

学位論文題名

奥行選択関連電位による特徴表現過程の検討

学位論文内容の要旨

近年の神経生理学的・神経心理学的研究は、視覚系におけるモジュール構造に関する知見を蓄積してきた。しかしながら、色や運動のような視覚特徴と特定の脳領域の単純な1対1対応には限界がある。各々の視覚領野はいくつもの手がかりに応答し、相互に密な連絡があるためである。顕著な例として、非常に有効な奥行き手がかりである両眼視差に選択性を持つ細胞は、極めて多くの脳領野に存在する。行動学的研究によると、線分の方位や空間周波数などの1次特徴だけでなく、それらの組み合わせからなる奥行き手がかりに対しても、自動的な検出器の存在が想定される。これは視覚行動にとっての基本特徴が網膜上の感覚手がかりであるよりむしろ外界の3次元(3D)視覚場面における特徴であることを示唆する。したがって奥行きが脳においてどのように表現されているかを明らかにすることは、視覚系の基本的理解にとって重要であると考えられる。

これまで事象関連電位(ERP)による視覚的注意の研究において、位置への選択的注意は初期視覚感覚誘発成分P1, N1に、非空間的特徴への注意は選択陰性電位(SN)に関連することがわかっている。これらの頭皮上分布や潜時は、脳における刺激選択過程の時空間情報を提供する。特に、多次元選択課題時のERPは特徴の機能的組織化を明らかにする有効な指標である。被験者の課題は、2つの特徴値をもつ2種の特徴次元を直交に組み合わせた刺激の連続提示に対して、そのうち1つの組み合わせを検出することである。刺激は、両方の特徴値が課題に関連、片方のみが関連、両方が非関連のいずれかに分類される。それらに対するERPを比較することにより、2つの特徴が、相互に結合、独立、あるいは片方に依存のいずれの様式で選択されたかを推測できる。これまで多くの非空間的特徴間の独立性と、それらの位置へに依存関係が明らかにされてきた。しかしながら、奥行きに関する検討はなされていない。

そこで、本研究は、視覚系の基本的な機能構築を明らかにするために、両眼視差手がかりによる奥行きと、網膜位置(実験1)、または形(実験2)、との多次元選択課題時におけるERPを検討した。

実験1

刺激提示後約100msに頂点を持つ視覚誘発成分P1は、注意に感度のあるもっとも早い成分として知られる。P1は、位置への注意に関連して潜時も頭皮上分布も変えずに増幅すること、発生源が有線外野の刺激視野の対応領域に推定されることから、空間的注意による感覚処理のゲイン制御を反映すると考えられている。しかしながら、これまでの研究は2Dディスプレイに限られたものであり、3D環境における妥当性は明らかでない。行動学的研究によれば注意は3D表現を持つ過程に作用するが、その詳細には議論がある。奥行きは空間位置情報をもたらす属性であるが、網膜位置ほど

効果的な選択手がかりではないことが報告されており、奥行きへの注意効果は網膜位置への注意効果と異なるかもしれない。そこで本実験は、奥行き(手前・奥)と視野(左・右)の多次元選択課題時のERPを検討した。もしも奥行きが注意の作用する視空間において網膜位置と同等に表現されているならば、奥行きへの注意は2D位置と結合的にP1, N1振幅を調節するだろう。これに対して、もしも奥行きが色や形などの特徴と同等に表現されているならば、位置選択に依存してSNが惹起されるだろう。

結果として、P1は、網膜位置と奥行きの両方が課題に関連する手前刺激に対してのみ増幅した。これは、P1注意効果が単に2D網膜位置表現に基づくのではなく、行動学的・神経生理学的研究の見解と一致して、視覚初期段階における網膜像の分節に関わることを支持する。さらに、奥行きへの注意は視野選択に依存するSNも惹起した。これは色や運動の先行知見に類似しており、共通の特徴選択機構を反映すると考えられる。

実験2

Random-dot stereograms (RDS)において知覚される奥行きと形には、それらが両眼視差のみの手がかりによるにもかかわらず、いくつかの行動学的乖離が報告されている。これに対して、①形が奥行きよりも高次の処理を必要とする、②奥行きが形と独立の特徴チャンネルを持つ、という2解釈が提起されている。本実験は、RDSにおける奥行きと形の多次元選択課題時のERPによりこれらの仮説を検討した。

立体視図形の出現に対して右後頭側頭部優位の大きな陰性波が惹起され、奥行きと形の注意に関連して、左後頭側頭部優位の陰性電位の増強が見られた。側方性の違いは、SNが外因性電位の単なる増強ではないことを示す。奥行きSNと形SNは、それぞれ潜時約175msと200msに開始し、はじめ他方の課題関連性に独立に振舞った。これは、①の仮説を棄却するわけではないが、②の仮説をより積極的に支持する。また、約250ms以降の後期SNは、両者が同一の対象上に知覚される交差性視差刺激においてのみ、両SNの過加算的增加が見られた。これは、SNが特徴の知覚的統合過程に関わることを示唆する。

総合考察および結論

これまで視覚特徴の選択にともなって変化する後頭部由来の成分P1, N1, およびSNの反映する注意機構について多くの議論がなされている。P1とN1については、知覚的負荷や注意による促進と抑制など、おもに注意の力動的側面との関係性に焦点が当てられているが、研究間で必ずしも一致した見解は得られていない。本研究は奥行きを選択手がかりとしたことにより、実験1ではP1成分に反映される刺激処理過程の性質についての知見を得た。これによるとP1は刺激の物理的特性よりも図地の分節過程などのより高次の処理段階に関わる可能性が高い。今後この点を考慮した実験操作により刺激処理と注意の相互作用をより詳細に検討できると考える。またSNについては、刺激弁別の難易度の操作から知覚的処理との関係が指摘されているが、実験2における知覚的統合との関係の示唆は、これをより積極的に支持するものである。

これらERP成分に仮定される処理過程と考え合わせると、奥行きの脳内表現には少なくとも2過程ある。1つはV2, V4などの初期有線外野における半自動的な面分節過程であり、もう1つは同じく

有線外野における独立な特徴分析器による刺激照合過程である。独立な分析器による特徴間の統合が 3D 環境において成立するためには、網膜位置に基づく単純な受容野機構だけでは説明できない。一度に同じ空間位置に複数の視覚対象は存在しないという物理的制約のため、奥行きは視覚対象を分節する強力な手がかりとして、網膜位置とともに視覚場面の位置マップを形成し、独立に分析される諸特徴を特定の視覚対象に結びつける働きをしていると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 諸 富 隆

副 査 教 授 佐 藤 隆 夫 (東京大学大学院人文社会系研究科)

副 査 助 教 授 室 橋 春 光

学 位 論 文 題 名

奥行選択関連電位による特徴表現過程の検討

視覚系のもっとも重要な機能は、2次元の網膜像から3次元の外的世界を復元することである。このことによって、私達は外的世界への適応を実現する。3次元世界の再構成、即ち、奥行きが脳（視覚皮質）内においてどのように表現されているか、視覚生理学・視覚心理学・視覚計算理論において、これまで多くの研究が蓄積されてきたが、奥行きの脳内における機能的構築については、未だ明らかにされていない。本論文の主題は、この奥行きの脳内表現の事象関連電位による解明である。具体的には、交差性もしくは非交差性に両眼視差をもつ立体視刺激図形によって生じる奥行き（手前・奥）と網膜位置（左・右視野）、または、ダイナミック・ランダムドットステレオグラムによる両眼視差を手がかりとする奥行き（手前・奥）と形（3次元物体）を多次元選択課題とする手続きによって、奥行きへの視覚的注意を高め、その時の事象関連電位の振舞の特徴から、奥行きの脳内における表現についてのモデルを提起することである。

本論文は、5章から構成されている。第1章では、視覚系の機能構築と事象関連電位による視覚的注意研究、特に、本研究で用いる多次元選択課題時における事象関連電位の振舞に関する先行研究を適切にまとめ、本研究の目的と仮説について述べている。第2章と第3章は、本論文の中心部分を構成するもので、奥行きと網膜位置の多次元選択時の事象関連電位の振舞に関する実験的研究（実験1）と、奥行きと形の多次元選択時の事象関連電位に関する実験的研究についてである（実験2）。実験1においては、2次元位置への注意によって初期視覚誘発電位成分であるP1（潜時が約80-120msの陽性成分）とN1（140-180msの陰性成分）の増強が生じ、奥行き注意に関連した奥行き選択関連電位としての選択陰性電位（selection negativity, SN）が惹起されることを見出している。このSNは、先行研究における色や形態等の非空間的特徴への注意によって生じるSNの頭皮上の時空間的分布と類似し、奥行きが非空間的特徴への注意と関連した同様のメカニズムによって3次元表現として機能的に構築されていることを示唆している。実験2においては、奥行き（手前・奥）と形（3次元物体）の多次元選択課題において、奥行きと形への注意に関連して左後頭側頭部優位にSNの増強が生じることを見出している。このSNは、奥行きに対しては潜時が約175ms（奥行きSN）で、形に対しては潜時

が200ms（形SN）で出現し，約250ms以前は他方の課題関連性に対して独立に振舞い，約250ms以降においては，奥行きと形が同一の対象上に知覚される交差性視差刺激においてのみ，両SNの加算的増加がみられるという極めて興味ある結果を見出している．これらの結果に依拠して，第4章において，脳内における奥行き表現には，少なくとも2つの水準があることを論じている．第1の水準は，視覚場面から対象を面として半自動的に分節する段階（P1とN1に反映される）である．第2の水準は，さらに2つの段階に区分され，1つは，独立の特徴分析器による刺激照合段階（初期SNに反映される）であり，2つは，これらの相互作用により知覚の統合が成立する段階（後期SNに反映される）である．さらに，この章において，Treisman(1999)の物体知覚の統合モデルの発展として，奥行きの脳内における機能構築モデルを提起している．第5章は，本研究の要約と結論である．

本研究は，二つの点から評価される．1つは，事象関連電位研究からの評価である．2つは，奥行きの脳内表現に関する研究からの評価である．

前者における評価の第1は，3次元的空间注意課題である奥行き注意においてもSNが非空間的な注意課題と同様に出現することを見出したことである．第2は，ダイナミック・ランダムドットステレオグラムによる両眼視差を手がかりとする多次元選択課題（奥行きと形）において，SNには初期SNと後期SNがあることを初めて見出したことである．後者における評価の第1は，方法に関してである．即ち，脳内における奥行きの機能的構築を明らかにするために，多次元選択課題を用いて奥行き注意効果を高め，その生理的指標として時間分解能が高く，脳内の時系列的処理の解明に最適な事象関連電位を採用したことである．第2は，P1，N1，SN（初期SNと後期SN）の特徴ある振舞いから，脳内において奥行きは，視覚場面から対象を面として分節する段階と独立な特徴分析段階およびこれらの相互作用によって知覚の統合が成立する段階において表現されることを強く示唆し，Treisman(1999)の物体知覚の統合モデルの発展として，奥行きの脳内表現モデルを提起したことである．

尚，実験2の研究は，視覚研究における最も権威のある国際ジャーナルであるVision Research誌に原著論文として掲載されている．実験1の研究については，認知脳研究の国際誌に投稿され，現在審査中である．

以上の内容から，審査員一同は，河西哲子の学位請求論文「奥行き選択関連電位による特徴表現過程の検討」が博士論文に相当すると判断し，河西哲子を博士（教育学）の学位を受ける資格があると認める．