色選択と文字探索の複合課題中の事象関連電位に及ぼす視覚負荷と記憶負荷の効果¹

広島大学 宮谷真人

Effects of display and memory load on the event-related potentials during visual letter search combined with selection by color

Makoto Miyatani (Department of Psychology, Graduate School of Education, Hiroshima University, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8524)

This study investigated the effects of display and memory load on the event-related potentials (ERPs) in a visual letter search task combined with selection by color. ERPs were recorded from 10 adult subjects, when they were required to judge if test stimuli, which consisted of a horizontal array of five colored alphabets, contained target letters defined by shape and color. The results showed that the increase of display or memory load caused the enlargement of three different negativities. The first and second display load effects were observed in the ERPs at midline central electrode (Cz) between 240-280 ms latency range, and in a posterior-distributed negativity that was the maximum at about 650 ms after the stimulus onset. The third was the anterior-central negativity that was the largest at Cz about 550 ms after the stimulus onset. In contrast to the first two effects, this negativity was enhanced by display or memory load. In discussion, a tentative linkage between these ERP changes and two slave systems of working memory (phonological loop and visuo-spatial sketchpad) was proposed.

Key words: visual search, event-related potentials (ERPs), display load, memory load, working memory.

視覚における選択的過程を調べる課題の一つに、視覚探索課題がある。この課題では、被験者に検出すべき標的の一つ以上覚えてもらい、その後呈示されるテスト刺激について、標的の有無やその位置に関する判断を求める。検出すべき標的の集合を記憶セットと呼ぶ。テスト刺激には、標的や標的以外の妨害刺激が一つ以上含まれる。記憶セットやテスト刺激に関する変数を操作し、それとともなう課題遂行成績の変化を調べることで、視覚情報処理のいろいろな特徴が明らかにされてきた。

視覚探索研究における検討課題の一つに、テスト刺激に関する変数操作と、記憶セットに関する変数操作の影響の違いがある (Shiffrin, 1988)。テスト刺激に関する変数操作の影響を受ける過程を視覚探索過程、記憶セット操作の影響を受ける過程を記憶探索過程と呼ぶと、視覚探索過程が標的と妨害刺激の区別のみならず (Duncan & Humphreys, 1989) や妨害刺激の抑制の程度 (Flach, 1986) に影響されるのに対し、記憶探索過程は、記憶セットを構成する複数の対象が標的という一つのカテゴリーに統合される程度 (Flach, 1986; Schneider & Fisk, 1984) に依存する。また、

Fisk & Rogers (1991) は、視覚探索過程と記憶探索過程では、加齢が及ぼす影響に違いがあることを示唆している。

事象関連電位 (event-related potentials, ERP) を指標とした研究でも、視覚負荷効果と記憶負荷効果の相違 (便宜的に、テスト刺激中の探索対象数によって決まる課題の難易度を視覚負荷、記憶セットの大きさで決まる難易度を記憶負荷と呼ぶ) が報告されている。テスト刺激に対する ERP は、負荷の増加にともない、刺激後 300 ms 前後から数百ミリ秒の間、陰性方向にシフトする。視覚負荷の増加による陰性シフトは後頭部や後部側頭部で大きい (宮谷, 1992; Ritter, Simson, & Vaughan, 1988) のに対し、記憶負荷効果は Cz で最大に出現する (宮谷・前堂・赤井, 1994; Okita, Wijers, Mulder, & Mulder, 1985)。ERP 成分の頭皮上分布の違いやその時間経過は、課題遂行にかかわる神経ネットワークの機能的パターンの違いを推測する手がかりとなる (Gevins & Cutillo, 1993)。本研究は、ERP 上の視覚負荷効果と記憶負荷効果の相違をさらに詳しく調べることによって、視覚探索を支える心理的過程の性質を明らかにすることを目的とする。

視覚探索課題の遂行成績に影響する要因の一つに、標的の選定方法がある。たとえば、標的と妨害刺激が、色や線分の方角など単一の視覚的特徴だけで区別

¹ 本研究は、前田尚子氏 (現姓: 中塩, 広島市) と共同で実施した。データの一部は、第 11 回日本生理心理学会学術大会で発表した。

できる条件では、標的の検出時間は視覚負荷の影響を受けない。ところが、標的が複数の特徴の組合せで定義される条件では、視覚負荷が大きいほど標的検出時間は延長する (Treisman & Gelade, 1980)。ERP による視覚探索研究でも、標的の定義方法が異なるいくつかの条件で、記憶負荷および視覚負荷効果に関する検討が行われてきた。

Okita et al. (1985) は、文字探索と空間的注意を組み合わせた課題を実施し、記憶セットによる ERP の変化を観察した。また、Wijers, Mulder, Okita, Mulder, & Scheffers (1989) は、文字探索を色による選択と組み合わせた課題で ERP の記憶負荷効果を調べた。これらの研究では、注意を向けた場所あるいは色の刺激に対する ERP に、単純な文字探索課題 (宮谷他, 1994) と同様、記憶負荷にともなう Cz 優勢の陰性シフトが出現した。

ERP における視覚負荷効果については、特に頭皮上分布に関して実験間で異なる結果が得られている。単純な文字探索課題を用いた研究では、後頭部から後部側頭部にかけて大きな視覚負荷効果が出現し、中心部や前頭部の ERP にはあまり変化がないとする報告 (宮谷, 1992; Ritter et al., 1988) と、中心部でも後頭部と同程度の視覚負荷効果を示す報告 (宮谷他, 1994; Wijers, Okita, Mulder, Mulder, Lorist, Poiesz, & Scheffers, 1987) がある。また、色選択と組み合わせた文字探索課題 (以後、複合探索課題) では、視覚負荷効果は中心部から前頭部にかけて優勢に出現した (宮谷, 1998)。

以上の結果から、記憶探索過程に比べ、視覚探索過程は標的の定義方法などの影響を受けやすいこと、複合探索課題では ERP の視覚負荷効果と記憶負荷効果は類似した頭皮上分布を示すことが推測できる。これらは、二つの探索過程がどのような脳の神経活動に支えられるかは課題の性質によって異なることを示唆する。つまり、単純な文字探索課題では二つの過程にそれぞれ異なる神経活動がかかわっているのに対し、複合探索課題では、二つの過程が同一の神経活動によって支えられるように変化する可能性がある。しかし、複合探索課題で記録された ERP について、視覚負荷効果と記憶負荷効果を直接比較した研究はまだ行われておらず、二つの負荷効果が同じであるかどうかについて結論することはできない。そこで本研究では、色選択と文字探索を組み合わせた課題で視覚負荷と記憶負荷を変化させ、それらが ERP に及ぼす影響を同一被験者内で比較することを目的とした。

方 法

被験者 視力 (矯正視力を含む) の正常な 20—23 歳の右手利き成人 10 名 (うち男性 5 名) を被験者とした。

刺激と装置 パソコンの CRT (PC-KD853, NEC) 上に、アルファベット 5 文字を横一列に並べて呈示した。各文字の大きさは視角で 0.7 度×0.7 度 (観察距離 90 cm)、文字列全体の横幅は約 4.2 度であった。刺激は、黒い背景上に、緑色または赤色で表示した。

C, G, U, V を除くアルファベットからランダムに 1, 2, または 4 文字を選び、記憶セットとした。テスト刺激は、それ以外のアルファベットから異なる 5 文字をランダムに選んで作成した。テスト刺激が標的刺激の場合には、5 文字のどれかを、記憶セット内の 1 文字と交換した。

テスト刺激の 5 文字は、すべて同じ色で表示した。呈示時間を 300 ms、刺激間隔 (SOA) を 1700—2000 ms の範囲でランダムとし、160 刺激を連続して呈示した。

課題と条件 被験者は、あらかじめ覚えた文字があらかじめ指定された色で呈示された場合 (注目色標的の刺激、以後 AT 刺激) にスイッチを右手で押して反応した。テスト刺激が、注目色ではあるが標的文字が含まれていない場合 (注目色非標的の刺激、AN 刺激)、標的文字は含まれているが注目色でない場合 (無視色標的の刺激、IT 刺激)、および無視色で標的文字も含まない場合 (無視色非標的の刺激、IN 刺激) には、何も反応しなかった。

視覚負荷を 3 水準 (P1, P2, P5)、記憶負荷も 3 水準 (M1, M2, M4) で変化させたが、実験の実施時間を考慮し、条件数を減らすために、P1M2, P2M2, P5M2, P2M1, P2M4 の 5 負荷条件を設定した。視覚負荷の効果を調べるために記憶負荷の等しい P1M2, P2M2, P5M2 の 3 条件 (P1, P2, P5 と略す) を、記憶負荷の効果を調べるために視覚負荷の等しい P2M1, P2M2, P2M4 の 3 条件 (M1, M2, M4) を比較した。標的文字は、P1 条件では必ず文字列の中央に、P2 条件では文字列の両端のどちらかに、P5 条件では 5 文字のどこかに出現した。

試行中は、中央文字位置の上下に長さ 0.7 度の水平線分 (間隔は約 1 度) を常に呈示し、それに挟まれた領域を凝視位置とした。被験者には、凝視位置から眼を動かさずに刺激を観察すること、および反応はできるだけ正確かつ速やかに行うことを教示した。テスト刺激呈示後スイッチが押されるまでの時間を 1 ms 単位で測定した。

手続き 各実験系列の最初に、標的文字を注目色で呈示し、標的が出現する可能性のある位置について被験者に知らせた。1 実験系列を 160 試行で構成した。そのうち 20 試行 (12.5%) で AT 刺激、60 試行 (37.5%) で AN 刺激、20 試行で IT 刺激、60 試行で IN 刺激を呈示した。4 種類の刺激はランダムな順序で呈示した。

負荷に関する 5 条件をそれぞれ 2 系列ずつ実施し

た。まず、前半の5系列ですべての負荷条件を1系列ずつランダムな順序で実施し、後半の5系列で再度各負荷条件をランダムな順序で実施した。実験を通じて被験者の半数は緑色、残りの半数は赤色を注目色とした。

脳波の記録と分析 銀・塩化銀皿電極を用い、両耳朶連結を基準電極として、Fz, F4, Cz, C4, T4, Pz, P4, T6, Oz, O2の10部位から脳波を導出した。正中線を含む右半球からの記録に限定した理由は、記録装置のチャンネル数の制約で、前頭から後頭にかけて一定以上の密度で電極を配置するためにはどちらか一方の半球に限定する必要があったことと、右手の反応による運動関連電位の影響を小さくするためである。右眼窩上より垂直眼球電図(EOG)を、左右眼窩外側間で水平EOGを記録した。脳波とEOGは、脳波計(1A97A, NECメディカルシステムズ)を用いて、帯域通過周波数0.05—30 Hzで増幅した。刺激呈示前100 msから100 msの区間の脳波とEOGを、サンプリング周波数100 HzでAD変換(DR-F1, TEACを使用)し、刺激呈示前区間をベースラインとして各試行における振幅を算出した。誤反応およびいずれかのチャンネルで $\pm 100 \mu\text{V}$ (水平EOGでは $\pm 30 \mu\text{V}$)以上の振幅を記録した試行を除き、条件別に加算平均した。加算回数は、AT刺激で18—40回、AN刺激で51—112回、IT刺激で9—37回、IN刺激で34—101回であった。

ERPの条件差を統計的に分析するために、刺激呈示から1000 msの区間を20 msごとに区切って各区間の平均電位を求め、分散分析を実施した。このように多数の分散分析を実施すると、タイプIエラーの確率が増加することになる。そこで、自由度を(1, 9)として、2区間以上連続して有意な F 値が得られた場合にのみ、有意な効果が得られたと判断した。また、繰り返し測度の分散分析における分散・共分散の非等質性によるタイプIエラー確率の増加を避けるために、必要に応じてGreenhouse-Geisserの ϵ で自由度を調整した。有意水準は5%とした。多重比較には、チューキーのHSD検定を用いた。

結 果

反応時間と誤答率 負荷条件別にAT刺激に対する正反応時間の中央値、ミス率を求めた。負荷の種類にかかわらず、高負荷になるほど反応時間が長くなり、ミス率が大きくなった。P1, P2, P5条件の反応時間(10名の平均値がそれぞれ552.4 ms, 588.7 ms, 787.1 ms)について視覚負荷に関する1要因分散分析を行ったところ、主効果が有意であった($F(2, 18) = 49.87$, $\epsilon = 0.648$, $p < .001$, $P1 < P2 < P5$)。また、M1, M2, M4の3条件(それぞれ511.9 ms, 588.7 ms, 692.3 ms)について記憶負荷に関する分散分析を行っ

たところ、主効果が有意であった($F(2, 18) = 46.62$, $\epsilon = 0.986$, $p < .001$, $M1 < M2 < M4$)。ミス率(P1: 0.3%, P2: 3.0%, P5: 7.5%, M1: 0.0%, M2: 3.0%, M4: 4.3%)については、全く誤反応のない条件があり、データの散らばりの点で不適切であると思われたので、統計的分析は実施しなかった。AN刺激に対するフォールス・アラーム(FA)率(P1: 0.16%, P2: 0.49%, P5: 1.32%, M1: 0.16%, M2: 0.49%, M4: 0.78%)を開平変換した値について、反応時間と同様の分散分析を実施したところ、視覚負荷の主効果のみが有意($F(2, 18) = 5.60$, $\epsilon = 0.860$, $p < .05$; $P1 < P5$)であった。無視色刺激に対するFA率は、すべての条件で1%以下であった。

ERP P2M2条件で記録されたERP(部位はCz)の総加算平均波形を、刺激の種類別にFigure 1に示す。四つの波形のうちAT刺激に対するERPには、ほかにはみられない、Pz最大に分布する大きな陽性シフト(P3b)が出現した。PzにおけるAT刺激ERPの、刺激後300—1000 ms区間で最大の陽性電位を示した点をP3b頂点とし、その潜時と振幅を条件別に測定した。負荷の種類にかかわらず、高負荷条件で振幅は減衰し、潜時は延長した。振幅について視覚負荷および記憶負荷の効果を1要因分散分析によって調べたところ、視覚負荷の効果($F(2, 18) = 10.98$, $\epsilon = 0.950$, $p < .01$, $P1 > P5$, P1: 17.6 μV , P2: 14.0 μV , P5: 10.6 μV)も記憶負荷の効果($F(2, 18) = 16.10$, $\epsilon = 0.811$, $p < .001$, $M1 > M2$, $M1 > M4$, M1: 17.7 μV , M2: 14.0 μV , M4: 8.9 μV)も有意であった。潜時について同様の分析を行ったところ、視覚負荷の効果($F(2, 18) = 14.33$, $\epsilon = 0.629$, $p < .01$, $P1: 510 \text{ ms} < P2: 618 \text{ ms} < P5: 707 \text{ ms}$)も記憶負荷の効果($F(2, 18) = 19.68$, $\epsilon = 0.756$, $p < .001$, $M1: 521 \text{ ms} < M2: 618 \text{ ms} < M4: 743 \text{ ms}$)も有意であった。

無視色刺激のERPには、標的の有無による違いは

Figure 1. Effects of stimulus type on the ERPs at Cz. ERPs to the attended target (thick line), the attended non-target (dotted line), the ignored target (thin line), and the ignored non-target (chain line) are superimposed.

ほとんど観察できない。区間平均電位について部位(10)×刺激タイプ(標的, 非標的)×負荷条件(P1M2, P2M2, P5M2, M1P2, M4P2)の分散分析を実施し, 刺激タイプの効果を調べた結果, 420—460 ms 区間と 500—560 ms 区間で IT 刺激 ERP が IN 刺激 ERP より陽性であった。しかし, 刺激タイプの効果が最大となる部位や負荷条件は区間によって異なり, 効果の出現の仕方は一貫しなかった。

非標的刺激 ERP における注意効果 Figure 1 の非標的刺激に対する ERP を調べると, AN 刺激 ERP は IN 刺激 ERP に比べ, 刺激後 200 ms 以降大きく陰性方向にシフトし, その差は 500 ms あたりまで持続している。この傾向は, AT 刺激でも同様である。区間平均電位について部位(10)×注意(注目色, 無視色)×負荷条件(P1M2, P2M2, P5M2, M1P2, M4P2)の分散分析を実施し, 注意の有無の効果を調べた結果, 180—240 ms 区間で部位×注意の交互作用, 260—440 ms 区間で注意の主効果が有意であった。また, 300—380 ms 区間では部位×注意の交互作用が有意であった。180—240 ms 区間では, T6, Oz, O2 で, AN 刺激 ERP が IN 刺激 ERP より陰性であった。また 200—240 ms 区間では, Fz と F4 で, AN 刺激 ERP が IN 刺激 ERP より陽性であった。300—380 ms 区間では, 頭部全体で AN 刺激 ERP が IN 刺激 ERP より陰性であり, その傾向は, Cz から前頭部にかけて強かった。

Figure 2. Grand averaged ERPs at Cz and O2 elicited by the attended and ignored non-target stimuli. The ERPs for three display conditions (left panel) and three memory load conditions (right panel) are superimposed.

非標的刺激 ERP における負荷効果 Figure 2 に非標的刺激に対する ERP を示す (Cz と O2 のみ)。上半分が AN 刺激, 下半分が IN 刺激に対する波形である。また, 左半分が視覚負荷, 右半分が記憶負荷に関する 3 条件の重ね書きである。AN 刺激における視覚負荷効果をみると, O2 では, 刺激後 240 ms あたりから負荷が大きいほど波形が陰性方向にシフトし, その違いは刺激後約 900 ms まで持続している。Cz では, 視覚負荷効果の出現の仕方がやや異なる。まず潜時 200 ms 付近から負荷条件による波形の違いが現れるが, 約 380 ms までは P2 条件と P5 条件の波形がほぼ一致し, その 2 条件の波形が P1 条件に比べて陰性である。ところが, 刺激後 400 ms あたりからは, P2 条件と P5 条件の間にも差が現れ, その差は刺激後 700 ms すぎまで持続している。

AN 刺激 ERP における記憶負荷の効果をみると, O2 では刺激後 200 ms あたりから小さな条件差が出現しているが, 負荷条件によるはっきりとした波形の違いが現れるのは, Cz でも O2 でも刺激後 400 ms 前後からであり, その後 900 ms あたりまでの波形は, 記憶負荷が大きいほど陰性方向へシフトしている。

IN 刺激に対する ERP では, 負荷による波形の違いは非常に小さい。O2 の 450—600 ms 区間で P1 条件の波形が他の 2 条件に比べて陽性であり, Cz の 300—500 ms の区間で, M1 条件の波形が他の 2 条件に比べて陰性である。

AN 刺激 ERP に出現した負荷効果を詳しく調べるために, 高負荷条件 (P2, P5 あるいは M2, M4) から低負荷条件 (P1, M1) の波形を引き算して求めた差波形を Figure 3 に示した。Cz の視覚負荷効果が, P2—P5 条件間に差のない前半部分と, 両条件の波形が分離する後半部分に分かれること以外に, 2 種類の負

Figure 3. Difference ERPs at Cz and O2 representing the effects of display (left panel) and memory (right panel) load. These waveforms are obtained by subtracting the attended non-target ERPs for low display (P1) or memory (M1) condition from those for high display (P2, P5) or memory load (M2, M4) conditions.

Figure 4. Effects of display and memory load on the ERPs elicited by the attended non-target stimuli. Horizontal bars show the epochs where the load effects were statistically significant.

荷効果に次のような違いがあることがわかる。まず、Czにおける負荷効果の持続時間である。最大振幅ではほとんど差がない(P5-P1: $-6.0 \mu V$, 潜時 530 ms; M4-M1: $-5.7 \mu V$, 560 ms)にもかかわらず、視覚負荷効果は記憶負荷効果に比べて約 200 ms 早く終結している。次は、O2 波形で最大振幅を示す潜時である。記憶負荷効果は Cz 波形よりやや早く 500 ms で最大($-3.0 \mu V$)となるのに対し、視覚負荷効果は Cz 波形よりも遅く 650 ms で最大($-3.9 \mu V$)となる。

以上の観察を統計的に確認するために、非標的波形の区間平均電位について、注意の有無および部位別に、各負荷に関する 1 要因分散分析を実施した。Figure 4 に AN 刺激 ERP において有意な負荷効果が得られた区間を示す。Cz の視覚負荷効果が二つの潜時帯に分かれて出現していること、Fz や Cz では視覚負荷に比べて記憶負荷の効果が長く持続し、逆に後部部位(T6, Oz, O2)では、記憶負荷効果に比べて視覚負荷効果の持続時間が長いことがわかる。IN 刺激 ERP では、T6 の 500–540 ms, Oz の 520–560 ms, O2 の 480–560 ms 区間で有意な視覚負荷効果が得られた。これらの区間では、P1 条件の波形が他の 2 条件に比べて陽性で、P2–P5 条件間に差はなかった。有意な記憶負荷効果を示した部位、区間はなかった。

次に、各被験者の P5–P1, M4–M1 波形について、Cz における 2 種類の負荷効果が最大となる 530–560 ms 区間と、O2 における視覚負荷効果が最大となる 640–660 ms 区間の平均電位を部位別に求めた(Figure 5)。530–560 ms 区間では、P5–P1 波形と M4–M1 波形の頭皮上分布はよく似ているが、640–660 ms 区間では、後部部位の P5–P1 波形の振幅が、M4–M1 波形に比べて大きい。しかし、視覚負荷効果と記憶負荷効果の頭皮上分布の違いは、統計的には支

Figure 5. Mean amplitudes of difference ERPs representing display (P5–P1) or memory (M4–M1) load effects for each electrode site. Left and right panels indicate the mean amplitudes in the two different latency ranges shown in each panel.

持されなかった。すなわち、ベクトル長によって規準化(McCarthy & Woods, 1985)した値に対して区間(2)×負荷の種類(2)×部位(10)の分散分析を行ったところ、有意な交互作用は得られなかった。

考 察

本研究は、色選択と文字探索を組み合わせた課題で記録される ERP の視覚負荷効果と記憶負荷効果を比較する目的で実施した。視覚負荷効果は、宮谷(1992)や Ritter et al. (1988) のような後部優勢な分布を示さず、Cz で最大であった。一方、記憶負荷効果については、宮谷他(1994)や Okita et al. (1985) と同様の Cz 優勢な分布が得られた。この結果、本実験では 2 種の負荷効果の頭皮上分布は類似し、統計的有意差は得られなかった。しかし、以下の理由から、見かけ上の類似にかかわらず、本実験においても二つの負荷効果は異なる現れ方をしたと考えるのが妥当であろう。

まず、視覚負荷効果は、後頭部や後部側頭部において、記憶負荷効果に比べて早く出現し、持続時間が長かった。それに対し、記憶負荷効果は、中心部から前頭部にかけて、視覚負荷効果に比べて長く持続していた。また、記憶負荷効果が最大になるのは Oz に比べて Cz でやや遅いのに対し、視覚負荷効果は、逆に、Cz に比べて Oz で約 100 ms 遅れて最大となった。記憶負荷による ERP の変動は、条件差の出現潜時や時間経過からみて、Cz を中心とする一つの陰性シフト(これを中心部探索電位と呼ぶ)が頭皮上全体で記録されたものであると考えられる。

一方、本実験で観察された視覚負荷による ERP 変動は、条件差の出現の仕方や時間経過の異なる三つの陰性電位が重複したものであると考えられる。まず、注目刺激 ERP では、潜時 200 ms あたりから、Cz に視覚負荷効果が現れた。Figure 2 をみると、この効果は P1 波形にみられる小さな陽性のくぼみに基づくよ

うに思える。しかし、図示してはいないが、この陽性のくぼみはPz波形で最も顕著であるにもかかわらず、条件差はCzでのみ有意であった。また、単純文字探索課題を実施して本実験と同様の視覚負荷効果を報告した宮谷・赤井(1993)の波形では、このようなくぼみは明瞭でない。これらのことから、この区間の視覚負荷効果は、中心部に比較的限定的に出現する陰性電位によると考えられる。この効果を詳しく調べると、P1条件と他の2条件間に差があり、P2-P5条件間には差がない。P2条件とP5条件を比べると、探索対象の数は後者で多いが、文字列の左端から右端まで全体的に注意を配分しておかなければならないことは共通している。したがって、この潜時帯の視覚負荷効果は、被験者の空間的注意の範囲を反映していると考えられる。

その後、Czでは、記憶負荷効果とよく似た視覚負荷効果が出現している。効果が最大となる時点も530msで、記憶負荷効果(560ms)とほぼ同じであった。後部部位でも視覚負荷によるERPの陰性シフトが観察できるが、視覚負荷効果の最大時点(刺激呈示後650ms)は、中心部(530ms)に比べて、100ms以上遅い。したがって、本実験では、視覚負荷による潜時300ms以降のERPの変化として、Cz最大の中心部探索電位と、後部部位で大きく出現する陰性電位(後部探索電位)の二つが、同潜時帯に重複して出現したと考えられる。

ERPにおける視覚負荷効果の頭皮上分布が実験間で一致しない原因は、これら陰性電位の重複の仕方が異なることであると考えられる。後部探索電位のみが出現する場合には、宮谷(1992)やRitter et al.(1988)のような後部優勢な分布が得られるが、それに中心部優勢な2種の陰性電位が重複すると、頭皮上分布は前寄りに変化する。空間的注意に関連する陰性電位のみが重複した場合には、Fzにおける視覚負荷効果はほとんど認められない(宮谷・赤井, 1993; 宮谷他, 1994)。それに中心部探索電位が重複すると、本実験のようにFzにおいてPzよりも大きな視覚負荷効果が出現するようになる。

以上のことから、文字探索を支える心理的過程について、次のような推論ができる。短潜時でCzを中心とする比較的限られた領域に出現する陰性電位は、初期選択過程の有無によって出現潜時がほとんど変化せず、無視刺激に対するERPには出現しない。この結果は、この電位が、初期選択後の探索作業に必要な処理資源の迅速な割り当てを反映している可能性を示唆する。

視覚探索課題以外に、心的回転課題を遂行中の被験者からも、本実験で記録された後部探索電位と類似の電位変化が記録されている(たとえば、Peronnet & Farah, 1989)。心的回転とは、内的な視覚表象の操作

であり、それは、視覚的符号を用いた作業である。また、頭頂・後頭・側頭後部優勢な頭皮上分布は、人間の視覚系のうち、大脳後頭部の一次視覚野から側頭葉下部皮質に向かう腹側経路と頭頂葉に向かう背側経路(藤田, 1994)と一致している。酒井(1997)によれば、記憶された情報の解読(復号化decoding)のために、外的刺激の符号化(encoding)で用いられるのと同じ特徴分析装置が使われる。これらを考え合わせると、視覚探索課題で記録される後部探索電位が、視覚系の活動を基礎とする、視覚的符号に基づく、標的の表象と外的刺激の表象の比較照合処理を反映するのではないかと推測することができる。

一方、中心部探索電位が反映する心理過程を推測するのに、ワーキングメモリに関する多重構成モデル(Baddeley, 1986)が手がかりとなる。このモデルでは、ワーキングメモリは、音声的符号に基づく言語的情報の一時的保持と処理を行う音韻ループ、視空間的材料を画像的符号によって扱う視空間スケッチパッドという二つのサブシステムと、これら二つのサブシステムの働きを調整する中央実行系で構成される。視覚探索における比較照合過程は、ワーキングメモリの機能に支えられていると考えられる。視覚的符号に基づく処理を反映する後部探索電位を視空間スケッチパッドの活動と対応させると、中心部探索電位は、もう一つのサブシステムである音韻ループの活動に関連するのではないかと推測できる。

このような対応づけによって、複合探索課題において前頭部で大きな視覚負荷が得られることを説明できる。刺激の一時的表象と標的の表象との比較照合が主として視覚的符号によって行われる場合には、ERPで記録されるのは後部探索電位のみであり、後部部位優勢な視覚負荷効果の分布が得られる。ところが、文字探索が色選択と組み合わせられた課題では、初期選択過程の存在によって比較照合過程の開始が遅れる。そのため、呈示時間が短い実験事態では視覚的符号の利用が困難となり、音声的符号への依存の程度が増して中心部探索電位が大きく出現し、中心部から前頭部にかけても大きな視覚負荷効果が得られるようになると考えられる。

しかし、中心部探索電位と音韻ループとの関連づけを直接支持する実験データはまだない。現在までに、音韻ループを反映するERP変動として、左半球前頭部に現れる緩徐な陰性波(Ruchkin, Berndt, Johnson, Ritter, Grafman, & Canoune, 1997)や、刺激後200-300ms潜時帯で中心部から前頭部にかけて生じる右半球優勢な陰性シフト(Martín-Loeches, Schweinberger, & Sommer, 1997)が報告されている。前者は遅延見本合わせ課題におけるS1に対するERPの変化、後者は聴覚刺激に対するERPの非関連スピーチ効果による変動を観察したもので、本実験とは課題の

性質が異なる。Okita (1989) は、聴覚刺激を用いた記憶探索課題で中心部優勢な探索陰性電位を記録しているが、その電位と視覚刺激を用いた本実験の探索電位が同じものであるかどうかは現在のところ不明である。さまざまなワーキングメモリ課題で記録されるERP変化の関係を今後検討することで、探索電位の反映する心理的過程や、ワーキングメモリを支える脳内活動についての知見が得られるであろう。

本実験では、ERP上の視覚負荷効果と記憶負荷効果はよく似ていたが、それでも効果の持続時間という点からみて、前頭部においては記憶負荷効果が視覚負荷効果に比べて大きく出現したといえる。これが、視覚負荷効果には後部探索電位が重なっているためであるのか、中心部探索電位そのものの出現の仕方が異なるのかについて、今後検討する必要がある。もしも後者であるとなると、中心部探索電位そのものが複数の下位成分で構成されており、視覚負荷が増加した場合と、記憶負荷が増加した場合では、それぞれの下位成分が反映する処理モジュール間の関連の仕方が異なることを示唆する。

本実験では、前頭部位では200—240 ms区間で注目色刺激ERPが無視色刺激ERPよりも陽性になり、後頭部位では逆に、同潜時帯の注目色刺激ERPが無視色刺激ERPに比べて陰性であった。これは、色選択と記憶探索を組み合わせたWijers, Mulder, Okita, Mulder, & Scheffers (1989)と一致する。また、本実験では無視色ERPである程度の時間持続する視覚負荷効果が得られ、文字の大きさを選択手がかりとしたWijers, Mulder, Okita, & Mulder (1989)も無視刺激ERPにおける記憶負荷効果を観察している。一方、無視刺激ERPについて、後頭部N230の振幅が視覚負荷によって増大すること(Wijers et al., 1987)や標的刺激に対するN2が非標的刺激のN2よりも振幅が大きいこと(標的効果, Wijers et al., 1987; Wijers, Mulder, Okita, Mulder, & Scheffers, 1989)が報告されているが、本実験では、それは再現されなかった。

無視刺激ERPに出現するこれらの条件差は、行動測定では得られないという意味でも、人間の情報処理過程についての重要な情報を含んでいる。Wijers et al. (1987)は、後頭部N230の振幅は初期の自動的な刺激符号化過程を、無視刺激にみられるN2の標的効果は自動的な刺激分類過程を反映していると考えている。負荷効果については、探索過程が自動的に始まり、選択手がかりに関する情報が十分に利用できるようになった段階で探索が終了した(Wijers, Mulder, Okita, & Mulder, 1989)とも考えられるし、加算試行の中に無視刺激に対しても探索を行った試行があった可能性も指摘できる。しかし、これらの条件差は、不安定で、課題の性質によって出現したりしなかったりする。たとえば、Wijers, Mulder, Okita, Mulder, &

Scheffers (1989)では、標的効果は、記憶負荷が小さい条件では得られたが、記憶負荷が大きくなると消失した。また、凝視点を中心とする円周上に文字を配置した刺激を用いた宮谷(1998)では、無視色刺激ERPにおける視覚負荷効果は出現しなかった。課題に無関連な刺激におけるさまざまな実験的操作の効果の出現の有無を決める要因については、さらに検討が必要である。

引用文献

- Baddeley, A. 1986 *Working memory*. Oxford: Oxford Press.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. 1989 Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, **96**, 433-458.
- Fisk, A. D., & Rogers, W. A. 1991 Toward an understanding of age-related memory and visual search effects. *Journal of Experimental Psychology: General*, **120**, 131-149.
- Flach, J. M. 1986 Within-set discriminations in a consistent mapping search task. *Perception & Psychophysics*, **39**, 397-406.
- 藤田一郎 1994 大脳視覚野の生理学 川人光男・行場次朗・藤田一郎・乾 敏郎・力丸 裕(編) 岩波講座 認知科学3 視覚と聴覚 岩波書店 Pp. 41-88.
- (Fujita, I.)
- Gevins, A., & Cuttolo, B. 1993 Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **87**, 128-143.
- Martin-Loeches, M. Schweinberger, S. R., & Sommer, W. 1997 The phonological loop model of working memory: An ERP study of irrelevant speech and phonological similarity effects. *Memory & Cognition*, **25**, 471-483.
- McCarthy, G., & Wood, C. C. 1985 Scalp distributions of event-related potentials: An ambiguity associated with analysis of variance models. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **62**, 203-208.
- 宮谷真人 1992 視覚的探索課題で出現する2種類の探索陰性電位について 生理心理学と精神生理学, **10**, 23-33.
- (Miyatani, M. 1992 Two varieties of search negativities recorded in visual search tasks. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, **10**, 23-33.)
- 宮谷真人 1998 色に基づく選択と組み合わせた文字探索課題遂行中の視的探索陰性電位 広島大学教育学部紀要第一部(心理学), **47**, 9-18.
- (Miyatani, M. 1998 Visual search negativities during a letter search task combined with selection by color. *Bulletin of the Faculty of Education, Hiro-*

- shima University (Psychology Division), 47, 9-18.)
- 宮谷真人・赤井俊幸 1993 マッピング条件が異なる視覚的探索課題における事象関連電位 広島大学教育学部紀要第一部 (心理学), 42, 1-10.
(Miyatani, M., & Akai, T. 1993 Event-related potentials in varied- and consistent-mapping visual search. *Bulletin of the Faculty of Education, Hiroshima University (Psychology Division)*, 42, 1-10.)
- 宮谷真人・前堂志乃・赤井俊幸 1994 視覚的探索課題における空間負荷と記憶負荷が事象関連電位に及ぼす影響 心理学研究, 65, 303-311.
(Miyatani, M., Maedo, S., & Akai, T. 1994 Effects of display and memory load on event-related potentials during a visual search. *Japanese Journal of Psychology*, 65, 303-311.)
- Okita, T. 1989 Within-channel selection and event-related potentials during selective auditory attention. *Psychophysiology*, 26, 127-139.
- Okita, T., Wijers, A. A., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. 1985 Memory search and visual spatial attention: An event-related brain potential analysis. *Acta Psychologica*, 60, 263-292.
- Peronnet, F., & Farah, M. J. 1989 Mental rotation: An event-related potential study with validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, 9, 279-288.
- Ritter, W., Simson, R., & Vaughan, H. G., Jr. 1988 Effects of the amount of stimulus information processed on negative event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 69, 244-258.
- 酒井邦嘉 1997 心にいどむ認知脳科学 岩波書店 (Sakai, K.)
- Ruchkin, D. S., Berndt, R. S., Johnson, R., Jr., Ritter, W., Grafman, J., & Canoune, H. L. 1997 Modality-specific processing streams in verbal working memory: Evidence from spatio-temporal patterns of brain activity. *Cognitive Brain Research*, 6, 95-113.
- Schneider, W., & Fisk, A. D. 1984 Automatic category search and its transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 1-15.
- Shiffrin, R. M. 1988 Attention. In R. C. Atkinson, R. J. Herrnstein, G. Lindzey, & R. D. Luce (Eds.), *Stevens' handbook of experimental psychology*. Vol. 2. 2nd ed. New York: Wiley. Pp. 739-781.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. 1980 A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., & Mulder, L. J. M. 1989 Event-related potentials during memory search and selective attention to letter size and conjunctions of letter size and color. *Psychophysiology*, 26, 529-547.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Okita, T., Mulder, L. J. M., & Scheffers, M. K. 1989 Attention to color: An analysis of selection, controlled search and motor activation, using event-related potentials. *Psychophysiology*, 26, 89-109.
- Wijers, A. A., Okita, T., Mulder, G., Mulder, L. J. M., Lorist, M. M., Poiesz, R., & Scheffers, M. K. 1987 Visual search and spatial attention: ERPs in focused and divided attention conditions. *Biological Psychology*, 25, 33-60.

——1999. 9. 22 受稿, 2001. 1. 13 受理——