

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 25 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360088

研究課題名(和文) 既存リソースのネットワーク化による大震災に備えた高度ハイブリッド試験環境の構築

研究課題名(英文) Development of advanced hybrid experimental environment for large scale natural disaster through networking of existing testing facilities

研究代表者

田川 泰敬 (Tagawa, Yasutaka)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20216807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：大型振動台などの既存の防災関連施設をネットワークで結び、これまで困難であった大規模地震実験環境を実現するための基礎技術に関する研究を実施した。具体的には、複数のセンサーと制御器を用い地震波を精度良く再現する研究(コントローラフュージョン)、数値シミュレーションと実際の実験を融合することにより、より効率的に大規模加振実験を実施する手法(リアルタイムハイブリッド試験)などに関する研究を行い、何れも実験によりその有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize super large scale experimental environment for earthquake disaster, it is efficient to connect existing disaster prevention facilities such as large shaking tables each other by using Internet. For this purpose, the following 2 types of basic research were conducted in this grant; (1) Control system design using multi-sensors and multi-controllers for more precise motion control (we call it "Controller fusion"), (2) fusion of real time numerical simulation and real experiments for assessment of large scale structures (Real time hybrid testing). Both methods were verified through experiments.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 運動制御 ハイブリッド試験 センサフュージョン 減災 動的試験 振動台 地震

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災により、津波、液状化、長周期地震、避難誘導などの研究の重要性が改めて認識されている。これらの課題を実験的に検証し有益な研究成果を得るためには、非常に大規模な設備を必要するが、新たな実験施設の建設には莫大な費用が発生する。米国では地震実験を低コストかつ効率的に行うために、各研究機関が比較的小規模な実験施設をネットワークで結び、大規模な実験を実施する NEES(Network for Earthquake Engineering Simulation) プロジェクトが進んでいる。ユーロ圏においてもフランスを中心とする EFAST(design study for European Facility for Advanced Seismic Testing)、英国の UK-NEES など、同様のプロジェクトが推進されている。これに対し、我が国は、“地震国”ということもあり、それぞれの研究機関が比較的大規模な試験装置を有しているが、これらの施設を共同で有効に活用する試みは、これまでほとんど見られない。しかし、近い将来、東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)に匹敵する巨大地震が東海・東南海沖で発生する確率が非常に高いなどの専門家の指摘も多く、これまでにない大規模な地震実験を低コストで行える環境を構築することが急務となっている。

2. 研究の目的

本申請では、各研究機関および関連企業が既に所有している大規模な地震実験装置、あるいは自動車、鉄道、航空機のモーション付シミュレータなど、既存の実験施設(リソース)をネットワーク化することにより、今後の大震災対策に必要な大規模実験を可能にするための基盤技術の確立を目指す。図1に、その1例を示す。東日本大震災では、車を利用した多くの避難者が震災の犠牲となり、震災時のドライバーの運転行動および避難誘導が大きな問題となった。このような状況を実環境において再現するのはほとん

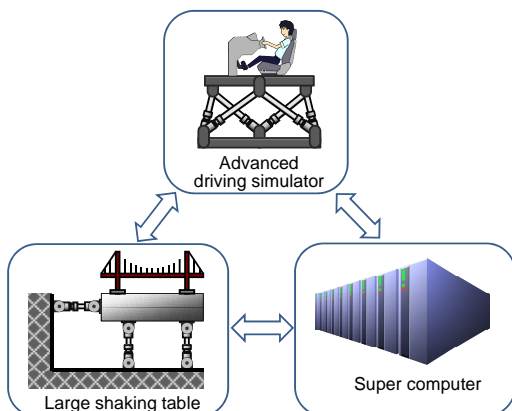


図1 ネットワークを利用したハイブリッド試験

ど不可能であるが、図1のように各研究機関が所有する既存の大型振動台、自動車シミュレータ、高性能コンピュータをネットワークで繋ぐことにより、大規模な実験を低コストかつ各機関の専門性を有効に活用しながら実施することができる。

3. 研究の方法

本申請では、上述の高度動的試験環境を実現する上で、最も基盤となる次の2点に関する研究に焦点を絞り、研究を実施した。

- ・動的試験の高度化
- ・リアルタイム・ハイブリッド試験の高度化

(1) 動的試験の高度化

近い将来、我々に甚大な被害を及ぼす可能性の大きな地震として、

- (i) 高加速度・高周波型地震
- (ii) 長周期・大変位型地震

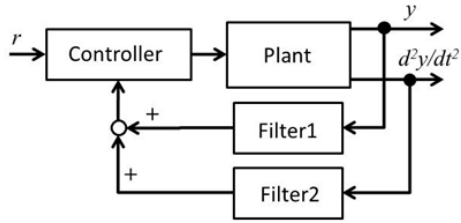
の2種類がある。兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災:1995年)や、中国の四川大地震(2008年)は、前者に属し、2011年の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)では、長周期地震が大きな問題となった。何れの型の地震も大きな被害を誘発していることから、これらを正確に再現可能な、つまり低周波・大変位から高周波・大加速度までの広い範囲を精度よく再現できる動的試験機の開発が急務である。

申請者らは、これらの要求を満たす動的試験機実現のための基盤研究として、以下の二つの課題に取り組んだ。

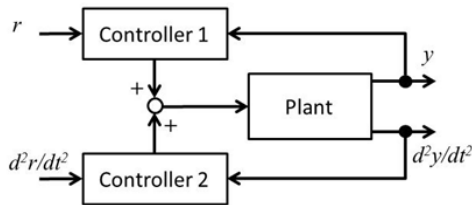
コントローラ・フュージョン

変位計や加速度計の分解能、計測可能な振幅、周波数帯域の制約などからフィードバックしてくる信号が信頼できる値を表すのは、特定の周波数帯に限定される。たとえば変位計は低周波域の動きはよく計測できるが、高周波域の動きを計測するには適さない。しかし加速度計は、低周波の直流成分に近い周波数帯の運動を計測することが難しい。このように、変位計と加速度計は一方の特性が常にもう一方の逆の特徴を有しており、例えばこの二つを用いることで、信頼できる計測値を広範囲の運動周波数に対して獲得できることはよく知られている。

複数のセンサを利用する計測の試みは先行研究で森、木田らにより人工衛星への適用例が報告されている。複数のセンサを利用する手法は一般にセンサフュージョン[]として知られている。センサフュージョンはセンサの計測値にフィルタリングしたものを足し合わせて運動の周波数に関係なく広い周波数帯で良好な計測を得るためのものである(図2(a))。センサフュージョンを制御に適用する場合、フィルタと制御特性を実現する補償器(制御器)を区別して考えるのが一般的である。しかし本研究で提案する手法では、フィードバックループそのものを帯域通過特



(a) Sensor Fusion



(b) Controller Fusion

図2 コントローラフュージョン

性にすることにより、センサフュージョンの機能を持たせながら、目標とする制御特性を実現可能な制御系を設計する(図2(b))。我々はこの手法を、センサフュージョンと対比させ、コントローラフュージョンと名付けその可能性を検討する。さらに、振動台(動的試験機)の運動制御に本提案手法を適用し、広い周波数帯域で精度の高い制御が可能であることを示す。

試験体の影響を受けない振動台制御

振動試験装置は、振動台に試験体を搭載し加振実験を行うため、試験体反力が振動試験機に加わることによって目標値どおりの加振が困難となり、加振精度が悪化する。特に、回転の自由度を含む多自由度振動試験装置では、試験体反力の影響により複数の軸同士での干渉が大きくなり、試験体の特性が見かけ上変化することが分かっている。これは振動加振装置の規模によらず全ての加振装置に共通する問題であり、試験体を搭載した状態で目標値どおりの加振実験を行うためには、試験体の影響を抑制する制御系が必要となる。これまで、研究代表者の田川らは、1自由度の油圧加振機を用い、試験体の反力を考慮した振動台の加速度制御に関する研究を行い良好な実験結果を得ている。そこで、本研究では、水平方向(x軸方向)、垂直方向(z軸方向)、回転方向(y軸まわり)の3自由度の加振が可能、3自由度電動型振動試験装置を用いて、試験体反力の抑制を考慮した3自由度の加速度制御系を設計し、その効果を実験により確認する。制御系設計手法にはDual Model Matching(DMM)法を用いた。DMM法はシステムの特性伝達関数(CTFM)に基づいた制御系設計手法であり、2自由度制御系の設計手法の一種で、目標値追従特性と外乱抑制特性を独立

に設定できる、制御器の導出を代数表記のままで出来るといった利点がある。本研究では、外乱-制御量間の閉ループ伝達関数にノッチフィルタ特性を持たせることにより特定の周波数の外乱に対して強い制御系を実現し、振動台上の試験体反力の影響を低減する。

(2) リアルタイムハイブリッド試験

リアルタイム・ハイブリッド試験(以下、“RTハイブリッド試験”と呼ぶ)とは、試験対象全体を一つの装置で試験することが困難な場合、試験対象をいくつかのサブシステムに分割し、複数の試験装置あるいは数値シミュレーションを併用し、リアルタイムに対象全体の挙動を模擬する試験手法である。たとえば、図3に例として、構造物を上下2つのサブシステムに分割し、詳細な挙動を知りたい下部構造物に“実物”を、上部構造物には“数値シミュレーション”を用いたハイブリッド試験を示す。RTハイブリッド試験において最も重要な問題のひとつが“アクチュエータの制御特性(特に位相遅れ)”であり、この特性によりRTハイブリッド試験の精度が大きく左右されることがわかっている。本研究では、このアクチュエータ制御系に研究代表者の田川らが提唱しているIDCS手法[]を適用し、RTハイブリッド試験の高度化を図る。

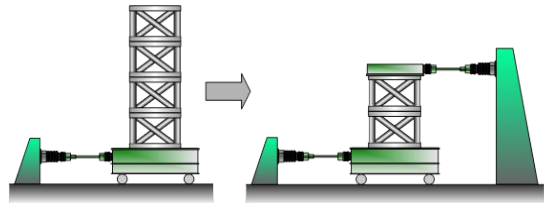


図3 RTハイブリッド試験のコンセプト

4. 研究成果

ここでは、3.で述べた研究に対して、それらの成果について述べる。

(1) 動的試験の高度化

コントローラ・フュージョン

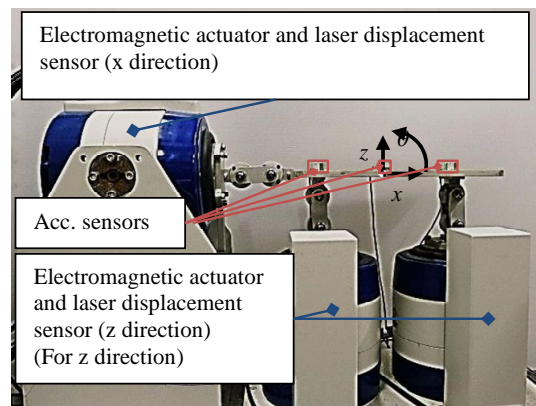


図4 3自由度電動加振器

図4に示す3自由度電動加振装置にコントローラフュージョンを適用し、制御実験を行った。入力波としては、東日本大震災において福島県相馬市で観測された地震波を用いている。図5に制御結果を示す。上段が変位波形を、下段が加速度波形を示す。目標波は、変位は低周波のゆったりした動きがが支配的であるが、加速度は高周波成分を含んでいることがわかる。また、実験結果より、低周波変位から高周波加速度までを非常に精度よく再現できており、提案するコントローラフュージョンの有効性が実証できた。

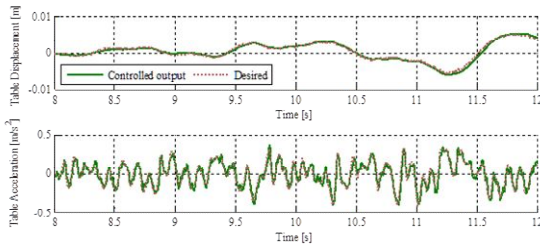


図5 コントローラフュージョン実験結果

試験体の影響を受けない振動台制御

3. の で述べた、手法を前節の3自由度電動加振台に適用した。こととき、図6に示すように減衰の非常に小さな(反力の大きい)構造物を製作し、これを試験体として振動台に搭載し、その制御性能に与える影響を提案手法と従来手法で比較した。図7に提案する制御系のブロック図を、図8にこの制御系の外乱抑制特性を示す。試験体の固有振動数近傍で外乱抑制特性が最大になるようにDMM手法で制御器を設計することにより、試験体反力の影響を抑える。図9に実験結果から得られた水平方向の目標値追従性能を示す。従来手法(黒線)では、試験体からの反力の影響で、試験体共振点近傍で、ゲイン特性が0dBから大きくずれて制御性能が悪化し

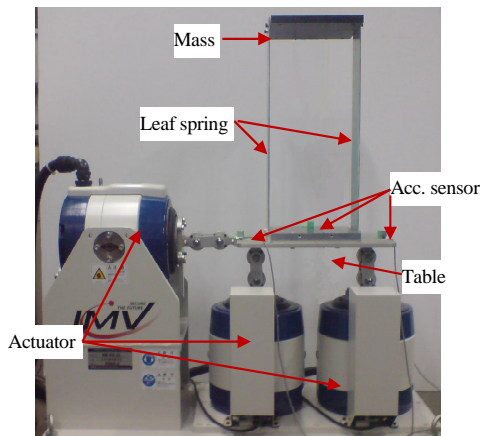


図6 試験体を搭載した3自由度振動台

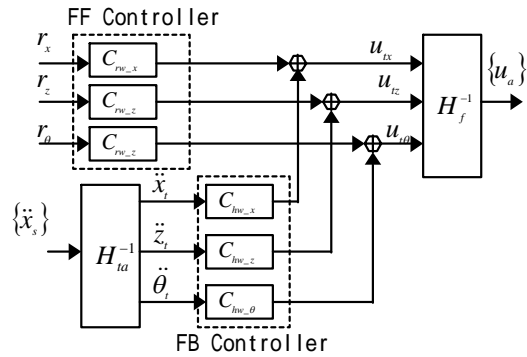


図7 制御系ブロック図

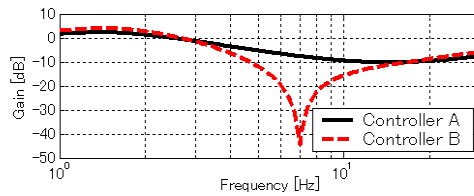


図8 外乱抑制特性

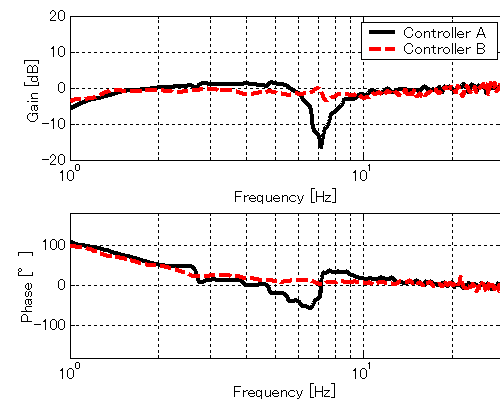


図9 目標値追従性能

ているのに対し、提案手法(赤線)では試験体反力の影響を受けずに0dBのゲイン特性、0degreeの位相特性が維持されており、提案する制御手法の有効性が実験によっても確認できた。鉛直方向、回転方向に関しても同様の結果を得ることができた。

(2) リアルタイム(RT)ハイブリッド試験

RTハイブリッド試験(HILSとも呼ばれる)は、従来、図10(a)に示すように、実システム(試験体)はECU(Engine Control Unit)などの“電子部品”であり、この実システムへの入出力は“電気信号”であった。しかし、構造物のRTハイブリッド試験では、図10(b)に示すように、数値シミュレーションの結果が“アクチュエータ”を介して実システム(試験体)に伝達される。この場合、アクチュエータがRTハイブリッド試験の制御ループ内に存在するため、アクチュエータの動

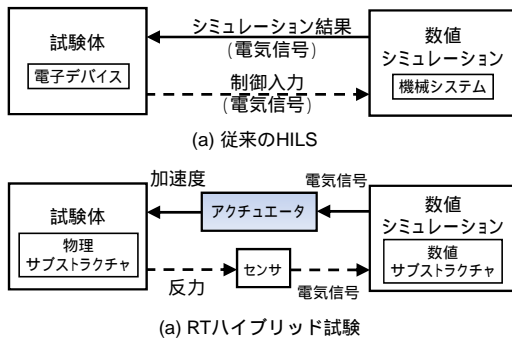


図 10 RTハイブリッド試験 (HILS)

特性がハイブリッド試験全体の精度に大きく影響を与える。特に、減衰の小さな構造物の試験においてこの影響が顕著であり、最悪の場合、ハイブリッド試験そのものが不安定化することもある。本研究は、申請者らが提案する IDCS 手法によりアクチュエータの制御特性を改善することにより、RTハイブリッド試験のパフォーマンスの向上を図る。

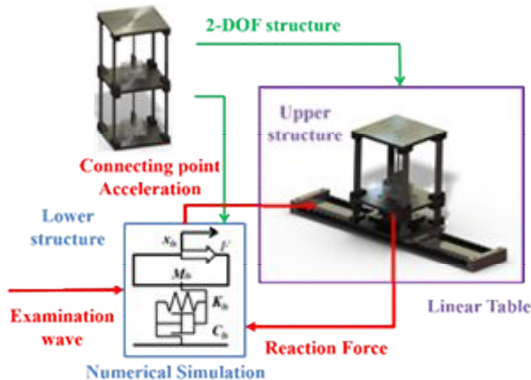


図 11 RTハイブリッド試験装置

上記手法の有効性の検証のため、図 11 に示す実験装置を製作した。これは、2 層 (2 自由度) 構造物に対し、1 層目を RT シミュレーション、2 層目を実モデルを用いて、2 層構造物全体の動的挙動を模擬しようとする装置である。構造はシンプルであるが、非常に減衰を小さくすることにより、あえて RTハイブリッド試験が困難な系とした。図 12 に、前述の IDCS を適用した RTハイブリッド試験の実験結果を示す。数値シミュレーション (赤線) と RTハイブリッド試験 (青線) の結果が良く一致しており、本手法の有効性が実証できた。

<引用文献>

森敦司、木田隆、長塩知之、“センサフュージョンによる宇宙機の姿勢制御”、第 17 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集、Vol. 2008 No.17 (2009) pp. 1-4
 (2) D. P. Stoten、“Fusion of kinetic data using composite filters”、

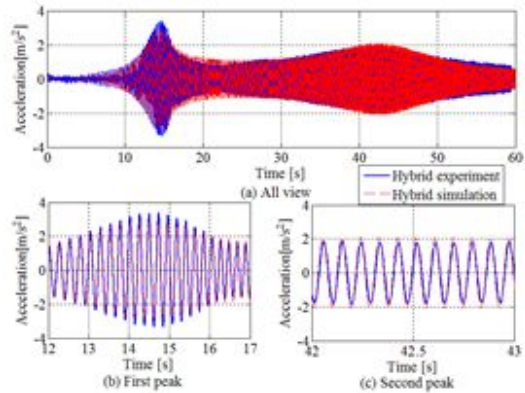


図 12 シミュレーションとの比較

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 215 No. 5 (2001), pp. 483 - 497
 (3) 白石昌武、“センサフュージョンのメカトロニクスへの応用”、日本機械学会 2008 年次大会講演資料集 Vol. 2008、No. 9 (2008)、pp. 123 -124
 越前はるか、田川泰敬、岡本峰基、3 自由度電動型加振装置を用いた他軸干渉とその制御に関する研究、Dynamics and Design Conference 2010 講演論文集
 弘中浩二、鈴木北海、鳴滝衛、田川泰敬、供試体反力を考慮した振動台制御 (振動台加速度制御を目的とした 2 自由度制御設計)、日本機械学会論文集 (C 編) 77 巻 777 号、pp.388 - 397
 Yasutaka Tagawa, Ryozauro Tagawa, David Stoten, “Characteristic transfer function matrix-based linear feedback control system analysis and synthesis”, (2009), INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL, Vol182, Issue4, pp.585-602
 Y. Tagawa, J. Tu, D. Stoten, “Inverse Dynamics Compensation via ‘Simulation of feedback control’ (IDCS)”, Proceedings of the IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 225, pp.137-153, (2011)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

霜野慧亮、青田隼一、田川泰敬、“複数の制御系の融合による高精度な追従特性を有する制御系の設計と 3 自由度電動加振機を用いた地震波再現実験”、日本機械学会論文集 (C 編) 79 巻 806 号、pp.3514 - 3524(2013)[査読有]
 DOI: 10.1299/kikaic.79.3514

[学会発表](計12件)

Mineki Okamoto, Yasutaka Tagawa, "Acceleration control of 3DOF shaking table which can suppress reaction force from test models", Proc. of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control (3 August 2014), Sapporo Convention Center, Sapporo (Japan) [査読有]

Keisuke Shimono, Yasutaka Tagawa, "A Unified Approach for Composite Filter and Controller Fusion", Proc. of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control (3 August 2014), Sapporo Convention Center, Sapporo (Japan) [査読有]

濱 郁夫、田川泰敬、"数値シミュレーションを融合したハイブリッド動的試験(HILS)における安定性の検討と対策"、第23回交通・物流部門大会(2014年12月1日)、東京大学(東京)[査読無]

K. Shimono, Y. Tagawa, "Closed loop fusion technique for the shaking table motion control", Proc. of 2013 ASME Dynamic Systems and Control Conference(DSCC), (21 October 2013), Stanford (USA) [査読有]

K. Shimono, Y. Inoue, G. Venture, Y. Tagawa, "Control methodology for stewart platform type motion simulator using closed loop control simulation via IDCS", Proc. of FAST-zero 2013, (22 September 2013), Nagoya University, Nagoya (Japan) [査読有]

神田瞬、田川泰敬、岡本峰基、"試験体反力を用いたIDCSによる3自由度電動加振機の制御"、第56回自動制御連合講演会(2013年11月16日)、新潟大学(新潟)[査読無]

羽場和樹、田川泰敬、"リアルタイム・ハイブリッド試験のパフォーマンス向上に関する研究"、第56回自動制御連合講演会(2013年11月16日)、新潟大学(新潟)[査読無]

霜野慧亮、青田隼一、田川泰敬、"複数の制御系の融合による運動制御の高精度化(3自由度電動加振機を用いた地震波再現性の検証)"、Dynamics and Design Conference 2012 (2012年9月18日)、慶應義塾大学(横浜)[査読無]

霜野慧亮、田川泰敬、"異なる周波数特性・フィードバック物理量を有する閉ループを組み合わせて構成される運動制御系設計についての考察"、第55回自動制御連合講演会(2012年11月17日)、京都大学(京都)[査読無]

霜野慧亮、田川泰敬、"複数の制御系の組み合わせによるモーションシミュレータの高精度運動再現"、第21回交通・物流

部門大会(2012年12月5日)、東京大学(東京)[査読無]

羽場和樹、渡邊達己、田川泰敬、弘中浩二、三浦淳、"数値シミュレーションと振動試験によるリアルタイム・ハイブリッド動的試験方法に関する研究"、第55回自動制御連合講演会(2012年11月17日)、京都大学(京都)[査読無]

神田瞬、岡本峰基、霜野慧亮、田川泰敬、"試験体反力の抑制を考慮した3自由度電動加振機の変位制御"、Dynamics and Design Conference 2012 (2012年9月18日)、慶應義塾大学(横浜)[査読無]

6. 研究組織

(1)研究代表者

田川 泰敬(TAGAWA Yasutaka)
東京農工大学・工学研究院・教授
研究者番号: 20216807

(2)研究分担者

VENTURE Gentiane
(VENTURE Gentiane)
東京農工大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 30538278

(3)連携研究者

梶原 浩一(KAJIWARA Koichi)
防災科学技術研究所・兵庫耐震工学センター・センター長
研究者番号: 10450256

(4)連携研究者

鎌田 崇義(KAMADA Takayoshi)
東京農工大学・工学研究院・教授
研究者番号: 60262119