

令和 5 年 4 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20538

研究課題名（和文）砂の液状化特性モデル化の抜本的革新を目指した極低拘束下での粒状体せん断挙動の計測

研究課題名（英文）Measurement of shear properties of granular media under extremely low confining stress states aiming at drastic innovation of modelling of liquefaction characteristics of sands

研究代表者

古関 潤一（Koseki, Junichi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30272511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：砂地盤が完全に液状化した際の挙動を解明し、その評価手法を抜本的に革新するために、水とほぼ同じ密度を有する高分子材料の丸棒を積層させた供試体の等体積繰返し二軸試験を高精度に行う装置を新規開発して系統的な試験を実施した。その結果、水浸条件下で自重の影響をほぼ受けない場合のほうが、乾燥条件下よりも小さな値まで拘束圧が低下し、その後の変形挙動も異なることを明らかにした。また、丸棒積層体内での相互力学作用を微視的にモデル化できる個別要素法を用いた数値解析を実施し、前述した試験結果を巨視的に再現できることを示すとともに、極低拘束圧下での各丸棒間の微視的接触状況が自重の有無によって異な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

地震時の砂地盤の液状化は各種の社会基盤施設や建築物に被害をもたらすが、液状化地盤の極低拘束圧下でのせん断変形挙動の高精度計測は容易ではない。本研究では、極低拘束圧下での巨視的な挙動を高精度に計測できる室内試験方法を開発し、さらに、このような挙動とその根源となっている微視的な相互力学作用を個別要素法で評価できることを明らかにした点で学術的な意義を有する。また、砂の間隙を水で飽和させる通常の液状化試験では供試体全体を極低拘束圧状態にできないために砂地盤が完全に液状化した際のせん断変形量を過小評価する恐れがあり、その程度について詳細検討が必要であることを示した点で、本研究の成果は社会的意義も有する。

研究成果の概要（英文）：In order to unveil the behavior of completely liquefied sandy ground and to drastically innovate its evaluation procedures, a series of cyclic bi-axial tests under a constant-volume condition were conducted on specimens consisting of an assembly of polymer rods that have almost the same density as water by using a newly introduced apparatus with high precision. The water-submerged specimens that were little affected by their self-weight underwent more extensive reduction of the confining stress than the dry specimens. Subsequently, the two types of specimens exhibited different deformation behaviors. Such experimental observations could be simulated macroscopically by numerical analyses using the discrete element method that can model the mechanical interactions in-between the rod assembly. By these numerical analyses, the microscopic contact conditions among each of the rods under extremely low confining stress states were found to vary depending on the degrees of self-weight effects.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 粒状体 微視的挙動 巨視的挙動 地盤工学

### 1. 研究開始当初の背景

地震時に砂地盤が液状化すると、各種の社会基盤施設や建築物に被害を引き起こす。このような液状化地盤の大変形は、有効応力がほぼゼロになった状態で進行しやすいことが知られているが、このせん断挙動の高精度計測は技術的な困難を伴う。

砂の液状化強度や液状化前後の挙動を計測するのに用いられる室内土質試験は「要素試験」とも呼ばれ、供試体の内部応力や局所変形状況は均一であることが前提とされている。しかし、液状化が進行して有効応力がほぼゼロになると、供試体の自重の影響が無視できなくなり、厳密には「有効応力がゼロになる完全液状化状態」は供試体の上端部でしか生じ得ない。

研究代表者らは2018年からアルミ丸棒積層体の二軸試験に取り組み、等体積繰返し载荷により砂の液状化挙動と類似した状態をほぼ再現できることを見出した。そこで、前述した供試体自重の影響を著しく低減するために、水とほぼ同じ密度を有する高分子を材料とする丸棒の積層体を水浸させた状態で二軸・単純せん断試験を実施する本研究を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、砂地盤が地震時に完全に液状化した際の挙動を高精度に解明し、その評価手法を抜本的に革新することを最終的な目標としつつ、上述した水浸条件下で試験を行う手法を確立したうえで極低拘束圧下における粒状体の微視的・巨視的なせん断挙動を高精度に計測し、これらの挙動を適切にモデル化することを目的とした検討を実施した。

### 3. 研究の方法

前述した目的を達成するために実施した研究の全体フローを図1に示す。本研究では図中に a. ~ e. として示した検討作業を行ったが、これらの研究内容は以下の3項目より構成される。

- (1) 極低拘束圧試験用の二軸・単純せん断試験装置の新規製作と、現有装置を用いた高分子丸棒積層体の気中条件下での等体積繰返し二軸試験の実施 (図1中の a および b)。
- (2) 新規製作した装置を用いた高分子丸棒積層体の水浸条件下での等体積繰返し二軸試験の実施と、気中条件下で実施した試験結果との比較 (図1中の c)。
- (3) 極低拘束圧下における粒状体材料のせん断挙動を微視的にモデル化できる個別要素法を用いた数値解析の実施と、二軸試験で得られた巨視的なせん断挙動の再現性の検討 (図1中の d および e)。

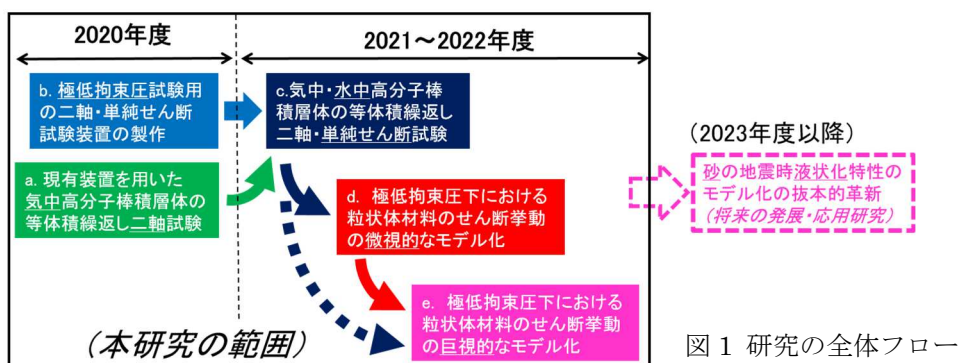


図1 研究の全体フロー

### 4. 研究成果

前章で記述した各研究項目の主要な成果を以下に示す。

- (1) 水とほぼ同じ密度を有する高分子材料の丸棒を積層させた供試体の等体積繰返し二軸試験を高精度に行うことができる装置を新規に製作した。装置側面の状況を図2に示すが、幅200mm、高さ200mm、奥行き50cmの丸棒積層供試体に対し、鉛直と水平の2方向からそれぞれ応力制御または変位制御で二軸载荷できる。応力制御は空気圧シリンダを用いて载荷容量3.7kN、最大変位70mm

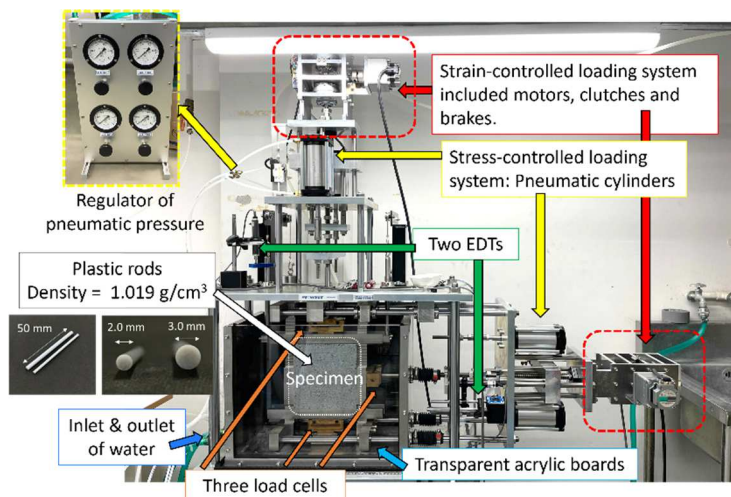


図2 新規製作した試験装置

となっている。変位制御にはモーターを用いるが、载荷方向反転時に全く遊びのない構造となっているために微小変位振幅での繰返し载荷が可能で、载荷容量 8kN、载荷速度 1.4~66.7mm/min、ストローク 200mm となっている。この装置を用いた試験結果例を次項で報告する。なお、図 2 に示した状態は気中条件下での二軸試験時の装置構成であるが、供試体を水浸させた条件下での二軸試験に加えて、供試体の側面拘束版や水平载荷位置の変更や二方向荷重計の追加等により単純せん断試験も行える仕様となっている。

(2) 水浸供試体 (青色) と気中供試体 (赤色) の等体積繰返し二軸試験結果の比較例を図 3 に示す。これらの供試体の繰返し载荷前の間隙比はそれぞれ 0.217 と 0.215 でほぼ一致している。図 3a) は応力ひずみ関係であるが、いずれの試験においても、応力ひずみ関係が部分的にほぼ水平になり、「液化化してせん断抵抗が発揮されない」状態に至っている。図 3b) は応力経路であり、繰返し载荷の進行とともにいずれの試験においても平均応力が低下して、最終的にはほぼゼロ近くの値となっている。しかしながら、図 3c) に示す原点付近の拡大図からは、水浸供試体のほうが気中供試体よりも小さな値まで平均応力の低下が生じていることがわかる。また、繰返し载荷回数と両振幅鉛直ひずみの関係を図 3d) に示すが、同じ繰返し载荷回数では水浸供試体のほうが気中供試体よりも大きな両振幅鉛直ひずみが生じており、図中に矢印で示したように、液化化後の鉛直ひずみの増分も水浸供試体のほうが大きいことがわかる。これらの試験結果を数値解析で再現し、微視的な検討も行った例を次項で報告する。

(3) 丸棒積層体内での相互力学作用を微視的にモデル化できる個別要素法を用いた数値解析を行い、前述した試験結果を巨視的に再現した結果の例を図 4~6 に示す。各図の a) が応力ひずみ関係、b) が応力経路である。図 4 に示す結果は気中供試体を想定して自重の影響を考慮した場合、図 5 は水浸供試体を想定し自重が浮力でほぼ相殺された状況を考慮した場合で、図 6 は自重と浮力が釣り合う完全な無重力状態での解析結果である。図 4b) では液化化後も平均応力が完全にゼロとなることがなく、気中供試体の試験データ (図 3b, c) 中の赤色) と対応する解析結果が得られた。一方で、無重力状態での図 6b) では液化化後の平均応力が一時的にゼロとなり、さらに図 5b) の解析結果でも平均応力がほぼゼロとなり水浸供試体の試験データ (図 3b, c) 中の青色) と対応することがわかった。図 7 は解析ステップの進行とともに各丸棒間の微視的接触状況が変化する様子を比較するために、「各丸棒の接触数の平均値」を縦軸にプロットしたものである。a) と b) はそれぞれ気中供試体と水浸供試体を想定した場合の解析結果であるが、前者では自重を支える必要があるために「接触数の平均値」が概ね 3 程度までしか低下しないのに対し、後者では「接触数平均値」が 1 を下回る状態が一時的に生じていることがわかる。なお、無重力状態では「接触数平均値」が一時的にゼロとなることも確認した。

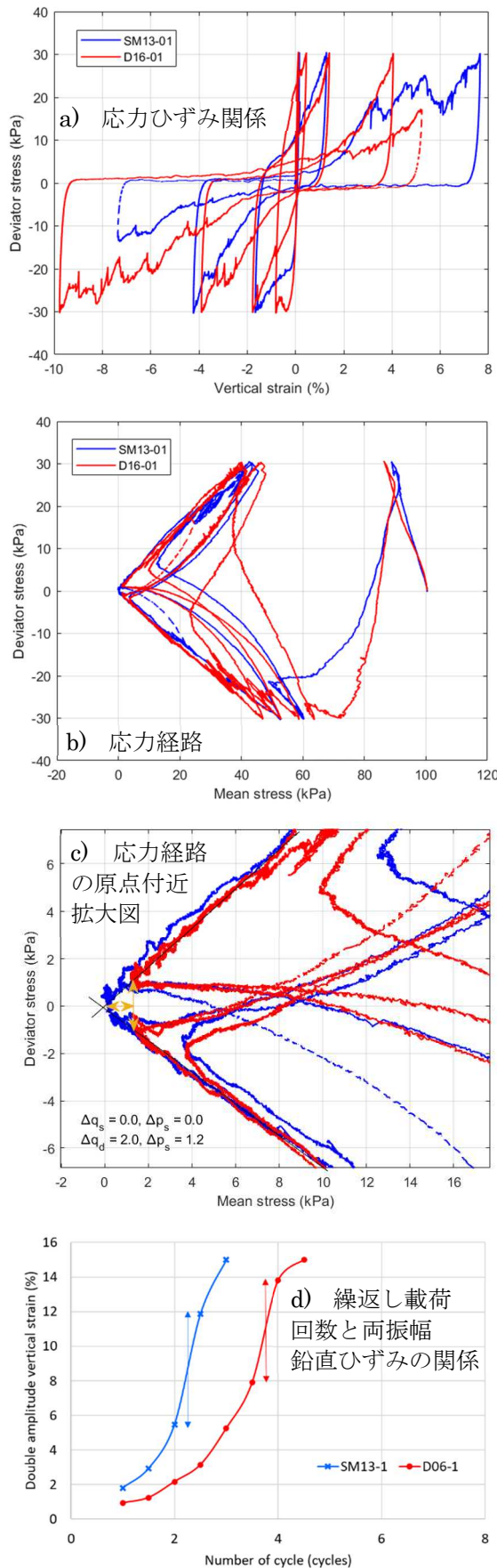


図 3 水浸供試体 (青色) と気中供試体 (赤色) の等体積繰返し二軸試験結果



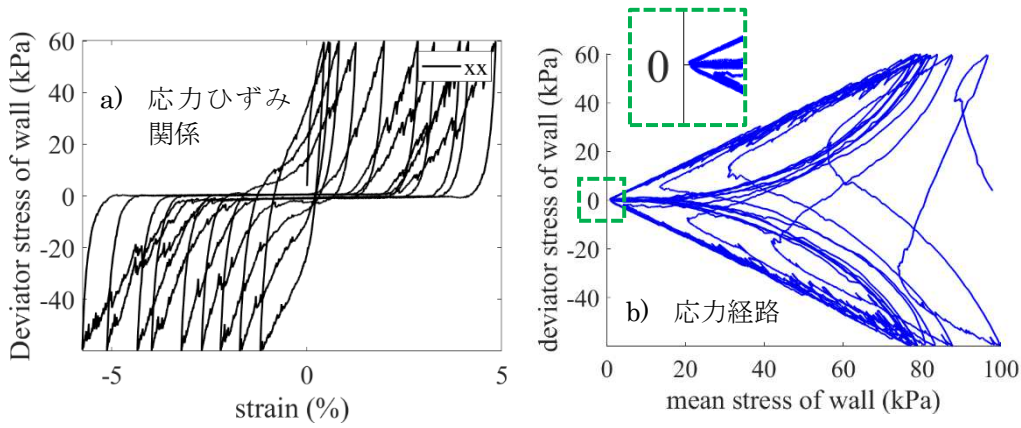


図4 気中供試体を想定し自重の影響を考慮した解析結果

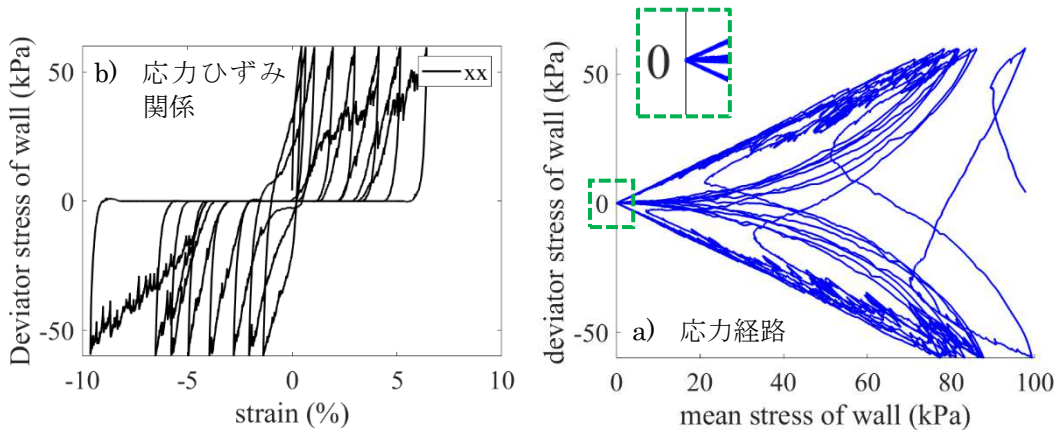


図5 水浸供試体を想定し自重が浮力でほぼ相殺された状況を考慮した解析結果

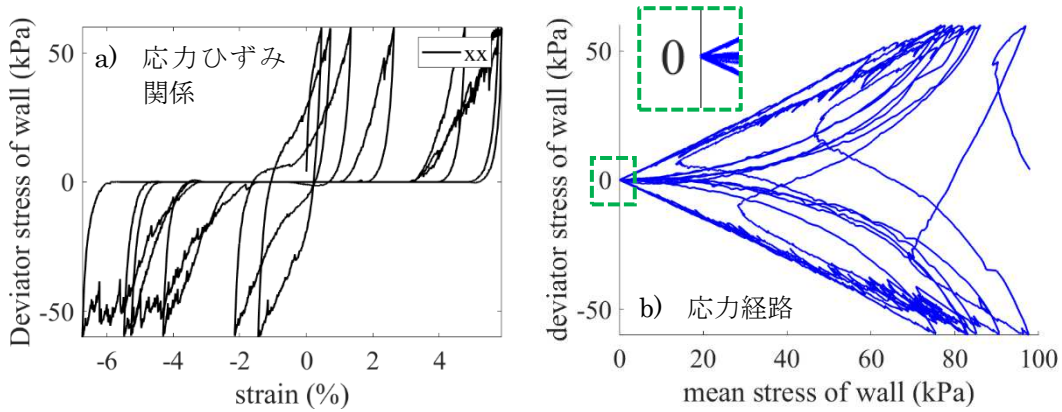


図6 自重と浮力が釣り合う完全無重力状態での解析結果

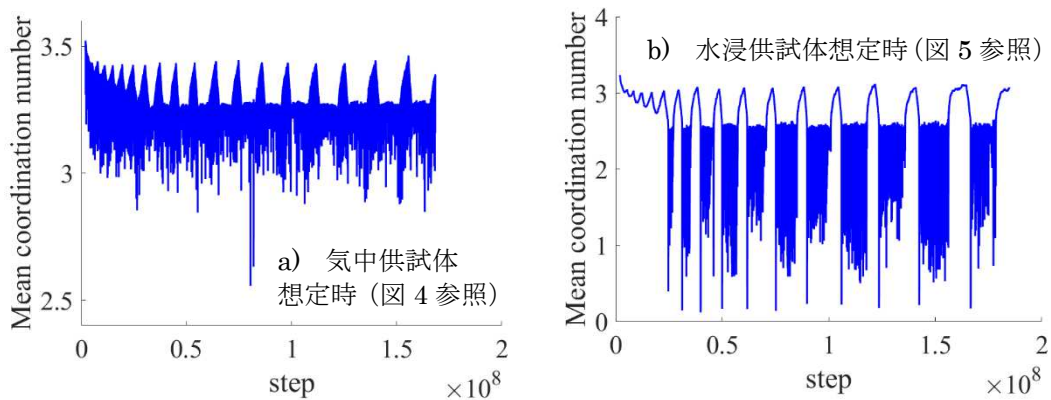


図7 各丸棒の接触数の平均値の変化状況

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Morimoto, T., Otsubo, M. and Koseki, J.	4. 巻 61 (2)
2. 論文標題 Microscopic investigation into liquefaction resistance of pre-sheared sand	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 335-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.12.008	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 Koseki, J., Yokoyama, D. and Morimoto, T.	4. 巻 7
2. 論文標題 Cyclic Bi-Axial Tests on Assembly of Metal Rods Under Constant-Volume Condition to Study Re-Liquefaction Behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Infrastructure Geotechnology	6. 最初と最後の頁 478-495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40515-020-00123-w	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 Otsubo, M., Chitravel, S., Kuwano, R., Kyokawa, H. and Koseki, J.	4. 巻 156
2. 論文標題 Liquefaction characteristics in triaxial tests under various gravity environments ? DEM analyses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	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) 10.1016/j.compgeo.2023.105245	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 Otsubo, M., Chitravel, S., Kuwano, R., Hanley, K.J., Kyokawa, H. and Koseki, J.	4. 巻 62 (5)
2. 論文標題 Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	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) 10.1016/j.sandf.2022.101202	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Sukhumkitcharoen, R., Koseki, J. and Kyokawa, H.
2. 発表標題 Visualization of local void ratio changes to study effects of liquefaction history on re-liquefaction behavior
3. 学会等名 23rd International Summer Symposium, 土木学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sukhumkitcharoen, R., Koseki, J. and Kyokawa, H.
2. 発表標題 The influence of liquefaction history on local void ratio characteristics
3. 学会等名 第18回 関東支部発表会（GeoKanto2021）, 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪正英, 桑野玲子, 京川裕之, 古関潤一
2. 発表標題 異なる重力環境下での液状化挙動に関するDEM解析
3. 学会等名 第57 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022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	京川 裕之  (Kyokawa Hiroyuki)  (60799865)	名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授    (13903)	

6. 研究組織（つづき）

	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	大坪 正英  (Otsubo Masahide)  (80804103)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（つくば中央研究所）・主任研究員    (82114)	
研究分担者	竹内 渉  (Takeuchi Wataru)  (50451878)	東京大学・生産技術研究所・教授    (12601)	
研究分担者	渡邊 健治  (Watanabe Kenji)  (80425925)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授    (12601)	

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