

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18139

研究課題名（和文）情報処理過程のモデル化に基づく調性知覚の神経基盤の解明

研究課題名（英文）Computational modeling of the neural basis of tonality perception

研究代表者

森本 智志（MORIMOTO, Satoshi）

慶應義塾大学・グローバルリサーチインスティテュート（三田）・特任助教

研究者番号：90794230

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：調性は西洋音楽において重要な知覚要素のひとつである。本研究では、和音進行聴取時に後続和音に対して生じる期待感（音楽的期待）に注目し、その分析を通じて調性を知覚する脳内の情報処理メカニズムについて計算論的な検討を行った。オンライン実験を実施し、従来研究では検証されていなかった調性音楽には現れにくい連鎖和音に対する音楽的期待について検証を行ったところ、提案する連鎖ベイズモデルが音楽経験の個人差に関係なく期待のパターンを精度よく予測できた。このことから、調性知覚は音楽のための特別な情報処理ではなく、脳内の時系列情報処理の特性が寄与している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの音楽知覚の研究は、音楽理論に当てはまる音と当てはまらない音の知覚を比較する形で発展してきた。しかし、音楽理論は経験的な体系に過ぎず、知覚理論とは言えないため、音楽知覚の全体像を捉える上で不十分であった。本研究では知覚情報処理を数学的に表す計算モデルを用いることで、音楽理論がカバーしていない和音進行に対するヒトの知覚パターンを分析した。今後この方法論を和音以外の音楽的特徴の分析にも用いることで、音楽理論全体を知覚現象として再検証し、知覚理論に則った新しい音楽理論や音楽の生成などに繋がることと期待される。

研究成果の概要（英文）：Tonality is an important perception in Western music. In this research, to investigate the computational process of tonal perception, we focused on musical expectancy, which is the priming effect of the next chord by the previous chord sequences.

We conducted an online experiment to test the proposed computational model (Sequential Bayes Model) with chord sequences that rarely occur in tonal music. The results showed that our model better fit the participants' responses, regardless of the difference in musical experience.

These results support that the perception of tonality is related to the general characteristics of time-series information processing in our brain.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：音楽的期待 和音進行 計算モデル ベイズモデル オンライン実験 調性

## 1. 研究開始当初の背景

音楽聴取時に後続音に対して主観的整合性を生じる音楽的期待は、我々が日常的に耳にする調性音楽が積極的に利用する重要な知覚現象である。これまで調と音楽的期待の関係について様々な研究がなされてきたが、その神経基盤は経験則上調性から逸脱するとされる音刺激に対する反応から得ていたため、背景にある情報処理に関する議論は困難であった。このことは他のモダリティとの神経基盤の共通性を論じる際にも、論理的基準を明示できない弊害をもたらしていた。そのため、経験則を仮定せず、知覚実験に基づいて音楽的期待の生じる計算過程のモデル化を行い、各情報処理に対応する神経基盤を明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、従来詳細な検討がなされていなかった、音楽理論上に想定されていない和音進行に対して生じる音楽的期待について、(1) 知覚実験の結果とそこから導かれる数学的妥当性に基づいて脳内の計算過程のモデル化を行う。その上で、(2) モデルに基づいて脳活動計測実験データを分析することで各計算過程に対応する神経基盤を明らかにすることを目的とする。また、和音以外の時系列情報処理との関係性を明らかにするため、(3) 動的な状態遷移をモデル化するための方法論を構築する。

## 3. 研究の方法

### (1)

まず、2~3連鎖和音の音楽的期待について網羅的に検証した先行研究[1]の行動実験データを用いて、計算モデルのシミュレーションを行った。計算モデルには調性に該当する隠れ状態を持つ連鎖ベイズモデル(Bayesian updating model)と、隠れ状態をもたないモデル(second-order Markov model)を準備した。その上で4連鎖の和音進行のうち、計算モデルの差を検証可能な候補を選別した。選別した和音進行を用いて、のべ約2000人を対象としたオンライン実験を行った。実験では和音進行に対して、繋がり良さ(以下、期待度と呼称)を9段階で回答させた。このとき、音楽経験の指標としてGoldsmiths Musical Sophistication Index(Gold-MSI)も記録した。各モデルの予測と実験データの関係を分析した。

### (2)

異動による脳波計測環境の再整備と、コロナ禍による実験停止により、本研究期間内に脳計測データを新規取得することができなかった。そのため、オンラインの公開データベースや、共同研究による提供データを用いて分析を試みたが、モデルの検証に必要な「音楽理論に出現しない」和音進行についての検証ができなかったため、最終的に本項については断念した。

### (3)

和音は知覚上、和音間の音程に基づいてシンボル化(離散化)して扱うことができる。他のモダリティの時系列情報処理と比較するためには、多次元の刺激(または行動)データの特徴量を離散状態に変換する必要がある。従来の心理学では、研究者が注目する特徴についてコーディングを行い、ラベルを付与することが一般的であるが、より客観的な方法を用いることが望ましい。そこで、computational neuroethologyと呼ばれる動物行動学で用いられる教師なし学習による行動状態の離散化を、ヒトのデータ分析にも応用することを検討した。多次元の異なるモダリティの特徴量を教師なし学習により離散状態に分節化する方法について、シミュレーション実験により検討した。コロナ禍以降では(2)を断念したため、代わってより発展的な課題として、脳活動の動的な変化との関係を定量化するため、移動時間窓を用いた情報量(相互情報量や移動エントロピーなど)の計算方法(時系列長や正規化方法など)をシミュレーション実験により検討した。

## 4. 研究成果

### (1)

先行研究のデータを用いたシミュレーション実験により、特に長3度(半音4つ上昇)および短6度(半音8つ上昇)の音程の組み合わせの和音進行が、音楽理論上の分類が困難かつモデルの比較検証に適していることが予測された(図1)。

そのため、当該進行を含めた2~4連鎖和音について音楽的期待の大きさを回答するオンライン実験を実施した。その結果、提案する調に対応する隠れ変数をもつBayesian updating modelが、よく回答パターンと近似できる傾向を示した。ただし、音楽理論上分類が困難な連鎖和音に対する平均的な期待度の傾向は、予測とは異なる結果となった(図2)。予測に用いたモデルパラメータは、比較的音楽経験の豊かな大学の学生16名で学習したものであり、より多様な幅広い年代でデータを取得したため、平均すると異なる傾向になったものと考えられる。音楽経験指標と期待度の関係は、期待度の回答が平均的に9段階の真ん中である「どちらでもない」から離

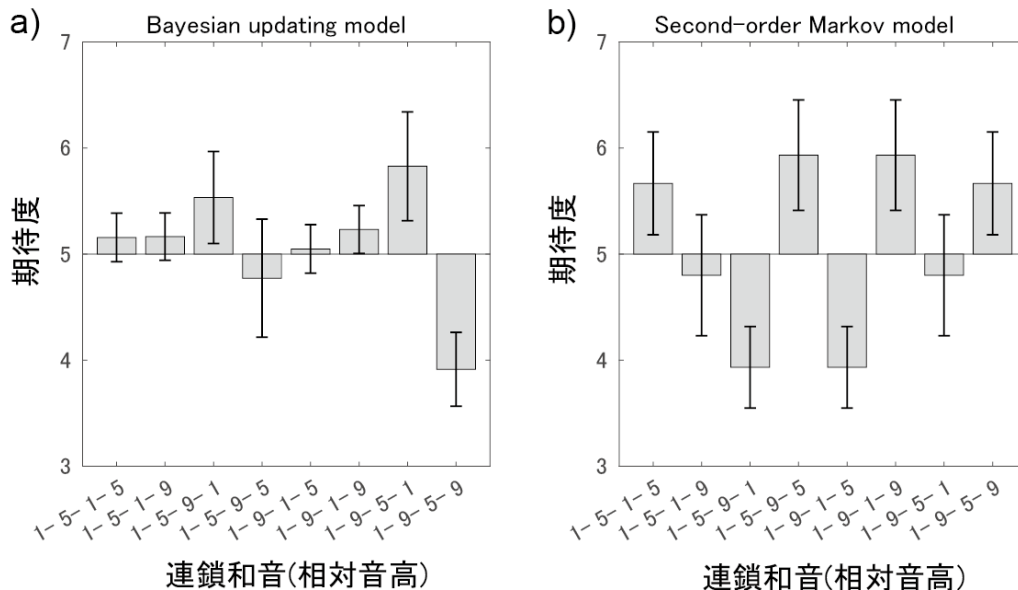


図1 モデルにより予測された期待度

れる傾向が見受けられたものの、明白な関係性は確認できなかった。これらの結果は、期待度のパターンが個人の経験や趣向に基づくものであることを示唆している。これまで音楽理論では分類が困難な連鎖和音に対して、調に相応する内的変数の存在を示唆した研究や、その個人差について調べた研究は著者の知りうる限りなく、音楽知覚研究として重要な知見とデータを得られたと考えている。なお、本研究期間内に論文発表は間に合わなかったが、今後国際雑誌論文誌に投稿する予定である。同時に、取得したデータをオープンアクセスの形で公開する。

提案モデルは音楽的期待に特異ではなく、一般的な時系列知覚モデルとして解釈可能である。今後、モンタージュ理論のような視覚のブラッキング効果はもちろん、コミュニケーションなどのより複雑な時系列情報処理課題においても比較検証を進めることで、ヒトの時系列情報処理の普遍的なメカニズムや神経基盤との関係を議論できると期待される。

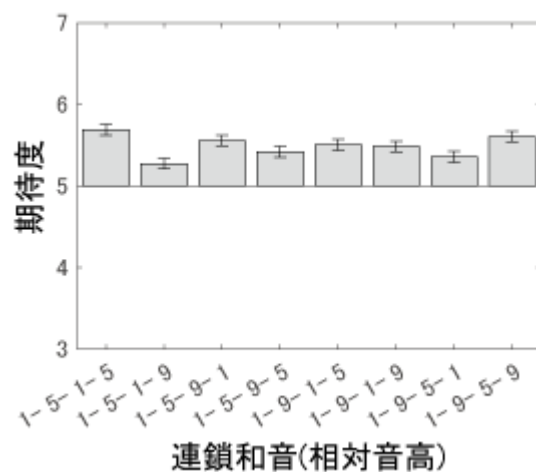


図2 全参加者の期待度の平均値

(2)

脳波計測環境の整備を進めた。通常の事象関連電位の実験と異なり、本研究計画では確率的に生成した多種類の連鎖和音を用いるため、それらに対処できるよう同期信号やラベル信号のシステムを拡張した。また、いくつかの音響機器を試験し、脳波に対する電気ノイズの影響の有無を確認した。

最終的にコロナ禍により実験自体を中止せざるを得なかったため、特筆すべき研究成果は得られなかった。

(3)

シミュレーション実験に基づき、スペクトルクラスタリングによる一次クラスタリングと潜在的ディリクレ配分法による二次クラスタリングの二段階の教師なし学習を組み合わせることで、刺激・行動特徴状態の階層的な関係性の表現を得る方法論を開発した。従来研究で用いられてきた教師なし学習による分節化の多くは、一次クラスタリングに該当する部分のみに留まっており、本手法によってより複雑な知覚・認知変数を扱う拡張を実現できたと考えている。また、時間幅を最適化した移動窓を用いた相互情報量により、分節化した状態系列同士の関係を定量化できることを示した。移動エントロピーは最適化が困難であり、本研究では特定の条件下でしかうまく定量化できなかった。これらの成果を用いて、今後連鎖和音以外の時系列情報処理について計算モデリングを進めていくことができると考えている。

発展的課題として、上述の方法論を用いて合成した脳活動データに対するシミュレーション実験を実施し、脳活動間の同期関係や(時間遅れのある)因果関係の定量化を試みた。その結果、

機能的近赤外分光法を模したデータについては、時間窓とフィルタ処理を最適化することにより、実データに近いノイズ下においても統計的に同期関係や因果関係を検出できた。従来の脳活動分析は刺激や行動のラベルに基づく一方向の分析であったが、脳の活動状態にも有効なラベルを付与できれば、両者の動的な関係を双方向で評価できる可能性がある。近赤外分光法を使って連鎖和音聴取時の脳活動評価を行った研究報告は非常に少なく、装置の特性上音楽的期待に関連する脳部位の計測が可能なのか不明ではあるが、コミュニケーションなど他の動的な推論過程の脳活動パターンと比較を行う足掛かりが得られたと考えている。

<引用文献>

[1] Morimoto, S., Remijn, G. B., & Nakajima, Y. (2016). Computational-model-based analysis of context effects on harmonic expectancy. *PLoS One*, 11(3), e0151374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151374>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森本智志
2. 発表標題 「調性」は実在するのか？：知覚実験と計算論的モデリングに基づく探索
3. 学会等名 音楽の科学研究会 第31回 研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本智志、皆川泰代
2. 発表標題 情報論に基づく社会的キューの分析
3. 学会等名 HCGシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末崎 真実, 高橋 範行, 森本 智志, 饗庭 絵里子
2. 発表標題 和音進行聴取時の期待からの逸脱に対する印象の違い
3. 学会等名 日本音響学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末崎 真実, 高橋 範行, 森本 智志, 饗庭 絵里子
2. 発表標題 音楽的期待に基づく和音進行聴取時の印象評価と事象関連電位との関係
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 (編・著) 西田 紘子、小寺 未知留(著) 野家啓一、佐藤典子、小川将也、鈴木聖子、木村直弘、森本智志、田邊健太郎、源河亨	4. 発行年 2023年
2. 出版社 春秋社	5. 総ページ数 264
3. 書名 音楽と心の科学史	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------