

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01483

研究課題名(和文) 質量可変型回転慣性質量ダンパーを用いた応答変位・加速度を共に低減する免震技術開発

研究課題名(英文) Development of isolation technology for responses using variable inerter mass damper

研究代表者

池永 昌容 (Ikenaga, Masahiro)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号：50552402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,510,000円

研究成果の概要(和文)：ダイナミック・マスを利用した付加質量が応答に応じて変化する「質量可変型回転慣性質量ダンパー」(以下、質量可変ダンパー)を開発し、その開発したダンパーの性能を動的加力実験と振動台実験によって明らかにした。開発した質量可変ダンパーのシミュレーション解析手法、特に質量変化時の数値解析手法についても提案し、提案手法の妥当性を実験結果との整合性から明らかにした。

また、基礎免震構造物に対して質量可変ダンパーを免震層に導入した場合の、本ダンパーの設計方法と他ダンパーに対する利点を時刻歴応答解析で明らかにし、特に長周期長時間地震動時に、免震層変位と応答加速度をともに他ダンパー以上に抑制できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
ダイナミック・マスは現在、建築構造分野で注目されている技術の一つである。その中でも、性能が変わるといった研究は他に類を見ない。また免震構造については昨今の大規模地震の頻発からも有効性が改めて取りざたされており、今後の免震構造における性能の高度化は必要になる可能性も低くない。本研究は、この免震構造とダイナミック・マスの融合を、質量可変という今までにない切り口で遂行した研究であり、今後の免震構造の高性能化の一翼を担う可能性があると考えられ、学術的意義、社会的意義の大きい研究であったと考えている。

研究成果の概要(英文)：We developed a "variable-mass rotary inertia mass damper" (hereinafter denoted as "variable-inerter damper"), in which the added inerter changes according to the response, and clarified the performance of the developed damper through dynamic loading experiments and shake table experiments. We also proposed a simulation analysis method for the developed variable inerter damper, especially a numerical analysis method for when the inerter changes, and clarified the validity of the proposed method through its consistency with the experimental results.

In addition, we clarify the design method of this damper and its advantages over other dampers when introducing a variable inerter damper into the seismic isolation layer of a base-isolated structure through time history response analysis. In particular, it was shown that during long-period, long-duration earthquakes, both the displacement of the seismic isolation layer and the response acceleration can be suppressed more than other dampers.

研究分野：制振構造

キーワード：ダイナミック・マス 免震構造 性能可変 動的加力実験 長周期地震動

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

構造安全性以外にも災害後の機能性保持や資産価値の維持など、多様化する要求に応えるため免震構造が広く普及している。免震構造は、建物基礎に剛性が低い免震層を設置して構造物を長周期化することで、上部構造の応答加速度低減を目的としており、免震層に生じる大きな応答変位に対してはダンパーなどの減衰要素により過度な増大を抑制している。

免震構造物に用いられるダンパーは一般的に減衰要素によるエネルギー消費を目的として導入されており、粘性ダンパーが代表として挙げられる。一方で、粘性要素と付加質量要素(以下、ダイナミック・マス、D.M.)を並列結合した粘性マスダンパーは、粘性要素によるエネルギー消費だけではなく付加質量要素によって免震構造物の卓越周期を長周期化させることができる。ただし粘性マスダンパーはD.M.が小さいと免震層変位の低減効果が小さく、D.M.が大きいと免震層変位は抑制できるが、応答加速度が増大してしまう問題を抱えていた。

地震動の大きさに応じて変位と加速度の両方を制御する研究として、応答に応じて減衰性能や剛性を変化させる性能可変デバイスの研究が挙げられる。性能可変デバイスの設計手法は、設計変数に対するパラメトリックスタディが主流であり労力がかかるものの、中小地震から大地震時に至るまで加速度応答と変位応答のそれぞれに対して適切な設計クライテリアを設定して同時に達成できるデバイスが複数あることが示されている。ただしこのような性能可変型ダンパーは一般的には減衰性能を増大させて卓越周期における応答倍率低減を目的としており、例えば性能が変化するとダンパー力が増大する傾向が顕著である。また減衰効果が低いパルス型地震動に対しては変位抑制が困難であった。さらに性能変化を開始させる変位応答値(以下、性能変化開始変位)の決定には膨大な計算による試行錯誤が必要であった。

このような背景の下、中南・木田らは歯車モータと連通管内の作動油圧によって歯車モータを動かして回転体を回転させることで、最大12000トン相当の回転慣性質量を発生させる装置を開発した。さらにこのダンパーの流路抵抗を操作することで回転慣性質量を可変とする新たな性能可変ダンパー(以下、質量可変ダンパー、V-VMDと示す場合がある)を発明した。回転慣性質量、つまりD.M.の可変システムは作動油の流路を応答に応じて変化させることで実現されているが、この場合D.M.のみならず作動油の流路抵抗による粘性減衰の変化も生じるため、D.M.のみが性能変化するメカニズムは研究開始当時は未だ見当たらなかった。

### 2. 研究の目的

免震構造物の性能向上を目指す一助として、これまでにないD.M.を用いたダンパーの検討は複数行われてきた。しかしながら、D.M.のみを応答に応じて性能変化させるといった質量可変型ダンパー(以下、V-VMD)はこれまでのところ、建築構造分野に限ってはほぼ見当たらない。

申請者が行ったV-VMDの先行研究の中で、数値解析モデルの構築とその解析モデルを用いた時刻歴応答解析により、質量可変ダンパーの免震構造物への有効性を、基礎免震5階建て建築物を対象に、長周期長時間地震動を入力として用いて示した。この数値解析の結果から、D.M.だけが性能変化する場合に、免震構造物に対して変位応答低減と加速度応答低減を両立する可能性が示された。ただし、この長所に対しての理論的考察やメカニズム解明には至っておらず、ダンパー設計は膨大な数のパラメトリックスタディに依存しており実用性に欠けていた。

そこで本研究の目的は以下の4項目である。

(1) D.M.のみが応答に応じて性能変化する質量可変型ダンパーを開発し、その動的加力実験を行いD.M.の性能変化時の実現象の確認と、数値解析手法の妥当性を検証する。ここでは性能変化のメカニズムについては、パッシブ型を目標とするが、研究の目的としては性能変化メカニズムは電気を用いるセミアクティブ・アクティブであっても問題ないとして進めた。なお、まずアクティブ制御によるダンパーを開発した上で、パッシブ型の手法も提案した。

(2) 質量可変型ダンパーが免震建物に及ぼす影響を、振動台実験による実現象を通して確認する。これまでのD.M.に関連するダンパーの既往研究では、ダンパー単体の動的加力実験が大半であるため、特にD.M.性能が変化する本研究のダンパーにおいては振動台実験は必須と考えた。

(3) 質量可変ダンパーの動的加力実験と免震構造物本体や支持部材剛性を解析モデルとして行う時刻歴応答解析とを融合したリアルタイムハイブリッド実験(RTHS)の適用可能性を検証する。RTHSが成功すれば、今後のV-VMD開発や研究がより簡便かつ低コストで実現可能となりうるため、本ダンパーが広く普及する可能性を秘めていると考えた。

(4) 実験で示されたシミュレーション解析手法を用いて、V-VMDを有する免震構造物の地震時応答低減メカニズムを解明するとともに、ダンパーの設計手法を提案する。設計手法にはパラメトリックスタディや最適設計手法は検討途中には用いるが、最終的にはより簡便な式展開などによる実用化を見据えた設計式の提案を目指す。

### 3. 研究の方法

- (1) 実験装置は以下の3点を本研究では利用した。
- ① 最大推力 70kN の動的加力装置実験を用いたダンパー単体の動的加力実験
  - ② 最大トルク 0.63Nm の小型回転モータを用いた、リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験
  - ③ 最大積載量 10 トンの大型振動試験装置（振動台）と総重量 5 トンの免震層試験体

(2) 時刻歴応答解析および周波数応答解析、また各種計算はすべて Matlab/Simulink による自作プログラムを用いた。時刻歴応答解析は、解析の安定性を考慮して平均加速度法とし、後述する多目的最適解やパレートフロントなどを求める場合には遺伝的アルゴリズムを用いた。また、リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験の制御時の計算手法のみ状態空間モデルを利用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 動的加力実験による V-VMD の性能確認とシミュレーション解析手法の妥当性検証

D.M.のみが性能変化する V-VMD (図1)を開発し、動的加力実験でその性能の確認とシミュレーション解析手法の妥当性を検証した。なお開発した V-VMD は現在特許出願中である。シミュレーション解析では、ラグランジュ方程式から D.M.の性能変化を考慮した図2の振動モデルに対する運動方程式をラグランジュ方程式から求め、入力変位を与えたときのダンパー応答変位に対する時刻歴応答解析を行った。なお図1の V-VMD の諸元を表1に示す。

減衰係数	内部摩擦力	変化前慣性質量	変化後慣性質量
$c_d$ [Ns/m]	$Q_{fd}$ [kN]	$m_{d\ before}$ [ton]	$m_{d\ after}$ [ton]
0.53	0.060	2.2	3.0

図3に正弦波入力に対して、性能変化前の質量で固定、性能変化後の質量で固定、そして性能変化させた場合、の3通りの実験結果を示す。全ての図において D.M.を有するダンパー特有の右下がりの楕円形上を示しており、D.M.の大きさに応じて勾配が大きいこと、また D.M.の性能変化によって右下がりの勾配が変化していることがわかった。また3通りともに減衰係数も変化していないこと、数値解析と実験の結果はよい対応を示しており、開発した V-VMD が D.M.のみ性能変化する装置であること、また解析手法の妥当性を検証することができた。

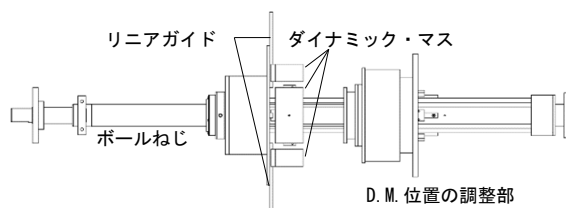


図1 開発したV-VMD

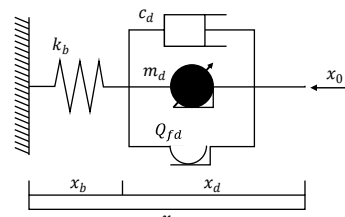


図2 V-VMDの力学モデル

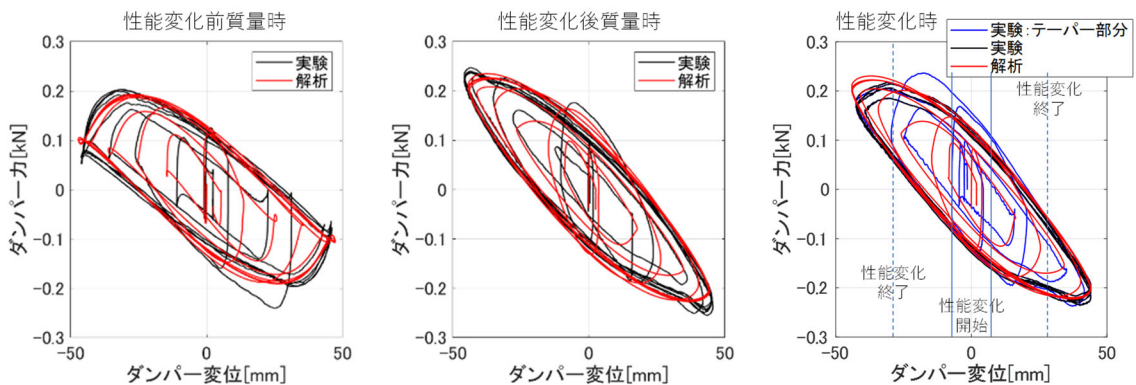


図3 正弦波加振実験結果

#### (2) 振動台実験による V-VMD の免震構造物に与える影響検証

V-VMD が免震構造物の免震層に導入された場合の、D.M.が構造物に与える相互作用を、振動台での正弦波加振によって確認する。V-VMD 試験体の構成は、主要な要素は (1) 単体加振実験と同様であるものの、試験体の取り付け部の違いに加えてダンパーの粘性係数や内部摩擦力はベアリングへの給油状態で異なる。そのため振動台実験の直前の単体加振実験から算出したダンパー諸元を表2に示す。また免震層特性も合わせて表2に併記する。

主系に粘性減衰要素は存在しないとしている。以上の条件のもと振動台実験と解析を行った。用いた解析手法は(1)で確認した

表2 振動台実験時の試験体諸元

上部構造質量	ton	5.06
免震層剛性	kN/m	12.4
免震層レール摩擦力	kN/m	0.046
ダンパー減衰係数	Ns/m	0.09
ダンパー内部摩擦力	kN	0.01
変化前慣性質量	ton	1.8
変化後慣性質量	ton	2.5
支持部材剛性	kN/m	14.0

手法である。加振条件を正弦波周期4秒、振幅30mmで、ダンパー変位14mmで性能変化開始、24mmで性能変化終了である。加振結果を図4に示す。ダンパー力・変位・速度、免震層変位・絶対加速度共に概ね解析と一致する結果が得られた。従って本ダンパー試験体のような回転半徑を操作するV-VMDを免震層に導入した場合も意図通りの挙動が期待できると判断する。

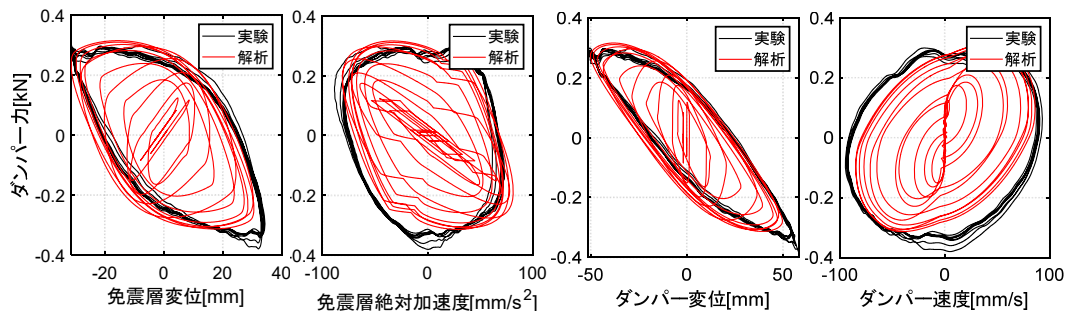


図4 V-VMD付き免震試験体の振動台実験結果

### (3) V-VMD に対する RTHS 実験の適用可能性

RTHS 実験は数値モデル化に置き換え可能な部位と、実験が必要な部位を組み合わせるハイブリッド実験であり、本研究では質量可変型ダンパーのD.M.のみを取り出し、実験部分とするRTHSを構築する。D.M.部にはV-VMDで用いる部位を取り出し、性能変化まで含めたRTHS実験を試みる。すなわち、質量可変ダンパーの軸方向直線運動を外力として与える単体加振実験と、図5のように質量可変ダンパーの質量可変要素部分のみを取り出して回転モータによるトルクを与える要素実験にRTHSを組み合わせて、RTHSによるダンパー単体加振挙動の模擬を試みる。

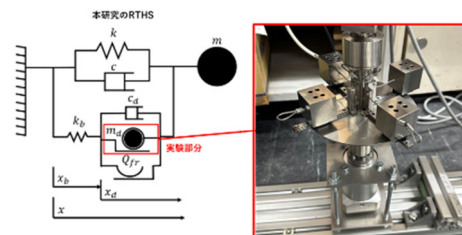


図5 RTHS実験の試験体と解析モデル

RTHS 実験の妥当性を示すために、V-VMD 部分試験体の RTHS 実験の結果と、全てを含んだ解析モデルの解析結果を比較する。

図6の実験結果より、建物時刻歴応答、ダンパー力時刻歴、履歴ループ、すべてで解析と実験がよく一致している。本実験の諸元の設定により影響の大きくなったダイナミック・マス要素の特徴である履歴ループにおける負の傾きも精度よく再現されている。以上の結果より、ダイナミック・マスのみを実験部分とするRTHSは妥当であると判断した。

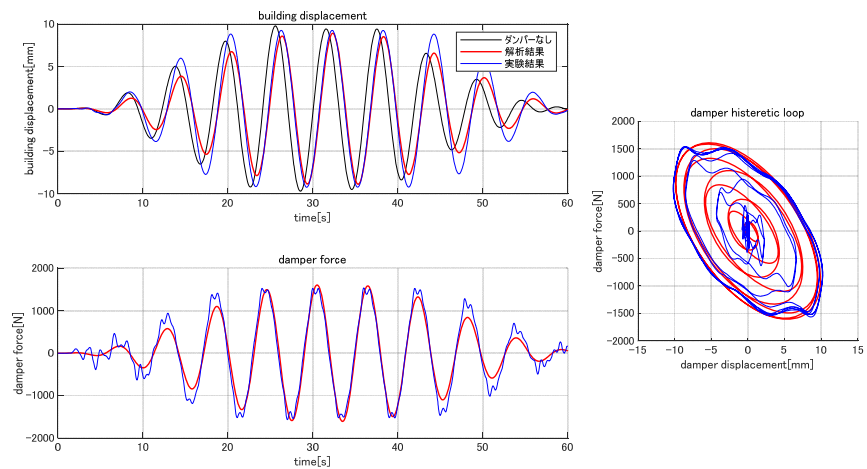


図6 RTHS実験結果 (正弦波周期3秒、振幅4mm)

### (4) V-VMD を有する免震構造物の V-VMD 設計手法の提案

設計手法の提案として、簡単のために図7に示す免震構造物を1質点縮約し、V-VMDと合わせて2質点系モデルを考える。まず性能変化前の諸元を検討するために、性能変化前のダンパーの目標である加速度応答の抑制方法を考える。加速度応答を表す加速度応答倍率において、V-VMDの質量比0.25時には図8のように定点が存在する。この定点が最大となるようにV-VMDの減衰定数を設定すると、 $h=0.22$ が求められ、この条件が最も加速度応答倍率の最大値を最小化することとなる ( $H_\infty$ ノルムの最小化)。次のステップとして性能変化後には、変位応答の最小化がV-VMDの目標であるため、変位応答倍率の最大値が最小となるように、質量比を設定する。図9に示すように、その結果質量比0.415が得られる。

表3の諸元を持つダンパーと、表4の地震動を入力したときの最大応答値を図10に示す。南海トラフ地震すべてに対してV-VMDはODよりも変位を抑制できている。加えて、TakatoriやSylmarに対してV-VMD(提案)はODと同程度の変位に抑えられている。加速度はODと比べてやや増大傾向にあるが、Lv.1, 2入力に対してはODと同程度の大きさに抑えられている。またV-VMD(既往)で見られた0.45[m]を大きく超える変位応答はV-VMD(提案)では見られなかつ

た。

以上の結果より、V-VMD(提案)は他の制振装置と比べて、変位抑制の上で非常に高い制振性能を有しており、免震性能については地震動によっては僅かに OD と比べて性能が低下するものの、その低下は限定的であることを示した。

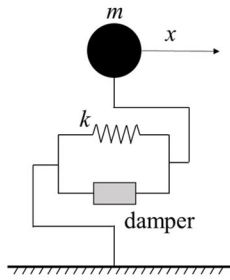


図7 検討対象モデル (1質点縮約建物+V-VMD)

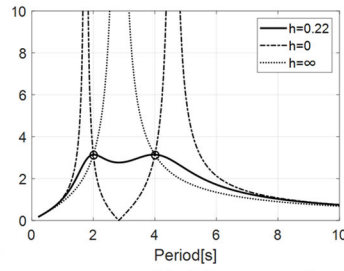


図8 V-VMDの付加質量比  $\mu = 0.25$  時の加速度応答倍率

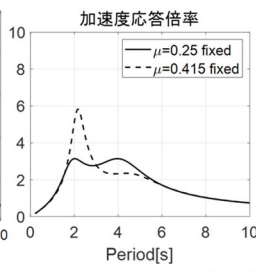


図9 V-VMDの減衰定数  $h = 0.22$  時の加速度応答倍率

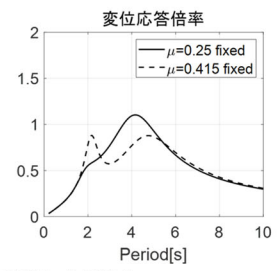


表3 検討ダンパー一覧

名称	$\mu_{\text{before}}$	$\mu_{\text{after}}$	$\beta$	$h$	$L_1$ [m]	$L_2$ [m]
V-VMD(提案)	0.25	0.415	2	0.22	0.14	0.24
V-VMD(既往)	0.2	0.7	2	0.2	0.14	0.24
OD	-	-	-	0.2	-	-

表4 入力地震動一覧

地震名	観測地点	PGV [m/s]	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	呼称
兵庫県南部地震	JR鷹取	1.22	6.57	Takatori
Sylmar波	Northridge	1.30	8.26	Sylmar
津島地点 南海トラフ4連動地震	津島	0.68	5.45	AIC003
CH1地域 南海トラフ予測地震動	名古屋	0.59	2.65	CH1
SZ1地域 南海トラフ予測地震動	焼津	0.45	2.82	SZ1
OS1地域 南海トラフ予測地震動	此花	0.47	2.63	OS1

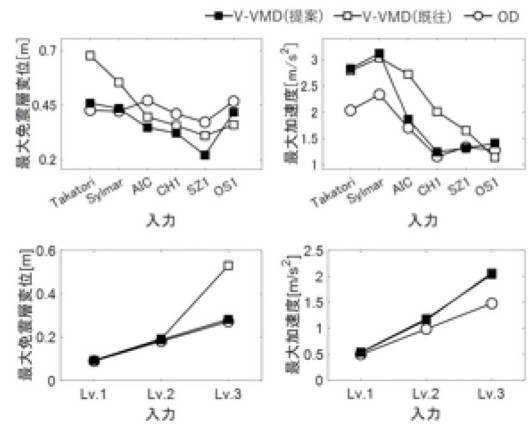


図10 地震応答解析結果

参考文献

- 1) 木田, 池永, 中南, 五十子, 井上: 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 5~6), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, 2019.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山内 恵生子, 山内 皓太, 池永 昌容
2. 発表標題 質量可変機構を有する免震建物用ダンパーの単体加振実験 その1. 実験装置の概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山内 皓太, 山内 恵生子, 池永 昌容
2. 発表標題 質量可変機構を有する免震建物用ダンパーの単体加振実験 その2. 単体加振実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池永 昌容, 内原 啓吾
2. 発表標題 可変な慣性質量を持つばね付き粘性マスダンパーの利用可能性と設計手法 その1. 数値解析手法と解析条件
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内原 啓吾, 池永 昌容
2. 発表標題 可変な慣性質量を持つばね付き粘性マスダンパーの利用可能性と設計手法 その2. 設計方法と解析結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南木元大海、池永昌容
2. 発表標題 可変質量要素を有するマスダンパーの免震建物への適用性 その3. 応答倍率曲線と瞬間入力エネルギーによる可変質量要素の有効性検証
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ダンパーおよび建築物	発明者 池永 昌容、内原 啓吾	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2024-033068	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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)	
研究分担者	榎田 竜太 (Enokida Ryuta) (20788624)	東北大学・災害科学国際研究所・准教授  (11301)	
研究分担者	松田 敏 (Matsuda Satoshi) (60278603)	関西大学・環境都市工学部・教授  (34416)	

#### 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
---------	---------