

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18843

研究課題名（和文）大型2軸・3軸動的加力装置に用いる世界最高精度の荷重計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of the Highest Accuracy Force Measurement System for Large Biaxial and Triaxial Dynamic Tests

研究代表者

吉敷 祥一（Kishiki, Shoichi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：00447525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、積層ゴムと4本の水平リンクを採用した新たな計測手法を採用した実験装置（実大免震試験機“E-Isolation”）に関して、実験装置の建設と並行して構成部材の性能確認を実施すること、および稼働後に最大鉛直荷重・水平荷重性能に対する検証実験を行うことが目的である。これらの研究から実大免震試験機を構成する天然ゴム系積層ゴムの微小変形領域における特性、プレストレス導入時の鉛直特性、反力支持部の水平特性などを把握した。さらに実際に試験体として積層ゴム支承を挿入し、試験機の最大鉛直荷重および水平性能に対する実験を行い、計測システムの妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国には大型化する免震部材に対して、その破壊実験や性能検証を縮小試験体の静的実験結果などを基に外挿して評価している問題があった。しかしながら、実大免震試験機“E-Isolation”が完成し、それらの実験が可能となった。本研究課題では、実大免震試験機のキーとなる天然ゴム系積層ゴム支承の微小変形時の挙動を把握するとともに、建設時における各部の性能確認を行ったものである。完成後には最大鉛直・水平性能の実験を行い、新たな計測システムの妥当性を検証しており、今後の実大免震試験機の活用の際に重要なデータを得ることに成功している。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research project is to verify the performance of the components of the experimental apparatus (full-scale testing facility “E-Isolation”), which employs a new measurement method with laminated rubber bearings and four horizontal links, in parallel with the construction of the facility, and to conduct verification experiments for maximum vertical and horizontal loading performance after the apparatus is put into operation. Through these experiments, the characteristics of the natural rubber laminate bearing that constitutes the facility in the extremely small-deformation region, the vertical characteristics when pre-stress is introduced, and the horizontal characteristics of the reaction beam supports were determined. Furthermore, the laminated rubber bearing was inserted as the test specimen, and dynamic experiments were conducted on the maximum vertical load and horizontal performance of the testing machine to confirm the validity of the measurement system.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：建築構造 実験装置 計測方法 精度 多軸加力

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海外と対照的に日本では、大型構造部材の実験施設がまだなく、著しく縮小化された部材の実験結果の外挿により実部材の性能が推測されている。しかし、大きいものほど壊れやすいという寸法効果があり、その把握のために実大・縮小実験の比較検討が不可欠である。そこで日本にも実大実験ができる大型装置を実現するため、様々な活動が行われてきた。この一環で、笠井らは、台湾国立地震研究所 (NCREE) の大型 2 軸加力装置での実際の大型実験、および加力・計測精度の調査を行ってきた (図 1)。試験体の上端は上梁に、下端はテーブルに固定し、テーブルは動的水平アクチュエータ 4 基 (最大 4MN) により水平方向に大きく動く。テーブル下面には大小の鉛直アクチュエータ 7 基 (最大 60MN) から上向き圧縮力、テーブル上面には浮き上がり防止のため鉛直アクチュエータ 4 基 (最大 4MN) から下向き圧縮力がかかる。

この装置では可動テーブルと鉛直アクチュエータの接触面での摺動抵抗力が、水平力のデータに混入し、水平アクチュエータのデータから、推測した摺動抵抗力を除去することで試験体の反力を評価している。しかし、本試験体の出荷試験と、同条件での NCREE の試験の結果が著しく異なる問題があった (図 2)。

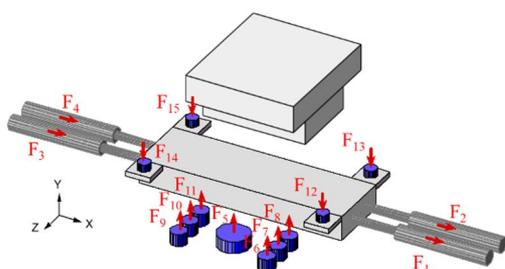
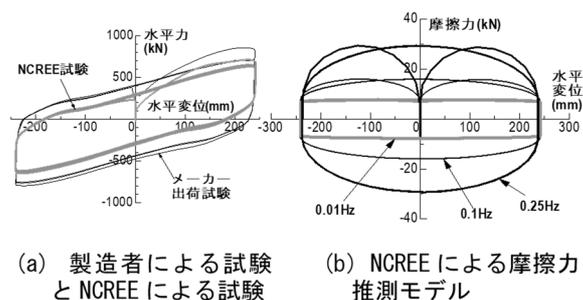


図 1 NCREE の大型 2 軸加力装置



(a) 製造者による試験と NCREE による試験

(b) NCREE による摩擦力推定モデル

図 2 機差や摩擦力推定の違いによる影響

2. 研究の目的

本研究課題では、積層ゴムと 4 本の水平リンクを採用した新たな計測手法を採用した実験装置 (実大免震試験機 “E-Isolation”) に関して、実験装置の建設と並行して構成部材の性能確認を実施すること、および稼働後に最大鉛直載荷・水平載荷性能に対する検証実験を行うことが目的である。

3. 研究の方法

具体的な研究の方法については、下記の 7 項目となる。これに加えて、鋼柱と水平リンクを採用した新たな計測方法を考案し、その他の項目として詳細な検討を行った。

- (1) 実大免震試験機において剛強な反力梁を支持する直径 650mm の天然ゴム系積層ゴムを対象とし、微小変形の線形性、水平剛性の面圧依存性・振幅依存性を静的載荷実験により確認する。
 - (2) 剛強な反力梁を積層ゴムにて支持して PC 鋼より線によりプレストレスを導入する過程を建設と並行して計測し、反力梁の支持部における鉛直方向変位の推移を取得する。
 - (3) プレストレスと積層ゴムにて固定された反力梁支持部の水平方向剛性の微小変形 (1 ~ 5mm) 領域における線形性と水平剛性の理論値との対応を確認する。
 - (4) 試験体の代わりに油圧ジャッキを挿入し、油圧ジャッキに別途取付けたロードセルの計測値と水平リンクによる計測値が合致することを確認し、計測システムの精度を確認する。
 - (5) 試験体として積層ゴム支承を挿入し、試験機の最大鉛直荷重に対する変位を詳細に計測し、反力梁の挙動を把握する。
 - (6) 試験体として積層ゴム支承を挿入し、試験機の最大水平性能 (振動数、振幅) に対する実験を行い、計測システムの妥当性を確認する。
 - (7) 多種多様な積層ゴム支承を用いた静的・動的実験を行い、そのデータ分析から試験機に内在する摺動抵抗力、慣性力の除去方法について検討を行う。
- その他、鉛直リンクを用いた実験装置については、1/3 サイズの縮小モデルによる動的実験の計測データの分析、および有限要素解析によりロードセルと太い支持部材の設計検討結果についての分析を行う。

4. 研究成果

3 章にて示した具体的な研究方法のうち、(1) ~ (3) の項目について研究成果を示す。

- (1) 実大免震試験機において剛強な反力梁を支持する直径 650mm の天然ゴム系積層ゴムを対象とした実験より得られた荷重変形関係を示す。実験より得られた基準面圧 15 MPa における水平方向の荷重 - 変形関係を、図 3 に示す。図の縦軸は試験体 1 体あたりの水平荷重 P であ

り、横軸は水平変形の上下の平均値 δ_h である。また、図中には振幅毎に最小二乗法による線形近似から算出した水平剛性の評価結果を灰色の実線にて併せて示している。いずれの場合もほぼ線形弾性挙動を示している。また、同じ水平変形における水平荷重と近似直線の差は振幅 ± 5 mmの場合にも最大0.3 kN程度であり、線形性が高いことが分かる。

ここでは省略するが、鉛直方向の荷重 - 変形関係についても議論しており、試験体の基準面圧は15 MPaであるが、試験機の性能や実大免震試験機において想定される面圧を勘案して、JSSI規格の評価方法と類似させて面圧6~15 MPaに相当する鉛直荷重下にて鉛直剛性を評価すると、全ての試験体において、鉛直剛性の実験値は設計値の結果に対して $\pm 4\%$ 以内の差に収まっており、試験体間の差も小さい結果であった。

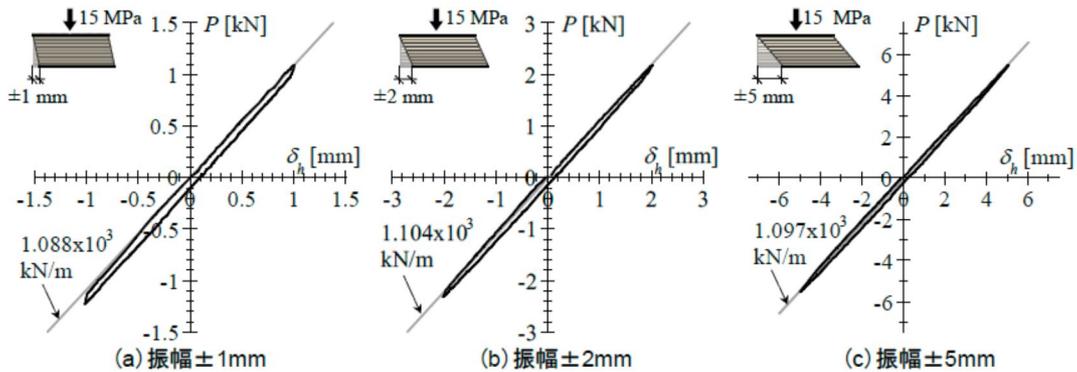


図3 直径650mmの天然ゴム系積層ゴム支承を対象とした微小変形実験の結果

(2) 剛強な反力梁を積層ゴムにて支持してPC鋼より線によりプレストレスを導入する過程を建設と並行して計測した結果を示す。PC鋼より線の張力の導入箇所と順番を、実験より得られた荷重 - 変形関係と併せて図4に示す。PC鋼より線は南北の反力梁支持部に1、212 mm間隔で設置された積層ゴム支承に対して、1台あたり四方の850 x 750 mmの位置に4本ずつ、計48本を設置している。PC鋼より線は、反力梁に傾きが生じないようにバランスよく、2本ずつ東西南北に対称となる箇所に1~24の番号に沿って、南北側を交互に1本あたり1、240 kNの初期張力を導入する。

荷重 - 変形関係における縦軸はPC鋼より線による導入張力 P_{PC} であり、横軸は反力梁支持部における鉛直変位 δ_{zN} 、 δ_{zS} の平均値 δ_z である。なお、計測は緊張前をゼロ点とし、PC鋼より線の2本分の張力(2、480 kN)を導入する毎に行っている。また、図中の“3章”と称して示している破線は、(1)の実験より得た全12台の積層ゴム支承の鉛直剛性の和である。プレストレスの導入初期はやや剛性が緩いものの、15、000 kN程度からはPC鋼より線の張力に比例して変位が増加している。3章の実験にて得た積層ゴム支承の鉛直剛性と比較すると、剛性が僅かに低くなっているが、これは反力梁のたわみによる影響であると考えられる。具体的には、本実験から得られた反力梁支持部の鉛直剛性は、(1)の実験にて得た積層ゴム支承の鉛直剛性の約82%程度となっている。

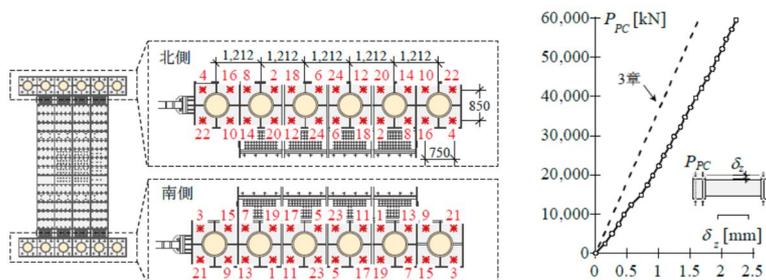


図4 PC鋼より線の張力の導入箇所と順番、および鉛直方向の荷重 - 変形関係

(3) プレストレスと積層ゴムにて固定された反力梁の水平方向剛性の微小変形(1~5 mm)領域における載荷実験の結果について示す。実験のセットアップと加力部分の詳細を、得られた荷重変形関係と併せて図5に示す。実験対象である反力梁は、積層ゴム支承12台に支持され、PC鋼より線によりプレストレスが導入された状態である。実験は、東側のRCドックの立上部を利用し、反力梁とRCドックの立上部の間に油圧ジャッキとロードセルを、H形鋼を介してRCドックに固定して行う。載荷は油圧ジャッキを用いて反力梁に西側方向への強制変位を与えて行う。実験は同一の載荷装置を南北に設置した上で、南北の油圧ジャッキを手動で操作し、目標変位を0 1 0 2 0 5 0 mmとする片側漸増変位振幅にて行う。計測は、最大変位振幅が1、2 mmのサイクルでは0.2 mm毎に、5 mmのサイクルでは0.5 mm毎にジャッキ操作を一時停止した後にしている。天井クレーンが設置されておらず、また実験時間の制約が厳しい状況で

あったため、人力での運搬が可能な装置を設計し、南北それぞれの荷重、計測を行っている。荷重中における反力梁に作用する荷重と水平変位の計測方法を説明する。反力梁の北側と南側に作用する荷重 P_N 、 P_S はロードセルにより計測する。また、南北における反力梁の水平変位 δ_N 、 δ_S は、RC ドック上面と反力梁端部の相対変位として計測した値 δ_{1N} 、 δ_{2N} 、および δ_{1S} 、 δ_{2S} のそれぞれの平均として得る。なお、反力梁の全体挙動については、荷重 P を P_N+P_S 、水平変位 δ を南北における水平変位の平均値 $(\delta_N+\delta_S)/2$ として評価する。荷重と変位はいずれも西側方向を正とする。

荷重 - 変形関係では、黒色は全体、赤色は北側、青色は南側をそれぞれ表している。また、色の明暗により荷重振幅を区別している。いずれの場合も北側と南側はほぼ同程度の剛性を有する弾性挙動を示している。ただし、最大変位が 1 mm の初期荷重時の範囲 (図の右端) を詳細にみると、水平変位が 0~0.2 mm にて荷重のわずかな立上がりが見られる。ただし、それより大きな変位 (0.2~ mm) では、ほぼ一定の剛性に沿って荷重が増減している。

ここで、荷重初期の荷重の立上がり (0~0.2 mm) について考察する。本実験は水平リンク部材を反力梁に接続する直前に実施している。したがって、可能な範囲で水平リンク部材と反力梁の間に隙間を設けるように現場作業を調整したが、南側の反力計測リンクは反力梁との僅かな接触が確認されている。すなわち、本実験の荷重以前から南側の反力計測リンクが反力梁を僅かに押ししており、これが実験結果に影響を及ぼしたものと考えられる。すなわち、まず荷重開始時点では、実験状況の観察から南側の反力計測リンクと反力梁が接触していることが分かっている (図中の)。この状況で南北の油圧ジャッキにより反力梁を西側に押し、初期状態において南側の反力計測リンクが負担している荷重が減少し、その減少分と反力梁を動かすために要する荷重の双方を油圧ジャッキが負担することになる ()。一方、水平変位 0~0.2 mm の範囲において南側の反力計測リンクが反力梁から離間し、全ての荷重を油圧ジャッキが負担する。したがって、反力計測リンク離間後は、反力梁支持部が有する本来の剛性に沿って荷重が増加する ()。なお、除荷時も同様の経路で元に戻るため ()、実験結果として非線形弾性の挙動を示すことになる。また、この考察は最大変位が 2, 5 mm の荷重時においても同様に荷重初期の荷重の立上がりが見られることとも合致する。

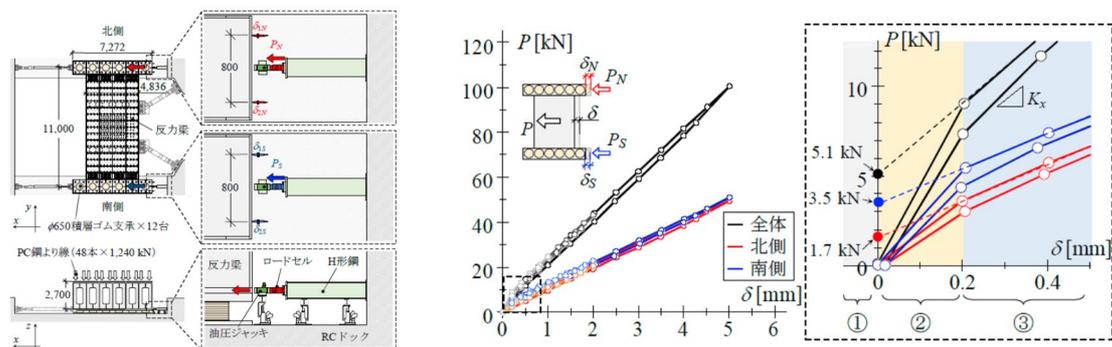


図5 反力梁支持部の水平剛性の確認実験のセットアップ、および得られた荷重 - 変形関係

実験結果から評価した水平剛性 K_x と計算値との比較を行う。反力梁支持部分の水平剛性は、積層ゴム支承の水平剛性と PC 鋼より線の張力による幾何剛性の和で表されるものと考えられる。積層ゴム支承の水平剛性 K_I は、(1) の実験結果で得た 12 台の積層ゴム支承の水平剛性の合計であり、1.0 mm 変形時には約 13.1×10^3 kN/m となる。一方、PC 鋼より線の幾何剛性 K_{PC} は理論的に導出できる。なお、PC 鋼より線の幾何剛性は、端部の境界条件を両端固定支持とすれば、両端ピン支持に対して 1.2 倍の値となる。

反力梁支持部の水平剛性 K_x について、横軸を反力梁の最大変位 δ_{max} として図 6 に示す。図中では、実験より得られた水平剛性 K_x を○、計算値を積層ゴム支承の水平剛性 K_I と PC 鋼より線の幾何剛性 K_{PC} に分け、 K_I と K_I+K_{PC} を●にて示している。実験より得られた水平剛性 K_x (○) は最大変位 1、2、5 mm において、それぞれ 19.5 、 19.3 、 19.1×10^3 kN/m と僅かな振幅依存性を有している。これは (1) の実験結果における振幅依存性と合致するものである。また、PC 鋼より線の幾何剛性を加えた計算値 K_I+K_{PC} は、実験結果とほぼ一致しており、その差は最大変位 1、2、5 mm に対して、それぞれ 2.21、1.89、1.53% 程度である。したがって、反力梁支持部の水平剛性は、積層ゴム支承の水平剛性と PC 鋼より線の幾何剛性の和として十分に予測できると言える。

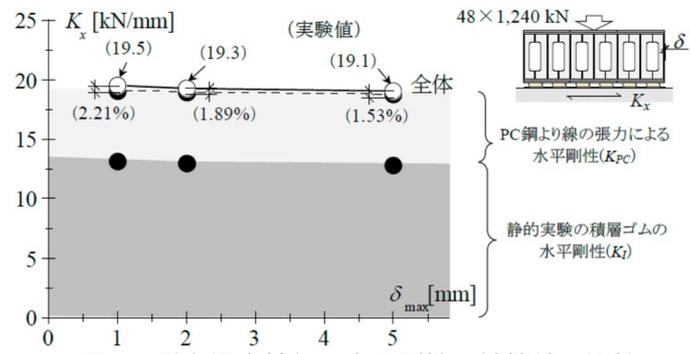


図6 反力梁支持部の水平剛性と計算値の比較

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 酒井一至, 吉敷祥一, 小林真帆, 平野一郎, 黒澤未来, 高橋良和	4. 巻 89
2. 論文標題 実大免震試験機“E-Isolation”の建設時における各部の性能検証	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 727-738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.89.727	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小林真帆, 黒澤未来, 吉敷祥一
2. 発表標題 小振幅下における天然ゴム系積層ゴムの各種依存性
3. 学会等名 2022年度日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林真帆, 酒井一至, 黒澤未来, 吉敷祥一, 東山孝治, 味野朋裕
2. 発表標題 高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その13: 積層ゴムの微小変形下における挙動
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉敷祥一, 酒井一至, 小林真帆, 平野一郎, 黒澤未来, 高橋良和
2. 発表標題 高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その14: 反力梁支持部分の水平剛性確認実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒澤未来, 酒井一至, 小林真帆, 平野一郎, 吉敷祥一
2. 発表標題 高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その15: 計測システムの検証実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井一至, 小林真帆, 平野一郎, 黒澤未来, 吉敷祥一, 高橋良和
2. 発表標題 高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その16: 鉛直荷重下における計測システムの検証実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井一至, 小林真帆, 平野一郎, 黒澤未来, 吉敷祥一, 高橋良和
2. 発表標題 実大免震試験機“ E-Isolation ”における検証実験
3. 学会等名 第16回 日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林真帆, 酒井一至, 黒澤未来, 吉敷祥一
2. 発表標題 E-Isolationを活用した天然ゴム系積層ゴムの実験研究
3. 学会等名 第16回 日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazushi Sakai, Maho Kobayashi, Ichiro Hirano, Miku Kurosawa, Shoichi Kishiki, Yoshikazu Takahashi
2. 発表標題 Experiment on Verification of Measuring System of Experimental System for Full-size Seismic Isolator
3. 学会等名 18th World Conference on seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maho Kobayashi, Kazushi Sakai, Miku Kurosawa, Shoichi Kishiki
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Various Dependencies in the Reduced and Full-scale Natural Rubber Bearings
3. 学会等名 18th World Conference on seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井一至, 吉敷祥一, 小林真帆, 黒澤未來
2. 発表標題 実大免震試験機における性能検証実験 - 摩擦力と慣性力を除去できる計測システムの検証 -
3. 学会等名 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小林真帆, 酒井一至, 黒澤未來, 吉敷祥一
2. 発表標題 様々な振幅領域における天然ゴム系積層ゴムアイソレータの各種依存性
3. 学会等名 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024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
--	---------------------------	-----------------------	----

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