

予測誤差による音楽的快感の誘発メカニズム - 脳波解析による検討 - Mechanism of inducing musical pleasure by prediction error - Investigation by EEG analysis -

上野 芙優[†], 嶋田 総太郎[‡]
Fuyu Ueno, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学理工学部
[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University,
[‡] School of Science and Technology, Meiji University
fueno@meiji.ac.jp

概要

本研究では、脳波の時間周波数解析を用いて、音楽的快感と驚き（予測誤差）の関係性を調査した。その結果、前頭部における β 波帯域および γ 波帯域のパワー値の増加と θ 波帯域のパワーの値の減少が、主観的快感と、統計的学習モデルを用いて算出した音楽的驚きの情報量と関連していることが示唆された。したがって θ , β , γ 波帯域の活動が予測誤差により誘発された音楽的快感の脳メカニズムに深く関与していることが示唆された。

キーワード：音楽認知, 脳活動計測, 情動

1. 目的

音楽はなぜ人々を魅了するのか。音楽に誘発される脳活動を調べた研究は数多くあるが (Koelsch, 2020 参照), 音楽の情動や快感に関連する脳領域については統一的な見解に至っていない。一方で、音楽的快感は予測メカニズムによって駆動されている可能性が示唆されている (Koelsch et al., 2019)。Salimpoor ら (2011) は、鳥肌が立つほどの音楽的快感を予期した時やピークの時には脳の報酬系が活動することを報告した。このことは、私たちがこれまでの様々な音楽ジャンルの聴取経験や習慣から学習された内部予測モデルを持っており、リアルタイムで聴いている音楽から手がかりを集め、聴取者自身の内部予測モデルから次の音響的特徴がどのように変化するかを予測していることを示唆している (Leahy et al., 2021)。この予測には不確実性が内在しており、実際に予測からある程度外れたときの驚き（予測誤差）によって、脳の報酬系が活動し快感を引き起こすと考えられる (Cheung et al., 2019)。

本研究では、音楽における報酬処理のメカニズムを解明するために、音楽聴取時の脳波を計測し、主観的快感と驚き（予測誤差）との関係性に着目した。快感と驚きの関係性について音楽情報の観点から分析するとともに、音楽的快感を反映する脳活動を特定することに

よって、音楽における報酬処理のメカニズムを解明できると推測した。

2. 方法

2.1. 被験者

聴覚が正常な 32 名が実験に参加した。音楽報酬感度質問票 (BMRQ: Barcelona Musical Reward Questionnaire; Mas-Herrero et al., 2013) のスコアが 65 点以下の 8 名は、音楽の感受性が低く、音楽的快感が誘発されにくいいため (Chabin et al., 2020) 除外した。また、脳波解析で脳波データ取得時の、機器の不調による技術的な問題で 2 名、過度のノイズで 4 名を除外した。さらに、実験中に眠っていた 1 名、歌詞が理解できた曲があった 2 名も除外した。最終的に、被験者 15 名 (女性 4 名, 23.3 ± 3.41 歳, 平均土標準偏差) に対して分析を行った。

2.2. 音楽的驚き（情報量）の分析

「音楽的驚き」の客観的な尺度を得るために、連続的な驚きを情報量 (IC: Information content) として定量化する期待の可変階マルコフモデルである Information Dynamics Of Music (IDyOM; Pearce, 2018) を用いて IC を算出した。この音楽的驚きは、曲の持つ音楽的特徴から客観的に算出されるものであり、聴取者が主観的に感じる「主観的驚き」とは異なる。IC は、直前までの聴覚シーケンスから動的な期待を生成する短期モデルと、大規模な訓練データから得られる模範的な期待を生成する長期モデルの 2 つから、現在の音イベントの条件付き確率を求めることで算出される。本研究では、Real World Computing (RWC) 研究用音楽データベース (ポピュラー音楽, ジャンル別音楽) の楽曲を用いた。このデータベースの楽曲はほとんどがオリジナルで制作され一般に流通していないため、全被験者がはじめて聴く曲となることが本研究で採用した理由である。

そして、訓練データとしてポピュラー音楽 100 曲を用いて、ジャンル別音楽 70 曲のメロディーとハーモニーの IC をそれぞれの midi データから算出した。多くの人がポピュラー音楽をよく聴いていて、被験者の音楽的履歴を反映していると考えられるため、訓練データとして選んだ。最終的に、IC の値の範囲が広い 8 曲を選出した (表 1)。

表 1 楽曲リスト (音楽刺激の詳細)

クリップ	タイトル	ジャンル	カテゴリー	曲長	RWC楽曲番号
1	In Your Arms	Pops	Pops	3:49	RWC-MDB-2001 No.3
2	Hold On	Pops	Ballad	5:15	RWC-MDB-2001 No.4
3	Waiting for Your Love	Rock	Rock	3:30	RWC-MDB-2001 No.9
4	Suddenly	Dance	Soul/R&B	3:34	RWC-MDB-2001 No.27
5	Wind Up	Jazz	Bigband	3:24	RWC-MDB-2001 No.28
6	Dance to the Samba	Latin	Samba	4:11	RWC-MDB-2001 No.41
7	Kittenish Tango	Latin	Tango	3:10	RWC-MDB-2001 No.47
8	Dear John's Letter	World	Blues	3:57	RWC-MDB-2001 No.66

2.3. 手順

被験者が 8 曲 (人の演奏が収録された CD 音源) を聴取している時の脳波測定を行った。測定後、被験者には音楽聴取時に喚起された快感の程度を、1~4 (1=中立, 2=低い快感, 3=高い快感, 4=鳥肌が立つ) で時系列的に報告 (Martínez-Molina et al., 2019) させた。次に音楽聴取中、驚いた瞬間にボタンを押して主観的驚きを時系列的に報告させた。最後に音楽報酬感度質問票 (BMRQ) に回答させた。ただし主観的驚きは、曲中で 1 回も驚きが報告されなかった楽曲と被験者の組み合わせが多くあったため、その後の分析は行わなかった。

2.4. 測定方法

脳波計 (g.USBamp, g.tec, Austria) を用いて、音楽聴取時の脳波測定を行った。測定の電極にはアクティブ電極を使用した。計測箇所は国際 10-20 法の 30 か所

(Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FT7, FC3, FCz, FC4, FT8, T7, C3, Cz, C4, T8, TP7, CP3, CPz, CP4, TP8, P7, P3, Pz, P4, P8, POz, O1, O2) とし、AFz を接地電極、左耳朶を参照電極とした。また、眼球運動を計測するため左眼窩上下に電極を配し眼電図を計測した。サンプリング周波数 512Hz で記録した。

2.5. 分析方法

脳波解析には MATLAB (The MathWorks, Massachusetts, USA) および MATLAB 上で動作する脳波解析ソフト (EEGLAB14.1.1b, Swartz Center for Computational Neuroscience, San Diego, USA) を用いて、データの周波数帯域を 1-60Hz に限定するようにバンドパスフィルタをかけた、50Hz の電源ノイズの低減を行った。その後、独立成分分析を用いて瞬目に由来するアーティファクトを除去した。

上記の前処理を行なった脳波データに対して時間周波数解析を用いて 5 つの周波数帯域 (δ :1-3Hz, θ :4-7Hz, α :8-13Hz, β :14-30Hz, γ :31-45Hz) の時系列パワー値を算出し、主観的快感と驚き (IC (melody/harmony)) の時系列データとのフィッティングの程度を General Linear Model (GLM) を用いて計算し t 値を算出した。

主観的快感と驚き (IC (melody/harmony)) については、曲ごとに、t 値を z スコアに変換し 0 との t 検定を行った。これにより、全曲のデータを元にして快感と驚きに有意な関連性を示す、各周波数帯の各電極のパワー値が特定できる。その中で、本研究では、金銭的報酬との関与が示唆されている前頭部領域の脳波の θ , β , γ 波帯域のパワー値に着目した。

3. 結果

3.1. 主観的快感に関連するパワー値 (図 1A)

θ 波帯域の時系列パワー値と主観的快感の時系列データの GLM 解析を行った結果、Fp1, Fp2 において、有意な負の相関が示された (Fp1: $t(225) = -2.35, p < 0.05$, Fp2: $t(225) = -2.47, p < 0.05$)。 β 波帯域では、Fp1, F3, FC3, FCz において有意な正の相関が示された (Fp1: $t(225) = 2.49, p < 0.05$, F3: $t(225) = 2.94, p < 0.01$, FC3: $t(225) = 2.0, p < 0.05$, FCz: $t(225) = 2.15, p < 0.05$)。 γ 波帯域では、Fp1, F3 において有意な正の相関が示された (Fp1: $t(225) = 2.2, p < 0.05$, F3: $t(225) = 2.0, p < 0.05$)。

3.2. IC (melody) に関連するパワー値 (図 1B)

θ 波帯域の時系列パワー値と IC (melody) の時系列データの GLM 解析を行った結果、Fp1, Fp2 において有意な負の相関が示された (Fp1: $t(238) = -2.32, p < 0.05$, Fp2: $t(238) = -2.52, p < 0.05$)。 β 波帯域では、Fp2, F4, FC4 において有意な正の相関が示された (Fp2: $t(238) = 3.51, p < 0.01$, F4: $t(238) = 3.39, p < 0.01$, FC4: $t(238) = 2.1, p < 0.05$)。 γ 波帯域では、Fp1, Fp2, Fz, F4, FC4 において有意な正の相関が示された (Fp1: $t(238) = 2.79, p < 0.01$, Fp2:

$t(238) = 3.49, p < 0.01$, Fz: $t(238) = 2.47, p < 0.05$, F4: $t(238) = 4.06, p < 0.01$, FC4: $t(238) = 2.1, p < 0.05$)

3.3. IC (harmony) に関連するパワー値 (図 1C)

θ 波帯域の時系列パワー値と IC (harmony) の時系列データの GLM 解析を行った結果、有意な相関は見られなかった。 β 波帯域では、Fp2, F4 において有意な正の相関が見られた (Fp2: $t(238) = 2.94, p < 0.01$, F4: $t(238) = 2.44, p < 0.05$)。 γ 波帯域では、Fp1, Fp2 において有意な正の相関がみられた (Fp1: $t(238) = 3.28, p < 0.01$, Fp2: $t(238) = 2.68, p < 0.01$)。

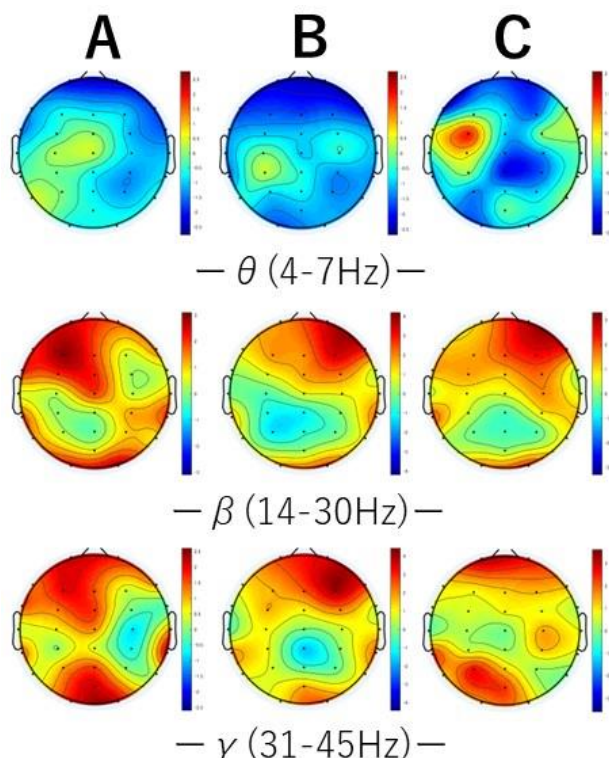


図 1 主観的快感 (A), IC (melody) (B), IC (harmony) (C) に関する各周波数帯域のパワー値のトポグラフ

4. 考察

本研究では、音楽における報酬処理のメカニズムを解明するために、音楽聴取時の脳波を計測し、主観的快感と驚き (予測誤差) との関係性に着目した。その結果、主観的快感と IC の両方が、前頭部における β 波帯域のパワーの増強、 θ 波帯域のパワーの抑制、 γ 波帯域のパワーの増強と関連していることが示された (図 1)。

前頭部の β 波帯域のパワーの増強については、ギャンプル課題や対戦型ゲームに対するポジティブなフィードバックに関連することが示されている (Marco-Pallares et al., 2008, 2015; Mas-Herrero et al., 2015; Inomata et al., 2019)。この時、腹側線条体、両側海馬、前頭前野、

前帯状皮などの報酬系の脳領域が活動することから、前頭部の β 波帯域の活動は報酬系の活動が反映されている可能性が示唆されている。

β - γ 波帯域の活動が予期せず報酬を獲得した後に増加することが示されている (HajiHosseini et al., 2012; Wang et al., 2019)。 β - γ 波帯域の活動は腹内側前頭前野で発生することが示されている (Marco-Pallares et al., 2015)。 γ 波帯域の活動は注意 (Herrmann and Knight, 2001) および新奇性検出 (Lapray et al., 2009) と関連している。これらの知見から、前頭部の β - γ 波帯域の活動の増加は、予期しない刺激に対する注意を高め、報酬系の活動を引き起こし、そのような刺激に対する感情的な反応を増加させる (Marco-Pallares et al., 2015) 報酬処理プロセスに関連している可能性がある。

本研究では主観的快感と IC の両方が、前頭部における θ 波帯域のパワーの抑制と関連していることを示した。ギャンプル課題において、報酬が得られた時に、報酬を失ったときと比べて、前頭部の θ 波帯域の活動が減少することが示されている (Gruber et al., 2013; Bernat et al., 2015)。また、報酬の予期及び消費の脳メカニズムを調査した研究では、報酬が予期された時は損失が予期された時よりも θ 波帯域の活動が増加し、報酬の獲得時は報酬の損失時よりも θ 波帯域の活動が減少したことを報告している (Ali Diez et al., 2024)。これらの知見から、本研究の θ 波帯域のパワーの抑制は報酬の獲得によって生じたと考えられる。さらに Salimpoor ら (2015) は、馴染みのある音楽では、予期された音イベントを聴きたいと期待した場合にドーパミンが放出され、馴染みのない音楽では、ポジティブな予測誤差 (予想以上の結果が得られた) 場合にドーパミンが放出される可能性があるとして示唆している。この知見と、本研究では被験者が聴いたことのない楽曲を刺激として使用したことから、 θ 波帯域のパワーの抑制はポジティブな予測誤差による報酬の消費時のメカニズムと関連していることが考えられる。

したがって、本研究の結果は、予想よりも良いポジティブな予測誤差から誘発された、音楽的快感の脳メカニズムを反映していることが示唆される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23KJ2001 の助成を受けた。

文献

- Ali Diez, I., Fabrega-Camps, G., Parra-Tijero, J., and Marco-Pallares, J. (2024). Anticipatory and consummatory neural correlates of monetary and music rewarding stimuli. *Brain Cogn* 179, 106186. doi: 10.1016/j.bandc.2024.106186.
- Bernat, E.M., Nelson, L.D., and Baskin-Sommers, A.R. (2015). Time-frequency theta and delta measures index separable components of feedback processing in a gambling task. *Psychophysiology* 52(5), 626-637. doi: 10.1111/psyp.12390.
- Chabin, T., Gabriel, D., Chansophonkul, T., Michelant, L., Joucla, C., Haffen, E., et al. (2020). Cortical Patterns of Pleasurable Musical Chills Revealed by High-Density EEG. *Front Neurosci* 14, 565815. doi: 10.3389/fnins.2020.565815.
- Cheung, V.K.M., Harrison, P.M.C., Meyer, L., Pearce, M.T., Haynes, J.D., and Koelsch, S. (2019). Uncertainty and Surprise Jointly Predict Musical Pleasure and Amygdala, Hippocampus, and Auditory Cortex Activity. *Curr Biol* 29(23), 4084-4092.e4084. doi: 10.1016/j.cub.2019.09.067.
- Gruber, M.J., Watrous, A.J., Ekstrom, A.D., Ranganath, C., and Otten, L.J. (2013). Expected reward modulates encoding-related theta activity before an event. *Neuroimage* 64(6), 68-74. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.07.064.
- HajiHosseini, A., Rodríguez-Fornells, A., and Marco-Pallarés, J. (2012). The role of beta-gamma oscillations in unexpected rewards processing. *Neuroimage* 60(3), 1678-1685. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.125.
- Herrmann, C.S., and Knight, R.T. (2001). Mechanisms of human attention: event-related potentials and oscillations. *Neurosci Biobehav Rev* 25(6), 465-476. doi: 10.1016/s0149-7634(01)00027-6.
- Inomata, T., Zama, T., and Shimada, S. (2019). Functional Connectivity Between Motor and Mid-Frontal Areas During Vicarious Reward Revealed via EEG Time-Frequency Analysis. *Front Hum Neurosci* 13, 428. doi: 10.3389/fnhum.2019.00428.
- Koelsch, S. (2020). A coordinate-based meta-analysis of music-evoked emotions. *Neuroimage* 223, 117350. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.117350
- Koelsch, S., Vuust, P., and Friston, K. (2019). Predictive Processes and the Peculiar Case of Music. *Trends Cogn Sci* 23(1), 63-77. doi: 10.1016/j.tics.2018.10.006.
- Lapray, D., Bergeler, J., and Luhmann, H.J. (2009). Stimulus-induced gamma activity in the electrocorticogram of freely moving rats: the neuronal signature of novelty detection. *Behav Brain Res* 199(2), 350-354. doi: 10.1016/j.bbr.2008.12.028.
- Leahy, J., Kim, S.G., Wan, J., and Overath, T. (2021). An Analytical Framework of Tonal and Rhythmic Hierarchy in Natural Music Using the Multivariate Temporal Response Function. *Front Neurosci* 15, 665767. doi: 10.3389/fnins.2021.665767.
- Marco-Pallares, J., Cucurell, D., Cunillera, T., Garcia, R., Andres-Pueyo, A., Munte, T.F., et al. (2008). Human oscillatory activity associated to reward processing in a gambling task. *Neuropsychologia* 46(1), 241-248. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.016.
- Marco-Pallares, J., Munte, T.F., and Rodriguez-Fornells, A. (2015). The role of high-frequency oscillatory activity in reward processing and learning. *Neurosci Biobehav Rev* 49, 1-7. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.11.014.
- Martínez-Molina, N., Mas-Herrero, E., Rodríguez-Fornells, A., Zatorre, R.J., and Marco-Pallarés, J. (2019). White Matter Microstructure Reflects Individual Differences in Music Reward Sensitivity. *J Neurosci* 39(25), 5018-5027. doi: 10.1523/jneurosci.2020-18.2019.
- Mas-Herrero, E., Marco-Pallares, J., Lorenzo-Seva, U., Zatorre, R.J., and Rodriguez-Fornells, A. (2013). Individual Differences in Music Reward Experiences. *Music Perception* 31(2), 118-138. doi: 10.1525/mp.2013.31.2.118.
- Mas-Herrero, E., Ripolles, P., HajiHosseini, A., Rodriguez-Fornells, A., and Marco-Pallares, J. (2015). Beta oscillations and reward processing: Coupling oscillatory activity and hemodynamic responses. *Neuroimage* 119, 13-19. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.05.095.
- Pearce, M.T. (2018). Statistical learning and probabilistic prediction in music cognition: mechanisms of stylistic enculturation. *Ann N Y Acad Sci* 1423(1), 378-395. doi: 10.1111/nyas.13654.
- Salimpoor, V.N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., and Zatorre, R.J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nat Neurosci* 14(2), 257-262. doi: 10.1038/nn.2726.
- Salimpoor, V.N., Zald, D.H., Zatorre, R.J., Dagher, A., and McIntosh, A.R. (2015). Predictions and the brain: how musical sounds become rewarding. *Trends Cogn Sci* 19(2), 86-91. doi: 10.1016/j.tics.2014.12.001.
- Wang, J., Zhang, J., Li, P., Martens, S., and Luo, Y. (2019). Beta-gamma oscillation reveals learning from unexpected reward in learners versus non-learners. *Neuropsychologia* 131, 266-274. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2019.06.002.