

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02307

研究課題名（和文）体温・血圧・血流量を予測する人体シミュレーションモデルの実用化

研究課題名（英文）Practical realization of human body simulation model for predicting body temperature, blood pressure and blood flow rate

研究代表者

後藤 伴延（Goto, Tomonobu）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20386907

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：体温・血圧・血流量を予測する人体シミュレーションモデルの実用化を目指して、血圧および血流量を予測する循環系モデル（流体解析）の計算安定性を向上させる改良、非定常環境下における生理量測定の実施とこれに基づく基本形モデルパラメータセットの整備、モデルパラメータセットの個別化に向けた文献調査、不均一環境下で重要となる人体の機能的特徴（部位感度と局所効果）に関する文献調査と局所効果を測定する実験方法の確立、シミュレーションの一般利用へ向けたプログラム等の改良を実施した。これらによって、人体モデルの安定性・信頼性・汎用性が向上したほか、さらなる改良へ向けた基礎的知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した実験によって得られた非定常環境下での生理量測定データは、これまでに類を見ない詳細かつ包括的なものであり、学術的に高い価値がある。また、このデータに基づき、非定常環境下における体温・血圧・血流量を適切に再現できる人体モデルが開発されたことは、人体シミュレーション研究において非常に大きな進歩である。加えて、基本形モデルパラメータセットの整備や個人特性に関する知見の整理などの取り組みは、人体シミュレーションによる熱的健康被害リスク評価を実現するために必要なステップとして重要な意義がある。

研究成果の概要（英文）：For the practical realization of the human body simulation model that predicts body temperature, blood pressure, and blood flow rate, we have worked on the following: Improving the computational stability of the cardiovascular model (fluid analysis) that predicts blood pressure and blood flow rate; Measuring physiological quantities under unsteady conditions and determining a basic model parameter set based on the measurement; Reviewing literature to individualize the model parameter set; Reviewing literature on the human body characteristics that function in heterogeneous thermal environments (local thermosensitivity and local effect) and establishing an experimental method to measure the local effect; Improving the simulation program for public use. Thus, we have improved the stability, reliability, and versatility of the human body model, and obtained fundamental knowledge for further improvements.

研究分野：建築環境工学

キーワード：熱環境 温熱生理 人体シミュレーション 熱中症 ヒートショック 体温 血圧 血流量

1. 研究開始当初の背景

熱環境による健康被害(熱的健康被害)に、熱中症やヒートショックがある。高齢化の進展に伴い、近年これらの健康被害による死亡者数の増加が報告されている。また、高齢者以外の身体的弱者(乳幼児・障がい者・病人など)にとっても深刻な問題であることから、社会的関心が非常に高まっている。熱的健康被害の発生メカニズムには、体温のみならず血流量や血圧が深く関わっている。暑熱環境においては、皮膚血流量の増加は体温上昇を防ぐために不可欠である一方、脳虚血を招いたり、発汗脱水の影響も加わって循環不全を引き起こしたりもする。また、温熱環境の急激な変化により、血圧が急変して脳卒中や心筋梗塞を招いたりするのがヒートショックである。さらに、熱的健康被害の要因は温熱環境だけでなく、個人の行動・体格・体質も影響しており、これらの複合影響により健康被害は生じている(図1)。

熱的健康被害の危険度を予測する上で、人が経験する温熱環境が画一的なものではなく、人の行動・体格・体質も同一ではないことを考えると、人体シミュレーションは有用な手段の一つである。そのため、研究代表者らは、体温・血圧・血流量を予測可能な人体シミュレーションモデル(図2)の開発を開始し、そのプロトタイプを既に作成していた。ただし、それを実用化するには未だ解決しなければならない課題が多く存在していた。

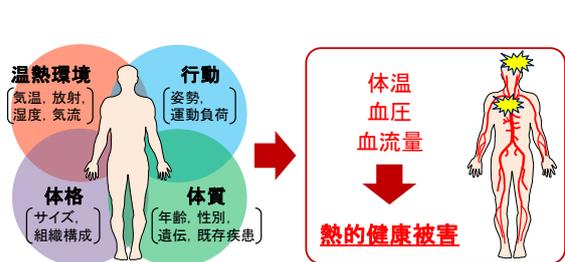


図1 熱的健康被害のメカニズムと影響要因

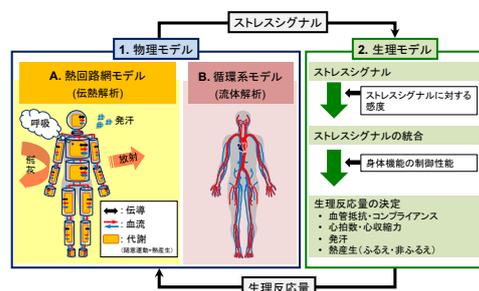


図2 新たな人体シミュレーションモデル

2. 研究の目的

本研究では、人体シミュレーションの実用化に向けて、人体に生じる物理的・生理的現象のメカニズムを正しく考慮しつつ、人体モデルの安定性・信頼性・汎用性を高めるための改良を行うことを目的とした。具体的には、血圧および血流量を予測する循環系モデル(流体解析)の計算安定性の向上、体格や体質といった個人特性に関するモデルパラメータの標準化(基本形の整備)と個別化、非正常環境や不均一環境などの複雑な条件下における人体モデルの適用性向上、開発者以外的一般利用へ向けたプログラム改良などについて検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 循環系モデルの安定性向上

血圧・血流量を予測する循環系モデルは、主要な動脈系を表現する1次元モデルと、その他の末梢循環・静脈系・心肺を表現する0次元モデルで構成されている。1次元モデルは、1次元の流体解析を行うものであり、動脈の分岐点や1次元モデルと0次元モデルの接続点において解が発散するケースが多い。そこで、1次元モデルの発散防止対策を実施し、循環系モデルの安定性向上を図った。

(2) 非正常環境下における生理量測定

人体シミュレーションモデルの非正常環境での適用性を向上させるためのリファレンスデータ、さらには、標準的な体型の20歳代男性を対象とした基本形パラメータセットの導出のためのリファレンスデータを収集するため、表1に示す3つの条件下において、各条件6~7名の被験者を対象に生理量測定を行った。測定スケジュールおよび測定項目は、それぞれ図3および表2の通りとした。

表1 測定条件

実験ケース	被験者数	室温	相対湿度	気流速度	着衣量	姿勢
室温上昇	7	28℃と38℃	40%	<0.1 m/s	0.06 clo	仰臥位
室温低下	6	28℃と18℃	40%	<0.1 m/s	0.06 clo	仰臥位
姿勢変化	6	28℃	40%	<0.1 m/s	0.06 clo	仰臥位と立位

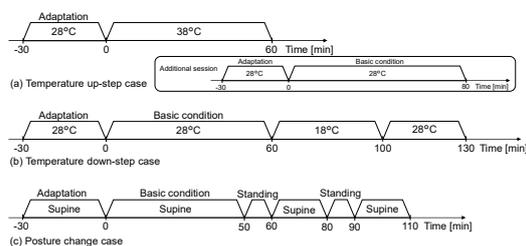


図3 測定スケジュール

表 2 測定項目

測定項目	測定部位
動脈血流量	内頸動脈, 外頸動脈, 椎骨動脈, 上腕動脈, 橈骨動脈, 尺骨動脈 (中枢側), 尺骨動脈 (末梢側), 大腿動脈, 深大腿動脈, 膝窩動脈, 前脛骨動脈, 左室流出路
皮膚血流量	額, 頸, 胸, 背, 腹, 腰, 上腕 (前), 上腕 (後), 前腕 (前), 前腕 (後), 手 (背), 手 (掌), 手 (中指), 大腿 (前), 大腿 (後), 下腿 (前), 下腿 (後), 足 (背), 足 (底), 足 (親指)
血圧	上腕, 足首
心拍数	胸
代謝量	呼気酸素濃度
深部温度	耳内
皮膚温度	額, 胸, 背, 腰, 上腕, 前腕, 手 (背), 手 (掌) 大腿, 下腿, 足 (背), 足 (底)
体重減少量 (発汗量)	全身

(3) 基本形パラメータセットの整備

本研究の人体シミュレーションモデルは、個人特性の違いに応じたきめ細やかなリスク評価を行うことを目指しているが、あらゆる人に対して個人特性パラメータを一から同定することは不可能である。そのため、基本形のパラメータセットを決定した上で、年齢や既往疾患などに応じてそれをアレンジ（個別化）することを指向している。基本となる個人特性パラメータセットには高い信頼性が必要であるため、最もデータ収集が容易な20歳代の日本人男性に着目し、この集団の平均的なパラメータの組み合わせを基本形パラメータセットとして整備することとした。これらのパラメータを決定するために、種々の文献値や(2)で収集したリファレンスデータを用いた。

(4) 個人特性に関する文献調査

前述した個人特性パラメータの個別化に向けて、発汗量や血流量などの個人差に関する文献調査を行った。

(5) 不均一環境下における生理反応に関する調査

人体シミュレーションモデルの不均一環境での適用性を向上させるため、不均一環境特有の生理反応を引き起こす要因と考えられる温冷受容器の感度の部位差（部位感度）、および、局所皮膚温度変化による局所的体温調節反応（局所効果）について文献調査を行った。さらに、不足情報を収集するため、新たに実施すべき生理量測定の実験方法について検討を行った。

(6) シミュレーションの一般利用へ向けた改良

将来的な人体シミュレーションの一般利用に向けて、利用者がプログラムの改変をすることなくシミュレーションが実施できるように、シミュレーションプログラムの改良を行った。

4. 研究成果

(1) 循環系モデルの安定性向上

動脈の分岐点において発散を検知した際に、その隣接点の値や分岐点における流量保存を考慮して現実的な値に修正し、そこから収束計算をやり直すプロセスを導入した。また、1次元モデルと0次元モデルの接続点である1次元モデルの流出境界において、局所的な流量保存と圧力-容積関係が成立するように流出境界の圧力と流量を収束計算によって求めるプロセスを導入した。これらのプロセスの導入により、大幅な発散防止効果が得られた。

(2) 非定常環境下における生理量測定

生理量測定結果の一部を図4-6に示す。これらの測定結果より、環境温度の変化に対しては、血流量、特に四肢への血流量が調節されることで深部温度が効率的に維持されていること、血流量調節のための心拍数の増加・減少や血管拡張・収縮による血圧の低下・上昇が生じることを確認した。立位への姿勢変化に対しては、静水圧の作用による足首血圧の上昇とSVの減少が生じ

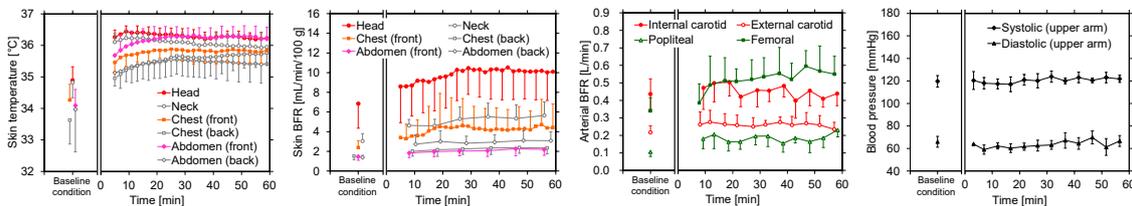


図4 室温上昇ケースの測定結果（一部）

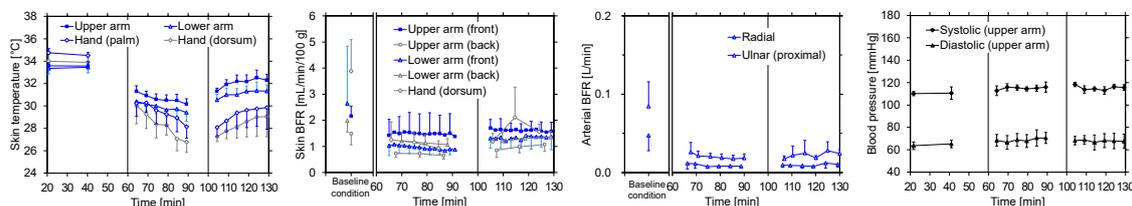


図5 室温低下ケースの測定結果（一部）

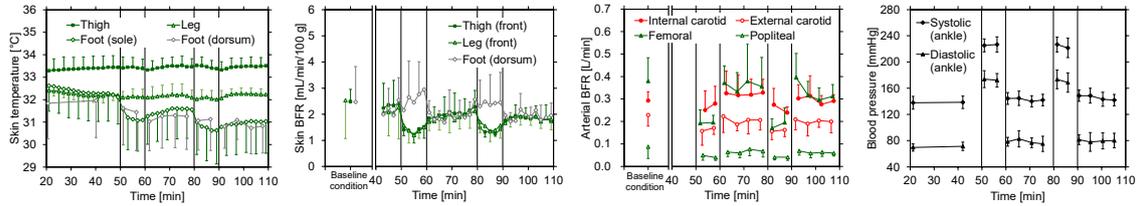


図6 姿勢変化ケースの測定結果 (一部)

ること、主に下肢の血流量の減少と心拍数の増加によって脳血流量の減少が抑制されていることを確認した。さらに、暑熱環境下では皮膚だけでなく皮下組織の血流量も増加していることや、寒冷環境下では皮膚・皮下組織に加えて筋の血流量も減少していることが推定された。

(3) 基本形パラメータセットの整備

物理モデルである熱回路網モデルのパラメータは、各ノードの熱容量と代謝量、ノード間の熱コンダクタンスである。これらについて、既往文献の20歳代の日本人男性の体格および体組織データ、各体組織の容積比熱と熱伝導率、単位質量あたりの基礎代謝量を参考に決定した。さらに、循環系モデルのパラメータに関して、1-Dモデルのパラメータについては文献を参考に与えた。0-Dモデルのパラメータについては、熱的中立・仰臥位（基本条件）での血流量を再現するようなパラメータセットによって身体の構造的特徴を表現し、これと生理的調節反応の影響を切り離して考慮することとした。基本条件における0-Dモデルのパラメータセットは、(2)の基本条件での血流量測定値、および、それに基づく血流量推定値を、シミュレーションによって再現できるようにチューニングを行うことで導出した。図7に基本条件での測定値と計算値の比較を示す。上述した物理モデルパラメータを用いることにより、基本条件の測定値を概ね再現できることを確認した。

生理モデルパラメータについては、(2)で収集した基本条件以外のリファレンスデータを用い、チューニングを行うことによって導出した。最終的に得られた生理量計算値の時間変化を、図8-10に測定値と比較して示す。それぞれの実験ケースにおいて、生理量の変化傾向を概ね再現することができた。図11-13に、部位別の体温・皮膚血流量・動脈血流量に関して測定値と計算値の比較を示す。このように、体温や血流量などの局所的な傾向についても概ね妥当な計算結果が得られることを確認した。

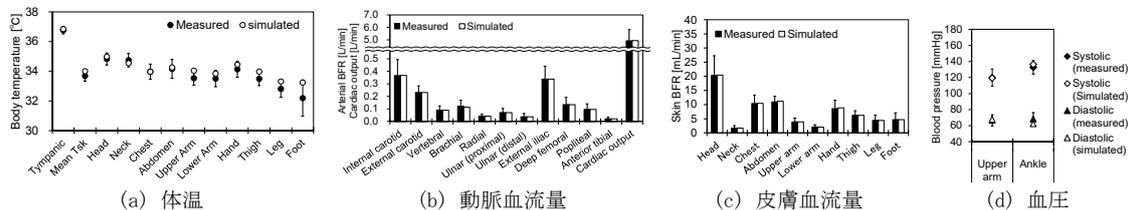


図7 基本条件の測定値と計算値

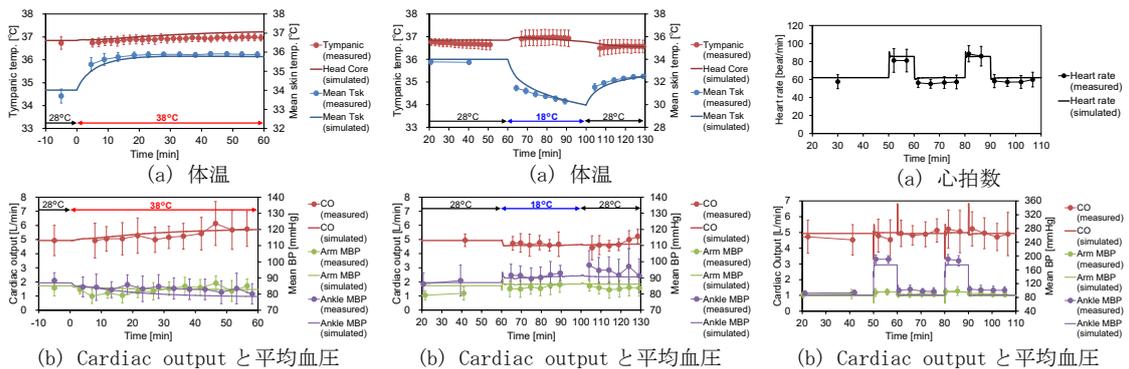


図8 室温上昇ケースの測定値と計算値

図9 室温低下ケースの測定値と計算値

図10 姿勢変化ケースの測定値と計算値

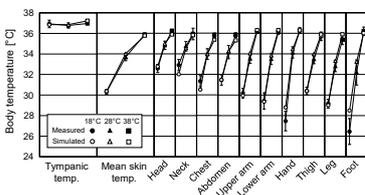


図11 部位別体温の測定値と計算値

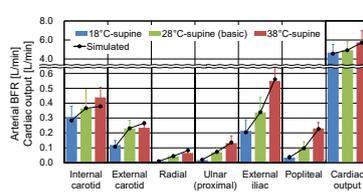


図12 皮膚血流量の測定値と計算値

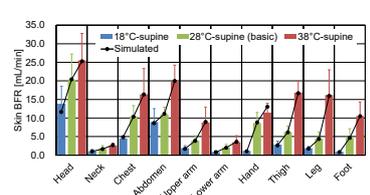


図13 動脈血流量の測定値と計算値

(4) 個人特性に関する文献調査

年齢や性別などの個人特性に関わる各要素と発汗量や循環系との関係について、文献調査で得られた主な知見を表3と表4にまとめて示す。これらの調査結果より、個人特性には体格や代謝熱産生量の違いで説明される部分とそれ以外の部分があり、これらを切り分けて考慮すべきことを確認した。

表3 発汗量に関する調査結果（概要）

個人特性要素	発汗量
① 年齢↑	↓（下半身から始まり胴体へ）
② 熱順化↑	↑（短期）、↓（長期）
③ 性別	男性>女性（主に④⑤に起因）
④ 表面積体重比↑	↓（顕熱放熱量増大に起因）
⑤ 最大運動強度↑	↑（主に代謝熱産生量増大に起因）

表4 循環系に関する調査結果（概要）

個人特性要素	Cardiac output	動脈ステイフネス	皮膚血流量
① 年齢↑	↓（成人以降）	↑	変化なし（熱的中立状態） 血流増加率↓（暑熱環境） 血流減少率↓（寒冷環境）
② 性別	男性>女性（体格に起因）	男性≧女性	男性≧女性
③ BMI↑	↑（主に代謝量に起因）	↑	↑（代謝熱産生量などに起因）

(5) 不均一環境下における生理反応に関する調査

部位感度に関する文献調査より、複数の研究で一貫して額の感度が有意に高いことが示されており、その他の部位では一貫した傾向がみられないことが明らかになった。また、局所効果については、その存在が複数の実験で証明され、温度係数 Q_{10} が2~5であることが分かった。ただし、既往研究では大腿と前腕の局所効果しか明らかにされておらず、その他の部位でも同様の Q_{10} を示すかは不明であった。このことより、それ以外の部位を含めた様々な部位の局所効果を明らかにすることに焦点を定め、そのための実験方法について検討を行った。その結果、室温一定環境下において特定部位の左右のうち片側を局所加温し、そのときの左右の発汗量および皮膚血流量の違いを比較することによって局所効果を評価する方法を採用することとした。さらに、局所加温の方法に関して、発熱体を直接接触させて加温する方法と、赤外線ランプの照射によって非接触で加温する方法を検討した。その結果、直接接触による加温方法では、皮膚圧迫による推定される発汗量と皮膚血流量の抑制が観察されたため、非接触による加温方法を採用することとした。この新たな実験方法により、発汗量および皮膚血流量に対する局所皮膚温度の局所効果について観察できる見通しを得た（図14）。

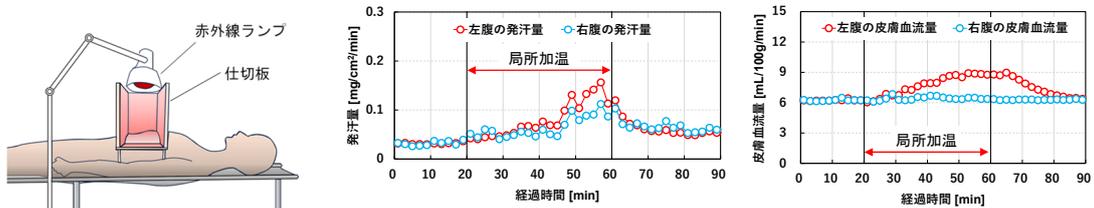


図14 局所効果に関する実験方法の確立

(6) シミュレーションの一般利用へ向けた改良

シミュレーションプログラム内で使用するほぼ全てのパラメータおよび解析条件を、外部入力ファイルから制御できるように改良した。さらに、データの入出力ファイルのフォーマットを新たに整備し、入出力データを容易に理解および操作ができるように構成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 後藤伴延
2. 発表標題 熱的健康被害防止のための人体モデル開発
3. 学会等名 第52回熱シンポジウム「温熱環境とウェルネス」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤伴延, 牛卓希, 石田泰之, 千葉友樹, 天野健太郎, 高木理恵
2. 発表標題 非正常条件下における生理反応の詳細測定に基づく新たな人体モデルの開発
3. 学会等名 室内環境学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomonobu Goto, Zhuoxi Niu, Yuki Sakamoto, Yuki Chiba, Kentaro Amano
2. 発表標題 Development of human thermophysiological model based on detailed measurements of human responses under three transient conditions
3. 学会等名 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤伴延
2. 発表標題 健康影響評価のための人体モデル開発
3. 学会等名 第50回熱シンポジウム「建築熱環境を考える～これまでの50年とこれからの50年～」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本佑紀, 宍倉健太, 黄思遠, 千葉友樹, 天野健太郎, 後藤伴延
2. 発表標題 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションに関する研究(その15) 標準的な20代男性を対象とした物理モデルパラメータの検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤伴延, 宍倉健太, 坂本佑紀, 黄思遠, 千葉友樹, 天野健太郎
2. 発表標題 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションに関する研究(その16) 標準的な20代男性を対象とした生理モデルパラメータの検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉友樹, 天野健太郎, 宍倉健太, 坂本佑紀, 黄思遠, 後藤伴延
2. 発表標題 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションに関する研究(その17) 低温環境下でのふるえ熱産生に関する既往研究レビュー
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021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
研究 分 担 者	高木 理恵 (Takaki Rie) (30466536)	東北工業大学・ライフデザイン学部・准教授 (31303)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	石田 泰之 (Ishida Yasuyuki) (20789515)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

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