

ERP に及ぼす運動プログラム再構築およびパラメータ修正過程の効果

正木 宏明* 高澤 則美** 山崎 勝男*

The effects of motor program reconstruction and parameter modification process on ERP

Hiroaki Masaki*, Noriyoshi Takasawa**, and Katuo Yamazaki*

Abstract

Event-related potentials (ERP) were recorded from five subjects who were instructed to pull a trigger of the apparatus with the right index finger in an attempt to produce the target force. Three tasks were used to investigate the effects of motor programming and parameter modification process on the ERPs elicited by the visual signals which informed the subjects of the target force. The subjects were requested to produce the single target of 1,300 gf repeatedly on the single target condition, to produce three target forces of 500 gf, 1,300 gf and 2,100 gf on the multiple target condition, and to perform both tracking tasks and single target force production task on the tracking condition. N145, P240, P320 and negative slow potential were elicited by the visual signals. The amplitudes of P240 and P320 were significantly larger on the tracking condition relative to the single and the multiple target condition. Negative slow wave on the multiple target condition were significantly larger at Cz than that on the single target condition. It was likely that enhancement of the P240 and P320 was due to novelty of the visual signal.

Key words: event-related potential, P300, motor program reconstruction, parameter modification

はじめに

ヒトの頭皮上から記録される脳波を外部信号の呈示時点で加算平均処理すると、事象関連電位 (event-related potential; ERP) が観察される。

ERP は呈示刺激に対する自動的処理を反映する成分と、呈示刺激に注意を向けて評価する制御的処理を反映する成分に大別される (Schneider & Shiffrin, 1977)。制御的処理を反映する ERP には、P300 (Sutton, Tueting, Zubin, & John,

*早稲田大学人間科学部

**科学警察研究所

※本研究は、1997年度特定課題研究 (97A-205) の助成を受けた

* *School of Human Science, Waseda University*

** *National Research Institute of Police Science*

1967), N400 (Kutas & Hillyard, 1980), 処理陰性電位 (processing negativity: Näätänen, 1982), search negativity (Okita, Wijers, Mulder, & Mulder, 1985)などがあり, 脳内情報処理過程を反映する成分として注目されてきた。

本研究ではこのERPに着目し, 運動プログラムやパラメータの修正を指示する視覚信号に対する認知過程がERP波形に及ぼす影響を検討した。Schmidt (1982)の運動発現に関する概念モデルによると, 運動実行者はまず, 当該運動に関する一般運動プログラム (generalized motor program) を構築し, 次にその運動プログラムを作動させるために運動パラメータを適用しなければならない。同一の運動を遂行する場合は, 同一の運動プログラムに同一パラメータを適用し続ければよいが, 質の異なる運動遂行を指示された場合には, 与えられた指示を正しく認知したうえで, 運動プログラムやパラメータを即座に修正しなければならない。本研究では, 後者のような事態を指示する視覚信号がヒトの脳内で処理された場合, ERP波形にどのように反映されるかについて検討した。

実験には, 引き金を随意的に牽引することによって, 予め設定された標的強度値を出力する運動課題を用いた。実験条件には, ①同一の標的強度値を繰り返して出力する条件, ②試行毎に標的強度値が変化する条件, ③牽引運動以外にもトラッキング課題を行わせることで運動プログラムの再構築をうながす条件を設定した。前述の概念モデルに基づくと, 同一の標的強度値を出力する条件では, 同じ運動プログラムとパラメータに基づいて課題を遂行すればよいが, 異なる標的強度値を交互に出力する場合には, 試行毎に異なるパラメータを適用しなければならない。さらに, トラッキング課題では, 牽引運動とは異なる運動プログラムが用いられるため, 試行毎に運動プログラムを修正しなければならないものと考えられる。

方 法

被験者：右利きの男子大学生および大学院生5名を被験者とした。平均年齢は 24.0 ± 2.3 歳であった。

課題および条件：被験者に課した運動課題は, 右

手第2指による引き金の牽引であった。これは, 運動測定装置 (Fig. 1) 上のグリップ部に軽く手掌を添え, 引き金を随意的に一気に引くものであり, 牽引には等尺性の筋収縮が要求された。また, 被験者は単に引き金を牽引するのではなく, 牽引によって予め設定された標的強度値を出力しなければならない。標的強度値の設定は条件 (各91試行) によって異なった。

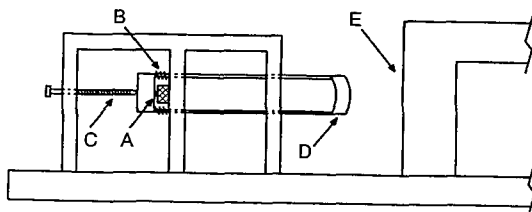


Fig. 1 Diagram of the apparatus for finger movement. A: load transducer, B: coil spring, C: adjusting screw, D: trigger, E: grip.

- ①単一標的的条件：被験者は, 全試行において標的強度値1300gfを出力するように引き金を牽引した。
- ②複数標的的条件：試行毎に出力すべき標的強度値が異なったが, $3n-2$ ($1 \leq n \leq 31$) 試行目は必ず1300gfになるように操作した。それ以外の試行では, ランダムに呈示される500gfあるいは2100gfのいずれかを出力した。
- ③トラッキング条件： $3n-2$ 試行目では標的強度値1300gfの出力課題を遂行した。それ以外の試行では, ランダムに呈示される2種類のトラッキング課題のいずれかを遂行した。これは, 被験者の前方1mに設置したCRT上に呈示されるS字状あるいは直線状のコースを, 左手に持ったマウスを動かすことによって白色光点を逸脱しないように辿らせる課題であった (Fig. 2)。被験者には, コースから逸脱させないよう正確に遂行する旨を教示した。

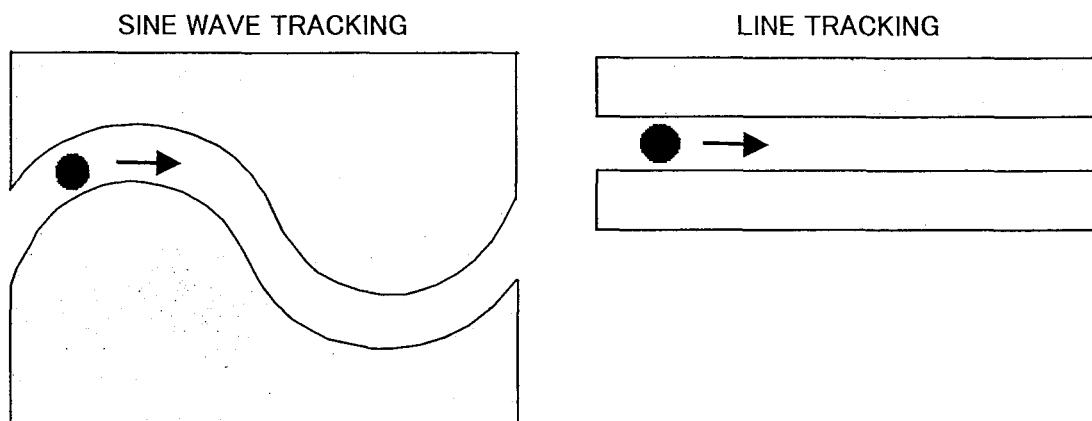


Fig. 2 Schematic illustration of the tracking tasks. The subjects performed the tasks by moving a mouse device with their left hand.

手続き

被験者に所定の電極を装着した後に、課題に関する教示を与えた。いずれの条件においても、課題を指示する視覚信号呈示後に任意の間隔において引き金を鋭く牽引するように教示した。この視覚信号は、チャイム音と同時に被験者前方1mに設置されたCRT上に呈示され、各標的強度値を示す縦棒と白色注視点から構成された (Fig. 3)。縦棒表示は、単一標的的条件では1本だけであったのに対して (標的強度値: 1300gf)、複数標的の条件では3本表示され、各標的強度値 (500gf, 1300gf, 2100gf) のそれぞれに合致していた。複数標的の条件では、縦棒上に重複呈示される注視点の表示位置が試行毎に変わり、被験者は注視点の表示された標的強度値を出力するように教示された。トラッキング条件では、引き金の牽引運動については単一標的の条件と同様の教示を与えた。トラッキング課題については、試行終了毎にコースからの逸脱回数をCRT上に呈示した。

いずれの条件においても、牽引運動終了2s後には水平方向の棒グラフを表示し、実際の牽引強度を被験者にフィードバックした。被験者は標的強度値を示す縦棒との比較により、実際の牽引強度が標的強度値からどの程度隔たっていたかを知る

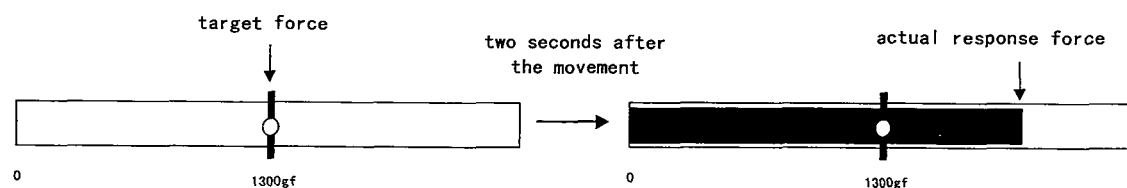
ことができた。

課題遂行の前後数秒間は、注視点を凝視するように要請し、眼球運動の抑制を図った。さらに、運動許可音呈示から課題遂行までの間隔が短くなり過ぎないように教示し、タイミングをとるためのカウントを禁じた。被験者は実験開始前に20試行程度の練習を行い、引き金の引き方、眼球運動の抑制方法及び試行間隔に関する注意を受けた。また、各セッション終了毎に約10分間の休憩を設けた。

測定装置及び記録方法

脳波 (EEG) および垂直眼球運動 (EOG) を脳波計 (NEC 三栄製 Synafit 1000) を用いて同時記録した。EEGはFz, Cz, C3', C4' (C3, C4の1.5 cm前方) から両耳垂結合 (A1-A2) を基準に時定数5sで導出した。EOGは左眼窩上下縁部から時定数5sで導出した。電極は全て銀塩化銀電極を用いた。測定事象はデータレコーダ (NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder) に磁気記録し、その後サンプリング周波数200HzでA/D変換した。これらの測定事象は1試行毎にCRT上に表示し、アーチファクトの混入が認められない場合に限り標的強度値を指示する視覚信号呈示時点でEEGを加算平均した。

SINGLE



MULTIPLE

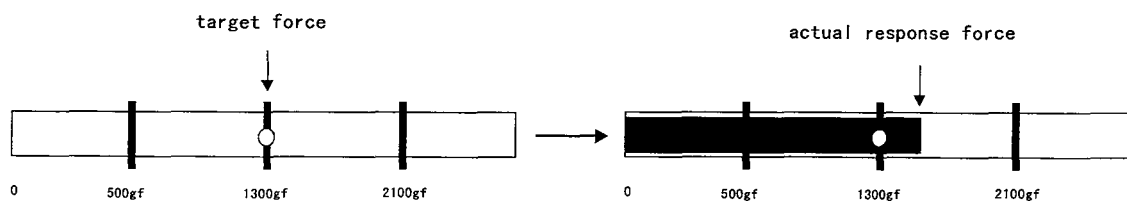


Fig. 3 Schematic illustration of the visual feedback signals. Subjects were instructed to produce the target force several seconds after presentation of a fixation point. On the multiple target condition, the vertical line with the fixation point represented the target force to be exerted. Two seconds after the movement, a horizontal line informed the subjects of their own actual movement force. Upper: the single target condition. Lower: the multiple target condition.

結 果

Fig. 4は牽引による1300gf出力を指示する視覚信号によって惹起されたERPである。視覚信号呈示後、潜時約145msにピークをもつ、いわゆるN100に相当する陰性波N145がみられた。N145は単一標的及びトラッキング条件に比較して複数標的の条件で大きかった。これは刺激弁別に関連した陰性成分NA (Ritter et al., 1983) の重畳によるものと考えられる。

N145出現後、潜時約210-270msにピークをもつ陽性成分P240と、潜時約290-360msにピークをもつ陽性成分P320がみられた。さらにその後、トラッキング及び複数標的の条件では、陰性方向への緩電位変動がみられた。

Fig. 5は各成分の平均振幅値である。各成分の振幅値について、条件(3)×部位(4)の2要因分散分

析を実施したところ、N145には条件間及び部位間の差はなかったものの、P240及びP320の振幅値には交互作用が認められた(それぞれ、 $F(6, 24) = 2.59, p < .05$; $F(6, 24) = 3.05, p < .05$)。いずれも、Fz以外の部位ではトラッキング条件の振幅値が他条件に比べて有意に大きいことを示すものであった。

トラッキング及び複数標的の条件でみられた陰性緩電位変動については、潜時700-1200ms区間における最大振幅値を計測して、同様の分散分析を行った結果、交互作用が有意であった($F(6, 24) = 2.66, p < .05$)。これは、Czの振幅値は複数標的の条件の方が単一標的の条件よりも大きいことを示すものであった。

N145, P240, P320の各ピーク潜時 (Fig. 6) についても同様の分散分析を行ったが、いずれも有意差はなかった。

考 察

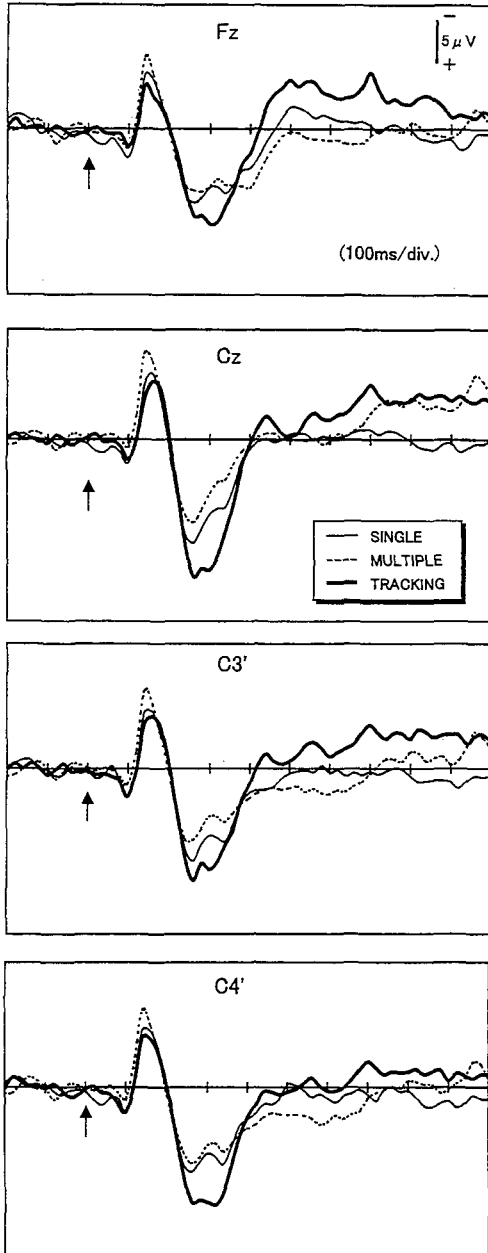


Fig. 4 Grand average waveforms of ERPs elicited by the visual signals which informed the subjects of the target force to be exerted. The thick solid line represents ERP on the tracking condition, the thin solid line represents the multiple target condition, the dashed line represents the single target condition. The arrow indicates the onset of visual signal.

本研究では、運動プログラムの再構築や強度パラメータ修正を要求する視覚信号とERP波形の関連を検討した。その結果、解析対象とした視覚信号は各条件間で共通であったにも関わらず、トラッキング条件におけるP240、P320の振幅値は、Fzを除く部位で他の2条件よりも有意に大きかった。また、P320出現後にみられた陰性電位変動の振幅値は、Czでは複数標的の条件の方が単一標的の条件よりも大きかった。

いずれの条件下にも出現した陽性成分P240およびP320については、その潜時からP3a、P3b (Squires, et al., 1975; 1977) に相当する成分の可能性を検討しなければならない。P3aは潜時220-280msに出現し、課題とは無関連な低頻度刺激によって惹起される成分である。一方、P3bの潜時は310-380msであり、低頻度で呈示される標的の刺激を検出する事態下で惹起される。P3bは、いわゆるP300に相当する成分である。本研究同様の標的強度値出力課題を用いた実験では、被験者に呈示した聴覚フィードバック信号によってP260、P360の2成分が報告されている(正木・高澤・山崎, 1995)。彼らは刺激呈示確率と頭皮上分布から、P260をP3aではなくP200に相当する成分とし、P360はP3aとP3b(P300)の複合したものと考えた。本研究の単一標的の条件では、全試行で同一課題が遂行されるため、被験者は毎試行同じ視覚信号を処理していた。この場合、呈示確率は100%であり、P240はP3a出現の必要条件とは無関係に出現したことになる。したがってP240はP3aと異なる成分である可能性が高い。正木他(1995)の報告を参考によると、呈示刺激のモグリティは異なるものの、P240はP200に相当し、P320はP300に相当する成分と考えるべきであろう。

複数標的の条件が単一標的の条件と異なる点は、強度パラメータが試行毎に修正されることであった。両条件のERPを比較すると、統計的に有意でなかったものの、P240、P320ともに単一標的の条件の方が大きかった。両条件における刺激の呈示確率を検討すると、解析対象とした標的強度値: 1300 gfを指示する視覚信号の呈示確率は、単一標的の条

ERPに及ぼす運動プログラム再構築およびパラメータ修正過程の効果

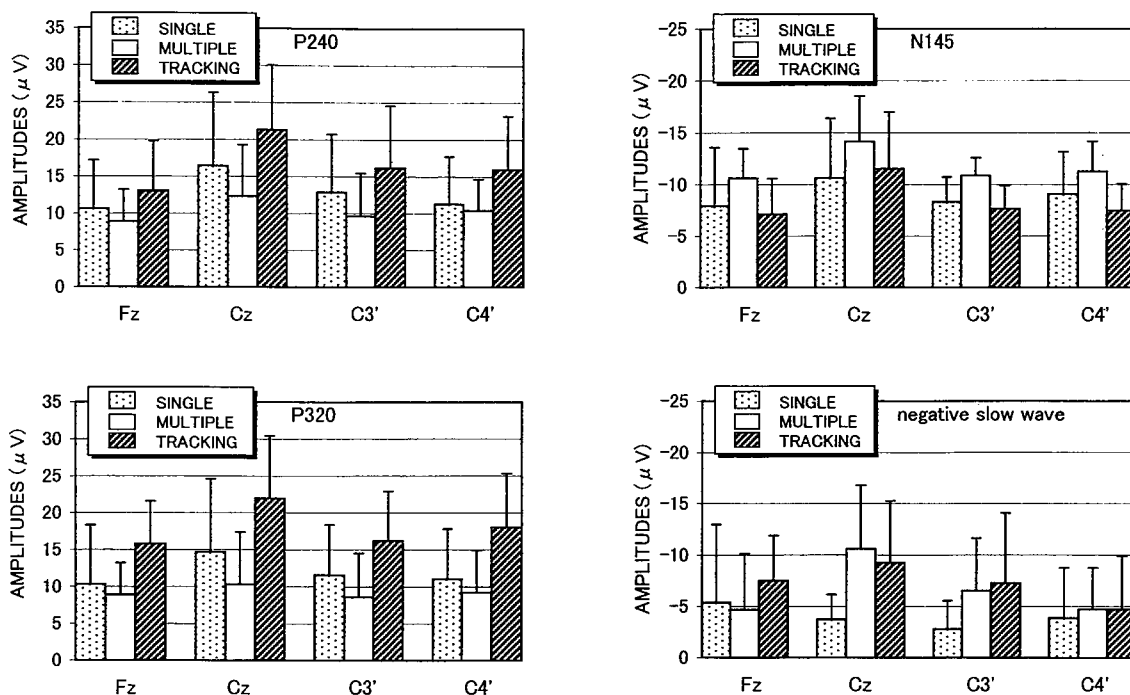


Fig. 5 Mean amplitudes of N145, P240, P320 and negative slow wave. ANOVA revealed significant interaction in P240 and P320 indicating that the amplitudes were larger on the tracking than other conditions over recording sites except for Fz.

件では100%であったのに対して、複数標的条件では約33%であった。呈示確率の高い単一標的条件の方でむしろ振幅値は大きくなっており、低頻度刺激で大きくなるという従来の報告とは逆の結果である。したがって、両条件間におけるERP波形の違いを呈示確率から説明することは不可能であり、後述のようにパラメータ修正過程に伴う陰性変動成分が重量した可能性を考慮すべきである。

トラッキング条件と複数標的の条件の比較では、トラッキング条件のP240, P320が有意に大きかったが、呈示確率は両者ともに約33%であり、同じ呈示確率にもかかわらず振幅差が生じたことになる。したがって、この結果も呈示確率から説明することはできない。単一標的及び複数標的の条件で呈示した視覚信号は、注視点移動の有無を除くと両者はほぼ同じであった。それに対して、トラッキング条件におけるトラッキング課題は、CRT上で作業を行うものであり、牽引運動を指示する

視覚信号とは物理的特性及び課題関与性の点で大きく異なるものであった。トラッキング課題遂行時には、被験者は運動プログラムを構築し直さなければならなかった。2種類のトラッキング課題を牽引運動の試行間に挿入された課題とみなすと、標的強度値出力課題を指示する視覚信号の刺激間隔 (interstimulus interval; ISI) は他条件よりも長かったことになる。そのため、トラッキング課題から標的強度値出力課題に変化した場合には、それを指示する視覚信号の持つ新奇性は他条件よりも高かったと考えられる。トラッキング条件でP240, P320が他条件よりも高振幅になった原因は、新奇性の強い刺激呈示によって惹起された注意によるものと推察される。新奇性の強い刺激によってP300が頭頂ではなく前頭、中心部で大きくなることは、novelty P300 (Courchesne et al., 1975) として報告されている。本研究では頭頂部を解析対象としなかったものの、P320が novelty

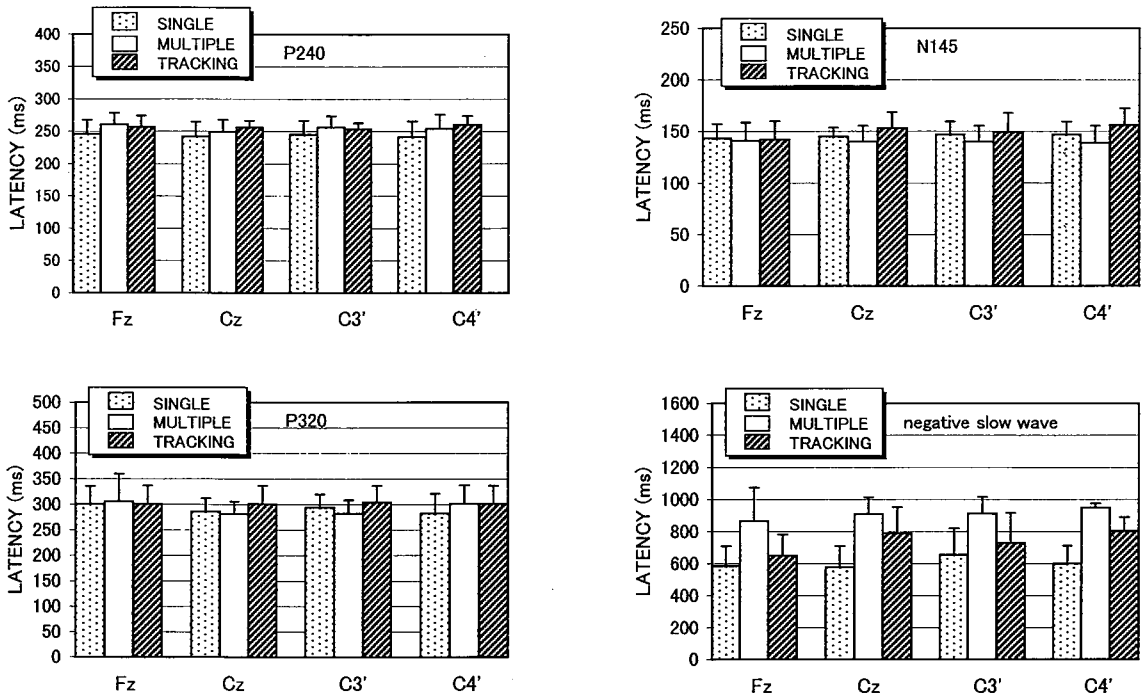


Fig. 6 Mean latencies of N145, P240, P320 and negative slow wave. They did not differ among conditions.

P300に類似した成分である可能性もあり、新奇性とP320の関連を示唆するものである。

潜時700-1200ms間にピークを持つ陰性変動成分については、単一標的条件では明確でなかったものの、複数標的およびトラッキング条件ではCzで顕著にみられた。ただし、統計的にはCzにおいて複数標的的条件と単一標的の条件間に有意差を認めずに過ぎなかった。本研究で操作した課題条件に基づくと、この陰性電位変動は運動プログラムの再構築及びパラメータ修正に関連する処理過程を反映したものと考えられる。直前の試行と異なる課題遂行を指示された場合には動作計画を修正しなければならず、ERPには陰性変動として反映されたと考えられる。動作計画の修正や認知活動によって陰性変動することは、随意運動直前に出現する準備電位 (readiness potential; Kornhuber & Deecke, 1965) の研究報告 (正木・高澤・山崎, 1996; 正木・高澤・山崎, 1997) にもみられ、上記推察を支持するものである。

P300潜時の機能的意義は一般に、刺激評価

(stimulus evaluation)の終了時点を反映するものと考えられている。反応時間とP300の関連を考慮すると、刺激評価が終了する前に反応準備は開始していると考えられるため、複数標的の条件で生じた運動準備に関連する陰性変動は、P240, P320に重畳して出現した可能性が高い。単一標的の条件のP240とP320が複数標的の条件よりも大きくなったのは、この陰性電位の重畳によって陽性成分が見かけ上小さくなったことに起因したものと説明できる。

Kok (1997) は従来の知見を概観し、脳内情報処理に必要な処理資源とERPを関連づけたモデルを提唱している。これによると、P3 (P300) 振幅は能動的注意を要する制御的処理だけでなく、注意を要さない自動処理時にも高振幅になることから、制御的処理をP3振幅の主な規定要因と考えるのではなく、むしろ陰性電位変動を規定要因と考えるべきだと強く主張している。これは陰性電位の重畳を考慮した本研究の推察を支持するものである。

ま と め

1300gf 出力を指示する視覚刺激の呈示確率及び ISI は条件間で異なっていたことや、陰性電位変動が P240, P320 に重畳していた可能性を考慮しても、本研究のトラッキング条件でみられた P240, P320 の振幅増大は、刺激の新奇性に起因したものと考えられる。

文 献

- Courchesne, E., Hillyard, S.A., and Galambos, R., 1975 Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 39, 131-143.
- Kok, A. 1997 Event-related potential (ERP) reflection of mental resources: a review and synthesis. *Biol. Psychol.*, 45, 19-56.
- Kornhuber, H.H., and Deecke, L. 1965 Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und Passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Arch. ges. Physiol.*, 248, 1-17
- Kutas, M., and Hillyard, S.A. 1980 Reading senseless sentences: Brain potential reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203-205.
- 正木宏明, 高澤則美, 山崎勝男 1994 準備電位に及ぼす運動目的性の効果. *生理心理学と精神生理学*, 12, 83-93.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1995 運動学習中に呈示した聴覚及び視覚フィードバック信号に対する ERP ヒューマンサイエンスリサーチ (早稲田大学人間科学研究科), 4, 115-127.
- 正木宏明, 高澤則美, 山崎勝男 1996 打鍵運動時の課題難度が準備電位に及ぼす効果. *脳波と筋電図*, 24, 205-212.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1997 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.
- Näätänen, R. 1982 Processing negativity: An evoked-potential reflection of selective attention. *Psychological Bulletin*, 92, 605-650.
- Okita, T., Wijers, A.A., Mulder, G., and Mulder, L.J.M. 1985 Memory search and visual spatial attention: an event-related brain potential analysis. *Acta Psychologica*, 60, 263-292.
- Ritter, W., Simson, R., & Vaughan, H.G. 1983 Event-related potential correlates of two stages of information processing in physical and semantic discrimination tasks. *Psychophysiology*, 20, 168-179.
- Schmidt, R.A. 1982 Motor control and learning. Human Kinetics Publishers, Inc, Illinois, pp 227-266.
- Schneider, W., and Shiffrin, R.M. 1977 Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Squires, K.C., Donchin, E., Herning, R.I., and McCarthy, G. 1977 On the influence of task relevance and stimulus probability on the event related potential components. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 42, 1-14.
- Squires, N.K., Squires, K.C., and Hillyard, S.A. 1975 Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 38, 387-401.
- Sutton, S., Tueting, P., Zubin, J., and John, E.R. 1967 Information delivery and the sensory evoked potential. *Science*, 155, 1436-1439.