

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82632

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700769

研究課題名（和文）エラー行動の評価及び修正と関連する脳内情報処理過程に関する研究

研究課題名（英文）Research on brain activity involved in error detection and correction

研究代表者

飯塚 太郎（IIZUKA TARO）

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・チーム「ニッポン」マルチサポート事業・契約職員

研究者番号：90455444

研究成果の概要（和文）：認知課題を「なるべく速くかつ正確に」行うことを求められる中で、特に反応の遅れのモニタリングと関連する脳活動を明らかにすることを目的に研究を行った。その結果、反応に時間のかかった試行ほど、脳波 θ 帯域（4～7Hz）のパワーが増大することが明らかとなった。また、その大きさは、前の試行のパフォーマンスによっても影響されることが示された。さらに、こうした成分は、課題処理に対する被験者のモチベーションによっても影響される可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated brain activity involved in monitoring of response speed during continuous cognitive task, in which subjects were instructed to respond as fast and correct as possible. First, increase in theta-band EEG power (4～7Hz) was observed in slower responded trials. Second, it was shown that the theta-band power was modulated by the task performance not only in the ongoing trials but also in the previous trials. In addition, it was suggested that the theta-band EEG power might also be affected by motivation in solving trials as fast as possible.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：神経生理学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：脳波、 θ 帯域、反応時間、パフォーマンスモニタリング

1. 研究開始当初の背景

(1) 時々刻々と変化する状況に応じて人間が適切な行動を選択し実行していくためには、行動のエラーを検知し、修正に結びつけるためのモニタリングシステムが必要だと考えられる。実際に、最近の脳研究における実験室的な知見では、選択反応課題の遂行中にエラーや反応時間の遅れが生じた際、前帯状皮質の活動が特異的に高まることが報告されており（Bush G et al, 2000 ほか）、行動の修正が必要な状況を検知する脳のはたらきが存在することが明らかにされてきて

いる。

ところで、Eisdorfer (1965) の分類によれば、行動指標として捉えたとき、エラーは目標に対して反応しない omission error と、非目標に対して反応してしまう commission error とに分けられる。omission error が「認知過程のエラー」である一方で、commission error は「反応過程のエラー」として捉えられ、同じエラーでも両者は性質の異なるものであると言える。

そうした中、最近になって、エラーを検知する脳のはたらきが、このようなエラーの性

質によって、前帯状皮質の中でもそれぞれ異なる部位によって処理される可能性が示唆されてきている (Wang C et al, 2005 ほか)。そのため、omission error と commission error の状況下においても、修正されるべき行動はもとより、その基盤となる脳内情報処理過程もそれぞれ異なりうるということが推測されるが、詳細なメカニズムは明らかにされていないのが現状である。

エラーモニタリングの脳活動に関する研究としては、fMRI や MEG、脳波など、さまざまな脳機能計測手法を用いて研究が進められてきており、その中心にあるのが、脳波事象関連電位によって示されるエラー関連陰性電位 (Error-related negativity: ERN) についての研究である (Dehaene S et al, 1994 ほか)。ERN は、選択反応課題遂行中にエラー反応 (commission error) が生じる際、その反応の直前から直後 200 ミリ秒程度にかけて、前頭正中中部付近 (Fz) から観察される特徴的な陰性電位であり、エラー検知に関連する前帯状皮質の活動を反映したものとされている。この ERN が持つ機能的な役割については様々な議論が為されており、単にエラーの発生という状況をモニターするとしたものがある一方で、連続する認知課題提示においては、その振幅が大きいほど次の試行の反応を慎重に行うようにする (次の試行の反応が遅くなる: post-error slowing) など、エラー後の行動の修正と関係付けられるとした研究もあり、結果は一様ではない (Vidal F et al, 2000)。しかし、いずれにしても、ERN は「反応過程のエラー」である commission error と関連した脳波パターンであり、一方で「認知過程のエラー」である omission error の検知・修正と関連する脳内情報処理過程については、これまでのところほとんど明らかにされてきていない。

(2) さらに、同じように「エラーをした」状況下でも、それに対してどの程度、行動に修正が為されるかは、個人間あるいは個人内でも時として大きく異なり、対応が必ずしも一様にならないことは経験的に明らかだろう。その背景として考えられる大きな要因は、「エラーをした」状況に対する情動的評価における相違であり、人間ならではの高次脳活動のはたらきが、物理的なエラーをモニターし修正する脳内情報処理過程に影響を及ぼしている可能性が考えられる。このように、エラー行動の検知・修正及びそれを支える脳内情報処理過程は、エラーの性質の相違ばかりでなく、エラーが生じた状況に対する情動的評価によっても影響されている可能性があるが、このことに関して、詳細な神経科学的メカニズムは未だ明らかにされていない。

こうした中で、エラーの検知及び行動の修正に、エラー状況に対する情動的評価の大きさが影響する可能性については、臨床的な研究を通じて、いくつか興味深い知見が明らかにされてきている。Ursu S et al. (2003) は、強迫性障害の患者を対象に fMRI を用いた実験を行い、選択反応課題でエラーが生じた際の前帯状皮質の活動について、健常者より有意に大きいことを示した。一方、Kerns J et al. (2005) は、統合失調症の患者を対象に、やはり fMRI を用いた実験を行い、選択反応課題でエラー反応を引き起こした場合でも、前帯状皮質の活動が健常者より有意に低く抑えられたことを報告している。これらは臨床的研究に基づく結果であり、議論を一般化することに注意が必要ではあるが、少なくとも commission error のモニタリングと関連付けられる脳のはたらきが、エラー発生という物理的な状況ばかりでなく情動的評価の影響を受け、次なる行動を変化させる重要な基盤となる可能性を示唆するものと位置づけることができる。

2. 研究の目的

(1) 「認知過程のエラー」である omission error に関して、エラー検知と関連付けられる脳波パターンの特徴を抽出する。さらに、エラー修正に向けて脳内情報処理過程にどのような変化が生じるか、連続する認知課題提示の中で、試行ごとの脳波パターンの変化と反応時間など行動データの変化とを対照させながら明らかにする。

(2) エラー行動の検知・修正及びそれを支える脳内情報処理過程が、モチベーションなどエラー状況に対する情動的評価に従って修飾されうる性質のものであるか検証する。エラー状況下における心拍数や血圧など、情動と関連付けられる生理的応答の変化と試行ごとの脳波パターンとを対照させることにより明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 被験者は同意を得た健常成人 10 名 (26.2±4.9 歳) であった。被験者は、パーソナルコンピュータ画面上に提示された Stroop 課題を 120 問行った。Stroop 課題として Color Word Test を用いた (図 1)。被験者には速く正確に回答することを求め、制限時間は問題提示後 2 秒とした。回答もしくは制限時間到達により問題が消え、0.5 秒後に次の問題が提示された。

脳波は脳波計 EEG-1200 (日本光電) を用い、国際 10-20 法の頭蓋上 19 電極位置から記録した (バンドパスフィルタ: 0.5-120Hz, サンプリング周波数: 200Hz)。記録した脳波の分析前処理として、瞬目の影響を独立成分分

析 (ICA) によって除外した。その EEG 波形に、4~7Hz (θ 帯域) に設定した complex Morlet wavelet をかけ、瞬時パワーを抽出した。瞬時パワー値は、被験者・電極位置ごとに試行全体の平均と標準偏差から Z スコアを求めて標準化した。

本研究では、頭頂部 (Cz) における「回答直前 (回答のタイミングを基準として -500~-100 ミリ秒) の θ 帯域」の平均パワー (以下、Res_ θ) に着目し、試行のパフォーマンスとの関連を比較検討した。脳波の解析においては、反応時間の早い正解試行 (CR_fast) ・遅い正解試行 (CR_slow) ・ omission error (OE) 試行 ・ commission error (CE) 試行の 4 種類に分類し比較した。



図 1: 本研究で使用した Stroop 課題
被験者は、上に提示された文字の色を下の 6 つの選択肢から選び、クリックで回答する。この場合、「あか」を選ぶと正解。

(2) 被験者は同意を得た健常成人 14 名 (29.5 ± 4.9 歳) であった。被験者は、3 分間の座位安静の後、パーソナルコンピュータ画面上に提示された Stroop 課題を 150 問行った。Stroop 課題として Color Word Test を用いた (図 1)。被験者には速く正確に回答することを求め、制限時間は問題提示後 2.5 秒とした。回答もしくは制限時間到達により問題が消え、0.5 秒後に次の問題が提示された。被験者には、平均反応時間及び正解率によってパフォーマンスを評価し、成績優秀者には報酬が与えられると予め教示した。

脳波は脳波計 EEG-1200 (日本光電) を用い、国際 10-20 法の頭蓋上 19 電極位置から記録した (バンドパスフィルタ: 0.5-120Hz, サンプリング周波数: 200Hz)。記録した脳波の分析前処理として、瞬目の影響を独立成分分析 (ICA) によって除外した。その EEG 波形に、4~7Hz (θ 帯域) に設定した complex Morlet wavelet をかけ、瞬時パワーを抽出した。瞬時パワー値は、被験者・電極位置ごとに試行全体の平均と標準偏差から Z スコアを求めて標準化した。

本研究においても、頭頂部 (Cz) における「回答直前 (回答のタイミングを基準として -500~-100 ミリ秒) の θ 帯域」の平均パワー (Res_ θ) に着目し、試行のパフォーマンスとの関連を比較検討した。脳波の解析においては、反応時間の早い正解試行 (CR_fast) ・遅い正解試行 (CR_slow) ・ omission error (OE) 試行 ・ commission error (CE) 試行の 4 種類に分類し比較した。

スとの関連を比較検討した。脳波の解析においては、反応時間の早い正解試行

(CR_fast) ・遅い正解試行 (CR_slow) ・ OE 試行 ・ CE 試行の 4 種類に分類し比較した。

3 分間の安静時と課題遂行時を通じて、心拍数及び血圧を運動負荷用血圧監視装置 STBP-780 (日本コーリン) で記録した。記録は 1 分ごとに行い、安静時と課題遂行時の平均心拍数、平均収縮期血圧、平均拡張期血圧をそれぞれ求めた。

4. 研究成果

(1) 課題のパフォーマンスは、正解試行における反応時間が 1,232 ミリ秒で、正解率は 88.9%、omission error が 5.9%、commission error が 5.2% であった。

Res_ θ は回答に時間を要した試行ほど大きくなり、CR_fast に対して omission error で有意に大きい値をとることが示された (図 2: $P < 0.01$)。

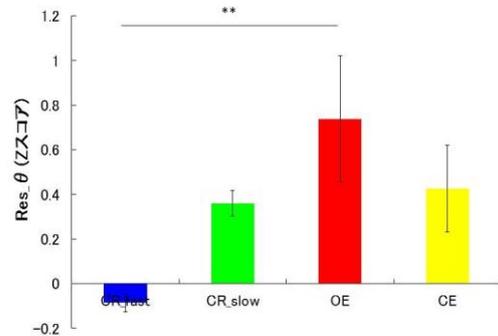


図 2: 課題のパフォーマンスとその試行における Res_ θ との関係 (**: $P < 0.01$)

次に、課題のパフォーマンスが次の試行の Res_ θ に及ぼす影響についても検証を行った。すると、次の試行自体は全て正解で反応時間にも有意差がなかったにも関わらず、Res_ θ は CR_fast 直後の試行で最大、omission error 直後の試行で最小となり、両者の間に有意差が見られた (図 3: $P < 0.01$)。

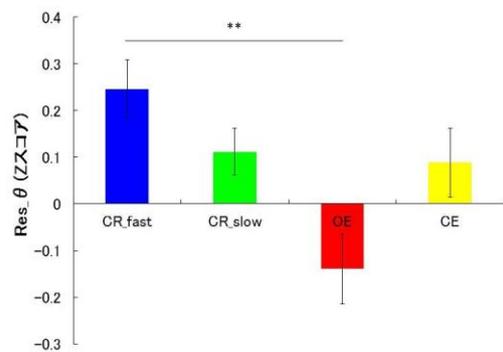


図 3: 課題のパフォーマンスと次の試行における Res_ θ との関係 (**: $P < 0.01$)

これらの結果から、頭頂部から記録される回答直前の θ 帯域の脳波パワーの大きさは omission error 時に最大となり、基本的には認知課題における反応の遅れに伴って増加する一方で、直前の試行のパフォーマンスによっても影響されることが明らかとなった。課題のパフォーマンスモニタリングと関連する脳活動が直前の試行のパフォーマンスによっても影響される可能性が示されたことは、試行と試行のつながりの中で、行動の評価と修正とを結びつける脳のはたらきについて明らかにしていくうえで重要な結果であると考えられる。

(2) 課題のパフォーマンスは、正解試行における反応時間が 1,271 ミリ秒で、正解率は 95.6%、omission error が 1.1%、commission error が 3.3%であった。制限時間が 2.5 秒 (2,500 ミリ秒) であったのに対し、全被験者の正解試行における平均反応時間が 1,271 ミリ秒であったことから、被験者は比較的余裕を持って課題を遂行できていたと考えられる。そのため、エラーに関しては omission error、commission error とともに非常に数が少なかった。そこで、ここでは omission error や commission error といった明確な「エラー」を除外し、CR_fast と CR_slow との比較の中で、反応に時間がかかってしまうことがそれぞれの被験者の Res_ θ に及ぼす影響について焦点を当てていくこととした。

すると、Res_ θ は、CR_fast に対して CR_slow で有意に大きい値をとることが示された (図 4 : $P < 0.01$)。このことから、Res_ θ は、パフォーマンスが正解であるかエラーであるかを問わず、課題の処理に対する反応の遅れのモニタリングとも関連づけられることが改めて示された。

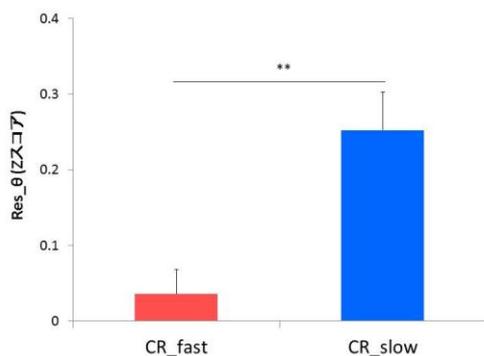


図 4 ; CR_fast と CR_slow における Res_ θ の比較 (** : $P < 0.01$)

次に、被験者ごとに CR_fast と CR_slow における Res_ θ の差分 (Δ Res_ θ とする) を求めたところ、 Δ Res_ θ は課題の平均反応時間との間に有意な負の相関関係をもつことが示された (図 5 : $P < 0.05$)。

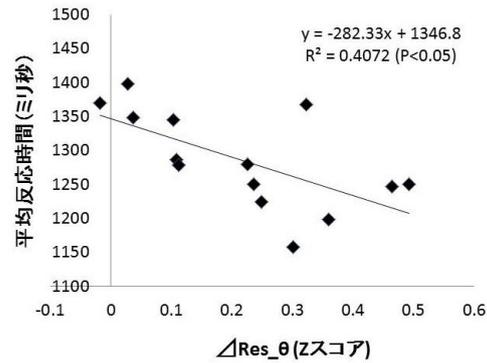


図 5 : Δ Res_ θ と平均反応時間との関係 ($P < 0.05$)

この結果から、Res_ θ は反応が遅れることによって一様に増大するのではなく、全体として反応時間を短くしようという課題のパフォーマンス向上に対するモチベーションの相違によっても影響される可能性が示唆された。しかし今回、心拍数と収縮期血圧、拡張期血圧に関しては、安静時に対して課題遂行中においてそれぞれ有意に数値が上昇したものの (いずれも $P < 0.01$)、 Δ Res_ θ との間に有意な相関関係はみられなかった。

今後、引き続き検証が必要であるものの、本研究の結果から、認知課題遂行中、頭頂部から観察される脳波 θ 帯域の活動は、omission error や反応の遅れという物理的なパフォーマンスのモニタリングと関係することに留まらず、モチベーションなど情動の評価の影響を受けながら次なる行動を変化させる重要な基盤となる可能性があることが示され、今後の研究に示唆を与える重要な結果が得られたと考えられる。

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯塚 太郎 (IIZUKA TARO)

独立行政法人日本スポーツ振興センター

国立スポーツ科学センター・チーム「ニッポン」

マルチサポート事業・契約職員

研究者番号 : 90455444