

予期しない刺激欠落に対する脳電位反応

石田 友美

【背景・目的】

私たちは常に、次の瞬間に何が起こるかを予測しながら生活している。このような過程は意識下で行われるため、ふだん気づくことはないが、予測とは異なる事象が生じると初めてその存在に気づく。例えば物が落ちたのに音がしないなど、起こるはずの感覚事象が起こらなかったときの「あれ？」という印象の根底にある脳の反応は、ただ何も感覚事象が無いというだけでは起こらない。それまでの経験や学習、文脈に基づいた「こうなるはずだ」という予測をもとに、何もない状態に能動的に意味づけをしている。脳のこのような予測機能を調べるためには、上記の例のように予測に反して事象が何も起こらないとき、つまり外的な刺激が存在しないときの脳活動を検討するのが最も効果的である。本研究では、予期しない刺激の欠落に対する脳電位反応を測定することで、感覚予測に関連する脳の働きを検討した。

提示されるはずの刺激が予期に反して起こらないときに生じる事象関連電位を、欠落刺激電位 (omission stimulus potential: OSP) という。OSP は、脳が予測した感覚信号と実際の感覚信号との相違 (予測誤差) を検出・評価し予測を更新する一連の処理過程を反映する内因性の電位であるとされる (SanMiguel, Saupe et al., 2013)。刺激が提示されるはずであった時点から約 100 ms 後に陰性電位 oN1, 約 200 ms 後に次の陰性電位 oN2, 約 300-400 ms 後に陽性電位 oP3 が生じる。予測の機能を反映する電気生理学的指標として期待されているが、その基本的な性質については明らかになっていない点も多い。刺激提示内容やタイミングの一貫性 (SanMiguel, Saupe et al., 2013; van Laarhoven et al., 2017), 欠落確率 (SanMiguel, Widmann et al., 2013; Stekelenburg & Vroomen, 2015) などを操作し、OSP の発生要件や特徴を捉えようと議論がなされている。

本研究では、OSP の基本的な性質についての知見を得ることを目的に、特に①感覚モダリティ間で OSP がどのように異なるのか、②刺激の欠落が課題に関連しているときと関連していないときで OSP はどのように異なるのか、という点について検討を行った。

【方法】

参加者 ($N=29$) に、1-2 秒に 1 回の一定間隔でマウスボタンを押すように求め、ボタン押し直後に視覚刺激 (LED ライト) または聴覚刺激 (純音) を提示した。刺激は 20% の確率で提示されないことがあり、その欠落時の事象関連電位を測定・分析した。脳波は頭皮上 64 部位から記録した。刺激が欠落する理由について、「ボタン押しの間隔が一定でないと刺激が提示されないので、できるだけ連続して提示されるように一定間隔でボタンを押してほしい」と教示する課題関連条件と、「刺激が提示されないことがランダムに起こるが、気にせず一定間隔でボタンを押してほしい」と教示する課題非関連条件を設け、欠落の課題関連性の操作を行った。参加者は、感覚モダリティ (視覚・聴覚) × 課題関連性 (関連・非関連) の 4 つの実験条件をすべて実施した。実施順序および反応手は参加者間でカウンタバランスした。実験条件に加え、刺激を提示せずボタン押しのみを行う統制条件を実験の最初と最後に行った。実験条件と統制条件の終了後には、課題の難易度、達成感、課題中の集中度、覚醒度について主観評定を求めた。また実験条件の終了後には、刺激が提示されない状況がどの程度気になったか、ボタン押しと刺激の提示がどの程度関係していると思ったかについて主観評定を求めた。行動測定として、ボタン押し間隔の平均値を条件ごとに求めた。また、直前の試行からのボタン押し間隔の平均変動量を、刺激が提示された後と刺激が欠落した後のボタン押しに分けて、それぞれ条件ごとに求めた。

【結果と考察】

主観測度 課題関連条件の方が課題非関連条件よりも課題が難しく、より集中していて、ボタン押しが刺激の提示により強く関連していると評定された。これらの結果から、教示による課題関連性の操作は有効であったといえる。

行動測度 ボタン押し間隔は、課題関連条件の方が課題非関連条件よりも短かった。この結果から、参加者は欠落の課題関連性の違いにもとづき、行動を条件間で変化させていたことが示された。ボタン押し間隔変動量は、課題関連・非関連条件間で差は見られなかった。しかし、刺激が提示された後よりも刺激が提示されなかった後の方が、変動量が大きくなった。変動の方向性としては、刺激が提示されると次のボタン押しまでの間隔が短くなり、刺激が欠落すると長くなった。これらの結果から、教示された刺激欠落の理由に関わらず、参加者は予期に反して刺激が欠落したときに、よりボタン押し間隔を調整すること、その際には間隔を長くする方向に調整することが示された。これは予測と異なる事象を検出し、行動の調整に至るまでの予測誤差処理に要する時間が加算されたことによると考えられる。

事象関連電位 ボタン押し後の刺激が低頻度で欠落したときの事象関連電位を分析した結果、全条件で OSP を構成する成分である oN1, oN2, oP3 が観察された。観察された OSP に他の成分やアーチファクトが時間的に重畳していた可能性を考慮し、事象関連電位の結果に時間主成分分析 (principal component analysis: PCA) を実施した。時間 PCA の結果においても視覚および聴覚で oN1, oN2, oP3 に相当する成分が特定された。OSP に与える感覚モダリティの効果として、oN1, oN2, oP3 それぞれの頂点潜時は視覚よりも聴覚の方が短かった。この潜時差は、各感覚受容器が刺激を受け取り脳へ信号を伝達するまでの視聴覚間の時間差を表すと考えられる。よって OSP が感覚特異的に生じていることが示唆された。また低次の脳領域での処理を反映するとされる oN1, oN2 の発生源を sLORETA で推定した。その結果、視覚刺激の欠落に対して視覚野の活動は認められなかった。しかし、視覚背側経路にあたる頭頂葉での活動が生じていた。聴覚刺激の欠落に対しては右側頭葉と頭頂葉に活動が認められた。これらの結果から、OSP の初期～中期電位が反映する予測誤差の処理には、視覚、聴覚それぞれの情報処理に関連する脳内の異なる領域が関わっていることが示された。OSP に与える欠落の課題関連性の効果として、どちらの感覚モダリティでも oN1, oN2, oP3 の振幅はそれぞれ、課題関連条件の方が課題非関連条件よりも大きいという傾向が得られた。課題関連条件ではボタンを一定間隔で押すという目標志向行動において、刺激の欠落は自身の行動のパフォーマンスの可否を表し、その後の行動調整にも関わる価値の高い情報であった。よってこの条件間の振幅差は、課題関連条件の方が課題非関連条件よりも欠落に注意を向けたことによるものであると考えた。

【まとめ】

本研究では、物理的刺激が存在しないという同じ状況に対する OSP を感覚モダリティ間で比較した。OSP は潜時および発生源において感覚モダリティ間で異なって生じた。OSP が反映するとされる予測誤差の処理は、刺激からの物理的な入力が存在しないにも関わらず、少なくとも部分的には刺激の感覚モダリティごとに異なる神経経路において行われていることが示された。またランダムに刺激が欠落する実験プログラムを用いて、参加者が欠落の課題関連性が条件間で異なると認知した場合の OSP への影響を検討した。欠落が課題に関連すると認知された場合には、そうでない場合に比べて OSP の振幅が大きくなる傾向があることが示された。刺激の欠落を解釈する高次の認知的枠組みが、予測の形成およびその後の予測誤差処理に影響を及ぼす可能性が示唆された。今後も OSP の基本的な性質の検討をさらに進めることで、人の感覚予測機能の解明に寄与することができるだろう。(基礎心理学)