

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 30日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760172

研究課題名（和文） 生物の歩行に学ぶセミアクティブ振動制御

研究課題名（英文） Semi-active vibration control inspired by smooth locomotion of animate beings

研究代表者

射場 大輔（IBA DAISUKE）

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：10402984

研究成果の概要（和文）：本研究では、身体のサイクリックな運動である歩行運動に関連しているとされる神経振動子の働きを減衰係数励振の制御方法に取り入れることを目的とし、その基礎的な検証を行った。減衰の係数励振においては実際の可変ダンパの非線形性が含まれる状況で利用できるような制御則の導出を行い、さらに並列に連結された構造物での利用方法を提案した。また、振動子の有する基本特性を把握するため、1自由度構造物に設置したアクティブ動吸振器を対象に、神経振動子とPD制御を組み合わせた制御器を導出し、数値計算によってその有効性を検証した。また提案した制振手法の同期特性の評価を行うため、非線形振動子の同期を評価する位相縮約法を利用して振動子の位相特性を評価することでシステム全体の評価を行う手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：This study proposes new vibration control methods using neural oscillators. One of the methods is for active mass dampers and the other one is based on harmonically varying damping for semi-active dampers. In biological study, Central Pattern Generators (CPGs) consisted of the neural oscillators in bodies playing a significant role in the walking have been learned over the last few decades. In this study, the algorithm is installed into the controller for the active mass damper requiring robustness and stroke limitation, and is tried to embed into the controller for the semi-active damper. Moreover, this study shows an evaluating method of synchronization between a structure and the CPGs installed in the controller using phase reduction theory. In addition, this study demonstrates application of the harmonically varying damping to MR dampers and the effect of the harmonically varying damping on a coupled structure in parallel with the variable damper.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2011年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |

研究分野：機械力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御、免震、制震、制御工学、耐震

## 1. 研究開始当初の背景

高出力・軽量・低コスト・高効率化が進む機械及び、高層化・長大化が進む建築・土木構造物の振動制御は非常に重要な課題である。こうした問題に対してパッシブ制御やアクティブ制御に関する研究が活発に行われてきた。近年、この両者の長所を受け継ぐセミアクティブ制御が提案され免震構造物などに実用化されるに至っている。これらの制振手法の基本は減衰装置による振動エネルギーの消散を目的とするものであり、セミアクティブ制御も目的は同じであった。

これに対し申請者はこれまでとはまったく異なる可変ダンパの利用方法について提案した。この手法は、可変ダンパの減衰を制御することによって振動振幅を減少させるのではなく逆に増加させ、振動系が有する固有振動数以外の振動数において共振を誘起する方法である。これまでの研究の結果、基礎励振を受ける1自由度系に可変ダンパを設置し、可変ダンパの係数を振動数5で変動させて人工的な係数励振を起こすと、図1に示す共振曲線が得られることが分かっている。

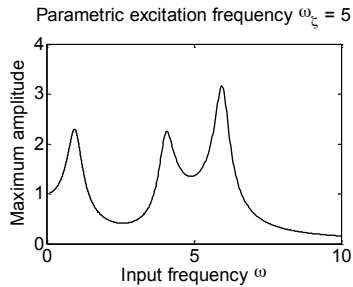


図1. 減衰係数励振系の周波数応答曲線

この図から、減衰の係数励振を行うと1自由度系の固有振動数である1付近において共振が得られる他に、可変減衰の振動数5を挟んだ両側にも大きな共振が得られることがわかる。また、これまでの研究から減衰係数励振に付随して得られる共振は、入力振動数が何であれ、出力振動数は通常の場合と同じくほぼ固有振動数と一致し、得られる応答の位相は減衰係数励振に与える位相で制御できるという知見を得ている。

さらに代表者はこの関係を利用して、複数の振動数成分を有する入力に対して、例えばもし入力に固有振動数成分が含まれていて共振が発生する状況でも、他の振動数成分と減衰係数励振を利用して逆位相の共振を発生させれば応答の干渉が起こり、結果として共振の振幅が低減できると考え、図2に示すように2つの振動数の入力に対してパッシブ系では共振が発生するが、減衰係数励振によって共振時の振幅低減が可能であることを数値計算により確認した。また、現在、提案

した手法をフィードフォワード制御として利用できるようにし、MRダンパを利用した制振実験に取り組んでいる。しかしながら、対応できる外乱は正弦波入力に限られている。

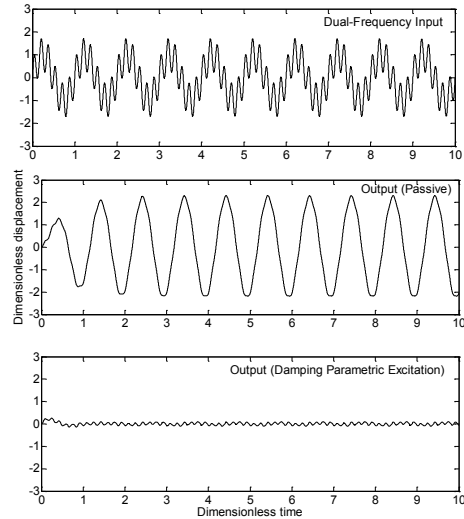


図2. 減衰係数励振による外乱相殺制御(上:入力, 中:パッシブ系出力, 下:セミアクティブ系出力)

一方で、生物の歩行に関する研究において Central Pattern Generator (以下 CPG) に注目が集まっている。動物の歩行にはその体内にあるリズム発生器が深く関わっているという報告例があり、例えば人体という冗長なシステムに対して CPG からの単純な命令で歩行という複雑な動作をロボストに行わせることが可能であるとされ、この原理を利用したロボットの歩行に関する研究が盛んに行われている。それらの研究では歩行などの脚式移動を振動と捉え、外部環境の変化に対して CPG による振動生成・適応を試みている。例えば、CPG 出力を利用して四足歩行ロボットの対となる二足のアクチュエータを逆位相で同期させ、センサ入力に対して適切な位相関係を保持・生成できるように制御系を構成し、不整地走行を可能にする方法などがある。

## 2. 研究の目的

本研究ではランダム入力を受けて振動している構造物に対して、生物の有する柔軟な制御アルゴリズムを利用してセミアクティブ制振を行うシステムの開発を目指している。

最終的な目標は神経振動子を利用して減衰係数励振の制御(セミアクティブ制御)を行うことによって構造物の制振を成し遂げることであるが、神経振動子を利用した CPG の導入をアクティブ・セミアクティブの制振装置に応用した例は代表者の知限りでは報告されていないため、基礎的な適用方法及

びその効果について把握することから始める必要がある。そこで研究期間内において次に挙げる2点を課題とし、解決を図ることで次の研究フェーズへとスムーズに移行する。

#### ①CPGによるアクティブ振動制御方法の開発

CPGをアクティブ振動制御に導入する方法について検討する。主系にアクティブ動吸振器を設置したモデルにおいて、主系とアクティブ動吸振器の適切な位相での同期を発生させる手法に焦点を当て、CPGを制振に利用するための基礎事項を明らかにする。

#### ②CPGによるセミアクティブ振動制御方法の開発

可変減衰装置を組み込んだ構造物を対象に、アクティブ制御で検討したCPGを可変減衰に与える振動数と位相の制御という観点で導入し、入力によって変化する主系の振動状態により適切に対応できる減衰係数励振の制御器を開発する。

### 3. 研究の方法

前述した研究の目的を達成するために、次のような計画と方法で研究に臨んだ。

#### ①平成22年度の計画及び方法

##### 研究1. CPGによるアクティブ動吸振器の制御

本研究では第一段階として図3に示すアクティブ動吸振器を設置した1自由度振動系の主系を振動制御の対象とし、観測した主系の振動状態を利用してアクティブ動吸振器に与える制御指令をCPGによる制御器によって生成することを目指す。

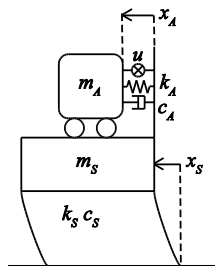


図3. アクティブ動吸振器と構造物

CPGのモデルとしては、松岡によって提案された伸筋と屈筋の駆動をモデル化した非線形の連立微分方程式による神経振動子が広く用いられており、本研究でも松岡モデルを用いる。CPGモデルは、生物規範型の歩行手法としてロボットの歩行制御に利用されており、自律的な適応機構を持った歩行運動生成の試みが成されている。こうした手法をアクティブ動吸振器による構造物の制振に対して利用するための基本となるアイデアは次のようになる。

一般的に、構造物の振動を低減させるため

の動吸振器の動作は、主系の振動状態に対して90度の位相で作用すればその反力で制振が行えることになる。二足歩行ロボットの場合、左右の脚(機械系)、地面との接地(外部環境による影響)、そして脚の制御装置(位相振動子)を考え、環境からの機械系へのフィードバックによって発生する位相の変化を位相振動子の引き込み作用によって適切な位相状態(左右の脚が逆位相となる状態)へ戻すことで環境変化に強い周期運動を生成しているが、例えばロボットの右脚を構造物の主系と見なし、またロボットの左脚を補助振動系である動吸振器と見なしたモデルに置き換えて、両者の系が地震の加速度外乱によってその状態量に変化を受けると考えれば、ロボットの対となる二脚を逆位相で制御するCPGの制御器と同様に、主系に対して動吸振器を常に適した位相状態で周期的な動作をさせることが可能になる。こうしたCPGと機械系(主系となる構造物とアクティブ動吸振器)及び環境間の相互作用を検討しながら松岡モデルによる神経振動子と構造物の接続方法及び神経振動子のパラメータを決定する。特に制御器の構造として神経振動子は構造物と動吸振器からの応答を入力とし、両者に必要となる位相関係を出力するリズム発生器とし、そのタイミングに合わせて動吸振器の位置をPD制御により行うシステムを開発する。

##### 研究2. 減衰係数励振のセミアクティブ制御

次にアクティブ動吸振器用CPGを改良して可変減衰による係数励振の制御を行うための準備として、セミアクティブ振動制御器の開発を行う。

初めに、これまでに提案した減衰係数励振によるセミアクティブ振動制御法の実現性を、MRダンパを使用した免震構造物に適用することにより検討する。提案した制御則をMRダンパで利用できるよう改良し、その有効性を次の方法で確認する。Bouc-Wenによる履歴復元力特性を表すモデルを利用してMRダンパの特性を表現し、構造物の免震層にダンパを設置した場合の数値シミュレーションを行う。また、MRダンパを利用したリアルタイムハイブリッドシミュレーション装置を使用し、実際のダンパを利用した実験を行う。

次に可変ダンパにより連結した構造物の制振問題において減衰係数励振を利用する制御則を開発する。連結される構造物はそれぞれ異なった固有振動数を有している状態を考える。減衰係数励振の変調を利用すれば固有振動数成分で振動している構造物を利用して固有振動数成分以外の振動数成分の力をダンパにより発生させることができる。この現象を利用して、連結した先の構造物の見かけ上の減衰比を増加させるような制御

アルゴリズムを導出する．ここでは入力には正弦波のみに限定し，その入力に対する制御器の開発を進める．

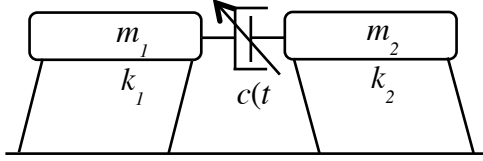


図4. 可変ダンパによる連結構造物

#### ① 平成23年度の計画及び方法

##### 研究3. アクティブ動吸振器による制振実験装置の開発

平成23年度は主に前年度に開発したアクティブ動吸振器用のCPG制御器の有効性を実験によって確認するためのシステム開発を行う．実験装置には現有設備の振動台を利用し，主系となる振動系を製作，そしてステップモータを利用した位置決め制御が可能な補助質量を有するアクティブ動吸振器を開発して主系の最上階に設置する．松岡の神経振動子を利用する制御器をPC内に実現し，正弦波入力による実験を行うことで提案した制御アルゴリズムの有効性と制振性能について実験的に検証する．

##### 研究4. 非線形振動子によるセミアクティブ制御

可変ダンパを利用して連結した構造物を対象に開発した減衰係数励振制御器をランダムな外力を受けている状況を想定し，神経振動子により必要となる振動成分を取り出す手法について検討する．非線形な振動子である神経振動子にはその自然周波数近傍の入力が作用した場合に，入力周波数に引き込まれて同期する性質がある．そこでこの性質を利用し，地震入力作用している構造物から構造物の主となる応答，すなわち構造物の固有振動数近傍の成分のうち，減衰係数励振で利用する周波数成分を抜き出し，前述した制御則に必要な応答成分の振幅と位相情報を利用して制振を行うシステムを開発を行う．

#### 4. 研究成果

研究計画と方法に基づいて図5に示す神経振動子とPD制御器を利用したアクティブ動吸振器による制振システムを提案した．二つの順応素子から構成される松岡型の神経

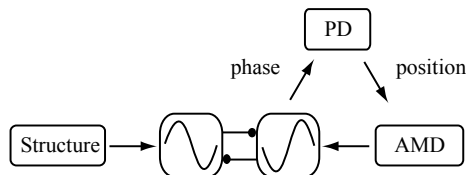


図5. 神経振動子を利用したアクティブ動吸振器の制御システム概念図

振動子を二つ用意し，相互接続した対型のCPGをシステムに取り入れた．このとき，片方の神経振動子を構造物に，もう片方の神経振動子は動吸振器に接続し，それぞれの神経振動子が構造物と動吸振器の動作に同期し，かつ，二つの神経振動子が相互同期を起こす構成とした．

これにより，外力によって振動する構造物と動吸振器，さらに制御システムまでを含めて引き込みを起こす状態となり，安定したリズムを生成するシステムが構成できた．本システムを組み込んだ正弦波入力をうける構造物に対して振動制御を行うシミュレーションを行った結果，図6に示す結果を得た．

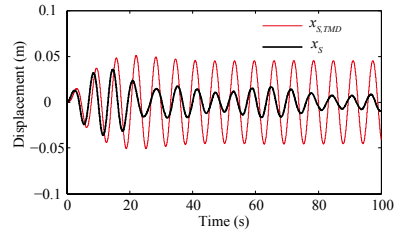


図6. 提案した制振システムとパッシブ制振システムの性能比較

この図は振動制御を行った場合とそうでない場合の構造物の変位を示している．明らかにアクティブ動吸振器を作動させた場合に，応答が低減できていることがわかる．

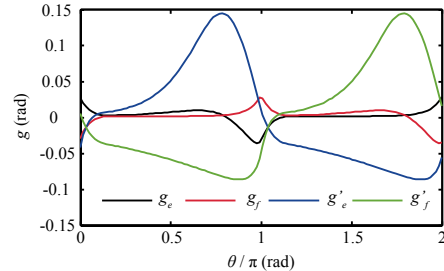


図7. 松岡神経振動子の位相応答関数

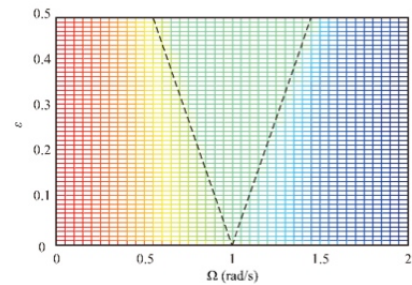


図8. 神経振動子の同期領域

次に提案したシステムを評価する方法の検討を行った．非線形振動子の同期現象を評価するための手法，位相縮約理論を神経振動子に対して適用した．その結果，位相応答関数(図7)，の位相感受関数，さらに位相結合関数が得られた．位相結合関数から神経振動子の外部入力に対する同期範囲を導出した．導出した結果を図8に示す．この図にお

いて同期を示すのは点線で囲んだ範囲であり、数値シミュレーションにより得た同期範囲である緑色の領域とほぼ重なっていることがわかる。これより、全領域に対して数値シミュレーションを実施し、非線形な神経振動子の同期範囲を求める必要がなく、位相結合関数から得られた結果の信頼性があることがわかる。今後はこの位相縮約理論を制御システム全体の同期特性の検証に利用できると考えている。

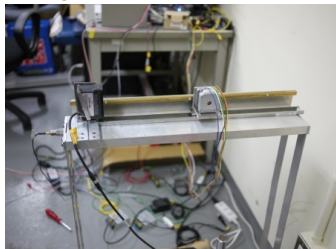


図9. 開発中のアクティブ動吸振器と制御システム

また、提案する制振システムの有効性を実験的に実証するため、アクティブ動吸振器と構造物の実験装置を開発している。構想構造物を模擬した小型の一自由度振動系の上部に、ステッピングモータで制御する動吸振器を構成した。動吸振器の補助質量としてモータ自身を利用しており、ピニオンとラックを介して構造物上部のスペースをモータが並進運動する。構造物の絶対加速度を加速度センサによって、また動吸振器の構造物に対する相対変位をレーザー変位計で測定し、それらセンサシステムからの出力をコンピュータ内に実現した神経振動子に入力し、動吸振器を移動させるタイミングをその出力により判断する。構造物の応答振幅から補助質量を移動させる目標変位量を決定し、PD制御によってその目標値に対する位置制御を行うシステムとした。開発している実験装置の写真を図9に示す。現在、ステッピングモータの特性や構造物の特性を考慮したシミュレーションモデルを作製し、実験装置の動作と比較することでその有効性を検証している。

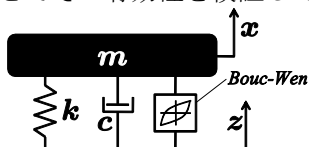


図10. セミアクティブ免震システム

図10に示すMRダンパの利用を想定した一自由度構造物のセミアクティブ免震ではMR流体の特性を考慮した制御器の導出を行った。入力の振幅に合わせて変化する一周当たりの消散エネルギーを考慮した補間係数を導出することによって、実際のMRダンパに与える電圧指令を制御することによって

十分な制振効果が得られることを確認した。さらに実際のMRダンパを利用するリアルタイムハイブリッドシミュレーションシステムにより、実験によってこれまでに提案した制御器の有効性を確認した。

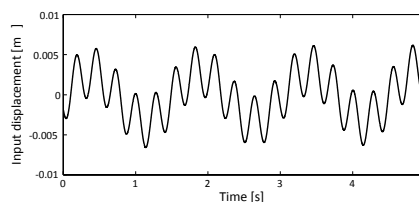


図11. 構造物への地盤入力

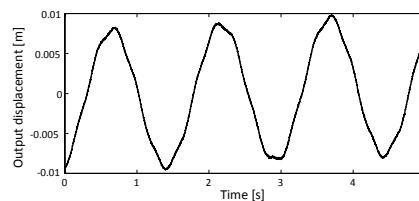


図12. 構造物の応答 (パッシブ系)

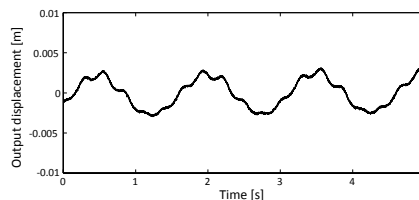


図13. 構造物の応答 (セミアクティブ系)

図11に構造物に与えた入力を、さらに図12にはパッシブ系の応答を、図13にはセミアクティブ系の応答を示す。入力には構造物の固有振動数が含まれており、パッシブ系では共振による応答の悪化が見られるが、セミアクティブ系では入力振幅以下にその成分が抑えられていることがわかる。

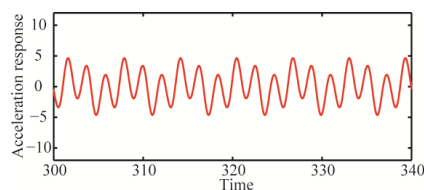


図14. 高い固有振動数の構造物の加速度応答

また、可変ダンパで連結した構造物モデルの減衰係数励振による制振問題では次のような結果を得た。開発した制御器を利用することによって、最大の加速度や変位振幅については従来のOn-Off制御によるセミアクティブ制振と同様の結果を得たが、減衰係数が制御によって正弦波状に変化するため、通常、の減衰係数の最大値と最小値を切り換える制御によって発生する加速度応答での急激な変動が見られず、スムーズな制振が行えることを確認した(図14)。

以上の問題では入力を正弦波に限っていたため、開発した制御器を直接地震波などの

ランダム入力作用するシステムに利用することができない。そこで現在、非線形振動子を利用してランダム入力によって振動している構造物の応答から開発した制御器に必要な構造物の固有振動数近傍成分の瞬時振幅や位相の情報を抽出する方法を開発している。現在、通常時のリミットサイクルが円弧を描くスクウェアトランダウ方程式による振動子を構造物の複雑な応答をフィルタリングするために利用する方法について数値シミュレーションを通して検討している。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. D. Iba, B. M. Phillips, B. F. Spencer Jr., Evaluation of Semi-active Control using Harmonically Varying Damping by Real-time Hybrid Simulation, Journal of System Design and Dynamics, Vol.6 (2012), No.1, 2012/2; 1-11 査読有.
2. D. Iba, B. F. Spencer Jr., Vibration Control Using Harmonically-varying Damping, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5 (2011), No. 5, 2011/7; 727-736 査読有.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. S. Hirohata and D. Iba, Frequency response analysis of multi-degree-of-freedom system with harmonically varying damping, Proc. SPIE 8345, 83453R (2012); <http://dx.doi.org/10.1117/12.915041> , Mar. 13, 2012, San Diego, CA.
2. J. Hongu and D. Iba, Mutual synchronization between structure and central pattern generator, Proc. SPIE 8345, 83451E (2012); <http://dx.doi.org/10.1117/12.915045> , Mar. 13, 2012, San Diego, CA.
3. S. Hirohata, D. Iba, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, Semi-Active Base Isolation with Harmonically Varying Damping (Performance Improvement and Application to MR Damper), The 14<sup>th</sup> Asia Pacific Vibration Conference, No. 106 (2011), pp. 1839-1848, Dec. 7, 2011, Hong Kong, China.
4. J. Hongu, D. Iba, M. Nakamura, I. Moriwaki, Control Method of Active Mass Damper using Neural Oscillator, The 14<sup>th</sup> Asia Pacific Vibration Conference, No. 129 (2011), pp. 640-649, Dec. 5, 2011, Hong Kong,

China.

5. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の地震入力に対する応答解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011, CD-ROM 論文集, No.353, pp.1-6, 2011年9月8日, 高知.
6. 廣畑賢, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 調和的な可変減衰器を用いたセミアクティブ免震(性能改善とMRダンパへの適用), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011, CD-ROM 論文集, No.327, pp.1-6, 2011年9月6日, 高知.
7. D. Iba and J. Hongu, Structural vibration control by tuned mass damper using central pattern generator, Proc. SPIE 7981, 79814Q (2011); <http://dx.doi.org/10.1117/12.880406> , Mar. 10, 2011, San Diego, CA.
8. D. Iba and B. F. Spencer, Jr., Vibration control using harmonically-varying damping, Motion and Vibration Control Symposium 2010, No.1C21, pp.1-10, Aug. 17, 2010, Tokyo.
9. D. Iba and B. F. Spencer, Jr., Impulse response reduction using harmonically varying damping, Proc. of the 2010 ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Seismic Engineering Volume, PVP2010-25758, 2010, pp.1-8, July 20, Bellevue, WA.
10. D. Iba, B. M. Phillips and B. F. Spencer, Jr., Evaluation of semi-active control using harmonically varying damping by real-time hybrid simulation, 5<sup>th</sup> World Conference on Structural Control and Monitoring, (2010), No.260, pp.1-13, July 13, 2010, Tokyo.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

射場 大輔 (IBA DAISUKE)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：10402984

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：