業気象学会 関東甲信越支部2022年度例会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永野 博彦、鈴木 優里、神田 裕貴、平舘 俊太郎、安藤 麻里子、小嵐 淳
2. 発表標題 水分変動増大がもたらす表層土壌の二酸化炭素放出増大：高温環境における鈍化
3. 学会等名 日本農業気象学会 2023年全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 優里、永野 博彦、神田 裕貴、平舘 俊太郎、安藤 麻里子、小嵐 淳
2. 発表標題 水分変動増大がもたらす表層土壌の二酸化炭素放出増大：規定因子の探索
3. 学会等名 日本農業気象学会 2023年全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永野 博彦、鈴木 優里、平舘 俊太郎、安藤 麻里子、小嵐 淳
2. 発表標題 土壌炭素動態推定手法としての風乾土壌の水抽出有機物
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirohiko Nagano
2. 発表標題 Dry soil rewetting for elucidating soil organic matter decomposition and carbon dynamics
3. 学会等名 KAAB International Symposium 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirohiko Nagano, Masataka Nakayama, Genki Katata, Keitaro Fukushima, Takashi Yamaguchi, Makoto Watanabe, Mariko Atarashi-Andoh, Ryunosuke Tateno, Syuntaro Hiradate, Jun Koarashi
2. 発表標題 Moderately elevated nitrogen deposition altering soil carbon dynamics
3. 学会等名 Acid Rain 2020 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永野 博彦; 鈴木 優里; 平箱 俊太郎; 安藤 麻里子; 小嵐 淳
2. 発表標題 水分変動増大がもたらす表層土壌の二酸化炭素放出増大: 火山灰土壌と非火山灰土壌
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirohiko Nagano, Yuri Suzuki, Syuntaro Hiradate, Mariko Atarashi-Andoh, Jun Koarashi
2. 発表標題 Exploring Predictors for Increase in Soil CO ₂ Release by Dry-Wet Cycles
3. 学会等名 AGU Annual Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuri Suzuki, Hirohiko Nagano, Syuntaro Hiradate, Mariko Atarashi-Andoh, Yukiko Abe, Jun Koarashi, Masataka Nakayama
2. 発表標題 Soil Microbial Fluctuation and CO ₂ Release Increase under Dry-Wet Cycles
3. 学会等名 AGU Annual Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 優里; 永野 博彦; 平舘 俊太郎; 安藤 麻里子; 阿部 有希子; 中山 理智; 小嵐 淳
2. 発表標題 水分変動増大が土壌微生物に及ぼす影響：国内6ヶ所10土壌による検証
3. 学会等名 日本農業気象学会関東甲信越支部2023年度例会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiaodong Chen, Eri Yamakita, Yuki Mori, Anna Gunina, Syuntaro Hiradate
2. 発表標題 Input of nitrogen suppresses soil respiration but promotes dissolved organic carbon release in a non-allophanic Andosol
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiaodong Chen, Eri Yamakita, Yuki Mori, Anna Gunina, Syuntaro Hiradate
2. 発表標題 Optimization of soil dissolved organic carbon (DOC) extraction from a non-allophanic Andosol with long-term fertilization
3. 学会等名 The 10th EAFES International Congress (2023年東アジア生態学連合 (EAFES)). The Best Award (最優秀ポスター発表賞) (国際学会)
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
研究 分担者	小嵐 淳 (Koarashi Jun) (30421697)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研 究主席 (82110)	
研究 分担者	平箱 俊太郎 (Hiradate Syuntaro) (60354099)	九州大学・農学研究院・教授 (17102)	

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