

特集 エラー関連陰性電位を使用した新たな精神生理学研究の展開

## エラー関連陰性電位 —行動モニタリングとしての機能的意義—<sup>1)</sup>

早稲田大学スポーツ科学部

正木 宏明

University of Michigan

William J. Gehring

江戸川大学社会学部

高澤 則美

早稲田大学スポーツ科学部

山崎 勝男

### The functional significance of the error-related negativity in action monitoring

Hiroaki MASAKI

School of Sport Sciences, Waseda University  
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

William J. Gehring

University of Michigan  
525 East University Avenue, Ann Arbor, MI 48109-1109

Noriyoshi TAKASAWA

Department of Sociology and Human Studies, Edogawa University  
474 Komaki, Nagareyama-shi, Chiba, 270-0198, Japan

Katuo YAMAZAKI

School of Sport Sciences, Waseda University  
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

---

2003.11.21 受稿, 2004.2.23 受理

- 1) 本研究の一部は, 平成14-15年度科学研究費補助金・基礎研究(c)課題番号15530478(研究代表者: 山崎勝男)および平成15年度早稲田大学特定課題研究(研究代表者: 正木宏明)2003A-940の助成を受けて実施した。

A growing area of research within psychophysiology concerns the error-related negativity (ERN), an event-related potential component that was first observed independently by the Illinois and the Dortmund groups about fifteen years ago. Since then, evidence has accumulated that the ERN represents action monitoring processes executed presumably by the anterior cingulate cortex (ACC). In this review paper, we discuss the functional significance of the processes reflected by the ERN in action monitoring. We first introduce fundamental aspects of the ERN, including its morphological characteristics, the tasks in which it has been observed, models of its neural generator, findings concerning the involvement of attention, and the relation between the ERN and the continuous vs. discrete nature of error. We discuss the ERN elicited by external feedback signals in light of its independence of motor responses and its relationship to negative affect. We focus on the error- vs. conflict-detection controversy, discussing recent reports addressing this issue. Because proponents of the error-detection and the conflict-detection theories have each reported convincing findings in support of their views, the controversy is not yet settled. We suggest that one reason for the difficulty in resolving the controversy is that theories and models have not specified in sufficient detail how error-detection and conflict-detection are conceptually distinct. In the final part of this paper, we introduce latest findings of the ERN and speculate on future research in this area. (*Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, 22(1) : 3-18, 2004.)

**Key words:** Error-related negativity (ERN); Feedback-ERN; Error detection; Response conflict; Error- vs. conflict-detection controversy

**【要 約】** エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) は、前部帯状皮質の行動モニタリング処理を反映した事象関連電位であり、近年ERNに対する関心が高まっている。本稿では、行動モニタリングの点からERNに反映される機能的意義について議論する。まずERNの諸特徴として、形態的特徴、課題、発現モデル、注意との関連、連続型エラーとの関連などを紹介する。また、外的フィードバック信号によって惹起されるERNについて、運動反応との独立性および負の情動との関係から議論する。本稿では「エラー検出対コンフリクト検出論争」を中心に提起し、最近の知見を踏まえながら論じる。両理論ともに、自らの立場を支持する知見を示しており、当該論争は未だ解決をみていない。解決困難の理由のひとつに、エラー検出とコンフリクト検出が概念上どのように区別されるかについて、両理論が十分示してこなかったことがある。最後に、最新の知見を紹介し、今後の研究を展望する。

## 1. はじめに

Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke (1990) と Gehring, Coles, Meyer, & Donchin (1990) の異なる研究グループによって、ほぼ同時期に発見されたエラー関連陰性電位 (error negativity: Ne / error-related negativity: ERN, 本稿ではERNと呼ぶ) は、90年代前半までその研究論文数は極めて少なかった。しかしながら、90年代後半になると、ERN研究は隆盛を極め始める。特に、1998年米国精神生理学会学術大会 (米国コロラド州デンバー) で企画されたERNシンポジウムでの反響は大きく、出席した多くの研究者の知的好奇心を刺激した。事実、その後わずか数年間でERN関連論文数は急増し、重要な基礎的知見の集積は落ち着いてきたかに見える。その中、2003年7月には、Michael FalkensteinとMarkus Ullspergerをオーガナイザーとするエラー国際会議 (Errors,

Conflicts, and the Brain) がドイツ・ドルトムントで開催され、最新の知見について活発な議論が交わされた。

本稿では、事象関連電位 (event-related potential: ERP) の中でもっとも発見が遅く、それゆえに近年熱い研究対象とされてきたERNについて、その機能的意義と基礎的知見を概観し、特にエラー検出モデルとコンフリクトモデルに関する最新の研究成果に焦点をあてたい。

## 2. ERNに関する基礎的知見

### 2.1. エラー反応に関するERP成分

エラー反応時の筋電図 (electromyogram: EMG) 開始時点に脳波を揃えて加算平均すると、潜時約100-150msにピークを示すERNが観察される (Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1993a)。ERN出現後にはさらに、エラー反応後約200-500msの

範囲にピークを示す陽性成分Pe (error positivity) が観察される (Falkenstein et al., 1990; Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000). ERNは前頭一中心に分布するのに対して, Peは中心一頭頂優勢に分布する. ERNはエラー検出を反映し, Peはエラーの詳細な主観的評価を反映したものと考えられてきた (Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1994).

## 2.2. ERN研究で用いられる課題

ERN研究ではエラー反応を誘発する課題が必要となる. これまで主に採用されてきた課題は, 反応競合課題, 4 択反応時間課題, Go/Nogo課題に分類することができる.

現在もっとも多く採用されている反応競合課題はフランカー課題である (Eriksen & Eriksen, 1974). これは, 標的刺激をノイズ刺激で挟んだ文字列呈示に対して, 標的刺激の指示する側の手で反応する (たとえば標的刺激がHなら左手, Sなら右手で反応する) 課題である. 文字列中央に位置する標的刺激とノイズ刺激が合致する場合には (HHHHH, SSSSS), 間違えることなく速い反応が容易となる. 一方, 標的刺激とノイズ刺激が合致しない場合には (SSHSS, HSHHH), ノイズ刺激処理に伴う反応競合が起こり, 反応時間は遅延し, エラー率も増大する. この課題では, 比較的高いエラー率と大きな干渉効果が得られることから, ERN研究に適した課題となっている. ほかにも, サイモン干渉課題 (Leuthold & Sommer, 1999) や空間ストループ課題 (Masaki & Segalowitz, 2004) などが反応競合課題として用いられている.

4 択反応時間課題では, 左右の第一および第二指あるいは四肢を用いた選択反応を行う (Bernstein, Scheffers, & Coles, 1995; Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1996; Gehring & Fencsik, 2001). 同側の反応指間での選択エラーよりも左右反応手間での選択エラーの方が, エラー検出は容易となる. この性質を利用して, ERNのエラー検出モデルが検証されている (Falkenstein et al., 1996).

Go/Nogo課題では, 単純あるいは選択反応時間

課題の遂行中に時折呈示されるNogo刺激に対して反応を抑制しなければならない. 類似の課題には, Go刺激呈示後にNogo信号が呈示されるストップシグナル課題がある (Logan, 1994). Nogo刺激に対して反応をしてしまうエラーは, フォルスアラーム (false alarm) と呼ばれるが, この種のエラーによっても ERN は惹起される (Falkenstein et al., 1996). フォルスアラーム試行と反応抑制試行との差は反応の有無であるため, Go/Nogo課題では選択反応時間課題よりもエラー検出が容易であるという (Falkenstein et al., 1996).

ERN研究では目的によって最適な課題を採用し, 必要に応じて修正を加えている. 研究グループ間で知見を比較し共有する意味では, 共通の課題を用いることが望ましい. そのため, フランカー課題を標準課題として推奨する動向もある.

## 2.3. ERNのエラー検出モデル

ERNはエラー検出を反映した陰性電位であるとの立場から, ColesらIllinoisグループが提案したエラー検出モデルを以下に紹介する (Coles, Scheffers, & Holroyd, 2001). 基本的には Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke (1991) のDortmundグループも同様のモデルを提唱している.

このモデルでは, エラー処理システムは2つの部分から構成されるとしている. 一方は, エラーを検出するシステムであり, 他方は, エラー検出に伴って起動する矯正行動システム (remedial action system) である. 後者は, 抑制 (inhibition), 修正 (correction), 補償 (compensation) という3つのエラー改善に関連した処理過程を包含している. エラーモニタリングの心臓部には, 比較器 (comparator) が想定され, 大脳基底核 (basal ganglia) がその役目を担うと考えられている. この比較器では, 正反応に関する表象と実際の反応に関する表象とが比較される. 正反応の表象には前頭前野 (prefrontal cortex) が関与している. もし比較器が両表象の不一致を検出した場合には, 第二のエラー処理システムである矯正行動システムにエラー信号が送られる. これによっ

て、エラー反応は抑制され、正しい反応に修正される。さらに、再びエラー反応を起こさないように、方略的な調整 (strategic adjustment) が働き (補償)、次の試行では反応時間の遅延が観察される。エラー検出モデルによると、エラー信号が矯正行動システムに到達したときに、前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex: ACC) からERNが生起するという。これら一連のエラー処理は、行動モニタリング (action monitoring) という概念として包括されている (e.g., Gehring et al., 1993a)。

最近 は さらに、中脳ドーパミン系 (mesencephalic dopamine system) と関連づけたモデルが提唱されている (Holroyd & Coles, 2002)。期待していたよりも結果が悪い場合には、ドーパミン作動系の活動は一過性に低下する。この過程で、中脳ドーパミン系から送られた信号によってACCに脱抑制が生じ、ERNを発現させるという。

#### 2.4. ERNを発現させる事象はなにか

ERNの立ち上がり時点は、EMG開始時点よりも僅かに遅れて観察される (e.g., Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993b)。もしERNが、エラー反応生起に伴う末梢からのフィードバック情報と、正反応に関する表象との比較によって発現する電位であるならば、その立ち上がり時点はEMG開始後約100msに観察されるはずである。しかしながら、この仮定はEMGとERNとの時間的關係に矛盾する。そのため、ERNを発現させる事象は、もっと早期に駆動する処理過程に求めなければならない。末梢からの情報に依存せず、中枢におけるフィードバック情報を利用可能とする機構が必要となる。

そのような機構の強力な候補として、遠心性コピー (efference copy) がある (Angel, 1976)。これは、運動指令のコピーが、末梢に送られる信号とは別に中枢神経系内に置かれ、正反応の表象との比較に用いられるという概念である。エラー反応の遠心性コピーは、運動命令が効果器に送られたときには既に利用可能となっているため、ERNの発現タイミングを説明することができる。しかしながら、後述するように、運動反応はなくと

も、フィードバック信号によって惹起されるいわゆるフィードバックERNについては、この発現メカニズムが適用されない。そのため、ERNは遠心性コピーと正反応表象との差の検出よりも、むしろ検出された差に対する反応 (たとえば負の情動) を反映している可能性も残されている (Gehring & Willoughby, 2002)。

#### 2.5. ERNの反応モダリティとの独立性と発現部位

ERNの発生源については、ダイポール推定法の適用やfMRIによってACCに推定されてきた (e.g., Holroyd, Dien, & Coles, 1998)。補足運動野 (supplementary motor area: SMA) の関与も否定できないものの (Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000)、ほとんどの研究でACCを発生源とみなしている。また、外側前頭前野はERN発現に直接関与しないものの、反応の正誤判別に必要な情報をACCに送っている点で重要な領域である (Gehring & Knight, 2000)。

ERNは運動野の活動とは独立して、ACCから生起することから、認知処理を反映した電位成分であると考えられる。したがって、ERNは特定の運動部位に依存しない出現様相を示すものと予測される。実際、足によるエラー反応 (Holroyd et al., 1998)、サッカーディック眼球運動でのエラー反応 (Van't Ent & Apkarian, 1999)、発声エラー (Masaki, Tanaka, Takasawa, & Yamazaki, 2001b) でも同様の陰性成分がこれまでに観察されている。また、後述するように、運動反応とは関わりなく、誤反応を伝えるフィードバック信号によっても類似の陰性成分が惹起される (Gehring & Willoughby, 2002; Miltner, Braun, & Coles, 1997; 高澤・多喜乃・山崎, 1990)。これらの報告は、エラー反応やエラー情報によって惹起される陰性電位が、反応肢とは独立し、認知処理を反映した現象であることを示唆している。

#### 2.6. 注意資源との関連

ERN振幅は注意との関連で変化することがこれまでに報告されてきた。たとえば、スピードと正確性のトレードオフについて検討した実験では、

正確性が要求される条件でERNは増大した (Gehring et al., 1993a). 正しい反応遂行を維持しようとする事態下では、エラー検出はさらに重要となり、課題遂行に対する注意を高めることとなる。ERNの高振幅化はこうした注意の高まりと大いに関連している。

注意資源の配分方略を実験的に検討するうえで、従来用いられてきた方法に二重課題法がある (e.g., Kahneman, 1973). 主課題と副課題を同時に遂行させ、主課題の難易度操作に伴う副課題のパフォーマンス低下から、注意資源配分を検討する手法である。一方の課題難度を高めることによって、他方の課題遂行に配分される注意資源量を相対的に減少させることができる。

もし割り当てられた注意資源量をERNが反映するのであれば、一方の課題難度を高めることに伴って、他方の課題で観察されるERNに低振幅化が生じるはずである。田中・正木・高澤・山崎 (2002; 2003) は、副課題の難易度を操作し、エラー反応に伴うERNと注意資源との関係を検討した。ここでは、一般的な二重課題とは異なり、副課題の難易度を操作することで、主課題での反応時間とERNが調べられた。注意資源配分の操作成功は、副課題の難度上昇に伴う主課題反応時間の遅延と、エラー率の上昇から確認された。一方ERNには、注意資源減少に伴う振幅低下が認められた。

その他にも、午後7時から翌朝10時までの連続課題遂行によって断眠させると、覚醒低下に伴うERN減少が報告されている (Scheffers, Humphrey, Stanny, Kramer, & Coles, 1999). このことは課題遂行時の注意要求によってERN振幅が調整されることを示唆している。ただし、眠気の強い状態と通常の状態ではフランカー課題を遂行した実験では、眠気の影響はERNではなく、Peの振幅減少として認められるに過ぎず、エラー検出そのものは眠気の影響をさほど受けないことが示唆されている (Murphy, Richard, Masaki, & Segalowitz, 2003).

## 2.7. フィードバックERN

ERNは反応肢と独立して正中線上で最大振幅を

示す。反応モダリティとの独立性とACC由来の電位である事実は、ERNが認知処理を反映する電位であることを示している。もしそうであるならば、被験者にエラーや失敗結果を伝える外的信号を呈示した場合にも、ERNが惹起されるかどうかは興味深いテーマである。

Miltner et al. (1997) は、時間評価課題を被験者に課し、結果の知識を与えるフィードバック信号 (以下FB信号) 呈示に惹起されるERPを検討した。FB信号には、視覚刺激、聴覚刺激、触覚刺激の3種類を用いた。その結果、刺激モダリティに関わらず、評価時間の誤反応を伝えるFB信号によって、潜時230–330msにピークを示し、前頭–中心部優勢に分布する陰性電位を見出した。これらの陰性電位の発生源はACCに推定され、包括的エラー検出過程 (generic error detection) を反映する陰性電位としてERNと同一視された。本稿ではこの陰性電位をFB-ERNと呼ぶ。FB-ERNは他者の遂行エラーを観察した時にも惹起されることから (Miltner, Brauer, Hecht, Trippe, & Coles, 2004; van Schie, Mars, Coles, & Bekkering, 2004), エラー関連事象の認知レベルでの検出を反映した陰性電位といえる。

結果の知識として呈示されるFB信号によって陰性成分が惹起されることは、高澤ら (1990) が既に報告している。引き金の牽引で標的強度値を出力する課題では、誤反応を知らせるFB信号呈示によって約210msのピーク潜時を示す陰性成分が惹起された。興味深いことに、金銭報酬で動機づけを高めた条件では、この陰性成分は増大した (Fig. 1)。

エラー検出モデルでは、FB-ERNに対して正反応表象と実際の反応との比較過程を適用せず、エラー信号そのものがERNを発現させていると考えている。しかしながら、FB-ERNは被験者の結果に関する予期表象と実際のフィードバック信号とが合致しない場合に生起するという可能性も残されている。そこで、Masaki, Tanaka, Takasawa, & Yamazaki (2001c) は、標的強度値出力課題を用いて、反応結果に関する予期とフィードバック信号との一致性からFB-ERNを検討した。反応毎に被験者から反応結果を予測させ、その確信度も聴

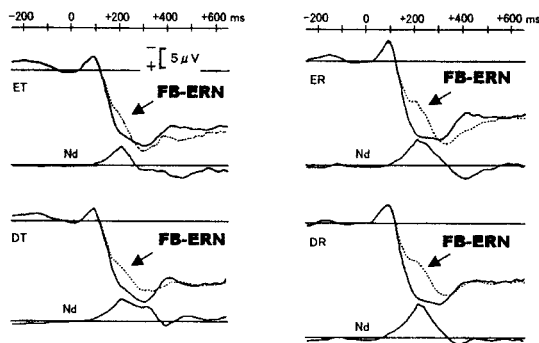


Fig. 1 標的強度値出力課題で呈示したフィードバック音に伴うERP波形 (高澤ら, 1990). 誤反応フィードバックによって潜時約210msに陰性成分が惹起された (破線). 一方, 正反応フィードバックでは, 陰性成分は惹起されなかった (実線). Nd (negative difference) は, 誤反応フィードバック呈示時のERPから正反応フィードバック時のERPを引算して求めた差波形. Ndの大きさに示されているように, 陰性成分は, 課題が難しくなった場合や報酬付加条件で大きくなった. ET:低難度条件, DT:高難度条件, ER:低難度報酬付加条件, DR:高難度報酬付加条件.

取した. もし, 予期表象とフィードバック信号の不一致がFB-ERNの生起要因であれば, 正反応を伝えるフィードバック信号でもFB-ERNが認められるはずである. 実験の結果, 誤反応フィードバック信号だけでなく, 予期表象とフィードバック信号の不一致時にもFB-ERNが観察された (Fig. 2).

頭皮上分布の僅かな差異 (Gehring & Willoughby, 2004), ピーク潜時の差異, 機能および発現モデルの点でFB-ERNとERNとの異同は議論の余地を残しているものの, 運動反応を伴わなくとも観察できるというFB-ERNの特徴に着目すると, その適用範囲は広いと考えられる. 誤反応生起に着目せずとも認知レベルでのエラー処理機能が扱えるばかりか, 運動機能障害を有する被験者のエラー検出機構も検討可能となるからである.

## 2.8. 連続エラーとERN

あるスポーツ競技の初心者が, 合理的で美しい動作フォームを獲得すべく練習している場合, 目

標動作と実際の動作との偏差を小さくすることが運動学習の本質とされる. 一方, 習熟段階では, 目標動作からの偏差は, エラーとして比較的容易に検出される. 目標 (標的) からの偏差は連続エラー (continuous error) として分類することができ, 偏差の程度はエラー量の大きさとして捉えられる. 誤反応肢によるボタン押しとは異なり, エラー量は標的を中心として一次元軸上を連続的に変化していく. この連続エラーの検出がERN振幅に反映されるならば, 習熟過程を評価するツールとしての適用可能性がみえてくる.

実際に, 連続エラーとERN振幅との関係を調べた研究では, 両者の関連を認めた報告 (田中・正木・高澤・山崎, 2000) と関連なしとする報告 (de Bruijn, Hulstijn, Meulenbroek, & van Galen, 2003; Masaki, Takasawa, & Yamazaki, 2001a) に分かれている.

引き金の牽引で標的強度値を出力する運動学習課題を用い, 運動の正誤結果別に運動関連電位を比較した研究では, 先行する準備電位 (readiness potential: RP, Kornhuber, & Deecke, 1965) を含むERP波形に正誤間の差はなかった (正木・山崎, 1992).

Masaki et al. (2001a) も同様の標的強度値出力課題を用い, 標的強度値と実際の牽引強度値との偏差の大きさから試行を3つに区分し, それぞれのERP波形を比較した. 実験は連続2日間行われ, 試行毎に被験者の確信度を聴取した. 引き金の牽引時点を基準に脳波を加算平均した結果, 運動直後に前頭部で大きい陰性電位 (ここでは便宜上 monitoring-related negativity: MRN と呼ぶ) をすべての区分で認めた (Fig. 3). このMRN振幅は, 標的強度値からの偏差が大きい試行と偏差の小さい試行間に差はなかった. 興味深いことに, MRNは標的強度値に近い力量を発揮した試行でむしろ大きかった. この高振幅MRNは, 第一日目の実験にのみ観察され, 第二日目では他の条件と同レベルまでに減少した. MRNはエラーの大きさとは対応しないため, ERNとの異同は不明のままである. しかしながら, 標的に近い強度値の出力に成功したときに振幅が大きかったという結果は, MRNがなんらかのモニタリング処理を反

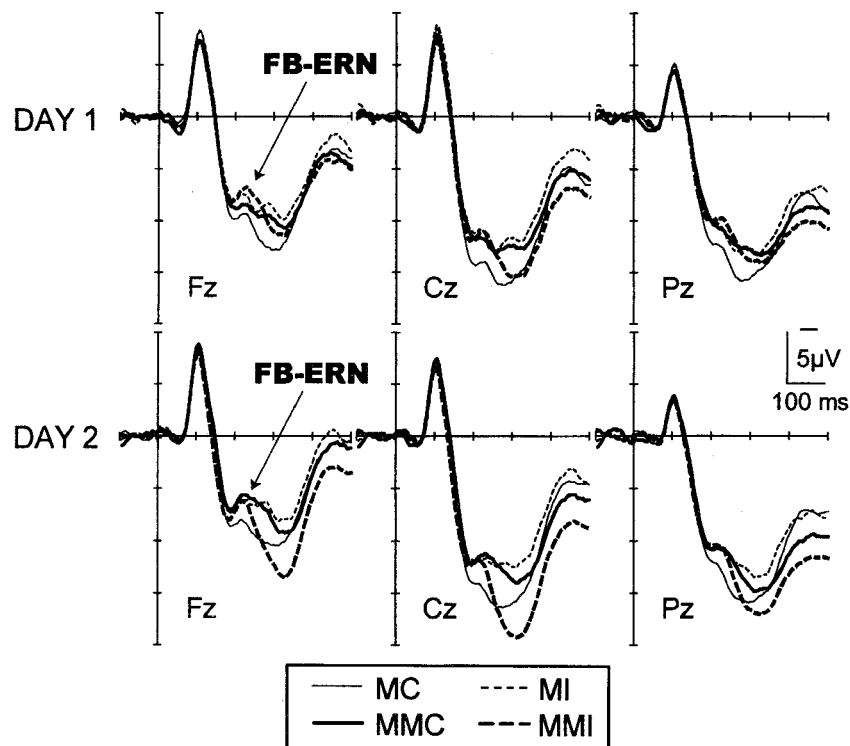


Fig. 2 標的強度値出力課題での視覚フィードバック由来のERP波形 (Masaki, et al., 2001c). 被験者の結果予測と実際のフィードバックとの対応から4条件に分類した. MC: 正反応・予測的中条件, MMC: 正反応・不的中条件, MI: 誤反応・的中条件, MMI: 誤反応・不的中条件. 陰性成分は, 誤反応フィードバックだけでなく, 予測に反した場合には正反応でも惹起され, 学習の進んだ第2日目で顕著であった. 図中縦軸はフィードバック表示時点を示す.

映したものと推察できる.

標的強度値出力課題では, 被験者は比較的早い段階で自分のパフォーマンスの結果を, フィードバック情報がなくともある程度正確に言い当てることができる (正木, 1994). そのため, MRN増大は狙い通りの強度出力ができたことに伴う強い気づき (salience) に起因したものかもしれない. もしもこの説明が正しければ, 被験者の確信度に伴ってMRNの増大が予測されるが, 実際に, 被験者の確信度が高かった場合に振幅は大きかった.

## 2.9. 負の情動とERN

意に反して起こしたエラー反応を快く思う人はいないであろう. むしろ, エラーによって負の情動が一過性に生じるはずである. 失敗直後に多く

生じるネガティブ語の発声は, 負の情動の表出である. このように, エラー生起と負の情動とは切り離すことができない. また, 古くはPapetzの回路 (Papetz, 1937) にみられるように, 帯状回機能は情動体験との文脈で議論されてきた. ACCを発生源とするERNに, 負の情動との関係を求めることは当然であろう.

正木・山崎 (2000) は, サイモン課題遂行中のエラー反応に対して, 罰 (不快音: 黒板を爪で引っ掻く音, 95dB/SPL) を与える条件と, 罰を与えない条件でERNを比較した. 罰を与えられる場合は回避動機が高まるため, エラーモニタリング機構の働きは強まり, ERNは増大するものと予測された. しかしながら, 実際にはERNは罰条件の方が小さかった (Fig. 4). ACCの尾側部は主に認知処理に, 吻側部は負の情動にそれぞれ関与

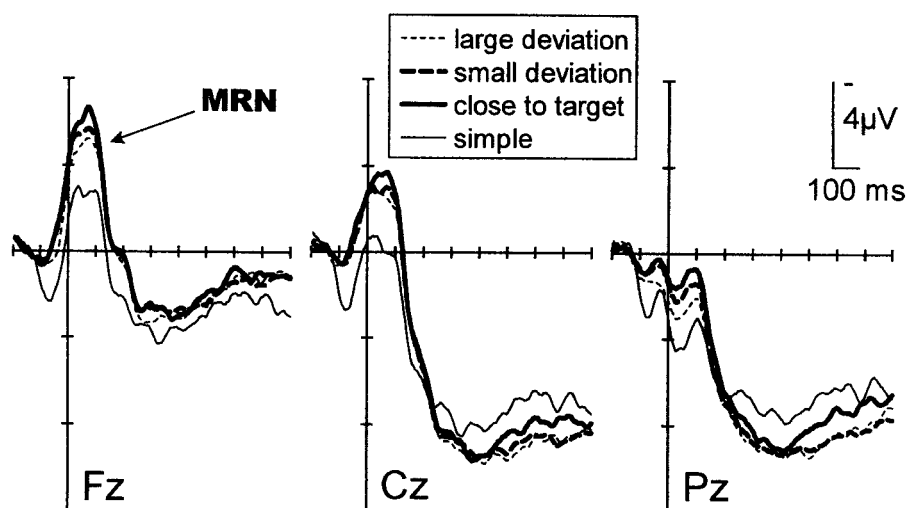


Fig. 3 連続型エラーとERP波形 (Masaki, Takasawa, & Yamazaki, 2001a). 単純な引き金の牽引でも陰性成分は出現したが、標的強度値出力時には大きな陰性成分 (monitoring-related negativity: MRN) がみられた。MRNは、標的強度値からの偏差の程度と無関係であった。しかしながら、標的強度値に近い出力時に、MRNは大きかった。図中縦軸は牽引運動開始時点を示す。simple: 単純な引き金の牽引, close to target: 標的強度値近傍の出力, small deviation: 標的強度値からの偏差が小さい場合, large deviation: 標的強度値からの偏差が大きい場合。

しており、両者には一方の活動亢進によって他方の活動が抑制されるという拮抗関係がある (Bush, Luu, & Posner, 2000)。罰付加に伴うERNの低振幅化はこの拮抗関係を反映した結果かもしれない。もしERNの発生源がACC吻側部より後方に存在するならば、罰条件の不快状況に伴う吻側部の活動亢進によって、ERNが低振幅化するからである。

その他にも、負の情動特性を強く示す被験者では、実験開始直後に高振幅のERNが観察され、その後漸減することが報告されている (Luu, Collins, & Tucker, 2000)。

FB-ERNはERNと同一電位とみなされているようであるが、ギャンブル課題を用いたGehring & Willoughby (2002)の研究では、内側前頭陰性電位 (medial frontal negativity: MFN) としてERNとは区別されている。それは、二者択一で賭金を選択した場合、賭け方のミスよりもむしろ損失結果に伴う負の情動をMFNは反映したためである。高澤ら (1990) も、金銭報酬条件でのエラーによってFB-ERNが高振幅になることを見出してい

る (Fig. 1)。これらの結果は、FB-ERNやMFNが負の情動を強く反映することを示唆している。

### 3. エラー検出対反応コンフリクト検出

#### 3.1. 反応コンフリクト説の登場

ERNの機能的意義は、その発見以来、エラー検出であると考えられてきた (Falkenstein et al., 1994; Gehring et al., 1994)。しかしながら、Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen (1998) がfMRIを用いて、反応競合課題遂行中の正反応時にもかかわらず、ACC由来の信号を検出したことで事態は一転した。彼らの想定した「コンフリクトはあってもエラーはない」状況下でACCの信号が得られたからである。その結果、ERNはエラー検出ではなく、正・誤両反応の賦活に伴う競合から生じた「反応コンフリクト (response conflict)」を反映した電位であると主張されるようになったのである。これがきっかけとなり、ERNのいわゆる「エラー検出対反応コンフリクト論争」が始まった。

オリジナルのエラー検出説 (Falkenstein et al.,



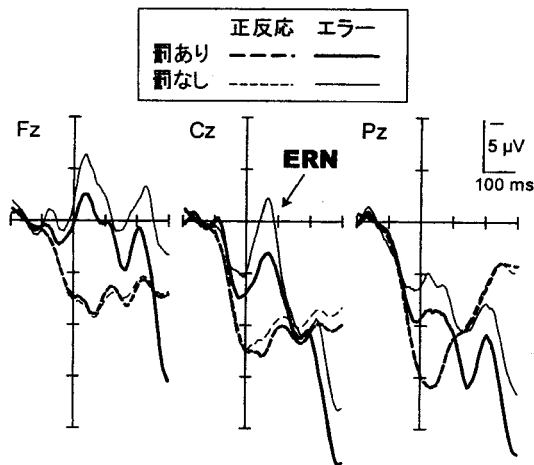


Fig. 4 負の情動生起とERN波形 (正木・山崎, 2000). エラー反応に対して罰を与えるとERNに低振幅化が生じた。図中の縦軸は、ボタン反応時点を示す。

1994; Gehring et al., 1994) では、正反応と誤反応に関する表象を比較する比較器が想定されていたのに対して、Carterらの主張する「反応コンフリクト説」では比較器は想定されていない。この点が両モデルを区別しているかにみえる。しかしながら、実際には、コンフリクトの検出でも比較過程が存在している。反応コンフリクトモデルでは、正・誤2つの反応賦活の差を算出しているが、これ自体が比較をもたらしことになるからである。また、Carterらの用いた課題では、反応処理系におけるエラーが正反応試行に混入していた可能性もある。この場合、問題視されるのは、明確なエラー反応ではなく、後述するEMGレベルでの部分エラー (partial error) が、正反応試行に混入する可能性である。

こうした事態から、実際には、エラー検出と反応コンフリクトの両モデルを明確に区別することは困難となっている。それにもかかわらず、いずれのモデルが妥当であるかを検討する実験やシミュレーションがこれまでに行われてきた。

### 3.2. 反応コンフリクト説を支持する知見

もし、ERNが反応コンフリクト検出ではなく、エラー検出を反映した電位であるならば、「ERNは排他的にエラー検出を反映する」という命題が

証明されなければならない。この場合、ERNは反応コンフリクト課題の正反応時には生じし得ないことになる。しかしながら、以下に紹介するように、実験結果の中にはこの予測に反するものが報告されている。

反応競合課題で不一致刺激によって惹起される反応コンフリクトは、反応時点というよりは刺激呈示時点に同期しているものと考えられる。そのため、反応コンフリクト説が正しいのであれば、刺激呈示時点で加算平均したERP波形に反応コンフリクトを反映した成分が観察できるはずである。

Carterグループは反応コンフリクト説の正当性を示すため、反応競合課題の不一致刺激に内包される課題関連情報と無関連情報の結合関係と、刺激情報と反応肢の結合関係を検討した (van Veen & Carter, 2002)。彼らはフランカー課題を加工し、中央の標的文字がSまたはXのときは右手反応、HまたはPのときは左手反応を行うように被験者に教示した。この場合、SSXSS, HHPHHという文字列呈示では、標的刺激とノイズ刺激は文字種類の点で一致しないものの、同じ反応肢を指定している点で両者は合致しており、刺激内コンフリクト刺激と呼ぶべきものであった。一方、SSPSS, HHXHHという文字列呈示では、ノイズ刺激と反応肢が不適合のため、反応コンフリクト刺激と呼ぶことができる。一見すると、両タイプの刺激とも同じ文字列刺激のようであるが、反応コンフリクト刺激のみが誤反応肢の賦活を引き起こす性質をもっている。

実験の結果、反応時間には、一致刺激、刺激内コンフリクト刺激、反応コンフリクト刺激の順に遅延がみられた。また、正反応率は反応コンフリクト刺激で大きく低下した。一方、刺激呈示時点を基準に加算平均したERP波形には、潜時340–380msに前頭–中心に分布するN2が観察された。このN2は反応コンフリクト刺激呈示時に高振幅値を示し、その発生源はACCに推定された。この結果は、Carterらの主張を裏付けるもので、エラー検出説を棄却する決定的証拠のようにみえる。

### 3.3. 反応コンフリクト説のシミュレーションによる検証

Carter グループはさらに、反応コンフリクト検出がERPに反映される様相を計算モデルによってシミュレートし (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001), ERNとパフォーマンスの振る舞いを説明している。彼らのモデルでは、コンフリクトモニタリング機構によってコンフリクトが評価され、その情報が認知制御中枢に送られることで、コンフリクトの抑制に繋がるという。ここでは、クロストーク干渉 (crosstalk interference) と呼ばれる並列処理が強調されている。クロストークとは、二つの刺激に対する処理経路が重複していない場合には、両者は平行して処理されるが、もし二つの処理経路がどこかで交差する場合には、処理資源を共有することとなり、両処理は互いに干渉しあうことを意味する (Mozer & Sitton, 1998)。CarterらはこのクロストークこそがERNを発現させるものと考えている。つまり、正反応経路と誤反応経路とのクロストークから生じた反応コンフリクトにACCが反応し、ERNを惹起させるという。その根拠に、刺激処理が不完全なうちに生じる速いエラー反応 (impulsive error) では、反応後も刺激評価は持続するし、誤反応が生じつつある最中でもエラー修正動作は非常に速い潜時で行われることを挙げている。また、刺激呈示から反応までに2秒間の猶予が与えられ、時間的切迫のない状況では、エラー反応が起きてもクロストークは生じ難いため、ERNは観察されなくなる (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994)。このように、速い修正動作は、それに先行する誤反応肢の賦活とオーバーラップし、コンフリクトを生起させると考えている。

彼らのシミュレーションでは<sup>2)</sup>、反応コンフリクト強度を表現するエネルギー値は、エラー反応時の方が正反応時よりも大きく、持続することが示された。またエラー反応のシミュレーションでは、現実のERN波形を鏡映するかのよう、反応コンフリクトはエラー反応直前から増大し始め、反応直後に最大となった。一方、正反応のシミュレーションでは、反応コンフリクトはより早くから生起し、反応以前にピークに達した。シミュ

レーション結果は、従来のERNの知見をうまく説明しうるものであった。

### 3.4. エラー検出説の主張

一方、ERNのエラー検出説を支持する研究者の主張は、反応コンフリクトのない事態下でのエラー反応によってERNが生起するという点にあった。たとえば、Falkenstein et al. (2000) は、単純な選択反応時間課題やGo/Nogo課題でもERNが観察される事実は、エラー検出説を強力に支持する証拠であると主張した。残念ながら、Go/Nogo課題のフォルスアラームには、反応コンフリクトは関係しないという主張は支持され難い。反応を抑制しようと努力したものの、反応を生起させてしまう過程自体が反応コンフリクトと同義であると見なされるからである (Nieuwenhuis, Yeung, van den Wildenberg, & Ridderinkhof, 2003)。

エラー検出説ではまた、エラー検出が容易な事態の方が、困難である場合よりもERNは大きくなることが予測される。一方、反応コンフリクト説では、エラー検出が困難な事態の方が、コンフリクトは強く生じるため、ERNは大きくなることが予測される。

#### Go/Nogo課題におけるフォルスアラーム検出

- 2) Botvinick et al. (2001) は、コネクションリストモデルに基づいてERNをシミュレートしている。方法の詳細は原著に譲るが、手続きの概略は以下のとおりである。フランカー課題の場合、入力、出力、注意の3つのモジュールが設定される。入力モジュール内の文字ユニットは、空間注意ユニット (左, 中央, 右) と出力ユニット (H, S) にそれぞれ興奮性に結合されている。一方、モジュール内のユニット間は相互抑制的に結合されている。フランカー課題は中央標的文字に反応する課題であるため、シミュレーションでは先ず、中央の空間注意ユニットに入力が行われ、次に文字刺激ボタンを文字ユニットに適用して計算される。その結果、モデルは出力ユニットが反応閾値に達するまで計算を繰り返す。さらに、計算サイクル毎にランダムノイズを各ユニットの賦活レベルに適用することで、様々な反応潜時を作り出し、時にはエラーを引き起こすように工夫されている。彼らは、出力モジュールに対してコンフリクトモニタリング機構を付加的に設定することで、反応層のエネルギー値を推定し、ERNをシミュレートしている。

は、他の選択反応時間課題のエラー反応よりも容易に行われると考えられる。実際にERN振幅はフォルスアラーム時の方が大きく、ピーク潜時も短い (Falkenstein et al., 1996)。さらに、4 択反応時間課題を用いた実験でも、正反応とエラー反応の表象差が大きい反応肢の選択エラー試行の方が、同側の反応指の選択エラー試行よりもERNは高振幅であった (Bernstein et al., 1995; Falkenstein et al., 1996)。これらの結果は、エラー検出説の予測を支持している。しかしながら、四肢による4 択反応時間課題で同様の仮説を検証したGehring & Fencsik (2001) の実験では、反応コンフリクトがもっとも強くなる、同側の手足の選択エラー時にERNは最大となった。このようにエラー反応と正反応との表象類似性を操作した研究では知見が一致していない。

### 3.5. エラー検出説の実験的検証

Masaki & Segalowitz (2004) は、反応コンフリクトの程度が異なる3つの刺激-反応コンパチビリティ課題 (stimulus-response compatibility: SRC) を比較することと、部分エラー (パフォーマンス上は正反応であっても、それに先行して誤反応肢の筋放電が観察される場合) に着目することで、エラー検出説と反応コンフリクト説の妥当性を検証している。ここでは、Kornblum (1992) のモデルに基づいて工夫された二種類のサイモン課題と空間ストロブ課題 (それぞれ、arrow-task: AR, arrow-Simon task: AS, arrow-orientation task: AO) を比較したところ、反応時間の遅延およびエラー率の上昇は $AR < AS < AO$ の順で大きくなり、反応コンフリクトの差異が確認された。もしERNが反応コンフリクト検出と無関係であれば、パフォーマンスとの乖離を示し、ERN振幅値に課題間の差はないことが予測される。しかしながら、ERN振幅もパフォーマンス同様の関係を示し、 $AR < AS < AO$ の順に増大した。

この研究では、部分エラーに伴うERN (岩木, 1998; 正木・高澤・山崎, 1999; Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet, 2000) に着目することで、反応コンフリクト説を検討している。SRC課題では反応競合に伴いエラー反応が生じやすくな

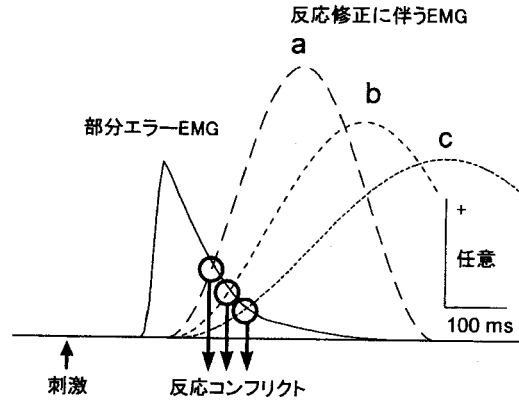


Fig. 5 部分エラーと修正動作との関係から生じる反応コンフリクトの概念図。反応競合課題で干渉効果が大きくなるに伴って、修正動作は遅延する(a→b→c)。反応コンフリクトは、部分エラーと修正反応の賦活が交差する時点で生じる。また、そのコンフリクト強度は、両者の重なりの方の大きさで決定される。反応コンフリクト説では、 $a > b > c$ の順で反応コンフリクトが弱くなるため、ERNもこの順で低振幅化とピーク潜時遅延を示すものと予測される。

る。ただし、被験者が誤反応肢を賦活させてしまっても、明確なエラー反応 (overt error) を起こす前に、正反応肢の反応にうまく修正できれば、その試行は正反応として分類される。このような試行は、あらわでないエラー (covert error) であり、誤反応肢のEMGを観察することではじめて同定される。

反応修正を強く伴った部分エラーは、正反応として分類されるものの、修正を伴わないエラー反応に比べれば反応コンフリクトは強いはずである。したがって、反応コンフリクト説に基づくと、ERN振幅は部分エラー試行時の方が修正のないエラー反応時よりも大きくなるものと予測された。Carterらのモデルを部分エラー試行に適用すると、Fig. 5のように説明される。正反応肢による修正EMGのピーク時点は、干渉効果の大きさに伴って遅れる。反応コンフリクトは、正反応肢の修正EMG波形が誤反応肢のEMG波形と交わる時点で生じ、その強度は両者の重なりの方の大きさから決定される<sup>3)</sup>。したがって、反応コンフリクト

3) 反応コンフリクトモデルによるこの予測は、Cameron Carter博士及びNick Yeung博士から直接教授を受けた。両氏に感謝します。

説に基づくと、干渉効果の増大に伴ってERNのピーク潜時遅延と低振幅化が予測される。しかしながら実験結果は、(1) ERN振幅は部分エラーの方が明確なエラーよりも小さく、(2) 正・誤EMG波形の交点遅延は、ERNのピーク潜時に影響を与えないものの、振幅をむしろ増大させたことから、反応コンフリクト説による予測に反するものであった。課題間にみられたERN増大は、エラーに対する強烈な気づき (salience) からも説明されうることを考慮すると、この実験結果は、全体的にエラー検出説を支持したものと見える。

ところで、ERN振幅に反映されるエラー検出過程の様相からエラー検出説には、全か無か検出 (all-or-nothing account) と勾配的検出 (a graded account) の二つの立場が包含されている。前者は、エラーを検出したときはいつでも同等のERNが出現するが、正反応時には全く出現しないという立場である。後者は、エラー検出に伴ってERNは出現するが、エラー検出過程の状況によってその振幅値が規定されるという立場である。従来の知見には、それぞれの立場を支持したものがあるが、課題遂行時の注意要求、強い気づき (salience) や苦痛 (distress) といった心理的反応、負の情動生起の強さ、によって振幅値は変化することが多く、ERNの勾配的検出様式を多くみることができる。

### 3.6. 論争の行方

ここまで概観してきたように、反応コンフリクト説とエラー検出説のいずれが正当であるかを検証することは、実際には極めて困難である。同じERNの振る舞いを両モデルが予測することも多く、モデル検証を一層困難とする一因になっている。また、反応コンフリクトの“反応”と“コンフリクト”は、それぞれ本質的に何を指したものなのかについては曖昧なところが多分にある。呈示刺激に対する筋活動を伴う運動反応だけでなく、エラー反応に伴う負の情動生起も反応であり、これは情動反応の強度に着目すれば、情動コンフリクトとも呼ぶことができる。反応コンフリクトの定義は研究者間で僅かずつ異なっており、この点がコンフリクト説の解釈をさらに複雑にし

ている。

エラー検出か反応コンフリクト検出かという論争は、どの研究モデルを採用するのか、どのような定義に基づいて現象を観察するのかによって、同一現象を異なるもののようにみている可能性がある。この場合、各モデルを支持する研究者それぞれが、もっともらしい知見を示して、自らの主張を擁護できる事態は当然のこととなる。こうした理由から、当該論争は、同一現象の捉え方に起因した意味論的 (semantic) 問題に過ぎない可能性も生じてくる。

いずれにしても、研究者がエラー検出と反応コンフリクト検出について、概念的な区別を明確にしてこなかったところに論争未解決の原因がある。

### 4. その他のERN適用例

社会成熟性の極端に低い被験者では、エラー反応への罰付加によって、ERNが低振幅化するという報告以来 (Dikman & Allen, 2000)、様々な行動特性やその背景にある性格特性とERNとの関係が注目されるようになった。最近では、社会成熟性と関連のある神経症傾向や誠実性についても検討されている (Pailing & Segalowitz, 2004)。誠実性の高い被験者では欣然と作業を遂行するため、ERNは金銭報酬額に関わらず大きい。誠実性の低い被験者では金銭報酬額によってERNは変化する。また、神経症傾向の高い被験者も低い者とは異なり、金銭報酬額によってERNが変化する。行動のモニタリング機能の点からERN振幅は、性格特性の個人差を捉える指標になりうるため、幅広い分野での応用が期待される。今後、種々の性格特性とERNとの関係が重要視され、ヒトの行動解明に大きく貢献するものと考えられる。

ERNに対する発達・加齢の影響についても報告が増えている。高齢者ではERNに低振幅化がみられ (Falkenstein et al., 2004)、記憶課題のエラーに対するERNの発生源は若年成人と異なる位置に推定されている (Dywan, Mathewson, & Segalowitz, 2004)。また、学童期 (7歳) から青年期 (18歳) にかけてのERNを調べた研究では、

ERNの発達様態だけではなく、思春期における発達の性差をERNが反映するという興味深い結果も報告されている (Segalowitz, Davies, Gavin, & Schmidt, 2004)。

臨床応用についても行動モニタリングの指標としてERN適用の増大が予測される。これまで、パーキンソン氏病、統合失調症、強迫性障害 (obsessive-compulsive disorder: OCD) などでERNが記録されている。統合失調症患者ではERNに低振幅化がみられるものの、正反応時でも誤反応と同等の陰性成分が観察されるという興味深い知見が得られている (Ford, 1999; Alain, McNeely, He, Christensen, & West, 2002)。パーキンソン氏病でもERNの低振幅化が観察されるが (Falkenstein, Hielscher, Dziobek, Schwarzenau, Hoormann, Sunderman, & Hohnsbein, 2001)、OCD患者では逆に高振幅のERNが観察される (Gehring, Himle, & Nisenson, 2000)。臨床応用についての報告はまだ少なく、今後の研究発展が期待される領域である。

## 5. おわりに

本稿ではERNの機能的意義に関する知見を概観した。ERNの機能的意義は、基本的には、明確なエラー (overt error)、または、あらわでないエラー (covert error) の検出と考えられる。しかしながら、この処理過程はコンフリクト検出という概念で捉え直すこともできる。エラーとコンフリクトの概念的区別の曖昧さが、ERNの機能的意義に関する論争の根底にある。いずれのモデルが正しいのかを決めようとする努力は、当該論争をいたずらに持続させることにもなりかねない。

本稿で概観したように、ERNの機能的意義や発現メカニズムについては、まだ微視的な議論の余地を残している。しかしながら、ERNの振る舞いに関する知見の集積が一段落したことで、今後は、臨床応用や人間工学分野での幅広い適用に期待が高まっていくであろう。

## 引用文献

- Alain, C. McNeely, H. E., He, Y., Christensen, B. K., & West, R. 2002 Neurophysiological evidence of error-monitoring deficits in patients with schizophrenia. *Cerebral Cortex*, 12, 840-846.
- Angel, R. W. 1976 Efference copy in the control of movement. *Neurology*, 26, 1164-1168.
- 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. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. 2001 Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624-652.
- 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., 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.
- de Bruijn, E. R. A., Hulstijn, W., Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. 2003 Action monitoring in motor control: ERPs following selection and execution errors in a force production task. *Psychophysiology*, 40, 786-795.
- Dehaene, 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. 2000 Error monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37, 43-54.
- Dywan, J., Mathewson, K. J., & Segalowitz, S. J.

- 2004 Error-related ERP components and source monitoring in older and younger adults. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience*, Pp.184-192.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W., 1974 Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sunderman, B., & Hohnsbein, J. 2001 Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: an ERP study. *Neuroreport*, 12, 157-161.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. 1994 Event-related potential correlates of errors in reaction tasks. In: G. Karmos, M. Molnár, V. Csépe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspective of event-related potentials research (EEG Supplement 44)*. Elsevier, Amsterdam, Pp. 261-272.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. 1996 Differential processing of motor errors. In: C. Ogura, Y. Koga, & M. Shimokochi (Eds.), *Recent Advances in Event-Related Brain Potential Research*, Elsevier, Amsterdam, Pp. 579-585.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1990 Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. Brunia, A. Gaillard, & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg University Press. Tilburg. 192-195.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1991 Effects of cross-modal divided attention on late ERP components: II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, 447-455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. 2000 ERP components on reaction errors and their functional significance: tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.
- Ford, J. M. 1999 Schizophrenia: the broken P300 and beyond. *Psychophysiology*, 36, 667-682.
- 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 (Abstract)*, 27, S34.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1993a A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1994 A brain potential manifestation of error-related processing. In: G. Karmos, M. Molnár, V. Csépe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspective of event-related potentials research (EEG Supplement 44)*. Elsevier, Amsterdam, Pp.261-272.
- 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. 1993b A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Gehring, W. J., Himle, J., & Nisenson, L. G. 2000 Action-monitoring dysfunction in obsessive-compulsive disorder. *Psychological Science*, 11, 1-6.
- Gehring, W. J., & Knight, R. T. 2000 Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, 3, 516-520.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. 2002 The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, 295, 2279-2282.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. 2004 Are all medial frontal negativities created equal? Toward a richer empirical basis for theories of action monitoring. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance*

- Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience., Pp.14-20
- 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. H. 1998 Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letter*, 242, 65-68.
- 岩本信喜 1998 視覚性GO/NO-GO課題におけるエラー関連陰性電位とNO-GO電位のオーバーラップ. *生理心理学と精神生理学*, 16, 77-84.
- Kahneman, D. 1973 *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. Pp. 13-27.
- 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.
- Kornblum, S. 1992 Dimensional overlap and dimensional relevance in stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility. In G. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (Vol. 2, Pp. 743-777). Amsterdam: North-Holland.
- Kornhuber, H. H., & Deecke, L. 1965 Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und Passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 248, 1-17.
- Leuthold, H., & Sommer, W. 1999 ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, 110, 342-357.
- Logan, G. D. 1994 On the ability to inhibit thought and action: a users' guide to the stop signal paradigm. In: D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory Processes in Attention, Memory, and Language*. Academic Press, San Diego, Pp. 189-239.
- 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.
- 正木宏明 1994 運動学習過程における脳の緩電位変動. 早稲田大学大学院人間科学研究科修士論文 (未公開)
- Masaki, H., & Segalowitz, S. J. 2004 Error negativity: A test of the response conflict versus error detection hypotheses. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.76-83.
- 正木宏明・山崎勝男 1992 運動学習課題の正誤反応と準備電位. 日本スポーツ心理学会第19回大会研究発表抄録集, B-08.
- 正木宏明・山崎勝男 2000 エラー反応に特異的な脳の陰性電位成分の検討. 日本体育学会第51回大会号, 174.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1999 認知的葛藤課題におけるエラー関連陰性電位の検討. *生理心理学と精神生理学*, 17, 158.
- Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2001a Action monitoring in a target force production task. *Psychophysiology*, 38, (suppl.), 64.
- Masaki H., Tanaka H., Takasawa N., & Yamazaki K. 2001b Error-related brain potentials elicited by vocal errors. *NeuroReport*, 3, 1851-1855.
- Masaki, H., Tanaka, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2001c Negative component following incorrect feedback represents mismatch process between internal representation and feedback information. *Psychophysiology*, 38, (suppl.), 64.
- 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.
- Miltner, W. H. R., Brauer, J., Hecht, H., Trippe, R., & Coles, M. G. H. 2004 Parallel brain activity for self-generated and observed errors. In: M.

- Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leiptzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.124-129.
- Mozer, M. C., & Sitton, M. 1998 Computational modeling of spatial attention. In H. Pushler (Ed.), *Attention*. London: UCL Press, 341-393.
- Murphy T. I., Richard, M., Masaki, H., & Segalowitz, S. J. 2003 Whoops, DARN, who cares: The effect of sleepiness on the error-related negativity. *Psychophysiology*, 40, (Suppl.) 62.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., van den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. 2003 Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a Go/NoGo task: Effects of response conflict and trial-type frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3, 17-26.
- Pailing, T. E., & Segalowitz, S. J. 2004 The error-related negativity (ERN/Ne) as a state and trait measure: Motivation, personality and ERPs in response to errors. *Psychophysiology*, 41, 84-95.
- Papetz, J. W. 1937 A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 38, 725-743.
- Scheffers, M. K., Humphrey, D. G., Stanny, R. R., Kramer, A. F., & Coles, M. G. H. 1999 Error-related processing during a period of extended wakefulness. *Psychophysiology*, 36, 149-157.
- Segalowitz, S. J., Davies, P. L., Gavin, W. J., & Schmidt, L. A. 2004 The Development of the Error Negativity in Children and Adolescents. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leiptzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.177-184.
- 高澤則美・多喜乃亮介・山崎勝男 1990 運動学習中に提示したfeedback音由来の事象関連電位. 生理心理学と精神生理学, 8, 95-101.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2000 Go/NoGo課題におけるエラー検出処理ーエラー関連陰性電位による検討ー. ヒューマンサイエンスリサーチ (早稲田大学大学院人間科学研究科紀要), 9, 299-311.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2002 エラー処理の注意資源配分とエラー関連陰性電位. 生理心理学と精神生理学, 20, 29-37.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2003 情報処理段階とエラー関連陰性電位. 臨床神経生理学, 31, 426-432.
- Van't Ent, D., & Apkarian, P. 1999 Motoric response inhibition in finger movement and saccadic eye movement: a comparative study. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1058-1072.
- van Schie, H. T., Mars, R. B., Coles, M. G. H., & Bekkering, H. 2004 Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Nature Neuroscience*, 7, 549-554.
- 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.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. 2000 Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological Psychology*, 51, 109-128.