

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13732

研究課題名（和文）二方向X線透視システムと精密筋骨格モデルを用いたヒト中足部ロック機構の機能解明

研究課題名（英文）Elucidating the details of midtarsal joint locking mechanism based on a biplanar X-ray fluoroscopy and a finite element analysis

研究代表者

伊藤 幸太 (Ito, Kohta)

大阪大学・人間科学研究科・助教

研究者番号：20816540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの足部は直立二足歩行に適応的な形質を数多く有していると考えられており、その一つに立脚期後期中足部の可動性が変化し、効果的な蹴り出しを実現するロック機構がある。しかし、足部の詳細な骨動態やそれによって生じる力作用を直接的に計測することは困難であり、ロック機構の詳細は十分に明らかになっていなかった。本研究では、この中足部のロック機構のメカニズムについて明らかにするために、二方向X線透視システムを用いた屍体足の骨格動態計測と、精密な足部モデルを用いた歩行運動シミュレーションを試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の試みによって、これまで困難とされてきた足部の骨格動態や、それによって生じる生体内力の推定が可能となり、ヒト足部が持つロック機構のメカニズムの一端が明らかとなった。また本研究で提案された方法論は、ヒト足部の歩行機能の理解だけでなく、頑強な二足歩行を生成する足部機構の提案といったロボット工学分野や、足部疾患の発症メカニズムの解明といった医療分野、さらには直立二足歩行の進化過程の解明といった生物人類学分野まで、幅広くインパクトを与えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The human foot has been thought to possess the mechanical function modulating the mobility of midtarsal joint at the late stance phase for generation of the effective propulsive force. However, due to the complex foot anatomical structure, the details of so-called midtarsal joint locking mechanism have not been fully investigated. In order to clarify the detailed mechanism of the human foot function, cadaver experiment using a biplanar X-ray fluoroscopy system and numerical simulation based on a finite element model of the human foot have been conducted.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：足部 直立二足歩行 X線透視計測 有限要素解析

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。

1. 研究開始当初の背景

ヒトの足部は多数の骨や靭帯、筋肉から構成されている複雑な構造体であり、ヒトの直立二足歩行中に生じる足部の機能的変形が、安定かつ効率的な二足歩行の生成に大きく寄与していると考えられてきた。ヒトの足部が有する歩行機能の一つに、蹴り出し時に生じる中足部のロック機構がある。これは、後足部（踵骨と距骨）と中足部（立方骨と舟状骨）を関節する横足根関節の可動性が、立脚期後期にアキレス腱の張力によって生じる踵骨の内反運動によって減少し、足部全体が硬い構造として振る舞うことで効果的な蹴り出しを実現する機能である。しかし、足部を構成する小さな骨の一つ一つの運動を詳細に計測することは困難であるため、実際にヒトの歩行中にこのような機能的変形が生じているのかについては、十分に明らかになっていない。

2. 研究の目的

静的荷重位や動的な歩行運動中に、ヒト中足部の骨格構造がどのように変形しているのか、さらにそれらの骨運動が関節間力や床反力といった力学的相互作用にどのように寄与しているのかを、①二方向 X 線透視システムを用いた屍体足の骨格動態計測、②ヒト足部有限要素モデルを用いた足部動態シミュレーション、の2つの試みによって明らかにする。これらを通して、ヒトの足部構造に内在するロック機構の詳細に迫ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 屍体足を用いた歩行中の足部姿勢における骨格動態の X 線透視計測

歩行運動中にヒトの足部内でどのような骨運動が生じているのかを直接的に明らかにするために、屍体足骨格動態の X 線透視計測をおこなった。計測に用いた X 線透視システムは2つの X 線源とフラットパネルから構成されており、計測空間に屍体足を配置することで、二方向から撮影した X 線透視画像を同時に取得することが可能となる。装置内床面に固定された治具に、足底が上方を向くように屍体足を取り付け、上方から床面を模擬した発泡スチロールを押し付けることで、荷重位における屍体足の骨格動態が観察可能となった(図1)。また、屍体足のアキレス腱に釣り糸を縫い付け、プーリを介して釣り糸を牽引することで、足部を底屈させ、蹴り出し姿勢を作成した。下腿の姿勢は歩行中の立脚期 80%における姿勢を参考に、床面に対して 60° とし、足関節から下の足部の底屈姿勢はアキレス腱を釣り糸で牽引することで再現した。アキレス腱には2本の釣り糸を通し、プーリを介してそれぞれにおもりを分配してかけることで、最大 600N 程度の力をアキレス腱にかけることができるようにした。床面は鉛直方向にのみ位置調整を可能とし、床面位置とアキレス腱の牽引力を調節することで足部の姿勢を決定した。足底に対する床面の鉛直方向位置4条件とアキレス腱張力5条件、計20条件で X 線透視撮影をおこなった。また、後述する数理モデルの評価をおこなうために、装置内に設置されたアクリル製の床面に屍体足を配置し、上方からおもりを載せた単純静荷重条件における計測もおこなった。

骨運動の定量化には、構築した3次元モデルマッチング手法を用いた。これは、計測に用いた屍体足の3次元骨モデルを、撮影した透視画像にマッチングすることで、骨の3次元運動を再構築する手法である。キャリブレーションによって得られる、二方向 X 線透視装置の X 線源とフラットパネルの位置関係を仮想空間で再現し、空間内に骨モデルを配置することで、同一の幾何条件で投影画像を得ることができる。仮想空間で得られる仮想投影画像と、撮影した透視画像内の骨輪郭が一致するように、空間内の骨モデルの位置・姿勢を最適化計算を用いて探索した。

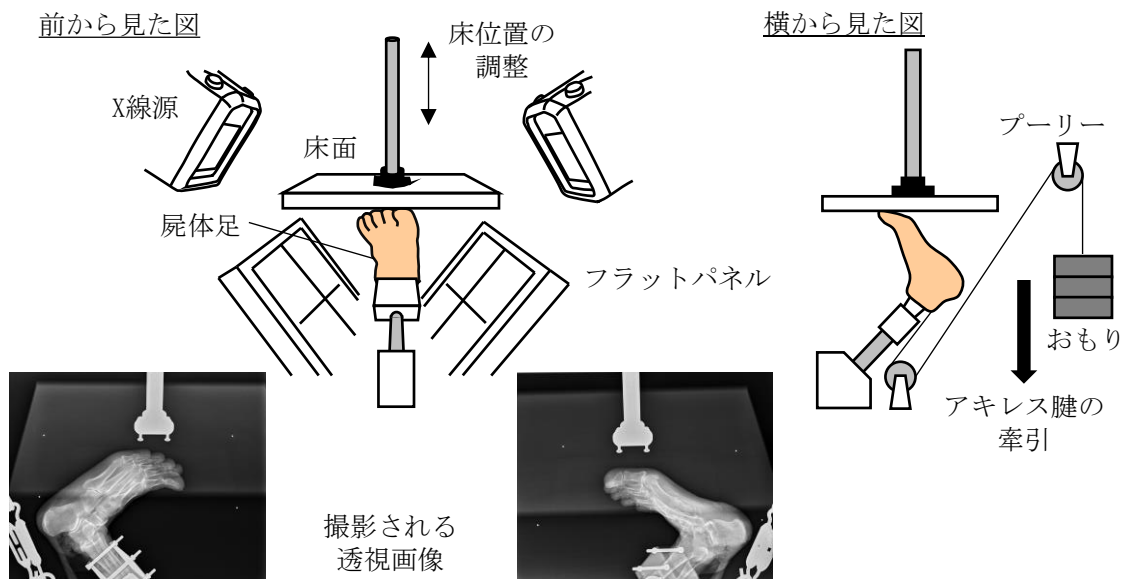


図1. 屍体足実験の概要と撮影される透視画像の一例

(2) 足部有限要素モデルを用いた静荷重および歩行中の足部動態解析

X線透視計測では、3次元的な骨運動を詳細に観察および定量化することが可能であるが、足部の骨運動が関節間力や床反力分布といった、生体内力や外界との力学的相互作用にどのように影響するのかを実験から理解することは非常に困難である。本研究では、これを明らかにするために、ヒト足部の精密な有限要素モデルを構築し、歩行運動中の力学的条件を計算器内で再現することで、足部動態とそれに伴う力作用の変化を推定することを試みた。構築したモデルを図2に示す。成人男性1名の右足のCT断層画像から、軟組織、および骨の3次元形状データを再構築し、それぞれ四面体要素でモデル化した。皮膚は厚さ1mmのシェル要素とし、骨同士をつなぐ靭帯は伸長した際に張力を発揮するバネ要素としてモデル化した。骨および皮膚は線形材料、軟組織はOgden則に基づく超弾性材料とした。また、骨の関節面に位置する部分を軟骨として異なる物性値を与えた。

歩行中の足部動態および力学的条件の再現においては、モデルの構築時にCT撮影をおこなった同一被験者の歩行中の下腿の運動を計測し、運動データをモデルに強制変位として与えることで再現した。また、歩行中のアキレス腱張力は、先行研究を参考に時間の関数として与え、歩行運動時に同時に計測された床反力とある程度一致するように下腿に鉛直荷重を与えた。また、計算器内で(1)の屍体足実験と同じ静的荷重条件を再現し、荷重によって生じる骨の並進及び回転運動の変位量を実験データと比較することで、構築した足部モデルの評価をおこなった。

4. 研究成果

(1) 蹴り出し条件における屍体足骨格動態

足底に対する床面の鉛直方向距離が大きくなるとともに、アキレス腱を牽引した際の足部姿勢は底屈位となり、ヒト実歩行中の蹴り出し時に観察されるような足趾の背屈も観察された。さらに床面位置を固定した状態でアキレス腱の牽引力を強めていくと、中足部がわずかながら背屈していく様子がX線透視画像から確認された。今後標本数を増やしていき、骨運動の定量化をおこなう予定である。

(2) 構築した有限要素モデルの評価

屍体足に鉛直荷重を与え、アクリル板に押し付けた際の力学的条件を、構築した有限要素モデルを用いて計算器内で再現し、シミュレーションから得られる骨の運動データと実験データを比較することで、有限要素モデルの評価をおこなった。図3に荷重による4つの足根骨の並進量および回転量の比較の結果を示す。有限要素モデルに鉛直荷重を与えた際の骨運動は、実験結果と定量的にある程度一致し、構築したモデルは十分に精密であると判断した。

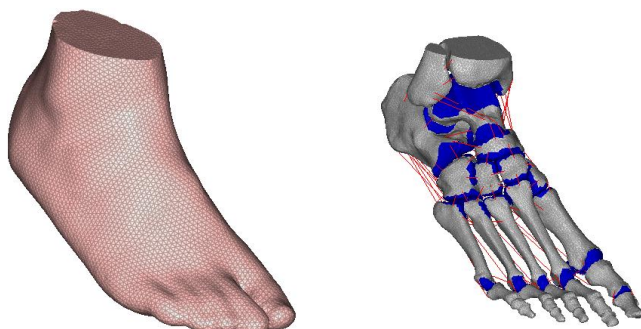


図2. 構築したヒト足部の有限要素モデル、赤い線要素が靭帯、青の領域が軟骨

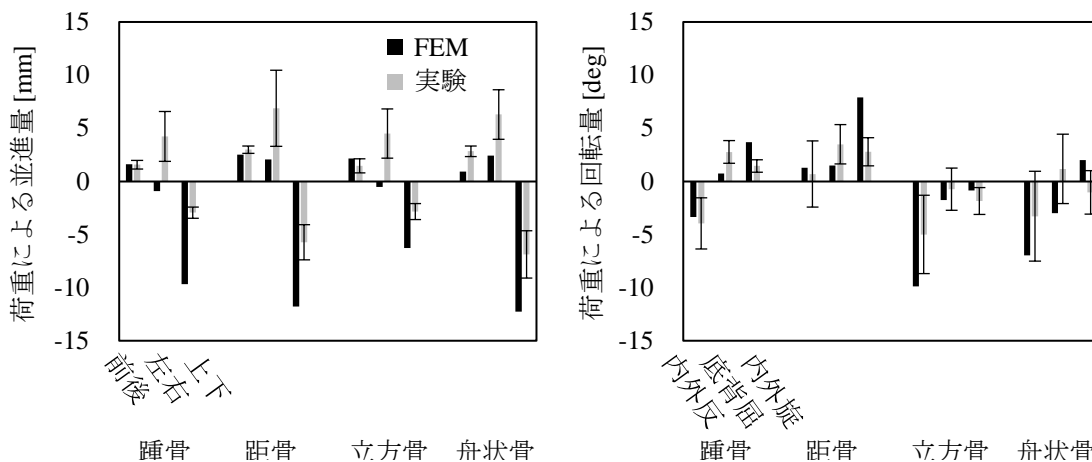


図3. 静荷重条件における骨運動のシミュレーションと実験結果の比較、並進は前方・内側・上方、回転は内反・底屈・内旋が正

(3) 歩行中の足部骨格動態および関節接触力

図4に有限要素モデルを用いて再現した歩行中の足部動態を示す。本研究では蹴り出し時の骨格動態や力作用について着目したため、立脚期50%~90%までの足部運動をシミュレートした。再現された運動は、実際のヒト二足歩行中と同様に、蹴り出しにかけて足部が底屈していった。また、再現された床反力は、蹴り出し時に鉛直方向床反力および前後方向床反力が増加する一般的なヒトの立脚後期における床反力波形と傾向が一致した。一方で、実際の歩行中の足部運動と比較して、立脚期90%で足部が相対的に大きく底屈し、すでに離地に近い状態となっており、この時床反力もゼロに近い値をとっている。これに関しては、運動データに対するモデルのマッチングが十分でない可能性があり、今後改善する必要がある。

今回再現された歩行中の足部運動において、立方骨・舟状骨・楔状骨で構成される中足部で、具体的にどのような力作用が生じているのかを確認するために、①距舟関節(距骨と舟状骨の間の関節)、②踵立方関節(踵骨と立方骨の間の関節)、③楔舟関節(3つの楔状骨と舟状骨の間の関節)、④楔立方関節(外側楔状骨と立方骨の間の関節)の4つの関節における接触力を立脚期10%刻みで定量化した(図6)。蹴り出しにかけて、どの関節においても接触力は増加傾向にあり、特に距舟関節における接触力が立脚期後期を通して大きかった。また、変化量は相対的に小さいものの、外側楔状骨と立方骨の接触力も増加していくことがわかった。

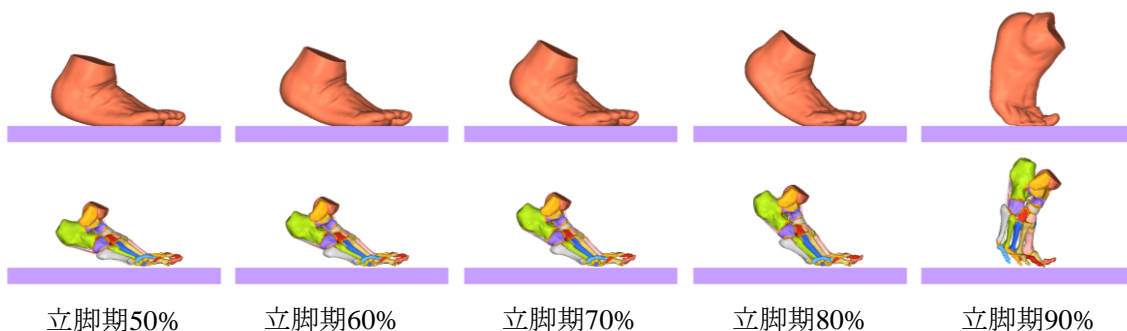


図4. 歩行運動シミュレーション時の足部有限要素モデルの様子

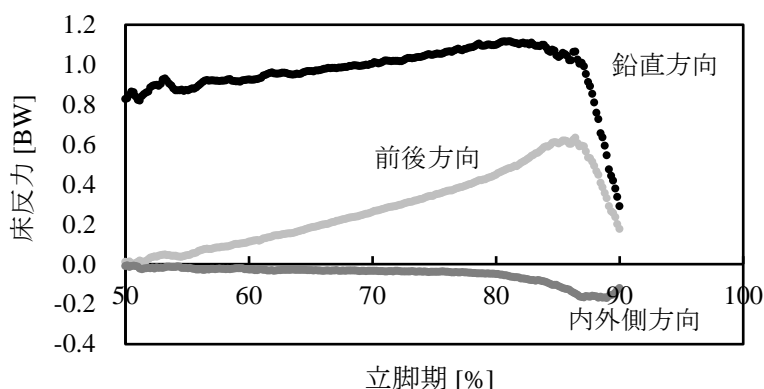


図5. 歩行運動シミュレーション時の再現された床反力、前方・内側・上方为正

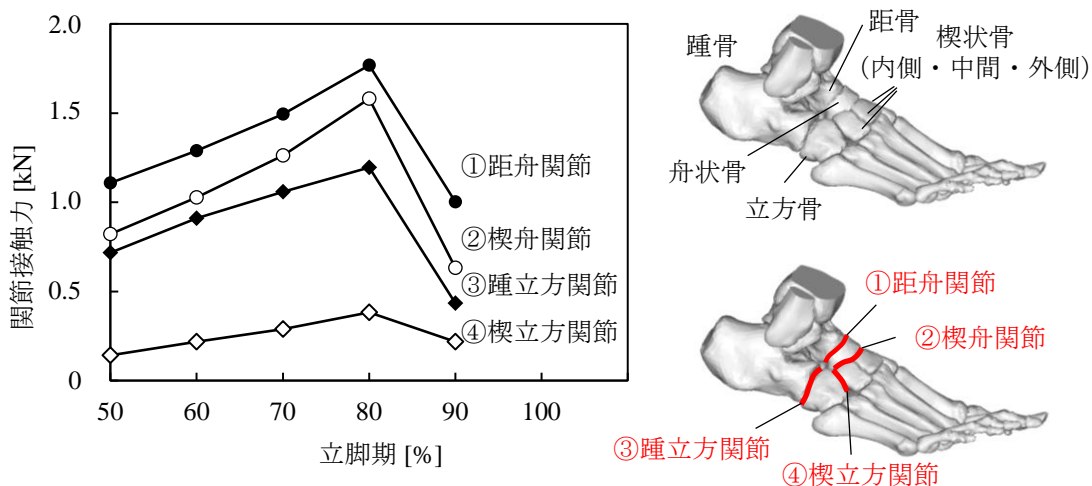


図6. 歩行運動シミュレーション時の中足部の関節接触力の変化

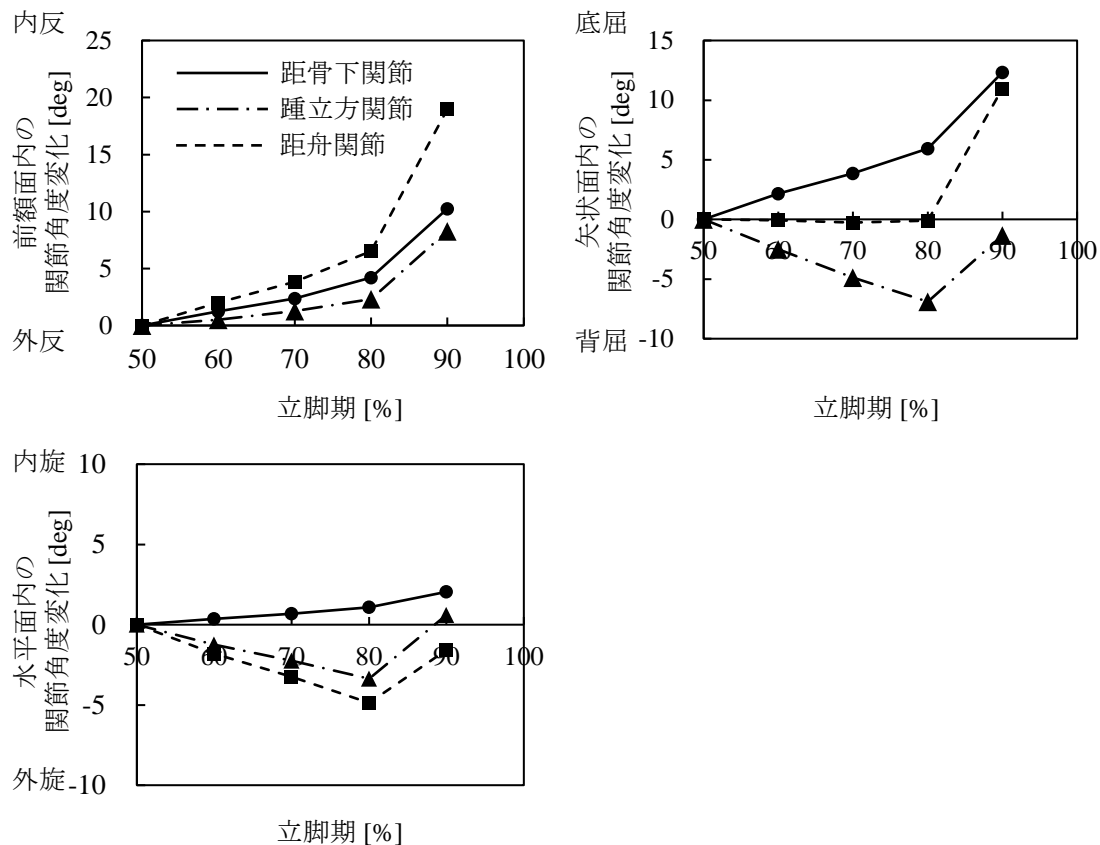


図7. 歩行運動シミュレーション時の関節角度変化、内反・底屈・内旋が正

この時の骨格動態を知るために、距骨下関節角度（距骨に対する踵骨の相対角度）、踵立方関節角度（踵骨に対する立方骨の相対角度）、距舟関節角度（距骨に対する舟状骨の相対角度）の3つの関節角度の時間変化を算出した（図7）。ここでは、立脚期50%において、距骨・踵骨・立方骨・舟状骨すべての骨の局所座標系が世界座標系と一致していると仮定し、立脚期50%を基準とした関節角度の増減を示している。まず、先行研究でも示されているように、蹴り出しにかけてアキレス腱の筋張力によって踵骨は距骨に対して内反していった。この時、立方骨と舟状骨も近位の骨に対する内反角度が増加していった。矢状面内運動で特徴的であったのは、立脚期50-80%の期間において、立方骨が踵骨に対してわずかに背屈していく一方で、距舟関節の底背屈運動が生じないということであった。距舟関節の接触力が他の関節と比較して相対的に大きかったことから、立脚期後期において距舟関節がロックされ、舟状骨の底背屈方向の可動性が減少した可能性がある。またこの時、立方骨と舟状骨は近位骨に対して外旋し、その変化量は舟状骨の方が相対的に大きかった。相対的に大きかった舟状骨の内反・外旋運動や、異なる傾向を見せた立方骨の背屈運動は、楔状骨と立方骨の間の接触を生じさせる要因になることが予想され、これらの骨運動によって中足部の可動性が変化した可能性が示唆された。

本研究によって、ヒト中足部が有するロック機構の機序の一端が明らかになったが、実際に足部全体の剛性が高くなっているかは今後確認する必要がある。また、(1)の屍体足実験との比較を通して、再現された歩行運動中の評価を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 Kohta Ito, Takuo Negishi, Koh Hosoda, Nobuaki Imanishi, Masahiro Jinzaki, Motoharu Oishi, Naomichi Ogihara
2. 発表標題 Visualization and quantification of 3D foot bone kinematics between human and African great apes using a biplanar X-ray fluoroscopy
3. 学会等名 17th Congress of the International Society of Biomechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤幸太, 根岸拓生, 細田耕, 名倉武雄, 今西宣晶, 陣崎雅弘, 大石元治, 荻原直道
2. 発表標題 ヒトおよび類人猿の踵骨形態と静荷重下における3次元足部骨格動態の関係
3. 学会等名 第72回日本人類学会大会
4. 発表年 2018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
---------	---------