

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20860

研究課題名(和文)個人の脳を超越して他者に伝播する運動予測信号

研究課題名(英文)Predictive motor signals propagating to others beyond individual brain

研究代表者

水原 啓暁(Mizuhara, Hiroaki)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：30392137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：自己と他者の認識(自他分離)を実現する脳メカニズムの有力候補として、運動指令の遠心性コピーによる運動予測が挙げられている。この運動予測が、単に遠心性コピーのみならずトップダウンの影響が存在することを検証する目的で、恋愛カップルが手をつなくことによる感覚減衰課題実施中の脳波を測定した。その結果、特に女性の実験参加者において、パートナーと手をつなくことにより感覚減衰の効果が表れる結果を得た。これは、自他分離の脳メカニズムの有力候補として考えられている運動予測について、遠心性コピー以外に文脈に依存したトップダウン信号の存在を示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自他分離を実現する脳メカニズムを研究する際に、感覚減衰パラダイムが頻繁に用いられている。この感覚減衰は運動指令の遠心性コピーにより実現されると考えられているが、二人一組で参加した被験者の個体を超えて感覚減衰が発生するとすれば、単純に遠心性コピーにより感覚減衰が発生するものではないことになる。そこで、より高次の文脈依存的なトップダウン信号によっても運動予測を実現しているかを検証した。このことは、今後、自他分離に関するさらなる研究を実施する際に感覚減衰パラダイムを用いることの正当性に関する知見を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：Motor prediction by an efference copy of motor signals has been suggested as a promising candidate for the brain mechanism that realises the recognition of self and others ('self and others segregation'). To investigate the existence of a top-down influence on motor prediction as well as the efference copy, we measured EEG during a sensory attenuation task in which romantic dyads were asked to hold their hands. The results showed that holding hands with a partner showed a sensory attenuation effect, especially in female participants. This suggests the existence of context-dependent top-down signals for motor prediction as well as the efference copy.

研究分野：認知科学

キーワード：自他分離 体感 コミュニケーション 脳波 自己主体感 遠心性コピー 事象関連電位 感覚減衰 運動主

1. 研究開始当初の背景

二人一組で参加した被験者の一方に痛みを感じる刺激を加えたとき、恋人同士が手をつないでいる場合には、その痛みが軽減することが最近の研究で次々に報告されている[1-3]。この結果の脳メカニズムは、感覚減衰で説明可能かもしれない。感覚減衰とは、自身の行動予測により、感覚の感度が低下する現象である。例えば、他人が自分の掌をくすぐった場合にはくすぐったく感じるが、自分でくすぐった場合にはくすぐったく感じない[4]。通常は、自分の運動を予測することで、これから入力される刺激への感度を落とすために、くすぐったく感じなくなる。これと同様に、恋人での痛み軽減の結果は、まるで感覚感度を低下させる感覚減衰を生じさせた結果のようである。

くすぐり実験のような self-initiated action に対して感覚感度が下がる場合については、そのメカニズムの第一候補に運動指令の遠心性コピーがある。遠心性コピーは、運動を実行する際に作成される運動指令信号のフィードフォワード信号である[5]。つまり、自分の行為のフィードバックとして刺激が入力される場合には、そのフィードバック刺激に先回りして、運動指令信号のコピーが予測信号として使われることで、感覚反応をつかさどる神経活動を抑制する。ただし、感覚減衰には遠心性コピーだけでは不十分で、これに加えて文脈に依存したトップダウン的な予測が必要とされる[6]。事実、小脳[4, 7]や、視床、頭頂皮質を含む複雑なネットワークによるフィードフォワード(トップダウン)とフィードバック(ボトムアップ)の両方[8]が、感覚減衰に関与していることが示されている。

2. 研究の目的

本研究では、感覚減衰パラダイムを用いて、恋人とのソーシャルタッチにより感覚減衰が発生するかを検証する。特に、対人関係のトップダウン情報は、感覚モダリティを超えて初期感覚皮質に作用することが示されており[9]、痛み刺激を直接的に用いるのではなく、異なるモダリティ(聴覚)への刺激に対する感覚減衰を検証する。

感覚減衰は頭皮脳波計測により検証する。従来の研究において、self-initiated action に関連してフラッシュ映像やビーブ音を提示した場合に、脳波の事象関連電位(ERP)の振幅が減少することが報告されている[7, 10-11]。この感覚減衰パラダイムを、被験者ペアでのハイパースキャン脳波実験に拡張する。通常感覚減衰で観察される ERP コンポーネントの減衰が、恋人同士のソーシャルタッチにより発生するかを検証する。通常感覚減衰パラダイムでは、自分がボタン押しすることによりビーブ音を発生させる場合(active 条件)と、自分の行動とは無関係にビーブ音が発生する場合(passive 条件)の ERP の潜時と振幅を比較することで、感覚減衰の有無を検証する。本研究では、passive 条件の代わりに、パートナーがボタン押しすること(partner 条件)によりビーブ音を発生させる。感覚反応自体を抑制しているのであれば、self-initiated action に伴う感覚減衰と同様に、partner 条件においても ERP の潜時の変化もしくは振幅の減少が観察されるはずである。一方で、恋人の痛み軽減の結果が情動的な側面での抑制に起因するのであれば、今回の感覚減衰パラダイムでは感覚減衰が発生しないはずである。また、ソーシャルタッチが感覚減衰に寄与していることを検証するため、恋人同士が手をつなぐ条件(hands-hold 条件)と、手をつながない条件(hands-free 条件)で、感覚減衰パラダイムを実施する。

3. 研究の方法

(1) 実験参加者

異性間の恋愛関係にある右利きの参加者 34 名(17 組の未婚カップル)を、京都大学の学生へのチラシにより募集した。実験参加者の年齢は 20~24 歳(男性 mean ± sd=21.6 ± 1.4 歳, 女性 mean ± sd=21.5 ± 1.4 歳)、子供なし、長期交際(mean ± sd=27 ± 14 カ月の交際歴)であった。

実験参加者数は、G*power を用いたサンプルサイズ設計に基づいて決定した。ERP 振幅の条件間比較を 2 要因の ANOVA(self/partner initiated sound 要因 × hands-hold/free 条件)により実施する場合、効果量(f)=0.25(middle)、危険率(α)=0.05、検出力(1-β)=0.8 とした場合、34 名の参加者が必要となるため、17 組以上の未婚カップルを実験参加者として京都大学内で広告を掲示して募集した。

実験手続きは京都大学心の先端研究ユニット内の研究倫理委員会の承認を得ている(承認番号 2-P-27)。被験者には実験の詳細な説明が行われ、書面での同意を得た後に実験を行った。

(2) 実験課題

テンキーのボタン押しにより、1kHz の純音を短時間(50ms)、80dB の音圧(SPL)で PC スピーカーを用いて提示した。実験は 2 × 2 条件(各条件 100 試行)の要因計画で構成されている。

一つ目の要因は、誰が音を鳴らすかである。この要因は 2 水準で構成されており、一つ目の水準は自分自身が右手人差し指でボタン押しをすることで音が発生する条件(self 条件)、もう一つの水準はパートナーが右手人差し指でボタン押しをすることで音が発生する条件(partner 条件)である。ボタンを押すタイミングは実験参加者のペースに任せていたが、おおむね 3 秒に 1 回のボタン押しをするように教示した。

二つ目の要因は、パートナーと手をつなぐかどうかである。恋人同士が手をつないだときに痛みが軽減することを報告した従来研究[2]と同様にして、実験参加者は互い違いな方向を向いている椅子に、左手同士で手をつなぐことができるように座る。このとき、実際に手をつなぐ条件(hands-hold条件)と手をつながない条件(hands-free条件)の2つの条件を水準として、この要因は構成されている。手をつなぐ条件では、左の手のひら同士をつないだ。手をつながない条件では、左腕をアームレストから外して、互いの身体に触れないようにした。

これらの音が発生する条件に加えて、ベースラインとして用いるために、単にボタン押しだけをする条件を実施した。この条件では、実験参加者は手をつなぐに、音が鳴る条件と同じようなペースでボタンを押すことを要求されていた。音なしでのボタン押し中についても、ボタンを押さない側のパートナーの脳波も同時に記録したので、この条件もself条件とpartner条件の2水準で構成されている。

以上の6条件を実験参加カップル間でカウンターバランスさせて実施した。各条件の実験時間は約300秒(5分)であり、条件のあいまいに1分程度の休憩をとって実験を行った。また、全ての条件において、目を閉じるとともに、心の中で時間カウントをおこなわないように要求した。実験に先立ち、ボタン押しのペースに慣れることを目的として、それぞれの参加者ごとに50試行(約150秒)のトレーニング課題を実施した。トレーニング課題では、本番実験と同様にボタン押しにより音が鳴るが、2.5秒よりも早い間隔でボタン押しすると、4kHzのピーブ音、3.5秒よりも遅い間隔でボタン押しすると0.5kHzのピーブ音、それ以外で本番と同じ1kHzのピーブ音が鳴ることで、平均的に3秒に1回のペースでボタン押しができるように練習した。

(3) 脳波記録

Brain Products GmbH社製の64チャンネルBrainamp MRアンプを用いて、二人の脳波を同時記録した。このシステムは、国際10/20システムで配置された32chの電極(Ag-AgCl)キャップ2個が、2台の脳波アンプに接続されている。それぞれのキャップのリファレンスは、それぞれの被験者の両耳朶に、それぞれのキャップのグラウンドは、それぞれの被験者のinionに設置した。信号は250Hzでアナログローパスフィルタリング、1-100Hzでデジタルフィルタリング(12dB/octave)および60Hzのノッチフィルタリングされ、 $\pm 16\text{mV}$ のレンジで16bitの垂直分解能で、5kHzで増幅、デジタル記録された。全ての電極インピーダンスは約10k以下とした。

(4) 脳波解析

脳波の前処理は、Matlab R2020a (The MathWorks)上でFieldtrip toolbox[12]を用いて実施した。測定した連続脳波データは、1-30Hzのゼロ位相シフトの2次のバターワースIIRバンドパスフィルタ(24dB/octave)を用いてフィルタ処理した後、ボタン押しの800ms前から1700ms後までの2.5秒間のデータセグメントに分割し、全脳波電極平均にリファレンス変更した。リファレンス変換したデータに対して、VEOGとHEOGのアーチファクトを回帰法[13]により差分除去し、200Hzにダウンサンプリングした。さらに、最大振幅が100[uV]、一次微分が25[uV/ms]を超えるセグメント、および振幅が0.5[uV]以下となる区間が100ms以上持続するセグメントについては、アーチファクトとして自動的に以降の解析からは除外した。また、1組(2名)の実験参加者は、実験を完遂できなかったため以下の統計解析から除外した。

脳波の統計解析はMatlab R2020a (The MathWorks)上で作成したin-houseソフトウェアにより2種類を実施した。一つ目は、事象関連電位解析(ERP)の振幅であり、二つ目はERPの潜時である。それぞれについて、AEPコンポーネントの条件間比較を行った。このERPの振幅解析においては、ERP解析のために、各トライアルのボタン押し前100msの時間平均の差分によるベースライン補正した。さらに、ボタン押しによる運動関連脳活動を除去するため、self条件のERPについてはself & button-only条件のERPとの差分により、被験者ごとにベースライン補正した。

これらの解析については、聴覚誘発電位N1およびP2が中心電極(Cz)付近で発生することが知られていることから、ボタン押しから80-120msおよび200-240msの時間窓でCz電極を対象として、被験者間平均値の条件間比較をおこなった。条件間比較は、self/partner要因とhands-hold/free要因をwithin要因、female/maleをbetween要因とする $2 \times 2 \times 2$ mixed ANOVAを用いて実施した。

4. 研究成果

(1) ERP振幅

ERP解析を実施したところ、聴覚反応を示す明確なN1コンポーネント(120ms付近)およびP2コンポーネント(200ms付近)が観察された(図1)。そこで、個人のN1コンポーネントのピークを検出し、その振幅を条件間比較したところ、いずれの条件間においても差があるとは言えない結果となった(図2左、Gender: $F(1, 30) = 0.30245$, $p^2 = 0.0100$, $p = 0.58642$; Self/Partner: $F(1, 30) = 0.036393$, $p^2 = 0.0012$, $p = 0.84999$; Free/Hold: $F(1, 30) = 0.53445$, $p^2 = 0.0175$, $p = 0.47041$; Gender*Self/Partner: $F(1, 30) = 0.94915$, $p^2 = 0.0307$, $p = 0.33773$; Gender*Free/Hold: $F(1, 30) = 0.85278$, $p^2 = 0.0276$, $p = 0.36313$; Self/Partner*Free/Hold: $F(1, 30) = 0.13793$, $p^2 = 0.0046$, $p = 0.71296$; Gender*Self/Partner*Free/Hold: $F(1, 30) = 1.01$, $p^2 = 0.0326$, $p = 0.32294$)。

一方で、P2コンポーネントのピークについては、自身でボタン押しした場合に、パートナーがボタン押ししたときよりも振幅が小さくなった(図2右、Gender: $F(1, 30) = 0.00051133$,

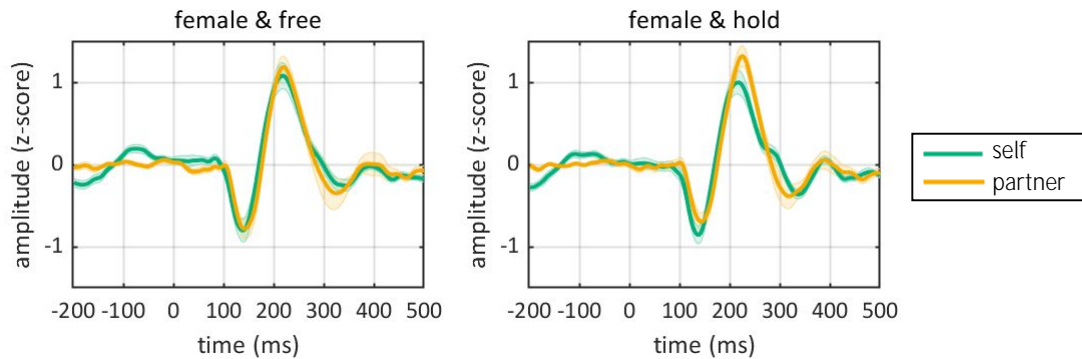


図 1 Cz 電極での ERP の女性被験者間平均。120ms 付近の負の電位が N1 コンポーネント，200ms 付近の正の電位が P2 コンポーネントである。

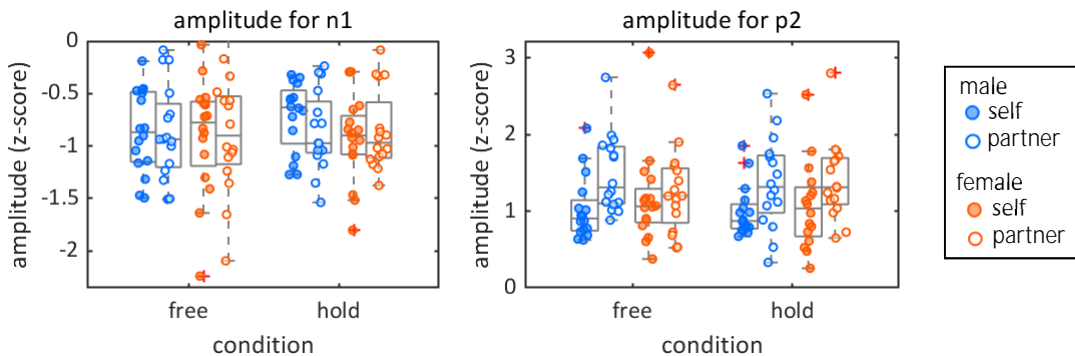


図 2 ERP の N1 コンポーネント(左)と P2 コンポーネント(右)のの振幅比較。各プロットは被験者ごとのデータであり，その被験者間の箱ひげ図で表示している。

$p^2 = 1.7044e^{-05}$, $p = 0.98211$; Self/Partner: $F(1, 30) = 28.49$, $p^2 = 0.4871$, $p = 8.9785e^{-06}$; Free/Hold: $F(1, 30) = 0.2221$, $p^2 = 0.0073$, $p = 0.64086$). つまり，振幅に関して，感覚減衰の追試が正しく行えていることが明らかである。また，性差および手をつなぐ効果との交互作用が有意傾向水準にあるため，この感覚減衰の効果が，どこで発生しているかの下位検定を行った (Gender*Self/Partner: $F(1, 30) = 2.8586$, $p^2 = 0.0870$, $p = 0.10125$; Gender*Free/Hold: $F(1, 30) = 1.4446$, $p^2 = 0.0459$, $p = 0.2388$; Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 0.63856$, $p^2 = 0.0208$, $p = 0.43051$; Gender*Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 3.423$, $p^2 = 0.1024$, $p = 0.074166$). その結果，男性の場合は手を放していても感覚減衰が発生するが，女性は手をつないだ場合においてのみ，感覚減衰の効果が P2 の振幅に出現した (Male & Free: $t(31) = 5.6938$, $d = 1.4235$, $p = 4.2568e^{-05}$; Male & Hold: $t(31) = 2.5902$, $d = 0.6475$, $p = 0.0205$; Female & Free: $t(31) = 0.9042$, $d = 0.2261$, $p = 0.3802$; Female & Hold: $t(31) = 3.8239$, $d = 0.9560$, $p = 0.0017$). 以上の結果から，ERP の P2 コンポーネントにおいて，特に女性の実験参加者の場合に，パートナーと手をつなぐことにより感覚減衰が発生することが明らかになった。

(2) ERP 潜時

N1 コンポーネント，P2 コンポーネントともに，自身でボタン押しした場合に，パートナーがボタン押ししたときよりも潜時が短くなった (図 3, N1, Self/Partner: $F(1, 30) = 17.531$, $p^2 = 0.3688$, $p = 0.00022786$; N2, Self/Partner: $F(1, 30) = 7.072$, $p^2 = 0.1908$, $p = 0.012441$). これは感覚減衰の追試が正しく行えていることを支持する結果である。その他の主効果および交互作用については，すべてにおいて差があるとは言えない結果となった (N1, Gender: $F(1, 30) = 0.98101$, $p^2 = 0.0317$, $p = 0.32987$; Free/Hold: $F(1, 30) = 0.00050466$, $p^2 = 0.000016822$, $p = 0.98223$; Gender*Self/Partner: $F(1, 30) = 0.027251$, $p^2 = 0.00090755$, $p = 0.86999$; Gender*Free/Hold: $F(1, 30) = 1.3126$, $p^2 = 0.0419$, $p = 0.26098$; Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 3.5349$, $p^2 = 0.1054$, $p = 0.069831$; Gender*Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 0.01416$, $p^2 = 0.00047177$, $p = 0.90607$; P2, Gender: $F(1, 30) = 1.741$, $p^2 = 0.0549$, $p = 0.19699$; Free vs Hold: $F(1, 30) = 1.4595$, $p^2 = 0.0464$, $p = 0.23645$; Gender*Self/Partner: $F(1, 30) = 0.0077169$, $p^2 = 0.00025716$, $p = 0.93058$; Gender*Free/Hold: $F(1, 30) = 0.58329$, $p^2 = 0.0191$, $p = 0.45099$; Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 0.13588$, $p^2 = 0.0045$, $p = 0.715$; Gender*Self/Partner *Free/Hold: $F(1, 30) = 0.4054$, $p^2 = 0.0133$, $p = 0.52914$). これらの結果から，潜時においては手をつなぐことによる感覚抑制の効果は発生していないことが明らかになった。

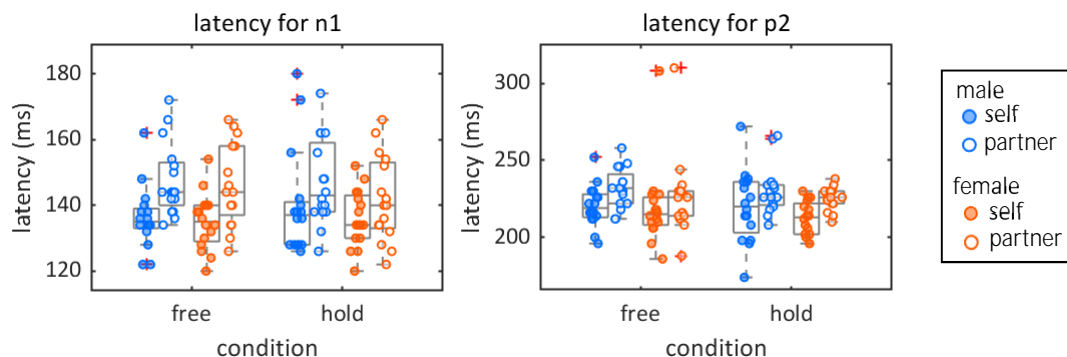


図3 ERPのN1コンポーネント(左)とP2コンポーネント(右)のの潜時比較. 各プロットは被験者ごとのデータであり, その被験者間の箱ひげ図で表示している.

<引用文献>

1. Goldstein, P., Shamay-Tsoory, S. G., Yellinek, S., & Weissman-Fogel, I. (2016). Empathy Predicts an Experimental Pain Reduction During Touch. *J Pain*, 17(10), 1049-1057.
2. Goldstein, P., Weissman-Fogel, I., Dumas, G., & Shamay-Tsoory, S. G. (2018). Brain-to-brain coupling during handholding is associated with pain reduction. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 115(11), E2528-E2537.
3. Goldstein, P., Weissman-Fogel, I., & Shamay-Tsoory, S. G. (2017). The role of touch in regulating inter-partner physiological coupling during empathy for pain. *Sci Rep*, 7(1), 3252.
4. Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nat Neurosci*, 1(7), 635-640.
5. von Holst, E. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organ. *Br J Anim Behav*, 2, 89-94.
6. Blakemore, S. J., Goodbody, S. J., & Wolpert, D. M. (1998). Predicting the consequences of our own actions: the role of sensorimotor context estimation. *J Neurosci*, 18(18), 7511-7518.
7. Cao, L., Thut, G., & Gross, J. (2017). The role of brain oscillations in predicting self-generated sounds. *Neuroimage*, 147, 895-903.
8. Hua, L., Recasens, M., Grent-'t-Jong, T., Adams, R. A., Gross, J., & Uhlhaas, P. J. (2020). Investigating cortico-subcortical circuits during auditory sensory attenuation: A combined magnetoencephalographic and dynamic causal modeling study. *Hum Brain Mapp*.
9. Gazzola, V., Spezio, M. L., Etzel, J. A., Castelli, F., Adolphs, R., & Keysers, C. (2012). Primary somatosensory cortex discriminates affective significance in social touch. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109(25), E1657-1666.
10. Cao, L., Veniero, D., Thut, G., & Gross, J. (2017). Role of the Cerebellum in Adaptation to Delayed Action Effects. *Curr Biol*, 27(16), 2442-2451 e2443.
11. Schafer, E. W., & Marcus, M. M. (1973). Self-stimulation alters human sensory brain responses. *Science*, 181(4095), 175-177.
12. Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., Schoffelen, JM (2011). FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, Article ID 156869.
13. Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 55(4), 468-484.

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 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mizuhara Hiroaki, Uhlhaas Peter	4. 巻 12
2. 論文標題 The Role of Temporal Contingency and Integrity of Visual Inputs in the Sense of Agency: A Psychophysical Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 635202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2021.635202	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 Sato Naoyuki, Matsumoto Riki, Shimotake Akihiro, Matsubashi Masao, Otani Mayumi, Kikuchi Takayuki, Kunieda Takeharu, Mizuhara Hiroaki, Miyamoto Susumu, Takahashi Ryosuke, Ikeda Akio	4. 巻 9
2. 論文標題 Frequency-Dependent Cortical Interactions during Semantic Processing: An Electroencephalogram Cross-spectrum Analysis Using a Semantic Space Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 4329-4339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhab089	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 Allal-Sumoto Takara Kenza, Miyoshi Kiyofumi, Mizuhara Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 The effect of productive vocabulary knowledge on second language comprehension	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 1049885
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2023.1049885	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3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiroaki Mizuhara
2. 発表標題 Neural oscillations: Toward a unified understanding of "communication"
3. 学会等名 第99回日本生理学会大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 アラル須本 ケンザ宝, 水原 啓暁
2. 発表標題 第二言語における語彙理解産出知識の相互作用が 理解処理に及ぼす影響：心理学的研究
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Spatiotemporal Reconstruction Accuracies of M/EEG Inverse Solution Models
2. 発表標題 Duygu Sahin, Hiroaki Mizuhara
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 子安 増生、丹野 義彦、箱田 裕司	4. 発行年 2021年
2. 出版社 有斐閣	5. 総ページ数 1002
3. 書名 有斐閣 現代心理学辞典	

〔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
---------	---------