

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03736

研究課題名(和文)京大岡山3.8m望遠鏡と専用分光器を用いた中質量星周りの短周期惑星の探索

研究課題名(英文) Searching for short-period planets around intermediate-mass stars using Kyoto-Okayama 3.8m telescope and a new dedicated spectrograph

研究代表者

佐藤 文衛 (Sato, Bunei)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：40397823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来の中質量星(中質量巨星)を対象とした惑星探索の根本的な問題点である、「中心星質量の不確定性」と「サンプル数の少なさ」を解消した新しい惑星探索の実施を試みた。まず、測光データを用いた機械学習的手法により、金属量を用いて中質量巨星を効率的に選別する方法を開発した。次に、京大岡山3.8m望遠鏡用に新たに系外惑星探索専用的高效率高分散分光器を設置した。さらに、岡山188cm望遠鏡を用いた観測から、これまでにほとんど見つかっていない中質量巨星周りの短周期巨大惑星候補を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでほとんど発見されていなかった、2太陽質量以上の中質量巨星を周回する短周期惑星候補を発見し、観測的・理論的研究に新たな方向性を与えた。また、京大岡山3.8m望遠鏡に初めて可視高分散分光器を設置し、視線速度精密測定による系外惑星探索やその他の多様な可視高分散分光観測を実施する環境を創出した。

研究成果の概要(英文)：This research tried to conduct a new exoplanet search targeting intermediate-mass giants avoiding uncertainties in mass estimation for central stars and small number of sample stars inherent in evolved intermediate-mass stars. First we developed a machine-learning-based method to estimate metallicity of giant stars using multi-band photometric data, which can be used to efficiently identify intermediate-mass giants. Next we developed and installed a new high-dispersion spectrograph to Kyoto-Okayama 3.8m telescope for a dedicated exoplanet search. Lastly, we discovered a new short-period giant-planet candidate orbiting around an intermediate-mass giant using Okayama 188cm telescope, which have been rarely discovered from previous surveys.

研究分野：系外惑星天文学

キーワード：太陽系外惑星 高分散分光 視線速度

## 1. 研究開始当初の背景

1995年の初発見以来、3000個を超える系外惑星が発見されてきた。ホット・ジュピター（短周期巨大惑星）やスーパー・アース（巨大岩石惑星）など、太陽系には存在しないタイプの惑星を含む多様な系外惑星が発見され、その質量は地球質量程度から木星質量の10倍以上まで、軌道は公転周期数時間から10年以上にまで及んでいる。このような系外惑星の多様性の起源と進化過程を統一的に明らかにし、汎惑星形成理論を構築することが系外惑星研究の大目標の一つである。

系外惑星の質量や軌道の多様性を生み出す主な要因は、惑星形成の母胎となる原始惑星系円盤の質量とその散逸のタイムスケール、惑星形成の効率、そして円盤との相互作用による惑星移動のタイムスケールであると考えられる。これらは理論のみからは知ることができず、実際に観測される系外惑星の分布と理論的に予測される分布とを比較することによって初めて明らかになる。このような試みは、数多く見つかっている太陽型星周りの系外惑星を対象とした研究によってこれまで一定の成功を収めてきた（e.g. Ida & Lin et al. 2004, ApJ, 604, 388）。

汎惑星形成論へ向けた次のステップは、中心星質量の異なる惑星系へこの試みを拡張することである。特に、中質量星（ $>2$  太陽質量）周りの短周期惑星（ $<0.5$  天文単位以内）が鍵を握っている。実は、同恒星の周りでは短周期惑星が存在しないことが観測的に知られており、中質量星周りの惑星系の代表的特徴と言われている。理論的には、基本的には太陽型星からの理論モデルの外挿で説明可能であると考えられており、中質量星では原始惑星系円盤の散逸が早い（e.g. Andrews et al. 2013, ApJ, 771, 129; Ribas et al. 2015, A&A, 576, A52）遠方で形成された惑星が内側に移動する時間がないことが短周期惑星欠乏の原因であると考えられている（e.g. Currie 2009, 694, L171）。

ところが近年、従来の観測的、理論的理解に変更を迫る大きな発見があった。まず観測では、KELT-9と呼ばれるA型主系列星（2.5太陽質量）の周りでホット・ジュピターが発見された（Gaudi et al. 2017, Nature, 546, 514）。このような惑星は太陽型星の周りでは多数発見されているが、中質量星の周りではほとんど存在しないと考えられており、実際これまでに一つも発見されていなかった。さらに理論では、太陽型星で得られた最新の知見を取り込んだ惑星形成・進化理論に基づいて本研究グループが行ったシミュレーションによると、中質量星の周りでも太陽型星同様にホット・ジュピターに限らず短周期惑星が数多く存在するはずであるという、これまでとは全く逆の結果が得られた。つまり、最新の観測的発見と理論的知見に基づくと、中質量星を対象とした従来の系外惑星研究は観測的にも理論的にも甚だ不十分であった可能性があり、我々のこれまでの理解が180度変わる可能性が出てきた。逆に、中質量星周りの短周期惑星欠乏が本当だとすると、太陽型星周りの惑星分布をうまく説明できるとされていた理論が実は不十分なものであるか、あるいは太陽型星と中質量星では惑星形成過程が全く異なるという可能性も生じてくる。

2 太陽質量を超える中質量星を対象とした惑星探索は、“進化した”中質量星であるG型巨星をターゲットとするのが一般的である（e.g. Sato et al. 2003, ApJ, 597, L157）。進化していない中質量星、すなわちBA型主系列星は、高温のためスペクトルに吸収線が少なく、かつ高速自転によって線幅が広がっているため、惑星検出の強力な手法である視線速度法を適用することができない（惑星検出に必要な視線速度測定精度が達成できない）。そのため、これらが進化して表面温度と自転速度が低下した巨星（約10太陽半径）に対して視線速度法を適用することが、中質量星の周りで幅広い質量・軌道範囲の惑星を検出するための目下唯一の方法である。

ところが、この巨星をターゲットとした中質量星周りの惑星探索には原理的に大きな問題がある。一つは、巨星の質量推定の不確定性が大きいこと、もう一つは、中質量巨星の数がそもそも少ないことである。そのため、探索対象を観測しやすい明るい恒星に限ると、惑星探索に適したサンプルを統計的に十分な数だけ確保することができない。また、巨星には中質量星だけでなく、その何倍もの数の軽い（1.5太陽質量以下）恒星が含まれている。様々な質量の恒星が進化の途中で似た巨星の段階を経るため、通常の方法で表面温度と光度だけから質量を推定すると50%以上の誤差が生じることになり、惑星分布の理論的解釈に大きな不定性を生む要因となる。

以上の問題によって、従来の惑星探索では信頼できる中質量星のサンプル数が実は極めて少なく、惑星分布を高い信頼度で議論できる状況には無いのである。

## 2. 研究の目的

本研究では、果たして中質量星の周りでは本当に短周期惑星が欠乏しているのか、欠乏していないとすればどのように分布しているのか、そしてそれらはどのようにして形成されたのかを明らかにすべく、以下の2つのアイディアに基づき、従来の中質量星を対象とした系外惑星探索の不十分な点、問題点を克服した新しい惑星探索を実施する。これにより、中質量星周りの惑星の信頼できるサンプル数を一気に現在の8倍に増やし、格段に高い信頼度で同恒星周りの惑星分布を明らかにする。

(1) 高金属量巨星をターゲットとすることによって、質量推定の信頼度を向上させる

中質量星は寿命が短いので進化した巨星と言えども太陽より若く(約 10 億歳以下) 通常の銀河化学進化に沿っていけば金属量(重元素量)は少なくとも太陽と同程度かそれ以上である。つまり、高金属量巨星は中質量星である可能性が高い。また、HR 図における巨星の進化経路からも、特に高金属量 ( $[Fe/H] > +0.1$ ) の巨星を選ぶことで低質量 ( $< 1.5$  太陽質量) 星を排除できることが分かる(低金属量の低質量星は金属量で、高金属量の低質量星は進化経路が離れていることで排除できる)。本研究では、約 2500 個の G 型巨星に対して多色測光・低分散分光による金属量スクリーニング観測を行い、高金属量巨星、すなわち真の中質量星を選び出す。全体の約 1 割(約 250 個)が 2 太陽質量以上であると期待され、これを惑星探索のサンプルとする。

(2) 大口径望遠鏡と高効率分光器を用いた惑星探索によってサンプル数を増大させる

従来世界で巨星周りの惑星探索に主に使用されてきた望遠鏡は口径 2m 以下であり、高い視線速度測定精度(数 m/s 以下)をもって惑星探索がなされてきたのは 6.5 等級より明るい恒星が中心である。この明るさでは、確実に 2 太陽質量以上の中質量星で惑星探索に適していると言えるものはせいぜい 30 個程度であり、統計的議論には甚だ不十分である。本研究では、集光力が 4 倍の京大岡山 3.8m 望遠鏡(せいめい望遠鏡)に新たに高効率の高分散分光器を設置し、探索限界等級を 8 等級にまで下げ、中質量星の惑星探索規模を従来の約 8 倍の 250 個に拡大する。これにより、真の中質量星の重点的な惑星探索を初めて実現する。

### 3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、本研究では、(1)中小口径望遠鏡を用いた事前のサンプル選定、(2)京大岡山 3.8m 望遠鏡への系外惑星探索専用高分散分光器の設置、(3)京大岡山 3.8m 望遠鏡を用いた系外惑星探索、という 3 本の柱を立てて研究を遂行する。2018 年度はサンプル選定観測と分光器の改造・設置準備に充て、2019 年度は引き続きサンプル選定観測を行いながら、3.8m 望遠鏡に分光器を設置し試験観測を行う。系外惑星検出に必要な分光器の所期性能を確認したのち、2020 年度から 2021 年度の 2 年間で本格的な系外惑星探索を実施し、研究目的を達成する。

(1) 中小口径望遠鏡を用いた事前のサンプル選定(2018-2019 年度)

8 等級より明るい約 2500 個の G 型巨星の中から、事前観測によって 2 太陽質量以上である可能性が高い高金属量巨星を選び出す。観測には主として岡山観測所 188cm 望遠鏡、ぐんま天文台 150cm 望遠鏡、西はりま天文台 2m 望遠鏡、京大岡山 3.8m 鏡の多色測光カメラや低分散分光器を使用し、荒い精度 ( $[Fe/H] < 0.2$  dex) で太陽より金属量が高い天体を選別する。その後、岡山 188cm 鏡の高分散分光器を使用して 0.1 dex 以下の精度で金属量を決定し、高金属量天体から順に 250 個を惑星探索用サンプルとする。

(2) 京大岡山 3.8m 望遠鏡への系外惑星探索専用高分散分光器の設置(2018-2019 年度)

現在ぐんま 150cm 鏡に設置・運用されている高分散分光器 GAOES を改造し、京大岡山 3.8m 鏡に移設する。GAOES は、岡山 188cm 鏡で現在惑星探索に使用されている HIDES と同時取得可能波長範囲を除いてほぼ同じスペックであり、分光器全体がコンパクトなので、比較的軽微な改造を施すだけで 3.8m 鏡に設置して数 m/s 以下の視線速度測定精度を達成することができる。加えて、今回の改造では分光器の高効率化と高安定化を図り、3.8m という大口径のメリットを最大限に生かす。主な改造点は以下の通りである。

- ・分光器への入射光安定化・高効率化のため光ファイバー伝送系を導入し、かつ光ファイバーの射出部にイメージライザーを取りつける。これにより、岡山の典型的なシーイングサイズ 1.5 秒角に対して 2 秒角程度の視野を確保し、入射光のロスを抑える。

- ・視線速度精密測定用の波長基準であるヨードセルを導入し、最高 1m/s の精度を実現する。

- ・クロスディスペルザーを更新し、視線速度測定用の波長域(500-600nm)に効率を最適化する。

- ・分光器全体を断熱室に入れ高精度空調を行い、安定した視線速度測定環境を実現する。

(3) 京大岡山 3.8m 望遠鏡を用いた系外惑星探索(2020-2021 年度)

(1)によって選定した 250 個の中質量高金属量巨星に対して、(2)で設置した高分散分光器を用いて 2 年間に渡る重点的な惑星探索を実施する。これにより、同恒星の周りの巨大惑星の存在頻度、軌道半径約 1 天文単位以内の惑星分布をこれまでにない確度で明らかにする。さらに、この結果を最新の惑星種族合成シミュレーションと比較し、中質量星周りの惑星形成・進化モデルを構築する。

### 4. 研究成果

前項で述べた 3 つの研究の柱について、成果を以下に述べる。

(1) 8 等級より明るい約 2500 個の G 型巨星の中から事前観測によって 2 太陽質量以上である可能性が高い高金属量巨星を選び出すことを目的とした。そのために当初は低分散分光観測による金属量測定を計画していたが、既存のデータを用いた予備的な解析の結果、低分散分光観測では期待していたほどの測定精度が得られないことが分かった。そこで、方針を再検討し、宇宙望遠鏡等で得られている大量の多色測光データに基づく機械学習的な手法によって金属量を推定する方法を検討した。具体的には、高分散分光観測から信頼できる金属量が推定されている約 3600 個の巨星について、それらの金属量を目的変数とし、各種色指数、天体の座標、固有運動、距離の情報を説明変数とする回帰モデルを作成した。その結果、 $[Fe/H]$  について最良で 0.12 dex の精度を達成できることが分かり、大量の天体から高金属量候補星を選び出すという第一段階のスクリーニングの目的には十分に利用できることが分かった(図 1; Fujita 2020, Master

thesis, Tokyo Tech)。この手法を用いて惑星探索を行う天体を選定した。

一方、今回作成した回帰モデルでは低金属量では金属量が過大評価され、高金属量星では逆に過小評価される傾向があることが分かった。これらは主にそのような金属量の天体のサンプル数の不足が原因と考えられるため、岡山 188cm 望遠鏡やすばる望遠鏡を用いてさらに多くの天体について高分散スペクトルを取得し、より広い金属量範囲に適用できる回帰モデルの作成へと研究が展開している。

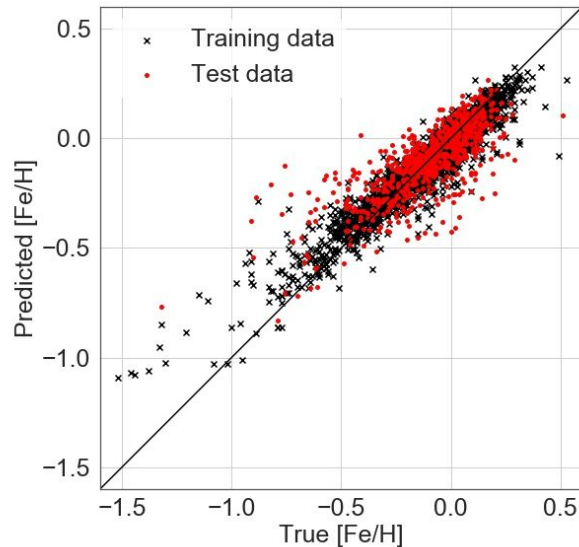


図 1：機械学習による回帰モデル。横軸は高分散スペクトルから測定された金属量、縦軸は回帰モデルにより色指数等から推定された金属量を表す。黒点はトレーニングデータ、赤点はテストデータ。

(2)コロナ禍における様々な困難に見舞われながらも、当初の計画通り GAOES 分光器に視線速度精密測定機能 (GAOES-RV) を追加し、ぐんま 150cm 望遠鏡からせいめい望遠鏡への移設を実現した。

系外惑星探索専用高分散分光器 GAOES-RV は、せいめい望遠鏡ドームの 2 階に本研究によって製作・設置された精密空調付き分光器室内に置かれ、恒星光はナスミス焦点から光ファイバーで伝送される(図 2 左)。恒星光はガイド系を含むナスミスユニットで口径比 3 に変換されたのち、約 2.4 秒角に相当するコア径 130 $\mu\text{m}$  の光ファイバーに入射される。これは岡山の典型的なシーイング (約 1.5 秒角) に比べて十分広い。また、スクランプリング性能を上げるため八角形コアの光ファイバーを用いる。出射光は口径比 30 に変換され、イメージスライサーで 5 分割されたのち、分光器の口径比 12.2 に変換される。これにより、高効率と高波長分解能 (約 55000) を同時に達成できる。イメージスライサーの導入による空間方向のオーダーの重なりを避けるため新たに購入した分散度の高い垂直分散格子を使用するが、視線速度精密測定用ヨウ素ガスセルの観測波長域 500-580nm を一枚の CCD でカバーできる。また、露出中の天体追尾のための独自に開発したガイド系を有する。分光器室内の温度安定性は良好であり、外気温が 10 度程度変化しても分光器内の気温は 0.1 度以内で一定に保たれる。

2020 年後半からの試験観測では、分光器としてはほぼ期待通りの質のスペクトルが得られることが分かったが(図 2 右)、望遠鏡からナスミスユニットまでの間で光軸上にケラレがあることが判明したため、現在改修中である。また、期間内に視線速度測定精度を実測することはできなかったが、スペクトル単体の質は期待通りであり、ヨードセルも過去に使用実績のあるものを使うことから、期待通りの精度が達成できるものと考えている。今後長期間の安定性を継続して評価していく。

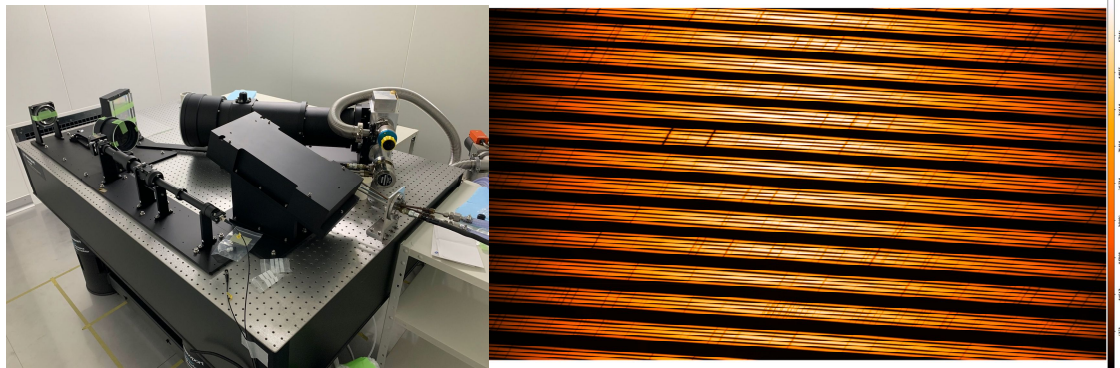


図 2：左：分光器室内に設置された GAOES-RV 本体。右：GAOES-RV で取得した太陽型星（こいめ星）のスペクトル。

(3) コロナ禍で分光器の一部製作や移設が遅れたこともあり、研究期間内にせいめい望遠鏡を用いた系外惑星探索を実施することはできなかった。しかし、ある程度の遅れを予想して、2020 年から 188cm 望遠鏡と高分散分光器 HIDES-F を用いて約 100 個の高金属量巨星候補天体について系外惑星探索観測を先行実施した。本来せいめい望遠鏡での観測を想定していたため 188cm 望遠鏡では光量が足りずデータ点および測定精度は十分ではないが、この中から公転周期約 50 日の惑星候補を一つ発見した（図 3）。主星の金属量は  $[Fe/H]=0.2$ 、質量は 2.1 太陽質量と推定され、本研究における観測対象と考えていた高金属量の中質量巨星である。周囲を公転していると考えられる惑星の質量は約 0.9 木星質量、軌道長半径は約 0.3 天文単位である。進化した恒星を周回する公転周期 100 日以内の惑星は視線速度法ではほとんど発見されておらず、今回の発見は中質量巨星 ( $>2$  太陽質量) 周りでそのような惑星が存在することを示唆する重要な結果である。目下惑星候補は一天体のみであるため惑星形成モデルに強い制約を与えることはできないが、今後せいめい望遠鏡でより多くの天体について高精度で観測を行っていく予定である。

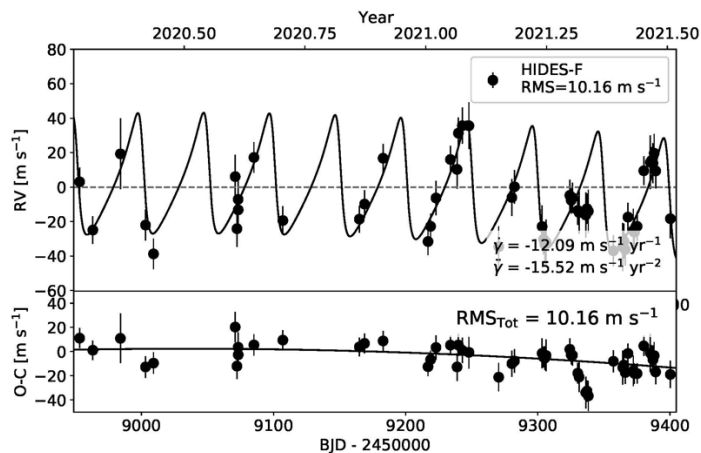


図 3：せいめい望遠鏡と GAOES-RV での観測に先行して実施した、188cm 望遠鏡と HIDES-F による観測で発見した短周期惑星候補を有する高金属量巨星の視線速度変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤文衛（東工大），橋本修（ぐんま天文台），大宮正士（ABC），泉浦秀行，田實晃人，神戸栄治，原 川紘季（国立天文台），松林和也（京都大），本田敏志（兵庫県立大），竇田拓也，堀安範（ABC），成田憲保（東大），國友正信（久留米大） |
| 2. 発表標題<br>せいめい望遠鏡に搭載する系外惑星探索専用高分散分光器 GA0ES-RV   |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2022年春季年会   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                          | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                    | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究協力者 | 國友 正信<br><br>(Kunitomo Masanobu)                   |  |    |
| 連携研究者 | 神戸 栄治<br><br>(Kambe Eiji)<br><br>(80435510)        | 国立天文台・ハワイ観測所・特任准教授<br><br><br>(62616)    |    |
| 連携研究者 | 橋本 修<br><br>(Hashimoto Osamu)<br><br>(20221492)    | 群馬県立ぐんま天文台・その他部局等・研究員<br><br><br>(82301) |    |
| 連携研究者 | 泉浦 秀行<br><br>(Izumiura Hideyuki)<br><br>(00211730) | 国立天文台・ハワイ観測所・准教授<br><br><br>(62616)      |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)  | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 連携研究者 | 大宮 正士<br>(Omiya Masashi)<br>(20624696)       | 大学共同利用機関法人自然科学研究機構（新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・特任研究員<br>(82675) |    |
| 連携研究者 | 原川 紘季<br>(Harakawa Hiroki)<br>(30771927)     | 国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員<br>(62616)   |    |
| 連携研究者 | 成田 憲保<br>(Narita Norio)<br>(60610532)        | 東京大学・大学院総合文化研究科・教授<br>(12601)  |    |
| 連携研究者 | 松林 和也<br>(Matsubayashi Kazuya)<br>(60622454) | 京都大学・理学研究科・特定助教<br>(14301)   |    |
| 連携研究者 | 本田 敏志<br>(Honda Satoshi)<br>(20425408)       | 兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・准教授<br>(24506)   |    |
| 連携研究者 | 堀 安範<br>(Hori Yasunori)<br>(40724084)        | 大学共同利用機関法人自然科学研究機構（新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・特任助教<br>(82675)  |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |