



VR コンテンツへの応用を目的とした 音楽聴取時における心拍変動の分析

馬場太一¹⁾, 中沢憲二¹⁾

Taichi BABA and Kenji NAKAZAWA

1) 金沢工業大学 工学研究科 システム設計工学専攻 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1,
c6501851@st.kanazawa-it.ac.jp, k.nakazawa@neptune.kanazawa-it.ac.jp)

概要: VR コンテンツへの応用を目的とし、音楽聴取時における感情と心拍変動との関係を分析した。音楽は「覚醒 - 快」、「覚醒 - 不快」、「沈静 - 快」、「沈静 - 不快」という 4 つのカテゴリを提示し、被験者に選択してもらった。心拍変動の分析は、時間領域および周波数領域指標を用いた。また感情分類ラベルを付与した音楽データベースを使い、実験で用いた音楽の持つ感情や要素を MEL スペクトログラムから推測した。本研究では被験者の感情を、心拍変動やスペクトログラムといった多様な手法を用いて考察し、コンテンツへの応用を検討する。

キーワード: 心拍変動, 音楽, 感情分析

1. はじめに

心拍変動の分析を通じて感情を推定し、それを様々な分野に応用する研究が行われている。例えば、ビデオゲームをプレイしている人の心拍と表情を記録し、その分析結果をゲームの局面と対応付け、心拍変動から感情を推定する試みがある [1]。本研究ではこうした心拍変動に基づく感情推定技術を、リアルタイムでコンテンツに反映させる仕組みの構築を目指す。この仕組みにより、感情の変化に応じてコンテンツの内容を動的に変化させることができれば、ユーザーの心理状態に即した体験を提供でき、より高い没入感を実現できるのではないかと考える。さらに、VR と組み合わせることで感情に応じた環境変化や演出が可能になり、没入感を一層強化できると考える。

このシステムを実現させるためには、まず心拍変動指標の解釈において不明瞭な点を明確にする必要があると考える。感情と指標との関係を探る研究では、しばしば音楽が用いられ、音楽による感情変化と指標との関連を検討した先行研究も存在する [2]。そこで本研究では、音楽聴取時における指標の変化を、自身の環境において分析し、音楽が心拍変動に与える影響を明らかにすることを目的とした。またそこから得られた知見をもとに、音楽と心拍変動指標の VR コンテンツへの利用可能性も探る。

2. 実験環境

実験では心電図データの取得に、市販の心拍センサとスマートフォンアプリケーションを利用した。センサは

Polar Electro 社の「Polar H10」を、アプリケーションは Mati Mononen が開発した「ECGLogger」を採用した。センサは胸部に装着し、Bluetooth 通信を介して心拍データをリアルタイムで ECGLogger に送信する。受信したデータはサンプリングレート約 130 Hz、CSV 形式で保存される。記録したデータはノートパソコンに転送後、Python 仮想環境下で分析を行った。心電図の分析では、主に BioSPPy、memspectrum [3]といったライブラリを用いた。

3. 実験方法

14 名の被験者を対象に、音楽聴取時の心電図を記録する実験を行った。刺激に用いる楽曲は、実験に先立ち事前アンケートを用いて、被験者自身に選定を依頼した。アンケートでは Russell の円環モデルを基に作られ、東海理化の実験で用いられた感情分類法 [4]を参考にし、4 つの感情カテゴリを次のように定義して提示した。「覚醒 - 快」は楽しさや喜びを感じ、気分が上がるような楽曲、「覚醒 - 不快」は怒りや恐怖を感じ、気が張るような楽曲、「沈静 - 快」は癒しや平穏を感じ、心が落ち着くような楽曲、「沈静 - 不快」は悲しさを感じ、気が沈むような楽曲である。これらの定義に基づき被験者には、各カテゴリに合致すると判断する楽曲を 1 曲ずつ、計 4 曲挙げてもらった。なお選定では、分析の関係や被験者への負担を考慮し、楽曲の長さを 2 分以上 6 分未満とする制限を設けたほか、「覚醒 - 不快」カテゴリの参考として YouTube の不快音という動画 [5]を提示した。感情カテゴリ、および

被験者の選定した楽曲を表1, 表2に示す.

実験で被験者は、座った状態でヘッドホンを装着し、事前に選定した4曲の楽曲を聴取した. なお楽曲は、7名には「覚醒 - 快」, 「沈静 - 不快」, 「覚醒 - 不快」, 「沈静 - 快」の順で、残る7名には「覚醒 - 不快」, 「沈静 - 快」, 「覚醒 - 快」, 「沈静 - 不快」の順で聴取してもらった. さらに、各楽曲間には待機時間（無音期間）を設け、先行する刺激の影響を最小化するよう努めた. 実験の詳細な流れを図1に示す.

4. 心拍変動指標による分析

取得した心電図データから R-R 間隔を求め、それを基に次の計 9 つの心拍変動指標を算出した. 時間領域指標として MeanNN, SDNN, RMSSD, SDNN/RMSSD の4つ、周波数領域指標として LF, HF, LF/HF, 正規化単位である LFn_u, HF_u の5つである. 分析では120秒間の分析区間（ウィンドウ）を1秒ずつ移動させながら、各ウィンドウにおける心拍変動指標を逐次算出した. 次に、各期間

※待機時間は無音、曲は2分以上

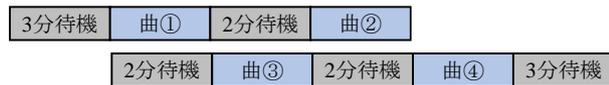


図1: 実験の流れ

表1: 感情カテゴリの定義

カテゴリ	定義
「覚醒 - 快」	楽しさや喜びを感じ、気分が上がるような楽曲
「覚醒 - 不快」	怒りや恐怖を感じ、気が張るような楽曲
「沈静 - 快」	癒しや平穏さを感じ、心が落ち着くような楽曲
「覚醒 - 不快」	悲しさを感じ、気分が沈むような楽曲

表2: 実験で使った曲

カテゴリ	聴取した曲				
「覚醒 - 快」	<ul style="list-style-type: none"> • Bling-Bang-Bang-Born (Creepy Nuts) • HOT LIMIT (T.M.Revolution) • Invidia (FINAL FANTASY XV) • Sincerely (ヴァイオレット・エヴァーガーデン) • パーベキヒーロー (天月、まふまふ 他) • 楽しくなっちゃうた (家庭教師ヒットマンREBORN!) • シュガーソングとビターステップ (UNISON SQUARE GARDEN) 	<ul style="list-style-type: none"> • Runaway Baby (Bruno Mars) • 賢沢と君のカプチーノ (sshikisai) • 前前世 (RADWIMPS) • 拝啓ドッベルゲンガー (kemu) • マツケンサンバII (松平健) • 夢 (ヒカキン & セイキン) • ワンダー (tayori) 			
	「覚醒 - 不快」	<ul style="list-style-type: none"> • GASSHOW (illion) • Monstrosity (バイオハザード ヴィレッジ) • Guardian Chase (The Evil Within 2) • ウァィエカ (バーバパバ) • 旧支配者のキャロル アレンジ ver (しとお) 	<ul style="list-style-type: none"> • 爆弾魔 (ヨルシカ) • 不快音 (youtubeの動画) • 魔王 (シュールベルト) 		
		「沈静 - 快」	<ul style="list-style-type: none"> • Forest Interlude (スーパードンキーコング2) • Main Theme from FINAL FANTASY • 115万キロのフィルム (Official髭男dism) • おおぞらをとぶ (ドラゴンクエストIII) • 無邪気さへの上書き (幽閉サテライト) • ロンリーユニバース (Aqu3ra) • 不可思議のカルテ (青春ブタ野郎はバニーガール先輩の夢を見ない) 	<ul style="list-style-type: none"> • One Love (嵐) • P (スピッツ) • ただ声一つ (ロクデナシ) • 自然音 (youtubeの動画) • 中空の庭 (天音かなた) • 帝国少女 (R Sound Design) • 僕と君のララバイ (みゆな) 	
			「沈静 - 不快」	<ul style="list-style-type: none"> • Penumbra (JUDGE EYES & LOST JUDGMENT) • アイネクライネ (米津玄師) • 今はいんだよ。 (MIMI) • 神隠しの真相 (しゃろう) • 君が思い出になる前に (スピッツ) • ノンフィクション (平井堅) • ピアノソナタ第2番 第3楽章 (ショパン) 	<ul style="list-style-type: none"> • 少女A (椎名もた) • だきしめるまで。 (MIMI) • 孤独の迷路 (SINoALICE) • フリージア (Uru) • 蛍の光 • 左右首 (ヨルシカ) • (作曲: x0o0x_)

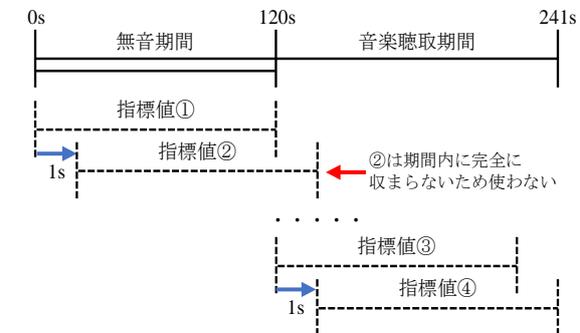
(無音, 音楽聴取)について、その期間内に完全に収まる全てのウィンドウから得られた指標値を平均し、これを各期間の代表値とした. 例えば期間長が 121 秒の場合、その期間内に完全に収まるのは開始 0 秒から 120 秒までと、開始1秒から 121 秒までの2つのウィンドウであるため、この2つのウィンドウから得られた指標値の平均値が、その期間の代表値となる. 具体的な代表値の算出方法を図2に示す. 続いて、各期間への移行による影響を評価するため、期間ごとの変化量を算出した. この変化量は、各期間の代表値から、その直前の期間の代表値を差し引いた差分として定義した. 以降、変化量を表す場合は指標名の前に Δ (デルタ)を付記する. 得られた14名分の変化量データは感情カテゴリごとに箱ひげ図で可視化し、分布の比較を行った.

5. 心拍変動指標による分析の結果と考察

5.1 音楽聴取期間とその直前の無音期間の比較

無音期間から音楽聴取期間への変化量について分析を行った結果、「覚醒 - 快」および「沈静 - 不快」カテゴリにおいて傾向が見られた. 「覚醒 - 快」カテゴリの楽曲聴取時には、 Δ MeanNN, Δ SDNN, Δ RMSSD, Δ HF は負の値を示す傾向にあった. MeanNN は値が低いほど心拍数が高いことを表すため、心拍数は増加傾向にあると考えられる. またSDNNは、わくわく感によって減少するという先行研究 [6]の知見と一致する. さらにRMSSD, HFは副交感神経活動の指標として広く支持されていることに基づくと、今回の傾向は副交感神経活動の抑制を示唆していると考えられる. これらの結果より、「覚醒 - 快」の楽曲を聴いた際には感情が高揚し、それに伴い心拍数は増加し、副交感神経活動は抑制されたと解釈できる.

「沈静 - 不快」カテゴリの楽曲聴取時には、 Δ MeanNN, Δ RMSSD は正の値を示す傾向にあった. これは先述の知見に基づくと、心拍数の減少と副交感神経活動の促進を示唆していると考えられる. さらに、 Δ SDNN/RMSSD は負の値を示す傾向にあった. この指標は交感神経活動の指標として支持されていることから、交感神経活動が



- 無音期間の代表値 = ①
- 音楽聴取期間の代表値 = (③ + ④) ÷ 2

図2: 代表値算出例

抑制されたと考えられる。これは副交感神経活動が促進したという先の解釈を支持する結果とも考えられる。これらの結果より、「沈静 - 不快」の楽曲を聴いた際には気分が沈み、それに伴い心拍数は減少し、副交感神経活動は促進したと解釈できる。

また ΔLF に関しては、「覚醒 - 快」、「沈静 - 不快」のいずれの楽曲聴取時においても、負の値を示す傾向が見られた。この結果は、 LF は交感神経と副交感神経の双方から影響を受けるという、従来広く支持される知見を支持するものであると考える。

ここまでの無音期間から音楽聴取期間への変化に関する考察で利用したデータのうち、特に顕著な傾向が見られた MeanNN の変化量データを図 3 に示す。

5.2 無音期間とその直前の音楽聴取期間の比較

音楽聴取期間から無音期間への変化量について分析を行った結果、「沈静 - 快」、「沈静 - 不快」カテゴリでは同様の傾向が確認された。具体的には、いずれのカテゴリにおいても楽曲聴取後に $\Delta SDNN$, $\Delta RMSSD$, ΔHF が正の値を示す傾向となった。先述の知見に基づくこの結果は、「沈静」の要素を含む楽曲を聴いた後には感情が落ち着き、副交感神経活動は促進すると解釈できる。

また ΔLF に関しては、「覚醒 - 快」、「沈静 - 不快」のいずれの楽曲聴取後においても、正の値を示す傾向が見られた。この結果は音楽聴取中に関する先の分析結果と同様の結論を導くものであり、 LF が交感神経と副交感神経の双方から影響を受ける指標であるとする見解を一層強く支持するものであると考える。

5.3 心拍変動指標による分析のまとめ

ここまでの結果を統合すると、楽曲カテゴリによって心拍変動指標への影響の現れ方が異なることが示唆された。まず「覚醒 - 快」カテゴリは、楽曲聴取中に傾向が見られたことから、その効果は即時的であると考えられる。次に「沈静 - 不快」カテゴリは、楽曲聴取中と聴取後の双方で影響が見られたことから、効果に持続性があるのではないかと考える。最後に「沈静 - 快」カテゴリは楽曲聴取後に傾向が見られたことから、効果の発現に遅延が生じる可能性があると考えられる。

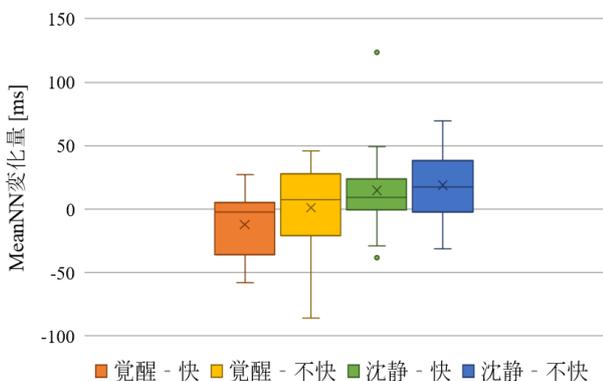


図 3: MeanNN 変化量分布 (無音→音楽聴取)

6. MEL スペクトログラムと機械学習による分析

刺激として用いた音楽に対し、MEL スペクトログラムと機械学習を用いた分析を行い、その音楽が持つ感情や要素を客観的に推定した。そのうえで、この推定結果を新たな分析軸として加え、先の分析結果と組み合わせることでより多角的な考察を行った。

6.1 データセットについて

分析には、楽曲の感情分析に関するデータセットである DEAM [7] を用いた。DEAM には多様な評価方法によるラベルデータが含まれるが、本研究では、楽曲を聴きながら覚醒度を連続的に評価したデータを使用した。なお、このデータは複数名の評価結果を平均したものであり、評価値は 500ms 間隔にリサンプリングされている。次に、これらのデータに対して、17 秒の分析区間(ウィンドウ)を設け、1 秒ずつ移動させながら各ウィンドウにおける覚醒度の平均値を算出した。算出したデータの分布を図 4 に示す。なお、覚醒度の値は正規化されており、-1 から 1 の範囲の値をとる。その後、算出した覚醒度の平均値を高い順に並べ、上位 300 個のデータを覚醒クラス、下位 300 個のデータを沈静クラスと定義し、これらのデータを機械学習に使用した。

6.2 機械学習について

計 600 個の音源データを MEL スペクトログラムに変換し、画像データを作成した。MEL スペクトログラムは、横軸に時間、縦軸に周波数を取り、色の濃淡により各周波数帯域の音の強さを示す図である。その後、600 枚の画像データを用いて、機械学習を行った。なお学習には、ImageNet で事前学習された VGG16 モデルを使い、ファインチューニングを実施した。

6.3 使用楽曲の推論について

まず実験に使用した楽曲を、17 秒の分析区間(ウィンドウ)に基づいて、ウィンドウを 1 秒ずつ移動させながら分割した。分割した音源は MEL スペクトログラムに変換し、その画像データを推論に用いた。推論では覚醒度を求めており、出力される数値が 1 に近いほど覚醒、0 に近いほど沈静を表す。また、楽曲ごとに覚醒度の平均を求め、これを新たな分析軸として加えた。例えば 26 秒の曲

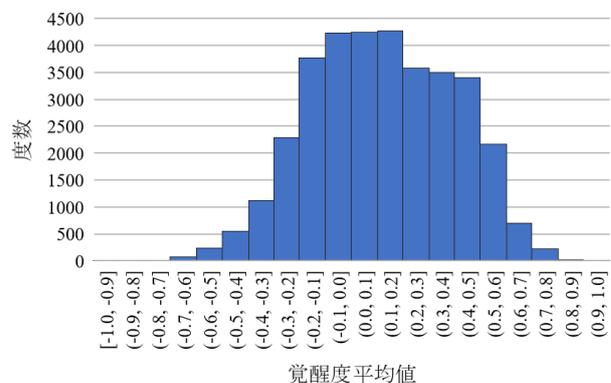


図 4: 各ウィンドウにおける覚醒度平均値の分布

であれば、画像データが10枚生成される。これら10枚それぞれについて覚醒度を推論し、その平均値を算出する。こうして得られた平均値が、その楽曲の覚醒度となる。

7. MEL スペクトログラムと機械学習による分析の結果と考察

分析によって求めた各楽曲の覚醒度に基づき、心拍変動指標による分析結果を再検討した。具体的には、「覚醒 - 快」、「覚醒 - 不快」カテゴリの楽曲において覚醒度が0.5以下の場合、「沈静 - 快」、「沈静 - 不快」カテゴリの楽曲において覚醒度が0.5以上の場合には、その楽曲を聴いていた被験者の心拍変動指標のデータを除外することとした。その結果、「覚醒 - 快」は14データで変わらず、「覚醒 - 不快」は9データ、「沈静 - 快」は8データ、「沈静 - 不快」は11データに減少した。次に、これらのデータを箱ひげ図で可視化し、分布の比較を行った。結果、主に「覚醒 - 不快」、「沈静 - 快」の音楽聴取期間から無音期間への変化量において、新たな傾向が確認された。

「覚醒 - 不快」においては、 ΔMeanNN 、 ΔHF が負の値を示す傾向にあった。これは心拍数の増加と副交感神経活動の抑制を示唆していると考えられる。さらに、 $\Delta\text{SDNN/RMSSD}$ は正の値を示す傾向にあり、交感神経活動は促進したことが考えられる。これは副交感神経活動が抑制されたという先の解釈を支持する結果とも考えられる。しかし、これらの結果は多様な解釈が可能でもある。例えば、楽曲を聴いたことでストレスが残っていたとも、逆にストレスから解放され気分が高揚した結果とも考えることができる。そのため、本カテゴリに見られる傾向は、信頼性が低い可能性がある。なお効果の発現については、音楽聴取後に傾向が見られたため、遅延が生じる可能性があると考えられる。

「沈静 - 快」の楽曲においては、新たに ΔMeanNN も正の値を示す傾向にあることが明らかになった。これは先述の考察を組み合わせると、「沈静 - 快」の楽曲を聴いた後には感情が落ち着き、それに伴い心拍数は減少し、副交感神経活動は促進すると解釈できる。

また、 ΔLF については「沈静 - 快」で正の値を示す傾向が見られた一方で、先に傾向が確認されていた「沈静 - 不快」では、その傾向は見られなかった。これらの結果から、 LF は交感神経と副交感神経の双方から影響を受ける指標であると解釈できると同時に、不安定な側面を持つ指標であるとも考えることができる。

8. まとめ

音楽聴取と心拍変動指標の関係性について分析を行った。音楽は4つの感情カテゴリに分類し、傾向や違いを観察した。まず、心拍変動指標に基づく分析では、複数のカテゴリおよび指標において一定の傾向が確認された。さらに、MEL スペクトログラムと機械学習を用いてより多角的な考察を行った結果、新たな傾向も確認された。

具体的には、「覚醒 - 快」、「覚醒 - 不快」カテゴリでは心拍数の増加と副交感神経活動の抑制が示唆された。また、「沈静」の要素を持つ楽曲においては、副交感神経活動の促進が示唆され、「沈静 - 快」カテゴリにおいては心拍数の減少が生じる可能性も示された。

さらにこれらの効果は、楽曲カテゴリによって心拍変動指標への影響の現れ方が異なることも示唆された。「覚醒 - 快」カテゴリは楽曲聴取時に傾向が確認でき、即時的な効果があると考えられる。また、「沈静 - 不快」カテゴリは楽曲聴取中と聴取後の双方で影響が見られたことから、効果に持続性があるのではないかと考える。さらに、「覚醒 - 不快」および「沈静 - 快」カテゴリでは楽曲聴取後に傾向が確認できたことから、効果の発現に遅延が生じる可能性があると考えられる。

これらの知見をVRコンテンツに応用することを考えると、即時的な効果が確認された「覚醒 - 快」や、効果に遅延はあるものの感情を落ち着かせることができる「沈静 - 快」カテゴリの楽曲は、活用しやすいと考える。これらの楽曲を用いることで、音楽聴取による感情の変化を生体情報から読み取り、それに基づいてVR内の環境をリアルタイムに変化させるといった、ユーザーの感情に寄り添う新たなコンテンツの創出が可能になると考える。

参考文献

- [1] 上田博唯 他, “ゲーム実行中のプレイヤーの心拍情報と顔画像の記録と分析 — QOL(Quality of Life)の客観的な計測に向けて —”, 電子情報通信学会, vol.122, MVE-74, 2022, pp. 1-6.
- [2] Satoshi Kume 他, “Music Improves Subjective Feelings Leading to Cardiac Autonomic Nervous Modulation A Pilot Study”, *Frontiers in Neuroscience*, Volume 11, 2017, pp. 1-11, <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00108>.
- [3] memspectrum, “Welcome to memspectrum’s documentation!”, <https://maximum-entropy-spectrum.readthedocs.io/en/latest/>, 2025年7月7日アクセス.
- [4] 田沼和泰 他, “脳血流と心拍による運転者の「わくわく感」と「不快緊張感」の検出可能性 — ドライビングシミュレータを用いた実験的検討 —”, *日本感性工学会論文誌*, Vol.21, No.2, 2022, pp. 247-256.
- [5] 音ちゃんの collection, “3分耐久！不快音”, <https://www.youtube.com/watch?v=KzqpKIUUZBM>, 2025年7月7日アクセス.
- [6] 伊藤弘大 他, “生理指標を用いた車載機器の情報提示による「わくわく感」の評価 — 車外風景に関する事前情報付与の影響のHRV解析 —”, *日本感性工学会論文誌*, Vol.16, No.3, 2017, pp. 321-331.
- [7] DEAM dataset, “The MediaEval Database for Emotional Analysis of Music”, <https://cvml.unige.ch/databases/DEAM/>, 2025年7月7日アクセス.