

# エラー回避のための認知制御に関する研究の展望

武澤 友広・宮谷 真人

(2003年9月30日受理)

A review of researches on the error-related and cognitive control processes

Tomohiro Takezawa and Makoto Miyatani

This article presents a brief review of the researches concerning the control system of behavior that consists of the error-related process and cognitive control. First, some event-related potential (ERP) studies were examined that dealt with the error detection, which is reflected in error-related negativity (ERN), and the subsequent response delay, which is one of cognitive controls for avoiding and/or correcting errors. Second, we investigated the evidences that demonstrate that the conflict detection process is mediated by the activation of anterior cingulate cortex (ACC). ERN is also supposed to originate in ACC, which suggests that both the conflict detection and the error detection mechanisms share the common brain processes. At last, we discuss the role of the affect for the behavior control system based on the ERP and functional imaging studies of the affective influences on conflict detection and cognitive control processes.

Key words: cognitive control, error detection process, conflict detection process, negative affect, anterior cingulate cortex

キーワード：認知制御，エラー検出処理，競合検出処理，ネガティブ情動，前部帯状皮質

## 1. はじめに

われわれは日常生活において、さまざまな目標志向的活動を行っているが、目標にそぐわない、不適切な行動を犯してしまうこともしばしばである。しかし、誤った行動を犯したとしても、自らの誤った行動を認識し、行動を修正しようとする働きが備わっているからこそ、人間は環境に対して高度に適応的にふるまうことができる。このような行動修正に関わる心的処理は総称して“認知制御”と呼ばれており、現在の目標を忘れないように保持しておくという作動記憶や、現在の目標に関係する対象の入力だけを促進する選択的注意など、かなり多様な処理が含まれている (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001)。本論文では、その中でも反応遅延という認知制御に焦点を当てる。まず、エラーそのものやエラーのリスクを検出する処理との関係を指摘した研究を概観し、エラー検出処理と認知制御から構成される行動制御シス

テムのモデルを紹介する。その上で、エラーに伴って生じるネガティブな情動が行動制御システムに与える影響を検討した研究について取り上げ、行動制御システムにおける情動の役割について論じる。

## 2. エラー検出処理

エラーを犯した後の行動はエラーを犯す前の行動と比べると慎重になる、という経験からもわかるように、エラーの認識は反応の出力時間を遅延させる。このことを最初に実験的に実証したのが、Rabbitt (1966) である。彼が用いた課題は、被験者の前に水平に設置された10個のランプのうちのどれか1つが光ったら、10個のボタンのうち、光ったランプと対応した位置にあるボタンを押す、という選択反応課題であった。Rabbitt (1966) は被験者が間違ったボタンを選択した直後に正しいボタンを選択し直した場合、その直後の試行の反応時間は、前の試行においてエラーを犯し

ていない場合の反応時間と比べて遅くなることを報告している。この結果は、刺激の入力から反応出力に至るまでの時間を通常より多めに確保するという処理が、エラー検出後に行われる行動修正に関する処理の1つとして実行されたことを示唆している。

それでは、なぜ、このような反応を遅延させる処理が行動修正につながるのであろうか。Rabbitt (1966) は正反応試行の反応時間とエラー試行の反応時間の比較も行っており、後者の反応時間が前者よりも速いことから、エラーは刺激に関する情報処理を十分に行う前に反応を出力したためにおこると解釈している。つまり、エラー試行の後の反応遅延は、刺激に関する情報処理を十分に行った後に反応を出力することで、早尚反応によるエラーを防ぐための方略的な行動修正であると考えられる。Laming (1979) は、単純な弁別課題においてもエラー試行の後の反応遅延が観察されたことに加え、エラー試行に続く試行におけるエラー率は前試行が正反応試行である場合よりも少ないことを報告している。したがって、反応遅延は実際に行動の正確さを向上させることに寄与しており、行動修正のために行われる処理と考える妥当性は高いであろう。

エラーを認識するエラー検出処理と反応遅延という認知制御の結びつきは、事象関連電位 (event-related potential: ERP) を指標とした一連の研究によっても支持されている。ERP とは、感覚・知覚・認知などの脳の情報処理に関係する神経集団の電氣的活動を頭皮上から記録したものである。ERP の中でも、エラー処理に関係した成分として近年、精力的に研究されているのが、エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) である (Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990)。ERN は“H”が呈示されたら左、“S”なら右のボタンを押すといった選択反応課題において、被験者が誤った反応を選択した際に、反応後 70 - 150ms をピークとして頭皮上中心部優勢に出現する陰性電位である。頭皮上の電位分布から電位の発生源を推定する等価電流双極子解析の結果から、その発生源は前部帯状皮質にあると推測されている (Dehane, Posner, & Tucker, 1994; Holroyd, Dien, & Coles, 1998; Miltner, Braun, & Coles, 1997; Ullsperger & Cramon, 2001)。

また、ERN がエラー処理に介在する複数の下位過程のうち、どれを反映したものなのかについても検討が進んでいる。Coles, Scheffers, & Holroyd (2001) が提案したエラー関連処理のモデルによると、エラー関連処理は、正反応に関する表象と実際に行った反応の表象との比較照合によるエラー検出処理と、その後に行われる行動修正処理の2つの処理過程に区別される。前者のエラー検出処理において比較される2つの

表象のうち、正反応に関する表象は、呈示された刺激を同定し、“H”が呈示されたので左」というように適切な反応を特定することで形成される。一方、実際の反応の表象の形成方法については、末梢の運動出力を知覚する方法と、運動の命令が効果器に送られると同時に中枢神経に送られる遠心性のコピー (cf. Angel, 1976) を表象とする方法の2つが考えられる。しかし、ERN は反応開始から 30ms 後には出現するが、運動開始のシグナルである筋電位 (electromyogram) の出現から実際のボタン押しまでだけでも約 50ms かかることがわかっているため (Jeannerod, 1988)、前者の方法を採用しているとは考えにくく、後者の方法を採用している可能性が高い。

このような2つの反応表象間の不一致を検出する処理をERNが反映しているとすれば、表象間の不一致の程度に応じてERNも変化することが予想される。Bernstein, Scheffers, & Coles (1995) は、反応表象間の違いが大きいほど、ERNの振幅も大きくなることを報告している。彼らは、例えば右手の人差し指で反応すべき試行について、左手の中指で反応したエラーと右手の中指で反応したエラーを区別してERNを比較した。前者のエラーは反応する手と指の両方が間違っているのに対し、後者のエラーは指しか間違っていないため、反応表象間の不一致の程度は前者のほうが大きい。この不一致の程度を反映して、前者の方が大きなERN振幅が観察された。逆に、不一致を検出することができない事態、つまり、照合に必要な反応表象が出揃わない場合には、ERNは出現しない。Scheffers & Coles (2000) は、刺激とそれを呈示する背景との間のコントラストを減らして、刺激の同定を困難にすることで、エラー検出に必要な正反応表象の形成を妨害した事態では、ERNの振幅が低下することを報告している。また、反応表象間の不一致の程度に影響を受けるのは振幅だけでなく、ピーク潜時も影響を受けることが報告されている (Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000)。以上の研究結果から、ERNは現在行っている行動が目標に適した行動かどうかをチェックするエラー検出処理を反映していると考えられている。

ERNを指標としたエラー検出処理の研究は、エラー検出処理とその後に行われる認知制御との関係も明らかになりつつある。Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin (1993) はERNの振幅の大きさと、そのエラー試行後の反応時間との関係を調べている。その結果は、ERNの振幅が大きいほど、その後続の試行における正反応時間は長く、誤反応率も低下するというものであった。この結果は、エラー試行の直後の試行におい

て実行される反応遅延という認知制御は、ERN に反映される反応表象間の不一致の程度に影響を受けることを示唆している。同様の結果は、Sheffers, Coles, Bernstein, Gehring, & Donchin (1996) でも観察されており、これらの結果は、エラー検出処理において割り出される目標からの行動のズレが大きいほど、その後に行われる認知制御が大幅になされるという行動制御のメカニズムの存在を推察させる。そしてERNは、現在必要とされている認知制御の程度を伝える信号として働いている可能性が考えられる。

### 3. 競合検出処理

エラー関連処理から推察される行動制御システムの起動には必ずしもエラーの生起を必要とせず、エラーがおきそうな状況を認識するだけでも起動することが示唆されている。例えば、Gratton, Coles, & Donchin (1992) の、フランカー課題を用いた実験は、エラーの生起以外に反応遅延のきっかけが存在することを示唆している。フランカー課題とは、複数の文字からなる文字列 (HHHHH や HSHH) の中央の標的文字に対して手の反応を仕分ける (例えば、標的文字がHなら左手で、Sなら右手で反応する) 課題である。一般に、不一致刺激 (HSHH) の試行では反応競合が起きるため、一致刺激 (HHHHH) の試行よりも反応時間が遅く、誤反応率が高い。反応競合とは、出力をめぐる複数の運動表象が同時に活性化する状況のことである。実際に、不一致試行では正反応となる手と誤反応となる手の両方から筋運動の準備を示す筋電位が観察される (Coles, Gratton, Bashore, Eriksen, & Donchin, 1985)。Gratton et al. (1992) は、一致試行を直前の試行が一致試行のものと不一致試行のものに区別して分析したところ、後者の方が反応時間が長いことを報告した。つまり、前試行で反応競合が生じた場合は、後続の試行において反応遅延が観察された。この結果は、反応競合を検出する処理がきっかけとなって、行動修正が行われる可能性を示している。また、Gratton et al. (1992) は同時に、不一致試行の反応時間は前試行が不一致試行である場合の方が短くなり、誤反応率も低くなることを報告している。この結果は、反応競合の検出がきっかけとなって、標的文字に注意を焦点化することで、その入力を促進するような認知制御が行われた結果、後続試行における反応競合が起きにくくなったことを示している。したがって、もし反応競合の検出処理に関連する神経活動を観察できれば、反応競合が軽減する不一致試行の後の不一致試行よりも、反応競合が軽減することのない一致

試行の後の不一致試行において、より強い活動を見出すことができるはずである。Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter, & Cohen (1999) は実際に、機能的磁気共鳴映像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) を用いて、予測通りの賦活が前部帯状皮質で観察されたことを報告している。

このような反応競合の程度に応じた前部帯状皮質の活性化は、反応競合の軽減に寄与する注意の焦点化や反応遅延といった認知制御に関する処理を反映するわけではない。MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter (2000) は前頭前野背外側部は課題目標の活性化に基づく注意の焦点化という認知制御に、前部帯状皮質は反応競合が生起しているかどうかを評価する過程に、それぞれ関与しているという仮説を立て、ストループ課題を用いて2つの制御過程を分離して示すことを試みた。ストループ課題とは、刺激として呈示される着色された色名単語に対し、単語に着けられた色を報告する色呼称課題か、単語をそのまま読み上げる単語呼称課題のいずれかを行う課題である。例えば、赤色で書かれた「あお」という色名単語 (不一致刺激) に対して、色呼称課題を行おうとすると、われわれは普段から単語を読むという行動に慣れているために、「あか」と文字を読む反応を出力しそうになり、色を呼称する反応との間で競合がおきる。それを反映して色呼称に要する反応時間は遅くなる (ストループ効果) が、反応の競合は、課題目標に注意を向けることで、解消される。

反応競合が生起する通常の試行での脳活動を観察するだけでは、反応競合に関する処理にかかわる脳活動と反応競合の解消に寄与する認知制御にかかわる脳部位を分離して評価することはできない。そこで、MacDonald et al. (2000) は各試行を始める前に「単語を読んでください」または「色を言ってください」と教示してから刺激を呈示することで、課題目標に対する注意の焦点化という過程を反応競合が生起する前に引き起こし、2つの処理過程の分離を試みた。その結果、教示の間に活性化した部位は左前頭前野背外側部であり、しかもより注意を必要とする色呼称課題の教示を行った場合の方がより強い賦活が観察された。また、左前頭前野背外側部の賦活量と反応競合の大きさを反映するストループ効果の大きさととの相関は-0.63であった。これらの結果から、前頭前野背外側部が反応競合を軽減する認知制御に関与しているとする仮説は支持された。一方の前部帯状皮質では、教示に関連する賦活が観察されない代わりに、反応競合に関する賦活が観察された。つまり、反応競合が生起する色呼称課題における不一致刺激の試行において、右前部帯

状皮質の賦活が確認された。この賦活量とストループ効果との相関は0.38であり、反応競合の大きさと比例関係にあった。もし、前部帯状皮質が認知制御と関係しているのなら、負の相関が得られたはずであり、むしろこの部位は反応競合の大きさを評価する処理に関与していることが支持された。

反応競合の大きさを評価に関与する前部帯状皮質は、前節で紹介したようにエラー検出処理を反映するERNの発生源でもある。この共通点に着目したCarter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen (1998) はエラー試行において観察される前部帯状皮質の活動はエラー検出処理ではなく、競合検出処理を反映しているのではないかと提案している。この仮説は、いくつかのERP研究によって支持されている。van Veen & Carter (2002) はフランカー課題の不一致試行において、刺激呈示後340-380msにピークをもち、前頭部から中央部にかけて出現する陰性成分が観察されたことを報告している。この成分は刺激呈示後200ms後に出現することからN200、もしくは2番目に出現する陰性電位であることからN2と呼ばれている(Heil, Osman, Wiegmann, Rolke, & Hennighausen, 2000; Kopp, Rist, & Mattler, 1996; Nieuwenhuis & Yeung, 2003; van Veen & Carter, 2002)。N200は反応競合が生起する不一致試行でしか出現しないため、競合検出処理を反映していると推測されるが、反応競合の解消の際に行われる誤反応準備の抑制処理を反映している可能性も残されている。Nieuwenhuis & Yeung (2003) はGo/No-go課題を用いて、N200が反応抑制処理と競合検出処理のいずれの処理を反映しているのかを検討している。Go/No-go課題では、あらかじめ定められたNo-go刺激が呈示された試行でのみ反応ボタンを押さず、それ以外の刺激(Go刺激)に対しては反応ボタンを押すことが要求される。一般に、Go/No-go課題ではGo試行の出現率はNo-go試行と比べるとずっと高いため、反応を出力するという行動傾向が強められることになる。逆に、No-go試行の出現率をGo試行よりもずっと高くすると、反応を抑制する行動傾向が強められる(Braver, Barch, Gray, Molfese, & Snyder, 2001)。このような事態でのGo試行では、多くNo-go試行を経験しているためにあらかじめ活性化された反応抑制に関する表象と同時に、反応出力に関する表象が活性化することで競合が生起する。ここで、反応抑制に関する表象を想定する妥当性については直感に反するかもしれない。なぜなら、反応抑制は反応出力の表象の活性化の減衰として表現することも可能だからである。しかし、サルを被験体とした研究から、反応を抑制する試行において特異的に賦活

する脳部位が観察されていることから(Stuphorn, Taylor, & Schall, 2000)、反応出力に関する表象とは別に反応抑制に関する表象を想定する妥当性はあるだろう。反応抑制に関する表象はNo-go試行を多く経験するほど高く活性化するため、Go試行において生起する競合は1ブロックにおいてNo-go試行の占める割合が多いほど大きいと考えられる。Nieuwenhuis & Yeung (2003) は1ブロック内におけるNo-go刺激の出現率が異なる3つの条件を設定した。もし、Go試行において出現するN200が競合の大きさを評価する処理を反映する成分ならば、No-go試行の出現率が高いブロックほど、その振幅も大きくなるはずである。そうではなく、N200が反応抑制処理を反映するならば、そもそも反応抑制が必要とされないGo試行ではN200が出現しないはずである。結果は、Go試行で出現するN200は競合の大きいブロックほど振幅が大きく、N200が、生起している競合の大きさを評価する処理を反映していることを示すものであった。

興味深いことに、競合検出処理を反映するN200の発生源はERNの発生源と同じであることが、等価電流双極子解析の結果から指摘されている(Nieuwenhuis & Yeung, 2003; van Veen & Carter, 2002)。この共通点から、2つの電位は同じ競合検出処理を反映している可能性が考えられる。Gehring & Fencsik (2001) は四肢選択反応課題を用いて、ERNが競合検出処理を反映している可能性について検討している。彼らは、右手で反応すべき試行において、左手で反応したエラー試行におけるERNと、左足で反応したエラー試行におけるERNを比較した。もし、ERNがエラー検出処理を反映しているとすれば、正反応に関する表象と実際に行った反応に関する表象との不一致が大きい後者のERNの方が大きくなる。そうではなく、競合検出処理を反映しているならば、前者のERNの方が大きくなる。なぜなら、同時に活性化する反応表象の類似性が高いほど、競合は大きいと考えられるからである。結果は、競合検出仮説を支持するものであった。この結果は前節で紹介したBernstein et al. (1995)の結果と一見、矛盾しており、ERNが競合検出を反映する成分であるかどうかについては、さらに検討を加える必要がある。ただし、Bernstein et al. (1995)において反応の選択肢として用いられた人差し指と中指は、一方の指が屈折すると隣接するもう一方の指の筋運動が緩和する関係にあるため(Ohtsuki, 1981)、反応競合が生起しにくかった可能性がある。

Gehring & Fencsik (2001) が主張するように、ERNがN200と同様に競合検出処理を反映しているとすれば、前節で紹介した行動制御システムは、エラー検出

というよりもむしろ競合検出処理によって起動すると考えることもできる。これまでERNが観察されてきたエラー試行についても、複数の反応表象が活性化する事態であることを考えれば、一種の競合事態と捉えることが可能だからである。ERNやN200は情報処理中に生じた競合に対する前部帯状皮質の反応を反映しているが、賦活の程度が競合の大きさに応じて変化することを考えると、前部帯状皮質は競合の有無に関する情報だけでなく、競合の大きさに関する情報も同時に伝達していることが推察される。それでは、なぜ競合の大きさを伝達する必要があるのだろうか。競合が大きい状況とは、例えば、ストループ課題でいえば、色呼称課題における不一致試行のように、習慣化した行動を克服する必要がある状況などである。習慣化した行動がエラーとなる状況では、エラーを犯すリスクが高く、エラーを回避するのに通常よりも注意を必要とする。したがって、エラーが生起する可能性が高い状況、すなわち大きな競合が生起している状況では、大幅な認知制御が必要となる。前部帯状皮質は競合の大きさを評価し、現在、どの程度の認知制御が必要とされているかという情報を、前頭前野背外側部をはじめとする認知制御を担当する脳部位に伝えていくと考えられる。

#### 4. 行動制御におけるネガティブ情動の役割

エラーのリスクを評価する機構（競合検出処理）とエラーのリスクを低減させる機構（認知制御処理）からなる行動制御システムには、情動が重要な役割を演じていることが示唆されている。Kiehl, Liddle, & Hopfinger (2000) は、強い反応競合がある場合、反応の正誤にかかわらず、前部帯状皮質の背側部が活性化するのに対し、エラー試行では前部帯状皮質の腹側部が特異的に活性化することを報告している。この結果は、前部帯状皮質の背側部と腹側部はそれぞれ異なる機能を持つことを示唆する。それは、それぞれの領域に接続している神経連絡の違いを見ても明らかである。背側部と接続しているのは、補足運動野、運動前野、頭頂葉、前頭前野背外側部といった認知制御処理と関わり深い脳領域である。一方の腹側部は、扁桃核、中心灰白質、眼窩野、島皮質といった情動行動と関与する脳領域と連絡している。このような神経連絡の違いから、背側部は反応競合処理に関与し、腹側部はエラーによって喚起されるネガティブ情動の処理に関与していることが推測される。

Bush, Luu, & Posner (2000) は、64の脳画像研究の

結果をメタ分析し、背側部は反応抑制、選択的注意、作動記憶といった認知制御を必要とする課題で賦活し、腹側部は情動が喚起されるような実験事態において賦活が認められると報告している。さらに、背側部と腹側部との関係について興味深い事実を指摘している。それは、背側部が活動するような認知課題を遂行している間は腹側部の賦活の低下が、腹側部が活動する情動情報の処理中には背側部の賦活の低下が認められることである。すなわち、この2つの領域間の関係は、一方の領域の賦活は他方の領域の賦活の低下を引き起こすという「相互抑制関係」である。この「相互抑制関係」から、情動の処理を行うことで腹側部が賦活した状態では、競合検出処理を担当する背側部の活動が低下するために、行動制御のシステムがうまく働かなくなるが予想される。

Luu, Collins, & Tucker (2000) はネガティブ情動 (negative affect: NA) に対する感受性に関する人格特性を抽出する質問紙を用いて、被験者群をNA感受性高群と低群に分け、エラー試行におけるERNとその後の試行において起こる反応遅延について群間で比較を試みた。結果は、実験の最初の方のブロックでは、NA感受性高群の方がERNの振幅が大きかったものの、NA感受性高群のERNの振幅はブロックが進行するにつれて減少していった。一方のNA感受性低群のERNの振幅は、ブロックの進行によって変化せず、一定であった。また、反応遅延についても、NA感受性高群ではブロックが進行するにつれて反応遅延の程度が減少したが、NA感受性低群では全ブロックにわたって一定であった。これらの結果を解釈するにあたり、NA感受性高群はエラーに伴うネガティブ情動の感受性が高いことを考慮する必要がある。実際、NA感受性高群は課題終了時に行った内省報告において、課題成績に対する自己評価が低かった。したがって、NA感受性高群はエラーによってネガティブ情動が喚起されやすく、ブロックが進行するにつれ、情動情報の処理を担当する前部帯状皮質の腹側部の活動が高まり、そのことがエラー検出処理を担当する背側部の活動低下を招いたと推察される。ブロックの進行に伴うERN振幅の減少、そして反応遅延の減少は、背側部の活動低下による行動制御システムの機能低下を反映していると考えられる。

Luu et al. (2000) が示したように、ネガティブ情動に対する過剰な処理は行動制御システムの働きを阻害するが、逆にネガティブ情動に対する処理が行われなくなっても、行動制御システムは正常に働かなくなる。Dikman & Allen (2000) は精神病質の傾向が高い被験者群と低い被験者群を質問紙によって分け、ERN

振幅を比較した。精神病質の傾向を持つ被験者は、エラーに対して電気ショックが与えられるような罰回避学習場面において学習困難を示すことから、エラーに伴うネガティブ情動に対する感受性が低いと考えられている (Schmuck, 1970)。結果は、正反応に対しては報酬が与えられるが、エラーに対して罰が与えられない課題における ERN 振幅は両群で差がなかったが、エラーに対して罰が与えられる課題における ERN 振幅は精神病質の傾向が高い被験者群の方が小さかった。この結果は、エラーに伴うネガティブ情動がある程度は処理されないと、行動制御システムはうまく機能しない可能性を示唆している。

以上のことから、エラーに伴うネガティブな情動が適度に処理されることが行動制御をうまく機能させる鍵であることがわかる。ネガティブ情動はゴールの実現が妨げられていることを知らせるフィードバック情報であり、不快を回避すべく、行動方略の修正を動機付ける機能がある (佐藤・大平, 2001)。前節で紹介した行動制御のシステムでは、認知制御のきっかけとなったのは、競合検出処理によって評価されたエラーのリスクの大きさに関する情報の伝達であった。この情報がネガティブ情動の大きさに変換され、認知制御を動機づける警告信号として機能しているのかもしれない。

## 5. 結語と今後の課題

われわれの日常生活は多くの目標志向的活動で構成されており、行動が目標から外れた時、もしくは外れそうな時には、行動を修正する仕組みが働くことになる。本稿では、行動修正を動機づける処理としてのエラー検出処理と競合検出処理を紹介し、前者は後者と同じ処理機構を用いているという考えを示した。つまり、現在の行動が目標からどれくらいズレがあるかについては、現在の情報処理において生起している競合の大きさに関する情報によって割り出すことができ、エラーの後に行われる行動修正もそのズレに関する情報を基にして行われるという可能性を指摘した。さらに、行動のズレに関する情報はエラーを犯すリスクに関する情報と考えることができ、このエラーのリスクに関する情報の処理がネガティブな情動を喚起し、それが行動修正を動機づける警告信号として機能するのではないかと論じた。

ただし、エラー検出処理を反映するとされてきた ERN を、競合検出処理を反映する電位として捉え直すことに対する反論もある (Holroyd & Coles, 2002)。例えば、ERN は反応競合が存在しない課題でも出現

することが報告されている (Miltner et al., 1997; Luu, Flaisch, & Tucker, 2000)。しかし、通常のエラー試行で観察される ERN は、前部帯状皮質の背側部が担当する競合検出処理に関する電気活動と、腹側部が担当するエラーに伴うネガティブ情報の処理に関する電気活動の両方の電気活動を反映したものであるということが証明できれば、たとえ反応競合が存在しない事態であっても、情動情報の処理のみを反映した ERN が出現しうることになり、ERN が競合検出処理を反映するという証明に不都合はなくなる。

本稿で紹介したように、エラー検出処理と反応遅延との関係は検討が進んでいるのに対し、競合検出処理と認知制御との関係については、最近、着手されたばかりである (Milham, Banich, & Barad, 2003; Takezawa & Miyatani, 2003)。また、競合検出処理自体に関しても、まだわかっていないことが多い。例えば、検出される競合の種類は反応競合だけに限られるのかどうかという問題もそのひとつである。Takezawa & Miyatani (2003) は刺激の知覚段階での競合が生じた試行の後の試行において反応遅延が観察されることを報告している。このように、複数の処理段階において競合が検出されるとしたら、検出する競合の種類によって喚起される認知制御に違いはあるのだろうか。また、複数の処理段階で競合が生じた場合、その競合の大きさは処理段階ごとに評価されるのか、それとも総合的に評価されるのだろうか。これらの性質を明らかにすることで、競合検出処理を基礎とした行動制御システムの理解が進むであろう。これらの問題を検討する際に、ERN や N200 のような ERP 測度が有効なツールになると考えられる。

情動と行動制御システムとの関係についても、まだ研究が始められたばかりである。本稿で紹介したのはネガティブ情動と行動制御システムとの関係に限られており、ポジティブ情動の処理が行動制御システムに与える影響についてはまだ検討されていない。ポジティブ情動は推論や意思決定を促進する効果があることが報告されている (Ashby, Isen, & Turken, 1999)。ポジティブ情動は報酬への接近を動機づけるため、慎重な行動制御の働きを緩める可能性が考えられる。また、エラー検出処理とネガティブ情動との関係はいくつかの研究で検討されているが、競合検出処理というエラーのリスク評価によって情動情報の処理が引き起こされるかどうかについては全く検討されていない。今後、競合検出処理と情動情報の処理との関わりを検討していくことで、行動制御システムにおける情動の役割が明らかになることが期待される。

## 【引用文献】

- Angel, R. W. (1976). Efference copy in the control of movement. *Neurology*, 26, 1164-1168.
- Ashby, F. G., Isen, A. M., & Turken, A. U. (1999). A neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition. *Psychological Review*, 106, 529-550.
- Bernstein, P. S., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. (1995). "Where did I go wrong?" A psychophysiological analysis of error detection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 1312-1322.
- Botvinick, M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624-652.
- Botvinick, M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402, 179-181.
- Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: Effect of frequency, inhibition, and errors. *Cerebral Cortex*, 11, 825-836.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 215-222.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-749.
- Coles, M. G. H., Gratton, G., Bashore, T. R., Eriksen, C. W., & Donchin, E. (1985). A psychophysiological investigation of continuous flow model of human information processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 529-553.
- Coles, M. G. H., Scheffers, M. K., & Holroyd, C. B. (2001). Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biological Psychology*, 56, 173-189.
- Dehane, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.
- Dikman, Z. V., & Allen, J. J. B. (2000). Error monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37, 43-54.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: A tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1990). The error-related negativity: An event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology*, 27, S43.
- Gehring, W. J., & Fencsik, D. E. (2001). Functions of the medial frontal cortex in the processing of conflict and errors. *The Journal of Neuroscience*, 21, 9430-9437.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121, 480-506.
- Heil, M., Osman, A., Wiegelmann, J., Rolke, B., & Hennighausen, E. (2000). N200 in the Eriksen-task: Inhibitory executive processes? *Journal of Psychophysiology*, 14, 218-225.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. H. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109, 679-709.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: Evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, 242, 65-68.
- Jeannerod, M. (1988). *The neural and behavioral organization of goal-directed movements*. Oxford: Clarendon.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., & Hopfinger, J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 37, 216-223.
- Kopp, B., Rist, F., & Mattler, U. (1996). N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, 33, 282-294.

- Laming, D. R. J. (1979). Choice reaction performance following error. *Acta Psychologica*, 43, 199-224.
- Luu, P., Collins, P., & Tucker, D. M. (2000). Mood, personality, and self-monitoring: Negative affect and emotionality in relation to frontal lobe mechanisms of error monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129, 43-60.
- Luu, P., Flaisch, T., & Tucker, D. M. (2000). Medial frontal cortex in action monitoring. *Journal of Neuroscience*, 20, 464-469.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal cortex and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- Milham, M. P., Banich, M. T. & Barad, V. (2003). Competition for priority in processing increases prefrontal cortex's involvement in top-down control: An event-related fMRI study of the stroop task. *Cognitive Brain Research*, 17, 212-222.
- Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. (1997). Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a "generic" neural system for error detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 788-798.
- Nieuwenhuis, S., & Yeung, N. (2003). Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task: Effects of response conflict and trial type frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3, 17-26.
- Ohtsuki, T. (1981). Inhibition of individual fingers during grip strength exertion. *Ergonomics*, 24, 21-36.
- Rabbitt, P. M. A. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 264-272.
- 佐藤徳・大平英樹 (2001). エラー, コンフリクト, 前部帯状皮質—行動制御を担う並列的脳内システム—心理学評論, 44, 398-421.
- Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. (2000). Performance monitoring in a confusing world: Error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 141-151.
- Scheffers, M. K., Coles, M. G. H., Bernstein, P. S., Gehring, W. J., & Donchin, E. (1996). Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology*, 33, 42-53.
- Schmuck, F. J. (1970). Punishment, arousal, and avoidance learning in sociopaths. *Journal of Abnormal Psychology*, 76, 325-335.
- Stuphorn, V., Taylor, T. L., & Schall, J. D. (2000). Performance monitoring by the supplementary eye field. *Nature*, 408, 857-860.
- Takezawa, T., & Miyatani, M. (2003). A quantitative relation between conflict and response inhibition. *Manuscript in preparation*.
- Takezawa, T., & Miyatani, M. (2003). The effects of conflict type on response inhibition. *Manuscript in preparation*.
- Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2001). Subprocesses of performance monitoring: A dissociation of error processing and response competition revealed by event-related fMRI and ERPs. *Neuroimage*, 14, 1387-1401.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.

(主任指導教官 宮谷真人)