

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04449

研究課題名(和文) 歯車型モータを用いた可変回転慣性質量ダンパーの免震構造物への適用性

研究課題名(英文) Feasibility study on variable inerter mass damper using hydraulic gear motor incorporated into seismic isolation structures

研究代表者

池永 昌容 (IKENAGA, Masahiro)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：50552402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：非常に大きな付加質量要素を構造物に付与できる回転慣性質量ダンパーを利用して、性能が変化する付加質量要素の免震構造物への適用性を検討した。その結果、地震応答中に質量要素の性能変化を行うダンパーを免震構造物への導入した場合、ダンパーの条件をつまき設定することで、免震層変位を低減させつつ上部構造の応答も低減させ、より良い免震効果を発揮できることを解析によって示した。質量要素のみの性能変化機構を有するダンパーである「錘ガイド型可変質量ダンパー」を提案し、単体加振実験を行った。質量要素の性能変化を実現できていることが確認できた。また、本ダンパー独自の課題点の検討を行い、原因と解決法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

免振構造物の高性能化は、重要な社会インフラである建築構造物の安全性を向上させ、人命保持のみならず災害後のインフラ機能保持の観点からも重要な技術的課題である。本研究課題は、免震構造物を従来の設計法に比べても加速度応答と変位応答の両面にわたって、極めてまれに発生すると想定される極大地震動のみならず頻繁に起こる中小地震動に対してもその性能を改善しており、社会的に非常に意義深い研究である。学術的にも、建築構造物にはほぼ検討されてこなかった付加質量変化という項目についての実現と、その数値解析手法、また利用方法に言及しており、これからの可変回転慣性質量ダンパーの研究に対する重要な端緒となる研究である。

研究成果の概要(英文)：Using inertial mass dampers (called inerter) that can apply a very large additional mass element to the structure, we investigated the applicability of the inerter whose performance changes to a seismic isolation structure.

As a result, when a inerter damper that changes the inertial performance according to the seismic response is introduced into the seismic isolation structure, the response of the superstructure is also reduced while reducing the displacement of the seismic isolation layer by setting the damper conditions well.

We proposed a "weight guide type variable mass damper" which is a damper with a performance change mechanism of only the inerter, and conducted vibration experiments. It was confirmed that the performance change of the inerter could be realized. In addition, we examined the problems unique to this inerter damper and found the cause and solution.

研究分野：免震構造

キーワード：免震構造 制振構造 ダンパー ダイナミック・マス 性能変化

1. 研究開始当初の背景

免震構造物は近年では広く普及が進む一方、これまでの想定を超える巨大地震が日本国内だけでも各所で頻発しており、これまで以上に高性能化された免振構造の需要が予想される。2011年の東日本大震災に代表される長周期長時間地震動では単一の地震動の中でも複数の振動特性が含まれており、従来の設計時に性能が一意に設定される制振装置では対応が困難である。また南海トラフ地震などの極大地震時の免震層変位抑制のために現状使われているオイルダンパーや鉛ダンパーなどの減衰要素を設計した場合、その他の中小地震動に対して免震構造の第一目的である免震層より上層部の床応答加速度低減性能が低下してしまう。さらに2016年の熊本地震のように短期間に複数の振動特性が異なる巨大地震が発生する場合への対処も求められており、このことは、設計の結果導入された免震装置によって特性が異なる複数の外乱に同時に対応する必要性を示唆しており、既存のデバイスでは対応できない可能性がある。

一般的な免震装置の中で、応答に応じてその性能を変動させる例として減衰力の制限を意図した荷重リリーフ機構や、変位に応じて減衰を変化させるデバイスが挙げられる。このように減衰性能変化型デバイスの研究・検討は数多くみられるものの、これらのデバイスは入力地震動の卓越振動数変化に直接的に対応しているわけではない。

近年、非常に大きな付加質量要素を構造物に付与できる回転慣性質量ダンパーを利用することで、減衰性能のみならず付加質量要素を操作する研究が盛んになっており、この中でも歯車モータと作動油の流路抵抗を利用して付加質量要素の性能を可変にできるデバイス（以降、iHGDと称す）が提案された。ただし、このような付加質量要素の性能を応答に応じて変化させるダンパーを免震建物に導入した既往研究は見当たらず、その設計方針・設計手法についても未知な点が多い。

2. 研究の目的

本研究では検討事例が少ない、回転慣性機構により誘導される見かけ上の質量、ダイナミック・マス（以降 D.M.と称す）を利用した、質量要素の性能変化機構を有するダンパー（以降、質量可変型ダンパーと称す）の免震建物への有効性を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、質量可変型ダンパーに関する検討を2つ行う。

まず、質量可変型ダンパーの免震構造物への有効性把握を行う。可変質量効果を持つ iHGD の機構を参考に、D.M.が変位に応じて性能を変化する質量可変型ダンパーをモデル化し、これを免震構造物に導入した時の制振性能を解析により検討する。

2つ目の検討として、既存の粘性マスダンパーに質量可変機構を取りつけることで、質量要素のみの性能可変機構を有する質量可変型デバイスとした、付加錘型性能可変マスダンパーを提案する。提案ダンパーを用いた動的加力実験で、D.M.性能変化時の具体的な履歴特性や性能変化の様相を確認する。

4. 研究成果

(1) 数値解析による免震構造物への質量可変型ダンパーの有効性

iHGD を簡略化した解析モデルとダンパー変位-D.M.関係をそれぞれ図1に示す。解析モデルは粘性要素と質量要素を並列配置した粘性マスダンパーとし、本ダンパー機構の場合、D.M.は、ダンパー変位 x_d によって性能が変化することを考慮すると、時刻 t の関数とみなすことができるため、本論では $m_d(t)$ と表記している。

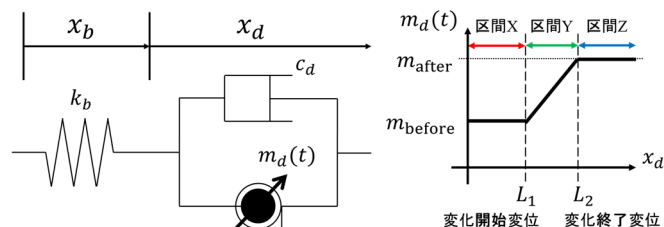


図1 質量可変型ダンパーの解析モデル

D.M.の性能変化は、既往研究の実験結果を参考にダンパー変位が小さい場合は、D.M.の性能変化前 m_{before} の値で一定となる。ダンパー変位が増大し性能変化開始変位 L_1 を超えると性能変化が始まり、ダンパー変位が性能変化終了変位 L_2 を超えると性能変化が完了し、D.M.の性能変化後の値 m_{after} で一定となる。また、ダンパー変位が L_1 と L_2 間の場合は、性能が変位に対して線形に変化するものとした。その後、変位が小さくなると、履歴に沿ってD.M.の性能変化前の値 m_{before} に復帰する。また、本検討では、付加質量要素が性能変化した場合の建物の応答性状に

絞って検討を進めるため、減衰性能の変化については考慮していない。

図2と表1に検討対象とするRC造5階建て基礎免震建物を示す。建物モデルは上部構造に免震層を加えた6質点せん断型モデルとしている。免震層を含む建物総重量は12666[ton]で、上部構造のみの固有周期は0.67秒、上部構造の構造減衰は剛性比例型2[%]であり、免震時周期は4秒である。また、免震層には粘性減衰や免震支承材などによる減衰要素はないものとした。

図3の免震層に導入するダンパーとして、以下の3種類を考える。

- (a) 応答中にD.M.が変化する質量可変型ダンパー (V-VMD)
- (b) 性能が変化しない粘性マスダンパー (VMD)
- (c) 減衰要素のみを有するオイルダンパー (OD)

(i)~(iii)の仮定より、本論で設定する設計諸元は、性能変化前後のD.M.の m_{before} と m_{after} を、それぞれ建物総質量で除した質量比 μ_{before} と μ_{after} 、性能変化開始変位 L_1 の3種類となる。V-VMDはこの3種類の設計変数について、表1に示すパターンを総当たりで計600通りを検討した。比較対象となるVMDはV-VMDと同じ μ_{before} を用いる計10通りを検討した。

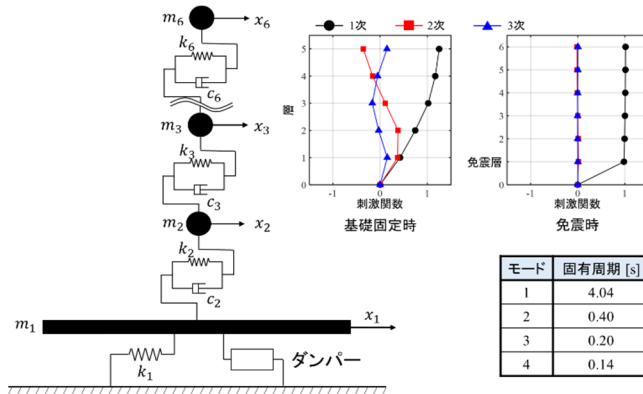


図2 検討建物モデル

表1 解析モデル諸元

設計変数	検討範囲
$\mu_{before} = m_{before} / \sum m_n$	0.1~1.0 @0.1
$\mu_{after} = m_{after} / \sum m_n$	0.1~1.0 @0.1
$L_1 =$	0.1[m] ~0.2[m] @0.02[m]

質点	階層数	階高 [m]	質量 [ton]	層剛性 [kN/m]
6	上部構造	5	3.80	1739
5		4	3.80	1800
4		3	4.40	1807
3		2	4.40	1928
2	免震層	1	5.45	2335
1		1.00	3057	31254
合計		22.85	12666	—

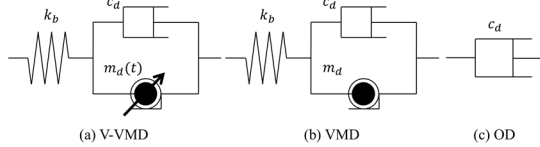


図3 検討ダンパーの解析モデル

表2 入力地震動

地震名	観測地点	成分	PGV [m/s]	呼称
1940年 Imperial Valley地震	EL CENTRO	NS	0.50	El Centro波
1952年 Kern Country地震	Lincoln School	EW	0.50	Taft波
1968年 十勝沖地震	八戸港湾	EW	0.50	八戸波
OS1地域 南海トラフ予測地震動	大阪府沿岸部	—	0.46	OS1波

図4に表2に示した4つの入力地震動ごとの最大免震層変位—最大床応答加速度結果を示す。プロットは表1で示した解析モデル諸元の解析結果すべてを示しており、その中で黒円は性能が変化していないVMD、黄×印はODの結果である。結果から、El Centro波、八戸波、OS1波においては最大免震層変位と最大床応答加速度の間にトレードオフ関係が見受けられ、特にOS1波では最大免震層変位を抑制しているプロットが多く見られた。検討地震動の中では、OS1波入力時の最大免震層変位が他の地震動入力時に比べて2倍程大きくなっており、免震構造の設計としてはまずOS1波に着目する必要がある。以降では600通りの中でOS1波入力時に特徴的な効果を発揮した赤丸のV-VMD (ダンパーA、表3)に注目して詳細検討を行う。図4の結果より、ダンパーA導入時は、最大床応答加速度がOS1波入力時のデータの中で最も小さく、最大免震層変位もVMDに比べて比較的抑制できており、最大免震層変位抑制と最大床応答加速度抑制を両立することができている。

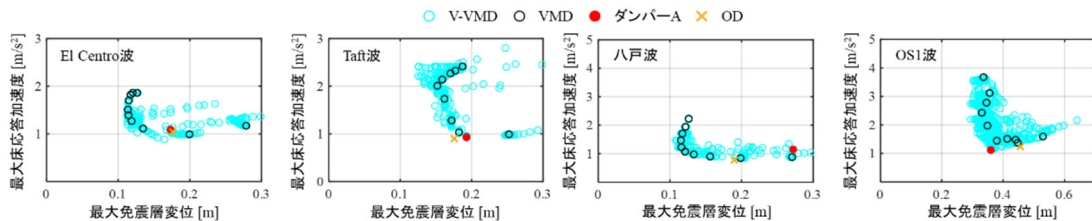


図4 最大応答値

表3 詳細を検討するダンパー諸元

ダンパー	μ_{before}	μ_{after}	L_1 [m]	L_2 [m]	k_b [kN/m]	c_d [kNs/m]
A	0.2	0.7	0.14	0.24	24524	7882
A1	0.2	0.2	—	—		
A2	0.7	0.7	—	—		
OD	—	—	—	—	—	7882

図 5 に OS1 波入力時のダンパーA 導入時の最大応答値を示す。性能変化がないダンパーA1、A2 と比べて、最大ダンパー力以外の最大応答値について良い結果を示すことがわかる。特に最大免震層変位は、性能変化がない A1 に比べて、性能変化を行う A では 25[%]程低減できており、なおかつ免震性能を示す最大床応答加速度についても、A1 に比べて A は 20[%]程度小さい結果となっている。ダンパーA とオイルダンパーOD を比較すると、最大免震層変位で 26[%]、最大床応答加速度でも 15~20[%]程度ダンパーA のほうが小さい値となっており、D.M.の変化による制振性能が大きく発揮されていることが分かる。

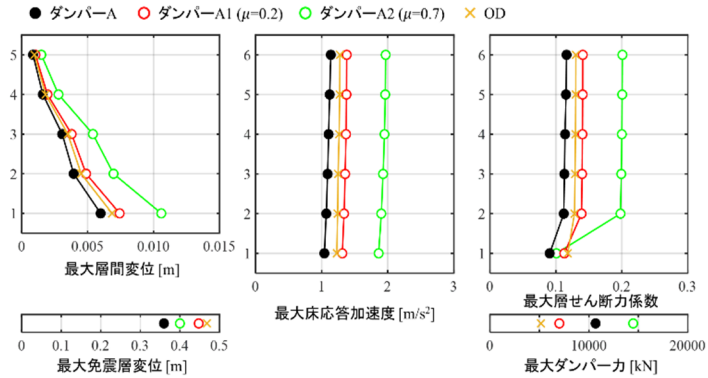


図 5 OS1 波入力時の最大応答値

図 6 に μ を 0.2 から 0.7 まで 0.1 ずつ変化させた場合の変位応答倍率曲線を示す。ダンパーA では性能変化をすることで、極大値 Max.A1 が全体的に広がりをもつ状態から、局所的な極大値 Max.A2L ともう一つの極大値 Max.A2R を有する状態に極大値を分裂させるような変化が起きる。この極大値の大きな変化が要因となり、図 5 で示した最大免震層変位を性能変化により抑制できたのではないかと考えられる。

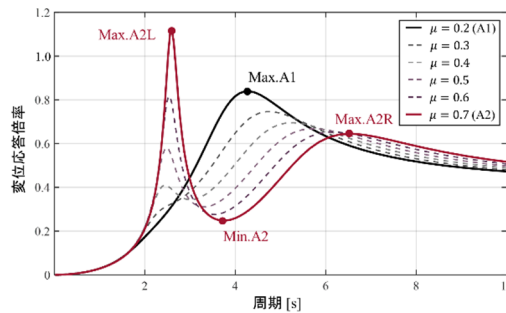


図 6 変位応答倍率曲線の推移

(2) 質量可変型ダンパーの単体加振実験

図 7、表 4 に錘ガイド型可変質量ダンパーを示す。本ダンパーの可変機構は、錘ガイドと称す部材を粘性マスダンパーに取り付け、ここに付加錘及びばねを挿入したものである。ダンパーの軸方向変位に応じてダンパー外筒と共に錘ガイドが回転し、錘ガイドに付加した錘の位置が回転による遠心力とばねの張力により内外に変化することで、付加錘の回転半径が変化することとなり、慣性モーメントの変化から D.M.のパッシブな増減が可能となる。また、付加錘の変化する位置には物理的な制限があるため、D.M.の下限値と上限値を定めることも可能となる。

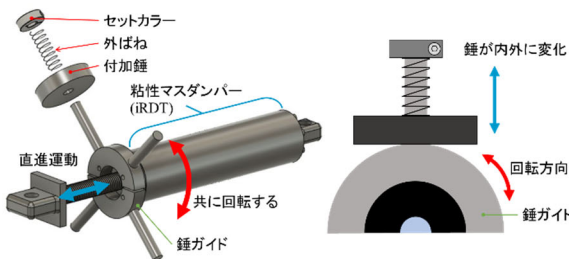


図 7 錘ガイド型可変質量ダンパー

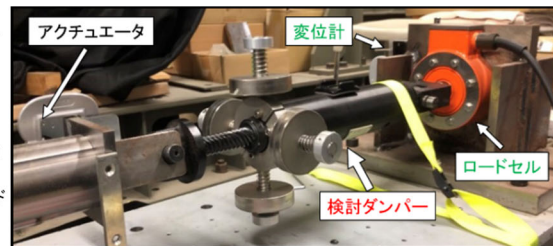


図 8 実験環境

表 4 可変質量ダンパーの諸元

ダンパー 内部諸元	内部摩擦	0.060[kN]	付加錘	質量	0.385[kg]	外ばね	内径	14.0[mm]
	D.M.	0.068[ton]		直径	65[mm]		自由高さ	50[mm]
	粘性減衰係数	1.5[kNs/m]		厚さ	16[mm]		ばね定数	0.15[N/mm]
錘ガイド	リード長	40[mm]	セットカラー	質量	0.017[kg]	内ばね	内径	13.8[mm]
	質量	0.610[kg]		直径	30[mm]		自由高さ	30[mm]
	丸棒長さ	60[mm]	厚さ	10[mm]	ばね定数	0.135[N/mm]		
	丸棒直径	12[mm]						

図 8 に実験環境を示す。本実験で用いる動的アクチュエーターの諸元は、最大荷重 20[kN]、最大加振振幅±100[mm]、最大速度 15[cm/s]であり、計測項目はダンパー変位、ダンパー軸力とした。入力には加振振幅±30[mm]、加振周波数 0.75[Hz]の正弦波とした。

図 9 に錘ガイド型可変質量ダンパーの時刻歴ダンパー軸力と変位及び速度の履歴ループを示す。なお、性能変化の有無を確認するため、計算により求めた錘位置最内側、最外側で固定した場合の結果を併記している。実験の結果、実験中に付加錘の移動を確認でき、図 9 よりダンパー力が最内側と最外側を示す青線と赤線を交互に移動している様子を確認できる。また、20.4 秒や 21 秒付近に波の乱れが見受けられるが、これは性能変化によるダンパー力の追従によるものである。一方で、ダンパー力が最大になる 21.4 秒付近などでは、ダンパー力が予想値よりも大きく生じていることがわかる。これは付加錘が強い力で端部に打ち付けられるために、錘ガイドの丸棒部に負荷がかかり、回転慣性力が増大してしまった結果ではないかと推測する。次に図 12 をみると、履歴ループにおいても性能の上限値と下限値へ変化する様相がうまく表れており、特に速度に応じたダンパー力の変化がよく分かる結果となっている。また、大幅なダンパー力の増加は最大速度付近のみで発生しており、付加錘の衝突による影響の裏付けとなる。

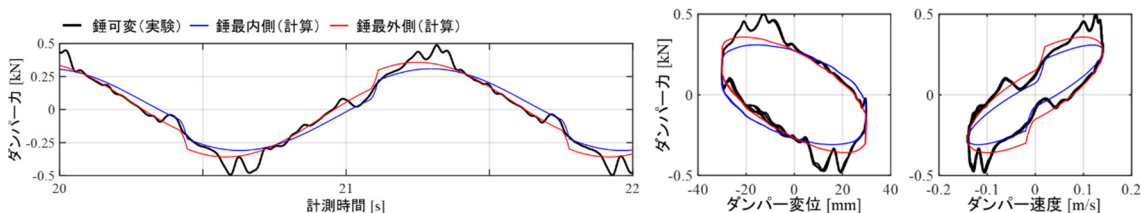


図 9 動的加力実験結果

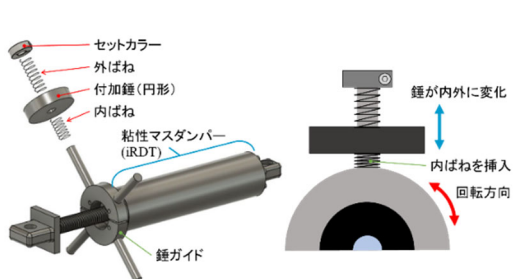


図 10 付加錘の改善方法

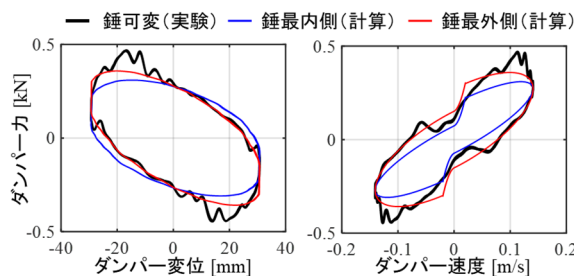


図 11 改善後の実験結果

過大に発生するダンパー力抑制のため、付加錘の移動に伴う衝撃の低減効果を期待し、錘の内側にばねを挿入して実験を行う。図 10 に内側にばねを挿入した場合の錘ガイド型可変質量ダンパーを示す。入力は同様の正弦波とした。図 11 に変位及び速度の履歴ループを示す。図 9 と比較すると、過大に生じるダンパー力が低減でき、期待値の結果に近づいていることが分かる。これより、内側にばねを挿入した結果、錘ガイドの丸棒部にかかる負荷を抑制できたのではないかと考える。また、内ばねを挿入した場合においても未だ発生する過大なダンパー力は、外側のばねを変更していないからであると推測する。そのため、この衝撃をさらに抑制するためには、外側のばねをばね定数がより高いものに変更する必要がある。しかし、そうすると性能変化を行うのに必要なダンパー速度が大きくなってしまい、性能変化が生じにくくなると考えられたため、今回は検討を行わなかった。今後本ダンパーの性能変化の様相を計算によって再現する際に、過大となるダンパー力がその再現性を害する可能性があるため、性能変化を阻害しない、より良い抑制法の検討が必要である。

4. まとめ

地震応答中に質量要素の性能変化を行うダンパーを免震構造物への導入した場合、ダンパーの条件をうまく設定することで、免震層変位を低減させつつ上部構造の応答も低減させ、より良い免震効果を発揮できることを解析によって示した。

質量要素のみの性能変化機構を有するダンパーである「錘ガイド型可変質量ダンパー」を提案し、単体加振実験を行った。その結果、質量要素の性能変化を実現できていることが確認できた。また、本ダンパー独自の課題点も見られたため、その事象についての検討を行い、原因と解決法を見出した。

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 0件）

1. 著者名 池永 昌容、甫木元 大海	4. 巻 Vol. 67B
2. 論文標題 ダイナミック・マスが性能変化する粘性マスダンパーの免震構造物への適用性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	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） なし	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 M. Ikenaga, H. Kida, K. Ikago, N. Inoue
2. 発表標題 Development of Variable Mass Effect by Rotary Inertial Damper Using a Hydraulic Gear Motor
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木田英範、池永昌容、中南滋樹、五十子幸樹、井上範夫
2. 発表標題 液圧で駆動する歯車モータを利用した回転慣性質量ダンパーの開発その5
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池永昌容、木田英範、中南滋樹、五十子幸樹、井上範夫
2. 発表標題 液圧で駆動する歯車モータを利用した回転慣性質量ダンパーの開発その6
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019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	五十子 幸樹 (IKAGO Kohju) (20521983)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	

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