

第1部 序論

第1章 はじめに

人間は様々な環境の中で活動しており、各環境で時々状況の変化に応じて適切な行動を選択・実行することで日常生活を送っている。ただし、常に適切な行動がなされていることはなく、エラーを犯すこともある。例えば、パソコンの入力ミス、工作機械や精密機器の操作ミスなどがあり、このような些細なエラーが重大な事故を引き起こすこともある。そのため、エラーを認知（検出）して修正・補正するモニタリングシステムが、人間の認知情報処理の円滑な遂行に重要な役割を果たしていることは言を待たない。

このモニタリングシステムは、反応時間などの行動指標や脳波などの生理指標を用いて実験心理学・精神生理学的に検討されてきた。そのような趨勢の中で、選択反応時間課題のエラー反応に伴い、エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN)が脳波上に観察された (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990; Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990)。近年、このモニタリングシステムの機能を ERN が反映しているとの知見が得られ、モニタリングシステムを検討する新たな手掛かりが得られつつある。本稿では、エラーと ERN に関する従来の研究を概観し、本研究の目的について言及する。

第2章 行動指標によるエラーの研究

第1節 エラーの分類

エラーについては、心理学・人間工学などの学問領域で多数の研究結果が報告されており、エラーに関する様々な定義・分類がなされている。本章では、それらエラーの定義・分類について概観する。

Norman (1981)はエラーを誤った知識や不完全な知識から生じる *mistake* と、意図を正確に実行する過程で生じる *slips* の二つに分類した。さらに、*slips* については自ら考案した ATS (Activation-Trigger-Schema)モデルによって詳細に検討した。ATSモデルにおいては、

一連の行動はスキーマ (知識の体制化された集合体で、行動の制御の流れを支配している手順のような構成概念)の集合体によって制御される。そして同時に複数のスキーマが活性化し、起動条件の満たされたスキーマのみが選択され行動を実行すると仮定している。Norman (1981)はこのATSモデルに基づいて、slipsを、意図を形成する時に生じる slips、スキーマの誤った活性化によって生じる slips、活性化されたスキーマを誤って実行することによって生じる slips の三つに分類した。意図を形成する時に生じる slipsには、モード・エラー: 行動は正確に実行されているものの不適切な状況下でその行動が実行されていることと、記述エラー: 意図の不完全さ・あいまいさによって生じるエラーが含まれる。スキーマの誤った活性化によって生じる slips はさらに意図しない活性化と活性化の消失の二種類に細分化されている。意図しない活性化には、奪取エラー: 行われるべきスキーマが別の頻繁に実行されているスキーマに似ていると、後者のスキーマが行動の制御を実行してしまうこと、データ推進型活性化: 周囲の環境に存在する事象がスキーマを活性化させること、連動型活性化: 活性化されたスキーマがそれと関連の強い別のスキーマを活性化することが含まれる。活性化の消失には意図の忘却、スキーマの順序の乱れ、スキーマの省略、スキーマの反復が含まれる。活性化されたスキーマを誤って実行することによって生じる slips もまた、誤起動と起動失敗の二種類に細分化される。誤起動にはスプーナリズム: 動作の要素間の順序を間違えること、混合: 競合するスキーマの各構成要素を組み合わせってしまうこと、考えの行動化: 実際に行動するつもりはないのに考えが実行されてしまうこと、早まった起動: 時期尚早な行動を起こすことが含まれる。起動失敗には、競合するスキーマにより動作が妨害されること、活性化が不十分なこと、スキーマを起動するための条件が満たされないことが含まれる。

Swets (1959)の信号検出理論によってもエラーを分類することができる。信号検出理論はレーダーや音波探知機に現れる警報 (信号)の検出に関する研究から発展した理論であり、この理論が提唱された実験条件は、雑音の中に警報信号が含まれているか否かを被験者に判定させる検査である。警報があった時のみに反応するよう教示すると、次の四通りの応答が可能である。警報が含まれている時に反応した場合はあたり (hit)、警報が含まれているにもかかわらず反応がなかった場合ははずれ (miss)、警報が含まれ

ないにもかかわらず反応してしまった場合は見せかけの警報に反応が誘発されたということ (false alarm) , 警報が含まれていない時に反応しなかった場合は正しい判断をしたということ (correct rejection)である。ここでは, miss と false alarmがエラーと定義できよう。

Eisdorfer (1965)は, エラーを行動指標としてみた場合, 誤反応は目標に対する無反応である omission error と, 非目標に対する“お手つき”である commission error とに区分されるとした。commission error は刺激評価が正しく行われているのに誤った反応過程が進行してしまうエラーであり, omission error は刺激評価が正しく行われないエラーである。また, 正田 (1988)はエラーを入力時のミス (知覚のミス), 処理時のミス (誤判断・記憶違い・忘却), 出力時のミス (動作のミス)の三つに分類している。

上記の様々なエラーを時系列的な情報処理の観点から分類すると, mistake, miss, omission error は刺激評価系に強く関与しているエラーであり, slips, false alarm, commission error は反応処理系に強く関与しているエラーである。刺激評価系のエラーはエラー自体の性質として, 誤反応の遂行中にエラーを認知することが困難であり, 誤反応の遂行後, 結果的にエラーを犯したことに気づくことが多い。それに対して反応処理系のエラーは誤反応の遂行中にエラーを認知できることが多い。そのため, 前章で述べたモニタリングシステム・ERNにより密接に関わるのは反応処理系のエラーであると考えられる。したがって, 本研究では反応処理系のエラーを分析対象として, モニタリングシステム・ERNを検討することにする。

第2節 反応処理系におけるエラー

前節で述べたように, 反応処理系におけるエラーを認知し, エラーに対して適切な対処をすること, すなわち自身の行動を監視するモニタリングシステムは人間が日常生活を円滑に営むための不可欠な要素である。そのため, 人間の認知情報処理に関する多くの理論は, 言語・運動反応などの処理過程にモニタリングシステムの存在を想定している (Kosslyn & Koenig, 1992; Levelt, 1989; Logan, 1985; Mackay, 1987; Norman, 1981; Reason, 1984, 1990; Shallice, 1988)。また, モニタリングシステムに関しては上記の理論的研究に加え, 主に選択反応時間課題を使用した実験的研究 (Rabbitt, 1966, 1967, 1968;

Rabbitt, Cumming, & Vyas, 1978; Rabbitt & Vyas, 1981)や、トラッキング課題を用いた実験的研究 (Angel, 1976; Angel & Higgings, 1969; Cooke, & Diggles, 1984; Higgings & Angel, 1970; Megaw, 1972)が多数行われており、エラーの生起確率や反応時間などの行動指標を分析の対象としている。

例えば、Rabbitt (1966)は選択反応時間課題において、正反応試行、誤反応試行および修正反応 (エラーを途中で抑制し正反応を遂行し直すこと)の反応時間を比較したところ、正反応よりも誤反応および修正反応の方が有意に速かった。しかし、誤反応と修正反応との反応時間に有意差は認められなかった。また、誤反応直後の1試行目から5試行目までの正反応試行の反応時間を比較したところ、他の試行に比べて1試行目の反応時間のみが有意に遅延した。続いて Rabbitt et al (1981)は修正反応の伴った誤反応と修正反応の伴わない誤反応の反応時間を比較したところ、修正反応の伴った誤反応試行の方が有意に速かった。また Higgings et al (1970)はジョイスティックによる追跡トラッキング課題で、行動の出力結果 (エラーか否か)を被験者にフィードバックしなくても誤反応試行に修正反応 (誤った方向へ移動したジョイスティックを正しい方向へ戻すこと)が生起することを示した。これらの実験結果では、モニタリングシステムはエラー検出とエラーの修正・補償といった機能を基本的特性としていることが共通している。エラーの検出は正反応の表象と実際の行動表象とのずれを検知すること、エラーの修正は誤反応を抑制し正反応を遂行し直すこと、エラーの補償は誤反応試行の直後の試行に対して慎重に対処することである。上記の知見から、Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin (1993)はエラーに関わるモニタリングシステムが、エラーの検出・修正・補償の機能を全て包含するというアクションモニタリングの概念を提唱した。Coles, Scheffers, & Holroad (1998)によれば、アクションモニタリングは、刺激と反応との対応を学習することで正反応の表象と実際の行動表象とのずれを検知する戦略を確立し、それによってエラー検出し、エラー検出後、エラーを修正および補償する、という順序で機能する。

しかし、アクションモニタリングの基本的特性をエラーの検出・修正・補償とする説とは異なる説もある。Coles, Gratton, Bashore, Eriksen, & Donchin (1985)と Eriksen, Coles, Morris, & O'Hara (1985)は、選択反応時間課題のアクションモニタリングを筋電図

(electromyogram: EMG)を用いて検討した。その結果、誤反応をしかけてそれを途中で抑制し再び正反応を遂行したこと、換言すれば、誤反応となる腕に筋活動が生じたものの、ボタン押しなどの行動指標上明確な反応出力に至らなかった部分的エラーが観察された。この結果について Coles et al (1985)と Eriksen et al (1985)は、正反応と誤反応が同一試行で生じて競合すると考え、そのような競合状態が正誤の両反応を相互に抑制させ、エラーに対処するアクションモニタリングを機能させるという相互抑制説を提唱した。

このようにアクションモニタリングの基本的特性に関する知見の不一致は、行動指標のみを扱った研究に起因している。エラーの生起確率、反応時間、筋活動などの行動指標は認知処理を直接的に反映していない。したがって、その結果には多様な解釈が成立する。つまり、行動指標のみの実験研究では、アクションモニタリングの内実は明確にならないであろう。

第3章 エラー関連陰性電位 (ERN)の諸特徴

第1節 ERNの発見

行動指標とは、人間の刺激評価から反応出力に至る一連の認知処理過程を終えた最終的な出力結果であり、この出力結果のみで認知情報処理の特性や時間的側面を推定するには制約がある。脳の神経細胞が認知情報を処理しているのは自明であることを考慮すると、認知情報処理の本質を明らかにするためには、行動指標に加えて実際の脳活動を指標に用いる必要があるだろう。

事象関連脳電位 (event-related brain potential: ERP)は脳活動を測定する指標の1つである。ERPとは、何らかの事象に関連して出現する脳神経細胞の一過性の変化、すなわち感覚・知覚・認知など、脳の認知情報処理に関わる神経細胞集団の同期的活動で生じる電場電位であると言われている (Hillyard & Kutas, 1983; 沖田, 1989; 沖田・諸富, 1998)。ERPは、極性・潜時・振幅・頭皮上分布といった特徴で記述され、それら複数の特徴を総称してERP成分と呼ばれることが多い。現在までに視覚・聴覚・体性感覚といった感覚器への刺激、さらに期待・選択的注意・刺激評価・運動準備・短期記憶などの認知情報処理機能との対応が想定される各種ERP成分が報告されてきた。ERPを指標として用

いる利点は、時間分解能（ミリ秒単位）が優れているため詳細な時間経過に沿って脳活動を捉えられること、上記のように各種 ERP 成分と認知情報処理機能との対応の特定化が進んでいることなどが挙げられる。

Gehring et al. (1990)は、行動指標に加えて ERP を用いてエラーのモニタリングに関する精神生理学的研究を行った。その結果、エラーを犯した際に、反応後約 60 ms に頂点振幅を示し前頭 - 中心部に分布する陰性成分を発見し、これをエラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) と命名した（例えば、第 2 部第 3 章の Fig.1-2 参照）。また同時期に、Falkenstein et al. (1990)も同様の陰性成分を発見し、Ne (error negativity)と命名した（本稿では ERN を用いる）。ERN の脳内発生源は、等価電流双極子推定法 (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994; Holroyd, Dien, & Coles, 1998), fMRI (functional magnetic resonance imaging) (Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000)を用いた研究や、サルを用いた研究 (Gemba, Sasaki, & Brooks, 1986)によって、前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex)に推定されている。

第 2 節 ERN の機能的意義

前章で述べたアクションモニタリング（エラーの検出・修正・補償）が ERN 成分とどのような関係にあるか検討されてきた (Gehring et al, 1993; Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring, & Donchin, 1996) 。Gehring et al. (1993)は Eriksen & Eriksen (1974)の認知的葛藤課題を使用し、CRT 上にアルファベット 5 文字の文字列を呈示した。文字列は一致刺激（HHHHH, SSSSS）と不一致刺激（HSHHH, SSHSS）の 4 パターンがあり、各文字列をランダムに等確率で呈示している。被験者は、文字列の中央が H であれば左手で、文字列の中央が S であれば右手で握力計を握り、最大握力の 25%以上の力量を発揮することで反応した。その結果、被験者のエラー認知（エラー検出）に対応して ERN が出現し、ERN 振幅が増大するほどその試行中のエラーは修正される確率が高くなった。また、ERN 振幅が増大するほどエラー試行直後の試行の反応時間が遅延すること、すなわちエラー直後に正確な反応をするために慎重な戦略をとること（エラーの補償）と ERN 振幅の間に関連のあることが示唆された。このように ERN はエラーの検出・修正・補償の認知処理機能と密接に関係することが指摘された。他方、Scheffers et al. (1996)は複合

的 Go/NoGo 課題によってエラーを修正可能なエラー (Go 試行の選択反応において誤った選択をすること)と修正不可能なエラー (反応を抑制しなければならない NoGo 試行において反応してしまうこと)の 2 種類に分類し,ERN とエラーの検出・修正・補償などの認知処理的機能との関係をより詳細に検討した. 複合的 Go/NoGo 課題では, CRT 中央に長方形とその長方形の内側に矢印が呈示された. 矢印の方向は左右の二つがあり, それぞれ左右に二つのグリップがある握力計によって反応すべき手 (右手・左手) と対応している. また長方形は長い辺が垂直または水平に呈示され, それぞれ Go 刺激と NoGo 刺激に対応している. 上記 4 パターンの刺激は等確率でランダムに呈示された. その結果, 上記 2 種類のエラーの ERN 振幅に差は認められず, エラーの修正と ERN は関連しないことが示唆された. また, エラーの補償と ERN との関係には弱いながらも関係が認められた. したがって, ERN と明確な関連が指摘された認知処理機能はエラー検出のみであった. また, Stemmer, Witzke, & Schönle (2001) は, 被験者が故意にエラー反応を行うと ERN が出現しなくなるという興味深い報告をした. この結果は, 故意によるエラーではエラー検出が機能しないことを示しており, ERN がエラー検出の反映であることを間接的に示唆している.

ところで, ERN がエラー検出機能を反映するというエラー検出説 (Gehring et al., 1993; Scheffers et al., 1996) に対して, ERN が反応選択の競合によって惹起されるという反応競合説 (Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen, 1998; Gehring & Fencsik, 2001) がある. この説は前章で述べた相互抑制説 (Coles et al., 1985; Eriksen et al., 1985) と極めて類似した概念であるが, ERP 以外の脳機能研究法を用いた研究でも相互抑制すなわち反応競合が示されたものと考えられる. Carter et al. (1998) は fMRI を使用して, 課題遂行中のエラー検出時よりも反応の競合が生じた場合の方が, ERN の発生源である前部帯状皮質の活動が賦活することを見出した. また, Gehring & Fencsik (2001) はストループ課題において両手両足による 4 つの反応肢を設定することで, エラーを 3 種類に分類した. それは体の同側で生じる Ipsilateral error (右手で反応すべき時に右足で反応してしまうエラー) と, 体の対側で生じる Contralateral error (右手で反応すべき時に左手で反応してしまうエラー) と, 全く異なる体部位で生じる Opposite error (右手で反応すべき時に左足で反応してしまうエラー) であった. そして, Ipsilateral error と Contralateral error は

強い反応競合が生じやすいため、エラー試行は反応競合によって惹起されたエラーと定義した。また、Opposite error は反応競合が生じにくいため、エラー試行はエラー検出機能に強く関連したエラーと定義した。上記 3 種類のエラーにおける ERN を検討したところ、Opposite error に比較して他の 2 種類のエラーの ERN 振幅が有意に増大した。したがって、エラー検出よりも反応競合が ERN に強く関与することが示唆された。

また、Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein (2000) は ERN 様成分が正反応試行にも出現すること、反応競合のない単純な 2 択による選択反応課題においても ERN が出現することから、ERN は反応チェックの認知機能を反映すると定義した。ただし、反応チェックとエラー検出との機能的意義の違いはあいまいである。

このように ERN の機能的意義について知見は一致していない。しかしながら、Coles et al. (2001) は、反応競合が生じない正反応試行において ERN 様成分が出現することについて、Falkenstein et al. (2000) の解釈とは異なり、ERN はエラー検出機能に強く関与すると結論づけた。また佐藤・大平 (2001) は、ERN 研究のレビューにおいて、認知的葛藤課題下で反応競合が強く生じる不一致条件と、反応競合が弱い一致条件との間に ERN 振幅に差がなかったことから (Leuthold & Sommer, 1999)、ERN が機能的にエラー検出を反映することを支持している。さらに Ruchow, Grothe, Spitzer, & Kiefer (2002) は、反応競合の全く生じない guessing task を使用した。被験者は CRT 上に出現する視覚刺激を、刺激呈示直前に呈示される 4 つの選択肢のいずれかを選択することで予測した。この場合、直感的な予測に基づいて反応遂行するため、反応競合は生じない。結果は、反応競合が生じない事態であるにも関わらず、エラー試行時に ERN 様成分が出現した。この結果から、彼らも ERN がエラー検出機能を反映すると結論づけた。

上記のように、近年では ERN は反応競合よりもエラー検出を反映することを支持する知見が多数を占めている。おそらく、反応競合も ERN に強く影響を及ぼすものの、ERN が反映する最も本質的な機能はエラー検出なのであろう。ERN 研究を概観すると、ERN の発現機序は、大脳運動関連領野から末梢筋へ出力された運動指令の遠心性コピーと、実際に行った運動のフィードバック情報を比較・照合することでエラー検出が機能し、それに伴って ERN が出現するという説が有力であった (Angel, 1976; Coles, Scheffers, & Holroyd, 2001; Gehring et al., 1993)。したがって、本研究においても ERN はエラー検出に

関する認知処理機能を反映するという立場から、ERNの性質を検討した。

第3節 情報処理段階におけるERNの所在

エラー検出機能を反映するERNが、刺激入力から反応出力に至る認知情報処理のどの段階に所在するかについてはいくつか報告がある。

Bernstein, Scheffers, & Coles (1995)は刺激の視覚的形狀および反応様式の類似性がERNに及ぼす影響を検討した結果、刺激よりも反応様式の類似性がERNに強く影響することを見出した。この結果は、ERNが刺激評価系よりも反応処理系の情報処理段階に密接な関連があることを示唆しており、彼らは反応遂行後におけるエラー検出段階にERNが生じると解釈した。しかしながら、反応選択段階の終了直後にERNは惹起されるとする説 (Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1995) もある。

Leuthold & Sommer (1999)は情報処理段階におけるERNの所在について上記知見の不一致を解消するため、S-R compatibility taskを使用した。彼らは、もしERNが反応選択段階の終了直後に生起するのであれば、S-R compatibility taskで反応選択段階の処理に対する負荷を操作すればERNの頂点潜時は変動すると仮定した。そこで、実験1では左右に呈示される刺激に対して同側の手で反応する direct 条件と、対側の手で反応する indirect 条件を設定し(S-R mapping 効果)、実験2では実験1とほぼ同様の実験状況であるものの、刺激と反応との対応が1ブロック内で一定である corresponding 条件と1ブロック内で変動する non-corresponding 条件を設定した (Simon 効果)。その結果、S-R mapping 効果および Simon 効果は direct 条件よりも indirect 条件の方が、corresponding 条件よりも non-corresponding 条件の方が、それぞれ反応時間は有意に遅延したものの、ERNの頂点潜時には影響を及ぼさなかった。したがって、ERNの情報処理過程における時系列的な所在については、反応選択段階の終了直後ではなく反応遂行後のエラー検出段階であることが示唆された。

第4節 刺激・反応モダリティがERNに及ぼす影響

Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke (1991)は選択反応課題において、アルファベットの CRT 上に視覚刺激として呈示する条件と、音声による聴覚刺激として呈示する条件を設定し、刺激モダリティがERNに及ぼす影響を検討した。その結果、刺激モダリティに関わりなく両条件のエラー試行において同様のERN成分が観察された。また、Miltner, Braun, & Coles (1997)の時間評価課題では、その時間評価の正確さを視覚・聴覚・体性感覚のそれぞれのモダリティに対してフィードバック信号を呈示したところ、全てのモダリティのエラー信号に同様のERN様成分が出現した。

Holroyd, Dien, & Coles (1998)はERNが感覚モダリティに非依存的であること(Miltner et al., 1997)から、異なる反応モダリティで生起するエラーがERNに及ぼす影響について検討した。彼らは認知的葛藤課題において両手で反応する条件と両足で反応する条件を設定した。その結果、刺激モダリティの場合と同様に、反応モダリティに関わりなく両条件に同様のERNが出現した。また、Van't Ent & Apkarian (1999)はGo/NoGo課題を用い、サックード運動で反応する条件と、指の伸展運動で反応する条件を設定したところ、両条件に同様のERNが出現した。

上記の研究を概観すると、刺激・反応モダリティに関わりなくERNは出現することが示唆された。

第5節 ERNとPe

Falkenstein et al. (1990)は、エラー反応によるERN出現後に陽性のERP成分が惹起されることを発見し、これをPe (error positivity)と命名した。Peはエラー反応後300-400msに頂点振幅を示す陽性成分である(Falkenstein et al., 1995)。Peの機能的意義については、エラーの意識的再認知、エラーの補償、エラーの主観的・情動的評価と関連した成分であると言われている(Falkenstein et al., 2000)。Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet (2000)は、行動指標上の明確なエラーにはPeが出現するが、行動指標上明瞭でない筋活動のみのエラー(EMGエラー)ではPeが出現しないことを見出した。この結果から、Peもエラー検出機能を反映する成分であると解釈された。また、Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok (2001)は、Antisaccade taskにおいて意識的に知覚した工

ラーと知覚していないエラーを設定し、この2種類のエラーとERNおよびPeとの関係を検討した。その結果、ERNは両エラーに出現するものの、Peは知覚したエラーのみに出現したため、Peはエラーの意識的再認知を反映していることが示唆された。このようにPeについてもその機能的意義について知見が一致していない。したがって、さらなる詳細な検討が必要であるが、Peがエラーの意識的再認知を反映しているとする説が最も多く、有力である。

第6節 正反応試行におけるERN様成分(CRN)

従来、エラー反応のみにERNが出現すると考えられてきたが、正反応試行にもERN様成分(Correct-related negativity: CRN)は出現するという報告がいくつかある。Luu, Flaisch, & Tucker (2000)は認知的葛藤課題において反応時間に時間制限を設定し、正反応で制限時間を越えた試行のERP成分を観察した。その結果、反応時間が遅延するほどERN様成分(CRN)が増大することを見出した。またVidal et al. (2000)は、従来のERNと比較して振幅は減少するものの、正反応試行でERN様成分(CRN)が出現することを報告している。

Scheffers & Coles (2000)は被験者に反応の正確さに対する確信度の評定を要請し、確信度とERNとの関係を検討した。その結果、正反応試行でもエラーを犯したと確信した場合にERN様成分(CRN)が出現すること、エラー試行でも正反応と確信した場合はERNが出現しないことが明らかになった。このような正反応試行におけるERN様成分(CRN)の出現について、Coles et al. (2001)は、正反応試行においてもエラー検出処理が機能していることと、刺激評価処理機能がアーチファクトとして混入することをその原因に挙げている。

従来の研究を概観すると、正反応試行におけるERN様成分(CRN)の振幅は通常のERN振幅と比較して小さく、ERNはエラーに対してより鋭敏に反応すると考えられる。ただし、正反応試行においてもエラー検出機能は活動していることに留意する必要がある。

第7節 ERN と他の ERP 成分

ところで、ERN 以外に様々な認知処理機能に対応した ERP 成分は存在するが、従来の研究ではいくつかの ERP 成分と ERN を生理指標として相補的に組み合わせて、エラー処理を詳細に検討している。Falkenstein et al. (1995)は運動反応直前の脳の準備状態を示す偏側性準備電位 (lateralized readiness potential: LRP) (Coles, 1989)と ERN を組み合わせた。彼らはエラー試行を修正ありと修正なしの 2 種類に分類し、2 種類のエラーごとに LRP と ERN を算出した。修正ありエラーでは誤った準備状態から正しい準備状態へ復帰する LRP 波形が見られ、修正なしエラーでは誤った準備状態にとどまっている LRP 波形が見いだされた。2 種類のエラーで LRP 波形は異なるという結果であった。他方、ERN については 2 種類のエラーそれぞれに同様の ERN 波形が観察された。これらの結果から、エラーの修正と ERN は直接関連しないことが示唆された。

また、Luu & Tucker (2001)は運動反応に関わる運動関連脳電位 (movement-related cortical potential: MRCP) (Shibasaki, Barrett, Halliday, & Halliday, 1980)と ERN の活動が相関することから、MRCP と ERN が協調して行動を調整すると解釈した。さらに、Davies, Segalowitz, Dywan, & Pailing (2001)は刺激の予期を反映する CNV (contingent negative variation) (Walter, Cooper, Aldridge, McCallum, & Winter, 1964)と ERN 振幅の関係を検討したが、両者間に相関関係は認められなかった。

岩木 (1998)は 2 種類の刺激の一方に反応し、他方には反応しない Go/NoGo 課題のエラー試行で、反応抑制機能を反映する NoGo 電位 (Gemba & Sasaki, 1989)に ERN がオーバーラップすることを見いだした。また、Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, (1999)は反応抑制機能とエラー検出機能の関係を調べるために、反応抑制機能を反映する N2 (Jodo & Kayama, 1992; Kopp, Mattler, Goertz, & Rist, 1996)と ERN を指標として用いた。彼らは、Go/NoGo 課題下で被験者を反応抑制能力の高い群と低い群に分類し、両群の N2 と ERN を比較した。NoGo 試行時のエラー率、すなわちフォールスアラーム率が高いほど反応抑制能力は低いとみなされる。結果は、N2 振幅では群間差があったものの、ERN 振幅では群間差がなかった。つまり、反応抑制能力の高い被験者よりも低い被験者の方が N2 振幅は減少したものの、ERN 振幅はほぼ同一であった。この結果は、N2 と ERN の機能的意義が異なることを示唆している。Van't Ent (2002)も、N2 と ERN の頂点潜

時・頭皮上分布が異なることを報告した。この結果から、彼は N2 は反応抑制機能を、ERN はエラー検出機能をそれぞれ反映し、時に両成分が協調して機能することもあるが、機能的意義は異なる結論づけた。

第4章 エラー関連陰性電位 (ERN) の神経生理学的基礎

前節で述べたように、近年では非侵襲的脳機能研究法によって、ERNの脳内発生源は前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex) に推定されている (Dehaene et al., 1994; Holroyd et al., 1998; Kiehl et al., 2000)。前部帯状皮質は大脳皮質前頭葉内側面の帯状溝と脳梁溝の間に位置し、Brodmannの24野と32野に相当する (Davinsky, Morrell, & Vogt, 1995; 虫明・丹治, 1999)。従来、解剖学的に前部帯状皮質は扁桃核を含む辺縁系との結合があることから、情動との関連で研究されてきた。例えば、非侵襲的脳機能研究法を使用して、数種の情動と関連する気分導入時の情動体験と脳内活動を調べた研究では、気分の種類に関わらず、いずれの情動体験と前部帯状皮質の活性化に相関関係があると報告している (George, Ketter, Parekh, Horowitz, Herscoritch, & Post, 1995)。また Damasio, Tranel, & Damasio (1990; 1991) は、前部帯状皮質損傷患者では、騒音などの物理的刺激に対しては皮膚コンダクタンス反応 (SCR) が観察されるが、ヌードや損傷した身体の画像などの、情動喚起刺激には SCR が観察されないと報告している。

しかし、近年では前部帯状皮質が運動の高次中枢を司る大脳皮質運動関連領域や脊髄へも強い結合があることが示され、アクションモニタリング・運動遂行に関与していることが明らかにされつつある (丹治, 1994b)。前部帯状皮質を含む大脳皮質高次運動関連領域は、主として一次運動野 (primary motor cortex)、補足運動野 (supplementary motor area)、運動前野 (premotor cortex) であるが、徳野 (1998) によればこれら前部帯状皮質・一次運動野・補足運動野・運動前野は相互線維連絡によって重層的に接続されており、さらにこれら領域の神経回路網は運動実行に直接関与している脊髄に投射線維を送っていることが知られている。したがって、これらの領域は運動の企画・発現から実行・監視に至る一連の認知処理機能を担うといわれている (丹治, 1994a)。また、丹治 (1997) は情動的・本能的行動に関与する大脳辺縁系と運動関連領域との関係を検討することは、運動の動機づけないしは随意性の源流を探るうえで重要であるとしている。特に前部

帯状皮質に近接する帯状回は注目されている。大脳辺縁系に属する帯状回は視床下部から送信される個体の身体状況の情報や、情動と本能行動に関する情報、さらには生物学的な価値判断に関する情報など、統合的な情報を濃密に受けていると考えられているからである (丹治, 1997)。また、前記のように、前部帯状皮質は ERN の発生源として同定され、エラー検出機能と対応してその電気活動は変化すると報告されているが (Brooks, 1986; Gemba et al., 1986)、この前部帯状皮質の電位変化は、海馬・扁桃核からの入力によるシナプス電位と推定されている。つまり、前部帯状皮質における電位変化に対する解釈として、大脳辺縁系に属する海馬と扁桃核は前部帯状皮質を舞台にして、運動の目的 (正反応の行動表象) と結果 (実際に遂行された行動表象) の比較・照合を行っている可能性がある (丹治, 1994a)。

虫明・丹治 (1999) によれば、解剖学的に前部帯状皮質は前方の吻側部と後方の尾側部に分類される。この両部位は大脳辺縁系と強く結合している他に、吻側部は前頭前野と、尾側部は一次運動野との解剖学的結合が強い。吻側部は、特に扁桃体・視床下部・島皮質など何らかの意味で情動経験に関与する部位と密接な連絡があり、この部位は情動行動の調整に関与するといわれている。また尾側部は、運動関連領域と密接な連絡があり、反応選択・反応遂行などの認知処理に関与するといわれている (Davinsky et al., 1995)。Bush, Luu, & Posner (2000) は従来の前部帯状皮質に関する知見を概観した結果、吻側部と尾側部の間には、一方の部位が活性化すると他方は抑制されるという拮抗関係があることを見出した。

Kiehl et al. (2000) は、fMRI を用い、Go/NoGo 課題下に前部帯状皮質の活動を検討した。その結果、強い反応競合が生じた場合は、エラー試行時でも正反応試行時でも尾側部が賦活した。一方、吻側部はエラー試行時にのみ賦活した。これらの結果は、吻側部はエラー検出、尾側部が反応競合の認知処理に関与することを示唆している。

前記のように、ERN の発生源は前部帯状皮質に同定されているが、最近では非侵襲的脳機能研究法によって、エラー検出機能を前部帯状皮質の神経活動に直接対応づける試みがなされている。Badgaiyan & Posner (1998) は word generation task におけるエラー検出機能をダイポール推定法によって検討した結果から、エラー検出は前部帯状皮質の吻側部、選択反応は尾側部で処理されていることを示唆した。Kiefer, Marzinzik,

Weisbrod, Scherg, & Spitzer (1998)も同様にダイポール推定法を用いて、運動関連領域と認知処理機能との対応を検討した。その結果、前部帯状皮質は運動遂行に、運動前野は運動制御にそれぞれ関与していることが明らかになった。さらに、Ullsperger & Gramon (2001)はfMRIを用いて、前部帯状皮質がエラー検出機能、前補足運動野が反応競合をそれぞれ担うと報告した。ただし、例外的にCarter et al. (1998)のfMRIデータでは、エラー検出よりも反応競合の方が、前部帯状皮質の活動はより賦活している。

以上の知見を概観すると、ERNの発生源である前部帯状皮質吻側部はエラー検出を司り、前部帯状皮質尾側部は反応競合に強く関与すると要約できる。このような神経生理学的な発現部位の違いからも、ERNは反応競合よりもエラー検出機能を反映した成分であることが示唆される。

第5章 エラー関連陰性電位 (ERN) と臨床応用

ERNは、主に認知心理学のパラダイムに従って、様々な実験変数を操作することでその基本的性質が明らかにされてきた。近年では、このような基礎研究にとどまらず、覚醒水準、人格、精神病質、年齢などを変数とした臨床場面に、適用した研究が行われている。

Scheffers, Humphrey, Stanny, Kramer, & Coles (1999)はSternberg search taskを用いて覚醒水準とERNの関係を検討した。実験は30試行×64ブロックを1セッションとする全9セッションを午後7時から翌日の午前10時まで実施した。ブロックおよびセッションごとに休憩時間をはさむが、実験中は一睡もしないよう被験者に要請した。最初の1セッションを除く8セッションを前半と後半に分類して、ERN振幅を比較したところ、覚醒水準が低下した後半のERN振幅は有意に減少した。この結果は、覚醒水準の低下がエラー検出機能の活動を阻害したと考えられている。また、Kaiser, Barker, Haenschel, Baldeweg, & Gruzelier (1997)は催眠状態がERN振幅に及ぼす影響を検討した。彼らは通常の意識状態と催眠状態の時にERN振幅を比較したが、有意差は認められなかった。

Luu, Collins, & Tucker (2000)はERNの脳内発生源である前部帯状皮質が情動にも強く関与することから、気分と人格、特に負の情動である恐怖、不安、敵意、孤独といった気分状態とERNとの関係を検討した。彼らはエラーが負の事象であることから、負の

情動に強い感受性を示す人ほどエラー検出に固執し、それに伴って ERN 振幅が増大すると仮定した。しかしながら、むしろ負の情動に強い感受性を示す人ほど ERN 振幅は減少した。この結果は、負の情動がエラー検出機能を抑制したことを示している。また、Dikman & Allen (2000)は社会的適合性とERNの関係を検討した。反応の正誤に対して報酬または罰が与えられる条件を設定したところ、社会的適合性の低い人は罰よりも報酬が与えられた方が ERN 振幅は有意に増大した。この結果は、報酬によって課題遂行に対する動機づけが高められ、それに伴ってエラー検出機能が促進されたと解釈された。さらに、Pailing, Segalowitz, Dywan, & Davies (2002)は被験者を行動制御能力の高い群と低い群に分類し、両群のエラー検出機能を比較・検討した。彼らは、エラー試行と正反応試行それぞれの平均反応時間の間には有意差がなく、データにバラツキがないほど行動制御能力が高いと予測した。その結果、行動制御能力の高い群の ERN 振幅は有意に増大した。このことから、行動制御能力とエラー検出機能には正の相関関係があることが示唆された。

Kopp & Rist (1999)は認知的葛藤課題に対し、統合失調症の症状が ERN 波形に及ぼす影響を検討した。被験者はパラノイアの症状を示している統合失調症患者、パラノイアの症状を示していない統合失調症患者、健常者の3群からなり、各々のERN波形を比較した。その結果、パラノイアの症状を示している統合失調症患者の ERN 振幅は、他の2群に較べて有意に減少した。したがって、パラノイアの症状を示す統合失調症患者はエラー検出機能が阻害されていることが示唆された。Mathalon, Fedor, Faustman, Gray, Askari, & Ford (2002)も同様に、パラノイアの症状を示す統合失調症患者の ERN 振幅が減少することを報告し、さらに正反応試行において ERN 様成分が出現すると報告した。Gehring, Himle, & Nisenson (2000)は強迫神経症患者がエラーを犯した際、健常者よりも大きな ERN 振幅を示すことを見い出した。加えて、ERN 振幅と強迫神経症の症状の強弱との間に正の相関があることを示した。この結果から、強迫神経症患者はエラー検出に強く固執すると解釈された。また、パーキンソン病患者においては、ERN 振幅の低下すなわちエラー検出機能の低下が報告されている (Falkenstein, Hielscher, Dziobek, Schwarzenau, Hoormann, Sundermann, & Hohnsbein, 2001)。また、前頭葉損傷患者は、正反応試行においてもエラー試行時とほぼ同振幅の ERN 様波形を示し、エラー検出は正常

に機能しないことが報告されている (Gehring & Knight, 2000).

Gehring, Coles, Meyer, & Donchin (1995)はエラー検出機能における加齢効果を検討するため、低年齢群 7名 (平均 20.6 歳) と高年齢群 7名 (平均 71.7 歳) の被験者群について ERN を比較したところ、低年齢群よりも高年齢群の方が ERN 振幅は減少することを見出した。また、Band & Kok (2000)は低年齢群 17名 (平均 21.2 歳) と高年齢群 13名 (平均 67.3 歳) とでは、エラー検出機能を含む広義のアクションモニタリング機能の性質が異なることを示している。低年齢群と比較して高年齢群の方が ERN 振幅の低下すなわちエラー検出機能は低下していた一方、エラー修正の生起確率やエラーの補償 (エラー試行直後の試行の反応時間が遅延すること) に関しては高年齢群の成績がいい。この結果から、低年齢群と比較して、高年齢群はエラー検出に成功することが少ないが、その他のアクションモニタリング機能 (エラーの修正や補償) によってエラーを予防する戦略をとることが示唆された。

第 6 章 注意資源と事象関連電位

エラー検出機能を含む人間の認知情報処理においては注意の果たす役割は極めて重要である。注意とは様々な意味を含んだ多義的概念であるが、御領 (1983)は注意を選択機能、覚醒水準、容量の 3 側面に分類した。選択機能は周囲の環境から人間の感覚器官に入力される膨大な情報の中から必要な情報を取捨選択し適切な処理をする注意機能である。覚醒水準は人間の認知情報処理における準備状態と関係する。眠い時は処理効率が低下するし、逆に覚醒水準が高くて興奮しすぎても処理効率が低下する。そして、処理資源あるいは注意資源の立場からの研究が、容量に含まれる。人間は限られた注意資源の総量を適切に配分することで、認知情報処理を遂行するとされている。

注意の 3 側面のうち、その性質上本研究の対象である反応処理系のエラーと ERN に最も強く関係するのは容量 (注意資源) である。したがって、本章では注意資源のモデルについて概観し、さらに注意資源と事象関連電位の関係について従来の研究を概観する。

第1節 注意資源のモデル

注意資源のモデルは多数報告されている。それらのモデルで共通しているのは、人間は一定量の注意資源を刺激入力から反応出力に至る各認知情報処理段階に必要なに応じて配分することで、複数の作業を並行して遂行するという考え方である。

注意資源の概念はまず Kahneman (1973)の単一競合モデルで提唱された。このモデルの特徴は、各認知情報処理段階が単一の汎用資源を共有している点である。このモデルによると、注意資源には常に一定の限界容量があり、注意資源量はシステムが持つ配分方略に従って各認知情報処理段階に配分され、作業を遂行すると想定した。その配分方略を支配する4つの基本の方針は以下のように示されている。 固定的傾向: 非意図的に注意配分を操作する方針。例えば新奇的な刺激入力や強度の強い刺激入力への注意配分。 時々意図: 意図的に注意配分を操作するその時々の方針。 容量需要の評価: 通常注意資源は各認知情報処理段階に必要な分だけの注意を配分し、作業が遂行される。しかし、限界容量を超える注意資源を必要とする作業を遂行する場合は、可能な作業だけに絞り注意資源を供給する傾向がある。 覚醒の効果: その時々覚醒水準は使用可能な注意資源の総量を増減させる。

Norman & Bobrow (1975)は Kahneman (1973)の単一競合モデルを発展させて、資源依存的過程とデータ依存的過程の概念を提唱した。資源依存的とはその作業の達成度が注意資源の増分に対応して向上する過程であり、データ依存的とは注意資源の配分をいくら増やしても作業の達成度には何も効果を与えない過程である。あらゆる認知情報処理にはその時々に応じて資源依存的、またはデータ依存的な性質を示すとされている。彼らは、この2つの過程を考慮すれば、同時に遂行される複数の作業間の相互干渉作用は、単一の汎用資源の競合によって説明可能であるとした。ただし、同時に遂行される複数作業の難しさはその作業間の組み合わせの特殊性に強く依存する。例えば、暗算をしながら歩くことは易しいが、暗算をしながらさらに別の暗算を行うことは難しい。このような作業間の特殊的相互作用は Kahneman (1973)や Norman & Bobrow (1975)の単一汎用資源の競合という概念では説明することができない。

そこで、Navon & Gopher (1979)は多元的特殊資源群の概念を提案した。彼らは様々な処理ごとに特殊化された注意資源があるとした。彼らのモデルでは、2つの作業が同一

の注意資源を競合するような場合（例えば暗算と暗算）には干渉が激化し、逆に異なる注意資源を用いて競合が生じないような複数作業を行う場合では干渉は弱まるとしている。また、入力モダリティ・中枢処理・反応出力の各認知情報処理段階に、個別の注意資源は存在するという複数競合モデルが提唱された (Wickens, 1980; 1984)。このモデルでは 2 つの作業の各認知情報処理段階で競合する注意資源の程度を重視しており、同一段階で注意資源を競合する場合は干渉が激しくなり、重複しない段階で注意資源をそれぞれ使用する場合は干渉が弱まるとしている。さらに Sanders (1983)の認知-エネルギーモデルでは、刺激前処理・特徴抽出・反応選択・動作調整の各情報処理段階にそれぞれ注意資源が存在する。彼は 4 つの注意資源の配分を調整する別の注意資源の存在を仮定しており、全ての情報処理段階の注意資源が相互作用する可能性を想定している。

近年の注意資源に関する研究では、自動性の概念に関心が集まっている。Schneider & Shiffrin (1977)は、人間の活動は学習によって習熟し、学習後は無意識的に自動的処理に移行される点に着目し、その自動的処理の概念の重要性を指摘した。Shiffrin & Schneider (1977)は学習による自動化と注意資源の配分方略を Sternberg search task によって検討し、人間の情報処理を制御的処理と自動的処理の 2 つのタイプに大別した。制御的処理は学習前の状態であり、注意資源の配分を必要とする意識的な処理である。自動的処理は学習後の習熟状態であり、注意資源の配分を必要としない無意識的な処理である。今後の注意研究では、このような学習による自動化のプロセスについても考慮する必要がある。

また現在の認知神経科学的研究では、注意に関連した脳内神経機構の存在を想定している。Crick (1984)のサーチライト説によれば、内的注意は視床からほぼ全ての大脳皮質領域へサーチライト状に作用しており、視床背側-網様体によって制御される。内的注意のサーチライトに照らされた局所的大脳皮質領域の神経細胞が賦活し、それ以外の大脳皮質領域の活動が抑制される。また、Posner & Petersen(1990)は注意の神経ネットワークモデルを提唱している。このモデルでは、前頭前野外側部・帯状回・補足運動野から形成され思考や運動の実行・制御に関与する前方注意ネットワーク、頭頂葉・視床枕上丘からなり空間的注意の移動や集中に関与している後方注意ネットワーク、脳幹

部の青班核から大脳皮質に投射して覚醒水準の維持に關与する覚醒ネットワークの 3 つのネットワークから構成される。

第 2 節 注意資源と事象関連電位

ERN を含む事象関連電位 (ERP) は、波形の頂点潜時・頂点振幅・極性・頭皮上分布によって特徴づけられる (Hillyard & Kutas, 1983; 沖田, 1989)。沖田 (1992a) によれば、従来の ERP 研究は 2 つのパラダイムに分類される。1 つは認知情報処理の時系列的変化すなわち時間的側面に焦点を合わせて ERP の潜時速度を指標とする研究である。もう 1 つは注意資源・記憶入力・意味プライミングなどの処理活動の強度・量的側面に焦点を合わせて ERP の振幅測度を指標とする研究である。本稿では注意資源と ERP の振幅測度の關係に着目し、従来の研究を概観する。

Kok (1997) によれば、ERP 振幅は刺激入力から反応出力に至る一連の情報処理段階ごとに配分される注意資源量を反映する。彼は刺激入力などの知覚的注意資源は N1 振幅、刺激評価などの中枢的注意資源は P300 振幅、反応出力などの反応関連注意資源は LRP 波形がそれぞれ反映するとしている。

ERP による注意資源の研究は、注意集中パラダイムと注意分割パラダイムに大別される (Kok, 1997)。注意集中パラダイムでは主にオドボール課題 (聴覚刺激弁別課題) が使用された。注意分割パラダイムでは Sternberg search task (視覚および記憶探索課題) などの単一課題内でその難易度を操作する方法と、二重課題を使用することで注意資源配分量を制限させる方法とが用いられてきた。このうち、2 つの課題を同時遂行する二重課題は、応用的要請に応じて注意資源配分量を測定する目的から考案された方法で、主課題の注意資源配分量を副課題の成績から推測することが一般的である。本来主観的な注意資源配分量を、副課題の成績という客観的指標によって数量的に把握できるという利点がある (沖田, 1992b)。

P300 は視覚刺激や聴覚刺激など認知的評価の処理機能に關連した ERP 成分 (Kutas, MaCarthy, & Donchin, 1977) である。P300 振幅はすでに、刺激評価への注意資源配分量を反映する生理指標としてメンタルワークロードの評価に適用されている (Wickens, Kramer, Vanasse, & Donchin, 1983; Kramer, Wickens, & Donchin, 1985; Wickens, 1990; 芳賀,

1993; 篠田・國分・芳賀, 1998) .

Kok (2001)は、二重課題下で P300 を指標とした注意資源の研究を課題難易度パラダイムと課題優先度パラダイムに大別した。課題難易度パラダイムは、主課題の課題難易度を変化させることで、その注意資源の配分方略を副課題・P300 振幅を指標として検討する手法である。例えば、Wickens et al. (1983)は CRT 上を移動する標的刺激をジョイスティックで追跡するトラッキング課題を主課題とし、視覚・聴覚刺激によるプローブ刺激をカウントする課題を副課題に設定した。主課題は課題難易度によって3条件に分類されており、段階的に難易度が上昇する。副課題は刺激の質的差異によって3条件に分類されており、各条件において呈示される2種類の量的に異なる刺激の一方のみをカウントする。その結果、主課題の難易度を上昇させて副課題に対する注意資源の配分量を減少させると副課題・P300 振幅は減少した。この結果は、本来副課題へ配分されていた注意資源が主課題の難易度上昇に伴って主課題の方へ配分されてしまうトレードオフ効果を、P300 振幅変動が反映したと解釈された。

課題優先度パラダイムは、主・副課題に対する注意資源量の配分割合を意識的に制御させることで、注意資源のトレードオフを主副の P300 振幅から比較検討する手法である。例えば、Strayer & Kramer (1990)は交互に呈示される主・副課題の視覚刺激に対して、全試行中の90%の主課題を遂行する場合は、残り10%を副課題の方を遂行するといったように、限界容量内の注意配分を意識的に制御させた。このような課題優先度の意識的制御による注意資源量の変化をP300によって検討した。その結果、主・副課題に対する注意資源の意識的・優先的な配分とよく対応したP300 振幅変動を示した。つまり、注意資源を優先的に配分された課題は有意に P300 振幅が増大した。

第3節 注意資源と ERN

従来の ERN 研究を概観すると、注意資源の配分方略は ERN 波形に影響することが示唆されている。例えば、被験者の注意が、課題遂行の正確さよりも遂行速度により多く向けられるほど、エラー検出に対する注意資源の配分量は減少するために、ERN 振幅は減衰するというトレードオフ効果が報告されている(Gehring et al., 1993) . また、Scheffers et al. (1999)は、Sternberg search task の課題難易度を上昇させ、注意資源の配分量を課題

遂行に投入させたところ、ERNの振幅が減少するという結果を得ている。このように、課題特性に応じた注意資源の配分方略は、エラー検出処理に影響を与え、ERN振幅にそれが反映すると考えられる。

第7章 本研究の目的

以上のようにエラー関連陰性電位(ERN)に関する研究を概観してきたが、いくつかの知見の不一致があるものの、多くの研究で共通する見解として、ERNはエラー検出機能を反映し、その機能がアクションモニタリングに重要な役割を果たすということである。しかし、エラー検出と注意資源、エラー検出とエラーの性質との関係は不明な点があり、エラー検出機能の本質は依然として検討の余地がある。エラー検出機能の本質で未だ明確ではない部分をより詳細に検討し、それを明らかにすることは、アクションモニタリングの研究を進展させることになるといえよう。そして、エラー検出機能を含むアクションモニタリングの知見を深めることは、人間の日常生活における行動を円滑に遂行するための重要な研究であろう。

したがって、本研究では、注意資源、エラーの性質といった心理的要因がエラー検出機能に及ぼす効果を、ERNを指標として検討することを目的とした。その上で、エラー検出機能の本質と認知情報処理との関係について論議する。

前節で述べたように、ERN振幅変動はエラー検出機能へ配分される注意資源量を反映するものと考えられる。単一課題法を用いて Scheffers et al. (1999)は、ERN振幅変動が単一競合モデル(共通の注意資源から認知情報処理の各段階に資源を配分とする立場)(Kahneman, 1973)と、複数競合モデル(認知情報処理の各段階に個別の注意資源が存在する立場)(Wickens, 1980; 1984)のいずれの注意資源モデルに適合するかを検討したところ、両モデルとも支持する結果を得た。しかしながら、複数競合モデルでは二重課題の各処理段階で競合する注意資源の程度を重視しているため、複数競合モデルの検証には、単一課題ではなく二重課題を用いるべきであろう。そこで実験1、実験2、実験3では、主課題への注意資源配分量を、副課題の成績から数量的に把握できる二重課題を用いて(沖田, 1992b)、エラー処理に配分される注意資源量を反映するERN振幅変動を検討した。

従来の ERN 研究では、選択反応時間課題下で手によるボタン押し反応の離散的なエラーが主な研究対象であった。しかし、実際の人間の行動を考慮すると、ボタン押し反応以外の運動反応（例えば、把握運動）も遂行するし、手以外の体部位でも運動反応を行う。したがって、あらゆる運動反応によるエラーに対してエラー検出機能が普遍的に機能するか否かを検討することは、エラー検出機能の本質を明らかにするためには重要であろう。そのためには、従来の ERN 研究で主な研究対象であった離散的な運動反応のエラーとは性質の異なる運動反応のエラーを対象として、そのエラー検出機能を検討する必要がある。そこで、実験 4 は握力計での力量発揮による連続的エラーと ERN、実験 5 は言い間違いによる発声エラーと ERN との関連をそれぞれ検討した。

第2部 実験1: エラー処理の注意資源配分とエラー関連陰性電位 (ERN)

第1章 目的

二重課題を用いて、エラー検出機能に配分される注意資源量を ERN 振幅変動から検討した。また、ERN 振幅変動が、単一競合モデル (共通の注意資源から認知情報処理の各段階に資源を配分するとする立場) (Kahneman, 1973) と、複数競合モデル (認知情報処理の各段階に個別の注意資源が存在するとする立場) (Wickens, 1980; 1984) とのいずれの注意資源モデルに適合するかを検討した。ERN 研究で使用頻度の高い Eriksen & Eriksen (1974) の認知的葛藤課題を主課題とし、副課題には聴覚刺激に対する選択反応課題を用いた。また副課題では、聴覚刺激の弁別難易度を操作した。

単一課題 低難易度の二重課題条件 高難易度の二重課題条件の順にパフォーマンスの成績と ERN 振幅の両者が段階的に低下した場合は、単一競合モデルが支持されることになる。他方、単一課題 低難易度の二重課題条件 高難易度の二重課題条件の順にパフォーマンスの成績が段階的に低下したにもかかわらず、ERN 振幅に条件差がなかった場合には、複数競合モデルが支持されることになる。

第2章 方法

被験者 手足が右利きの成人 8 名(男子 3 名, 女子 5 名, 平均年齢 23.6 ± 0.7 歳)を被験者とした。

課題 本実験では以下の 3 条件を設定した。

単一条件: 単一条件では視覚的な認知的葛藤課題を遂行した。認知的葛藤課題は、“H” と “S” で構成される文字列 (視角 $4.3^\circ \times 0.7^\circ$) の中央文字 (標的刺激) に対して反応するもので、標的刺激の両側 2 文字はノイズ刺激であった (Eriksen & Eriksen, 1974)。視覚刺激は標的文字とノイズ刺激との組み合わせから、一致刺激 (HHHHH, SSSSS) と不一致刺激 (SSHSS, HSHHH) に分類した。各刺激は、被験者の前方 1 m に設置した CRT 上に等確率でランダム呈示され、標的刺激に対してできるだけ速くかつ正確に、左第三指あるいは右第三指によるキー上げ反応を行うように被験者に要請した。左右両手指用

の反応キーは、それぞれ被験者前方 30 cm の位置に左右対象に設置した。標的文字と反応肢との割り当ては、被験者間でカウンターバランスをとった。

周波数条件： 周波数条件は単一条件と同一の認知的葛藤課題を主課題として遂行し、同時に聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題として遂行する二重課題とした。周波数条件の副課題で用いた聴覚刺激は、高音 (587 Hz) と低音 (196 Hz) の 2 種類 (持続時間 50 ms, 立ち上がり・立ち下がり各 10 ms, 音圧 50 dB SPL) であった。被験者は、主課題遂行中に呈示される聴覚刺激に対して、高音あるいは低音のいずれかに対して反応するように教示された。聴覚刺激は、刺激間隔 3000 ms で被験者前方 150 cm に設置したスピーカから呈示した。反応様式は、前方 30 cm の床上に設置したボタンに対して、利き足の足趾背屈運動によるキー上げ反応であった。聴覚刺激と標的刺激との割り当ては、被験者間でカウンターバランスをとった。2 種類の聴覚刺激の呈示順序はランダムにし、呈示率は同一とした。

呈示時間条件： 呈示時間条件も単一条件と同一の認知的葛藤課題を主課題として遂行し、同時に聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題として遂行する二重課題とした。呈示時間条件の副課題で用いた聴覚刺激は、長音 (持続時間 100 ms) と短音 (持続時間 50 ms) の 2 種類 (いずれも 587 Hz, 立ち上がり・立ち下がり各 10 ms, 音圧 50 dB SPL) であった。被験者は、主課題遂行中に呈示される聴覚刺激呈示時間の長音・短音の、いずれかに対して反応するように教示された。聴覚刺激の刺激間隔、聴覚刺激に対する反応様式、聴覚刺激と標的刺激との割り当て方、聴覚刺激の呈示順序および呈示率は、全て周波数条件と同一であった。

手続き 各条件を行う前に 30 試行の練習を行った。いずれの条件も認知的葛藤課題は、CRT 上に注視点 “+” を 300 ms 間呈示し、続く 500 ms 間のブランク後に認知的葛藤課題の文字列を 300 ms 間呈示した。試行間隔は 2000 - 4000 ms の間で変動させた。周波数条件と呈示時間条件では、被験者は主課題に加えて副課題も遂行した。単一条件、周波数条件、呈示時間条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。各条件 4 ブロック (100 試行/ブロック)、計 12 ブロックを実施した。各ブロックとも最初の 3 試行はダミー試行とし、解析から除外した。また各ブロック終了後には、3 min 程度の休憩を設けた。

被験者には、主課題では中央の標的刺激に対して反応すること、呈示される標的
文字は予測不可能であること、できるだけ速く正確に反応すること、瞬目や眼球運
動を抑制すること、主課題遂行を優先すること、の5点を教示した。

記録および分析方法 脳波 (EEG)、眼球運動 (EOG)、筋電図 (EMG)を脳波計 (NEC 三
栄製 Synafit 1000)を用いて同時記録した。EEGは、Fz, Cz, Pz, C3, C4 から両耳垂結合を
基準に時定数 5 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。EOG は左眼窩上下縁部から時定
数 5 s で導出した。EMG は両前腕 (尺側手根伸筋)から時定数 0.03 s で導出した。電極は
全て銀塩化銀電極を用い、接触抵抗値を 5 k 以下とした。全測定事象はデータレコー
ダ (NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder)に磁気記録した後、サンプリ
ング周波数 200 Hz で A/D 変換した。EEG は主課題のキー上げ反応時点と、主課題・副課
題の刺激呈示時点をそれぞれトリガに用いて加算平均した。± 100 μ V 以上の眼球運動
や、体動などのアーチファクト混入試行は加算平均処理から除外した。ERN は中心部優
勢に出現する (Gehring et al., 1993; Scheffers et al., 1996)ことから、本研究では ERN の解
析対象部位を Czに限定した。また、P300は Pzから導出した。いずれの ERP 波形にも 10
Hz のローパス・フィルターをかけた。

ERN 頂点振幅は、反応開始前 100 ms 間の平均電位をベースラインとして、反応後
0-100 ms 区間内の最大陰性電位を計測した。P300 頂点振幅は刺激呈示前 100 ms 間の平
均電位をベースラインとして、刺激呈示後 250 - 500 ms 区間内の最大陽性電位を計測し
た。また、3水準以上の繰り返しのある 1 要因および 2 要因分散分析では、タイプ エラ
ーを統制するために、Greenhouse-Geisser の による自由度補正を適用した。多重比較に
は Tukey 法を用いた。

EMG は両波整流した後に、刺激呈示前 200 ms - 100 ms 区間の振幅値について標準偏
差 (SD)を試行タイプ毎に算出した(以下、基線部 SD)。反応開始後に EMG 振幅が基線部
SD の 4 倍に達しなかった場合は無反応、4 倍以上の場合は EMG 反応の生起とみなした。

主課題のエラーは、誤反応肢側にキー上げ反応が生じた場合を Overt エラーと定義し
た。誤反応肢側にキー上げ反応には至らなかったものの、EMG 反応が認められた場合
は EMG エラーと定義した。本研究では EMG エラー試行を加算平均処理から除外した。
また、反応が極端に速い・遅い試行は刺激を正確に認知していない恐れがあるため、主

課題・正反応試行のうち反応時間が 200 ms 未満あるいは 1000 ms 以上の試行を加算平均処理から除外した。

第 3 章 結果

パフォーマンス

Fig.1-1 の上段は主課題・正反応試行の平均反応時間を，課題条件別および刺激呈示別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (3) の 2 要因分散分析の結果，一致刺激 (Compatible) よりも不一致刺激 (Incompatible) の反応時間の遅延が認められた ($F(1, 7)=49.93, p<.0001$)。また課題条件間の差も有意であり ($F(2, 4)=6.84, \eta^2=.841, p<.01$)，反応時間は，単一条件 (Single) 周波数条件 (Frequency) 呈示時間条件 (Duration) の順に遅延した (いずれも $p<.05$)。

Fig.1-1 の中段は，主課題の平均 Overt エラー率を課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (3) の 2 要因分散分析の結果，一致刺激よりも不一致刺激のエラー率が有意に高かった ($F(1, 7) = 9.32, p < .05$)。

Fig.1-1 の下段は主課題の平均 EMG エラー率を，課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (3) の 2 要因分散分析の結果，一致刺激よりも不一致刺激のエラー率が有意に高かった ($F(1, 7)=16.45, p<.01$)。

副課題における正反応試行の平均反応時間を課題条件別に求めた。ただし，呈示時間条件は聴覚刺激の呈示時間が周波数条件よりも 50 ms 長い場合があるため，刺激呈示時間が 100 ms である試行毎に 50 ms 差し引いて反応時間を求めた。その結果，周波数条件では 564 ± 115 ms (mean \pm SD)，呈示時間条件では 558 ± 104 ms (mean \pm SD) であり，両条件間に有意差はなかった。

主課題・不一致刺激の ERN

主課題の一致刺激では Overt エラーの試行数が少なく，十分な加算回数が確保できなかったため，解析対象を主課題の不一致刺激に限定した。Fig.1-2 は，Cz における総加算平均波形を，反応の正誤別および課題条件別に示したものである。単一条件および周波数条件では，反応開始後 0-100 ms 区間において Overt エラー試行に特異的な ERN が同定された。一方，呈示時間条件では ERN が明瞭ではなく，反応開始後 60 ms を頂点とす

る陰性方向へのシフトが、わずかにみられただけであった。

Fig.1-3 は、各条件の ERN 波形を重ね書きしたものである。ERN の平均頂点振幅値は、単一条件が $-6.6 \pm 6.4 \mu V$ (mean \pm SD)、周波数条件が $-3.9 \pm 11.9 \mu V$ 、呈示時間条件が $-0.9 \pm 8.2 \mu V$ であった。ERN の平均頂点振幅について一元配置分散分析を行った

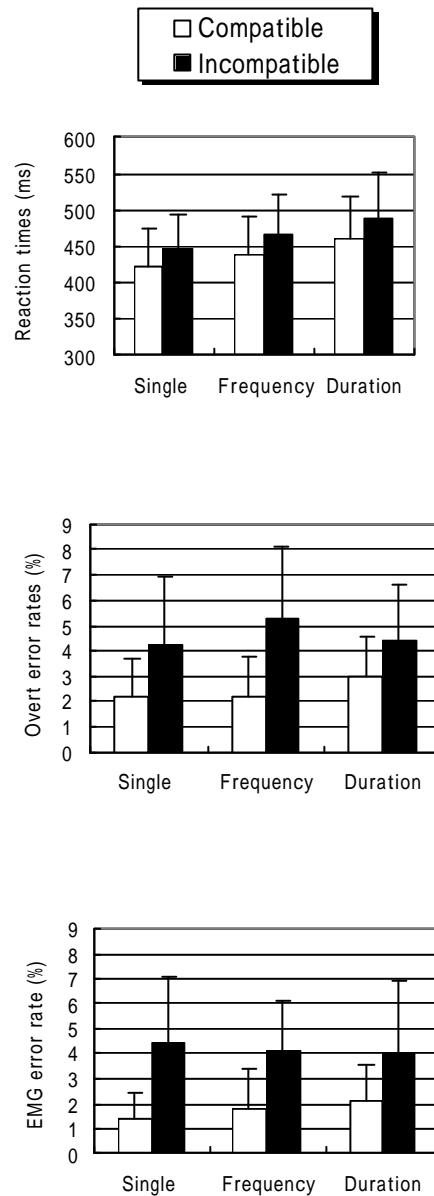


Fig.1-1 主課題の課題条件別・刺激別の平均反応時間、平均 Overt エラー率、EMGエラー率。

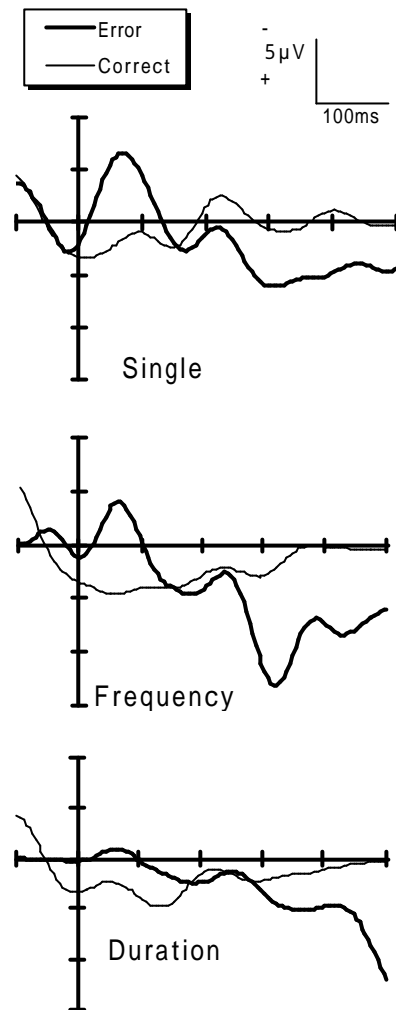


Fig.1-2 Czにおける主課題・反応の正誤別の ERP 波形.
不一致刺激のみ加算. 縦軸は反応開始時点.

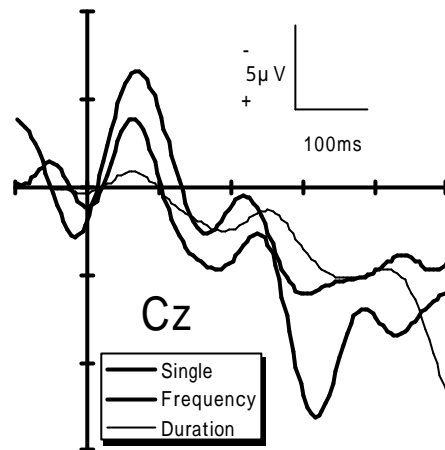


Fig.1-3 主課題・課題条件別の ERN 波形. 不一致刺激のみ加算.

ところ, 有意差がみられた ($F(2, 14)=5.80$, $\eta^2=.775$, $p<.05$). 多重比較の結果, 単一条件よりも呈示時間条件の ERN 頂点振幅が有意に小さかった ($p<.05$).

主課題・不一致刺激の P300

Fig.1-4 は, 主課題の P300 波形 (Pz) である. P300 は, 他条件に比較して単一条件で最も大きく発達した. 平均頂点振幅値は, 単一条件: $9.1 \pm 7.7 \mu V$, 周波数条件: $6.0 \pm 6.3 \mu V$, 呈示時間条件: $6.6 \pm 4.6 \mu V$ であった. 平均頂点振幅値を条件間で比較したところ, 有意傾向がみられた ($F(2, 14)=3.17$, $\eta^2=.902$, $p<.10$).

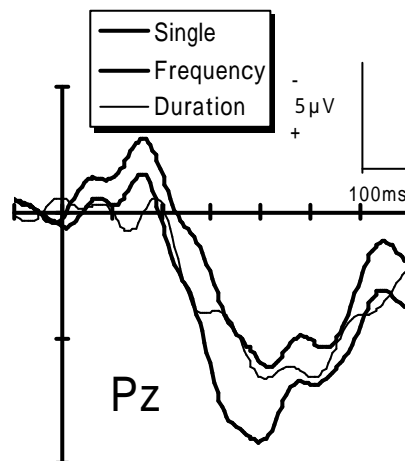


Fig.1-4 主課題・課題条件別の P300 波形. 不一致刺激のみ加算.

副課題・P300

Fig.1-5 は、副課題の P300 波形 (Pz) である。P300 振幅は、呈示時間条件が周波数条件よりも大きかった。平均頂点振幅値は、周波数条件: $1.1 \pm 5.5 \mu\text{V}$ 、呈示時間条件: $4.7 \pm 5.1 \mu\text{V}$ であった。平均頂点振幅値を条件間で比較したところ、片側検定で有意傾向がみられた ($t(7) = 1.45, p < .10$)。

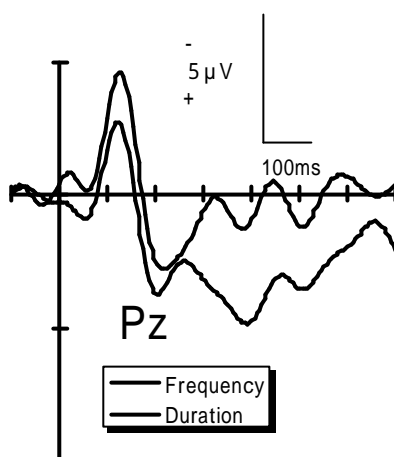


Fig.1-5 副課題・課題条件別の P300 波形。

第4章 考察

本研究では、パフォーマンスと ERP の振幅を指標として、二重課題遂行時のエラー処理に対する注意資源の配分方略を検討した。その結果、刺激の一致性に関わらず主課題の平均反応時間は、単一条件 周波数条件 呈示時間条件の順に遅延した。主課題を優先して反応するように教示したにも関わらず、主課題の反応時間に条件差が生じたことは、副課題に注意資源が配分されたことを示唆している。主課題の P300 頂点振幅は、単一条件よりも他の 2 条件で減少傾向がみられた。副課題の P300 頂点振幅は、周波数条件よりも呈示時間条件で増加傾向がみられたが、有意差はなかった。この結果は、副課題の難易度上昇に伴い副課題への注意資源配分量が増加し、その分主課題の注意資源配分量は減少したことを示唆している。

主課題の ERN 頂点振幅は、単一条件よりも呈示時間条件で有意に減少した。主課題

の Overt エラー率に条件差がなかったことから ,ERN 頂点振幅の差は正確さと速さとのトレードオフ (Gehring et al., 1993)に起因したものとは考えられない。したがって ERN 頂点振幅の低下は, パフォーマンスと P300 振幅の結果と同様に, 呈示時間条件の副課題・難易度上昇に伴い副課題へ注意が配分されたため, 主課題のエラー処理に配分し得る注意資源量が減少した結果と解釈できる。上記解釈は Scheffers et al. (1999)の知見に合致する。

従来の注意資源に関する概念モデルは, 一定の注意資源限界容量から認知情報処理の各段階に配分するという単一競合モデル (Kahneman, 1973)と, 個別の注意資源が入力モダリティ, 中枢処理, 反応出力の各段階に存在するという複数競合モデル (Wickens, 1980; 1984)に大別される。複数競合モデルは, 二重課題の, どの処理段階でどの程度の注意資源が競合しているかを重視しており, 2 つの課題が異なる注意資源を用いる場合には, 注意資源の競合はないと主張している。ただし, いずれのモデルもヒトの注意資源に限界容量を想定しており, いかなる課題も限界容量内の注意資源に基づいて遂行されることを強調している (志堂寺, 1999)。

ところで, ERN は時系列的な認知処理過程において, 反応処理後の段階を反映する ERP 成分とされている (Leuthold & Sommer, 1999) 。本研究では副課題の入力モダリティの難易度を操作したため, 課題条件間で主課題の ERN 振幅に差がなければ, 入力モダリティ, 中枢処理, 反応出力のそれぞれに別個の注意資源が存在するという複数競合モデルを支持することになる。しかしながら, 本研究では呈示時間条件で ERN の振幅が減少した。

その一方で, 主課題の反応時間には, 条件間で有意差がみられたにもかかわらず, ERN 振幅には単一条件と呈示時間条件との間にしか有意差がなかったという結果は, 共有の注意資源を各認知処理段階に配分するという単一競合モデルとも矛盾する。したがって本研究の結果は, 限界容量内から注意資源をエラー処理などの認知処理へ配分していたことを示唆する一方で, 複数競合モデルと単一競合モデルのいずれにも合致しない配分方略が適用されていたことを示唆している。なお, ERN 頂点振幅を詳細に見直すと, 単一条件 周波数条件 呈示時間条件の順に単調減少しているが, 多重比較では有意差がなかった。これは加算対象となるエラー試行数が少なかったために, ERN 振幅のバラツ

キが大きかったことに起因している可能性もある。しかし、1 試行毎の ERN 頂点振幅測定の有効性が報告されていること (Scheffers et al., 1996) から、本研究の加算回数は問題がないと考えられる。

ERN の発生源は、fMRI を用いた研究により、前部帯状皮質吻側部に推定されている (Kiehl et al., 2000)。この前部帯状皮質は、行動の監視を担う吻側部と反応選択・反応遂行を担う尾側部とに区別されるが、両者間には一方が活性化すると他方は抑制されるという拮抗関係がある (Bush et al., 2000)。これらの知見を本研究の結果に援用すると、副課題の難易度上昇に伴い反応選択・遂行に関与する前部帯状皮質尾側部の活性化が吻側部の活動を抑制した結果、主課題の ERN 振幅が減少した可能性も考えられる。

また、現在の認知神経科学的研究では、注意に関連した脳内神経機構が存在することを想定している。Crick (1984) のサーチライト説によれば、限界容量がある内的注意は、視床から大脳新皮質領域へ局所的にサーチライト状に作用しており、その内的注意は視床背側 - 網様体により制御される。内的注意のサーチライトに照らされた大脳皮質領域の神経細胞は賦活し、それ以外の大脳皮質領域の活動は抑制される。視床は、刺激評価に関わる認知機能を司る大脳皮質領域 (視覚連合野, 聴覚連合野) や反応処理系に関わる大脳皮質領域 (一次運動野, 帯状皮質運動野) などを含めたほぼ全ての大脳皮質領域に投射線維を送っている。また、逆に大脳皮質領域も線維を受けた視床核へ投射線維を送ることで、視床と大脳皮質領域の間に相互性線維連絡を形成する (黒田, 2000)。したがって、刺激評価と反応処理に関わる注意機能は、視床を介して相互作用する可能性がある。このサーチライト説を本研究の結果の解釈に援用すると、呈示時間条件では、副課題・入力モダリティの難易度上昇が刺激評価 (認知機能) に関わる大脳皮質領域を活性化させ、主課題・反応出力 (エラー検出処理機能) に関わる前部帯状皮質吻側部の活動を抑制した結果、ERN 振幅が減少したと考えられる。

本研究では副課題の刺激評価系 (入力モダリティ) の難易度のみを操作しており、反応処理系 (反応出力) は操作していない。そのため、本研究の結果からサーチライト説の妥当性を結論づけることはできない。この点を明確にするためには、副課題・反応処理 (反応出力) の難易度のみを選択的に操作し、副課題・刺激評価 (入力モダリティ) の難易度には影響しない独立変数を選定し、主課題・副課題の P300 振幅と主課題の ERN

振幅を比較しなければならないであろう。

本研究においては、二重課題を用いることで注意資源の配分方略と ERN 振幅変動との関係を明らかにした。ただし、本研究の周波数条件・副課題においては、2種類の聴覚刺激の聴覚閾値が 10 dB 以上も異なる点が問題視される。しかし、被験者間で聴覚刺激と反応の割り当てを変えていることと、聴覚刺激の呈示率が同一であることから、問題は少ないと考えられる。また、主課題と副課題ともに刺激に対してキー上げ反応を行っており、このような反応様式の類似性そのものが注意配分の競合を起こしている可能性もある。しかし、手と足と反応肢が異なるため、反応様式の競合は少ないと考えられる。しかしながら、反応様式の競合という問題をよりよい形式で改善するためには、副課題を暗算課題にして反応を求めないなど、課題を工夫することも必要であろう。

第3部 実験2: 情報処理段階とエラー関連陰性電位 (ERN)

第1章 目的

Scheffers et al. (1999)は, Sternberg search task を用い, 注意資源の配分方略に伴う ERN 振幅変動が, 単一競合モデル (Kahneman, 1973)と複数競合モデル (Wickens, 1980; 1984)のいずれに適合するかを検討したところ, 両モデルを支持する結果を得た. しかしながら, 彼らは単一課題しか用いておらず, 二重課題での注意資源競合を重視した複数競合モデルを検証するには, 手続き上もともと不適切であったと指摘できる. この点を克服するために, 実験1では二重課題を用いて, 注意資源の配分方略と ERN 振幅変動との関係を検討した. その結果, ERN 振幅は単一課題に比較して二重課題条件で減少するが, 二重課題の難易度操作には影響されないことを見出した. この知見は, ERN の振幅変動が単一競合モデルと複数競合モデルのいずれにも適合しないことを示唆している. ただし, 実験1では入力モダリティ段階の難易度だけを操作し, 反応出力段階は操作していないため, ERN振幅変動と同一処理段階の競合を重視する複数競合モデルとの関連性を完全に否定することはできない. ERNは反応出力段階の処理を反映することから (Leuthold & Sommer, 1999), 入力モダリティ段階よりも反応出力段階の難易度を操作する方が, 複数競合モデルを検討するには適しているからである. そこで本実験は, 入力モダリティ段階のみならず, 反応出力段階にも難易度を操作する二重課題条件下に, エラー検出処理に対する注意資源の配分方略と ERN との関係を検討した.

入力モダリティおよび反応出力段階に対する負荷に関わりなく, 単一課題 低難易度の二重課題条件 高難易度の二重課題条件の順にパフォーマンスの成績と ERN 振幅の両者が段階的に低下した場合は, 単一競合モデルが支持されることになる. 他方, 反応出力段階に負荷をかけた二重課題条件と他の条件との間にパフォーマンスの差がなく, ERN 振幅のみ差があった場合には, 複数競合モデルが支持されることになる.

第2章 方法

被験者 四肢が右利きの成人 12 名 (男子 7 名, 女子 5 名, 平均年齢 23.1 ± 1.5 歳) を被験者とした。

課題 本実験では以下の 4 条件を設定した。

単一条件: 実験 1 と同様の手続きであった。

周波数条件: 実験 1 と同様の手続きであった。

呈示時間条件: 実験 1 と同様の手続きであった。

運動継起条件: 単一条件で用いた認知的葛藤課題を主課題とし, 聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とする二重課題を遂行した。副課題は反応様式を除いて周波数条件と同一であった。反応様式は, 前方 30 cm の床上に設置された第 1 キーに対してまず足趾背屈運動によるキー上げ反応を行い, 次に第 1 キーの右側 10 cm にある第 2 キー, その次に第 2 キーの右側 10 cm にある第 3 キーを順に押し, 最後に足を第 1 キーに戻すこと (キー押し) であった。

手続き いずれの条件も認知的葛藤課題は, CRT 上に注視点“ + ”を 300 ms 間呈示し, 続く 500 ms 間のブランク後に文字列を 300 ms 間呈示した。試行間隔はランダムに変動させた。単一条件, 周波数条件, 呈示時間条件, 運動継起条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。認知的葛藤課題を各条件とも 4 ブロック (100 試行/ブロック), 計 12 ブロック実施した。被験者には, できるだけ速く正確に反応することと, 主課題遂行を優先するように教示した。

記録および分析方法 実験 1 と同様であった。

第3章 結果

パフォーマンス

Fig.2-1 の上段は主課題・正反応試行の平均反応時間を, 課題条件別および刺激呈示別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果, 一致刺激 (Compatible) よりも不一致刺激 (Incompatible) の反応時間の遅延が認められた ($F(1, 11)=37.09, p<.0001$)。また, 反応時間は課題条件間にも有意差がみられ ($F(3, 33)=6.16, =.87, p<.01$) , 単一条件 (Single) に比較して他の 3 条件で有意に遅延した (いずれも

$p < .05$).

Fig.2-1 中段は、主課題の平均 Overt エラー率を、課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率は有意に高かった ($F(1, 11) = 17.52, p < .05$)。また課題条件間の比較では、単一条件に比較して運動継起条件の方が、平均 Overt エラー率は高い傾向を示した ($F(3, 33) = 2.48, \eta^2 = .76, p < .10$)。

Fig.2-1 下段は主課題の平均 EMG エラー率を、課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率が有意に高かった ($F(1, 11) = 23.90, p < .001$)。

副課題における正反応試行の平均反応時間を課題条件別に求めた結果、周波数条件 (Frequency) では 806.4 ± 43.9 ms (mean \pm SD)、呈示時間条件 (Duration) では 835.5 ± 61.0 ms、運動継起条件 (Motor sequence) では 803.1 ± 67.9 ms であった。1 要因分散分析の結果、条件間に有意差はなかった ($F(2, 22) = 2.08, \eta^2 = .80, n.s$)。

主課題・不一致刺激の ERN

主課題の一致刺激では Overt エラーの試行数が少なく、十分な加算回数が確保できなかったため、解析対象を主課題の不一致刺激に限定した。Fig.2-2 は、主課題・反応開始時点をトリガとした Cz の総加算平均波形を、反応の正誤別および課題条件別に示したものである。各条件ともに Overt エラー試行では反応後 0-100 ms 区間に陰性シフトする ERN が同定された。

Fig.2-3 は、各条件の ERN の平均頂点振幅値を課題条件別に求めた結果である。ERN の平均頂点振幅を 1 要因分散分析したところ、有意差がみられた ($F(3, 33) = 4.94, \eta^2 = .70, p < .05$)。多重比較の結果、単一条件よりも呈示時間条件の ERN 頂点振幅は有意に小さかった ($p < .05$)。

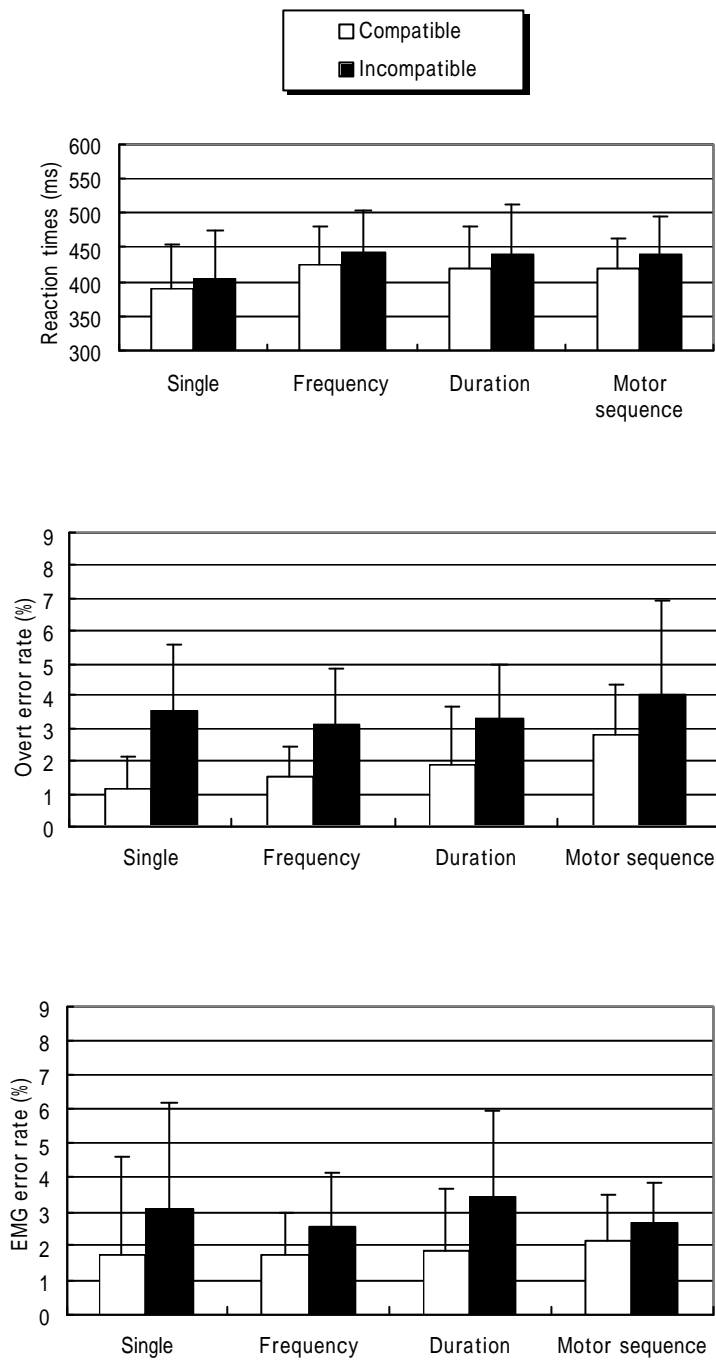


Fig.2-1 主課題の課題条件別・刺激別の平均反応時間, 平均 Overt エラー率, EMGエラー率.

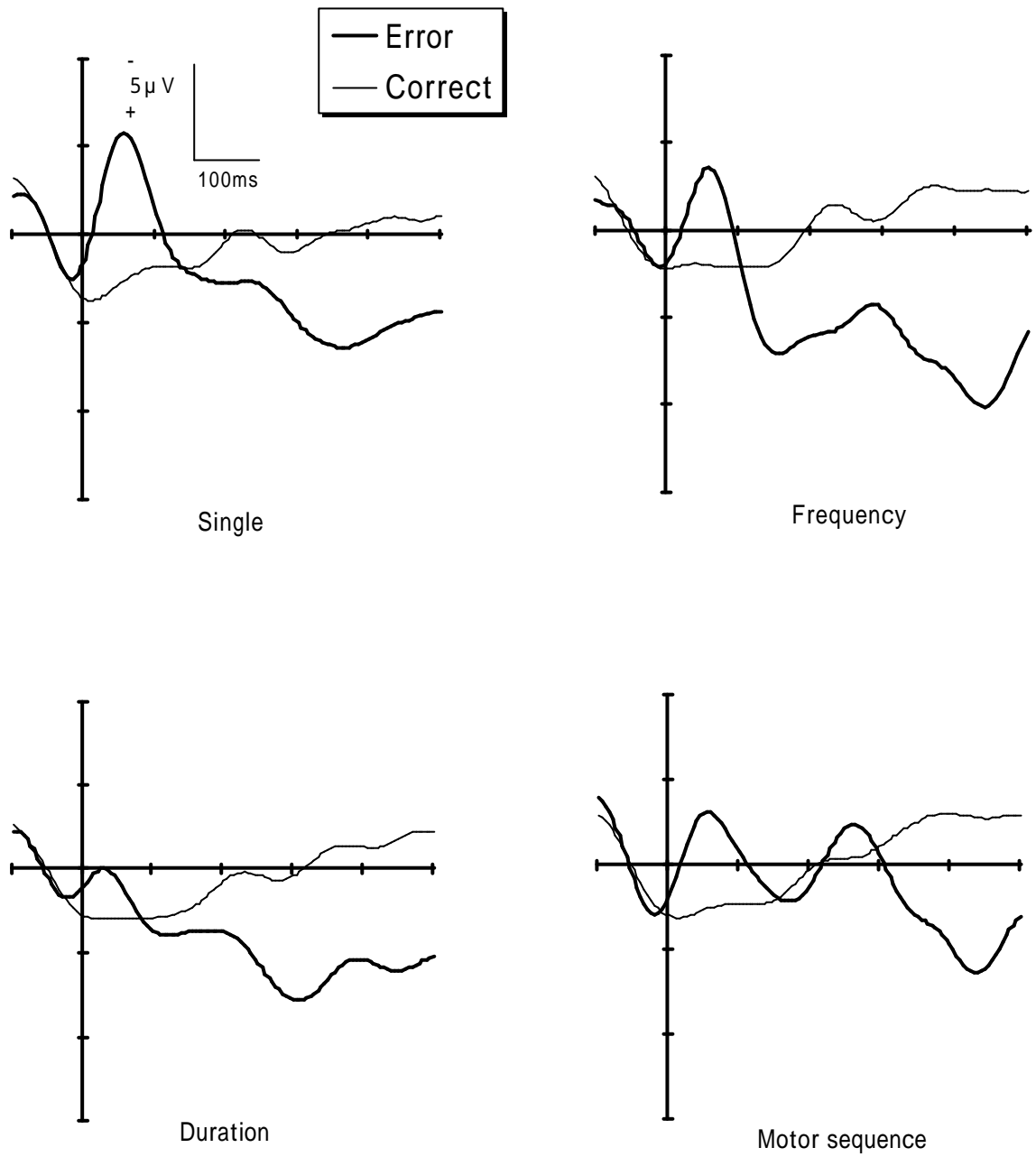


Fig.2-2 Czにおける主課題・反応の正誤別のERP波形. 不一致刺激のみ加算. 縦軸は反応開始時点.

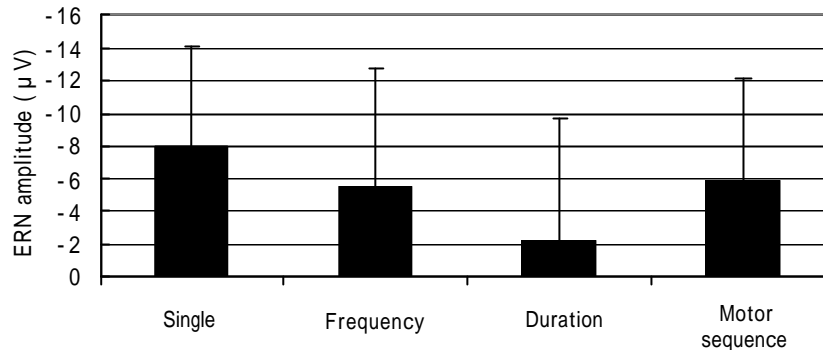


Fig.2-3 主課題・課題条件別の ERN 振幅. 不一致刺激のみ加算.

第4章 考察

本実験では、異なる認知情報処理段階に負荷を加えた条件を設定して、注意資源配分とエラー処理との関係を検討した。その結果、主課題の平均反応時間は、単一条件に比較して他の3条件で有意に遅延した。主課題の Overt エラー率は、単一条件に比べて運動継起条件で増加傾向がみられた。これらの結果は、副課題の難易度上昇によって本来主課題に配分されていた注意資源が、副課題に投入されたことを示唆している。ただし、力丸 (2002)によれば、周波数弁別が比較的容易な聴覚刺激の処理部位は、下丘、内側膝状体などの皮質下に限局されており、弁別困難な聴覚刺激の処理は一次聴覚野も関与する高次処理となる。本研究の呈示時間条件は周波数条件と異なり、同一周波数の聴覚刺激を用いたことから刺激弁別は困難であった。その結果、呈示時間条件では入力モダリティ段階での負荷が高まり、周波数条件よりも難易度は上昇し、一次聴覚野も賦活されたと考えられる。また、運動継起条件では主課題の Overt エラー率が増加したことから、反応出力段階での負荷の高まりが示唆された。したがって、周波数条件、呈示時間条件、運動継起条件の難易度には質的差異があったと考えられる。

主課題の ERN 頂点振幅は、単一条件よりも呈示時間条件で有意に減少した。この結果は実験 1 の知見と合致しており、副課題の難易度上昇によって主課題のエラー処理に使用可能な注意資源量が減少したものと解釈でき、パフォーマンスの結果とも合致する。

本実験の呈示時間条件では、副課題の入力モダリティに負荷を加え、運動継起条件では副課題の反応出力段階に負荷を加えた。したがって、主課題の ERN 振幅が運動継起条件で減少すれば、反応出力段階における注意資源の競合を示したことになる、複数競合モデル (Wickens, 1980; 1984) を支持することになる。しかしながら、呈示時間条件のみに ERN 振幅の減少がみられ、入力モダリティ段階での競合を示唆するにとどまった。

また、主課題の反応時間には単一条件と他の 3 条件との間に有意差がみられたにもかかわらず、ERN 振幅には単一条件と呈示時間条件との間にだけ有意差がみられた。単一競合モデル (Kahneman, 1973) が支持されるのであれば、反応時間と同様、ERN 振幅にも単一条件と他の 3 条件との間に有意差が生じるはずである。したがって、本研究の結果は、エラー処理に対して複数競合モデルと単一競合モデルのいずれとも合致しない注意資源の配分方略が適用されていたことを示唆している。上記解釈は実験 1 の解釈と合致する。

ERN の発生源である前部帯状皮質は、行動監視 (反応出力) を担う吻側部と反応選択・反応遂行 (中枢処理) を担う尾側部とに分類されるが、両部位の間には一方が活性化すると他方は抑制されるという拮抗関係が存在し (Bush et al., 2000)、ERN 発現は特に吻側部に関連していることが fMRI から示唆されている (Kiehl et al., 2000)。これらの知見を本研究の結果に援用すると、呈示時間条件では入力モダリティに関する処理が困難であったために、刺激の弁別に葛藤が生じ、反応選択・反応遂行 (中枢処理) に関する処理に、より大きな負荷が加わった可能性がある。その結果、前部帯状皮質では尾側部の活動賦活と吻側部の活動抑制が生じ、その結果 ERN 振幅は減少したものと考えられる。

本研究では反応出力段階に負荷を加えた運動継起条件を設定したが、複数競合モデルを否定する結果となった。ERN は運動反応の発現に関与する運動関連脳電位 (movement-related cortical potential: MRCP; Shibasaki et al., 1980) と密接な関係があり、両者は協調して行動を調整している (Luu & Tucker, 2001)。その背景には、運動反応を制御

する一次運動野・補足運動野・運動前野などの大脳皮質運動関連領野が、ERNの発生源である前部帯状皮質と神経回路網によって重層的に接続されているという解剖学的理由がある(徳野, 1998)。したがって、2つの異なる運動反応が、同一の情報処理段階で影響し合う運動継起条件では、ERNの振幅減少が予測されるが、実際にはERN振幅に変化はなかった。同一情報処理段階内での注意資源競合よりも、異なる情報処理段階間での注意資源競合の効果の方が大きいという結果は興味深い。さらに別種の処理段階に負荷を加えることで、エラー検出処理における注意資源の配分方略を検討する必要がある。

第4部 実験3: エラー検出機能における注意資源の離散的および段階的配分方略

第1章 目的

実験1では、単一課題と二重課題を用いて、注意資源の配分方略とERN振幅変動の関係を検討した。単一課題はEriksen & Eriksen (1974)の認知的葛藤課題を用いた。二重課題はEriksen & Eriksen (1974)の認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とした。聴覚刺激は周波数よりも呈示時間を弁別する方が困難であるといわれている (Turnbull, 1944)。そこで、聴覚刺激の周波数を弁別する条件と、聴覚刺激の呈示時間を弁別する条件を設定することで、副課題の難易度を操作した。その結果、ERN振幅は単一課題と比較して、難易度が高い二重課題条件で有意に減少するが、二重課題条件間の難易度操作には影響されないことを見出した。実験2においても、同様の結果が得られた。これらの結果は、エラー検出機能の注意資源には一定の閾値が存在し、副課題の難易度が低く、課題遂行に必要とされる注意資源量がエラー検出機能の注意資源の閾値以下の分量で充足される場合は、主課題・エラー検出機能へ余剰分の注意資源が一挙に・離散的に投入される配分方略がとられたことを示唆している。ただし、他方でGehring et al. (1993)は、課題遂行の速さを重視する条件、課題遂行の正確さを重視する条件、中立条件を設定し、各条件のERN波形を検討したところ、速さ重視 中立 正確さ重視の順にERN振幅が増大したと報告している。この結果は、エラー検出機能における速さと正確さのトレードオフを示したものであり、エラー検出機能へ注意資源が段階的に投入される配分方略がとられたことを示唆している。このように、エラー検出機能における注意資源の配分方略については知見が一致していない。

しかしながら、実験1・2では副課題の難易度を操作した際、聴覚刺激の周波数および呈示時間の弁別課題をそれぞれ設定したため、二重課題条件間での刺激の物理的特性に大きな違いが生じた。この刺激の物理的特性の違いが課題難易度の質的差異を引き起こし、実験結果に影響を与えた可能性がある。もし、副課題の難易度操作の質を統制し、実験変数の数量的変化によってのみ難易度を操作したならば、エラー検出機能における注意資源は、一定の閾値を境として一挙に離散的に投入されるか、あるいは段階

的・連続的に投入されるのかといった配分方略を明確に示すことができる。そこで本研究では、副課題に Sternberg memory search task (Sternberg, 1966)を用いて、エラー検出機能における注意資源の配分方略と ERN 振幅変動との関係を検討した。

Sternberg memory search task は記憶探索課題であり、記憶負荷量を増減させることで難易度の段階づけを数量的に操作できる特徴がある (Wickens, Hyman, Dellinger, Taylor, & Meador, 1986)。この課題には刺激と反応の対応が実験中に一貫する CM (consistent mapping)条件と、実験のセッションごとに変動する VM (varied mapping)条件がある。CM 条件の方が課題に習熟しやすく、一度課題に習熟すると課題遂行へ注意資源を投入する必要はなくなると報告されている (Shiffrin & Schneider, 1977)。したがって、本研究では VM 条件のみを使用した。

第2章 方法

被験者 四肢が右利きの成人9名(男子4名,女子5名)を被験者とした。被験者の年齢は 23.2 ± 2.5 歳であった。

課題 本実験では単一課題あるいは二重課題を遂行する4条件を設定した。被験者は単一条件では視覚的な認知的葛藤課題のみを遂行し、二重課題では、主課題である認知的葛藤課題と同時に副課題である Sternberg memory search task を遂行した。

認知的葛藤課題は、“H”と“S”で構成される文字列の中央文字(標的刺激)に対して反応するもので、標的刺激の両側4文字はノイズ刺激であった。視覚刺激は標的文字とノイズ刺激との組み合わせから、一致刺激(HHHHH, SSSSS)と不一致刺激(SSHSS, HHS HH)に分類された。各刺激はCRT上に一致刺激(40%)、不一致刺激(60%)の割合でランダム呈示され、標的刺激に対してできるだけ速くかつ正確に、右第3指あるいは左第3指の伸展運動でキー上げ反応を行うように被験者に要請した。標的文字と反応手の割り当ては被験者間でカウンターバランスをとった。

Sternberg memory search task は、実験開始直前にアルファベットを短期間記憶し、CRT上に呈示される文字中に記憶した文字が存在するか否かを判断し、記憶した文字が存在する場合には、できるだけ正確に早く反応する作業である。記憶する文字は、2・4・6文字の3条件(以下、M2, M4, M6)とし、妨害文字もそれぞれ2・4・6文字の組み合わせ

とした。例えば、M2の文字がV, Bとすれば妨害文字は、メモリーに使用した文字以外のF, Zなどを用いる。V, Bの2文字がCRT上に呈示されたときは、記憶した文字と一致しているため、右足の足趾背屈運動でキー上げを行うように教示した。F, Zの場合は記憶した文字と一致していないので、左足の足趾背屈運動でキー上げ反応を行うように教示した。4・6文字も同様に標的文字、妨害文字をランダムに組み合わせた。いずれの条件も正答が50%となるようにした。また、本実験では Sternberg memory search task の中で、ブロックごとに標的文字が変化する VM 課題のみを使用した。

手続き 被験者は主課題に対して、対応する手の第3指伸展運動で反応し、副課題に対しては、対応する足趾の背屈運動で反応した。単一条件は、CRT上に文字列を200ms間呈示し、試行間隔は3000msとした。また、M2・M4・M6の二重課題条件では、文字列1字のアルファベット・文字列の順序で交互に刺激呈示した。各二重課題条件ではCRT上に文字列・1字のアルファベットを200ms間呈示し、試行間隔は1500msとした。各二重課題条件では、被験者は主課題と副課題を同時に遂行した。単一条件、M2条件、M4条件、M6条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。各条件4ブロック(100試行/ブロック)、計16ブロックを実施した。各ブロックとも最初の3試行はダミー試行とし、解析から除外した。

記録および分析方法 実験1と同様であった。

第3章 結果

パフォーマンス

Fig.3-1 上段は主課題・正反応試行の平均反応時間を、課題条件別および刺激呈示別に求めた結果である。刺激一致性(2)×課題条件(4)の2要因分散分析の結果、一致刺激(Compatible)よりも不一致刺激(Incompatible)の反応時間の遅延が認められた($F(1, 8)=43.43, p<.001$)。また課題条件間の差も有意であり($F(3, 24)=8.45, p<.001$)、多重比較の結果、反応時間は単一条件(Single) M2・M4条件 M6条件の順に有意に遅延した(いずれも $p<.05$)。

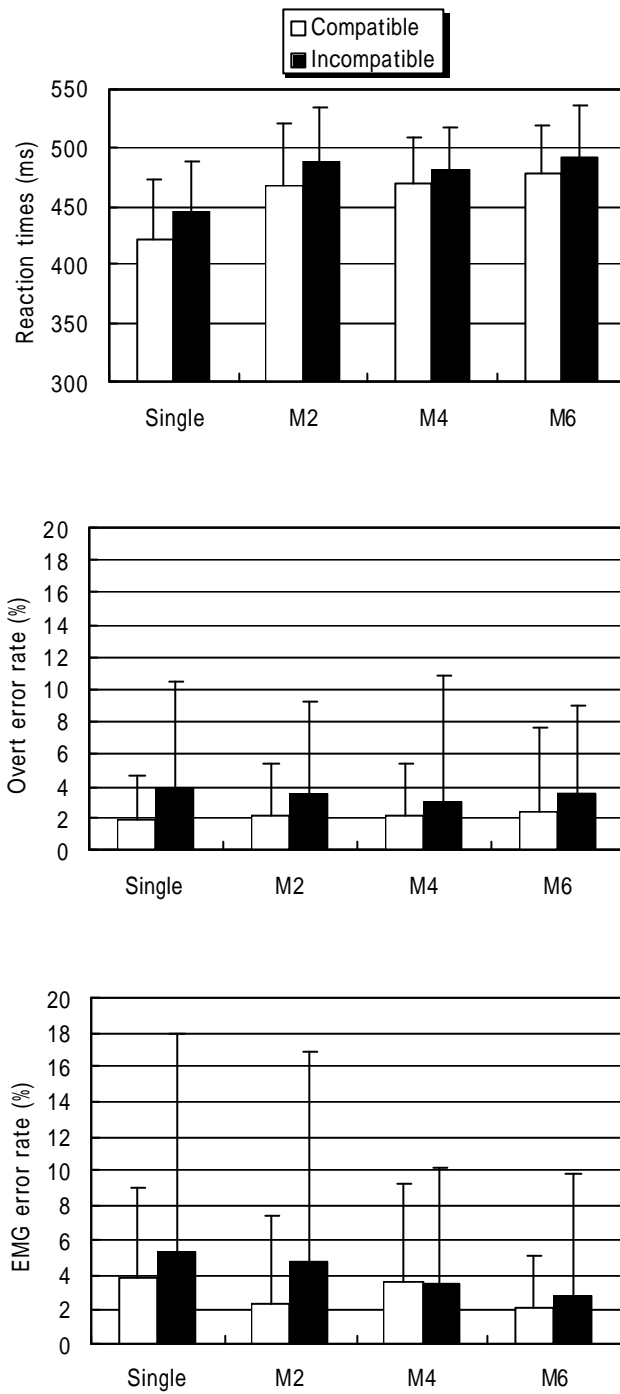


Fig.3-1 主課題の課題条件別・刺激別の平均反応時間, 平均 Overt エラー率, EMGエラー率.

Fig.3-1 中段は、主課題の平均 Overt エラー率を課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率は有意に高かった ($F(1, 8)=27.04, p<.001$)。

Fig.3-1 下段は、主課題の平均 EMG エラー率を課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対する EMG エラー率は有意に高かった ($F(1, 8)=8.89, p<.05$)。また課題条件間の差も有意であり ($F(3, 24)=5.40, p<.01$)、多重比較の結果、EMG エラー率は単一条件に比較して M6 条件で増加した ($p<.05$)。

主課題・不一致刺激の ERN

主課題の一致刺激では Overt エラーの試行数が少なく、十分な加算回数が確保できなかったため、解析対象を主課題の不一致刺激に限定した。Fig.3-2 は、主課題・反応開始時点をトリガとした Cz の総加算平均波形を、反応の正誤別および課題条件別に示したものである。各条件ともに Overt エラー試行では反応後 0-100 ms 区間で陰性シフトする ERN が同定された。

Fig.3-3 は、各条件の ERN の平均頂点振幅値を課題条件別に求めた結果である。ERN の平均頂点振幅について 1 要因分散分析を行ったところ、有意差がみられた ($F(3, 24)=3.30, \eta^2=.88, p<.05$)。多重比較の結果、単一条件・M4 条件と比較して M6 条件の ERN 頂点振幅が有意に減少した ($p<.05$)。

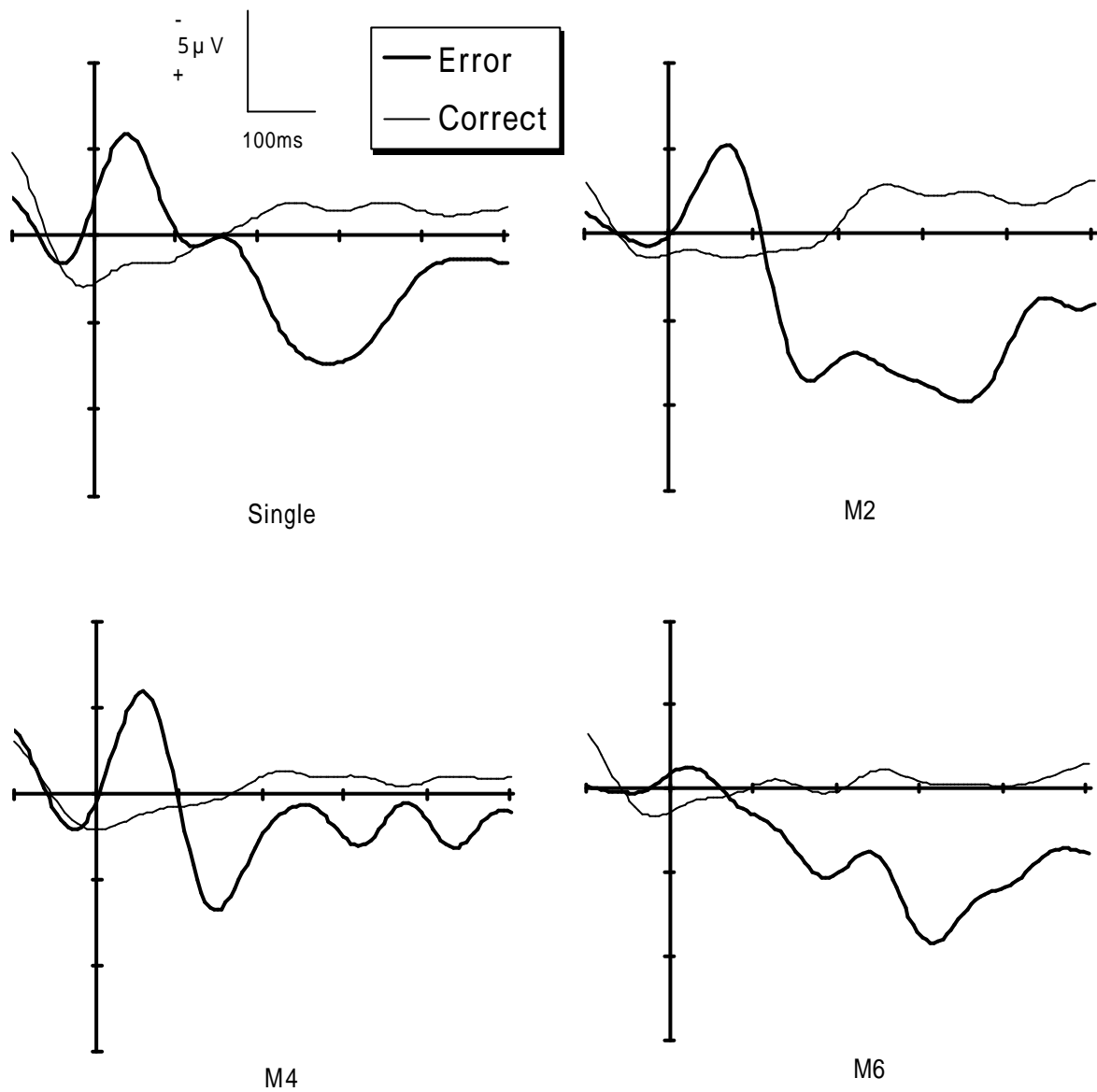


Fig.3-2 Czにおける主課題・反応の正誤別のERP波形. 不一致刺激のみ加算. 縦軸は反応開始時点.

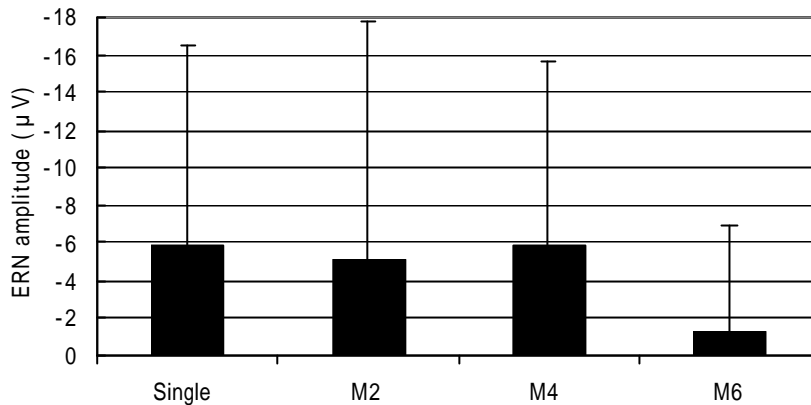


Fig.3-3 主課題・課題条件別の ERN 振幅. 不一致刺激のみ加算.

第4章 考察

本実験では、ERN 振幅を指標として、エラー検出機能における注意資源の配分方略が一定の閾値を境として離散的に投入されるのか、あるいは段階的・連続的に投入されるのか否かを検討した。その結果、刺激の一致性に関わらず主課題の平均反応時間は、単一条件 M2・M4 条件 M6 条件の順に段階的に遅延した。刺激入力から反応出力に至る認知情報処理全体の効率を反映する主課題・反応時間は、主課題に対する認知情報処理全体の注意資源量を反映している。注意資源が配分されないと処理効率は低下し、反応時間が遅延する。したがって、この結果は、副課題の難易度上昇に伴って注意資源が副課題へ多く配分され、そのトレードオフとして主課題の注意資源量が減少したことを示唆している。

主課題の ERN 頂点振幅は、単一条件・M4 条件と比較して M6 条件で有意に減少した。M6 条件以外では条件差はみられなかった。他の条件に比べて最も難易度の高い条件のみで ERN 振幅が有意に減少した結果は、実験 1・2 の知見と合致する。これらの知見から、副課題の難易度上昇によって副課題への注意資源量が一定量を越えて配分されると、主課題・エラー検出機能に対する注意資源配分量は、一挙に・離散的に減少する配

分方略がとられたことが推察できる。主課題・平均反応時間は段階的な副課題・難易度変化に付随して、段階的に変動したが、主課題・ERN 頂点振幅は段階的に変動することはなかった。

二重課題における注意資源の配分方略を検討するうえで、非常に使用頻度の高い生理指標が P300 である。P300 は視覚刺激や聴覚刺激の評価に関する認知処理機能を反映する ERP 成分 (Kutas et al., 1977) であるが、その P300 振幅の増減が刺激評価へ配分される注意資源量を示すといわれている (Kok, 1997; 2001)。Kok (2001) によれば、二重課題を用いた P300 研究は課題難易度パラダイムと、課題優先度パラダイムに大別される。課題難易度パラダイムは、主課題の課題難易度を变化させることで、その注意資源の配分方略を副課題・P300 振幅を指標として検討する手法である (例えば、Wickens et al., 1983)。課題優先度パラダイムは、主副の両課題に対する注意資源量の配分の割合を意識的に制御させることで、注意資源のトレードオフを主副の両 P300 振幅を比較検討する手法である。例えば、Strayer & Kramer (1990) は交互に呈示される主副両課題の視覚刺激に対して、全試行中の 100% の主課題を遂行し、全試行中の 0% 一切遂行しない 100/0 条件、主課題を 90% 副課題を 10% 遂行する 90/10 条件、以下同様に 50/50 条件、10/90 条件、0/100 条件の 5 条件を設定し、課題優先度の意識的制御による注意資源量の変化を P300 振幅変動によって示した。

上記の両パラダイムに共通した知見は、難易度の段階的变化に伴って P300 振幅も段階的に変動することである。ただし、これらの知見を詳細に検討すると、課題優先度パラダイムでは比較的 P300 振幅が段階的に変動しやすい。他方、課題難易度パラダイムでは段階的 P300 振幅変動がみられる場合 (篠田ら., 1998; Wickens et al., 1983) と、段階的 P300 振幅変動がみられない場合がある (Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin, 1980; Kramer & Strayer, 1988)。これらの知見から、課題優先度の操作による意識的な注意資源配分の制御よりも、課題難易度の変動の方が、段階的な変動による配分方略はとられにくくなると推察される。

本実験の課題は、副課題の記憶負荷量の変化によって課題難易度を操作したものであり、課題難易度パラダイムに分類される。上記の知見を援用して本実験の結果を解釈すると、課題優先度パラダイム下の意識的な注意資源の配分方略ではなく、課題難易度

パラダイムであったため、主課題・ERN 振幅は段階的な変動を示さなかった可能性がある。

Gehring et al (1993)の課題遂行の速さと正確さのトレードオフを操作した研究では、速さ重視条件 中間条件 正確さ重視条件の順に、段階的に ERN 振幅が増大した。彼の課題は、条件間で速さと正確さに対する意識的な注意の方向性を操作したことから、課題優先度パラダイムに極めて類似した手法がとられたと推察できる。彼の知見と本実験の知見を比較すると、エラー検出機能における注意資源は、被験者の意識的な注意の制御などの内的要因に対しては段階的な (trade off)変動を示し、課題難易度の操作などの外的要因に対しては離散的な (all or none)変動を示す配分方略がとられることが示唆された。

第5部 実験4: 連続的エラーとエラー関連陰性電位 (ERN)

第1章 目的

2種類の刺激の一方に対して反応し、他方には反応しない Go/NoGo 課題を用いた研究では、すでに ERN が観察されている。しかしながら、それらはボタン押しなどの離散型装置による実験 (Falkenstein et al., 1995; 岩木, 1998) や、握力計を用いた連続型装置による複数の反応選択肢を変数とした複合的 Go/NoGo 課題の実験 (Scheffers et al., 1996) であり、連続型装置を使用した標準的 Go/NoGo 課題による実験はまだ行われていない。そこで、本研究では片手で反応する握力計を用い、標準的な Go/NoGo 課題によって、エラー検出と ERN との関係を検討した。この場合、NoGo 試行におけるエラーは、力量の発揮および EMG のみの出力と定義される。一方、Go 試行におけるエラーは、標的強度からの逸脱と定義される。Go 試行のエラーは、行動指標上は正反応であるものの、出力強度のエラー (連続的エラー) であるため、従来の ERN 研究のボタン押しによる離散的错误とは性質が異なる。本実験では、Go 試行のエラーにおいて、ERN 様成分が出現するか否かについても検討した。

ところで、ERN が誘発されるエラー検出機能は、運動遂行と同時に脳へフィードバックされる末梢の効果器 (筋肉) の感覚入力と、大脳皮質運動関連領域から筋肉へ出力された運動命令 (Angel, 1976) とを比較・照合することで可能になるという説が有力である (Gehring et al., 1993; Lewis, Zee, Gaymard, & Guthrie, 1994)。このような筋肉の感覚入力と運動命令との比較には、主観的判断の影響が予想される。したがって、本実験では1試行ごとに標的強度からの逸脱の程度に対する確信度を評定し、確信度と Go 試行のエラーで誘発される ERN 様成分との関係についても検討した。

第2章 方法

被験者 常用手が右手の成人7名 (男子5名, 女子2名) を被験者とした。被験者の年齢は 25.0 ± 2.0 歳で、視力は正常 (矯正を含む) であった。

刺激 被験者に反応を指示する視覚刺激として、CRT 中央に赤色または緑色の円図形を

呈示した。刺激呈示の制御にはタキストスコープ（岩通アイセル社製 IS-702 AV タキストスコ - プ）と PC（NEC 製 PC-9801DX）を用いた。

課題 被験者は、右手を用いて、Go刺激に対して握力計をできるだけ速く正確にバリスティックな握力把握することによって、予め設定された標的強度値を出力した。NoGo刺激に対しては握力把握を行わなかった。刺激の色に対する Go/NoGo の割り当ては被験者間でカウンターバランスをとった。また、Go 刺激と NoGo 刺激はそれぞれ等確率でランダムに呈示した。

手続き 被験者には、右手を握力計に軽く添えた状態で楽な姿勢をとるように教示した。被験者の前方 1 m に CRT を 2 台水平に設置した。左側の CRT は、注視点（+ 型）呈示の 1400 ms 後に 2 種類の刺激を等確率でランダムに 100 ms 間呈示した。被験者は Go 刺激に対して最大握力の 10% の力量（標的強度値、平均 3.9 kgf）を発揮することで反応した。反応終了後約 4 s には、右側の CRT 上に水平方向の棒グラフ（Fig.4-1）を表示して、実際の力量を視覚的にフィードバックした。これによって、被験者は実際に出力した力量と標的強度値との隔たりを知ることができた。視覚的フィードバックでは、棒グラフ上の標的強度位置に赤色の縦線を表示し、同時にその縦線を中心とした黄色と赤色の 2 種類の枠線を表示した。被験者は本実験前に課題を 20 試行練習し、その時の握力把握の力量の平均を測定しているが、黄色枠線は練習試行における平均力量の 1/2 SD の範囲であり、赤色枠線は 1 SD の範囲であった。赤色枠線内の力量を正解範囲とし、範囲外の力量は誤反応とみなした。

また、視覚的フィードバック呈示の約 2 s 前、つまり反応終了後約 2 s では、被験者は実際に出力した力量が標的強度値にどの程度近いかな否か（確信度）を評定した。確信度の評定は前方 30 cm に設置したボタンで行った。実際の力量が標的強度値に相当近い（黄色の枠線内の範囲）と判断したらボタン 1 を、やや近い（黄色の枠線外で、赤色の枠線内の範囲）と判断したらボタン 2 を、はずれた（赤色の枠線外）と判断したらボタン 3 を、途中で反応を抑制した場合あるいは反応しなかった場合はボタン 4 を左手で押した。

被験者は、はじめに正解範囲を設定するための 20 試行と、本実験用の練習 20 試行を行った後、1 ブロックが 50 試行の本実験を 6 ブロック行った。被験者は各ブロック終了後、5 分程度休憩した。また練習の際、被験者は握力把握の反応様式、眼球運動の抑

制方法に関する注意を受けた。

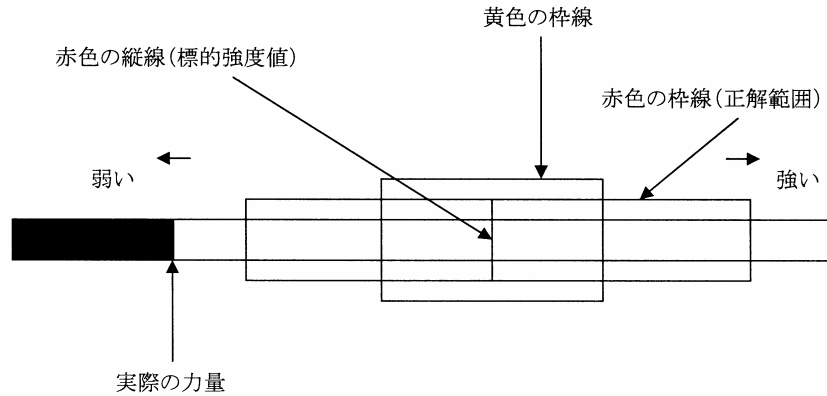


Fig.4-1 視覚的フィードバック

記録および分析方法 脳波 (EEG), 眼球運動 (EOG), 筋電図 (EMG), 握力計の荷重曲線を脳波計 (NEC 三栄製 Synafit1000)を用いて同時記録した。EEGは, Fz, Cz から両耳垂結合を基準に時定数 3 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。EOGは左眼窩上下縁部から時定数 3 s で導出した。EMGは右前腕の尺側手根屈筋群から時定数 0.03 s で導出した。電極は全て銀塩化銀電極を用いた。全測定事象はデータレコーダ (NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder)に磁気記録し, その後サンプリング周波数 200 Hz で A/D 変換した。全測定事象は試行毎に CRT 上に表示し, 眼球運動, 体動などのアーチファクト混入試行を除外したうえで, 加算平均処理を行った。

EMG 振幅は両波整流し, 分析区間前半の 3-4 s 間 (刺激呈示前の区間)の標準偏差 (SD)を試行毎に算出した (以下, 基線部 SD)。各試行における反応の有無を判定するため, 反応開始後の EMG 振幅がその基線部 SD の 4 倍に達しない場合を無反応, 4 倍以上の場合は反応が生じたと定義した。反応の有無の基準を上記のように設定したのは, 反応の有無を判定するために EMG 振幅を使用する場合, 刺激呈示前の基線部振幅の変動 (基線部 SD)をノイズ変動と考え, そのノイズ変動と刺激呈示後の EMG 振幅を区別

することが反応の有無の基準になるからである。しかし、このような基準は研究者がそれぞれ各自で経験的に定めている段階であり、主に試行ごとに基線部 SD を計測し、その 3-4 倍を当該試行の基準にする方法が採用されている (例えば、岩木, 1998; Smid, Mulder, Mulder, & Brands, 1992)。本研究では基線部 SD の 4 倍を基準とした。

Go 試行における正反応 (正反応 Go 試行)は、反応開始後の EMG 振幅が基線部 SD の 4 倍以上に達し、握力把握の力量が赤色の枠線内 (Fig.4-1)で出力した場合とし、それ以外の力量はエラーとした。

NoGo 試行における正反応 (正反応 NoGo 試行)は、反応開始後の EMG 振幅が基線部 SD の 4 倍に達しなかった場合とした。4 倍以上に達した場合、および EMG に加えて握力把握の力量が出力された場合はエラーとした。

Go 試行と NoGo 試行の両条件について、加算平均処理は反応開始後の EMG 振幅が基線部 SD の 4 倍に達したポイントからみて、その直前にあたる上向脚の開始時点 (EMG 起始時点)と、刺激呈示時点のそれぞれをトリガにして行った。

また、オフライン処理で、脳波に 10 Hz の低域遮断フィルターをかけた。

第 3 章 結果

パフォーマンス

全試行における正反応 Go 試行の割合は 90%、誤反応 Go 試行の割合は 10%であった。正反応 Go 試行の EMG-RT (刺激呈示時点から EMG 開始時点までの潜時)は 361 ± 170 ms (mean \pm SD)だった。正反応 NoGo 試行の割合は 97%、誤反応 NoGo 試行の割合は 3%で、誤反応 NoGo 試行の EMG-RT の平均は 363 ± 301 ms であった。正反応 Go 試行および誤反応 NoGo 試行の EMG-RT の平均について t 検定をおこなったところ、有意差は認められなかった。また、全 Go 試行において、握力把握の力量が視覚的フィードバックの、黄色枠線の範囲内 (正解範囲内)だった試行の割合は 60%、赤色枠線の範囲内(正解範囲内)だった試行の割合は 30%、赤色枠線の範囲外 (正解範囲外)だった試行の割合は 10%であった。前記の黄色枠線の範囲内 (正解範囲内)だった試行で実際の力量と確信度の評価が一致した試行の割合は 31%、実際の力量と確信度の評価が一致せず、なおかつ確信度の評価が正解範囲外だった試行の割合は 3%であった。赤色枠線の範囲内 (正解範囲

内)だった試行で実際の力量と確信度の評定が一致した試行の割合は 13% , 実際の力量と確信度の評定が一致せず, なおかつ確信度の評定が正解範囲外だった試行の割合は 6%であった .

ERP

Fig.4-2 は, EMG 開始時点をトリガとした Go 試行 (細実線)と誤反応 NoGo 試行 (太実線)の EEG の総加算平均波形である. EMG 開始後の 100-200 ms 間で Go 試行よりも誤反応 NoGo 試行の方が陰性方向にシフトしている .そこで EMG 開始後 300 ms までの各計測区間の平均振幅値について 部位 (Fz, Cz)と反応の正誤 (Go 試行, 誤反応 NoGo 試行)の 2 要因分散分析を行った. その結果, 0-100 ms の区間では部位の主効果のみが有意傾向であった ($F(1,6)=4.13, p<.10$) . 100-200 ms の区間では部位 ($F(1,6)=8.94, p<.05$)と反応の正誤 ($F(1,6)=30.67, p<.01$)のいずれの主効果も有意であり, 交互作用はなかった . 200-300 ms の区間では部位の主効果のみが有意傾向 ($F(1,6)=5.23, p<.10$)であった. このように ,特に 100-200 ms の区間は ,Go 試行よりも誤反応 NoGo 試行の方が陰性であり , Cz 部位よりも Fz 部位の方が全体的に陰性にシフトしていた. また, より詳細な時間分解能で ERP 波形の変動を検討するため ,各被験者の誤反応 NoGo 試行の波形から Go 試行の波形を引いた差波形を求め ,この差波形と基線 (0 V)との差を EMG開始後から 5 ms ごとに t 検定を行った. その結果, Fz では 115-205 ms , Cz では 125-265 ms の区間に有意差が認められた. この結果は, 従来から報告されている ERN の出現潜時に合致している. このように頭皮上分布および出現潜時から, 誤反応 NoGo 試行の陰性変動は ERN であると同定される .

誤反応 NoGo 試行における ERN 振幅は, Cz よりも Fz の方で有意に増大し, その波形が明瞭であったことから , 誤反応 Go 試行の ERP 成分については Fz 部位のみを分析対象とした .

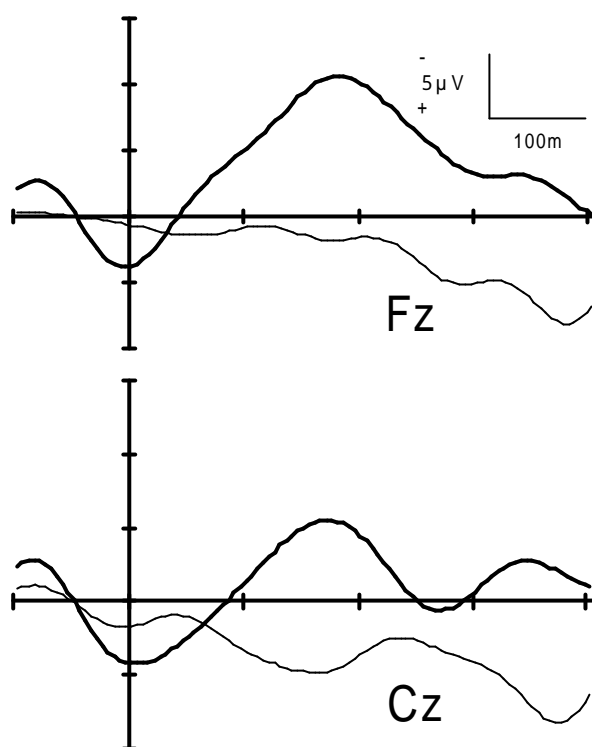


Fig.4-2 EMG開始時点を通リガとしたERP波形. 正反応Go試行(細実線)とエラーNoGo試行(太実線). EMG試行縦軸は開始時点.

Fig.4-3はEMG開始時点を通リガとした正反応Go試行(細実線)と誤反応Go試行(太実線)のEEGの総加算平均波形である. 正反応Go試行よりも誤反応Go試行のERP成分が,陰性方向へシフト(ERN様のERP成分の出現)している.そこでEMG開始後300msまでの各計測区間の,正反応Go試行および誤反応Go試行の平均振幅値をt検定したところ,EMG開始後100-200msの区間において有意傾向が認められた($t(3)=2.77$, $p<.10$).

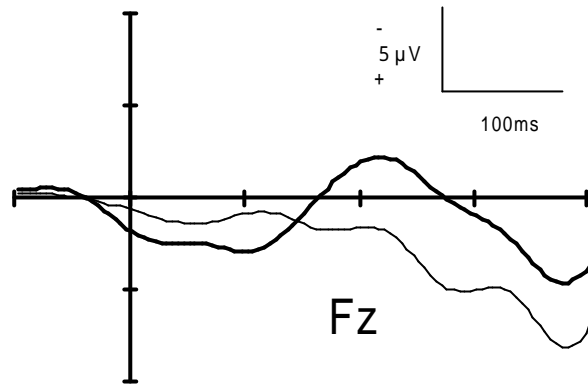


Fig.4-3 Go 試行の EMG開始時点トリガとした ERP 波形. 正反応 Go 試行 (細実線)とエラー Go 試行 (太実線). EMG試行縦軸は開始時点.

Fig.4-4 は誤反応 Go 試行について、正解範囲以上の力量を出力した (large error)試行 (太実線)と正解範囲に至らない力量を出力した (small error)試行 (細実線)に分類し、EMG 開始時点トリガとして求めた EEG の総加算平均波形である .EMG 開始後 300 ms までの各計測区間の平均振幅値について t 検定を行ったが、いずれの区間においても有意差は認められなかった .

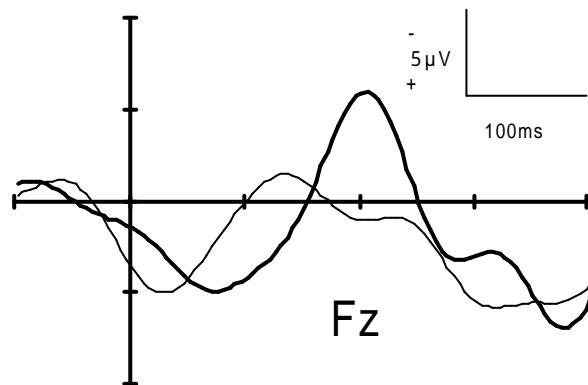


Fig.4-4 エラー Go 試行の EMG開始時点トリガとした ERP 波形. 正解範囲に達しない力量を出力した (small error) エラー Go 試行 (細実線)と正解範囲を超える力量を出力した (large error)エラー Go 試行 (太実線). 縦軸は EMG開始時点.

Fig.4-5 は実際に出力した力量が正解範囲内だった Go 試行の力量と、確信度の評定が一致した試行 (細実線), および力量と確信度の評定が一致せずなおかつ確信度の評定が正解範囲外だった試行 (太実線)の EEG の総加算平均波形である。実際に出力した力量が正解範囲内だったにもかかわらず, 実際の力量と確信度の評定が一致せず, なおかつ確信度の評定が正解範囲外だった試行に ERN 様成分が出現した。そこで, EMG 開始後 300 ms までの各計測区間の平均振幅値について t 検定を行ったところ, EMG 開始後 100-200 ms の区間で有意差が認められた ($t(3)=3.29, p<.05$)。

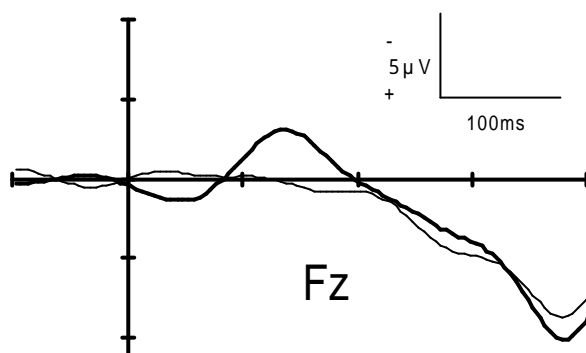


Fig.4-5 正反応 Go 試行の EMG 開始時点トリガとした確信度別 ERP 波形。
Go 試行において確信度の評定が正解範囲内、実際に出力した力量が正解範囲内だった試行 (細実線)と、確信度の評定が正解範囲外であるにも関わらず、実際に出力した力量が正解範囲内だった試行 (太実線)。縦軸は EMG 開始時点。

Fig.4-6 は, 刺激呈示時点トリガとした正反応 Go 試行 (実線), 正反応 NoGo 試行 (細実線) および誤反応 NoGo 試行 (太実線)の EEG の総加算平均波形である。正反応 NoGo 試行の Fz 部位に, 約 220 ms の頂点潜時を持つ陰性電位が出現しており, 反応抑制機能を反映する NoGo 電位 (Gemba & Sasaki, 1989) と考えられる。そこで刺激呈示後 200 ms までの各計測区間の振幅値について, 部位と反応の種類 (正反応 Go 試行, 正反応 NoGo 試行)の 2 要因分散分析を行ったところ, 0-100 ms と 100-200 ms の区間でそれぞれ反応の種類の主効果のみ有意であった ($F(1,6)=8.42, p<.05$) ($F(1,6)=12.87, p<.05$)。ところで,

岩木 (1998)は NoGo 電位と ERN がオーバーラップすることを報告しているが 本研究における誤反応 NoGo 試行においては NoGo 電位とは別に 400-500 ms の区間に大きな陰性電位が出現した. つまり, 本研究では NoGo 電位と ERN がオーバーラップしたのではなく, この陰性電位が ERN だと考えられる. そこで刺激呈示後 500 ms までの各計測区間の振幅値について, 部位 (Fz, Cz)と反応の正誤 (正反応 Go 試行, 誤反応 NoGo 試行)の 2 要因分散分析を行ったところ, 0-100 ms, 100-200 ms, 200-300 ms いずれにも有意差はなかった. しかし, 300-400 ms の区間で部位の主効果 ($F(1,6)=8.24, p<.05$)と反応の正誤の主効果 ($F(1,6)=8.06, p<.05$)がそれぞれ有意であり, 交互作用はなかった. 400-500 ms の区間も部位の主効果 ($F(1,6)=10.60, p<.05$)と反応の正誤の主効果 ($F(1,6)=23.37, p<.01$)がそれぞれ有意であり, 交互作用はなかった.

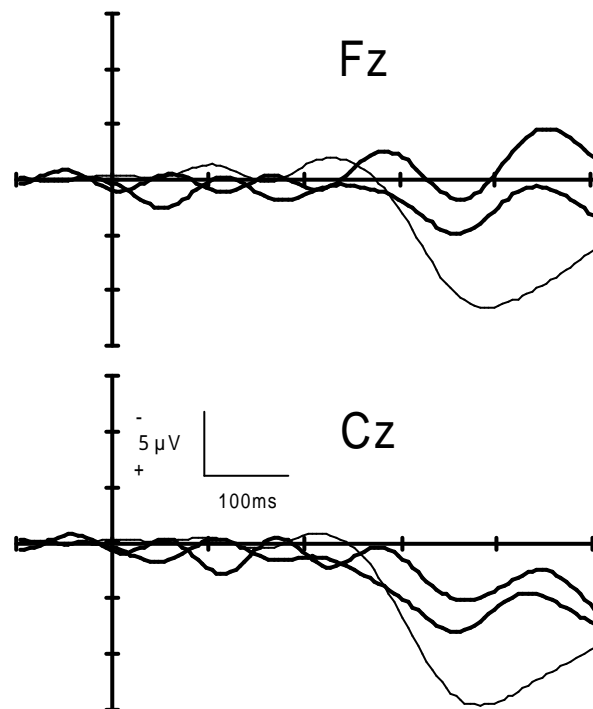


Fig.4-6 刺激呈示時点トリガとした ERP 波形. 正反応 Go 試行 (実線), 正反応 NoGo 試行 (細実線). エラー NoGo 試行 (太実線). 縦軸は EMG 試行開始時点.

第4章 考察

本実験では、握力計を用いた Go/NoGo 課題下の誤反応で誘発される ERP を検討した。その結果、NoGo 試行の誤反応時において、EMG 開始後 100-200 ms 区間に、正反応 Go 試行よりも有意な陰性方向へのシフトがみられ、ERN と同定された。しかしながら、従来の研究における ERN 波形は、EMG 開始後 100 ms を頂点として急峻に出現しているのに対して、本研究では全体的に緩徐であった。これは、被験者の内観報告(反応の抑制よりも、標的強度値を出力することが気になった)から、注意の大半が Go 試行の標的強度値の出力に向けられたため、エラーの検出に関する敏感さが減少した結果と考えられる。Falkenstein et al. (1991)は刺激モダリティ (視覚・聴覚)を実験変数として操作することにより被験者の注意を分割し、注意の分割が ERN 波形に及ぼす効果を検討した結果、注意が拡散される条件の方が ERN の頂点潜時は遅延することを示した。Scheffers et al. (1999)は Sternberg search task において、課題難易度の上昇に伴う注意資源配分量の減少によってパフォーマンスの成績が落ちると (反応時間が延長し、誤反応率が増加する)、ERN 振幅は減少すると報告している。これらの研究結果は注意の配分によって ERN 波形が変動することを示唆したものであり、本研究における ERN 波形が注意に影響されたとする上記解釈は妥当であると言える。また、Scheffers et al. (1996)は、ERN 振幅の変動はエラー検出処理機能がエラー認知の程度を反映しており、そのエラー検出処理機能は課題特性によって大きく影響されると結論づけている。

本実験では、NoGo 試行における離散的错误とは性質が異なる Go 試行の連続的错误においても ERN 様成分が観察された。しかしながら、握力計による力量発揮の課題では、誤反応試行の力量が小さい程 ERN 振幅が増大するという報告もあることから (Gehring et al., 1993)、本研究の結果は Go 試行の連続的错误の検出によるものではなく、握力把握の力量の知覚と関連している可能性がある。そこで、力量の小さい誤反応 Go 試行と力量の大きい誤反応 Go 試行の ERP 成分を比較したところ、有意差はなかった。したがって、力量の知覚によるものではなく、Go 試行の連続的错误検出によって惹起された ERN 様の電位であると考えられる。このように Go 試行の連続的错误、すなわち反応出力の強度に対し、標的強度値と実際に出力された力量とのずれを検出する脳活動が観察されたことは非常に興味深い。

さらに、ERN 様成分と確信度との関係を検討したところ、実際に出力した力量が正解範囲内にもかかわらず、確信度の評定が正解範囲外だった場合にこの ERN 様成分が惹起された。P300 は刺激評価 (刺激の認知) を反映する ERP 成分であるが (Kutas et al., 1977)、標的音呈示に対する被験者の確信度が高い場合には、実際には標的音が呈示されていないにもかかわらず、正確に標的音を認知したときと同様の振幅を有する P300 が出現し、確信度が低くなるにつれて P300 振幅は減少する (Parasuraman, Richer, & Beatty, 1982; Squires, Hillyard, & Lindsay, 1973; Squires, Squires, & Hillyard, 1975)。本実験の結果は、誤反応 Go 試行における ERN 様成分が、P300 と同様に被験者のエラー検出に対する主観的判断に影響されることを示唆している。

また本実験では、誤反応 NoGo 試行の EMG-RT が岩木 (1998) の結果よりも遅かったことから、反応抑制機能を反映する NoGo 電位 (Gemba & Sasaki, 1989) に ERN がオーバーラップすることはなかったと考えられる。本研究における誤反応 NoGo 試行の EMG-RT が 362.7 ms であることから、むしろ ERN は刺激呈示後の 400-500 ms の区間に出現した陰性電位であると考えられる。Falkenstein et al (1995) は刺激呈示後約 400 ms 後に ERN が出現すると報告しており、本研究の結果と合致した。

部分的エラー (EMG のみ出現) と完全なエラー (ボタン押しや握力把握の力量を出力したエラー) では、ERN 振幅は異なることが報告されている (Gehring et al., 1993; Scheffers et al., 1996; 岩木, 1998)。しかし、本研究では誤反応 NoGo 試行数が非常に少なかったため、部分的エラーと完全なエラーに分類することはできなかった。実験課題を検討し、よりエラー数を増加させる工夫が必要であると思われる。

ところで、本研究を含めた ERN に関する研究は、ボタン押しなどの離散型装置を使用した実験と、握力計などの連続型装置を用いた実験に大きく 2 分類できる。しかしながら、離散型装置による ERN 研究の多くは両手第 2 指あるいは第 3 指での二者択一的な、単純な反応様式によるものであり、複雑な反応様式は扱っていない。また、連続型装置による ERN 研究は、全てが握力計を用いたものである。したがって今後、日常生活 (例えば、パソコンのキーボード操作、車や自転車などのハンドル操作・ギアチェンジなど) でみられる複合的な要素からなる動作のエラー検出処理機能を明らかにするためには、離散型装置では運動継起 (中指 薬指 人差し指など、あらかじめ決められた順序

で指を動かしボタンを押すこと)の選択と実行による課題 (志堂寺, 1999)が注目されるであろうし, 連続型装置では打鍵運動 (正木・高澤・山崎, 1996)やジョイスティックによるトラッキング課題 (Higgins et al., 1970; Angel, 1976)が興味の対象になるであろう。また, 発声運動と ERP 成分との関係を検討した研究 (正木・高澤・山崎, 1997)もあり, ERN についてもこのような言語機能との関連から検討すれば, “言い間違い”などのエラー検出処理について興味深い知見が得られよう。

本研究の結果から, ERN がエラー検出処理を反映する ERP 成分であることが確認され, さらに ERN 波形がエラー検出処理機能を鋭敏に示す切れのよい指標であることが示唆された。したがって, 精神医学や人間工学など他の学問領域において, ERN の応用的研究を実施することは十分に可能であろう。松岡 (1997)は, ERP を含めた精神生理学的手法による認知処理障害の客観的評価が, 精神医学の進歩に大きく貢献したと述べている。すでに, パラノイア (妄想)症状を持つ統合失調症患者にはエラーを犯した時でも明瞭な ERN は出現しないという報告 (Kopp & Rist, 1999)があり, 統合失調症の客観的評価のツールとして, ERN の適用が期待できる。また, 人間工学領域のヒューマン・エラーに関する研究, 例えば航空機や自動車などの交通機関, 工場などにおける操作ミス, また操作ミスなどの人的エラーから引き起こされる重大事故の予防などに, ERN の応用が期待される。

第6部 実験5: 発声エラーとエラー関連陰性電位 (ERN)

第1章 目的

従来の ERN 研究では、選択反応時間課題下での手によるエラー反応を使用することが多かった。ERN に関連したモニタリングシステムを理解するためには、従来とは異なる性質の運動反応エラーから惹起される ERN 様成分を調べることも重要である。例えば、Holroyd et al. (1998)は手と足のそれぞれのエラーで誘発された ERN を比較したところ、各エラーによる ERN の脳内発生源は同一であることを発見し、ERN が反応モダリティに非依存的な成分であることを示した。また、眼球運動によるエラーでも同様に ERN は惹起される (Van't Ent & Apkarian, 1999)。このように反応モダリティに関わりなくエラー反応によって ERN が惹起されるため、言い間違いによる発声エラーによっても ERN の出現が予想される。そこで、本研究では発声エラーによって ERN が出現するか否かを検討した。発声エラーを誘発させるため、ストループ色名呼称課題を使用した。

ERP を用いた発声エラー研究では、発声関連電位 (vocalization-related cortical potentials: VRCPs)に関連した問題点がある。VRCP は発声に先行する運動関連電位 (movement-related cortical potential: MRCP)と発声直後に誘発される陰性の聴覚(性)誘発電位で構成される (Deecke, Engel, & Lang, 1986; McAdam & Whitaker, 1971)。この陰性の聴覚(性)誘発電位は、反応の正確さに関わりなく発声によって惹起される成分であり、ERN とは異なる成分である。しかし、聴覚(性)誘発電位は ERN と頂点潜時が等しく、発声後 100ms を頂点として陰性方向に出現する。したがって、発声エラーに関するエラー検出を検討するためには、VRCP から ERN を分離・抽出する手続きが必要である。

近年、ホワイトノイズを継続的に呈示して被験者本人の発声をマスキングすると、発声直後の VRCP の振幅は劇的に減少することが報告されている (Gunji, Kakigi, & Hoshiyama, 2000)。本研究においても、ヘッドフォンからピンクノイズを呈示することで発声をマスキングし、VRCP を抑制して ERN が出現するか否かを検討した。

第2章 方法

被験者 健常な成人7名(男子5名,女子2名,平均年齢22.0歳,年齢範囲20-23歳)を被験者とした。

手続き ストループ色名呼称課題を使用した。常用漢字の赤,青,緑,黄の4つの文字をそれぞれ赤,青,緑,黄の4色に割り当てて表記し,刺激として呈示した。例えば,「赤」はそれぞれ赤,青,緑,黄の4色のいずれかで着色されて呈示される。このような文字と色との組み合わせから16種類の刺激を設定した。刺激は,被験者の前方1mに設置した17 inchのCRT上に,16種類の文字の中から1文字のみを呈示した。視角は $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ に設定した。被験者には各刺激の色の呼称をできるだけ速く正確に発声するよう教示した。1ブロックを72試行として全10ブロック実施した。各ブロックでは,16種類の刺激が等確率でランダムに呈示した。1ブロックのうち,25%の試行が文字と色が一致(一致刺激)しており,75%の試行が文字と色が不一致(不一致刺激)であった。

各試行は注視点「+」が1000 ms間呈示されることから開始し,それから注視点を刺激に替えて呈示した。刺激は刺激呈示後500 msまで呈示し続けた。刺激呈示後1000 ms以内に発声がない場合は,被験者が制限時間内の反応に失敗したことを示す「SKIP」という単語を呈示した。

本実験では以下の2条件を設定し,全ブロックの半分にあたる5ブロックを各条件に割り当てた。(1) non-masking 条件では,被験者がマスキングされることなく,自身の発声が聞き取れる状態で課題を遂行した。(2) masking 条件では,課題遂行中に継続してピンクノイズ(音圧80dB SPL)をヘッドフォンから呈示し,被験者が自身の発声を聞き取れないようにマスキングした状態で課題を遂行した。各条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。

記録および分析方法 脳波(EEG),眼球運動(EOG),筋電図(EMG)を脳波計(NEC三栄製 Synafit 1000)を用いて同時記録した。EEGは,Fz,Cz,Pzから両耳垂結合を基準に時定数5s,高域遮断周波数100Hzで導出した。EOGは左眼窩上下縁部から時定数5s,高域遮断周波数100Hzで導出した。EMGは口輪筋から時定数0.03s,高域遮断周波数1500Hzで導出した。電極は全て銀塩化銀電極を用い,接触抵抗値を5k以下とした。全測定事象はデータレコーダ(NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder)

にオンラインで磁気記録すると同時に、サンプリング周波数 200 Hz で A/D 変換した。 EEG は、 $\pm 150 \mu\text{V}$ 以上の眼球運動、体動などのアーチファクト混入試行は加算平均処理から除外した。 ERN 波形には 10 Hz のローパス・フィルタをかけた。

ERN 頂点振幅は、発声反応開始前 200 ms 間の平均電位をベースラインとして、発声反応後 0-100 ms 区間内の最大陰性電位を計測した。また、3 水準以上の繰り返しのある 2 要因分散分析では、タイプ エラーを抑制するために、Greenhouse-Geisser の による自由度補正を適用した。多重比較にはニューマン・クールズ法を用いた。

EMG には 30 Hz のローパス・フィルタをかけ、そして両波整流した。反応時間は刺激呈示時点から口元のマイクロフォンが発声を集音した時点までを、デジタルタイマーによってミリ秒単位で記録した。

第 3 章 結果

パフォーマンス

Fig.5-1 左側は正反応試行の平均反応時間を課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性(2)×課題条件(2)の2要因分散分析の結果、一致刺激 (Compatible) に比較して不一致刺激 (Incompatible)の反応時間の遅延が認められた ($F(1, 6)=23.27$, $p<.01$)。交互作用はなかった。

Fig.5-1 右側は主課題の平均エラー率を課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性(2)×課題条件(2)の2要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激のエラー率は有意に高かった ($F(1, 6)=100.23$, $p<.00005$)。

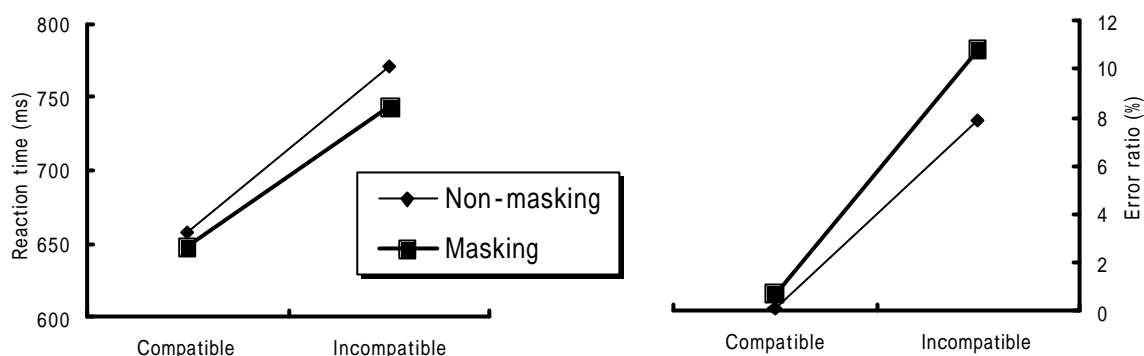


Fig.5-1 各条件の平均反応時間, 平均エラー率.

各条件の ERP

Fig.5-2 (a), 5-3 (a)は, 発声反応開始時点トリガとした正反応試行の総加算平均波形を, 頭皮上の部位別および課題条件別に示したものである. non-masking 条件では頂点潜時を約 85 ms とする鋭峻な陰性成分 (VRCP)が出現した. 他方, masking 条件では non-masking 条件よりもこの陰性成分 (VRCP)の振幅が減少した. 陰性成分の振幅について頭皮上の部位(3)×課題条件(2)の2要因分散分析を行ったところ, 課題条件 ($F(1, 6)=12.17, p<.05$)と頭皮上の部位 ($F(2, 12)=17.70, \eta^2=.98, p<.05$)いずれの主効果も有意であった. 多重比較の結果, 陰性成分は Fz よりも Cz ($p<.05$), Cz よりも Pz ($p<.01$)の方が有意に増大した. VRCP は後頭部優勢に出現した.

ERN

Fig.5-2 (b), 5-3 (b)は, masking 条件における反応開始時点トリガとした総加算平均波形を, 反応の正誤別および頭皮上の部位別に示したものである. エラー試行では反応後 0-100 ms 区間で陰性シフトする ERP 成分 (ERN 様成分)が出現したが, 正反応試行ではこの ERP 成分 (ERN 様成分)が出現しなかった. 陰性成分の振幅について頭皮上の部位(3)×反応の正誤(2)の2要因分散分析を行ったところ, 反応の正誤 ($F(1, 6)=9.61, p<.05$)と頭皮上の部位 ($F(2, 12)=9.08, \eta^2=.98, p<.005$)いずれの主効果も有意であった. 多重比較の結果, 陰性成分は Cz よりも Fz ($p<.10$), Pz よりも Fz ($p<.01$)の方が有意に増大した. ERN 様成分は前頭部優勢に出現した.

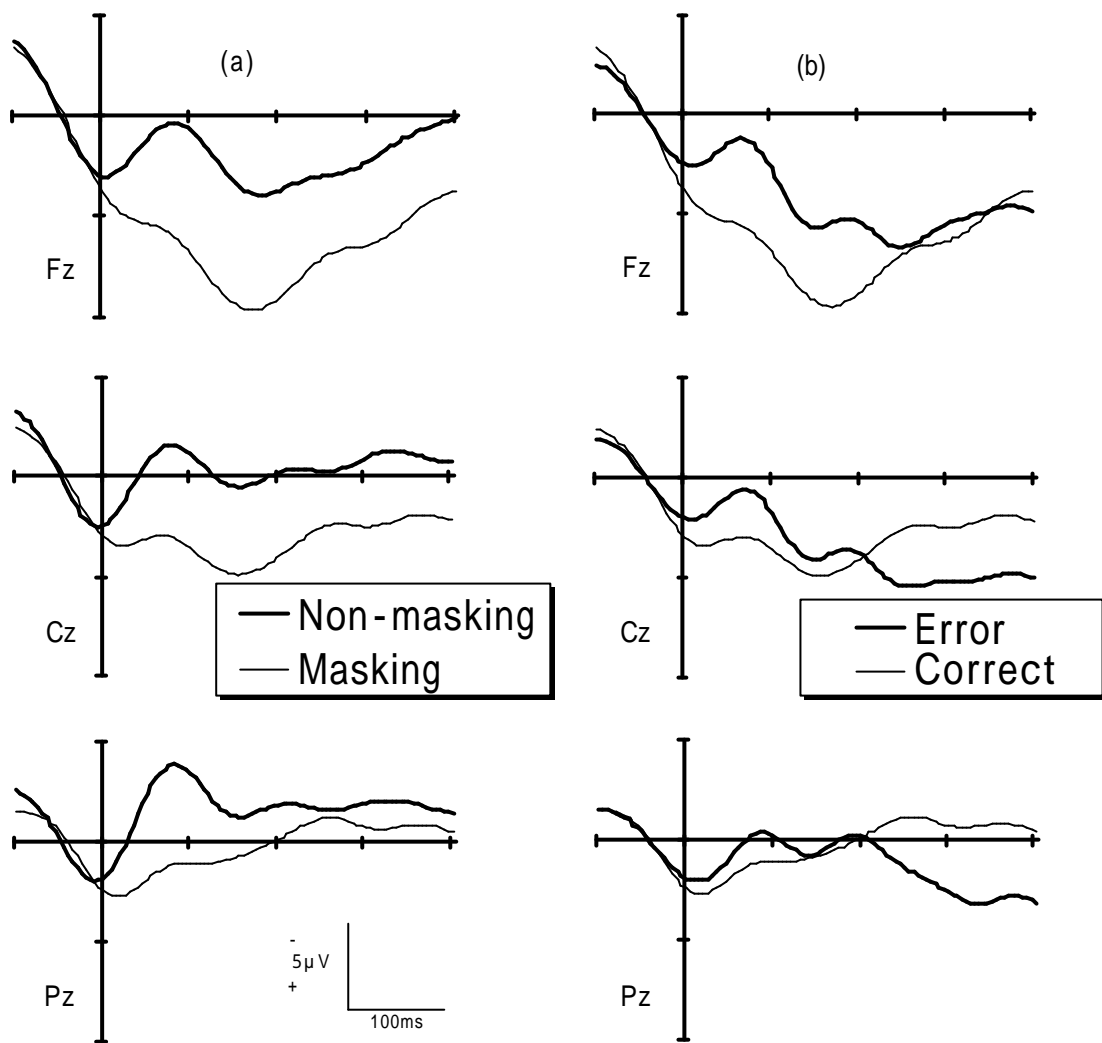


Fig.5-2 発声開始時点トリガとした各条件のERP波形. 縦軸は発声開始時点.

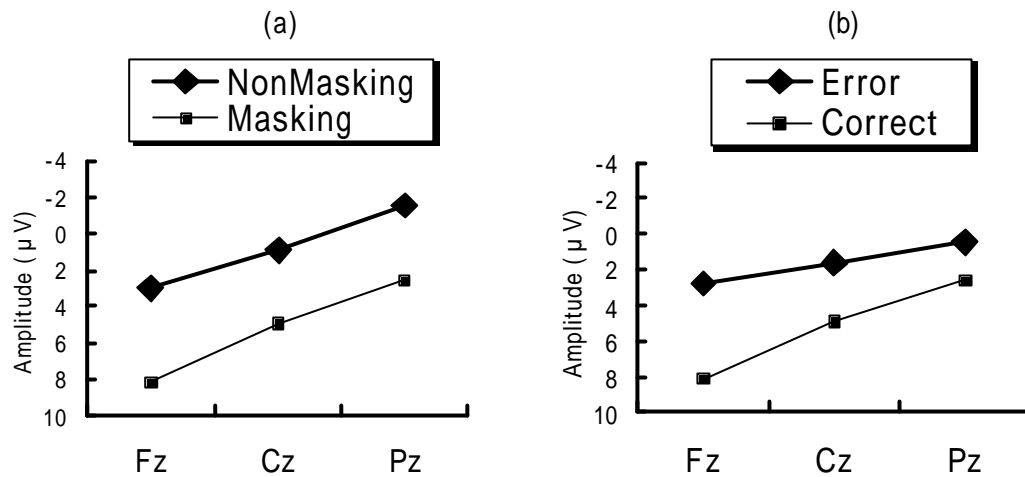


Fig.5-3 各条件・各部位のERP振幅

第4章 考察

本実験では発声エラーにおいても ERN が出現するか否かを検討した。その結果、(1) masking 条件における発声反応のエラーは、陰性の ERP 成分を惹起した。(2) masking 条件でエラー試行時の陰性成分の直後に陽性成分が出現した。(3) この陰性-陽性の移相パターンは、non-masking 条件と masking 条件の正反応試行には出現しなかった。(4) マスキングは発声によって誘発された VRCP を減少させたことが明らかになった。

本実験の発声エラーに誘発された ERP 成分の極性、頂点潜時、頭皮上分布は従来の ERN の特徴と一致することから、この成分は ERN だと結論づけることができよう。この解釈の妥当性は、ERN 様成分の出現直後に陽性成分 (Pe 様成分) が出現したという結果から支持される。Pe (error positivity) は ERN の直後に出現し、エラーの再認知を反映する成分だと報告されている (Falkenstein et al., 1991)。

発声による VRCP から ERN を抽出する手法として、マスキングは有用な手法である。マスキング効果の有用性は、2条件下の正反応試行時の ERP 波形を比較することで実証された。non-masking 条件に比較して masking 条件の VRCP 振幅が減少したこと、すなわちマスキングによって VRCP の出現を抑制したことは、Gunji et al. (2000) の知見と合致する。したがって、masking 条件下の発声エラーに誘発された ERN 様陰性成分は、VRCP

とオーバーラップしていないことが推測される。その上、masking 条件で正反応試行時よりもエラー試行時の ERP 波形が陰性方向にシフトしたことは、この ERN 様陰性成分が VRCP よりもエラー検出に関与することを強く示唆している。

また、非侵襲的脳機能研究法によって、VRCP は両側の聴覚野 (Gunji, Hoshiyama, & Kakigi, 2000), ERN は前部帯状皮質 (Carter et al., 1998; Dehaene et al., 1994; Holroyd et al., 1998) にそれぞれ脳内発生源が推定されている。したがって、上記のように ERN と VRCP は極めて類似した ERP 成分であるが、脳内発生源が異なるという事実からもそれぞれ異なる認知機能を反映した成分と推測できる。

第7部 総合論議

第1章 本研究のまとめと結論

第1節 エラー関連陰性電位 (ERN) と注意資源の配分方略

本研究の目的の1つは、ERNを指標としてエラー検出機能における注意資源の配分方略を検討することであった。本章では、本研究で得られた知見を中心に ERN と注意資源の配分方略の関係について論議する。

従来の注意資源に関する概念モデルを概観すると、入力モダリティ、中枢処理、反応出力といった認知情報処理過程の各処理段階に対して、単一の汎用注意資源から注意をそれぞれに配分する単一競合モデル (Kahneman, 1973) と、各処理段階が独自に有する注意資源を当該処理段階に配分する複数競合モデル (Wickens, 1980; 1984) に大別される。複数競合モデルによると、2つの実験課題を同時遂行する二重課題下では、両課題が同一の認知情報処理段階で処理される場合には注意資源の競合は激化するものの、異なる処理段階で処理される場合には注意資源の競合は生じないという。

Scheffers et al. (1999) は、Sternberg search taskを用いて、注意資源の配分方略に伴うERN振幅変動が単一競合モデルと複数競合モデルのいずれに適合するかを検討したところ、両モデルを支持する結果を得た。しかしながら、彼らは単一課題しか用いておらず、二重課題での注意資源競合を重視した複数競合モデルを検証するには不適切であったと考えられる。この点を克服するために、実験1では単一課題と二重課題を用いて注意資源の配分方略とERN振幅変動との関係を比較検討した。単一課題はEriksen & Eriksen (1974)の認知的葛藤課題を用いた。二重課題は、Eriksenの認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とした。さらに、副課題の難易度を操作した。その結果、ERN振幅は単一課題に比較して二重課題条件で減少するが、二重課題の難易度操作には影響されないことを見出した。この知見は、ERNの振幅変動が単一競合モデルと複数競合モデルのいずれにも適合しないことを示唆している。

しかしながら、実験1では入力モダリティ段階の難易度のみを操作し、反応出力段階

は操作していないため、ERN 振幅変動と複数競合モデルとの関連性を完全に否定することはできない。ERN は反応出力段階の処理を反映することから (Leuthold & Sommer, 1999) ,入力モダリティ段階よりも反応出力段階の難易度を操作する方が、複数競合モデルとの関連性を検討するうえで適しているからである。そこで実験 2 では、入力モダリティ段階と反応出力段階でそれぞれ難易度操作する二重課題条件を設定し、エラー検出機能に対する注意資源の配分方略と ERN との関係を検討した。その結果、実験 1 と同様に、単一課題条件に比較して二重課題条件の方が難易度は高く、それに伴って主課題の反応時間が延長し ERN 振幅が減少した。ERN 振幅変動が二重課題の難易度操作には影響されないという結果も実験 1 と合致した。また、反応出力段階ではなく、入力モダリティ段階に負荷をかけた条件で ERN 振幅は減少した。これらの結果は、ERN の振幅変動が単一競合モデルと複数競合モデルのいずれにも適合しないことをより明確に示し、ERN の脳内発生源である前部帯状皮質の機能的特性 (Bush et al., 2000)によってこの結果が惹起されたことを示唆している。

実験 1・2 では、副課題の難易度が低く、課題遂行に必要とされる注意資源量が閾値より低い場合は、主課題・エラー検出機能へ注意資源が一挙に投入される配分方略がとられた。他方 Gehring et al. (1993)は、課題遂行の速さを重視する条件、課題遂行の正確さを重視する条件、中立条件を設定し、各条件の ERN 波形を検討したところ、速さ重視 中立 正確さ重視の順に段階的に ERN 振幅が増大したと報告している。しかし実験 1・2 では、副課題の難易度を操作した際、聴覚刺激の周波数または呈示時間の弁別課題を設定したために、この 2 条件間の難易度には質的差異があったと考えられる。もし、副課題の難易度の質を同一に設定し、実験変数の数量的変化によってのみ難易度を操作したならば、エラー検出機能へ配分される注意資源が一定の閾値を越えると一挙に離散的に投入されるのか、あるいは段階的・連続的に投入されるのかといったエラー検出機能の注意資源配分方略を、ERN 振幅変動から明確に示すことが可能である。そこで実験 3 では、二重課題において主課題である認知的葛藤課題と同時に副課題である Sternberg memory search task を設定し、副課題の難易度の質を統制するために記憶負荷の数量的変化によってのみ難易度を操作することで、エラー検出機能における注意資源配分の方略を検討した。Sternberg memory search task は、実験開始直前にアルファベットを短期間

記憶し、CRT 上に呈示される文字中に記憶した文字が存在するか否かを判断し、記憶した文字が存在する場合には、できるだけ正確に速く反応する作業である。記憶する文字は、2・4・6文字の3条件（以下、M2、M4、M6）とし、妨害文字もそれぞれ2・4・6文字の組み合わせとした。その結果、主課題の平均反応時間は段階的な副課題・難易度変化に付随して段階的に変動したが、主課題のERN頂点振幅はM6条件のみが有意に減少し、副課題の難易度変化に伴って段階的に変動することはなかった。エラー検出機能における注意資源は、速さと正確さの意識的な注意のトレードオフなどの内的要因に対しては段階的な (trade off) 変動を示し、課題難易度の操作などの外的要因に対しては離散的な (all or none) 変動を示すような配分方略がとられると示唆された。

本研究で得られた二重課題下でのERN振幅変動の結果は、単一競合モデルおよび複数競合モデルのいずれも否定するものであった。ただし、各認知情報処理段階が単一の汎用資源を共有しているとする単一競合モデルの概念は、本研究の結果と合致しないが、単一競合モデルの注意資源の配分方略を支配する4つの基本方針は、本研究の結果を解釈するうえで援用することができる。4つの基本方針とは以下の通りである。

強度の強い刺激入力や弁別の困難な刺激などに反射的・強制的に配分される非意図的配分方略。意図的に注意資源を操作する配分方略。各認知情報処理段階に必要とされる注意資源の需要の評価を行い、その評価に従って配分方略が遂行される。ただし、限界容量を越える注意資源を必要とする作業が遂行される場合は、可能な作業のみに限定して注意資源を配分する方略をとる。その時々覚醒水準が注意資源の限界容量を増減させる。

実験1・2では、副課題である聴覚刺激の弁別が非常に困難な呈示時間条件のみで、主課題のERN振幅が有意に減少しており、上記の配分方略が適用されたと推察できる。換言すれば、非常に弁別困難な刺激へ強制的に注意が大量に配分されたため、その分エラー検出機能の注意資源が減少したものと推察できる。実験3では、副課題の記憶負荷量が最も多いM6条件のみで主課題のERN振幅が有意に減少しており、上記の配分方略が適用されたと推察できる。換言すれば、M6条件は記憶負荷量が多く、その処理に限界容量を越える程の注意資源が必要とされたため、エラー検出機能から記憶検索へ優先的に注意資源が配分されたのであろう。

エラー検出機能における注意資源の配分方略は、単一競合モデルおよび複数競合モデルのいずれにも合致しない方略がとられたことと、課題難易度の操作による外的要因に対して離散的 (all or none) な方略がとられたことが、本研究において明らかになった。

第2節 認知情報処理におけるエラー検出機能

実験 4・5 では、従来の ERN 研究で主な研究対象であった手のボタン押し反応による離散的な運動反応のエラーとは異なる性質の運動反応によるエラーを検討した。実験 4 は握力計の力量発揮による連続的エラー、実験 5 は発声エラーを対象とした。その結果、連続的エラーおよび発声エラーの両者において、従来の離散的エラーによって惹起された ERN 類似の ERP 成分が出現した。潜時・極性・頭皮上分布がほぼ等しいため、両者の ERP 成分は ERN と同定した。これらの結果から、ERN が反映するエラー検出機能は、あらゆる性質の運動反応で生起するエラー認知に関与する普遍的なモニタリング機能であることが推察できる。

前節で述べたように、エラー検出機能は注意資源の配分方略と密接な関係がある。実験 1・2・3 で共通して見い出された知見は、課題難易度がある程度の高さを越えた高さになると、エラー検出機能へ配分される注意資源量が低下し、エラー検出の機能は低下したことであった。同時に反応時間の遅延というパフォーマンスの低下も共通に見い出された。反応時間は刺激入力から反応出力に至る認知情報処理全体の処理効率、すなわち認知情報処理の制御システムの機能を示す指標である (Donders, 1969)。これらの結果は、エラー検出機能と制御システムの機能は注意資源の配分方略を媒介として正の相関関係があることを推測させる。

本研究においては、エラー検出機能が運動反応に伴うあらゆる性質のエラーに機能することと、エラー検出機能は注意資源の配分方略が介在して認知情報処理全体の制御システム機能と正の相関を推測させるよう関係にあることを明らかにした。換言すれば、エラー検出機能が低下すれば、同時に認知情報処理の処理効率も阻害され、エラー検出機能が低下しなければ、認知情報処理の処理効率も阻害しないという結果を得た。このように、人間の情報処理においてエラー検出機能が重要な役割を果たすことは本

研究の結果からも明らかになった。

アクションモニタリングはエラーの検出・修正・補償を全て含む広義な概念である (Gehring et al., 1993)。人間の認知情報処理はアクションモニタリングの調整機能によって、時空間的整合性と構造的秩序がもたらされるようになる。そして、多くの認知心理学的理論では、知覚・言語・運動反応などのあらゆる認知情報処理過程に普遍的なアクションモニタリングシステムが存在し、重要な役割を果たすという基本概念が共通にみられる (Kosslyn & Koenig, 1992; Levelt, 1989; Logan, 1985; Mackay, 1987; Norman, 1981; Reason, 1984, 1990; Shallice, 1988)。これは運動反応の性質の異なるあらゆるエラーのモニタリングに対して、普遍的にエラー検出が機能するという本研究の知見と、共通する部分があることが推察できる。

このようなアクションモニタリングを含む認知情報処理のシステム全体は、どのような脳内神経機構のもとに成立しているのでしょうか？ その脳内神経機構は现阶段で必ずしも明確ではないが、認知神経科学的研究においていくつかの仮説が提唱されている。Posner & Petersen (1990)は、前頭前野外側部・帯状回・補足運動野から形成され思考や運動の実行・制御に關与する前方注意ネットワーク、頭頂葉・視床枕上丘から成り空間的注意の移動や集中に關与している後方注意ネットワークなどで構成される注意の神経ネットワークモデルを提唱した。また佐藤・大平 (2001)は、前部帯状皮質吻側部・眼窩野・扁桃体から成る腹内側システムと前部帯状皮質背側部・前頭前野外側部・運動野から成る背外側システムが存在し、この2つの並列的なシステムが視床を中継した神経回路網を形成し、行動を制御するというモデルを示した。腹内側システムは情動価を伴った価値依存的なモニタリング・反応選択機構である。背外側システムは内的表象・運動指令のアクティブな保持によるトップダウン的な反応選択機構である。

興味深いのは、Posner & Petersen (1990)と佐藤・大平 (2001)の両モデルが共通して、前部帯状皮質・前頭前野・視床の各解剖学的部位を中心としてモデルが構築されていることである。前部帯状皮質は前章で述べたようにERNの脳内発生源であり (Dehaene et al., 1994; Holroyd et al., 1998; Kiehl et al., 2000)、エラー検出機能を司る。前頭前野は認知情報処理の高次中枢であり (Posner, 1998)、認知情報処理全体の情報収束・分析・判断・トップダウン的制御を担っている。視床はほぼ全ての脳皮質領域と相互性線維連絡を

形成している (黒田, 2000). Crick (1984)によれば, 内的注意は視床から特定の大脳皮質領域へ局所的にサーチライト状に作用しており, 内的注意のサーチライトに照らされた領域の神経細胞は賦活し, それ以外の神経細胞の活動は抑制される. 換言すれば, 視床は注意資源の配分を制御していることが推察できる.

これらの解剖学的部位の神経生理学的機能は, エラー検出機能と認知情報処理全体の制御システムが注意資源の配分方略を媒介として密接に関係していることを示した本研究の知見とリンクしている. Fig.6-1 に示したように, エラー検出機能は前部帯状皮質, 認知情報処理全体の制御システムは前頭前野, 注意資源の配分方略は視床がそれぞれ担い, 各解剖学的部位が並列的なシステムを構成して相互に作用することで認知情報処理を円滑に遂行しているものと考えられる. そして, このシステム的作用において広義のアクションモニタリングが機能するのであろう.

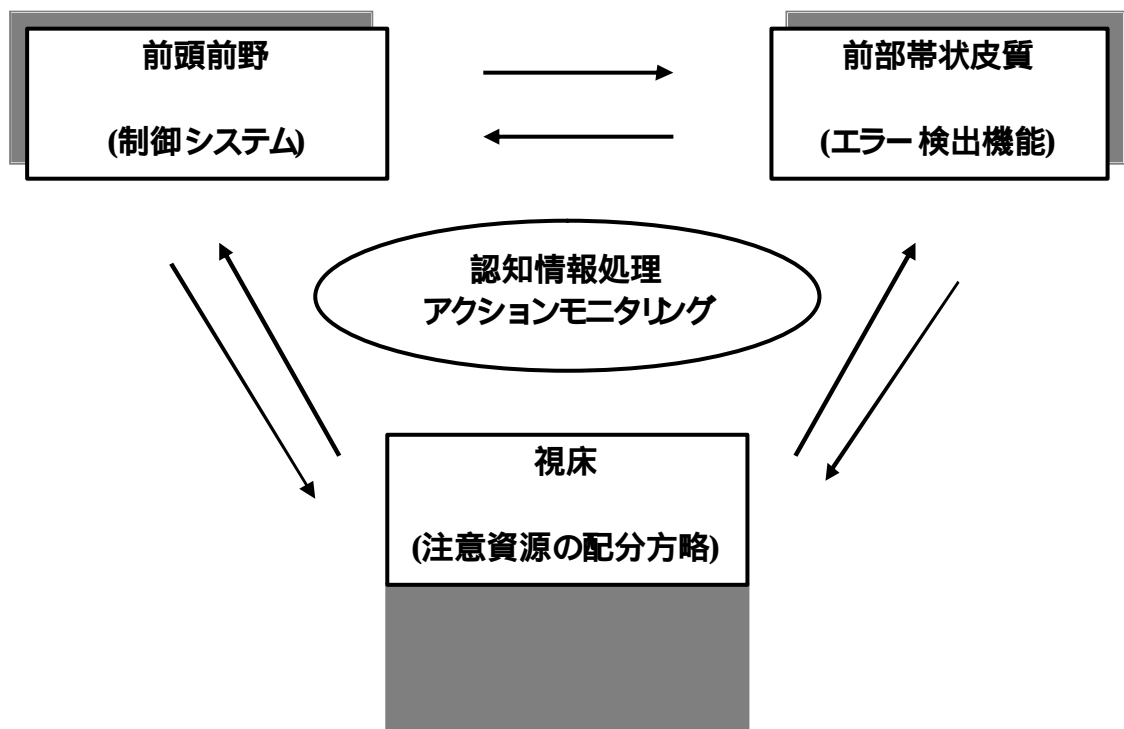


Fig.6-1 認知情報処理システムの概念図

第2章 今後の展望

本研究では、ERNを指標としてエラー検出機能における注意資源の配分方略を様々な観点から検討した。ただし、近年、注意資源モデルの研究で注目されている自動的処理と制御的処理の概念 (Shiffrin & Schneider, 1977) および、エラー検出機能との関係は検討していない。

自動的処理は学習後の習熟状態であり、注意資源の配分を必要としない無意識的処理である。制御的処理は学習前の未熟な状態であり、注意資源の配分を必要とする意識的処理である。日常生活における人間の行動は、学習によって習熟し、制御的処理から自動的処理へ移行する。人間行動の大部分は自動的処理に支えられており、その役割は重要である (Schneider & Shiffrin, 1977)。ある行動が習熟による慣れによって自動化し注意資源が配分されなくなった時、その不注意からヒューマンエラーが生じ、大事故を引き起こすことが人間工学的研究で多数報告されている (正田, 1988)。したがって、自動的処理下でのエラー検出機能の役割は、事故予防の人間工学的視点からも極めて重大な研究対象であり、今後に残された課題である。

また、本研究では ERN の脳内発生源である前部帯状皮質が前頭前野や視床と協調して、認知情報処理全体の制御・注意配分・エラー検出を遂行し、行動とアクションモニタリングを構成しているという考えを示した。しかし、上記のような大脳新皮質 (前頭前野) から間脳 (視床) を含む広範な解剖学的部位間の神経機構は未知の部分が多く、本研究で示した概念は推測の域を出ていない。この概念を実証するためには脳内神経機構についてさらなる詳細な検討が必要であるが、本研究で使用した ERP は空間分解能が低く、脳機能研究法として限界がある。ERP のみでは、ある認知情報処理がどのような部位による神経機構で処理されているかを特定できない。

宮内 (1997) によれば、単一の脳機能研究法だけでは神経機構の全容は解明できない。ERP を含む様々な脳機能研究法の長所と短所を踏まえて、複数の脳機能研究法を併用して相補的に脳活動を検証する必要性を強調した。そして、近年急速に進歩し、空間分解能が優れた非侵襲的脳機能研究法である fMRI (機能的核磁気共鳴画像) や PET (Positron Emission Tomography: 陽電子断層装置) を時間分解能の優れた ERP と併用することが、脳内神経機構を解明する上で有用であると示唆されている。将来、本研究で示

した概念は上記のような脳機能研究法を用いて検証する必要がある。

近年、非侵襲的脳機能研究法のうち、最も注目されているのが fMRI である。現在では、技術の進歩に伴って数百ミリ秒で fMRI 画像を取得可能な高速撮像法が開発された。その時間分解能は ERP には遠く及ばないものの、秒単位で脳機能を捉えることが可能である。このように fMRI の優れた空間分解能に加えて進歩した高速撮像法を使用し、短時間の神経興奮に伴う一過性信号変化を捉えることで特定の認知情報処理（イベント）に関連する脳活動を明らかにしようとする研究手法は、事象関連 fMRI（event-related fMRI）と呼ばれている。事象関連 fMRI は、その名が示す通り事象関連脳電位（ERP）と課題設定上の共通部分が多く、特定の認知情報処理を反映する ERP 成分を解剖学的部位に直接対応づける手法として期待されている（本田，2002）。ERN 研究でもすでに事象関連 fMRI を用いた研究があり、ERN の発生源である前部帯状皮質吻側部はエラー検出を担うこと、前部帯状皮質背側部は反応競合を担うことが明らかにされている（Kiahl et al, 2000）。今後は、行動指標・ERP・事象関連 fMRI を併用して、認知情報処理のシステムと脳内神経機構を詳細に検討する必要がある。

認知情報処理のシステム、すなわち人間の心とは一体何なのか。有史以来、人類にとってこの根元的疑問は、近年において脳と心の問題として真正面から科学的研究の対象となっている。このような趨勢の中で、本研究で得られた知見が、脳と心の間を解明するための一助ともなれば、本研究の目的は達成される。

引用文献

- Angel, R. W. 1976 Efference copy in the control of movement. *Neurology*, **26**, 1164-1168.
- Angel, R.W., & Higgins, J. R. 1969 Correction of false moves in pursuit tracking. *Journal of Experimental Psychology*, **82**, 185-187.
- Badgaiyan, R. D., & Posner, M. I. 1998 Mapping the cingulate cortex in response selection and monitoring. *Neuroimage*, **7**, 255-260.
- Band, G. P. H., & Kok, A. 2000 Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology*, **51**, 201-221.
- 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.
- Brooks, V. B. 1986 *The Neural Basis of Motor Control*. Oxford University Press.
- 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. 1989 Modern-brain reading: Psychophysiology, physiology, and Cognition. *Psychophysiology*, **26**, 251-269.
- Coles, M. G H., Gratton, G., Bashore, T. R., Eriksen, C. W., & Donchin, E. 1985 A psychophysiological investigation of the 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. 1998 Berger's dream? The error-related negativity and modern cognitive psychophysiology. In H. Witte, U. Zwiener, B. Schack, & A. Doring (Eds.), *Quantitative and Topological EEG and MEG Analysis*. Jena-Eriangen: Druckhas Mayer Veriag. Pp 96-102.
- 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.
- Cooke, J. D., & Diggles, V. A. 1984 Rapid error correction during arm movements: evidence for central monitoring. *Journal of Motor Behavior*, **16**, 348-363.
- Crick, F. 1984 Function of the thalamic reticular complex: The searchlight hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Science*, **81**, 4586-4590.

- Damasio, A. R., Tranel, D., & Damasio, H. 1990 Individuals with sociopathic behavior caused by frontal damage fail to respond autonomically to social stimuli. *Behavioural Brain Research*, **41**, 81-94.
- Damasio, A. R., Tranel, D., & Damasio, H. 1991 Somatic markers and the guidance of behavior: Theory and preliminary testing. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg, & A. L. Benton (Eds.), *Frontal lobe function and dysfunction*. NY: Oxford University Press. Pp 217-229.
- Davies, P. L., Segalowitz, S. J., Dywan, J., & Pailing, P. E. 2001 Error-negativity and positivity as they relate to other ERP indices of attentional control and stimulus processing. *Biological Psychology*, **56**, 191-206.
- Deecke, L., Engel, W., & Lang, H. H. 1986 Bereitschaftspotential preceding speech after holding breath. *Experimental Brain Research*, **65**, 219-223.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. 1994 Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, **5**, 303-305.
- Devinsky, O., Morrell, M. J., & Vogt, B. A. 1995 Contributions of anterior cingulate cortex to behavior. *Brain*, **118**, 279-306.
- 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.
- Donders, F. C. 1969 On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, **30**, 412-431.
- Eisdorfer, C. 1965 Verbal learning and response time in the aged. *Journal of Genetic Psychology*, **107**, 15-22.
- 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.
- Eriksen, C. W., Coles, M. G. H., Morris, L. R., & O'Hara, W. P. 1985 An electromyographic examination of response competition. *Bulletin of the Psychonomic Society*, **23**, 165-168.
- Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sundermann, 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. 1995 Event-related potential correlates of error in reaction tasks. In G. Karmos, M. Molnar, V. Csepe, I. Czigler, & J.E. Desmedt (Eds.), *Perspectives of event-related potentials research (EEG Suppl. 44)*. Amsterdam: Elsevier. Pp 287-296.
- 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: Tilburg University Press. Pp

192-195.

- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1991 Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. . 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: a tutorial. *Biological Psychology*, **51**, 87-107.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., S., & Hohnsbein, J. 1999 ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychologica*, **101**, 267-291.
- 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**, S34(Abstract).
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1995 A brain potential manifestation of error-related processing. In G. Karmos, M. Molnar, V. Csepe, I. Czigler, & J.E. Desmedt(Eds.), *Perspectives of evnnt-related potentials research(EEG Suppl. 44)*. Amsterdam: Elsevier. 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. 1993 A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, **4**, 385-390.
- Gehring, W., 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.
- Gemba, H., & Sasaki, K. 1989 Potential related to no-go reaction of go/no-go hand movement task with color discrimination in human. *Neuroscience Letters*, **101**, 263-268.
- Gemba, H., Sasaki, K., & Brooks, V. B. 1986 'Error' potentials in limbic cortex (anterior cingulate area 24) of monkeys during motor learning. *Neuroscience Letters*, **70**, 223-227.
- George, M. S., Ketter, T. A., Parekh, P. I., Horowitz, B., Herscovitch, P., & Post, R. M. 1995 Brain activity during transient sadness and happiness in healthy women. *American Journal of Psychiatry*, **152**, 341-351.
- 御領謙 1983 注意研究の変遷 サイコロジー, **40**, 12-18.
- Gunji, A., Hoshiyama, M., & Kakigi, R. 2000 Identification of auditory evoked potentials of one's own voice. *Clinical Neurophysiology*, **111**, 214-219.

- Gunji, A., Kakigi, R., & Hoshiyama, M. 2000 Spatiotemporal source analysis of vocalization-associated magnetic fields. *Cognitive Brain Research*, **9**, 157-163.
- 芳賀繁 1993 メンタルワークロードの測定と注意リソースの測定 人間工学, **29**, 349-352.
- Hillyard, S. A., & Kutas, M. 1983 Electrophysiology of cognitive processing. *Annual Review of Psychology*, **34**, 33-61.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. H. 1998 Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, **242**, 65-68.
- 本田学 2002 事象関連 fMRI の方法論と応用 臨床脳波, **44**, 137-141.
- Isreal, J., Chesney, G., Wickens, C., & Donchin, E. 1980 P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, **17**, 259-273.
- 岩木信喜 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.
- Jodo, E. & Kayama, Y. 1992 Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **82**, 477-482.
- Kaiser, J., Barker, R., Haenschel, C., Baldeweg, T., & Gruzelier, J. H. 1997 Hypnosis and event-related potential correlates of error processing in a stroop-type paradigm :a test of the frontal hypothesis. *International Journal of Psychophysiology*, **27**, 215-222.
- Kahneman, D. 1973 *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. Pp 13-27.
- Kiefer, M., Marzinzik, F., Weisbrod, M., Scherg, M., & Spitzer, M. 1998 The time course of brain activations during response inhibition: Evidence from event-related potentials in a go/no go task. *Neuroreport*, **9**, 765-770.
- 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.
- Kok, A. 1997 Event-related potential (ERP) reflections of mental resources: a review and synthesis. *Biological Psychology*, **45**, 19-56.
- Kok, A. 2001 On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, **38**, 557-577.
- Kopp, B., Mattler, U., Goertz, R., & Rist, F. 1996 N2, P3 and the lateralized readiness potential in a nogo task involving selective response priming. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **99**, 19-27.
- Kopp, B., & Rist, F. 1999 An event-related brain potential substrate of disturbed response monitoring in paranoid schizophrenic patients. *Journal of Abnormal Psychology*, **108**, 337-346.

- Kosslyn, S. M., & Koenig, O. 1992 *Wet Mind: the New Cognitive Neuroscience*. The Free Press, NY.
- Kramer, A. F., & Strayer, D. 1988 Assessing the development of automatic processing: An application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biological Psychology*, **26**, 231-267.
- Kramer, A. F., Wickens, C. D., & Donchin, E. 1985 processing of stimulus properties: Evidence for dual-task integrality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **11**, 393-408.
- 黒田優 2000 視床の構造: 入出力線維連絡路 *Clinical Neuroscience*, **18**, 880-883.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. 1977 Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time, *Science*, **197**, 792-795.
- Leuthold, H., & Sommer, W. 1999 ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, **110**, 342-357.
- Levelt, W. J. M. 1989 *Speaking: From Intention to Articulation*. Cambridge MA, MIT Press.
- Lewis, R. F., Zee, D. E., Gaymard, B. M., & Guthrie, B. L. 1994 Extraocular muscle proprioception functions in the control of ocular alignment and eye movement conjugacy. *Journal of Neurophysiology*, **72**, 1028-1031.
- Logan, G D. 1985 Executive control of thought and action. *Acta Psychologica*, **60**, 193-210.
- 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. *The Journal of Neuroscience*, **20**, 464-469.
- Luu, P., & Tucker, D. M. 2001 Regulating action: alternating activation of midline frontal and motor cortical networks. *Clinical Neurophysiology*, **112**, 1295-1306.
- Mackay, D. 1987 *The Organization of Perception and Action: A theory for language and other cognitive skills*. Springer, NY.
- 正田亘 1988 ヒューマン・エラー: 過誤は巨大化する エイデル研究所.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1996 打鍵運動時の課題難度が準備電位に及ぼす効果 脳波と筋電図, **24**, 205-212.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1997 発声運動に先行する準備電位に及ぼす課題難度の効果 脳波と筋電図, **25**, 401-407.

- Mathalon, D. H., Fedor, M., Faustman, W. O., Gray, M., Askari, N., & Ford, J. M. 2002 Response-monitoring dysfunction in schizophrenia: An event-related brain potential study. *Journal of Abnormal Psychology*, **111**, 22-41.
- 松岡洋夫 1997 精神疾患の情報処理障害と事象関連電位 丹羽真一・鶴紀子 (編) 事象関連電位: 事象関連電位と神経情報科学の発展 新興医学出版社 Pp.164-174.
- McAdam, D. W., & Whitaker, H. A. 1971 Language production: electroencephalographic localization in the normal human brain. *Science*, **172**, 499-502.
- 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.
- 宮内哲 1997 ヒトの脳機能の非侵襲的測定 -これからの生理心理学はどうあるべきか- 生理心理学と精神生理学, **15**, 11-29.
- 虫明元・丹治順 1999 大脳による行動と運動の認知的制御 実験医学, **17**, 2198-2204.
- Navon, D., & Gopher, D. 1979 On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, **86**, 214-255.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P. H., & Kok, A. 2001 Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, **38**, 752-760.
- Norman, D. A. 1981 Categorization of action slips. *Psychological Review*, **88**, 1-15.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. 1975 On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, **7**, 44-64.
- 沖田庸嵩 1989 事象関連電位と認知情報処理: 選択的注意の問題を中心として 心理学研究, **60**, 320-335.
- 沖田庸嵩 1992a ERP 研究に役立つ心理実験パラダイム () 臨床脳波, **34**, 269-275.
- 沖田庸嵩 1992b ERP 研究に役立つ心理実験パラダイム () 臨床脳波, **34**, 334-339.
- 沖田庸嵩・諸富隆 1998 事象関連電位 藤澤清・柿木昇治・山崎勝男 (編) 新生理心理学 1 巻 生理心理学の基礎 北大路書房 Pp104-123.
- Pailing, P. E., Segalowitz, S. J., Dywan, J., & Davies, P. L. 2002 Error negativity and response control. *Psychophysiology*, **39**, 198-206.
- Parasuraman, R., Richer, F., & Beatty, J. 1982 Detection and recognition: Concurrent process in perception. *Perception & Psychophysics*, **31**, 1-12.
- Posner, M. I., & DiGiroramo, G. J. 1998 Executive attention: Conflict, target detection, and

- cognitive control. In R. Parasuraman (Eds.), *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press. Pp 401-423.
- Posner, M. I., & Petersen, S. 1990 The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, **13**, 25-42.
- Rabbitt, P. M. A. 1966 Error and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, **71**, 264-272.
- Rabbitt, P. M. A. 1967 Time to detect errors as a function of factors affecting choice-response time. *Acta Psychologica*, **27**, 131-142.
- Rabbitt, P. M. A. 1968 Three kinds of error-signalling responses in a serial choice task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **20**, 179-188.
- Rabbitt, P. M. A., Cumming, G., & Vyas, S. M. 1978 Some errors of perceptual analysis in visual search can be detected and corrected. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **30**, 319-322.
- Rabbitt, P. M. A., & Vyas, S. M. 1981 Processing a display even after you make a response to it. How perceptual errors can be corrected. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **33A**, 223-239.
- Reason, J. 1984 Lapses of attention in everyday life. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds), *Varieties of Attention*. NY: Academic Press, Pp 515-549.
- Reason, J. 1990 *Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- 力丸裕 2002 大脳皮質における聴覚情報処理 神経研究の進歩 **46**, 35-46.
- Ruchsow, M., Grothe, J., Spitzer, M., & Kiefer, M. 2002 Human anterior cingulate cortex is activated by negative feedback: evidence from event-related potentials in a guessing task. *Neuroscience Letters*, **325**, 203-206.
- Sanders, A. F. 1983 Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, **53**, 61-97.
- 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., 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.

- 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.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. 1977 Controlled and automatic human information processing: . Detection, search and attention. *Psychological Review*, **84**, 1-66.
- Shallice, T. 1988 *From Neuropsychology to Mental Structure*. Cambridge, England, Cambridge University Press.
- Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E., & Halliday, A. M. 1980 Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **49**, 213-226.
- 志堂寺和則 1999 運動反応の心理メカニズム 九州大学出版会.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. 1977 Controlled and automatic human information processing: . Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, **84**, 127-190.
- 篠田晴男・國分三輝・芳賀繁 1998 二重課題法によるメンタルワークロード要因の心理生理的評価 人間工学, **34**, 37-44.
- Smid, H. G. O. M., Mulder, G., Mulder, M. J. M., & Brands, G. J. 1992 A psychophysiological study of the use of partial information in stimulus-response translations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 1101-1119.
- Squires, K. C., Hillyard, S. A. & Lindsay 1973 Vertex potentials evoked during auditory signal detection: relation to decision criteria. *Perception & Psychophysics*, **14**, 265-272.
- Squires, K. C., Squires, N. K., & Hillyard, S. A. 1975 Decision-related cortical potentials during an auditory signal detection task with cued observation intervals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **1**, 268-279.
- Stemmer, B., Witzke, W., & Schonle, P. W. 2001 Losing the error related negativity in the EEG of human subjects: an indicator for willed action. *Neuroscience Letters*, **308**, 60-62.
- Sternberg, S. 1966 High-speed scanning in human memory. *Science*, **153**, 652-654.
- Strayer, D. L., & Kramer, A. F. 1990 Attentional requirements of automatic and controlled processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, **16**, 67-82.
- Swets, J. A. 1959 Indices of signal detectability obtained with various psychophysical procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, **31**, 511-513.
- 丹治順 1994a 運動関連領野と運動プログラミング 甘利俊一・酒田英夫 (編) 脳とニュー

ーラルネット 朝倉書店 Pp 203-217.

丹治順 1994b 運動系の生理学 伊藤正男・安西祐一郎・川人光男・市川伸一・中島秀之・橋田浩一 (編) 1994 岩波講座: 認知科学 4 運動 岩波書店 Pp 32-73.

丹治順 1997 大脳高次運動領野の情報処理 外山敬介・杉江昇 (編) 脳と計算論 朝倉書店 Pp 228-241.

徳野博信 1998 上肢運動調節に関わる大脳皮質運動領野とその線維連絡 神経研究の進歩 **42**, 18-27.

Turnbull, W. W. 1944 Pitch discrimination as a function of tonal duration. *Journal of Experimental Psychology*, **34**, 302-316.

Ullsperger, M., & Yves von Cramon, D. 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't Ent, D. 2002 Perceptual and motor contributions to performance and ERP components after incorrect motor activation in a flanker reaction task. *Clinical Neurophysiology*, **113**, 270-283.

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.

Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. 2000 Is the 'error negativity' specific to error? *Biological Psychology*, **51**, 109-128.

Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. M., McCallum, W. C., & Winter, A. L. 1964 Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, **203**, 380-384.

Wickens, C. D. 1980 The structure of attentional resources. In R. Nickerson, & R. Pew (Eds.), *Attention and Performance, Vol. 1*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. Pp 239-257.

Wickens, C. D. 1984 Processing Resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of Attention*. NY: Academic Press. Pp 63-102.

Wickens, C. D. 1990 Applications of event-related potential research to problems in human factors. In J.W. Rohrbaugh, R. Parasuraman & R. Johnson, Jr (Eds.), *Event-related brain potentials basic issues and application*. NY: Oxford University Press. Pp 301-309.

Wickens, C. D., Hyman, F., Dellinger, J., Taylor, H., & Meador, M. 1986 The Sternberg memory search task as an index of pilot workload. *Ergonomics*, **29**, 1371-1383.

Wickens, C., Kramer, A., Vanasse, L., & Donchin, E. 1983 Performance of concurrent tasks: A psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*,

221, 1080-1082.

関連文献

本研究に関連した文献を以下に示す.

実験 1

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.

実験 2

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**, 印刷中.

実験 3

(未公刊)

実験 4

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 -エラー関連陰性電位による検討- 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.

実験 5

Masaki, H., Tanaka, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2001 Error-related brain potentials elicited by vocal errors. *Neuroreport*, **12**, 1851-1855.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、指導教員としてご指導くださいました山崎勝男先生に心から御礼申し上げます。山崎先生には、大学院の研究指導を通じて数々の貴重なご教授を賜りました。そして、本論文の副査を快く引き受けてくださった、春木豊先生、鈴木秀次先生に心より感謝申し上げます。科学警察研究所の高澤則美先生には研究・実験機材に関して多大な援助をいただきました。心より御礼申し上げます。また、学部時代の恩師である文教大学の丹治哲雄先生には、卒業論文の指導を通じて研究に対する基礎学力をご教授いただきました。誠にありがとうございました。

正木宏明先生には実験装置の操作法・分析方法を教えていただいただけでなく、研究とは何か、研究に対する根本的な態度を教えていただきました。本論文をまがりなりにも完成することができたのは、先生の教えによるところが大きかったと存じます。ここに厚く御礼申し上げます。また、5年間お世話になりました早稲田大学精神生理学研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。大学院在学中、数々の温かい励ましと助言・援助をいただきました。

早稲田大学大学院人間科学研究科では多くの友人達との貴重な出会いがありました。彼らとの交流が研究活動への大きなモチベーションにつながりました。また彼らには、快く実験の被験者を引き受けていただきました。多くの友人達に心から感謝致します。

最後に、日々の生活を支え、大学院で学ぶ機会を与えてくださった父、母、弟の家族全員に心から感謝申し上げます。父には、この年齢になるまで多大な経済的負担をかけてしまいました。本論文の完成をもって、いくらかの恩返しになればと存じます。そして、亡き母に本論文を捧げたいと存じます。