

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：33108

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15142

研究課題名（和文）加速度応答記録を用いた建築構造物の残存耐震性能評価に関する基礎研究

研究課題名（英文）Basic study on evaluation of residual seismic performance of building structure using acceleration response record

研究代表者

涌井 将貴（Wakui, Masaki）

新潟工科大学・工学部・准教授

研究者番号：40778205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地震時における構造物の損傷度評価を目的として、加速度応答の2階微分を用いた手法の適用性を検討した。これまでの研究では加速度2階微分を算出するにあたり、微分処理の方法までは未検証であった。そこで、アナログ回路で微分処理を行う加速度微分センサを試作し、振動台実験によってその適用性を検討した。その結果、本提案手法によって構造物の荷重変形関係に生じる非線形性を検出することが可能であるものの、具体的な損傷位置を同定することが困難であるという適用可能範囲を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震等による災害が発生した際に、建物の継続使用性や避難の必要性を迅速に判断すること非常に重要である。本研究では加速度応答の2階微分というこれまであまり着目されていなかった物理量を用いることで、地震時に生じる損傷を検出できる可能性を示した。併せて、加速度2階微分を計測できるセンサ開発とその適用可能範囲の検証によって、実用化に向けた基礎的なデータを蓄積することができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, the applicability of the method using the second derivative of the acceleration response was examined for the purpose of evaluating the degree of damage to the structure during an earthquake. In the previous studies by the author, the method of differential processing has not been verified when calculating the second derivative of acceleration. Therefore, an acceleration differential sensor was manufactured that performs differential processing with an analog circuit, and examined its applicability by shaking table experiments. As a result, although it was possible to detect the non-linearity that occurs in the load deformation relationship of the structure by the proposed method, it was difficult to identify the damage position.

研究分野：建築構造

キーワード：加速度微分 構造ヘルスマニタリング 非線形性

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震などの広範囲にわたって被害が生じるような場合には、建物の継続使用性および復旧要否の判断を迅速に行うことが困難であり、避難所の不足や帰宅困難者の発生といった問題が生じる。このような背景から、地震等による災害が発生した際に、建物の健全性を即時に判定し、その後の継続使用性や避難の必要性を判断するための有用な方法として、構造ヘルスマニタリング技術の研究が国内外で活発に行われている。健全性判定システムの導入が進められてはいるものの、実用化に至っているシステムの多くは、設計時に想定される限界値と地震時の最大応答値を比較して評価するものとなっている。このようなシステムでは、構造部材や骨組に生じた損傷を検出することができないため、損傷に起因した剛性や耐力の低下といった残余耐震性能を定量的に評価することが困難な現状にある。

そこで研究代表者は、これまでの研究において、より構造損傷との関連付けが明確な指標として、加速度応答の高次微分を用いた損傷評価手法を提案した。提案した手法は構造物の加速度応答の2階微分によって、荷重変形関係に生じる非線形性を検出することが可能であり、損傷検出手法として有用であることを解析的・実験的に示してきた。しかしながら著者らの研究を含む損傷検出に関する研究の多くは、柱や梁などの構造部材のみを対象としたものであり天井や壁などの非構造部材の損傷を含めた研究例はほとんど見られない。被災した建物の継続使用性を評価するためには、構造部材だけでなく、非構造部材の損傷に関する情報も重要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまで進めてきた加速度応答の高次微分を用いた損傷評価手法を拡張し、非構造部材を含む構造物への適用性を検討する。また、本提案手法では、市販の加速度センサによって計測されるデジタルデータをデジタルフィルタによって微分しているが、この方法では計測ノイズが検出結果に与える影響が大きい。そこで、アナログ回路によって微分処理を行うことができる加速度微分センサの開発を行う。併せて、研究期間内に実施する振動実験だけでなく、実在建物の計測データを蓄積し、残存耐震性能評価手法の確立に向けた基礎データの蓄積を図る。

3. 研究の方法

本研究では、理論構築、数値解析による検証、振動台実験の計測データによる検証の3つの作業を並行して進め、相互にフィードバックすることで、実用的な理論を構築できるように進める。これまでの研究では、加速度記録を微分にするにあたって、デジタルデータである加速度応答記録をデジタルフィルタによって微分していた。しかしデータ処理が煩雑であり、ノイズ耐性が低いことから、アナログ回路で微分処理できるセンサを試作する。アナログ回路の設計にあたっては、これまでに検証した理論を基に抵抗値などを設定する。開発した加速度微分センサの検証を行うための振動台実験を行う。振動台実験にあたっては、使用する試験体の数値解析を行い、パラメータを決定する。併せて、振動台実験による検証だけでなく、他プロジェクトなどによって実施される実建物を対象とした計測によってデータを蓄積する

振動台実験で使用する試験体概要を図1に示す。試験体は1層1スパン鉄骨平面骨組であり、柱、梁にはSN400Bのフラットバーを使用した。柱、梁は集中質量とボルトにより剛接合としている。非構造部材を含む構造物に対する提案手法の検討にあたり、構造部材である柱、梁だけでなく、非構造部材を模擬した壁材として幅90mm、厚さ2.5mmラワン合板を設置した。ラワン合板を設置するための治具を図に示すように梁と振動台上に設置し、ボルト接合によって治具に留め付けた。

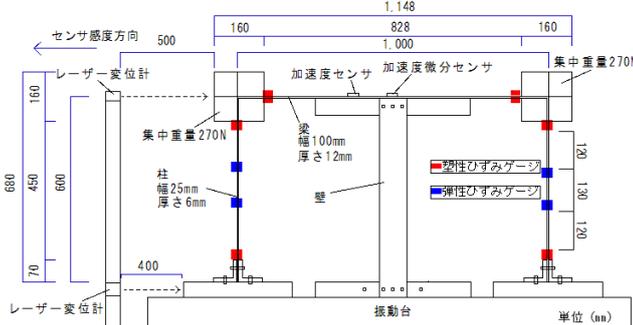


図1 試験体概要

柱のみが塑性化する試験体として設計にするにあたり、梁と柱の断面寸法を決定するため、図2に示す骨組解析モデルを用いた地震応答解析を行った。解析モデルの柱および梁は線材と材端ばねで構成し、柱脚は固定とした。材端ばねの復元力特性は完全剛塑性とし、全塑性モーメント M_p の値は素材試験結果によって得られた降伏応力度によって決定した。なお、減衰定数は1%とした。柱のみが塑性化するよう、地震応答解析の結果から試験体の梁は幅100mm、厚さ10mm、柱は幅25mm、厚さ6mmとした。

絶対応答加速度を計測するために、加速度センサを梁上部および振動台上に設置した。柱頭および柱脚の水平変位を計測するため、レーザー変位計を設置した。併せて、市販の加速度セ

ンサとの比較・検証を行うため、製作した加速度微分センサを梁上部に設置した。また、柱、梁の端部両面には塑性ひずみゲージ、柱中間部には弾性ひずみゲージを貼付け、鋼材の降伏状況を観察した。計測データはすべて1000Hzでサンプリングしている。

振動台実験には、研究代表者の所属機関が所有する3次元振動台を用い

1方向加振とした。入力地震動にはEl Centro波のNS成分を用い、入力レベル50%、125%、150%、175%、200%として加振した。本報告書では、試験体の構造部材が弾性範囲であった入力レベル50%、および柱が塑性化し、壁材の損傷が目視できた入力レベル175%の加振結果について述べる。

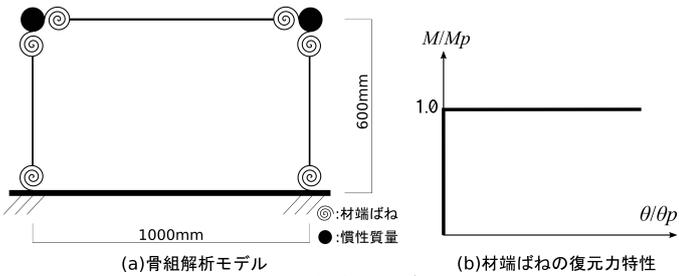


図2 解析モデル

4. 研究成果

(1) 加速度2階微分による非線形性検出手法と加速度微分センサの開発

ここでは既報¹⁾に従う1質点系における加速度2階微分による非線形性検出の閾値、推定誤差、およびノイズの影響を基に緩やかに剛性が変化する場合の非線形性検出手法を示す。

時刻 Δt ごとに得られている、離散時間ステップ j における絶対応答加速度を a_j とすると、その時間ステップにおける加速度2階微分は以下のデジタルフィルタで計算する。

$$\ddot{a}_j = \frac{a_{j+n} - 2a_j + a_{j-n}}{(n\Delta t)^2} \quad (1)$$

本提案手法では、絶対応答加速度を微分する際に、加速度記録をデータ数 n 個ごとに間引くことで時刻間隔を大きくし、ノイズの影響を低減する。検出可能範囲を決定するための閾値 \ddot{a}_{thres} 、推定誤差 \ddot{a}_{error} 、ノイズ \ddot{a}_{noise} 、および振動特性の把握のために必要な時刻間隔の上限値による条件をまとめて示すと次式となる。

$$\frac{\ddot{a}_{thres}}{\omega^2} = -\frac{k'}{k_0} v^2, \quad \frac{\ddot{a}_{error}}{\omega^2} = C_{max} g \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right), \quad \frac{\ddot{a}_{noise}}{\omega^2} = \frac{4}{(\omega\Delta t)^2} N_{max}, \quad \omega\Delta t \leq \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

ここで、 k_0 は初期剛性、 ω は固有振動数、 C_{max} は最大せん断力係数、 g は重力加速度である。また、 k', v は検出すべき折れ曲がり点における瞬間剛性の微分と応答速度、 N_{max} は計測された応答加速度に含まれるホワイトノイズの最大振幅である。

本研究では、前述したデジタルフィルタによる非線形性検出手法で得られた知見を元に、アナログ回路で微分処理を行う加速度微分センサの製作を行った。製作した加速度微分センサは2台であり、始めに製作したものを1号センサ、その後に製作したものを2号センサとし、それぞれの回路図と外観写真を図3~6にそれぞれ示す。

1号センサは加速度、加速度1階微分、加速度2階微分の計3種類が出力される。可変抵抗の値は最大85.8kΩまで1kΩ単位でダイヤルにより変更が可能である。本報告書においては詳細は割愛するが、まずは1号センサを用いて振動実験を行ったところ、ノイズの影響が大きく、試験体が塑性化し、荷重変形関係に非線形性が生じたにもかかわらず、加速度2階微分の時刻歴波形に明確なピークが観察されなかった。可変抵抗の値を上限値である85.5kΩとした場合には、時刻歴波形にピークが観察されたものの、試験体の荷重変形関係に生じる非線形性との整合性が確認できなかった。

そこで2号センサでは、加速度、加速度1階微分、加速度2階微分に加えて加速度2階微分(増幅)の計4種類を出力可能とした。加速度、加速度微分、加速度2階微分については1号センサと同様である。追加した加速度2階微分(増幅)では、加速度2階微分からノイズ低減を目的としたローパスフィルタと振幅の増幅処理を行った結果が出力される仕様とした。

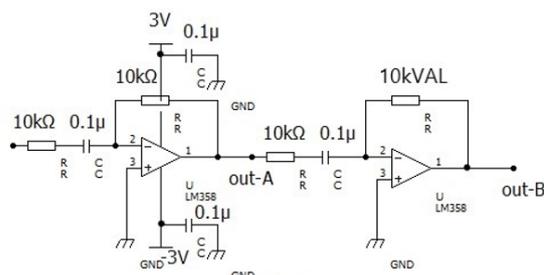


図3 1号センサ回路図



図4 1号センサ外観

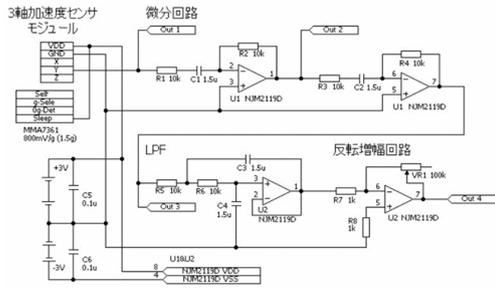


図5 2号センサ回路図

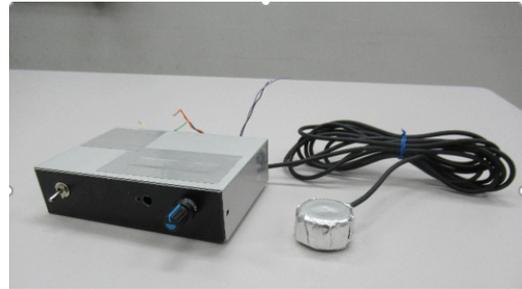


図6 2号センサ外観

(2) 鉄骨造試験体による振動台実験結果への適用性

入力レベル125%の場合について、加速度センサによる計測記録をデジタルフィルタを用いて算出した加速度2階微分および加速度微分センサによる加速度2階微分と荷重変形関係を図7に示す。加速度微分センサについては、ローパスフィルタなどの処理をしていない場合（アナログフィルタ1）と、ローパスフィルタおよび増幅した場合（アナログフィルタ2）の2通りを示す。荷重変形関の横軸は2つのレーザー変位計から算出した層間変形であり、縦軸は集中質量と加速度応答記録の積によって算出した層せん断力である。時刻歴波形に示す青線は検出の閾値であり、赤色のプロットは加速度2階微分の値が閾値を超えた時点を示している。

試験体の柱は塑性化しておらず、非構造部材である壁材にも目視で判断できるような損傷は生じていなかった。しかしながら、荷重変形関係は線形とはなっておらず、非線形性が生じていることから目視では確認できなかったが、壁材のボルト接合部などで損傷が生じていたと考えられる。加速度2階微分時刻歴波形を観察すると、(a)デジタルフィルタでは荷重変形関係で非線形性が生じた時点でピークが確認できる。一方で(b)アナログフィルタ1でも、時刻歴波形のピーク時点において、荷重変形関係に非線形性が生じている場合があるものの、ノイズの影響が大きく、線形挙動時点でも閾値を超える場合がある。(c)アナログフィルタ2では(b)に比べてノイズの影響が低減できているものの、ピーク時点では荷重変形関係がほぼ線形となっている。

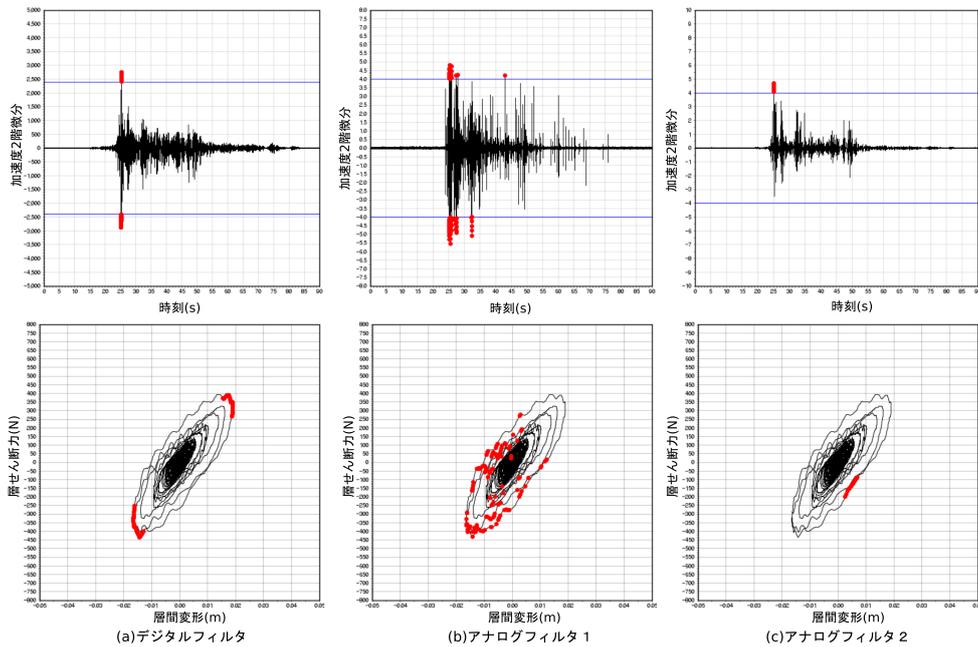


図7 入力レベル125%

入力レベル125%と同様、入力レベル175%の計測結果を図8に示す。試験体の柱は塑性化しており、壁材上部のボルト接合部において合板にき裂が生じた。荷重変形関係には非線形性が生じている。加速度2階微分時刻歴波形を観察すると、入力レベル125%と同様、(a)デジタルフィルタでは荷重変形関係で非線形性が生じた時点でピークが確認できる一方、(b)アナログフィルタ1では、ノイズの影響が大きく、時刻歴波形のピークと荷重変形関係の非線形性が不整合となる場合が散見された。(c)アナログフィルタ2では(b)に比べてノイズの影響が低減できているものの、ピーク時点では荷重変形関係がほぼ線形挙動となっていることがわかった。

今回の振動台実験によって、荷重変形関係上に生じる非線形性を加速度2階微分によって検出できる可能性を示した一方、損傷部位を同定することが困難であることがわかった。

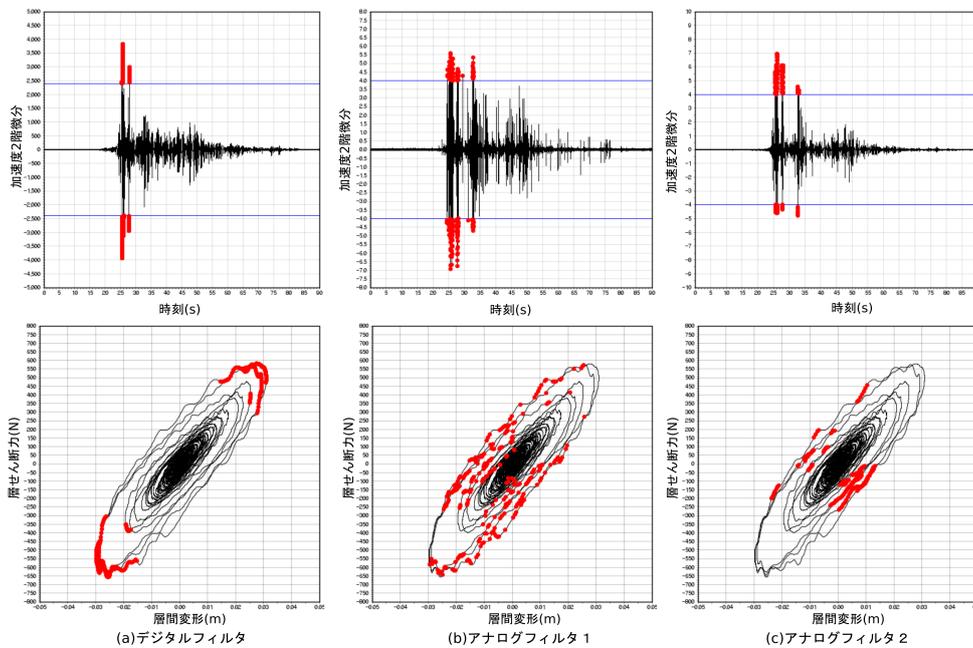


図8 入力レベル175%

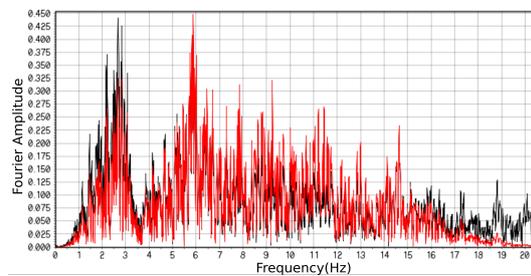
フィルタ処理方法による検証のため、加速度微分センサによって計測された加速度応答記録をデジタルフィルタで2階微分した場合と、アナログ回路上で2階微分した場合のフーリエ振幅スペクトルと時刻歴波形の比較を図9に示す。どちらも赤線がデジタルフィルタ、黒線がアナログ回路での結果となっている。なお、時刻歴波形は比較しやすいように拡大している。

図9(a)によると振動数によっては、振幅の値が異なる部分が観察されたものの、スペクトル形状に大きな違いは見られなかった。一方で図9(b)時刻歴波形においては、波形状は同様となっているものの、デジタルフィルタに比べて、加速度微分センサでは時刻遅れが生じていた。これは、ノイズ低減処理を目的としたローパスフィルタによって生じたものと考えられる。そのため、加速度微分センサの値が閾値を超えた時刻と、振動系の荷重変形関係上で剛性が変化した時刻が一致しない結果となることがわかった。

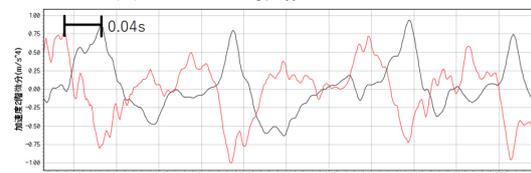
(3) 知見

- ① 製作した加速度微分センサは市販の加速度センサと同様に計測可能であることを確認した。ただし、回路の製作時点で検出可能範囲が決定してしまうため、回路設計段階での検証が重要であることがわかった。またノイズ低減を目的としたローパスフィルタを組み込んだことによって時刻遅れが生じ、荷重変形関係上の非線形性発生時刻とのずれが生じた。
- ② 鉄骨造平面骨組を対象とした振動台実験結果から、非構造部材を含む構造物であっても、加速度2階微分によって荷重変形関係上の非線形性を検出可能であることがわかった。しかし、検出した非線形性の発生原因が構造部材によるものなのか、非構造部材によるものなのかを同定することは困難であった。

本研究成果を総括すると、加速度2階微分からは荷重変形関係に生じる非線形性は検出可能であるものの、具体的な損傷位置を同定することは困難であるという適用可能範囲を明らかにした。製作した加速度微分センサは直接加速度2階微分を計測できるため、デジタルフィルタと比較してリアルタイム性が高いといえるが、時刻遅れの影響や回路設定に課題が残る。また研究期間内における他プロジェクトへの参加などによって、実建物を対象とした地震応答計測記録が蓄積されている。今後も引き続き計測を行い、データの蓄積を行っていく予定である。



(a) フーリエ振幅スペクトル



(b) 時刻歴波形
図9 フィルタ処理による比較

参考文献

- 1) Jun IYAMA, Masaki WAKUI: Threshold value and applicable range of nonlinear behavior detection method using second derivative of acceleration, International Journal of Japan Architectural Review for Engineering and Design, vol. 2, issue 2, pp.153-165, 2019.2.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 涌井将貴, 伊山潤, 本吉弘岐	4. 巻 28
2. 論文標題 鉄骨造体育館のひずみ計測に基づく地震時の応力分布評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 968-973
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 -

1. 著者名 涌井将貴, 白井佑樹, 伊山潤	4. 巻 29
2. 論文標題 鉄骨造体育館のひずみ計測に基づく地震時のブレース挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 226-231
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masaki Wakui, Kazuki Buto, Jun Iyama, Eiichi Sato
2. 発表標題 Nonlinearity Detection Method of Shaking Table Test with Frame Using Second Time Derivative of Absolute Acceleration
3. 学会等名 10th International Symposium on Steel Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 涌井将貴, 伊山潤, 長谷川隆
2. 発表標題 梁端破断を伴う鉄骨造2層骨組の地震応答に関する振動台実験 その5 加速度2階微分による非線形性検出手法の適用性
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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