

メタバース空間におけるファントムセンスの誘発特性と

生理的反応の比較

Comparative Study of Phantom Sense Induction Characteristics and Physiological Responses in Metaverse Spaces

加賀 奏汰 角 薫

KAGA Sota, SUMI Kaoru

公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

Abstract: This study investigates phantom sense, a phenomenon in which users perceive tactile sensations in metaverse environments despite the absence of physical stimuli. While such experiences have been frequently reported in social VR, the effects of multisensory integration on both subjective evaluations and physiological responses remain insufficiently understood. We conducted a comparative experiment manipulating sensory conditions in virtual environments: visual only, visual + auditory, visual + tactile, and visual + auditory + tactile. Sixty university students experienced three tasks (falling, slashing, and thermal sensation) while EEG data and subjective ratings of phantom sensation intensity were collected. Results indicated that overall averages showed limited differences between conditions; however, time-resolved analysis revealed that the addition of tactile cues modulated μ -band and total-band EEG power during specific temporal intervals. Notably, significant changes were observed in the slashing and thermal tasks under tactile-included conditions.

These findings suggest that phantom sense is not solely a visual illusion but emerges through multisensory integration, with tactile cues influencing the temporal dynamics of brain activity. The study provides insights into the role of sensory timing and integration in designing immersive VR experiences without dedicated haptic devices.

1. はじめに

近年、仮想現実（VR）およびメタバース技術の発展に伴い、遠隔教育、医療リハビリテーション、エンターテインメントなど多様な分野での応用が進んでいる。特に、視覚・聴覚・触覚といった複数の感覚情報を統合した多感覚提示は、ユーザーの没入感や身体的実在感を高める重要な要素として注目されている。

その中でも、実際には触覚刺激が存在しないにもかかわらず、触れられているように感じる現象は「ファントムセンス」と呼ばれ、主に視覚情報によって誘発される感覚錯覚として報告されてきた。近年のソーシャル VR 環境においても、ユーザーが他者から触れられている感覚を経験する事例が多く

報告されており、ファントムセンスはメタバース体験の質に影響を与える重要な要因と考えられている。

しかし、従来研究の多くは主観評価に基づくプレゼンス評価を中心としており[1]、視覚に加えて聴覚や触覚の手がかりを組み合わせた多感覚提示が、ファントムセンスの強度や生体反応に及ぼす影響については、限定的な知見にとどまっている。特に、脳活動の時間的変化を含めた生理指標との対応関係は十分に明らかになっていない。

そこで本研究では、メタバース空間において視覚・聴覚・触覚の提示条件を操作した仮想環境を構築し、ファントムセンスの主観的強度および脳活動への影響を比較検討する。具体的には、視覚のみ、視覚+聴覚、視覚+触覚、視覚+聴覚+触覚の4条

件を設定し、落下、斬撃、温感の3種類の課題において体験を提示する。主観評価に加え、脳波 (EEG) を用いて μ 帯域および全帯域の活動変化を分析し、多感覚統合がファントムセンスの生成過程に与える影響を明らかにすることを目的とする。

本研究は、触覚デバイスに依存しない没入型 VR 体験の設計指針を提供するとともに、多感覚統合と身体感覚の関係を理解するための基礎的知見を示すことを目指す。

2. 関連研究

失ったはずの手足がまだ残っているように感じる、いわゆる幻肢研究は、四肢切断後にも身体感覚が持続する現象として古くから報告されてきたが、その多くは痛覚や運動感覚に焦点を当てたものであった。これに対し、Mays and Mays (2008) は、幻肢において「触れられる感覚」が生起する事例を報告し、触覚を含む身体感覚が物理的身体の境界を越えて拡張しうる可能性を示した。同研究では、幻肢の触覚体験を単なる主観的錯覚としてではなく、空間的に実在する「感覚の場」として捉える立場が提示されている。これらの知見は、身体感覚が必ずしも物理的身体に限定されず、心的身体 (mind-limb) が空間的に拡張される可能性を示唆するものであり、後年の VR 研究におけるファントムセンス現象を、身体スキーマや空間的身体表象の拡張として理解する理論的基盤を与えている [2]。

近年、Pilacinski ら (2023) は、実際の触覚刺激が存在しないにもかかわらず「触れられた感覚」が生じる現象をファントムタッチ錯覚 (Phantom Touch Illusion: PTI) として体系的に報告した。同研究では、VR 環境において視覚的に自己身体への接触が提示される状況を構成し、触覚刺激を与えない条件下でも高頻度に触覚様体験が生起することを示した。特に、被験者の約 9 割が何らかの触覚的感覚を報告したことや、視覚的に直接確認できない部位に対しても錯覚が生じたことが報告されている。これらの結果は、触覚錯覚が視覚情報のみで成立するのではなく、身体スキーマや運動予測といった内部モデルが関与している可能性を示している。さらに、VR を用いない条件では錯覚の発生率が低下したことから、PTI は視覚刺激単独ではなく、VR 環境における自己運動と視覚的自己像の統合によって生じる現象であると結論づけられている [3]。

斉藤・角 (2025) は、メタバース空間におけるファントムセンスの発生率および体験特性を調査し、日常的に利用されるソーシャル VR 環境においても高頻度にファントムセンスが生起することを実証的に示した。同研究では、43 名中 30 名 (約 70%) がファントムセンスを体験したと報告している。さらに、ファントムセンスを体験した被験者は、体験をより「面白い」と評価し、没入感、フロー体験、ポジティブ感情において有意に高いスコアを示した。一方で、事前に身体運動を行った場合にはファントムセンスの強度が低下する傾向も報告されており、現実の身体感覚が強く残存している状態では、仮想環境における身体表象との不一致が生じ、没入感を阻害する可能性が示唆されている。この研究は、ファントムセンスを単なる一時的錯覚としてではなく、メタバース体験の質や再訪動機に影響を与える重要な要因として位置づけている点で意義が大きい [4]。

以上のように、身体感覚の拡張に関する理論的知見、VR 環境における触覚錯覚の実証研究、およびメタバース体験におけるファントムセンスの重要性は示されている。しかし、多くの研究は主観評価を中心とした検証にとどまっており、多感覚提示がファントムセンスの強度や生理反応にどのような影響を及ぼすかについては体系的な検証が十分に行われていない。特に、視覚を基盤とした体験に対して聴覚や触覚の手がかりを組み合わせた多感覚統合が、身体感覚の生成過程および脳活動の時間的変化にどのように関与するかは明らかではない。

3. 仮説

3.1 多感覚統合と身体知覚

人間の知覚は、視覚・聴覚・触覚といった複数の感覚情報が相互に作用することで形成されると考えられている。このような多感覚統合は、日常生活における物体認知や身体感覚の形成において重要な役割を果たしており、特定の感覚情報が他の感覚の知覚内容や強度に影響を及ぼすことが知られている。特に視覚は、他の感覚と比較して空間的情報量が多く、身体位置や運動の知覚に対して強い影響力を持つ感覚である。仮想現実環境においては、ユーザーは視覚的に提示された身体や環境情報を自己の身体状態として解釈しやすく、視覚情報の操作によって身体所有感や身体図式が変

化することが報告されている。このような視覚優位性は、実際には触覚刺激が存在しない状況においても、触れられているように感じるファントムセンスの発生を説明する重要な要因の一つと考えられる。一方で、聴覚および触覚は、視覚情報によって形成された知覚を補強する役割を担う感覚として位置付けられる。聴覚刺激は、事象の発生や動作の因果関係を明確にし、仮想環境における現実感や没入感を高める効果を持つ。また、触覚刺激が実際には存在しない場合であっても、触覚に関する視覚的・聴覚的手がかりが与えられることで、身体への刺激を予測・期待する認知過程が生じ、主観的な触覚体験が増強される可能性がある。以上のように、視覚を中心としつつ聴覚および触覚が相互に作用することで、多感覚的な身体知覚が形成されると考えられる。本研究では、視覚刺激のみによる条件と、視覚・聴覚・触覚を同期させた複合刺激条件を比較することで、感覚統合の違いがファントムセンスの主観的強度および脳活動にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

3.2 仮説 1 : 主観的ファントムセンス強度

人間の身体知覚は、単一の感覚情報ではなく、複数の感覚情報の統合によって形成される。仮想現実環境においては、視覚刺激が身体所有感や空間知覚に強く影響を与える一方で、聴覚や触覚に関する手がかりが加わることで、知覚の一貫性や現実感がさらに高まると考えられる。本研究では、視覚刺激のみによって構成された条件と、視覚・聴覚・触覚を同期させた複合刺激条件を設定し、それぞれにおけるファントムセンスの主観的強度を比較する。視覚のみ条件では、視覚情報を基盤としてファントムセンスが誘発されるものの、感覚情報の不足により、知覚体験の強度には一定の限界が存在すると想定される。一方、複合刺激条件では、視覚刺激に加えて聴覚的な事象提示や触覚に関する手がかりが与えられることで、身体への刺激に対する期待や予測が形成され、主観的な触覚体験が増強される可能性がある。このような多感覚の手がかりの付加は、ユーザーに提示される刺激の因果関係や時間的一貫性を明確にし、仮想環境における出来事を自己の身体に生じた事象として解釈させやすくする。結果として、実際には触覚刺激が存在しない場合であっても、触れられている、あるいは刺激を受けたという感覚がより強く知覚されると考えられる。以上より、視覚・聴覚・触覚を組み合わせた複合刺激条件では、視覚刺激のみを提示する条件と比較して、ファントムセンスの

主観的強度が有意に増大すると仮説を立てる。

仮説 H1 :

視覚・聴覚・触覚を組み合わせた複合刺激条件では、視覚刺激のみの条件と比較して、ファントムセンス (PTS) の主観的強度が有意に増大する。

3.3 仮説 2 : 脳活動の変調

複合刺激によって増強される身体感覚は、主観的体験にとどまらず、体性感覚処理に関連する脳活動の変調として観察される可能性がある。脳波は、非侵襲的に脳活動を計測できる手法として広く用いられており、感覚処理や身体知覚に関連する神経活動の変調を捉える指標として有効である。特に、運動および体性感覚処理と関連が深いとされる μ 帯域と呼ばれる脳波 (8-13 Hz) の活動は、実際の運動や触覚刺激が存在しない場合であっても、身体感覚の想起や観察によって変化することが報告されている。このため、 μ 帯域の変調は、ファントムセンスのような主観的身体感覚を伴う体験を評価する指標として適していると考えられる。

一方で、仮想現実環境における体験は、身体感覚に加えて視覚処理や注意、空間認知といった複数の認知過程を同時に含む。そのため、特定の周波数帯域のみに着目するのではなく、脳活動全体の変化を捉える指標として、全周波数帯域における活動の変調を併せて検討することが有効であると考えられる。

本研究では、前頭部・頭頂部・後頭部の各領域 (ROI) に着目し、感覚刺激条件の違いによる脳活動の変化を比較する。視覚刺激のみを提示する条件では、視覚情報に基づく身体知覚が主となり、脳活動の変調は一定程度にとどまると予測される。一方、視覚・聴覚・触覚を同期させた複合刺激条件では、多感覚情報の統合により身体感覚がより強く喚起され、これに伴って μ 帯域を中心とした脳活動の変調が増大すると考えられる。また、こうした変化は特定の周波数帯域に限らず、全周波数帯域においても観察される可能性がある。

以上より、本研究では、複合刺激条件において、視覚のみ条件と比較して、各 ROI における μ 帯域および全周波数帯域の脳活動に、より大きな変調が生じると仮説を立てる。

仮説 H2 :

複合刺激条件では、視覚のみ条件と比較して、各 ROI における μ 帯域および全周波数帯域 (total band) の脳活動に、より大きな変調が生じる。

4. メタバース実験環境

第4章では、本研究で用いたメタバース空間および実験刺激の設計と実装について述べる。ファントムセンスの主観的強度および脳活動の変化を検証するためには、刺激を一貫した条件で提示するとともに、被験者が過度な操作負荷や混乱を感じない体験設計が不可欠である。そこで本研究では、VRChat上に実験用ワールド群を構築し、チュートリアル、実験刺激、休憩を明確に分離した段階的な体験フローを採用した。

本章では、実験全体の体験順および開発環境を示したうえで、ファントムセンスの発生条件を段階的に検討するために設計した各ワールドについて、設計意図と提示内容を順に説明する。各ワールドは、視覚単独刺激から多感覚刺激へと条件を拡張する構成とし、落下、斬撃、温感の3種類の課題を用いて刺激を提示する。

4.1 実験ワールドの提示順序

本研究では、被験者がメタバース空間での体験に段階的に慣れること、および各実験刺激を一貫した条件で提示することを目的として、複数のワールドを順に体験する構成を採用した(図1)。実験全体は、チュートリアルワールド、各実験刺激ワールド、リセット/レストワールドから構成され、被験者はこれらを順番に移動しながら体験する。

はじめに体験するチュートリアルワールドでは、VRChatの基本操作や視点移動に慣れることを目的とし、実験刺激とは直接関係しない内容のみを提示した。これにより、実験開始時点での操作不慣れや緊張が測定結果に影響することを抑制した。

その後、被験者は落下、斬撃、温感の各実験ワールドを体験し、各ワールドの間にリセット/レストワールドを挿入した。実験刺激ワールドの体験順は、特定の刺激に対する慣れや疲労が結果に影響する可能性を考慮し、被験者ごとに調整した。また、各刺激の提示条件は定められた手順に従って実施し、体験時間および指示内容は可能な限り統一した。

リセット/レストワールドは、直前の体験から一度離れ、身体感覚や注意状態を落ち着かせることを目的として設けた。これにより、連続した刺激提示によるキャリーオーバー効果を軽減し、各条件を独立した体験として提示できるよう配慮した。

4.2 開発環境

本研究で用いたメタバース環境はVRChat上に構築し、スタンドアロン型VRデバイスを用いて実験

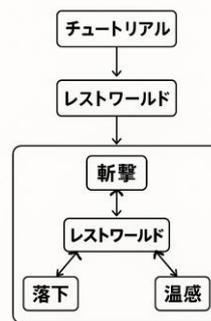


図1 メタバース体験フロー

を実施した。被験者はすべてMeta Quest 3を装着し、外部PCを介さないスタンドアロン構成でVRChatワールドへアクセスした。

これにより、実験環境を被験者間で統一し、機材差による影響を最小限に抑えた。

実験ワールドの開発にはUnity 2022.3.22f1を使用し、VRChat Creator CompanionおよびVRChat World SDKを用いてワールドの構築およびアップロードを行った。実験に用いたワールドは一般公開せず、実験専用のInviteインスタンスとして運用した。

生理指標の計測には脳波計測装置としてEmotiv EPOC Xを使用した。脳波データはVR体験と並行して取得し、主観評価アンケートの結果と併せて解析を行った。各データの同期についてはリアルタイム同期は行わず、実験手順に基づくイベントタイミングを用いて事後的に対応付けを行った。本研究では条件間比較を目的としているため、本手法は解析上十分な精度を有すると判断した。

実験実施時の被験者の姿勢は刺激内容に応じて調整した。斬撃ワールドおよび温感ワールドでは立位姿勢とし、落下ワールドでは着座姿勢とした。これにより、各刺激の体験特性に適した姿勢を確保した。

4.3 チュートリアルワールド

図2に示すチュートリアルワールドは、被験者がVRChatの操作に慣れ、実験中の体験を円滑に進めることを目的として用意した。

4.3.1 概要

実験開始直後に操作方法や姿勢に関する不安が生じると、その後の体験や主観評価に影響を及ぼす可能性があるため、本研究では実験刺激とは独立

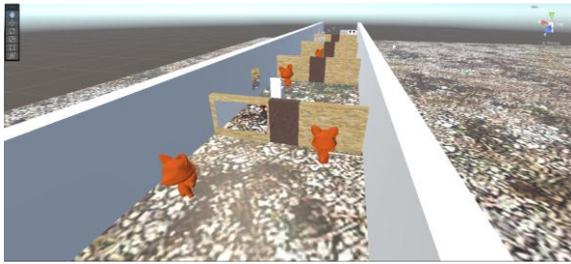


図2 チュートリアルワールドの全体像

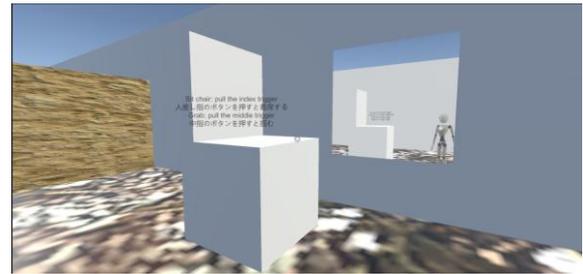


図3 チュートリアルワールドの椅子

したチュートリアル専用ワールドを最初に体験させた。チュートリアルワールドでは、基本的な移動操作として歩行を行い、その後に着席および立ち上がり動作を体験させた。これにより、被験者は実験中に求められる姿勢変化を事前に確認できるようにした。また、ワールド内に設置した鏡を用いて、被験者自身のアバターを確認する工程を設けた。なお、チュートリアルワールドでは、実験刺激に該当する視覚・聴覚・触覚的な演出は一切行わず、あくまで操作習熟および体験準備を目的とした内容のみを提示した。これにより、実験開始前の段階でファントムセンスが誘発される可能性を低減し、各実験条件を独立して評価できるよう配慮した。本ワールドは斎藤らが作成したワールドを基に構築した[4]。

4.3.2 体験内容

被験者はチュートリアルワールドに入室後、実験者の指示に従い、仮想空間内での基本操作を順に体験する。ワールド内では歩行による移動や視点移動を行い、VRChatにおける空間操作に慣れることを目的とした。また、仮想空間内に配置された椅子を用いて、着席動作を体験することで、後続する実験ワールドで求められる姿勢のイメージを共有した(図3参照)。さらに、ワールド内に設置された鏡を通して自身のアバターを確認し、仮想空間内での身体位置やスケール感を把握する工程を設けた(図4参照)。チュートリアル中の進行は実験者の判断により行われ、被験者が基本的な操作を問題なく行えることを確認した段階で次のワールドへ移行した。

4.3.3 設計上の工夫

チュートリアルワールドでは、被験者が実験開始前に仮想空間での基本操作に十分に慣れることを目的とし、歩行、視点移動、着席動作、および自身のアバター把握を重点的に体験できる構成と

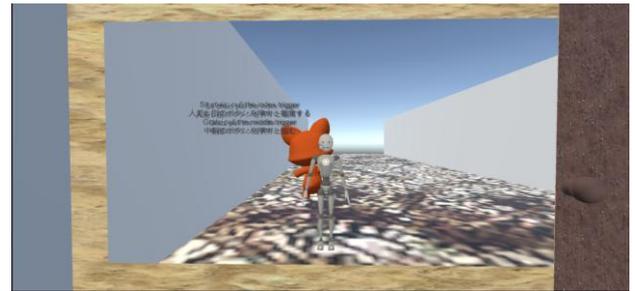


図4 チュートリアルワールドの鏡

した。

これらの操作は、後続する実験ワールドにおいて前提となる動作であるため、チュートリアル段階で確実に習熟させることを意図した。実験刺激と明確に切り離すための工夫として、チュートリアルワールドでは実験ワールドとは異なる雰囲気づくりを行った。具体的には、実験とは直接関係のないポップなBGMを流すことで、被験者がこれから行う体験が実験刺激ではないことを直感的に理解できるように配慮した。これにより、チュートリアル段階でファントムセンスが誘発される可能性を低減し、実験条件への影響を抑えることを目指した。また、初めてVRを体験する被験者や操作に不慣れた被験者に対しても、不安や緊張を感じにくい体験となるよう工夫を行った。単調な操作説明に終始するのではなく、ドアを自分の操作で開けられる、ボタンを押すことで椅子に着席できるといった、操作に対する達成感を得られる要素を配置した。これにより、仮想空間内での操作に対する自信を持たせ、実験本番への心理的ハードルを下げることを意図した。さらに、チュートリアル内に鏡を設置し、被験者が自身のアバターを確認できる機会を設けた。これにより、仮想空間内での身体位置や自己の存在感、空間スケールを把握しやすくし、後続する実験ワールドにおける身体感覚の理解を促すことを目的とした。チュートリアルの実施時間については固定せず、実験者が被験者の習熟度を確認しながら進行することで、最

低限の操作が確実にできる状態になるまで実施した。

4.3.4 システム構成

チュートリアルワールドは、単一の空間で構成されており、被験者が基本操作に集中しやすい設計とした。ワールド内での歩行や視点移動は VRChat 標準の機能を用いて実装しており、特別な移動用スクリプトは使用していない。これにより、実験ワールドと同一の操作感を維持しつつ、システム構成を簡潔に保った。着席動作については、被験者本人は実験全体を通して実際には着座した状態で体験することを前提とし、仮想空間内では映像上の椅子に着席する演出のみを行った。これにより、物理的な姿勢変化を伴わずに、後続する落下ワールドにおける着席状態のイメージを事前に共有できるようにした。アバター確認に用いた鏡は VRChat 標準のミラー機能を使用しており、追加の描画制御や独自スクリプトは導入していない。これにより、表示遅延や処理負荷を抑え、安定した表示を確保した。チュートリアル内の進行は自動化せず、実験者の指示に基づいて各操作を行わせる形式とした。これにより、被験者の理解度に応じた柔軟な進行が可能となった。また、チュートリアルワールドでは、実験刺激となり得る視覚的・聴覚的な演出や振動表現は意図的に導入していない。BGM についても実験内容とは無関係なものを使用し、刺激として解釈される可能性を低減した。さらに、後続する実験ワールドと共通して、標準アバターを使用する仕様とした。これにより、被験者の身長差がアバターに自然に反映され、体格差によってオブジェクトのトリガーが反応しないといった問題を防ぐとともに、オリジナルアバター使用時に生じうる違和感を回避した。

4.4 落下ワールド

落下ワールドは、視覚情報を主導とした錯覚体験を提示し、視覚刺激のみが身体感覚に与える影響を検討することを目的として設計したワールドである。

4.4.1 概要

本ワールドでは、被験者が図5に示すような高所から落下する状況を視覚的に体験することで、実際の身体移動を伴わないにもかかわらず落下感を生起させることを狙いとした。本研究における他の実験ワールドである斬撃ワールドや温感ワールドと比較した際の特徴は、被験者自身が空間内を移動し、高所に位置しているという感覚を視覚的に



図5 落下ワールドの全体像



図6 落下ワールドのエレベーター

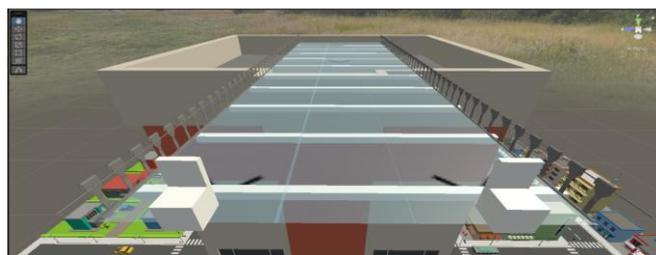


図7 落下ワールドのガラス床（高所）

強く提示する点にある。特に、高所感の形成を重視した演出を多く取り入れることで、落下体験に先立つ段階から身体感覚への影響を与える構成とした。なお、聴覚刺激については、聴覚条件を体験する場合に限り付加される要素として位置付けている。本ワールドは斎藤らが作成したワールドを基に構築した[4]。

4.4.2 体験内容

被験者は落下ワールドにスポーンすると、エレベーター内に立っている状態のアバターとして配置される。(図6参照)ただし、被験者本人は実験中を通して安全面に配慮し、実際には着座した姿勢で体験を行う。エレベーターは起動後、自動的に上昇を開始し、被験者はガラス床越しに地面が徐々に遠ざかっていく様子を視覚的に体験する。エレベーターによって高所へ到達した後、被験者はガラス床の足場を進み、バンジー椅子の前まで移動する。椅子に着席すると、約6秒間の待機時間を経て、椅子が足場を離れ、落下体験が開始され

る。(図7参照) 落下後は、椅子が上下に揺れる動作を数回繰り返し、揺れが収まった後、一定時間経過した時点で実験者の指示によりリセット/レストワールドへ移動する。

4.4.3 設計上の工夫

落下ワールドでは、落下感を生起させる前段階として高所感を十分に形成することを重視した。そのため、エレベーターの床をガラス状にし、上昇中に地面の様子を視認できる構造としたほか、上空では雲を通過する演出を加えることで、被験者が高所に到達していることを直感的に理解できるようにした。また、椅子に着席してからすぐに落下させるのではなく、約6秒間の待機時間を設けた。この待機時間は、被験者に落下のタイミングを予測させないことを目的としており、視覚的に地面までの距離を確認させることで、落下前の状況認知を強調する役割を果たしている。さらに、被験者自身が落下する前に、近くに配置されたキャラクターが先に落下する演出を導入した。これにより、これから自分自身も落下するという状況を認識しやすくさせ、視覚的な注意を落下事象へ向けさせることを意図した。聴覚条件を体験する場合には、落下中に風を切るような音や、地面に近づくにつれて変化する環境音を提示した。これらの聴覚刺激は、視覚情報によって形成された落下体験に対して、リアリティを補強する役割を担っている。加えて、ワールド内には進行方向を示す矢印を配置し、移動経路を明示することで、被験者間で体験内容に差が生じにくいよう配慮した。

4.4.4 システム構成

落下ワールドにおけるエレベーターの上昇、椅子の落下、ならびに落下後の揺れ動作は、Unityのアニメーション機能を用いて制御した。各動作はあらかじめ設定されたアニメーションに基づいて自動的に実行され、実験者の操作を介さずに進行する。これにより、被験者ごとに体験内容が変化することを防ぎ、再現性の高い実験環境を実現した。安全面への配慮として、エレベーターや足場には十分な厚みを持つ Collider を設定し、被験者のアバターが誤って先に落下してしまうことがないようにした。また、各演出のタイミングや移動距離は固定し、エレベーター到達から落下体験終了までの一連の流れが約1分程度となるよう統一した。これらのシステム設計により、被験者間で体験のばらつきを最小限に抑えつつ、視覚主導の落下体験を安定して提示できる構成とした。

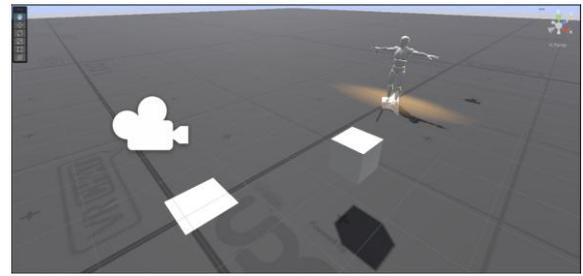


図8 斬撃ワールドの全体像

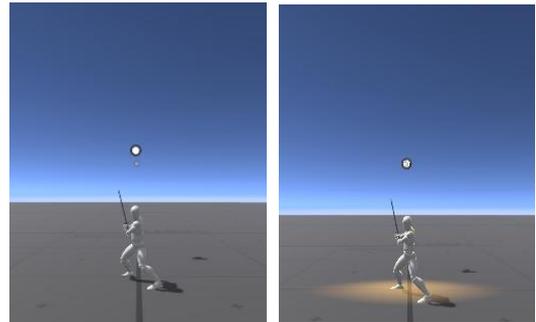


図9 斬撃ワールドの照明（消灯時/点灯時）

4.5 斬撃ワールド

斬撃ワールドは、視覚情報を主導とした刺激提示を基本構成とし、他者から攻撃を受ける状況を仮想空間内で体験させることで、外部からの事象が身体感覚に与える影響を検討することを目的として設計したワールドである(図8)。

4.5.1 概要

本ワールドでは、被験者自身が能動的に行動するのではなく、攻撃を受ける側として刺激を提示される点に特徴がある。落下ワールドでは自己が移動する錯覚を重視していたのに対し、斬撃ワールドでは、被験者がその場に留まった状態で外部からの事象を受け取る構成とした。これにより、視覚的に提示される攻撃行動が、被験者の身体感覚にどのような影響を及ぼすかを検討できるようにした。なお、聴覚刺激および触覚刺激については、条件に応じて付加される要素として位置付けている。このように、本ワールドは自己の移動感覚を扱う落下ワールドとは対照的に、他者からの接触事象が身体感覚に与える影響を検討することを目的としている。

4.5.2 体験内容

被験者は斬撃ワールドにスポーンすると、白いタ

イルから少し離れた位置に配置される。その後、実験者の指示に従い、ワールド内に設置された白いタイルの位置まで移動し、実験中の立ち位置を固定する。この段階で、被験者の正面には斬撃動作を行う敵キャラクターが配置されており、これから攻撃が行われることを視覚的に予期できる構成とした。被験者が右側に配置されたオブジェクトを操作すると、一定の遅延を経て敵キャラクターが接近し、攻撃モーションを実行する。トリガー操作が行われた際には、キャラクター上部の照明が点灯し、攻撃開始の合図となる。攻撃は1体験につき1回のみ行われ、攻撃終了後、一定時間が経過したのち、実験者の指示によりリセット/レストワールドへ移動する。

4.5.3 設計上の工夫

斬撃ワールドでは、攻撃がいつ行われるかを被験者に予測させないことを重視し、トリガー操作から攻撃開始までに意図的な遅延を設けた。この遅延により、攻撃のタイミングを悟らせにくくし、視覚的な緊張状態を維持したまま刺激を提示できるようにした。また、被験者が立つ位置を白いタイルによって明示することで、被験者と敵キャラクターとの距離関係を統一し、実験条件間および被験者間で体験内容に差が生じないように配慮した。立ち位置を固定することで、攻撃が行われる位置や距離を一定に保ち、実験の再現性を高めることを意図した。聴覚条件を体験する場合には、攻撃モーションに同期して剣撃音や被弾音を提示した。これらの聴覚刺激は、視覚情報によって提示される攻撃行動に対する知覚的一貫性および現実感を高める目的で用いた。触覚条件では、実際のプラスチック製ミニチュア剣を用い、攻撃タイミングに合わせて触覚刺激を併用した。素材は、安全性および再現可能性を考慮して選定した。

4.5.4 システム構成

斬撃ワールドにおける敵キャラクターの接近および攻撃動作は、UnityのAnimatorを用いて制御した。被験者が右側のオブジェクトを操作すると、設定されたアニメーションが開始され、一定の遅延後に接近動作および攻撃モーションが実行される構成とした。

攻撃タイミングにおける視覚刺激、聴覚刺激、触覚刺激は、同一のトリガーを基準として同期させて

いる。特に触覚刺激については、キャラクター上部に設置した照明の点灯を合図として、実験者が手動で提示する方法を採用した(図9参照)。この方法は、機械的な提示装置を用いない簡易的な構成である一方、実験者の操作に依存する点で課題が残る。触覚刺激の提示タイミングは照明の点灯を基準として行い、提示タイミングの誤差を最小限に抑えるため事前に練習を実施し、視覚刺激との同期が保たれるよう配慮した。安全面については、触覚刺激に使用する剣をプラスチック製とすることで、被験者への危険を最小限に抑えた。これらのシステム設計により、視覚主導の斬撃刺激を安定して提示しつつ、条件に応じて聴覚および触覚刺激を付加できる構成とした。

4.6 温感ワールド

温感ワールドは、視覚および聴覚情報の組み合わせによって、図10のような温かさおよび冷たさに関する感覚を喚起することを目的として設計したワールドである。

4.6.1 概要

本研究ではクロスモーダル知覚を題材として扱い、触覚刺激を比較対象として位置付けるため、本ワールドの基本構成は視覚刺激と聴覚刺激の組み合わせとした。温条件と冷条件は同一ワールド内で切り替えるのではなく、それぞれ別ワールドとして構成した。これにより、条件間の視覚的混同を避け、各条件における体験を明確に分離した。

落下ワールドや斬撃ワールドが主に外部から与えられる事象を扱っていたのに対し、温感ワールドでは、身体内部の感覚と外界刺激との結びつきに着目した点に特徴がある。視覚および聴覚情報によって温冷に関する予測や期待を形成させたいうえで触覚刺激を提示することで、多感覚統合が主観的温冷感覚に与える影響を検討できる構成とした。

4.6.2 体験内容

被験者は温感ワールドにスポーンすると、立ち位置指標から少し離れた位置に配置される。その後、実験者の指示に従い白い指標の位置へ移動し、立位姿勢を維持したまま体験を行う。白い指標の近傍には、温条件では加熱された鍋が、冷条件では水道と氷水を含む容器が配置されており、被験者は必然的にそれらの対象の前に立つ構成となっている。

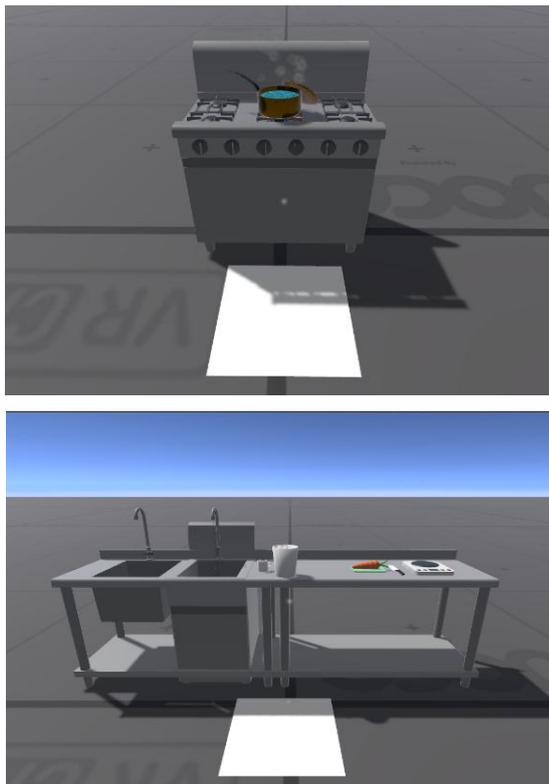


図 10 温感ワールドの参考図（提示映像の例）

被験者が熱源または寒冷物に近づくにつれて、3D音源として設定された沸騰音または水道音が大きくなり、視覚情報と聴覚情報が同時に変化する。被験者はその状態で約1分間待機し、これから触覚刺激が提示されることを予測できる状況が形成される。その後、条件に応じて温冷刺激が短時間、皮膚に接触する形で提示される。刺激提示後は、一定時間が経過したのち、自動的にリセット/レストワールドへ移動する。

4.6.3 設計上の工夫

温条件では、ガスコンロの上で加熱されている鍋を中心に、炎や湯気がアニメーションによって常時動く視覚表現を用い、沸騰している水の様子を明示的に提示した。一方、冷条件では、キッチン環境を想定し、水道から水が流れるアニメーションと、氷と水を入れた容器を配置することで冷たさを視覚的に表現した。環境全体を大きく変える演出も検討したが、条件間で過度な差が生じることを避けるため、いずれも日常的なキッチンという共通の文脈を採用した。

聴覚演出については、沸騰音および水道から水が出る音を用いることで、被験者にこれから触れる対

象が温水または冷水であることを事前に理解させる役割を持たせた。これらの音は3D音源として設定されており、被験者が対象物に近づくにつれて音量が変化することで、視覚情報と整合したリアリティを補強している。

また、温冷刺激は短時間のみ提示する設計とした。温条件では約40℃、冷条件では約20℃の水温を用いた。これらの温度は安全性を考慮した範囲内であり、やけどや過度な冷刺激の危険を伴わない設定とした。長時間接触させると映像内の印象との乖離に被験者が気づく可能性があるため、初回の刺激提示に重きを置き、ファントムセンスの低下を防ぐことを意図した。

白い立ち位置指標については、斬撃ワールドと同様のシステムを用いつつ、ワールド構成に応じて配置を調整している。

4.6.4 システム構成

温感ワールドにおける視覚演出は、条件に応じて切り替えるのではなく、鍋の沸騰、湯気、水の流れ、氷といった要素を常時表示する構成とした。これにより、被験者がワールド内に滞在している間、一貫した視覚情報を提示できるようにした。

聴覚刺激はUnity側で3D音源として設定しており、被験者と音源との距離に応じて音量が変化するよう制御している。これにより、対象物への接近行動と聴覚情報の変化が自然に対応する設計とした。

触覚刺激については機械的な提示装置は用いず、実験者が手で水温刺激を提示する方法を採用した。提示手順は事前に統一し、刺激提示のタイミングおよび接触時間にばらつきが生じないように配慮した。水温は温条件で約40℃、冷条件で約20℃に毎回統一し、被験者間で刺激条件に差が生じないように管理した。

これらの設計により、視覚・聴覚情報を中心とした温冷体験を、安全かつ再現性のある形で提示できる構成とした。

4.7 リセット/レストワールドについて

リセット/レストワールドは、各実験刺激ワールドの体験後に被験者を一時的に移動させ、直前の刺激による影響を軽減することを目的として設計したワールドである。

4.7.1 概要

図11のような本ワールドは、実験刺激そのものを提示する場ではなく、被験者の身体感覚および注意



図 11 リセット／レストワールドの全体像

状態を落ち着かせるための中間的な役割を担う。落下、斬撃、温感といった各ワールドでは、視覚・聴覚・触覚刺激が集中的に提示されるため、それらの影響が次の条件に持ち越される可能性がある。

そこで本研究では、各刺激条件間の独立性を確保し、キャリーオーバー効果を低減するために、リセット／レストワールドを挿入する構成を採用した。

4.7.2 体験内容

被験者は各実験ワールド終了後、自動的にリセット／レストワールドへ移動する。ワールド内では特定の操作や課題は与えられず、被験者はその場に留まりながら一定時間待機する。

この間、被験者には次の実験条件に関する説明や指示は行わず、直前の体験から注意を切り離す時間として位置付けた。待機時間は、心理的緊張や身体感覚の残存を緩和し、次の条件に向けて状態をリセットするための回復期間として機能する。待機時間が経過した後、実験者の指示に従い、次の実験ワールドへ移動する。

4.7.3 設計上の工夫

リセット／レストワールドでは、被験者が直前の実験刺激から心理的・感覚的に距離を置ける環境を提供することを目的とし、視覚的および聴覚的に穏やかなシーンを採用した。具体的には、浅い海の上に立っているように見える景観を提示し、遠方まで続く水平線と空を視界に含める構成とした。

このような開放的な景観は、実験刺激ワールドで用いられた閉鎖的あるいは対象指向的な空間構成とは性質が異なり、注意を特定のオブジェクトから環境全体へと分散させる効果が期待できる。

また、ワールド内では波音を環境音として提示している。波音は周期性が高く突発的な変化を含まないため、被験者の注意や緊張状態を過度に喚起しにくい音刺激である。これにより、直前の実験刺激によって生じた感覚的な高まりを緩和し、次の条件に向けて状態を整える役割を担わせた。

さらに、海や空といった自然要素を用いることで、特定の実験条件や刺激内容を想起させる意味の手がかりを排除している。これにより、被験者が無意識のうちに直前の体験を反芻したり、次に提示される刺激を予測したりすることを防ぎ、各実験条件を独立した体験として提示できるよう配慮した。

4.7.4 システム構成

リセット／レストワールドは、特別なインタラクションや演出制御を持たないシンプルな構成とした。ワールドへの移動は各実験ワールド終了後に自動的に行われ、一定時間経過後に次のワールドへ進む流れを基本とした。

このようにシステムを簡素化することで、実験進行中のトラブルを防ぐとともに、被験者間で待機環境に差が生じないようにした。結果として、各実験刺激ワールドの影響を適切に区切るための安定した中継点として機能する設計とした。

4.8 実験で使用したアバター

本研究では、実験中に使用するアバターとして、VRChat に標準で用意されているデフォルトアバターを使用した。被験者個別のオリジナルアバターや外見の異なるアバターは使用せず、全被験者に対して共通のアバターを適用している。

デフォルトアバターを採用した理由は、被験者間で外見の特徴や身体比率に差が生じることを避け、実験条件以外の要因が知覚体験に影響を与える可能性を最小限に抑えるためである。特に、身体所有感や身体位置の知覚に関わる研究においては、アバターの外見やスケール感が主観的体験に影響を及ぼすことが指摘されており、条件間の統一が重要である[5]。

また、デフォルトアバターは被験者の身長に応じて視点高さや身体スケールが自動的に調整される仕様となっており、被験者自身の身体感覚と仮想空間内の身体表現との乖離を抑える効果が期待できる。この点は、ファントムセンスのような身体感覚に関わる体験を扱う本研究において、実験環境の安定性および再現性を確保する上で有効である。

以上の理由から、本研究ではデフォルトアバターを採用することで、被験者間の差異を抑えた統制された実験環境を構築した。

5. 実験

本章では、第4章で構築したメタバース実験環境を用いて実施した実験の方法および手順について

述べる。本研究では、メタバース空間における視覚・聴覚・触覚刺激の組み合わせが、ファントムセンスの主観的強度および生理反応に与える影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

実験では、仮想現実環境上に構築した複数の実験ワールドを用い、視覚刺激のみを提示する条件と、視覚刺激に聴覚および触覚刺激を組み合わせた条件とを比較した。これにより、多感覚刺激の統合が身体感覚の生成および神経活動に及ぼす影響を検討する。

本章ではまず実験の概要を示し、続いて実験デザイン、手順、測定指標について述べる。

5.1 実験概要

実験は、落下ワールド、斬撃ワールド、温感ワールドの三種類の実験ワールドを用いて行った。各ワールドはそれぞれ異なる感覚特性に着目して設計されており、被験者は提示される刺激を体験することで、身体に対する主観的な感覚変化を報告する。

実験中は、被験者の主観的評価に加えて脳波計測を行い、刺激条件の違いによる生理的変化を記録した。

実験全体の流れとして、被験者はチュートリアルワールドにて基本的な操作に慣れた後、デフォルト状態における脳活動を計測するためリセット/レストワールドへ移動し、安静時の脳波計測を行った。その後、三つの実験ワールド（落下・斬撃・温感）を所定の順序で体験する構成とした。各実験ワールドの体験後には、再度リセット/レストワールドを挟むことで直前の刺激による影響を軽減し、次の条件へ移行した。

課題提示順については、順序効果を考慮した設計とした。本実験により、視覚刺激を基盤としたファントムセンス体験が、聴覚および触覚刺激の付加によってどのように変化するかを、主観評価および生理指標の両面から明らかにすることを目的とした。

5.2 被験者および実験条件

本実験は、公立はこだて未来大学に在籍する学生 60 名を対象として実施した。被験者の内訳は男子 36 名、女子 24 名であり、いずれも大学生であった。実験参加にあたっては、実験内容および安全面に關する説明を事前に行い、同意を得た上で実施した。

本研究では、落下課題、斬撃課題、温感課題の三種類の課題を用意し、各課題に対して表 1～表 3 に示す刺激条件を設定した。落下課題および斬撃課題

では、視覚刺激のみを提示する条件を基準とし、聴覚刺激および触覚刺激を単独または組み合わせて付加する四条件（視覚のみ、視覚+聴覚、視覚+触覚、視覚+聴覚+触覚）を設定した（表 1、表 2）。

一方、温感課題ではクロスモーダル知覚を主題とするため、視覚のみ条件は設定せず、視覚・聴覚刺激を基本条件とした。その上で、触覚刺激の有無および温冷の違いを組み合わせた四条件（温：視覚+聴覚、温：視覚+聴覚+触覚、冷：視覚+聴覚、冷：視覚+聴覚+触覚）を設定した（表 3）。

各課題における条件は 4 種類であり、被験者数 60 名を各条件に均等に割り当てるため、各条件につき 15 名を配置した。被験者は三つの課題すべてを体験するが、同一課題内では一つの条件のみを受ける設計とした。すなわち、各被験者は落下・斬撃・温感の三課題について、それぞれ異なる条件を一回ずつ体験し、計三回の実験を行った。この割当方法により、課題内条件と課題提示順の双方におけるバイアスを最小化した。また、課題提示順による順序効果を抑制するため、三課題（落下・斬撃・温感）の提示順については順列による六通りの順序を用いた。これら六つの提示順に対して被験者を均等に割り当て、各順序条件に 10 名ずつ配置することでカウンターバランスを確保した。

以上のように、被験者数および条件配置を統制することで、各刺激条件および課題間の比較が可能な実験デザインとした。なお、カウンターバランスの詳細および被験者の条件割付は付録に示す。

表 1 落下課題における感覚刺激条件の構成

群名	視覚刺激	聴覚刺激	触覚刺激
視覚のみ	落下映像	無	無
視覚+聴覚	落下映像	落下風切り音	無
視覚+触覚	落下映像	無	送風
視覚+聴覚+触覚	落下映像	落下風切り音	送風

表 2 斬撃課題における感覚刺激条件の構成

群名	視覚刺激	聴覚刺激	触覚刺激
視覚のみ	斬撃映像	無	無
視覚+聴覚	斬撃映像	斬撃音	無
視覚+触覚	斬撃映像	無	模擬剣の触覚刺激
視覚+聴覚+触覚	斬撃映像	斬撃音	模擬剣の触覚刺激

表3 温感課題における感覚刺激条件の構成

群名	視覚刺激	聴覚刺激	触覚刺激
視覚+聴覚 +触覚 (温)	温感映像(熱い)	沸騰音	温水刺激 (約 40°C)
視覚+聴覚 (温)	温感映像(熱い)	沸騰音	無
視覚+聴覚 +触覚 (冷)	温感映像(冷たい)	冷水音	冷水刺激 (約 20°C)
視覚+聴覚 (冷)	温感映像(冷たい)	冷水音	無

5.3 評価方法

本研究では、感覚刺激条件の効果を多面的に検討するため、生理指標評価、主観評価、および探索的評価の三つの枠組みに基づいて評価を行った。生理指標評価を主評価とし、主観評価および探索的評価は補助的指標として位置付けた。

5.3.1 生理指標評価

本研究では、感覚刺激条件の違いによって生じる脳活動変化を定量的に評価するため、生理指標として脳波 (EEG) を用いた。EEG は被験者の主観的報告に依存せず、感覚刺激に伴う無意識的な神経活動の変化を捉えることが可能であることから、本研究における主評価指標として位置付けている。脳波計測には Emotiv EPOC X を用いた。本装置は 14 チャンネルのワイヤレス脳波計測が可能なポータブル EEG デバイスであり、国際 10–20 法に準拠した電極配置を有する。サンプリング周波数は 128 Hz で、被験者の行動を大きく制限することなく脳活動を計測できる点が特徴である。EEG は非侵襲的に計測し、各課題ごとにあらかじめ設定した一定時間の計測区間において記録した。被験者はチュートリアル終了後、安静着座状態でベースライン計測を行い、その値を被験者の通常時の脳波として扱った (以下、安静時に取得したベースライン EEG を default とし、各条件との差分算出の基準とする)。その後、各実験課題の計測を実施した。本研究では、落下、斬撃、温感の三課題すべてにおいて共通の解析枠組みを用いた。まず、各被験者について、課題条件と default における EEG 指標の差分 (delta) を算出し、個人差や装着状態の違いを低減した差分指標を作成した。次に、EEG の時間的变化を評価するため、窓幅 2.0 秒、ステップ 0.5 秒のスライディング窓を用いた時間変

化解析を行った。解析は計測終了時刻を基準として行い、刺激体験の進行に伴う脳活動変化を追跡した。

空間的な解析では、計測チャンネルを前頭部、頭頂部、後頭部の三つの領域 (ROI) に集約した。前頭部は注意や予測に関わる認知的過程、頭頂部は体性感覚統合、後頭部は視覚処理に関与するとされており、各領域の活動変化を比較することで、感覚刺激条件による脳活動の特徴を整理した。ROI への集約は、VR 環境下で生じやすい筋電ノイズや動作アーチファクトの影響を抑え、結果の解釈を簡潔にする目的で行っている [7]。周波数解析では、 μ 帯域を含む α 帯域および 1–40 Hz の total 帯域を中心に解析を行った。 μ 帯域は体性感覚および運動関連領域と関係が深く、実際の刺激が存在しない場合でも身体感覚の予測や想起によって変調することが知られているため、ファントムセンス体験に伴う脳活動変化を捉える指標として適していると考えられる [8]。加えて、total 帯域を併用することで、特定帯域に限定されない全体的な脳活動傾向を把握できるようにした。統計解析では、各課題の条件設計に対応した 2×2 要因分散分析 (ANOVA) を用い、聴覚および触覚の主効果、ならびに交互作用を評価した。この統一的な解析設計により、課題間の結果を同一の枠組みで比較することが可能となった。

5.3.2 主観評価

本研究では、生理指標による評価を主軸としつつ、被験者が主観的に感じたファントムセンス体験の内容を把握するための補助的指標として、事後アンケートによる主観評価を実施した。主観評価は、生理指標の結果と対照することで、感覚刺激条件の違いが体験にどのような影響を及ぼしたかを多角的に検討することを目的としている。アンケートは、被験者がすべての実験ワールド (斬撃・温感・落下) の体験を終了した後に実施した。評価には五段階リッカート尺度を用い、尺度の最小値を「何も感じなかった」、最大値を「非常に強く感じた」と定義した。これらの尺度文言はすべての該当質問項目で共通とし、条件間および課題間での比較が可能となるよう統一している。質問項目の構成は付録 A に示すとおりであり、各実験ワールドごとに、体験のリアリティや没入感、身体一体感に関する項目に加え、ファントムセンスの中核となる「触られた」「衝撃を感じた」「温かさ・冷たさを感じた」「落下感覚を感じた」といった主観的感覚の強度を直接問う項目を含めた。これにより、各課題におけるファントムセンス体験の有無および強度を段階的に把握でき

る構成とした。また、温感ワールドにおいては、温度感覚に関する体験の特性をより詳細に把握するため、主観的に感じた温度を数値で自由記述する項目や、その感覚の持続時間を回答する項目を追加した。これらの項目は、単なる強度評価にとどまらず、温感ファントムセンスの質的側面を補足的に把握することを目的としている。アンケートは、被験者がヘッドマウントディスプレイを外した後、PC上の Google Form を用いて実施した。回答時間に制限は設けず、被験者が体験を振り返りながら落ち着いて回答できる環境を整えた。本研究では、これらの主観評価結果を単独で解釈するのではなく、生理指標の解析結果と併せて条件間比較を行うことで、ファントムセンス体験の特徴を総合的に検討する。

5.3.3 探索的評価項目について

本研究では、生理指標および主観評価に加えて、被験者の個人特性がファントムセンス体験に与える影響を探索的に検討するため、補足的評価項目として性格特性に関するアンケートを実施した。性格特性の測定には、Big Five 理論に基づく Big Five Inventory 短縮版 (BFI-20) を参考とした質問項目を用いた[11]。Big Five は、開放性、誠実性、外向性、協調性、神経症傾向の五因子から構成される性格モデルであり、知覚傾向や刺激に対する反応の個人差と関連することが先行研究により指摘されている。質問項目は、各因子につき 4 項目、計 20 項目から構成した。本研究で採用した項目構成は BFI-20 に基づくものであり、各因子を複数項目で測定することにより、極端に簡略化された尺度 (例: TIPI-J) と比較して、より安定した性格特性の把握が可能となる構成を採用した。また、各因子には肯定的項目と逆転項目をそれぞれ含めることで、回答の一方方向化や反応バイアスを抑制する構成とした。各項目は 7 件法のリニアスケールにより評価され、逆転項目については得点を反転処理した上で、因子ごとに平均値を算出し、性格特性スコアとした。性格特性に関するアンケートは、主観評価アンケートと同様に事後アンケートとして実施し、被験者がすべての実験課題を終了した後回答した。本研究において Big Five による評価は、仮説検証を主目的とするものではなく、生理指標および主観評価の結果を補足的に解釈するための探索的指標として位置付けている。

6. 結果

本章では、各課題における生理指標の解析結果を示し、感覚刺激条件の違いが脳活動に与える影響について報告する。

6.1 落下課題における生理指標の結果

本節では、落下課題における生理指標として EEG データの解析結果を示す。EEG 解析では、 μ 帯域 (8-13 Hz)、 β 帯域 (13-30 Hz)、および 1-40 Hz の総パワーを指標とし、落下課題実施中に取得した EEG (falling) と、刺激を提示しない安静着座状態で取得したベースライン EEG (default) との差分指標を算出した。

$$\Delta = \log_{10}(\text{falling/default})$$

ここで、 Δ が正の値を示す場合は課題条件におけるパワーの増加を、負の値を示す場合は低下を意味する。解析は終了時刻に整列した時間軸 (align = end) に基づき行い、各試行の終了時刻を基準として時間を揃えることで、刺激体験の進行に伴う脳活動変化を比較可能とした。2 秒窓・0.5 秒ステップのスライディング窓を用いて時間変化を評価した。これは、2 秒間の EEG データを解析単位とし、0.5 秒ずつ窓を移動させることで、刺激体験中の脳活動変化の時間的推移を詳細に把握するためである。刺激条件は A (視覚のみ)、B (視覚+聴覚)、C (視覚+触覚)、D (視覚+聴覚+触覚) の 4 群とし、聴覚刺激 (あり/なし) × 触覚刺激 (あり/なし) の 2×2 要因分散分析により主効果および交互作用を検定した。

6.1.1 試行全体代表値に基づく解析結果

まず、各被験者について試行全体の代表値として算出した Δ に対し、2×2 要因分散分析を行った。その結果、 μ 帯域、 β 帯域、および 1-40 Hz 総パワーのいずれの指標においても、聴覚刺激の主効果、触覚刺激の主効果、および両者の交互作用はいずれも有意には至らなかった。したがって、試行時間全体の平均値として算出した Δ に基づく解析では、落下課題における EEG 指標の群間差は認められなかった。

6.1.2 時間窓解析における主結果

次に、スライディング窓を用いた時間変化解析を行った。時間窓解析では、多重比較の影響を制御するため、時間窓×ROI×指標×効果の全検定に対して FDR 補正を適用した。FDR (False Discovery Rate) 補正は、多重比較に伴う第 I 種の過誤を制御する手法であり、多数の検定を行う場合において偽陽性の

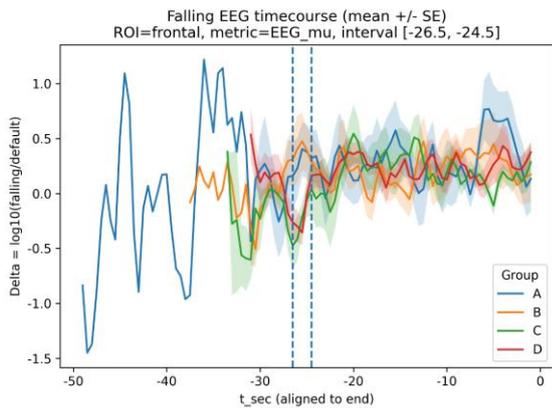


図 12 前頭 ROI における μ 帯域の時間推移

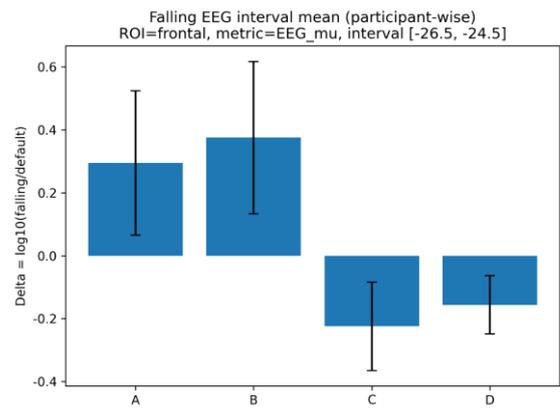


図 13 前頭 ROI における μ 帯域の棒グラフ (終了 26.5-24.5 秒前)

割合を抑える目的で用いられる。その結果、補正後も有意として残った所見は 1 点のみであった(図 12 参照)。具体的には、前頭 ROI における μ 帯域について、終了約 25.5 秒前 ($t_{\text{sec}} = -25.5$) の時間窓において触覚刺激の主効果が有意であった ($F = 13.23$, $p = 0.000600$, $q_{\text{FDR}} = 0.0354$, $n = 60$)。この時間窓では全被験者のデータが揃っており、統計的に安定した結果である。同時間窓における群平均値は、A 群および B 群では Δ が正の値を示したのに対し、C 群および D 群では負の値を示した。すなわち、要因として整理すると、触覚刺激なし条件 (A, B) と触覚刺激あり条件 (C, D) との間で μ 帯域の変化方向が異なる結果となった。これらの結果より触覚の有無によって脳活動変化の方向が異なること、また、触覚刺激の付加に関連する差が一部の時間帯で観察され、視覚主導の課題においても、触覚刺激が脳活動に影響を及ぼす可能性が示唆された。

6.1.3 前頭 ROI μ 帯域における区間的傾向

単一時間窓で得られた有意結果の安定性を確認するため、前節で有意が観察された時間窓周辺を区間としてまとめて検討した。具体的には、複数の時間窓における検定結果を統合する手法として Fisher 法を用いた。Fisher 法は、複数の検定結果の p 値を統合し、区間全体としての有意性を評価する方法である。時間窓ごとの結果が一貫した傾向を示しているかを確認する目的で用いられる。結果、前頭 ROI の μ 帯域について、終了約 26.5 秒前から 24.5 秒前 ($t = -26.5 \sim -24.5$) の 5 窓を区間として設定した。区間平均における群平均値は、 $A = 0.299$, $B = 0.375$, $C = -0.224$, $D = -0.156$ であり、触覚刺激なし条件 (A, B) では正の値を、触覚刺激あり条件 (C, D) では負の値を示した(図 13 参照)。この区間内の各窓で得られた触覚主効果の検定結果を

Fisher 法により統合したところ、触覚主効果は区間全体としても一貫して有意であった (統合 $p = 6.54 \times 10^{-6}$)。一方、同区間において聴覚刺激の主効果および聴覚 \times 触覚の交互作用はいずれも有意ではなかった。

6.1.4 後頭 ROI μ 帯域における補助的结果

後頭 ROI の μ 帯域では、終了約 16 秒前から 14 秒前 ($t = -16 \sim -14$) において、触覚刺激あり条件で Δ が大きい傾向がみられた(図 14 参照)。区間平均の群平均値は、 $A = 0.247$, $B = -0.105$, $C = 0.361$, $D = 0.488$ であった(図 15 参照)。この区間における窓ごとの 2×2 要因分散分析では、単一窓での結果は FDR 補正後に有意とはならなかった。単一窓では有意とはならなかったものの、5 窓の検定結果を Fisher 法で統合すると、触覚主効果の可能性が示唆された (統合 $p = 0.00619$)。さらに、窓内の群間比較 (Holm 補正) では、視覚+聴覚条件 (B) と

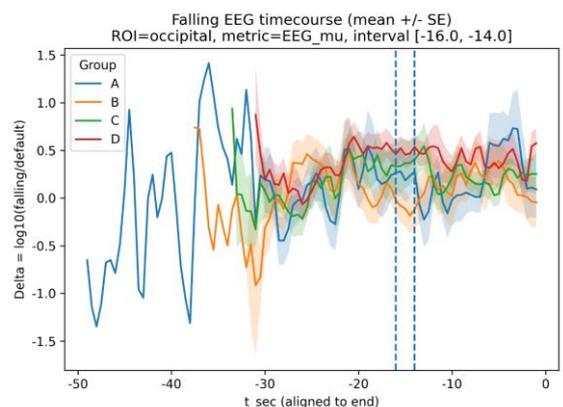


図 14 後頭 ROI における μ 帯域の時間推移

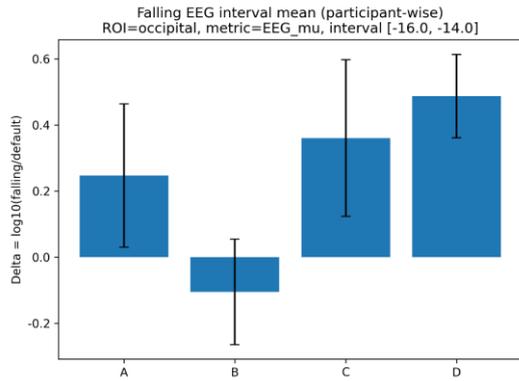


図 15 後頭 ROI における μ 帯域の棒グラフ (終了 16.0-14.0 秒前)

視覚+聴覚+触覚条件 (D) との比較において, $t = -15.5$ および $t = -14.5$ の時間窓で有意差が認められた. これらの窓を区間として統合した結果, B 群と D 群の差は統計的に有意であった (Fisher 統合 $p = 5.11 \times 10^{-6}$).

6.2 斬撃課題における生理指標の結果

本節では, 斬撃課題における生理指標として EEG データの解析結果を示す. EEG 解析では, μ 帯域 (8-13 Hz), β 帯域 (13-30 Hz), および 1-40 Hz の total 帯域 (総パワー) を指標とし, 斬撃課題実施中に取得した EEG (slash) と, 刺激を提示しない安静着座状態で取得したベースライン EEG (default) との差分指標 Δ を用いた. Δ は次式により算出した.

$$\Delta = \log_{10}(\text{slash/default})$$

ここで, Δ が正の値を示す場合は課題条件におけるパワーの増加を, 負の値を示す場合は低下を意味する. 解析は計測終了時刻に整列した時間軸 (align = end) に基づき, 2 秒窓・0.5 秒ステップのスライディング窓を用いて時間変化を評価した. 刺激条件は, 視覚のみ (A), 視覚+聴覚 (B), 視覚+触覚 (C), 視覚+聴覚+触覚 (D) の 4 群とし, 聴覚刺激 (あり/なし) \times 触覚刺激 (あり/なし) の 2 \times 2 要因分散分析により主効果および交互作用を検定した.

6.2.1 試行全体代表値に基づく解析結果

まず, 各被験者について試行全体の代表値として算出した Δ に対し, 2 \times 2 要因分散分析を行った. そ

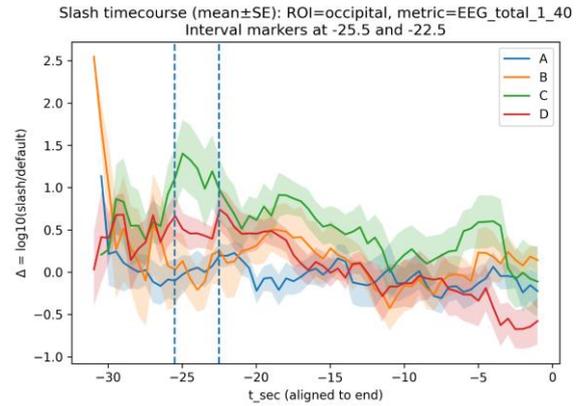


図 16 後頭 ROI における total 帯域の時間推移

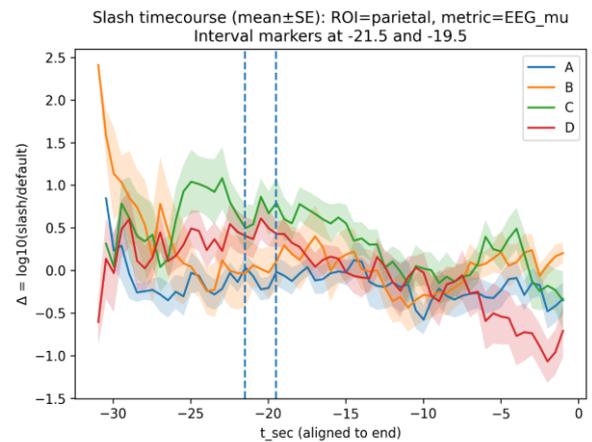


図 17 頭頂 ROI における μ 帯域の時間推移

の結果, μ 帯域, β 帯域, および 1-40 Hz 総パワーのいずれの指標においても, 聴覚刺激の主効果, 触覚刺激の主効果, および両者の交互作用はいずれも有意には至らなかった. したがって, 試行全体を単一の代表値として平均化した場合, 斬撃課題における EEG 指標の群間差も明確には認められなかった.

6.2.2 時間窓解析における主結果

スライディング窓を用いた時間変化解析を行い, 各時間窓において 2 \times 2 要因分散分析 (聴覚 \times 触覚) を適用した. 時間窓 \times ROI \times 指標 \times 効果のように検定回数が増加するため, 多重比較の影響に留意し, 本研究では時間窓解析を探索的段階として位置付け, 差が生じやすい時間帯と ROI・帯域の候補を抽出した上で, その後に区間平均へ集約して統計的検討を行った.

具体的には, 触覚刺激の主効果は一部の時間窓で強く現れ, 特に頭頂 ROI の μ 帯域および後頭 ROI の

total 帯域 (1-40 Hz) で顕著であった。例えば、頭頂 ROI の μ 帯域では、終了約 20 秒前付近 ($t \approx -20.47$ 秒) において触覚刺激の主効果が強く示された ($p = 0.000166$) (図 16 参照)。この時間窓における群平均は、視覚のみ条件 (A) -0.221 , 視覚+聴覚条件 (B) 0.018 , 視覚+触覚条件 (C) 0.865 , 視覚+聴覚+触覚条件 (D) 0.611 であり、触覚刺激なし条件 (A, B) と触覚刺激あり条件 (C, D) の間で Δ の大きさが異なる傾向が観察された。

また、後頭 ROI の total 帯域 (1-40 Hz) では、終了約 24 秒前付近 ($t \approx -23.96$ 秒) において触覚刺激の主効果が示された ($p = 0.000812$) (図 17 参照)。同時間窓における群平均は、視覚のみ条件 (A) 0.054 , 視覚+聴覚条件 (B) -0.208 , 視覚+触覚条件 (C) 1.226 , 視覚+聴覚+触覚条件 (D) 0.459 であり、触覚刺激を含む条件 (C, D) で Δ が大きい傾向が観察された。

以上より、斬撃課題の時間窓解析では、触覚刺激の影響が現れやすい時間帯と ROI・帯域 (頭頂 μ , 後頭 total) が候補として抽出された。触覚刺激を伴う条件で差分値が一貫して高い傾向が確認されていることから、斬撃という外界からの侵襲的刺激を想起させる課題において、触覚刺激が脳活動変化に強く関与する可能性が示唆された。

6.2.3 後頭 ROI total 帯域における区間的傾向

時間窓解析で差が観察された時間帯の周辺について、被験者ごとに区間平均を算出し、区間平均 1 値に対して 2×2 要因分散分析を適用した。ここで、複数窓を平均化することで、時間窓ごとの変動の影響を低減し、特定時間帯における傾向を 1 値として整理した。

終了約 24 秒前に相当する区間 ($t = -25.5 \sim -22.5$) において、後頭 ROI の total 帯域 (1-40 Hz) の差分値を被験者ごとに区間平均し、 2×2 要因分散分析 (聴覚 \times 触覚) を行った ($n = 54$: 該当区間のデータが欠損した被験者を除外, 群内訳 A=14, B=13, C=13, D=14)。その結果、触覚刺激の主効果が有意であった ($F(1, 50)=11.94, p=0.00113, \eta^2=0.193$) (図 18 参照)。一方、聴覚刺激の主効果 ($F(1, 50)=2.20, p=0.144$) および交互作用 ($F(1, 50)=1.92, p=0.172$) は有意ではなかった。

区間平均の群平均 (平均 \pm SD) は、視覚のみ条件 (A) 0.020 ± 0.653 , 視覚+聴覚条件 (B) -0.003 ± 1.000 , 視覚+触覚条件 (C) 1.163 ± 1.196 , 視覚+聴覚+触覚条件 (D) 0.486 ± 0.472 であった。区間平均 1 値に対する群間比較 (Welch の t 検定, Holm 補正) では、A と C の比較が有意であった ($p_{\text{Holm}} = 0.0409$)。

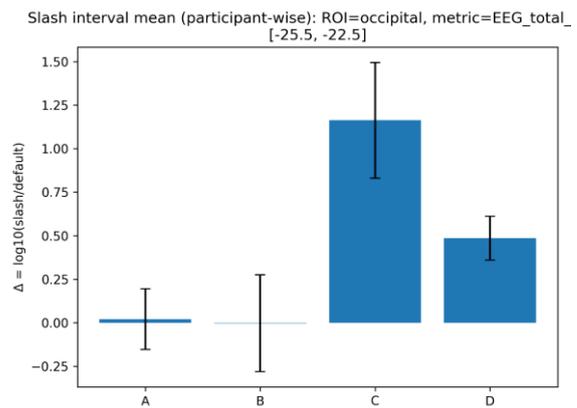


図 18 後頭 ROI における total 帯域の棒グラフ (終了 25.5-22.5 秒前)

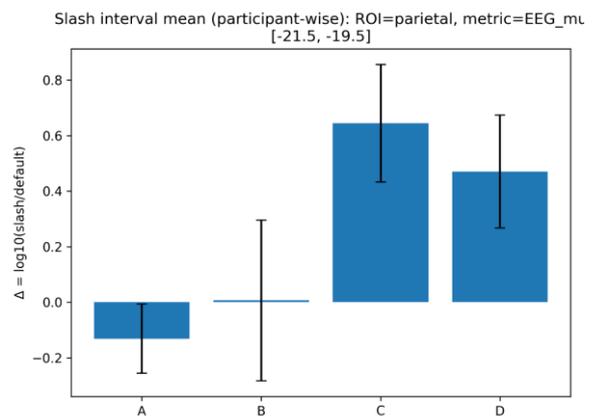


図 19 頭頂 ROI における μ 帯域の棒グラフ (終了 21.5-19.5 秒前)

以上より、後頭 ROI の total 帯域においては、触覚刺激の付加が脳活動の増加と関連することが確認された。

6.2.4 頭頂 ROI μ 帯域における区間的傾向

同様に、終了約 20 秒前に相当する区間 ($t = -21.5 \sim -19.5$) において、頭頂 ROI の μ 帯域 (8-13 Hz) の差分値を被験者ごとに区間平均し、 2×2 要因分散分析 (聴覚 \times 触覚) を行った ($n = 58$: 該当区間のデータが欠損した被験者を除外, 群内訳 A=15, B=13, C=15, D=15)。その結果、触覚刺激の主効果が有意であった ($F(1, 54)=8.87, p=0.00433, \eta^2=0.141$) (図 19 参照)。一方、聴覚刺激の主効果 ($F(1, 54)=0.013, p=0.911$) および交互作用 ($F(1, 54)=0.551, p=0.461$) は有意ではなかった。

区間平均の群平均 (平均 \pm SD) は、視覚のみ条件 (A) -0.31 ± 0.485 , 視覚+聴覚条件 (B) $0.0066 \pm$

1.044, 視覚+触覚条件 (C) 0.644 ± 0.819 , 視覚+聴覚+触覚条件 (D) 0.470 ± 0.787 であった. 区間平均 1 値に対する群間比較 (Welch の t 検定, Holm 補正)では, A と C の比較が有意であった ($p_{\text{Holm}} = 0.0268$).

以上より, 頭頂 ROI の μ 帯域においては, 触覚刺激の付加が脳活動の増加と関連する傾向が確認された.

6.3 温感課題における生理指標の結果

本節では, 温感課題における生理指標として EEG データの解析結果を示す. 温感課題では, 温条件 (熱湯映像) と冷条件 (氷水映像) を同一の枠組みで扱い, 視覚・聴覚が提示する温冷手がかりと, 触覚刺激 (実際の水温接触) の付加が脳活動に与える影響を検討した. これは, 視覚・聴覚による温冷の予測と触覚による身体入力の相互作用が, 知覚および注意に関連する脳活動を変調させる可能性を検討するものである. EEG 解析では, μ 帯域 (8-13 Hz), β 帯域 (13-30 Hz), および total 帯域 (1-40 Hz) のパワーを指標とし, 温感課題実施中に取得した EEG (temperature) と, 刺激を提示しない安静着座状態で取得したベースライン EEG (default) との差分指標 Δ を算出した.

$$\Delta = \log_{10}(\text{temperature/default})$$

ここで, Δ が正の値を示す場合は課題条件におけるパワー増加を, 負の値を示す場合は低下を意味する. 解析は計測終了時刻に整列した時間軸 (align = end) に基づき, 2 秒窓・0.5 秒ステップのスライディング窓を用いて時間変化を評価した. 要因は映像温度 (温/冷) × 触覚 (あり/なし) の 2×2 として整理し, 2×2 要因分散分析により主効果および交互作用を検定した.

6.3.1 試行全体代表値に基づく解析結果

温感課題について, 各被験者の試行時間全体の平均値として算出した差分指標 Δ に対し, 映像温度 (温/冷) × 触覚 (あり/なし) の 2×2 要因分散分析を行った. その結果, μ 帯域および total 帯域のいずれにおいても, 映像温度の主効果, 触覚の主効果, ならびに交互作用はいずれも有意には至らなかった. したがって, 温感課題においても, 試行全体を単一の値として扱った場合には, 条件間の差は明

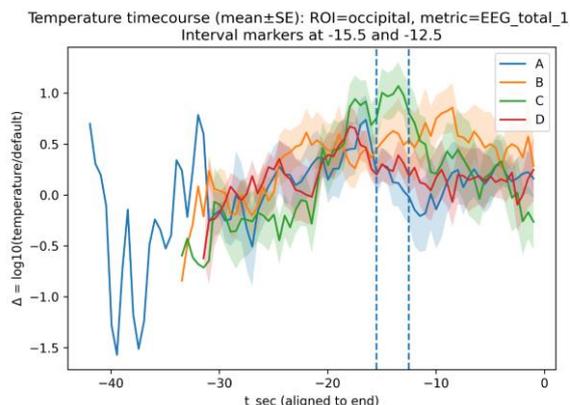


図 20 後頭 ROI における total 帯域の時間推移

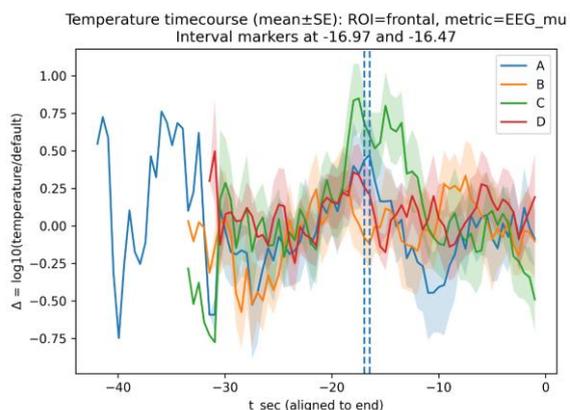


図 21 前頭 ROI における μ 帯域の時間推移

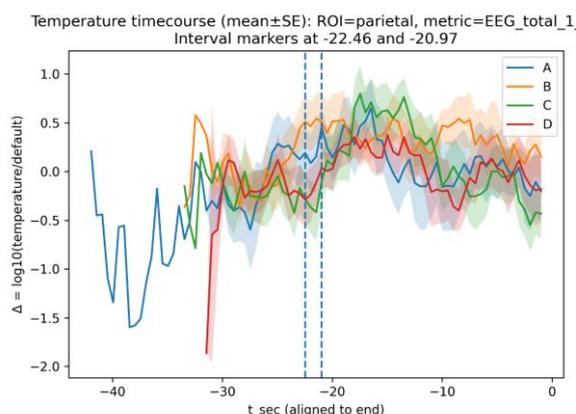


図 22 頭頂 ROI における total 帯域の時間推移

確には捉えられなかった。

6.3.2 時間窓解析における主結果

次に、スライディング窓を用いた時間変化解析を行い、各時間窓において映像温度（温／冷）×触覚（あり／なし）の2×2要因分散分析を適用した。

その結果、温感課題では単一の効果に集約されるのではなく、ROIおよび周波数帯域ごとに異なる三種類の効果が、異なる時間帯に出現することが確認された。

後頭ROIにおけるtotal帯域では映像温度と触覚の交互作用が、前頭ROIにおける μ 帯域では映像温度の主効果が、頭頂ROIにおけるtotal帯域では触覚の主効果が、それぞれ比較的まとまった時間区間で観察された。

後頭ROIにおけるtotal帯域について、終了約15.5秒前から12.5秒前（ $t = -15.5 \sim -12.5$ s）の区間において、映像温度（温／冷）と触覚刺激の交互作用が有意であった（図20参照）。

また、前頭ROIにおける μ 帯域では、終了約17秒前から16秒前（ $t = -16.97 \sim -16.47$ s）の区間において、映像温度の主効果が有意であった（図21参照）。

さらに、頭頂ROIにおけるtotal帯域では、終了約22.5秒前から21秒前（ $t = -22.46 \sim -20.97$ s）の区間において、触覚刺激の主効果が有意であった（図22参照）。

このように、温感課題では、交互作用、映像温度の主効果、触覚の主効果が、それぞれ異なる時間区間および脳部位において観察された。

この結果は、複数の感覚要因が独立ではなく、脳内の異なる処理系において相補的に作用している可能性を示唆する。

図20 後頭ROIにおけるtotal帯域の時間推移

図21 前頭ROIにおける μ 帯域の時間推移

図22 頭頂ROIにおけるtotal帯域の時間推移

6.3.3 後頭ROIにおけるtotal帯域の区間的傾向

6.3.3 後頭ROIにおけるtotal帯域の区間的傾向

終了約15秒前に相当する区間（ $t = -15.5 \sim -12.5$ ）において、後頭ROIのtotal帯域（1-40 Hz）の差分値を被験者ごとに区間平均し、2×2要因分散分析（映像温度×触覚）を行った（ $n = 60$ ，群内訳 A=15, B=15, C=15, D=15）。その結果、映像温度と触覚の交互作用が有意であった（ $F(1,56)=7.52$ ，

$p=0.00818$ ， $\eta^2 p^2=0.118$ ）。一方、映像温度の主効果（ $F(1,56)=0.50$ ， $p=0.482$ ）および触覚の主効果（ $F(1,56)=1.73$ ， $p=0.192$ ）は有意ではなかった。

区間平均の群平均（平均±SD）は、熱・触覚なし条件（A） 0.178 ± 0.761 ，冷・触覚なし条件（B） 0.546 ± 0.936 ，熱・触覚あり条件（C） 0.961 ± 0.752 ，冷・触覚あり条件（D） 0.282 ± 0.487 であった（図23参照）。

交互作用の内容を確認するため、区間平均1値に対して単純主効果の検定（Welchのt検定，Holm補正）を行った。その結果、触覚あり条件における熱条件（C）と冷条件（D）の比較が有意であった（ $p_{\text{Holm}} = 0.0288$ ）。また、熱条件における触覚あり（C）と触覚なし（A）の比較も有意であった（ $p_{\text{Holm}} = 0.0288$ ）。一方、触覚なし条件における熱条件（A）と冷条件（B）の比較、および冷条件における触覚あり（D）と触覚なし（B）の比較はいずれも有意ではなかった。

これらの結果は、後頭ROIのtotal帯域において、触覚刺激の効果が映像温度条件によって異なることを示している。特に、熱条件では触覚刺激の付加により差分値が増加した一方、冷条件では触覚刺激の有無による明確な変化は認められなかった。

6.3.4 前頭ROIにおける μ 帯域の区間的傾向

前節と同様に、終了約17秒前に相当する区間（ $t = -16.97 \sim -16.47$ ）において、前頭ROIの μ 帯域（8-13 Hz）の差分値を被験者ごとに区間平均し、2×2要因分散分析（映像温度×触覚）を行った（ $n = 60$ ，群内訳 A=15, B=15, C=15, D=15）。その結果、映像温度の主効果が有意であった（ $F(1,56)=6.73$ ， $p=0.0121$ ， $\eta^2 p^2=0.107$ ）。一方、触覚の主効果（ $F(1,56)=1.97$ ， $p=0.167$ ）および交互作用（ $F(1,56)=0.15$ ， $p=0.703$ ）は有意ではなかった。

区間平均の群平均（平均±SD）は、熱・触覚なし条件（A） 0.455 ± 0.694 ，冷・触覚なし条件（B） -0.097 ± 0.828 ，熱・触覚あり条件（C） 0.643 ± 0.701 ，冷・触覚あり条件（D） 0.233 ± 0.653 であった（図24参照）。

区間平均1値に対する群間比較（Welchのt検定，Holm補正）では、AとBの比較、およびCとDの比較において有意差が認められ、いずれも熱条件が冷条件より高い値を示した。

これらの結果は、前頭ROIの μ 帯域において、触覚刺激の有無にかかわらず、映像温度（熱／冷）の違いが脳活動に影響を及ぼすことを示している。特に、熱条件では μ 帯域パワーの増加が一貫して観察され、温かさに関する視覚的手がかりが、前頭領域における予測的処理や注意配分に関与している可

Temperature interval mean (participant-wise): ROI=occipital, metric=EEG_tot [-15.5, -12.5]

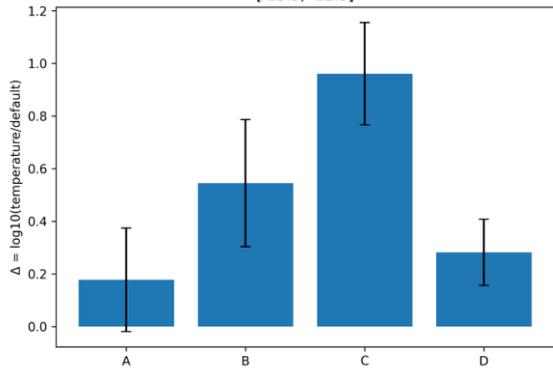


図 23 後頭 ROI における total 帯域の棒グラフ (終了 15.5-12.5 秒前)

Temperature interval mean (participant-wise): ROI=frontal, metric=EEG [-16.97, -16.47]

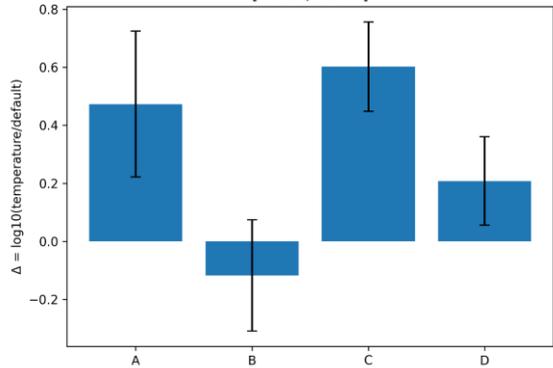


図 24 前頭 ROI における μ 帯域の棒グラフ (終了 16.97-16.47 秒前)

Temperature interval mean (participant-wise): ROI=parietal, metric=EEG_tot [-22.46, -20.97]

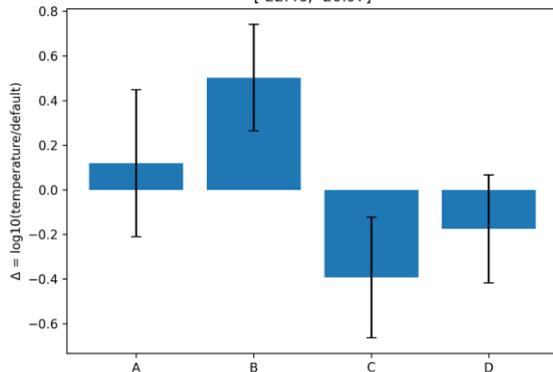


図 25 頭頂 ROI における total 帯域の棒グラフ (終了 22.46-20.97 秒前)

能性が示唆された。

6.3.5 頭頂 ROI における total 帯域の補助的結果

さらに、終了約 22 秒前に相当する区間 ($t = -22.46 \sim -20.97$) において、頭頂 ROI の total 帯域 (1-40 Hz) の差分値を被験者ごとに区間平均し、 2×2 要因分散分析 (映像温度 \times 触覚) を行った ($n = 60$, 群内訳 A=15, B=15, C=15, D=15)。その結果、触覚の主効果が有意であった ($F(1,56) = 5.69$, $p = 0.0204$, $\eta^2 = 0.092$)。一方、映像温度の主効果 ($F(1,56) = 0.75$, $p = 0.388$) および交互作用 ($F(1,56) = 0.08$, $p = 0.772$) は有意ではなかった。

区間平均の群平均 (平均 \pm SD) は、熱・触覚なし条件 (A) 0.221 ± 0.612 , 冷・触覚なし条件 (B) 0.507 ± 0.881 , 熱・触覚あり条件 (C) -0.293 ± 0.684 , 冷・触覚あり条件 (D) -0.151 ± 0.531 であった (図 25 参照)。

区間平均 1 値に対する群間比較 (Welch の t 検定, Holm 補正) では、触覚なし条件 (A, B) と触覚あり条件 (C, D) との間で差が認められ、触覚刺激を伴う条件では差分値が低い傾向が確認された。

これらの結果は、頭頂 ROI における広域的な脳活動が触覚刺激の付加によって抑制方向に変化する可能性を示しており、視覚・聴覚による温度予測に対して実際の身体入力に加わることで、体性感覚統合過程が調整されることを示唆する。

6.4 主観評価の結果

主観評価 (リニアスケール) について、課題ごとに被験者間 2×2 要因分散分析 (ANOVA) を行った。落下および斬撃課題では、要因を聴覚 (あり/なし) \times 触覚 (あり/なし) とし、群定義は EEG 解析と完全に一致するよう A (視覚のみ), B (視覚+聴覚), C (視覚+触覚), D (視覚+聴覚+触覚) に統一した。温感課題は実験設計上すべての条件に聴覚刺激が含まれるため、 2×2 要因を温度 (熱湯映像/氷水映像) \times 触覚 (あり/なし) とした (A = 熱湯+視聴覚, B = 氷水+視聴覚, C = 熱湯+視聴覚+触覚, D = 氷水+視聴覚+触覚)。各設問について、第 1 要因および第 2 要因の主効果、ならびに両要因の交互作用を検定し、効果量として偏 η^2 (η^2) を算出した。なお、本研究では 1 課題あたり複数の主観指標を同時に検定しているため、単純に有意水準 $p < .05$ を用いると、第 I 種の誤り (偶然による偽陽性) が増加する可能性がある。そこで、多重検定による誤検出率を制御するために、

Benjamini-Hochberg 法による False Discovery Rate (FDR) 補正を適用した。FDR 補正は、「有意と判定された結果のうち、どの程度が偽陽性であるか」という期待割合を制御する手法であり、Bonferroni 補正などの家族誤差率 (FWER) 制御法と比較して検出力が高いという特徴をもつ。本研究のように探索的要素を含み、複数の主観評価項目を包括的に検討する場合には、過度に保守的な補正を避けつつ、統計的信頼性を担保できる点で FDR 補正が適していると考えられる。以上を踏まえ、本研究では課題内かつ効果種別 (主効果・交互作用) ごとに FDR 補正を行い、補正後の q 値が .05 未満の結果を有意の目安として解釈した。

6.4.1 落下課題における主観評価結果

落下課題では、「風・空気抵抗」に関する評価において触覚の主効果が有意であり、触覚あり条件 (C, D) が触覚なし条件 (A, B) より高い値を示した ($F(1,55)=13.95$, $p < .001$, $\eta p^2 = .202$, $q = .008$)。各群の平均は A ($n=15$, $M=2.07$, $SD=1.49$), B ($n=15$, $M=2.60$, $SD=1.59$), C ($n=15$, $M=3.53$, $SD=1.30$), D ($n=14$, $M=3.79$, $SD=0.97$) であった。

この結果は、送風による触覚刺激の付加が、落下体験における空気抵抗感の主観的強度を高めることを示している。その他の設問では、FDR 補正後に有意となる主効果および交互作用は確認されなかった。

6.4.2 斬撃課題における主観評価結果

斬撃課題では、複数の設問において触覚の主効果が有意であった。とくに「衝撃・触られた感覚」(2.3.1)において触覚の主効果が有意であり、触覚あり条件 (C, D) が触覚なし条件 (A, B) より高い値を示した ($F(1,55)=77.14$, $p < .001$, $\eta p^2 = .584$, $q < .001$)。各群の平均は A ($n=15$, $M=1.53$, $SD=0.83$), B ($n=15$, $M=1.73$, $SD=1.10$), C ($n=15$, $M=3.80$, $SD=1.42$), D ($n=14$, $M=4.43$, $SD=0.85$) であった。

同様に、「リアリティ」(2.1.1)においても触覚の主効果が有意であり ($F(1,55)=13.22$, $p = .001$, $\eta p^2 = .194$, $q = .005$)、「触られている感じ」(2.1.8)においても触覚の主効果が有意であった ($F(1,55)=11.79$, $p = .001$, $\eta p^2 = .177$, $q = .006$)。さらに、「興奮・緊張」(2.6)においても触覚の主効果が有意であった ($F(1,55)=6.72$, $p = .012$, $\eta p^2 = .109$, $q = .049$)。

一方、聴覚の主効果および交互作用は、FDR 補正後には有意に至らなかった。以上の結果は、斬撃体験において触覚刺激が主観的な衝撃感、リアリティ、身体的接触感、および情動反応を一貫して強め

ることを示している。

6.4.3 温感課題における主観評価結果

温感課題では、「温かさ・冷たさを感じたか」(3.3)において触覚の主効果が有意であり、触覚あり条件 (C, D) が触覚なし条件 (A, B) より高い値を示した ($F(1,55)=68.29$, $p < .001$, $\eta p^2 = .554$, $q < .001$)。各群の平均は A ($n=15$, $M=1.67$, $SD=1.11$), B ($n=15$, $M=2.40$, $SD=1.55$), C ($n=15$, $M=4.40$, $SD=0.74$), D ($n=14$, $M=4.64$, $SD=1.08$) であった。

また、「リアリティ」(3.1.1)および「触られている感じ」(3.1.8)においても触覚の主効果が有意であった (3.1.1: $F(1,55)=12.37$, $p = .001$, $\eta p^2 = .184$, $q = .004$; 3.1.8: $F(1,55)=12.32$, $p = .001$, $\eta p^2 = .183$, $q = .004$)。

さらに、「興奮・緊張」(3.7)では温度×触覚の交互作用が有意であった ($F(1,55)=9.44$, $p = .003$, $\eta p^2 = .147$, $q = .043$)。事後的に単純主効果 (Welch の t 検定, Holm 補正)を確認したところ、熱条件における触覚の効果 (A vs C) が有意であった ($p_{\text{Holm}} = .006$)。一方、冷条件における触覚の効果 (B vs D) は有意ではなかった ($p_{\text{Holm}} = .295$)。

これらの結果は、温感体験において触覚刺激が温度感覚およびリアリティを強めるとともに、情動反応への影響は温条件において顕著であり、温冷の知覚と触覚入力統合が非対称的に生じる可能性を示唆している。

6.5 探索的評価項目における補足的観点

本節では、本研究の主要な仮説検証とは独立した探索的分析として、被験者の個人特性が生理指標に及ぼす可能性について検討する。具体的には、事後アンケートに含まれていた Big Five 性格特性を用い、EEG 指標との関連を補足的に分析した。

Big Five 特性は、外向性、協調性、誠実性、神経症傾向、開放性という比較的安定した性格傾向を表す指標であり、感覚刺激に対する主観的反応や注意配分の個人差と関連する可能性が指摘されている。一方で、本研究における EEG 解析は条件操作による群間差の検出を主目的として設計されており、性格特性を主要因として扱うことは想定していない。そのため、本節での分析は、個人差の背景要因を把握するための探索的検討として位置づける。

6.5.1 Big Five 特性と生理指標評価の関連

6.5.1 Big Five 特性と生理指標評価の関連

Big Five 特性と EEG 指標の関連を検討するため、各課題において代表的な EEG 指標を抽出し、被験者ごとに区間平均値を算出した。代表指標は、第 6.1 節から第 6.3 節までで効果が示唆された時間区間および ROI・帯域の組み合わせを基準として選定した。これにより、各被験者について「課題を代表する EEG の単一指標」を得た。

次に、Big Five の各特性スコアと対応する EEG 区間平均値との間で相関分析を行った。相関係数には、外れ値の影響を受けにくい Spearman の順位相関係数を用いた。なお、本分析は複数の特性および複数課題を対象とする探索的分析であることから、多重比較補正を前提とした厳密な有意性判定よりも、相関係数の大きさおよび方向性に着目して結果を解釈した。

その結果、いずれの課題においても、多重比較補正後に統計的に有意と判断できる相関は確認されなかった。一方で、落下課題では外向性と前頭 ROI の μ 帯域指標との間に弱い正の相関傾向が認められた。また、温感課題では神経症傾向と後頭 ROI の total 帯域指標、および前頭 ROI の μ 帯域指標との間に弱い相関傾向が観察された。斬撃課題においては、Big Five 特性と EEG 指標との明確な関連は確認されなかった。

以上より、本研究においては Big Five 特性と EEG 指標との関連は探索的水準にとどまり、明確な関連性を示す結果は得られなかった。

6.5.2 Big Five 特性と主観評価指標の関連

Big Five 特性と主観評価指標の関連を検討するため、Big Five パーソナリティ特性（開放性 O、誠実性 C、外向性 E、協調性 A、神経症傾向 N）を説明変数として、各課題に含まれるすべての主観評価設問に対して重回帰分析を実施した。各設問を目的変数とし、刺激条件（A-D）をカテゴリ変数として投入したうえで、Big Five の 5 因子を連続変数として同時にモデルに含めることで、刺激条件の影響を統制した上で性格特性が主観評価に独立して寄与するかを検討した。

解析は斬撃課題、落下課題、温感課題ごとに行い、欠損値を含む被験者を除外した結果、解析対象は 59 名となった。設問数が多く、多重検定による偽陽性の増加が懸念されることから、Big Five 各因子の回帰係数に対して Benjamini-Hochberg 法による False Discovery Rate (FDR) 補正を適用し、補正後の q 値が .05 未満の結果を有意の目安として解釈した。

その結果、斬撃課題および落下課題においては、Big Five 特性が主観評価を有意に説明する設問は

FDR 補正後には確認されなかった。これらの課題では、多くの設問において刺激条件の効果が強く、個人差としての性格特性の寄与は限定的であった。

一方、温感課題においては外向性 (E) が一部の設問で有意な正の寄与を示した。具体的には、「仮想の身体 (腕や手) は、自分の身体の一部のように感じましたか」 (設問 3.1.5) において外向性の回帰係数が有意であり ($\beta = 0.455$, $p = .001$, $q = .011$)、外向性が高い被験者ほど身体所有感を強く報告する傾向が認められた。また、「触られているように感じましたか」 (設問 3.1.8) においても外向性が有意な正の寄与を示した ($\beta = 0.454$, $p = .001$, $q = .011$)。

一方で、開放性、誠実性、協調性、神経症傾向については、FDR 補正後に有意となる設問は確認されなかった。

さらに、性格特性が触覚刺激の効果を調整する可能性を検討するため、条件を触覚なし (A/B) と触覚あり (C/D) に再分類し、Big Five 特性との交互作用項を含む回帰モデルを追加で構築した。その結果、温感課題の一部設問において外向性 \times 触覚有無の交互作用が正方向に働く傾向が認められ、外向性が高い被験者ほど触覚刺激が付加された際に主観評価がより大きく増加する可能性が示唆された。ただし、これらの交互作用効果はいずれも FDR 補正後には有意水準に達しなかったため、本研究では探索的所見として位置づける。

6.6 結果の総括

本章では、落下、斬撃、温感の三課題における生理指標および主観評価の結果を示した。試行全体の平均値に基づく解析ではいずれの課題においても明確な群間差は確認されなかったが、時間窓解析により、特定の時間帯および脳部位において感覚刺激条件の影響が観察された。特に、落下および斬撃課題では触覚刺激の有無が μ 帯域および total 帯域の脳活動変化に関与する傾向が示され、視覚主導の課題においても触覚刺激が脳活動に影響を与える可能性が示唆された。温感課題では、映像温度と触覚刺激が異なる脳部位および周波数帯域において独立または交互に影響することが確認され、クロスモーダル統合の特徴が示された。

主観評価の結果では、三課題すべてにおいて触覚刺激がファントムセンスの強度およびリアリティの向上に寄与することが確認され、生理指標の結果と部分的な整合がみられた。一方、Big Five 特性と生理指標との関連は限定的であったが、温感課題

において外向性が身体所有感および触覚感の主観評価と関連する可能性が示唆された。

7. 考察

本章では、第6章で得られた生理指標 (EEG)、主観評価、探索的評価 (Big Five) の結果を統合し、仮説 H1・H2 の検証結果を整理した上で、感覚モダリティの役割と課題間差を解釈する。とくに、本研究では試行全体の代表値では群間差が明確になりにくい一方、時間変化を考慮した解析により特定の時間帯・ROI・帯域で効果が検出された。この特徴を踏まえ、ファントムセンス体験が「体験中のある局面で一過的に立ち上がる現象」である可能性を中心に議論する。

7.1 仮説 H1・H2 の検証結果の整理

仮説 H1：複合刺激条件では視覚のみ条件より PTS 主観強度が有意に増大する

結論：H1 は概ね支持された (主観評価の観点では強く支持)。

第6章の主観評価では、3課題すべてで触覚刺激を含む条件 (C/D) が触覚なし条件 (A/B) より高い傾向が確認された。とくに、斬撃課題の「衝撃・触られた感覚」(2.3.1) および温感課題の「温かさ/冷たさを感じたか」(3.3) では触覚の主効果が大きく、複合刺激 (少なくとも視覚+触覚) によって PTS 強度が有意に増大することが示された。落下課題でも「風・空気抵抗」(4.4) で触覚の主効果が有意であり、触覚の付加が体験強度を押し上げる方向で作用することが確認された。

一方で、H1 は「視覚・聴覚・触覚の複合」として述べられているが、本研究の結果では、主観強度の増大を駆動した主因は触覚であり、聴覚の主効果は一貫して有意になりにくかった。したがって、厳密には「視覚+触覚を含む複合刺激」が PTS 強度を増大させた、という形で解釈するのが適切である。この点は、聴覚刺激が身体入力を直接付与するものではなく、体験強度を単独で押し上げるよりも、事象性や因果性の理解を補助する役割として機能した可能性と整合的である。

仮説 H2：複合刺激条件では視覚のみ条件より EEG (μ 帯域・total 帯域) がより大きく変調する

結論：H2 は「時間構造を考慮した解析において部分的に支持された」。

EEG 解析では、試行全体を単一の代表値 (試行時間全体の平均値として算出した Δ) に集約した解析では、いずれの課題でも有意な群間差が確認されな

かった。このため、「試行全体の平均」という意味では H2 は支持されない。

しかし、スライディング窓解析および区間平均解析により、特定の時間帯・ROI・帯域で複合刺激 (主として触覚) の影響が検出された。具体的には、斬撃課題では後頭 ROI の total 帯域および頭頂 ROI の μ 帯域で触覚主効果が有意となり、視覚のみ条件より触覚を含む条件で Δ が大きい傾向が確認された。温感課題でも、後頭 ROI の total 帯域で温度×触覚の交互作用、前頭 ROI の μ 帯域で温度主効果、頭頂 ROI の total 帯域で触覚主効果がそれぞれ区間として有意であり、複数モダリティの組合せが脳活動を局所的に変調し得ることが示された。落下課題では、前頭 ROI の μ 帯域で触覚主効果が観察されたが、所見は限定的であり、斬撃・温感に比べて効果が安定しにくい可能性が示唆された。

以上より、本研究の EEG 結果は、複合刺激の効果が「常に一律な増大」として現れるのではなく、体験中の特定局面で一過的に立ち上がるという特徴を示す。このため H2 は、「試行全体の平均で一律に大きくなる」という単純な予測としては支持されない一方、時間整列 (align = end) にもとづく局所解析では、 μ 帯域および total 帯域において複合刺激 (とくに触覚) 関連の変調が検出されるという意味で部分的に支持されたと結論づけられる。

7.2 視覚・聴覚・触覚の役割分担

本節では、視覚・聴覚・触覚が PTS 体験に果たす役割を、(i) 視覚が形成するイベント理解の枠組み、(ii) 触覚がもたらす身体入力としての補強、(iii) 聴覚が担う事象性・因果性の補助、の観点から整理する。その上で、主観評価と EEG 所見がどのように対応し、どの部分で乖離し得るかを検討する。

7.2.1 視覚は体験の骨格を形成し、触覚が身体入力として体験を増幅する

3課題に共通して、視覚はイベント理解 (落下・斬撃・温冷) の枠組みを提示し、体験の骨格を形成する役割を担う。その上で触覚刺激が加わると、主観評価では感覚強度が大きく増加し、とくに斬撃 (「衝撃・触られた感覚」と温感 (「温かさ/冷たさを感じたか」) で強い主効果が確認された。この傾向は、「触覚が加わることで、視覚情報に基づく予測が身体入力によって裏づけられ、体験が自分の身体の出来事として再解釈されやすくなる」ことを示唆する。

7.3 課題間差の解釈

7.1.2 温感課題における温度×触覚の交互作用

温感課題では、後頭 ROI の total 帯域において映像温度（熱／冷）と触覚の交互作用が確認された。この所見は、温冷知覚が単一モダリティの入力で決定されるのではなく、視覚・聴覚による温冷手がかり（予測）と、触覚による身体入力（確認）が統合される過程で動的に構成される可能性を示唆する。すなわち、触覚刺激の付加は単に体験強度を増大させるだけでなく、映像温度の解釈や注意配分を変調し、結果として熱条件と冷条件の差の現れ方を変える可能性がある。

また、本研究では、温感課題において交互作用（後頭 total）、温度主効果（前頭 μ ）、触覚主効果（頭頂 total）が異なる時間区間・ROI で観察された。この分離は、温感体験が視覚の手がかりの処理、予測の更新、身体入力の統合といった複数の処理要素から成り、それぞれが体験中の異なる局面で関与し得ることを示している。したがって温感課題では、「触覚があるほど一様に強く感じる」という単純な増幅モデルよりも、予測と身体入力の整合性に応じて知覚が再構成されるクロスモーダル統合の枠組みで捉えることが適切である。

7.2.3 聴覚刺激の効果が主効果として現れにくかった可能性

落下および斬撃課題では、EEG および主観評価の双方において、聴覚刺激の主効果が一貫して有意とはならなかった。この結果は、本研究で用いた聴覚刺激が触覚刺激のように身体への入力を直接付与するものではないため、体性感覚関連の指標や主観的な感覚強度を単独で増大させにくかった可能性を示している。

一方で、聴覚は出来事の因果性や事象性の理解を補助し、視覚情報によって形成される予測を強化する手がかりとして機能し得る。そのため、聴覚の寄与は「体験強度を一様に押し上げる主効果」という形ではなく、視覚・触覚の統合が成立しやすい状況を整える補助的役割として現れる可能性がある。今後は、聴覚刺激のタイミング、同期精度、音源定位、音の意味づけの強さといった設計要因を明示的に操作し、触覚との相互作用やイベント理解の指標を併用して検討することが望ましい。

本節では、試行全体の代表値（ Δ の 1 値化）では効果が検出されにくく、時間窓・区間平均解析で効果が現れた理由を整理する。とくに、体験中に生じる脳活動変化が時間的に局所化している可能性と、平均化により効果が相殺される可能性に着目する。

7.3.1 斬撃課題で触覚効果が最も明確に現れた可能性

斬撃課題では、EEG の区間平均解析で後頭 ROI total 帯域と頭頂 ROI μ 帯域に触覚主効果が有意となり、主観評価でも触覚関連項目が強く増加した。斬撃は外界から身体へ侵入する出来事を想起させやすく、触覚入力と結びつきやすい。そのため、触覚が身体への入力として効きやすく、結果として体性感覚統合（頭頂）や広帯域の変調（total）として表れた可能性がある。この課題は、触覚刺激がphantom sense 形成に与える影響を示すうえで、3 課題の中で相対的に感度が高いタスクとして位置づけられる。

7.3.2 落下課題で変化方向が条件により異なったことの意味

落下課題では、前頭 ROI μ 帯域で触覚の有無により Δ の符号が異なる時間帯が観察された。この所見は、「触覚が付加されることで注意配分や予測処理が変化し、結果として μ 帯域が同一方向には変化しない」可能性を示唆する。落下は身体全体の状態変化を含むため、触覚入力が単純な増幅として働くというより、予測の更新や緊張状態の調整のような前頭系の過程に影響し、 μ 帯域の変調方向が変化した可能性がある。

一方で、有意所見が限定的である点は、落下課題が斬撃に比べて触覚入力の意味づけが難しく、個人差が大きいことを示唆する。

7.3.3 温感課題はクロスモーダル統合が前提となるため交互作用が現れやすい

温感課題では、後頭 ROI total 帯域で温度×触覚の交互作用が有意であった。これは温冷知覚が、視覚・聴覚の手がかり（予測）と触覚（身体入力）の整合性によって動的に構成されるクロスモーダル現象であることと整合的である。また、同一課題内で「後頭 total = 交互作用」「前頭 μ = 温度主効果」

「頭頂 total=触覚主効果」と効果の種類が分離したことは、温感体験が単一の処理系ではなく、視覚処理（後頭）、予測・注意（前頭）、体性感覚統合（頭頂）が異なるタイミングで関与する可能性を示す。

7.4 生理指標（EEG）で平均化すると効果が見えにくい理由

本研究では、試行全体の差分指標 Δ を 1 値に集約した解析では有意差が確認されなかった一方で、時間窓解析および区間平均解析により、特定の時間帯・ROI・帯域で触覚や温度に関連する効果が検出された。この違いは、ファントムセンスに関連する脳活動変化が試行全体にわたって一様に持続するというより、体験中の特定局面で一過的に強調される可能性を示唆する。

具体的には、落下・斬撃・温感の各課題は、体験の進行に伴って「出来事理解」「予測の更新」「身体入力との統合」といった処理が段階的に変化し得る。そのため、試行全体を平均化すると、局所的な増減や符号の異なる変化が相殺され、群間差が小さく見積られる可能性がある。本研究で効果が検出された時間帯が限定的であったことは、この解釈と整合的である。

以上より、EEG による評価では、単一の代表値のみで結論づけるのではなく、イベントに整列した時間軸に基づく解析により、変化が生じやすい局面を同定した上で検討することが重要である。本研究の解析枠組み（計測終了時刻に整列した時間軸、スライディング窓、区間平均による集約）は、この点に対応するための方法として位置づけられる。

7.5 主観評価の位置づけと EEG との関係

主観評価では触覚の効果が明確に現れた一方、EEG では局所的な時間帯に限って効果が検出された。この差は、主観評価が「体験を振り返った総合判断」であるのに対し、EEG が「体験中の局所的処理の変化」を反映し得るという、指標の性質の違いによるものと考えられる。

つまり、主観評価の強度上昇は「触覚があった」という事実と整合しやすいが、EEG は「いつ」「どの処理系（ROI・帯域）」が変化したかを示すため、必ずしも単調な増減にはならない。したがって、ファントムセンスのような主観性の高い現象を評価する際には、主観評価と生理指標を相補的に用いる

ことが有効であり、両者を併せて解釈することで体験の総合像をより妥当な形で捉えられる可能性がある。

7.6 個人差（Big Five）の解釈と限界

探索的分析では、Big Five と EEG の関連は明確ではなく、主観評価において温感課題で外向性が一部設問に寄与した。この結果は、性格特性がファントムセンス体験を決定づける主要因というより、条件効果が生じたときの“感じ方”を修飾する背景要因として作用する可能性を示す。一方で本研究は性格特性を操作因として設計していないため、過度な一般化は避け、探索的所見として位置づけることが妥当である。

7.7 本研究の限界と今後の課題

1. EEG は VR 環境下で筋電・動作アーチファクトの影響を受けやすく、ROI 集約や差分化で緩和したが、残存ノイズの可能性は残る。
2. 聴覚効果が弱かった点は、提示タイミングや定位、音の意味づけの設計に依存するため、音の要因操作を分離した追試が必要である。
3. 主観評価は事後評価であり、体験中の局所の変化を反映しにくい。連続評価やイベント直後の短縮質問を併用することで、EEG の時間局面との対応が取りやすくなる。

8. まとめ

本研究では、VR 環境におけるファントムセンス体験を対象として、視覚を基盤とする刺激提示に対し、聴覚および触覚を付加したときの影響を、生理指標（EEG）と主観評価の両面から検討した。落下、斬撃、温感の三課題を設計し、感覚モダリティの組合せが体験および脳活動に与える効果を比較した点が本研究の特徴である。

生理指標の解析では、安静時ベースライン（default）との差分指標を用いたうえで、試行全体の代表値だけでなく、時間変化を考慮したスライディング窓解析と区間平均解析を行った。その結果、試行全体を単一の代表値として扱う解析では群間差が明確になりにくい一方で、時間軸に沿った解析により、特定の時間帯・ROI・周波数帯域で触覚や映像条件に関連する効果が検出された。このことは、ファントムセンスに関わる脳活動変化が体験中に一様に持続するのではなく、体験の進行に伴う局面

で一過的に強調され得ることを示唆する。

課題間差としては、斬撃課題で触覚刺激の効果が最も明確に現れ、主観評価でも触覚関連項目が大きく増加した。落下課題では、触覚の付加が一律の増幅としては現れにくく、条件によって変化方向が異なる時間帯が観察され、課題文脈や個人差の影響が大きい可能性が示された。温感課題では、温度(熱/冷)と触覚の交互作用が観察され、温冷知覚が視覚・聴覚による手がかり(予測)と触覚による身体入力(確認)の統合によって動的に構成される可能性が示唆された。

主観評価では、いずれの課題でも触覚刺激を含む条件で体験強度が高く評価される傾向が確認された。一方で、EEGで検出された効果は時間的に局所的であり、主観評価のような総合的判断と必ずしも一対一に対応しない可能性が示された。したがって、ファントムセンスのように主観性の高い現象を評価するには、主観評価と生理指標を相補的に用い、体験の「総合印象」と「体験中の処理過程」を併せて解釈することが有効である。

探索的検討として Big Five 性格特性を扱った結果、主観評価の一部設問で外向性の寄与が示されたものの、課題横断で強い一貫性は確認されなかった。このため、性格特性は主要因というより、条件効果が生じた際の感じ方を修飾し得る背景要因として位置づけるのが妥当である。

以上より、本研究は、VRにおけるファントムセンス体験が、感覚モダリティの組合せ、とくに触覚刺激の付加と、体験中の時間的文脈に依存して変化することを、生理指標と主観評価の両面から示した。これらの知見は、今後のVR体験設計において、触覚刺激の導入の有無だけでなく、提示のタイミングや課題文脈との整合性を設計指針として検討するうえでの基礎的知見として位置づけられる。

謝辞

本論文の作成にあたり、実験にご協力いただき、被験者として参加して下さった公立ほこだて未来大学の学生の皆様および実験の準備および実施に際して多大なご支援を賜りました角薫研究室の皆様に、心より御礼申し上げます。

参考文献

[1] Mel Slater, Anthony Steed, “A virtual presence counter”, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9(5): 413–434 (2000).

[2] Robert G. Mays, Suzanne B. Mays, “Phantom limb ‘touch’ suggests that a ‘mind-limb’ extends beyond the physical body”, *Toward a Science of Consciousness 2008 Poster*, Tucson (2008).

[3] Artur Pilacinski, Marita Metzler, Christian Klaes, “Phantom touch illusion, an unexpected phenomenological effect of tactile gating in the absence of tactile stimulation”, *Scientific Reports*, 13 (1): 15453 (2023).

[4] 齊藤天馬, 角薫, “メタバース空間におけるファントムセンスの実証研究”, *AIoT 行動変容学会第9回研究会 (BTI9)*, *AIoT 行動変容学会* (2025).

[5] Bigna Lenggenhager, Tej Tadi, Thomas Metzinger, Olaf Blanke, “Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness”, *Science*, 317(5841): 1096–1099 (2007).

[6] Mark T. Wallace, Barry E. Stein, “Multisensory integration in the nervous system”, *Nature Reviews Neuroscience*, 5(6): 459–471 (2004).

[7] Morten L. Kringelbach, Tipu Z. Aziz, Michael J. Green, “Translational principles of deep brain stimulation”, *Nature Reviews Neuroscience*, 8(8): 623–635 (2007).

[8] Lutz Jäncke, Christian Brügger, Lutz Brügger, “Brain activity during imagined hand movements”, *NeuroReport*, 13(16): 2039–2042 (2002).

[9] L. Pineda, “The functional significance of mu rhythms: Translating ‘seeing’ and ‘hearing’ into ‘doing’”, *Brain Research Reviews*, 50(1): 57–68 (2005).

[10] Barry E. Stein, Terrence R. Stanford, “Multisensory integration: Current issues from the perspective of the single neuron”, *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4): 255–266 (2008).

[11] Donnellan, M. B., Oswald, F. L., Baird, B. M., & Lucas, R. E., “The Mini-IPIP Scales: Tiny-yet-effective measures of the Big Five factors of personality”, *Psychological Assessment*, 18(2), 192–203 (2006).

付録

付録 A 事後アンケート 質問項目一覧

基本情報・個人特性

- 1.1 研究者に言われた ID 番号を半角数字で書いてください
- 1.2 年齢を教えてください
- 1.3 あなたの性別を教えてください
- 1.4 学籍番号を半角数字で教えてください
※ b を除いた 7 桁の数字でお願いします
- 1.4.1 何かあった時のために連絡の取りやすいメールアドレスを書いてください
- 1.5 実験中の体調について教えてください
- 1.6 ゲームの頻度について教えてください
- 1.7 ゲームをするかと答えた人に質問です。
1 日あたりの平均プレイ時間はどのくらいですか？
- 1.8 VR 体験（経験）の頻度について教えてください
- 1.9 ファントムセンスについて知っていましたか

性格特性（Big Five）

- Q-BF1 私は、新しい体験やアイデアに好奇心をもつほうだ
Q-BF2 私は、芸術や文化的な活動にあまり関心がない
Q-BF3 私は、幅広い話題について学ぶのが好きだ
Q-BF4 私は、慣れたやり方以外を試すのは好きではない
Q-BF5 私は、やるべきことを計画的に進める
Q-BF6 私は、締切や約束をうっかり忘れがちだ
Q-BF7 私は、細部まで注意を払う
Q-BF8 私は、場当たりに動くことが多い
※ 場当たりの：その場の思いつきで行動すること
Q-BF9 私は、人前で話したり人と関わるのが好きだ
Q-BF10 私は、初対面の人と話すのが苦手だ
Q-BF11 私は、活動的でエネルギッシュだ
Q-BF12 私は、静かに一人で過ごす方がずっと楽だ
Q-BF13 私は、思いやりがあり、人に配慮する
Q-BF14 私は、つい批判的・攻撃的な言い方になってしまう
Q-BF15 私は、周囲と協力して物事を進めるのが得意だ
Q-BF16 私は、自分の利益を優先して他人の気持ちを後回しにしがちだ
Q-BF17 私は、気持ちが動揺しやすい
Q-BF18 私は、ストレス下でも落ち着いて対処できる
Q-BF19 私は、将来の不安を考え込んでしまうことが多い
Q-BF20 私は、めったに不安や緊張を感じない

斬撃体験

- 2.1.1 斬撃体験はリアリティ（現実感，没入感）を感じましたか
- 2.1.2 現実世界の存在を忘れるほど没入していましたか
- 2.1.3 仮想空間に本当にいるような感覚はありましたか
- 2.1.4 仮想環境と自分が一体化しているように感じましたか
- 2.1.5 仮想の身体（腕や手）は、自分の身体の一部のように感じましたか
- 2.1.6 仮想の身体と自分の身体の位置が一致していると感じましたか

- 2.1.7 仮想の身体を自分の意志で動かしているように感じましたか
- 2.1.8 仮想の身体に何かが触れたとき、自分が触られているように感じましたか
- 2.2 人と対面している感覚はありましたか
- 2.3.1 斬られた部位に「衝撃」や「触られた」ような感覚を感じましたか
- 2.3.2 2.3.1 で「何も感じなかった」を選ばなかった人に質問です。
その感覚の持続時間について教えてください（例：切られてから x 秒）
- 2.4.1 斬撃体験の際に不快感を感じましたか
- 2.4.2 斬撃体験の際に快いと感じましたか
- 2.5 斬撃体験の際に恐怖感・不安感を感じましたか
- 2.6 斬撃体験の際に興奮・緊張を感じましたか
- 2.7 斬撃体験の際に自分が状況をコントロールできていたと感じましたか
- 2.8 斬撃体験を通して興味深さや面白みを感じましたか
- 2.9 斬撃体験を通して気づいたことや感じたことなどの感想をお願いします
温感体験
- 3.1.1 温感体験はリアリティ（現実感，没入感）を感じましたか
- 3.1.2 現実世界の存在を忘れるほど没入していましたか
- 3.1.3 仮想空間に本当にいるような感覚はありましたか
- 3.1.4 仮想環境と自分が一体化しているように感じましたか
- 3.1.5 仮想の身体（腕や手）は、自分の身体の一部のように感じましたか
- 3.1.6 仮想の身体と自分の身体の位置が一致していると感じましたか
- 3.1.7 仮想の身体を自分の意志で動かしているように感じましたか
- 3.1.8 仮想の身体に何かが触れたとき、自分が触られているように感じましたか
- 3.2 洗面台・台所の前に立っている感覚はありましたか
- 3.3 お湯の「温かさ」または「冷たさ」を感じましたか
- 3.4.1 【温かい】実際の水温は 40°C 付近でしたが、それ以上の温度を感じましたか
- 3.4.2 【温かい】感じた水の温度は何度（°C）くらいでしたか
※ 数字のみで回答してください
- 3.4.3 3.4.1 で「何も感じなかった」を選ばなかった人に質問です。
その感覚の持続時間を教えてください（例：〇°C に感じてから x 秒）
- 3.5.1 【冷たい】実際の水温は 20°C 付近でしたが、それ以下の温度を感じましたか
- 3.5.2 【冷たい】感じた水の温度は何度（°C）くらいでしたか
※ 数字のみで回答してください
- 3.5.3 3.5.1 で「何も感じなかった」を選ばなかった人に質問です。
その感覚の持続時間を教えてください（例：〇°C に感じてから x 秒）
- 3.6.1 温感体験の際に不快感を感じましたか

- 3.6.2 温感体験の際に快いと感じましたか
- 3.7 温感体験の際に「興奮」や「緊張」を感じましたか
- 3.8 温感体験の際に自分が状況をコントロールできていたと感じましたか
- 3.9 温感体験を通して興味深さや面白みを感じましたか
- 3.9.0 温感体験を通して気づいたことや感じたことなどの感想をお願いします
- 落下体験
- 4.1.1 落下体験はリアリティ（現実感，没入感）を感じましたか
- 4.1.2 現実世界の存在を忘れるほど没入していましたか
- 4.1.3 仮想空間に本当にいるような感覚を感じましたか
- 4.1.4 仮想環境と自分が一体化しているように感じましたか
- 4.1.5 仮想の身体（腕や手）は，自分の身体の一部のように感じましたか
- 4.1.6 仮想の身体と自分の身体の位置が一致していると感じましたか
- 4.1.7 仮想の身体を自分の意志で動かしているように感じましたか
- 4.1.8 仮想の身体に何かに触れたとき，自分が触られているように感じましたか
- 4.2 高い場所にいると感じましたか
- 4.3.1 落下する感覚を感じましたか
- 4.3.2 4.3.1 で「何も感じなかった」を選ばなかった人に質問です。
その感覚の持続時間を教えてください（例：落下感覚を感じてから x 秒）
- 4.4 落下中に「風」や「空気の抵抗」を感じましたか
- 4.5 身体が浮いたり引っ張られたりするような感覚はありましたか
- 4.6.1 落下体験の際に不快感を感じましたか
- 4.6.2 落下体験の際に快いと感じましたか
- 4.7 落下体験の際に恐怖感・不安感を感じましたか
- 4.8 落下体験の際に興奮・緊張を感じましたか
- 4.9 落下体験の際に自分が状況をコントロールできていたと感じましたか
- 4.9.1 落下体験を通して興味深さや面白みを感じましたか
- 4.9.2 落下体験を通して気づいたことや感じたことなどの感想をお願いします
- 全体感想
- 5 最後に，実験全体を通して気づいたことや感想などがあればお願いします

付録 B 被験者 提示順 カウンターバランス

- ID 提示順
- P001 落下→斬撃→温感
- P002 落下→斬撃→温感
- P003 落下→斬撃→温感
- P004 落下→斬撃→温感
- P005 落下→斬撃→温感
- P006 落下→斬撃→温感
- P007 落下→斬撃→温感
- P008 落下→斬撃→温感
- P009 落下→斬撃→温感
- P010 落下→斬撃→温感
- P011 落下→温感→斬撃
- P012 落下→温感→斬撃
- P013 落下→温感→斬撃
- P014 落下→温感→斬撃
- P015 落下→温感→斬撃
- P016 落下→温感→斬撃
- P017 落下→温感→斬撃
- P018 落下→温感→斬撃
- P019 落下→温感→斬撃
- P020 落下→温感→斬撃
- P021 斬撃→落下→温感
- P022 斬撃→落下→温感
- P023 斬撃→落下→温感
- P024 斬撃→落下→温感
- P025 斬撃→落下→温感
- P026 斬撃→落下→温感
- P027 斬撃→落下→温感
- P028 斬撃→落下→温感
- P029 斬撃→落下→温感
- P030 斬撃→落下→温感
- P031 斬撃→温感→落下
- P032 斬撃→温感→落下
- P033 斬撃→温感→落下
- P034 斬撃→温感→落下
- P035 斬撃→温感→落下
- P036 斬撃→温感→落下
- P037 斬撃→温感→落下
- P038 斬撃→温感→落下
- P039 斬撃→温感→落下
- P040 斬撃→温感→落下
- P041 温感→落下→斬撃
- P042 温感→落下→斬撃
- P043 温感→落下→斬撃
- P044 温感→落下→斬撃
- P045 温感→落下→斬撃
- P046 温感→落下→斬撃
- P047 温感→落下→斬撃
- P048 温感→落下→斬撃
- P049 温感→落下→斬撃
- P050 温感→落下→斬撃
- P051 温感→斬撃→落下
- P052 温感→斬撃→落下
- P053 温感→斬撃→落下
- P054 温感→斬撃→落下
- P055 温感→斬撃→落下
- P056 温感→斬撃→落下
- P057 温感→斬撃→落下
- P058 温感→斬撃→落下
- P059 温感→斬撃→落下
- P060 温感→斬撃→落下