

令和 5 年 9 月 13 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04676

研究課題名（和文）シリンダ式の無周期・無動力鉛直免震装置の開発

研究課題名（英文）Development of an aperiodic and no power required vertical seismic isolation system using a hydraulic cylinder

研究代表者

山田 学（Yamada, Manabu）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員

研究者番号：10835763

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）：パラレルリンク式鉛直免震の検討を、解析及び小型モックアップで実施した。解析の結果、パンプ方式で支持型のパラレルリンクを用いる場合、シリンダの変位が拡大する部分で不安定挙動を生じる。このため、これを解消できる懸架型パラレルリンクに変更した。シリンダを収縮方向で使用する懸架型は、シリンダ連結部の力点とカベクトルが一直線になることからスムーズな動作が期待できる。またシリンダ方式の最大の弱点である摩擦力の低減にも作用する。小型モックアップとして、エア式4台と、油圧式1台を製作し、加振実験に供し、入力加速度を低減する良好な結果を得た。現時点での250t/脚の設計仕様をまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフ地震が確実視され、その備えが必要である。そこで、フライトシミュレータ等に用いられるパラレルリンクを鉛直免震装置に適用する検討を実施した。パラレルリンクは、関節を順次連結するシリアルリンクと比較して、堅強な構造を作る事ができるが、地震力を受け流す方向で使う場合、水平復元力が乏しく、不安定挙動を示すことが本研究で明らかになった。そこで、支持型から懸架型に変更することで復元性を向上し、安定化できる見通しを得た。小型モックアップの加振実験では一定の免震性能を確認している。今後、ほとんど実用化されていない鉛直免震の有望な方式として発展が期待される。

研究成果の概要（英文）：Parallel link vertical base isolation was studied by analysis and small mock-up. The results of the analysis showed that the use of a supported parallel link in the passive method causes unstable behavior where the displacement of the cylinder expands. Therefore, we changed to a suspension type parallel link that can solve this problem. In the suspension type, where the cylinder is used in the retracted direction, the force vector and the force point of the cylinder connection are aligned, so smooth motion can be expected. It also works to reduce frictional force, which is the biggest weak point of the cylinder system. Four pneumatic type and one hydraulic type were fabricated as small mockups and subjected to vibration tests, which showed good results in reducing the input acceleration. The current design specifications for 250 t/leg are summarized.

研究分野：機械工学

キーワード：鉛直免震 パラレルリンク 固有周期 力学特性 復元力特性 摩擦力 無動力

### 1. 研究開始当初の背景

免震装置は、地震時の機能維持が必要な庁舎や病院などで導入が進んでいるが、鉛直地震動を低減する機能は無く、その 100% が建物内部に伝播し、相応の被害をもたらすという課題がある。一般に免震は支持要素の低剛性化により振動を低減する。水平方向は、積層ゴムなどにより建物の自重を支持しながら横方向を低剛性化できるが、鉛直方向は建物の大荷重を支持しながら同じ方向に低剛性化する必要があり実現が困難である。本研究はその解決手段として、油圧シリンダでパラレルリンクを構成し、各シリンダの内圧を、アキュムレータ(蓄圧機)により、ピストンの位置・動作によらず一定荷重を出力することで、大荷重の建物を無周期で支持し、好適な免震性能を発揮できると考えた。さらに、本法式は、地震時には無動力で動作させることが可能である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、提案する油圧シリンダ式無周期・無動力鉛直免震装置についての実現性を明らかにし、建屋免震の実用的規模である 250ton/脚の設計仕様を確立する。その免震手段の要点は、油圧シリンダ内の圧力を、ピストンの位置・動作によらず一定に保つことで一定荷重を出力するもので、これにより大荷重の建物を無周期で支持できる。無周期であれば周期を持つ免震の最大の課題である共振を回避できる。シリンダ内部の圧力を一定に保持する手法は、精密な油圧制御回路と十分な容量のポンプがあれば可能だが、瞬時に大量の作動油を供給・排出することとなり高コストが懸念される。そこで、地震で発生する油圧シリンダの動作によるエネルギーをアキュムレータ(蓄圧機)に蓄積する方式を検証する。

### 3. 研究の方法

パラレルリンクをパッシブ式の免震装置として使用するにあたり、幾何学的な特性を解析と小型モックアップで確認する。今回の研究では、通常の支持型パラレルリンクでは、復元特性に課題があることが分かったため、懸架型パラレルリンクを考案し、検討を進めた。これらの結果を踏まえ 250ton/脚の設計仕様を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) パラレルリンクの解析モデル

図 1 にパラレルリンクの小型モックアップを示す。(a) はフライトシミュレーターなどで用いられる支持型だが、加振実験でバランスが崩れるような不安定挙動を示したことから、(b) の懸架型を考案し検討することとした。図 2 に解析モデルを示す。

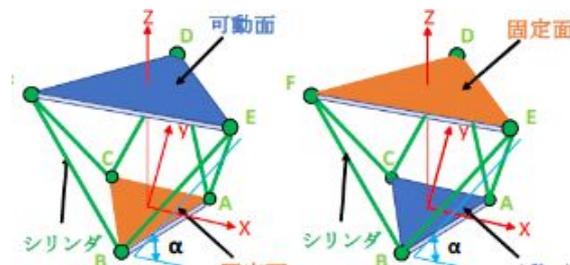
正三角形の剛板の各節点同士にはばね要素でピン接合したモデルとし、可動面に変位を与えることで解析を行う。変位が与えられた際の幾何学的関係からシリンダの長さや方向を導出し、長さの変化量から軸方向復元力を、それにシリンダ方向ベクトルを乗じる形で座標系各軸方向の復元力を計算する。

#### (2) 静的復元力特性

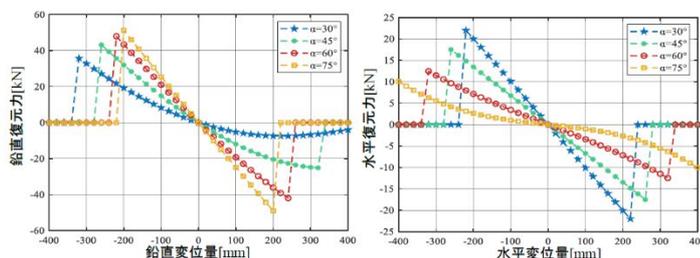
復元力特性の一例として、懸架型の状況を図 3 に示す。鉛直方向では水平面からの角度  $\alpha$  が小さいほど、水平方向では  $\alpha$  が大きいほど変位に伴い剛性が低下する。また、変位に対して抵抗力が生じない非抵抗領域が確認された。この領域は  $\alpha=75^\circ$  時に急激に拡大するため、 $\alpha$  を  $60^\circ$  程度以内に設定することが望ましい。



(a) 支持型 (b) 懸架型  
図 1 パラレルリンクの小型モックアップ



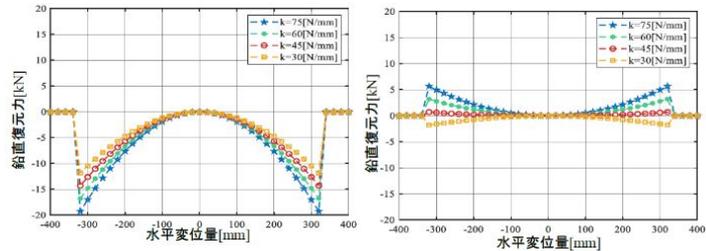
(a) 支持型 (b) 懸架型  
図 2 パラレルリンク解析モデル



(a) 鉛直復元力 (b) 水平復元力  
図 3 静的復元力特性(懸架型)

### (3) 荷重支持時の復元力特性

可動面の変位による荷重支持に要する軸力変化を考慮した水平復元力と変位の関係を図4に示す。支持型は、水平変位の増加に伴い、復元力が低下するため、変形が進行する不安定挙動の原因となっている。一方、懸架型は正剛性となっていて理想的である。ただし、ばね剛性が低いと反転するケースがあるため注意が必要である。



(a) 支持型 (b) 懸架型  
図4 荷重支持時の水平復元力特性

### (4) 小型モックアップ(エア式)による実証実験

懸架型平行リンク鉛直免震装置の小型モックアップを設計・製作し加振実験を実施した。取り扱いが容易なエアシリンダを採用した。主な仕様を表1に、加振の計画図を図5に、振動台上の外観を図6に示す。加振波は、ランダム波、1995年の兵庫県南部地震のJR鷹取波、2016年4月16日の熊本地震のKiK-net 益城町波(以後、熊本本震波と称す)等を使用した。加振中は、加速度と3軸方向の変位、各シリンダの圧力等を測定した。

表1 懸架型平行リンク小型モックアップ(エア式)の主な仕様

支持荷重(4脚)	120kg	油圧シリンダ(1本)	ストローク	100mm
目標周期(全体)	1.4秒		口径	12mm
目標ストローク	±55mm		圧力	0.7MPa
平行リンク中立角度	60°	エアチャンバ(蓄圧機)	容積(1本)	0.1L

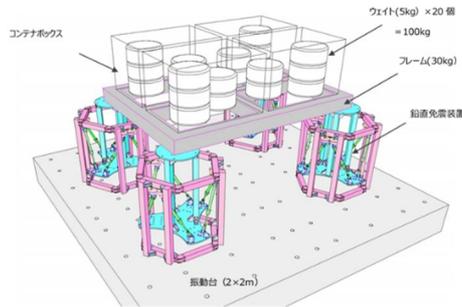


図5 加振実験の計画図



図6 振動台上の免震装置の外観

図7に一軸加振実験結果の一例を示す。熊本本震波の鉛直方向(Z軸)のみ、30%出力加振の結果で、積載質量は110kgである。(加振台の最大性能から、熊本本震波は3軸で20%出力、鉛直方向(Z軸)のみ加振で30%出力が最大である。)

概ね±0.5m/sec以上の入力加速度をカットしており、免震の効果は確認した。しかしながら、最大加速度を1/3以下にするという目標には達していない。これは、実際の地震よりも小さな入力であることが原因で、今後、実地震程度の入力が可能な加振実験で検証する予定である。

図8に3軸加振結果の一例を示す。こちらは、熊本本震波の3軸20%加振の結果で、積載質量は110kgである。こちら、実際の地震よりも小さな入力であることが原因で、明らかな免震性能を認める結果とはなっていない。特に水平方向は摩擦の影響が大きく、水平入力が静止摩擦力を上回ると動きだす現象のため、遅れて加速度が生じていて若干の増幅が見られる。また、水平方向の加速度が終盤でオフセットしているのは、免震装置が傾いて復元していないためである。これは解析結果の水平復元力が小さい事を裏付けている。一方、鉛直方向は前記加振実験よりも入力が小さいもののピークがカットされた。これは水平加速度の入力で、シリンダが動きだし、動摩擦力が支配的に作用していたためと思われる。これは、平行リンクならではの知見と考える。

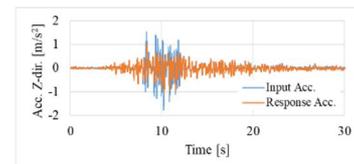
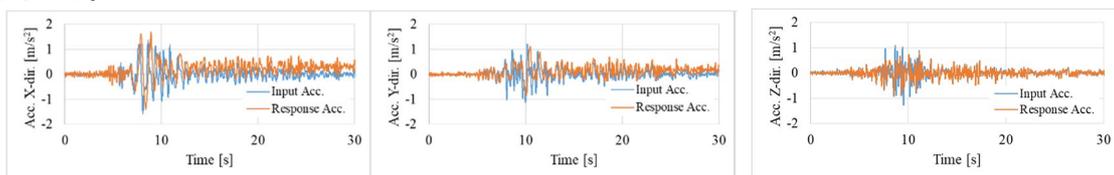


図7 熊本本震波30%鉛直方向加振のZ軸方向加速度時刻歴



(a) 水平X方向 (b) 水平Y方向 (c) 鉛直Z方向

図8 熊本本震波20%3軸方向加振の加速度時刻歴

(5) 小型モックアップ（油圧式）の開発

エア式の結果を受け、油圧式の小型モックアップを設計・製作し加振実験を実施した。主な仕様を表 2 に示す。エア式と比較して 2 倍のストロークとし、1 脚当たりの支持荷重も約 24 倍と実用に近いスケールとした。一般的にシリンダの最大圧力と最小動作圧力（無負荷時にシリンダを動かすことができる最小圧力）の比は、エア式に比べて油圧式の方が大きい。このため、(4) 項で課題となった摩擦力の低減が期待できる。

加振実験のパラメータは、支持荷重と固有周期とした。固有周期は、ウェイトとアキュムレータで確定するが、アキュムレータのガス初期圧力を変更することで、所定の範囲内で固有周期を変更した。

表 2 懸架型平行リンク小型モックアップ（油圧式）の主な仕様

支持荷重（1 脚）	875kg	油圧シリンダ （1 本）	ストローク	200mm
目標周期（全体）	1.1～3.3 秒		ロッド径、口径	10mm, 20mm
目標ばね定数（全体）	5.37N/m		定格圧力	7 MPa
目標ストローク	±120mm	アキュムレータ （蓄圧機）	ガス容積（1 本）	1.2L
平行リンク中立角度	60°		最大ガス初期圧力	6.3MPa

(6) 小型モックアップ（油圧式）の加振実験

振動台上の免震装置を図 9 に、全体の外観を図 10 に示す。振動台上にフレームを固定し、フレームから懸架された 6 本の油圧シリンダで底板を支持した。底板に円形のウェイトを重ねる形で質量を変更できる。アキュムレータ、電磁弁、油圧ポンプは、振動台の大きさの関係で外側に配置し、油圧ホースで連結した。油圧ホースは、大きな圧力損失が発生しないように、油の流速に対して十分な有効断面積を持つものを適用した。加振波形は、振動台の特性から最も大きな鉛直加速度出力できる新潟県中越地震（2004）小千谷市城内とした。加振は振動台の最大出力の関係から、観測波の 75% を使用した。実験パラメータはウェイトの質量と、アキュムレータに充填される窒素ガスの初期圧調整で得られる固有周期とした。ウェイト質量は 200kg～422kg の範囲で、固有周期は 1.1s～3.3s の範囲で実施した。

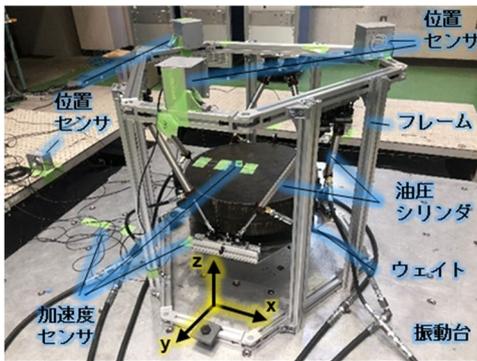


図 9 振動台上の免震装置

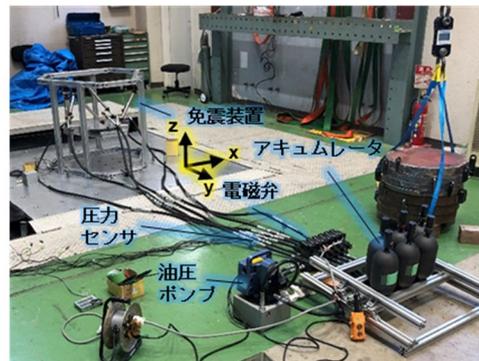


図 10 免震装置全体の外観

(7) 小型モックアップ（油圧式）の加振実験結果

今回の実験で最大加速度の低減率が 56.9% と最も高かったウェイト質量 300kg, 固有周期 1.4 秒のケースについて、加速度時刻歴を図 11 に、フレームとウェイトの相対変位の時刻歴を図 12 に示す。約 200Gal で静止摩擦係数を越えて免震が開始され、時間 16s くらいの個所で振動台と一緒に動きになっている。3 カ所に設置した変位センサのデータでは、二つの変位センサが初期位置に復元せず、約 2.6° 傾きを生じて停止している。その他のケースも同様に、初期位置からオフセットするか、僅かに傾いて停止する状況となった。本システムでは地震後に中間位置に復元する操作が必要になると考える。

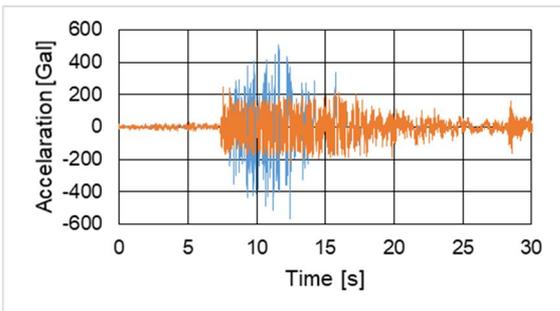


図 11 振動台上と免震装置上の加速度時刻歴

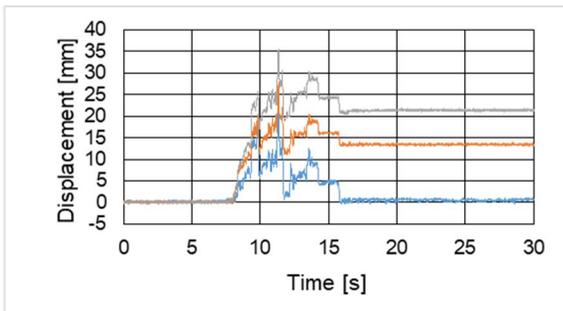


図 12 フレームとウェイトの相対変位の時刻歴

### (8) 油圧システム

当初資料で提案した逆止弁を用いる油圧回路システムは、逆止弁の開放・閉止圧力に大きな差があるため、スムーズに動作できなかつた。そこで、別回路を小型モックアップの実験等で検討した。提案する油圧システムの模式図を図13に示す。2台のソレノイドバルブと、流路の有効断面積が大きなエア駆動バルブ、油圧ポンプ、圧力センサおよび位置センサからなる。油圧シリンダとアキュムレータが常時連結されていると、上部構造の質量が変動した時に、鉛直変位が生じる可能性が高い。さらにこれをバルブ操作で修正するにも、送油量による位置合せが困難になる。そこで、通常時は全バルブをロックして免震装置を高剛性化し、地震の初期微動や緊急地震速報を受けたときのみ、エア駆動バルブを開放して低剛性化する方式とした。

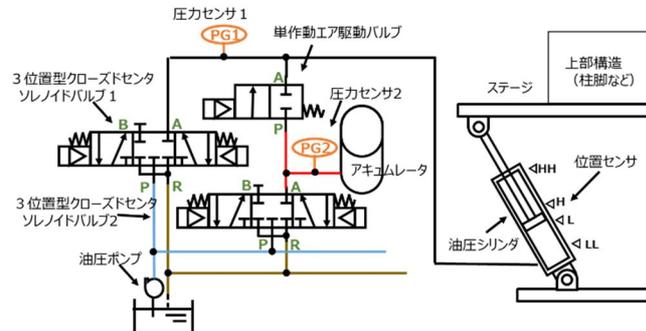


図13 油圧システムの模式図

### (9) 3次元免震システムの構想

図14に3次元免震システムの構想を示す。本研究により、パラレルリンク式鉛直免震装置を、ただちに3次元免震システムとするには、摩擦力や水平復元性の課題があることが分かった。そこで、水平免震は既往の研究で、低コストかつ高性能の流体浮揚式水平免震装置と組み合わせる構想である。

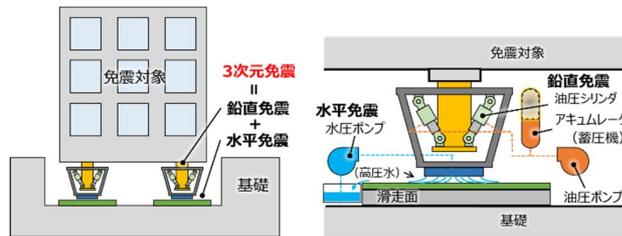


図14 3次元免震システムの構想

### (10) 250ton/脚の設計仕様

1脚当たりの支持荷重を250ton、ポルトロープ指数を1.4、目標周期を3秒としたときの油圧式懸架型パラレルリンクの設計仕様を表3に示す。ここで掲載した仕様の製品は、市販品で構成が可能のため、実現できる仕様と考える。

表3 油圧式懸架型パラレルリンク鉛直免震装置 250ton/脚の設計仕様

支持荷重(全体)	250ton	油圧シリンダ (1本)	ストローク	400mm
目標周期(全体)	3秒		口径	224mm
目標ばね定数(全体)	1.09MN/m		圧力	15MPa
目標ストローク	±230mm	アキュムレータ (蓄圧機)	ガス容積(1本)	90L
パラレルリンク中立角度	60°		ガス初期圧力	12MPa

## 5. まとめ

油圧シリンダ式の無周期・無動力鉛直免震装置についての実現性を明らかにし、建屋免震の実用的規模である250ton/脚の設計仕様を確立する研究を実施し、以下の結論を得た。

- ・支持型パラレルリンクは水平変位の復元特性が悪く、変位が進行する課題がある。
- ・懸架型パラレルリンクでは前記を改善できる見通しのため、本研究の主要案とする。
- ・エア式懸架型モックアップの加振実験で、鉛直免震装置としての機能を確認した。
- ・同上の加振実験で、シリンダの摩擦力による性能低下の課題が明らかになった。
- ・シリンダの摩擦力の影響を低減できる油圧式モックアップを製作し、加振実験を実施した。この結果、鉛直方向の最大加速度の低減率 56.9%得て、免振装置としての有効性を確認した。
- ・固有周期を長周期化したため復元力が乏しく、ほとんどのケースで初期位置からオフセットするか、僅かに傾いて停止する状況となった。本システムでは地震後に中間位置に復元する操作が必要になると考える。
- ・流体浮揚式水平免震上にパラレルリンク式鉛直免震を載せる3次元免震装置を提案。
- ・250ton/脚の設計のため、油圧シリンダ、アキュムレータの仕様を提案した。

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 TOMIZAWA Tetsuya, MATSUMOTO Itsuki, OGAWA Koya, YAMADA Manabu, SATO Eiji, FUKUI Hirohisa	4. 巻 87
2. 論文標題 A STUDY ON STATIC MECHANICAL PROPERTIES OF VERTICAL SEISMIC ISOLATION SYSTEM WITH PARALLEL LINK MECHANISM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1164 ~ 1173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1164	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田 学、佐藤栄児、福井弘久、梶原浩一、富澤徹弥
2. 発表標題 流体浮揚式3次元免震システムの開発 (その4) 油圧シリンダによるパラレルリンク式鉛直免震
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川航矢、富澤徹弥、松本 樹、山田 学、福井弘久、佐藤栄児
2. 発表標題 パラレルリンク機構を用いた鉛直免震システムに関する研究 その1 静的力学特性
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 樹、富澤徹弥、小川航矢、山田 学、福井弘久、佐藤栄児
2. 発表標題 パラレルリンク機構を用いた鉛直免震システムに関する研究 その2 縮小装置を用いた特性確認試験及び鉛直動に対する地震応答解析
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演会
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
研究協力者	富澤 徹弥  (Tomizawa Tetsuya)  (30774773)	明治大学・理工学部建築学科・専任准教授   (32682)	
研究協力者	佐藤 栄児  (Sato Eiji)  (60343761)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・室長   (82102)	
研究協力者	福井 弘久  (Fukui Hirohisa)  (50881520)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・研究員   (82102)	

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