

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21530774

研究課題名（和文） エラー反応を予測する脳活動の研究

研究課題名（英文） A study of brain activities that foreshadow error responses

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・准教授

研究者番号：80277798

研究成果の概要（和文）：動作遂行中のエラー反応を脳波の事象関連電位から予見できるかについて検討した。単調な予測反応を反復させる課題では、反応誘発電位の陽性成分にその後のパフォーマンス結果が反映されることを見出した。陽性成分が高振幅の時にエラー誘発刺激を提示しても正反応となる一方で、低振幅時に提示すると反応抑制は機能せず、誤反応となることが明らかとなった。本研究で得た知見は、ヒューマンエラー予防に役立つものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The present study investigated if event-related potentials (ERPs) foreshadow performance on the forthcoming trials in an alternating-response task, in which the participants responded to the pointing direction of an arrowhead. The alternated presentation pattern of arrowhead direction was occasionally broken by a repeated stimulus (i.e., lure trial). Analyses of ERPs on the five consecutive lure-preceding trials showed that the electromyogram-locked positive deflections were larger on the correct-preceding trials than on the error-preceding trials. These results suggest that the larger positive deflection immediately following responses seems to foreshadow correct performance in a reduced conflict task. The present findings might contribute to prevention of human errors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
23年度	500,000	150,000	650,000
22年度	500,000	150,000	650,000
21年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：生理，パフォーマンスモニタリング，エラー，事象関連電位，前帯状皮質

## 1. 研究開始当初の背景

前頭内側に位置する前帯状皮質(anterior cingulate cortex: 以下 ACC と略記)の主要な役割のひとつは、自分自身の行動をオンラインでモニタすることにある。我々が意図に反して間違った反応をしつつある場合、ACC はそ

のエラー反応を検出し、抑制をかける。ひとたびエラー反応が生じた場合には、ACC は同じ過ちを繰り返さないようにその後の行動修正に働きかける。こうした行動のモニタリング機能は、パフォーマンスモニタリングと呼ばれており、人の適用行動・学習の理解

に重要なことから、近年その神経機序の解明が進んだ。エラー発生メカニズムとエラー防止策の確立は人間工学ではもちろんのこと、スポーツ心理学、臨床応用などの分野で重視されてきた命題である。

エラー反応発生の原因のひとつとして、「パフォーマンスモニタリングの一過性低下」を挙げることができる。もしこの仮説が正しければ、パフォーマンスモニタリング機能の一過性低下は、エラー反応の発生以前から生じている可能性が高い。そのため、エラー試行そのものを分析するよりは、それ以前の試行での脳内情報処理を調べるほうが、仮説の検証だけでなく、応用研究につなげるうえでも有益となる。

これまで研究代表者は、脳波の事象関連電位(event-related potential: ERP)のなかでも、エラー反応によって惹起するエラー関連陰性電位(error-related negativity: ERN)の機能的意義について研究してきた。ERNに関する多くの研究では、エラー試行そのものを研究対象としてきたため、「パフォーマンスモニタリング機能の一過性低下」という仮説を検証した研究は少なかった。

その一方で近年、エラー生起に先行して生じるパフォーマンスモニタリングの一過性低下を示すエビデンスも僅かながら報告されている。たとえば Ridderinkhof et al. (2003)は、認知的葛藤課題ではエラー反応の直前に、パフォーマンスモニタリングを反映するcorrect-response negativity (CRN)に振幅低下が生じることを見出し、この陰性電位低下と相対的にエラー先行陽性電位(error-preceding positivity: EPP)が観察されることを報告した。同様の結果は、Allain et al. (2004)や Hajcak, et al. (2005)によって追試されている。しかしながら、これらの研究はすべて反応コンフリクトを誘発する認知的葛藤課題に限られた知見であり、日常生活で多くみられる単調で反復する作業課題にも敷衍できる知見なのかは不明であった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、より単純で反応コンフリクトを誘発しない課題を用い、エラー反応から時間的に遡ったときに、「パフォーマンスモニタリングの一過性低下」が生じているのかについて、ERPを用いて検証することとした。

本研究では交互反応課題を採用してエラーに先行する脳活動を検討した。この課題は従来使用されてきた認知的葛藤課題とは異なり、左右反応肢による予測反応を促すものであるが、低頻度で「ルアー刺激(lure)=フェイント」を提示することで、エラーを誘発する課題であった。

この課題の特長は、1. 反応コンフリクト

の関与が低い、2. エラー反応率を50%程度に統制できる、3. 時系列に沿った分析が可能である、4. エラー反応後の所謂「ポストエラー slows」現象を測定しやすい、ことにある。したがって、反応コンフリクトに注目してきた従来の研究とは異なった切り口で、エラー発生メカニズムを検討できることになる。

ルアー刺激に対する正誤反応に基づいて時系列分析をした研究はこれまでになく、「パフォーマンスモニタリングの一過性低下」現象の一般化に寄与する課題と考えられる。

エラー反応に先行して生じる「パフォーマンスモニタリングの一過性低下」を示せば、ヒューマンエラーの発生メカニズムとその防止に役立てることができる。たとえば、脳波のオンライン解析に基づきバイオフィードバック技法を駆使することで、エラーを予測して行為者に警告を与えるなどの応用が可能となる。

本研究では、近年注目されている機能的MRI (functional magnetic resonance imaging: fMRI)と脳波の同時測定システムの構築も目指した。ERPを用いる利点は、認知機能をミリ秒オーダーで調べられることにあるが、空間的分解能は低いという短所を有する。一方、fMRIの強みは、高い空間分解能にあり、ERPでは困難な活動脳部位の推定が可能となる。パフォーマンスモニタリング低下に関わる脳部位が特定できれば、当該研究領域に大きく貢献できるものと考えられた。

ERNの有する機能的意義については、過去10年間で多くのことが解明されてきたものの、本研究課題を遂行する上で、ERNの基礎的知見をさらに集積しておく必要がある。そのため、認知的葛藤課題遂行時のERNの振る舞いも測定し、ERNに及ぼす反応コンフリクトの影響、情動の影響、昼間睡眠の効果についても検討した。さらに、ERN以外の電位成分がパフォーマンスモニタリング機能を有する可能性についても、運動電位(motor potential: MP)に着目することで検討した。

## 3. 研究の方法

### 【研究1】

目的：単純課題のエラー予測性を調べた。  
実験課題：エラー反応を予測し得る脳機能を調べるために「交互反応課題」を用いた。この課題は、注視点の上下に繰り返し交互提示される視覚刺激に対して、上下に配列されたボタンで速くかつ正確に反応することであった。刺激提示位置が上のときは上のボタンで、下のときには下のボタンで反応した(図1)。ただし、前試行と同じ刺激が低頻度確率(5%)で反復提示される(ルアー刺激)。実験参加者はルアー刺激に対してもエラー

せず、素早く反応しなければならなかった。刺激間隔は600–1000msの範囲でランダムに変動させた。課題は、1ブロック200試行を8ブロック遂行させた。

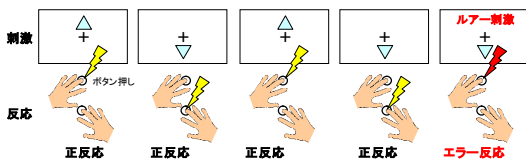


図1 実験課題

分析方法：交互反応課題遂行中に頭皮上128部位から脳波を導出した。分析は、ルアー刺激試行(L)に対してエラー反応した場合と、正反応した場合のそれぞれについて、5試行前まで遡り両条件の脳活動を比較した。①ルアー試行(L)、②L-1試行からL-5試行までの各試行で正反応前と誤反応前の反応時間および脳活動を比較し、エラーを予見する成分の同定を試みた。③エラー反応後のL+1試行で生じる反応時間の遅延(ポストエラー slows)の脳活動についても検討した。

#### 【研究2】

目的：認知的葛藤課題におけるERNの機能的意義を調べた。

課題と手続き：研究代表者が従来用いてきた空間ストローク課題を主に使った。この課題は注視点の上下いずれかの位置に、上下いずれかを指し示す矢印を提示し、実験参加者には、刺激の提示位置を無視し、できるだけ素早く正確に矢印の方向に対して反応することを求めた。特長は、強い反応コンフリクトを惹起させ、少ない試行数でも十分なエラー反応を稼げることにある。空間ストロークと比較する目的で、反応コンフリクトの小さいサイモン課題も実施し、両課題間でのERNの振る舞いを検討した。

#### 【研究3】

目的：パフォーマンスモニタリングが昼寝後に変化するか調べた。

課題と手続き：上記空間ストローク課題を用いた。1時間の昼間睡眠を取らせた後で課題を遂行させた条件と、睡眠の代わりに本を読ませた統制条件でERNを算出し、両条件で比較した。

#### 【研究4】

目的：パフォーマンスモニタリングに及ぼす情動の効果を調べた。

課題と手続き：空間ストローク課題遂行中に生じたエラー反応に対して、言語的な叱咤激励を随伴させた。叱りつける条件、激励する条件、言語フィードバックを提示しない条件でERNを比較した。

#### 【研究5】

目的：MPがパフォーマンスモニタリングを

反映するか検討した。

課題と手続き：一致タイミング課題を用いた。画面上に提示される時計型刺激に対して(刺激回転速度：高速条件420 ms/cycle, 低速条件570 ms/cycle), 12時に指針が到達する時点に、フォースキーにより発揮したピーク力量時点を合致させた。キー押し速度(time to peak force: TTP)は2条件設定した(TTP 100 ms, TTP 200 ms)。刺激速度と動作速度との組み合わせから4条件を設定した。

#### 【研究6】

目的：パフォーマンスモニタリングに関与する大脳基底核の活動を探るため、意思決定課題を用いた。意思決定結果を知らせるフィードバックに対する期待を反映する刺激前陰性電位(stimulus-preceding negativity: SPN)を測定した。

課題と手続き：単純な意思決定課題を用いた。この課題では、画面上に表示される2つの選択肢のいずれかを選択できるChoice条件と、コンピュータにより強制的に選択されてしまうNoChoice条件を比較した。いずれの条件も、選択反応に伴って相対的に良い結果と悪い結果がもたらされる課題であった。フィードバック提示時点で脳波を加算平均し、自らの意思で選択できるプロセスがSPNに及ぼす効果を調べた。

## 4. 研究成果

### 【平成21年度】

32チャンネルデジタル脳波計とfMRIが同時記録できるシステムを構築することを試みた。その一方で、128チャンネルデジタル脳波計を用いて、パフォーマンスモニタリング低下に関与する脳活動を探った。ルアー刺激先行試行での反応時間とERPを測定した結果、両者にルアー試行でのパフォーマンス結果を予見する特徴を見出した。予測に反してエラーよりもむしろ正反応が予測できることを示唆するものだった。

エラー反応そのものと、反応結果に対する予期の研究では、情動・動機づけプロセスを無視することはできない。そこで意思決定課題中に呈示したフィードバック信号への情動予期を反映するSPNと、フィードバック信号に誘発されるfeedback-related negativity (FRN)を測定した。その結果、自分の意思で行動選択できるChoice条件では、意思決定できないNoChoice条件に比較して、SPNは大きく発達した。このSPNの振る舞いの差を生じさせた脳領域を同定するため、同じ課題にfMRIを適用した結果、SPN増大の発生源は大脳基底核と島皮質であることが示された(Neuroreport誌で発表)。

### 【平成22年度】

前年度の意思決定課題と同様の課題を用いて行為と結果の随伴性(action-outcome

contingency: AOC)を再度調べた。その結果、fMRI 測定では前帯状皮質(anterior cingulate cortex: ACC)の顕著な賦活を認め、FRN 増大の原因であると推察された。

さらに、脳波と fMRI の同時計測時に眼球運動も記録可能か検証した。眼球運動のモニタは脳波測定では不可欠であり、サッカード眼球運動等の記録は、脳波・fMRI 同時計測研究を推進させることにつながる。実験の結果、サッカード由来の眼電位変動は、fMRI 由来のアーチファクトによって観察困難であったものの、オフラインでノイズ除去することができた。

昼間睡眠がパフォーマンスモニタリングに及ぼす効果を調べた実験では、統制群と比較しても、ERN に条件間の差はなかった。しかしながら、ERN に引き続いて観察されるエラー陽性電位(error positivity: Pe)は、昼寝をさせた条件のほうが低振幅化した。Pe はエラーの評価を反映した電位であることから、昼寝後の睡眠慣性が働いている間は、人はエラーをしても積極的にそれを気にすることはないことが示唆された (journal of Sleep Research 誌で発表)。

#### 【平成 23 年度】

これまでの実験データを論文に纏める作業に従事した。パフォーマンスモニタリング機能に注目した一連の実験の結果、ERN は反応の困難性を反映する一方で、N2 成分から分離できることを、time-frequency analysis と source analysis (電流発生源分析) に供することで明らかにした (Clinical Neurophysiology 誌で報告)。

エラー予防の観点では、エラーを誘発し得る事象よりも以前からパフォーマンスモニタリングが強まっていることが望ましい。従来の研究の多くは、エラー反応時にパフォーマンスモニタリングが駆動することを強調しているが、正反応時に駆動しても良いはずである。ただし、この場合のパフォーマンスモニタリングは ERN に必ずしも反映されるとは限らず、他の ERP 成分に反映される可能性も高い。この点を確認するために、一致タイミング課題を工夫した結果、タイミングコントロールが首尾良くできた条件(低速・TTP 100 ms 条件)では、反応肢と反対側に分布する運動電位(motor potential: MP)が増大することを見出した。この結果は、MP が望ましい反応に関するパフォーマンスモニタリングの指標となり得ることを示唆している (Experimental Brain Research 誌で報告)。

ERN に及ぼす情動の効果を調べた実験では、運動部員に実験参加してもらい、空間ストループ課題のエラー反応時に、彼らのキャプテンの肉声により叱咤激励の言葉をフィードバックした。実験の結果、エラー反応に対して叱りつける条件では、言語フィードバック

クを何も与えない条件に比較して、ERN に振幅低下が生じた。これらの結果は、情動の影響を受けて ERN の発生源が ACC 内で移動することを示唆している (Neuroreport 誌で発表)。

フェイント刺激を挿入した交互反応課題では、Lure 試行で正反応した場合、それに先行して運動関連陽性成分の増強が認められた。つまり、運動反応によって惹起し、前頭中心に分布する陽性電位がルアー刺激提示に先行して大きくなっている場合には、ルアー刺激に対して正しく反応できることが明らかとなった。ルアー刺激でのエラー率は約 50%であったため、エラー出現頻度の関連からはこの結果は説明できない。また、ルアー刺激の 5 試行前では両条件に反応時間の差はなく、ERP 波形にも形態的な差はなかった。これらの結果は反応で誘発される陽性電位が抑制過程を反映している可能性があり、その後のパフォーマンスの成功を予測する指標となることを示している (PlosOne 誌で発表)。

本研究課題の成果がもたらす貢献は以下の通りである。反応時に誘発される運動関連陽性電位を ERN, MP と同時記録することで、ビジランス作業 (管制官のモニタ監視作業等) から、スキルを要する動作課題 (熟練工の作業やスポーツ等) に至るまで、ヒューマンエラーを防止し、パフォーマンスの正確性を維持する方法論の確立に貢献し得ると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Masaki, H., Murphy, T.I., Kamijo, K., Yamazaki, K., & Sommer, W. (2012). Foreshadowing of performance accuracy by event-related potentials: Evidence from a minimal-conflict task. PlosOne, (Accepted for publication). 査読有り
2. Masaki, H., Sommer, W., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2012). Neural mechanisms of timing control in a coincident timing task. Experimental Brain Research, 218, 215–226. 査読有り  
DOI: 10.1007/s00221-012-3052-5
3. Masaki, H., Murphy, T.I., Desjardins, J.A., & Segalowitz, S.J. (2012). The error-related negativity associated with different strength of stimulus-response interference. Clinical Neurophysiology, 123(4), 689-699. 査読有り  
DOI:10.1016/j.clinph.2011.07.043
4. Ogawa, K., Masaki, H., Yamazaki, K., & Sommer, W. (2011). The influence of emotions due to verbal admonishment and encouragement on performance monitoring. NeuroReport, 22(7), 313-318. 査読有り

- DOI: 10.1097/WNR.0b013e328345bf42
5. Masaki, H., Yamazaki K. & Hackley A.S. (2010). Stimulus-preceding negativity is modulated by action-outcome contingency. *NeuroReport*, 21, 277-281. 査読有り  
DOI: 10.1097/WNR.0b013e3283360bc3
6. Asaoka, S., Masaki, H., Ogawa, K., Murphy, T., Fukuda, K., and Yamazaki, K. (2010). Performance monitoring during sleep inertia after a 1-h daytime nap. *Journal of Sleep Research*, 19, 436-443. 査読有り  
DOI: 10.1111/j.1365-2869.2009.00811.x

[学会発表] (計 17 件)

1. Masaki, H. & Hajcak, G. Don't choke! electrocortical measures of performance. Society for Psychophysiological Research 51st Annual Meeting 2011 年 9 月 15 日 Boston
2. Hackley, S.A., Hebert, K., Masaki, H., & Valle-Inclan, V. Expecting something good [Symposium] Society for Psychophysiological Research 51st Annual Meeting 2011 年 9 月 15 日 Boston
3. Xu Lu · 正木宏明 Effects of response sequence complexity and movement duration on motor programming 第 29 回日本生理心理学会 2011 年 5 月 21 日 高知大学
4. 對間直也 · 山崎勝男 · 正木宏明 運動学習中のパフォーマンスモニタリング 第 29 回日本生理心理学会 2011 年 5 月 21 日 高知大学
5. 小川景子 · 正木宏明 · 山崎勝男 2 峰性を示すラムダ反応の機能的意義に関する検討 第 29 回日本生理心理学会 2011 年 5 月 22 日 高知大学
6. ベンソリュウ · 正木宏明 · 山崎勝男 日常生活活動が高齢者の実行機能に及ぼす影響 第 29 回日本生理心理学会 2011 年 5 月 22 日 高知大学
7. 原田 恵 · 正木宏明 · 山崎勝男 反応準備時間と複雑性の脳内情報処理 第 29 回日本生理心理学会 2011 年 5 月 22 日 高知大学
8. 正木宏明 (指定討論者) スポーツにおける運動イメージの研究結果と課題 (学会企画シンポジウム) 日本スポーツ心理学会第 38 回大会 2011 年 10 月 10 日 日本大学文理学部 (東京)
9. Masaki, H., Shibahara, Y., Ogawa, K., Yamazaki, K., & Hackley, S.A. Action-outcome contingency and feedback-related negativity Abstract of the Society for Psychophysiological Research 50th Annual Meeting, Portland, USA P118 2010 年 10 月
10. ベンソリュウ · 小川景子 · 正木宏明 · 山崎勝男 高齢者における身体活動量の違いが反応抑制機能に及ぼす影響 第 28 回日本生理心理学会 2010 年 5 月 15 日 茨城大学
11. 芝原裕介 · 高澤則美 · 山崎勝男 · 正木宏明 参照点からの乖離量が損失評価に及ぼす影響 第 28 回日本生理心理学会 2010 年 5 月 15 日 茨城大学
12. 丸尾祐矢 · 小川景子 · 山崎勝男 · 正木宏明 エラーモニタリングに及ぼす金銭的罰および報酬の影響 第 28 回日本生理心理学会 2010 年 5 月 15 日 茨城大学
13. 小川景子 · 正木宏明 · 平田直樹 · 山崎勝男 · Hackley S.A. 刺激前陰性電位に及ぼす行為と結果の随伴性の影響 日本心理学会 2010 年 9 月 20 日 (大阪)
14. Masaki, H., Yamazaki, K., Hackley, S.A.: "Stimulus-Preceding Negativity and Action-Outcome Contingency" Symposium 2.2 Reward Expectation the Society for Psychophysiological Research 49th Annual Meeting. 2009 年 10 月 22 日 Berlin, Germany
15. Masaki, H., Murphy, T.M., Kamijo, K., Yamazaki, K.: "I Am Positive I Am Going to Be Correct: Correct Responses are Foreshadowed by Increased Positivity in a Low Interference Task" the Society for Psychophysiological Research 49th Annual Meeting. 2009 年 10 月 23 日 Berlin, Germany
16. 本多麻子 · 正木宏明 運動習慣と運動強度が一過性運動時の快感情に及ぼす効果 日本心理学会第 73 回大会発表論文集 p.1370, 2009 年 8 月 28 日
17. 本多麻子 · 正木宏明 運動強度が一過性運動時の感情に及ぼす影響 日本健康心理学会第 22 回大会発表論文集 p. 106, 2009 年 9 月 7 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.pplab.org/~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・准教授  
研究者番号: 80277798

### (2) 研究協力者

山崎 勝男 (YAMAZAKI KATUO)

早稲田大学・名誉教授  
研究者番号: 40084579

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

小川 景子 (OGAWA KEIKO)

広島大学・助教

研究者番号: 70546861

浅岡 章一 (ASAOKA SHOICHI)  
東京医科大学・助教  
研究者番号：80386656

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