

学位論文

認知的葛藤課題における反応抑制と反応選択に
関する心理生理学的研究

広島大学大学院
教育学研究科
心理学専攻

岩木信喜

第 1 章	研究の背景と目的	
第 1 節	エラー行為と行為のプログラミング	(1)
第 2 節	行為のプログラミングの研究方法	(6)
第 3 節	Eriksen らの認知的葛藤課題における情報処理過程の モデルとその研究の概観	(12)
第 4 節	問題と目的	(35)
第 2 章	認知的葛藤課題における情報処理過程の実験的検討	
第 1 節	相互抑制モデルに関する心理生理学的検討 (実験 1)	(40)
第 2 節	反応抑制処理の測定ツールとしての事象関連電位 の妥当性	
1.	NO-GO 電位とエラー関連陰性電位の分離 (実験 2)	(51)
2.	反応準備過程におけるエラー反応と NO-GO 電位と の関係 (実験 3)	(63)
第 3 節	チェック操作モデルの妥当性の心理生理学的検討	
1.	チェック操作の存在を示す心理生理学的証拠 (実験 4)	(72)
2.	認知的葛藤の増大が反応準備期間の反応抑制に及ぼ す影響 (実験 5)	(83)
3.	認知的葛藤の軽減が反応準備期間の反応抑制と反応 選択に及ぼす影響 (実験 6)	(94)
第 3 章	総合考察	
第 1 節	本研究の成果と意義	(108)
第 2 節	今後の課題	(117)
	引用文献	(121)

第 1 章 研究の背景と目的

第 1 節 エラー行為と行為のプランニング

1.1.1 エラー行為を分類する視点

海保・田辺 (1996) は、ヒューマン・エラーを分類するにあたり、3つの視点を提案している。第 1 の視点は“エラーの現れ (結果) による分類”である。ある目標、あるいは意図となる理想的行為からずれてしまった行為が分類対象である。例えば、必要な行為を省略したエラーはオMISSION・エラーと呼ばれ、誤った行為の実行はCOMMISSION・エラーと呼ばれる。

第 2 の視点は、“エラー発生状況による分類”であり、エラー発生の外的な状況が分類対象である。例えば、注意を散らす外的事象や病気による体調不全、課題の作業量や作業時間の増加、作業の性質などである。

第 3 の視点は、“エラー発生時の心的過程による分類”である。ある行為が実行されるまでには、様々な心理的な過程 (情報処理過程) が存在する。その過程のどこで何が起こったかに基いてエラー行為を分類する。例えば、情報の入力段階での欠落や刺激の同定ミス、誤解釈、想起における記憶違い、手の操作の調節のような身体的協応の不全、手の操作順序のミスなどである。本研究は、第 3 の視点によって分類されるエラー行為のうち、特に手の操作順序のミスから推察されるような、“行為の順序を構成するプランニング過程”を扱う。

1.1.2 行為のプランニングにおける行為の順序づけ

Lashley (1951) は、個々の行為の順序づけの重要性を指摘した研究者の一人である。彼の功績の 1 つは、それまで広く受け入れられていた連

合による反射連鎖理論 (associative chain theory, 図 1-1 参照. Kelso, 1982 から転載) を否定し, スキーマ理論を提唱した点にある (Bruce, 1994). スキーマとは, ここでは, 行為達成までの定型的な感覚-運動の知識構造 (sensori-motor knowledge structure) のことである. Lashley (1951) は, 自己受容性の末梢性感覚のフィードバックでは, ピアニストのようなすばやい動作を駆動する入力刺激としてはタイミングが遅すぎることを指摘し, 動作系列が “schema of order (順序スキーマ)” によってあらかじめ形成されていると主張した. 後に, この考えが不十分であり, 自己受容性感覚のフィードバックが運動の調節に役立つことが示されたが (Abbs, 1990; Adams, 1971; Jeannerod, 1991; von Holst, 1954), Lashley のスキーマ理論は広く受け入れられるようになり, Keele (1968; Keele, Cohen, & Ivry, 1990) の “motor program (運動プログラム)” という概念に受け継がれた (Bruce, 1994; Jeannerod, 1997; スキーマ理論の詳細は Arbib, 1985; Brooks, 1979, 1986; Kelso, 1982; Schmidt, 1975; Semjen & Gottsdanker, 1992 に述べられている).

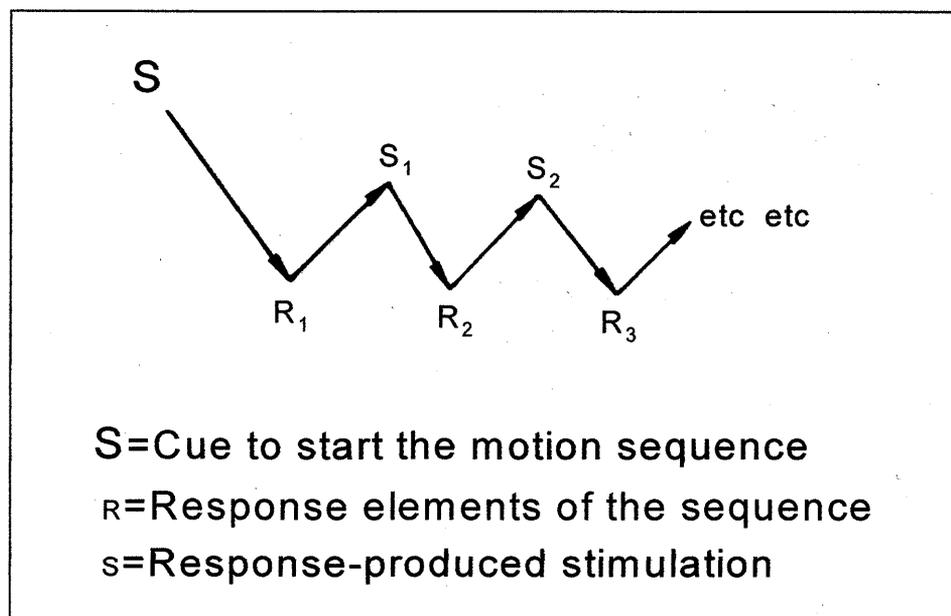


図 1-1. 行動の反射連鎖モデル. (Kelso, 1982 からの転載)

反射連鎖理論については、スポーツなどの初心者が、必ずしも一定の反射連鎖を示しながら動作系列を学習してはいないという事実によって反駁を受けている (Kelso, 1982. また, Arbib (1969), Miller, Galanter, & Pribram (1960), Stelmach (1982) による反論もある). 運動の学習と制御については、先に言及した自己受容性感覚の役割を重視するものだけでなく、大脳の前運動野から末梢へ向かって発射される遠心性運動指令のコピー (efference copy) を重視する考えがあり、遠心性コピーが自己受容性感覚との比較なしに運動制御に利用されると考えられている (Angel, 1976; Angel, Garland, & Fischler, 1971; Cooke & Diggles, 1984; Higgins & Angel, 1970; Jones, 1974a, 1974b). これらの運動の学習と制御の理論において特徴的なことは、実際の運動に関するフィードバック情報と理想的運動との比較を行うところにある。しかし、本研究の関心は、実際の運動の前段階にあたる“行為のプランニング過程”にある。そこで、次に、反応前の行動制御と関わりが大きいエラーを例にとって説明する。すなわち、Lashley (1951) も言及していた、タイピング動作における行為の順序づけに関連するエラーである。

まず、タイピング動作におけるエラーも含め、幅広いエラー行為を説明する理論に Norman (1981) の“Activation-Trigger-Schema (ATS)”理論がある。例えば、“あ”という文字を書こうとしたとき、長期記憶貯蔵庫から引き出された“あ”の書字スキーマにしたがって行為が準備され、実行される。そのスキーマの構造は、図 1-2 (海保・田辺, 1996 から転載) に示したように階層的であり、“意図の形成”、“スキーマの活性化”、“スキーマのトリガリング (triggering)”の3つに大きく分かれる。エラーは、例示してあるようにどのレベルでも生じる。また、図には示していないが、エラー行為を検出するフィードバック機構も想定されている (Norman, 1981).

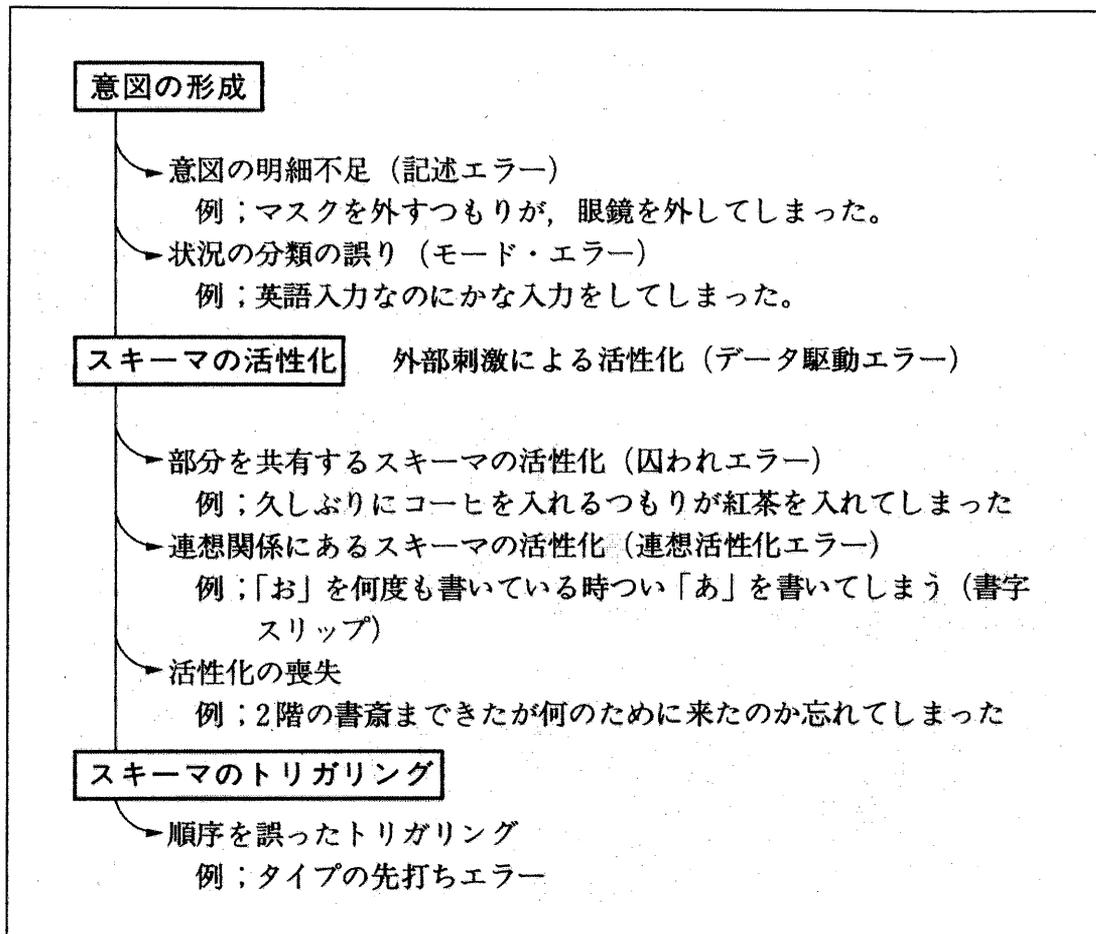


図 1-2. D. Norman (1981) の Action-Trigger-Schema 理論による行為の段階と主なスリップの分類. (海保・田辺, 1996 が仁平・丸山, 1995 から改変して引用した図の転載)

ここでは、タイピング動作におけるスキーマのトリガリング・エラーについて説明する。Rumelhart & Norman (1982) によると、タイピング動作のエラーにはいくつかのパターンがある。代表的なものには、二重打ちにおけるエラー (doubling error), 交互打ちにおけるエラー (alternation reversal error), 置換エラー (transposition error) がある。二重打ちにおけるエラーは “bokk (正確には book)” のようなもので、交互打ちにおけるエラーは “thses (these)” のようなものである。もっともポピュラーだったのは置換エラーで、“becuase (because)” や “whihc (which)” といった

左右の手にまたがる2文字が置き換えられるエラーであった。同じ手における置換エラーは、“supermely (supremely)”のようなものであるが、置換エラー全体のおよそ75%が、左右の手にまたがるエラーであった。また、Shaffer (1976)によれば、およそ90%との報告もなされている。

図1-3は、タイピング事態における情報処理の流れを示したものである (Rumelhart & Norman, 1982 から転載)。この場合の“意図”は、紙に書かれた文章をタイプライターで清書することである。知覚過程は、タイプする人がその文章を見ることによって始まる。知覚した単語は一旦バッファーに貯蔵されて、単語スキーマを活性化し、さらにその単語スキーマがキー押しスキーマを活性化させる。この段階では、どの文字を左右どちらの手で入力するのかという左右判断や、左右の手の順序づけ

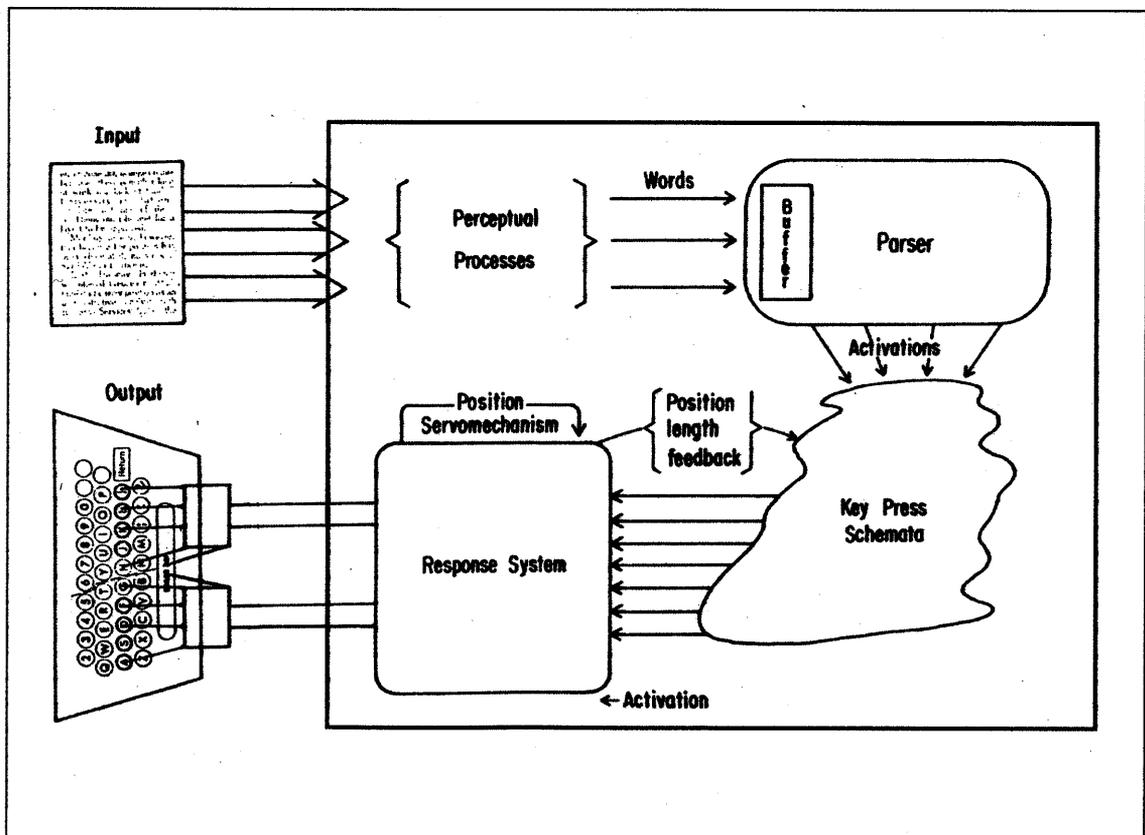


図1-3. タイピング事態における情報処理過程のモデル。(Rumelhart & Norman, 1982 からの転載)

がなされ、適当な反応が反応システムにおいて準備される。言いかえると、左右判断や順序づけのエラーは、誤った反応の準備を作り出すことになる。また、不適切な反応を修正する“指の位置に関するサーヴォ機構”も想定されているが、それは反応出力と同時に機能しはじめる運動制御機構である。

タイピング動作にみられる“置換エラー (which→whihc)”や“交互打ちにおけるエラー (these→thses)”は、行為の順序づけ、言いかえると、スキーマのトリガリングにおけるエラーの具体例である。このような行為の順序づけエラーを未然に防ぐメカニズムは、流暢な動作系列を可能にする重要な要素と考えられる。そして、このメカニズムを検討することが本研究の目的である。

第2節 行為のプランニングの研究方法

1.2.1 神経生理学における心的時間測定法の導入

行為のプランニング過程を支える大脳のメカニズムの研究は、行動と関連した単一ニューロン活動を訓練したサルから記録することで可能になった (Jeannerod, 1997)。この神経生理学的アプローチでは、動物の脳を対象にした破壊や電気刺激 (人で行われることもある)、微小電極の慢性的埋め込みによる実験、事故による脳損傷患者を対象にした認知課題による実験などが行われる (甘利・酒田, 1994; Jeannerod, 1997; Passingham, 1995; Squire & Kosslyn, 1998; 丹治, 1999; 山鳥, 1985)。そして、1970年代に入ると、認知心理学における心的時間測定 (mental chronometry) の方法論が神経生理学に導入されるようになる (Jeannerod, 1997)。この方法は、19世紀に von Helmholtz が神経伝導測度の計測に成功したことに始まる (Meyer, Osman, Irwin, & Yantis, 1988)。Donders (1868/ 1969)

は引き算法 (subtraction method) を考案したが、その理論の背後にある心的過程に関する前提が事実と異なっていたため、心的時間測定は一時的に使用されなくなった。その後、Sternberg (1969) の加算要因法 (additive factor method) により再度注目され、普及するという経過をたどる (Meyer et al., 1988; 沖田, 1992)。

加算要因法においては、ある運動課題の遂行に要する時間を、適切な反応を実行するのに必要な諸過程 (例えば、刺激の検出と同定、刺激と反応との対応づけ、反応出力など) に要する時間の総和と考える。また、情報の伝達様式が直列的 (serial) で、各処理段階間の時間的重複がない (離散的情報伝達, discrete transmission) と仮定している。そして複数の独立変数 (仮に、 a と b) が別々の処理段階に影響したならば、分散分析において a と b の主効果だけが認められ、それは2つの独立変数が反応時間の変動に対して加算的に影響した結果であると考えられる。一方、それら2つの独立変数が交互作用を示したならば、それらが同じ処理段階に影響したと想定する。

刺激に対して反応をする以前の大脳の活動は、“set-related activity” とよばれる (Jeannerod, 1997)。例えば、前頭前野に関しては、遅延反応課題を用いてワーキングメモリ (船橋, 1993, 1994; Goldman-Rakic, 1998) や反応抑制機能との関連 (Diamond, Werker, & Lalonde, 1994; Passingham, 1995) が調べられている。あるいは、目標物に対する動作 (小さな物をつかむ、指先で拾う、物体を握る、小さなボタンを指で押すという動作など) と運動前野との関連 (丹治, 1994a)、一連の動作の順序や両手の協応と補足運動野との関連 (丹治, 1991)、さらに、腕の筋肉における張力の大きさと第1次運動野との関連 (Hashimoto, Gemba, & Sasaki, 1980; 丹治, 1994b) など、多岐にわたる研究が行われてきた。そして、これらの研究では、主としてサルを対象にし、例えば脳の一部を破壊したり、

道具的に条件づけた行動にともなう脳電位を，慢性的に埋め込んだ微小電極から測定するなど，人を対象とした場合には不可能な実験データを得てきた．しかし，実験施設のメンテナンスや動物の飼育など，費用面での大きな負担が免れないことに加え，サルなどの実験結果から人の大脳における情報処理を推定するには，種を超えた帰納的推論が必要であるという困難が常につきまとう．したがって，人を対象にする実験も必須である．その場合，運動の準備期における“set-related activity”を測定でき，認知心理学の実験事態での心的時間測定に適用可能な時間分解能もあわせもつ，非侵襲的な指標が必要となる．

1.2.2 事象関連電位の有用性

そのような指標として，脳波 (electroencephalogram, EEG) の一種である事象関連電位 (event-related potential, ERP) がある．脳波は，頭皮上の電極から導出した電気活動の空間的加算を，他の部位との比較で (例えば，両耳朶を結合したものを基準，つまり 0 電位として) 脳波計などで増幅して記録した時に得られる電位差の時間的変動である (中村, 1983)．脳波には， α 波 (8 Hz から 13 Hz) や β 波 (13 Hz から 35 Hz) などの周波数が規則的な律動のほかに，種々の刺激に対して生じる誘発電位 (evoked potential) がある．ただし，誘発電位の中には，課題が要請する種々の心的過程に関連して現れる電位があるため，刺激が誘発する以上のことを反映するという意味を，より中立的に表現する“event-related (事象関連)”という用語が用いられている (Coles & Rugg, 1995)．ERP は，Hillyard & Kutas (1983) にしたがって定義するなら，感覚，認知，運動という事象に関連して惹起する小さな脳電位であり，脳の情報処理と関連する神経集団の同期的活動で生じる電場電位である．

図 1-4 は，音刺激に対して生じる ERP である (Hillyard & Kutas, 1983

から転載). 図は, 例えば, 被験者がランダムな順序で呈示される 2 種の音を注意して聴いている事態を示している. そして, 被験者は, 一方の音に対してだけボタンを押したり, それを数えたりする. “ONGOING EEG” として示されている波形からわかるように, 頭皮上から導出され増幅されただけの ERP は, そのままでは背景脳波に埋もれているために, 肉眼ではほとんど識別できない. しかし, 背景脳波は, 刺激呈示時点を起点 (0 点) としたときに一定のパターンを示さないので, 加算を繰り返すと, 電位がプラスとマイナスにランダムに変動して相殺し, ゼロ電位に近づいていく. 一方, 刺激に対してあるパターンを描く ERP は, 加算回数の増加とともに S/N 比が改善し, 肉眼で識別できるようになる. 音の繰り返し呈示は, 図では脳波の下に矢印で示してある. また, 刺激呈示時点をマークする信号が脳波処理システム (図の “signal averager”) に送られる. 例えば, その信号の 100 ms 前から呈示後 1000 ms までというような一定区間の脳波を加算し, 平均する. そうして算出した ERP が, 図では “AUDITORY EVENT-RELATED POTENTIAL” として描かれている.

図 1-4 における, P1 成分より早期に現れる I 波から VI 波, N0, P0, Na, Pa, Nb という ERP は, 誘発電位のカテゴリーに入るものである. これらは, 刺激の物理的特性の影響は受けるが, 人の心理状態の影響をほとんど受けないので, 外因性 (exogenous) 成分とも呼ばれる. それに対して P1 成分以降の種々の成分は, 人の状態や課題における刺激の意味, 課題そのものの違いにより大きく変化するため, 人の何らかの知覚や認知の処理過程と関連すると考えられている. これらの成分は内因性 (endogenous) とも呼ばれる. これまでのところ, 刺激の呈示後に現れる ERP としては, 選択的注意を反映する Nd (あるいは, 処理陰性電位), 刺激文脈における刺激の物理的逸脱に関連する N2, ミスマッチ陰性電位,

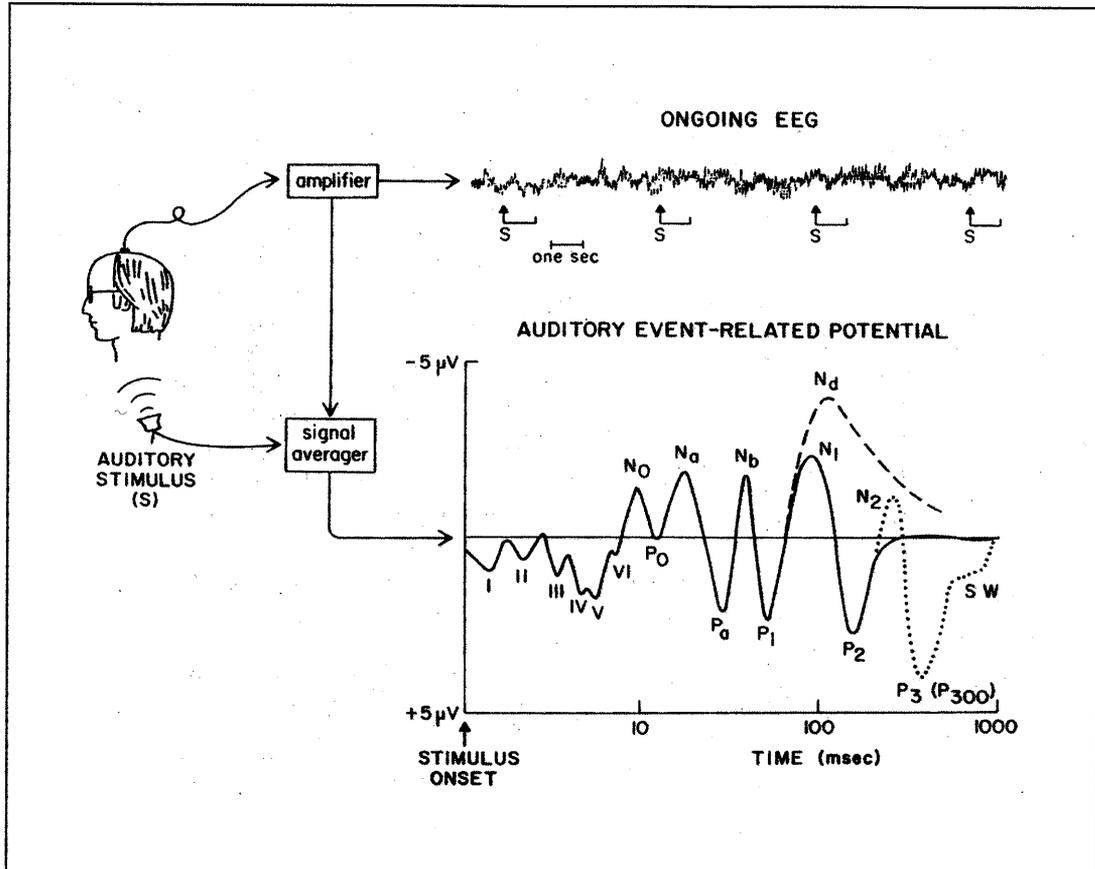


図 1-4. 聴覚刺激を用いた実験における事象関連電位の測定状況の模式図。
(Hillyard & Kutas, 1982 からの転載)

P3a, 意味的逸脱に関連する N400, 課題に関連する刺激を検出したときに出現する P3b などが報告されてきた (Coles & Rugg, 1995, 本稿では以後, P3b を指して単に P3 と表現する). さらに, 事象に関連するがそれに先行する ERP もあり, 代表的なものには, 自発的な運動に先行する準備電位 (詳しい説明は第 3 節で行う) や, 事象の予測や期待を反映する CNV (contingent negative variation) がある.

一般的にいわれる ERP の長所は, 被験者の外的反応に依存せずに記録できる点である. 例えば, 被験者が課題遂行上, ある刺激に反応しなかった試行や無視した試行についても, 情報処理過程の内容を推定するデータを得ることが可能である. また, ERP は非侵襲的であり, 脳磁図 (magnetoencephalography) や MRI (magnetic resonance imaging), ポジトロ

ン CT (positron emission tomography) よりも空間的分解能は低いが、認知心理学の実験における心的時間測定に適用可能な時間分解能 (1 000 分の 1 秒程度) を有している。したがって、空間的分解能が求められる研究内容の場合は、ERP のほかに今述べたほかの方法を併用すれば有効であろう。さらに、ERP を使うと、人を対象にした実験が比較的容易に行えるので、その意味では、サルなどのデータから人の脳活動の心理学的意義を推論するという、異種にまつわる問題をある程度は回避できる (人の ERP データを解釈したり、起源を同定する際に、サルなどのデータと対照させる必要が生じることもあるので、厳密な意味では回避できない)。このような理由から、ERP は、運動を行う以前の準備期における “set-related activity” の指標として有用と考えられる。

ところで、頭皮上から記録される ERP は、多数の成分で構成され、多くの場合、時間的、空間的に重畳して生じる合成波である。また、脳は、脳脊髄液、頭蓋骨、皮膚など、導電率の異なる複数の組織によって被われているため、脳の局所的な電気活動の頭皮上分布は大きくゆがみ、脳波だけから正確な発生源を推定することは困難と考えられている (宮内, 1997; Squires & Ollo, 1986)。そこで、Näätänen (1982) は “成分” という用語を脳内の単一発生源に発する ERP 変化に限定して使用すべきと考えているが (Coles & Rugg, 1995)、本稿では、“成分”、“波”、“振れ”、“電位” などの用語を特に厳密には区別せずに用いることにする。

1.2.3 左右の手による選択反応課題の有用性

本研究の関心は、タイピング動作のような流暢な動作を可能にする行為のプランニング過程にある。ただし、ERP を用いるためには、体動がアーチファクトとして脳波に影響しないように、腕をほとんど動かさない課題事態を設定しなければならない。さらに、ERP を算出するためには、

被験者がある時点から刺激を知覚したり，運動を開始する必要がある．刺激が常に見えていたり，腕が常に動いている状態では ERP の測定はできないのである．このような要求を満たし，なおかつ，行為の順序づけエラーを未然に防ぐメカニズムの検討を可能にする課題を設定しなければならない．

まず，左右の手の順序づけを検討する以上，課題では左右の手による選択反応が必要である．例えば，反応機器として左右に 2 つのボタンを並べたコンパクトな箱を用意し，青の色パッチが眼前のモニターに呈示されたら，できるだけすばやく左のボタンを左手の指で押し，緑の色パッチが呈示されたら右のボタンを右手の指で押すというような課題が考えられる．しかし，この場合，刺激を識別して指を動かすだけなので，仮にエラー反応が生じたとしても，それは色を見間違えたのかもしれないし，単に色と反応との対応づけを誤ったのかもしれない．したがって，ほかに何らかの工夫をして，“置換エラー”や“交互打ちにおけるエラー”のような左右の手の順序づけエラーを，被験者に行わせる必要がある．1 つの方法として考えられるのは，手の選択エラーを誘発する工夫である．そうすると，エラー反応（例えば，左手のボタン押し動作）を止めて正反応（右手のボタン押し）を準備し実行する必要がある生じるので，被験者が，順序づけエラーを防ぐメカニズムを働かせながら課題を遂行していると想定できる．そのような実験事態を提供したのが，Eriksen & Eriksen (1974) の研究である．

第 3 節 Eriksen らの認知的葛藤課題における情報処理過程のモデルとその研究の概観

Eriksen & Eriksen (1974) は，中央の標的文字の両側にノイズ文字を付加した文字列を用いて，標的文字に対する選択的反応実験を行った（以

下では、Eriksen & Eriksen, 1974 の認知的葛藤課題を指して“認知的葛藤課題”あるいは“Eriksen らの認知的葛藤課題”と表記する。これはフランカー課題とも呼ばれる)。この課題では、標的文字とノイズ文字が同じである刺激を一致刺激 (例えば, HHHHH や SSSSS), 異なる刺激を不一致刺激 (例えば, SSHSS や HSHHH) と呼ぶ。被験者は、標的の“H”や“S”に対して左右の手による選択的なボタン押しを行う。通常、被験者の反応時間は一致刺激よりも不一致刺激に対するほうが長く、エラー反応も不一致刺激に対するほうが多い。また、認知的葛藤課題の情報処理過程に関する研究では、これまで、行動測定 (レバー押し, 握力計の把握動作, ボタン押しなどの反応時間) や筋電図 (Electromyogram, EMG), さらに ERP の一種である偏側性準備電位 (Lateralized Readiness Potential, LRP) の測定が一般に行われてきた。そして、それらを用いて、エラー反応の大きさを独立変数として扱ったり、エラー反応の準備の有無を測定し、モデル検証を行ってきた経緯がある (Coles & Gratton, 1986; Coles, Gratton, & Donchin, 1988; Coles, Smid, Scheffers, & Otten, 1995)。そこではじめに、本研究でも用いる LRP を詳細に説明し、性質の異なる 3 種類のエラーを操作的に定義する。

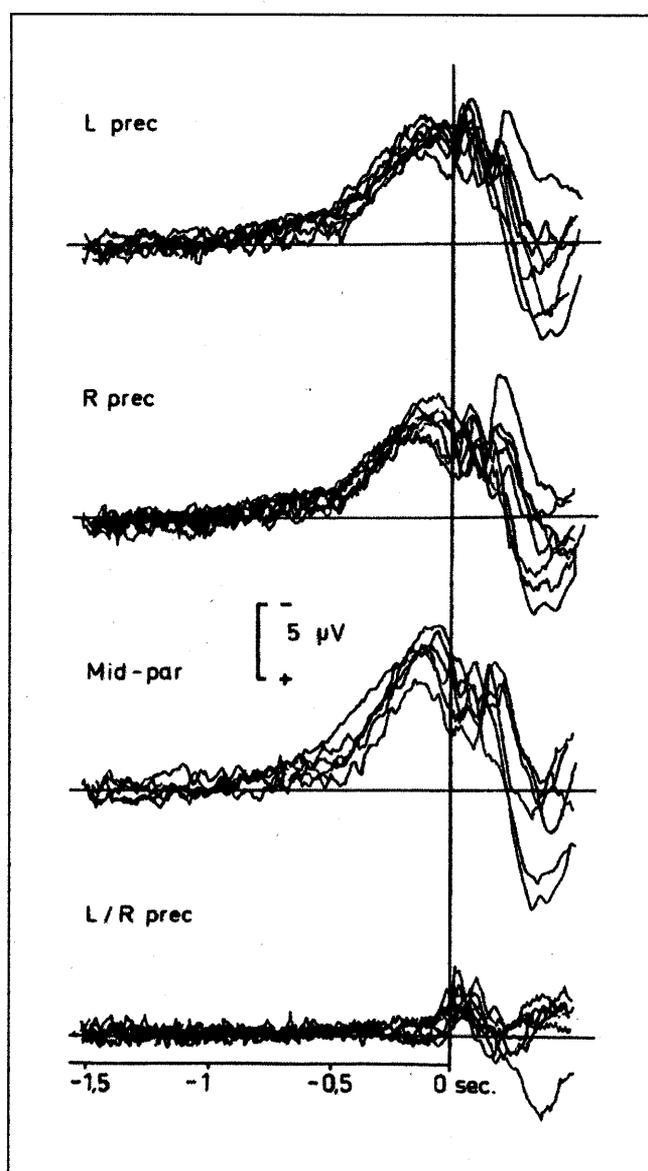
1.3.1 LRP

LRP は、手の運動にともなって両半球に生じる運動関連脳電位 (movement-related brain potential) を加工し、その左右差を取り出したものである (Coles, 1989)。随意運動に先行する頭皮上の運動関連脳電位は、西ドイツの Kornhuber と Deecke によって 1965 年に初めて記録された (柴崎, 1979)。彼らは、運動開始時点から一定時間 (例えば, 500 ms) をおいてパルスを出力し、それを脳波とともに磁気テープに記録した。そして、実験後、テープを逆行再生し、そのパルスをトリガー信号として脳波の加算平均を行った (reverse averaging)。被験者が行う運動は、第 2 指を 2-3 秒の間隔の自己ペースで自発的に伸展させるというものであった。通常、被験者には 100-500 回くらい繰り返して運動させる。そして、Kornhuber と Deecke は、随意運動の開始に先行する漸増性の陰性緩電位

を発見し，これを準備電位 (bereitschafts-potential または readiness potential) と命名した (柴崎，1979)。

図 1-5 は，被験者に右手の第 1 指を屈曲させたときの ERP である (Deecke, Grözinger, & Kornhuber, 1976)。最上段から順に，左運動野，右運動野，中心部からそれぞれ導出した波形を示してある。通常，導出時の基準電極は両耳朶連結を用いる。それらの波形を比較すると，中心部が最大であることがわかる。運動のおよそ 800 ms 前から陰性電位が漸増しており，これがいわゆる準備電位である (Deecke, Scheid, & Kornhuber, 1969; Deecke et al., 1976)。最下段は，左右の運動野上から双極導出した

図 1-5. 右手第一指の屈曲運動に伴う運動関連脳電位。約 1000 回加算による波形を 8 つ重畳したもの。上の図から順番に，左中心部 (左第 1 次運動野の手の領野上)，右中心部 (右第 1 次運動野の手の領野上)，中心部から両耳朶連結を基準として導出した波形，および，左右の中心前野から双極導出した波形を示す。上向きが陰性。(Deecke et al., 1976 からの転載)



ERP であり,これが運動の直前に運動側とは逆 (以後,この意味で“対側”と表記する) の頭皮上で相対的に陰性となる運動電位 (motor potential) である. 図 1-6 は, 運動関連脳電位を構成する要素を模式的に示したものである (Deecke et al., 1976 から転載). はじめに準備電位が増大し, 反応の直前に陽性方向に触れ (pre-motor positivity, 運動前陽性電位), 運動の直後に体性感覚野への運動覚のフィードバックを示す陰性電位 (EVP) が出現する. このように全部で 4 つの成分があり, 運動前の成分は準備電位, 運動前陽性電位, 運動電位の 3 種である (ただし, 柴崎, 1979 によると, 運動前陽性電位は明瞭には出現しないことがしばしばある). この中で運動電位だけが対側運動野に限局し, 準備電位と運動前陽性電位は両側性に左右差なく分布すると考えられている (Deecke et al., 1969, 1976).

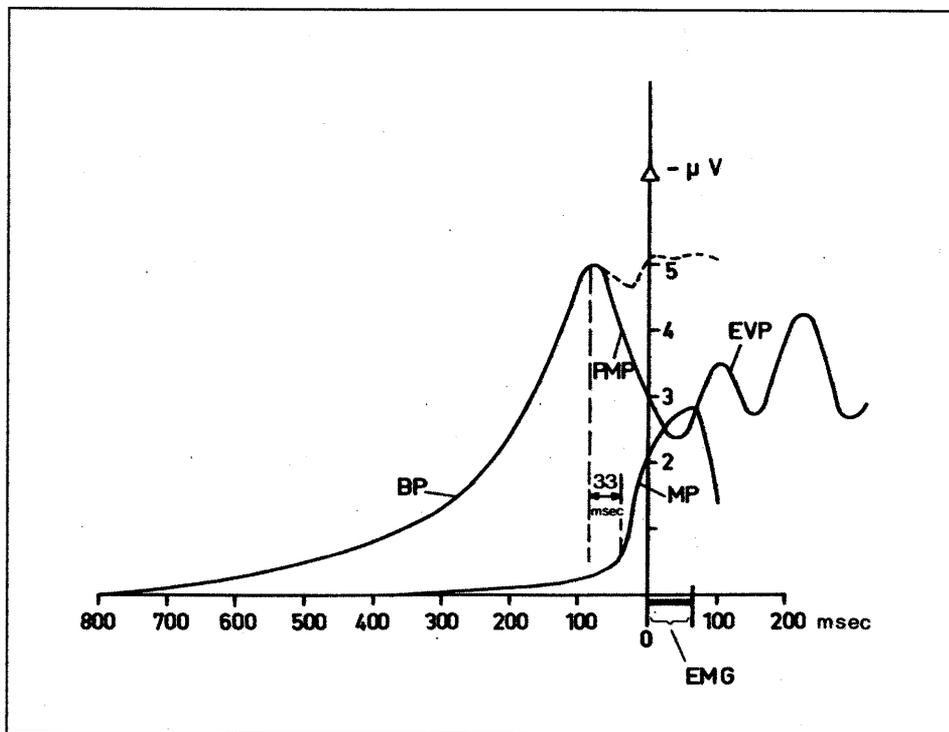
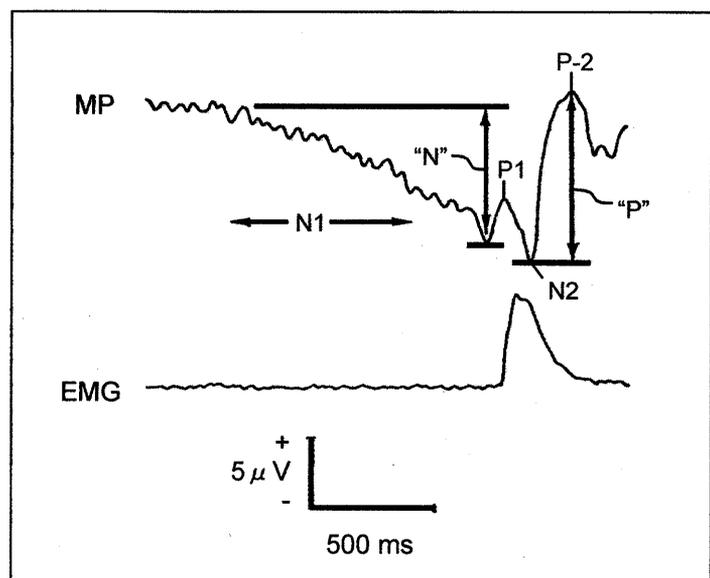


図 1-6. 運動関連脳電位の模式図. 準備電位 (BP) と運動前陽性電位 (PMP) は両耳朶連結を基準とした導出で, 運動電位 (MP) は双極導出による (図 1.5 の説明も参照). EVP は誘発電位. 上向きが陰性. (Deecke et al., 1976 からの転載)

LRP というのは、先に触れたように、両半球の運動関連領野の左右差を反映するので、Kornhuber らの分類における運動電位を反映するはずである。しかしこの点についてはいくつもの異論がある。まず、Kornhuber らが準備電位を発見した同じ 1965 年に、Vaughan, Costa, Gilden, & Schimmel も自発運動にともなう陰性電位の増大を発見し、これを“motor potential”と呼んだ (例えば、Gilden, Vaughan, & Costa, 1966; Vaughan, Costa, & Ritter, 1968. ただし、Vaughan らのこの概念は Kornhuber らの 4 つの構成要素をすべて含む概念なので、本稿では以後“運動関連脳電位”で統一し、“運動電位”は Kornhuber らの用語法で用いる)。そして、Vaughan らも運動関連脳電位を構成する要素として Kornhuber と類似した 4 成分を同定した。図 1-7 は、Vaughan et al. (1968) が 4 成分を説明した図で (上向きが陽性)、Kornhuber らの用語に対応させるならば、N1 成分が準備電位 (Arezzo & Vaughan, 1975)、P1 が運動前陽性電位、N2 が運動電位、P2 が EVP に相当するように見える (ただし、柴崎, 1979 によると、N2 と運動電位とは異なる可能性がある)。そして、Vaughan ら (1968; Gilden et al., 1966) は、N2 だけではなく、特に N1 の対側優位を報告した。この報告は、柴崎 (1976) や Shibasaki, Barrett, Halliday, & Halliday (1980) によっても支持されている。

さらに、Kutas & Donchin (1974) は、運動に関係する変数 (利き手, 反

図 1-7. 上段は、左中心部より記録した右手首背屈運動に伴う波形。上向きが陽性であることに注意。下段は、整流筋電図を加算したもの。(Vaughan et al., 1968 から一部改変して転載)



応手，反応するときの力の強さ) を操作する実験を行った結果，N1 (あるいは準備電位) に相当する成分が対側運動野上のほうが同側よりも大きくなることを確かめた．Kutas & Donchin (1974) は，反応する強さが電位に左右差を生じる重要な要因であることを示し，準備電位に左右差を認めない実験では被験者の反応が弱かった可能性があることを指摘した．以上のように，Kornhuber らの立場に立つならば，LRP は運動電位だけを反映することになるが，Kutas & Donchin (1974) の研究からもわかるように，準備電位 (Vaughan らの N1) における左右差も LRP に反映されていると考えるほうが妥当と思われる (Kutas & Donchin, 1980 も参照)．

次に，LRP の起源に関して述べておく．Arezzo & Vaughan (1975) は，サルの自発運動時に，運動野皮質を中心とする様々な個所に埋め込んだ電極から脳波を測定した．その結果，運動前およそ 85-110 ms 前に，N2 成分が第 1 次運動野の“手”の領域で最大になることを確認した．N1 成分の詳細なマッピングは行われなかったが，その分布は N2 とだいたい重なっていたようである．これを支持する知見は，サルについても (Hashimoto, Gemba, & Sasaki, 1981; Miller, Riehle, & Requin, 1992; Requin, Riehle, & Seal, 1988)，人についても (Neshige, Lüders, & Shibasaki, 1988; Neshige, Lüders, Friedman, & Shibasaki, 1988) 得られている．

Coles (1989) は，第 1 次運動野のほかに運動前野で生じる準備電位も左右差を生じ，LRP の一部を構成する可能性を指摘している．確かに，運動前野が準備電位に寄与することを明らかにしている研究もあるが (Requin, 1985; Requin et al., 1988; Riehle & Requin, 1989)，これらのサルを対象にした実験では，運動する手の対側半球にしか微小電極を挿入しなかったため，運動前野の準備電位が左右差を生じるかどうかは報告されなかった．一方，サルの大脳の両半球から微小電極で ERP を測定した Sasaki らの実験では，自己ペース運動でも (Hashimoto, Gemba, & Sasaki, 1979; Gemba, Sasaki, & Hashimoto, 1980)，視覚刺激始動性の運動でも (Sasaki & Gemba, 1982)，あるいは S1-S2 課題 (CNV 課題) においても (Gemba, Sasaki, & Tsujimoto, 1990; Sasaki, Gemba, & Tsujimoto, 1990)，運

動前野の準備電位は両側性に出現すると報告されている。もちろんサルのデータからの推論には慎重でなければならないが、Sasakiらの研究ではどの課題でも一貫して、運動前野の準備電位が両側性であること、第1次運動野と体性感覚野の準備電位がいずれも運動肢の対側で出現し、同側ではほとんど出現しないことが報告されている。これは、人の大脳の状態を考える場合にも参考となるデータである。運動前野の内側部(補足運動野)については、それが頭皮上準備電位に寄与し (Deecke & Kornhuber, 1978; Goldberg, Kwan, Borrett, & Murphy, 1984; Schreiber, Lang, Lang, Kornhuber, Heise, Keidel, Deecke, & Kornhuber, 1983), 左右差はない (Goldberg, 1985) という報告がある。しかし、サルの少数例ではあるが、自己ペース運動時に運動肢の対側補足運動野でだけ電位が認められたとする研究もある (Gemba & Sasaki, 1984)。また、補足運動野が両側性に活動する場合に限っては、ほぼ向いあう両半球の双極子が電位を相殺するので、補足運動野が頭皮上準備電位に寄与することはほとんどないと推定する研究もある (Bötzel, Plendl, Paulus, & Scherg, 1993; Lang, Cheyne, Kristeva, Beisteiner, Lindinger, & Deecke, 1991; 佐々木, 1984)。このように補足運動野については、運動前野と同様に、まだ確実なことは言えないようである。

以上から、Kornhuberらの分類における準備電位と運動電位が、運動の前に左右差を生じること、および、その左右差の少なくとも一部が第1次運動野と体性感覚野に起源をもつことは、ほぼ認めてよいと思われる。運動前野と補足運動野のLRPへの寄与は、今後の研究を待つほかはない。なお、体性感覚野の活動は運動野の活動の結果と考えられるので、その意味では、LRPデータの解釈において、運動野の活動とその原因となる脳部位の情報処理が議論の中心になることは自然と思われる。ただし、次のことに注意が必要であることも付け加えておく。これまでの研究で“新小脳-視床-運動野-四肢領野応答”が刺激始動性運動において重要な情報経路であることが明らかにされている (Gemba & Sasaki, 1988; Sasaki & Gemba, 1982, 1983, 1991a, 1991b; Sasaki, Gemba, & Mizuno, 1982)。そして、小脳外側核と中位核の両方の切除によって、小脳経由の

運動指令を欠落させたり (Sasaki & Gemba, 1984b), 運動野を冷却して機能不全にすると (Sasaki & Gemba, 1984a), 運動野の反応がほぼなくなり, 体性感覚野の準備電位が増大する. この時, 反応時間が長くなってばらつくものの, 課題の遂行は可能であった. しかし, 数日後に体性感覚野も冷却すると課題の遂行が不可能になった. これは, 体性感覚野が運動野の代償として機能することを示唆するデータである (玄番, 1993, 1994c; Tsujimoto, Gemba, & Sasaki, 1993). この場合は, 実験対象がサルであり, 小脳の一部を切除したり運動野を冷却するという特殊な事態を作っているので, 健常の人間について明らかなことは言えないが, 少なくとも体性感覚野が運動の発現に関与する場合があることは確実なようである.

LRP は, 以上のような運動関連脳電位を式 (1) にしたがって加工したものである. 図 1-8 は, 式 (1) による LRP の算出過程を示している (Coles, 1989 から転載). “C3'” と “C4'” は, それぞれ左運動野と右運動野の頭皮上の電極部位である (C3' は図 1-9 の Cz から左側 4 cm, C4' は右側 4 cm の位置である. C3 と C4 については, 個人差があるが, Cz の左右およそ 7-8 cm の位置である). 図 1-8 における合計 6 つの ERP のパネルには, 縦に 2 本の点線が引かれている. 左の 1 本目の点線は警告刺激が呈示された時点であり, 被験者はその刺激によって次に命令刺激がくることを知って待機する. 命令刺激が呈示されるのはパネルの 2 本目の点線の時点である. したがって, 2 本の点線にはさまれた時間帯に, 運動関連脳電位を構成する準備電位が出現し, 増大する. この図の ERP には, 命令刺激に対して反応する際に生じる運動電位や運動前陽性電位などが描かれていないが, それらは準備電位と同じ試行から測定されるので, ここで準備電位だけを例にとっても算出方法の説明としては十分である.

$$\text{LRP} = [\text{左手反応時の差分電位 (C3' - C4')} \text{ の加算平均波形} + \text{右手反応時の差分電位 (C3' - C4')} \text{ の加算平均波形}] / 2 \quad (1)$$

図 1-8 の上段のパネルは加算平均しただけの ERP である. “Left Hand” とあるのは, その試行が左手反応を要求したことを意味し, そのような

試行うち、正反応試行だけを加算平均した ERP である。“Right Hand”も同様である。いずれのパネルでも、電位は、反応する手の対側頭皮上のほうが同側よりも大きいことがわかる。また、警告刺激呈示後 100 ms から 200 ms 付近に、小さな ERP が左右いずれの手で反応しても左半球優位に現れている。この ERP は、反応する手とは無関係に、常に左半球か右半球で優位に生じると想定している。

次に、中段のパネルに、左右の手それぞれについて、対側電位から同側電位を引いた差分波形が示されている（振幅の単位が上段と中段のパネルで異なることに注意）。この引き算により両側の頭皮上に等しく出現する ERP は相殺されてなくなり、警告刺激後 500 ms 付近から増大する準備電位の左右差を生じた部分だけが残存する。しかし、この段階では、反応とは無関係の片半球優位の ERP も残存している。LRP の算出では、この中段の 2 つの ERP をさらに加算平均し、左右の手を込みにした波形を作る。それが下段の縦に並んだ 2 つのパネルの上側である。この時点で、反応とは無関係な片半球優位の ERP は相殺されてなくなる。その結果、LRP は、ほぼ純粋に運動関連脳電位の左右差を生じた部分だけで構成されることになる（もちろん両側性に生じる準備電位は相殺され、LRP として

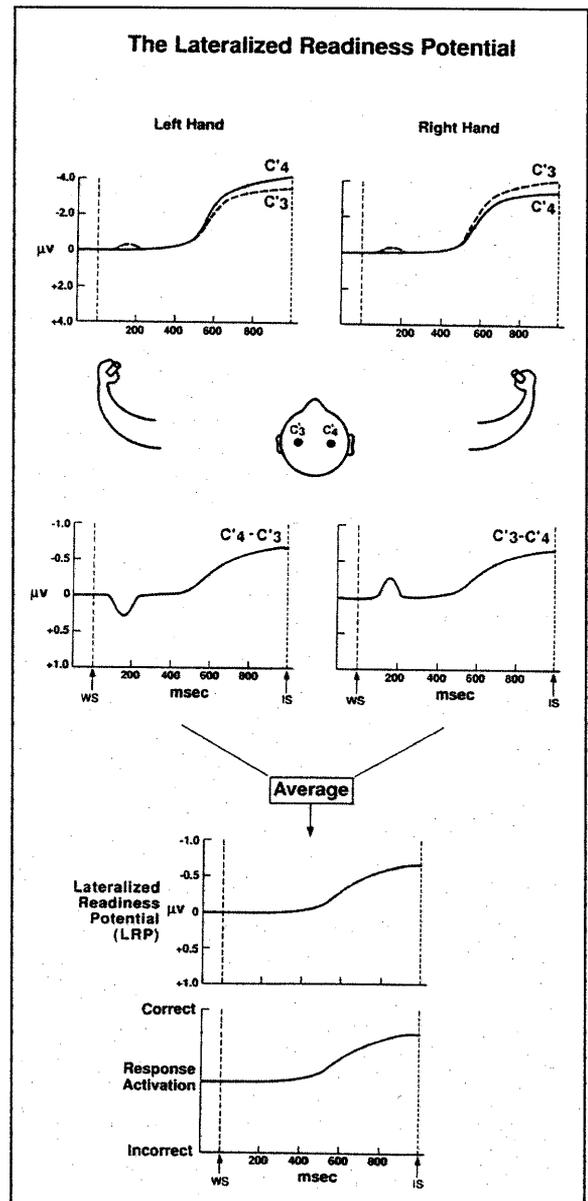


図 1-8. 偏側性準備電位 (LRP) の算出過程の模式図 (Coles, 1989 からの転載). 説明は本文を参照.

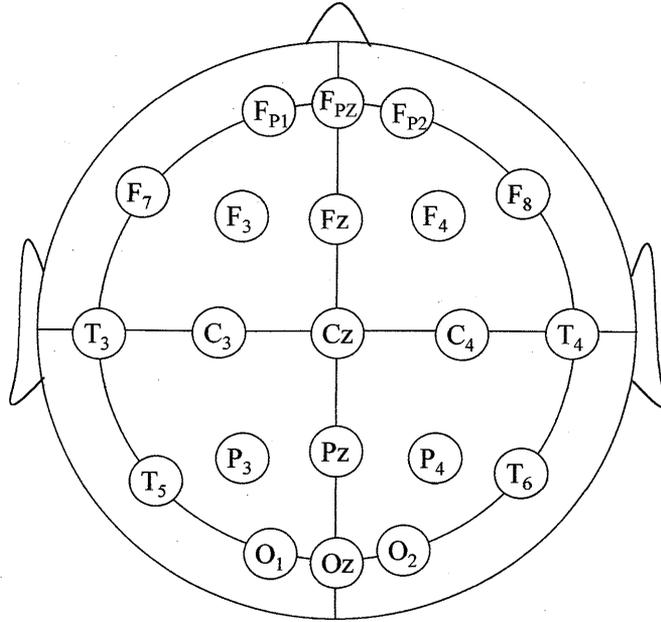


図 1-9. 国際 10-20 法に基づく電極位置.

は存在していない).

LRP の特徴をよく説明しているのが、一番下のパネルである．説明のはじめに述べたように、図 1-8 では、正しく反応した試行だけ进行分析している．したがって、正反応である手の対側電位から同側電位を引くと、運動関連脳電位の左右差は必ず陰性になる．一番下の図は、LRP が陰性方向（図では上方向）に振れば、それが正反応の準備状態を反映することを意味している．逆に、エラー反応を準備した場合（刺激は右手を意味するのに、左手反応を準備したような場合）、式（1）による波形は、陽性方向（下方向）に振れる．このように、LRP は、大脳における反応準備状態の正誤を判断する指標として使えるのである．ところで、LRP という名称は Gratton, Coles, Sirevaag, Eriksen, & Donchin (1988) によるものであるが、De Jong, Wierda, Mulder, & Mulder (1988) もまた、Gratton et al. と同時期に “Corrected Motor Asymmetry” という LRP と等価の ERP を用いて、認知的葛藤課題とは異なる課題の情報処理過程进行分析している．しかし、その後、一般に LRP の名称が用いられるようになったので、本研究でもそれに従うことにする．

1.3.2 認知的葛藤課題における3種類のエラー試行

本研究では、被験者に左右の手の選択的なボタン押しをさせると同時に、両腕からEMGを、頭皮上からはLRPを測定する。そして、これら3つの指標により3種のエラーを区別する。図1-10は、右手による反応が正答である場合について、3種のエラー反応を定義したものである(Coles, Scheffers, & Fournier, 1995から一部を改変して転載)。図1-10の左列に、ボタン押しだけを指標にしたときの、反応の正誤を示した。左上図では、ボタン押しのモニターに、右手の反応を示す矩形パルスが出現している。同様に下図では、左手のエラー反応があったことがパルスによって確認できる。

次に、右列に、ボタン押しとEMGを組み合わせた場合(上図)と、それにLRPを追加した場合(下図)を示した。上図では、被験者は正しく右のボタンを押しているが、左腕も一瞬わずかに動いたことがEMGからわかる。本研究ではこれをEMGエラーと呼ぶ(Coles, Gratton, Bashore,

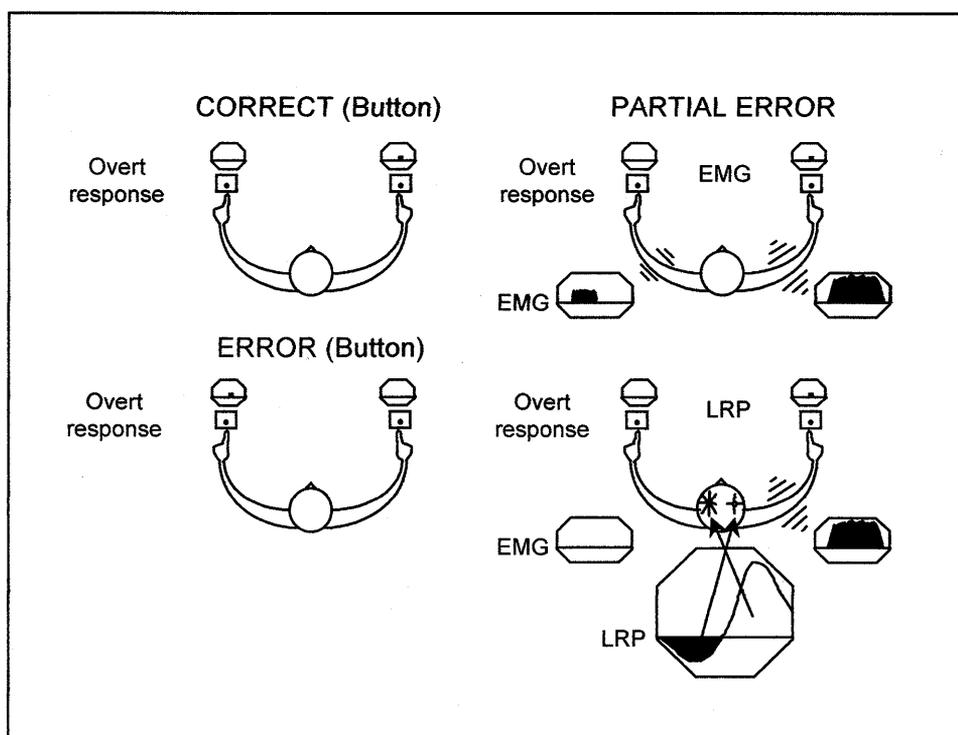


図 1-10. ボタン押しと EMG と LRP によるエラー反応の定義 (Coles, Scheffers, & Fournier, 1995 から一部を改変して転載)。説明は本文を参照。

Eriksen, & Donchin, 1985 や Eriksen, Coles, Morris, & O'Hara, 1985 が “partial error” と呼ぶものと同じである).

右下の図は、EMG レベルでもエラー反応がなく、その意味では、LRP を測定しなければエラー反応の要素がまったく見出せない試行を描いたものである。先に説明したように、LRP においては、陰性 (図の上方向) が正反応の準備状態、陽性 (下方向) はエラー反応の準備状態を示す。したがって、図に示した LRP は、被験者が一度エラー反応を準備し、それを修正してから正反応を準備したことを示している。

以上のように、EMG や LRP を利用すると、(a) ボタン押しのような明らかなエラー試行 (ボタン押しエラー試行)、(b) 誤りとなる腕に弱い筋放電が生じたもののボタン押しには至らなかったエラー試行 (EMG エラー試行)、(c) 外見的には完全な正反応であるが、大脳ではエラー反応の準備が一時的に生じた試行、という質的に異なる 3 つのエラー試行を区別することができる。

1.3.3 認知的葛藤課題における情報処理モデル

Coles, Smid, et al. (1995) によると、ERP 研究は、独立変数の効果の所在 (独立変数がどの情報処理過程に影響を及ぼすのか) という観点と、システムがどのように機能するのか (ある合目的的行動を産出するまでのシステムの働き方、あるいは “executive control, 実行制御”) という 2 つの観点から整理できる。以下、認知的葛藤課題における情報処理モデルについても、それらの観点から整理する。

(1) 独立変数の効果の所在に関する情報処理モデル

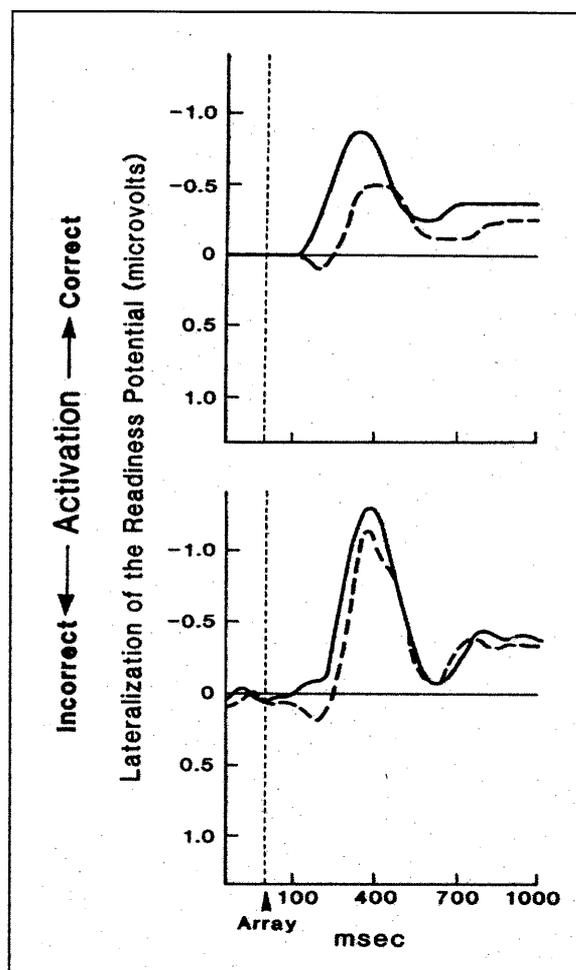
相互抑制モデル

認知的葛藤課題において独立変数がどの情報処理過程に影響を及ぼすのかという問を立てたのは、Coles et al. (1985) と Eriksen et al. (1985) であった。すなわち、刺激の一致性の効果 (ノイズ文字の効果) は、刺激の評価段階にあるのか、あるいは反応段階にあるのかという問題設定である。いずれの研究においても、前腕の EMG を測定したところ、ボタ

ン押しエラー試行と EMG エラー試行の割合が，一致刺激（例えば，HHHHH）より不一致刺激（例えば，SSHSS）の試行における方が大きかった．この結果から，不一致刺激に含まれるノイズがエラー反応を賦活し，標的文字に対する正反応と競合（response competition, 反応競合）を生じたのではないかと推定された（Coles, et al., 1985; Eriksen, et al., 1985）．これを大脳の情報処理過程において生じている事態に関する仮説として表現すると，正反応とエラー反応とが反応の出力前に“相互抑制（mutual inhibition, Eriksen, et al., 1985; reciprocal inhibition, Gratton et al., 1988）”を生じ，その結果，正反応を実行するまでの時間が長くなったといえる（本研究では，仮定する情報処理過程をより直接的に表現しているという理由で，“相互抑制”の用語を用いる）．この仮説をLRPによって検討したのが Gratton et al. (1988) であった．図 1-11 は，Gratton et al. (1988) が Eriksen らの認知的葛藤課題で測定した LRP の総加算平均波形である．不一致刺激の破線波形からわかるように，エラー反応の準備を示す陽性 LRP が，陰性に振れる直前に生じている．この結果は，正誤反応の相互抑制が，不一致刺激の試行の反応準備段階で生じていたことを支持する証拠と考えられた．

相互抑制モデルによって反応時間の結果を説明するためには，もう 1 つの仮定が必要であった．それは，Gratton et al. (1988) が提出した LRP の“fixed criterion hypothesis (閾値一定説)”である．図 1-12 は，Gratton et al. (1988) による認知的葛藤課題における LRP であるが，EMG 潜時によって試行を 4 カテゴリー（150-199 ms, 200-249 ms, 250-299 ms, 300-349 ms）に分類し，加算平均したものである．加算する範囲は，警告刺激が呈示される 100 ms 前から反応が生じた時点までである．図 1-12 の 3 つのパネルに共通することは，反応生起時点での LRP 振幅がほぼ一定であることである．反応出力時の LRP 振幅は，刺激の一致性や反応の正誤にかかわらずほぼ一定であり，EMG 潜時の 4 カテゴリー間の比較でも差がない．このようなデータは，LRP がある一定の閾値に達したときに反応が出力されるという閾値一定説を支持すると考えられた．したがって，相互抑制モデルでは，エラー反応の準備が，正反応準備の開始時間と閾

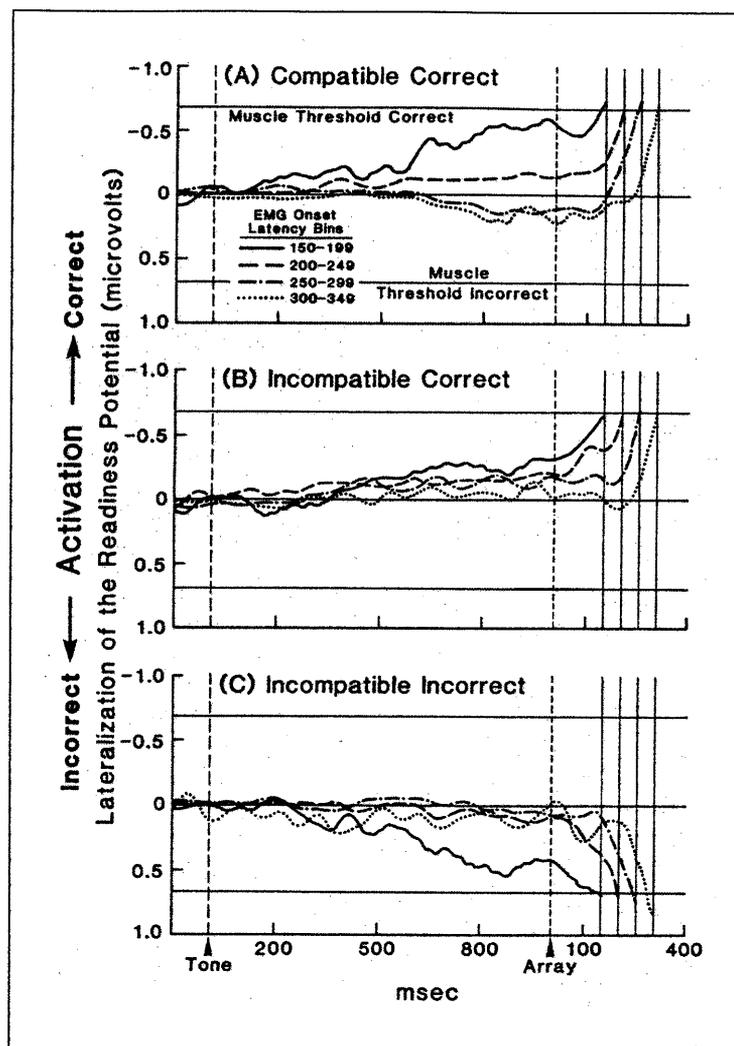
図 1-11. Eriksen 課題における命令刺激呈示時の LRP 波形. 上段は全試行を加算平均した波形で, 下段は EMG 潜時が 300 ms から 349 ms までの範囲に入る試行だけを加算した波形. (Gratton et al., 1988 から一部を改変して転載)



値到達時間を遅らせ, その結果, EMG 潜時やボタン押し反応時間も延長すると説明できる. このように, LRP の閾値一定説を前提とすると, 正誤反応の相互抑制は必然的に反応時間を延長させると考えられる.

一方, Coles et al. (1985) は, 不一致刺激に対する反応時間の延長には, P3 という ERP 成分が反映する情報処理も関与することを指摘している. P3 は, 反応過程とは別の処理過程 (例えば, 刺激評価) を反映すると考えられている (Donchin & Coles, 1988; Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977; Magliero, Bashore, Coles, & Donchin, 1984; McCarthy & Donchin, 1981; Ragot, 1984). Coles et al. (1985) の結果では, その頂点潜時は一致刺激より不一致刺激に対するほうが長かった. また, 反応時間と反応の正答率, および P3 潜時との関係を調べた結果, 任意の反応時間における反応の正答率は P3 潜時が短いほど高くなることがわかった. P3 成分が反映する心理的過程については様々な考え方があがる (例えば, Meyer et

図 1-12. Eriksen 課題における警告刺激の呈示以降の LRP 波形。上段は一致刺激に対する正反応試行, 中段は不一致刺激に対する正反応試行, 下段は不一致刺激に対するエラー反応試行をそれぞれ加算平均した波形を示す。各パネルの 4 波形は, EMG 潜時の 4 カテゴリーに対応する。各パネルの上下に水平に引かれた 2 本の線は, LRP の閾値を示す。(Gratton et al, 1988 からの転載)



al., 1988 の批判的検討), 刺激の評価のような, 反応過程とは別の処理過程が, 不一致刺激に対する反応時間の延長に関与していることは確かなようである。

ところで, Eriksen らの認知的葛藤課題は, 情報の伝達様式 (処理段階間の伝達様式が直列的か並列的か, さらに離散的か連続的かという問題) を視点にした研究でも利用されてきたが (Meyer et al., 1988; Miller, 1988; Coles, Smid, et al., 1995), ここではその問題には立ち入らない。

(2) 実行制御に関する情報処理モデル

次に, 情報処理システムがどのようにしてある合目的的行動を産出できるように機能するのかという実行制御の観点から, 認知的葛藤課題の情報処理過程を概観する。この種の研究は大きく 2 つある。1 つは, 刺

激情報の処理に焦点をあてた研究である。すなわち、複数の種類の情報（例えば、色や形態）のどれを優先的に処理するのかを決める制御に関する研究 (Smid, Mulder, Mulder, & Brands, 1992), および、刺激評価処理から、その処理の継続中に次々と反応準備処理に送られていく情報（文字刺激の場合ならば、どの文字かが同定される前に伝達される“形態的特徴” (Smid, Lamain, Hogeboom, Mulder, & Mulder, 1991) などのことで、一般に“partial information (部分情報)”と呼ばれるもの) を反応準備の形成に役立てるかどうかが決める方略的制御 (strategic control) に関する研究である (Gratton, Coles, & Donchin, 1992; Gehring, Gratton, Coles, & Donchin, 1992 も参照)。もう 1 つは、エラー反応の検出 (detection), 修正 (correction), および補正 (compensation) に関わるとされる“Error-Related Negativity, ERN (エラー関連陰性電位)” (Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990), あるいは“Ne” (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990, 1991) に関する研究 (本稿では以下 ERN と呼ぶ), および, Kopp, Rist, & Mattler (1996) によるエラー反応の準備段階での抑制処理様式を検討した研究である。本研究ではエラー反応を未然に防ぐ情報処理過程に関心があるので, ERN に関する諸研究と Kopp, Rist, et al. (1996) の研究をとりあげる。なお, 実行制御における反応抑制処理の役割は, 認知的葛藤課題以外の課題でも検討されているが (例えば, De Jong, Coles, Logan, 1995; De Jong, Coles, Logan, & Gratton, 1990; Naito & Matsumura, 1994, 1996), ここでは認知的葛藤課題に焦点を絞って説明する。

エラー反応の出力後の実行制御

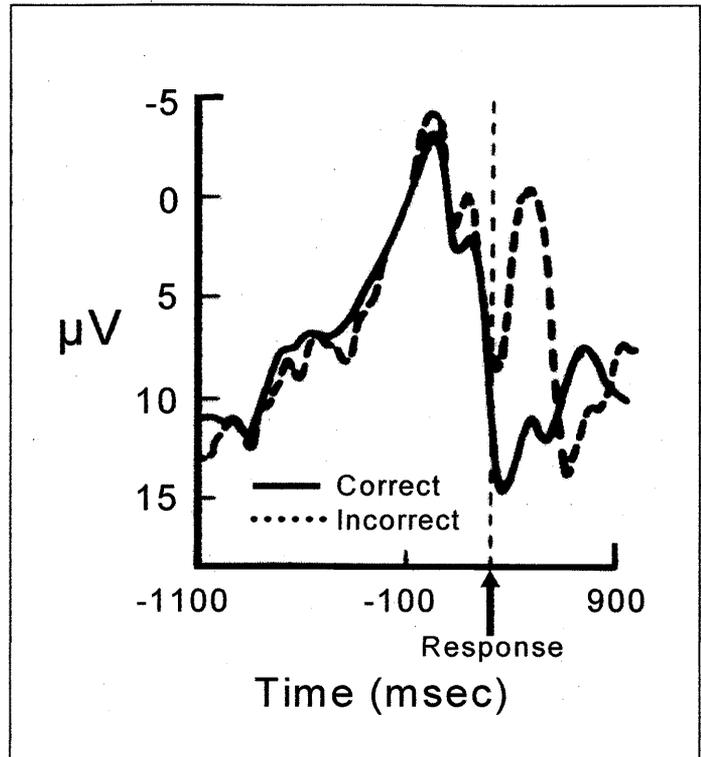
人のエラー反応に注目した研究では, エラー反応が素早く修正されて正反応がなされることや (Rabbitt, 1966, 1968, 1978), エラー反応が生じた次の試行では反応時間が長くなること (Bechtereva, Medvedev, & Abdullaev, 1991; Rabbitt, 1966) から, 人の認知機構にはエラーの検出と修正のモニター機構が存在すると仮定されている (Rabbitt, 1966, 1978)。エラー反応のモニター機構という発想は一般的であり, 例えば, 発話行

為 (Levelt, 1983, 1989) や運動学習 (Adams, 1971), もっと広く行為の認知的制御 (Angel et al., 1971; Badgaiyan & Posner, 1998; Logan, 1985; Passingham, 1998; Shallice, 1975; Shallice & Burgess, 1998) などで想定されている。

エラーの検出と修正の基本的な考え方は, 実際の行為と理想的行為とのずれを検出して修正するところにある (Adams, 1971; Angel, 1976). そして, 実際の行為に関する情報には, 中枢に起源をもつ遠心性コピーと, 末梢に起源を持つ自己受容性感覚や視覚などからのフィードバックとがあり, 行為のモニター機構はそれらを利用すると考えられる. しかし, 中枢性起源の行為情報を利用してエラーを検出する大脳の働きを直接的に捉えた研究は, ERN が発見されるまではほとんどなかったようである (Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993). なお, エラー行為の認知と関連するニューロンが存在することはもっと以前からわかっていたが (Gemba, Sasaki, & Brooks, 1986; 久保田, 1985, 1993; Kubota & Komatsu, 1985; Niki, 1982; Niki & Watanabe, 1979; Rosenkilde, Bauer, & Fuster, 1981; Thorpe, Rolls, & Maddison, 1983; Watanabe, 1989; Watanabe & Niki, 1985), 以下では頭皮上から検出される ERN に焦点をあてた議論を行う。

図 1-13 は, Eriksen らの認知的葛藤課題の不一致刺激に対する ERP を示したものである (Coles, Gehring, Gratton, & Donchin, 1992 から転載). 図の縦に引かれた点線は反応が生じた時点である. エラー反応が生じた試行の破線波形では, エラー反応とほぼ同時に $10\mu\text{V}$ 程度の陰性電位が出現している. 正反応試行の実線波形にはそのような電位は認められない. ERN は, 被験者が行動指標上で (握力計の把握動作やボタン押しなどで) 明瞭なエラーをしなくても, EMG のレベルでエラーをすれば出現する. その頂点潜時は, EMG 開始時点からおよそ 100-150 ms 後であり, 頭皮上では中心部と前頭部が優勢である (Gehring et al., 1993; Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring, & Donchin, 1996). ERN の起源は, 帯状回前部と補足運動野が主であると考えられている (Badgaiyan & Posner, 1998; Dehaene, 1996; Dehaene, Posner, & Tucker, 1994. Miltner, Braun, & Coles, 1997).

図 1-13. Eriksen 課題における不一致刺激に対する ERP 波形. 縦の点線は反応時点を示す. (Coles, Gehring, Gratton, & Donchin, 1992 からの転載). 本文の説明を参照.



ERN は, (a)課題の種類 (例えば両手を使う種々の選択反応課題; Gehring et al., 1990) や刺激の種類 (視覚, 聴覚, および触覚刺激; Falkenstein, Koshlykova, Kiroj, Hoormann, & Hohnsbein, 1995; Miltner et al., 1997) とは無関係に出現し, (b)被験者に反応のスピードよりも正確さを求めた方が振幅が大きくなり (Falkenstein et al., 1990; Gehring et al., 1993), (c)振幅が大きいほどその試行のエラー反応は小さく (Gehring et al., 1993), (d)さらに, 次試行の反応時間が長くなる (Gehring et al., 1993). Gehring et al. (1993) は, 上の (c)と(d) を根拠にして ERN がエラー反応の抑制や修正 (あるいは, 補正) に関わると考えた. しかし, (c)の結果が再現されなかったという研究 (Scheffers et al., 1996) や, 時間推定課題 (time estimation task) で被験者の反応から一定時間後に呈示した正誤を示す信号に対して ERN と類似する ERP が惹起された研究 (Miltner et al., 1997; 類似課題におけるサルの単一ニューロン活動については Niki & Watanabe, 1979) があることから, 現在では, ERN がエラー反応の検出にだけ関わるとする見方が有力のようである. また, 注意に負荷をかける注意分割条件 (divided attention condition) においては, ERN の潜時

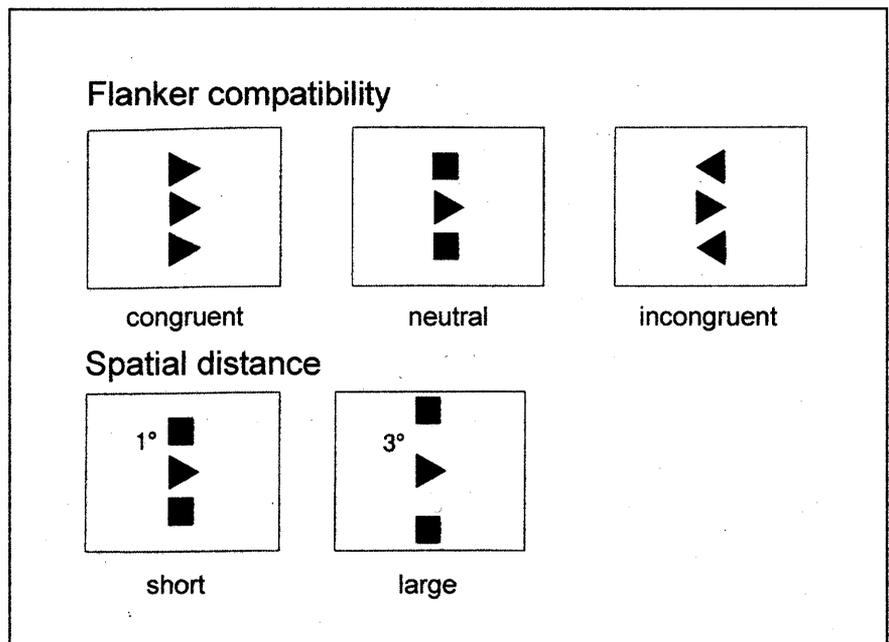
が長くなったことから，ERN が反映するシステムは注意機構と資源を共有する（あるいは，資源をめぐる競争する）ことが示唆されている (Falkenstein et al., 1990).

以上のように，ERN がエラー反応とほぼ同時に出現するので，ERN が反映するエラー検出メカニズムが利用する行為情報の起源は，自己受容性のフィードバック情報ではなく（時間的に遅すぎる），遠心性コピーと考えられている (Gehring et al., 1993). つまり，遠心性コピーを情報源とする，エラー反応のモニター機構が存在すると考えられる。

エラー反応の準備段階における実行制御

一方，エラー反応の準備状態に対して出現する ERP に関しては，Kopp, Rist, et al. (1996) の研究が示唆的である。彼らは，三角形と四角形を刺激として，Eriksen らの認知的葛藤課題の類似課題を作成した (図 1-14). 中央の三角形が標的で，上下の図形はノイズとしてのフランカーである。この実験では，被験者がエラー反応を生じやすいようにするため，フランカーを標的よりも 100 ms 先行させて呈示し，標的とフランカーの距離（視角が 1 度の短い間隔条件と 3 度の長い間隔条件）を操作した。被験者の課題は，中央の標的に注目して，2 ニュートン（国際単位系の組立単

図 1-14. Kopp, Rist, et al. (1996) が実験で用いた刺激。(Koop, Rist, et al., 1996 からの転載)



位で、1 ニュートンは、質料 1 キログラムの物体に作用して、毎秒 1 メートルの加速度を生じさせる力の大きさ) 以上の強さで左右の選択的なキー押しを行うことであった。実験の結果、反応時間は一致刺激、ニュートラル刺激、不一致刺激の順で長くなった。フランカーの影響は、短い間隔条件のほうが大きかった (短い間隔条件の反応時間は、長い間隔条件よりも、一致刺激に対してより短く、不一致刺激に対してより長かった)。また、LRP に示されるエラー反応の準備が、短い間隔条件のほうが長い間隔条件よりも大きく生じた。

図 1-15 は不一致刺激の試行を分析したものである。左パネルはキー押しの強さと総加算平均 LRP 波形であり、右パネルは総加算平均 ERP 波形である (距離要因の 2 水準は込みにしてある)。横軸の“T”は標的の呈示時点である。フランカーに対する ERP と標的に対する ERP が重畳しているために複雑な形状になっているが、不一致刺激に対する陰性電

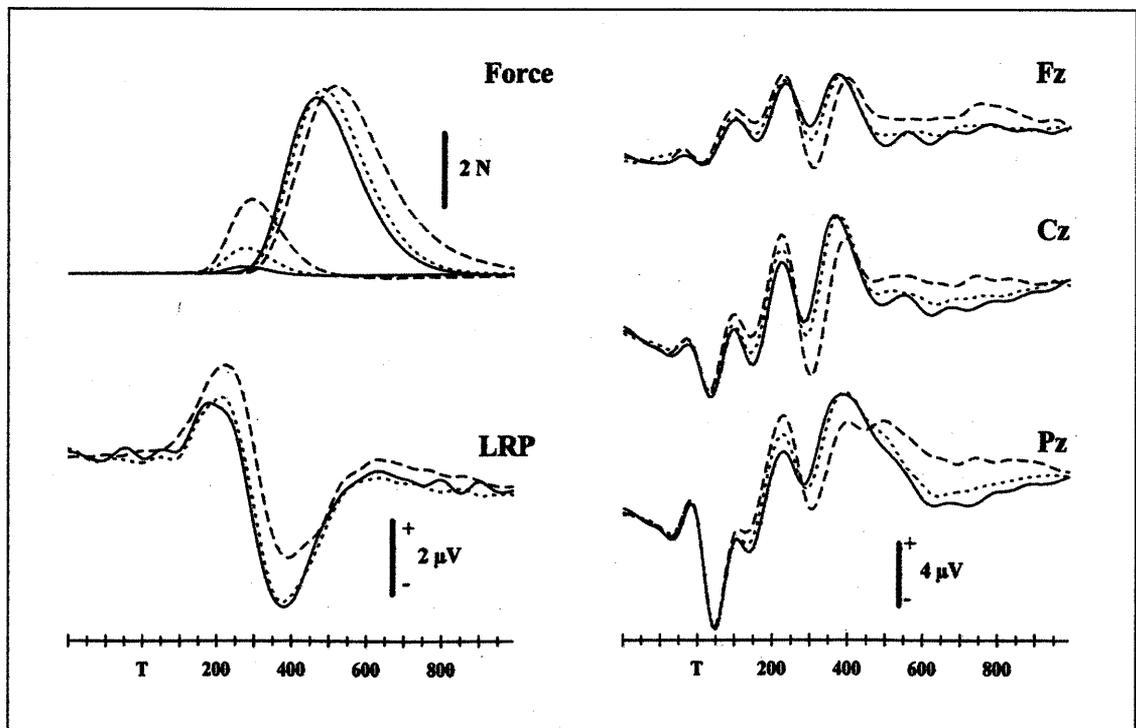


図 1-15. Kopp, Rist, et al. (1996) の実験結果。左パネル上図はキー押しにおける力の大きさ, 下図は LRP の波形である。右パネルは標的呈示時の ERP 波形。(Kopp, Rist, et al., 1996 からの転載)。説明は本文を参照。

位 (N2c) が標的呈示後ほぼ 300 ms 付近を頂点にして現れた。また, Kopp, Rist, et al. (1996) は, 不一致刺激の試行をエラー反応の大きさによって分類し, 刺激呈示時点を起点 (0 点) に ERP を加算した。その結果, N2c は, エラー反応がほとんどない試行でも生じ, エラー反応が大きくなるほど増大した。さらに, エラー反応が生じた時点を起点として ERP を加算すると, エラー反応とほぼ同時に陰性電位が出現すること, それがエラー反応の大きさに比例することを確認した。そこで, Kopp, Rist, et al. (1996) は, N2c の出現分布と発生条件が ERN に類似することから, N2c もまたエラー反応に関する情報処理を反映すると考えた。ただし, N2c はエラー反応がほとんど生じなくても出現するため, ERN とは同一ではないとした。つまり, N2c は, エラー反応をその準備段階で検出し, それを抑制する処理に関わると考えたのである。

このように, Kopp, Rist, et al. (1996) は, 反応抑制処理という一種の実行制御を認知的葛藤課題において検討したが, それからおよそ 20 年ほども前に, Eriksen & Eriksen (1974) と Eriksen & Schultz (1979) は, 反応抑制処理を構成要素として含む “check operation, チェック操作” というより包括的な仮説をすでに提出していた (Kopp, Rist et al., 1996 はこの点について言及していない)。

チェック操作モデル

Eriksen & Eriksen (1974) は, 反応の正しさをチェックする間は反応を全体的に止めておく必要があるため, ある種の抑制処理 (some type of inhibitory process) が全ての反応に働くと考えた。標的文字 (例えば, H や S) だけで 1 ブロックを構成した葛藤なし条件と, それらを, 標的にノイズを付けた刺激 (例えば, HHHHHHH, SSSSSSS, SSSHSSS, HHHSHHH) に混ぜて呈示した葛藤条件とを比較したところ, 標的だけの刺激に対する反応時間は, 葛藤なし条件の方が葛藤条件よりも短かった。彼らは, 葛藤条件ではノイズを伴う刺激が含まれているため, 被験者は (a)エラー反応をしないように反応準備のチェックを行い, (b)その間, 反応を出力しないように全ての反応を抑制する, (c)さらに, この条

件下では標的のみの刺激に対してもチェック操作が働くと考えた。一方、葛藤なし条件では、標的文字しか呈示されないため、ノイズ文字によるエラー反応をチェックする必要がはじめからない。したがって、標的文字だけの刺激に対する反応時間は、葛藤条件よりも短くなると考えた。

一方、Eriksen & Schultz (1979) は、チェック操作の働き方を、反応抑制様式に関して修正した。すなわち、チェック操作を構成する反応抑制機構は、準備中の反応が正しいかどうかを確認し、エラー反応の準備だけを選択的に抑制する (differential inhibition of noise response) と考えた。Eriksen & Schultz (1979) の実験では、通常の認知的葛藤条件の他に、1 ブロック中ではノイズ文字の同じ刺激だけを用いるブロック化条件 (例えば、AAAAA と AAHAA, あるいは HHHHH と HHAHH) を設定した。実験の結果、不一致刺激に対する反応時間は認知的葛藤条件よりもブロック化条件の方が短かった。この結果の解釈においては、被験者がブロック化条件下の刺激が全て同じノイズを有していることを知っていて、ノイズによるエラー反応を予測できることが重要である。そこで、チェック操作によるエラー反応の検出と選択的抑制が認知的葛藤条件よりも短時間で行われて、不一致刺激に対する反応時間も短くなったと考えられる。以下、チェック操作という用語は、特に断らない限り、時期的に後に提出された Eriksen & Schultz (1979) のものを指して用いる。

図 1-16 は、チェック操作を含む情報処理過程を描いたものである。図では、刺激として“SSHSS”の不一致刺激が呈示された場合を示してある。刺激評価系からの情報は、反応準備過程とチェック操作の両方に伝達される。刺激評価の初期段階では“H”の情報も伝達されるが、それよりも“S”の情報量が多いので、その影響でエラー反応の準備が生じている。しかし、チェック操作が刺激評価系から受け取る情報をもとに、エラー反応の準備を検出し、それを抑制しながら反応選択と反応準備をやり直すという流れである。

すでに述べたように、相互抑制モデルでは、エラー反応の準備と正反応準備という 2 つの対立する反応傾向が相互に抑制し合うと仮定している。その結果、正反応準備の LRP が閾値に到達するまでの時間が長くな

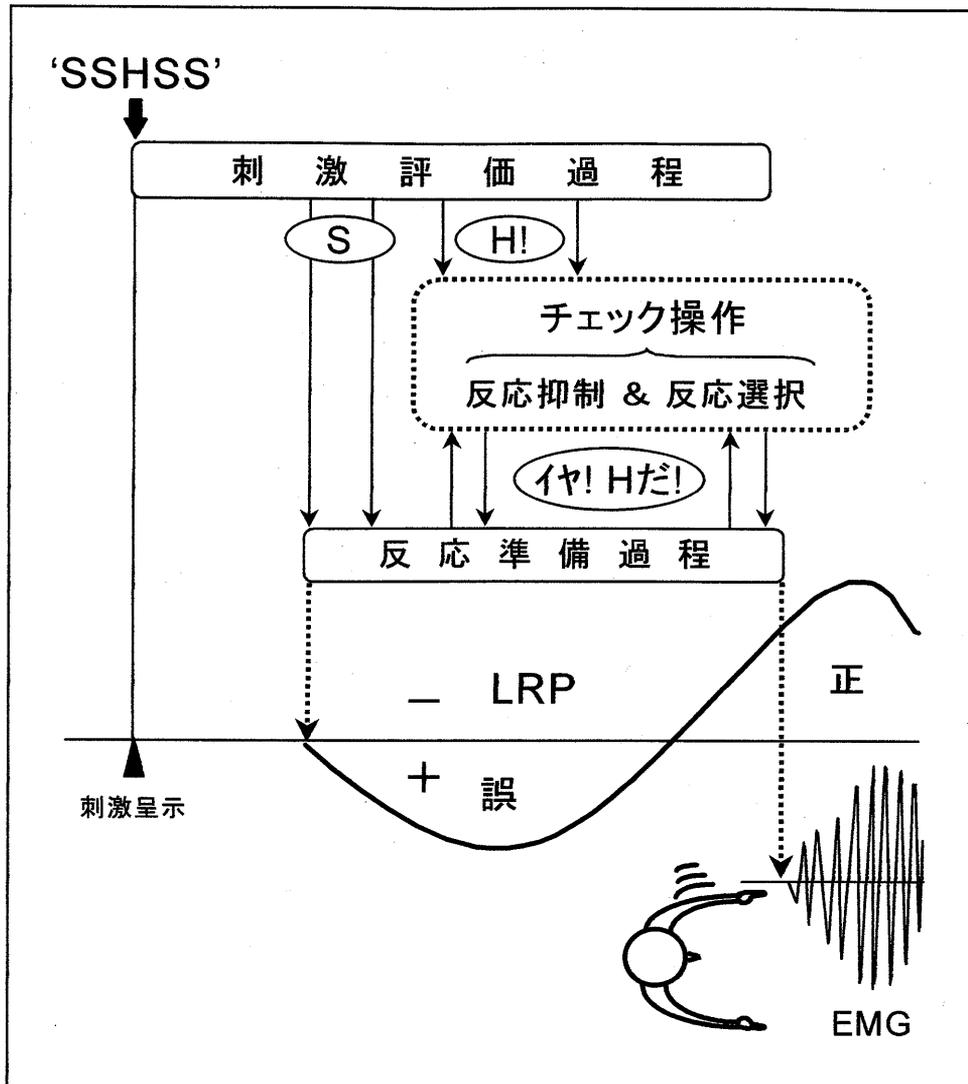


図 1-16. Eriksen らの認知的葛藤課題におけるチェック操作処理を含む情報処理過程の流れ図. 左手による反応が正答. 説明は本文を参照.

り、反応時間もそれに応じて長くなると考える。一方、チェック操作モデルでは、LRP の閾値については何も仮定せず、選択した反応の正しさを確認し終えるまでの処理時間が反応時間を決定すると考える。したがって、仮にエラー反応が準備されても、チェック操作が短時間にすみやかに機能すれば、反応時間もそれに応じて短縮すると予想されるのである。

以上のように、チェック操作とは、合目的的行為を支える実行制御の1つのあり方を示しており、Kopp, Rist, et al. (1996) の反応抑制処理の発

想をそのまま含んでいるということもできる。したがって、Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c のような、エラー反応の準備との関連で生じる陰性 ERP は、チェック操作モデルが仮定する反応抑制処理の役割を検討するツールとして利用できる可能性がある。

なお、Eriksen, C. W. は、相互抑制モデルとチェック操作モデルの両方に関わっているが、それらの関係についての言及は見当たらない。また、現在までのところ、2 つのモデルに示される情報処理過程のいずれがデータとの整合性がよいかを比較し、評価した研究もないようである。

第 4 節 問題と目的

本研究の関心は、タイピング動作の“置換エラー (which→whihc)”や“交互打ちにおけるエラー (these→thses)”に例示されるような、左右の手の順序づけのエラーを未然に防ぐ情報処理過程にある。そこで、左右の手の選択エラーを誘発する Eriksen & Eriksen (1974) の認知的葛藤課題を採用し、被験者がエラー反応を準備しながらも正しく反応するまでの情報処理過程を再現する。そして、これまでに提出されている相互抑制モデルとチェック操作モデルの妥当性を ERP と行動指標を利用して検討する。

1.4.1 相互抑制モデル

まず、相互抑制モデルに関しては、これまで、(a) LRP に反映される正反応準備がその閾値に到達するまでの時間がエラー反応の準備によって長くなるという前件が与えられたときに、(b) 反応時間が長くなるという後件を示すデータが繰り返し示され、相互抑制モデルを支持する結果とみなされてきた (例えば、Gratton et al., 1988; Smid, Mulder, & Mulder, 1990; Smid et al., 1991)。相互抑制モデルを支持するというのは、言いかえると、LRP の閾値一定説を支持するということでもある。そこで、実験 1 では、相互抑制モデル、ひいては LRP の閾値一定説の妥当性を検討するため、上の“(a) ならば (b)”という含意命題とは対偶の関係にあた

る“(b) でないならば (a) でない”という含意命題が支持されるかどうかを検討する。つまり、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激よりも長くないという前件を与えたときに、正反応準備（陰性 LRP）がその閾値に達するまでの時間がエラー反応の準備によって長くなってはいないという後件が現象として認められるかどうかを検討する。この仮説を検討した研究はこれまでにないようである。

1.4.2 チェック操作モデル

次に、チェック操作モデルに関しては、その構成要素である反応選択と反応抑制のうち、特に後者の反応抑制処理が反応時間の変化に関係するのかどうかを重点的に検討する。つまり、Eriksen & Schultz (1979) が言うように、エラー反応の準備に対する選択的抑制処理が、反応時間の変化に関係しているのかどうかを検討する。そのためには、反応抑制処理を測定できる指標が必要である。

Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c は、実際のエラー反応がほとんどない場合にも出現し、エラー反応の準備の大きさに比例して変化した。したがって、N2c は、反応準備段階における反応抑制処理の ERP 指標として有用と思える。しかし、エラー反応が少しでも観察されたならば、エラー関連陰性電位 (ERN) が N2c に重畳すると考えたほうがよい。一方、Kopp, Mattler, Goertz, & Rist (1996) は、同様の陰性電位 (N2) を、左右の手の選択反応と GO/NO-GO 課題とを組み合わせた課題でも測定した。そして、N2 が、エラー反応の準備が認められる時に、それが認められない場合よりも増大することを示した。しかしこの実験でも反応の有無の基準を 2 ニュートンにしたので、それより弱いエラー反応が生じた試行も正反応として扱っていた。そのような試行では、N2 が ERN の重畳によって見かけ上、増大していた可能性を否定できない。さらに、Kopp, Mattler, et al. (1996) の研究では、ERN とは明らかに異なる起源を持つ NO-GO 電位（反応を止めておく情報処理に関与すると言われる ERP。例えば、Sasaki & Gemba, 1986）との区別があいまいという問題もある。この点は Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c についても言えることである。現

在までのところ、認知的葛藤課題においては、反応抑制に関連する陰性電位が、エラー反応の準備に対する実行制御に関連して出現し、変化しうるのかどうかという点を十分に明らかにした研究はないようである。そこで次に、NO-GO 電位の性質を述べ、それを認知的葛藤課題へ応用するために必要な検討課題を明らかにする。

運動をしないという意思決定 (the judgement not to execute the movement. 以下, NO-GO 判断) と運動の抑制 (the suppression of motor execution. 以下, 反応抑制) の両方, あるいはそのうちの一方を反映すると考えられる ERP に, NO-GO 電位と呼ばれる陰性電位がある (Sasaki & Gemba, 1986; Sasaki, Gemba, & Tsujimoto, 1989; レビューとしては玄番, 1994a, 1994b, 1994c). NO-GO 電位は, サルを対象にした視覚性 GO/NO-GO 課題においては, 前頭前野の主溝背側皮質と吻側腹側端に発生源を持ち (Sasaki & Gemba, 1986; Sasaki et al., 1989), 刺激呈示後 110-150 ms で立ち上がっておよそ 50 ms 程度持続する (Sasaki & Gemba, 1986). サルの場合, 聴覚刺激を用いても同様の結果になる (Gemba, 1993; Gemba & Sasaki, 1990). NO-GO 電位は人で測定すると, 刺激呈示後 200-300 ms 付近に陰性の頂点を持って出現し (Eimer, 1993; Gemba & Sasaki, 1989; Jodo & Kayama, 1992; Pfefferbaum, Ford, Weller, & Kopell, 1985; Sasaki, Gemba, Nambu, Jinnai, Yamamoto, & Llinas, 1992), それとサルにおける NO-GO 電位とは機能的に等しいと考えられている (佐々木, 1993; Sasaki, Gemba, Nambu, & Matsuzaki, 1993). 最近の機能的 MRI を用いた研究は, NO-GO 試行における人の脳の活動部位とサルの活動部位との類似性を支持している (Casey, Trainor, Orendi, Schubert, Nystrom, Giedd, Castellanos, Haxby, Noll, Cohen, Forman, Dahl, & Rapoport, 1997). また, NO-GO 電位振幅は, 反応の抑制に努力を要するほど増大し (Jodo & Kayama, 1992), その頂点潜時は記憶負荷の増大によって長くなる (Kok, 1986) と報告されている。

ところで, 人に対して聴覚刺激を用いた実験では, しばしば, NO-GO 電位が現れなかったり, むしろ GO 試行の N2 のほうが NO-GO 試行よりも大きく生じることがある (Banquet, Renault, & Lesèvre, 1981;

Falkenstein, et al., 1995; Hillyard, Courchesne, Krausz, & Picton, 1976; Karlin, Martz, & Mordkoff, 1970). Falkenstein et al. (1995) は、NO-GO 試行における N2 の増大を視覚刺激特異的であり、反応抑制とは無関係と考えているが、この点はまだ十分には結論できない。例えば、Gemba (1993) や Gemba & Sasaki (1990) のサルを対象にした研究では、聴覚刺激に対する NO-GO 電位が現に出現しており、岩木 (1997) の実験でも人を対象にした聴覚性 GO/NO-GO 課題で NO-GO 電位を認めている。したがって、聴覚刺激の場合には NO-GO 電位の個体差が大きいか、視覚刺激の場合には影響力のない何らかの剰余変数が介在していると推定されるが、はっきりしたことはまだわからない。

NO-GO 電位を解釈するうえでもう 1 つ重要なことは、反応を必要としない認知課題でも生じるということである。Pfefferbaum et al. (1985) は、視覚刺激を用いた GO/NO-GO 課題で、GO 刺激に対して右手でボタン押しをさせる条件と GO 刺激だけを無声で数える条件を設けた。その結果、NO-GO 電位と考えられる N2 が両条件で生じ、その振幅は外的反応を課したほうが大きかった。この結果を解釈すると、Kopp, Rist, et al. (1996) や Kopp, Mattler, et al. (1996) が指摘するように、NO-GO 試行における N2 成分は、外的反応の抑制処理に限定されず、外的と内的とにかかわらず、課題遂行に必要な処理過程を中断する処理に関わると考えられる。これを Sasaki et al. (1986, 1989) の NO-GO 電位に関する定義に則して解釈すると、NO-GO 電位は、反応を止めておく意思決定 (NO-GO 判断) と反応抑制の 2 種の処理過程に関わり、仮に反応抑制が必要とされない事態でも、何らかの処理過程を中断する NO-GO 判断だけでも生じると言えるだろう。以上の理由から、NO-GO 電位は、脳の起源が ERN とは異なり、さらに、前者は無声の計数課題でも、計数に必要な処理過程の中断 (あるいは、停止) によって出現するが、ERN は実際のエラー反応が無ければ現れないと考えられる。したがって、NO-GO 電位は、反応準備段階における反応抑制処理の指標として適当と思われる。

そこで、実験 2 では、NO-GO 電位を ERN から分離して測定する方法を検討する。実験 3 では、NO-GO 電位を認知的葛藤課題で測定する前に、

NO-GO 電位の潜時と振幅がエラー反応の準備の有無によって変化するかどうかをあらかじめ検討しておく。そして、実験 2 と実験 3 の結果を踏まえて、実験 4 では、チェック操作が認知的葛藤課題において機能しているかどうかを検討する。もしチェック操作が機能しているなら、その構成要素である反応抑制処理がエラー反応の準備との関連で機能し、NO-GO 電位が出現すると予想される。さらに、実験 5 と実験 6 では、反応抑制処理が反応時間の変化に関係して変化するのかどうかを検討する。実験 5 では、不一致刺激に対する反応時間が長くなるほど NO-GO 電位が増大するかどうかを検討し、実験 6 では、その逆に、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激と同じになる事態では、NO-GO 電位が減少するかどうかを検討する。これら実験 5 と実験 6 において、反応抑制処理が反応時間の変化と関連して変化したならば、不一致刺激に対する反応時間の延長には、反応抑制処理が関係していると考えられる。

第2章 認知的葛藤課題における情報処理過程の実験的検討

第1節 相互抑制モデルに関する心理生理学的検討 (実験1)

第1章の第4節で述べたように、相互抑制モデルの検討は、これまで、(a)エラー反応の準備(陽性LRP)が生じて、正反応準備(陰性LRP)の閾値到達時間(あるいはその指標としての立ち上り潜時)が長くなる場合に、(b)反応時間が長くなるという含意命題を支持するデータが提出されてきた(Gratton et al., 1988; Smid et al., 1990, 1991)。ところで、エラー反応の準備が反応時間を長くする原因の1つであることを主張するためには、上の“(a)ならば(b)”の対偶にあたる“(b)でないならば(a)でない”、つまり、陽性LRPを通常生じる刺激に対しても反応時間が長くないという前件を与えた場合に、陽性LRPがなく、陰性LRPがその閾値に達するまでの時間が延長していないという後件がデータによって支持されるかどうかを検討することが1つの有効な方法と考えられる。

そのような実験事態が、チェック操作モデルの有効性を提唱したEriksen & Schultz (1979)の研究で提供されていた。第1章第3節で説明したように、Eriksen & Schultz (1979)は、ノイズが共通している刺激(例えば、HHHHHとHHAHH)だけを1ブロック中に混ぜて呈示するブロック化条件を設定し、通常の認知的葛藤を引き起こすミックス条件と比較する実験を行った。その結果、ミックス条件で認められた不一致刺激に対する反応時間の延長が、ブロック化条件で大幅に小さくなった。このブロック化条件によって上の“(b)でないならば(a)でない”における前件“(b)でない”を作り出せると考えられる。このブロック化条件を設定してLRPを測定した研究がこれまでにないので、実験1では、相互抑制モデルがブロック化条件におけるLRPを適切に予測できるかどうかを検討する。もし適切に予測できれば、実験1のデータからは相互抑制モデルとチェック操作モデルの間に優劣をつけることはできないが、データが予測と異なる場合には、チェック操作モデルの方がより広範なデータを説明できる可能性が示唆される。

実験 1 では LRP のほかに、刺激の評価のような反応過程とは別の認知的処理過程を反映するとされる P3 も測定し、P3 の頂点潜時が反応時間が長くなる条件で長くなるという Coles et al. (1985) と Smid et al. (1990) の報告が繰り返し認められるかどうかとも検討する。

方 法

被験者 矯正を含め視力正常な、右利きの大学生と大学院生 12 名 (18-33 歳) が実験に参加した。

刺激 刺激は、中央の標的文字とその両側にノイズ文字を 2 つずつ付加した文字列であった (HHHHH, SSSSS, SSHSS, HSHHH)。標的文字とノイズ文字とが同じ文字列が一致刺激 (HHHHH と SSSSS)、それらが異なる文字列は不一致刺激 (HSHHH と SSHSS) である。また、標的文字のみの“H”と“S”をニュートラル条件で用いた。5 文字の横の視角は約 2.5 度であった。凝視点の視角は約 0.1 度で、実験中は標的文字の下に継続的に呈示した。各試行では、まずディスプレイの中央に“+”を 300 ms 間呈示し、500 ms 間のブランクの後、テスト刺激を呈示した。被験者の反応とともに刺激を消去し、次試行までは 2 000 ms のインターバルとした。

課題 課題は 3 種類で、4 種類の刺激をブロック内にランダムに混合するミックス条件を 2 ブロック、ノイズ文字が同じである 2 種類の刺激 (HHHHH と HSHHH, または SSSSS と SSHSS) だけを 1 ブロック中に混ぜるブロック化条件を 2 ブロック、さらに、標的文字のみを呈示するニュートラル条件を 1 ブロック用意した。1 ブロックは 88 試行であった。

被験者には、標的文字が“H”の場合には左手人差し指で左のボタンを、“S”の場合には右手人差し指で右のボタンをできるだけ早く正確に押すように教示した。ブロック化条件では、どの刺激についてもノイズ文字が同じであることを、練習試行の際に被験者に教示した。テスト刺激に対して 200 ms-1 000 ms の間にボタンが押された場合を正反応とした。

手続き 被験者は、各課題を行う前に 16 試行の練習を行った。3 種類

の課題の順序については、被験者間でカウンターバランスをとった。被験者は、第2ブロック、あるいは第3ブロックの後に15分程度の休憩をとった。

脳波の記録 脳波は、国際10-20法（図1-9を参照）に準拠し、銀・塩化銀皿電極を用いて Cz の左側約4cmの C3' と右側約4cmの C4'、及び Pz から両耳朶連結を基準電極として導出した。接地電極は FPz においた。さらに、右眼の上下から垂直眼球電図 (electrooculogram, EOG) を記録した。電極間抵抗値は 5 k Ω 以下とした。脳波と EOG は、高域遮断周波数を 100Hz (ロールオフ-3 dB)、時定数を 0.3 s に設定して増幅し、データレコーダ (TEAC PU-400) によって磁気テープに記録した。

脳波の分析 記録した脳波は、シグナルプロセッサ (7T18, NEC) によってオフラインで分析した。サンプリング周波数は 200Hz とし、移動平均法を利用して高域遮断周波数 29.5Hz のデジタルフィルタを脳波と EOG に適用した (ロールオフ-9dB)。脳波と EOG は、刺激呈示前 150 ms 間の平均値を基準として呈示後 800 ms までを加算した。ただし、(a)各ブロックのはじめの 8 試行 (反応が定常化するまでの練習試行)、(b)ボタン押しエラー試行、(c)EOG を含むいずれかのチャンネルで $\pm 50 \mu V$ を超える電位が測定された試行は、加算処理から除外した。

LRP の算出手続きは、第1章の第3節で説明した Coles (1989) の方法に従い、刺激呈示時点を起点 (0 点) として加算した。各被験者の LRP 潜時は、基線部 (刺激提示前 150 ms 間の平均値) から片側 5% 水準で有意な陰性の振幅値に達し、かつそれ以後 50 ms 間以上その有意水準を維持した場合に限り、有意水準に達した最初のポイントを LRP 潜時とした。

各被験者の P3 の頂点潜時は、Pz 部位において刺激呈示後 250-500 ms 間に出現する陽性波のピーク時点とした。この測定基準は以後の実験でも同じである。

結 果

反応時間 表 2-1 に各条件の平均反応時間を示した。2 (ブロック化の

表 2-1 実験 1 の各条件におけるボタン押し反応時間, LRP 潜時, P3 潜時に関する平均値, および, 陽性 LRP の有無

測 度	ニュートラル条件	ミックス条件		ブロック化条件	
		一致刺激	不一致刺激	一致刺激	不一致刺激
ボタン押し反応時間 (ms)	359±37	375±32	411±33	374±30	380±33
LRP 潜時 (ms)	219±23	209±37	255±19	213±35	248±32
陽性 LRP の有無 (区間, ms)	無	無	有 (200-240)	無	有 (185-245)
P3 潜時 (ms)	337±23	374±27	410±32	365±29	374±34

(±SD)

有無)×2 (刺激の一致性) の分散分析の結果, ブロック化の有無 (ミックス条件>ブロック化条件; $F(1,11)=18.50, p<.01$). 以下, 結果においてはミックス条件を“M”, ブロック化条件を“B”と表記すると刺激の一致性 (一致<不一致; $F(1,11)=53.54, p<.001$) の主効果が有意であり, 交互作用も有意であった ($F(1,11)=107.22, p<.001$). 交互作用の下位検定では, ミックス条件における刺激の一致性の単純主効果が有意であったが (一致<不一致; $F(1,22)=125.18$), ブロック化条件では有意傾向にとどまった ($F(1,22)=3.56$). また, 不一致刺激に対するブロック化の有無の単純主効果が有意であった ($M>B$; $F(1,22)=59.43$). ノイズを伴わないニュートラル条件の反応時間は, t 検定 (片側, $df=11, p<.05$) において, ミックス条件の一致刺激 ($t=1.77$), および, ブロック化条件の一致刺激 ($t=1.39$) に比べて短い傾向が認められた.

LRP 総加算平均 LRP 波形を図 2-1 に示した. LRP 上に示した短い斜線は, 表 2-1 に示した各条件の平均立ち上がり潜時と同じである. LRP 潜時について反応時間と同様の 2 要因分散分析を行った結果, 刺激の一致性の主効果が有意であった (一致<不一致; $F(1,11)=13.40, p<.01$). 交互

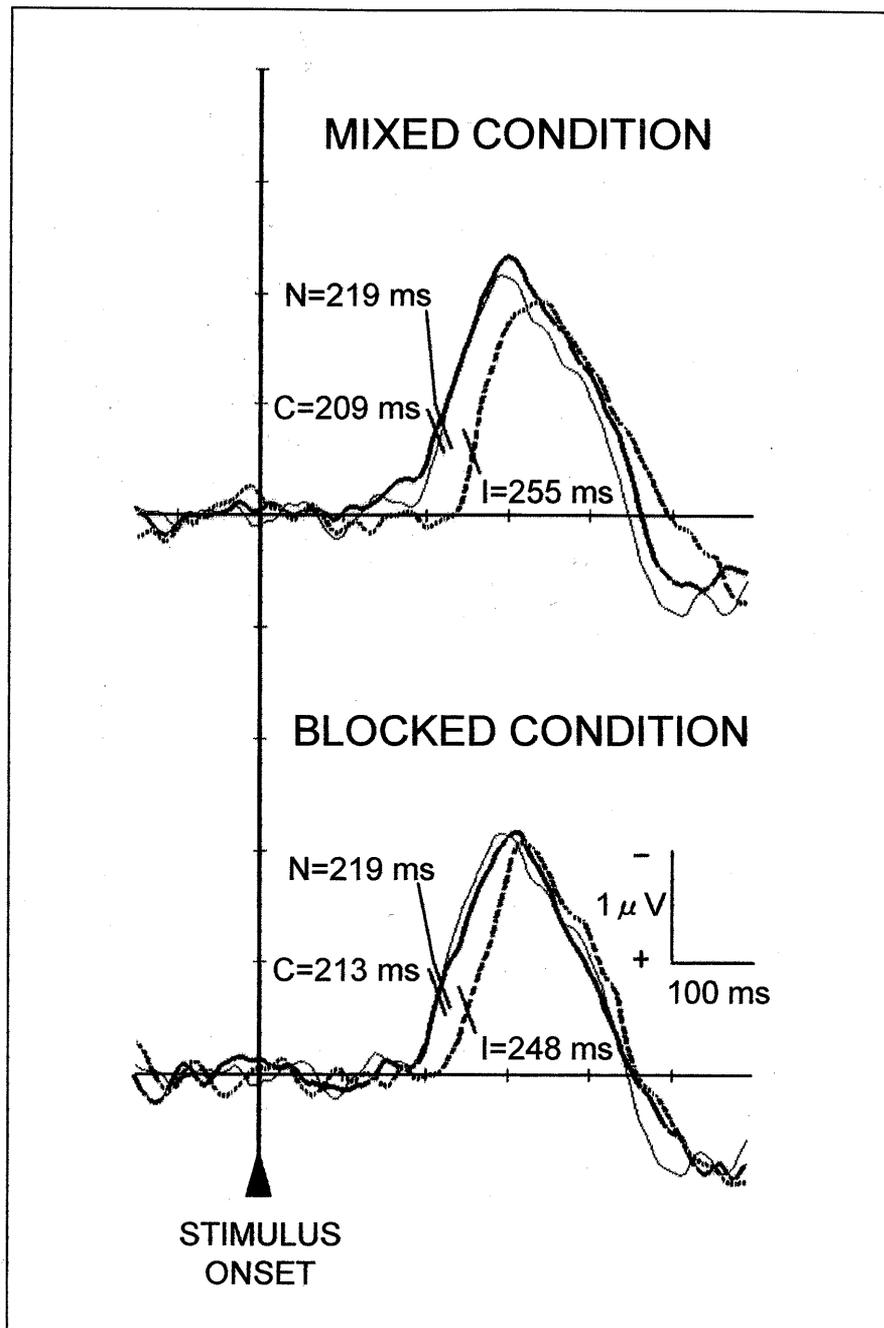


図 2-1. 各条件における刺激呈示時点を起点に加算した LRP の総加算平均波形 (実験 1). 図中の “N”, “C”, “I” はそれぞれ “ニュートラル”, “一致”, “不一致” の刺激条件を示す.

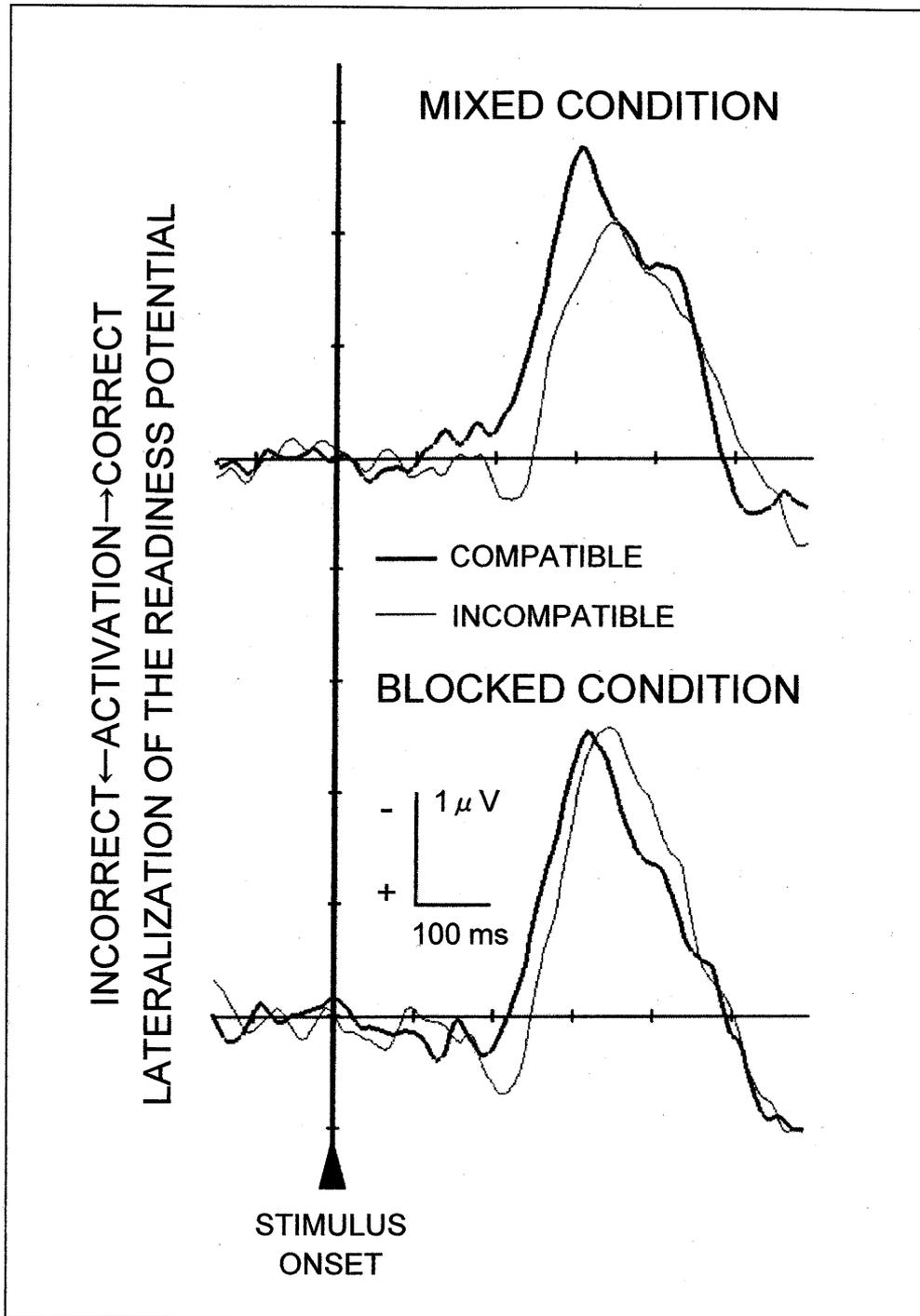


図 2-2. ボタン押し反応時間が 350-550 ms 間の試行だけを加算した各条件の総加算平均 LRP 波形 (実験 1). 刺激呈示時点を起点に加算した.

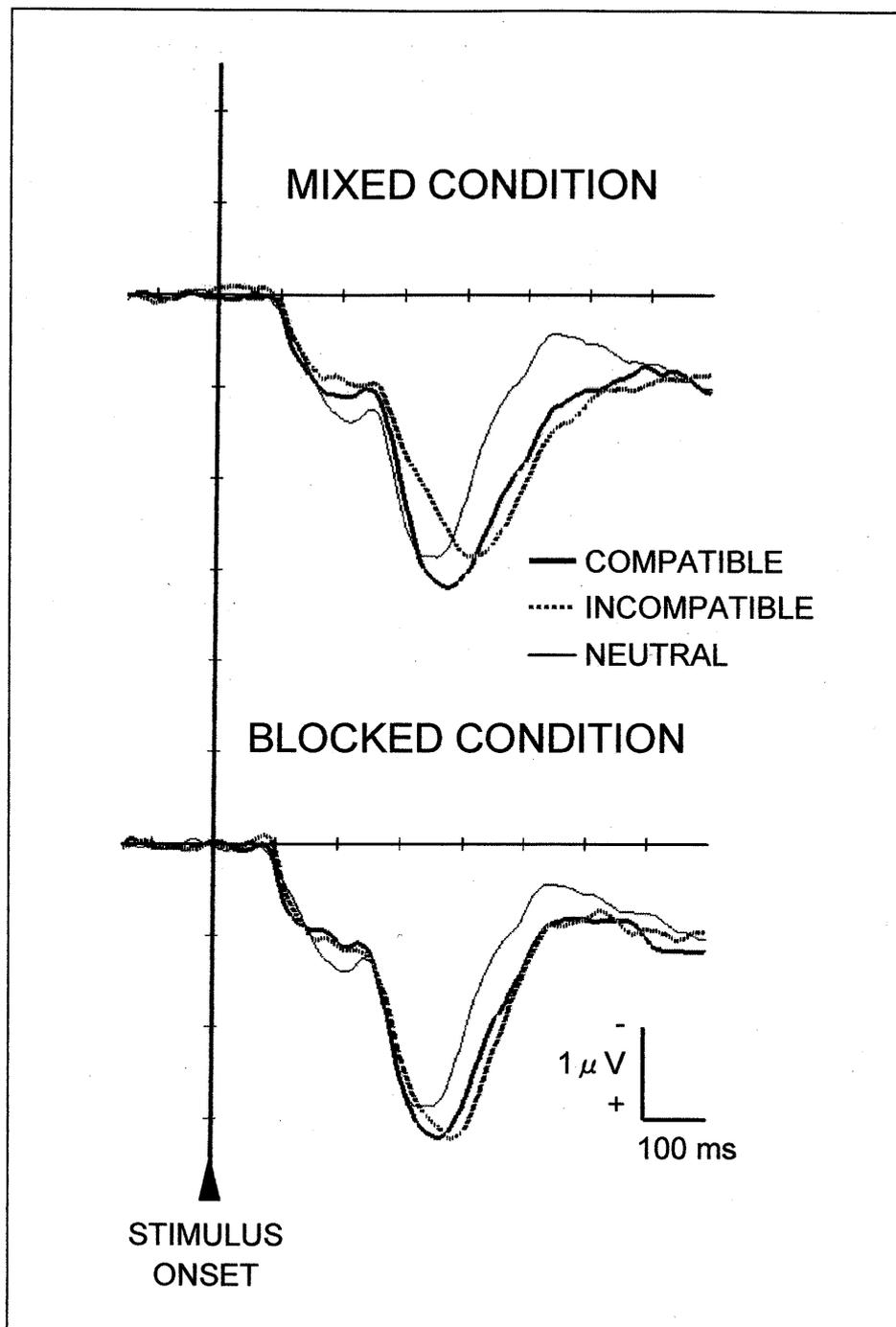


図 2-3. 各条件における刺激呈示時点をもとに加算した ERP の総加算平均波形 (実験 1).

作用は認められなかった。また、ニュートラル条件をミックス条件の一致刺激やブロック化条件の一致刺激と t 検定 (片側, $df=11$, $p<.05$) で比較したところ、いずれも有意ではなかった。

次に各条件における陽性 LRP (エラー反応の準備) の有無を検討した。一般に、正反応準備の直前に生じる下方への陽性 LRP は小さい (Coles et al., 1988; Gratton et al., 1988; Gratton et al., 1992; Smid et al., 1990, 1991)。

図 2-1 の LRP 波形は有効試行を全て加算したものであるが、エラー反応の準備は検出されなかった。そこで、Gratton et al. (1988) の方法を採用し、加算回数を十分に確保する目的で反応時間が 350 ms 以上 550 ms 未満である試行だけを加算平均した (図 2-2)。その結果、エラー反応の準備が 2 種の不一致刺激に対して出現し (刺激呈示後 190 ms 付近)、正反応準備の立ち上がり潜時が長くなっていた。条件別のそれぞれの波形について、刺激呈示後 5 ms 毎の平均値を基線と比較 (片側 t 検定, $p<.05$) した結果、不一致刺激に対しては、ミックス条件 (200-240 ms 区間) とブロック化条件 (185-245 ms 区間) で有意な陽性 LRP が認められたが、一致刺激の 2 波形には認められなかった。

P3 頂点潜時 総加算平均 ERP 波形を図 2-3 に示した。平均 P3 潜時は表 2-1 に示した。反応時間と同様の分散分析の結果、ブロック化の有無 ($M>B$; $F(1,11)=9.27$, $p<.05$) と刺激の一致性 (一致<不一致; $F(1,11)=9.47$, $p<.05$) の主効果が有意であり、交互作用も有意であった ($F(1,11)=8.04$, $p<.05$)。交互作用の下位検定では、ミックス条件における刺激の一致性 (一致<不一致; $F(1,22)=16.97$)、および、不一致刺激に対するブロック化の有無 ($M>B$; $F(1,22)=16.70$) の単純主効果が有意であった。また、ニュートラル条件の P3 潜時は、 t 検定 (片側, $df=11$, $p<.05$) において、ミックス条件の一致刺激 ($t=4.03$) やブロック化条件の一致刺激 ($t=4.15$) よりも有意に短かった。

考 察

ミックス条件の不一致刺激の試行では、(a)エラー反応の準備 (陽性 LRP, 図 2-2) が生じて、正反応準備 (陰性 LRP) の潜時 (閾値到達時間

の指標) が長くなった場合に、(b)反応時間が長くなったというこれまでの研究結果 (Gratton et al., 1988; Smid et al., 1990, 1991) が繰り返し認められた。さらに、相互抑制モデルが反応時間の変化を十分に説明するならば、“(a) ならば (b)” の対偶にあたる“(b) でないならば (a) でない”、つまり、エラー反応の準備を通常生じる刺激に対しても反応時間が長くないブロック化条件では、エラー反応の準備がなく、正反応準備の潜時が一致刺激とほぼ同じであると予想される。しかし、この予想は支持されなかった。ブロック化条件でも陽性 LRP が陰性 LRP の直前に生じ (図 2-2), LRP 潜時と反応時間が一致刺激よりも長かった。このように、チェック操作モデルを導いた実験計画において、相互抑制モデルは LRP と反応時間のデータを適切に予測できなかった。したがって、現時点ではチェック操作モデルの方が相互抑制モデルよりも広範なデータを説明できる有望なモデルと考えられる。なお、図 2-2 のブロック化条件の一致刺激において刺激呈示後 100 ms 過ぎと 200 ms 手前のディップらしきものは、(a) 基線との比較で有意ではなかったこと、(b) 変動の大きかった 2 名の被験者データが影響したこと、(c) 基線の変動と比べても大差はないことから、ノイズ変動の範囲内であると判断した。

チェック操作とは、課題遂行に必要な反応が 2 種類以上ある場合、選択し準備している反応が正しいかどうかを確認し、必要に応じて反応準備を修正する処理過程のことである。また、その確認が終了するまでは、エラー反応を出力しないように反応抑制処理が働いている。ミックス条件の場合、不一致刺激の標的文字には 2 種類が存在するので、被験者はノイズ文字の影響でエラー反応が生じやすいことをすでに学習している。したがって、標的文字の確認とそれに反応が正しく対応しているのかどうかの確認に時間をかけてエラー反応を回避すると考えられる。さらに、エラーとなる反応が左右のいずれであるのかの判断も難しいので、エラー反応を出力しないようにするためには、全ての反応を一度抑制する可能性が考えられる。一方、ブロック化条件では、不一致刺激が 1 種類なので、刺激が不一致であると同定することは、標的文字を特定することに等しい。また、ノイズ文字が常に同じなので、ノイズ文字に由来する

エラー反応の準備を容易に抑制できる。すなわち、反応抑制処理にかかる負荷がミックス条件よりも小さく、反応を行うときの抑制処理の解除もより小さな負荷で行うことができると考えられる。このように、チェック操作モデルによると、選択した反応の正誤の確認時間と反応抑制処理にかかる負荷の大きさによって、ミックス条件とブロック化条件の反応時間の違いを説明することが可能である。

このチェック操作との関係で、P3 潜時の結果を考察する。P3 潜時は刺激の評価のような反応過程とは別の処理過程に関連すると考えられている。本実験では、表 2-1 からわかるように、反応時間の傾向と P3 潜時の傾向が非常に類似していた。このことは、刺激の評価のような処理過程が反応時間の変化に関係していることを示唆している。刺激の評価過程には、刺激のコード化から反応の意思決定までの複数の処理が含まれている。チェック操作モデルにおいて考えれば、P3 潜時は標的と反応が適切に対応しているかどうかを確認し終えるまでの時間と関係すると仮定できる。このような仮定によって、ニュートラル条件の P3 潜時と反応時間との関係を説明してみる。まず、ニュートラル条件の P3 潜時は、他の 2 条件の一致刺激よりも有意に短く、反応時間は短い傾向であった。被験者は、ニュートラル条件では、ノイズ文字に由来するエラー反応をしないように注意する必要がないことをあらかじめ知っているので、反応の適切さの確認作業にかかる負荷がミックス条件やブロック化条件よりも小さく、処理時間も他の条件に比べて短いと考えられる。つまり、P3 潜時とチェック操作に要する処理時間とが関係すると仮定すると、ニュートラル条件のデータもよく説明できる。

ニュートラル条件では、他の 2 条件の一致刺激との比較で LRP 潜時に差がなかったが (図 2-1)、この結果は、刺激が 5 文字でも 1 文字でも形態処理に要する時間には差がないことを示唆している。

ところで、Gratton et al. (1988) は、LRP には閾値があり、LRP 振幅がそれを超えると反応 (EMG) が生じると考えた (LRP の閾値一定説, 第 1 章第 3 節および図 1-12 を参照)。彼らの分析では、EMG 潜時の区間を 150-199 ms, 200-249 ms, 250-299 ms, 300-349 ms の 4 つに分け、EMG

潜時に応じて各試行を分類した。その結果、EMG 潜時と LRP 潜時が正の相関を示し、4 区間の LRP 振幅がほぼ一定であることがわかった。そこで、Gratton et al. (1988) は、LRP には閾値があると判断し、Grice, Nullmeyer, & Spiker (1982) の閾値変動説 (variable-criterion hypothesis) を否定したのである (ただし、Grice et al., 1982 は LRP の閾値を問題にしていたのではない)。しかし、本実験のブロック化条件では、不一致刺激に対する LRP 潜時が一致刺激よりも長かったにもかかわらず、反応時間はそれに対応して長くはならなかった。これは、LRP の閾値一定説に明らかに矛盾する結果である。

ここで、Gratton et al. (1988) の分析には、P3 潜時が含まれていなかったことに注意する必要がある。本実験結果からわかるように、P3 潜時は、刺激の一致性の影響を受けて反応時間と類似の変化を示した。Gratton et al. (1988) の実験でも、EMG 潜時、LRP 潜時、および、P3 潜時の 3 者が相関していた可能性を指摘できる。仮に P3 が反映する処理過程が EMG 潜時を強く規定する要因であったなら、EMG 潜時に対応する LRP 振幅が表面的に一定であった、つまり、LRP に閾値があるように見えただけであった可能性がある。他の説明としては 2 つ考えられる。1 つは、LRP の閾値が変化するという仮説であり、もう 1 つは、チェック操作の処理時間が変化するという仮説である。刺激の部分情報 (Smid et al., 1992) が反応の意思決定処理に影響して反応時間を長くさせ得ること (Miller, Schäffer, & Hackley, 1991 の GO/NO-GO 課題を用いた実験 6) を参考にすると、本結果からは LRP の閾値変動仮説について積極的に支持することはできないが、チェック操作に要する処理時間が反応時間の規定因となり得ることは指摘できるであろう。

第2節 反応抑制処理の測定ツールとしての事象関連電位の妥当性

実験1のデータは、相互抑制モデルを支持しなかった。また、P3潜時が反応時間の傾向とよく対応していたことから、反応過程とは別の認知的処理が反応時間の変化に関係することが示唆された。そこで、その認知的処理として、Eriksen, C. W.ら (1974, 1979) の指摘したチェック操作 (選択した反応の正しさのチェックとそれが完了するまでの反応抑制処理) を想定し、新たな実験を行う。特に本研究では、チェック操作の構成要素である反応抑制処理に注目し、それが反応時間の変化に関係するのかどうかを重点的に検討する。そのため、反応抑制処理を測定する指標としてNO-GO電位をとりあげる。ただし、NO-GO電位を利用するにあたり、2つの問題を解決しておく必要がある。1つは測定方法に関する問題であり、これは実験2で検討する。もう1つは、NO-GO電位の潜時や振幅が、認知的葛藤課題に特徴的なエラー反応の準備と関連して変化するのかどうかという問題である。これは実験3で検討する。

1. NO-GO電位とエラー関連陰性電位の分離 (実験2)

第1章の第4節で述べたように、NO-GO電位は、被験者がある刺激に反応し、他の刺激には反応しないGO/NO-GO課題を行ったときに、反応を止めておくNO-GO試行で出現する前頭部優勢の陰性電位である (例えば, Sasaki & Gemba, 1986)。しかし、被験者がNO-GO試行で反応する試行も存在し、そのようなフォールス・アラームが生じると、反応の直後にエラー関連陰性電位 (ERN) が出現すると考えられる。さらに、ボタン押しには至らない筋レベルのエラー (EMGエラー) に対してもERNが生じ、NO-GO電位に重畳する可能性がある (例えば, Scheffers et al., 1996)。もしERNがNO-GO電位に重畳すると、NO-GO電位の振幅や潜時に現れた条件差が、NO-GO電位そのものに由来するのか、あるいはERNに起因するのかを判定できないという不都合が生じる。そこで、実験2では、ERNがEMGエラー試行でも生じるのかどうかを確認し、今

後の実験で EMG エラー試行を加算処理から除く必要があるのかどうかを検討する。

方 法

被験者 矯正を含め視力の正常な、右利きの大学生と大学院生 8 名が実験に参加した (21-26 歳)。

刺激と装置 水色または緑色で塗りつぶした円形刺激 (直径の視角が約 1.5 度) をパソコンのディスプレイ (MF8621, Iiyama) に呈示した。凝視枠として、左右の視角が 1.8 度の “—” と “┌” を、刺激の中心から上下 1.4 度の位置に継続的に呈示した。刺激呈示は、ミリ秒タイマーソフト (吉田, 1994) を組み込んだパソコン (PC-9801RA21, NEC) で行った。

GO 刺激と NO-GO 刺激は、ランダムな順序で等確率に呈示した。GO 刺激は、被験者のボタン押しから 600 ms 後に消去した。刺激呈示後 1 000 ms 以内に反応が認められなかった GO 試行や NO-GO 試行では、1 000 ms 時点で刺激を消去した。刺激の消去と同時に、ボタン押し反応時間を刺激呈示位置に 300 ms 間呈示した。反応が 1 000 ms 以内になかった場合は “0” を呈示した。刺激間隔は 2 600-4 600 ms の範囲でランダムに変化させた (平均 3 600 ms)。2 種類の刺激の GO 試行と NO-GO 試行への割り当てについては、被験者間でカウンターバランスをとった。

課題と手続き 被験者には、片方の手の人差し指をボタンにおき、一方の刺激にはできるだけ早くボタンを押し、他方には押さないことをできるだけ正確に行うように教示した (特にここでは、正確さよりも早さを強調する教示をした)。

被験者は、はじめに 100 試行程度の練習を行ってから、70 試行で構成したブロックを 12 ブロック行った。ボタン押しに使用する手は 2 ブロックごとに交替し、最初に用いる手については被験者間でカウンターバランスをとった。また、被験者は各ブロック終了後に 3 分程度の休憩をとった。休憩中は、被験者が課題への動機づけを維持することを意図して、直前のブロックのボタン押し反応時間のヒストグラムをディスプレイに

呈示した（これは以下の実験でも同じなので，実験 3 以降では記載を省略する）。

脳波と EMG の記録 脳波は，国際 10-20 法に準拠し，銀電極を用いて Fz, F3, F4, Cz, C3' (Cz の左約 4 cm), C4' (Cz の右約 4 cm), Pz, P3, P4 の 9 部位から両耳朶連結を基準として導出した。EOG は右眼の上下から，EMG は左右前腕の長掌筋上からおよそ 9 cm の間隔をあけて双極導出した (EMG の長掌筋上からの導出は Jodo & Kayama, 1992 に準拠した)。電極間抵抗値は，脳波と EOG が 5 k Ω 以下，EMG が 50 k Ω 以下であった。生体用アンプ (BIOTOP-6R12, NEC San-ei) を用いて，脳波と EOG を帯域通過周波数 0.05-30 Hz で，EMG は 20-200 Hz で増幅した (低域と高域遮断周波数のロールオフはそれぞれ -6 dB と -12 dB)。増幅した脳波，EOG，EMG は，シグナルプロセッサ (DP-1200, NEC メディカルシステムズ) によってオンラインで 200 Hz の AD 変換をし，変換後のデータを光ディスクに保存した。

脳波と EMG の分析 アナログ波形の AD 変換とオフラインでの分析は，DP1200 を用いて行った。脳波と EOG に移動平均法を利用した 0.1 Hz の低域遮断デジタルフィルター (ロールオフ -9 dB) を適用した。ERP は，刺激呈示前 200 ms 間の平均値を基準として刺激呈示後 700 ms までを加算した。ただし，(a) 各ブロックのはじめの 6 試行 (練習試行)，(b) EOG を含むいずれかのチャンネルが $\pm 50 \mu\text{V}$ を超える試行，(c) EMG 潜時が 100 ms 未満の試行，(d) 各被験者についてボタン押し反応時間がその平均値の 99% 信頼区間の上限を超える試行は，加算から除外した。なお，ERN の頭皮上分布には左右差のないことが報告されているので (例えば，Miltner et al., 1997)，正中線上の Fz, Cz, Pz の 3 部位だけを分析した。

EMG の分析は，刺激呈示前 200 ms から平均ボタン押し反応時間の 99% 信頼区間の上限までの範囲について，試行ごとに行った。まず，刺激呈示前 200 ms 間の平均値を基準として，量子化したデータを全て絶対値に変換した。次に，各試行の刺激呈示前 200 ms 間の SD を算出した (以下，本研究を通じて“基線部 SD”と表記する)。その基線部の電位変化をノイズ変動とみなし，その変動と刺激呈示後の EMG が区別できるかどうか

かを次の基準で判定することにより，EMG 反応の有無を決定した．まず，(a) 刺激呈示後の EMG が基線部 SD の 3 倍に達しない試行は，EMG 無し試行とした．(b) EMG が基線部 SD の 3 倍以上 5 倍未満の試行は，EMG の有無を断定できないと考えて，分析から除いた．そして，(c) EMG が基線部 SD の 5 倍以上の試行は，EMG が生じた試行とした．

正しい GO 試行は刺激呈示後 1 000 ms 以内にボタン押しがあった場合とした．EMG 潜時は，EMG が基線部 SD の 5 倍に最初に達した時点の直前の谷における最小電位を示す時点とした．

正しい NO-GO 試行は，EMG が上記の無反応の基準 (a) を満たす場合とした (EMG 無し試行)．また，NO-GO 試行に関して，ボタン押しをした試行をボタン押しエラー試行とし，ボタン押しには至らないが上記の基準 (c) を満たす試行は EMG エラー試行とした．なお，ボタン押しエラー試行だけを除いた残りの NO-GO 試行を全て加算する波形も求めた．

多重比較を行う場合はライアン法を用い，有意水準を 5% とした．

結 果

本研究では，EMG の分析結果を，ボタン押し反応時間および各種試行の割合と同様に行動指標として報告する．

行動指標 ボタン押し反応時間と EMG 潜時の平均値，および，正しい GO 試行の割合と NO-GO 試行における EMG 無し試行，EMG エラー試行，ボタン押しエラー試行の全試行に占める割合を表 2-2 に示した．

3 種類の EMG 潜時 (正しい GO 試行，EMG エラー試行，ボタン押しエラー試行) に関する分散分析を行った結果，有意な効果が認められた ($F(2, 14)=9.13, p<.01$)．多重比較では，ボタン押しエラー試行が正しい GO 試行や EMG エラー試行よりも有意に短かった．

ERP 図 2-4 は，刺激呈示時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形である．左列には，正しい GO 試行 (細実線) と EMG 無しの NO-GO 試行 (太実線) の ERP 波形を示した．刺激呈示後およそ 200-300 ms 間において，EMG 無しの波形が正しい GO 試行よりも陰性であり，その増加部分が NO-GO 電位である．図 2-4 の右列には，NO-GO 試行における 3

表 2-2 実験 2 の各条件における行動指標と ERN 頂点潜時の平均値

測 度	正 GO 試行	NO-GO 試行		
		EMG 無し	EMG エラー	ボタン押しエラー
ボタン押し反応時間 (ms)	313±23	—	—	—
EMG 潜時 (ms)	204±25	—	191±29	169±10
割合 (%)	99.3±1.3	26.9±11.8	28.2±14.6	11.5±5.9
ERN 頂点潜時 (ms)	—	—	99±13	148±29

(±SD)

種類の ERP を示した。EMG エラー試行 (点線) とボタン押しエラー試行 (細実線) においても、EMG 無し (太実線、左列と同一波形) と似た陰性電位が刺激呈示後およそ 200 ms 以降に出現した。ただし、それらの陰性電位の頂点振幅は、EMG エラー試行では EMG 無し試行よりも大きく、ボタン押しエラー試行では EMG 無し試行よりも長く持続していた。

上記の EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の陰性電位は、NO-GO 電位にそれとは別の電位 (ここでは仮に“N3”と呼ぶ) が重畳した合成波と考えられる。この N3 は、EMG が生じた試行にだけ存在するので、それが筋レベルのエラー反応と関係するエラー関連陰性電位 (ERN) であるのかどうかを検討した。まず、N3 が EMG のエラー反応と関係するならば、その潜時は EMG 潜時と相関すると予測される。そこで、各被験者において EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の波形から EMG 無し試行の波形を引いた 2 種の差分波形を求めた。そして、差分波形が最も明瞭に認められた Cz 部位において、その頂点潜時を測定し、EMG 潜時との相関を求めた。その結果、EMG エラー ([平均頂点潜時=296 ms, SD=31 ms], $r=.78$, $n=8$, $p<.05$) とボタン押しエラー ([平均頂点潜時=335 ms, SD=37 ms], $r=.72$, $n=8$, $p<.05$) の両試行において、有意な正の相関が認められた。

もし N3 が ERN であるならば、EMG 開始時点を起点 (0 点) として加

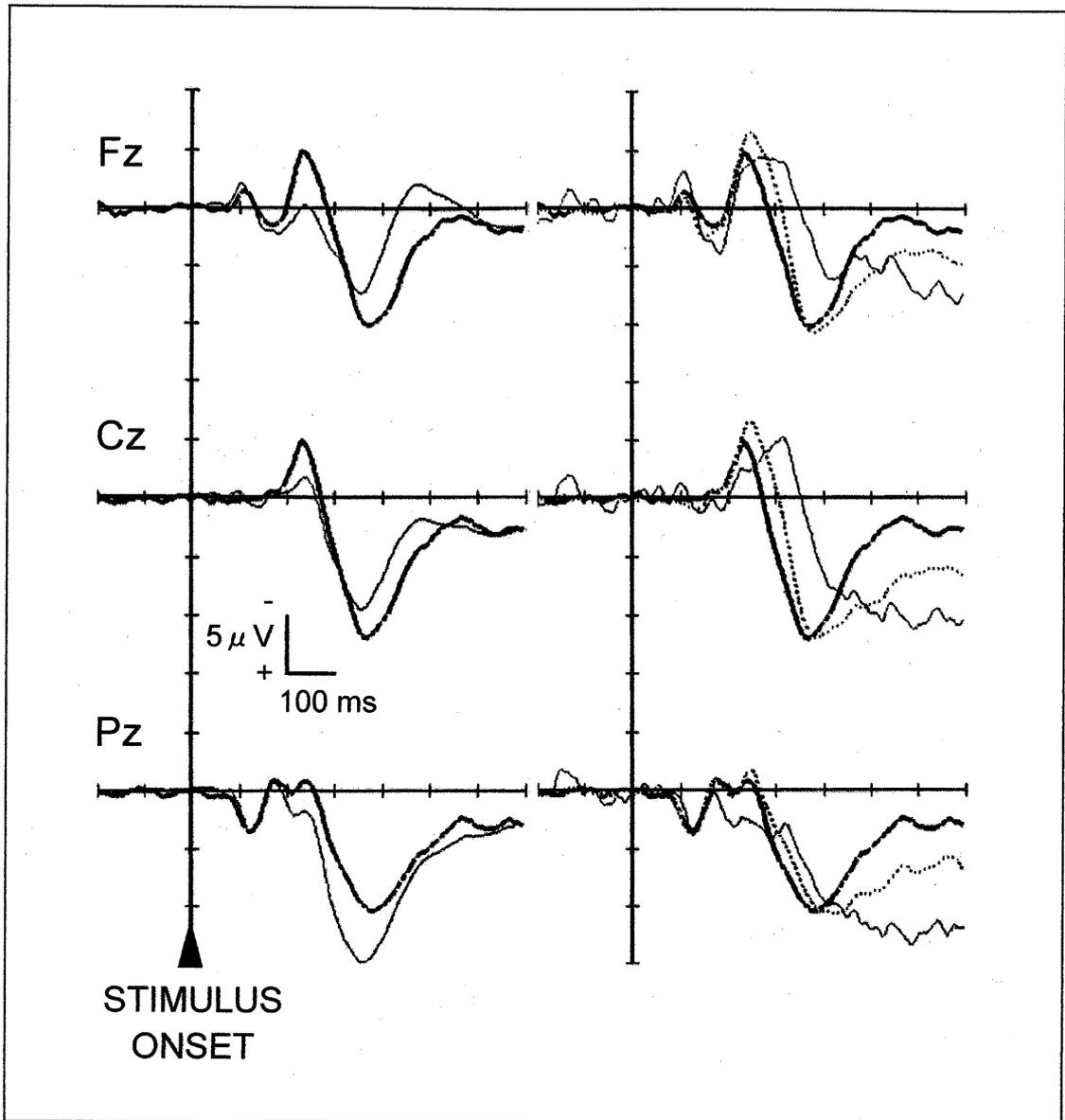


図 2-4. 刺激呈示時点を加算した ERP の総加算平均波形 (実験 2): 左列には正 GO 試行 (細実線) と正 NO-GO 試行 (EMG 無し試行, 太実線), 右列には 3 種の NO-GO 試行 (左列と同じ太実線の EMG 無し試行, 点線の EMG エラー試行, および, 細線のボタン押しエラー試行) を示す.

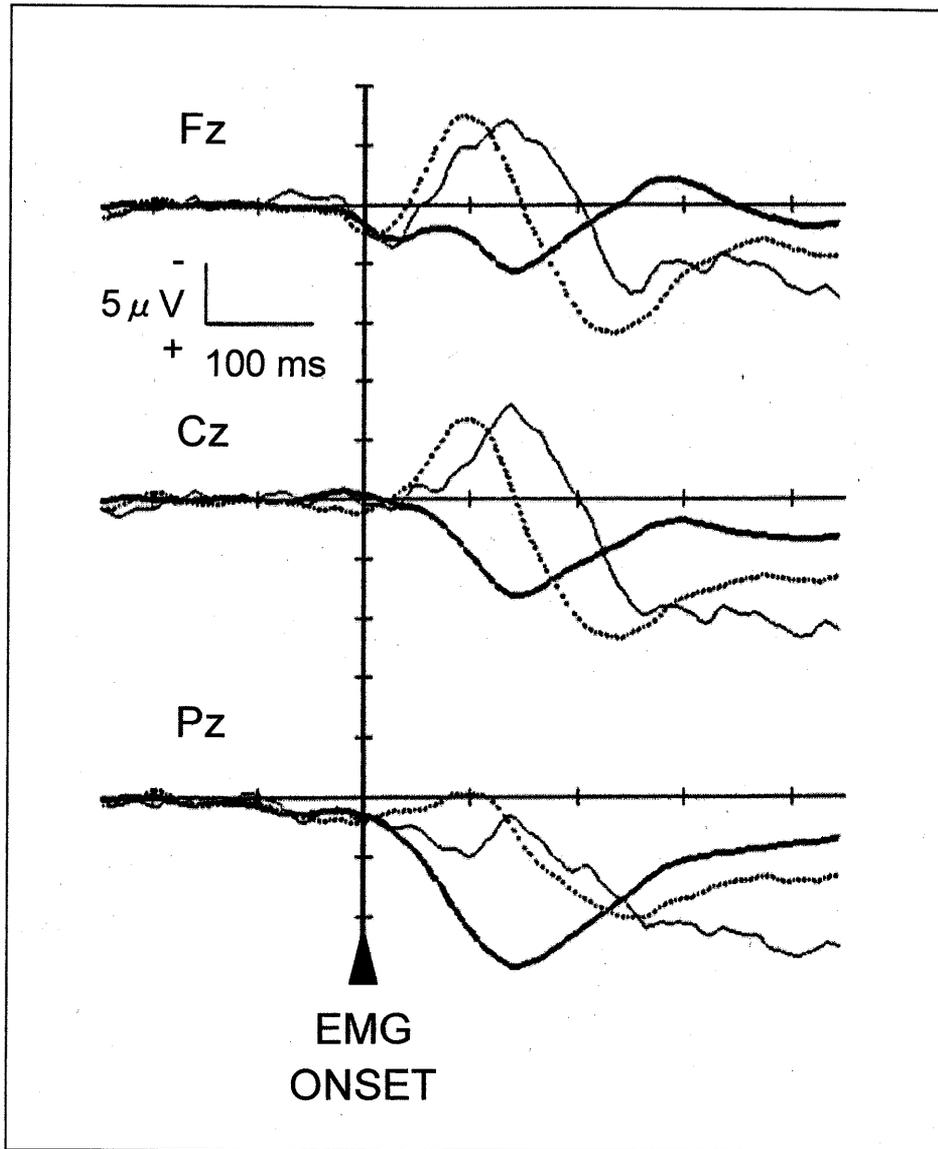


図 2-5. EMG 開始時点を超算した ERP の総加算平均波形 (実験 2). 太実線は正 GO 試行, 点線は EMG エラー試行, 細実線はボタン押しエラー試行を示す.

算した ERP にも陰性電位が観察されるはずである。さらに、ERN は反応出力時点 (EMG 潜時) から一定の間隔をおいて現れるため、EMG 潜時と ERN の頂点潜時との合計値は、先に言及した差分波形の頂点潜時とほぼ同じ値になると考えられる (この推論は、Falkenstein et al., 1995, pp. 40-41 の ERPs of error (false alarm) trials の項を参考にした)。まず、EMG 開始時点に合わせて脳波を加算した結果、大きな陰性電位が EMG エラーとボタン押しエラーの両試行で出現した (図 2-5)。それらは ERN と考えられる。その頂点潜時 (表 2-2) は、EMG エラー試行の方がボタン押しエラー試行よりも有意に短かった ($t(7)=4.45, p<.01$)。そして、EMG 潜時と ERN 頂点潜時の合計は、EMG エラー試行で 290 ms (191 ms + 99 ms)、ボタン押しエラー試行では 317 ms (169 ms + 148 ms) であった。これらの合計値は、それぞれ、EMG エラー (296 ms) とボタン押しエラー (335 ms) における差分波形の頂点潜時に近い値であった。

次に、ボタンなどの行動指標だけを用いる (EMG を測定しない) 実験状況を想定し、NO-GO 電位が出現する潜時帯の陰性電位が、ERN の重畳によってどの程度、変化するかを検討した。まず、ボタン押しエラー試行を除く残りの NO-GO 試行を全て加算平均した (以下、ボタン押し

表 2-3 加算条件と部位別の NO-GO 電位振幅と潜時の平均値、および、分散分析の結果 (実験 2)

測度	部位	加算条件		2 (加算条件) × 2 (部位) の分散分析の結果
		EMG 無し試行	ボタン押しエラー無し試行	
振幅 (μ V)	Fz	-7.1 ± 3.6	-8.1 ± 3.3	加算条件 $F(1, 7)=8.67, p<.05$
	Cz	-6.9 ± 4.4	-7.9 ± 4.2	
潜時 (ms)	Fz	243 ± 19	245 ± 23	加算条件 $F(1, 7)=4.49, p=.072$ 部位条件 $F(1, 7)=6.52, p<.05$
	Cz	236 ± 20	240 ± 21	

(±SD)

注：表中のボタン押しエラー無し試行は EMG 無し試行と EMG エラー試行を含む。

エラー無し試行). そして, そのボタン押しエラー無し試行と EMG 無し試行における Fz 部位と Cz 部位の頂点振幅と潜時を測定し, 表 2-3 に示した. NO-GO 電位の平均振幅に関する 2 (加算条件)×2 (部位) の分散分析の結果, 加算条件の主効果が有意であった (EMG 無し試行<ボタン押しエラー無し試行. F 値と p 値は表 2-3 に示した). 次に, 同様の分散分析を頂点潜時に関して行った結果, 部位 (Fz>Cz) の主効果が有意であった. 加算条件には有意傾向が認められた.

また, 図 2-5 からわかるように, NO-GO 試行における ERN 以降の陽性電位は, その基線復帰が正しい GO 試行よりも遅れていて, その傾向は EMG エラー試行よりもボタン押しエラー試行で顕著であった. そのような形態的特徴は, 刺激呈示時点に合わせて加算平均した ERP (図 2-4 の右列) にも認められた.

考 察

実験 2 の目的は, ボタン押しには至らない筋レベルのエラー (NO-GO 試行におけるフォールス・アラームとしての EMG エラー) に対しても ERN が出現し, NO-GO 電位に重畳するかどうかを検討することであった. 実験の結果, EMG エラー試行では, NO-GO 電位とは異なる陰性電位 (仮に “N3” と表記した ERP) が認められた. そして, (a) EMG エラー試行とボタン押しエラー試行における N3 頂点潜時が EMG 潜時と有意な正の相関を示したこと, (b) それらの試行では EMG (エラー反応) 開始時点を開始点として加算した ERP 波形に ERN が出現したこと (図 2-5), (c) N3 頂点潜時が EMG 潜時と ERN 頂点潜時の合計値に近かったこと, (d) ERN 以降の陽性電位が基線復帰するまでの時間が長くなるという形態的特徴 (図 2-5) が, 刺激呈示時点を開始点に加算した ERP (図 2-4 の右列) にも見られたことから, NO-GO 電位に重畳していた N3 は EMG エラーに対する ERN であると考えられる. なお, (d) は, 先行研究 (Falkenstein et al., 1991, 1995; Scheffers et al., 1996) を支持する結果であった.

次に, ボタン押しエラー試行だけを除いて加算平均した NO-GO 試行

(ボタン押しエラー無し試行) では、ERN が NO-GO 電位に重畳していたと考えられる。その合成波形を EMG 無し試行と比較すると、合成波形の頂点潜時は長くなる傾向を示し、振幅は有意に大きかった (表 2-3. いずれも差は小さいが結果は被験者間で一貫していた)。この変化が NO-GO 電位そのものの変化なのか、ERN の影響によるものなのかは決定できないが、少なくとも部分的には ERN の影響によると推定される。

以上のような結果と考察から、実験手続き上の問題を指摘することができる。反応時間課題では、被験者はできるだけ早く反応するように求められるため、通常は EMG エラー試行が少なからず存在している (早く反応することが強調された本実験の GO/NO-GO 課題では平均 28%)。しかし、ボタン押し反応の有無だけを反応の正誤の基準にした場合には、仮に筋レベルのエラー反応が生じて、その試行はボタン押しエラーがない限り正反応として分類される。その結果、ERN が同潜時帯の他の ERP (たとえば、GO/NO-GO 課題における NO-GO 電位) に重畳することになる。そこで、ERN が実験条件の差に影響しないようにする方法を採ることが望ましいが、その方法は EMG を用いるかどうかによって大きく 2 つに分類できる。

EMG を指標として用いない実験は、さらに、ボタン押しなどの離散型装置 (反応の有無のみが記録される装置) を用いる場合と、反応強度を連続的に測定できる装置を用いる場合にわけられる。離散型装置を用いる実験では、実験条件間でエラー数の比較をして違いがあるかどうかを確認しておくことが望ましい。エラー数が異なる場合は、筋レベルのエラー数も異なると考えておくほうが安全だからである。一方、反応強度を連続的に測定できる装置を用いる実験では、EMG ほど直接的ではないが、離散型装置よりも敏感にエラー反応を判別できる点で有用である。この場合は、離散型装置による実験ほどには、エラー数の条件差に神経質になることはないように思われる。連続型装置には、たとえば、ロード・トランスデューサーを利用したもの (正木・高澤・山崎, 1997) や握力計を用いたもの (Scheffers et al., 1996) がある。

EMG を用いる場合は、基本的には、刺激呈示前の基線部振幅の変動を

ノイズ変動と考え、刺激呈示後の振幅がそのノイズ変動から区別されるかどうかを反応の有無の基準にする。ただし、このような基準は EMG のローパスフィルターの周波数 (Hodges & Bui, 1996) やアナログ波形を量子化する周波数と密接に関係するため、絶対的な基準があるわけではなく、次のような方法が採用されている。1 つは、各試行ごとに基線部振幅の SD を計測し、例えばその 3-4 倍 (本実験では 3 倍) を当該試行の基準にする方法である (例えば, Smid et al., 1990, 1992)。もう 1 つは、各試行の基線部 SD を当該ブロックでプールし (1 ブロックの試行数と同数の SD をプールし)、その中から適当な値、例えば 80 パーセンタイル値に相当する SD の 4 倍を基準値とする方法である (Scheffers et al., 1996)。ただし、被験者が刺激に反応するとき以外の安静時にも、不随意的な筋放電 (例えば、群化放電) が生じることがある。この筋放電は、上の基準値を不当に大きくしたり、コンピュータがそれを刺激に対する反応として検出するという誤りを生じる。したがって、そのような筋放電が観察された場合には、その試行やそれを含むブロックを分析から除くなどの処置が必要となるため、注意が必要である。

以上のような方法と基準はそれぞれの研究者が経験的に定めて用いている段階であり、今後も重ねて検討していく必要がある。本研究では、NO-GO 電位を実験 3 以降においても指標として用いるので、エラー反応に敏感な EMG をあわせて記録し、EMG エラー試行を正反応試行に含めないように加算から除外する。

最後に、ERN が反映する処理過程の性質について考察する。ERN の頂点潜時は、EMG エラー試行よりもボタン押しエラー試行で長かった。この結果から、エラーを認知 (検出) するまでの時間が EMG エラー試行よりもボタン押しエラー試行の方が長かったと解釈できる。また、EMG 潜時は EMG エラー試行よりもボタン押しエラー試行の方が有意に短かったことから、被験者の情報処理過程には反応の早さと正確さのトレードオフが生じていたと推定される。つまり、反応の正確さに対する注意が、EMG エラー試行よりもボタン押しエラーの試行における方が少なかったと解釈できる。そこで、ERN 頂点潜時と EMG 潜時の結果を総合する

と、正確さに対する注意が少ないほどエラーの検出が遅れるという、反応の正確さとエラーの検出時間とのトレードオフの関係が示唆される(類似した結果は、Scheffers et al. (1996) の研究にも認められる)。ただし、ERN の性質の検討は本研究の趣旨ではないので、ERN 自体の検討は以下の実験では行わない。

2. 反応準備課程におけるエラー反応と NO-GO 電位との関係 (実験 3)

NO-GO 電位を認知的葛藤課題で測定するにあたり、その振幅や潜時がエラー反応の準備の有無によって変化するのかどうかを検討しておく。実験 3 では、実験 1 の認知的葛藤課題で用いた一致刺激と不一致刺激を利用し、2 種類の NO-GO 試行を設定する。一致刺激の NO-GO 試行は、標的文字とノイズ文字の両方が NO-GO を意味するが、不一致刺激の NO-GO 試行では、ノイズ文字が GO を意味するために反応傾向が促進され、EMG エラーやボタン押しエラーが増加するはずである。また、反応が全く認められない正 NO-GO 試行においても、不一致刺激の試行ではフォールス・アラームの反応準備が生じると予想される。そこで、一致刺激と不一致刺激の NO-GO 試行を比較することにより、NO-GO 電位の振幅と潜時が、エラー反応の準備の有無によって変化するかどうかを検討する。

方 法

被験者 矯正を含め視力正常な右利きの大学生及び大学院生 14 名 (18-27 歳) が実験に参加した。

刺激と装置 中央の標的文字の両側にノイズ文字を 2 つずつ付加した刺激 (HHHHH, SSSSS, SSHSS, HSHHH) を用いた。視角は 1 文字が縦 0.6 度×横 0.5 度、5 文字で縦 0.6 度×横 3.5 度であった。実験中、視角が縦 0.07 度×横 0.5 度の横棒を標的文字の下部に継続的に呈示した。刺激はランダムな順序で等確率に呈示した、試行間間隔は 2 600-4 600 ms の範囲でランダムに変化させた (平均 3 600 ms)。刺激の呈示時間は 1 200 ms とした。刺激呈示に関わる装置は実験 2 と同じであった。

課題 被験者には、片方の手の人差し指をボタンにおき、2 種のアルファベットの標的文字に対して、一方が呈示されたらボタンを押し、他方が呈示されたらボタンを押さないように教示した。2 種の文字と GO 試行および NO-GO 試行との対応については、被験者間でカウンターバランスをとった。

手続き 被験者は、45-75 試行程度の練習の後、60 試行からなるブロックを計 12 ブロック行った。被験者は、各ブロック終了後に 3 分程度、4 ブロックごとに 10 分程度、休憩した。ボタンを押す手は、左手からはじめて 2 ブロックごとに交替した。

脳波と EMG の記録 脳波は、銀皿電極を用いて、国際 10-20 法における Fz, F3, F4, Cz, C3' (C3 の前方 1 cm かつ上方 1 cm), C4' (C4 の前方 1 cm かつ上方 1 cm), Pz, P3, P4, 右耳朶の 10 部位から、左耳朶を基準として導出した (C3' と C4' の位置は Hackley & Miller, 1995 に準拠した。この点は以下の実験でも同じである)。EOG は右眼の上下から、EMG は両前腕の長掌筋上から約 3 cm の間隔をあけて双極導出した。電極間抵抗値は、脳波と EOG が 5 k Ω 以下、EMG は 50 k Ω 以下であった。脳波、EOG、EMG の増幅と記録に関しては、EMG の帯域通過周波数を 5-500 Hz とした点を除いて実験 2 と同じであった。

脳波と EMG の分析 脳波と EOG は、刺激呈示前 200 ms 間の平均振幅を基準にして、呈示後 800 ms までを加算した。ただし、(a) 各ブロックのはじめの 4 試行 (練習試行)、(b) EOG を含むいずれかのチャンネルの電位が $\pm 50 \mu\text{V}$ を超える試行、(c) EMG 潜時が 100 ms 未満の試行、(d) EMG 潜時が平均潜時の 95% 信頼区間の上限を超える試行は、分析から除外した。分析装置は実験 2 と同じであった。

EMG の分析は、刺激呈示前 200 ms (基線) から平均 EMG 潜時の 95% 信頼区間の上限までの範囲について、試行ごとに行った。はじめに、刺激呈示前 200 ms 間の平均値を基準にして、データを絶対値に変換した。次に、各試行の基線部 SD を算出した。そして、刺激呈示後の EMG 振幅が、基線部 SD の 4 倍未満であった場合を無反応とし、基線部 SD の 5 倍以上であった場合は反応が生じたとした。ただし、刺激呈示後の EMG 振幅が、基線部 SD の 4 倍以上 5 倍未満の場合、反応の有無を決めることが困難とみなし、その試行は分析から除いた。したがって、正しい GO 試行では、反応に用いる腕の前腕 EMG が基線部 SD の 5 倍以上であり、正しい NO-GO 試行では 4 倍未満であった。さらに、NO-GO 試行に関しては、EMG エラー試行とボタン押しエラー試行を区別して分析した。ま

た，各試行の EMG を観察によってチェックし，刺激に対する反応とは認められない EMG (例えば，体動や群化放電など) が混入した試行は分析から除外した (以下の実験でも特に断らない限り同じである)．EMG 潜時の測定手続きは実験 2 に同じであった．

LRP は，刺激呈示時点を起点として加算した．GO 試行の LRP 潜時の同定と分析は，Smulders, Kenemans, & Kok (1996) の次の方法に従った．全被験者の総加算平均波形について，その最大振幅値の 2 分の 1 の振幅に達した時点を LRP 潜時とした．潜時の比較は，両潜時に挟まれた区間の平均 LRP 振幅を各条件について算出し， t 検定 (両側， $df=13$ ， $p<.05$) を行った．一方，NO-GO 試行の LRP 振幅は，刺激呈示後 50 ms から 20 ms 区間ごとにその平均電位と基線との t 検定 (片側， $df=13$ ， $p<.05$) を行った．1 区間を 20 ms としたのは，ノイズ変動を抑えるためである．そして，有意区間が 2 区間 (40 ms 間) 以上連続した場合に限り，その区間の LRP 振幅には意味があると定義した．この基準を採用したのは，これまでの経験から，LRP の有無に関する観察結果と統計的検定の結果との整合性が良好と判断するからである (LRP 振幅の統計的検定の基準は特に言及しない限り，以下の実験でも同じである)．

結 果

行動指標 正しい GO 試行におけるボタン押し反応時間，EMG 潜時，全試行における割合を表 2-4 に示した．ボタン押し反応時間と EMG 潜時は，一致刺激よりも不一致刺激の試行の方が有意に長かった (表 2-4 に t 値と p 値を示した)．EMG 潜時の被験者内 SD の平均値は，一致刺激が 56 ms，不一致刺激が 55 ms でほぼ同じであった．NO-GO 試行における EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合を表 2-5 に示した．ボタン押しエラー試行が少数であったので，それと EMG エラー試行を合計してから t 検定を行った．その結果，エラー反応の割合は一致刺激より不一致刺激の試行の方が有意に大きかった (表 2-5 を参照)．

ERP GO 試行の総加算平均 LRP 波形を図 2-6 に示した．LRP 潜時については，GO 試行の一致刺激 (240 ms) と不一致刺激 (245 ms) がほぼ

表 2-4 一致刺激と不一致刺激の GO 試行における行動指標, LRP 潜時, N2 振幅に関する平均値と両側 t 検定の結果 (実験 3)

測 度	一致刺激	不一致刺激	t 値 ($df=13$)
ボタン押し反応時間 (ms)	368±39	379±42	3.89 ($p<.01$)
EMG 潜時 (ms)	259±37	270±41	3.78 ($p<.01$)
割合 (%)	93.9±2.0	91.6±2.8	—
LRP 潜時 (ms)	240	245	1.00 (n.s.)
240-245 ms 間の平均振幅 (μ V)	-0.91±0.46	-0.77±0.52	
N2 振幅 (μ V, 180-260 ms 間)	3.2±2.8	4.3±2.8	3.36 ($p<.01$)

(±SD)

同じであり, Smulders et al. (1996) の方法による統計的検定でも有意差はなかった (表 2-4). 図 2-7 は, NO-GO 試行の総加算平均 LRP 波形である. 基線との片側 t 検定 ($df=13$) で有意差があったのは, 不一致刺激では刺激呈示後 150 ms から 270 ms の連続する 6 区間で, 一致刺激では 150 ms から 170 ms の 1 区間であった (基準は方法における脳波と EMG の分析の項を参照).

総加算平均 ERP 波形を図 2-8 に示した. GO 試行においては, 不一致刺激に対する波形が 180 ms から 260 ms 付近で陰性方向に増大していた. その区間の GO 試行の平均電位は, 一致刺激よりも不一致刺激に対する方が有意に大きく ($t(13)=3.36, p<.01$), その立ち上がりは一致刺激の NO-GO 試行とほぼ同じであった.

図 2-8 に見られるように, NO-GO 試行では NO-GO 電位が明瞭に出現した. その平均頂点振幅と平均潜時, および, 刺激条件に関する t 検定の結果を表 2-5 に示した. 平均振幅は一致刺激よりも不一致刺激に対する方が有意に大きく, 頂点潜時は一致刺激よりも不一致刺激に対して有

表 2-5 一致刺激と不一致刺激の NO-GO 試行における NO-GO 電位振幅と潜時, エラー試行率に関する平均値と両側 t 検定の結果 (実験 3)

測 度		一致刺激	不一致刺激	t 値 ($df=13$)
	LRP の有無 (区間, ms)	無	有 (150-270)	—
正試行	NO-GO 電位振幅 (μV)	-0.68 ± 3.1	-3.93 ± 3.2	$5.65 (p < .001)$
	NO-GO 電位潜時 (ms)	291 ± 37	314 ± 22	$3.15 (p < .01)$
エラー試行	EMG エラー率 (%)	15.7 ± 10.8	26.4 ± 13.6	$5.99 (p < .001)$
	ボタン押しエラー率 (%)	0.6 ± 0.8	3.5 ± 4.6	

($\pm SD$)

注: エラー試行率に関する t 検定では, EMG エラー試行率とボタン押しエラー試行率の合計値を用いた。

意に長かった。

考 察

実験 3 の目的は, NO-GO 電位の振幅や潜時がエラー反応の準備が生じた場合に変わることかどうかを検討することであった。

まず, NO-GO 試行における LRP は, 不一致刺激の試行では明瞭に出現したが, 一致刺激の試行ではノイズ変動と十分に区別できる振幅が認められなかった (図 2-7)。NO-GO 電位については, 一致刺激よりも不一致刺激に対する方が有意に振幅が大きく, また有意に頂点潜時が長かった (図 2-8)。したがって, NO-GO 電位は, 振幅も潜時もエラー反応の準備と関係して変化すると考えられる。

不一致刺激の NO-GO 試行では, LRP が生じていたので, 反応抑制処理の負荷が一致刺激よりも大きかったと推定される。したがって, NO-GO 電位振幅が一致刺激より不一致刺激に対して大きかったことは, 反応抑制の努力が大きいほど NO-GO 電位が増大するという Jodo & Kayama

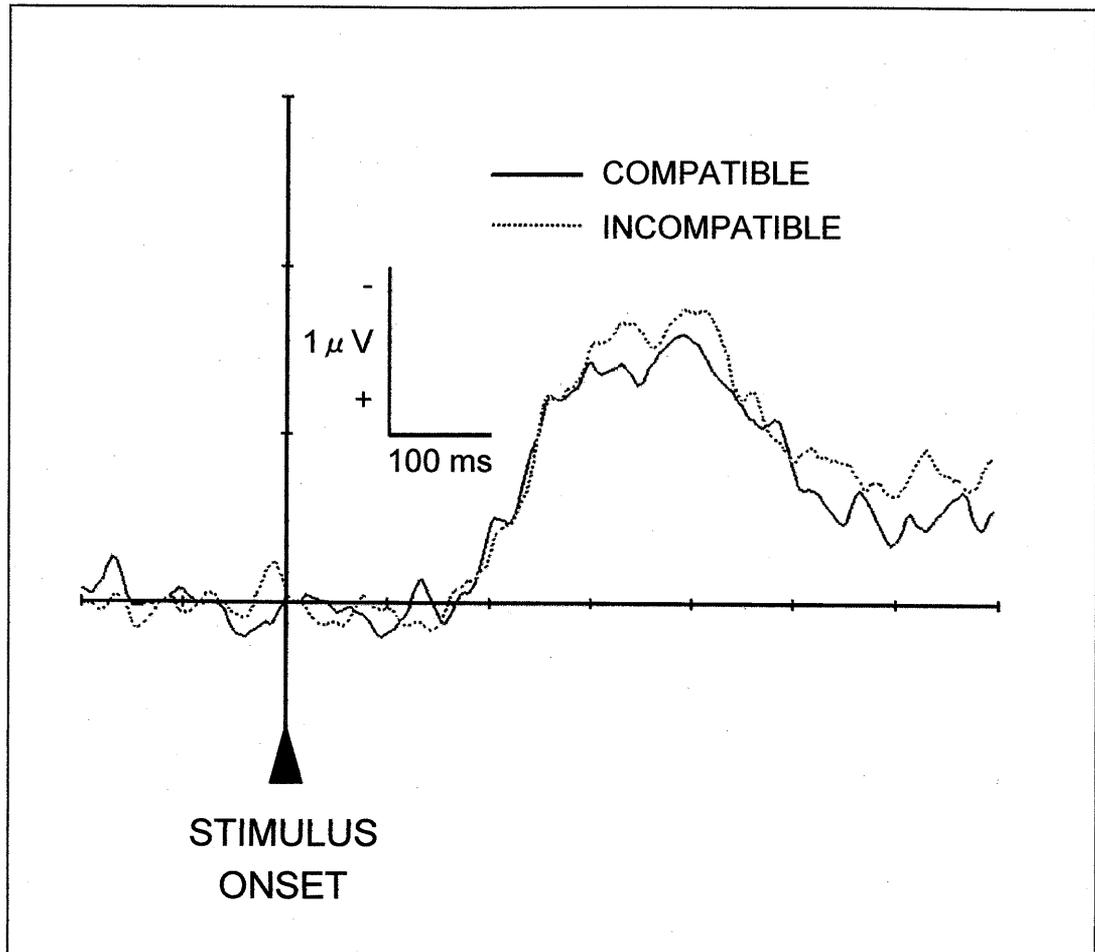


図 2-6. GO 試行における刺激呈示時点をもとに加算した LRP の総加算平均波形 (実験 3). 一致刺激と不一致刺激に対する LRP の重ね書き.

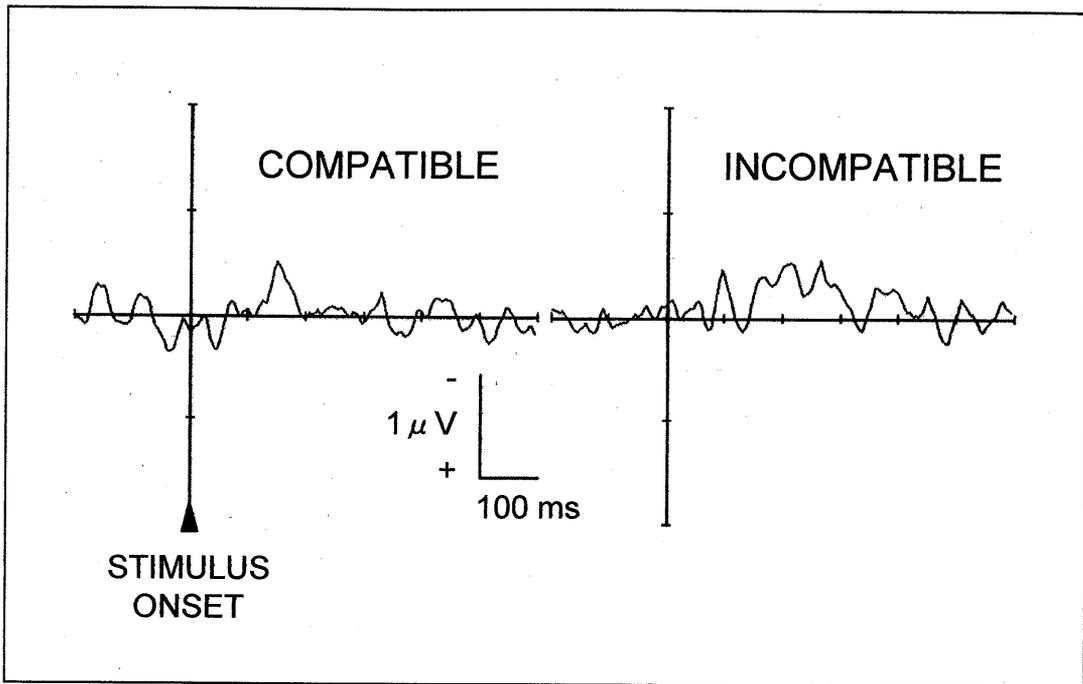


図 2-7. NO-GO 試行における刺激呈示時点を起点に加算した LRP の総加算平均波形 (実験 3).

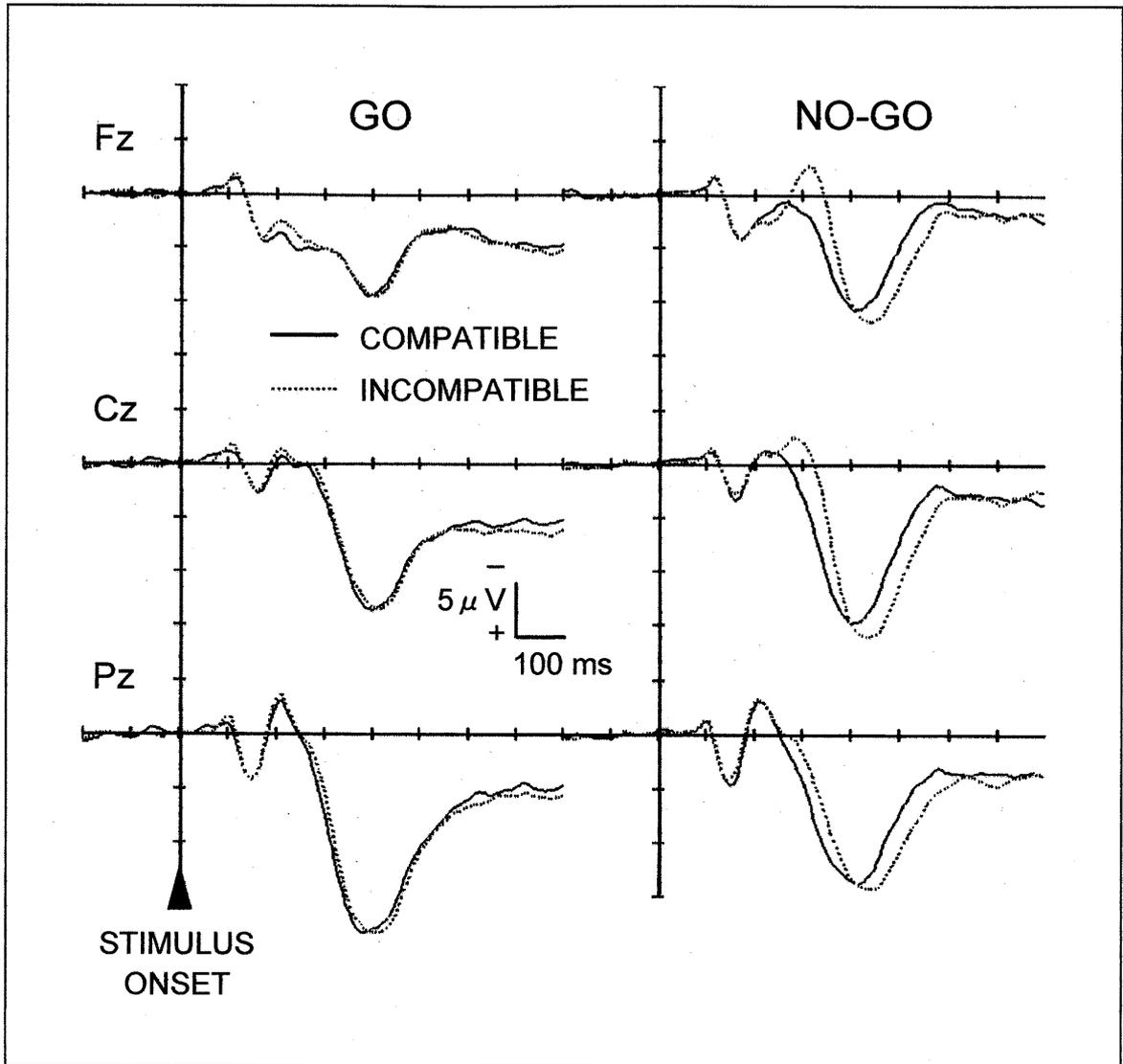


図 2-8. 実験 3 の各条件における刺激呈示時点を中心に加算した ERP の総加算平均波形.

(1992) の仮説を支持する結果と考えられる。しかし、その反応抑制処理の負荷の内容が、エラー反応の準備を抑制することなのか、NO-GO 判断を行うことなのか、あるいはその両方であるのかは、今のところ結論できない。

また、不一致刺激の NO-GO 試行では、ノイズ文字が GO 反応を意味するため、NO-GO 判断に要した時間は一致刺激よりも不一致刺激に対する方が長かったと推測される。言いかえると、NO-GO 判断のタイミングは、不一致刺激の方が一致刺激に対するよりも遅延していたと考えられる。このとき、NO-GO 電位頂点潜時が一致刺激より不一致刺激に対して長かったので、頂点潜時は NO-GO 判断を行うまでの処理時間と関係することが示唆される。

次に、GO 試行について考察する。ノイズ文字が NO-GO 反応を意味する不一致刺激の試行では、前頭部の陰性電位が一致刺激よりも有意に増大していた。この陰性電位の増大は、ノイズ文字が持つ NO-GO 反応の情報が影響した結果と考えられる。これを裏付けるように、不一致刺激に対するボタン押し反応時間と EMG 潜時が一致刺激よりも有意に長かった (表 2-4)。ところで、LRP 潜時には刺激の一致性の効果が認められなかった。その理由として2つの可能性が考えられる。1つは、EMG 潜時の結果からもわかるように、条件差が小さいため、反応準備段階にはその差が十分に現われなかったという可能性である。もう一つは、反応の意思決定処理が反応準備過程とは独立に機能していて、NO-GO 判断が反応抑制処理を起動する前に GO 判断へと修正された可能性である。この場合、反応時間は、反応準備を抑制することによって長くなるのではなく、意思決定処理における GO 判断の遅れによって長くなると考えられる。本研究ではこの点をさらに検討する予定はないが、今後独立した実験的検討が望まれる。

以上から、実験 3 において、NO-GO 電位振幅がエラー反応の準備が生じる事態では増大し、潜時が延長することが概ね明らかになった。

第3節 チェック操作モデルの妥当性の心理生理学的検討

実験2と実験3においてNO-GO電位を検討した結果、今後の実験でもEMGエラー試行を加算から除外する必要があること、および、エラー反応の準備が生じる事態ではNO-GO電位の振幅が大きくなり、潜時が長くなることが示された。実験4から実験6では、このNO-GO電位を用いて、認知的葛藤課題における情報処理過程をチェック操作モデルによって説明できるかどうかを検討する。

1. チェック操作の存在を示す心理生理学的証拠 (実験4)

実験4では、チェック操作が存在することを示唆する心理生理学的証拠が得られるかどうかを検討する。もしチェック操作が機能しているならば、その構成要素である反応抑制処理が働いているはずであり、エラー反応の準備が生じる不一致刺激に対して、NO-GO電位が出現するはずである。もし不一致刺激に対してNO-GO電位が出現するならば、それは反応抑制処理を構成要素として持つチェック操作が存在することを示す証拠と見なすことができる。そこで、実験4では認知的葛藤課題にNO-GO試行を混ぜた課題を設定する。NO-GO試行ではNO-GO電位が出現すると予想されるが、それと同じと考えられる陰性電位が、不一致刺激に対しても出現するかどうかを検討する。また、NO-GO電位が生じるにはNO-GO判断が必要である。実験4では、その判断が利用する情報源が運動関連領域からのフィードバックによるのかどうかも検討する。もしNO-GO判断がエラー反応の準備を含意するフィードバック情報に基いてなされるならば、陽性LRPだけではなく、反応抑制性陰性電位も、反応生起時点(EMG潜時)を起点に加算したERPにおける方が、刺激呈示時点を中心とするERPよりも明瞭に現れると予想される。

方 法

被験者 矯正を含め視力の正常な、右利きの大学生および大学院生 14

名 (20-30 歳) が実験に参加した。

刺激と装置 刺激は、中央の標的文字の両側にノイズ文字を 3 つずつ付けた文字列であった。標的とノイズとが同じ一致刺激 (HHHHHHH と SSSSSSS), それらが異なる不一致刺激 (SSSHSSS と HHHSHHH), および、アスタリスク刺激 (*****) の 3 種類を設け、それら 3 つの刺激カテゴリーがそれぞれ 3 分の 1 の確率になるようにした。被験者からディスプレイまでの距離は約 80 cm で、1 文字の視角が縦 0.6 度×横 0.5 度、7 文字で縦 0.6 度×横 4.4 度であった。刺激の呈示順序はランダムで、刺激間隔は 2 600-4 600 ms の範囲でランダムに変化させた (平均 3 600 ms)。刺激の呈示時間は 1 200 ms とした。装置は実験 3 と同じであった。

課題と手続き 被験者には、2 種類のアルファベット (H と S) に対して左右のボタンを選択的に押し、刺激がアスタリスクの時には反応しないように教示した。2 種類のアルファベットと左右の手との対応については、被験者間でカウンターバランスをとった。

被験者は、練習を 45-75 試行おこなってから、70 試行で構成されるブロックを計 8 ブロック行った。被験者は、各ブロック終了後に 3 分程度、第 4 ブロック終了後に 10 分程度の休憩をとった。

脳波と EMG の記録 実験 3 と同じであった。

脳波と EMG の分析 脳波の分析は、分析から除く試行を決める基準の 1 つである“EMG 潜時が 100 ms 未満”を“EMG 潜時が 200 ms 未満”とした以外は実験 3 と同じであった。

EMG の分析は、刺激呈示前 200 ms からボタン押し反応時間の 95%信頼区間の上限までの範囲について、各試行ごとに行った。まず、刺激呈示前 200 ms の平均振幅を基準にして、データを絶対値に変換した。次に左右の腕の基線部 SD を算出し、それぞれの腕について EMG 反応の有無を判定した。反応が生じたとした基準は、刺激呈示後の EMG が基線部 SD の 5 倍以上の振幅を示した場合とした。無反応の基準は、刺激呈示後の EMG が基線部 SD の 4 倍未満の場合とした。したがって、標的文字がアルファベットの場合、標的と対応する腕の EMG が基線部 SD の 5 倍以上で、他方の腕の EMG が 4 倍未満の試行を正反応試行とした。標的が

アスタリスクの場合，両方の腕の EMG が，基線部 *SD* の 4 倍未満であれば，正しい NO-GO 試行とした。

エラー試行については，2 種類を区別した．まず，標的がアルファベットの場合は，誤りとなる腕の EMG が基線部 *SD* の 5 倍以上であるなら EMG エラー試行とし，ボタン押しに至ればボタン押しエラー試行とした．EMG が基線部 *SD* の 4 倍以上 5 倍未満であった場合は判別不可とした．この基準は，刺激がアスタリスクの NO-GO 試行でも同じであるが，NO-GO 試行では，両腕の EMG のうち大きい方の振幅値を用いてエラー反応の分類を行った．EMG 潜時の測定手続きは実験 3 と同じであった．

刺激呈示時点を起点とした加算による LRP (stimulus-locked LRP, s-LRP) と EMG 潜時を起点とした加算による LRP (response-locked LRP, r-LRP) の 2 種類を算出した．s-LRP は，反応準備の開始時間の条件間比較を行うために利用し，r-LRP はエラー反応の準備を示す陽性 LRP が存在するかどうかを検討するために用いた．r-LRP は，EMG が生じた時点を起点として，それ以前の 350 ms から以後の 300 ms までを加算した．

P3 頂点潜時の測定については，実験 1 と同様にして行った．

結 果

行動指標 ボタン押し反応時間と EMG 潜時の条件別の平均値と *t* 検定の結果を表 2-6 に示した．ボタン押し反応時間と EMG 潜時はともに，不一致刺激の試行の方が一致刺激よりも有意に長かった．また，表 2-7 は，一致刺激，不一致刺激，および NO-GO 刺激に対する EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合を示したものである．EMG エラー試行 ($t(13)=4.36, p<.001$) とボタン押しエラー試行 ($t(13)=2.91, p<.05$) のいずれについても，その割合は一致刺激よりも不一致刺激に対する方が有意に大きかった．

ERP 刺激呈示時点を起点に加算した s-LRP の総加算平均波形を図 2-9 に示した．表 2-6 に示したように，正反応準備 (陰性方向) の立ち上がり潜時は，一致刺激よりも不一致刺激の試行の方が有意に長かった (振幅の意味は方法を参照)．しかし，図 2-9 ではエラー反応の準備を示す陽

表 2-6 一致刺激と不一致刺激の試行における，行動指標，LRP，P3 潜時に関する平均値と t 検定の結果 (実験 4)

測 度	一致刺激	不一致刺激	t 値 (両側, $df=13$)
ボタン押し反応時間 (ms)	424±32	447±38	8.26 ($p<.001$)
EMG 潜時 (ms)	321±31	343±37	8.30 ($p<.001$)
s-LRP 潜時 (ms)	295	325	
295-325 ms 間の平均振幅 (μV)	-1.50±0.82	-0.73±0.69	4.53 ($p<.001$)
r-LRP における陽性 LRP (μV)	-0.17±0.39	-0.31±0.39	
反応前の区間 (ms)	130-60	195-60	—
t 値 (片側, $df=13$)	1.61 (<i>n.s.</i>)	2.98 ($p<.01$)	
ERP 上の有意差区間 (ms) (片側 t 検定, $df=13$, $p<.05$)	280-340		—
P3 潜時 (ms)	421±24	433±32	2.1 ($p=.056$)

(±SD)

注：陽性 LRP に関する t 検定は基線との比較で行った。

性 LRP は認められなかった。次に，反応時点 (EMG 潜時) を起点に加算した r-LRP の総加算平均波形を図 2-10 に示した。不一致刺激の波形を見ると，反応前の 195-60 ms 間において陽性方向に振れているように見える。この区間の平均電位は，統計的にも基線と比べて有意であった。一方，一致刺激の波形を見ると，反応前 130-60 ms 間において陽性方向に振れているように見えるが，その平均電位は基線と比較して有意ではなかった。

各条件における刺激呈示時点をもとに加算した ERP の総加算平均波形を図 2-11 に示した。NO-GO 電位が明瞭に現れる Fz 部位の波形を一致刺激と不一致刺激の間で比較すると，刺激呈示後およそ 260-350 ms 間に違いが認められた。そこで，それらの波形に有意差が生じはじめる時点とそれが持続する区間を求めるため，各サンプリングポイントごとに t 検

表 2-7 実験 4 の各刺激条件における EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合の平均値

エラー試行の種類	一致刺激	不一致刺激	NO-GO 刺激
EMG エラー	12.3±5.1	18.4±6.4	12.8±3.4
ボタン押しエラー	1.5±1.8	3.7±3.6	0.3±0.5

(±SD)

定 (片側, $df=13$, $p<.05$) を行ったところ, 280-340 ms 区間に有意差が認められた (表 2-6). また, NO-GO 電位が NO-GO 試行で立ち上がった時点を推定するため, 一致刺激の試行と NO-GO 試行の波形について, 各サンプリングポイントごとに t 検定 (片側, $df=13$, $p<.05$) を行った (200-300 ms 区間に限定した). その結果, 有意差は刺激呈示後 225 ms から認められた. 次に, 一致刺激と不一致刺激の試行における, 反応生起時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形を図 2-12 に示した. 図からわかるように, 陰性電位の増大はどの波形にも認められなかった.

図 2-11 における Pz 部位の P3 頂点潜時は, 一致刺激よりも不一致刺激の試行で長い傾向が認められた (表 2-6). NO-GO 試行の P3 潜時は, 448 ms であった.

考 察

実験 4 の目的は, チェック操作が存在することを示唆する心理生理学的証拠が得られるかどうかを検討することであった. もしチェック操作が機能しているならば, その構成要素である反応抑制処理の働きを反映して, NO-GO 電位が出現すると予想される. したがって, エラー反応の準備が生じる不一致刺激の試行において NO-GO 電位が出現したならば, 反応抑制処理を構成要素として持つチェック操作が存在することを仮定して研究を進めていく根拠が得られる.

まず, P3 潜時について簡単に触れておく. P3 潜時は一致刺激よりも不一致刺激の条件で遅れる傾向にあったが, これは, 反応過程とは別の

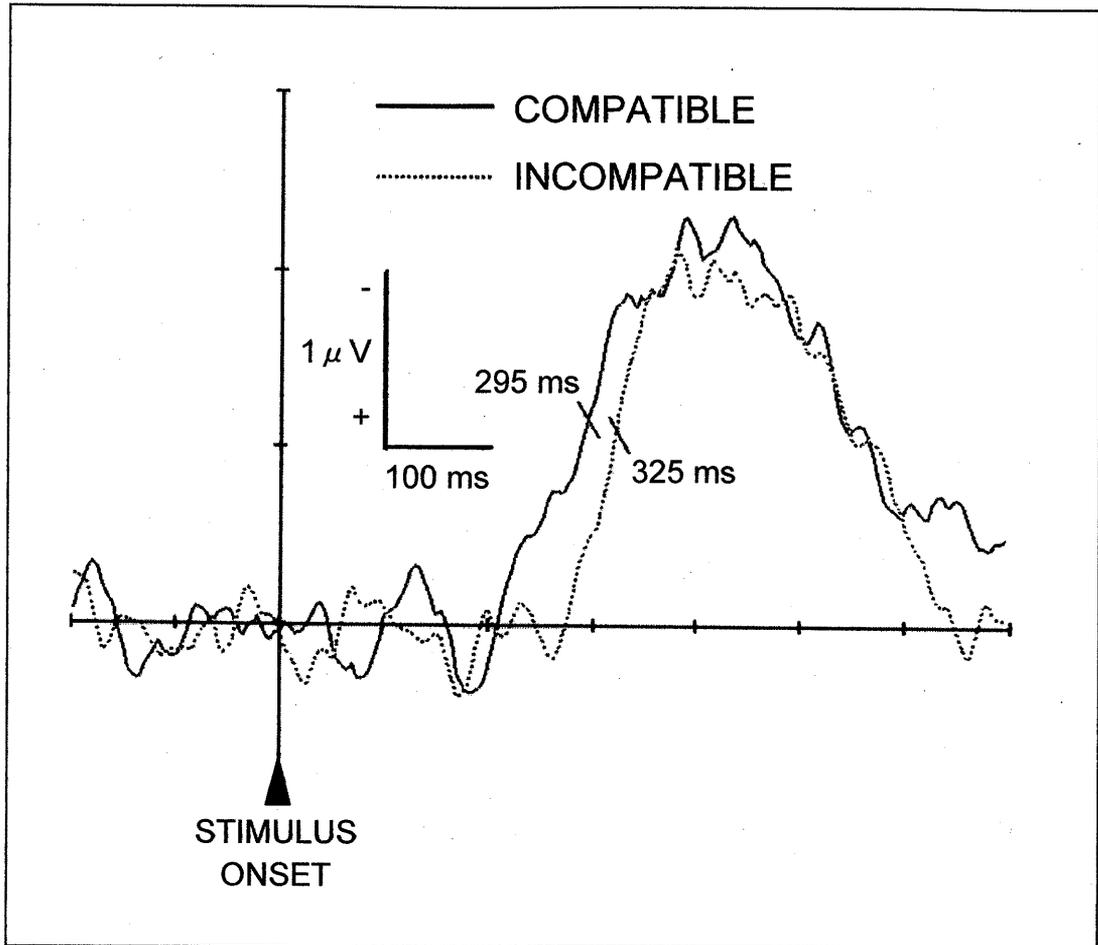


図 2-9. 一致刺激と不一致刺激の試行における刺激呈示時点を起点に加算した LRP の総加算平均波形 (実験 4). LRP に示した斜め線と数字は, 最大陰性振幅の 50% の振幅に相当する潜時を示す (説明は本文の方法を参照).

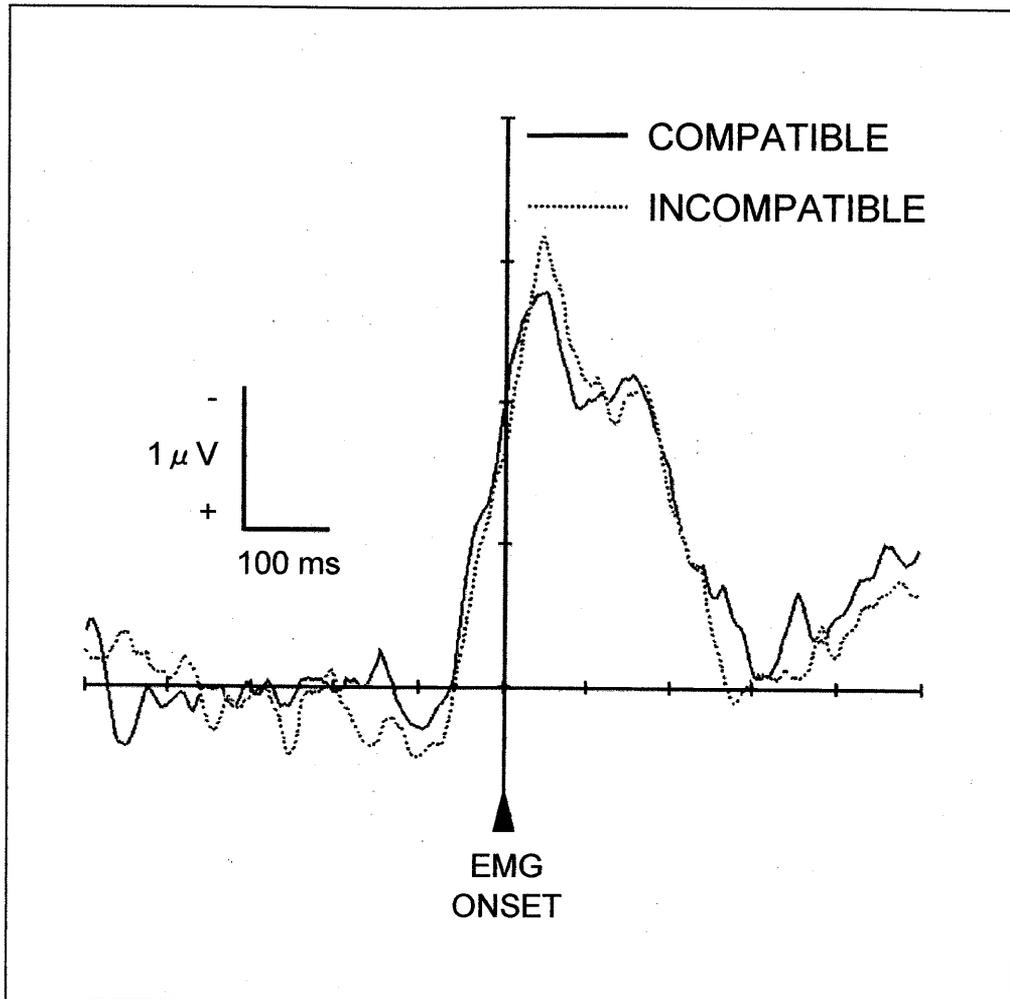


図 2-10. 一致刺激と不一致刺激の試行における EMG 開始時点を起点に加算した LRP の総加算平均波形 (実験 4).

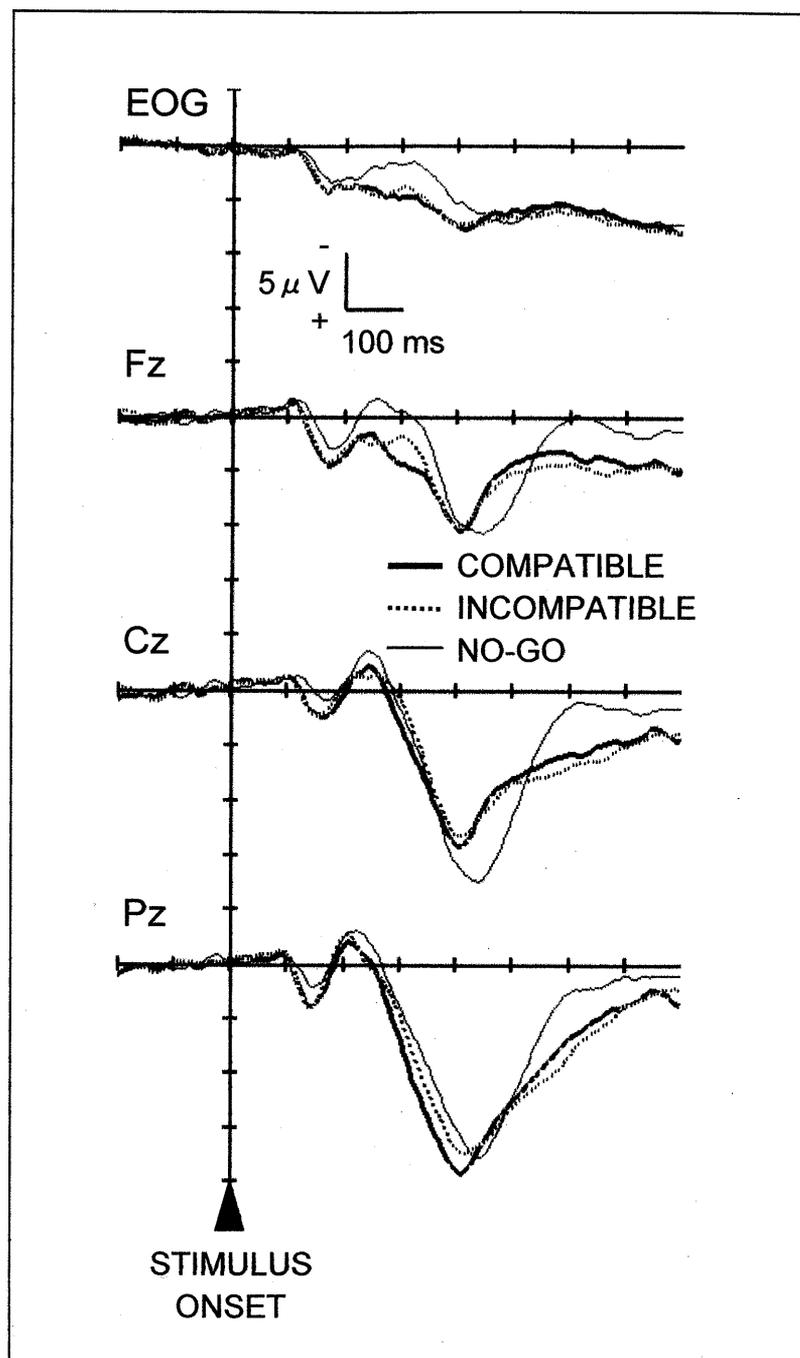


図 2-11. 各条件における刺激呈示時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形 (実験 4).

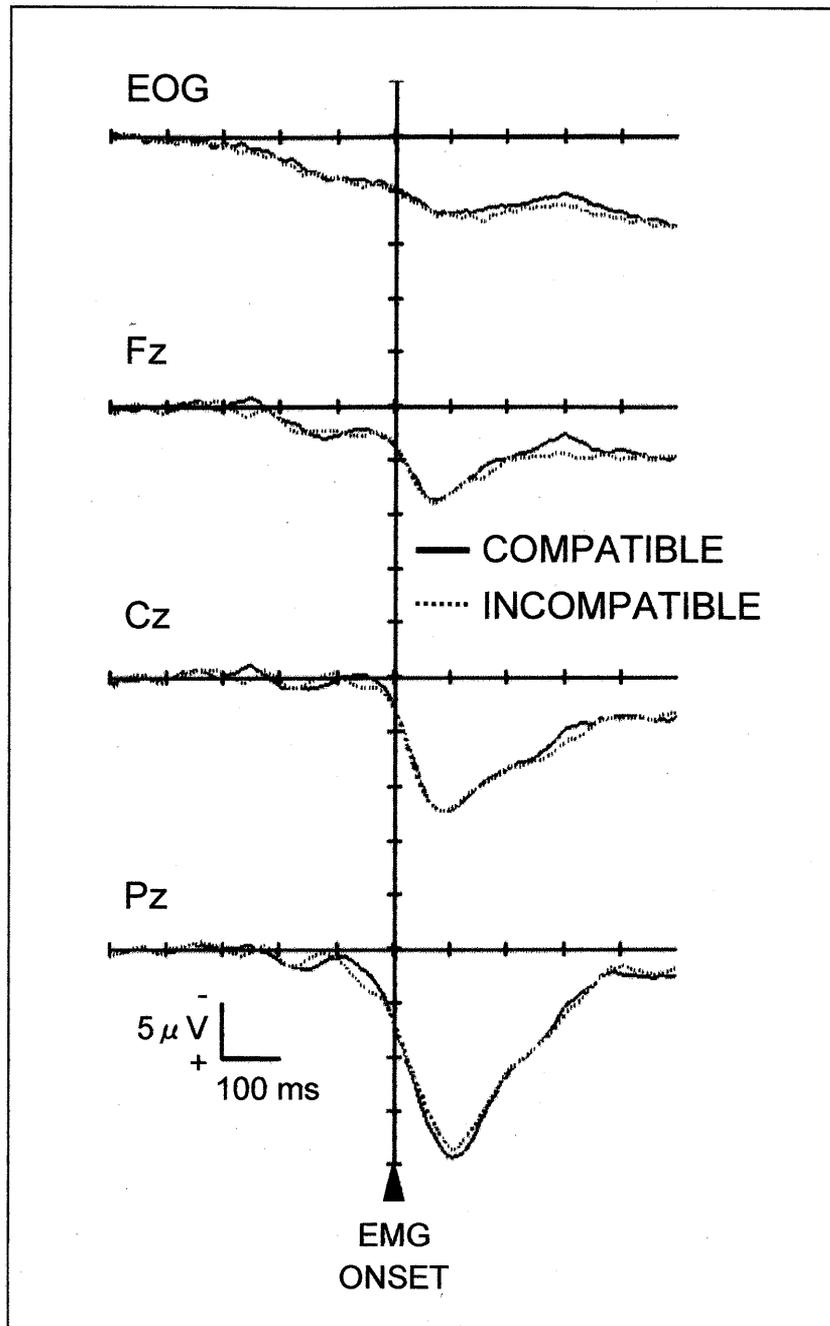


図 2-12. 一致刺激と不一致刺激の試行における EMG 開始時点起点に加算した ERP の総加算平均波形 (実験 4).

認知的処理も反応時間の変化に寄与するという実験 1 や Coles et al. (1985) の考察を支持する結果であった。P3 潜時の分析は本実験の主たる目的ではないので、これ以上は言及しない。

図 2-10 に見られるように、エラー反応の準備を示す陽性 LRP が不一致刺激に対してだけ認められた。さらに、NO-GO 電位と考えられる陰性電位が NO-GO 試行だけではなく、不一致刺激 (280-340 ms 区間) に対しても一致刺激の波形との比較で有意に出現した (図 2-11)。不一致刺激に対する陰性電位を NO-GO 電位と考える理由は、(a) その分布が前頭部優勢であったこと、(b) エラー反応の準備 (陽性 LRP) が認められたこと、(c) NO-GO 電位がエラー反応の準備のあった試行で増大することが実験 3 で示されていること、および、(d) エラー反応の準備が生じる事態では NO-GO 判断と反応抑制が機能すると考えられることの 4 点である。したがって、準備中の反応がエラーとして認知されていた、言いかえると、反応準備状態の適切さを確認する処理過程 (チェック操作) が認知的葛藤課題における情報処理過程において機能していたと考えられる。

この NO-GO 電位と推定される電位は、エラー反応が準備された試行で検出されたという意味では、Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c と類似するものである。しかし、本実験では陰性電位の分布が前頭部よりであったのに対し、Kopp, Rist, et al. の実験では中心部 (Cz 部位) の方が前頭部よりも大きかった。この頭皮上分布の相違は、EMG エラー試行の扱いの違いによると思われる。Kopp, Rist, et al. の実験ではボタン押し反応で反応の正誤を判断していたので、EMG エラー試行が正反応試行として扱われていた。その場合、Cz 部位で優勢となるエラー関連陰性電位 (ERN) が NO-GO 電位に重畳するため、それらの合成波形は中心部よりの分布になったのではないかと推測される。

NO-GO 電位の出現潜時は、NO-GO 刺激 (225 ms) よりも不一致刺激 (280 ms) に対して長かった。NO-GO 試行ではアスタリスク刺激のどの部分も NO-GO 判断を行う情報となるのに対し、不一致刺激の試行では、少なくとも一致刺激と不一致刺激とを弁別しなければ NO-GO 判断ができない。そのような時間差が NO-GO 電位の出現潜時の差となっている

と考えられる。ただし、不一致刺激であるという判断だけで反応抑制を行うと両手を無選択に抑制せざるを得ない（以下では“全抑制タイプ”と呼ぶ）。はたしてそのような抑制様式であるのか、あるいは、チェック操作が想定するようなエラー反応の準備に対する選択的な抑制であるのかは本実験からは、積極的には言及できない。

次に、チェック操作における反応抑制処理の駆動因はエラー反応の準備の有無に関する情報であり、それは運動関連領野からのフィードバックによるという仮説について考察する。もしこの仮説が正しいならば、エラー反応の準備が明瞭に観察されるのは反応生起時点を起点に加算した LRP においてであるから、反応抑制処理の陰性電位もその手続きによる ERP において明瞭に観察されるはずである。しかし、図 2-12 の ERP には、陰性電位が観察できなかった。これは上の仮説に対して否定的であり、準備中の反応がエラーであるかどうかの判断は、運動関連領野からのフィードバックには依存しないと考えられる。1 つの可能性としては、刺激評価の初期に選択した反応を記憶しておき、それと実際の標的文字とが正しく対応するかどうかを確認するプロセスを考えることができる。この場合には、NO-GO 判断が標的文字の検出時間に相関すると考えられ、陰性電位は刺激呈示時点を起点に加算した ERP で明瞭に出現するはずである。この仮説は本実験のデータと矛盾するものではない。

反応抑制様式については、エラー反応の準備だけを選択的に抑制したのか、あるいは、一時的に全ての反応を抑制したのかという問題がある。理論的には、被験者はエラー反応の準備を選択的に抑制し、それに並行して正しく反応していたと解釈できる。この点については、反応抑制処理が機能しても反応時間が長くなることを示すデータが得られるかどうかを検討することが有効であろう。なぜなら、全抑制タイプの抑制処理が機能する試行では反応時間が必ず長くなると予想されるからである。換言すると、反応抑制処理が機能したと考えられる試行で反応時間が長くなった場合は、基本的には、エラー反応の準備だけに対する選択的抑制と、全抑制の 2 つの可能性がいずれも否定されずに残ることになる。この点は今後も検討していく必要がある。

2. 認知的葛藤の増大が反応準備期間の反応抑制に及ぼす影響 (実験 5)

実験 5 と実験 6 においては、チェック操作を構成する反応抑制処理が、反応時間の変化に関係しているのかどうかを検討する。まず実験 5 では、反応抑制処理が強く働くほど反応時間が長くなるという仮説が支持されるかどうかを検討する。そこで、認知的葛藤課題における不一致刺激の難易度に 2 水準を設ける。さらに、NO-GO 電位振幅と反応時間との関係をより詳細に検討するため、正反応試行を EMG 潜時がその中央値よりも短い試行と長い試行に分類し、NO-GO 電位振幅が反応時間の長短の変数によって変化しているかどうかにも検討する。

また、実験 4 では、NO-GO 電位が運動関連領野からのフィードバック情報ではなく、刺激評価過程で分析された情報に依存して出現することが示唆されたが、それが繰り返し認められるかどうかを検討する。さらに、反応抑制処理を反映する N2c がエラー反応の準備の大きさと比例して増大するという、Kopp, Rist, et al. (1996) の仮説 (第 1 章第 3 節参照) の妥当性も検討する。

方 法

被験者 矯正を含め視力の正常な、右利きの大学生と大学院生 14 名 (19-29 歳) が実験に参加した。

刺激と装置 刺激は、5 文字の文字列で、中央の標的文字の両側にノイズ文字を付加して構成した。刺激には、標的文字がノイズ文字と同じ一致刺激 (HHHHH と SSSSS)、および、それらが異なる 2 種の不一致刺激 (困難条件: HSHHH と SSHSS, 容易条件: HSSSH と SHHHS) の 3 種類を設けた。1 文字の視角は縦 0.6 度×横 0.5 度、文字列全体では縦 0.6 度×横 4.6 度であった (観察距離およそ 80 cm)。刺激は、ランダムな順序で、3 200 ms の試行間隔でディスプレイに呈示した。呈示時間は 1 200 ms であった。実験中は、視角が縦 0.07 度×横 0.5 度の横棒を標的文字の下部に継続的に呈示した。各刺激条件の呈示確率は、一致刺激が 50%、不一致容易刺激が 25%、不一致困難刺激が 25% であった。装置は実験 4

と同じであった。

課題と手続き 被験者には、2種の標的文字に対して、左ボタンを左手の人差し指で、右ボタンを右手の人差し指で選択的に押すように教示した。文字と手との対応については、被験者間でカウンターバランスをとった。

被験者は、48-72試行の練習を行ってから、72試行で構成したブロックを計10ブロック行った。被験者は、各ブロックの終了後に3分程度、第5ブロック終了後に10分程度の休憩をとった。

脳波とEMGの記録 脳波の測定に銀・塩化銀皿電極を用いたこと、および、EMGを両前腕の長掌筋上から約4cmの間隔をあけて導出したことを除いて実験4と同じであった。

脳波とEMGの分析 分析装置は実験4と同じであった。分析のはじめに、両耳朶連結が基準となるようにデータを再計算した。脳波とEOGは、刺激呈示前200msの平均振幅値を基準にして呈示後800msまでの範囲を加算した。ただし、(a)各ブロックのはじめの8試行(練習試行)、(b)EOGを含むいずれかのチャンネルの電位が $\pm 100 \mu\text{V}$ を超える試行、(c)EMG潜時が150ms未満の試行、(d)EMG潜時がその平均潜時の99%信頼区間の上限を超えて遅い試行は、加算から除外した。

EMGの分析は、分析範囲を刺激呈示前200ms(基線)から平均EMG潜時の99%信頼区間の上限までとしたこと、および、EMGが生じたとした基準を基線部SDの5.5倍としたことの2点を除いて、実験4と同じであった。

LRPは、EMGが生じた時点を起点として、それ以前の350msから以後の300msまでを加算し、反応前に陽性LRPが存在するかどうかを検討した。陽性LRPが統計的に意味があるかどうかは、反応前350msから20ms区間ごとにその平均電位と基線との t 検定(片側5%, $df=13$, $p<.05$)を行い、実験3と同じ基準で判定した。

P3頂点潜時は、実験4と同様の手続きで測定した。

行動指標の分析とLRP以外のERPの分析では、繰り返し測度の分散分析を実施するので、タイプIエラーの確率が増加する危険を避けるため、

Greenhouse と Geisser の方法で自由度を調整した。多重比較には Ryan 法を用い、有意水準を 5% とした。

結 果

行動指標 各刺激条件の試行を中央値よりも短い EMG 潜時試行と長い EMG 潜時試行に分け、ボタン押し反応時間、EMG 潜時の平均値を求めた (表 2-8)。以下では、冗長さを避けるため、結果では“一致”を“C”、“不一致容易”を“EI”、“不一致困難”を“DI”と表記する。ボタン押し反応時間に関する 2 (EMG 潜時の長短) × 3 (刺激条件) の分散分析の結果、EMG 潜時の長短 ($F(1, 13)=320.62, p<.001$) と刺激条件 ($F(2, 26)=9.38, p=.001, \epsilon=0.962$) の主効果が有意であったが、交互作用はなかった。刺激条件に関する多重比較では、3 条件それぞれの間には有意差が認められ、C, EI, DI の順に長くなった。EMG 潜時に関しても同様の分

表 2-8 実験 5 の各条件における行動指標、NO-GO 電位、P3 潜時に関する平均値、および、陽性 LRP の有無

測 度	EMG 潜時が中央値より短い試行			EMG 潜時が中央値より長い試行		
	一致	不一致 容易	不一致 困難	一致	不一致 容易	不一致 困難
ボタン押し反応時間 (ms)	346±23	358±24	368±29	463±43	473±49	485±44
EMG 潜時 (ms)	233±23	249±23	262±28	327±35	333±36	352±40
陽性 LRP (反応前の区間, ms)	無	無	無	無	無	有 220-180 140-80
NO-GO 電位潜時 (ms) 振幅 (μV)	260 (-0.1±2.7)	270 (-0.4±3.3)	270 (-2.4±2.7)	280 (-1.4±2.4)	295 (-2.3±3.4)	295 (-3.7±4.3)
P3 潜時 (ms)	370±20	375±29	391±34	391±33	408±26	421±25

(±SD)

注：NO-GO 電位と潜時については本文の説明を参照。

表 2-9 実験 5 の各刺激条件における EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合の平均値

エラー試行の種類	一致刺激	不一致 容易刺激	不一致 困難刺激
EMG エラー	7.9 ± 3.3	9.6 ± 3.6	13.1 ± 5.3
ボタン押しエラー	0.7 ± 0.7	0.5 ± 0.8	1.3 ± 1.0

(±SD)

析を行った結果，EMG 潜時の長短 ($F(1, 13)=346.99, p<.001$) と刺激条件 ($F(2, 26)=22.76, p<.001, \epsilon=0.720$) の主効果が有意であった。刺激条件に関する多重比較では，3 条件それぞれの間には有意差が認められ，C, EI, DI の順に長くなった。交互作用も有意であり ($F(2, 26)=5.22, p<.05, \epsilon=0.909$)，下位検定の結果，短い EMG 潜時試行では 3 条件それぞれの間単純主効果が有意であり，C, EI, DI の順に長くなった。長い EMG 潜時試行では，DI が他 2 条件よりも有意に長かった。表 2-9 は，EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合を示したものである。ボタン押しエラー試行の割合が非常に小さかったため，それに EMG エラー試行の割合を加えたデータを開平変換した。そして，変換後のデータについて，刺激条件に関する 3 水準の分散分析を行ったところ，有意な主効果が認められた ($F(2, 26)=30.05, p<.001$)。多重比較では，DI 条件が C ($t(14)=7.52$) と EI ($t(14)=5.38$) よりも有意に大きかった。

LRP 反応時点 (EMG 潜時) を起点として加算した LRP の総加算平均波形を図 2-13 に示した。反応の直前に生じる陽性 LRP は，長い EMG 潜時試行 (下図) の DI 刺激に対して，反応前 220-180 ms の 40 ms 間と 140-80 ms の 60 ms 間において，基線との比較で有意な振幅を示した。有意な陽性 LRP は，その他の波形では認められなかった。

NO-GO 電位 刺激呈示時点を中心に加算した ERP の総加算平均波形を図 2-14 に示した。NO-GO 電位の頂点を同定できない被験者がいたので，総加算波形の Fz 部位における刺激呈示後 250 ms から 350 ms 間の頂点潜時を表 2-8 に示した。また，NO-GO 電位の直前の陽性電位 (P2) が

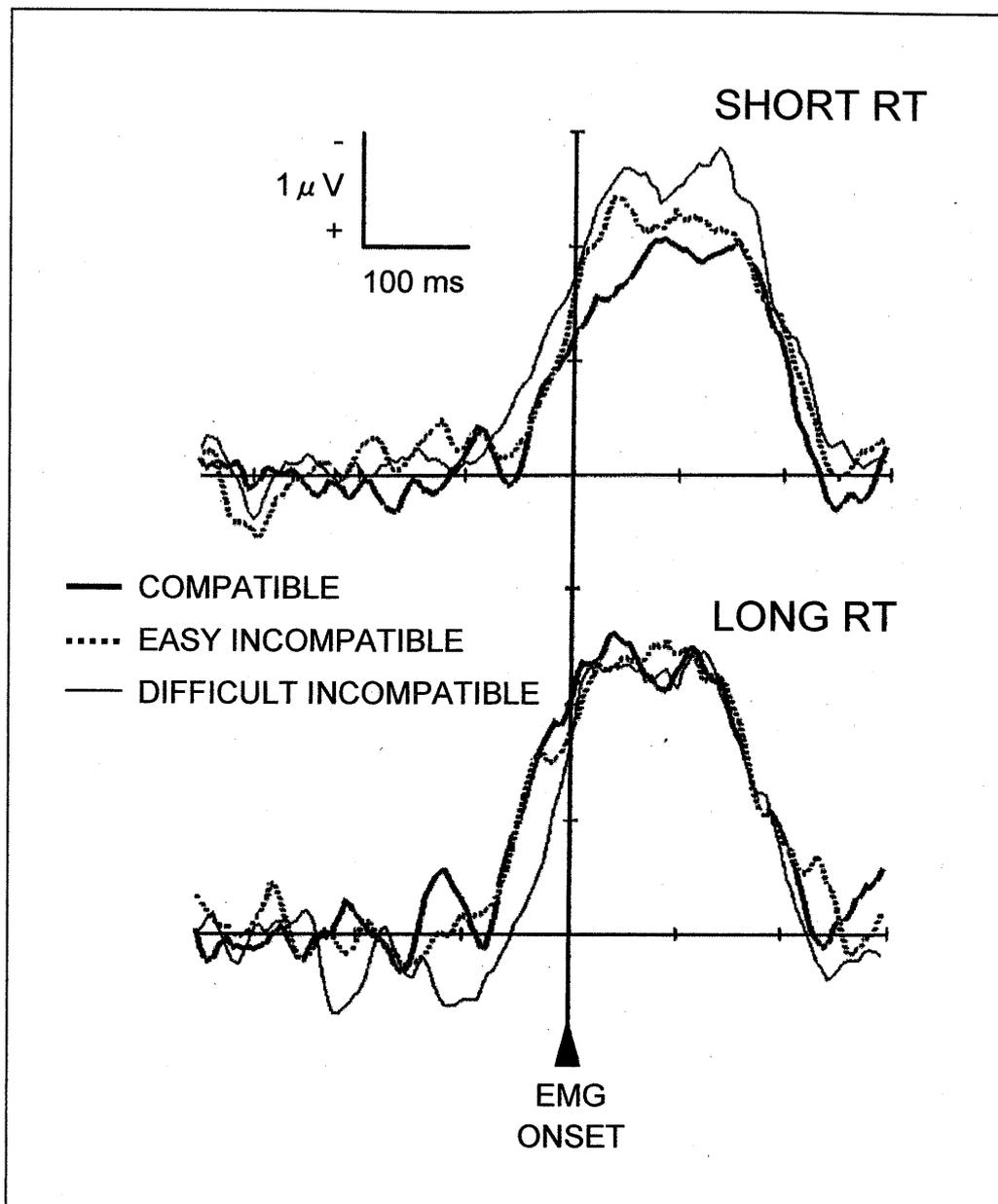


図 2-13. 実験 5 の各条件における EMG 開始時点を起点に加算した LRP の総加算平均波形.

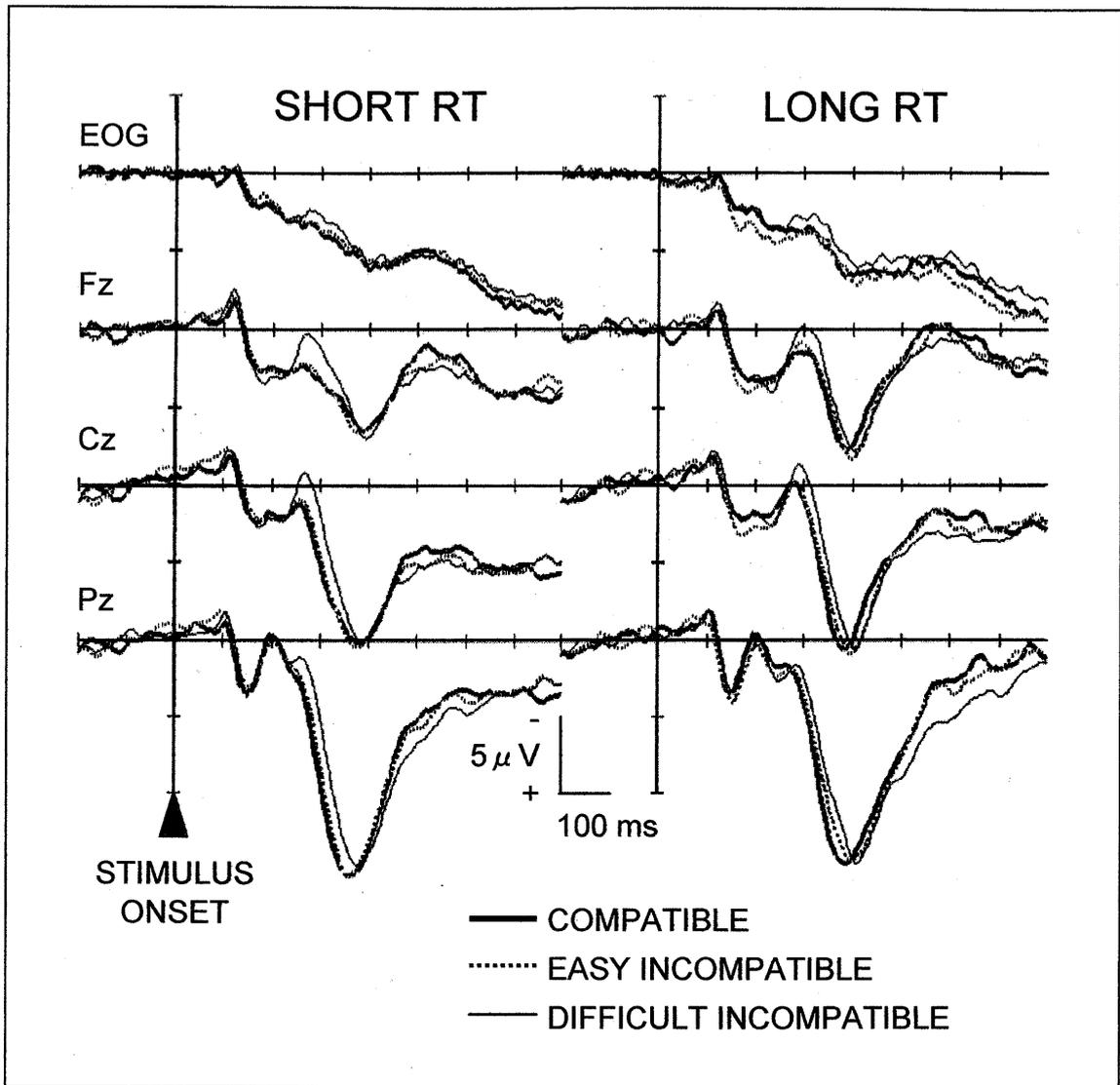


図 2-14. 実験 5 の各条件における刺激呈示時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形.

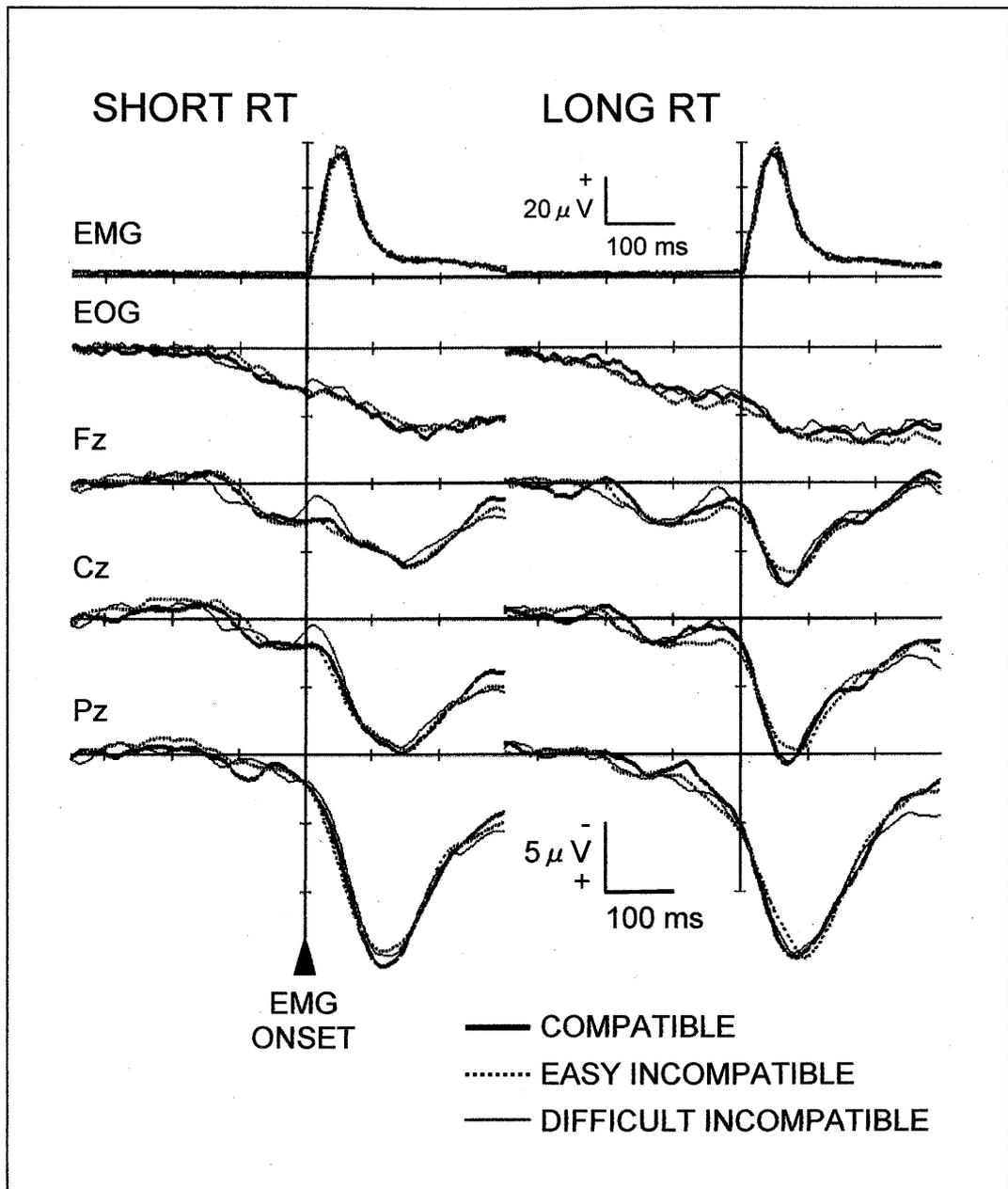


図 2-15. 実験 5 の各条件における EMG 開始時点を中心に加算した ERP の総加算平均波形.

DI 刺激に対して明瞭に認められ、その潜時は短い EMG 潜時試行で 215 ms、長い EMG 潜時試行では 230 ms であり、それらの潜時の振幅は条件間で異なっているように見える。P2 頂点振幅が異なると、NO-GO 電位振幅の基線も変化していると考えられるので、P2 頂点振幅と NO-GO 電位の頂点振幅との相対差 (2つのピーク間の振幅値) を NO-GO 電位振幅として測定することにした (この分析方法は Jodo & Kayama, 1992 の研究から妥当と考えられる)。そこで、短い EMG 潜時条件では 215 ms 時点の振幅、長い EMG 潜時条件では 230 ms 時点の振幅を基準に ($0 \mu V$ として)、総加算平均波形で測定した Fz 部位の NO-GO 電位頂点潜時の前後 25 ms の平均値を各被験者ごとに算出し、被験者全体の平均値を表 2-8 に示した。

NO-GO 電位振幅に関する 2 (EMG 潜時の長短) \times 3 (刺激条件) の分散分析の結果、EMG 潜時の長短 ($F(1, 13)=7.43, p<.05$) と刺激条件 ($F(2, 26)=9.65, p<.01, \epsilon=0.710$) の主効果が有意であったが、交互作用はなかった。刺激条件に関する多重比較では、DI が C と EI のいずれよりも有意に大きかった。

EMG 潜時を起点に加算した ERP の総加算平均波形を図 2-15 に示した。陰性電位が反応の直前に生じていた。この点は考察で言及する。

P3 頂点潜時 図 2-14 における P3 潜時の結果を表 2-8 に示した。NO-GO 電位と同様の分析の結果、EMG 潜時の長短 ($F(1, 13)=64.45, p<.001$) と刺激条件 ($F(2, 26)=24.87, p<.001, \epsilon=0.885$) の主効果が有意であったが、交互作用はなかった。刺激条件に関する多重比較では、3 条件のいずれの間にも有意差が認められ、C、EI、DI の順に長くなった。

考 察

実験 5 の目的は、チェック操作を構成する反応抑制処理が、反応時間の変化に関係しているかどうかを検討することであった。もし関係しているならば、反応抑制処理が強く働くほど反応時間が長くなると考えられる。

EMG 潜時は、一致刺激、不一致容易刺激、不一致困難刺激の順で長く

なり (表 2-8), この傾向が統計的にも支持された. NO-GO 電位振幅の分析でも刺激条件の主効果が有意であり, 一致刺激, 不一致容易刺激, 不一致困難刺激の順で振幅が大きくなった (多重比較では, 不一致困難刺激が一致刺激と不一致容易刺激よりも有意に大きな振幅であった). また, NO-GO 電位は, EMG 潜時が長い試行条件の方が短い条件よりも有意に大きかった. このように, EMG 潜時と NO-GO 電位振幅の変化の様子が概ね対応していたので, 反応抑制処理が強く働くほど反応時間が長くなるという仮説は現在のところ有望と考えられる.

次に, 反応抑制処理を駆動する情報の起源について考察する. エラー反応の準備を反映する陽性 LRP は, 長い EMG 潜時試行の不一致困難条件以外では出現しなかった (図 2-13). もしエラー反応の準備を検出してから反応抑制が機能するなら, NO-GO 電位も陽性 LRP が生じた条件でだけ現れ, 分散分析で交互作用を示したはずである. しかし, 実際には交互作用はなかったことから, 実験 4 で示唆されたように, NO-GO 電位が反映する反応抑制処理が運動関連領域からのフィードバック情報を受け取ってから機能するという仮説は支持できない. このことは, 反応生起時点を起点に加算した ERP (図 2-15) からとも言えることである. もし上記の仮説が正しいなら, 長い EMG 潜時試行の不一致困難条件の ERP でだけ陽性 LRP の時間帯の直後に陰性電位が生じるはずである. しかし, そのような ERP は全く観察されなかった. 反応前に陰性電位が生じているように見えるが, これはエラー反応の準備の時間帯とほぼ重なっており, エラー反応の準備の検出に関連して出現したと考えるには, 潜時が短かすぎる. 出現のタイミングから考えて, この陰性 ERP は, 刺激呈示に同期して現れる NO-GO 電位が残存したのと考えた方が自然である. この点は短い EMG 潜時試行においてはさらに明瞭であった. この試行ではエラー反応の準備が存在しないにもかかわらず, 反応前から陰性 ERP が生じているが, これも刺激呈示に同期する NO-GO 電位が残存したのと考えられる.

次に, Kopp, Rist, et al. (1996) が提出した, 反応抑制処理を反映する N2c がエラー反応の準備の大きさに比例して増大するという仮説が妥当

ならば、図 2-15 において、反応後 100 ms 付近を頂点にして N2c が現れたはずである。しかし、N2c は、陽性 LRP が生じた長い EMG 潜時試行の不一致困難条件を含めて、どの条件でも出現しなかった。このことから、エラー反応の準備の大きさと反応抑制処理の強さとが比例関係にあるという Kopp, Rist, et al. (1996) の仮説は支持されなかった。

次に、反応抑制処理の様式について考察する。この点を考える上では、NO-GO 電位振幅の分散分析において EMG 潜時の長短の主効果が有意であったことが重要である。この結果は、エラー反応の準備がない条件でも NO-GO 電位が生じただけではなく、エラー反応を誘発するノイズ文字を含まない一致刺激条件でも NO-GO 電位が出現し、反応時間が長くなったことを示している。これらのことから、反応抑制処理は、エラー反応の準備に対する選択的抑制ではなく、両手の反応を一時的に抑制する全抑制タイプであることが示唆される。そこで、全抑制タイプの処理が機能する事態を考えてみると、(a) エラー反応を予期する情報を刺激が含んでいると認知されたとき、(b) 中央の標的文字の同定が不十分であったとき、(c) 標的と反応との対応づけに手間取ったとき、(d) 選択した反応に確信が持てないとき、(e) 刺激が出てくるタイミングにうまく集中できなかったとき、(f) 刺激とは関係なく反応抑制処理が偶然に作動したとき、といういくつかの候補を上げることができる。(a) についてはエラー反応を予期する情報が実際には存在しなくとも、それが含まれていると誤って認知される場合もあるだろう。こういった状況では、全抑制によって反応を遅延させ、反応の正確さを増すための時間をつくるという方略が瞬時に作動すると考えることもできる。このように考えると、たとえ一致刺激が呈示されても、NO-GO 電位が反映する反応抑制処理が誤って機能する可能性があることになり、本実験の結果を矛盾なく説明できる。これらの諸点については今後も検討していく必要があるだろう。

以上までをまとめると、(a) NO-GO 電位振幅が反映する反応抑制処理は反応時間が長くなる条件ほど強く働く、(b) その反応抑制処理は運動関連領野からのフィードバック情報ではなく、刺激評価過程の分析結果

に依存して機能する，(c) 反応抑制処理の強さはエラー反応の準備の大きさに比例するという Kopp, Rist, et al. (1996) の仮説は支持できない，(d) 反応抑制処理としては少なくとも全抑制タイプが存在する（選択的抑制タイプの存在については言及できない），(e) エラー反応の準備が生じなくても反応時間は長くなる場合がある，という5点が概ね明らかになったと考えられる．5点目の(e)は，相互抑制モデルの妥当性に関係することである．実験1において，エラー反応の準備と正反応準備が相互に抑制し合うということだけでは，反応時間が不一致刺激に対して長くなることを説明する十分条件ではないことが示されている．さらに，実験5では，エラー反応の準備がなくても反応時間が長くなったことから，エラー反応の準備が反応時間の遅延をもたらす必要条件でもないことが示された．

3. 認知的葛藤の軽減が反応準備期間の反応抑制と反応選択に及ぼす影響 (実験 6)

実験 5 では、NO-GO 電位が増大するほど反応時間が長くなることが示されたが、この関係に因果関係を想定してよいかどうかをより詳しく検討するため、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激に比べて長くない条件においては、NO-GO 電位振幅が減少するという仮説が支持されるかどうかを検討する。もしこのことが支持されたならば、不一致刺激に対する反応時間の変化には、反応抑制処理の働く強さが関係していると考えられる。

そこで、実験 6 では、実験 1 におけるミックス条件とブロック化条件をもう一度設定する。不一致刺激に対する反応時間の延長は、ミックス条件では認められるがブロック化条件では認められないはずである。そして、NO-GO 電位が反映する反応抑制処理が反応時間の変化に関わっているなら、NO-GO 電位の振幅がブロック化条件で小さくなるか、その潜時が短くなることが予想される。さらに、ボタン押し反応時間、LRP、P3 に関するデータが、実験 1 の結果を繰り返し支持するかどうかも検討する。

方 法

被験者 視力 (矯正を含む) の正常な、右利きの大学生と大学院生 16 名 (18-29 歳) が実験に参加した。

刺激と装置 刺激は、5 文字の文字列で、中央の標的文字の両側にノイズ文字を付加して構成した。刺激には、標的文字がノイズ文字と同じ一致刺激 (HHHHH と SSSSS) とそれらが異なる不一致刺激 (HHSHH と SSHSS) を設けた。1 文字の視角は縦 0.6 度×横 0.5 度、文字列全体では縦 0.6 度×横 4.6 度であった (観察距離は約 80 cm)。刺激は、ディスプレイの中央に、ランダムな順序で等確率に呈示した。試行間間隔は 3 200 ms、呈示時間は 1 200 ms とした。実験中は、視角が縦 0.07 度×横 0.5 度の横棒を標的文字の下部に継続的に呈示した。装置は実験 5 と同じであった。

課題 1ブロックは80試行で構成し、4種類の刺激をすべて混ぜて呈示するミックス条件を4ブロックと、ノイズ文字が同じ2種類の刺激だけをブロック中に混ぜるブロック化条件を4ブロック作成した。その4ブロック中の2ブロックでは“HHHHH”と“HSHH”を用い、残りの2ブロックでは“SSSS”と“SSHSS”を用いて刺激系列を作成した。それら2種類の刺激系列の呈示順序については、カウンターバランスをとった。被験者には、中央の標的に対して一方の文字には左ボタンを左手人差し指で、もう一方の文字には右ボタンを右手人差し指で押すように教示した。文字と手との対応については、被験者間でカウンターバランスをとった。

手続き ミックス条件 (M) とブロック化条件 (B) の実験順序は、8名がMMBBBBMMで、残りの8名がBBMMMMBBであった。被験者は、各条件の本実験の前に48-72試行の練習を行った。休憩は、各ブロック終了後に3分程度、第4ブロック終了後に10分程度とした。

脳波とEMGの記録 実験5と同じであった。

脳波とEMGの分析 脳波の分析は、EMG潜時が平均潜時の95%信頼区間の上限を超える試行を分析から除いたこと以外、実験5と同じであった。

EMGの分析は、刺激呈示前200msから平均EMG潜時の99%信頼区間の上限までの範囲について、試行ごとに行った。まず、刺激呈示前200ms間の平均値を基準にして、データを絶対値に変換した。次に、各試行の両腕の基線部SDを算出した。反応の有無の基準値は、基線部SDの5.5倍とした(これまで、EMG振幅が基線部SDの4倍以下であることを無反応の基準としてきたが、それでは少しの体動による極めて小さな基線の変動や、意味が認められないノイズ変動も基線部SDの4-5.5倍の範囲に入ることがわかってきた。そこで、実験6では、基線部SDの5.5倍だけを基準にして反応の有無を判定しても、結果には影響しないと判断した)。刺激呈示後のEMG振幅が基準値以上であった場合は、その腕には筋反応が生じたとし、基準値に至らなかった場合は無反応とした。したがって、標的に対応する腕のEMGが基準値以上で、誤りとなる腕では

基準値未満の場合を正反応試行とした。もしボタン押しには至らないが、誤りとなる腕に基準値以上の EMG が観察されたなら、その試行は EMG エラー試行とした。また、各試行の EMG をオフラインで観察し、刺激に対する反応とは認められない EMG (例えば、体動や群化放電など) が基線部 SD の 5.5 倍以上で混入した試行は分析から除外した。EMG 潜時は、EMG が基線部 SD の 5.5 倍に最初に達したポイントの直前の谷における最小電位を示す時点とした。

刺激呈示時点を起点とした加算による s-LRP と EMG 潜時を起点とした加算による r-LRP を算出した。s-LRP は、反応準備の開始時間の条件間比較を行うために利用し、r-LRP はエラー反応の準備を示す陽性 LRP が存在するかどうかを検討するために用いた。陽性 LRP の分析方法は実験 5 と同じであった。

結 果

行動指標 ボタン押し反応時間と EMG 潜時の平均値を表 2-10 に示した。ボタン押し反応時間に関する 2 (ブロック化の有無)×2 (刺激の一致性) の分散分析の結果、ブロック化の有無 (ミックス条件>ブロック化条件, $F(1, 15)=11.28, p<.01$ 。以下、結果ではミックス条件を“M”, ブロック化条件を“B”と表記する) と刺激の一致性 (一致<不一致, $F(1, 15)=10.47, p<.01$) の主効果が有意であり、交互作用も有意であった ($F(1, 15)=9.47, p<.01$)。交互作用の下位検定では、不一致刺激に対するブロック化の有無 (M>B, $F(1, 30)=19.56$)、および、ミックス条件における刺激の一致性 (一致<不一致, $F(1, 30)=19.91$) の単純主効果が有意であった。EMG 潜時に関しても同様の分析を行った結果、ブロック化の有無 (M>B, $F(1, 15)=17.49, p<.001$) と刺激の一致性 (一致<不一致, $F(1, 15)=19.27, p<.001$) の主効果が有意であり、交互作用も有意であった ($F(1, 15)=29.64, p<.001$)。交互作用の下位検定では、一致刺激 (M>B, $F(1, 30)=4.80$) と不一致刺激 (M>B, $F(1, 30)=32.73$) に対するブロック化の有無、および、ミックス条件における刺激の一致性 (一致<不一致, $F(1, 30)=46.33$) の単純主効果が有意であった。

表 2-10 実験 6 の各条件における行動指標, s-LRP 潜時, NO-GO 電位振幅, P3 潜時に関する平均値, および, 陽性 LRP の有無

測 度	ミックス条件		ブロック化条件	
	一致	不一致	一致	不一致
ボタン押し反応時間 (ms)	425±57	441±58	416±53	417±55
EMG 潜時 (ms)	328±39	345±41	318±35	318±37
s-LRP 潜時 (ms)	220	250	175	250
r-LRP における陽性振幅 (反応前の区間, ms)	無	有 (120-80)	無	無
NO-GO 電位振幅 (μV)	—	-2.6±4.2	—	-1.8±4.6
P3 潜時 (ms)	396±26	409±27	388±16	396±21

(±SD)

EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合を表 2-11 に示した。ボタン押しエラー試行が少数であったので、それを EMG エラー試行と合計した上で、EMG 潜時と同様の分析を行った。その結果、刺激の一致性の主効果（一致<不一致, $F(1, 15)=38.46, p<.001$ ）と交互作用（ $F(1, 15)=5.25, p<.05$ ）が有意であった。交互作用の下位検定では、不一致刺激に対するブロック化の有無の単純主効果が有意傾向で（ $F(1, 30)=4.14, p=.051$ ）、ミックス条件（一致<不一致, $F(1, 30)=38.06$ ）とブロック化条件（一致<不一致, $F(1, 30)=9.88$ ）における刺激の一致性の単純主効果が有意であった。

LRP 条件別の総加算平均 r-LRP を図 2-16 に示した。反応の直前の陽性 LRP は、ミックス条件の不一致刺激に対してだけ観察された。これが統計的にも支持されるかどうかを検討するため、刺激呈示前 350 ms から 20 ms ごとの平均値に関して、基線との比較で t 値を算出し、図 2-17 に折れ線グラフにして示した。有意な陽性振幅は、ミックス条件の不一致刺激に対する LRP においてのみ 40 ms 持続していた（反応前 120-80 ms

表 2-11 実験 6 の各条件における EMG エラー試行とボタン押しエラー試行の割合の平均値

エラー試行の種類	ミックス条件		ブロック化条件	
	一致刺激	不一致刺激	一致刺激	不一致刺激
EMG エラー	4.3±3.9	7.9±6.1	5.2±4.4	7.0±4.5
ボタン押しエラー	1.2±1.7	2.3±2.4	0.6±0.6	1.1±1.5

(±SD)

間). 次に, 条件別の総加算平均 s-LRP を図 2-18 に示した. 波形の変動の影響を抑えるために 15 ms ごとの平均振幅を計算し, それと基線との比較における t 値を折れ線グラフにして図 2-19 に示した. 不一致刺激の陰性方向への立ち上がり潜時 ($t(15)=1.75$ (片側, $p<.05$) を超過した時点) は, ミックス条件とブロック化条件のいずれにおいても, 一致刺激よりも長かった (表 2-10).

NO-GO 電位 刺激呈示時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形を図 2-20 に示した. 実験 5 と同様に, P2 頂点振幅を基準にして, 総加算平均波形における NO-GO 電位頂点潜時の前後 25 ms の平均値を各被験者ごとに算出し, それを NO-GO 電位振幅とした. P2 が同定できない被験者がいたので, 総加算平均波形における P2 の頂点潜時で代用した (ミックス条件では 180 ms, ブロック化条件では 185 ms). 被験者全体の平均振幅値を表 2-10 に示した. NO-GO 電位振幅は, ミックス条件の方がブロック化条件よりも有意に大きかった ($t(15)=2.45$, $p<.05$).

EMG 潜時を起点に加算した ERP の総加算平均波形を図 2-21 に示した. ミックス条件でもブロック化条件でも, 一致刺激と不一致刺激の波形に違いが認められなかった.

P3 頂点潜時 各刺激条件の平均 P3 潜時を表 2-10 に示した. 2 (ブロック化の有無) × 2 (刺激の一致性) の分散分析の結果, ブロック化の有無 ($M>B$, $F(1, 15)=6.31$, $p<.05$) と刺激の一致性 (一致<不一致, $F(1, 15)=13.62$, $p<.05$) の主効果が有意であったが, 交互作用はなかった.

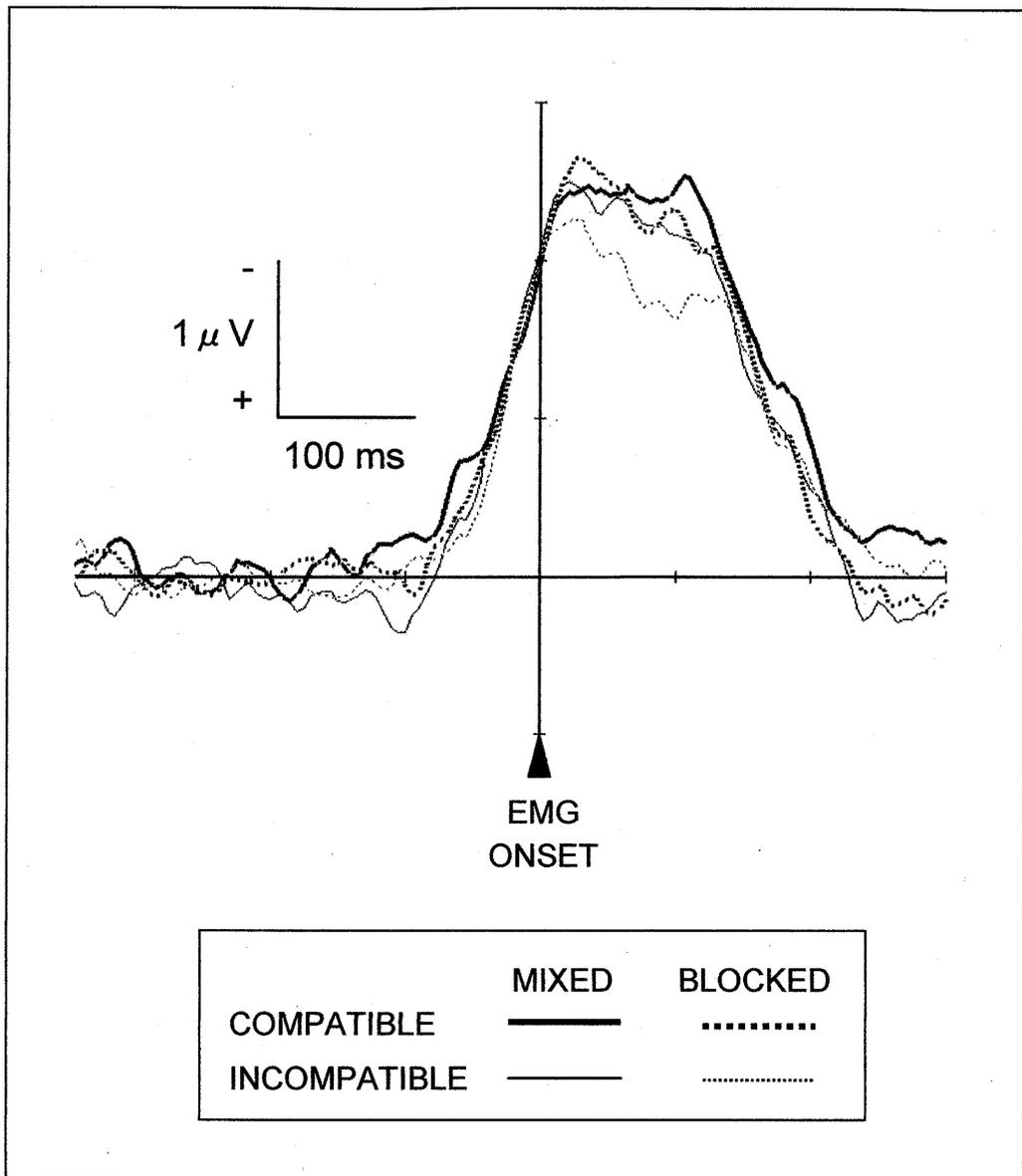


図 2-16. 実験 6 の各条件における EMG 開始時点を中心に加算した LRP の総加算平均波形.

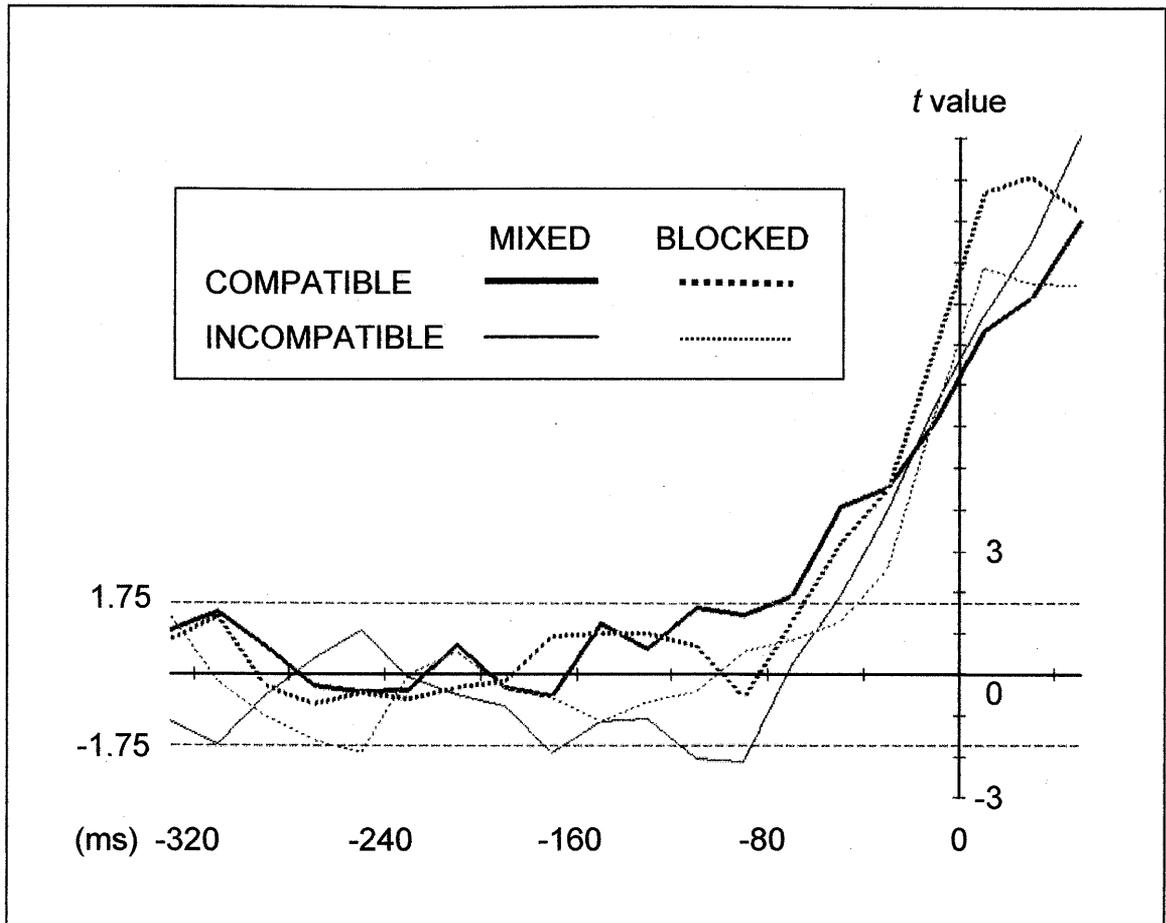


図2-17. EMG 開始時点を起点にした総加算平均 LRP における平均振幅の t 値 (実験 6). t 値は, 20 ms ごとの平均振幅値と基線とを比較して算出した. 基線の上下に示した t 値が “1.75” と “-1.75” に相当する破線は, 片側 5% ($df=15$) の水準で有意となる値を示す.

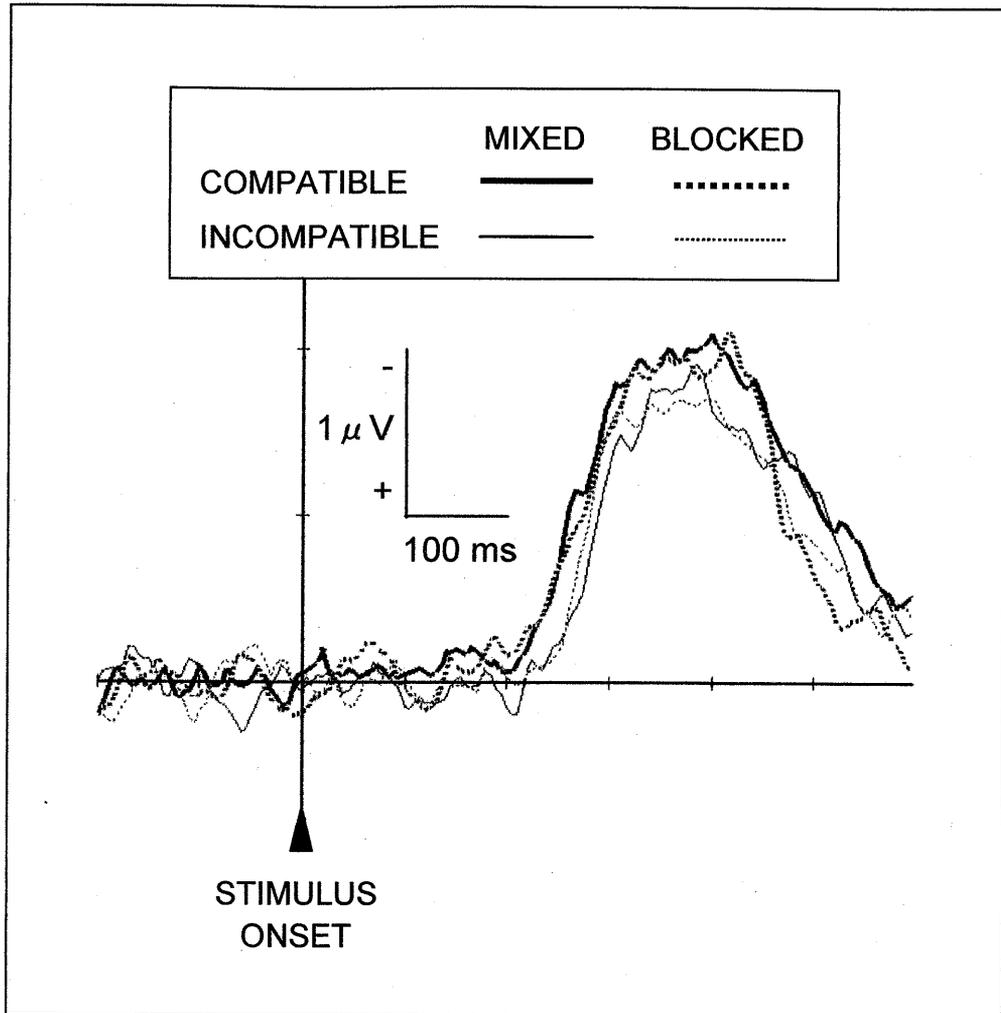


図 2-18. 実験 6 の各条件における刺激呈示時点を中心に加算した LRP の総加算平均波形.

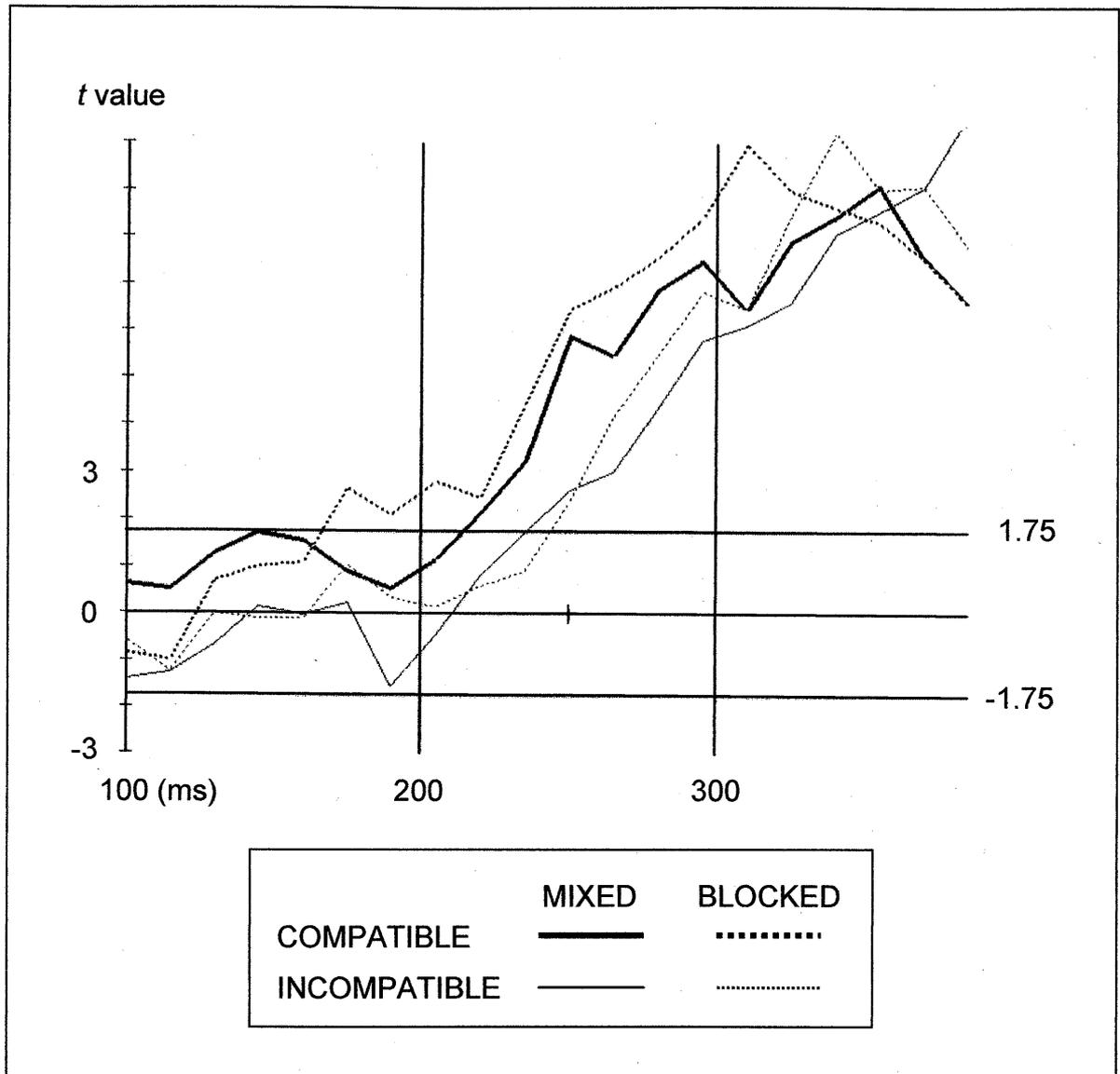


図 2-19. 刺激呈示時点を起点にした総加算平均 LRP における平均振幅の t 値 (実験 6). t 値は 15 ms ごとの平均振幅値と基線とを比較して算出した. 基線の上下に示した t 値が “1.75” と “-1.75” に相当する横線は, 片側 5% ($df=15$) の水準で有意になる値を示す.

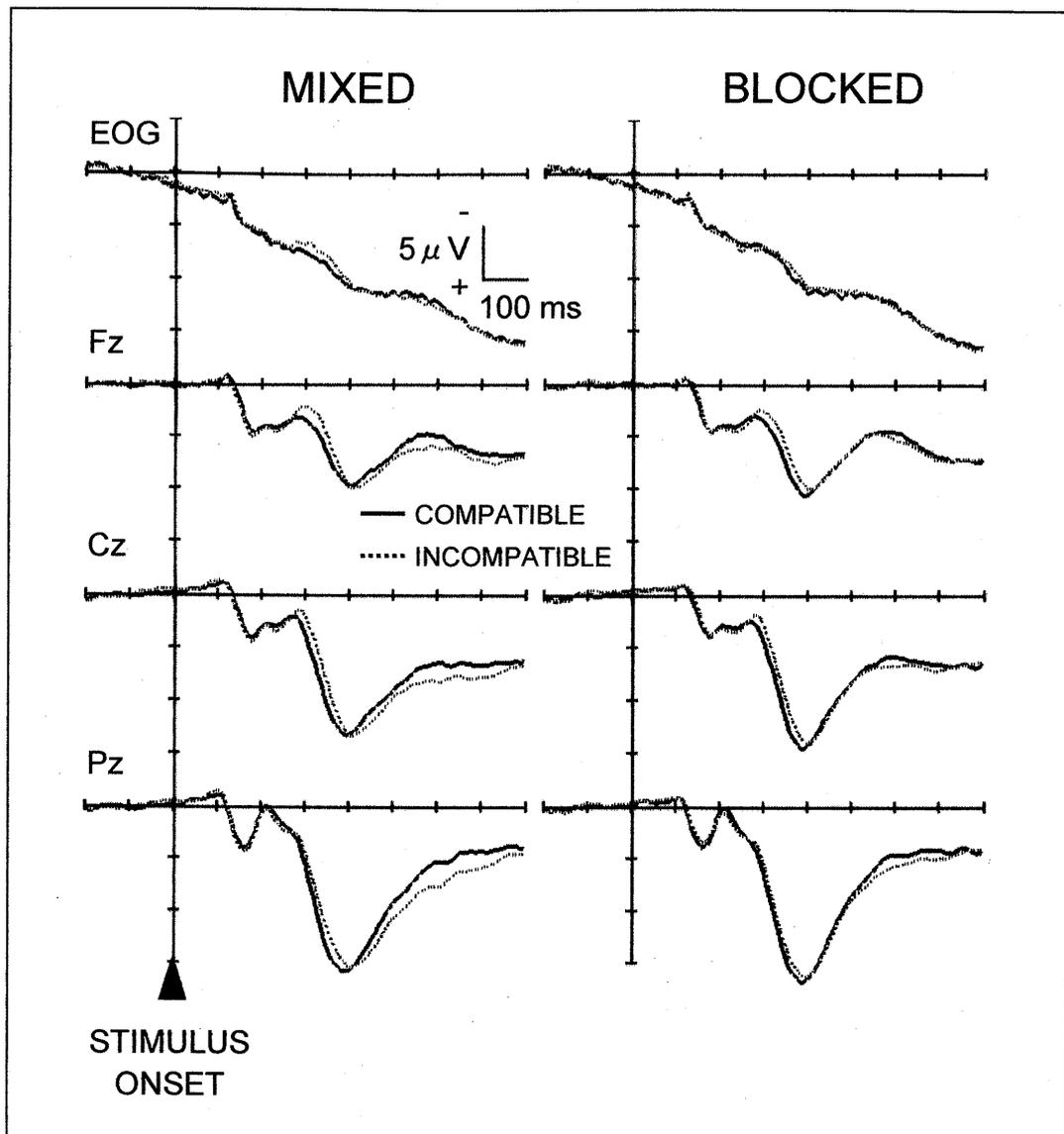


図 2-20. 実験 6 の各条件における刺激呈示時点を起点に加算した ERP の総加算平均波形.

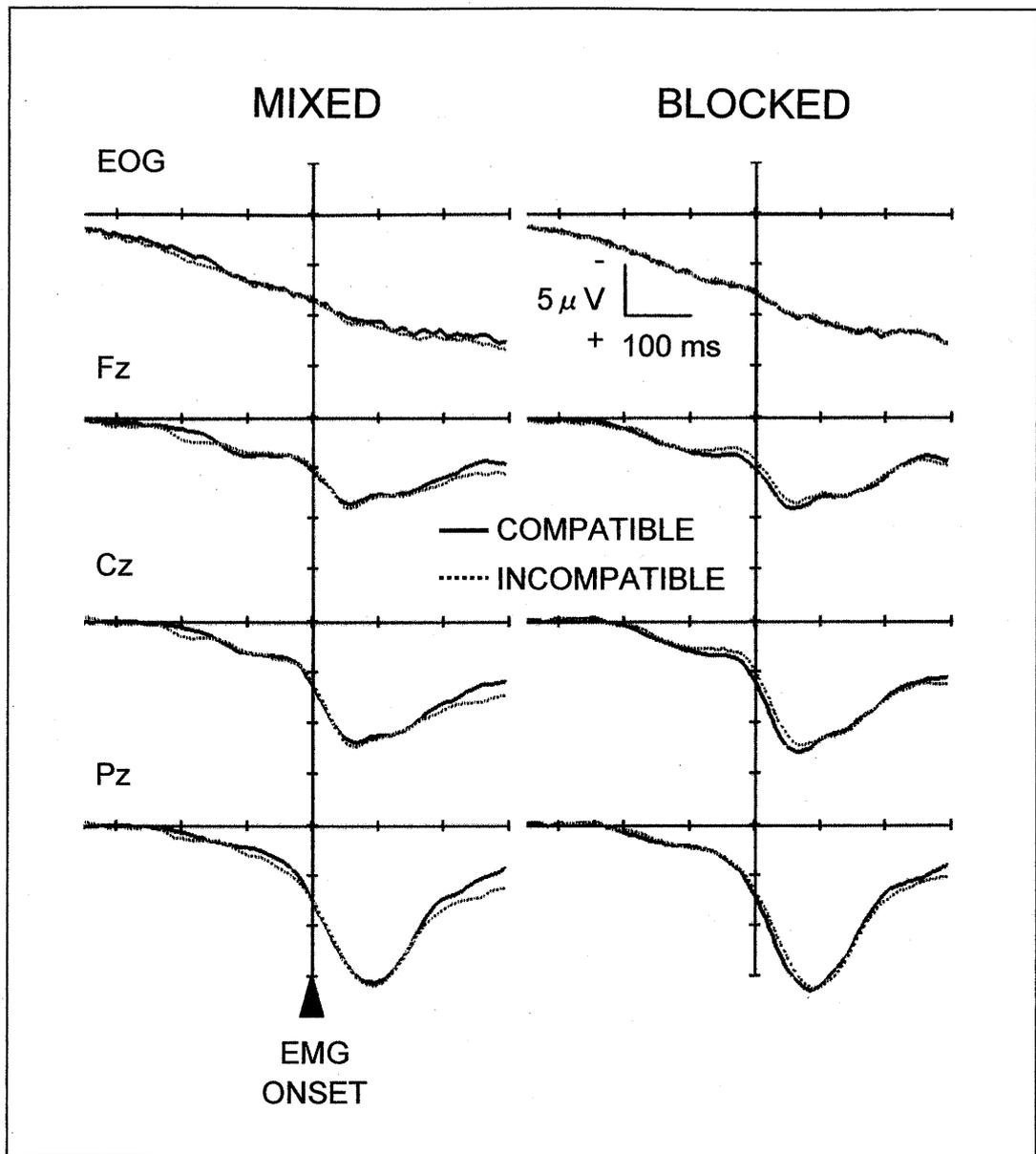


図 2-21. 実験 6 の各条件における EMG 開始時点を中心に加算した ERP の総加算平均波形.

考 察

実験 6 の目的は、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激より遅い条件と遅くない条件とを比較すると、後者における NO-GO 電位振幅は、前者のものより減少するという仮説が支持されるかどうかを検討することであった。

ボタン押し反応時間は実験 1 の結果を繰り返し支持した。不一致刺激に対するボタン押し反応時間は、ミックス条件では一致刺激よりも長かったが、ブロック化条件では同じ値であった。EMG 潜時も同様の傾向であったが、ブロック化の有無の主効果が有意であったことがボタン押し反応時間と異なっていた。ブロック化条件ではブロック全体の反応傾向がミックス条件よりも多少早くなっていたかもしれないが、ボタン押し反応時間にそのような主効果が認められないことから、基本的には Eriksen & Schultz (1979) や実験 1 の結果が繰り返し得られたものと考えられる。そして、NO-GO 電位振幅は、ミックス条件よりもブロック化条件の方が有意に小さかったことから、NO-GO 電位が反映する反応抑制処理の強さが弱くなると、反応時間が短くなるという仮説、つまり、不一致刺激に対する反応時間の変化には、チェック操作における反応抑制処理が関係しているとする仮説が支持されたと考えられる。しかし、反応時間に刺激の一致性の効果が全く認められないブロック化条件において、なお NO-GO 電位が不一致刺激に対して現れたことは、反応抑制処理の働きだけで反応時間の変化を予測できないことを示していた。

実験 1 では、P3 成分が反映する処理過程が反応時間の変化と関係するという仮説を提示した。実験 6 でも不一致刺激に対する EMG 潜時と P3 潜時の両方が、ミックス条件よりもブロック化条件において短かった。さらに、一致刺激に対しても、EMG 潜時と P3 潜時の傾向がよく対応しており、いずれにおいても、ブロック化条件の方がミックス条件よりも短かった。このように、実験 6 のデータは実験 1 から導かれた仮説を支持するので、P3 が反映する反応過程とは別の認知的処理が反応時間の変化にかかわっていることが強く示唆される。

ところで、エラー反応の準備は、ミックス条件の不一致刺激の試行で

だけ認められた (図 2-16, 図 2-17). 実験 1 では, 不一致刺激に対するエラー反応の準備がブロック化条件でも認められたので, その点が実験 6 と異なっていた. その理由として, EMG エラー試行の扱いの違いが考えられる. 本実験のブロック化条件においてエラー反応の準備が見られないのは, エラー反応の準備が生じる EMG エラー試行を加算に含めなかったことによるのであろう. しかし, 図 2-18 と図 2-19 から明らかのように, 不一致刺激に対する正反応準備の立ち上りは, ミックス条件とブロック化条件のいずれにおいても, 一致刺激よりも長く, この点は実験 1 の結果と同様であった. このように, ブロック化条件における不一致刺激の試行では, エラー反応の準備が存在しないにもかかわらず正反応準備の開始が一致刺激よりも遅れていた. この結果は, エラー反応の準備の存在が正反応準備の開始時間を遅らせる必要条件ではないという実験 5 の考察を支持しており, 相互抑制モデルでは解釈困難な結果である.

この点はチェック操作モデルによって次のように解釈できる. まず, 呈示された刺激に対して正しい反応を選択したかどうかを確認するが, それと同時に反応抑制処理が機能してエラー反応を出力しないようにする. この抑制処理は仮にエラー反応の準備がない場合でも正反応準備の開始を遅延させる. ミックス条件では確認処理が完了するまでに時間を要するので, 反応を出力する意思決定も遅延し, 反応時間が長くなる. 一方, ブロック化条件では, 不一致刺激が 1 種類しかないため, 刺激が不一致刺激であるという情報が標的文字を特定する情報と等価である. したがって, 確認処理が一致刺激と同程度の時間で完了する結果, 反応時間がほとんど一致刺激と異ならない. このように, ブロック化条件の不一致刺激に対して NO-GO 電位が出現し, 正反応準備の開始を遅らせること, および, そのような事態でも反応時間が一致刺激と同じであることの両方を説明できるのである.

この実験 6 においても 1 つ重要なことは, 実験 1 で疑問視された LRP の閾値一定説 (Gratton et al., 1988) を放棄しなければ, この実験 6 においても LRP 潜時と EMG 潜時との関係を説明できないという点である. 繰り返しになるが, ブロック化条件では, 不一致刺激に対する正反応準備

備（陰性 LRP）の開始時点が一致刺激より長かったにもかかわらず，その EMG 潜時やボタン押し反応時間は一致刺激と同じであった．このように，実験 1 の結果を繰り返し支持するデータを得たことから，相互抑制モデルだけではなく，LRP の閾値一定説も妥当でない結論できる．

反応抑制処理の様式については，ブロック化条件の不一致刺激の試行において，NO-GO 電位が出現し，LRP 潜時が長くなったにもかかわらず，EMG 潜時が一致刺激と同じであったことから，全抑制タイプの抑制処理では説明できない．むしろこのデータは，エラー反応の準備だけを標的にする抑制処理が働いたことを示していた．

最後に，反応抑制処理を駆動する情報源については，反応生起時点を超えて加算した ERP (図 2-21) に陰性 ERP が認められなかったことは，運動関連領野からのフィードバック情報ではないとした実験 5 の考察を支持する結果であった．

第3章 総合考察

第1節 本研究の成果と意義

3.1.1 独立変数の効果の所在に関する情報処理モデル

Coles et al. (1985) や Eriksen et al. (1985) は、刺激の一致性の効果（ノイズ文字の効果）が刺激の評価段階にあるのか、あるいは反応段階にあるのかという問題設定をした。そして、EMG エラーの割合にその効果が認められることから、相反する2つの反応傾向が1つの反応出力をめぐって相互に抑制し合うという仮説を提出した。これは、反応時間に変化をもたらす主要な原因を反応準備段階に求める理論であった。

(1) 相互抑制モデル

これまでは、(a) エラー反応の準備（陽性 LRP）と正反応準備（陰性 LRP）が相互に抑制し合い、正反応準備（陰性 LRP）がその閾値に到達するまでの時間（あるいはその指標としての立ち上り潜時）が長くなった場合に、(b) 反応時間が長くなったというデータが提出されてきた (Gratton et al., 1988)。そして、エラー反応の準備の存在は反応時間を長くする主要な要因と考えられた。しかし、本研究のデータ（実験1、実験5、実験6）は、相互抑制モデルに否定的であった。

まず、LRP に反映されるエラー反応の準備が反応時間の変化に常に関係するのならば、上の“(a) ならば、(b)”の対偶にあたる“(b) でないならば、(a) でない”という含意命題も支持されるはずである。しかし、実験1では、“(b) でない”という前件を与えた場合でも、エラー反応の準備を示す陽性 LRP が明瞭に出現した。これは、予測に反する結果である。したがって、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激よりも長くなることに関して、LRP に反映されるエラー反応の準備は十分条件ではないことが示された。

次に、2（短い EMG 潜時試行と長い EMG 潜時試行）×3（一致刺激、不一致容易刺激、不一致困難刺激）の計画で実験5を行った結果、エラー

反応の準備が長い EMG 潜時試行の不一致困難刺激に対してだけ出現した。もしエラー反応の準備が反応時間を長くするのに必要ならば、その他の不一致刺激の反応時間は一致刺激と同じになるはずであるが、データはこの予想を支持しなかった。したがって、エラー反応の準備は、反応時間の遅延をもたらす必要条件でもなかった。

さらに、実験 6 でも相互抑制仮説では説明に困るデータが得られた。実験 6 では、実験 1 で設定したミックス条件とブロック化条件において再度、ERP を測定した。その結果、ブロック化条件ではエラー反応の準備が認められなかったものの、正反応準備の開始時間が実験 1 と同様に遅延していた。このように、エラー反応の準備が存在しないにもかかわらず正反応準備の開始が一致刺激よりも遅れたことは、エラー反応の準備の存在が正反応準備の開始時間を長くする必要条件ではないことを示しており、それを必要条件と見なす相互抑制モデルには不利な結果であった。

以上から、エラー反応の準備を示す陽性 LRP の振幅 (Kopp, Rist, et al., 1996; Gratton et al., 1988) や持続時間 (Gratton et al., 1988) は、反応時間とある程度関係して変化する場合もあるが、それが反応時間に変化をもたらす重要な要因であるとする相互抑制モデルは、本研究結果から妥当ではないと結論できる。

(2) LRP の閾値一定説

本研究のデータは、相互抑制モデルが前提としている LRP の閾値一定説に関しても否定的であった。

実験 1 と実験 6 では、不一致刺激に対する反応時間が一致刺激とほぼ同じになるブロック化条件を設定し LRP も測定した。その結果、反応時間に遅れがない不一致刺激の試行でも LRP の立ち上り潜時が一致刺激よりも長かった。これは、LRP の閾値一定説に対して不利な結果である。閾値が一定であるという前提でブロック化条件の結果を説明するためには、LRP がその閾値に達した時点から反応時点 (ボタン押し時点、あるいは、EMG 開始時点) までの間隔が短くなったと考えなければならない。

実験 1 について言えば、ブロック化条件における一致刺激 (213 ms) と不一致刺激 (248 ms) の LRP 潜時の差は 35 ms, ボタン押し反応時間の差は 6 ms であり (その差 29 ms), 実験 6 では, LRP 潜時の差が 75 ms (一致=175 ms, 不一致=250 ms), EMG 潜時に差は無かった. 実験 6 の 75 ms の差はかなり大きい, t 値の折れ線グラフ (図 2-20) を見ると, ブロック化条件における一致刺激と不一致刺激の折れ線がだいたい一貫して 30 ms 程度ずれていた, 実験 1 と同程度の差であったと考えてもよい. ここでの問題は, LRP 波形におけるおよそ 30 ms の差が, 反応出力後の差に還元できるかどうかである.

LRP 振幅がその閾値に達してからボタン押しまでのインターバルは, EMG 潜時によってさらに 2 つに分けることができる. すなわち, LRP の閾値到達時点から EMG 開始時点までの“LRP-EMG インターバル”と EMG 開始時点からボタン押しまで“EMG-ボタン押しインターバル”である. 実験 6 では, ブロック化条件における EMG-ボタン押しインターバルの平均値は, 一致刺激 (99 ± 29 ms) と不一致刺激 (99 ± 31 ms) で同じであった. したがって, LRP の閾値一定説を保持するには, LRP 波形のおよそ 30 ms のずれを, LRP-EMG インターバルにおける条件差に還元しなければならない. この点は, 実験 1 についても同様と考えられる. ところで, Benecke, Meyer, Göhmann, & Conrad (1988) は, 人の運動野を電気刺激すると, 腕の筋反応がおよそ 20 ms 後に現れると報告している. ここで, LRP の閾値到達時点と運動野から遠心性インパルスが発射される時点と見なすなら, LRP-EMG インターバルをおよそ 20 ms と見積もることができる. この場合, そのインターバルに生じる条件差は 20 ms 未満でなければならないので, 実験 6 におけるおよそ 30 ms という差は明らかに大きすぎる. したがって, ブロック化条件では, 不一致刺激に対する反応出力時点での LRP 振幅が, 一致刺激の場合よりも小さかったと考えざるを得ない. つまり, LRP の閾値一定説は妥当でない結論される. この仮説に代わる, 反応出力時点を規定する処理過程については, 後で, 修正したチェック操作モデルを説明する際に述べる.

3.1.2 実行制御に関する情報処理モデル

認知的葛藤課題における情報処理過程は、独立変数の効果の所在という視点のほかに、合目的的行動を産出する実行制御という視点からも検討されてきた。その実行制御には、複数の種類の情報（例えば、形や色など）のどれを優先的に処理するかを決める制御 (Smid et al., 1992)、刺激情報を反応準備の形成に利用するかどうかを決める制御 (Gehring et al., 1992; Gratton et al., 1992)、あるいは、エラー反応の検出（例えば、Gehring et al., 1993）やその準備段階での抑制 (Kopp, Rist, et al., 1996) に関わる制御がある。本研究で重点的に検討したチェック操作は、エラー反応の準備段階での抑制に関わる実行制御である。

実験 1 の実験計画は、チェック操作モデルを導いた Eriksen & Schultz (1979) の研究を参考にしたので、その実験結果を相互抑制モデルが適切に予測できなかつたことは、チェック操作モデルの方がより広範なデータを説明できることを示唆していた。そして、実験 2 から実験 6 において、チェック操作を構成する反応抑制処理を重点的に検討した。実験 2 と実験 3 では、NO-GO 電位という反応抑制処理を測定できる ERP 指標について、実験 4 から実験 6 では、反応抑制処理の様式とそれを駆動する情報の起源について成果を得た。そこで、その成果を順に述べた後、チェック操作を含む情報処理過程の修正モデルを提案し、1 つの応用例としてタイピング動作における情報処理過程の説明を試みる。

(1) 反応抑制処理の ERP 指標

チェック操作は選択した反応の正誤を確認する反応選択処理とエラー反応を出力しないようにする反応抑制処理の 2 つで構成される。このうち反応抑制処理が反応時間の変化と関連しているかどうかを調べるために、その抑制処理だけを選択的に測定できる指標が必要であった。なぜなら、チェック操作に影響する独立変数を設定するだけでは、反応選択、反応抑制、あるいは両方という、反応時間に影響する可能性のある 3 つの要因を区別することが困難だからである。

そこで、GO/NO-GO 課題の NO-GO 試行で測定できる NO-GO 電位をと

りあげることにした。そして、EMGによってエラー反応を判別し、それらを除いて加算すれば、エラー関連陰性電位が NO-GO 電位に重畳する事態を防げること (実験 2)、および、エラー反応の準備が生じるような事態では NO-GO 電位振幅が増大し、潜時が長くなること (実験 3) を示した。さらに実験 4 において、NO-GO 電位と考えられる陰性電位が認知的葛藤課題においても測定できることを明らかにした。

(2) 反応抑制処理の様式

第 1 章 3 節で説明したように、チェック操作モデルは一度改定されている。Eriksen & Eriksen (1974) が提出したはじめのチェック操作モデルでは、反応抑制処理として全抑制タイプが仮定されていた。その後、Eriksen & Schultz (1979) がエラー反応の準備に対する選択的抑制を仮定することでチェック操作モデルを修正したのである。以下では、それら 2 種の反応抑制処理について考察する。

まず、2 (短い EMG 潜時試行と長い EMG 潜時試行) × 3 (一致刺激、不一致容易刺激、不一致困難刺激) の計画で行った実験 5 では、長い EMG 潜時試行の不一致困難刺激に対してだけエラー反応の準備 (陽性 LRP) が生じていたことは先に触れた通りである。そして、もし NO-GO 電位がエラー反応の準備だけを選択的に抑制するなら、NO-GO 電位の出現潜時帯の陰性電位振幅に関する分散分析は、交互作用を示すはずである。しかし、交互作用はなく、2 種の主効果が有意であった。この結果は、NO-GO 電位がエラー反応の準備がない条件でも生じるというだけでなく、エラー反応を誘発しないはずの一致刺激の試行でも NO-GO 電位が出現し得ることを示している。したがって、この場合は、両手の反応を一時的に抑制する全抑制タイプの反応抑制処理が反応を遅延させ、反応の正確さを増すための時間をつくるという方略が瞬時に作動したと考えられる。

一方、実験 6 では、全抑制タイプの処理では説明の難しいデータが得られた。ブロック化条件では、不一致刺激に対する EMG 潜時が一致刺激と同じ値になったが、その不一致刺激に対して NO-GO 電位が出現し

ていた。全抑制処理が機能したときには反応時間が必ず長くなると考えられるので、この場合はエラー反応の準備だけが選択的に抑制され、それに並行して正反応が出力されたとしか考えられない。

以上を総合すると、チェック操作を構成する反応抑制処理には、実験 5 から示唆される全抑制タイプと、実験 6 における選択的抑制タイプの 2 種類が存在すると考えることが自然である。そして、ブロック化条件のように、刺激が含むノイズ文字があらかじめわかっている、ノイズ由来のエラー反応が完全に予測できる状況では、選択的抑制タイプの処理が働き、ノイズ文字があらかじめ特定できない状況（実験 5 やミックス条件）では、全抑制タイプの処理によって、たとえ反応時間が長くなっても、エラー反応を避ける方略を選択していると考えられる。ただし、実験 6 の NO-GO 電位は実験 5 などと比べるとかなり小さかったので、実験 6 の結果の信頼性を今後も検討し、選択的抑制タイプの存在を確認することが必要である。

(3) 反応抑制処理を駆動する情報の起源

反応抑制処理を促す情報の起源としては、大きく 2 つ考えられる。1 つは運動関連領域からのフィードバックである。その情報に基いて運動野におけるエラー反応の準備の有無を判定するとすれば、反応抑制処理を反映する ERP は、エラー反応の準備（陽性 LRP）が現れやすい、反応生起時点を起点に加算した ERP において明瞭に出現するはずである。しかし、陽性 LRP が出現した実験 4 の不一致刺激に対しても（図 2-12）、あるいは、実験 5 の長い EMG 潜時の不一致刺激（図 2-15）や実験 6 のミックス条件における不一致刺激（図 2-21）に対しても、そのような反応抑制処理を反映する陰性電位は認められなかった。したがって、Eriksen らの認知的葛藤課題において機能している反応抑制処理は、運動関連領域からのフィードバック情報には基いていないと考えられる。

他の情報源としては、刺激の評価過程を考えることができる。たとえば、その評価過程において、ノイズ文字が標的とは不一致であるという情報を得たなら、エラー反応の危険を予測して反応抑制処理を駆動する。

もしそうならば、その反応抑制処理を反映する ERP は、刺激呈示時点に相関して出現するので、その呈示時点を開始に加算した ERP において明瞭に現れるはずである。そして、本研究で得られた NO-GO 電位と考えられる陰性電位は、すべて刺激呈示時点を開始とする ERP において出現していた。したがって、反応抑制処理を駆動する情報は刺激の評価過程から得られるという仮説が有望と考えられる。

(4) Eriksen ら (1974, 1979) のチェック操作モデルの修正

本研究に基いて構成したチェック操作を含む情報処理過程を図 3-1 に示した。図 3-1 は、第 1 章で示した図 1-16 とほぼ同じである。異なる点は、(a) 反応抑制処理に関しては、全抑制タイプと選択的抑制タイプのどちらかが課題状況に応じて機能すること、(b) LRP に閾値を仮定せず、反応の正誤の確認（反応選択処理）が完了すれば、反応が出力されること、(c) 反応準備過程からチェック操作へのフィードバックを仮定しないことの 3 点である。(c) については、先に反応抑制処理を駆動する情報の起源を考察した際に述べたので、ここでは繰り返さない。

1 点目の全抑制タイプと選択的抑制タイプの使い分けについて述べる。選択的抑制タイプは、ブロック化条件（実験 1 と実験 6）のように左右どちらのエラー反応が生じやすいかが、刺激呈示以前に予測できる事態において機能する。全抑制タイプの方は、ミックス条件（実験 1 と実験 6）や実験 4 におけるように、反応する手の選択エラーが、予測できない状況で機能する。あるいは、実験 5 で考察したように、(a) エラー反応を予期する情報を刺激が含んでいると認知されたとき、(b) 中央の標的文字の同定が不十分であったとき、(c) 標的と反応との対応づけに手間取ったとき、(d) 選択した反応に確信が持てないとき、(e) 刺激の出現タイミングにうまく集中できなかったとき、(f) 刺激とは関係なく反応抑制処理が偶然に作動したときというようないくつかの状況では、刺激の一致性とは関係なく、全抑制によって反応を遅延させ、反応の正確さを増すための時間を確保する方略が瞬時に作動する。

次に、反応の出力がいつなされるのかという点であるが、LRP の閾値

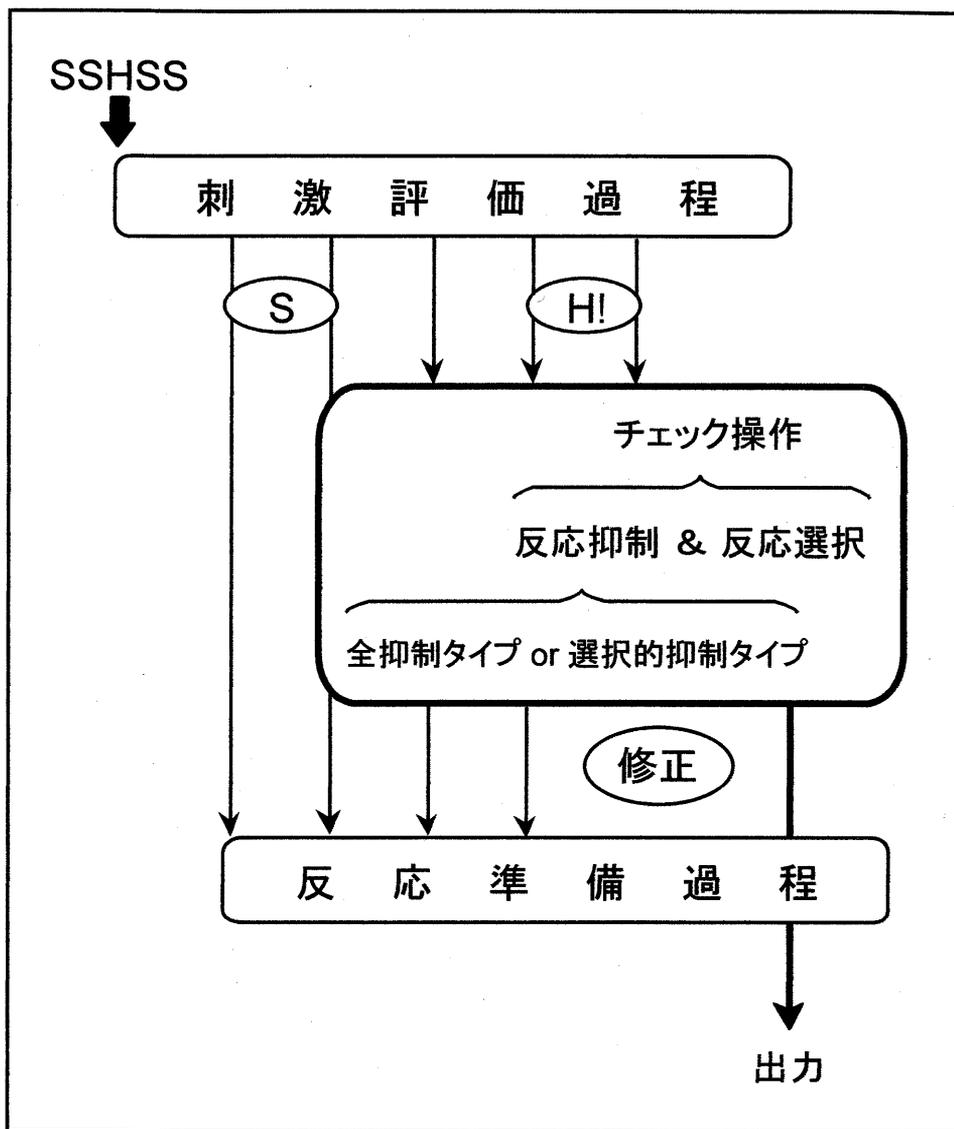


図 3-1. 実験結果に基づいて修正したチェック操作モデル.

一定説が支持されなかったので、ここでは、選択した反応の正誤を確認する処理（反応選択処理）が完了した直後に反応がなされると考える。さらに実験 1、および、実験 4-6 において、P3 潜時が反応時間の傾向とよく対応して変化したことは、反応過程とは別の何らかの認知的処理が反応時間の変化に関与することを強く示唆している。したがって、チェック操作モデルにおいては、P3 潜時が関与する認知的処理は反応選択が完了するまでの時間と関係すると仮定できる。

3.1.3 タイピング動作におけるエラー行為を未然に防ぐ制御過程

タイピング動作を 1 つの応用例として、エラー行為を未然に防ぐ制御過程を考えてみる。ただし、本研究で用いた課題が左右の人差し指だけを用いる極めて単純な課題であったので、以下の考察は、本研究で得た知見から帰納的に推察できる範囲を超える危険があることを承知した上で、1 つの提案として行う。

図 1-3 のような、ある文章をタイプで清書する事態では、次のように考えられるだろう。仮に清書する文章が自分で考えて作り上げたものならば、文章を見ながらタイプするときの記憶範囲が広く、文章表現の癖も自分自身のものであるので、動作系列の準備を時間的に余裕を持って行える。そのような事態では、苦手なキー打ち順序でも、エラーを具体的に予測しやすいので、選択的抑制処理が機能する頻度が多くなるだろう。また、キー打ちの練習などで、ある一定の動作系列を学習しているときは、よく生じるエラーを意識できる状態でもある。そのように十分生じ得るエラーをあらかじめ把握している事態においても、選択的抑制タイプの処理が機能し、学習に貢献していると考えられる。

一方、誰か他の人の文章をタイプする事態を考えてみる。その場合は、自分の文章をタイプするときよりも記憶範囲が狭くなり、表現上の癖も異なるために、動作系列の準備に時間を要する。また、具体的なエラー行為の予測も困難になるはずである。そのような事態では、全抑制タイプの反応抑制処理を機能させて、エラー打ちを少なくする方略が選択されると予想できる。そうすると、動作系列をより確実にすることに、よ

り多くの時間をあてることができる。あるいは、行間に下線や書き込みなどの追加情報が文章の読みを妨げるような場合、たとえ自分の文章であっても全抑制タイプの処理に切り替えてエラーを回避すると考えられる。また、目が疲れて文字が見えにくいとき、まれにしか使わないキーに指を移動させるとき、選択したキーに確信が持てないとき、キー打ちのリズムが上手くとれなかったときなどにも、全抑制タイプの反応抑制処理によって、エラー打ちが瞬時に回避されると考えられる。

以上のようなエラー打ちの回避においては、エラー行為が実際に生じたこと、あるいは、これから生じる可能性のあることを、何らかのルートで知るはずである。例えば、視覚や触覚などの外受容感覚、筋肉や関節部における自己受容感覚、あるいは、大脳の運動野から末梢へ発射される遠心性指令のコピーがある。これらは運動を実際に起こした時点から後に得られる情報である。さらに、エラーの予期情報も存在する。それは基本的には経験によって学ばれるものである。本研究に参加した被験者も、練習や本実験を通じて、標的に付加されたノイズ文字がエラー反応を誘発することを学習したはずである。そのような学習によって、あるエラー行為が具体的に特定できる場合には選択的抑制タイプを用い、具体的に特定できない場合には、全抑制タイプを用いると考えることもできる。複雑なタイピング動作においても、実際のエラー行為のフィードバック情報だけではなく、経験から学んだエラー行為の様々な予期情報を利用しながら、選択的抑制処理と全抑制処理を使い分けていると考えられる。

第2節 今後の課題

本研究では、認知的葛藤課題における情報処理を、チェック操作モデルによってある程度説明できることを示した。しかし、チェック操作を構成する反応抑制と反応選択のうち、まだ後者の検討が十分でない。反応選択処理は選択した反応の確認を行うが、それが完了するまでに要する時間がP3潜時と関係する可能性を示した。したがって、P3潜時を反応選択処理の指標として用いることができるかどうかを検討することが、

今後の課題の1つである。

反応抑制処理の指標として用いた NO-GO 電位については、実験 4 から実験 6 で検討したように反応生起時点を起点に加算した ERP には出現しなかった。しかし、Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c は、類似した認知的葛藤課題 (第 1 章第 3 節参照) において、反応時点を起点にした ERP で明瞭に出現している。この違いの原因を検討する必要がある。Kopp, Rist, et al. (1996) の実験ではボタン押しの強さを反応の指標としたので、一部の EMG エラー試行は正反応試行として分類されたと考えられる。そうすると、Kopp, Rist, et al. (1996) の N2c は、エラー関連陰性電位そのものである可能性がある。彼らの実験ではエラー反応がほとんど生じていない試行でも陰性電位の存在を認めたが、それは刺激呈示時点と相関して現れる NO-GO 電位が反応時点を起点にした ERP にも残存していたのかもしれない (この可能性については、実験 5 の図 2-15 における短い EMG 潜時試行の不一致刺激の ERP を参照)。

次に、Dempster (1992) や土田 (1997, 1998) が指摘するように、反応抑制機能も加齢によって変化するので、反応抑制処理の加齢による変化に関する応用的課題に触れておきたい。全抑制タイプと選択的抑制タイプの反応抑制処理は、運動スキルの獲得に伴い、前者から後者へ移行すると予想される。はじめは運動を全体的にストップしながらかある種の動作系列を学習するが、学習が進むと、エラー反応を抑制しながら正しい反応を導けるようになると考えられる。一方、エラー反応を防ぐ実行制御の観点からは、選択的抑制タイプから全抑制タイプへの瞬時の移行が重要である。選択抑制によるスムーズな動作系列を急に止めて障害物への追突を避けるような場合である。おそらく高齢になるほど困難になるので、全抑制処理への瞬時の移行能力における加齢による変化を調べることは重要であろう。

ところで、反応選択における確認作業には、刺激と反応とを対応づけた記憶が必要なので、確認作業の早さと正確さがワーキングメモリの容量と関係するかもしれない。ワーキングメモリ容量が小さい人については、エラー反応を防ぐという観点から、反応抑制処理の適切な利用方略

を学習することが有効と考えられる。そのようなことが問題になる対象は、交通事故によって脳に損傷を受けた人や知的障害を持つ人や子どもである。例えば、注意欠陥多動障害児における反応抑制処理に焦点を当てた研究としては、Barkley (1997), Jennings, van der Molen, Pelham, Debski, & Hoza (1997), Logan, Schachar, & Tannock (1997) がある。脳損傷者に関しては、Hart, Giovannetti, Montgomery, & Schwartz (1998) が述べているように、これらの対象者についてまず問題になるのは、抑制すべき自分のエラー反応に気づいていない場合があるという点である。同様の問題は障害児・者についても経験的に当てはまる。したがって、(a) 自分自身のエラー反応を認知する能力に問題があるかどうかを調べ、(b) 問題があれば、エラー反応の認知を促す訓練を行い、(c) その上でエラー反応を予期しながら必要に応じて選択的抑制タイプや全抑制タイプの反応抑制処理を使い分ける訓練をすることが有効と考えられる。

(a) のエラー反応を認知する能力を調べるツールとしては、エラー関連陰性電位 (ERN) が注目される。これを測定する課題としては、本研究の実験 2 で行った GO/NO-GO 課題が比較的単純で利用しやすいだろう。ERN は 10 回から 20 回程度のエラー試行の加算でも肉眼で十分に識別できる。場合によっては、数回の加算でも識別可能である。さらに、この ERN の顕著な特性として、その振幅がエラー反応の気づきのレベル (意識化のレベル) と正の相関を示す (Scheffers & Coles, 1996) ことがあげられる。したがって、エラー反応への気づきを促す訓練の成果は、ERN 振幅を指標として測定できるかもしれない。特に、言語能力に問題がある人が対象の場合には、有用な測定ツールになる可能性があるため、検討が急がれる。

次に、エラー反応の認知を促す訓練方法であるが、これはまだ検討の進んでいない領域と思われる。しかし、課題の遂行にともなう“結果の知識” (knowledge of results) をどのような手続きでフィードバックするのかを検討した研究 (例えば、七木田, 1998; Schmidt, 1991) から、有効な手がかりが得られるであろう。ここでは詳細な検討は加えないが、“エラー反応の認知を促す”という観点から、結果の知識のフィードバック

方法を整理する必要がある。

最後に、エラー反応を予期しながら必要に応じて選択的抑制タイプや全抑制タイプの反応抑制処理を使い分ける訓練についてであるが、これも、結果の知識を与える様々な手続きを整理して、今後の展望を得ることが先決と思われる。

以上から示唆されるように、高齢者や障害児・者においては、反応抑制処理が生活の質を高めるための重要な要素であることがわかる。障害物への追突を避けることは、高齢者がケガをしないで健康に過ごすために必須である。障害児・者にとっては、手先を使った製作の仕事などにおいて、材料に傷をつくらないように反応抑制処理を活用した運動スキルを身につけることが望ましい。本研究では、エラー反応を未然に防ぐ情報処理過程を検討するために Eriksen らの認知的葛藤課題を利用したが、チェック操作モデルを、認知的葛藤課題以外の両手を使い分ける様々な状況での1つの作業モデルとみなし、上に指摘したような応用的問題の検討に適用してみることも有用であろう。

引用文献

- Abbs, J. H. 1990 Functional contributions of rapid and automatic sensory-based adjustments to motor output. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance X III*. Hillsdale: Erlbaum. Pp. 627-653.
- Adams, J. A. 1971 A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, **3**, 111-150.
- 甘利俊一・酒田英夫 1994 脳とニューラルネット 朝倉書店.
- Angel, R. W. 1976 Efference copy in the control of movement. *Neurology*, **26**, 1164-1168.
- Angel, R. W., Garland, H., & Fischler, M. 1971 Tracking errors amended without visual feedback. *Journal of Experimental Psychology*, **89**, 422-424.
- Arbib, M. A. 1969 Memory limitations of stimulus-response models. *Psychological Review*, **76**, 507-510.
- Arbib, M. A. 1985 Schemas for the temporal organization of behavior. *Human Neurobiology*, **4**, 63-72.
- Arezzo, J., & Vaughan, H. G., Jr. 1975 Cortical potential associated with voluntary movements in the monkey. *Brain Research*, **88**, 99-104.
- Badgaiyan, R. D., & Posner, M. I. 1998 Mapping the cingulate cortex in response selection and monitoring. *Neuroimage*, **7**, 255-260.
- Banquet, J. P., Renault, B., & Lesèvre, N. 1981 Effect of task and stimulus probability on evoked potentials. *Biological Psychology*, **13**, 203-214.
- Barkley, R. A. 1997 Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, **121**, 65-94.
- Bechtereva, N. P., Medvedev, S. V., & Abdullaev, Y. G. 1991 Neuronal correlates of mental error detection in the human cortex. *Biomedical Science*, **2**, 301-305.
- Benecke, R., Meyer, B.-U., Göhmann, M., & Conrad, B. 1988 Analysis of muscle responses elicited by transcranial stimulation of the cortico-spinal

- system in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **69**, 412-422.
- Bötzel, K., Plendl, H., Paulus, W., & Scherg, M. 1993
Bereitschaftspotential: Is there a contribution of the supplementary motor area? *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **89**, 187-196.
- Brooks, V. B. 1979 Motor programs revisited. In R. E. Talbott & D. R. Humphrey (Eds.), *Posture and Movement*. New York: Raven Press. Pp. 13-49.
- Brooks, V. B. 1986 *The neural basis of motor control*. New York: Oxford University Press.
- Bruce, D. 1994 Lashley and the problem of serial order. *American Psychologist*, **49**, 93-103.
- Casey, B. J., Trainor, R. J., Orendi, J. L., Schubert, A. B., Nystrom, L. E., Giedd, J. N., Castellanos, F. X., Haxby, J. V., Noll, D. C., Cohen, J. D., Forman, S. D., Dahl, R. E., & Rapoport, J. L. 1997 A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a Go-No-Go task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **9**, 835-847.
- Coles, M. G. H. 1989 Modern mind-brain reading: Psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology*, **26**, 251-269.
- Coles, M. G. H., Gehring, W. J., Gratton, G., & Donchin, E. 1992
Response activation and verification: A psychophysiological analysis. In G. E. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior II*. Pp. 779-792.
- Coles, M. G. H., & Gratton, G. 1986 Cognitive psychophysiology and the study of stages and processes. In G. R. J. Hockey, A. W. Gaillard, & M. G. H. Coles (Eds.), *Energetics and Human information processing*. Netherlands: Nijhoff. Pp. 409-424.
- 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., Gratton, G., & Donchin, E. 1988 Detection of early communication: Using measures of movement-related potentials to illuminate human information processing. *Biological Psychology*, **26**, 69-89.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. 1995 Event-related brain potentials: An introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition*. New York: Oxford University Press. Pp. 1-26.
- Coles, M. G. H., Scheffers, M. K., & Fournier, L. 1995 Where did you go wrong? Errors, partial errors, and the nature of human information processing. *Acta Psychologica*, **90**, 129-144.
- Coles, M. G. H., Smid, H. G. O. M., Scheffers, M. K., & Otten, L. J. 1995 Mental chronometry and the study of human information processing. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind*. New York: Oxford. Pp. 86-131.
- Cooke, J. D., & Diggles, V. A. 1984 Rapid error correction during human arm movements: Evidence for central monitoring. *Journal of Motor Behavior*, **16**, 348-363.
- Deecke, L., Grözinger, B., & Kornhuber, H. H. 1976 Voluntary finger movement in man: Cerebral potentials and theory. *Biological Cybernetics*, **23**, 99-119.
- Deecke, L., & Kornhuber, H. H. 1978 An electrical sign of participation of the mesial 'supplementary' motor cortex in human voluntary finger movement. *Brain Research*, **159**, 473-476.
- Deecke, L., Scheid, P., & Kornhuber, H. H. 1969 Distribution of readiness potential, pre-motion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements. *Experimental Brain Research*, **7**, 158-168.
- Dehaene, S. 1996 The organization of brain activations in number

- comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **8**, 47-68.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. 1994 Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, **5**, 303-305.
- De Jong, R., Coles, M. G. H., & Logan, D. 1995 Strategies and mechanisms in nonselective and selective inhibitory motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 498-511.
- De Jong, R., Coles, M. G. H., Logan, D., & Gratton, G. 1990 In search of the point of no return: The control of response processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 164-182.
- De Jong, R., Wierda, M., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1988 Use of partial information in response processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 682-692.
- Dempster, F. N. 1992 The rise and fall of the inhibitory mechanism: Toward a unified theory of cognitive development and aging. *Developmental Review*, **12**, 45-75.
- Diamond, A., Werker, J. F., & Lalonde, C. 1994 Toward understanding commonalities in the development of object search, detour navigation, categorization, and speech perception. In G. Dawson & K. W. Fischer (Eds.), *Human Behavior and the Developing Brain*. New York: The Guilford Press. Pp. 380-426.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. 1988 Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Science*, **11**, 357-374.
- Donders, F. C. 1969 On the speed of mental processes In W. G. Koster (Ed. and Trans.), *Attention and performance II* (pp. 412-431). Amsterdam: North-Holland. (Original work published 1868.)

- Eimer, M. 1993 Effects of attention and stimulus probability on ERPs in a go/nogo task. *Biological Psychology*, **35**, 123-138.
- 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.
- 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., & Schultz, D. W. 1979 Information processing in visual search: A continuous flow conception and experimental results. *Perception & Psychophysics*, **25**, 249-263.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, J. 1990 Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard, & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological brain research*. Elsevier Amsterdam. Pp. 192-195.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1991 Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **78**, 447-455.
- Falkenstein, M., Koshlykova, N. A., Kiroj, V. N., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. 1995 Late ERP components in visual and auditory Go/Nogo tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **96**, 36-43.
- 船橋新太郎 1993 ワーキング・メモリー 神経研究の進歩, **37**, 44-55.
- 船橋新太郎 1994 前頭連合野の機能の発達—遅延反応を指標にして 久保田競 (編) 発達と脳のメカニズム ミネルヴァ書房 Pp. 53-78.
- 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 (supplement).
- 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. J., Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. 1992
Probability effects on stimulus evaluation and response processes. *Journal of Experimental Psychology*, **18**, 198-216.
- 玄番央恵 1993 小脳の可塑性 *Clinical Neuroscience*, **11**, 29-31.
- 玄番央恵 1994a NO-GO potential (I) 臨床脳波, **36**, 746-753.
- 玄番央恵 1994b NO-GO potential (II) 臨床脳波, **36**, 821-827.
- 玄番央恵 1994c 運動学習と中枢のメカニズム 久保田競 (編) 発達と脳
のメカニズム ミネルヴァ書房 Pp. 99-119.
- Gemba, H. 1993 Changes in cortical field potentials during learning
processes of go/no-go reaction time hand movement with tone
discrimination in the monkey. *Neuroscience Letters*, **159**, 21-24.
- Gemba, H., & Sasaki, K. 1984 Distribution of potentials preceding
visually initiated and self-paced hand movements in various cortical areas
of the monkey. *Brain Research*, **306**, 207-214.
- Gemba, H., & Sasaki, K. 1988 Changes in cortical field potentials
associated with learning processes of audio-initiated hand movements in
monkeys. *Experimental Brain Research*, **70**, 43-49.
- 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. 1990 Potential related to no-go reaction in
go/no-go hand movement with discrimination between tone stimuli of
different frequencies in the monkey. *Brain Research*, **537**, 340-344.
- 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.
- Gemba, H., Sasaki, K., & Hashimoto, S. 1980 Distribution of
premovement slow cortical potentials associated with self-paced hand
movements in monkeys. *Neuroscience Letters*, **20**, 159-163.

- Gemba, H., Sasaki, K., & Tsujimoto, T. 1990 Cortical field potentials associated with hand movements triggered by warning and imperative stimuli in the monkey. *Neuroscience Letters*, **113**, 275-280.
- Gilden, L., Vaughan, H. G., Jr., & Costa, L. D. 1966 Summated human eeg potentials with voluntary movement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **20**, 433-438.
- Goldberg, G. 1985 Supplementary motor area structure and function: Review and hypotheses. *The Behavioral and Brain Sciences*, **8**, 567-615.
- Goldberg, G., Kwan, H. C., Borrett, D., & Murphy, J. T. 1984 Topography of the movement-associated scalp potential (MASP) suggests initiation of spontaneous movement by the supplementary motor area. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **65**, 662-663.
- Goldman-Rakic, P. S. 1998 The prefrontal landscape: Implications of functional architecture for understanding human mentation and the central executive. In A. C. Roberts, T. W. Robbins, & L. Weiskrantz (Eds.), *The prefrontal cortex: Executive and cognitive functions*. New York: Oxford University Press. Pp. 87-102.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. 1992 Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, **121**, 480-506.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., Sirevaag, E. J., Eriksen, C. W., & Donchin, E. 1988 Pre- and poststimulus activation of response channels: A psychophysiological analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 331-344.
- Grice, G. R., Nullmeyer, R., & Spiker, V. A. 1982 Human reaction times: Toward a general theory. *Journal of Experimental Psychology: General*, **111**, 135-153.
- Hackley, S. A., & Miller, J. 1995 Response complexity and precue interval effects on the lateralized readiness potential. *Psychophysiology*, **32**, 230-241.

- Hart, T., Giovannetti, T., Montgomery, M. W., & Schwartz, M. F. 1998
Awareness of errors in naturalistic action after traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, **13**, 16-28.
- Hashimoto, S., Gemba, H., & Sasaki, K. 1979 Analysis of slow cortical potentials preceding self-paced hand movements in the monkey. *Experimental Neurology*, **65**, 218-229.
- Hashimoto, S., Gemba, H., & Sasaki, K. 1980 Premovement slow cortical potentials and required muscle force in self-paced hand movements in the monkey. *Brain Research*, **197**, 415-423.
- Hashimoto, S., Gemba, H., & Sasaki, K. 1981 Distribution of slow cortical potentials preceding self-paced hand and hind limb movements in the premotor and motor areas of monkeys, *Brain Research*, **224**, 247-259.
- Higgins, J. R., & Angel, R. W. 1970 Correction of tracking errors without sensory feedback. *Journal of Experimental Psychology*, **84**, 412-416.
- Hillyard, S. A., Courchesne, E., Krausz, H. I., & Picton, T. W. 1976 Scalp topography of the P3 wave in different auditory decision tasks. In W. C. McCallum & J. R. Knott (Eds.), *The responsive brain*. Bristol: Wright. Pp. 81-87.
- Hillyard, S. A., & Kutas, M. 1983 Electrophysiology of cognitive processing. *Annual Review of Psychology*, **34**, 33-61.
- Hodges, P. W., & Bui, B. H. 1996 A comparison of computer-based methods for the determination of onset of muscle contraction using electromyography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **101**, 511-519.
- 岩木信喜 1997 認知的葛藤課題における意志決定過程と運動抑制に関する精神生理学的研究 広島大学大学院教育学研究科修士論文 (未公開).
- Jeannerod, M. 1991 The interaction of visual and proprioceptive cues in controlling reaching movements. In D. R. Humphrey and H. -J. Freund (Eds.), *Motor control: Concepts and issues*. New York: Wiley. Pp. 277-291.

- Jeannerod, M. 1997 *The cognitive neuroscience of action*. UK: Blackwell.
- Jennings, J. R., van der Molen, M. W., Pelham, W., Debski, K. B., & Hoza, B. 1997 Inhibition in boys with attention deficit hyperactivity disorder as indexed by heart rate change. *Developmental Psychology*, **33**, 308-318.
- 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.
- Jones, B. 1974a Is proprioception important for skilled performance? *Journal of Motor Behavior*, **6**, 33-45.
- Jones, B. 1974b Role of central monitoring of efference in short-term memory for movements. *Journal of Experimental Psychology*, **102**, 37-43.
- 海保博之・田辺文也 1996 ヒューマン・エラー—誤りからみる人と社会の深層 新曜社.
- Karlin, L., Martz, M. J., & Mordkoff, A. M. 1970 Motor performance and sensory-evoked potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **28**, 307-313.
- Keele, S. W. 1968 Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, **70**, 387-403.
- Keele, S. W., Cohen, A., & Ivry, R. 1990 Motor programs: Concepts and issues. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII* Hillsdale: Erlbaum. Pp. 77-110.
- Kelso, J. A. S. 1982 The process approach to understanding human motor behavior: An introduction. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior: An introduction*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates. Pp. 3-19.
- Kok, A. 1986 Effects of degradation of visual stimuli on components of the event-related potential (ERP) in go/nogo reaction tasks. *Biological Psychology*, **23**, 21-38.
- 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., & Mattler, U. 1996 N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, **33**, 282-294.
- 久保田競 1985 前頭葉の働きと間違いの認識 伊藤正男・塚原仲晃 (編) 脳科学の展開 上 平凡社 Pp. 131-143.
- 久保田競 1993 前頭葉の行動制御 神経研究の進歩, **37**, 26-43.
- Kubota, K., & Komatsu, H. 1985 Neuron activities of monkey prefrontal cortex during the learning of visual discrimination tasks with Go/No-go performance. *Neuroscience Research*, **3**, 106-129.
- Kutas, M., & Donchin, E. 1974 Studies of squeezing: Handedness, responding hand, response force, and asymmetry of readiness potential. *Science*, **186**, 545-548.
- Kutas, M., & Donchin, E. 1980 Preparation to respond as manifested by movement-related brain potentials. *Brain Research*, **202**, 95-115.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. 1977 Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, **197**, 792-795.
- Lang, W., Cheyne, D., Kristeva, R., Beisteiner, R., Lindinger, G., & Deecke, L. 1991 Three-dimensional localisation of SMA activity preceding voluntary movement. *Experimental Brain Research*, **87**, 688-695.
- Lashley, K. S. 1951 The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior: The Hixon Symposium*. New York: Wiley. Pp. 112-146.
- Levelt, W. J. M. 1983 Monitoring and self-repair in speech. *Cognition*, **14**, 41-104.
- Levelt, W. J. M. 1989 *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Logan, G. D. 1985 Executive control of thought and action. *Acta psychologica*, **60**, 193-210.
- Logan, G. D., Schachar, R. J., & Tannock, R. 1997 Impulsivity and

- inhibitory control. *Psychological Science*, **8**, 60-64.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., & Donchin, E. 1984 On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, **21**, 171-186.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1997 引き金の牽引運動時におけるパラメータ修正過程が準備電位に及ぼす効果. 脳波と筋電図, **25**, 18-24.
- McCarthy, G., & Donchin, E. 1981 A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, **211**, 77-80.
- Meyer, D. E., Osman, A. M., Irwin, D. E., & Yantis, S. 1988 Modern mental chronometry. *Biological Psychology*, **26**, 3-67.
- Miller, J. 1988 Discrete and continuous models of human information processing: Theoretical distinctions and empirical results. *Acta Psychologica*, **67**, 191-257.
- Miller, G., Galanter, E., & Pribram, K. H. 1960 *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.
- Miller, J., Riehle, A., & Requin, J. 1992 Effects of preliminary perceptual output on neuronal activity of the primary motor cortex. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 1121-1138.
- Miller, J., Schaffer, R., Hackley, S. A. 1991 Effects of preliminary information in a Go versus No-go task. *Acta Psychologica*, **76**, 241-292.
- 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 生理心理学と精神性理学, **15**, 11-29.
- Naito, E., & Matsumura, M. 1994 Movement-related potentials associated with motor inhibition as determined by use of a stop signal paradigm in

- humans. *Cognitive Brain Research*, **2**, 139-146.
- Naito, E., & Matsumura, M. 1996 Movement-related potentials associated with motor inhibition under different preparatory states during performance of two visual stop signal paradigms in humans. *Neuropsychologia*, **34**, 565-573.
- 中村道彦 1983 臨床脳波一波と活動 門林岩雄・井上健・中村道彦 (編) 脳波 金芳堂 Pp. 16-17.
- 七木田敦 1998 精神遅滞児における運動スキルの転移と保持に及ぼす文脈干渉効果について 特殊教育学研究, **35**, 13-20.
- Neshige, R., Lüders, H., Friedman, L., & Shibasaki, H. 1988 Recording of movement-related potentials from the human cortex. *Annales of Neurology*, **24**, 439-445.
- Neshige, R., Lüders, H., & Shibasaki, H. 1988 Recording of movement-related potentials from scalp and cortex in man. *Brain*, **111**, 719-736.
- Niki, H. 1982 Reward-related and error-related neurons in the primate frontal cortex. In S. Saito & T. Yanagita (Eds.), *Learning and memory: Drugs as reinforcer*. Amsterdam: Excerpta Medica. Pp. 22-34.
- Niki, H., & Watanabe, M. 1979 Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey. *Brain Research*, **171**, 213-224.
- Norman, D. A. 1981 Categorization of action slips. *Psychological Review*, **88**, 1-15.
- 沖田庸嵩 1992 ERP 研究に役立つ心理実験パラダイム (I) 臨床脳波, **34**, 269-275.
- Passingham, R. 1995 *The frontal lobes and voluntary action*. New York: Oxford University Press.
- Passingham, R. E. 1998 Attention to action. In A. C. Roberts, T. W. Robbins, & L. Weiskrantz (Eds.), *The prefrontal cortex*. New York: Oxford University Press. Pp. 131-143.
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Weller, B. J., & Kopell, B. S. 1985 ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalography and Clinical*

- Neurophysiology*, **60**, 423-434.
- Rabbitt, P. M. A. 1966 Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, **71**, 264-272.
- 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. 1978 Detection of errors by skilled typists. *Ergonomics*, **21**, 945-958.
- Ragot, R. 1984 Perceptual and motor space representation: An event-related potential study. *Psychophysiology*, **21**, 159-170.
- Requin, J. 1985 Looking forward to moving soon: Ante factum selective processes in motor control. In M. I. Posner and O. Marin (Eds.), *Attention and performance XI*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. Pp. 147-167.
- Requin, J., Riehle, A., & Seal, J. 1988 Neuronal activity and information processing in motor control: From stages to continuous flow. *Biological Psychology*, **26**, 179-198.
- Riehle, A., & Requin, J. 1989 Monkey primary motor and premotor cortex: Single-cell activity related to prior information about direction and extent of an intended movement. *Journal of Neurophysiology*, **61**, 534-549.
- Rosenkilde, C. E., Bauer, R. H., & Fuster, J. M. 1981 Single cell activity in ventral prefrontal cortex of behaving monkeys. *Brain Research*, **209**, 375-394.
- Rumelhart, D. E., & Norman, D. A. 1982 Simulating a skilled typist: A study of skilled cognitive-motor performance. *Cognitive Science*, **6**, 1-36.
- 佐々木和夫 1984 運動関連電位と随意運動 神経研究の進歩, **28**, 123-137.
- 佐々木和夫 1993 前頭葉の事象関連電位と脳磁図 神経研究の進歩, **37**, 72-81.
- Sasaki, K. & Gemba, H. 1982 Development and change of cortical field potentials during learning processes of visually initiated hand movements

- in the monkey. *Experimental Brain Research*, **48**, 429-437.
- Sasaki, K. & Gemba, H. 1983 Learning of fast and stable hand movement and cerebro-cerebellar interactions in the monkey. *Brain Research*, **277**, 41-46.
- Sasaki, K. & Gemba, H. 1984a Compensatory motor function of the somatosensory cortex for the motor cortex temporarily impaired by cooling in the monkey. *Experimental Brain Research*, **55**, 60-68.
- Sasaki, K. & Gemba, H. 1984b Compensatory motor function of the somatosensory cortex for dysfunction of the motor cortex following cerebellar hemispherectomy in the monkey. *Experimental Brain Research*, **56**, 532-538.
- Sasaki, K., & Gemba, H. 1986 Electrical activity in the prefrontal cortex specific to no-go reaction of conditioned hand movement with colour discrimination in the monkey. *Experimental Brain Research*, **64**, 603-606.
- Sasaki, K., & Gemba, H. 1991a Cortical potentials associated with voluntary movements in monkeys. In C. H. M. Brunia, G. Mulder, & M. N. Verbaten (Eds.), *Event-related brain research*. North-Holland: Elsevier. Pp. 80-96.
- Sasaki, K., & Gemba, H. 1991b How do the different cortical motor areas contribute to motor learning and compensation following brain dysfunction? In D. R. Humphrey & H.-J. Freund (Eds.), *Motor Control: Concepts and Issues*. Chichester: Wiley. Pp. 445-461.
- Sasaki, K., Gemba, H., & Mizuno, N. 1982 Cortical field potentials preceding visually initiated hand movements and cerebellar actions in the monkey. *Experimental Brain Research*, **46**, 29-36.
- Sasaki, K., Gemba, H., Nambu, A., Jinnai, K., Yamamoto, T., & Llinas, R. 1992 Cortical activity specific to no-go reaction in go/no-go reaction time hand movement with colour discrimination in monkeys and human subjects. *Biomedical Research*, **13**, 5-9 (supplement).
- Sasaki, K., Gemba, H., Nambu, A., & Matsuzaki, R. 1993 No-go activity

- in the frontal association cortex of human subjects. *Neuroscience Research*, **18**, 249-252.
- Sasaki, K., Gemba, H., & Tsujimoto, T. 1989 Suppression of visually initiated hand movement by stimulation of the prefrontal cortex in the monkey. *Brain Research*, **495**, 100-107.
- Sasaki, K., Gemba, H., & Tsujimoto, T. 1990 Cortical field potential associated with hand movement on warning-imperative visual stimulus and cerebellum in the monkey. *Brain Research*, **519**, 343-346.
- Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. 1996 Do you know what you did?: Errors, confidence, and the brain. *Psychophysiology*, **33**, S75 (supplement).
- 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.
- Schmidt, R. A. 1975 A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82**, 225-261.
- Schmidt, R. A. 1991 *Motor learning and performance: From principles to practice*. Champaign: Human Kinetics Books.
- Schreiber, H., Lang, M., Lang, W., Kornhuber, A., Heise, B., Keidel, M., Deecke, L., & Kornhuber, H. H. 1983 Frontal hemispheric differences in the Bereitschaftspotential associated with writing and drawing. *Human Neurobiology*, **2**, 197-202.
- Semjen, A., & Gottsdanker, R. 1992 Plans and programs for short movement sequences. In G. E. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior II*. Amsterdam: North-Holland. Pp. 211-228.
- Shaffer, L. H. 1976 Intention and performance. *Psychological Review*, **83**, 375-393.
- Shallice, T. 1975 On the contents of primary memory. In P. M. A. Rabbitt and S. Dornie (Eds.), *Attention and performance V*. London: Academic. Pp. 269-280.

- Shallice, T., & Burgess, P. 1998 The domain of supervisory processes and the temporal organization of behaviour. In A. C. Roberts, T. W. Robbins, & L. Weiskrantz (Eds.), *The prefrontal cortex*. New York: Oxford University Press. Pp. 22-35.
- 柴崎浩 1976 脳運動関連電位の基礎的および臨床的研究IV 脳運動関連電位の頭皮上局在. 脳波と筋電図, **4**, 157-164.
- 柴崎浩 1979 運動関連脳電位 神経研究の進歩, **23**, 386-396.
- 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.
- Smid, H. G. O. M., Lamain, W., Hogeboom, M. M., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1991 Psychophysiological evidence for continuous information transmission between visual search and response processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **17**, 696-714.
- Smid, H. G. O. M., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1990 Selective response activation can begin before stimulus recognition is complete: A psychophysiological and error analysis of continuous flow. *Acta Psychologica*, **74**, 169-201.
- Smid, H. G. O. M., Mulder, G., Mulder, L. J. M., & Brands, G. J. 1992 A psychophysiological study of the use of partial information in stimulus-response translation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 1101-1119.
- Smulders, F. T. Y., Kenemans, J. L., & Kok, A. 1996 Effects of task variables on measures of the mean onset latency of LRP depend on the scoring method. *Psychophysiology*, **33**, 194-205.
- Squire, L. R., & Kosslyn, S. M. 1998 *Findings and current opinion in cognitive neuroscience*. Cambridge: The MIT Press.
- Squires, N. K., & Ollo, C. 1986 Human evoked potential techniques:

- Possible applications to neuropsychology. In H. J. Hannay (Ed.), *Experimental techniques in human neuropsychology*. New York: Oxford University Press. Pp. 386-418.
- Stelmach, G. E. 1982 Motor control and motor learning: The closed-loop perspective. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior: An introduction*. Hillsdale: Erlbaum. Pp. 93-115.
- Sternberg, S. 1969 The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In W. G. Koster (Ed.), *Attention and performance II*. Amsterdam: North-Holland. Pp. 276-315.
- 丹治順 1991 手の使用と補足運動野 神経研究の進歩, **35**, 1007-1013.
- 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) 脳とニューラルネット 朝倉書店 Pp. 203-217.
- 丹治順 1994b 一次運動野と高次運動野の働き *Brain Medical*, **6**, 355-361.
- 丹治順 1999 脳と運動—アクションを実行させる脳 共立出版.
- Thorpe, S. J., Rolls, E. T., & Maddison, S. 1983 The orbitofrontal cortex: Neuronal activity in the behaving monkey. *Experimental Brain Research*, **49**, 93-115.
- 土田宣明 1997 老年期の抑制機能 発達心理学研究, **8**, 26-33.
- 土田宣明 1998 老年期の抑制機能に関する研究の意義と現状 心理学評論, **41**, 73-83.
- Tsujimoto, T., Gemba, H., & Sasaki, K. 1993 Effect of cooling the dentate nucleus of the cerebellum on hand movement of the monkey. *Brain Research*, **629**, 1-9.
- Vaughan Jr., H. G., Costa, L. D., & Ritter, W. 1968 Topography of the human motor potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **25**, 1-10.
- von Holst, E. 1954 Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behavior*, **2**, 89-94.
- Watanabe, M. 1989 The appropriateness of behavioral response coded in

post-trial activity of primate prefrontal units. *Neuroscience Letters*, **101**, 113-117.

Watanabe, M., & Niki, H. 1985 Hippocampal unit activity and delayed response in the monkey. *Brain Research*, **325**, 241-254.

山鳥重 1985 神経心理学入門 医学書院.

吉田弘司 1994 心理学実験におけるコンピュータの利用—NEC PC-98 シリーズコンピュータによるミリ秒単位のタイマー 広島大学教育学部紀要 第一部 (心理学), **43**, 11-19.

謝 辞

本論文を作成するにあたり，主査の利島保先生，指導教官の宮谷真人先生，審査委員の稲水惇先生と坂手照憲先生，ならびに，兵庫教育大学の今塩屋隼男先生には，一方ならぬご厚情をいただきました．一つの論文にまとめることができましたのも，先生方の献身的なご努力のお陰と存じ，心からお礼申し上げます．

また，教育学部の松田文子先生，森敏昭先生，中條和光先生，七木田敦先生，比治山大学の吉田弘司先生，札幌学院大学の沖田庸嵩先生，北海道大学の片山順一先生，広島国際大学の赤井俊幸先生，竜谷大学の藤原直仁先生，聖カタリナ女子大学の松尾浩一郎先生，広島大学教育学部講師の河原純一郎先生，日本学術振興会の正木宏明先生，ならびに，北海道大学の松本秀彦さんにおきましても，多方面からの支援を賜りました．心からお礼申し上げます．さらに，広島大学心理学科と兵庫教育大学障害児教育講座の諸先生方にも弛まぬご指導とご鞭撻をいただきました．誠にありがとうございました．

本研究の実験は，広島大学と兵庫教育大学において実施させていただきました．当地においてお忙しい中，快く被験者をお引き受けいただいた皆様，ならびに，実験の計画立案から結果の考察にいたるまで有意義な議論を提供していただいた学生の皆様にも深謝いたします．特に，広島大学の友人である高橋功さんと樋口匡貴さんとの澁刺とした議論は，きっと本論にも活かしていることと信じております．ここに心からお礼申し上げます．

2000年1月

岩木信喜