

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：35402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2023

課題番号：17K00064

研究課題名（和文）時空間統計モデルによる世界森林面積減少がもたらす社会経済的影響

研究課題名（英文）The Socioeconomic Impact of Global Forest Area Reductions Using Spatiotemporal Statistical Models

研究代表者

田中 章司郎（Tanaka, Shojiro）

広島経済大学・メディアビジネス学部・教授

研究者番号：00197427

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：計量経済学において使用される空間パネルデータ分析 Spatial Durbin Errorモデルは、説明変数に社会経済指標を事前に予め指定する必要がある。しかし、目的変数に対して、どの説明変数が主要な寄与をしているかを予め指定することは困難である。この時空間モデルに変数選択する手法を開発しソースプログラムを公開した(Variable Selection in Spatial Regression: VSSR)。また行政区画中の人工衛星の数十万画素を集約して平均値などを求めるアルゴリズムを開発した。

巨大空間隣接行列を用いた2段階疑似最尤法にも進展があり、反復計算量を格段に低減させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動に対する森林等の環境要素の重要性がますます高まる中、経済的な需要によって自然が荒らされ、その回復力を超えるまで消耗されている。この状況を打破し、持続可能な未来を築くためには、経済と森林を代表とする環境の双方を定量的・包括的に考慮し、データに基づいた対策が不可欠である。本研究により社会経済活動の諸変数と環境変数を変数選択により主要因を特徴的な地域で特定することができた。持続可能な社会経済構造を実現するためには、単に例えば温暖化ガス排出抑制策を講ずるだけでなく、地域ごとに経済成長と環境変数との相互依存関係を実証的に解析して地域に適した無理のない対策を推し進めることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The Spatial Durbin Error model, used in econometrics, requires the prior specification of socioeconomic indicators as explanatory variables. However, it is difficult to pre-specify which explanatory variables contribute significantly to the dependent variable. To address this, a method for variable selection in spatial regression, called Variable Selection in Spatial Regression (VSSR), was developed and its source code was made publicly available. An algorithm was simultaneously developed to aggregate tens of thousands of pixels from artificial satellites within administrative bodies to calculate averages and other statistics.

There have also been advancements in the two-stage pseudo-maximum likelihood estimation using large spatial adjacency matrices, drastically reducing the computational burden of iterative calculations.

研究分野：経済と環境のデータに基づくモデリング

キーワード：時空間回帰モデル 変数選択 空間Durbin誤差モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動に対する森林の重要性がますます高まる中、経済的な需要によって自然が荒らされ、その回復力を超えるまで消費されている。この状況を打破し、持続可能な未来を築くためには、各種の指標で経済と環境の双方を定量的・包括的に考慮し、データに基づいた政策が不可欠である。これまでの我々の研究では、代表的な自然環境指標である森林面積比率と同じく代表的な社会経済指標である人口密度の関係について、コロンビア大学が作成した世界規模のメッシュ人口密度データ(GPWv3)を、地形データ US Geological Survey の GTOPO30 とともに用いて NOAA 人口衛星データで得られた同一メッシュ区画の森林面積比率とのバックボーンとなる関数型を探索してきた。

20 通りのモデルの組合せを検証した結果、赤池情報量基準 AIC による実データとモデルとの相対適合度評価により、少なくとも日本、中国を含む東アジアの 4 地域に於いて共通の関数型が選ばれた。このことにより、森林と人口の関係は地形の影響を考慮した上で、人口が増加するにつれて森林が減少する逆シグモイド型の非線形関数型が東アジアの 4 つの試験領域で成立することを示していた(Tanaka and Nishii, 2009)。この定量的な関係をベースにコロンビア大が新たに改訂した GPWv4 と新しい森林面積データに、相対地価、住民の収入額などの社会経済データを追加して、アマゾン流域など世界の特徴的な地域において、森林面積減少がもたらす社会経済的な影響を検証することが当初の背景であった。時空間統計モデル、特に「空間」モデルの適用を想定したのは、温暖化ガス濃度(SDG 指標 13.2.2)を変数選択の対象に含める場合、風向などで隣接する解析区画と相互に影響するため、空間隣接関係を想定する必要があったためである。

2. 研究の目的

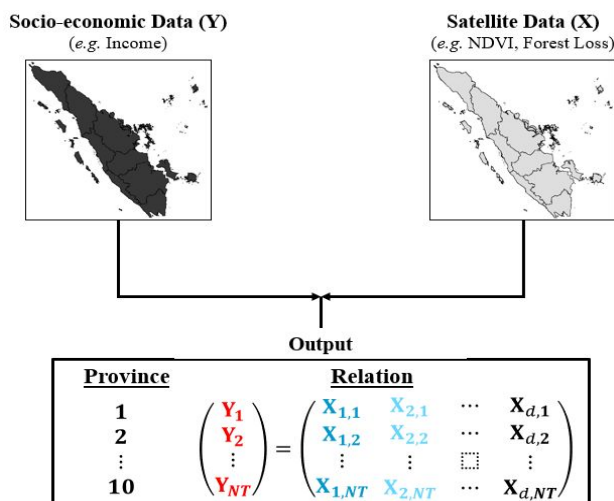
しかし生産形態、気候帯など地域によって相互作用は大きく異なり、多くの場合、予め何らかの地域の構造を明示的に知ることは困難であった。主要因を多くの指標(SDG 指標数は 231)から変数選択により、特徴的な地域ごとに森林減少、植生指標、経済成長などとの関連を総合的に解析する必要性が明らかになった。

多くの指標を導入するには、当初想定した GPW などのグリッドセルベースのデータのみでは実現の可能性が乏しく、逆に古典的な行政区画ごとのデータを使用する必要性に迫られた。一方、人工衛星から得られる自然環境指標はグリッドセルベースなので、行政区画ごとのデータとの整合性を取る必要がある。

このため、(i)行政境界座標ファイルを用いて対象行政区画毎に切り出して空間的なマッチングする技術、及び(ii)複雑な誤差構造を持つ Spatial Durbin Error モデル(固定効果時空間回帰モデル)において変数選択を可能にするアルゴリズム、の二つの開発が**新たな目的の追加**として必要となった。

3. 研究の方法

(1) 行政区画データと人工衛星データとの空間マッチング技術の開発：ESRI 社の行政境界座標シェープファイルを用いて行政区画毎に画素を切り出す。この空間的なマッチング（下図：インドネシアスマトラ島の例）により、行政区画内に人工衛星など画像を数百万単位で集約することができる。測定帯域別センサーの平均値はもとより、中央値、標準偏差などの要約値を求める。Python, R などのプログラム言語ライブラリの crop, aggregate コマンドにより境界ファイル内部の画素データを集約する。近年急速に普及している無料の人工衛星データとプログラム言語を用いれば可能であった。



Polygon-to-Polygon マッチング

(2) 固定効果時空間回帰モデルにおける変数選択：これは次のアルゴリズムで実現した。

空間隣接を考慮して最適な説明変数を得るためには、目的変数の空間情報を追加した次の固定効果時空間回帰モデルを変数選択可能にする。

$$y_t = \alpha \mathbf{1} + \delta \mathbf{W} y_t + \mathbf{X}_t \boldsymbol{\beta} + \mathbf{W} \mathbf{X}_t \boldsymbol{\theta} + v_t, \\ v_t = \lambda \mathbf{W} v_t + \epsilon_t, \quad \epsilon_t \sim \text{i.i.d. } N(0, \sigma^2 \mathbf{I}), \quad t = 1, \dots, T$$

ここで y_t は、時間 t における目的変数の $N \times 1$ ベクトルであり、 N は行政区画の数である。 $\mathbf{X}_t = [x_{1t}, \dots, x_{Kt}]$ は、 K 個の説明変数からなる $N \times K$ 行列である。 \mathbf{W} はサイズ $N \times N$ の行基準化した空間隣接行列 ($\mathbf{W} \mathbf{1} = \mathbf{1}$) で $w_{ij} = 0$ であり地域間の隣接情報を格納している。は共通の切片を表し、 $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]'$ は $N \times 1$ ベクトルである。と はそれぞれ説明変数の回帰係数と空間回帰係数からなる $K \times 1$ ベクトルである。地域間のつながりを検証するために最適な変数を選択するために、式の左から $(\mathbf{I} - \lambda \mathbf{W})$ をかけて次式を作る。

$$\tilde{y}_t = \tilde{\alpha} \mathbf{1} + \delta \tilde{\mathbf{W}} y_t + \tilde{\mathbf{X}}_t \boldsymbol{\beta} + \tilde{\mathbf{W}} \mathbf{X}_t \boldsymbol{\theta} + \epsilon_t$$

上式を用いて、以下の手順で変数選択を行う。

ステップ 1: を区間 $[0, \phi)$ に固定してグリッド探索を行う。ここで ϕ は行列 \mathbf{W} の 1 より小さい最大固有値の逆数である。

ステップ 2: を固定して、最小二乗推定 $\hat{\alpha}(\lambda), \hat{\delta}(\lambda), \hat{\boldsymbol{\beta}}(\lambda), \hat{\boldsymbol{\theta}}(\lambda), \hat{\sigma}^2(\lambda)$ を求める。

ステップ 3: 変数選択のための AIC() を最小化する最良のモデルを次の計算に基づいて求める： $AIC(\lambda) = NT \log(2\pi e) + NT \log \hat{\sigma}^2(\lambda) + 2 \cdot T \log |\mathbf{I} - \lambda \mathbf{W}| + 2 \cdot d$

ここで、 N は解析対象区画の数、 T は観測時期の数、 d は $\tilde{\alpha}, \delta, \sigma^2, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}$ のパラメータの数である。変数の選択には、赤池情報量基準 AIC 値に対して、変数減少法を用いる。

ステップ 4: ステップ 1~3 を繰り返す。

この手法は、統計的理論と計算機アルゴリズムを組み合わせた独自の方法であり、Variable Selection in Spatial Regression: VSSR 法と名付けた。

4. 研究成果

当初目的の研究成果

(1) 空間統計モデルのパラメータ推定プロセスは、最適化の際に局所解になる可能性があり、膨大な繰返し計算が必要であった。この欠点を克服する方法として擬似的近似方法を考案し、

最尤推定法と同じ実データとの相対適合度順位を示すことを実証した。Shojiro Tanaka, Ryuei Nishii, and Gigih Fitrianto, 2019 (<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8899281>); Ryuei Nishii and Shojiro Tanaka, 2020 (<https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323823>)

- (2) 巨大な空間ラティスデータの空間従属性を記述する高速定式化を提案した。Gigih Fitrianto, Shojiro Tanaka, and Ryuei Nishii, 2018 (<https://doi.org/10.5430/rwe.v9n2p1>)

新たに設定した研究の成果

- (1) スマトラ島 9 州 7 年間の地域所得を就学率, 人口に対する 15 歳未満の子供の比率 (児童労働率), パーム油生産量などの変数に各州の約 1km² 四方の標高 (GTOPO30) を集約した標準偏差 (地形の凹凸の度合い) を空間マッチングさせて変数に追加して検証した。その結果, 近隣の州とともに平地の多い州が有意に地域所得が高いこと, 児童労働率は有意な変数として選択されなかったことなど, 多くの知見を得ることができた。地形の変数が強く有意となったことはパーム油プランテーションの適地が平地であることを強く示唆した。この研究で用いたソースプログラムを GitHub サイトで公開した (<https://bit.ly/4br0N5C>)。Gigih Fitrianto (研究協力者) 博士論文, 2021 (<https://bit.ly/44VB4Qj>)

- (2) SDGs 指標を活用した近隣自治体の経済構造変化と地域の回復力を分析した。空間離接情報を用いて, ブロークンタイムトレンドモデルの時系列分析を行った。地域スペクトルのリーマンショックに対する回復力を検出し, ショック前後の各地域の経済成長トレンドを比較した。米国では空間隣接性を考慮しない場合には, 空間クラスターの検出には F 検定の方が優れているが, 空間隣接性を考慮した場合 Wald 検定の方が優れていることが示された。また, 日本ではデータ数の制限から Wald 検定が使えない弱点があることが明らかになった。Gigih Fitrianto, Shojiro Tanaka, and Ryuei Nishii, 2019 (<http://isi2019.org/proceeding/2.STS/STS%20VOL%202/index.html#p=149>)

- (3) “ Michael D. Ward and Kristian Skrede Gleditsch (2019) *Spatial Regression Models* (2nd Ed.) SAGE Inc. ” の翻訳作業を完了し, 共立出版から発行した。これは社会科学における空間データを数理モデルで解析するための効果的なアプローチを与えている点において画期的なモノグラフである。Michael D. Ward, Kristian Skrede Gleditsch (著) 田中章司郎・西井龍映 (共訳) (<https://www.kyoritsu-pub.co.jp/book/b10031712.html>)

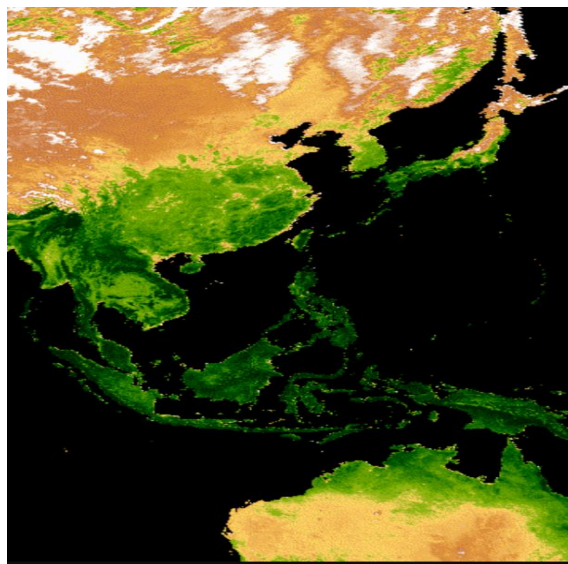
その他の成果

- (1) コンピュータビジョンに基づく植物の生育を分類するためのレビュー論文。マルチスペクトル人工衛星画像解析技術と同一の植物生育モニタカメラによる遺伝子発現の機械学習について有力な文献を精査した。Mochidaa Keiichi, Koda Satoru, Inoue Komaki, Hirayama Takashi, Tanaka Shojiro, Nishii Ryuei, Melgani Farid, 2018

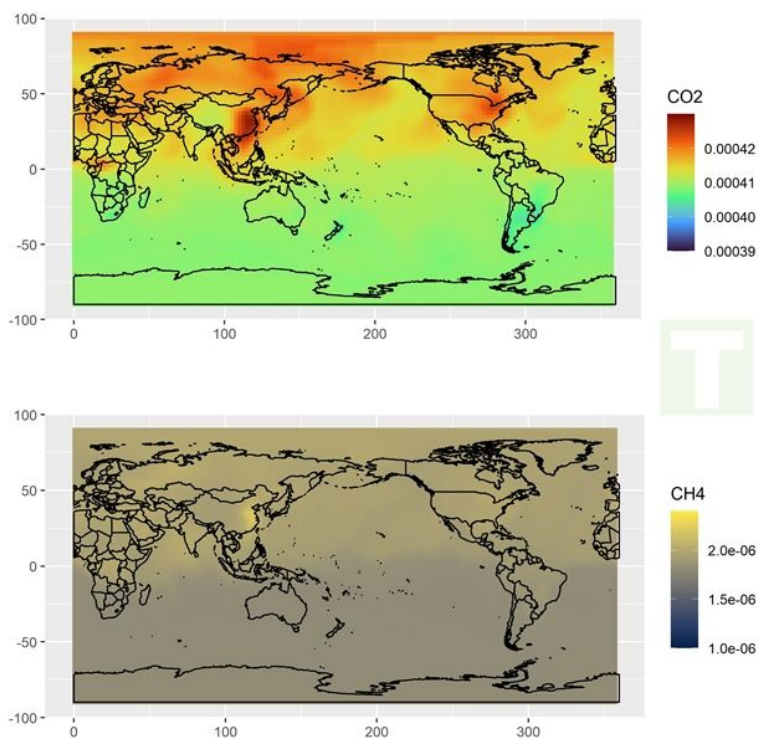


(<https://www.doi.org/10.1093/gigascience/giy153>)

- (2) MODIS 衛星による広域・多時期の東アジアにおける植物活性指標季節変化のヒューリスティック動画表示技術の開発（右図） 田中 (<http://bit.ly/3cWhD3q>)



- (3) いぶき GOSAT 衛星による温暖化ガス (CO₂, CH₄) 同時動画表示。田中
(2020年1月1日 - 9月30日: <https://www.youtube.com/watch?v=tPIHC1afzWo>)



(補足)

コロナ禍により、授業が通常のものからオンラインになり、対面形式に戻り、再びオンラインになるなど、教育の高負荷が数年続き、この研究に影響が無かったとは言い難い。

しかし、行政区画データと人工衛星データとの空間マッチング技術が具体的に導入できたこと、時空間統計モデルの変数選択解析プログラムが完成したこと、画像系の人工衛星データと大幅にフォーマットが異なる大気観測衛星データの解析技術を開発できたこと、グリッドセル形式のデータにおいても非線形反

復母数推定計算量を大幅に軽減できたこと、などこの助成により、格段に統計モデルの深度と精度を向上させることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 RYUEI NISHII AND SHOJIRO TANAKA	4. 巻 IGARSS 2020
2. 論文標題 TWO STAGE ESTIMATION PROCEDURE OF NON-LINEAR REGRESSION FUNCTIONS FOR SPATIALLY-DEPENDENT DATA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PROC. IEEE IGARSS 2020	6. 最初と最後の頁 1520-1523
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IGARSS39084.2020.9323823	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 -
1. 著者名 Tanaka,Shojiro	4. 巻 Volume 2020
2. 論文標題 Socio-economic impact of world forest area reduction by spatio-temporal statistical model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact（研究紹介）	6. 最初と最後の頁 43-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2020.6.43	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 Gigih Fitrianto（研究協力者）	4. 巻 （博士論文）
2. 論文標題 A Data-driven Analysis to Attest Regional Interlinkages between Economics and Environment: Utilization of SDG Indicators for Spatio-temporal Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 URI https://bit.ly/44VB4Qj （博士学位論文、広島経済大学甲第12号）	6. 最初と最後の頁 1-176
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 Tanaka Shojiro, Nishii Ryuei, Fitrianto Gigih	4. 巻 1
2. 論文標題 Two Stage Estimation Procedure for Spatial Regression Models and Model Selection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium	6. 最初と最後の頁 1919-1922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IGARSS.2019.8899281	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 該当する

1. 著者名 Gigih Fitrianto, Shojiro Tanaka, and Ryuei Nishii	4. 巻 STS474
2. 論文標題 Analysis of Regional Economic Growth against Crisis: US-Japan Statistical Comparative Study Before-After Lehman's Shock	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ISI WSC 2019 (http://isi2019.org/proceeding/2.STS/STS%20VOL%202/index.html#p=149)	6. 最初と最後の頁 137-145
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 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 Fitrianto Gigih, Tanaka Shojiro, Nishii Ryuei	4. 巻 7
2. 論文標題 Formulation of Huge Lattice Spatial Adjacency Matrices With Non-rectangular Shape of Socio-economic Grid-Cell Data for the Analysis of Sustainable Economy With High Computational Efficiency	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Research in World Economy	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5430/rwe.v9n2p1	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 Mochida Keiichi, Koda Satoru, Inoue Komaki, Hirayama Takashi, Tanaka Shojiro, Nishii Ryuei, Melgani Farid	4. 巻 8
2. 論文標題 Computer vision-based phenotyping for improvement of plant productivity: a machine learning perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 GigaScience	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gigascience/giy153	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 Gigih Fitrianto and Shojiro Tanaka	4. 巻 40
2. 論文標題 Fundamental Review on the Formulation of Large Lattice Spatial Neighbor Matrices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 広島経済大学研究論集	6. 最初と最後の頁 pp.41-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18996/kenkyu2017400303	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 該当する

1. 著者名 Koda, S., Zeggada, A., Melgani, F. and Nishii, R.	4. 巻 56 (10)
2. 論文標題 Spatial and structured SVM for multilabel image classification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 5948-5960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2016.2539174	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 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Gigih Fitrianto, Ryuei Nishii, and Shojiro Tanaka
2. 発表標題 Attesting Interlinkages between Income Inequality and the Covariates by Variable Selection for Sustainable Regional Development: A Case Study of Palm Oil Industry in Sumatra Island, Indonesia
3. 学会等名 Hiroshima International Conference on Peace and Sustainability 2022, March 1-4, 2022, Hiroshima (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gigih Fitrianto and Shojiro Tanaka
2. 発表標題 Preliminary exploration on the usage of analysis-ready spatio-temporal satellite data in NASA Open Data Cube project
3. 学会等名 統計数理研究所共同研究会「環境・生態データと統計解析」(30-共研-5003)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Nishii, R. Kikuyama and P. Qin
2. 発表標題 Feature Selection of Support Vector Regression
3. 学会等名 The 2017 SIAM Workshop on Dimensionality Reduction (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中章司郎・西井龍映 訳 (原著者 Michael D. Ward and Kristian Skrede Gleditsch)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 168
3. 書名 空間回帰モデル (Spatial Regression Models (2nd Ed))	

〔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	西井 龍映 (Nishii Ryuei) (40127684)	長崎大学・情報データ科学部・教授 (17301)	

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			
インドネシア	Universitas Gadjah Mada			
米国	CIESIN, Columbia University			
イタリア	University of Trento			