

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04068

研究課題名(和文) 両手操作型用具を介する跳・投・打動作の動力的貢献分析によるコツの抽出と検証

研究課題名(英文) Extracting and validations of tips for improving the performances via dynamic contribution analyses of double-handed vaulting, throwing, and hitting motions using instrumented equipment

研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：50272670

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)：両手によって用具を扱うスポーツ動作では、左右各上肢と用具とが、機構的な閉ループ系を構成するため、用具の動きを計測しても、左右の各手のキネティクスは不明である。そこで、本研究では、閉ループ問題の解決および順動力的貢献分析により、これらの動作では、どの関節トルクや動きが、パフォーマンスにどのような影響を及ぼしているかを定量化することを試みた。その結果、ハンマー投げでは、自励系の特性が大きく関与することを割り出した。また、棒高跳びやゴルフスウィングでは、センサーグリップを考案し、その精度向上のために、ひずみ信号の時間微分をも考慮した変換関数を設けることが有効であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのバイオメカニクスの学問領域では、キネマティクスの変数やキネティクスの変数とパフォーマンスとの相関から、統計的にスポーツ動作の生成メカニズムを推察していたが、相関に基づく分析では、力学的なメカニズムを説明することはできなかった。本研究では、対象とする系の運動方程式が有する入力(関節トルク)と出力(パフォーマンス的指標)との因果関係を含む順動力的な貢献分析を可能としたことによって、これまでのバイオメカニクスの分析手法では扱うことができなかった複雑なスポーツ動作のメカニズムを明瞭化することを可能としている。

研究成果の概要(英文)：Sports motions, where the left and right upper limbs and equipment form a mechanistic closed-loop system, so that even if the motion of the equipment is measured, it is generally difficult to know the kinetics of each hand acts on the equipment. Therefore, the closed-loop solution and the forward dynamic contribution analyses were used to quantify the functional roles of joint torques to the generation of performance outputs in these movements. As a result, in the hammer throw, we determined the characteristics of the self-excited system play a significant role in the increase in head speed from the analyses based on the equation of motion of the system derived by a simplified modeling. In the pole vault and golf swing, instrumented grip handles with strain sensors were devised to solve the closed-loop problem for each hand kinetics, and a transformation function that also takes into account the time derivative of the strain signal was found to be effective in improving the accuracy.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：両手操作 閉ループ問題 順動力的貢献分析 因果関係 コツ シミュレーション 運動方程式 マルチボディ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ハンマーヘッドスピードの増加メカニズムは明らかにされておらず、パフォーマンス向上策は不明であった。同様に、棒高跳びポールを大きく変形させる技術における左右上肢の役割については定量的には明らかにされておらず、現場で使える知見が求められていた。ゴルフスウィングにおいても、左右上肢各関節トルクの役割は不明であり、どのようなしくみによって、ヘッドスピードが増加するかについての知見は乏しかった。さらにそのしくみにおけるシャフトの変形の順動力学的な影響について説明はされてきていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、陸上ハンマー投げ、棒高跳び、ゴルフスウィングなど、左右各手と用具とが構造的な閉ループ系を生じさせるスポーツ動作を対象として、パフォーマンスとの関連が深い物理量生成のメカニズムを、対象とした系の運動方程式の有する因果関係を利用して、明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1)陸上ハンマー投げの分析方法について

陸上競技のハンマー投げにて使用されるハンマーは、鉄球に回転対偶を介してワイヤーが、ワイヤーに回転対偶を介してグリップハンドルが連結された 3 セグメントのリンク系であり、回転対偶はトルクを生じさせない機構となっているため、力学的には、列駆動型の多体系である。選手の身体-ハンマー系をモデル化する際、ターン動作中において、選手は左右の上肢を三角形に固定して、ハンドルを操作することを勘案して、選手の左右上肢-ハンマー連成系を 3 セグメント剛体リンク系としてモデル化した。これにより、複雑な選手のダイナミクスを非常に簡単なモデルによって近似することを可能としている。この身体ハンマー系の運動方程式は、構成セグメント重心の並進及び回転の速度ベクトルよりなる一般化速度ベクトル  $V$  を用いると次式として記述することができる。

$$\dot{V} = A_N N + \bar{A}_V V + A_G G + A_{n_r} n_r + A_{\eta} \dot{\eta} + A_{Acc,ShC} \ddot{x}_{ShC} \quad (i)$$

式(i)を用いると、ターン動作中におけるハンマーヘッドの生成メカニズムを定量化することが可能となる。

(2)前述した分析方法を用いてハンマーヘッドの生成メカニズムを定量化する際に、遠心力やコリオリ力といった、多体系の各セグメントが拘束に回転しながら運動する際に生じる見かけの力の影響が大きな際には、その生成要因を明らかにする必要がある。この点についても、研究代表者によって提案されている手法を用いて、運動依存項の生成要因をあきらかにする。

#### (3)棒高跳びの分析方法について

使用する用具であるポールの材質が自然素材の木から人工素材(繊維強化プラスチック)へと変遷したことにより、大きく湾曲するポールの復元力を利用して、跳躍者は倒立とバーのクリアを行えるようになり、記録が大きく向上した経緯から、ポールの大変形に関係すると考えられる左右上肢のポールへの作用力を定量化するセンサポールの開発を行った。また、その精度検証を

可能とするために、ボールの先端力を計測可能とするために、ボール先端を突き入れるボックスの下に地面反力計を設置した室内実験環境を構築しての跳躍動作時の精度検証を行った。

#### (4) 上肢のキネティクスの分析を可能とするセンサーボールの開発とその精度検証について

棒高跳ボールのグリップ部近傍に FRP 素材用のひずみゲージを多数貼付し、跳躍中の左右各手の作用力の計測を可能とするセンサボールを開発した。ボールが大変形中このひずみゲージ出力信号と作用力や作用モーメントに対する静的大変形条件でのキャリブレーション実験の装置を開発して、跳躍動作における地面反力計の出力とモーションキャプチャーを利用して計測したボールの変形形状から、センサーボール出力の検証をおこなった。その際の各種物理量への変換誤差を低減するために後述する方策を考案して対応した。

#### (5) センサーボールの精度向上策について

棒高跳びボールは金属などと比較して変形し易いことから、速度に関する影響が大きいことが想定される。しかし、速度に関する感度・干渉を特定するためには、実際の跳躍または同等の速度を再現する必要がある。また、変位と速度の両方の感度・干渉に関するパラメータを推定する場合、パラメータの数が多くなることから適切な推定が難しくなる。そこで、大変形キャリブレーションにおけるパラメータ推定では、主に変位に関する係数を推定し、跳躍試技におけるパラメータ推定では、変位と速度に関する係数の両方を推定することによって、速度に関するパラメータの推定と、変位に関するパラメータに含まれる誤差を低減させることをおこなった。また、変換関数の多項式係数の算出にはカルマンフィルタを活用した。

#### (6) センサーゴルフグリップの精度向上について

静的な精度向上策として、地面反力計とアルミフレームとプーリーを用いた静的なキャリブレーションを可能とする多軸負荷付加装置を作成して、センサーの校正を行った。

#### (7) センサーゴルフグリップの動的負荷下の精度向上策について

上記項目(6)について記した静的な負荷条件におけるセンサーゴルフグリップにおけるセンサーのキャリブレーション係数では、ゴルフスウィングにおける動的な負荷条件では、誤差の低減が困難となることが、同様の構造のセンサーグリップハンドルにおいて明らかになっていることを受けて、その誤差低減方法について検討した結果、モーメントに対する荷重速度を考慮することにより、精度の向上を可能としている。

## 4. 研究成果

### (1) ハンマー投げのヘッドスピード加速メカニズムについて

投擲者の左右上肢-ハンマー連成系を二つの非駆動関節(受動関節)を有する剛体 3 リンクモデルによって近似し、この 3 リンク系の運動方程式を用いて、国内一流競技者と大学線種とで、ヘッドスピード加速メカニズムの比較を行った結果、関節トルク項、重力項による貢献は、競技レベ

ルの異なる両者において際立った差異が見受けられなかったこと，ならびに遠心力やコリオリ力による運動依存項の貢献において，大きな差異が見受けられることを明らかにした．

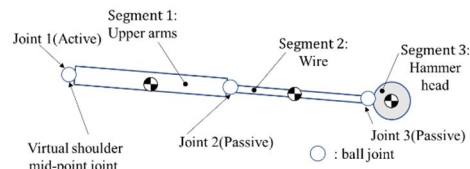


図 1 . 投擲者の上肢-ハンマー連成系の簡易モデル

(2)ハンマー投げにおける運動依存項の生成要因と加速メカニズムについて

上記(1)の結果を受けて，運動依存項の生成要因を定量化したところ，予備スウィング局面において獲得した一般化速度ベクトルの初期値に対する累積的な効果により，ターン局面におけるヘッドスピードの主な増大が行われていること，すなわち，関節トルクや，近位端の加速度入力，重力項などの操作可能な変量によってヘッドスピードの増大が起きているわけではなく，初期の速度ベクトルに対する状態量初期値がヘッドスピードを生成する自励系を構成するように選手が動作を行っていることを突き止めた．なお，このメカニズムは特異なものであり，これを明らかにするには別途，新たな検討を要する．

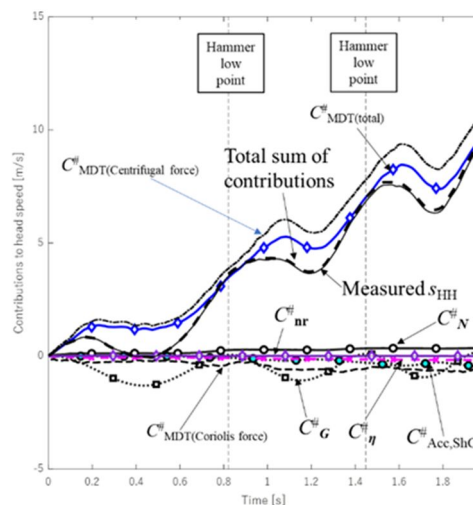


図 2 . ターン局面におけるハンマーヘッド生成メカニズム

注：MDT は運動依存項， $C\#$ の添え字 nr は残差モーメント項， $N$  は関節トルク項，

Acc,ShC は近位端加速度拘束項

(3)陸上棒高跳びにおける上肢閉ループ問題の解決について

選手の左右上肢とポールにて構成される閉ループ問題を解決するためのセンサーポールについてひずみゲージの選定，貼付位置，キャリブレーション精度などを検討し，室内での跳躍動作の計測とポール先端反力の計測を可能とする実験施設環境を整備した．その結果，実際の跳躍動作

におけるキネティクス的変量の計測精度を検討したところ、これまでのひずみ信号の時間応答からキネティクス的変量への変換法では誤差の低減が困難であり、限界があることを明らかにした。

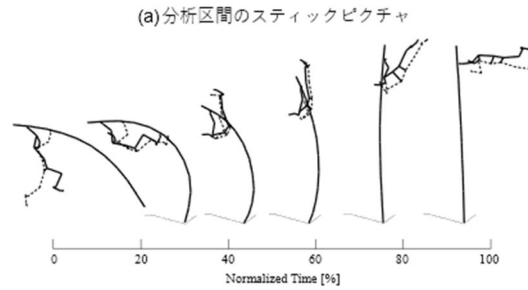


図1．跳躍中のポールの変形状態と跳躍者の動作のスティックピクチャ．

(4)動的大変形キャリブレーションとカルマンフィルタに基づく係数算出による精度向上について

上記項目(3)の課題を受けて、跳躍試技すなわち動的な大変形状態でのひずみ値とポール各部の作用力・モーメント情報から、校正係数の算出を行った。その際、ひずみ信号の時間微分値を考慮した高次の多項式による変換式とし、その各係数については、カルマンフィルタにより算出した。これにより、ポール長軸作用力の推定値と計測値との誤差の低減を実現している。

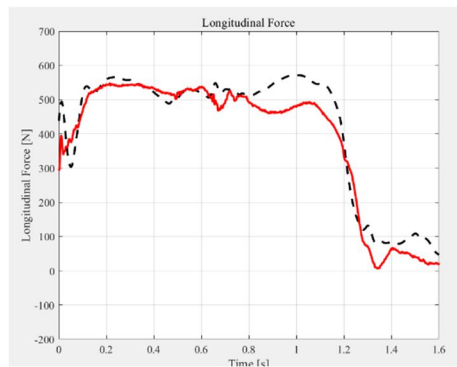


図2.ポール長軸力の推定値（赤線）と算出値（黒破線）との比較

(5)ゴルフスウィングの上肢キネティクス分析用センサーグリップハンドルの精度向上について

ゴルフスウィングにおける上肢閉ループ問題解決のためのセンサーグリップハンドルの校正方法について検討を行った。ゴルフスウィングの場合は、左右各手においてモーメントを作用させることが想定されるため、先行研究と同様のセンサーグリップハンドルにおける校正方法を適用した場合には、モーメントにおける誤差が低減しないことがわかった。そこで、モーメントに関するセンサー出力については、その時間微分までをも考慮して、角キネティクス的変量への変換関数を多項式としてあらわし、その係数をカルマンフィルタによって求めることにより、誤差の低減を実現した。また、シャフトの弾性変形を考慮した順動力的貢献分析手法を提案し、ヘッドスピードに対する各関節トルクの定量化を可能としている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sekiya KOIKE, Tempei TOMINAGA, Keigo, Byun OYAMA and Alexander P WILLMOTT	4. 巻 1
2. 論文標題 Head speed generating mechanisms during turning phases of athletic hammer throwing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Book of Abstracts for IUTAM Symposium	6. 最初と最後の頁 58,59
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 該当する
1. 著者名 Rinri UEMATSU, Kiyoshi HIROSE, Osamu TAKEDA, Alexander P. WILLMOTT and Sekiya KOIKE	4. 巻 1
2. 論文標題 An instrumented pole for Measuring the Individual Hand Forces in Pole Vaulting	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Book of Abstracts for IUTAM Symposium	6. 最初と最後の頁 80,81
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 該当する
1. 著者名 小池関也, 富永天平, 井村祥子	4. 巻 1
2. 論文標題 スウィング動作を伴うターン動作における末端部スピード生成メカニズム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会D&D2022講演論文集USB	6. 最初と最後の頁 1-6
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 無
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 小池 関也, 植松倫理	4. 巻 1
2. 論文標題 用具の弾性変形を考慮したスウィング動作の順動力学的貢献分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2022論文集USB	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 無
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 富永天平, 小池 関也	4. 巻 1
2. 論文標題 ハンマー投における動的バランス維持のメカニズム (身体およびハンマーの角運動量に対する順動力学的貢献分析)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2022論文集USB	6. 最初と最後の頁 1-6
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 無
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 植松倫理, 小池関也	4. 巻 1
2. 論文標題 ひずみゲージを用いた棒高跳中のポール弾性エネルギー推定法の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2022論文集USB	6. 最初と最後の頁 1-611111111
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 無
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 富永天平, 大山卞圭悟, 小池関也	4. 巻 1
2. 論文標題 ハンマー投ターン局面中の身体-ハンマー間における力学的エネルギーの伝達	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第28回日本バイオメカニクス学会大会講演論文集USB	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 無
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 小池関也, 富永天平, 井村祥子, 大山卞圭悟	4. 巻 1
2. 論文標題 陸上ハンマー投げ動作の順動力学的貢献分析による国内一流競技者のヘッドスピード獲得技術の抽出	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第28回日本バイオメカニクス学会大会講演論文集USB	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 無
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 植松倫理, 武田理, 小池関也	4. 巻 1
2. 論文標題 ひずみゲージを用いた棒高跳中の左右各手によるボール作用力の計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第28回日本バイオメカニクス学会大会講演論文集USB	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 無
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 富永天平, 井村祥子, 野中愛理, 小池関也	4. 巻 1
2. 論文標題 ハンマー投における全身モデルに対するハンマーヘッドスピード生成要因の定量化 (運動依存項の帰着法の検討)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2021抄録集	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 無
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 小池 関也, 田村大聖, 植松倫理, 廣瀬圭	4. 巻 1
2. 論文標題 センサーゴルフクラブグリップハンドルの多軸負荷荷装置によるキャリブレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020講演論文集USB	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 無
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 植松倫理, 武田理, 小池関也	4. 巻 1
2. 論文標題 棒高跳における左右各手によるボール長軸作用力の分配	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第41回バイオメカニクス学術講演会講演論文集	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 無
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 野中愛理, 武田理, 藤井範久, 小池閑也	4. 巻 1
2. 論文標題 ハンマー投げにおけるハンマーヘッドスピード生成メカニズム: モデル間の比較による上肢, 体幹および下肢の役割の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第41回バイオメカニズム学術講演会講演論文集	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 無
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 野中愛理, 武田理, 藤井範久, 小池閑也	4. 巻 1
2. 論文標題 ハンマー投げにおけるハンマーヘッドスピード生成メカニズム (第一ターン局面を対象とした全身モデルの分析による検討)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バイオメカニクス学会第26回大会抄録集	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 無
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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Sekiya Koike, Tempei Tominaga, Keigo Byun Ohyama and Alexander P. Willmott
2. 発表標題 Head speed generating mechanisms during turning phases of athletic hammer throwing
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Rinri Uematsu, Kiyoshi Hirose, Osamu Takeda, Alexander P. Willmott and Sekiya Koike
2. 発表標題 An Instrumented Pole for Measuring the Individual Hand Forces in Pole Vaulting
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 富永天平, 井村祥子, 野中愛理, 小池関也
2. 発表標題 ハンマー投における全身モデルに対するハンマーヘッドスピード生成要因の定量化 (運動依存項の帰着法の検討)
3. 学会等名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植松倫理, 武田理, 小池関也
2. 発表標題 棒高跳における左右各手によるボール長軸作用力の分配
3. 学会等名 第41回バイオメカニクス学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野中愛理, 武田理, 藤井範久, 小池関也
2. 発表標題 ハンマー投げにおけるハンマーヘッドスピード生成メカニズム: モデル間の比較による上肢, 体幹および下肢の役割の検討
3. 学会等名 第41回バイオメカニクス学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野中愛理, 武田理, 藤井範久, 小池関也
2. 発表標題 ハンマー投げにおけるハンマーヘッドスピード生成メカニズム - 第一ターン局面を対象とした全身モデルの分析による検討 -
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会第26回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小池 関也, 田村大聖, 植松倫理, 廣瀬 圭
2. 発表標題 センサーゴルフクラブグリップハンドルの 多軸負荷負荷装置によるキャリブレーション
3. 学会等名 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Uematsu, R., Hirose, K., Takeda, O., Willmott AP. . and Koike S.	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 12
3. 書名 Book of the IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales	

1. 著者名 Koike, S., Tominaga, T., Oyama.B.,K., Willmott AP.,	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 13
3. 書名 Book of the IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales	

〔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
---------	---------