

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19569

研究課題名（和文）視覚・認知の成立過程に対する運動効果の解明：並列視覚情報経路の視点からの検証

研究課題名（英文）The effect of acute exercise on formation process of visual perception/cognition: Verification from the viewpoint of parallel visual information pathways

研究代表者

小見山 高明 (Komiya, Takaaki)

大阪大学・全学教育推進機構・講師

研究者番号：20827688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：運動は脳機能に影響することが多くの研究により明らかとなっている。しかしながら、運動がなぜ、どのように脳機能に影響しているかといったメカニズムについては未だ解決されていない。そこで本研究では、脳の並列情報処理機構に着目し、運動による知覚・認知の過程における情報処理過程・経路への影響を検証を行った。その結果、運動は視覚情報処理の過程や経路に対して特異的な修飾効果をもたらすことにより脳機能を改善させること、視覚の改善効果は、視対象の周囲の情報処理を抑制することで起こる可能性があること、運動による脳活動の増加は、閉眼を行った際には脳領域特異的に相乗的な増加が起こ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

これまで運動と脳機能との関係について調査した研究では、脳機能自体をブラックボックスとして捉えてきたために、運動がなぜ、どのように脳機能に影響しているかという根本的な問題については解決されてこなかった。本研究はこの点に対して、脳情報処理に着目し、その情報処理経路における特性の違いを利用することによって、脳活動あるいは脳機能に対する運動効果は一様ではない可能性を明らかにした。この結果は、脳機能に対する運動効果のメカニズムの解明に役立つ重要な情報となり、同時に運動により脳機能を高めるためには画一的な運動処方ではなく、脳機能ごとの“テーラーメイドの運動処方”が必要であることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：Many studies have revealed that exercise affects brain function. However, the mechanism of why and how exercise affects brain function has not yet been clarified. In this study, we focused on the parallel information processing mechanism of the brain and examined the effects of exercise on formation processes and pathways in the perception-cognition process. As a result, (1) exercise improves brain function by causing a specific modification effect on the process and pathway of visual information processing, and (2) the improvement effect of visual perception results from exercise suppresses information processing around the visual target. (3) The increase in brain activity by exercise was suggested to occur in a synergistic manner specific to the brain area when eyes closed.

研究分野：スポーツ生理学・神経科学

キーワード：運動 脳機能修飾効果 視覚並列情報処理 視覚 視覚性マスキング 脳波

1. 研究開始当初の背景

スポーツ場面では、時々刻々と周囲の状況が変化していく。その中でいかに状況を正確かつ素早く把握し、それを基に最適な判断を選択・実行できるか否かは、プレーの質に大きく関わってくる。つまり、スポーツパフォーマンスを考える上で、このような脳のパフォーマンスは非常に重要であると考えられる。しかしながら、実際のスポーツ場面では、身体動作（運動）を伴いつつも状況判断をしなければならず、運動は脳機能に影響することが申請者の研究を含め多くの研究により明らかとなっている。しかしながら、運動がなぜ、どのように脳機能に影響しているかといったメカニズムについては未だ解決されていない。

一方で、脳は属性の異なる情報を並列的かつ段階的に処理している。例えば、ヒトは網膜、外側膝上体、一次視覚野、高次視覚野の順に情報を送り処理していく中で徐々に知覚形成を行っており（Hegde, 2008）、それぞれの過程において担っている情報処理が異なる。またこれらの情報処理は2つの経路に分かれており、視対象の形や色など物体の詳細な知覚イメージを形成するといった“モノの特徴”を処理するための経路（腹側経路）と、物体の位置や動きを捉える“モノの動き”を処理するための経路（背側経路）に分かれている（Goodale & Milner, 1992）。このように、脳情報処理は特に視覚機能においてその内部構造としての神経科学的機序が詳細に調べられている。つまり、脳情報処理に着目することにより、運動による脳機能変化の神経科学的なメカニズムを調べることができるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、脳の並列情報処理機構に着目し、運動による知覚-認知の過程における情報処理過程・経路への影響を検証することで「知覚-認知過程における脳機能に対する運動の情報処理経路・過程特異的修飾効果」について明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1)【実験1：視覚情報処理の過程・経路に対する運動による修飾効果の検証】

視覚情報処理の各処理経路特性を引き出す逆行性マスキングという知覚現象（瞬間的に呈示しても確実に見えるターゲット刺激の後に、それを囲むようにマスク刺激を呈示すると、ターゲットの知覚が抑制される現象）を用いて、背側経路と腹側経路の2つの情報処理経路への運動による修飾効果について検証を行った。情報処理経路は刺激特徴選択性といったニューロン応答の特異的反応性があることが知られている（Ishikawa et al., 2006）。例えば、腹側経路は縞の特徴（縦方向や横方向）などの違いに対する反応性が高く、背側経路は反対にその反応性が低いという方位選択性を示す。本実験では、経路間の方位選択性を踏まえ、ターゲットの縞刺激（ガボールパッチ）の縞の方向に対して、直行するマスク刺激（cross）と等方位のマスク刺激（iso）の2つのマスク刺激を用いた視覚検出課題（図1）により、2つの異なる処理経路を計測した。

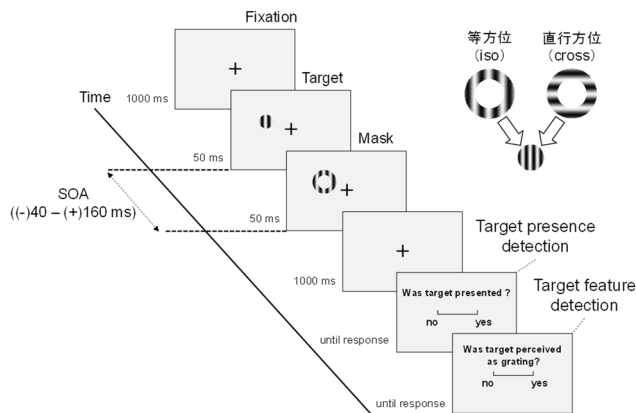


図1. 逆行性マスキング課題の概要

さらに、本実験では、1試行内での同一のターゲット刺激に対し、ターゲット刺激自体が呈示されていたかどうかを問う「存在検出」とターゲット刺激の縞がはっきりと見えなかったかどうかを問う「特徴検出」をさせる回答を行わせることにより、情報処理の過程に対する計測を行った。知覚形成の特性として、1. 知覚が形成されるまでは網膜へ入力が起こってから一定の時間を要すること、2. 知覚形成の情報処理が完了しないと正しく知覚が完了しないことを利用し、ターゲット刺激に対して様々な刺激呈示時間間隔（SOA；-40, -20, 0, 20, 40, 60, 80, 120, 160 msの9条件）でマスク刺激を呈示させ、各SOAに対する検出率から得られたマスキング関数により（図2）、どの時点のSOAで検出率が回復するかを存在検出と特徴検出で比較することにより、情報処理の形成過程を分離し、各過程に対する運動による修飾効果を検証した。

健常成人男性14名を対象に、自転車エルゴメータによる運動を行いながら課題を行う運動条件と自転車エルゴメータ上での座位安静状態で課題を行うコントロール条件を設け、運動前、運動中に視覚検出課題を実施した。運動は、推定最大心拍数の55%に相当する運動強度で実施した。2つの異なる情報処理経路ならびに過程の定量評価のため、それぞれ得られたマスキング関数（図2）から100%正答率を基準として曲線下面積をそれぞれ算出し、各経路におけるマスキング効果における知覚抑制の指標（PSI）とした。また、マスク刺激がIsoの場合のPSIを両経

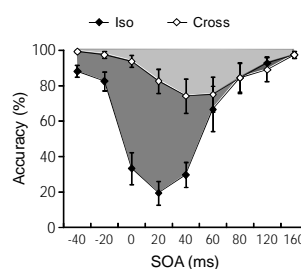


図2. 等方位 (iso) と直行方位 (cross) のマスキング関数と曲線下面積の例

路の成分，マスク刺激が Cross の場合の PSI を背側経路の成分，Iso から Cross の PSI を差し引いた PSI を腹側経路の成分として定量評価した。

(2)【実験 2：脳波を用いた視覚情報処理の過程・経路に対する運動による修飾効果の検証】

実験 1 で行った実験内容に脳の電気生理的反応を現わす脳波（事象関連電位：特定の事象により惹起する脳の活動）を併せて実験を行い，神経生理的観点から情報処理の過程・経路に対する運動による修飾効果の検証を行った。

健常成人男性 16 名を対象に，実験 1 と同様に逆行性マスクングを用いた視覚検出課題（SOA は 60ms のみ，被験者の回答は特徴検出のみを実施）を運動前，運動中に実施した。実験中は，脳波計を頭部に装着し，国際 10-20 法により電極位置を決定し，視覚関連領野（O1・O2）から脳波の計測を行った。運動は，推定最大心拍数の 65～75%に相当する運動強度で実施した。

実験により得られた脳波から事前処理（ノイズ処理など）を行った後，事象関連電位を 1 試行ずつ抽出し，全試行で加算平均処理を行った。加算平均処理を行った事象関連電位は，刺激呈示のオンセットを 0ms とし，-100-0ms の時間窓を自発応答（ノイズ：N），0-600ms の時間窓を視覚応答（シグナル：S）と定義し，0 μ V を基線とし，それぞれの曲線下面積により定量評価を行った。また，ノイズとシグナルの比であるシグナルノイズ比（SNR）をそれぞれの曲線下面積の値から算出した（SNR = S 曲線下面積 / N 曲線下面積）。

(3)【実験 3：脳波を用いた運動時の脳活動による脳領野特異的効果の検証】

運動時に脳波の計測を行い，運動と閉眼を組み合わせた際の脳活動の変化を観察することで，運動による脳活動への影響が脳領野特異的に現れるのかを検証を行った。

健常成人男性 15 名を対象に，運動前，運動中，運動後にそれぞれ閉眼・開眼を行い，脳波の比較を行った。実験中は，脳波計を頭部に装着し，国際 10-20 法により電極位置を決定し，後頭部（O1・O2），頭頂部（P3・P4），後頭部（F3・F4）から脳波の計測を行った。実験は，まず自転車エルゴメータ上で座位安静状態を 6 分間保ち，実験開始 2 分後から，閉眼を 2 分間行い，その後開眼を 2 分間実施した。その後，心拍数が 120-130 拍/分になるように事前に調節した運動負荷での 6 分間の運動を開始した。運動開始から 2 分後に閉眼を 2 分間行い，その後開眼を 2 分間実施した。運動終了後，再度自転車エルゴメータ上で座位安静状態を 6 分間保ち，実験開始 2 分後から，閉眼を 2 分間行い，その後開眼を 2 分間実施した。

実験により得られた脳波から事前処理（ノイズ処理など）を行った後，周波数解析を行い，それぞれの脳領野の α 波（8-13Hz）パワースペクトラム（PSD）を算出し，脳領野の左右の PSD から後頭部（O1・O2），頭頂部（P3・P4），後頭部（F3・F4）ごとにそれぞれ平均値を算出した。また運動前の開眼の PSD を 100%とし，それぞれの変化率を算出し比較を行った。さらに運動閉眼時の PSD の増加が運動と閉眼による相乗的な増加であるかを調べるために，以下のよう

相加的増加 = (安静閉眼時 PSD - 安静開眼時 PSD) + (運動閉眼時 PSD - 安静閉眼時 PSD)

相乗的増加 = 運動閉眼時 PSD - 安静開眼時 PSD

4. 研究成果

(1)【実験 1：視覚情報処理の過程・経路に対する運動による修飾効果の検証】

本実験では，脳の情報処理の過程・経路に対して，逆行性マスクングを用いて知覚レベルに分離し，それぞれの過程や経路に対する運動の修飾効果の検証を行った。

最初に，同一の視覚（ターゲット）刺激に対して存在検出と特徴検出それぞれの回答を行わせることで，情報処理過程がどのように形成されているかについて検討を行った。図 3 に存在検出（Q1）と特徴検出（Q2）における運動前のマスクング関数を示す。まず，特徴検出において，SOA が約 20ms の際に知覚の抑制がピークに達し，その後徐々に知覚抑制が弱くなるといった先行研究と一致した結果を示した。一方で，存在検出は，ピーク的位置に関しては特徴検出と同様の結果を示したが，知覚抑制自体全体的に弱いという結果が得られた。次に各過程でどの時点で知覚抑制がみられなくなるか，つまり情報処理が完了しているかを見ていくと，存在検出については約 60ms で，特徴検出については約 160ms で知覚抑制がみられなくなっていた。

つまり，特徴検出は存在検出よりも知覚抑制がかからなくなる時点が遅いことから，特徴検出は存在検出と比べて処理に完了する時間がより長いことを示している。これは知覚形成における，視知覚はモノの存在からモノの特徴の順に時間発達的に形成されている性質を反映しており，本実験において知覚の形成過程を分離できていることが考えられる。

次に，これらの情報処理過程と経路に対する運動の影響について検討を行った。図 4 は，逆行性マスクングにより得られたマスクング関数から定評評価した 2 つの経路・過程の PSI を示す。

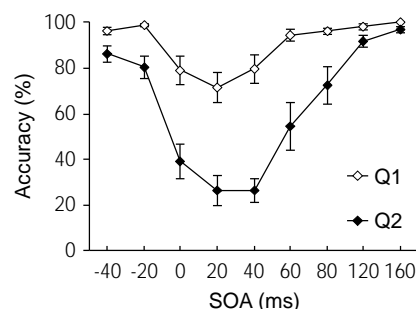


図3. 存在検出(Q1)と特徴検出(Q2)のマスクング関数

まず、存在検出と特徴検出における PSI に対する運動の影響について、存在検出に対して運動による PSI の改善効果はみられなかった一方で、特徴検出においては運動による PSI の有意な改善効果が認められた。つまり、運動は視知覚形成過程における特徴検出にあたる過程を修飾することで視知覚を高めていることが考えられる。視覚情報の階層処理を考えると、本実験では存在

検出と特徴検出は部分的に共通した処理過程の中で行われているにも関わらず、特徴検出においてのみ運動による影響がみられたことから、運動はこれらの情報処理全体に影響するのではなく、特定の過程に特異的に影響していることが示唆された。

背側経路と腹側経路における PSI に対する運動の影響について、まず、背側経路と腹側経路を含めた全成分について、運動により有意な改善がみられた。それぞれの成分を分けて見ていくと、背側経路の成分においては同様に運動による顕著な改善がみられました。一方で、腹側経路の成分においては統計的な差はみられなかった。つまり、背側経路の成分にのみ改善がみられ、それぞれの成分では関与している処理経路が異なることから、運動による視知覚の改善には処理経路特異的な影響がある可能性があることが明らかとなった。

逆行性マスキングにおける知覚抑制が運動により改善する際に想定される機序として 2 つの仮説が考えられる。1 つ目はターゲットに関する視覚応答が直接的に運動による修飾効果を受けたため、視知覚が高まったことが考えられる。しかしながら、この場合だと背側経路・腹側経路の成分に関係なく、視知覚が高まるため、本実験では背側経路の成分のみ高まったことを考えるとこの仮説は棄却される。もう 1 つの仮説は、ターゲットに関する視覚応答ではなく、マスクに関する視覚応答が減弱することで、相対的に抑制が弱まり、視知覚が高まったことが考えられる。本実験では背側経路の成分のみ改善効果がみられたことから、2 つ目の仮説が当てはまる可能性が高く、運動は視対象周辺からの抑制、つまり受容野周囲抑制を弱めることで視知覚を高め、処理経路特異的な効果を持つ可能性が示唆された。

さらに、これまでの結果をもとに情報処理過程について運動がどのように作用していたかについて検討を行った。皮質に当たる一次視覚野において方位選択性が顕著に現れ、本実験の結果として運動は方位選択性のない背側経路の成分においてのみ改善効果を示した。つまり、運動による処理過程特異的な効果は、皮質下に当たる外側膝状体から現れる可能性があることが明らかとなった。

(2)【実験 2：脳波を用いた視覚情報処理の過程・経路に対する運動による修飾効果の検証】

上記の実験 1 では、心理物理実験による実験者の知覚（行動）に基づいた検証であり、脳内で処理された結果として現れた行動を示すものである。そのため、「運動は受容野周囲抑制を弱めることで視知覚を高め、処理経路特異的な効果を持つ可能性がある」とことについては、知覚レベルにおける推測に過ぎない。そのため、本実験では、その裏付けとして脳波を同時に計測することにより、神経生理学的観点から上記の仮説の検証を行った。まず、実際の知覚レベルにおいて運動による改善がみられるか検討を行ったところ、実験 1 と同様に運動による知覚の有意な改善が認められた。そのため、次に脳波（事象関連電位）に対する運動の影響を、ターゲット刺激のみが呈示された場合、マスク刺激のみが呈示された場合、ターゲット刺激とマスク刺激の両方が呈示された場合の事象関連電位からマスク刺激の事象関連電位を差し引いた（両方の刺激が呈示された際の正味の視覚応答）場合の視覚応答について検討を行った（図 5、図 6、図 7）。

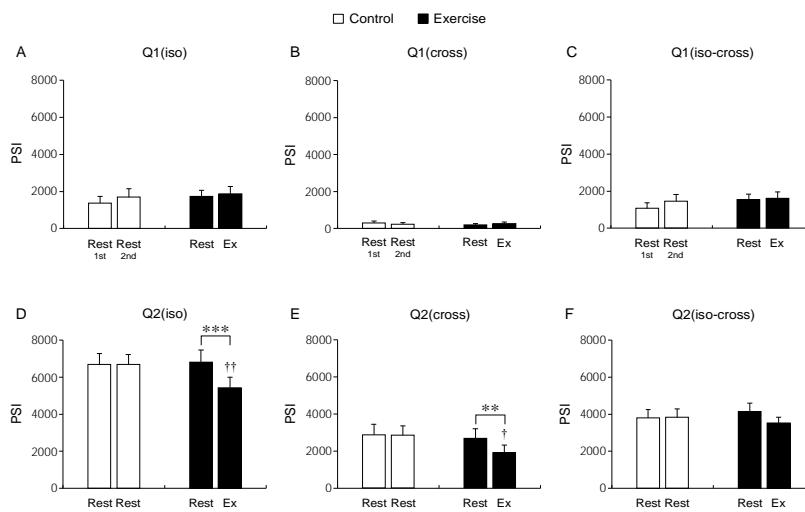


図4. 逆行性マスキングから定評評価した2つの経路・過程に対する運動効果。Q1は存在検出、Q2は特徴検出、Isoは腹側・背側両経路の成分、Crossは背側経路の成分、Iso-Crossは腹側経路の成分を示す。* $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, † $P < 0.05$, †† $P < 0.01$ vs. Rest^{2nd} in the Control.

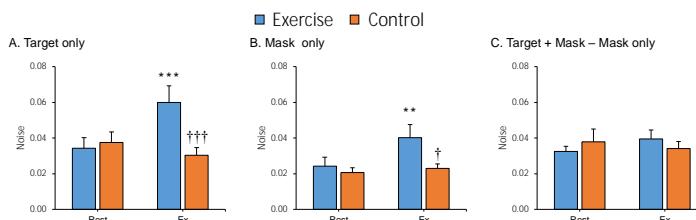


図5. 事象関連電位における自発応答（ノイズ）に対する運動による影響。* $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ vs Rest, † $P < 0.05$, ††† $P < 0.001$ vs Exercise.

ターゲット刺激のみが呈示された場合の脳活動について、自発応答においては運動による増加がみられたが(図5)、視覚応答には変化がみられなかった(図6)。ターゲット刺激とマスク刺激が同時に呈示された場合の脳活動について、自発応答においては有意な変化はみられなかったが(図5)、視覚応答が増加する傾向にあった(図6)。また、マスク刺激のみが呈示された場合の脳活動について、ターゲット刺激と同様に、自発応答においては運動による増加がみられたものの(図5)、視覚応答には変化がみられなかった(図6)。一方で、SNRは有意な減少がみられたことから(図7)、マスク刺激における視覚応答が相対的に低下していることが考えられる。これらのことから、実験1における運動により受容野周囲抑制を弱めることで、視知覚を高めていることを支持する結果が得られた。今後は、さらに事象関連電位の解析方法の精査や被験者数について検討する必要がある。

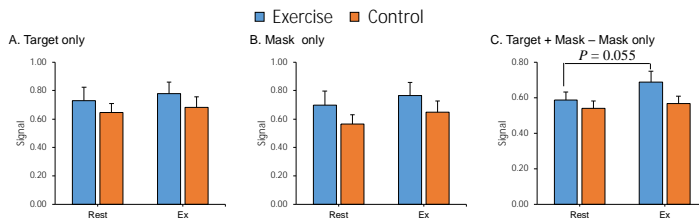


図6. 事象関連電位における視覚応答(シグナル)に対する運動による影響。

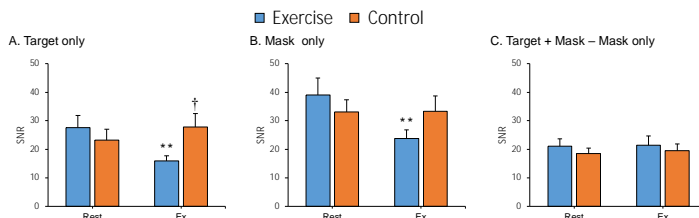


図7. 事象関連電位におけるシグナルノイズ比(SNR)に対する運動による影響。
** $P < 0.01$ vs Rest, † $P < 0.05$ vs Exercise.

(3)【実験3：脳波を用いた運動時の脳活動による脳領域特異的効果の検証】

運動時に脳波の計測を行い、運動と閉眼を組み合わせた際の脳活動の変化を観察することで、運動による脳活動への影響が脳領域特異的に現れるのかを検証を行った。

運動による α 波の増加は後頭部と前頭部で顕著にみられた(図8)。また、運動による α 波の増加は閉眼時よりも閉眼時に有意に高かった。これらの α 波の増加が運動と閉眼による相加的な増加か、あるいは相乗的な増加であるかを検証したところ、相乗的な増加を示していることがわかり、さらにその相乗的な増加は後頭部に特異的にみられることが明らかとなった(図9)。これらのことから、運動による脳活動の増加は、閉眼時には脳領域特異的に起こることが示唆された。

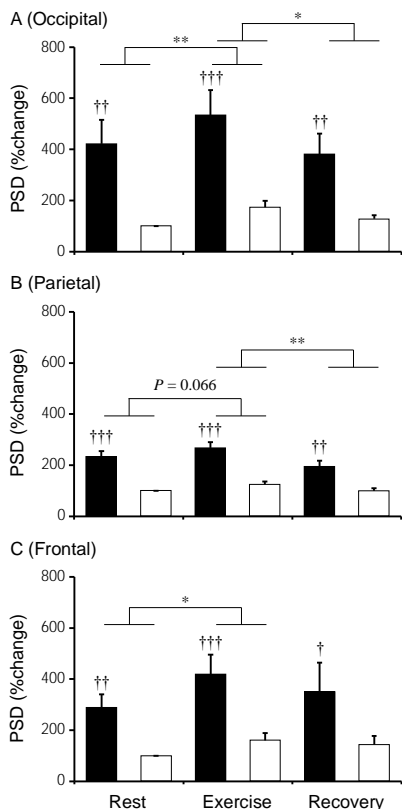


図8. 運動と閉眼による α 波への影響。

* $P < 0.01$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.01$, † $P < 0.05$, †† $P < 0.01$, ††† $P < 0.001$, vs EO.

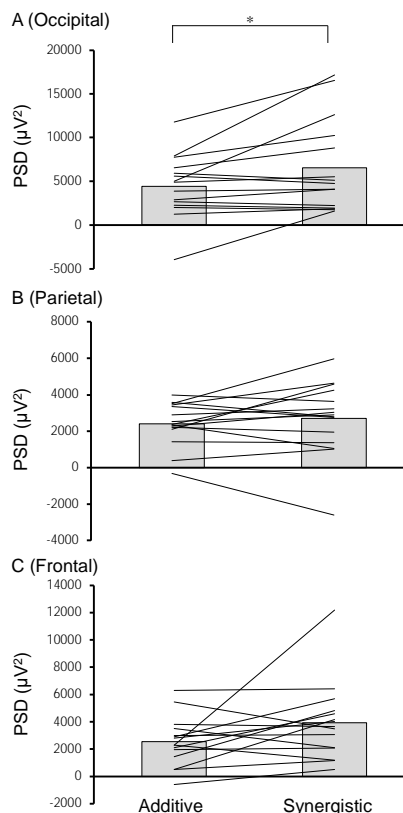


図9. 運動と閉眼の併用による α 波の相加・相乗的増加。* $P < 0.05$.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Komiyama Takaaki, Goya Ryoma, Aoyama Chisa, Yokota Yusuke, Naruse Yasushi, Shimegi Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 The combination of acute exercise and eye closure has a synergistic effect on alpha activity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-021-99783-y	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小見山 高明, 呉屋 良真, 青山 千紗, 横田 悠右, 成瀬 康, 七五三木 聡
2. 発表標題 有酸素運動と閉眼の併用は 波を相乗的に増加させる
3. 学会等名 第77回 日本体力医学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小見山 高明, 呉屋 良真, 青山 千紗, 七五三木 聡
2. 発表標題 運動時の視知覚修飾の神経科学的メカニズム
3. 学会等名 第76回 日本体力医学会
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
---------	---------