

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H04198

研究課題名（和文）色の感覚意識体験に関連する神経表現の共通性と多様性

研究課題名（英文）Diversity and similarity of neural representation associated with conscious experience of color

研究代表者

平松 千尋（Hiramatsu, Chihiro）

九州大学・芸術工学研究院・准教授

研究者番号：30723275

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの色覚には多様性が存在するが、異なる色覚を持つ人々が同じ色刺激を見ている際の神経応答の共通性と多様性はほとんどわかっていなかった。本研究では、一般的な3色覚と2型3色覚など少数派の色覚を持つ参加者を対象とし、注意を要する色識別課題遂行中の脳波を計測し、色覚型によって逆の顕著性を示す色刺激を用いて神経応答の時空間ダイナミクスを調べた。その結果、それぞれの色覚型にとって目立つ色に対し、同様の空間的・時間的神経活動パターンが観察された。また、少数派の色覚を持つ人々では、神経応答、色知覚、行動の間に複雑な関係があることも示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

他者と共有することが難しい主観的意識体験を生み出す神経基盤の共通性と多様性を探ることは、他者を理解する上で重要である。本研究では、一般的な3色覚を持つ人々と少数派の色覚を持つ人々が、同じ色刺激を見た際の神経活動の共通性と多様性を解析した。そして、それぞれの色覚にとって目立つ色（ただし、目立つ色は色覚型間で異なる）に対する神経活動の時空間的活動パターンには共通性があることを見出した。この結果は、同一の物理刺激が人々の間で異なる神経活動を引き起こすこと、また異なる物理刺激が人々の間で同様の神経活動を引き起こすことを示唆するものであり、主観的感覚意識体験の背後にある神経メカニズムの理解の一助となる。

研究成果の概要（英文）：Color-vision diversity exists in human populations. However, little is known about the neural mechanisms underlying how individuals with different color vision types process the same chromatic information during cognitive tasks. In this study, we used electroencephalography to investigate the spatiotemporal dynamics of neural activity in individuals with different color vision types (typical trichromacy and anomalous trichromacy) during an attention-demanding color discrimination task. By presenting the same chromatic stimuli with reversed expected saliency for different color vision types, we observed similar spatial and temporal neural activity patterns depending on the saliency of each color vision type. Our results further suggest an intricate relationship between neural activity, color sensitivity, and behavior in individuals with anomalous trichromacy.

研究分野：視覚生理心理学

キーワード：色覚 多様性 主観的体験 脳波 注意

1. 研究開始当初の背景

青い空の色合い、コーヒーの芳醇な香りなど、多くの人々において自身にとってはありありとした主観的な感覚意識体験（クオリア）がどのような脳の物理的振る舞いから生成されるのか、また他者も同様のクオリアを感じているかを実証的に示すすべは今のところ示されていない。主観的体験を生み出す仕組みの解明のために現在主として実践されているアプローチは、主観的な意識体験に最低限必要な神経活動（**Neural correlates of consciousness : NCC**）を調べることである[1]。よって、たとえ体験者 A の赤色の感覚意識体験と相関する神経活動を体験者 B の脳に完全に再現でき、体験者 B が、「赤色」に見えると報告したとしても、体験者 A が感じていた主観的体験を体験者 B が追体験しているかを実証できない。このことは、しばしば哲学、心理学、神経科学上のハードプロブレムと呼ばれ、方法論のブレークスルーが待たれている。

クオリアを生み出す仕組みの完全な理解にはつながらなくとも、個人に固有の体験を生み出す神経メカニズムの多様性に焦点を当てることで、主観的感覚意識体験の理解が深まる可能性がある。個人の感覚意識体験は、遺伝的に規定された感覚受容器と、発達過程で身体や環境と相互作用しながら変化していく脳内の情報処理ネットワークの中で作られると考えられる。よって、個人に固有の経験が主観的な感覚意識体験に深く結びついているという作業仮説が立てられる。例えば、個人に身近な物体の色の彩度は誇張して知覚される記憶色効果が報告されている[2]。また、同じドレスの写真を見ても、個人間で色の見えが異なる現象について、経験の影響が示唆されている[3]。これらは、意識体験における個人の来歴の重要性を意味すると同時に、物理刺激に対する感覚意識体験の神経表現は個人間で多様である可能性を示唆する。

他方で、遺伝的背景や経験の違いによって、色の感覚意識体験が異なっていたとしても、言語を介して色名や色カテゴリを伝達することで、個人間で色を指し示しコミュニケーションをとることができる。網膜に3種類の錐体細胞、S（青型）M（緑型）L（赤型）を持つ一般的な3色覚の人と同様に、M錐体またはL錐体を持たない2色覚の人でも、刺激サイズが大きく呈示時間が充分であれば、共通した色名を答えることが報告されている[4]。受容器レベルの入力が異なる人々が、どのようにして共通した色名を答えることができるのかは明らかになっていない。しかしこのことは、人の脳では個々の受容器の特性に合わせて、何らかの光波長の物理特徴を取り出し、コミュニティで共有されている共同主観性に見合うよう経験を通して意味付けを行い、色カテゴリとして表象することでコミュニケーションに用いていることも推測される。

以上のような背景より、遺伝的背景や経験が異なっている場合、同じ光波長成分から構成される色を見ていても、神経活動が全く同一であるとは考えにくい。一方で、同じ物理刺激を受け取る受容器レベルの特性は異なっている場合、色の目立ちやすさなどの性質に対する同等の神経表現もみられるはずである。また、色覚の段階は刺激の受容、知覚、認知、行動まで多岐にわたることから、それぞれの段階で神経活動の共通性と多様性がみられる可能性がある。

2. 研究の目的

遺伝的背景や経験によって多様だと考えられる感覚意識体験の神経表現を探る第一歩として、同じ波長成分を持つ光刺激に対し、受容器レベルの特性が異なる人々の間で、神経応答の時空間特性にどのような多様性と共通性があるのかについて明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 参加者

S、M、L錐体による一般的な3色覚を有する成人男性13名、M錐体の感度がL錐体寄りの2型3色覚を有する成人男性5名、S、L錐体による2型2色覚を有する1名が実験に参加者した。参加者の色覚型は、石原色覚検査表、アノマロスコープ、**100 Hue Test**、**Colour Assessment and Diagnosis (CAD)**により、複合的に確認した。

(2) 実験デザインと刺激

頻りに呈示される標準刺激から、稀に呈示される逸脱刺激に対してボタン押し反応を求めることで、逸脱刺激に注意を向けさせるオッドボール課題を用い、色覚の違いが、同じ色刺激に注意を向けている際の神経活動にどのような共通性と多様性があるかを調べた。刺激の色は、一般的な3色覚にとって、ユークリッド距離が色の知覚的違いを表す **CIE1976 u' , v'** 均等色空間にお

いて、灰色 (D65) から **0.03** の距離にある 3 点の色度を選定した。そのうち、逸脱刺激は「青緑」(Deviant 1)、オレンジがかった赤 (Deviant 2、以後「赤」と表記) と標準刺激は「緑」(Standard) とした (図 1)。色度図から、標準刺激と逸脱刺激間の色の距離は、一般的な 3 色覚では「赤」の方が「青緑」よりも大きい。理論上、色度図中の混同色線上の色は同じ色に見えると考えられる 2 型 2 色覚では、標準刺激と逸脱刺激間の色の距離は「青緑」の方が「赤」よりも大きいと予測された。色覚の違いによって同じ光刺激に対する輝度感度は異なることから、色度のみ同一に保ち、輝度はフリッカーフォトメトリーにより背景として使用した D65 と等輝度になるように、個人ごとに調整した。刺激は色校正されたディスプレイの中心に視角 2 度の大きさで **400ms** 間呈示された。各逸脱刺激の出現頻度は **10%** であった。

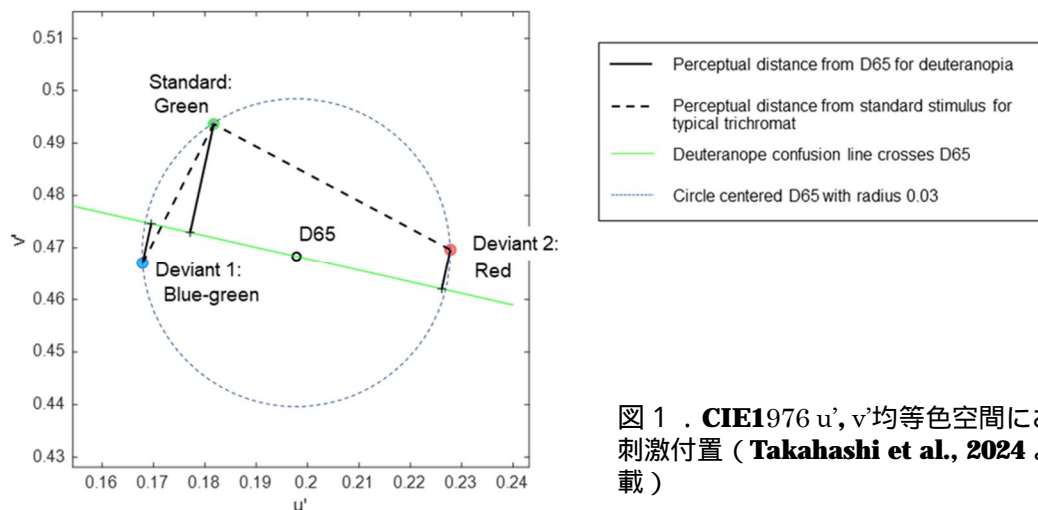


図 1 . CIE1976 u', v' 均等色空間における刺激付置 (Takahashi et al., 2024 より転載)

(3) 神経活動の記録と解析

オッドボール課題遂行中の神経活動を、時間解像度に優れた **64** チャンネルの脳波計を用いて計測した。全チャンネルの平均振幅を基準として、刺激呈示による事象関連電位を解析した。色覚や刺激の違いによる時空間特性の違いを探索的に解析するため、全チャンネル、刺激呈示後 **600ms** までの事象関連電位を用い **cluster-based permutation test** を実施した。

4 . 研究成果

図 2 は、前頭、頭頂、後頭電極における事象関連電位の参加者平均と **95%** 信頼区間を示す。一般的な 3 色覚と、2 型 3 色覚の両者において特に頭頂電極において、標的刺激「青緑」、「赤」に対する事象関連電位として、刺激呈示後 **400ms** 付近にピークを持つ顕著な陽性成分がみられた。

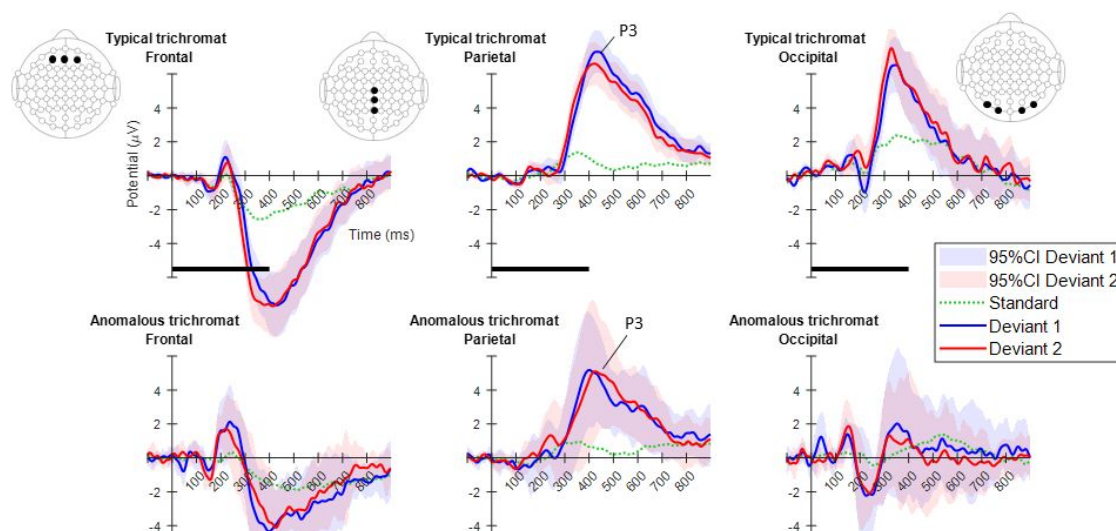


図 2 . 前頭 (Frontal)、頭頂 (Parietal)、後頭 (Occipital) 電極における、一般的な 3 色覚 (Typical trichromat)、2 型 2 色覚 (Anomalous trichromat) の、青緑 (Deviant 1)、「赤」(Deviant 2)、緑 (Standard) 各刺激に対する平均事象関連電位 (Takahashi et al., 2024 より転載)

一般的な3色覚を持つ参加者における逸脱刺激間の神経応答の時空間パターンの違いを調べた解析では、「赤」に対する応答が後頭でより早く現れ、差が頭頂に移動していくことが明らかとなった(図3)。このことは、一般的な3色覚にとって「赤」が「青緑」よりもより目立つと予測されることと一致する。

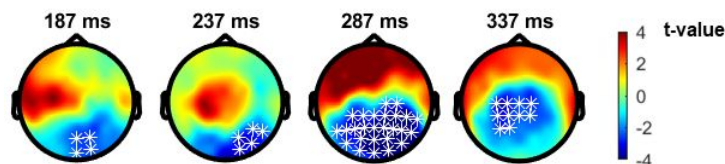


図3 . Cluster-based permutation test による、一般的な3色覚参加者の逸脱刺激間の時空間応答パターンの違い (Takahashi et al., 2024 より転載)

2型3色覚を持つ参加者における逸脱刺激間の神経応答の時空間パターンには違いがみられなかった。しかし、各逸脱刺激と標準刺激に対する応答の時空間パターンの違いを調べた解析から、「青緑」に対する応答は「赤」よりもより後頭でより早く現れ、標準刺激に対する応答の差はその後頭頂に移動していくことが明らかとなった(図4)。

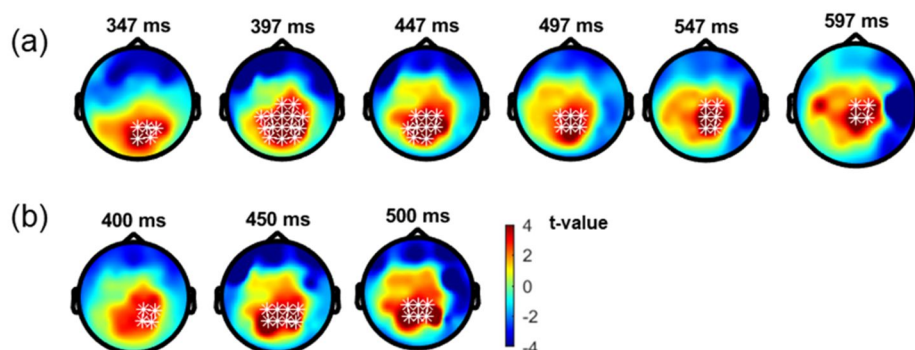


図4 . Cluster-based permutation test による、2型3色覚参加者における、(a)逸脱刺激「青緑」と標準刺激「緑」、(b)逸脱刺激「赤」と標準刺激「緑」の時空間応答パターンの違い (Takahashi et al., 2024 より転載)

多くの2型3色覚の人では「青緑」の方が「赤」よりも目立つと予測されることから、目立つ色に対する応答潜時が早い点については一般的な3色覚と共通している。一方で、これらの結果は同じ色度を持つ刺激を見ている、色覚によって時間的活動パターンが異なることを示唆する。ただし、同じ色度を持つ刺激についての色覚型間の比較では神経活動パターンに顕著な差がみられなかった。2型3色覚としてグループ化した参加者の色覚特性には大きな多様性があったことから、より多くの参加者に協力いただくことで、色覚の違いによる神経活動の共通性と多様性の理解を深めることができるだろう。また、この多様性が、波長感受性に影響を与える遺伝的な違いによるのか、経験に応じた神経の可塑性にも依存するものなのか、本研究では明らかになっていない。遺伝的な多様性、知覚、行動、認知における多様性と神経活動の多様性がどのように関連しているかを明らかにしていくことが今後の展望として挙げられる。

<引用文献>

- [1] Koch C, Massimini M, Boly M, Tononi G. Neural correlates of consciousness: progress and problems. *Nature Review Neuroscience*, 17(5), 307-21, 2016.
- [2] Hansen T, Olkkonen M, Walter S, Gegenfurtner K. Memory modulates color appearance. *Nature Neuroscience*, 9(11), 1367-1368, 2006.
- [3] Lafer-Sousa R, Hermann K, Conway B. Striking individual differences in color perception uncovered by “the dress” photograph. *Current Biology*, 25(13), R545-R546, 2015.
- [4] Montag E. Surface color naming in dichromats. *Vision Research*, 34(16), 2137-2151, 1994.
- [5] Takahashi N, Sawayama M, Chen X, Motomura Y, Takeichi H, Miyauchi S, Hiramatsu C. Temporal and spatial analysis of event-related potentials in response to color saliency differences among various color vision types. *bioRxiv*, 2023.09.12.557493, 2024 (revised).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Melin Amanda D., Veilleux Carrie C., Janiak Mareike C., Hiramatsu Chihiro, Sanchez-Solano Karen G., Lundeen Ingrid K., Webb Shasta E., Williamson Rachel E., Mah Megan A., Murillo-Chacon Evin, Schaffner Colleen M., Hernandez-Salazar Laura, Aureli Filippo, Kawamura Shoji	4. 巻 289
2. 論文標題 Anatomy and dietary specialization influence sensory behaviour among sympatric primates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20220847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspb.2022.0847	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 Morimoto Y, Sato H, Hiramatsu C, Seno T	4. 巻 237
2. 論文標題 Material surface properties modulatevection strength	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research	6. 最初と最後の頁 2675-2690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00221-019-05620-0	査読の有無 有
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 Hayashi S, Tsuru A, Kishida F, Kim YK, Higuchi S, Motomura Y	4. 巻 38
2. 論文標題 ERP study on the associations of peripheral oxytocin and prolactin with inhibitory processes involving emotional distraction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of physiological anthropology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40101-019-0196-z	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 -

1. 著者名 Hiramatsu Chihiro, Takashima Tatsuhiko, Sakaguchi Hiroaki, Chen Xu, Tajima Satohiro, Seno Takeharu, Kawamura Shoji	4. 巻 290
2. 論文標題 Influence of colour vision on attention to, and impression of, complex aesthetic images	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20231332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspb.2023.1332	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 -

1. 著者名 平松千尋	4. 巻 48(1)
2. 論文標題 霊長類における色覚の進化史と現代人の色覚多様性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 バイオメカニズム学会誌	6. 最初と最後の頁 15-21
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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Naoko Takahashi, Xu Chen, Masataka Sawayama, Yuki Motomura, Chihiro Hiramatsu
2. 発表標題 Color saliency and attention change represented by neural processing in individuals with various color visions
3. 学会等名 Vision Sciences Society (VSS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chihiro Hiramatsu, Tatsuhiko Takashima, Hiroaki Sakaguchi, Satohiro Tajima, Takeharu Seno, Shoji Kawamura
2. 発表標題 Long-term and short-term influence of color vision type on impressions of complex images
3. 学会等名 Vision Sciences Society (VSS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平松千尋
2. 発表標題 色覚から考える多様性
3. 学会等名 日本心理学会第86回大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 澤山正貴, 元村祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 日本視覚学会2023年冬季大会
3. 学会等名 異なる色覚型間における色顕著性の違いと注意に関する神経活動の多様性
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 澤山正貴, 元村 祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 多様な色覚をもつ観察者による顕著性の異なる色刺激に対する事象 関連電位
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「質感・色彩の視覚的な感性認知メカニズムに関する研究」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 澤山正貴, 元村 祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 多様な色覚を持つ参加者間での顕著性の異なる色刺激に対する事象関連電位
3. 学会等名 日本色彩学会色覚研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦颯希, 平松千尋
2. 発表標題 色相環に沿った配置と色の個数が好ましさに及ぼす影響
3. 学会等名 日本色彩学会色覚研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 元村祐貴
2. 発表標題 時代を越えて常識を変える：一流科学者×若手研究者 交流促進シンポジウム
3. 学会等名 睡眠と脳と生理人類学、第二回日本生理人類学会フロンティアミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 元村祐貴
2. 発表標題 睡眠不足における情動への影響
3. 学会等名 日本睡眠学会第46回定期学術集会シンポジウム4「情動と睡眠」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 元村祐貴
2. 発表標題 覚醒～入眠期における脳活動
3. 学会等名 日本睡眠学会第46回定期学術集会シンポジウム14「睡眠は私たちの行動や意識をどう変えるのか」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 元村祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 色覚が異なる人々における色刺激に対する事象関連電位
3. 学会等名 日本生理人類学会 感性・脳科学研究部会 睡眠研究部会 光と生体リズム研究部会 合同会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 元村祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 異なる色覚を持つ人々における色刺激に対する神経応答の多様性
3. 学会等名 日本色彩学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴彩美, 林小百合, 岩山俊裕, 岸田文, 樋口重和, 元村祐貴
2. 発表標題 母親と非母親における末梢オキシトシンおよびプロラクチンと共感的反応に関する研究
3. 学会等名 日本生理人類学会第81回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahashi N, Chen X, Motomura Y, Hiramatsu C
2. 発表標題 Neural response to colors with different saliency
3. 学会等名 The Asia Color Association Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahashi N, Chen X, Motomura Y, Hiramatsu C
2. 発表標題 Investigation of color saliencies through visual oddball task
3. 学会等名 The 48th Perceptual Frontier Seminar
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 元村祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 神経応答より抽出するオドボール課題を用いた色顕著性の研究
3. 学会等名 「質感のつどい」第5回公開フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳旭, 高橋直子, 上妻多紀子, 平松千尋
2. 発表標題 第三世代シークエンサーによる視物質遺伝子の解析
3. 学会等名 日本生理人類学会 感性・脳科学研究部会睡眠研究部会合同会合
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋直子, 陳旭, 元村祐貴, 平松千尋
2. 発表標題 事象関連電位により抽出するオドボール課題を用いた色顕著性の研究
3. 学会等名 日本生理人類学会 感性・脳科学研究部会睡眠研究部会合同会合
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayashi S, Tsuru A, Kishida F, Higuchi S, Motomura Y
2. 発表標題 Different effect of children's anger on the behavioral inhibition in mothers and in non-mothers
3. 学会等名 The 14th International Congress of Physiological Anthropology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuru A, Hayashi S, Kishida F, Higuchi S, Motomura Y
2. 発表標題 Empathetic reaction in mothers and non-mothers while watching a facial expression video
3. 学会等名 The 14th International Congress of Physiological Anthropology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴彩美, 林小百合, 岸田文, 樋口重和, 元村祐貴
2. 発表標題 卵胞期・黄体期における表情動画観察時の共感的反応
3. 学会等名 日本生理人類学会第79回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林小百合, 鶴彩美, 岸田文, 樋口重和, 元村祐貴
2. 発表標題 月経前後の夜間睡眠の変化と月経前不快気分の関連についての検討
3. 学会等名 第37回日本生理心理学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 長谷川 博、村木 里志、小川 景子(編)...平松千尋(分担執筆)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 820
3. 書名 人間の許容・適応限界事典	

1. 著者名 ジョン・モロン & リリー・カボニウス(著), 尾家宏昭 (日本語版作成), 平松 尋 (監修)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 学術研究出版	5. 総ページ数 34
3. 書名 ラーゲルンダの鉄道衝突事故と色覚検査の導入	

〔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	丸山 修 (Maruyama Osamu) (20282519)	九州大学・芸術工学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	元村 祐貴 (Motomura Yuki) (50645273)	九州大学・芸術工学研究院・助教 (17102)	

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