

氏名（本籍） 栗 田 佑 騎（神奈川県）
学位の種類 博士（理学）
学位記番号 甲第1290号
学位授与の日付 2023年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 **Unconscious neural mechanism involved
in access processing to visual awareness**
(視覚的意識へのアクセス処理に関与する無
意識下の神経メカニズム)

論文審査委員 (主査) 教授 荒木 修
教授 伊藤 哲明 教授 岡村総一郎
准教授 住野 豊 教授 池口 徹

論文内容の要旨

意識に 관련된 脳活動(Neural correlate of consciousness, NCC)に関する研究の多くは、視覚刺激が意識上に知覚された場合と知覚されなかった場合の神経活動を比較することで、その神経メカニズムを明らかにしようとしてきた。意識上に関連する神経活動はいくつか報告されているが、無意識下の神経メカニズムを報告した研究はほとんどない。我々は、無意識下の視覚刺激が意識上に知覚されるかを決定する無意識下の神経メカニズム(アクセス処理)があるのではないかと考えた。先行研究によると、注意機能が初期の視覚情報処理に影響を与え、無意識下の刺激を意識上に知覚されやすくする。つまり、注意機能が無意識下の視覚情報処理を促進することで、無意識下の刺激情報が意識上にのぼり易くなることが考えられる。意識に関わる研究では、両眼視野闘争がよく利用される。両眼視野闘争とは、左右の目に異なる画像を呈示した時にどちらか一方の画像のみが知覚され、その知覚が自動的に切り替わる現象であり、知覚されている画像を“意識上”、知覚されていない画像を“無意識下”として区別できる。両眼視野闘争のような曖昧知覚において、急激な刺激変化による変化関連反応(Change-related N1)が両眼視野闘争の知覚交代に関与していると報告されている。しかしながら、多くのNCC研究では、意識上と無意識下の静的コントラストに着目しており、アクセス処理のような動的のプロセスに関わる神経メカニズムは明らかになっていない。

そこで、我々はアクセス処理に関わる神経メカニズムの候補として視覚ミスマッチ陰性電位(Visual mismatch negativity, vMMN)に着目した。vMMN は時間的規則性に従う視覚刺激(Standard)に比べて、時間的規則性を破る視覚刺激(Deviant)に対する誘発電位が陰性方向に増大する脳波成分であり、後頭電極で刺激呈示後約 130-250 ms に観測される。この陰性増大成分は、視覚刺激の自動的な変化検出処理を反映しており、Deviant 刺激に対する注意定位反応の誘引に関連している。つまり、無意識下の Deviant 刺激による視覚ミスマッチ処理に誘引された注意システムが無意識下刺激の意識知覚に関与していると考えられる。

さらに本研究では、vMMN に加えて、視覚ミスマッチ振動応答(Visual mismatch oscillatory responses, vMORs)にも着目した。vMORs は、Standard 刺激に比べて Deviant 刺激に対するシータ帯域の振動応答(例えば、スペクトルパワー(Event-related spectral perturbation, ERSP)や位相同期(Inter-trial phase coherence, ITPC))の増大が後頭電極で刺激呈示後約 100-350 ms に観測される。vMORs とアクセス処理との関係を調査することで、アクセス処理において視覚ミスマッチ処理により駆動される情報処理を明らかにすることができる。

本研究は、アクセス処理の神経メカニズムを明らかにするために、vMMN, vMORs, change-related N1 のそれぞれと両眼視野闘争における知覚交代との相関関係を調査した。実験では、両眼視野闘争を利用して、vMMN, vMORs, change-related N1 のそれぞれを誘発する視覚刺激(ターゲット刺激)を無意識下に呈示した。この時、ターゲット刺激前後での知覚交代率及び脳波を計測した。

vMMN に関する実験の結果、行動データにおいて、無意識下に Deviant 刺激を呈示した時、Standard 刺激を呈示した時に比べて有意に知覚交代率が増大した。さらに、無意識下の条件において vMMN 振幅と知覚交代率との間に正の相関関係が認められた。これらの結果は、自動変化検出を反映する vMMN がアクセス処理に関与しており、初期の視覚情報処理において vMMN に関連する注意機能がアクセス処理に重要な役割を持つことを示唆する。

vMORs に関する実験の結果、無意識下 Deviant 刺激を呈示した時、シータ帯域の ITPC の増加するほど、知覚交代率が増大する傾向が認められた。一方、ERSP については相関関係は認められなかった。これらの結果から、無意識下の Deviant 刺激によるシータ帯域の位相同期がミスマッチ処理に関連する注意システムへの機能的接続を強化したことで、無意識下の視覚刺激が意識上に知覚されやすくなることが考えられる。

Change-related N1 に関する実験の結果、行動データにおいて、無意識下に刺激変化を呈示した時、刺激変化を呈示しなかった時に比べて有意に知覚交代率が増大した。しかし、Change-related N1 と知覚交代率との間に相関関係は認められなかった。これらの結果は、刺激変化に誘発される Change-related N1 はアクセス処理の促進には関与していないが、一過性の急激な刺激変化は無意識下の視覚刺激を意識上に知覚させることに関与していることを示唆する。

本研究は、視覚ミスマッチ処理に関連する脳活動である vMMN の振幅とシータ帯域の

ITPC がアクセス処理に関係していることを示した。無意識下に Deviant 刺激を呈示した時、vMMN は刺激呈示後 130 ms、シータ帯域の ITPC 増大は刺激呈示後 200-400 ms に観測された。これらの結果から、vMMN に反映される情報処理からシータ帯域の ITPC 増大に反映される情報処理に続く動的な神経活動がアクセス処理の神経メカニズムに関係していることが示唆される。

無意識下に時間的規則性を破る刺激変化が呈示された時、その刺激は意識上に知覚されやすくなった。一方、無意識下に時間的規則性を持たない急激な刺激変化を呈示した時も、その刺激は意識上に知覚されやすくなった。これらの結果から、2 つに共通する無意識下の刺激が変化することに関連する神経メカニズムがアクセス処理に関与していると考えられる。しかし対照的に、脳活動の相関関係を見ると、Change-related N1 は相関関係が認められなかったが、vMMN は知覚交代の増大に正の相関が認められた。この違いは、刺激パラダイムの違いである、ターゲット刺激のタイミングを予測できるか否かに起因すると考えられる。すなわち、「予測に基づく情報処理」がアクセス処理の神経メカニズムに重要な要素の 1 つである可能性がある。

まとめると、本研究は、vMMN 振幅とシータ帯域の ITPC が両眼視野闘争における知覚交代の促進に関連することを示した。この結果は vMMN 振幅とシータ帯域の ITPC に反映される視覚ミスマッチ処理に関連する神経活動がアクセス処理に関係していることを示唆する。また、vMMN と Change-related N1 を誘発する刺激のどちらも無意識下の視覚刺激を意識上に知覚されやすくすることを示した。対照的に、vMMN は知覚交代と相関が認められたのに対して、Change-related N1 は認められなかった。この結果は、アクセス処理の神経メカニズムには、vMMN と Change-related N1 に共通の神経メカニズムが関与することを示唆する。さらに、そのアクセス処理に関係する共通の神経メカニズムは、予測による情報処理が関与することが考えられる。

論文審査の結果の要旨

まず、本論文の概要を述べる。無意識下にある刺激が視覚的意識にのぼる過程に関与する神経メカニズムを電気生理学的な脳波を測定することによって明らかにしようとする研究論文である。意識に相関した脳活動に関するこれまでの研究の多くは、視覚刺激が意識上に知覚された場合と知覚されなかった場合の神経活動を比較することによって差を明らかにしてきた。しかし、無意識下の刺激が意識上に知覚されるまでの動的な過程(本論文ではこれをアクセス処理と呼ぶ)に焦点を当てた研究は、あまり行われていない。ただ、注意によって無意識下の刺激が意識上に知覚されやすくなる効果は知られていた。本論文の実験では、知覚される視覚刺激が数秒ごとに交代する両眼視野闘争という現象を利用した。両眼視野闘争の視覚刺激に、注意をうながすミスマッチ刺激と変化反応刺激という 2 種類の摂動的な刺激を加えることによって、知覚交代と神経活動を反映する

脳波に現れる変化を解析するユニークな実験を行なった。この実験により、これまで知覚に影響すると考えられてこなかったミスマッチ刺激の脳波反応と知覚交代との関係、そして変化反応刺激の脳波反応と知覚交代との関係が本論文の研究により明らかになった。以下、論文の構成に沿って、論文で示されていることと審査の要旨を述べる。

本論文は、参考文献と用語集を除けば7章から構成される。

1章では、認知神経科学分野における視覚的意識に関するこれまでの研究がサーベイされている。特に、ミスマッチ刺激と位相の合致する誘発反応である vMMN(visual Mismatch Negativity)と振動する誘導反応である vMOR(visual mismatch oscillatory responses)が両眼視野闘争の知覚交代過程の無意識下の刺激が意識上にのぼるプロセスと関係があるのではないかという仮説が議論されている。

2章では、1章で述べた仮説について検証することを目的とすることが説明されている。3章は、ミスマッチ刺激の脳波反応である vMMN と両眼視野闘争における知覚交代との関係を調べる実験について、方法と結果、考察が示されている。ミスマッチ刺激とは、過去の標準刺激に対する逸脱刺激であり、時間的な規則性の破れを特徴とする。逸脱刺激への脳波反応から標準刺激の反応と引くと、vMMN という脳波成分が検出されることが記されている。実験・解析の結果、無意識下の刺激に逸脱刺激を呈示した時に有意に知覚交代が促進されたことが示されている。さらに、vMMN の振幅と知覚交代率の間に正の相関関係があることが示されている。これらの結果は、vMMN が単なる変化検出に関連するのみならず、無意識下の刺激を意識上にのぼらせるアクセス処理に vMMN の振幅によって関与していることを発見したことを意味する。

4章では、3章と同じ実験において解析対象のミスマッチ反応を vMMN から vMOR という振動反応に変えた場合の結果と考察を述べている。解析の結果、無意識下の刺激に逸脱刺激を呈示した時、シータ帯域の位相同期と知覚交代率との間に関連があることが示唆されたが、多重比較の結果では有意な相関は得られなかった。周波数パワーについては相関関係は認められなかったことが示されている。これらの結果によって、無意識下の逸脱刺激によって起こったシータ帯域の位相同期の、知覚の情報処理における役割を示唆する実験データが得られたことになる。

5章では、ミスマッチとは異質の刺激履歴のない変化刺激を3, 4章と同様の両眼視野闘争の実験の枠組みにおいて加えた実験の方法、結果、考察が述べられている。無意識下の刺激に呈示した時は、ミスマッチの逸脱刺激と同様に有意に知覚交代率が増大した。しかし、変化刺激の反応である脳波成分 N1 の振幅と知覚交代率の間には相関関係は認められなかった。これにより、ミスマッチ反応と異なるアクセス処理への関与が示唆された。

6章では、以上の実験結果を総括して議論を行っている。ミスマッチ刺激でも変化反応刺激でも視覚的意識へのアクセス処理を促進したことから、共通のアクセス処理が考えられるとしている。しかし一方で、脳波反応とアクセス処理についての異なる相関関係の原因は、予測に基づく情報処理の違いによることを議論している。一方、視覚ミスマッチ処

理に関連するシータ帯域の位相同期は、注意機能と関係するかもしれないことが議論されている。

7章では、ミスマッチ反応と視覚的意識へのアクセス処理の関連が結論されている。

本論文は、認知神経科学における視覚的意識のアクセスの神経メカニズムの解明に寄与していることから博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。