

視覚探索における文脈記憶の事象関連電位による測定

小野史典・白石舞衣子・吉村奈緒・宮谷真人

Contextual memory and event-related potentials in the visual search task

Fuminori Ono, Maiko Shiraiishi, Nao Yoshimura, and Makoto Miyatani

本研究では、視覚探索中に文脈記憶によっておこる注意の誘導を、行動指標(反応時間)と生理的指標(事象関連電位)の2つの方法で測定した。被験者は、妨害刺激“L”の中から標的“T”を探索した。その際、半数の試行では、特定の刺激配置を繰り返し呈示し、残りの試行では毎試行新規な刺激配置を呈示した。その結果、行動指標では、同じ配置を繰り返し呈示した試行の方が、毎試行新規な配置を呈示した試行よりも、標的探索が速くなった。この結果は、視覚探索中に獲得された文脈記憶が、選択的注意を標的に誘導していたことを示している。一方、生理的指標では、同じ配置を繰り返し呈示した試行と、毎試行新規な配置を呈示した試行に、違いは見られなかった。

キーワード: 文脈手がかり, 選択的注意, 事象関連電位

目的

視覚的な対象認知において、物体の置かれている空間的位置(視覚的文脈)は重要な役割を果たしている。例えば、われわれがレストランで空席を探すときは床の上を探し、決して天井や壁を探すことはない。このような対象認知における文脈の重要性は、日常場面の写真や文字を用いた研究から明らかにされている。Biederman(1972)は、分割攪拌することによって文脈を壊した日常場面の写真は、通常の写真よりも認知しにくいことを示した。しかし、こうした従来の研究は、主に被験者の既知知識や視覚的経験を利用した対象を用いて調べられてきたため、重要な変数である視覚的文脈を統制することが困難であった。

この問題点を克服するために、Chun & Jiang (1998)は、偶発学習事態を用いることによって被験者の視覚的文脈を統制する手法を開発し、視覚的注意を誘導する視覚的文脈記憶の存在を明らかにした。彼らはこれを文脈手がかり(contextual cueing)と呼んだ。彼らの実験では、アルファベット文字を刺激として使用し、被験者は数百試行の視覚探索課題を行った。その際、半数の試行では毎試行異なる刺激配置を呈示し、残りの試行では同じ刺激配置を繰り返し呈示した。その結果、毎試行異なる刺激配置を呈示する試行に比べて、同じ刺激配置を繰り返し呈示する試行の方が、標的が速く探索されることがわかった。このとき、被験者は一貫した刺激配置が一部の条件で繰り返し呈示されていたことに気づかず、探索実験後にその配置を再認できなかったことから、Chun & Jiang

(1998)は、文脈手がかりは潜在的な記憶であると述べている。

Olson, Chun, & Allison (2001)は、視覚探索中に文脈手がかりによって注意誘導が生じている際の脳活動を事象関連電位(Event-Related Potentials: ERP)で測定した。彼らは、難治性てんかんの患者の発作の発生源を特定する目的で頭蓋内に直接埋め込まれた電極を利用した。文脈手がかりの効果が得られた患者のERPを調べたところ、V1やV2において、刺激呈示後200ms付近に出現する陰性電位の振幅が、文脈手がかりによって増大していた。

ERPは、視覚処理における選択機構を探るための魅力的なツールである(河西・熊田, 2003)。もしも、Olson et al. (2001)の結果が、脳内電極による記録だけでなく、頭皮上電極による測定で再現できれば、視覚探索における文脈手がかりの効果について調べるための有効な測度になると期待できる。そこで本実験では、大学生を被験者として、視覚探索中に文脈手がかりによって注意誘導が生じている際のERPを頭皮表面の電極により記録し、Olson et al. (2001)と同様の結果が得られるかどうかを調べた。

方法

被験者 正常な視力(矯正を含む)、および色覚を有する成人8名(男性3名、女性5名、年齢：22-33歳、全員右利き)。全ての被験者は実験の目的を知らなかった。

装置 実験の制御、および被験者の反応の記録にはPC/AT互換機とフレームバッファ(Cambridge Research Systems VSG2/5)を用い、刺激はCRTディスプレイ(SONY GDM-19PS)上に呈示した。観察距離は約60cmとした。

刺激 標的として右または左に90度回転させたTを1個、妨害刺激として回転(0, 90, 180, 270度)させたLを11個用いた。Jiang & Chun (2001)と同様に、Lの線分の接合部分に6ピクセルずれを設けた。

Figure 1は本研究で用いた刺激の例である。全ての刺激の大きさは視角 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、探索画面の大きさは横 25° × 縦 18.5° とした。刺激は 12×8 マスの仮想格子上に呈示された。刺激の色は赤、青、黄、緑の4色であった。画面の背景は灰色とした。それぞれの刺激は直線上に並ばないように 0.1° から 0.3° の範囲で上下、左右に無作為にずらして配置された。

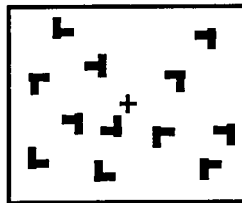


Figure 1. Schematic example of the stimuli used in this experiment.

標的位置の確率の効果をなくすために、実験の始めに1ブロック分の標的位置として24の位置を無作為に選択した(Jiang & Chun, 2001と同様)。全てのブロックにおいて、同じ24の標的位置を使

用した。この標的位置の繰り返しは全ての条件において一貫していた。すなわち、統制条件以外の条件においていかなる学習も、標的位置そのものの学習によるものではないといえる。標的の向きはいずれの配置とも相互に関係しないように無作為に選ばれた。標的の向きは試行ごとに無作為に決められ、1ブロック内の右向きと左向きのTは同数とした。

手続き 被験者がスペースキーを押すと試行が始まり、凝視点が500ms間呈示された。その1s後に標的を含む12個の刺激が呈示された。被験者の課題は、標的を探索し、その方向に対応するキーをできるだけ速く正確に押すことであった。刺激は被験者が反応するまで呈示された。被験者には、呈示される刺激の中に常に標的が含まれることを教示した。呈示される刺激配置は、以下に述べる2条件があったが、被験者はこの2条件については一切知らされていなかった。

実験計画は2×5の2要因計画で、いずれも被験者内要因であった。第1の要因は繰り返し配置の要因で、次の2条件であった。(1)統制条件: 妨害刺激の配置が毎試行無作為に生成された。標的位置(12種類)はどの試行においても新しい妨害刺激の配置と組み合わせられた。(2)繰り返し条件: 妨害刺激の配置(12種類)が実験の始めに一度作られた。この妨害刺激の配置は、特定の標的位置と組み合わせられ、実験を通して繰り返し呈示された。繰り返し条件において、ある配置が繰り返される場合は、刺激の位置だけでなく、妨害刺激の形も一貫していた。また、刺激の位置に持たせられずとも、それぞれの繰り返し配置ごとに一貫していた。

第2の要因は累積試行数の要因で、全600試行を5つの期間に分けた。1期間は5ブロックからなり、1ブロックは24試行とした。実験は1ブロック24試行(12:統制条件, 12:繰り返し条件)を25ブロック繰り返した。1ブロック内の試行順番は無作為に決められた。実験の始めには24試行の練習試行を行った。練習において使用した刺激配置は実験中には使用しなかった。約50分の実験中、被験者は自由に休憩をとることができた。

脳波の記録と分析 銀・塩化銀電極を装着した電極キャップ(Physio-Tech Quiki-Cap)を用い、国際10-20法によるFp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, Fz, Cz, Pzから脳波を記録した。左右眼窩外側間で水平EOGを、Fp1と左眼窩下側に置いた電極間で垂直EOGを記録した。脳波とEOGは、デジタル脳波計(日本光電 EEG-1100)を用いて増幅した。記録条件は、基準電極を両耳朶(オフライン処理)、帯域通過周波数を0.08-30Hz、サンプリング周波数を1kHzとした。刺激呈示前100msから呈示後1000ms区間の脳波について、呈示前区間をベースラインとして条件別に加算平均処理を行った。その際、誤答試行と、いずれかのチャンネルで $\pm 100\mu\text{V}$ 以上の振幅を記録した試行のデータは、加算しなかった。ERPの分析には繰り返し測度の分散分析を用いた。分散・共分散行列の非対称性に起因するタイプIエラーの確率の増加(Vasey & Thayer, 1987)に対応するために、必要な場合にはGreenhouseとGeisserの ϵ (Jennings & Wood, 1976)で自由度を調整した。

結果

行動測定 誤答率は1.45%と極めて低く、繰り返し配置の要因の主効果、期間の要因の主効果、交互作用(繰り返し配置×期間)はいずれも有意ではなかった。Figure 2は、それぞれの期間での各条件の正答試行の平均反応時間を示したものである。正答試行の平均反応時間について繰り返し配置

(統制条件, 繰り返し条件)×期間(1-5)の 2 要因分散分析を行ったところ, 有意な繰り返し配置の主効果($F(1, 7)=12.32, p<.01$), 期間の主効果($F(4, 28)=12.28, p<.001$)が認められた. 両要因の交互作用は傾向差が認められた($F(4, 28)=2.39, p<.10$). すなわち繰り返し条件は統制条件に比べて有意に反応時間が短かった. さらに 1 ブロックと 25 ブロックの反応時間について 2 要因分散分析を行ったところ, 繰り返し配置と期間の有意な交互作用が認められた($F(1, 7)=15.46, p<.01$). これは文脈手がかりが学習の後に獲得されたことを示している.

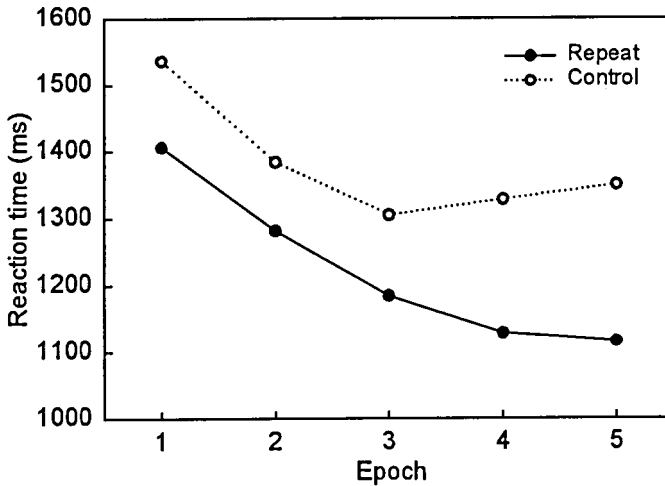


Figure 2. Mean correct reaction times as a function of condition and epoch for this experiment.

ERP 繰り返し配置に関する条件別の ERP 波形を Figure 3 に示した. 繰り返し条件(図では Repeat と表示)と統制条件(Control と表示)の波形はよく似ており, 左前頭部(Fp1, F7)以外の部位では, ほとんど重なっている. 刺激呈示後の ERP について, 20 ms ごとの 50 区間別に平均電位を求め, 各区間における繰り返し配置の要因の効果の有無を, 繰り返し配置×記録部位の分散分析によって調べた. その結果, 繰り返しの主効果または交互作用が有意である区間はなかった. Fp1 と F7 において, 刺激後 400 ms あたりから繰り返し条件の波形が統制条件の波形よりも陰性であるのは, 1 名の被験者が示す大きな条件差が総加算平均波形に残存したものであり, 被験者間で一貫したものではなかった.

反応時間で得られた繰り返し配置の主効果は, ERP では観察できなかった. そこで, 反応時間における期間の主効果に対応する効果が ERP で出現しているかどうかを調べるため, 繰り返し条件と統制条件の 300 試行を, 前半(1-100 試行), 中間(101-200 試行), 後半(201-300 試行)に分け, 期間ごとに加算平均波形を計算した(期間の分割の仕方が反応時間と異なるのは, ERP の十分な加算回数を確保するためである). Figure 4 には繰り返し条件の期間別総加算平均波形を, Figure 5 には統制条件の期間別総加算平均波形をそれぞれ示す. Figure 4 も Figure 5 も, ほぼ同様の期間効果を示している. 前頭部から中心部の波形では, 刺激後 300-500 ms の区間で, 中間期間および後半期間の波形が

前半期間の波形に比べて陰性になっている。統制条件(Figure 4)では、その後3期間の波形が短時間重なった後、再び期間効果が出現し、後半期間波形が、他の2期間の波形に比べて陰性である。繰り返し条件(Figure 5)では、前頭部における後半期間波形の陰性シフトが特に顕著である。

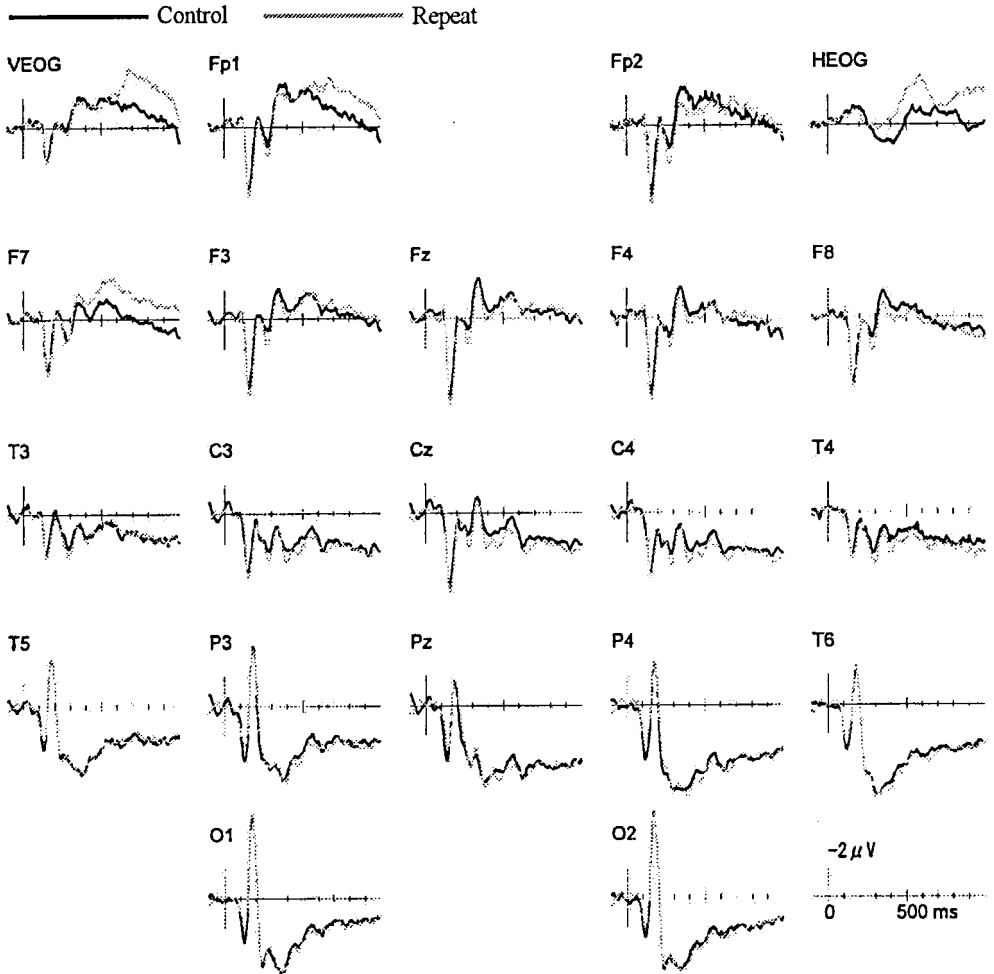


Figure 3. Grand-averaged ERPs for visual displays in the repeat and control conditions.

これらの視察を統計的に確かめるために、刺激後 350-500 ms 区間、および 650-800 ms 区間の平均振幅を計算して、繰り返し配置×期間×部位の分散分析を実施した。その結果、350-500 ms 区間では、期間×部位の交互作用が有意($F(2, 38)=3.45$, $\epsilon=0.083$, $p<.05$)であった。部位別に期間効果について調べたところ、Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, F7, F8, Fz, Cz では、中間期間および後半期間の波形が、前半期間の波形に比べて陰性であった(各部位の分析で得られた F 値等については省略する)。650-800 ms 区間でも、期間×部位の交互作用がほぼ有意($F(2, 38)=3.14$, $\epsilon=0.065$, $p<.07$)であったので、

部位別に期間効果について調べた。Fp1 では、後半期間の波形が、他の 2 期間の波形に比べて陰性であったが、他の部位では、期間の単純主効果は有意でなかった。

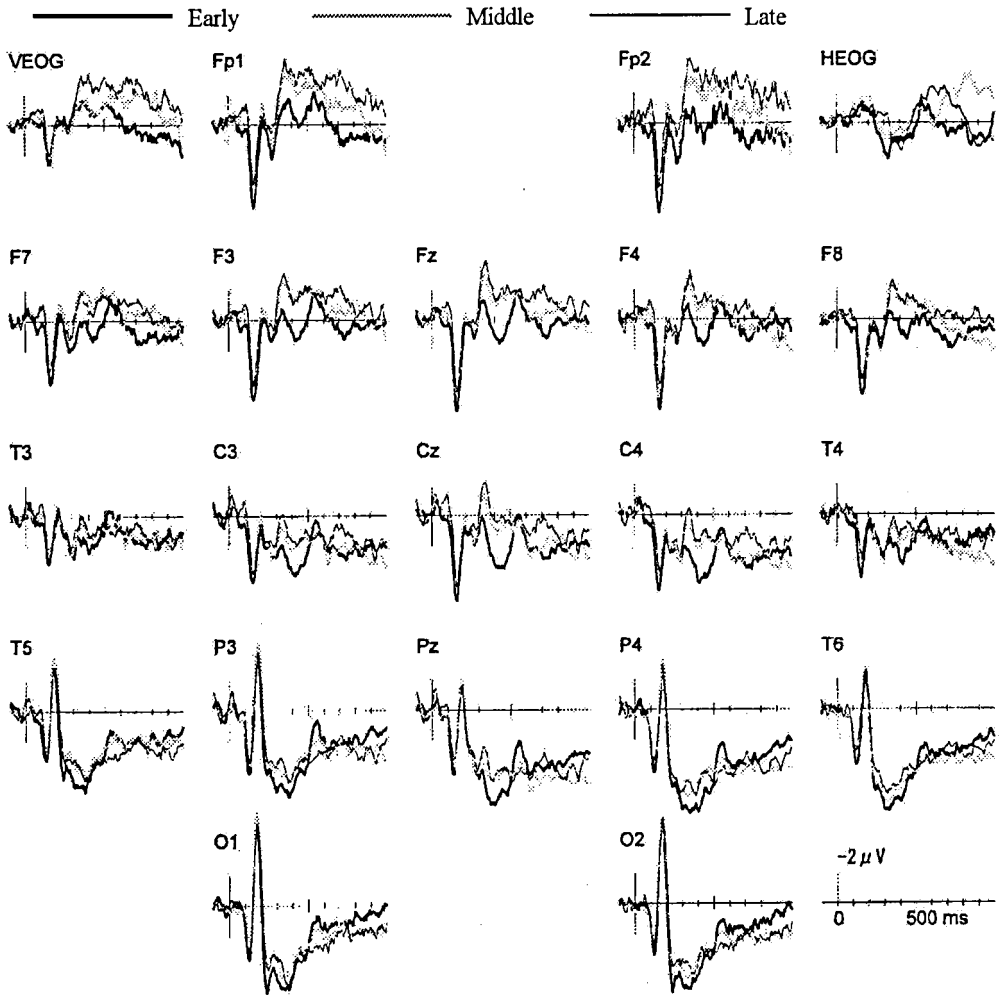


Figure 4. Grand-averaged ERPs as a function of epoch in the control condition.

考察

本実験は、大学生を被験者として、視覚探索中に文脈手がかりによって注意誘導が生じている際の ERP を、頭皮上電極を用いて記録することを目的として実施した。その結果、被験者は、毎試行異なる刺激配置を呈示する試行(統制条件)に比べて、同じ刺激配置を繰り返し呈示する試行(繰り返し条件)において、標的を速く探索することが出来た。すなわち、行動測度において、文脈手がかりが獲得されていることを示す結果を得ることができた。この結果は、繰り返し同じ刺激配置の画

面を呈示することによって、被験者の選択的注意が、標的に誘導されていたことを示している。しかしながら、ERPにおいて、統制条件と繰り返し条件の間に有意な相違は認められなかった。すなわち、本実験では、Olson et al. (2001)が頭蓋内電極による記録で報告した、文脈手がかりによるN210成分の振幅増加を、頭皮上電極による記録によって再現することはできなかった。脳内の電気的活動がすべて頭皮上ERPに反映されるわけではないが、文脈手がかりによる注意誘導を反映するERP成分を頭皮上から記録可能かどうかについて結論する前に、いくつか検討しなければならないことがある。

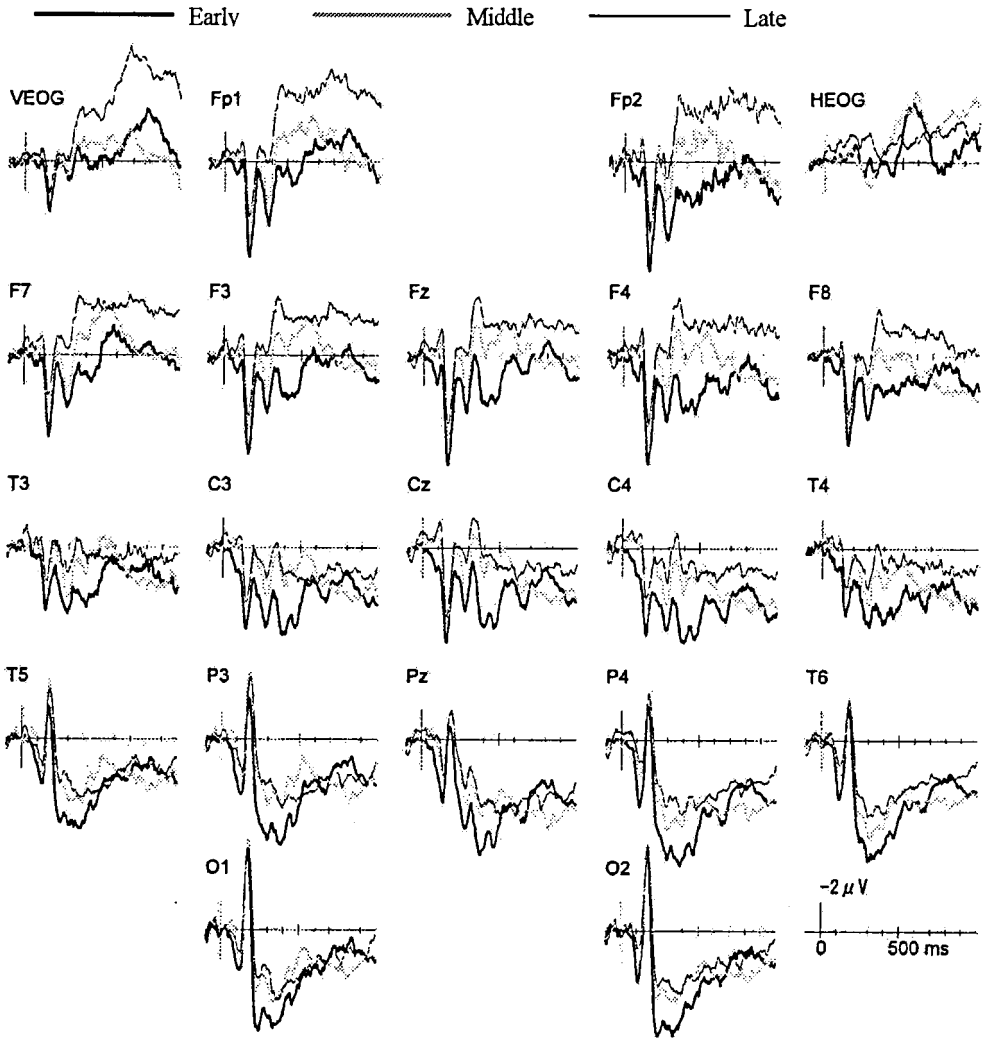


Figure 5. Grand-averaged ERPs as a function of epoch in the repeat condition.

系列的な事象に関して非意図的に生じる学習の機序を検討するための課題に、系列反応時間課題 (SRT 課題, Nissen & Bullemer, 1987)がある。Eimer, Goschke, Schlaghecken, & Stürmer (1996)は、逸脱刺激を刺激系列に挿入する、すなわち系列中の1刺激をその順序規則から逸脱した位置にランダムに置き換えた SRT 課題を考案し、課題遂行中の被験者から ERP を記録した。言語報告や生成テストの成績によって被験者を系列の顕在的(意識的)な学習の有無によって群分けして分析したところ、顕在的知識がある場合には、逸脱刺激以外の刺激に対する反応時間は逸脱刺激に比べて短縮し、さらに逸脱刺激に対する ERP の N2 成分の振幅が、試行ブロックの進行につれて増大した。Olson et al. (2001)と Eimer et al. (1996)では、用いた課題が異なるし、刺激の繰り返し呈示に関する被験者の気づきの程度も異なる。しかし、繰り返し呈示される刺激に対する N2 潜時帯の ERP 変化を比較すると、Olson et al. (2001)では、繰り返しのない刺激に対する ERP に比べて振幅が増大しているのに対し、Eimer et al. (1996)では逆に、振幅が減衰していることになる。本実験においても、文脈手がかりに関する違いはないものの、試行ブロックの進行に伴う反応時間の短縮に関連すると思われる ERP 変化が出現している。つまり、本実験におけるパフォーマンスの変化には、文脈手がかり以外にもさまざまな要因が関与しており、それぞれに関連する ERP 変化が相互に効果を打ち消しあったり、小さな変化を検出させにくくしたりした結果、文脈手がかりによる注意誘導に関連する ERP 変化が観察できなかった可能性がある。

もう一つ、眼球運動の問題がある。本実験で用いた探索画面の大きさは横 25° × 縦 18.5° であった。被験者には凝視点から目を動かさないように教示し、また水平 EOG によって眼球運動をモニターし、一定以上のアーチファクトが混入した試行は加算処理から除いた。しかし、それでも水平 EOG の記録を調べると、標的が右視野にあるときと左視野にあるときでは、刺激後 250 ms 付近以降の記録は明瞭に異なっており、標的探索の際に眼球運動が起こっていたと推測できる。Olson et al. (2001)が用いた頭蓋内とくに後頭部の電極からの記録は、このような眼球運動の影響を受けにくいと考えられる。本実験において、微小な眼球運動が、標的の位置によりさまざまな方向に生じていたとすると、この眼球運動によって生じたアーチファクトによって、文脈手がかりによる注意誘導の ERP 成分の検出が困難になった可能性がある。

本実験の結果から、今後視覚探索中の注意誘導に関する ERP 研究を進める際に考慮しなければならないことが2つ示唆された。まず、課題に含まれるさまざまな要因を抽出し、それぞれを他と切り離して評価するための工夫が必要である。第2は、眼球運動の問題である。視角の大きい刺激を用いて空間的な視覚探索課題を行う場合、眼球運動を抑制させることは困難である。今後の研究では、刺激の呈示視野を限定したり、刺激の逐次的に呈示によって時間的な探索を行わせたりするなど、眼球運動の影響を排除した ERP 測定を行う必要がある。

引用文献

- Biederman, I. 1972 Perceiving real-world scenes. *Science*, 177, 77-80.
- Chun, M. M., & Jiang, Y. 1998 Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*, 36, 28-71.

- Eimer, M., Goschke, T., Schlaghecken, F., & Stürmer, B. 1996 Explicit and implicit learning of event sequences: Evidence from event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **22**, 970-987.
- Jennings, J. R., & Wood, C. C. 1976 The ϵ -adjustment procedure for repeated-measures analyses of variance. *Psychophysiology*, **13**, 277-278.
- Jiang, Y., & Chun, M. M. 2001 Selective attention modulates implicit learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **54A**, 1105-1124.
- 河西哲子・熊田孝恒 2003 視覚的選択の脳内機構 —ERP データを中心に— 心理学評論, **46**, 371-390.
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. 1987 Attention requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, **19**, 1-32.
- Olson, I. R., Chun, M. M., & Allison, T. 2001 Contextual guidance of attention: Human intracranial in anatomically early, temporal late stages of visual processing. *Brain*, **124**, 1417-1425.
- Vasey, M. W., & Thayer, J. F. 1987 The continuing problem of false positives in repeated measures ANOVA in psychophysiology: A multivariate solution. *Psychophysiology*, **24**, 479-486.