

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04146

研究課題名(和文) 疑似触覚による「重み」感覚を利用した指のすべり摩擦における触感の再現化

研究課題名(英文) Reproduction of tactile perception in sliding friction of fingers using pseudo-tactile "weight" perception

研究代表者

青木 才子 (AOKI, SAIKO)

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：30463053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：触感の刺激因子として、表面粗さ、指先皮膚の水和状態に着目し、表面粗さが異なるガラス表面上で指の摩擦測定と触感試験を実施し、摩擦による触感の表現指標の確立を試みた。指先皮膚の水和状態の差異により摩擦係数の大小だけでなく摩擦係数の安定性や振動に差異が生じることがわかった。すべり感やさわり心地を心理尺度値で表現し指の摩擦特性と比較した結果、すべり感は皮膚の水和状態に依存し摩擦係数や分散と相関がある一方、さわり心地は材料表面の物性と相関があり相関は見られなかった。指先皮膚の水和状態や摩擦係数など界面現象に相関があるすべり感は心理尺度値を用いて定量的に表現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面粗さ、指先皮膚の水和状態、画面応答遅れなど触感刺激因子と指の摩擦特性との相関分析により、すべり感など界面現象に関連のある触感を定量的に表現することができ、これは学術的独自性の高い成果である。触感の定量的表現を進展させて視覚刺激や摩擦刺激により擬似的な「重み」感覚を再現することが可能になれば、触感を制御する新たなインターフェースの開発が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Focusing on surface roughness and hydration state of fingertip skin as stimulating factors for tactile perception, we conducted friction measurements and tactile perception tests of fingers on glass surfaces with different surface roughness. The hydration state of finger caused differences not only in friction coefficient but also in its stability. Perceived slipperiness and touch feeling were expressed as psychometric values and compared to the friction properties of finger. Perceived slipperiness was dependent on the hydration state of finger and correlated with the friction coefficient and its stability, while touch feeling was correlated with the physical properties of the material surface and showed no correlation with friction. Perceived slipperiness correlated with interfacial phenomena such as the hydration state of the finger and the friction coefficient can be quantitatively expressed using psychometric values.

研究分野：トライボロジー、潤滑油、感性工学

キーワード：指の摩擦 疑似触覚 皮膚水和状態 表面粗さ 触感

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間性に配慮したものづくりの実現に向けて、人と機械を結ぶユーザインターフェースには快適な操作性やユーザビリティの向上だけでなく、人の嗜好に寄り添う「リアルな触感」を付与することが求められている。触覚を与える手段として、指への摩擦刺激だけでなく、視覚的な刺激を与えることで擬似的な触覚 (Pseudo-Haptic) を誘起させることが可能である。例えば、タブレット端末のディスプレイ上に表示された「●」のマークを指で動かすとき、「●」の動きに時間的な遅れ (応答時間) を生じさせると、「重い」という感覚が引き起こされると同時に、触感に対する力学的応答として指への押し付け荷重や摩擦などが変化する。これは、視覚的刺激により誘起された触感が摩擦抵抗や荷重などの指における力学的変化として現れることを示しており、「重い」という触感は入力される既知の視覚的刺激だけでなく、出力される力学的応答によっても定量的に表現できる可能性がある。また、視覚的刺激以外にも、すべり面のせん断強さを変化させることで「重い」という感覚を押付荷重などの力学的変化で得られることもわかっている。このように、ディスプレイ応答時間の遅れなどの視覚的刺激やすべり面のせん断強さなどの摩擦刺激を制御して任意の触感を与え、それに応じて生じる力学的変化を数値化して、入力値の刺激と出力値の力学データの双方向から触感を定量化することは、「重み」感覚の再現化に向けて重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、タブレット操作時での指のすべり動作における触感の再現化を目標として、視覚的刺激や摩擦刺激により誘起された疑似あるいは実際の触感とそれら触感に対応する力学的応答の相関を明らかにして、触感を定量的に表現する指標を確立することを目的とする。

(1) ディスプレイ表面での指のすべり動作における指の接触面観察と摩擦特性の評価

3成分力センサで構成された平板型摩擦測定装置を用いて、指のすべり動作時における摩擦力と指の接触面積の測定を実施して、指のすべり動作における摩擦力、荷重等力学データと指の接触状態との関連性を明らかにする。指への摩擦刺激として、相手摩擦材の表面特性として表面粗さ、指先の物理化学特性として皮膚の水和状態に着目し、表面粗さ形状が異なる各種ディスプレイ用ガラス基板を相手摩擦材として水和状態が異なる指により摩擦測定を実施し、皮膚の水和状態の変化がもたらす指の接触状態の変化が摩擦力などの力学データに与える影響について評価を行う。

(2) ディスプレイ画像の応答遅れから生じる心理的および力学的変化の相関評価

Windows タブレットを用いて視覚刺激を付与するプログラムの作成を行う。基本構成として、画面上のマーク (●) を左から右へ動かす操作を2回連続で行うとき、1回目と2回目のどちらか一方のみにランダムに応答遅れを生じさせる仕組みとする。応答遅れによる触感の変化を評価するため、1回目の操作と2回目の操作のどちらが重く感じたか、画面上のアンケートに回答する仕組みも追加する。この Windows タブレットを平板型摩擦測定装置に組み込み、開発したプログラムによる疑似触覚体験下で摩擦測定を実施する。応答遅れ時間など視覚的刺激因子、測定により得られた摩擦力や垂直荷重、アンケート回答確率のそれぞれについて相関を調査する。

(3) 指の摩擦刺激と視覚的刺激による触感の表現指標の確立

触感の支配的因子 (表面粗さ、皮膚の水和状態、ディスプレイ応答遅れ時間など) に対する出力パラメータとしての力学データ (押し付け荷重、せん断強さなど) との定量的相関を明らかにして触感の定量化を試みる。両者の相関を表す指標を抽出して、その指標による触感の再現化について提案を行う。

3. 研究の方法

(1) ディスプレイ表面での指のすべり動作における指の接触面観察と摩擦特性の評価

圧電型 3成分力センサを中心に設置した既存の平板型摩擦測定装置を用いて、指のすべり動作における荷重と摩擦力を測定した。この平板型摩擦測定装置の上に、端末操作における指の接触点座標と時刻を取得する自作のアプリケーションソフトを組み込んだタブレット端末を設置し、さらにそのタブレット端末上に相手摩擦材であるガラス基板を貼付した。当初、この平板型摩擦測定装置に既存の高速度カメラを組み込み、摩擦測定と同時に指のすべり動作における接触状態の画像解析を取得できるよう改良する予定であったが、摩擦測定と画像取得を同期させることが困難であるため、従来の ink-stamping 法により接触面積の測定を行うこととした。

指への摩擦刺激として、相手摩擦材の表面特性として表面粗さ、指先の物理化学特性として皮膚の水和状態に着目した。相手摩擦材として汎用の無アルカリガラス (イーグル XG®) 基板を使用しショットブラスト加工により数種類の等方性粗さをそれぞれ施した基板を作製して、指の摩擦測定に供した。

また、皮膚の水和状態の影響を調査するため、乾燥・湿潤状態などの異なる n-dry, c-damp, et-dry, w-damp の計 4 条件を設定した。n-dry 条件は、右手示指の指先を石鹼で洗浄後水分を拭き取り 5 分間静置した状態である。et-dry 条件は、n-dry 条件と同様に石鹼洗浄をした後消毒用エタノールに 5 分間浸漬し、皮膚の脱脂脱水を行った状態である。c-damp 条件は、n-dry 条件と同様に石鹼洗浄をした後、室温の水に 5 分間浸漬し、表面についた水を拭き取った直後の状態と

した。w-damp 条件は、n-dry 条件と同様に石鹸洗浄をした後、40°Cの温水に5分間浸漬し、表面についた水を拭き取った直後の状態とした。すべての条件について、表皮水分量およびヤング率を測定することにより指先のうるおい状態を評価した。表皮水分量はポータブル表皮水分計（Moisture Meter EpiD, Delfin Technologies 社）を用いて測定した。また、ヤング率は押込み試験機（Yawasa-5N-1, テック技販社）により測定した。

(2) ディスプレイ画像の応答遅れから生じる心理的および力学的変化の相関評価

Windows タブレット Surface Pro7+を用いて、指のすべり操作に対するディスプレイ画像の応答遅れを生じさせるプログラムを作成した。試作したプログラムを搭載した Surface Pro7+を既存の平板型摩擦測定装置に設置し、画像の応答遅れ時における指の摩擦測定を実施した。タブレット画面に2つのボール(●)を並列に表示し、この2つのボールをそれぞれ指で動かすとき、どちらか一方のボールに遅れが生じるように設定した。このボールを動かす軌道に清浄ガラス基板を2枚並べて、ガラス基板上における指の摩擦測定を行った。

(3) 指の摩擦刺激と視覚的刺激による触感の表現指標の確立

表面粗さや分子膜の有無など表面状態が異なる数種類のガラス基板を用いて、4種類の指の水和状態における触感試験を実施した。触感試験では、すべり感(Perceived slipperiness; PS)とさわり心地(Touch feeling; TF)について判定し、すべり感とは研究対象者の感じた指先の試験片に対するすべりやすさ、さわり心地とは指先で触ったときの感触の好ましさとそれぞれ定義した。触感試験は、「研究対象者に2種類のガラス基板を呈示、対象者は2種類の試験片上で指のすべり動作を行う、対象者に「2つのうちどちらがすべりやすい(さわり心地が好ましい)と感じるか」を質問してどちらかを選択させる、すべての組み合わせに対して ~ を繰り返す」という一対比較法を実施した。

4. 研究成果

(1) ディスプレイ表面での指のすべり動作における指の接触面観察と摩擦特性の評価

表面粗さが異なる数種類のガラス基板における指の摩擦測定を研究対象者8名(20代の男女)に対して実施した。8名の研究対象者から測定した右手示指の表皮水分量およびヤング率の平均値を図1および2に示す。図1より、自然乾燥条件である n-dry およびエタノールによって脱脂・脱水された et-dry では水分含有率は小さく、水中浸漬から取り出した直後である c-damp および w-damp では大きい結果となった。図2より、すべての荷重域において、ヤング率は2つの damp よりも2つの dry の方が増大する傾向であった。damp 条件では皮膚への水浸透により皮膚組織が膨潤して外力に対する変形が大きくなるためヤング率が減少するが、dry 条件では水分の減少により変形が小さくなりヤング率が増加したことが伺える。

4種類の水和状態における指を用いて、表面粗さが異なる数種類のガラス基板における摩擦測定を実施した。ここでは、粗さの異なる3種類のガラス基板について結果を示す。図3は3種類のガラス基板の AFM 高さ像である。「Glass」は洗浄後の無アルカリガラス基板そのものであり、「50-L」はショットピーニング加工により $S_a = 50$ nm 程度の等方性粗さを有するガラス基板、「300-L」は同じく加工後 $S_a = 300$ nm 程度の等方性粗さを有するガラス基板である。研究対象者8名から得られた摩擦試験結果として、垂直荷重に対する平均摩擦係数の変化を図4に示す。図4より、基盤の種類に関わらず、測定荷重範囲において dry よりも damp の方が高い摩擦係数を示した。また、damp では荷重の増加に伴い摩擦係数は大幅に減少する一方、dry では荷重によらず摩擦係数はほぼ一定の値を示した。図1および2の結果を踏まえると、damp では水和による皮膚の軟化により荷重に伴い接触面積が増大するが、dry では弾性変形量が少なく接触面積は小さいままである。この接触面積の違いが摩擦特性の差異に現れたことが考えられる。さらに、基板間の差異に着目すると、表面粗さの大きい300-Lでは、damp 条件においても低荷重域で比較的低い摩擦係数を示すことから、粗さの付与によって指の接触面積の減少が起こり摩擦係数の低減につながる事が考えられる。

ところで、指のすべり時間に対する摩擦力の変化を確認すると、

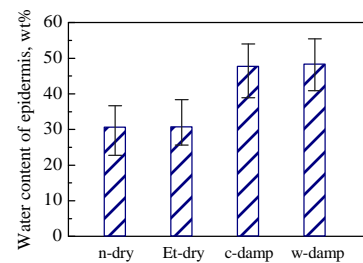


図1 各水和状態における指表皮水分量

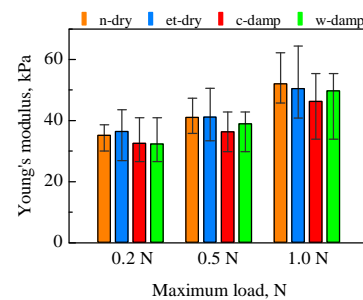
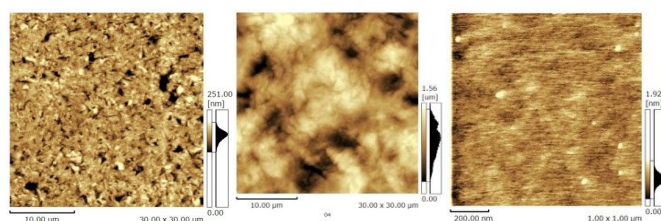


図2 各水和状態における指のヤング率



(a) 50-L (b) 300-L (c) Glass

図3 各水和状態における指のヤング率

一部の条件において摩擦力は一定ではなく振動が見られることがわかった．この振動特性を評価するため，摩擦係数の分散 (variance, μ_q)，歪度 (skewness, μ_{sk}) を算出し評価を行った．図 5 はランダムに抽出した 1 名の研究対象者から得られた分散と歪度の比較である．図 5 より，分散は dry では小さく，damp では大きくなり，これは dry の方が振動は小さく安定した摩擦挙動であることを示している．一方，度では，damp において 0 より小さく（尖度も 3 より小さい）なり，このときに図 6 に示すような不均一な振動 (stick-slip 振動) が生じることが推察される．以上の結果をより，指の水和状態が異なることにより，摩擦係数の大小だけでなく摩擦係数の安定性や振動に差異が生じることが明らかになり，この差異は触感にも影響を与える可能性があると思像できる．

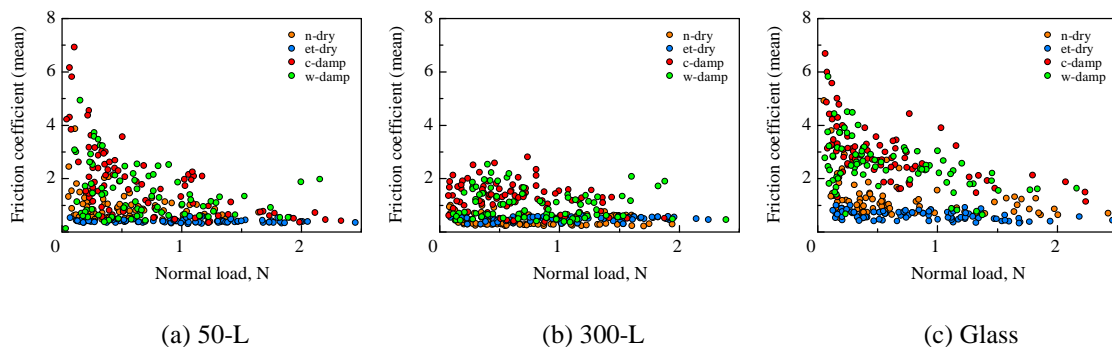


図 4 種類の水和状態における垂直荷重に対する平均摩擦係数の変化

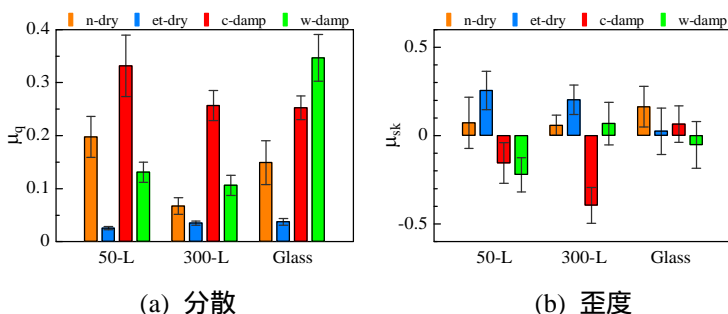


図 5 すべり時間に対する摩擦係数の変化における分散と歪度

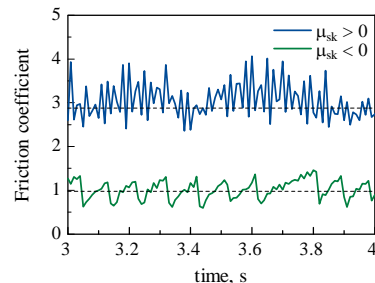


図 6 すべり時間に対する摩擦係数の不均一な振動

(2) ディスプレイ画像の応答遅れから生じる心理的および力学的変化の相関評価

図 7 に示すように，試作したプログラムを搭載した Surface Pro7+ を既存の平板型摩擦測定装置に設置し，研究対象者 3 名に対して指の摩擦測定を実施した．ランダムに抽出した 1 名の結果を図 8 に示す．図 8 は，応答遅れが起きた場合 (Time-delay) の垂直荷重から応答遅れがない場合 (Normal) の荷重の差分を応答遅れ時間に対してプロットした図である．時間の増加に伴い荷重の差分は増加したことから，ボールの遅れ時間が長くなるほど指へ加える荷重が増大することがわかった．すなわち，遅れの間隔の与え方という視覚的的刺激により指にかかる垂直荷重という力学的応答に差異が現れることが明らかになった．このプロトタイプの結果を踏まえて，今後はプログラムをさらに改良し複数の研究対象者に対する評価を行う．

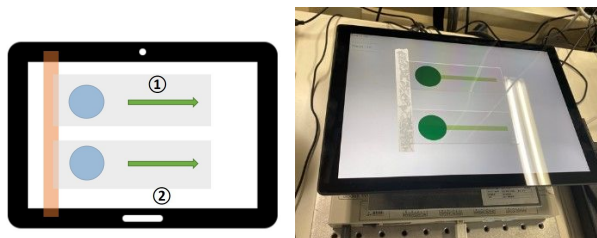


図 7 試作した応答遅れプログラムと摩擦測定の外観図

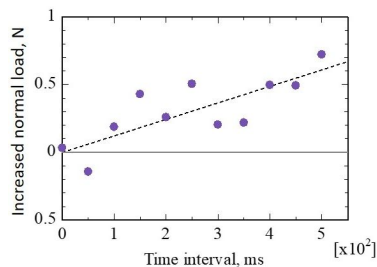


図 8 応答遅れによる荷重増加分と応答遅れ時間の関係

(3) 指の摩擦刺激と視覚的的刺激による触感の表現指標の確立

上記(1)で使用した指の水和条件およびガラス基板を用いて，8 名の研究対象者に対して触感試験を実施した．一対比較法にて 2 種類の基板のすべり感とさわり心地の有無を判定し，判定した

人数により選択確率を算出した後、標準正規分布の累積分布関数の逆関数の式に代入し、すべり感・さわり心地の相対距離を求め、これを心理尺度値 (Scale value) とした。なお、すべり感の尺度値が大きい場合、よりすべりやすいと感じたことを示し、さわり心地の尺度値が大きい場合はさわり心地が良いと感じたことを示す。図9は、指の摩擦測定で得られた平均摩擦係数に対して、その測定と対応する指と基板の組み合わせに対応するすべり感およびさわり心地の尺度値をプロットした図である。図9より、平均摩擦係数とすべり感には負の相関があり、低摩擦であるほどすべりやすいと感じることがわかった。dry よりも damp で高摩擦でありすべりにくいと感じる傾向であった。一方、さわり心地の場合、すべり感のように明確な相関は現れず、すべり感とは異なる知覚のメカニズムであることが伺える。図10に4種類の指の水和状態におけるすべり感およびさわり心地の尺度値を示す。すべり感の場合、dry ではすべての基板での尺度値が0~2の範囲に分布し、damp では幅広く分布する傾向であった。すなわち、dry ではすべり感の差異が生じにくい、damp ではすべり感を知覚しやすく、これよりすべり感は摩擦係数の大小や分散の程度など界面現象に基づく知覚であることが考えられる。一方、さわり心地の場合、指の水和状態に関わらず、尺度値の分布が類似していた。尺度値が指のすべり動作に基づく数値であるため、さわり心地は皮膚物性や界面現象に依存せず、触感覚の恒常性として対象者の主観や環境、経験に影響を受けやすい知覚であることが伺える。

本研究では、触感の支配的因子として、表面粗さ、皮膚の水和状態、ディスプレイ応答遅れ時間に着目し、これら因子に対する出力パラメータとして垂直荷重や摩擦係数、摩擦係数の分散などの力学データを得ることができた。さらに、これら力学データとすべり感やさわり心地などの触感との相関を検討し、すべり感やさわり心地は摩擦に起因する心理尺度値を用いて定量的に表現できることを明らかにした。

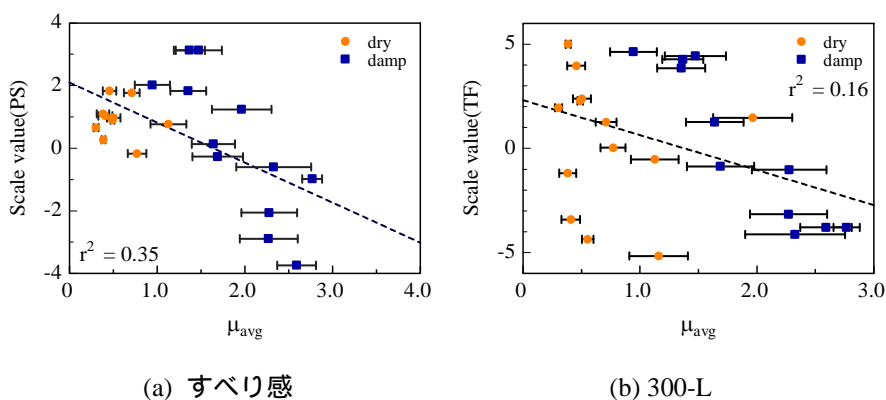


図9 指の平均摩擦係数と心理尺度値との関係

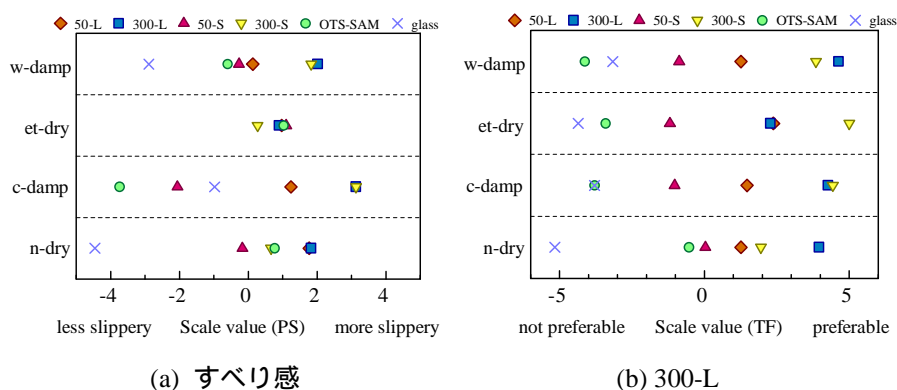


図10 心理尺度値と指の水和状態との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Wu Han, Saiko Aoki
2. 発表標題 Evaluation of Correlation between Shear Strength and Normal Load Applied to a Finger Sliding on the Striped Surface with Molecular Layers
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (ITC Sendai 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu Yimeng, Saiko Aoki
2. 発表標題 Dynamic Response to Frictional Stimulus Applied to a Finger Sliding against Striped Glass Surfaces with a Molecular Layer
3. 学会等名 44th Leeds-Lyon Symposium on Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻晴彦, 青木才子
2. 発表標題 指先のすべり摩擦特性に及ぼす皮膚のうるおい状態の影響
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 秋 松江
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
---------------------------	-----------------------	----

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