

プレイヤーの情動分析に基づく動的難易度調整 設計への示唆

Implications for Dynamic Difficulty Adjustment Design Based on Players' Emotional States

佐藤優介¹ 角薫¹

SATO Yusuke¹, SUMI Kaoru¹

¹ 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

¹ Graduate School of Systems Information Science,
Future University Hakodate

Abstract: In game development, difficulty adjustment is a crucial factor that significantly influences player motivation and immersion. Dynamic Difficulty Adjustment (DDA), which aims to prevent player disengagement by adapting game difficulty in real time according to the player's state, has attracted considerable attention. However, conventional DDA systems primarily rely on external indicators such as scores or input logs, and thus insufficiently reflect players' internal emotional states. This study explores DDA design strategies based on the relationship between players' emotional states and physiological signals. Heart rate variability (HRV) and electrodermal activity (EDA) were used to capture changes in tension and arousal during gameplay, and player states were organized with reference to Csikszentmihalyi's flow model. In addition, physiological trends across three game genres—action, horror, and puzzle—were compared to examine genre-specific emotional characteristics and immersion. Subjective immersion was assessed using the Game Experience Questionnaire (GEQ). The results indicate that flow-related experiences were observed across all genres, suggesting the potential applicability of flow-oriented DDA beyond specific genres. Distinct emotional transition patterns were also observed: tension and relaxation alternated in action and puzzle games, whereas sustained tension tended to occur in horror games. Furthermore, physiological measures alone were insufficient to accurately capture emotional states, highlighting the importance of combining physiological and subjective evaluations. These findings suggest that game design and genre characteristics influence both player experience and physiological responses. Considering the substantial inter-individual variability in physiological indicators, future research should incorporate larger samples and explore personalized design guidelines for emotion-aware DDA.

1 序論

本研究では、ゲームプレイ中のプレイヤーの情動状態に着目し、生体情報と主観評価を組み合わせた動的難易度調整 (DDA) の設計方策について検討する。

1.1 研究背景：ゲームにおける難易度設計

と DDA

ゲーム業界では、ゲーム設計の際、多くのプレイヤーが満足できるよう慎重な難易度設計が行われている。プレイヤーの腕前には個人差があるため、万人が満足するような難易度設定は難しいものである。不適当な難易度はプレイヤーにとってストレスとな

り、ゲームからの離脱を招く恐れがある。近年、この問題に対応するため、動的難易度調整が注目されている。動的難易度調整 (DDA) とは、コンピュータがプレイヤーのプレイ状況を分析し、適当な難易度に調整するシステムのことである。プレイヤーのスキルレベルと課題の難易度を適切に釣り合わせるにより、ゲームへのエンゲージメントや没入感を向上させ、ゲームからの離脱を防ぐことが期待されている[1]。DDA の例として、一般的には FPS ゲームのエイムアシストが知られている。

1.2 フロー理論

フロー理論は、Csikszentmihalyi により提唱された心理学的概念であり、個人が活動に完全に没入し、

高度な集中と内発的動機づけが生じている経験の状態を指す[2]。フロー状態では時間感覚の変化、自己意識の低下、行為と意識の融合といったような体験が得られることが報告されている。[2,3]。フロー状態成立の条件として、課題の難易度と個人のスキルレベルが釣り合っていることが必要であり、課題の難易度とスキルレベルのバランスが崩れると、不安や退屈といったようなネガティブな体験が生じるとされている[3]。フロー概念は、心理学分野のみならず、教育、スポーツなど様々な分野で研究されている。Nakamura (2002) は、フローを構成する主要素として、明確な目標、即時的フィードバック、集中、自己意識の低下などを挙げている[3]。一方で、近年のレビュー研究では、フローの操作的定義や測定方法が研究ごとに異なり、一貫性に欠ける点が指摘されている[4]。このことから、フローは理論的には確立された概念である一方で、実証研究においては評価方法に課題が残されているといえる。

1.3 ゲーム体験とフロー理論

ゲーム体験においても、フロー理論は重要な概念である。Chen (2007) は、ゲームと人間のフロー的体験を結び付け、プレイヤーのスキルレベルに見合った難易度（フローゾーン）の課題を与えられることで、それを乗り越えた時にやりがいや上達を感じることができる」と述べている[5]。Chenはこの理論をゲームの難易度設計時にも適用できることを報告している。また、Sweetserら(2005)は、フロー理論に基づいた GameFlow モデルを提案し、ゲームの楽しさや没入感を評価するための指標を提案した[6]。これらの研究から、ゲームにおける難易度設計は、フローと関連していることが示唆される。

1.4 従来の DDA の課題とフロー理論に基づくアプローチ

フロー理論に基づいた DDA は、幅広い熟練度のプレイヤーに対して高い満足感を与え、ゲームからの離脱を防ぐ有望な手法であると考えられている[1]。しかし、DDA の実際の効果は一様ではなく、プレイヤー状態の推定精度や調整方法に大きく依存することも報告されている。例えば、プレイヤーのパフォーマンス指標や生体指標を用いた DDA を比較した実験研究では、生体情報を含む高度な指標を用いた場合であっても、必ずしもプレイ体験が一貫して向上するわけではないことが示されている[7]。この結果は、プレイヤーの内的状態を正確に推定することの困難さや、不適切な難易度調整がプレイ体験の質を低下させる可能性を示唆している。さらに、

フロー理論に基づいて DDA を設計・評価した研究では、プレイヤーの没入感が向上する可能性が示されている一方で、その効果はゲームジャンルや設計方法に依存し、単一の推定手法によって全てのプレイヤーに最適な調整を行うことは困難であると指摘されている[8]。これらの先行研究から、DDA は理論的には有望であるものの、プレイヤーの情動状態をどのように捉え、どの情報を用いて調整を行うかについては、依然として検討の余地が残されているといえる。

1.5 目的と貢献

本研究では、生体情報に基づく情動推定の可能性と主観的情動評価の結果を踏まえ、フロー理論に基づく DDA の設計方策を検討する。生体情報と主観的没入感との関係を分析することで、生体情報が DDA において果たし得る役割を整理し、どのような形で生体情報をゲーム難易度調整に組み込むことが現実的であるかについて指針を提示する。また、複数ジャンルのゲームを比較することで、これらの方策がゲームジャンルに依存するか否かを明らかにすることを目指す。具体的には、心拍変動 (HRV) および皮膚電位反応 (EDA) を指標として、ゲームプレイ中の緊張度や覚醒度の変化を測定し、Csikszentmihalyi のフローモデルを参照して情動状態を整理する。さらに、アクション、ホラー、パズルの3ジャンルにおける生体情報の傾向を比較し、ジャンルごとの情動特性および没入度の違いを明らかにする。得られた結果を基に、プレイヤーの情動変化に応じた難易度調整の設計指針を示すことで、情動に配慮した動的難易度調整の実現に向けた基礎的知見を提供することを目指す。

2 関連研究

本章では、本研究に関連する先行研究について整理する。はじめに、フロー理論に関する基礎的な研究およびゲーム分野への応用について述べる。次に、ゲームにおける動的難易度調整 (Dynamic Difficulty Adjustment: DDA) の研究動向を示す。最後に、生体情報や情動推定を用いた DDA に関する先行研究を取り上げ、本研究の位置づけを明確にする。

2.1 フロー理論

フロー理論は、Csikszentmihalyi によって提唱された心理学的概念であり、人が活動に深く没入し、高い集中状態と内発的な充実感を得ている状態を指す[2,3]。フロー状態は、課題の難易度とスキルレベルが適切に釣り合っているときに成立しやすいとされ、

スキルレベルに対して、挑戦が過度に困難であれば不安が、容易すぎれば退屈が生じると説明されている。

フローに関する研究として、Abuhamdeh は、フロー体験の概念的整理と測定手法に関する課題を指摘している[4]。Abuhamdeh は、フローが主観的体験であることから、実験環境の影響を受けやすく、その評価には慎重な検討が必要であると述べている。一方で、フロー理論は教育、スポーツ、エンターテインメントなど幅広い分野で応用されており、特にゲーム分野との親和性が高いとされている。ゲーム分野において、Chen はフロー理論をゲームデザインに応用し、プレイヤーのスキルレベルとゲームの難易度を適切に調整することの重要性を指摘している[5]。また、Sweetser and Wyeth は、フロー理論を基盤としたゲーム体験評価モデルである GameFlow を提案し、集中、挑戦、フィードバックなどの要素がプレイヤーの楽しさに寄与することを示した[6]。さらに、須甲ら(2012)は、プレイヤーのスキルレベルと没入度を、ストレス指標を用いて定量的に評価し、それに応じてゲームシステムを動的に設計する方法を提案した[9]。これらの研究から、フロー理論はゲーム体験の質を理解・評価するための有効な枠組みであり、プレイヤーの没入や満足度を高める設計指針として広く受け入れられていることが分かる。

2.2 DDA の動向

DDA は、プレイヤーの状態や行動に応じてゲームの難易度を動的に変化させる手法であり、ゲーム体験の質を維持・向上させることを目的として研究されてきた。DDA は、プレイヤーが過度に不安や退屈を感じることを防ぎ、継続的なゲームプレイを促進するための重要なゲームデザイン手法の一つと位置づけられている[1, 8]。従来の DDA 研究では、プレイヤーのスコア、成功率、失敗回数などのゲーム内での計測結果に基づいて難易度を調整する手法が多く提案されてきた。例えば、設計者があらかじめ定義した条件に基づいて難易度を調整するルールベース手法やプレイヤーの行動ログを統計的に解析する手法が提案されている。Sepulveda らは、これらの DDA 手法を体系的に整理し、ルールベースおよび統計的手法による難易度調整がプレイヤー体験に与える影響について議論している[1]。これらの手法は実装が比較的容易であり、リアルタイムな制御が可能である一方で、プレイヤーの心理的状态や主観的体験を直接考慮しておらず、ゲームシーンに反映できていない点が課題として挙げられている。

近年では、より精緻な難易度調整を実現するために、プレイヤーモデリングを用いた DDA 手法が提

案されている。González-Duque ら(2021)のベイズ最適化を用いた研究では、プレイヤーの行動履歴からスキルやプレイ傾向を確率的に推定し、それに基づいてゲームコンテンツを動的に適応させる手法が示されている[10]。このアプローチは、プレイヤーごとの差異を考慮できる点で有効であるが、推定精度がモデル設計やデータ量に依存するという制約がある。さらに、強化学習を用いた DDA 手法も注目されている。Rahim ら(2022)は、Soft Actor-Critic (SAC) アルゴリズムを用いて、視覚作業記憶ゲームにおける難易度をプレイヤーの正答率に基づいて連続的に最適化する手法を提案した[11]。この手法は、個々のプレイヤーのスキルレベルに応じてリアルタイムな難易度調整が可能である一方で、学習が安定するまで時間を要する点や数値指標と主観的評価との対応関係が明確でない点が課題として指摘されている。

一方、日本国内の研究として、築瀬ら(2016)は、プレイヤーが誰でも高い達成感を得られるように設計された DDA を提案している[12]。この研究では、プレイヤーの操作をシステム側で補正することにより、成功体験を強化し、ゲームへの没入感を高める設計が示されている。しかし、このような補助的手法においても、プレイヤーが主観的に感じる挑戦感や没入状態を定量的に評価することは容易ではない。以上の研究から、DDA はプレイヤー体験を向上させる有効な手法である一方で、プレイヤーの内的状態や情動を直接反映する設計には至っていないことが分かる。この点は、フロー理論が示す「挑戦とスキルの均衡」を実現する上で重要な視点である。これを受けて、次節では、生体情報や情動推定を用いたアプローチについて整理・検討する。

2.3 生体情報・情動推定を用いた DDA 関連研究

近年、プレイヤーの内的状態に基づく DDA の研究が進展している。Physiological Signal Analysis for Evaluating Flow during Playing of Computer Games では、異なる難易度のゲームプレイにおけるフロー体験を心拍変動や皮膚電気反応などの生体情報から定量的に評価し、適切な難易度条件ではフロー体験が高まることを示した[13]。しかし同研究では、与えられた課題の難易度は固定であり、プレイヤーの個別スキルや情動状態に応じた最適化は行われていない。また、Oner ら(2025)は、ホラーゲームにおいて心拍やストレス指標をリアルタイムに取得し、プレイヤーの緊張状態に応じて難易度を動的に調整する DDA システムを提案している[14]。この研究では、生体情報を基盤とした DDA により、主観的没入感

や楽しさの向上が示唆されている。他に, Pawel ら (2019) は, 皮膚電位抵抗, 心拍変動に応じてふるまいを変えるゲームにおけるユーザーの没入感を検証し, ゲームにおける感情ループを開発している [15]. DDA ありと, DDA なしの 2 種類で没入感の比較をし, さらに機械学習により生体情報から情動を推定した。結果, DDA ありの方が高い没入感を示し, ラッセルの円環モデルに当てはめると, 34% の情動推定の精度を見せた。このことから, 生体情報を用いた DDA の有用性が期待できることが分かる。しかし, 情動推定の精度はあまり高いとは言えず, 改善の余地がある。さらに, Pawel らは同じ研究の中で, 様々な情報からユーザーの置かれている状況を認識し, その状況を連ねた文脈から情動を予測する, 文脈認識システムを提案した。文脈認識システムは, 日時, 位置情報, 生体情報などから今何をしているのかを認識し, その文脈に基づいて情動を予測するものである。このシステムの実現により, デバイス使用時のストレス軽減が期待できると述べられている。しかし, Pawel らの研究ではフロー理論による情動の評価は行われていない。さらに, Darzi ら (2021) が実施した比較研究では, エクササイズゲームにおける 5 種類の DDA 手法 (手動, ランダム, パフォーマンスベース, 性格+パフォーマンス, 生体・性格・パフォーマンス統合ベース) のユーザー体験を比較評価した。この研究では, 生体情報を含む統合的な DDA 手法 (all-data メソッド) が難易度調整の精度では他の自動 DDA 手法を上回ったにもかかわらず, 主観的動機付け (Intrinsic Motivation Inventory) やフロー体験 (Flow Experience Measure) では, パフォーマンスベースの手法等と有意な差を示さなかった [7]。また, 4 種類の自動 DDA 手法をまとめて分析した結果では, 難易度調整の精度とプレイヤーの楽しさやストレスとの間に有意な相関が観察されたものの, 生体情報を含む DDA が単独で主観体験を改善する決定的な証拠とはならなかった。この結果は, 生体情報を導入した DDA が必ずしもユーザー体験を向上させるとは限らないことを示唆している。

一方で, VR ゲームを対象とした研究では, 心電図 (ECG) や筋電図 (EMG) など複数の生体信号からストレス状態を推定し, 難易度を調整するパイプラインを構築しており, 複数指標を統合した生体情報の活用可能性を示している [16]。加えて, EEG を用いた情動推定研究では, 脳波データからゲーム誘発情動を予測する手法が提案され, 生体情報を介した主観情動評価のモデル化の先行例として位置付けられる [17]。

これらの先行研究から, 生体情報を用いた DDA にはいくつかの課題があることが分かる。第一に, 主

観評価との整合性検証が限定的であり, プレイヤーの感情体験と生体情報の関連性を体系的に示す研究は少ない。第二に, 対象ゲームのジャンルやタスクが限定的であり, 汎用的な DDA 方策としての適用可能性は十分に検討されていない。

本研究は, これらの課題を踏まえ, 心拍や皮膚電位反応などの生体情報と主観的没入感評価を組み合わせ, フロー理論に基づく DDA 設計方策を検討する。また, 複数ジャンルのゲームを比較することで, 生体情報を用いた DDA の有効性がジャンルに依存するか否かを明らかにすることを目的とする。これにより, 生体情報を現実的にゲーム難易度調整に組み込むための指針を提供する点で, 従来研究との差別化を図ることができる。

3 生体センサを用いた情動分析システム

本章では, 生体情報を取得・分析し, ゲームプレイ中の情動状態を検討するために構築したシステムの構成と使用機材について述べる。

3.1 使用機材と開発環境

3.1.1 BITalino

BITalino (図 1) とは生体信号をリアルタイムに取得するためのハードウェアである。メインとなる基盤のハードウェアにセンサを接続して使用する。センサには ECG (心電図), EDA (皮膚電位), EMG (筋電図), EEG (脳波) など, 様々な種類が存在し, 複数のセンサを用いて同時に生体信号を取得することが可能である。専用の分析ソフトウェア Opensignals(r) と Bluetooth 接続をすることにより, 生体信号の変化をリアルタイムに表示することが可能である。本システムでは, ゲル付きの電極をセンサに取り付け, 人体に電極を貼り付けることによって生体信号の取得を行った。BITalino を用いた理由としては, 生体信号をリアルタイムに取得できるという点, ゲームプレイ中に常に変化する情動を推定する際に有益であるためである。また, Pawel Jemiolo らの実験により, BITalino からの取得データを用いてパラメータを変化させるゲームを作成できることが実証されており [15], 本研究の目的を達成するために必要な要件を満たしている。

3.1.2 Opensignals(r)

Opensignals(r) (図 2) とは BITalino の取得データをリアルタイム表示できる無料ソフトウェアである。リアルタイム表示のほかにも, 全体の測定結果を可視化したり, CSV ファイルで分析結果を出力したりすることが可能である。また, プラグインを購入す

ることにより機能を拡張することができ、測定結果のより詳細な分析を行うことも可能である。

本システムでは、BITalino から取得した生体信号を記録・分析するために用いた。計測データの区間を任意のタイミングで設定できるため、本研究ではゲームの進行に合わせて計測区間を設定し、生体情報を分析した。

3.1.3 TreasLin HSV321

TreasLin HSV321(図 3)とはゲーム機の映像・音声を PC へ出力するための中継器である。ゲーム機と本機とを HDMI 端子で接続し、PC と本機とを USB3.0 で接続することにより、ゲーム機の映像・音声を PC へ出力することができる。さらに、本機はパススルー機能を有しており、本機とモニターとを HDMI 端子で接続することで、PC とモニターの 2 画面にゲームの映像を出力することができる。本システムでは、ゲーム機の映像・音声を PC へ出力することにより、実験時にゲームのプレイ動画を録画する際に用いた。

3.1.4 OBS Studio

OBS Studio とは無料で使用できるストリーミングアプリである。画面録画機能を持ち、主に PC でライブ配信を行う際に使用されている。本システムでは、ゲーム用モニターに映されているゲーム画面を録画する際に用いた。録画したデータは次項で述べるツールで使用した。

3.1.5 Stream annotator tool

Stream annotator tool とは、映像内にタグをつけるプログラムである[18]。html 形式のプログラムであり、コード内のビデオファイル名を書き換えることで任意の映像とタグの選択肢を挿入することが可能である。矢印のドラッグ&ドロップで簡単にタグの範囲を選択し、付加することができる。また、タグにカーソルを合わせて右クリックをすることでタグを削除することも可能である。本システムでは、ゲームのリプレイ動画を視聴してゲームプレイ中の各場面での情動を思い出し、ゲームプレイ中の各場面とその時の情動を紐づけて記録するために用いた。

3.2 システム概要

本システムでは、生体センサからリアルタイムに取得しているゲームプレイヤーの生体情報から、ゲームプレイ中のゲームプレイヤーの情動を推定する。生体情報のリアルタイム取得には、BITalino を用いた。推定する情動は、Csikszentmihalyi のフローのモデル (図 4) から、フロー、覚醒、コントロール、リラクセス、不安、心配、退屈、無関心の 8 つとした[2]。

このモデルは、自分自身のスキルレベルに対する認識と、与えられた課題の難易度によってどのよう



図 1 BITalino

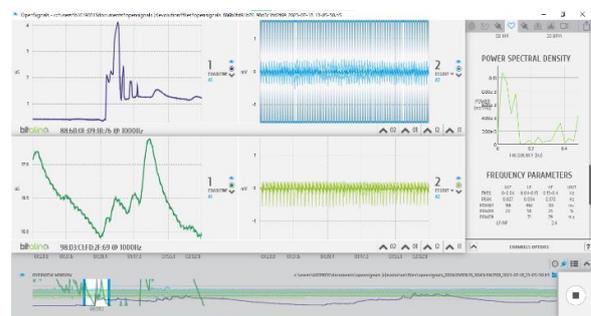


図 2 Opensignal(r)のインターフェース



図 3 TreasLin HSV321

に感じるかを示している。例えば、自分のスキルレベルが低いと認識しているときに難易度の高い課題が提示された場合に不安を感じ、自分のスキルが高いと認識している状態で簡単な課題が提示された場合にはリラックスでき、余裕を感じるというような見方ができる。

ゲームプレイヤーは BITalino を装着し、その状態でゲームをプレイする。この際、後に Stream annotator tool でリプレイ動画を再生できるように、OBS Studio を用いて画面録画を行う。情動の推定には、

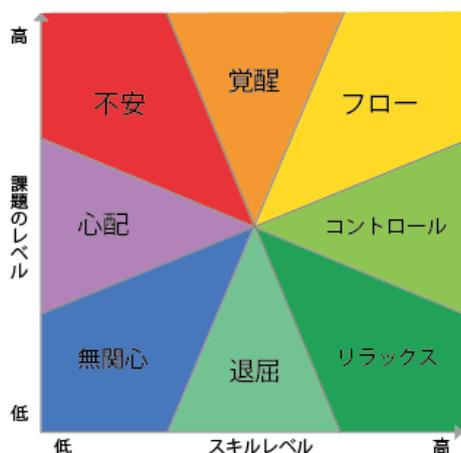


図 4 Csikszentmihalyi のフローのモデル

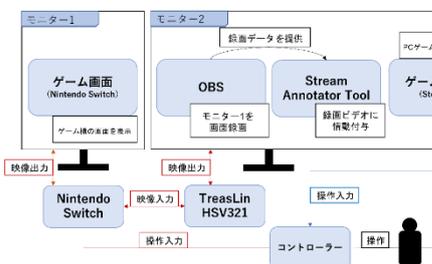


図 5 システム概要図

Stream annotator tool と Opensignals(r)の2つを用いる。まず、Stream annotator tool によってゲームプレイヤー本人が感じたありのままの情動を記録する。そして、Opensignals(r)と Stream annotator tool の時系列を揃えて2つのデータを比較することにより、情動ごとに特徴的な生体情報の変化が生じるかどうかを探る。このシステムの概要をまとめた図を図5に記す。

4 生体情報から情動を推測する実験

本章では、生体情報と主観評価を用いてゲームプレイ中の情動変化を調査するために実施した実験の方法について述べる。

4.1 実験概要

4.1.1 実験の目的と対象

生体情報とゲームシーンにおける情動状態との関連を検討するため、実際のゲームプレイの中で生体情報及び情動がどのように変化するか調査した。この実験は2023年の7月に実施し、本学に在籍する男性15名、女性7名の計22名の学生を対象に行われた。

4.1.2 実験方法

実験方法は以下のとおりである。また、実験協力



図 6 実験の様子

者1人あたりの実験時間は約90分であった。

- 実験説明
- 実験同意書と健康調査票の記入
- 実験協力者のステータスを調査するアンケート
- BITalino の装着と接続確認
- ゲームプレイと、プレイの振り返り(約25分×3ジャンル)
- センサの取り外し

はじめに実験協力者に対して実験説明を行い、本実験の目的と段取りを教示した。次に、実験協力者のステータスを調査するアンケートを行い、年齢や性別、どの程度ゲームに慣れているかを調査した。アンケート回答後、生体センサの装着にかかった。装着した生体センサの詳細については、4.2項にて述べる。センサの装着後、Opensignals(r)を用いて接続確認を行い、同時に平常時の波形を確認した。そして、接続が正常に行われていることが確認でき次第、ゲームプレイに取り掛かってもらった。ゲームの起動は実験計画者が行い、実験協力者にはゲーム起動後、任意のタイミングで操作を開始してもらった。ゲーム起動と同時に、OBS Studioによる画面録画を開始した。実験用のゲームはアクション、ホラー、パズルの3ジャンルで実施した。各ジャンルのゲームについての詳細は、4.3項にて述べる。ゲームのプレイ時間は、1ジャンルにつき10分であった。実験協力者はゲームプレイ後、OBS Studioにて録画したリプレイ動画を用いて、情動の主観評価による振り返りを行った。その後、GEQ(Game Experience Questionnaire)[19]を用いてゲームへの没入感を調査した。GEQは、Jeanneらによって作成された、ゲームへの没入感を調査するアンケートであり、ゲームをプレイした際のプレイヤーの情動を分析、評価した結果をもとに作成されている。Competence, Sensory and Imaginative Immersion, Flow, Tension/Annoyance, Challenge, Negative affect, Positive affectの7つの要素に基づく、33の質問によって構

成されている。これらの質問は、0 から 4 の 5 段階のスケールで評価される。GEQ への回答をもって 1 ジャンル終了とし、すべてのジャンルのゲームを終えるまでゲームプレイと振り返りを繰り返し行ってもらった。なお、本実験ではプレイするゲームジャンルの順番はランダムに決定された。すべてのジャンルについてゲームプレイと振り返りを終えた時点で、装着していた生体センサをすべて取り外し、実験を終了した。実際の実験の様子を図 6 に記す。

4.2 生体情報分析

生体センサは BITalino の心拍変動 (ECG) および皮膚電位反応 (EDA) センサを使用した。生体情報の分析には Bitalino との互換性がある Opensignals(r) を用いた。

4.2.1 ECG センサによる分析

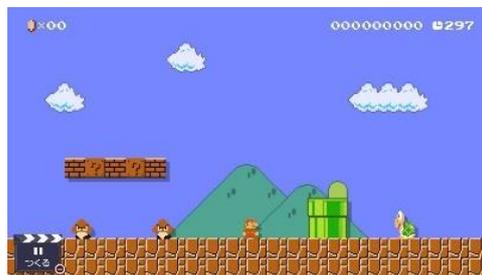
心拍変動には自律神経系の活性度を評価するいくつかの指標がある。NN は不正脈を除いた正常な心拍間隔を示す。SDNN は心拍間隔の標準偏差で、低いほどストレス下にあることを示す。rMSSD は隣接する心拍間隔の差の二乗平方根で、低いほどストレス下にあることを示す。pNN20 と pNN50 は、隣接する心拍間隔(RRI)の差が特定の閾値(20ms, 50ms)を超える割合で、低いとストレス下にあることを示す。HR は一般的な生体信号で、HR の高さはストレス、睡眠、代謝率のレベルを示す。ECG センサはゲーム操作に集中できるよう、鎖骨の下と首の後ろに電極を付けて測定した。BITalino の ECG センサのリファレンス電極 (REF) は、筋活動が少なく信号ノイズが低い骨部に配置することが推奨されており、(Plux Biosignals, 2022) [20, 21]ゲームプレイ中の動作を考慮すると、安定して心拍変動を取得できる。

4.2.2 EDA センサによる分析

EDA は精神性発汗を測定でき、覚醒状態を判断する指標として有望とされている。EDA 信号は Tonic 成分と Phasic 成分の 2 つの成分から構成されており、記録された EDA 信号は刺激前の安定した基準レベル (Tonic) と刺激後の急激な反応 (Phasic) に分解され、それぞれが異なる生理的意味を持つ (Benedek & Kaernbach, 2010) [22]。刺激前の安定した基準レベルは SCL で表され、長時間かけてゆっくりと変化し、皮膚電位反応の全体的な覚醒状態を反映する。また、急激な反応は SCR で表され、刺激に対する瞬間的な交感神経応答を反映する。SCL, SCR 分析を行うことにより、刺激に対する反応や自律神経全体の覚醒度を評価することができる。

EDA センサは本来手に装着する方法が推奨されているが、事前に動作を確認したところ、ゲームコントローラーを握る際にかかる圧力で送信されるデ

図 7 各ゲームのスクリーンショット



(a) アクションゲーム



(b) ホラーゲーム



(c) パズル

ータにノイズが入ってしまうことや、手汗によって電極が剥がれやすくなってしまいうケースが見られた。Fortes-Ferreira ら (2023) は、足首周辺を含む足部に EDA センサを装着し、足部、足首での EDA (および PPG) 計測が可能かを評価したところ、足および足首に装着するソックス型の機器において EDA および PPG を取得可能であることが示された[23]。よって、本実験では、足首に電極を装着し、EDA の計測を行った。

4.3 ジャンルごとのゲーム選定

アクションゲーム、ホラーゲーム、パズルゲームの 3 ジャンルのゲームを、それぞれ 1 つずつ選定した (図 7)。

アクションゲームでは、SUPER MARIO MAKER2

を用いてコースを作成した。このゲームは Nintendo Switch 対応ソフトであり、プレイの際には TreasLin HSV321 によって、PC に画面を出力した。このゲームでは、横スクロールアクションゲームのコースを自由に作成することが可能であるため、障害物配置や足場構造、制限時間などを調整することで、課題難易度およびプレイヤーの緊張状態を実験者側で統制することができると考え、本作を採用した。実験用コースはいろいろな情動を発現させることを目的としており、不安定な足場による緊張や焦りを誘発させる区間や、比較的単純な作業を繰り返す区間を組み合わせることで難易度に緩急をつけ、情動の変化を促した。また、本作は成功・失敗が即時にフィードバックされるため、達成時の高揚感や失敗時の苛立ちといった覚醒水準の変動が生起しやすい特性を持つと考えられる。よって、情動と生体反応の関係を検討する本研究の目的に適していると判断した。実験用コースは2つで、コース内ギミックの難易度が異なっている。1つ目のコースはチュートリアル of 要素を持ち、ダッシュ、ジャンプ、ダッシュジャンプ、パワーアップといった基本的なシステムの習得と実践ができるステージ構成となっている。2つ目のコースは、足場が狭く、ギミック1つひとつの難易度が高い応用コースとなっている。1つ目のコースを攻略できた人のみ、2つ目のコースをプレイできた。

ホラーゲームには、Amnesia: The Dark Descent を用いた。このゲームは、Steam 対応ソフトであり、実験では PC 上でプレイした。一人称視点のサバイバルホラーであり、暗闇環境、限定的な光源管理、正気度 (Sanity) システムといったゲームデザインにより、不安や恐怖を持続的に誘発する設計となっている。このような設計は、不安や心配といった、高覚醒のネガティブな情動を安定的に喚起する条件を備えていると考えられるため、本研究の目的に適していると判断した。ゲームは初期設定の状態でのプレイした。

パズルゲームは Tetris® Effect: Connected を用いた。このゲームも Steam 対応ソフトであり、実験では PC 上でプレイした。このゲームは、落ち物パズルゲームである Tetris を基盤としつつ、音楽と操作が同期する演出や動的に変化する背景映像を特徴とする作品である。特に音楽の盛り上がりや達成時の演出は、中～高覚醒のポジティブな情動を喚起する条件を備えていると考えられるため、本研究の目的に適していると判断した。プレイシーンには、主要モードである Journey Mode を選択した。このモードでは、一定数ラインを消すたびにレベルが上がり、ミノの落下速度が上昇する。さらに、音楽・映像演出が段階的に変化する。

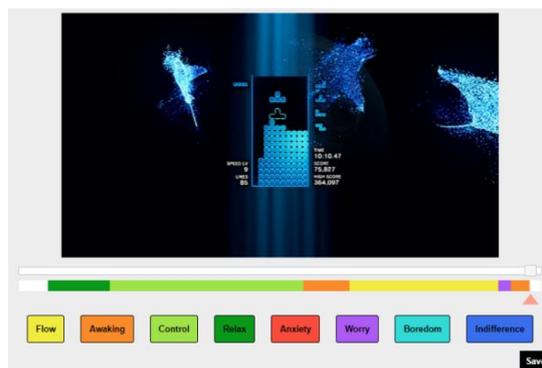


図 8 Stream annotator tool のスクリーンショット

表 1 フローモデルの説明

情動	説明の例
フロー	無我夢中でプレイしていた
覚醒	適度な緊張感をもってプレイしていた
コントロール	思い通りにプレイできていた
リラックス	ミスはしないだろうという余裕があった
不安	これ以上難しくなるとミスしてしまうだろうと思い、不安だった
心配	この先思い通りにプレイできるか心配だった
退屈	ゲームが簡単で退屈だった
無関心	これ以上はどうせできないので何とも思わなかった

4.4 ゲームプレイの主観評価

情動の主観評価には、Stream annotator tool を用いた[18]。このツールでは、ビデオをインポートし、シークバーを動かしてビデオの任意の点にタグを付与することができる。今回の実験ではこのツールを用いてプレイシーンに情動のタグ付けを行った(図8)。また、ツールを用いる際に、各情動を付けてもらう際の基準として、表1のような説明を提示した。これらの情動はそれぞれフローモデルの項目となっており、各情動の説明を提示することにより、プレイ中の情動の主観評価をフローモデルの情動に対応させた。

5 実験結果

本章では、収集した主観評価および生体情報の分析

表 2 Competence の質問群

a1	このゲームに熟達していると思った.
a2	実力に自信を持ってプレイしていた.
a3	得意なゲーム (ジャンル) だった.
a4	プレイ内容に関して, 目標を達成できたと思った.
a5	プレイ内容に関して, 早く目標を達成できたと思った.

表 3 Competence の平均と標準偏差

	a1	a2	a3	a4	a5
アクション M	1.32	1.55	1.55	1.68	1.32
アクション SD	0.99	1.18	1.14	1.17	1.17
ホラー M	0.50	0.73	0.64	0.55	0.45
ホラー SD	0.74	0.94	0.95	0.67	0.74
パズル M	1.45	1.59	1.73	1.55	1.09
パズル SD	1.22	1.30	1.20	1.18	0.97

表 4 Sensory and Imaginative Immersion の質問群

b1	ゲームのストーリーは興味深かった.
b2	ゲームのグラフィックは美麗で魅力的だった.
b3	プレイ中, 想像力に満ちた気持ちになった.
b4	ゲームの内容について, もっと探究できると思った.
b5	感動的なプレイ体験であった.
b6	このゲームプレイは, 豊かな経験となった.

表 5 Sensory and Imaginative Immersion の平均と標準偏差

	b1	b2	b3	b4	b5	b6
アクション M	1.95	2.82	1.86	3.18	1.64	2.59
アクション SD	1.56	1.10	1.28	0.91	1.05	1.10
ホラー M	1.95	1.91	1.77	2.55	0.91	1.73
ホラー SD	1.05	1.06	1.34	1.53	0.81	1.16
パズル M	1.59	3.64	2.18	3.00	2.14	2.64
パズル SD	1.30	0.79	1.18	1.20	1.21	0.79

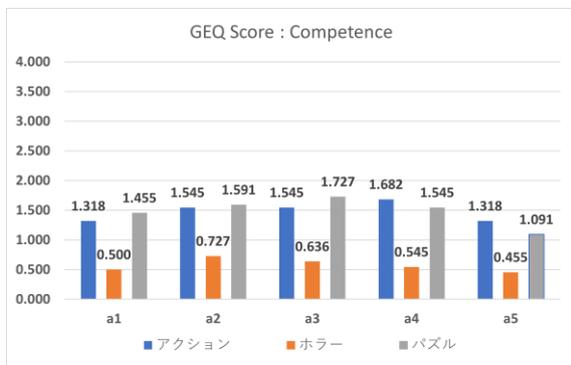


図 9 Competence の平均得点

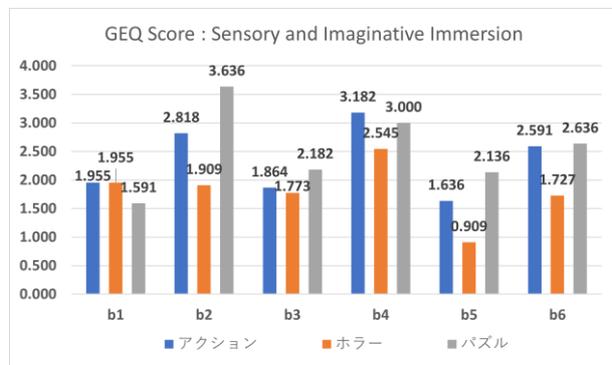


図 10 Sensory and Imaginative Immersion の平均得点

表 6 Flow の質問群

c1	プレイ中、ゲームのことで頭がいっぱいだった。
c2	周りのことはすべて忘れて、プレイに没頭してしまった。
c3	プレイ中、時間の感覚を失っていた。
c4	プレイ中、ゲームに深く集中していた。
c5	現実世界とのつながりを失ったように感じた。

表 7 Flow の平均と標準偏差

	c1	c2	c3	c4	c5
アクション M	3.55	3.27	2.95	3.27	0.91
アクション SD	0.60	0.98	1.36	0.94	1.06
ホラー M	2.82	2.50	2.23	2.86	1.18
ホラー SD	1.10	1.22	1.48	1.08	1.26
パズル M	3.91	3.64	3.23	3.68	1.41
パズル SD	0.29	0.58	1.07	0.57	1.18

表 8 Tension/Annoyance の質問群

d1	ゲームの内容に軽度の苛立ちや不快感を覚えた。
d2	長時間、イライラしながらプレイしていた。
d3	思うようにプレイできず、イライラした。

表 9 Tension/Annoyance の平均と標準偏差

	d1	d2	d3
アクション M	1.50	0.77	1.55
アクション SD	1.47	1.15	1.47
ホラー M	1.32	0.73	1.36
ホラー SD	1.46	1.35	1.29
パズル M	0.73	0.32	0.73
パズル SD	0.77	0.57	0.88

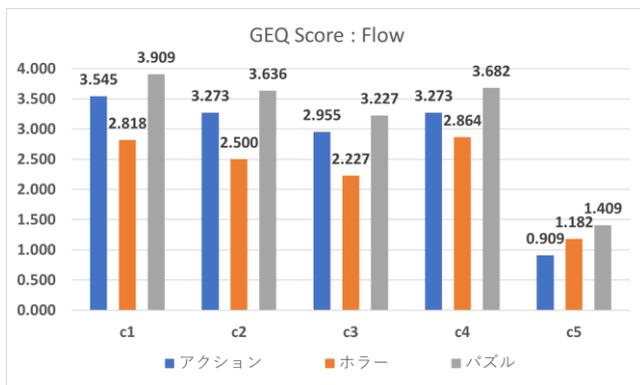


図 11 Flow の平均得点

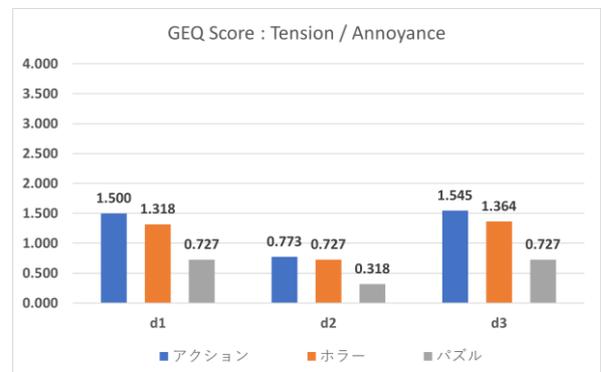


図 12 Tension/Annoyance の平均得点

表 10 Challenge の質問群

e1	ゲームが難しいと感じた.
e2	緊張感を覚えながらプレイしていた.
e3	ゲームに対して挑戦的な気持ちになった.
e4	プレイ中, 時間に追われている感覚に陥った.
e5	プレイのために多くの労力を注いだ.

表 11 Challenge の平均と標準偏差

	e1	e2	e3	e4	e5
アクション M	2.55	2.68	2.95	1.50	2.50
アクション SD	1.26	1.21	1.13	1.54	1.22
ホラー M	2.05	3.09	1.73	0.95	2.00
ホラー SD	1.46	1.06	1.49	1.21	1.31
パズル M	2.05	2.68	2.82	1.14	2.23
パズル SD	0.95	1.25	1.10	1.42	1.11

表 12 Negative affect の質問群

f1	プレイしたことによって機嫌が悪くなった.
f2	プレイ中, ゲームに関係のない他のことを考えていた.
f3	内容が単調で, 退屈だった.
f4	内容に興味が湧かず, 退屈だった.

表 13 Negative affect の平均と標準偏差

	f1	f2	f3	f4
アクション M	1.00	0.45	0.82	0.77
アクション SD	1.41	0.74	0.96	1.02
ホラー M	0.86	0.95	1.18	1.05
ホラー SD	1.28	1.09	0.91	0.84
パズル M	0.59	0.82	0.50	0.32
パズル SD	0.96	1.05	0.60	0.57

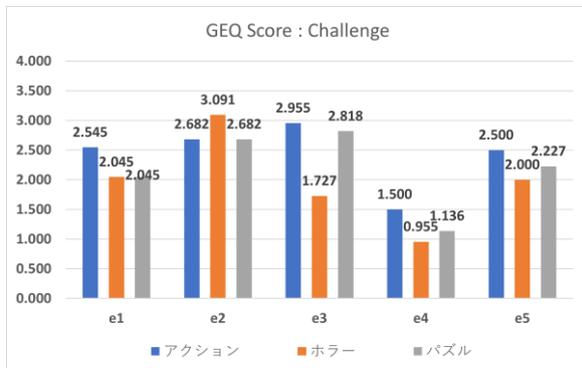


図 13 Challenge の平均得点

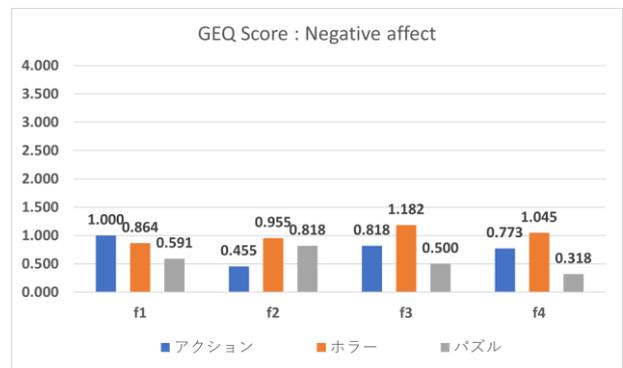


図 14 Negative affect の平均得点

表 14 Positive affect の質問群

g1	プレイしたことによって満足感を覚えた.
g2	ゲームの内容は楽しいものであった.
g3	プレイによって幸せな気持ちになった.
g4	とても良いゲームだと思った.
g5	プレイ体験は楽しいものであった.

表 15 Positive affect の平均と標準偏差

	g1	g2	g3	g4	g5
アクション M	2.68	3.27	2.18	3.18	3.36
アクション SD	1.13	0.83	0.96	0.91	0.73
ホラー M	1.18	1.36	0.73	1.73	2.09
ホラー SD	0.96	1.14	1.08	1.03	1.38
パズル M	3.27	3.77	2.73	3.27	3.73
パズル SD	0.46	0.43	0.88	0.63	0.46

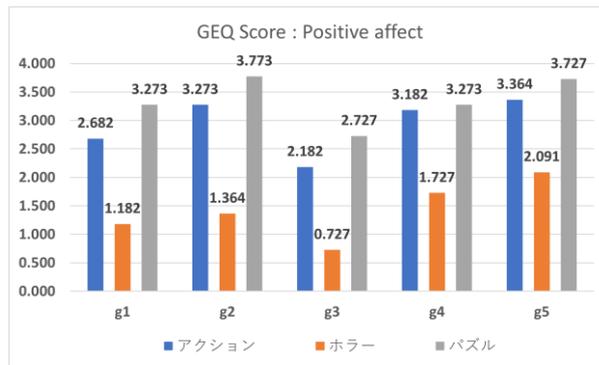


図 15 Positive affect の平均得点

表 16 アクションゲームにおける技能指標（客観・主観）と GEQ 因子の相関分析結果

因子	得点 M	得点 SD	客観 技能 r	客観 技能 t	客観 技能 p	主観 技能 r	主観 技能 t	主観 技能 p
Competence	1.48	0.91	0.611	3.45	<.01	0.495	2.55	.02
Sensory and Imaginative Immersion	2.34	0.82	0.126	0.57	.58	0.107	0.48	.64
Flow	2.80	0.74	0.329	1.56	.13	0.374	1.80	.09
Tension/Annoyance	1.27	1.26	0.0149	0.067	.95	-0.377	-1.82	.08
Challenge	2.44	0.73	0.203	0.93	.36	0.0840	0.38	.71
Negative affect	0.79	0.75	-0.298	-1.40	.18	-0.521	-2.73	.01
Positive affect	2.87	0.82	0.258	1.19	.25	0.440	2.19	.04

表 17 パズルゲームにおける技能指標（客観・主観）と GEQ 因子の相関分析結果

因子	得点 M	得点 SD	客観 技能 r	客観 技能 t	客観 技能 p	主観 技能 r	主観 技能 t	主観 技能 p
Competence	1.48	0.93	0.671	4.04	<.01	0.289	1.35	.19
Sensory and Imaginative Immersion	2.53	0.60	0.149	0.67	.51	0.258	1.20	.25
Flow	3.17	0.41	0.277	1.29	.21	0.214	0.98	.34
Tension/Annoyance	0.59	0.53	-0.0917	-0.41	.68	-0.261	-1.21	.24
Challenge	2.18	0.68	-0.281	-1.31	.21	-0.107	-0.48	.64
Negative affect	0.56	0.48	-0.0624	-0.28	.78	0.107	0.48	.64
Positive affect	3.35	0.41	0.151	0.68	.50	-0.135	-0.61	.55

結果を示し、ゲームジャンル間の違いや相関関係について報告する。

5.1 GEQ の評価分析

ここでは、実験参加者全体の GEQ の平均値を提示する。GEQ の Competence, Sensory and Imaginative Immersion, Flow, Tension/Annoyance, Challenge, Negative affect, Positive affect の7つの要素について、ジャンルごとに平均値を集計し、棒グラフで出力した。ジャンル間の得点の差を比較するため、分散分析並びに Tukey の多重比較検定を行った。

5.1.1 Competence

Competence の質問群（表 2）について、ジャンル（アクション、パズル、ホラー）の3水準を要因とする反復測定分散分析を行った。図 9 および表 3 に平均と標準偏差を示す。a1 については、ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 6.67, p = .003, \eta^2 p = .16$ 。Holm 法による多重比較の結果、ホラーはアクション ($p = .005$) およびパズル ($p = .005$) より有意に得点が低かった。a2 についてもジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 4.18, p = .022, \eta^2 p = .11$ 。多重比較の結果、アクションとホラーの間に有意差が認められた ($p = .027$)。a3 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 5.61, p = .007, \eta^2 p = .16$ 。多重比較の結果、ホラーはアクション ($p = .014$) およびパズル ($p = .014$) より有意に得点が低かった。a4 については球面性の仮定が満たされなかったため Greenhouse-Geisser 補正を適用した。その結果、ジャンルの主効果が有意であった $F(1.44, 30.23) = 8.53, p = .003, \eta^2 p = .20$ 。多重比較の結果、ホラーはアクション ($p < .001$) およびパズル ($p = .004$) より有意に得点が低かった。a5 についてもジャンル

の主効果が有意であった $F(2, 42) = 4.73, p = .014, \eta^2 p = .13$ 。多重比較の結果、アクションとホラーの間に有意差が認められた ($p = .025$)。以上より、Competence においては多くの項目でジャンル間に有意差が認められ、特にホラーは他のジャンルと比較して得点が低い傾向が示された。

5.1.2 Sensory and Imaginative Immersion

Sensory and Imaginative Immersion の質問群（表 4）について、図 10 および表 5 に平均と標準偏差を示す。b1 については、ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = .649, p = .528, \eta^2 p = .017$ 。Holm 法による多重比較でも、アクション-パズル、アクション-ホラー、パズル-ホラーすべてで有意差は認められなかった ($p_{adj} > .8$)。b2 については、ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 16.237, p < .001, \eta^2 p = .346$ 。Holm 法による多重比較の結果、アクション-ホラー $p_{adj} = .015$ 、アクション-パズル $p_{adj} = .006$ 、ホラー-パズル $p_{adj} < .001$ で有意差が認められた。b3 については、ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = .621, p = .542, \eta^2 p = .02$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった ($p_{adj} > .3$)。b4 については、ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = 1.656, p = .203, \eta^2 p = .047$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった ($p_{adj} > .2$)。b5 については、ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 8.265, p = .00094, \eta^2 p = .199$ 。Holm 法による多重比較の結果、アクション-ホラー $p_{adj} = .029$ 、アクション-パズル $p_{adj} = .157$ 、ホラー-パズル $p_{adj} = .001$ で有意差が認められた。b6 については、ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 5.074, p = .011, \eta^2 p = .147$ 。Holm 法による多重比較の結果、アクション-ホラー $p_{adj} = .049$ 、アクション-パズル

p.adj = .883, ホラー-パズル p.adj = .019 で有意差が認められた。以上より, Sensory and Imaginative Immersion の各項目では, b2, b5, b6 でジャンル間に有意差が認められ, 特に b2 はアクション, パズル, ホラーのすべての組み合わせで有意差が見られ, b5 および b6 でも特定のジャンル間で有意差が示された。b1, b3, b4 ではジャンル間の有意差は認められなかった。

5.1.3 Flow

Flow の質問群 (表 6) について, 図 11 および表 7 に平均と標準偏差を示す。c1 については, ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 12.714, p < .001, \eta^2 p = .282$ 。Holm 法による多重比較の結果, アクション-ホラー p.adj = .016, アクション-パズル p.adj = .017, ホラー-パズル p.adj = .001 で有意差が認められた。c2 については, ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 7.809, p = .001, \eta^2 p = .201$ 。Holm 法による多重比較の結果, ホラー-パズル p.adj = .001 のみ有意差が認められた。c3 については, ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 5.418, p = .008, \eta^2 p = .098$ 。Holm 法による多重比較の結果, ホラー-パズル p.adj = .027 で有意差が認められた。c4 については, ジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 4.738, p = .014, \eta^2 p = .129$ 。Holm 法による多重比較の結果, ホラー-パズル p.adj = .011 で有意差が認められた。c5 については, ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = 1.476, p = .24, \eta^2 p = .031$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった (p.adj > .2)。以上より, Flow の各項目では, c1~c4 でジャンル間に有意差が認められ, 特に c1 はすべての組み合わせで差が見られ, c2~c4 でもホラーと他ジャンル間で有意差が示された。c5 ではジャンル間の有意差は認められなかった。

5.1.4 Tension/Annoyance

Tension/Annoyance の質問群 (表 8) について, 図 12 および表 9 に平均と標準偏差を示す。d1 については, ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = 2.624, p = .084, \eta^2 p = .065$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった (p.adj > .08)。d2 については, ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = 1.209, p = .309, \eta^2 p = .036$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった (p.adj > .3)。d3 については, ジャンルの主効果は有意でなかった $F(2, 42) = 2.786, p = .073, \eta^2 p = .077$ 。Holm 法による多重比較でもすべての組み合わせで有意差は認められなかった (p.adj > .06)。以上より, Tension/Annoyance の各項目では, ジャンル間の有意差は認められず, す

べての組み合わせで差は見られなかった。

5.1.5 Challenge

Challenge の質問群 (表 10) について, 図 13 および表 11 に平均と標準偏差を示す。e1 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .309, p = .426, \eta^2 p = .036$ 。Holm 法による多重比較の結果, アクション, パズル, ホラーのすべての組み合わせで有意差は認められなかった。e2 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .419, p = .699, \eta^2 p = .027$ 。Holm 法による多重比較の結果, すべての組み合わせで有意差はなかった。e3 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 6.523, p = .003, \eta^2 p = .168$ 。Holm 法による多重比較の結果, アクションはホラー (p = .026) およびパズル (p = .026) より有意に得点が高かった。e4 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .393, p = .429, \eta^2 p = .027$ 。Holm 法による多重比較の結果, 有意差は認められなかった。e5 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .473, p = .984, \eta^2 p = .029$ 。Holm 法による多重比較の結果, 有意差は認められなかった。以上より, Challenge の各項目では, e3 でジャンル間に有意差が認められ, 特にアクションはホラーおよびパズルより有意に得点が高かった。e1, e2, e4, e5 ではジャンル間に有意差は示されなかった。

5.1.6 Negative affect

Negative affect の質問群 (表 12) について, 図 14 および表 13 に平均と標準偏差を示す。f1 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .487, p = .798, \eta^2 p = .02$ 。Holm 法による多重比較の結果, アクション, パズル, ホラーのすべての組み合わせで有意差は認められなかった。f2 についてはジャンルの主効果が有意でなかった $F(2, 42) = .184, p = .623, \eta^2 p = .047$ 。Holm 法による多重比較の結果, すべての組み合わせで有意差はなかった。f3 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 3.56, p = .037, \eta^2 p = .104$ 。Holm 法による多重比較の結果, ホラーはパズル (p = .03) より有意に得点が高かった。f4 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 3.973, p = .026, \eta^2 p = .12$ 。Holm 法による多重比較の結果, ホラーはパズル (p = .018) より有意に得点が高かった。以上より, Negative affect の各項目において, f1, f2 ではジャンル間に有意差は認められなかったが, f3 および f4 では特定のジャンル間で有意差が示された。

5.1.7 Positive affect

Positive affect の質問群 (表 14) について, 図 15 および表 15 に平均と標準偏差を示す。g1 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 30.779,$

$p < .001$, $\eta^2 p = .504$. Holm 法による多重比較の結果、アクションはホラー ($p = .00049$) およびパズル ($p = .044$) と、ホラーはパズル ($p < .001$) より有意に得点が高かった。g2 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 46.366$, $p < .001$, $\eta^2 p = .611$. Holm 法による多重比較の結果、アクションはホラー ($p = .0000181$) およびパズル ($p = .018$) と、ホラーはパズル ($p < .001$) より有意に得点が高かった。g3 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 24.107$, $p < .001$, $\eta^2 p = .439$. Holm 法による多重比較の結果、アクションはホラー ($p = .000672$) およびパズル ($p = .056$) と、ホラーはパズル ($p = .00000138$) より有意に得点が高かった。g4 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 20.697$, $p < .001$, $\eta^2 p = .408$. Holm 法による多重比較の結果、アクションはホラー ($p = .000552$) およびパズル ($p = .704$) と、ホラーはパズル ($p = .00000265$) より有意に得点が高かった。g5 についてはジャンルの主効果が有意であった $F(2, 42) = 18.184$, $p < .001$, $\eta^2 p = .37$. Holm 法による多重比較の結果、アクションはホラー ($p = .004$) およびパズル ($p = .073$) と、ホラーはパズル ($p = .0000296$) より有意に得点が高かった。以上より、Positive affect ではすべての項目でジャンル間に有意差が認められ、特にホラーはパズルやアクションに比べて一貫して得点が高い傾向が示された。

5.1.8 技能指標と GEQ との関連

本研究では、各ジャンルにおけるプレイヤーの技能水準を把握するために、客観技能指標および主観技能指標を用いた。客観技能指標は、各ゲームにおけるパフォーマンスログに基づき設定した。具体的には、アクションゲームではゲーム内ギミック突破数を、パズルゲームではゲーム内の到達レベルを客観技能指標の数値として用いた。なお、ホラーゲームについては、プレイヤー間で到達度の差が小さく、明確な成功失敗構造に基づく技能差を定量化することが困難であった。そのため、客観的 skill 指標の妥当な定義が困難であると判断し、本節における技能と GEQ 因子との関連分析はアクションゲームおよびパズルゲームに限定した。一方、主観技能指標は、ゲームプレイ開始前に行った実験参加者のステータスを調査するアンケート内で、1~5 の 5 段階の自己評価尺度により取得した。客観技能指標はゲーム内行動に基づく達成度を反映する値であり、主観技能指標はプレイヤー自身が認知する技能感覚を表す。

技能指標と主観的ゲーム体験との関連を検討するため、技能指標と GEQ 各因子 (Competence, Sensory and Imaginative Immersion, Flow, Tension/Annoyance, Challenge, Negative affect, Positive affect) との間でピ

アソンの積率相関係数を算出した。分析はジャンル別 (アクション, パズル) に実施した。また、主観技能指標と客観技能指標との関連についても同様に相関係数を算出した。表 16, 17 は主観技能指標および客観技能指標と GEQ 因子との相関分析結果である。なお、主観技能指標は $M = 3.41$, $SD = 0.65$, アクションゲームにおける客観技能指標は $M = 9.68$, $SD = 3.78$, パズルゲームの客観技能指標は $M = 7.00$, $SD = 3.40$ であった。

アクションゲームにおける客観技能指標と GEQ 因子との相関係数は、Competence ($M = 1.48$, $SD = 0.91$, $r = 0.611$, $p < .01$) において比較的強い正の相関が認められた。Flow ($M = 2.80$, $SD = 0.74$, $r = 0.329$, $p = .13$) および Positive affect ($M = 2.87$, $SD = 0.82$, $r = 0.257$, $p = .25$) には中程度の正の相関がみられ、Negative affect ($M = 0.79$, $SD = 0.75$, $r = -0.298$, $p = .18$) には弱い負の相関が確認された。一方、Sensory and Imaginative Immersion ($M = 2.34$, $SD = 0.82$, $r = 0.125$, $p = .58$), Tension/Annoyance ($M = 1.27$, $SD = 1.26$, $r = 0.014$, $p = .95$), Challenge ($M = 2.44$, $SD = 0.73$, $r = 0.203$, $p = .36$) との関連は限定的であった。主観技能指標との相関では、Competence ($r = 0.495$, $p = .02$) および Flow ($r = 0.373$, $p = .09$) に正の相関がみられ、Negative affect ($r = -0.520$, $p = .01$) および Tension/Annoyance ($r = -0.377$, $p = .08$) に負の相関が確認された。Positive affect ($r = 0.439$, $p = .04$) にも正の関連がみられた。また、主観技能指標と客観技能指標との間 ($r = 0.625$, $p = .002$) には正の相関が認められた。パズルゲームにおける客観技能指標と GEQ 因子との相関係数は、Competence ($M = 1.48$, $SD = 0.93$, $r = 0.670$, $p < .01$) において比較的強い正の相関が認められた。Flow ($M = 3.17$, $SD = 0.41$, $r = 0.276$, $p = .21$) には中程度の正の相関がみられた一方、Challenge ($M = 2.18$, $SD = 0.68$, $r = -0.280$, $p = .21$) には負の相関が確認された。Sensory and Imaginative Immersion ($M = 2.53$, $SD = 0.60$, $r = 0.149$, $p = .51$), Tension/Annoyance ($M = 0.59$, $SD = 0.53$, $r = -0.092$, $p = .68$), Negative affect ($M = 0.56$, $SD = 0.48$, $r = -0.062$, $p = .78$), Positive affect ($M = 3.35$, $SD = 0.41$, $r = 0.150$, $p = .50$) との関連は限定的であった。主観技能指標との相関では、Competence ($r = 0.289$, $p = .19$), Sensory and Imaginative Immersion ($r = 0.258$, $p = .25$), Flow ($r = 0.214$, $p = .34$) に弱い正の相関がみられ、Tension/Annoyance ($r = -0.260$, $p = .24$) に負の相関が確認された。一方で、Negative affect ($r = 0.106$, $p = .55$) および Positive affect ($r = -0.135$, $p = .64$) との関連は小さかった。

主観技能指標と客観技能指標との相関係数は、アクションゲームでは $r = 0.625$ であったのに対し、パズルゲームでは ($r = 0.102$, $p = .65$) であった。以上

の結果より、アクションゲームでは主観的スキル評価と客観的スキル評価との間に一定の関連が認められた一方、パズルゲームでは両者の関連は限定的であった。

以上より、スキル水準と主観的ゲーム体験との関連はジャンルによって異なる傾向が示された。

5.2 生体情報のパラメータ分析

情動やジャンルごとにパラメータの現れ方に傾向があるかを調査した。Opensignals(r)を用いて、情動のタグ付けをしたリプレイデータの時間を元に生体データを分割し、皮膚電位指標 (EDA)、心拍指標 (HRV) の解析をした。解析して得られた数値は、情動およびジャンルごとに集計し、パラメータごとに分散分析並びに Tukey の多重比較検定を実施した。この時、明らかに正常値から外れている値は取り除いた。パラメータは、皮膚電位指標として平均 EDA、最小 EDA、最大 EDA、EDA の標準偏差、心拍指標として最小 NN、最大 NN、平均 NN、SDNN、rMSSD、pNN20、pNN50、平均 HR、HR の標準偏差、LF、HF、LF/HF の計 16 個を取得し、分析した。NN は不正脈を除いた正常な心拍間隔を示す。SDNN は心拍間隔の標準偏差で、低いほどストレス下にあることを示す。rMSSD は隣接する心拍間隔の差の二乗平方根で、低いほどストレス下にある事を示す。pNN20 と pNN50 は、隣接する心拍間隔(RRI)の差が特定の閾値 (20ms, 50ms) を超える割合で、低いとストレス下にあることを示す。HR は一般的な生体信号で、HR の高さはストレス、睡眠、代謝率のレベルを示す。以下、パラメータ分析の結果を述べる。

5.2.1 アクションゲームにおける情動間パラメータ比較

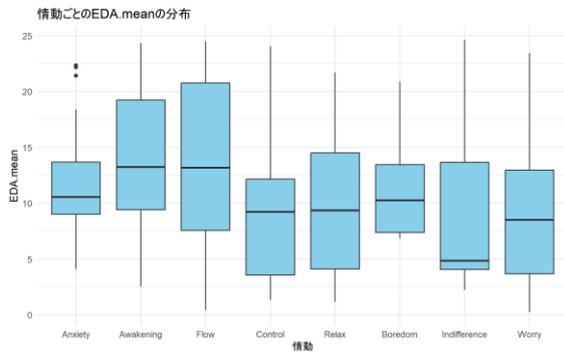
アクションゲームにおける情動間のパラメータを図 16 に示す。平均 EDA ($p = .0033$), 最大 EDA ($p = .0036$), 最大 NN ($p = .00095$), 平均 NN ($p = .0065$) が 1%以下で、最小 EDA ($p = .013$), 最小 NN ($p = .049$), pNN50 ($p = .048$), 平均 HR ($p = .023$) が 5%以下で有意であった。Tukey 検定の結果、平均 EDA (心配-覚醒 : $p \text{ adj} = .0062$, 心配-フロー : $.049$), 最小 EDA (心配-覚醒 : $p \text{ adj} = .022$), 最大 EDA (心配-覚醒 : $p \text{ adj} = .0069$), 最小 NN (リラックス-コントロール : $p \text{ adj} = .012$), 最大 NN (コントロール-不安 : $p \text{ adj} = .013$, コントロール-覚醒 : $p \text{ adj} = .0057$, コントロール-フロー : $p \text{ adj} = .0022$, リラックス-コントロール : $p \text{ adj} = .000084$, 心配-コントロール : $p \text{ adj} = .0278$), 平均 NN (コントロール-フロー : $p \text{ adj} = .016$, リラックス-コントロール : $p \text{ adj} = .0013$), pNN50 (リラックス-コントロール : $p \text{ adj} = .015$), 平均 HR (リラックス-コ

ントロール : $p \text{ adj} = .0057$)であった。皮膚電位指標においては、主に心配と覚醒との間で有意差が認められ、覚醒度の観点で情動の質的差異が反映されている可能性が示唆された。一方、心拍指標においては、リラックスとコントロールとの間で複数の指標に有意差が認められた。

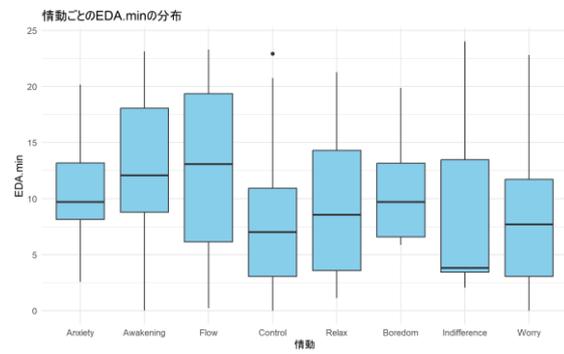
次に、SCR 分析の結果について述べる。SCR は主に情動の覚醒度を反映する指標であるため、集団分析で認められた情動条件間の差異が、個々の実験参加者においてどのような SCR 反応として現れているかを確認することを目的として、SCR 波形および SCR 関連指標に基づく分析を行った。皮膚電位および心拍指標の集団分析では、アクションゲームにおいて、特に覚醒を含む情動条件間で皮膚電位指標に差が認められた。また、心拍指標においては、リラックスとコントロールとの間で差が確認された。以上の結果を踏まえ、本研究では覚醒を、高覚醒状態を代表する情動として選定した。一方、低覚醒側の情動としては退屈や無関心も含まれるが、これらは申告数が少なく個人差が大きかった。そこで、申告数が多く、かつ安定した生理反応が観察されたリラックスを、低覚醒状態の代表として選定した。SCR 指標として、皮膚電位の持続的な水準 (SCL) の平均を表す SCL_mean, 一過的な皮膚電位反応 (SCR) の頻度を表す SCR ピーク数, および単位時間当たりの SCR 反応数である SCR_per_min を算出した。その結果、高覚醒条件 (覚醒) における SCL_mean の平均値は $567.27 (\mu S)$, SCR ピーク数の平均は 8.50 (回), SCR_per_min の平均は 7.20 (回/s) であった。一方、低覚醒条件 (リラックス) では、SCL_mean の平均値は $419.46 (\mu S)$, SCR ピーク数の平均は 7.80 (回), SCR_per_min の平均は 7.20 (回/s) であった。これらの結果から、高覚醒条件では低覚醒条件と比較して SCL_mean が高い値を示しており、覚醒水準の違いが SCL に反映されている可能性が示唆された。一方で、SCR ピーク数および SCR_per_min については両条件間で大きな差は認められず、SCR の発生頻度は必ずしも覚醒度の高低を単純に反映するものではない可能性が示された。

図 17 に、代表的な実験参加者における SCR 波形およびピーク検出結果を示す。代表例においても、高覚醒条件では SCL 水準が全体的に高く推移する傾向が確認され、集団的な指標結果と整合した反応が観察された。ただし、SCR ピークの出現頻度については個人差が大きく、課題内容やプレイ状況といったような覚醒度以外の要因による影響も含まれている可能性がある。

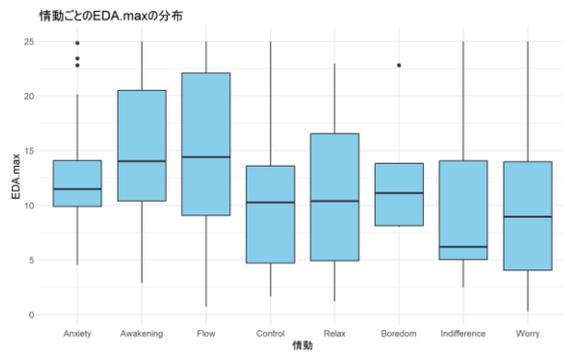
図 16 アクションにおける情動ごとのパラメータ



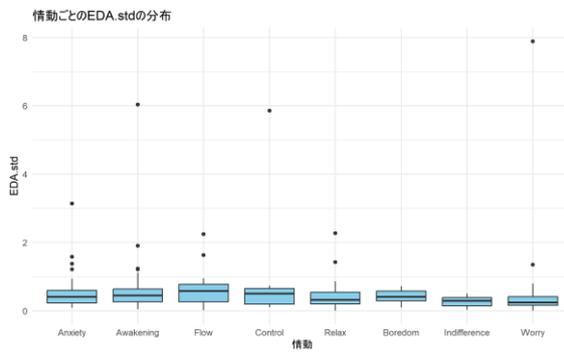
(a) 平均 EDA



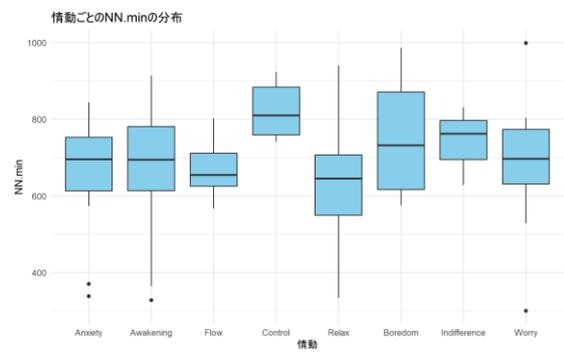
(b) 最小 EDA



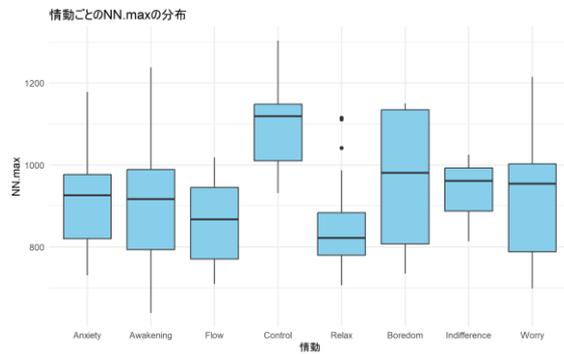
(c) 最大 EDA



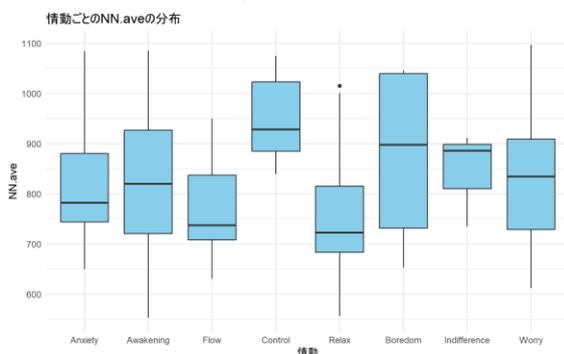
(d) EDA の標準偏差



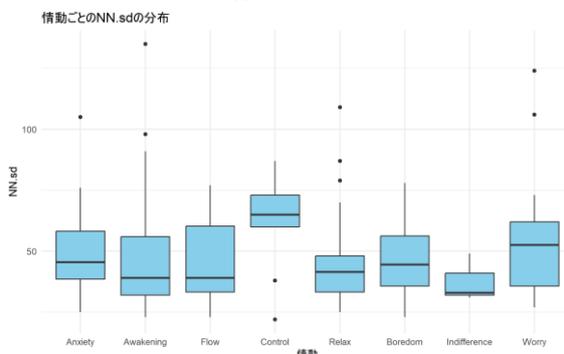
(e) 最小 NN



(f) 最大 NN

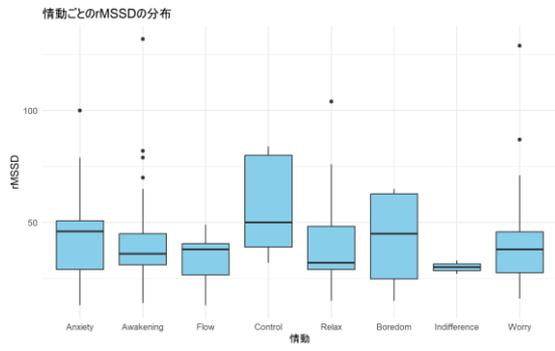


(g) 平均 NN

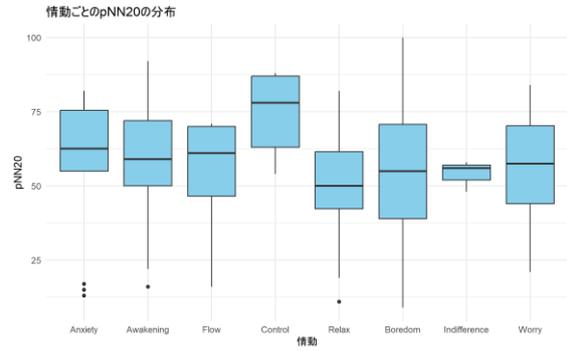


(h) SDNN

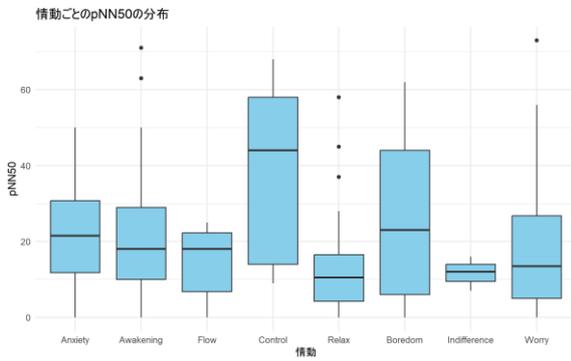
図 16 アクションにおける情動ごとのパラメータ (続き)



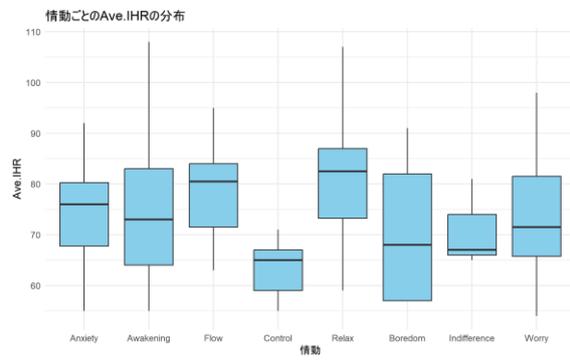
(i) rMSSD



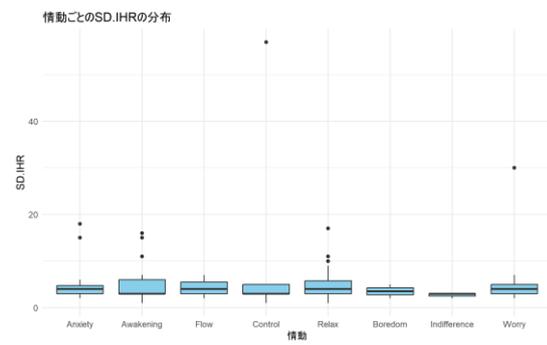
(j) pNN20



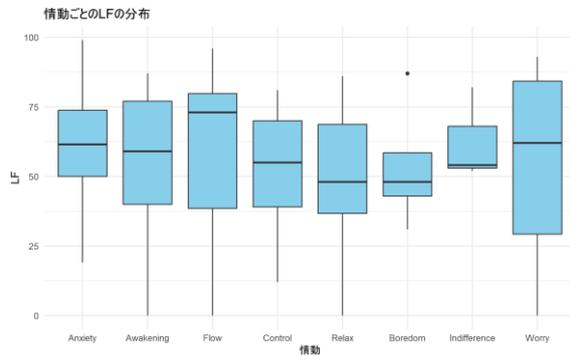
(k) pNN50



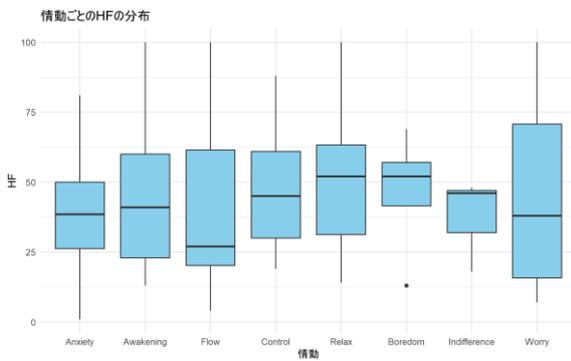
(l) 平均 HR



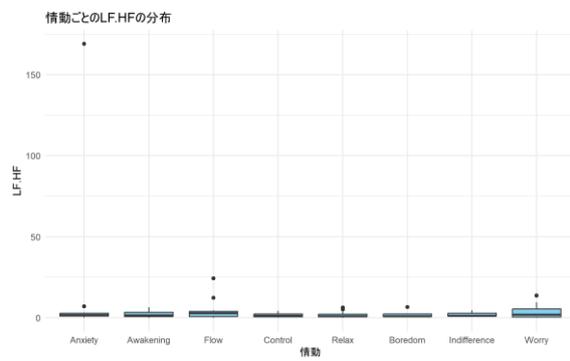
(m) HR の標準偏差



(n) LF

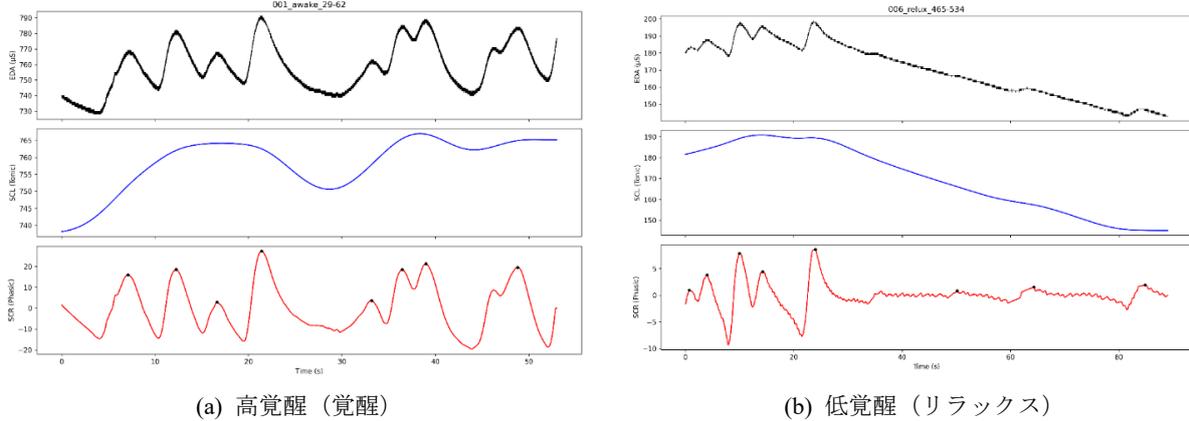


(o) HF



(p) LF/HF

図 17 高覚醒（覚醒）と低覚醒（リラックス）における SCR 反応の比較（アクション代表例）



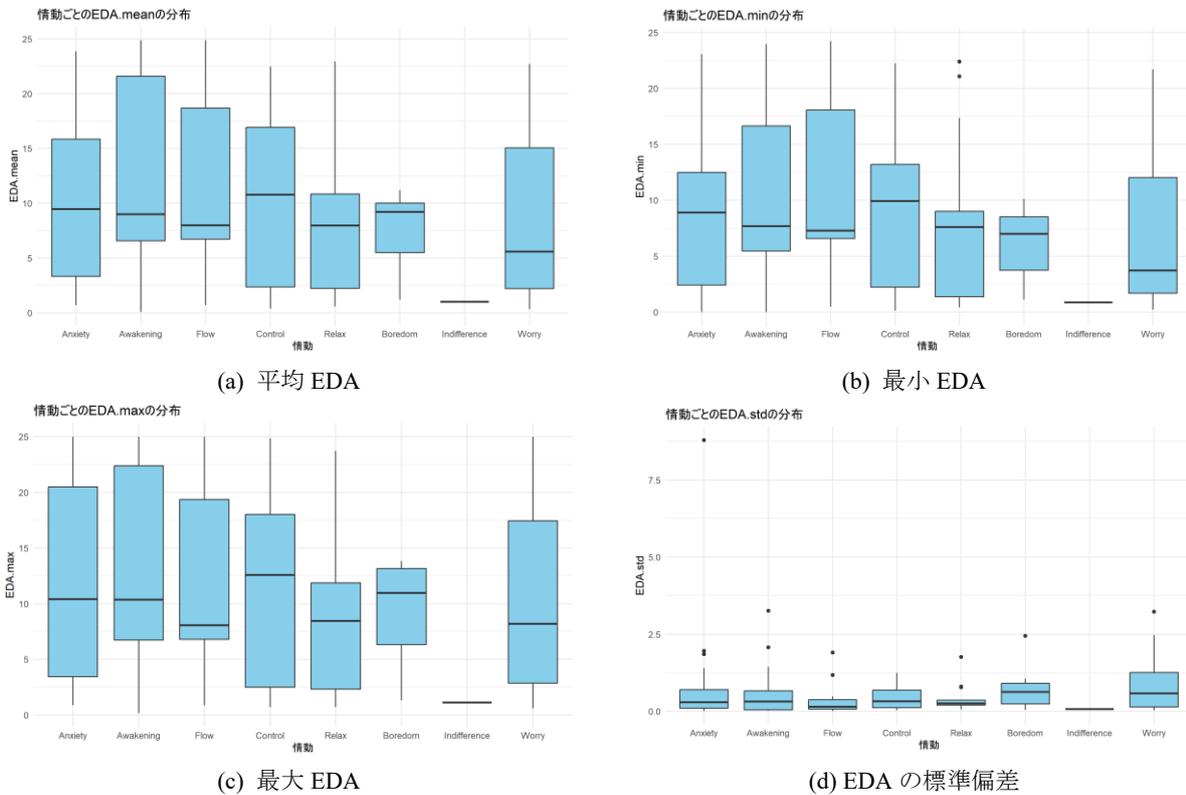
なお、本研究では SCR 指標を用いた全情動の網羅的比較を目的とせず、集団分析において差が認められた情動条件に着目し、個々の生理反応の具体例を示すことを目的として分析を行った。

5.2.2 ホラーゲームにおける情動間パラメータ比較

ホラーゲームにおける情動間のパラメータを図 18 に示す。心拍指標のうち、 $pNN20$ ($p = .030$) について 5%以下で有意差が認められた。しかし、Tukey の多重比較検定ではいずれの情動間においても有意

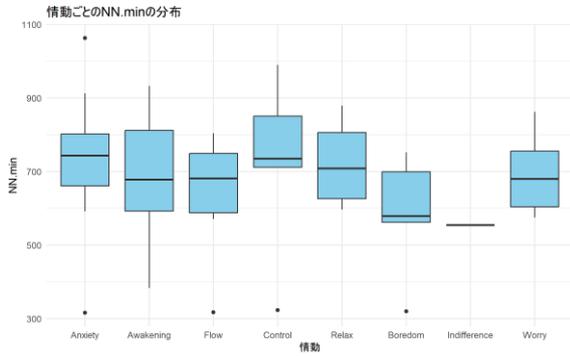
差が認められなかった。このことから、情動間に全体的なばらつきは存在するものの、特定の情動間における明確な差異は示されなかったと考えられる。また、各情動におけるストレス値 (SDNN, rMSSD, pNN50) の傾向を比較すると、フローおよびリラックス条件において相対的に高い値を示し、コントロール条件では低い値を示す傾向が確認された。一方、不安および心配条件は類似した傾向を示しており、生体指標の観点からは両情動の差異は明確には現れなかった。

図 18 ホラーにおける情動ごとのパラメータ

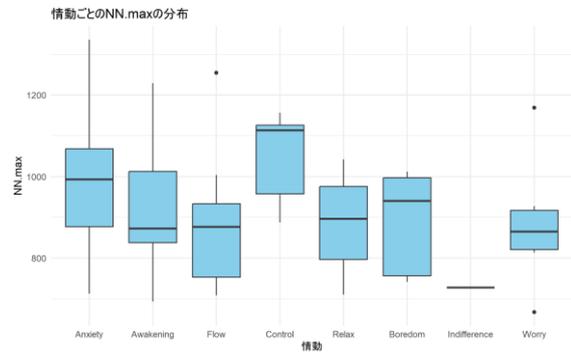


差が認められなかった。

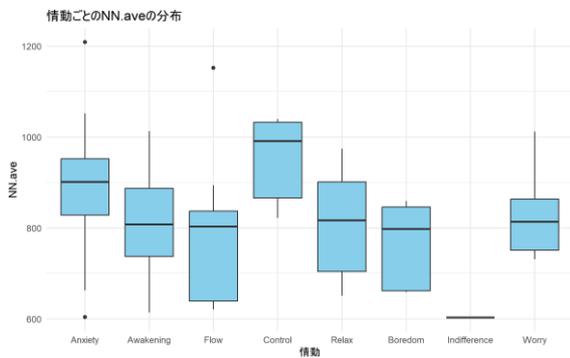
図 18 ホラーにおける情動ごとのパラメータ (続き)



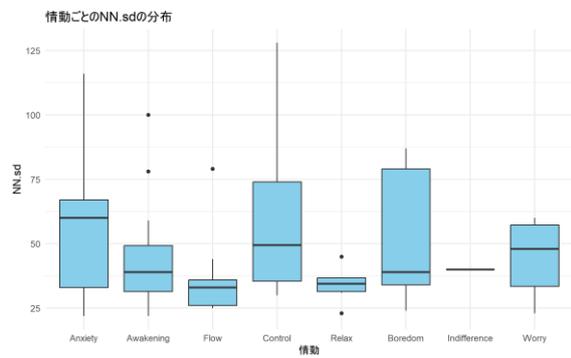
(e) 最小 NN



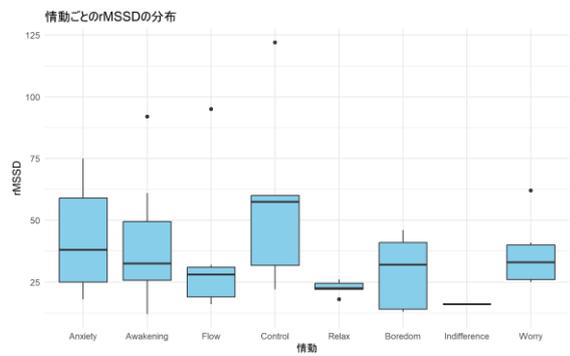
(f) 最大 NN



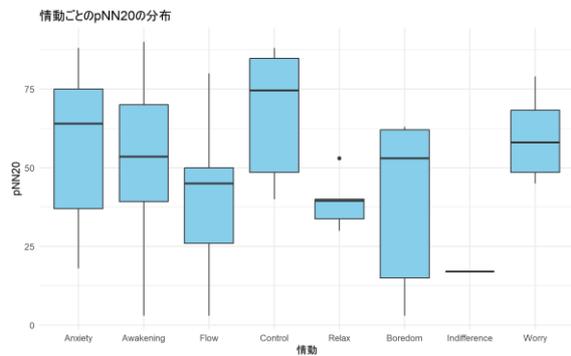
(g) 平均 NN



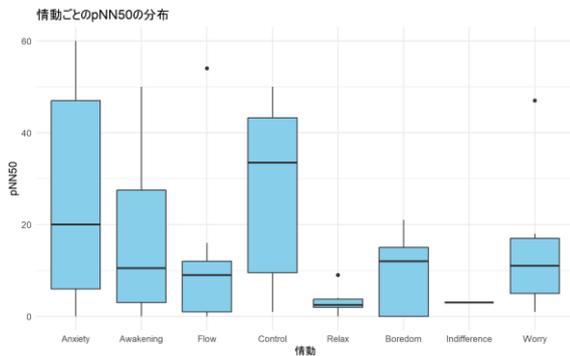
(h) SDNN



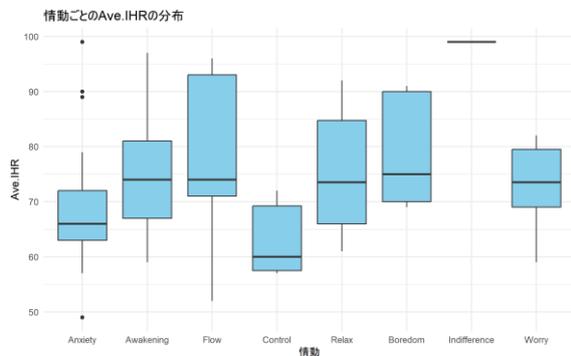
(i) rMSSD



(j) pNN20



(k) pNN50



(l) 平均 HR

図 18 ホラーにおける情動ごとのパラメータ (続き)

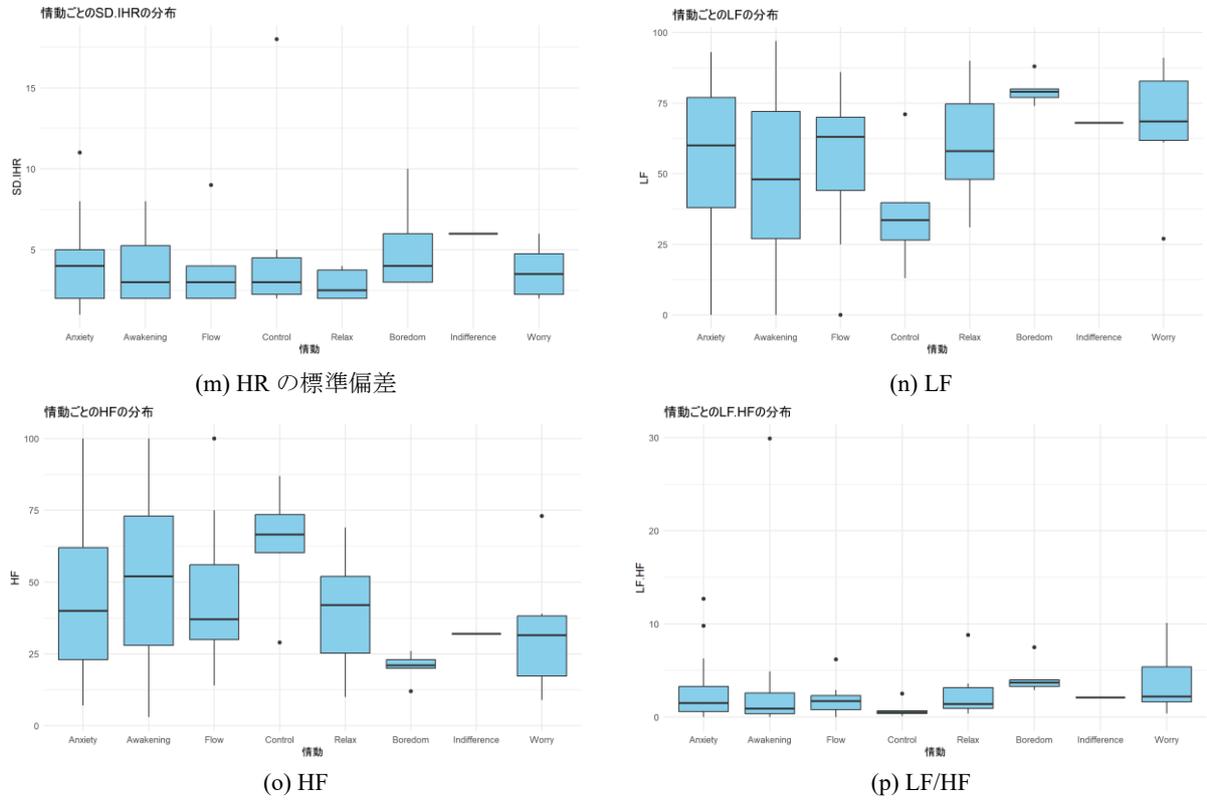
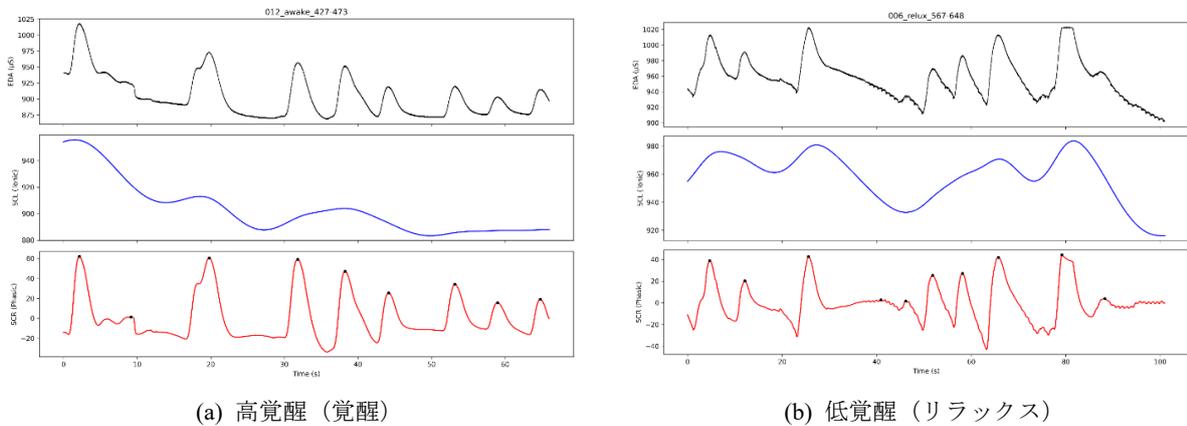


図 19 高覚醒 (覚醒) と低覚醒 (リラックス) における SCR 反応の比較 (ホラー代表例)



次に、ホラーゲームにおける SCR 分析の結果について述べる。ホラーゲームにおいても、覚醒およびリラックスの情動申告数が多く、代表的な情動として扱うことが可能であった。よって、申告数が多くデータ数の観点から比較が可能であった覚醒を高覚醒寄りの情動、リラックスを低覚醒寄りの情動として選定し、SCR 分析を行った。

その結果、覚醒条件における SCL_mean の平均値

は 468.25 (μS)、SCR ピーク数の平均は 9.32 (回)、SCR_per_min の平均は 7.18 (回/s) であった。一方、リラックス条件では、SCL_mean の平均値は 358.69 (μS)、SCR ピーク数の平均は 10.26 (回)、SCR_per_min の平均は 6.72 (回/s) であった。これらの結果から、ホラーゲームにおいても、覚醒条件ではリラックス条件と比較して SCL_mean が高い値を示しており、皮膚電位の持続的な水準には情動条件による差異が反映されている可能性が示された。一

生体指標の観点からは両情動の差異は明確には現れなかった。

一方で、SCR ピーク数および SCR_per_min はいずれも両条件間で近い値を示しており、SCR 反応の発生頻度に関しては覚醒度の高低による一貫した差は確認されなかった。このことから、ホラージャンルにおける SCR 反応は、覚醒水準そのものよりも、驚きや緊張といった一過的なイベントやプレイ状況に依存して変動する可能性が示唆される。

図 19 に、代表的な実験参加者におけるホラーゲームプレイ時の SCR 波形およびピーク検出結果を示す。代表例においても、覚醒およびリラックス条件間で SCR 反応の出現頻度に明確な違いは確認されなかった。

5.2.3 パズルゲームにおける情動間パラメータ比較

パズルゲームにおける各情動条件間の生体指標パラメータを図 20 に示す。統計解析の結果、いずれの指標においても情動条件間で有意差は認められなかった ($p > .05$)。このことから、パズルゲームにおいては、アクションゲームやホラーゲームと比較して、情動条件による生理反応の差異が全体として小さい傾向にあると考えられる。一方で、記述統計的には、無関心において心拍変動指標に基づくストレス値 (SDNN, rMSSD, pNN50) が相対的に低い傾向がみられた。ただし、これらの差は統計的に有意なものではなく、明確な情動間差を示すものではない。

皮膚電位指標と心拍指標では有意差が認められなかったものの、パズルゲームにおける SCR 指標についても確認した。図 21 に代表的な実験参加者におけるパズルゲームプレイ時の SCR 波形およびピーク検出結果を示す。パズルゲームでは、主観的情動申告においてリラックスの申告数が最も多く、覚醒を上回っていた。ここで、SCR 指標を見ると、覚醒では、SCL_mean の平均が 312.03 (μS)、SCR ピーク数の平均が 8.30 (回)、SCR_per_min の平均が 7.20 (回/s) であった。一方で、リラックスでは、SCL_mean の平均が 398.40 (μS)、SCR ピーク数の平均が 7.33 (回)、SCR_per_min の平均が 7.11 (回/s) であった。SCL_mean では、覚醒の方がリラックスよりも低い値を示し、SCR ピーク数および SCR_per_min については覚醒とリラックス条件で大きな差は認められなかった。このことから、パズルゲームにおいては、主観的にはリラックスと評価される状況においても、SCL_mean や SCR 反応の水準には一定の変動があり、主観的覚醒感と SCL との間に必ずしも完全な一致は見られないことが示唆された。また、SCR ピークの発生頻度は両条件ではほぼ同程度

であったことから、SCR の発生頻度は覚醒度の高低を単純に反映するものではない可能性がある。

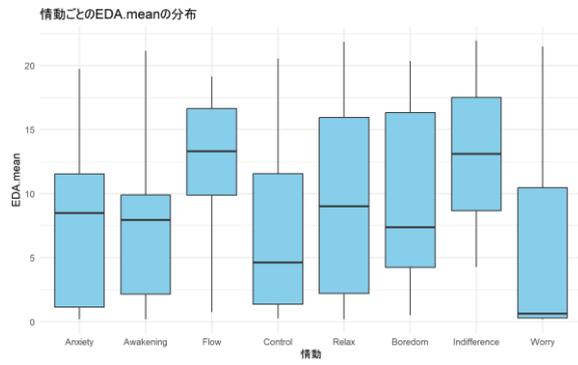
5.2.4 ジャンル間のパラメータ比較

ジャンル間で各情動の皮膚電位および心拍指標を比較した結果、不安・フロー・リラックス・退屈・心配について、有意差は認められなかった。一方で、覚醒においては皮膚電位指標の平均 EDA ($p = .00024$)、最小 EDA ($p = .0014$)、最大 EDA ($p = .00012$) で有意差が認められ、特にパズルはアクションおよびホラーに比べて値が低く、落ち着いた状態であったことが示唆された。心拍指標においては、コントロールでパズルが他ジャンルと異なる傾向を示し、SDNN, rMSSD, pNN20, pNN50, 平均 NN, 最大 NN, 平均 HR など多くのパラメータで有意差が観察されたことから、パズルではコントロール時に比較的低いストレス値を示したと考えられる。無関心条件ではデータ総数が少ないため傾向にばらつきが見られたが、一部のパラメータでは有意差が確認された。

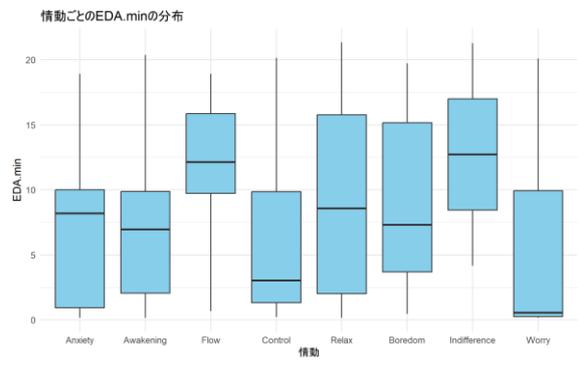
次に、SCR 分析の結果について述べる。分析する情動は、皮膚電位指標で有意差のあった覚醒を選定した。結果は前節で述べたように、アクションゲームでは、覚醒における SCL_mean の平均値は 567.27 (μS)、SCR ピーク数の平均は 8.50 (回)、SCR_per_min の平均は 7.20 (回/s) であった。ホラーゲームでは、覚醒条件では SCL_mean が 468.25 (μS)、SCR ピーク数が 9.32 (回)、SCR_per_min が 7.18 (回/s) であり、アクションよりやや低い水準が観察された。これに対して SCR ピーク数および SCR_per_min は大きな差がなく、ジャンルによる覚醒度の違いが発生頻度に直結していない傾向が確認された。パズルゲームの覚醒では、SCL_mean が 312.03 (μS)、SCR ピーク数が 8.30 (回)、SCR_per_min が 7.20 (回/s) であり、アクションおよびホラーと比較して SCL_mean が低く、落ち着いた状態であったことが示唆された。また、ホラーの SCL_mean はアクションとパズルの中間であり、ゲーム全体を通して、中程度の覚醒状態であったと言える。一方、SCR ピーク数および SCR_per_min はジャンル間で大きな差は認められなかった。

以上の結果から、覚醒における SCL_mean はジャンル差を示す傾向が確認されたが、SCR の発生頻度はジャンル間で大きな差を示さず、覚醒度の違いを単純には反映していない可能性が示された。

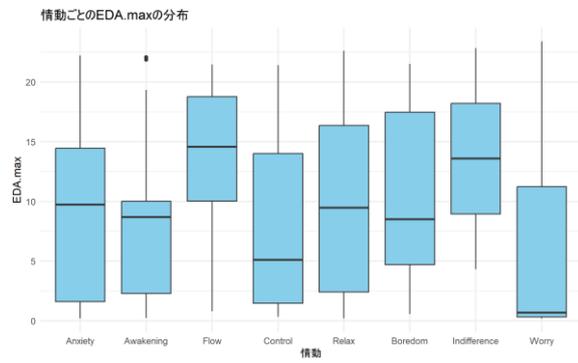
図 20 パズルにおける情動ごとのパラメータ



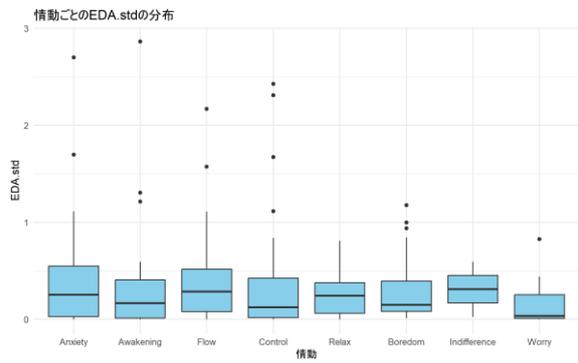
(a) 平均 EDA



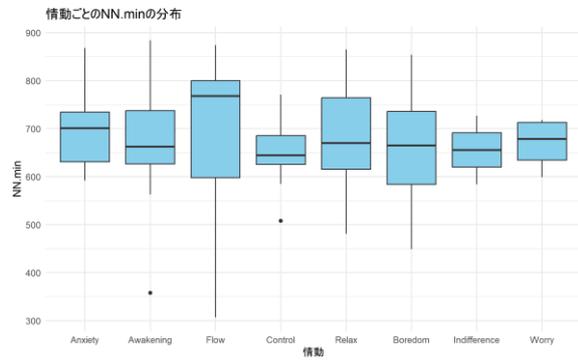
(b) 最小 EDA



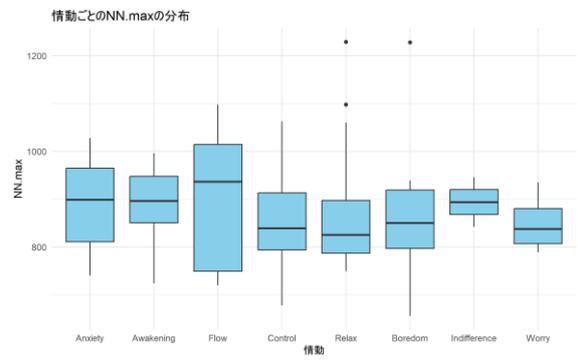
(c) 最大 EDA



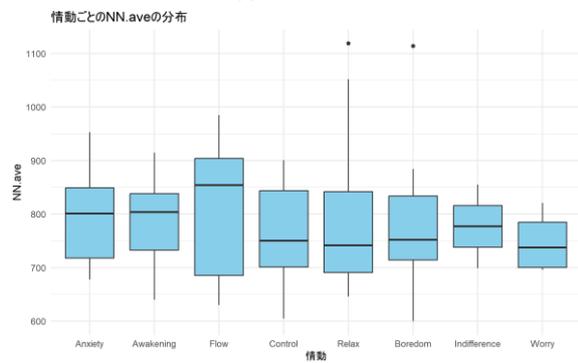
(d) EDA の標準偏差



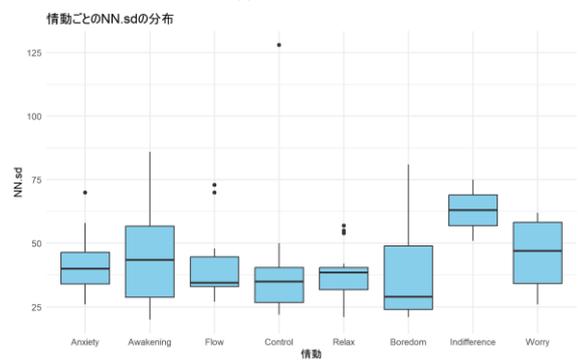
(e) 最小 NN



(f) 最大 NN

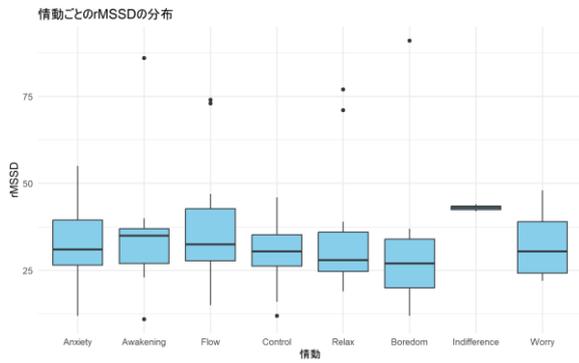


(g) 平均 NN

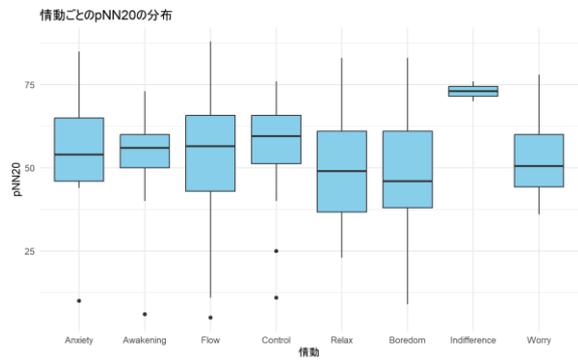


(h) SDNN

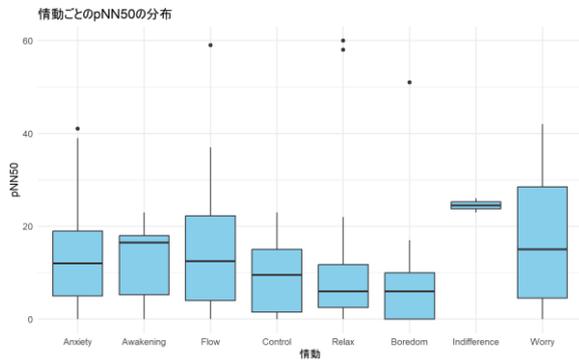
図 20 パズルにおける情動ごとのパラメータ (続き)



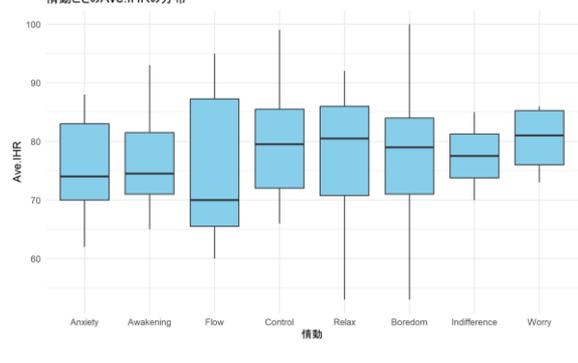
(i) rMSSD



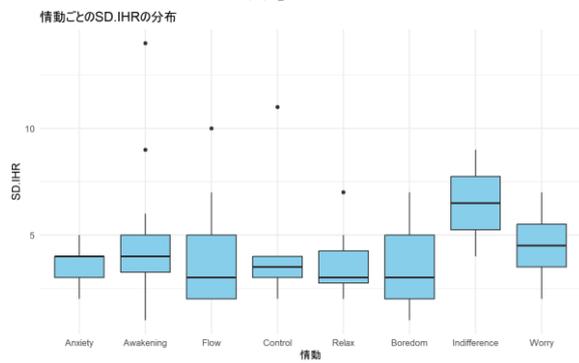
(j) pNN20



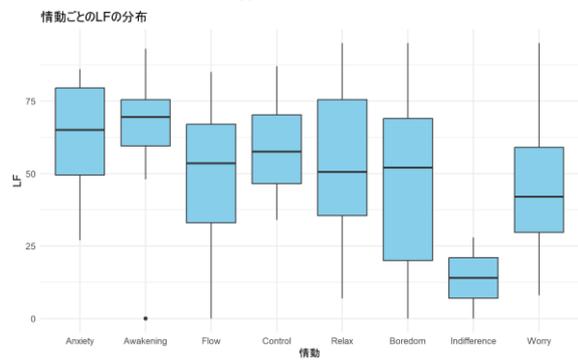
(k) pNN50



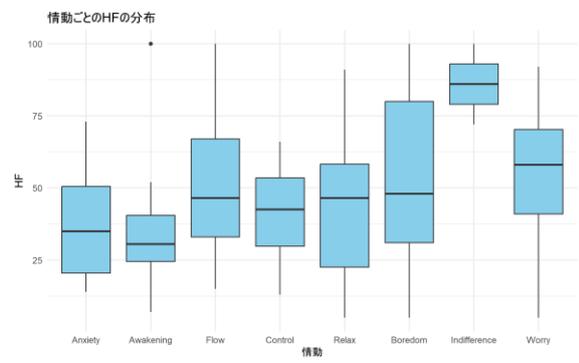
(l) 平均 HR



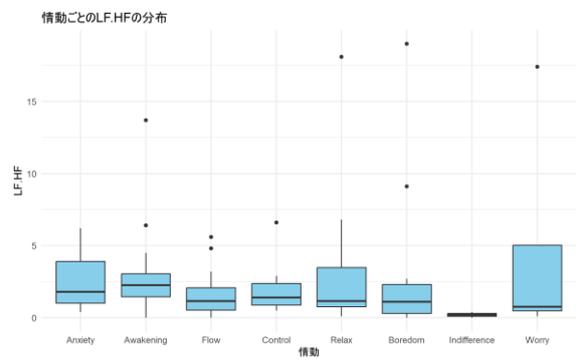
(m) HR の標準偏差



(n) LF

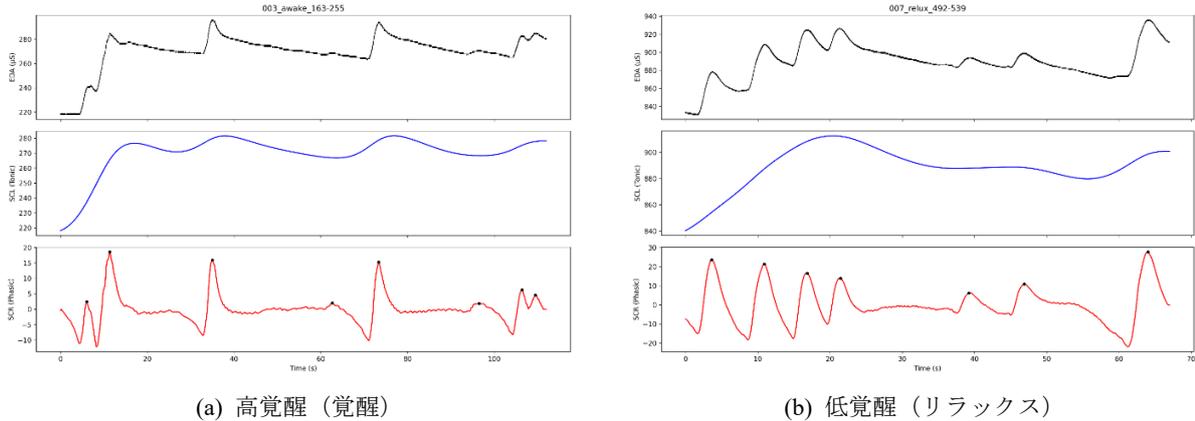


(o) HF



(p) LF/HF

図 21 高覚醒（覚醒）と低覚醒（リラックス）における SCR 反応の比較（パズル代表例）



5.3 状態遷移図

情動遷移の前後関係を調査するため、情動の状態遷移図を作成した。次の情動に変化する確率を表現した図であり、数字が1に近いほどその情動に遷移しやすいことを示す。矢印の太さは矢印の始点の情動がどの情動に遷移しやすいかを表し、太いほど矢印の先の情動に遷移しやすいことを示す。また、数字の箱の大きさは矢印の先の情動がどの情動から遷移してきやすいかを表し、大きいほどその情動から遷移してきやすいことを示す。

5.3.1 アクションの状態遷移図

アクションゲームにおける状態遷移図を図 22 に示す。覚醒、リラックス、心配の導線があり、緊張の波が形成されている。退屈、無関心からは不安、

覚醒へよく変化しているが、不安、覚醒からの反対方向の変化はあまり見られなかった。フローへは覚醒、リラックス、心配からの遷移が多かった。コントロールについても覚醒との結びつきが強いことが分かる。

5.3.2 ホラーの状態遷移図

ホラーゲームにおける状態遷移図を図 23 に示す。覚醒、不安、フローの導線があり、緊張感の高いプレイ体験が覗える。また、アクションゲームと比較して、リラックスの情動申告の割合が低く、不安や心配が多くなっている点からも、ジャンルの特性が表れているといえる。また、不安や覚醒に遷移しやすく、反対に楽観的な情動には遷移しにくくなっている。さらに、アクションと同様に心配、リラックス、覚醒の導線もみられ、緊張の波が存在していると考えられる。

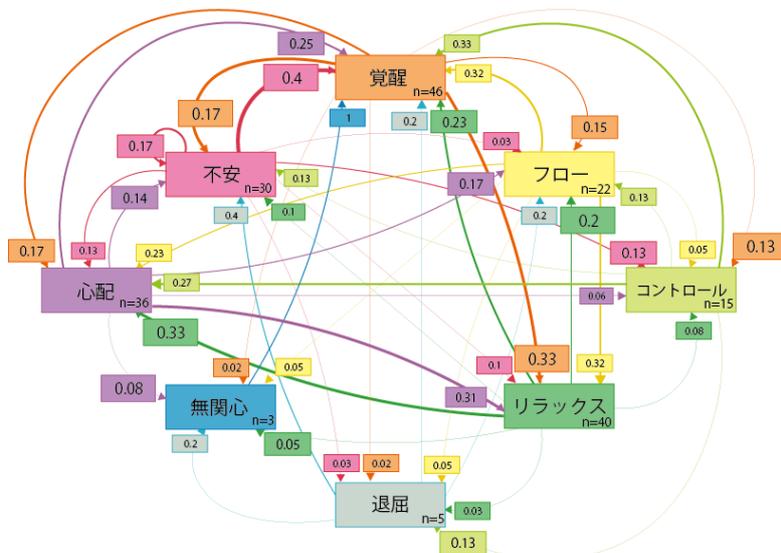


図 22 アクションの状態遷移図

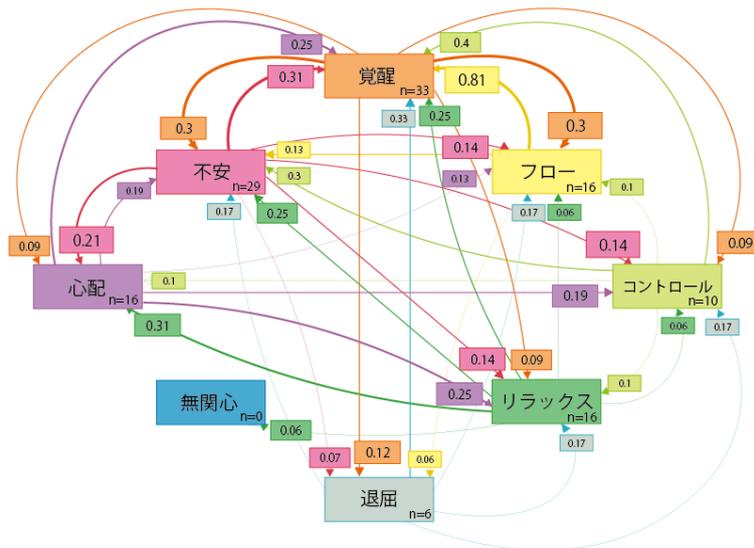


図 23 ホラーの状態遷移図

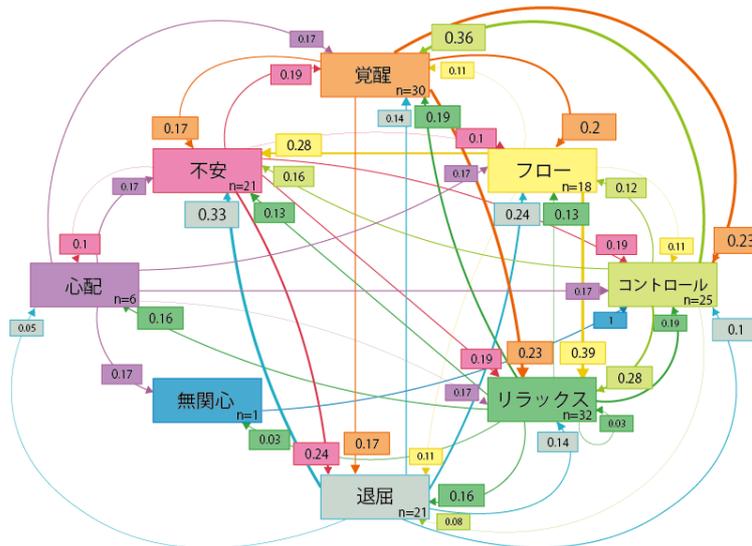


図 24 パズルの状態遷移図

5.3.3 パズルの状態遷移図

パズルゲームにおける状態遷移図を図 24 に示す。不安と退屈、覚醒とリラックスとコントロールの結びつきが強くなっており、特に覚醒とリラックスがよく見られる。また、フローからは不安、リラックスに変化しやすく、フローへは覚醒、退屈からの遷移が多くなっている。よって、フローが情動の中継点のような役割を担っていると考えられる。また、アクション、ホラーにおいて覚醒が多かったのに対し、パズルはリラックスが多く、緊張感の弛張がよりはっきりとしているといえる。

6 考察

本章では、実験結果を踏まえ、生体情報に基づく情動理解と DDA 設計への示唆について考察する。

6.1 GEQ の評価分析

Flow 項目のスコアが全体的に高かったことから、すべてゲームジャンルにおいてフロー的状態の経験が認められた。このことから、今回実施したアクション、ホラー、パズルのすべてのジャンルにおいてフロー理論に基づく DDA の実現は可能であると考ええる。また、ホラーにおいて没入度の低さが認められたが、Tension/Annoyance と Negative affect の質問

群のスコアが他の質問群と比べて比較的lowく、ホラーゲームに対する極端な苛立ちや否定的意見は見られなかったことから、ホラーゲームの得点の低さはジャンル特性とは考えづらく、ゲーム選択に改善の余地があると考えられる。このことは、ホラージャンル特有の問題というよりも、今回選択したゲームのデザイン上の特徴が影響している可能性が高い。具体的には、目標が分かりにくくクリアまでに時間を要することや、グラフィック面での評価が相対的に低かったこと、言語が日本語に対応していなかったことが、没入度の低さに寄与したと考えられる。

さらに、技能指標と GEQ 因子との関連を検討した結果、ジャンルによって技能が主観的体験に与える影響の様相が異なることが示された。アクションゲームでは、客観技能指標と **Competence** との間に比較的強い正の相関が認められ、さらに主観技能指標と **Negative affect** との間に負の相関が確認された。また、主観技能指標と客観技能指標との間にも一定の正の相関がみられた。これらの結果は、アクションゲームにおいては技能水準がプレイヤーの有能感や感情状態と関連しやすく、プレイヤー自身も自身の技能をある程度正確に認識している可能性を示している。一方で、パズルゲームでは客観技能指標と **Competence** との間に比較的強い正の相関が認められたものの、主観技能指標と客観技能指標との関連は限定的であった。このことから、パズルゲームでは実際の到達度とプレイヤー自身の技能認知との間に乖離が生じる可能性が示唆される。

以上より、いずれのジャンルにおいてもフロー的状态の経験は確認されたものの、技能水準と主観的体験との結びつきはジャンルによって異なる傾向があると考えられる。このことは、DDA 設計において単にフロー状態の維持のみを目標とするのではなく、ジャンル特性に応じて技能情報の扱い方を変える必要性を示唆している。

6.2 生体情報のパラメータ分析

アクションゲームにおいては、情動間で生体指標に有意差が確認された。皮膚電位指標では心配と覚醒の間に差が認められ、心拍指標ではリラックスとコントロールの間に差が確認されたことから、本実験では心配と覚醒の判別には EDA が、リラックスとコントロールの判別には HRV が有用である可能性が示唆された。SCR の代表的な個別データでも、高覚醒条件では SCL 水準が高く維持される傾向が確認され、集団分析の EDA 結果と整合していた。一方で、SCR ピーク数は個人差が大きく、覚醒度を単純には反映しないことが示唆された。

注目すべき点として、フロー条件やリラックス条

件で HRV 指標のストレス値が相対的に高く、不安条件では低い傾向が観察されたことが挙げられる。従来のフロー理論に基づけば[2,3]、フローやリラックス条件では低ストレスが予測されるが、本実験では予想と異なる傾向が示された。この理由として、アクションゲーム特有の空間認識とボタン操作への集中により、プレイヤーが主観的にフローやリラックスと評価しても、生理的には一定の覚醒状態が維持された可能性がある。また、プレイヤーによる情動のタグ付けに認識差があった可能性や、生体指標が即時に情動変化を反映しない特性の影響も留意するべきである。

一方で、退屈や無関心条件では、サンプル数が少なく、個々のデータが平均に与える影響が大きかったため、特徴的な傾向は明確に現れなかった。このことから、データのばらつきや個人差の影響が大きくなり、アクションゲームにおける情動評価では、集団分析に加えて個別ケースでの分析も重要であることが示唆される。

さらに、ジャンル間の比較から、パズルやホラーに比べてアクションでは覚醒時の SCL が高く、リラックスやコントロール時の HRV 差が明瞭であった。このことは、アクションゲーム特有の高負荷環境において、覚醒状態の生理反応がより顕著に現れる一方、コントロール感の評価には心拍指標が有効であることを示しており、従来の DDA 研究[7,16]が示す一般傾向を支持しつつも、ジャンル特性による違いという本研究独自の知見を提供している。

以上の結果から、アクションゲームにおいては、覚醒状態の把握には皮膚電位、コントロール感やリラックス状態の把握には HRV 指標を組み合わせることが有効であると考えられ、生体情報に基づく DDA 設計への具体的な応用が示唆される。また、実験でのフローやリラックスで生理的ストレスが高いという結果は、プレイヤーの主観評価と生理反応の対応が必ずしも一致するとは限らないことを示しており、今後の DDA 研究やゲームデザインにおけるプレイヤー体験評価の方法に示唆を与えるものである。

ホラーゲームにおいては、心拍指標の pNN20 において 5%以下で有意差が認められたものの、Tukey の多重比較検定では特定の情動間で有意差は観察されなかった。このことから、情動間に一定のばらつきは存在するものの、明確な判別は困難であることが示唆される。集団分析の結果、フロー条件およびリラックス条件では SDNN、rMSSD、pNN50 の値が相対的に高く、コントロール条件では低い傾向が確認された。不安および心配条件は類似した傾向を示しており、生体指標の観点からは両情動の差異は明確に

は現れなかった。これは、ホラーゲームにおいて、リラックスの申告が少なく、不安や心配の申告が比較的多いことから、主観的にフローやリラックスと評価しても、生理的には一定の覚醒状態が維持される傾向を示している。

また、SCR 分析において、高覚醒条件では SCL 水準が比較的高く維持される傾向が観察され、集団分析の皮膚電位結果と整合していた。一方で、SCR ピーク数と SCR_per_min とではジャンル間で大きな差は見られず、覚醒度の違いが発生頻度に単純には反映していないことが示唆された。この結果は、主観評価での覚醒感と生理的覚醒との対応が必ずしも一致しないことを示しており、プレイヤー体験の評価における指標選択の重要性を示している。

これらの知見は、ホラーゲームにおける HRV を用いたストレス推定の先行研究[14]と比較すると、新たな示唆を与える。本研究では、心拍指標のみでは情動判別が困難であること、主観評価と生理的覚醒の間にズレが生じる可能性があることを確認した。これらの結果は、複数ジャンルの比較を通じてホラーゲーム特有の生理反応パターンを把握する手がかりとなる。以上の結果から、ホラーゲームにおいては、覚醒状態の把握には SCL_mean など皮膚電位指標を中心に観察することが有効であり、心拍指標の傾向を併せて観察することで、プレイヤーの緊張やストレスの変化を評価する一助となる可能性があると考えられる。

パズルゲームにおいては、情動条件間で生理的指標に有意差は認められなかった。心拍指標や皮膚電位指標の統計解析結果から、アクションゲームやホラーゲームと比較して、情動による生理反応の差異は小さい傾向にあることが示された。無関心条件では、心拍変動指標に基づくストレス値 (SDNN, rMSSD, pNN50) が相対的に低い傾向が観察されたものの、統計的に有意ではなく、明確な情動差としては評価できなかった。SCR の分析では、SCL_mean は低覚醒条件の方が高い値を示す結果となったが、SCR の発生頻度 (ピーク数および SCR_per_min) は両条件でほぼ同程度であった。

これらの結果は、パズルゲームにおいて情動条件間で生体指標の差異が小さく、主観評価と生体反応が必ずしも一致しないことを示しており、本研究の観察としても、生体指標のみで情動を推定することの困難さが示唆された。この傾向は、生体指標だけで情動を推定することの難しさを示しており、Darziらの先行研究[7]と整合している。

パラメータのジャンル間比較の結果では、覚醒条件においては皮膚電位指標 (SCL_mean) に有意差が認められ、パズルゲームはアクションおよびホラー

と比較して低い水準を示した。このことは、ジャンル特性に応じてプレイヤーの覚醒度が異なることを示しており、パズルでは比較的落ち着いた状態、アクションでは高覚醒状態、ホラーでは中間的な覚醒状態が観察されたことと整合する。一方、SCR ピーク数および SCR_per_min はジャンル間で大きな差がなく、覚醒度の違いが発生頻度に単純には反映されないことが示された。これは、SCL_mean のような持続的な皮膚電位水準と、瞬間的に発生する SCR 頻度との間には必ずしも一致が見られないことを意味する。

ジャンル間における主観評価および生体情報の差については、SCL_mean を用いることで覚醒状態の相対的な違いを把握できることが示唆された。しかし、SCR 発生頻度だけではジャンル差を明確に捉えることは困難であるため、DDA 設計においては、ジャンルごとに適切な生体指標を選択する必要がある。

6.3 状態遷移図

各ジャンルの状態遷移図を比較すると、情動遷移の傾向にジャンル特性があることが明らかとなった。アクションゲームでは、覚醒、リラックス、心配の間で覚醒度の緊張・弛緩が確認され、退屈や無関心からは不安や覚醒へ移行しやすい傾向が見られた。ホラーゲームでは、覚醒、不安、フローの導線が中心で、リラックス状態の申告が少なく、緊張状態が持続しやすいことが示唆された。パズルゲームでは、覚醒とリラックスの導線が明瞭で、フローから不安やリラックスに遷移しやすく、フローが情動の中継点として機能していることが示された。

これらの結果から、アクションやパズルでは緊張感の弛張が生じやすく、ホラーでは緊張状態が維持されやすいことが分かった。また、全ジャンルにおいてフローは覚醒状態との関連が深いことも確認され、調査したい情動に応じてジャンルを選択することで、今後より効果的な情動分析や DDA 設計が可能であると考えられる。

6.4 DDA 設計への示唆

本研究の結果から、生体情報を活用した DDA 設計に関していくつかの示唆が得られた。

第一に、生体情報のみからプレイヤーの情動状態を一義的に推定することは困難であり、主観評価や文脈情報と組み合わせた多面的な判断が重要である。

第二に、ゲームジャンルごとに異なる情動遷移パターンが観察されたことから、難易度調整は単一の指標に基づく一律の制御ではなく、ジャンルの特性や体験の目的に応じて設計する必要がある。例えば、

アクションゲームやパズルゲームでは緊張と緩和のリズムを維持することが没入感の向上に寄与する可能性がある一方、ホラーゲームでは持続的な緊張状態を損なわない調整が重要となる。

第三に、生体指標には大きな個人差が存在するため、プレイヤーごとの基準値の設定や適応的なモデルの導入が、実用的な DDA システムの実現に向けた重要な課題である。これらの示唆は、情動に配慮した難易度調整の設計において、有用な視点を提供するものと考えられる。

7 結論

本研究では、生体情報と主観評価を組み合わせ、フロー理論に基づく DDA 設計の可能性について検討した。

7.1 総括

本研究では、アクション、ホラー、パズルの3ジャンルのゲームにおける主観評価および生体情報(EDA, HRV)を用いて、情動状態の把握と DDA (Dynamic Difficulty Adjustment)の可能性を検討した。まず、GEQの結果から、3ジャンルすべてでプレイヤーがフロー的な体験を得ていたことが確認された。これにより、今回対象としたアクション、ホラー、パズルの各ジャンルにおいても、フロー理論に基づいた DDA の実現の可能性が示唆された。一方で、ホラーにおいては没入度の低さが見られた。Tension/Annoyance および Negative affect の質問群のスコアは他の項目に比べて低く、極端な苛立ちや否定的意見は観察されなかったことから、ホラーゲーム特有の問題というより、選択したゲームのデザインの要因が影響した可能性が考えられる。具体的には、目標が分かりにくくクリアまでに時間を要すること、グラフィック評価が相対的に低かったこと、言語が日本語に対応していなかったことが、没入度の低さに関与していたと考えられる。

さらに、本研究では技能指標と GEQ 因子との関連についても検討した。その結果、技能水準と主観的体験との関係はジャンルによって異なる傾向が示された。アクションゲームでは、客観技能指標と Competence との間に比較的強い正の相関が認められ、主観技能指標と Negative affect との間にも負の相関が確認された。また、主観技能指標と客観技能指標との間にも一定の関連が認められ、プレイヤーが自身の技能をある程度適切に認識している可能性が示唆された。一方で、パズルゲームでは客観技能指標と Competence との間には正の相関が見られたものの、主観技能指標と客観技能指標との関連は限

定的であった。このことから、パズルゲームでは実際の達成度と自己認識との間に乖離が生じる可能性が示された。これらの結果は、フロー理論に基づく DDA がジャンル横断的に適用可能である一方で、技能情報の扱い方についてはジャンル特性を踏まえる必要があることを示唆している。

次に、生体指標の分析結果では、アクションゲームにおいては覚醒状態の評価に皮膚電位指標が有効であり、リラックスやコントロール状態の把握には心拍変動指標(HRV)が有用であることが示された。ホラーゲームでは心拍指標のみでの情動判別は困難であり、主観評価と生理的覚醒にズレが生じる可能性が確認された。パズルゲームでは、情動条件間で生理的指標の差異は小さく、主観評価との一致が必ずしも得られない傾向が見られた。これらの結果は、ジャンルごとの特性に応じて生体情報と主観評価を併用する分析の重要性を示しており、DDA 設計においても単一の指標に依存することの限界を示唆している。

また、状態遷移図の分析結果を踏まえると、各ジャンルにおける情動の変化パターンに特徴があることが明らかとなった。アクションゲームでは、覚醒、リラックス、心配の間で緊張と弛緩の変動が見られ、退屈や無関心からは不安や覚醒への移行が多かった。ホラーゲームでは、覚醒、不安、フローが中心の導線を形成し、リラックス状態の申告が少なく、緊張状態が比較的長く維持されやすい傾向が示唆された。パズルゲームでは、覚醒とリラックスの導線がはっきりと見られ、フローから不安やリラックスへの遷移が頻繁に起こり、フローが情動変化の中継点として機能している様子が確認された。これらの結果から、アクションやパズルでは緊張と弛緩が交互に生じやすく、ホラーでは緊張状態が持続しやすいことが分かる。また、全ジャンルにおいてフローは覚醒との関連が強いことが確認され、特定の情動を調べたい場合にはジャンル選択が有効であることが示された。

以上のことから、本研究の成果は以下の通りである：

- すべてのジャンルでプレイヤーはフロー体験を得ており、フロー理論に基づく DDA はジャンルを問わず適用可能である。
- 技能水準と主観的体験との関連はジャンルによって異なり、アクションでは技能依存的な体験構造が強い一方、パズルでは自己認識との乖離が見られた。
- 各ジャンルには異なる情動遷移パターンが存在し、アクションやパズルでは緊張と弛緩が交互に現れ、ホラーでは緊張状態が維持されやす

いことが確認された。

- 情動状態を単独の生体指標から一義的に推定することは難しく、主観評価と組み合わせることにより精度の高い分析が可能である。
- ゲームデザインの特徴やジャンル特性がプレイヤー体験や生理的反応に影響することを明らかにした。

これらの知見は、今後のゲームジャンルごとの DDA 設計やプレイヤー体験評価の改善に向けた指針となるものである。

7.2 今後の課題と展望

今後の課題としては、まず参加者の個人差が大きく生体指標のばらつきが見られたことから、より大規模な実験協力者のデータを用いた検証や、個別に対応した設計指針が必要である。また、本研究では既存ゲームを対象とした分析に留まったため、ゲームデザイン要素(目標の明確さ、クリアまでの時間、グラフィック、言語対応など)が情動体験に与える影響について、より詳細な検証が求められる。さらに、本研究で確認されたフロー的体験と覚醒の関連性や、ジャンルごとの情動遷移パターンの違いは、今後の DDA 設計に応用可能である。例えば、覚醒度を皮膚電位で把握し、高覚醒が続く場合は演出や負荷を抑える調整が考えられる。この調整方法は、高覚醒状態を検知、維持しやすいアクションおよびホラーにおいて有効であると考えられる。また、心拍変動を用いることで、プレイヤーの制御感や負荷を推定し、操作補助や難易度調整に反映する方法も考えられる。これは、HRV 指標の影響を反映するアクションにおいて有効であると考えられる。さらに、状態遷移を利用することで、緊張が長く続く状況や覚醒からの離脱を検出し、ゲーム進行を調整する方法が考えられる。ホラーでの緊張の波の激しさと、パズルにおけるリラクセスが長く、覚醒状態を検知しやすい特徴から、状態遷移を利用した調整は、ホラー及びパズルにおいて有効であると考えられる。しかし、ゲームプレイにおいては、スリリングな状況下を楽しむ等、個人によって求める楽しみ方が異なることも留意する必要があり、システムに幅を持たせる必要がある。また、生体指標だけでは情動判別に限界があることが示されたことから、主観評価やプレイヤー行動の情報など、複数の情報源を統合した DDA の実現が期待される。

将来的には、本研究で明らかになったジャンル特性や情動遷移の知見を踏まえ、個々のプレイヤーに最適化されたゲーム体験を提供する DDA システムの構築が可能となり、特に教育目的のゲームや健康支援ゲームなどのシリアスゲーム分野において幅広

い応用が見込まれる。

謝辞

本実験を快く引き受けてくださった実験協力者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] Gabriel K. Sepulveda, Felipe Besoain, and Nicolas A. Barriga, 2019, Exploring Dynamic Difficulty Adjustment in Videogames, IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON).
- [2] Csikszentmihalyi, M, 2010, フロー体験入門, 世界思想社.
- [3] Jeanne Nakamura and Mihaly Csikszentmihalyi, 2002, The concept of flow. In C. R. Snyder & S. J. Lopez (Eds.), Handbook of positive psychology (pp. 89–105). Oxford University Press.
- [4] Sami Abuhamdeh, 2020, Investigating the “Flow” Experience: Key Conceptual and Operational Issues, Frontiers in Psychology, 11, 158.
- [5] Jenova Chen, 2007, Flow in games (and everything else), Communications of the ACM, 50(4).
- [6] Penelope Sweetser and Peta Wyeth, 2005, GameFlow: A Model for Evaluating Player Enjoyment in Games, ACM Computers in Entertainment, 3(3), July 2005. Article 3A.
- [7] Ali Darzi, Sean M McCrea and Domen Novak, 2021, User Experience With Dynamic Difficulty Adjustment Methods for an Affective Exergame: Comparative Laboratory-Based Study, JMIR Serious Games, 9(3), e26136.
- [8] Nicholas Fisher and Arun K. Kulshreshtha, 2024, Exploring Dynamic Difficulty Adjustment Methods for Video Games, Virtual Worlds, 3(2), pp.230-255.
- [9] 須甲惇, 大久保雅史, 山口泰弘, 山下翼, 2012, 「フロー理論に基づくゲームシステムデザインの提案」, 情報処理学会第 74 回全国大会, 6ZA-7.
- [10] Miguel González-Duque, Rasmus Berg Palm, Sebastian Risi, 2021, Fast Game Content Adaptation Through Bayesian-based Player Modelling, Proceedings of the 2021 IEEE Conference on Games (CoG).
- [11] Masoud Rahim, Hadi Moradi, Abdol-hossein Vahabie, Hamed Kebriaci, 2023, Continuous Reinforcement Learning-based Dynamic Difficulty Adjustment in a Visual Working Memory Game, arXiv:2308.12726.
- [12] 築瀬洋平, 鳴海拓志, 2016, “誰でも神プレイできるジャンプアクションゲーム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.3, pp.415-422.
- [13] Yu Tian, Yulong Bian, Pigu Han, Peng Wang, Fengqiang

- Gao and Yingmin Chen, 2017, Physiological Signal Analysis for Evaluating Flow during Playing of Computer Games of Varying Difficulty, *Frontiers in Psychology*, 8, 1121.
- [14] Atalay Oner and Enver Kucukkulahli, 2025, Evaluating Player Stress and Motivation Through Biofeedback-Controlled Dynamic Difficulty Adjustment, *Electronics*, 14(19), 3870.
- [15] Pawel Jemiolo, Barbara Gizycka, and Grzegorz J. Nalepa, Prototypes of Arcade Games Enabling, 2019, *Affective Interaction ICAISC 2019, Artificial Intelligence and Soft Computing*, pp.553-563.
- [16] Carmen Elisa Orozco-Mora, Rita Q. Fuentes-Aguilar and Gustavo Hernández-Melgarejo, 2024, Dynamic Difficulty Adaptation Based on Stress Detection for a Virtual Reality Video Game: A Pilot Study *Electronics*, 13(12), 2324.
- [17] Min Xuan Lim and Jason Teo, 2024, Predicting game-induced emotions using EEG, data mining and machine learning, *Bulletin of the National Research Centre*, 48, Article 57.
- [18] Tiam-Lee, Thomas James, and Kaoru Sumi. "Analysis and prediction of student emotions while doing programming exercises." *International conference on intelligent tutoring systems*. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [19] Jeanne H. Brockmyer , Christine M. Fox, Kathleen A. Curtiss, Evan McBroom, Kimberly M. Burkhart, Jacquelyn N. Pidruzny, 2009, The development of the Game Engagement Questionnaire: A measure of engagement in video game-playing, *Journal of Experimental Social Psychology* 45 (2009) 624–634.
- [20] Plux Biosignals. (2022). Home Guide 2 — ECG (pp. 11). Retrieved from https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2022/04/HomeGuide2_ECG.pdf
- [21] PLUX Biosignals. (2023, February 14). Where should I place my Electrocardiography (ECG) electrodes? Retrieved from <https://support.pluxbiosignals.com/knowledge-base/where-should-i-place-my-electrocardiography-ecg-electrodes/>
- [22] Mathias Benedek and Christian Kaernbach, 2010, *Journal of Neuroscience Methods*, 190(1), pp80-91.
- [23] Afonso Fortes-Ferreira, Hugo Plácido da Silva, Helena Alves, Nuno Marques and Ana Fred, 2023, Feasibility of Electrodermal Activity and Photoplethysmography Data Acquisition at the Foot Using a Sock Form Factor, *Sensors*, 23(2), 620