

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13365

研究課題名（和文）ヒト視知覚における時空間的文脈効果の脳内処理

研究課題名（英文）Psychological and neural mechanisms of spatial and temporal context effects in human visual perception

研究代表者

金子 沙永（Kaneko, Sae）

北海道大学・文学研究院・准教授

研究者番号：60763183

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）：本研究は心理物理学的手法・脳機能計測手法の2つのアプローチから空間的・時間的文脈が視知覚に与える影響のメカニズムを明らかにすることを目的としていた。本研究では明度知覚において観察時間により空間的文脈が視知覚に与える効果が異なるという知覚のダイナミクスがあることを初めて報告した。また、空間的文脈に関する心理物理学の実験の個人差データ解析により、観察時間に応じて異なる機序が働くという仮説を支持する結果を得た。脳波測定を用いた研究では定常視覚誘発電位（SSVEP）という手法を初期視覚野での色情報処理検討に初めて用いた。結果は初期視覚野で既に知覚に対応した脳活動が見られることを示唆していた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果の学術的意義には以下の二点がある。一つには、先行研究で示された視知覚のダイナミクスがある程度普遍的な現象であることを示し、知覚特性を包括的に説明するモデルにはtime-variantな性質が必要であるというモデル研究の方向性を提案したことがある。もう一つには、ヒト色覚情報処理の神経基盤を検討する上で高効率かつ適応可能性の高い定常視覚誘発電位を用いた実験パラダイムを提案したことがある。特に後者に関しては、当該パラダイムが既に国内外の研究室において複数の方向性（患者群や乳幼児を対象とした研究等）に活用されていることから重要な意義であることが明らかである。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to explore the mechanisms of the effects of spatial and temporal context on visual perception from two approaches: psychophysical and neuroscientific methods. First, we reported the discovery of the dynamic nature of lightness perception, that is, that the effect of spatial context on lightness perception depends on the exposure/observation time. Second, our analysis of individual differences in psychophysical data supported the hypothesis that different mechanisms are at work depending on the stimulus duration. In our EEG study, the steady-state visual evoked potential (SSVEP) technique was used for the first time to examine color information processing in the early visual cortex. The results suggest that brain activity corresponding to perception is already present in the early visual cortex.

研究分野：実験心理学

キーワード：明るさ/明度知覚 色覚 定常視覚誘発電位 錯視

1. 研究開始当初の背景

ヒトは「外界のどこに、何が存在するのか」という情報の大部分を視覚から得ている。しかし目に入る大量の情報全てを等しく処理することは難しいため、我々にとっての有益な情報のみを効率的に処理する必要がある。効率的な視覚情報処理のため、我々は時空間的な文脈（見たいものの周りになにかがあるかという周辺情報）を利用していると考えられ、それを示す現象（e.g., 錯視）が複数知られている。見え方が隣接領域に存在する情報に影響を受ける空間的文脈効果の代表例としては同時対比がある。例えば明るさ同時対比では同じ灰色でも背景が明るい場合、背景が暗い場合よりも暗く見える。これは明るさの情報、視野全体でなく変化のある場所（エッジ部）の情報のみ強調されていることによって生じると考えられる。同様の現象は色覚、線分の傾き、点の密度など様々な視覚属性に関して見られ、このような空間文脈の利用が視覚的に普遍的な原則であることがわかる。

Kaneko & Murakami (2012)や Kaneko et al.(2017)では、空間文脈が明るさや色の知覚に与える影響が観察時間によって大きく異なることが示された。これらの研究では心理物理学的に測定した明るさ同時対比・色同時対比の錯視量が最短の刺激呈示時間条件(10ms)で最も大きいこと、錯視量が時間と共に指数関数的に減衰していくことが示された。さらに明るさ同時対比においては、短時間と長時間での錯視の効果に異なる空間特性があることも示唆された。これらの結果から、同時対比に見られるような空間文脈が知覚に及ぼす効果は時間と共に変化する動的な性質を持った情報処理ではないかという仮説が得られた。先述の通り、同時対比に代表されるような空間文脈の効果は幅広い視覚特徴において確認できるものであるため、このような動的特性がどの程度視覚情報処理に普遍的なものであるのかを明らかにする上で、こうした錯視効果と時間との関係性を検討することが有効な手段であるという発想を得た。

一方で、上記のような心理物理学的な手法では脳内でどのような視覚情報処理が行われているかの様相を直接的に知ることは難しい。そのため、心理物理学的知見を補足する目的のもと脳波測定を研究に採用することとした。他の脳機能測定技法と比べて時間解像度に優れた測定方法であるため、本研究で求める知覚のダイナミクスの神経基盤を調べる手法として最適であると考えた。本研究では脳波測定の中でも特に S/N 比の優れた定常視覚誘発電位 (SSVEP) という手法を用いた。

2. 研究の目的

本研究の目的は心理物理学・脳機能計測の2つのアプローチから、時空間的な文脈を利用した視覚情報処理の様相を明らかにすることであり、特に心理物理学的な手法からは「どのような視覚特徴がどのような条件下において文脈を利用しているのか」、脳機能計測の側面からは「文脈の効果は脳内でどのように実現されているのか」という問いを設定した。

(1) 明るさ同時対比・色同時対比の錯視量の個人差解析

これまでの先行研究において得られた同時対比の錯視量のデータは参加者全体の平均に基づいて議論されており、個人間に見られる錯視量の差については特段解析の対象としていなかった。この点に関して、個人差解析の手法に精通している John F Kennedy 大学(現・Fielding Graduate University)の Peterzell 博士から指摘を受け、既存のデータの個人差解析を行うことで背後メカニズムの検討を行う新たなアプローチを試みることとなった。本研究の目的は複数の実験にわたって得られた同時対比錯視量のデータに対し因子分析を行い、得られた因子構造が全体平均データに基づき得られた仮説と一致するものかどうかを問うことであった。Peterzell 博士および東京大学の村上教授、東北大学の栗木准教授(現・埼玉大学教授)との国際共同研究として実施した。

(2) 明度知覚のダイナミクスについて

空間文脈の効果が示す時間特性について、すでに確認された明るさ・色・傾き以外の視覚特徴として明度を研究対象とすることとした。明度(lightness)とは知覚される物体の表面反射率であり、明るさ(brightness)とは異なる。空間文脈が明度知覚に影響を与える例としては、同時対比の他にダンジョン錯視(図2左)や奥行き効果(Gilchrist, 1977)などが知られている。こうした錯視の効果が時間と共に変化するかどうかを本研究では問うた。本研究は明度知覚研究の世界的権威の1人であり、アンカリング理論の提案者である Rutgers 大学の Gilchrist 教授(現・名誉教授)との国際共同研究として実施し、一部実験は Rutgers 大学にて行った。

(3) 色相選択的な神経活動に関する SSVEP 実験

時空間文脈が色覚に与える現象に関する実験の準備段階において、ヒト脳での色情報処理の多くが未解明であることに興味を持つに至った。東北大学の栗木准教授(当時)と Aberdeen 大学の Andersen 上級講師(現 Southern Denmark 大学教授)との議論の中で、fMRI を用いてヒト脳での色相表現を検討した Kuriki et al. (2015)の補完として SSVEP が有効な測定手法であるとの着想を得て実験を実施した。本研究は上記2名との国際共同研究として実施した。本研究の目的はヒト脳、初期視覚領域における色相表現が皮質以前での色相表現と共通したものであるか否か、その様相を探索的に検討することであった。

3. 研究の方法

(1)明るさ同時対比・色同時対比の錯視量の個人差解析

Kaneko & Murakami (2012)および Kaneko et al.(2017)からすでに得られている 12 の心理物理データセットに対して因子分析を行った。これら先行研究から提案された仮説に基づき, 100 ms 前後で異なる因子が知覚を決定している因子構造を想定した。

(2)明度知覚のダイナミクスについて

明度同時対比, ダンジョン錯視, 奥行きによる明度錯視の 3 つの効果に関して表面反射率の制御された紙を用いて実物による刺激作成を行った。刺激デザインに関しては Gilchrist 教授の過去の研究で用いた刺激等を参照した。北海道大学で実施した発展研究においては当該研究 (Rutgers 大学で実施) で用いた刺激を参照に同等のものを作成し使用した。実験参加者はマンセル色票を用いて異なる観察時間での標的の明度を評価した。

(3)色相選択的な神経活動に関する SSVEP 実験

本研究では Kuriki et al. (2015)を参考に, 脳波測定に最適化された等輝度色刺激を用いた。視覚刺激の色相が錐体コントラストによって定義される色空間上で滑らかに変化する様子を観察している実験参加者の脳活動を記録した。色相選択的な神経活動を記録するため, 視覚刺激は 5 Hz で点滅しており, 5Hz での SSVEP 応答の振幅および位相によって色相選択的な神経活動を定義した。

4. 研究成果

(1)明るさ同時対比・色同時対比の錯視量の個人差解析

本研究では複数の研究に渡り得られた心理物理学的データから明るさや色の知覚において短時間観察と長時間観察で異なる機序が存在することが示唆された (図 1)。具体的には刺激の呈示時間が極端に短い (<100ms) 場合に支配的な因子と, 刺激の呈示時間が十分に長い場合に支配的な因子が錯視量に対して交代で高い因子負荷を持っている構造が一貫して見られた。このことはこれまでの心理物理学的研究(Kaneko & Murakami, 2012)から得られていた仮説を支持するものである。本研究成果は *iPerception* 誌に採択・掲載された。

本研究で用いられた解析方法は心理物理学的データのみならず, 例えば他研究で得られた脳波計測データ (Kaneko et al., 2020) などにも適応可能である。これまでの自身の研究では複数の実験参加者のデータの平均値をもとにした議論を行っていたが, このような個人差解析の手法を取り入れることによって各研究で得られたデータを多面的に解析し, 背後にある知覚メカニズムの検討を行うことが可能になった。(2)や(3)の研究およびその展開研究においても個人差解析の手法を積極的に採用している。

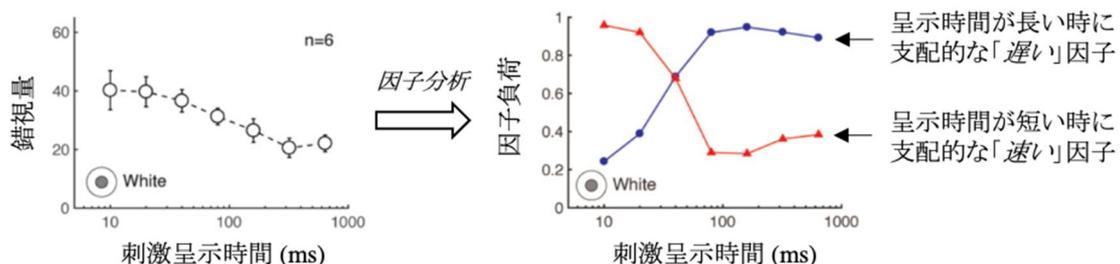


図 1: 心理物理学的研究で得られた錯視量データの個人差を因子分析により解析した結果, 刺激呈示時間の長さによって異なる因子が抽出できることが明らかになり, この因子構造は複数の実験で得られたデータに一貫して確認できた (Kaneko et al., 2018)。

(2)明度知覚のダイナミクスについて

本研究では短時間 (15 ms) 呈示と長時間呈示 (時間無制限) の比較において, 空間的文脈の効果が大きく異なることが明らかになった。短時間呈示の場合に同時対比の効果は強まり, ダンジョン錯視の効果は逆転し (図 2), 奥行きの効果が著しく減退 (あるいは消失) することがわかった。明度知覚を説明するモデルは Gilchrist 教授のアンカリング理論, ODOG モデルを始めとするフィルタリングモデルなど複数存在するが, そのいずれにおいても本研究で明らかになったような時間的に変化する効果については説明できない。本研究結果は明度知覚の計算において, 時間によって異なる計算機序が存在しうることを強く示唆するものと言える。本研究成果は *iPerception* 誌に採択・掲載された。

発展研究として行った実験ではさらに細かく時間を操作することで時間と効果の精緻な関係性を調べると共に, 実験デザインを改良し, (2)の研究で行なった個人差解析を適応可能なデータを得た (山本・金子, 2023)。その結果, ダンジョン錯視や同時対比は観察時間と共に指数関数的

に錯視量が変化することがわかった。また本実験の個人差解析の結果は短時間 (< 100 ms) とそれ以上の時間において異なる機序が働いていることを示唆するものであり、明るさや色の知覚に関して行われた先の研究結果の仮説を支持するものとなった。

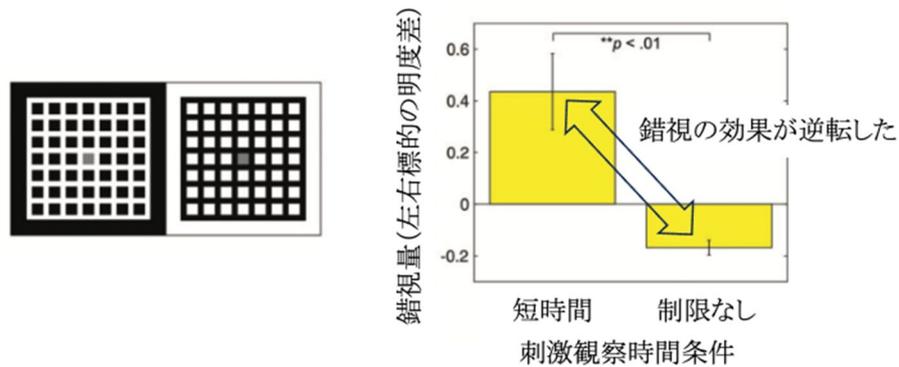


図 2: ダンジョン錯視 (左) と刺激観察時間によるダンジョン錯視の違い (右). 観察時間に制限のない「通常の」ダンジョン錯視では左側の標的 (中央の正方形) の方が右側の標的よりも明るく見えるが、短時間観察では効果が逆転し、左側の標的の方が暗く見えることがわかった (Kaneko & Gilchrist, 2020) .

(3) 色相選択的な神経活動に関する SSVEP 実験

本研究結果から錐体コントラストで定義された色空間での等輝度色刺激に対する応答は反対色応答から期待されるような軸対称のパターンを示さず、中間色に最も強い応答をすることが明らかになった。また、モデル比較の結果、見た目の鮮やかさ (マンセル表色系におけるクロマ) を取り入れたモデルが最も適合度の高いモデルと評価された。本研究成果は *Cerebral Cortex Communications* 誌に採択・掲載された。

本研究結果が示す中間色に対する応答は fMRI を用いた先行研究と合致したものであり、反対色より進んだ色相表現が初期視覚野の段階から存在するという仮説をさらに強固にする知見である。さらに本研究で用いた刺激提示方法、SSVEP を用いた記録方法は金銭的・時間的コストを抑えた上で効率的に色選択的な脳活動を記録する方法であり、本研究成果によって当該パラダイムの有用性を示した点に大きな意義がある。本実験パラダイムはすでに国内外の研究に用いられており (例: Yang et al., 2021, VSS; Watts et al., 2023, bioRxiv), その特徴から他記録手段の難しい乳幼児や患者群などへの適用も可能である。本研究は実験手法の展開可能性という意味でもインパクトのある研究となった。

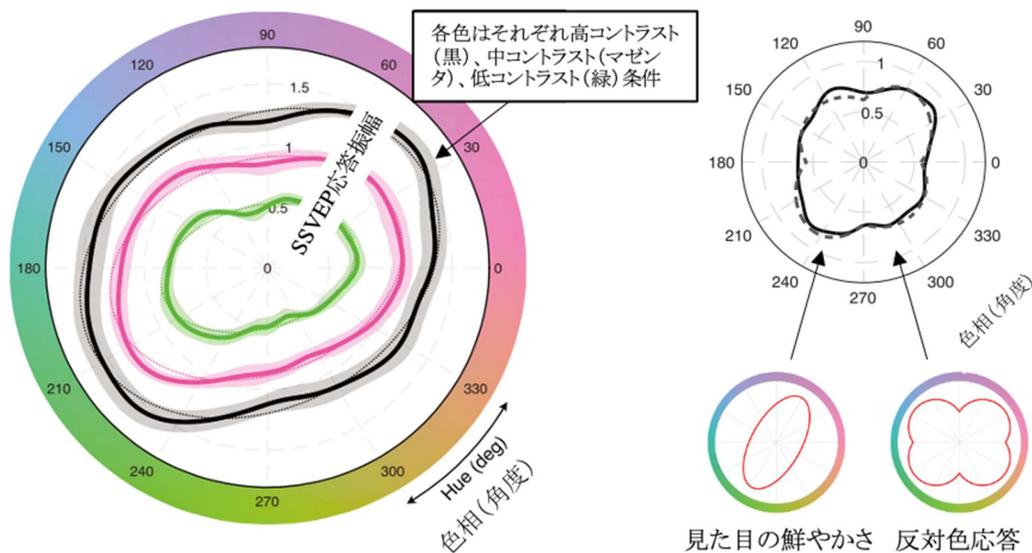


図 3: 各色コントラスト条件における色相選択的 SSVEP 応答振幅の様子 (左) とモデル検証の結果 (右). 中間色であるマゼンタや黄緑の方向に最も強い応答が現れたことで初期視覚野での色相表現が皮質以前の反対色表現とは異なることが確認された (Kaneko et al., 2020) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kaneko Sae, Gilchrist Alan	4. 巻 11
2. 論文標題 Lightness in a Flash: Effect of Exposure Time on Lightness Perception	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/2041669520983830	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 該当する

1. 著者名 Kaneko Sae, Kuriki Ichiro, Andersen Soren K	4. 巻 1
2. 論文標題 Steady-State Visual Evoked Potentials Elicited from Early Visual Cortex Reflect Both Perceptual Color Space and Cone-Opponent Mechanisms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex Communications	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/texcom/tgaa059	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 該当する

1. 著者名 Kaneko Sae, Murakami Ikuya, Kuriki Ichiro, Peterzell David H.	4. 巻 9
2. 論文標題 Individual Variability in Simultaneous Contrast for Color and Brightness: Small Sample Factor Analyses Reveal Separate Induction Processes for Short and Long Flashes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/2041669518800507	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 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 4件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Prasoon Ambalathankandy, Yafei Ou, Sae Kaneko, Masayuki Ikebe
2. 発表標題 A Psychological Study: Importance of Contrast and Luminance in Color to Grayscale Mapping
3. 学会等名 The 31st Color and Imaging Conference（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神田朔, 金子沙永
2. 発表標題 等輝度点滅による時間過大視
3. 学会等名 日本視覚学会2023年夏季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本レイ, 金子沙永
2. 発表標題 観察時間による明度同時対比・ダンジョン錯視の変化
3. 学会等名 日本視覚学会2023年夏季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子沙永
2. 発表標題 Investigating the dynamic impact of spatial context on visual perception: insights from psychophysical studies
3. 学会等名 Tohoku NeuroTech Symposium (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子沙永
2. 発表標題 心理物理学的測定法による知覚の定量化
3. 学会等名 電子情報通信学会・映像情報メディア学会共催研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 慧・金子沙永・河西 哲子
2. 発表標題 傾き対比錯視と自閉スペクトラム症傾向の関連
3. 学会等名 北海道心理学会・東北心理学会 第13回合同大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神田 朔・金子沙永
2. 発表標題 点滅刺激の種類が時間知覚に与える影響
3. 学会等名 日本視覚学会2023年冬季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子沙永
2. 発表標題 実験心理学的な視覚研究の学際性
3. 学会等名 令和4年度TI-FRIS/FRISシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaneko, S., Kuriki, I., Peterzell, D. H.
2. 発表標題 In search of early cortical mechanisms for color: individual variability in steady-state VEP amplitudes for hues sweeping around the isoluminant LM and S cone-opponent plane.
3. 学会等名 Virtual Vision Sciences Society 2021(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaneko Sae, Gilchrist Alan
2. 発表標題 Lightness perception in a flash
3. 学会等名 Virtual Vision Sciences Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaneko, S., Kuriki, I., & Andersen, S. K.
2. 発表標題 Hue selective masking: an SSVEP study.
3. 学会等名 Vision Sciences Society 19th annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kuriki, I., Kaneko, S., & Andersen, S. K.
2. 発表標題 Hue selectivity of SSVEP responses.
3. 学会等名 25th symposium of the International Colour Vision Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊 嘉楽・金子沙永・金沢 創・山口真美・栗木一郎
2. 発表標題 発達初期の視覚野における色相選択性
3. 学会等名 日本視覚学会2020年冬季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sae Kaneko, Ichiro Kuriki, Soren K. Andersen
2. 発表標題 SSVEP amplitudes reflect hue selectivity in the human brain
3. 学会等名 Vision Sciences Society 18th Annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Prasoon Ambalathankandy, Yafei Ou, Sae Kaneko, Masayuki Ikebe
2. 発表標題 Perceptual evaluation of decolorization algorithms to study subjectively appealing color contrast information
3. 学会等名 European Conference on Visual Perception 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子沙永
2. 発表標題 瞬間的に見える錯視とその特性
3. 学会等名 視覚科学技術コンソーシアム 2021年度第3回メンバーイベント (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sae Kaneko, Alan Gilchrist
2. 発表標題 奥行きや知覚的グルーピングが明度知覚に与える影響と観察時間の関係
3. 学会等名 日本視覚学会2020年夏季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大友沙紀, 金子沙永, 羽鳥康裕, 塩入 諭, 栗木一郎
2. 発表標題 定常視覚誘発電位を用いたマスキング実験による色情報機序の考察
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiale Yang, Sae Kaneko, So Kanazawa, Masami K. Yamaguchi, Ichiro Kuriki
2. 発表標題 The development of hue selectivity in human visual cortex
3. 学会等名 Virtual Vision Sciences Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮塚諒, 金子沙永, 栗木一郎
2. 発表標題 携帯型脳波計による定常視覚誘発電位の色相選択性測定を試み
3. 学会等名 日本視覚学会 2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

鮮やかな色を脳はどのように認識しているか 見た目の色の鮮やかさと関連した脳波成分を初めて記録
<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/10/ress20201030-02-color.html>

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