

学位論文題名

Psychophysiological Investigation of Change Detection Mechanisms in the Visual Modality

(視覚における変化検出メカニズムに関する心理生理学的研究)

学位論文内容の要旨

ヒトの感覚器官には常時膨大な情報が入力されているが、限界のある処理資源しか有さないヒトは、それらの情報のすべてを同時に処理することはできない。したがって、それらの情報のうち重要な情報のみを選択して処理する必要性が生じる。この情報選択は、随意的注意および不随意的注意という二つの注意メカニズムの働きを介して達成されていると考えられている。随意的注意は、課題に関連する事象への能動的な注意配分に関係している。一方、不随意的注意は、課題に関連しないにも関わらず、可能性として有用な事象それ自体による受動的な注意の捕捉に関係している。不随意的に注意を捕捉する事が知られている一つの典型的な事象が、本論文の主題である「変化」である。

課題に関連しないにも関わらず変化事象に対し不随意的に注意が捕捉されるためには、変化事象を前注意的(自動的)に検出するシステムの存在が不可欠と考えられる。本論文では、この前注意的な変化検出メカニズムに焦点を当てた。特に、視覚における変化検出メカニズムについて、高い時間分解能を有する心理生理学的指標である事象関連脳電位(ERP)を指標とした実験を通し、その脳内メカニズムの解明を試みた。

第1部(序論)では、視覚に加え、これまでに多くの知見が蓄積されている聴覚における変化検出メカニズムに関する先行研究を概観した。聴覚変化検出メカニズムに関する先行研究は、変化刺激に対し二つのERP成分が出現することを報告している。一つは、変化刺激呈示後100-200ms付近で前頭部優位に出現するミスマッチ陰性電位(mismatch negativity, MMN)と呼ばれる成分である。オドボール系列における低頻度逸脱刺激だけでなく、等確率系列における変化刺激に対しても惹起することから、先行する事象に関する記憶痕跡と入力刺激との比較照合により変化を検出するシステムを反映すると考えられている(記憶に基づく比較照合仮説)。もう一つは、変化刺激呈示後100-200ms付近で観察される中心部優位の聴覚N1と呼ばれる成分である。オドボール系列における低頻度逸脱刺激に加え、標準刺激なし系列における逸脱刺激に対しても惹起することから、低頻度で呈示される刺激に対する求心性ニューロン群の低い順応状態をもとに変化を検出するシステムを反映すると考えられている(順応仮説)。総じて、聴覚変化検出メカニズムに関する先行研究は、聴覚変化検出がこれら二つの並列的なシステムによって達成されていることを示唆している。

一方、視覚変化検出メカニズムに関する先行研究は現時点ではあまり多くないものの、これまでの研究から、変化刺激呈示後 100-200 ms 付近で観察される後頭部優位の変化関連陰性電位 (change-related negativity, CRN) と呼ばれる成分が同定されている。オドボール系列における低頻度逸脱刺激に加え、標準刺激なし系列における逸脱刺激に対しても惹起することから、聴覚 N1 と同様、低頻度で呈示される刺激に対する求心性ニューロン群の低い順応状態をもとに変化を検出するシステムを反映すると考えられている (順応仮説)。一方、MMN と同様の機能的意義を有する視覚成分の存在はこれまで明らかになっておらず、先行事象に関する記憶痕跡と入力刺激との比較照合による変化検出システムが視覚においても存在するか否かは不明であった。

第 2 部 (実験的検討 I) では、4 つの実験を通し、先行する事象に関する記憶痕跡と入力刺激との比較照合により変化を検出するシステムが視覚においても存在するのか否か、という問題にアプローチした。比較照合に基づく変化検出システムの働きのみを抽出するために適当と考えられる等確率系列を用いて変化関連成分の同定を試み、さらに同定された成分の特性の分析を通し、比較照合に基づく視覚変化検出メカニズムの特性について検討した (Kimura, Katayama, & Murohashi, 2005a, 2005b, 2006a, 2006b)。これらの実験において、変化刺激呈示後 100-200 ms 付近に出現する後頭部陽性成分が出現した。この成分はこれまで報告のない成分であり、筆者はこの成分を変化関連陽性電位 (change-related positivity, CRP) と名づけた。さらに CRP に関し、以下の知見を得た：(1) CRP は、P1 あるいは N1 といった外因性成分の変動ではない。(2) CRP は、色、形、運動方向、あるいは空間周波数といった様々な刺激特徴における変化に対し観察されうる。(3) CRP は特徴特異的である。(4) CRP は初期の視覚領域に発生源をもつ。(5) CRP は変化の大きさに比例する。(6) CRP は惹起刺激の特性に関わらず惹起する。(7) CRP は惹起刺激の課題関連性に関わらず惹起する。(8) CRP は被験者の特徴注意に依存せず惹起する。(9) CRP は被験者の空間的注意に依存せず惹起する。総じてこれらの知見は、聴覚における MMN と同様、CRP が視覚モダリティにおける記憶との比較照合に基づく前注意的な変化検出に関わる ERP 成分であることを示唆している。

第 3 部 (実験的検討 II) では、CRP と CRN の機能的意義を直接的に比較することを目的とし、等確率系列およびオドボール系列を用いた実験の結果を報告した (Kimura, Katayama, & Murohashi, 2006c)。その結果、CRP は先行刺激と入力刺激が異なる場合に惹起する一方、CRN は入力刺激が刺激系列内において稀な刺激である場合に惹起することが示された。この結果は、CRP が先行刺激と入力刺激の比較照合に基づく変化検出、CRN が低頻度で呈示される刺激に対する求心性ニューロン群の低い順応状態に基づく変化検出を反映することを強く示唆する。

第 4 部 (総合考察および結論) では、上記の知見をもとに、ヒトの視覚変化検出メカニズムの特性についてまとめた。上記 5 つの実験から、ヒトにおける前注意的な視覚刺激変化の検出が、二つのシステム (記憶との比較照合に基づく変化検出システム (CRP に反映) と、ニューロン群の順応状態に基づいた変化検出システム (CRN に反映)) によって達成されているということが示された。これら二つの前注意的な変化検出システムの働きにより、

我々の変化事象に対する不随意的な注意配分が達成されていることが明らかとなった。

本論文内で報告した5つの実験は、以下の学術論文として公表されている。

Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2005a). Neural correlates of preattentive and attentive processing of visual changes. *NeuroReport*, *16*, 2061-2064.

Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2005b). Positive difference in ERPs reflects independent processing of visual changes. *Psychophysiology*, *42*, 369-379.

Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2006a). An ERP study of visual change detection: Effect of magnitude of spatial frequency changes on the change-related posterior positivity. *International Journal of Psychophysiology*, *62*, 14-23.

Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2006b). Independent processing of visual stimulus changes in ventral and dorsal stream features indexed by an early positive difference in event-related brain potentials. *International Journal of Psychophysiology*, *59*, 141-150.

Kimura, M., Katayama, J., & Murohashi, H. (2006c). Probability-independent and -dependent ERPs reflecting visual change detection. *Psychophysiology*, *43*, 180-189.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 室 橋 春 光
副 査 助 教 授 片 山 順 一
副 査 助 教 授 矢 部 博 興 (弘前大学医学部)
副 査 名 誉 教 授 諸 富 隆 (作新学院大学)

学 位 論 文 題 名

Psychophysiological Investigation of Change Detection Mechanisms in the Visual Modality

(視覚における変化検出メカニズムに関する心理生理学的研究)

本論文は、視覚における変化検出のありかたとその脳内メカニズムについて、事象関連電位(Event-Related Potential: ERP)を指標として心理生理学的観点から解明しようとしたものであり、4部構成・10章よりなる。

第一部では不随意的注意と変化検出の関係が論じられ、その指標となるERPを用いた先行研究が紹介されている。認知機構には処理資源の限界があり、情報選択機構として注意が存在する。課題非関連であっても生体適応にとり重要な刺激に対しては、受動的なかたちで注意の捕捉が生じる。本論文では、この不随意的注意の出現に関わる前注意的変化検出過程の脳内メカニズムを、聴覚モダリティにおける先行研究にならいERPの差分を指標とする方法を採用して解明することを試みた。

第二部と第三部では、視覚的変化検出過程が5つの実験により検討された。この過程が特徴ベースであるか(第二部:実験1, 2)、前注意的であるか(第二部:実験3, 4)、またこの過程と刺激系列性との関連性(第三部:実験5)という視点である。いずれの実験も、先行刺激(S1)と後続刺激(S2)間で刺激特性のミスマッチを生じさせ、ミスマッチのない場合のERPとの差波形から変化検出のありかたを検討した。

実験1では比較照合過程が、色あるいは形及びその両方を変化させることにより検討された。その結果、刺激呈示後100-200ms付近に変化検出に対応する陽性のERP差波形が生じた。このとき、色変化対応差波形と形変化対応差波形を人工的に加算することで実際の色・形変化で生じた差波形と同等の波形が再現された。この結果は、この段階での視覚変化検出機構が特徴ごとに独立な比較照合を行っていることを明確に示した。

実験2では、色あるいは運動方向及びその両方を変化させることにより比較照合過程が検討された。その結果、刺激呈示後100-250ms付近に変化検出に対応する陽性のERP差波形が同定された。実験1と同様に、色変化対応差波形と運動方向変化対応差波形を

人工的に加算することで、実際の色・運動方向変化で生じた差波形と同等の波形が再現された。再び、この段階での視覚変化検出機構が、特徴ごとに独立な比較照合を行っていることを明らかにした。

実験3では、刺激の空間周波数を変化させることにより比較照合過程の前注意性を検討した。その結果、刺激呈示後 120-180ms 付近に変化検出に対応する陽性の ERP 差波形が同定された。この成分は、被験者の注意制御に関わりなく刺激変化の大きさに対応して生じたことから、この成分により反映される比較照合過程は前注意的であることが示唆された。

実験4では、視野の左右に呈示される刺激の色が左側あるいは右側及び両側に変化する場合について、前注意性を検討した。その結果、刺激呈示後 100-400ms 付近に変化検出に対応する陽性の差波形が同定された。実験3と同様にこの成分は、被験者の注意制御に関わりなく刺激変化に対応した大脳半球側に生じたことから、再びこの成分により反映される比較照合過程は前注意的であることが示唆された。

実験5では、等確率刺激系列を用い、課題非関連刺激の系列性が操作された (○○○ ○×、○○○×、○○×、○×など)。その結果、実験1-4で示された刺激変化に対応する陽性の差波形は、刺激の系列性とは関わりなく生じた。一方、陽性差波形に続く陰性差波形が、刺激系列性に対応して変動した。これらの結果から、陽性差波形は比較照合に基づくミスマッチを反映し、陰性差波形は稀さに感度のある神経活動を反映することが示唆された。

第四部では、5つの実験の結果から、視覚における変化・逸脱事象に対する不随意的な注意の捕捉の背景に存在するとみられる、2つの前注意的な変化検出システムの働きが論じられた。すなわち、刺激系列性に感度のある神経活動に基づく変化検出システムと、先行刺激とのミスマッチに感度のある記憶との比較照合に基づく変化検出システムである。なお、これらの実験の報告は、生理心理学領域の主要な国際学術雑誌である NeuroReport, Psychophysiology, International Journal of Psychophysiology に掲載されており、実験手法、データの解釈等について一定の学術的評価を得たものと認められる。

本論文は、視覚における比較照合過程について、実験を一つひとつ丁寧に積み上げ、データに基づいて変化検出のありかたの諸相を整然と論じた点で、学術的意義を有すると認められる。他方、聴覚刺激提示法と ERP の差分法に基づく変化検出モデルを、視覚刺激 (S1-S2) 提示法下での変化検出に適用することについては論議が十分であるとはいえず、視覚特有の差異検出機構との関連性をさらに検討する必要がある。これらは今後の課題として残るが、博士後期課程において上述の如く十分な研究成果をあげており、著者は北海道大学博士 (教育学) を授与される資格があるものと認める。