

The Role of Harmonic Expectancy Violations in Musical Emotions: Evidence from Subjective, Physiological, and Neural Responses

Nikolaus Steinbeis, Stefan Koelsch, and John A. Sloboda

Journal of Cognitive Neuroscience, 18:8, pp.1380-1393(2006)

Abstract

- 和音に対する予期を逸脱した現象が起こる際、人間の感情がどう影響されるのかを調査した。
- 24名の参加者（音楽家と非音楽家各12名）に対し、予期の逸脱が主観的と生理的感情指標にどのような影響を与えるのかを観測するために、緊張と情動性の主観的評価、皮膚電気活動（EDA）と心拍数（HR）を記録した。さらに、これらの逸脱による神経活動の相関を観察するために EEG の計測も行った。

Introduction

- 認知活動が感情状態の生成に関わることは既に認められている (Frijda, 1993, Smith & Lazarus, 1993).
 - その中に、驚きや失望、達成感や満足感に関して、予期は特に重要である (Dennett, 1991).
- Meyer (1956) は、多くの音楽に対する感情は満たされた・中止された音楽的予期により喚起される。
 - 彼によると、聴者がこれからの音楽に何が起こることに対して暗黙の予期を持っていて、この予期が満たされるかどうかにより、聴者は安堵感・緊張感と不安感を体験する。
 - このような予期・期待は、音楽のルールと規則性に関する暗黙の知識によって生じる。これらの知識は、繰り返し特定のスタイルの音楽を経験することによって獲得できる、例として「西洋調性音楽」が挙げられる (Tillmann, Bharucha, & Bigand, 2000).
- 本研究は、音楽的予期が聴者の感情反応の生成過程においてどのような役を演じているのかを直接に検証した。
 - 音楽的予期は、すでに曲調、旋律、和音などのために研究された。本研究では、和音のみに注目している。理由として、和音の逸脱は、「五度圏」(Circle of Fifths)理論を用いて、簡単に量化できる。
 - 先行研究 (Bharucha & Stoeckig, 1986)によると、和音的予期は和音距離(五度圏により定義される; Figure 1)の関係に基づいている。距離が近いほど、聴者がより早く判

断を下す(調子が合ってる・調子はずれ)。

- 和音的予期は楽曲に含まれた緊張感に関連する。元の調子から遠く離れた和音は緊張感を生み出す。予期通りの和音が多く中止されたことが原因である(Lerdahl & Jackendoff, 1983).
- 多くの研究は、聴者が感じた緊張感と感情的になる度合いの間に高い相関があることを示唆している(Krumhansl & Schenck, 1997; Krumhansl, 1997)
- まとめ
 - ◇ 和音が元の調子から遠く離れているほど、予期との一致性が低くなり、聴者がより緊張を感じる。よって、聴者の感情を高揚させる。
 - ◇ しかし、予期せぬ音楽と感情反応の直接の関連性はまた明らかになっていない。
- 本研究は、感情処理の指針として、心拍間隔 (IBI)と皮膚電気活動 (EDA)計測を用いた。この二つの測定は、感情経験の価と興奮度合いとの間に一貫の関連性がある(Bradley & Lang, 2001; Bradley, Lang, & Cuthbert, 1993;Lang, Greenwald, Bradley, & Hamm, 1993)。
 - 興奮は感情の強さ、価は刺激によって感じた快と不快を表す。
 - 音楽の感情処理において、体系的に生理指標を用いた研究は少ない。
 - 先行研究によると、喜び、悲しみ、恐怖と安らぎの四つの感情のなかで、喜びと恐怖は、悲しみと安らぎより顕著な皮膚電気活動を引き起こす。つまり、音楽刺激に対し、感情の価より興奮度合いの指針として皮膚電気活動が有効である(Khalfa, Peretz, Blondin, and Manon, 2002).
- 逸脱した和音に引き出される脳の事象関連電位(event-related potential: ERP)については二つの現象がすでに明らかになった。
 - 右半球前頭部優勢な陰性電位(early right-anterior negativity: ERAN)が、約 180 msec で振幅が最大となる、これは和音的予期の逸脱に対する反応だと考えられている。
 - 両側前頭部優勢な陰性電位(bilateral frontal negativity: N5)が、約 500~550 msec で振幅が最大となる、これは逸脱した和音を進行中の音楽的構文に統合するための高次処理だと考えられている。
- 先行研究(Koelsch et al., 2000)によると、実験参加者に提示した五つの一連の和音の中で、逸脱した和音が最後の位置に出現する条件は、真ん中の第三位置に出現する条件より、ERAN が大きい。
 - 解釈として、最後の位置に出現する条件では、より多くの前置きの和音を処理することによって、聴者はより強烈的な音楽的予期を生み出す。よって、予期の逸脱も大きい。

- 十分な音楽的構文が与えられた条件でこのような現象が起こるのは、脳は和音の逸脱に敏感であることの証拠だと考えられる。その後の研究もこれを支持している(Koelsch, 2005; Koelsch & Siebel, 2005).
 - 非音楽家にも ERAN が発生することで、西洋調性音楽をよく知っているすべての聴者は、調性に関する暗黙の感覚を持っていることを示唆している。
 - 同時に、和音的予期の逸脱に対する神経の感度において、音楽家は非音楽家より高い。つまり、音楽訓練が和音の関係の処理に影響する(Kansok, 2002)。
 - さらに、非音楽家は古典派作曲家がピアノ曲に加えた不適切な和音を検出することができる(Koelsch & Mudler, 2002)。よって、本研究もこのような実在の音楽を刺激として使用する。
- これらの EEG 研究で使われた刺激は、ある fMRI 研究にも使用された(Koelsch, Fritz, Schulze, Alsop, & Schaulaug, 2005).
 - この研究では、和音的予期の逸脱に対し、弁蓋部の前部(frontal operculum, BA 44, 左半球, プローカ野の一部)に顕著な賦活が観察された。この構造は、音楽と言語の構造的不規則性の処理に関連している(Koelsch, 2005; Friederici, 2002).非音楽家より音楽家の方が、この弁蓋部前部の賦活が大きい。結果として、前の EEG 研究の発見を支持している。
 - さらに、非音楽家と音楽家両条件において、眼窩前頭皮質の側面部(orbital frontolateral cortex: OFLC)の賦活が観察された。この傍辺縁系の構造は、感覚刺激の感情価評価と感覚情報の感情価帰属に関連する(Mega, Cummings, Salloway, & Malloy, 1997).
 - 和音的予期の逸脱に対する OFLC の賦活は、この脳構造の活動は逸脱に対する感情処理によるものである可能性を示唆している。
- これらの EEG と fMRI の研究は、音楽的構文から逸脱した和音を用いて、言語の構文処理と高い関連性を持つ音楽の構文処理に反応する神経活動を引き起こした(Friederici, 2002).しかし、逸脱した和音がなぜ感情処理を活性化するのはまだ不明である。
- これまで説明した理論と観察された OFLC の賦活がこの仮説の可能性を増やした。本研究の目的は、和音的予期の逸脱は感情的に重要であるかどうかを明白に検証すること。より統合した分析を実現するために、いくつかの従属的測定を用いた。
- 仮説として、和音の逸脱度合いの増加につれ
 - (a) 和音の逸脱に従い、主観的感情強度が上昇する。
 - (b) 音楽鑑賞による緊張感が上昇する。
 - (c) 刺激に対する全体的な感情強度が上昇する。

- (d) 感情に関する生理指標が上昇する。
- (e) 神経活動の過程が引き起こされ、特に ERAN と N5。
- (f) 西洋音楽の規則をより完全に習得した音楽家群は、非音楽家群よりすべての計測の反応が大きい、そして逸脱に対する感度も高い(Koelsch et al., 2005; Koelsch et al., 2002; Sloboda, 1985, 1992).

Methods

● 参加者

- 音楽家 12 名 (年齢 19-29 歳,平均年齢 25.15 歳 ;男性 6 名)
- 非音楽家 12 名 (年齢 20-27 歳,平均年齢 24.7 歳 ;男性 6 名)
- 音楽家群は平均 13.8 年の音楽教育の経験を有していた(範囲: 8.5-18.5 年)。音楽学校で楽器の授業と聴覚訓練を受けた。
- 非音楽家群は、学校教育以外の専門的な音楽教育を受けていなかった。
- 全員右利きで、かつ報告により、正常な聴力を有していた。

● 刺激

- 刺激として、作曲家 J. S. Bach の六つの聖歌からの抜粋を用いた(Riemenschneider, 1941)。これらの抜粋は、オリジナルと、二つの最小限に調整されたバージョンが含まれた。調整は、オリジナルと比べて、和音的予期との一致が高い・低い両条件で行われた(Table 1)。
- 抜粋は意図的に逸脱した和音構造のある箇所特定した、主に終止形。
- これらの箇所は音楽的な直感により選ばれた。調子から逸脱したかどうかは五度圏(Figure 1)を用いて距離を計算し、確認した。
- 各抜粋の調整されたバージョンについて、オリジナルより予期の一致が高いバージョンは、必ず元の調子に戻る。オリジナルより予期の一致性が低いバージョンは、必ず元の調子とナポリの六度(Neapolitan Sixths)の距離を取って終わる。
- まとめ
 - ◇ 刺激は三種類ある: 和音的予期と一致、不一致(Bach's original)、非常に不一致。
 - ◇ 調整により、六つの抜粋は、計 18 個の刺激となる。
- 刺激は事前に録音された MIDI ファイルから切り出し、CuBase SX で調整を行った。音楽は感情を込めた技法を抜いて演奏された。テンポと音量も一定に維持した。
- 各刺激を二つのバージョンに編集した。
 - ◇ フール・バージョン(45-90 sec)は連続反応計測に使用された。
 - ◇ ショット・バージョン(9-20 sec)は EEG と EDA 計測に使用された。

- 調整された和音とそれに対応する未調整の和音の長さは、650-1200 msec だった。
- 刺激は、CuBase SX のピアノサウンド(Steinberg/Wizoo; Germany)を用いて WAV フォーマットに変換した。

● 手順

- 実験は二つの部分から構成される:
 - ◇ 一回目は行動実験。参加者が連続に音楽に対する緊張感と情動性を評価し、そして各刺激が終わった後に全体の情動性を評価する。
 - ◇ 二回目は、EEG のほかに、生理指標(IBE,EDA)も計測する。
- 一回目の実験は、緊張感と情動性を両方記録できる。参加者が、まずは最初の三つの聖歌に対する情動性を連続評価して、その後に次の三つに対する緊張感を連続評価する。この順番は、三つの抜粋毎に変化する。
 - ◇ 参加者がキーボードを使って感情反応と緊張感を評価する。このキーボードはモニター上に表示される赤いスライダーを操作できる。スライダーは最小値 0 から最大値 100 まで、緊張感と情動性を評価できる。
 - ◇ 実験の際に、「聞いている音楽に対して自分が感じた情動・緊張感を連続に評価してください」の文字をモニターに提示し、100 ms 毎に反応を記録した。
 - ◇ 一つの聖歌が終わった後に、音楽全体に対する情動性評価を 1 から 10 の十段階で評価した。
 - ◇ 参加者が評価インターフェースの操作に慣れるまで、ほかの聖歌を使って練習した。
 - ◇ 一つの刺激の全体評価が終わった後に、この刺激を含めた試行をもう一度行った。この二試行を一つのブロックとした。
- 二回目の実験は、IBE, EDA, と EEG 計測から構成される。
 - ◇ 聖歌はランダムに提示された。
 - ◇ 聖歌の数が少ないため、一つのバージョンは六回提示された。刺激は計 108 個となり、各条件に対応する刺激は 36 個になった。
 - ◇ 各バージョンの重複は、SNR(signal-to-noise)の上昇に重要である。
 - ◇ 生理と神経データを記録する際に、参加者が音楽に集中することを確保するためにタスクを用いた。
 - 行動実験のような連続評価は EDA に影響を与えるため使用しなかった。
 - タスクは、タスクによる興奮を最小限に抑える。
 - 参加者は、各刺激の長さを前の刺激と比較するように要求された。

- 参加者に比較の結果を入力するインターフェースを与えたが、フィードバックは提示されない。EDA に影響を与えないよう、各刺激が終わった時刻の二秒後に、参加者が結果を入力する。
 - 入力した後に 8 秒の休憩を入れた、これは EDA がベースラインに戻るのを確保するためである。
- データ計測と分析
 - 先行研究(Sloboda & Lehmann, 2001; Krumhansl, 1996)によると、連続反応の計測において、音楽刺激と対応の評価の間に 2 から 4 秒のラグが生じる。
 - ◇ データを観察した結果、刺激後 3 秒以降の反応の変化はなかった。
 - ◇ よって、本研究はラグを最大 3 秒と推定する。
 - 連続反応のデータ量を削減するために、10 個のデータの平均を取って一つのポイントにまとめた。つまり、一秒に一つの反応データが対応している。
 - 分散分析を用いて反応データを分析した。二つの連続反応(緊張感と情動性)に対し:
 - ◇ 和音要素条件(expected, unexpected, very unexpected)ごとに分析した。
 - ◇ 時間条件(0-1 sec, 1-2 sec, 2-3 sec) ごとに分析した。
 - ◇ ブロック条件(first rating, second rating) ごとに分析した。
 - ◇ 被験者条件(musician, nonmusician) ごとに分析した。
 - EDA, IBI, と EEG は 500Hz のサンプリング率で記録した。
 - ◇ EDA 計測では、二つの電極を非利き手の中指と人差し指の指節骨に装着し、粘着テープで固定した。
 - 記録した EDA データを 20 Hz にサンプル・ダウンし、8.5 Hz のフィルタ (599 points, fir)をかけた。
 - 人工的に EDA データから計測装置の錯誤を検出した。
 - ◇ IBI 計測では、二つの電極を両手の二頭筋の上部に装着した。
 - 記録した IBI データに 2 – 60 Hz(801 points, fir) のフィルタをかけた。
 - 瞬間的な心拍数は R-R ピークの間の時間により計算された。
 - ◇ EEG は国際 10-20 法に準じて 32 箇所電極を配置した。
 - 記録した EEG データに 0.25 – 25 Hz(3001 points, fir) のフィルタをかけた。
 - 激しい目と筋肉の運動による閾値を超えた異常なデータを除外するために、全試行の 12.2%のデータが分析対象になれなかった。
 - 事象関連電位(ERP)の平均値を四つの区域ごとに求めた:

- ◇ 前部左側(F7, F3 ,FT7, FC3)
- ◇ 前部右側(F8, F4 , FC4, FT8)
- ◇ 後部左側(C3, CP5, P7, P3)
- ◇ 後部右側(C4, CP6, P4, P8)

- 結果

- 連続反応データ

同じブロック内の相関関係

- ◇ 同じブロック内の二回の連続情動性と緊張感評価両方とも、高い正の相関関係が見られた($r = .571, p < .001$ and $r = .771, p < .001$).
- ◇ 同じブロック内の二回の全体情動性評価も高い相関が見られた($r = .908, p < .001$).
- ◇ つまり、参加者の評価の信頼性が高い。

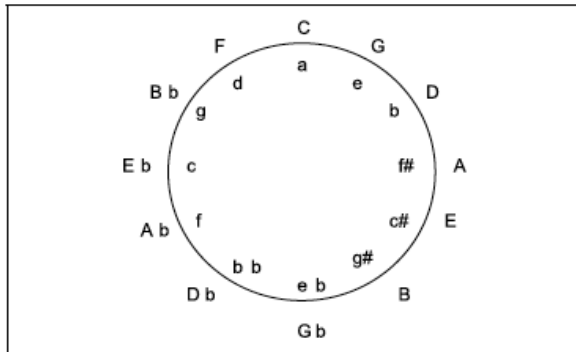


Figure 1. Circle of Fifths: The outer upper-case symbols represent major keys and the adjacent inner lower-case symbols represent the relative minor keys (i.e., C major–a minor). The closer the keys, the closer their harmonic relationships, which are indicated by the number of scale-notes in common: with direct neighbors, this is six notes, with neighbors once removed, this is five notes, and so forth.

Figure 2. One example of a cadence within the stimulus set and its manipulations: Version A is an excerpt of the original composition by Bach, with a harmonically unexpected event (indicated by the dashed square); Versions B and C are identical to the original, apart from the harmonic events enclosed within boxes, which were rendered to be either harmonically more expected than the original (Version B) or less expected than the original (Version C).

Table 1. Chorales Used as Stimuli

| <i>Chorale (as indicated by Riemenschneider, 1941)</i> | <i>Length of Entire Chorale (length of excerpt)</i> | <i>Placement of Targets within the Segment and Manipulation</i> |
|--|---|---|
| No. 7 (BWV 17.7): Nun lob', mein' Seel', den Herren. | 46 bars (bars 24–31) | Bar 27—move to the subdominant |
| No 21 (BWV 153.5): Herzlich tut mich verlangen | 17 bars (bars 1–5) | Bar 4—heightened chromaticism |
| No 52 (BWV 429): Wenn mein Stündlein vorhanden ist | 16 bars (bars 3–7) | Bar 7—move to the subdominant |
| No 60 (BWV 133.6): O Stilles Gotteslamm | 17 bars (bars 11–17) | Bar 15—move to the relative minor of the home key |
| No 84 (BWV 197.5): Nun bitten wir den heiligen Geist | 15 bars long (bars 8–15) | Bar 13—move to the relative minor of the section key |
| No 276 (BWV 375): Kommt her, ihr lieben Schwesterlein | 11 bars (bars 5–11) | Bar 9—heightened chromaticism |