

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24530925

研究課題名(和文) 運動学習中のパフォーマンスモニタリングに関する研究

研究課題名(英文) A study of performance monitoring during motor learning

研究代表者

正木 宏明 (MASAKI, HIROAKI)

早稲田大学・スポーツ科学学術院・教授

研究者番号：80277798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：パフォーマンスモニタリングは、エラー反応をした際にそれを修正し再発を防止する補償機能として概念化されてきた。本研究では従来の知見を概観し、運動学習におけるパフォーマンスモニタリングの重要性を示したうえで、その見地を事象関連電位によって検証した。運動学習現象の文脈干渉効果、フィードバック頻度の効果、潜在的学習、運動プログラミング、タイミング機能に関わる処理過程が事象関連電位を変化させることを示した。

研究成果の概要(英文)：Performance monitoring has been conceptualized as the process that initiates remedial actions when we commit errors. In this project, we confirmed the importance of performance monitoring in motor learning and in the control of learned motor behavior by reviewing previous studies. We further tested the validity of this assertion by recording event-related potentials (ERPs) associated with performance monitoring. We focused on previously-reported phenomena in the motor learning area, including the contextual interference effect, beneficial effects of infrequent feedback, implicit learning, motor programming, and timing function. A series of experiments revealed that ERPs recorded during motor learning were modulated by performance monitoring.

研究分野：実験心理学

キーワード：運動学習 パフォーマンスモニタリング 事象関連電位 脳波 MRI

1. 研究開始当初の背景

運動学習では、獲得すべき目標動作と実際に遂行している動作とのズレ(エラー)を検出し、修正する能力が重要となる。反復練習でエラーを小さくしていくことによって、目標動作は獲得される。脳機能の観点からは、エラーの検出と修正、エラーの再発防止は、パフォーマンスモニタリングという概念で包括的に捉えられてきた。また、脳の深部に位置する前帯状回(anterior cingulate cortex: ACC)がパフォーマンスモニタリング機能を担うことが明らかとなり、ACC活動を計測する研究が大きく進んだ。しかしながら、運動学習の神経機序に関して、パフォーマンスモニタリングの観点を加味し、認知神経科学の手法を用いて検討した研究はほとんどなかった。

運動学習研究で従来検証されてきた現象のひとつに文脈干渉効果がある。新奇の動作スキル課題を練習する場合、常識的には当該スキルを反復練習する方法が習熟への近道と思われる。一方、当該スキル以外に異質の動作課題を複数加えて、試行毎に課題を変えて練習する場合は、反復練習よりも習熟に時間がかかると思われる。実際に、反復練習する条件と、複数の課題を交互に練習する条件でパフォーマンスを比較すると、練習期のパフォーマンスは反復練習条件のほうが良い。しかしながら後日、保持テストや転移テストを実施し、学習ないし忘却を調べると、複数課題をランダムに練習した条件のほうが反復練習条件よりもパフォーマンスは優れるという逆転現象が生じる。これは、試行間で干渉を起こしたほうが学習は促進することを示しており、文脈干渉効果として知られている。こうした直観に反する現象は、フィードバック頻度を操作した実験等でも報告されてきたが、背景の神経機序については不明な点が多く、生理心理学、認知神経科学的な検討があまりに不足していた。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまで、脳波の事象関連電位(event-related potential: ERP)を測定することで、脳内情報処理の研究に従事してきた。特に過去10年間は、エラー関連陰性電位(error-related negativity: ERN)の機能的意義の解明に力を注いできた。ER Nは人がエラー反応をした際にACCから生起する陰性電位で、頭皮上の前頭-中心部から記録した脳波上に観察される。ER Nの機能的意義は、パフォーマンスモニタリングを反映することにある。そこでER Nを指標とすれば、運動学習過程で学習者に求められる「エラー検出能力の発達」の神経機序を明らかにできる。

パフォーマンスモニタリングは、動作課題の遂行中に首尾良く課題が遂行されているか否かをモニタする機構であり、エラー反応が生じたり、反応肢間で競合(反応コンフリクト)が生じると、それらを検出して一過性

に駆動する。研究代表者はこれまで、エラー反応の大きさ、反応コンフリクトの強度に伴ってER Nが増大することを報告してきた。また、エラー反応に対して他者が言語的に叱咤すると、モニタリング機能が低下してER Nは減衰することを示した。このように、パフォーマンスモニタリング機構は、エラーとコンフリクトに関する要因と、環境に依存して変化する注意や情動・動機づけ要因の影響を受けることを確かめてきた。これらの知見に基づき、本研究では、適切な課題設定と方法論の下でデータを取得し、妥当性の高い解釈を目指した。

ER N以外にもパフォーマンスモニタリングの指標となり得るERP成分がある。スキル動作が首尾よく完遂した場合には、体性感覚野由来の陽性脳電位が惹起する。この電位はスキル陽性電位(skilled performance positivity: SPP)として報告されている。SPPは30年以上前に発見されたにもかかわらず、これまで注目を浴びることはほとんどなかった。本研究では、SPPの機能的意義を再確認したうえで、スキル獲得の神経機序を調べるツールとすることを着想した。

運動学習課題の1つにタッピング課題がある。予め定められたタイミング(標的時間)通りにボタンをタップしていく課題である。本研究では、同一課題をブロック化して反復練習するブロック練習群と、試行毎に異なる課題がランダムに提示されるランダム練習群に実験参加者を振り分け、文脈干渉効果を確認することを計画した。その際、練習期におけるER NとSPPの振る舞いを調べることとした。運動学習では課題遂行後にパフォーマンス結果をフィードバックすること(結果の知識, knowledge of results: KR)が重要である。しかしながら、KRは1試行毎に丁寧に与えるよりも、2, 3試行に1回の割合で提示したり、数試行の結果を要約して与えたほうが学習は促進することが知られている。本研究では、タッピング課題でKR頻度を操作し、ER NとSPPを測定することとした。

脳波は時間分解能に優れているものの、脳の活動部位を明確化することは難しい。そこで、ERP実験から得た知見をもとに、動作スキル課題に機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: fMRI)を適用して、スキル動作発現の背景にある神経基盤を探ることを計画した。右手第2指の屈曲動作による力量発揮課題を用いて、微細な力量調整を支える脳活動と関連部位を明らかにすることを目指した。

本研究では一連の実験的検証によって、運動学習研究で従来報告されてきた種々現象の神経機序について、パフォーマンスモニタリングの観点から新しい知見を得ることを目的とした。これらの知見は、主に現象記述と行動指標に基づき構築されてきた運動学習モデルに神経科学的基礎を与えうるものである。その結果、スポーツ実践者も指導者

も、科学的根拠の下に自信をもって「効率のよい練習法」を工夫し、実践できるようになることが期待される。本研究の成果は、認知神経科学領域に大きなインパクトを与えるだけでなく、スポーツ現場への還元の可能性も高いものと考えた。

3. 研究の方法

各年度に実施した実験では以下の課題を順次用いて、ERPを測定した。脳波はいずれも128チャンネルデジタル脳波計(Biosemi社製 Active Two)によって導出した。実験課題遂行中に刺激提示時点と反応生起時点を表すマーカーを同時記録し、加算平均処理のトリガとした。

運動学習課題としては、相対タイミングを操作したボタン押し課題を用いた。この課題では、ボタンを4回連続でタッピングするが、各タッピング間(3区間)には標的時間が設定されており、実験参加者は標的時間に合致したタイミングでボタン押しすることが求められた。さらに、各区間の標的時間が異なる3課題を設定し、練習スケジュールの違いに伴う文脈干渉効果を検証した。また、同じ課題で学習に及ぼすKR頻度の効果も検証した。

SPPの機能的意義を調べるために、タイミングスキル課題を用いた。左手のボタン押しで光点をスイープさせ、右手のボタン押しで40-60msの範囲内に止める課題であった。右手ボタン押しと同時に光点が止まり、それ自体がKRとなる同時フィードバック条件と、右手ボタン押しでは光点が止まらずスイープし続け、3画面表示時に止まる遅延フィードバック条件を設定した。SPP同定に必要な統制条件(右手ボタン押しで光点は止まらない)も2種類設定した。

異質の運動学習課題の比較では、特定のパターンでボタン押しを行う系列学習課題と、マウスデバイスを用いた適応学習課題を用いた。後者は、標的までカーソルを移動させる際に、マウスデバイスの移動方向に対してカーソルの移動方向が30度回転するものだった。

モンティホールジレンマ課題では、3つの選択肢から1つを選択すると、残り2つの選択肢から不正解の選択肢が1つだけ開示された。実験参加者は、最初に選んだ選択肢から残り1つの選択肢に変更する機会を最後に与えられた。最終意思決定を行った後に、自分の選択結果と残り1つの選択肢の結果が同時に開示された。

標的強度値発揮課題では、予め決められた標的強度値を出力するようにフォースキーを鋭く押した。注視点後にGo信号が提示されるが、反応を求めないキャッチ試行も低頻

度で提示された。運動反応後に、動作結果に関する主観的評価を聴取し、実際の出力強度値を視覚的にフィードバックした。同様のプロトコルはMRI実験でも採用した。

4. 研究成果

一連の実験を行う過程で、当初注目していた以外のERP成分も、運動学習中のパフォーマンスモニタリングを検討するうえで重要視された。ERNに続いて出現するエラー陽性電位(error positivity: Pe)は、エラーの詳細な評価過程と関係していることが知られており、パフォーマンスモニタリングと関係が深い。また、スキル動作を出力するには、適切な反応をプログラミングし、実行する必要があるが、その脳内情報処理過程を知るには運動関連脳電位(movement-related cortical potentials)を調べる必要があった。本研究では特に、運動電位や、「警告刺激-命令刺激-運動反応」課題で観察される随伴陰性変動(contingent negative variation: CNV)、準備電位の左右半球間差を算出して得られる偏側性準備電位(lateralized readiness potential: LRP)等に注目した。さらに、結果の知識(KR)を提示する際、フィードバック提示前に刺激前陰性電位(stimulus-preceding negativity: SPN)が観察される。また、悪い結果を知らせるKRによって、フィードバック陰性電位(feedback-related negativity: FRN)が惹起し、良い結果のKRによってP300成分が惹起する。これらのERP成分にも着目しながら、本研究を進めることとした。各年度での成果は以下の通りであった。

平成24年度では、運動学習中のパフォーマンスモニタリング機能について、その意義と今後の展望について検討した。運動学習と運動制御の視点から従来の研究知見を概観し、運動学習研究を推進するうえで有効と考えられる認知神経科学的方法論を再考した。その結果、スキル動作の習得にはパフォーマンスモニタリング機能が強く関与しているものの、ERPで検証した研究はほとんどないことがわかった。これらの検証結果は、総説論文としてJournal of Physical Fitness and Sports Medicine誌に報告し、本研究を遂行するうえでの礎とした。

次に実験的に検証するため、運動学習に及ぼすフィードバック頻度の効果に注目した。学習者に対して試行毎にKRを与える群と、50%頻度でKRを与える群を比較し、そのときの運動電位を調べた。運動電位は体性感覚野由来の陰性電位であり、反応肢と反対側で大きくなる偏側性を有し、末梢からのフィードバック情報を反映するものと考えられている。さらに文脈干渉効果に着目した実験を行い、ランダム練習とブロック練習がもたらす学習効果の差異と、運動電位を対応づけた。これらの実験結果から、運動電位は運動学習中のパフォーマンスモニタリングを反映することが示唆された。運動制御の観点では、

タイミングスキルに注目した実験を行った。タイミング反応後に生じる SPP は、タイミング動作のモニタリングを反映すると考えられてきたが、実際には提示刺激に対する認知処理を反映しているに過ぎないことが示唆された。

平成 25 年度では、SPP データをさらに分析した結果、SPP は反応タイミングを外した場合に減少するとする従来の知見を疑問視する結果を得た。パフォーマンスモニタリングの観点では、SPP 減少は FRN の重畳によるものと解釈すべきという結論に達した。事実、KR を遅延提示することで SPP と FRN を時間的に乖離させると、SPP は減少しなかった。本研究の知見は、従来の誤った解釈を正した点で意義がある (International Journal of Psychophysiology 誌で報告)。

運動学習研究では反応プログラミング過程の理解が重要となる。そこで、反応時間課題で反応複雑性と動作持続時間の 2 変数を直交操作し、LRP を測定した。両変数ともに反応時間を遅延させ、反応同期 LRP の持続時間を延長させたことから、反応プログラミングは独立した複数の下位段階から構成されることが示唆された (Psychophysiology 誌で報告)。

さらに標的強度値出力課題で、同一の標的強度値を反復出力した条件と、試行毎に標的強度値を変えた条件で CNV を比較した。CNV は強度パラメータの修正過程を反映して複数標的条件で増大した。標的強度値の出力に関与する脳領域を同定するため、fMRI 実験でも用いることのできる実験器具を製作した。

反復運動は動作スキル獲得を促進させるが、同時に認知機能も向上させることを確認するため、トレッドミル走による一過性運動後に P300 を測定した。その結果、P300 に振幅増大を認め、一過性運動の効果と走姿勢の関与が示唆された。この知見は Journal of Ergonomics 誌にて報告した。

運動学習には、動機づけの影響が大きいことから、パフォーマンスモニタリングに情動・動機づけ処理の観点を加えて研究を進める必要性が生じた。そこで最終の平成 26 年度では、ERN、Pe に及ぼす外発的・内発的動機づけの影響について、空間ストループ課題遂行中のエラー反応に、聴性罰を随伴させて検討した。その結果、Pe に罰随伴による振幅増大がみられた。また BIS/BAS 尺度を適用した結果、BAS 得点と Pe 振幅値との間に中程度の負の相関関係を認めた (日本生理心理学会誌で報告)。さらに同課題で金銭報酬を操作した結果、内発的動機づけの低い者では、金銭報酬の効果によって ERN が増大した。

系列学習課題と適応学習課題では、大脳基底核と小脳の関与が異なることが知られている。ACC 由来の ERN は大脳基底核の活動とも関係が深いことが示唆されてきたため、2 つの学習課題を比較した際に、系列学習の

ほうが適応学習よりも ERN の変化は大きくなることが予測される。学習課題遂行中に ERN を記録することが困難なことから、空間ストループ課題で ERN を計測し、その振幅値と、両学習課題のパフォーマンスとの対応を調べた。その結果、系列学習において ERN 振幅とパフォーマンス向上との間に相関関係がみられ、ERN 振幅は学習向上を予測することが示唆された。

キー押しによる系列学習課題を使った研究では、潜在的な学習(implicit learning)の生起が報告されている。そこで本研究でも、正しい意思決定が潜在的に学習できるか検証した。これまで用いられなかったモンティホールジレンマ課題を採用した。この課題では、参加者は最初の意思決定(正解確率 1/3)に固執することが知られている。実際には、選択肢を変更すると正解の確率が 2/3 に上昇するという直観に反した解を有している。したがって、潜在的に学習が進めば参加者の変更率が増大することになる。実験の結果、変更率に増大傾向がみられた。KR に先行する SPN を調べた結果、SPN 振幅値は反復遂行によって増大する結果を得た。SPN の増大は、正しい意思決定が潜在的に行われるに伴い、KR に対する期待が上昇することを示している。意思決定の結果を評価し、次の行動選択につなげていくというパフォーマンスモニタリングが、潜在的に進む学習にも関与していることを示唆している。

標的強度値出力課題を遂行している際の運動関連脳電位を調べた結果、パフォーマンスモニタリングを反映する ERN は力量エラーによって惹起しなかった。その一方で、運動電位には出力成功の主観的感覚に対応して増大がみられた。同様のプロトコルで fMRI でも調べた結果、パフォーマンスモニタリングにおける小脳の関与が示唆された。

研究期間全体を通じて、運動学習にとって重要な役割を担うパフォーマンスモニタリング機能について検証した。この機能を反映する指標として、ERN、Pe、FRN、SPP に着目した。さらに、反応プログラミング過程を反映する LRP と、フィードバックに対する期待を反映する SPN も重視した。一連の実験での成果は、運動学習におけるパフォーマンスモニタリング機能の重要性を支持するものであり、運動学習を支える神経機序の理解に貢献する知見であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

2014 年度

1. Masaki, H., Xu, L., Taima, N., & Murphy, T. I. (in press). The functional significance of the skilled performance positivity: an update. *International Journal of Psychophysiology*.
2. Xu, L., Sommer, W., & Masaki, H. (2015). The

structure of motor programming: Evidence from reaction times and lateralized readiness potentials. *Psychophysiology*, 149-155. (査読有り)

3. 丸尾祐矢・正木宏明 (2015). パフォーマンスモニタリングに及ぼす聴覚性罰刺激の効果. *生理心理学と精神生理学*, 32. (査読有り)
4. Xu, L., Sommer, W., & Masaki, H. (2014). On the structure of motor programming: an additive factors approach. *スポーツ科学研究*, 11, 250-264. (査読有り)
5. Nakano, M., Matsuo, K., Nakashima, M., Harada, K., Egashira, K., Masaki, H., Takahashi, K., & Watanabe, Y. (2014). Gray matter volume and rapid decision-making in major depressive disorder. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 48, 3, 51-56. (査読有り)

2013 年度

6. Bae, S., Kamijo K., & Masaki, H. (2013). Wearing ergonomically designed core stability shorts improves cognitive control and affect following acute aerobic exercise. *Journal of Ergonomics*, S2:003. doi:10.4172/2165-7556.S2-003. (査読有り)

2012 年度

7. Masaki, H. & Sommer, W. (2012). Cognitive neuroscience of motor learning and motor control. *Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 1 (3), 369-380. (招待総説 査読なし)

[学会発表](計 18 件)

1. Masaki, H., Takasawa, N., Soga, K., & Sommer, W. Motor potential is modulated by perceived correctness in a target force production task. The 55th Annual Meeting of the Society for Psychophysiological Research (SPR), September 30-October 4, Seattle, USA. (accepted for presentation).
2. 松橋拓努・丸尾祐矢・長野祐一郎・正木宏明 運動学習課題の差異とパフォーマンスモニタリングとの関係 第 33 回日本生理心理学会(関西福祉科学大学) 2015 年 5 月 24 日
3. 丸尾祐矢・正木宏明 Go/Nogo 課題遂行中のパフォーマンスモニタリングに及ぼす金銭報酬の効果 第 33 回日本生理心理学会(関西福祉科学大学) 2015 年 5 月 24 日
4. Xu, L., Sommer, W., Takasawa, N., & Masaki, H. The effect of force parameter modification on the contingent negative variation. Abstracts of the 17th World Congress of Psychophysiology, Hiroshima, Japan, 2014/9/25. *International Journal of Psychophysiology*, 94, pp215-216. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.861.
5. Kamijo, K., & Masaki, H. Positive association between childhood fitness and cognitive

control. Abstracts of the 17th World Congress of Psychophysiology, Hiroshima, Japan, 2014/9/24. *International Journal of Psychophysiology*, 94, p136. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.633.

6. Maruo, Y., Sommer, W., & Masaki, H. The effect of monetary punishment on error monitoring in a Go/Nogo task. Abstracts of the 17th World Congress of Psychophysiology, Hiroshima, Japan, 2014/9/25. *International Journal of Psychophysiology*, 94, pp216-217. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.864.
7. Hirao, H., Murphy, T.I., & Masaki, H. Change or stick? Anticipation processes associated with subjective and objective probability of winning in a Monty Hall Dilemma task. Abstracts of the 17th World Congress of Psychophysiology, Hiroshima, Japan, 2014/9/25. *International Journal of Psychophysiology*, 94, p216. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.863.
8. Kamijo, K., & Masaki, H. The association of childhood fitness with proactive and reactive cognitive control. Society for Psychophysiological Research 54th Annual Meeting, Atlanta, GA, USA, 2014.
9. Kamijo, K., Bae, S.R., & Masaki, H. The association of aerobic fitness to cognitive control strategy in preadolescent children. Society for Psychophysiological Research 53rd Annual Meeting, Florence, Italy, 2013.
10. Kamijo, K., Bae, S.R., & Masaki, H. Cardiorespiratory fitness is associated with cognitive flexibility in preadolescent children. 18th Annual Congress of the European College of Sport Science, Barcelona, Spain, 2013.
11. 平尾貴大・正木宏明 最後通牒課題における意思決定課程の検討 第 31 回日本生理心理学会(福井大学) 2013 年 5 月 19 日
12. Masaki, H. & Xu, L. Does skilled-performance positivity represent timing control? Abstract of the Society for Psychophysiological Research 52nd Annual Meeting, New Orleans, USA, p109, 2012/09/21.
13. Xu, L., Sommer, W., & Masaki, H. Motor Programming of response complexity and movement duration. Abstract of the Society for Psychophysiological Research 52nd Annual Meeting, New Orleans, USA, p108, 2012/09/21.
14. Bae, S. & Masaki, H. Acute aerobic exercise influences on executive control assessed by task switching paradigm Abstract of the Society for Psychophysiological Research 52nd Annual Meeting, New Orleans, USA, p109, 2012/09/21.
15. Xu Lu・正木宏明 Effects of response complexity and movement duration on lateralized readiness potential: A random manipulation 第 30 回日本生理心理学会(北海道大学) 2012 年 5 月 3 日

16. ベソソリュウ・山崎勝男・正木宏明 一過性有酸素運動と習慣的身体活動がワーキングメモリ機能に及ぼす影響 第30回日本生理心理学会大会(北海道大学)2012年5月2日
17. 對間直也・正木宏明 運動学習に及ぼすフィードバック頻度の効果とERP 第30回日本生理心理学会(北海道大学)2012年5月3日
18. 原田恵・正木宏明 気付きに關与する事象關連電位成分の抽出 第30回日本生理心理学会大会(北海道大学)2012年5月3日

〔図書〕(計3件)

1. Kamijo, K., & Masaki, H. (in press). Task difficulty mediates the association between childhood fitness and cognitive flexibility. In K. Kanosue (Ed.), Sport Science Series on "Active Life". Springer. (査読なし)
2. Xu, L., Sommer, W., & Masaki, H. (in press) On the structure of movement preparation inferences from motor schema theory. In K. Kanosue (Ed.), Sport Science Series on "Active Life". Springer. (査読なし)
3. Hackley, S.A., Valle-Inclan, F., Masaki, H., & Hebert, K. (2014). Stimulus-preceding negativity (SPN) and attention to rewards. In: G.R. Mangun (Ed.) Cognitive electrophysiology of attention. Elsevier, Pp. 216-225. (査読なし)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.waseda.jp/sem-masaki/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

正木 宏明 (MASAKI HIROAKI)
早稲田大学・スポーツ科学学術院・教授
研究者番号：80277798

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

高澤 則美 (TAKASAWA NORIYOSHI)
江戸川大学・社会学部人間心理学科・教授
研究者番号：70356161

小野田 慶一 (ONODA KEIICHI)

島根大学・医学部・講師
研究者番号：60432712

紙上 敬太 (KAMIJO KEITA)

早稲田大学・スポーツ科学学術院・講師
研究者番号：20508254

(4)研究協力者

丸尾祐矢 (MARUO YUYA)
早稲田大学大学院・スポーツ科学研究科・博士後期課程

曾我啓史 (SOGA KEISHI)

早稲田大学大学院・スポーツ科学研究科・博士後期課程

平尾貴大 (HIRAO TAKAHIRO)

早稲田大学大学院・スポーツ科学研究科・博士後期課程

對間直也 (TAIMA NAOYA)

早稲田大学大学院・スポーツ科学研究科・修士課程

SOMMER, Werner

Humboldt University・Institute of Psychology,
Germany・Professor

SEGALOWITZ, Sidney

Brock University・Department of Psychology,
Canada・Professor

MURPHY, Timothy

Brock University・Department of Psychology,
Canada・Associate Professor

HACKLEY, A. Steven

University of Missouri-Columbia・Department of
Psychological Sciences, USA・Associate
Professor