

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22871

研究課題名（和文）自己言及性に基づく主観的触知覚モデルの構築

研究課題名（英文）Model of subjective tactile perception based on the self-reference

研究代表者

田中 由浩（Tanaka, Yoshihiro）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90432286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、粗さを対象にして触覚の個人差を明らかにすることを目的とし、対象、皮膚に加わる機械刺激（振動、摩擦）に加え、皮膚特性（水分量、粘弾性、指紋など）および各刺激に対する触覚感度との関係を解析した。実験の結果、若年群と高齢者群における皮膚振動および摩擦係数の違いや皮膚特性との関係、皮膚伝播振動の個人差や振動感度との関係、指の姿勢や運動が粗さ感に与える影響や粗さにより押付け力の感覚変化などを明らかにした。また、力学的要素だけでなく認知的要素にも個人差が多いに関与することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、触覚が対象の物理特性だけでなく、個々人の皮膚特性や運動特性、さらに認知特性によって変化することを示し、個々人の感覚を見ることの重要性を示した。得られたそれぞれの特性に関する知見は、触覚の知覚メカニズムの研究だけでなく、触覚の定量化や個々人にあった触覚デザインに役立てることができ、粗さ感だけでなく主観的な触覚の設計と活用に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify individual differences in tactile sensation for roughness. In addition to objects' properties and mechanical stimulation (vibration and friction) applied to the skin, skin characteristics (moisture content, viscoelasticity, fingerprints, etc.) and tactile sensitivities were investigated in the relationship among each other. The experimental results showed the difference in skin vibration and friction coefficient between the young group and the elderly group and its relation with the skin characteristics, individual difference in skin-propagated vibration and its relationship with the vibrotactile sensitivity, the influence of the posture and movement of the finger on the roughness, and the perceptual bias of the contact force by the roughness. In addition, it was indicated that not only mechanical factors but also cognitive factors are involved much in individual differences of tactile sensations.

研究分野：触覚，ロボティクス，メカトロニクス

キーワード：触覚 粗さ感 皮膚特性 皮膚振動 個人差 感度 振動伝播 主観モデル

### 1. 研究開始当初の背景

触覚は我々が接触を通して外界を認知するための感覚であり、製品のさわり心地や快適性などの付加価値向上から、近年では、VR、遠隔操作やアシストロボットにおける触覚伝送による実感や操作性の向上まで、広く活用が注目されている。しかし、未だ触覚を定量的に扱えておらず、試行錯誤的な感覚のチューニングが行われている。触覚の定量化が困難な一つの要因として触覚が極めて身体に依存した主観的感覚であることが考えられる。先行研究の多くは、対象の物性値と触覚との関係を解析したものが多く。しかし、触覚は、自身の皮膚の変形や振動、温度変化を基に知覚されており、自己言及的な感覚である。すなわち、対象物の物性値だけでなく、皮膚の厚みや指紋の凹凸、乾燥などによっても、皮膚で生じる機械刺激は異なり、さらには、機械刺激に対する認知的な感度にも個人差があるだろう。同じ対象物に触れても、触覚は個人の特性によって異なる。そこで、対象物、皮膚の力学的特性、皮膚に生じる機械刺激、感度、得られる触覚の一連の関係を明らかにすることで、主観的触覚を定量的に扱えるのではないかと考えた。触覚の本質に迫り、個々人の感覚を見ることの重要性を示し触覚研究の基礎から応用までパラダイムシフトをもたらすことが期待される。製品では、子供や高齢者など使用者に合った感覚設計を可能にし、日常生活だけでなく、福祉、リハビリテーションにも展開が広がる可能性がある。遠隔操作やアシストを始めとする身体拡張技術では、使用者に親和性の高い触覚伝送を可能にし、他者との触覚の共有、標準化が図れ、システムティックな感覚調整が行える。このようにして主観的触覚を設計論に組み込むことができる。

研究代表者は、上述した自己言及性に注目し、対象に直接触れながら皮膚の振動を取得できるウェアラブルセンサを開発した(引用文献①)。このセンサを活用し皮膚特性や感度の計測も加えれば、対象から感覚まで個人特性を含めて解析ができる。これまでにも、同じ対象でも人によって皮膚振動が異なり、さらに機械刺激の差だけでなく、各刺激に対する認知の重みの差もある可能性を見出している。

### 2. 研究の目的

上記の背景を基に本研究では、皮膚振動センサを活用して触覚の個人差を明らかにすることを目的とする。対象は、将来発展を考慮し、触覚の基本要素で重要な粗さとする。粗さは基本要素であるにもかかわらず、未だその知覚原理は明らかになっておらず、表面凹凸の空間情報、皮膚の振動、摩擦力、それぞれ寄与することが議論されている。そこで、対象、皮膚をベースとする機械刺激に加え、皮膚特性(水分量、粘弾性、指紋など)および各刺激に対する触覚感度との関係を解析し、個人の粗さ感と対応可能な主観的触覚モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 皮膚特性と機械刺激および感度との関係解析

皮膚特性として、水分量や粘弾性に着目し、被験者として若者および高齢者を対象とし、摩擦係数や皮膚振動の違い、および粗さ感との関係を調べた。また、皮膚振動伝播の伝達関数を計測し、個人差を調べ、振動検出感度との関係について調べた。

皮膚振動や摩擦係数は図1に示すように、被験者の人差し指の第1関節と第2関節の間に研究代表者がこれまでに開発した

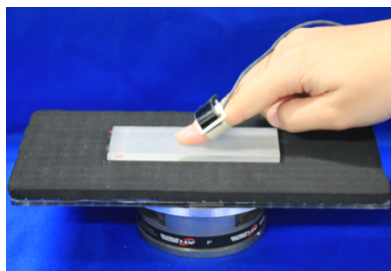


図1 ウェアラブル皮膚振動センサと6軸力センサによる計測

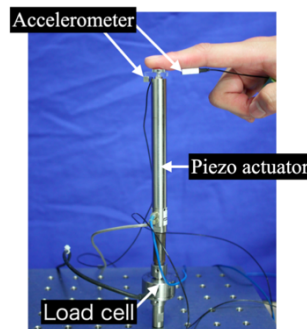


図2 皮膚伝播振動の伝達関数の計測

皮膚振動センサを装着し、試料を6軸力センサの上に配置し、これに対し当該人差し指でなぞり運動を行うことで計測する。試料には、粒子径を揃えて表面にマイクロビーズを敷き詰めたものや、一定のピッチの凹凸、布地などを用いた。皮膚伝播振動の伝達関数は図2に示すように、圧電アクチュエータを用いて指先にスイープ振動を入力し、この時の入力加速度と指で生じた振動の加速度から算出した。加速度センサは、皮膚振動センサと同様の位置に配置した。

#### (2) 知覚と運動や姿勢との関係解析

運動や姿勢によっても皮膚への機械刺激は変化し、またその機械刺激に基づく感覚に応じて、運動も変化する。そこで、運動や姿勢が変化した際の、皮膚振動や粗さ感の変化、また、押付け力の感覚などに及ぼす影響について調べた。

### (3) 各刺激の認知的負荷の関係解析

表面凹凸と振動、摩擦を試料によって独立に制御することは困難である。そこで、視覚に基づく錯覚を利用して、これらの複数刺激を独立に制御可能な触覚提示装置を開発し、各種刺激が粗さ感に及ぼす影響を、個人々に着目しながら検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 皮膚特性と機械刺激および感度との関係解析

#### ①若年群と高齢者群の比較

健康な若年女性群 10 名と健康な高齢者女性群 10 名に対して皮膚水分量や粘弾性を予め計測し、布地を用いて皮膚振動や摩擦係数を計測する実験を行った。実験の結果、図 3 に示すように高齢者群の皮膚振動強度および摩擦係数が、若年群と比較し有意に小さい結果を得た。また、摩擦係数では、皮膚水分量および粘弾性との間に相関が示され、皮膚特性と機械刺激の関係性が示された。

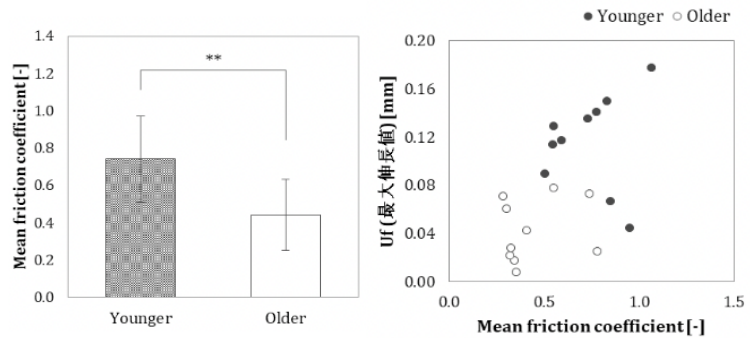


図 3 若年群と高齢者群における摩擦係数の比較および摩擦係数と粘弾特性との関係

粗さ感やその他の触感と機械刺激および皮膚特性の関係をまとめて見ると、必ずしも一意に表すことができず、力学的要因のみではモデル化が困難であることが示唆された。

#### ②皮膚伝播振動の個人差

18-32 歳の男女 28 名に対して皮膚伝播振動の伝達関数を計測し、クラスター解析を行った。結果を図 4 に示す。これまでの知見と同様に、皮膚伝播振動の伝達関数は 100-200Hz 周辺にピークを有したが、特に、高周波振動の減衰に特徴があることが示され、減衰が大きいグループと小さいグループに分けられることが明らかになった。マス・バネ・ダンパーに拡散係数を加えたモデルからは、グループ間において、バネ定数以外に有意差が認められた。また、伝達関数のクラスター解析の結果では、減衰が小さいグループに有意に女性が多く確認され、皮膚の厚みや指の大きさとの関係が推察された。さらに、この特徴を基に、高周波数として 400Hz の振動に対する検出閾値を計測する実験を行った。その結果、図 5 に示すように伝達関数のゲインと振動検出閾値との間に負の相関関係が認められ、皮膚特性に応じた感度の個人差が明らかとなった。ただし、この相関関係は統計的に有意と認められたものの、強い相関ではなく、力学的要素だけでなく、認知的要因による個人差も大いにある可能性が示唆された。

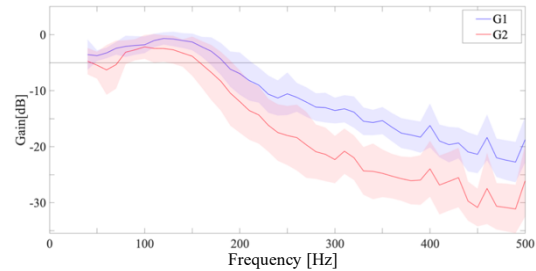


図 4 クラスター解析に基づく皮膚伝播振動の伝達関数 (グループごとの伝達関数の平均および標準偏差)

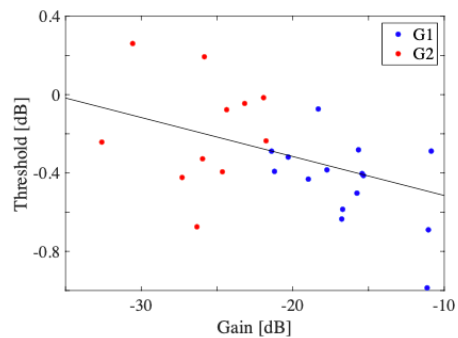


図 5 400Hz の正弦波振動に対する伝達関数のゲインと振動検出閾値との関係

### (2) 知覚と運動や姿勢との関係解析

#### ①指の姿勢が感度や粗さ感に与える影響

指先は指腹よりも硬い。物体に触れる際には姿勢も個人々人や環境に応じて異なる。そこで、指先と指腹による個人内の感度の違いを調べた。21-24 歳 12 名の被験者に対して、圧電アクチュエータを用いて、20Hz および 200Hz の振動を指先および指腹に与え、検出閾値を計測した。その結果、図 6 に示すように、いずれの振動に対しても指先が指腹よりも有意に振動閾値が低く、敏感であることが明らかになった。

さらに指紋の配向に着目した。指紋は指腹中央を中心として楕円の形状をしている。したがって、指先では指紋は指長手方向に対して横方向に並んでいるような形状をなしている。指紋は、なぞり時に振動を増強することが知られているため、このような配向が皮膚振動や粗さ感に影響する可能性が考えられる。そこで、指先におけるなぞり動作において、指長手方向になぞった場合と、横方向になぞった場合における皮膚振動と粗さ感を調べた。19-24 歳の 12 名の被験者に対して凹凸の表面を持つ試料を用いた実験の結果、図 7 に示すように横方向に比べて長手方



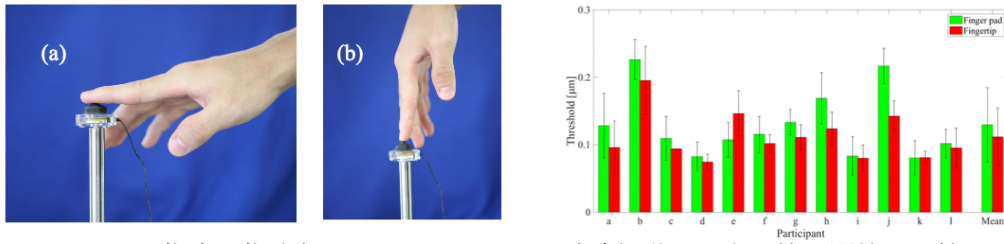


図6 指先と指腹部における200Hzの正弦波振動に対する検出閾値の比較

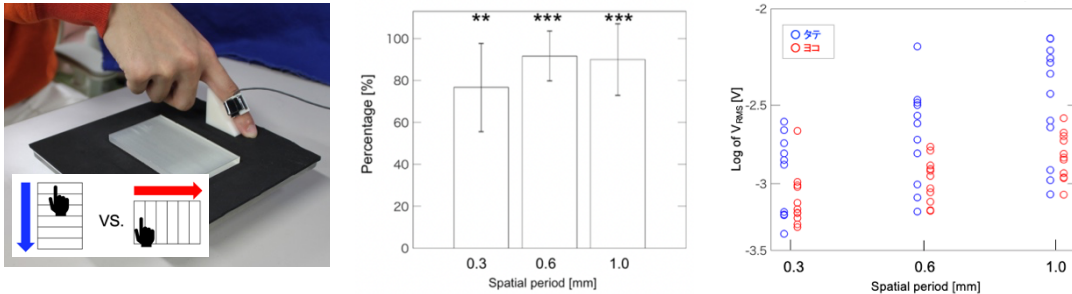


図7 指の姿勢と縦なぞりと横なぞりにおける粗さ感および皮膚振動強度の比較（縦なぞりに対して粗いと答える頻度が高く、皮膚振動が大きい）

向になぞった場合に、有意に大きな皮膚振動が生じ、粗さ感も有意に大きいことが示された。また、追加実験として横方向のなぞりにおいては、指先よりも指腹でなぞった方が、皮膚振動が大きくなることが示され、なぞり方向と指紋の配向との関係を支持する結果が得られた。これらのことから、粗さ感において姿勢の影響を十分考慮する必要があることが明らかとなった。

### ②押付け力の感覚と粗さ感との関係

粗さの異なる2つの試料を準備し、同じ押付け力の感覚でなぞり動作を行う実験を19-32歳の11名の被験者に対して行った。その結果、図8に示すように、同じ試料をなぞった場合には、押付け力に差は認められなかったが、異なる粗さの試料をなぞった場合に、11名中6名について、粗い試料をなぞった際に有意に小さな押付け力を使用したことが明らかとなった。これは、粗さによる押付け力の感覚バイアスを示唆する結果と言える。個人差はあるが、粗い試料に対して押付け力を大きく見積もる傾向があることが示された。押付け力は皮膚振動強度にも影響するため、自然な動作で対象をなぞる際に、考慮すべき事項であり、個人差を生む特性であることが明らかとなった。

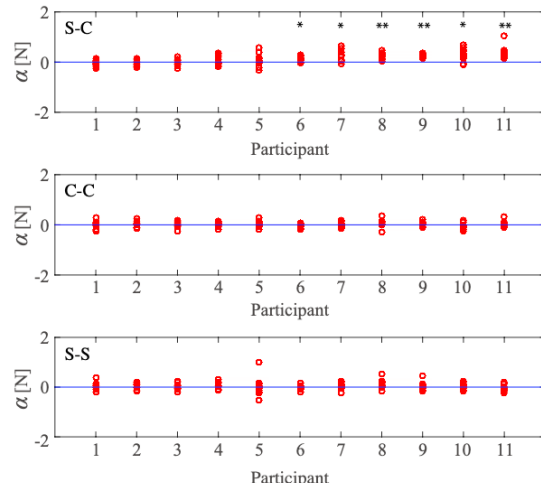


図8 粗い試料(C)と滑らかな試料(S)を同じ押付け力と感じながらなぞった時の実際に使用した押付け力の差

### (3) 各刺激の認知的負荷の関係解析

皮膚特性や運動、姿勢の影響が機械刺激に与える影響を明らかにしてきたが、粗さ感との関係について力学的要素のみならず、認知的要素も個人差を生む要因であることが明らかとなった。そこで、凹凸、皮膚振動、摩擦力を独立に制御して指先に与えることができる触覚提示装置を開発した(図9)。凹凸と摩擦を独立に制御することは難しいことから、指を動かさずに視覚的になぞり運動を行なっている錯覚を与え、ボイスコイルモーターを用いたリニアスライダにより最大静止摩擦力の範囲内で、指先に摩擦力を提示する手法を考案した。振動は、スライダに振動子をつけることにより与え、表面凹凸は、指を置く試料を変えることで調整する。摩擦力および振動は提示装置の下に配置した力センサにより計測した押付け力に応じて変化するようにした。予め参考となる試料の摩擦係数や皮膚振動を計測し、こ

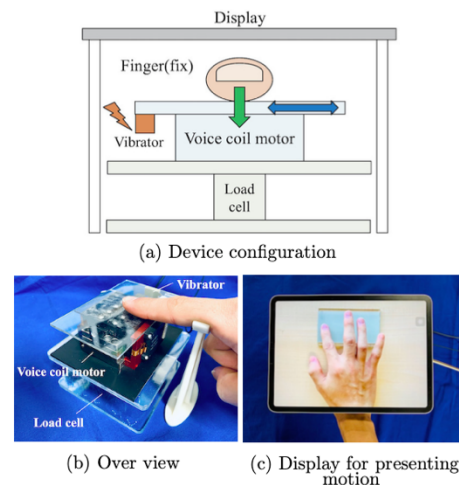


図9 凹凸・摩擦・振動の独立提示装置

れをなぞり運動の映像に合わせて再現した。各刺激を制御した実験では、これまでのように粗さ感に個人差が見られ、各物理量に対する認知負荷の違いも確認されたが、表面凹凸の影響が大きく働く傾向にあった。これはなぞり運動を行なっていないため、凹凸を乗り越えることによる摩擦や振動が不足している可能性があり、装置の改良とともに、各刺激の感度との関係についてはさらなる検討が必要と考えられる。今後、(1)(2)で得られた知見と統合し、認知的負荷による個人差分を定量化し、主観的触知覚モデル構築につなげたい。

<引用文献>

- ① Y. Tanaka, D. P. Nguyen, T. Fukuda and A. Sano, Wearable skin vibration sensor using a PVDF film, Proceedings of the 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), 2015, pp. 146-151, 2015. doi: 10.1109/WHC.2015.7177705

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中由浩, 佐野明人	4. 巻 20
2. 論文標題 皮膚と対象との力学的相互作用のデザインと数値化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 マテリアルステージ	6. 最初と最後の頁 11~16
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 Shirakawa Kaho, Tanaka Yoshihiro	4. 巻 12272
2. 論文標題 Influence of Roughness on Contact Force Estimation During Active Touch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nisky I., Hartcher-O'Brien J., Wiertlewski M., Smeets J. (eds) Haptics: Science, Technology, Applications. EuroHaptics 2020. Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 140~148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58147-3_16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤溪也, 川合章史, 田中由浩
2. 発表標題 表面の凹凸と振動, 摩擦力に基づく触感提示装置
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中由浩
2. 発表標題 主観的触覚情報の共有による共創社会
3. 学会等名 科学技術交流財団 新産業創出に向けたマイクロセンサデバイス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川合章史, 田中由浩
2. 発表標題 皮膚振動伝達関数の個人差クラスター解析
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川合章史, 田中由浩
2. 発表標題 粗さ感の原理分析のための因子別触刺激制御装置
3. 学会等名 第18回情報学ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中由浩
2. 発表標題 触覚テクノロジーの活用価値
3. 学会等名 電気硝子工業会第53回技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊豆南緒美, 佐藤真理子, 田中由浩
2. 発表標題 衣素材のなぞり運動における皮膚への機械刺激が触感に与える影響
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中由浩
2. 発表標題 知覚と運動の双方向性に基づく触覚技術展開
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2020先端技術フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊豆南緒美, 佐藤真理子, 三枝優希, 田中由浩
2. 発表標題 衣素材のなぞり運動における高齢者の皮膚振動に関する研究
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊豆南緒美, 佐藤真理子, 松井有子, 田中由浩
2. 発表標題 スポーツウェア素材の触感と皮膚振動に関する一考察
3. 学会等名 繊維学会年次大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川合章史, 田中由浩, 臼田信光
2. 発表標題 指腹と指先端の触覚感度に関する基礎研究
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 伊豆南緒美, 佐藤真理子, 田中由浩
2. 発表標題 衣素材のなぞり運動時における皮膚の振動・摩擦特性と触感に関する検討
3. 学会等名 日本家政学会第72回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三枝優希
2. 発表標題 高齢者の触覚と皮膚振動に関する研究
3. 学会等名 日本家政学会関東支部主催 第22回家政学関連卒業論文・修士論文発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 幸平, 田中 由浩, Astrid M.L. Kappers
2. 発表標題 凹凸表面に対する指紋の接触状態が皮膚振動に及ぼす影響
3. 学会等名 ハプティクス研究委員会第23回研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Robotics Lab, Nagoya Institute of Technology  
<http://rah.web.nitech.ac.jp>

## 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	佐藤 真理子  (Sato Mariko)  (10409336)	文化学園大学・服装学部・教授    (32674)	

## 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			
オランダ	Technische Universiteit Eindhoven			