

# 主成分回帰による音楽的緊張モデルの構築と特徴量の同定

樋口 梨花<sup>1,a)</sup> 竹川 佳成<sup>1,b)</sup> 平田 圭二<sup>1,c)</sup>

**概要：**これまでに音楽的緊張の線形予測モデルが提案されてきた。実験によって得られた音楽的緊張を目的変数とし、和声や音高などの特徴量を説明変数として重回帰分析を行い、それによって得られた線形モデルで、概括的な緊張を表現できるとしている。しかし、従来研究 [3][4] は、モデルの回帰係数について言及しておらず、各説明変数がどれだけモデルの性能に貢献しているかが明らかになっていなかった。また、重回帰分析を行う際の多重共線性の影響が考慮されていなかった。さらに、和声による緊張を算出するために、GTTM の延長的簡約木を用いているが、正しい延長的簡約木を求めるのは困難であった。そこで本研究は、音楽的緊張に寄与する特徴量について再検討し、延長的簡約木に代わる新たな特徴量をモデルに導入する。そして主成分回帰を行い、新たな音楽的緊張の線形予測モデルを構築する。ビートルズの楽曲を 5 曲使用し、交差検証を行い提案モデルの予測精度を測定した。全ての主成分得点を説明変数として重回帰分析を行った結果、一番精度が良かった曲の決定係数の値は 0.755 であった。また、モデルの回帰係数を確認したところ、本研究で導入した特徴量が大きく貢献していた。新しく簡易的に設定した特徴量は、従来研究の特徴量に代わる役割を果たすことが明らかとなった。

## Construction of Musical Tension Model by Principal Component Regression and Identification of Feature Values

### 1. 序論

音楽は人々の情動を引き起こす、または増長させる効果があるとされる。近年の研究では、音楽聴取中にドーパミンが脳内で分泌されることが確認されており、音楽によって快の情動を引き起こされることが示された [17]。音楽と情動の密接な関わりを利用して、現代では心の動きをコントロールするために音楽聴取を行うこともある [17]。作曲や編曲をする際や演奏時に意図的に情動を生じさせるような操作を加え、音楽の美的価値を高めることもある。音楽聴取中の情動は「音楽情動」と呼ばれ、研究が盛んに行われている [17]。音楽が情動を引き起こす仕組みを解明することは需要があると言える。

音楽的緊張は、音楽によって引き起こされた聴者の緊張である。音楽的緊張は音楽の特徴と情動の中間の階層に存在する [3][4]。音楽的緊張は音楽の特徴を解釈することによって生じ、情動を引き起こす。音楽的緊張が大きいほど、

のちに得られる情動は大きいとされる [1]。

本研究の目的は、音楽的緊張のモデルを構築し、音楽が情動を引き起こす仕組みを「緊張」という観点から解くことである。モデルは重回帰分析によって求める。説明変数として楽譜に記載されている特徴量（音高、音量など）、目的変数として聴者が認知した音楽的緊張を用いる。従来研究 [3][4] は、モデルの回帰係数について言及しておらず、各説明変数がどれだけモデルの性能に貢献しているか明らかになっていなかった。また、重回帰分析を行う際の多重共線性の影響が考慮されていなかった。さらに、和声による緊張を算出するために、GTTM の延長的簡約木を用いているが、正しい延長的簡約木を求めるのは困難であった。そこで本研究では、音楽的緊張に寄与する特徴量について再検討し、延長的簡約木に代わる新たな特徴量をモデルに導入する。そして主成分回帰を行い、新たな音楽的緊張の線形予測モデルを構築する。

### 2. 関連研究

#### 2.1 音楽的緊張と情動

音楽的緊張は、音楽によって呼び起こされた聴者の緊張

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学大学院  
Graduate School of Future University Hakodate  
a) g2118031@fun.ac.jp  
b) yoshi@fun.ac.jp  
c) hirata@fun.ac.jp

である。音楽的緊張は音楽の特徴と情動の中間の階層に存在する [3][4]。音楽的緊張は情動を引き起こす役割をしている。人は無意識のうちに、知覚した音楽の特徴を解釈し緊張を生じている。この解釈には人間の予測能力が関係している。予測能力は生物が生存するために進化を遂げてきた。予測が当たった場合は報酬が得られ、外れた場合は罰せられるというメカニズムが存在したと考えられている [1]。また、快感という報酬が予測への動機になっていると考えられる。人は音楽を聴くときに無意識に様々な予測を行なっている。生存に関わらないはずの音楽にまで予測を行う理由は、本能の過剰反応であると言える。「予測が正しいかどうか」のみが重要であり、生存にとって重要かどうかは判断されない [1]。

音楽の認知に関する研究では、この予測と情動の関係についての調査が多く行われている。Hindemith は「予測が当たった場合」に着目し、実際に曲から受けた印象が聴者の予測に近いほど得られる喜びが大きいとした [7]。聴者は経験をもとに音楽の予測のための「雛形」を作る。つまり、音楽経験が豊富な人ほど予測能力が高くなる。しかし、実際は予測が完全に一致する可能性は低い。よって、この主張は Meyer によって覆される。Meyer は「予測が裏切られた場合に情動が生じる」と主張した [15][16]。Meyer によると、人は音楽を聴いているとき、無意識に様々な予測をしているとされる。次の展開を予測できたとき、人は緊張状態になり、予測が正しいかどうかを評価する。予測が正しければ緊張状態は緩和され、予想外の展開の場合は緊張がさらに増幅される。緊張状態のときは興奮や不安定感などの情動が引き起こされ、弛緩状態のときは安静や安定感などの情動が引き起こされる。Meyer によれば、情動は予測が多少なりとも裏切られたことによって生じるとされる。また、音楽的緊張が大きいほど最終的に得られる情動は大きい。音楽的緊張の操作は意図的に行われることがある。例えば、曲の終盤にテンポを遅くするというテクニックがある。また、より複雑な操作としてコード進行の操作が挙げられる。

音楽的緊張は情動を生じさせる。この情動は「嬉しい、悲しい」という意識上の反応とは異なる。Huron は無意識の反応と意識上の反応を区別して考えている [8]。予測に反する展開が起こると、その瞬間は予測が外れたことによる不快感が生じる。Huron によれば、これは無意識の反応である。しかし、その時に起きた出来事が自分にとって良いものだった場合、不快感は「嬉しい驚き」に変わる。この「嬉しい驚き」は意識上の反応である。

情動に影響を及ぼす要素は音楽的緊張のみではない。音楽が持つ背景や聴取者の背景、聴取環境など、音以外の要素も影響を及ぼす。聴取者の音楽経験や職業という背景によって生じる情動が変化することが確認されている [17]。

## 2.2 特徴量の相互作用を考慮した音楽的緊張モデル： Farbood's musical tension model

Farbood は、特徴量の相互作用を考慮した音楽的緊張モデルを構築した。音楽的緊張は、6 つのパラメータの時間変化関数として表現できる。Farbood は、実験によって得られた音楽的緊張を目的変数とし、和声や音高などの特徴量を説明変数として重回帰分析を行い、それによって得られた線形モデルで、概括的な緊張を表現できるとしている。Farbood が主張する特徴量は、(1) ローカルテンポ、(2) 和声、(3) 音高、(4) 音量、(5) テンポ、(6) メロディ期待値の 6 つである。和声 [12][13]、音量 [9]、メロディ期待値 [14] については、それぞれ他の先行研究のモデルを用いている。線形モデルは、各特徴量の値 ( $x_n$ ) にその重要度に応じた重み ( $a_n$ ) を掛け合わせることによって、全体的な音楽的緊張 ( $y$ ) を求めることが可能である。 $b$  は誤差を表す。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b$$

## 3. 音楽的緊張モデルの構築方法

### 3.1 使用する楽曲と入手方法

モデルの構築に使用した楽曲は以下のビートルズの楽曲 5 曲である。(1) A Hard Day's Night, (2) All You Need Is Love, (3) Back In The USSR, (4) Ob-La-Di Ob-La-Da, (5) The Long And Winding Road. 楽譜はヤマハミュージックデータショップ (<https://yamahamusicdata.jp/>) で、MIDI 形式で楽譜の購入が可能である。購入した楽譜は楽譜編集ソフトを使用して xml 形式と mp3 形式に変換を行った。購入した楽譜にコードが記載されていない場合は、chordify (<https://chordify.net/>) によって推定されたコードを使用した。

### 3.2 特徴量の候補と算出方法

本研究は、Farbood が主張する特徴量に加え、新たに特徴量を考案した。音高、メロディ期待値、ローカルテンポは従来研究の特徴量を使用している。和声については、従来研究よりも簡易的な算出方法を再考案した。

#### 3.2.1 従来研究の特徴量

##### 音高

Farbood によると、音楽的緊張は音高に比例して上昇するとされる。そこで、本研究では音高が半音上がるごとに緊張度が 1 つ増加するように値を設定した。

##### メロディ期待値

人は、ある音を聴いたときに次に聴こえてくる音を予測しているとされる。メロディ期待値は、その期待値を表している。これは Lerdahl の Melodic attraction (Lerdahl, 2004, pp.161-173) によって算出可能である。(以下の式は参考文献より抜粋)

$$\alpha(p_1 \rightarrow p_2) = \frac{s_2}{s_1} \times \frac{1}{n^2}$$

$\alpha(p_1 \rightarrow p_2)$  : ある音  $p_1$  から次の音  $p_2$  へのアトラクション  
 $s_i$  :  $p_i$  の anchoring strength (図 1 中の ( ) の中の数値)  
 $n$  :  $p_1, p_2$  間の半音数

例えば, ハ長調の B から C へのメロディ期待値は  
 $\alpha(B \rightarrow C) = \frac{4}{2} \times \frac{1}{1^2} = 2$  となり, D から C へのメロ  
 ディ期待値は  $\alpha(D \rightarrow C) = \frac{4}{2} \times \frac{1}{2^2} = 0.5$  となる。

|     |   |          |   |          |   |   |          |   |          |   |          |   |   |
|-----|---|----------|---|----------|---|---|----------|---|----------|---|----------|---|---|
| (4) | C |          |   |          |   |   |          | G |          |   |          |   | C |
| (3) | C |          |   |          | E |   |          | G |          |   |          |   | C |
| (2) | C |          | D |          | E | F |          | G |          | A |          | B | C |
| (1) | C | D ♭ /C # | D | E ♭ /D # | E | F | G ♭ /F # | G | A ♭ /G # | A | B ♭ /A # | B | C |

図 1 ハ長調のメロディのアトラクタ

## ローカルテンポ

オンセットとオンセットの間隔 (秒) は, IOI (inter onset interval) と呼ばれ, 音の長さから算出することができる ( $IOI = duration \times \frac{60}{tempo}$ ). duration は音の長さが何拍分であることを表す。ローカルテンポは, IOI の逆数を指す。音楽的緊張はローカルテンポに比例して上昇する。

### 3.2.2 従来の特徴量をもとに簡易的な算出方法を再考案した特徴量

#### 和声

本研究は, 和声による緊張を簡易的に表すために, そのコードが持つ安定性に従って値を設定した。安定性は機能 and 和声における和音の役割をもとに値を決めた。表 1 のコード番号は, ダイアトニックコードの番号を表している。各コードは, トニック (T), トニックの代理コード (T'), サブドミナントの代理コード (SD'), サブドミナント (SD), ドミナントの代理コード (D'), ドミナント (D) の順番に安定しているとして, それぞれ 0 から 5 までの値を設定した。ダイアトニックコード以外の和音の値は 6 とした。

表 1 長調のダイアトニックコード一覧と設定した値

|     | I | ii  | iii | IV | V | vi | vii | その他 |
|-----|---|-----|-----|----|---|----|-----|-----|
| 安定度 | T | SD' | T'  | SD | D | T' | D'  | -   |
| 値   | 0 | 2   | 1   | 3  | 5 | 1  | 4   | 6   |

### 3.2.3 本研究で考案した特徴量

本研究では以上の特徴量の他に, 次のような特徴量を新しく追加した。(1) 音の密度, (2) 旋律の傾き, (3) 旋律の平均値, (4) 旋律の最高音, (5) 旋律の最低音, (6) 非和声音の数, (7) 傾きが正の 1 次関数 ( $y = t$ ), (8) 対数関数 ( $y = \log(t + 1)$ ), (9) 上に凸の 2 次関数 ( $y = -(t - a)^2$ )

音の密度は, 1 小節中の音数である。音の密度が大きいかほど緊張が高いと仮定した。旋律の傾きは, 小節中の最後の音の高さから最初の音の高さを引き, 1 小節の時間で割っ

たものとする。旋律の平均値・最高音・最低音は, 小節中の旋律のみに着目したときの平均の高さ・最高音・最低音である。非和声音とは, そのときに鳴っている和音の構成音以外の音である。非和声音が多いと緊張が増す。Lerdahl によると, 音楽的緊張は非和声音によって加算される。

本研究では, 音楽的緊張の基本大域的パターンには次の 3 つがあるという仮説を立てる。まず 1 つ目は, 曲の進行と共に直線的かつ右上がりに音楽的緊張が上昇するパターンである。2 つ目は, 曲の進行と共に右上がりに音楽的緊張が上昇し, 途中から値の上昇が緩やかになっていくパターンである。3 つ目は, 曲の序盤は音楽的緊張が上昇し, 曲の中盤で最も大きな盛り上がりを迎え, 曲の終盤にかけて音楽的緊張が下降していくパターンである。1 つ目は, 正比例のグラフとして表すことができる。2 つ目は, 対数関数として表せる。対数関数は,  $x = 0$  の時  $y = 0$  となるように,  $x$  軸の負の方向にシフトする。3 つ目は, 上に凸の 2 次関数のグラフとして表すことが可能である。曲の再生時間が半分まで達したときに最も値が大きくなると仮定し, 上に凸の 2 次関数を  $x$  軸の正の方向にシフトする。 $a$  は曲の長さを 2 で割った数値である。本研究ではこれら 3 つの広域的な音楽的緊張の概形を表現する特徴量を新たに導入した。

## 3.3 教師データの作成方法

### 3.3.1 実験装置

図 2 は作成した実験装置である。実験装置の画面右にあるのがスライダーであり, 値は 0 から 100 まで, 初期値は 20 に設定した。被験者は音楽を聴きながら, そのときに認知した緊張に応じてスライダーを上下に動かす。スライダーを動かすと, そのときの再生時間とスライダーの値が記録される仕組みとなっており, リアルタイムな応答を収集することができる。なお, スライダーの操作性を考え, 被験者がスライダーの上にマウスカーソルを置いたときにスライダーのツマミがマウスに追従するように設定した。マウスボタンを押すことなく上下に動かすだけでスライダーを操作できるように, 操作ミスが起こりにくくなる。実験装置の画面左にあるのは, 再生ボタンと評価値の入力ボタンである。被験者が再生ボタンを押すと, 5 秒間カウントダウンした後に曲が流れ始める。カウントダウン機能は, 被験者が再生ボタンを押した後に, スライダーの位置にマウスを移動し, 曲の始まりとともにスライダーの操作ができるように実装した。被験者は楽曲を聴き終わった際に, 1 試行ごとに評価値を入力することができる。評価値は, 音楽的緊張への応答の信頼度を 5 段階で表している。

### 3.3.2 被験者実験

聴者が認知する緊張のデータを収集するために実験を行う。実験方法で注意すべき点は, 音楽的緊張に対する聴者のリアルタイムな応答を収集することである。被験者が曲



図 2 実験装置

を聴き終わった後に尋ねる方法だと、聴き終わった直前の緊張の大まかな外形しか反映されないため、リアルタイムで連続的に音楽的緊張への応答を収集する工夫が必要である。そこで、本研究では作成した実験装置を用いて被験者実験を行なった。

被験者は大学生 10 名で、いずれも 20 代である。音楽経験の有無や性別に関係なく無作為に選ばれた。被験者に実験装置の画面を表示して実験の概要の説明を行ったあと、被験者のタイミングで再生ボタンを押すように指示した。1 曲に対し 3 試行ずつ実験を行った。

### 3.4 実験データの整形

被験者実験によって収集した全ての実験データから、教師データを作成する方法について述べる。収集した実験データは、スライダーを動かした際に再生時間とスライダーの値を記録したものであった。そのため、時系列データの間に線形補間し、0.1 秒ごとのサンプリングに統一した。その後、それぞれの実験データのスライダーの値に対して標準化を行い、データを整形した。被験者ごとにスライダーを動かす幅には個人差があったため、標準化を行い、スケールを揃える必要があった。

### 3.5 知覚から反応までの遅れの計測

実験から得られたデータは、聴者が音楽を知覚してからスライダーを動かすまでのタイムラグが存在する。そこで実験装置を使用して、知覚から反応までに要する遅れの計測を行った。遅れの計測には自作の音声データを使用した。音声データは C3 の音と C4 の音が一定間隔で十分な間を開けて交互に鳴るようにした。スライダーの初期値を 20 とし、C4 の音が聴こえたらスライダーを 80 まで上げ、C3 の音が聴こえたら 20 まで下げるように指示をした。得られたデータから、音が鳴ってから目標の値の  $\pm 3$  までに

達する時間を測る。これを 15 回繰り返し計測した結果、平均時間は 2.08 秒であった。音楽的緊張モデルの構築の際には、実験から得たデータの時刻を 2.08 秒早めることでタイムラグを考慮することが可能である。

### 3.6 主成分回帰

モデルを構築する際に多重共線性について考慮する必要がある。多重共線性とは説明変数同士の関連性が高い状態を指す。この状態のとき回帰係数の値は一意に定まらない場合がある。本研究では、多重共線性を解消するために主成分回帰を行う。主成分回帰とは、全ての特微量に対して主成分分析を行い、得られた独立な主成分得点を説明変数に用いて重回帰分析を行う方法である。

## 4. 結果

### 4.1 ビートルズの楽曲 5 曲での交差検証の結果

モデルの汎化性能を確認するために、ビートルズの楽曲を 5 曲使用して交差検証を行った。(1) A Hard Day's Night, (2) All You Need Is Love, (3) Back In The USSR, (4) Ob-La-Di Ob-La-Da, (5) The Long And Winding Road.

A Hard Day's Night の結果は図 3 に示す。他の曲全てを学習用データとし、A Hard Day's Night をテストデータとした。推定値は学習用データからモデルの回帰式を求め、それに対して A Hard Day's Night の主成分得点を当てはめた結果である。また、All You Need Is Love の結果は図 4 に、Back In The USSR の結果は図 5、Ob-La-Di Ob-La-Da の結果は図 6、The Long And Winding Road の結果は図 7 に示す。

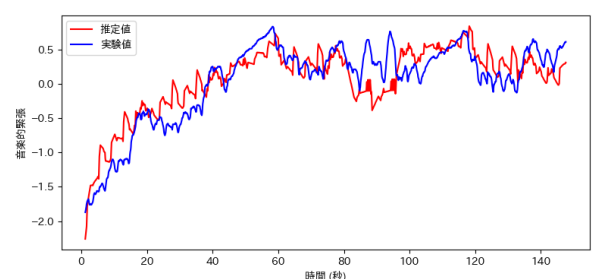


図 3 交差検証/A Hard Day's Night

全ての主成分得点を説明変数とした場合の交差検証の結果を表 2 に示す。各曲の自由度調整済みの決定係数の値は表に書かれている通りである。

ビートルズの楽曲 5 曲の全ての特微量に対し、主成分分析を行って得られた主成分負荷量を表 3、表 4、表 5 に示す。これは各主成分に対してどの程度特微量が影響しているかを表している。

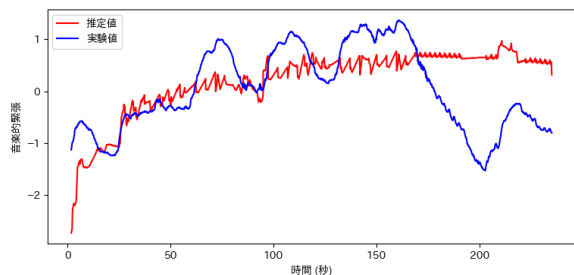


図 4 交差検証/All You Need Is Love

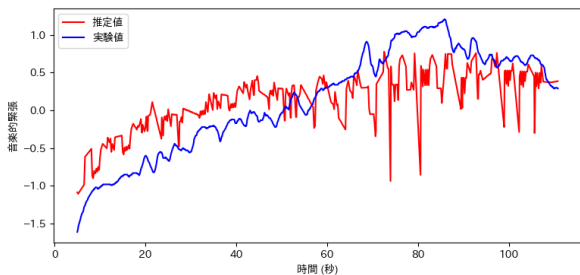


図 5 交差検証/Back In The USSR

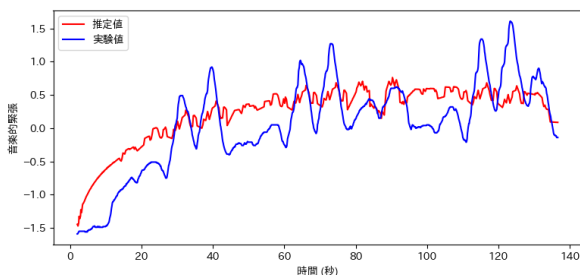


図 6 交差検証/Ob-La-Di Ob-La-Da

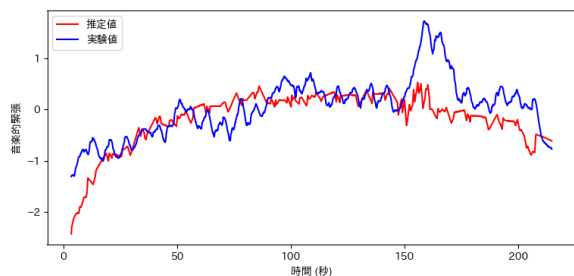


図 7 交差検証/The Long And Winding Road

表 2 交差検証の結果

| テスト用の楽曲                   | 精度 (R <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|----------------------|
| A Hard Day's Night        | 0.755                |
| All You Need Is Love      | -0.077               |
| Back In The USSR          | 0.562                |
| Ob-La-Di Ob-La-Da         | 0.561                |
| The Long And Winding Road | 0.197                |

表 3 主成分負荷量 (1)

|      | 音高    | ローカルテンポ | メロディ期待値 | 密度    |
|------|-------|---------|---------|-------|
| PC1  | -0.94 | -0.25   | -0.06   | -0.32 |
| PC2  | -0.09 | 0.06    | 0.13    | -0.10 |
| PC3  | -0.16 | 0.51    | 0.13    | 0.70  |
| PC4  | 0.07  | 0.34    | 0.63    | 0.00  |
| PC5  | -0.07 | 0.52    | 0.04    | 0.15  |
| PC6  | -0.01 | -0.21   | 0.72    | -0.31 |
| PC7  | -0.02 | 0.26    | -0.12   | 0.01  |
| PC8  | 0.01  | 0.39    | 0.00    | -0.31 |
| PC9  | -0.01 | -0.16   | 0.19    | 0.43  |
| PC10 | 0.02  | -0.07   | 0.00    | 0.04  |
| PC11 | -0.29 | 0.00    | 0.01    | 0.00  |
| PC12 | 0.00  | 0.00    | 0.00    | -0.01 |
| PC13 | -0.01 | 0.00    | 0.00    | 0.00  |

表 4 主成分負荷量 (2)

|      | 最高音   | 最低音   | 傾き    | 平均値   |
|------|-------|-------|-------|-------|
| PC1  | -0.93 | -0.89 | 0.22  | -0.97 |
| PC2  | -0.10 | -0.11 | -0.27 | -0.09 |
| PC3  | -0.11 | -0.24 | -0.35 | -0.18 |
| PC4  | 0.05  | 0.03  | 0.32  | 0.04  |
| PC5  | -0.01 | -0.13 | -0.15 | -0.07 |
| PC6  | -0.01 | -0.05 | -0.05 | -0.04 |
| PC7  | -0.02 | -0.03 | 0.77  | 0.00  |
| PC8  | 0.07  | -0.01 | -0.17 | 0.01  |
| PC9  | -0.08 | 0.09  | 0.05  | 0.00  |
| PC10 | 0.30  | -0.33 | 0.02  | 0.02  |
| PC11 | 0.11  | 0.09  | 0.00  | 0.09  |
| PC12 | 0.00  | -0.01 | 0.00  | 0.01  |
| PC13 | -0.05 | -0.04 | 0.00  | 0.09  |

表 5 主成分負荷量 (3)

|      | 非和声音  | 和声    | $y = \log(t + 1)$ | $y = t$ | $y = -(t - a)^2$ |
|------|-------|-------|-------------------|---------|------------------|
| PC1  | -0.19 | -0.17 | 0.04              | 0.17    | -0.38            |
| PC2  | 0.13  | 0.31  | -0.92             | -0.93   | 0.08             |
| PC3  | 0.69  | 0.41  | 0.20              | 0.19    | 0.09             |
| PC4  | 0.20  | -0.41 | -0.16             | 0.00    | -0.51            |
| PC5  | -0.45 | -0.48 | 0.03              | -0.12   | 0.48             |
| PC6  | 0.01  | 0.23  | 0.22              | 0.04    | 0.45             |
| PC7  | 0.01  | 0.31  | 0.00              | -0.09   | 0.26             |
| PC8  | -0.27 | 0.36  | 0.03              | 0.13    | -0.25            |
| PC9  | -0.39 | 0.18  | -0.07             | 0.03    | -0.12            |
| PC10 | -0.04 | 0.01  | -0.01             | -0.01   | -0.03            |
| PC11 | 0.01  | -0.01 | 0.00              | -0.01   | 0.00             |
| PC12 | 0.01  | 0.00  | -0.15             | 0.15    | 0.05             |
| PC13 | 0.00  | 0.00  | 0.00              | 0.00    | 0.00             |

## 5. 考察

### 5.1 音楽的緊張に貢献する特徴量

表 6, 表 7, 表 8 において回帰係数の絶対値が 0.1 より大きいものに着目すると, PC1, PC2, PC4, PC5, PC6 である. PC2 の回帰係数が常に大きいことから, 本研究

表 6 回帰係数/A Hard Day's Night

|       | coef    | std err | t       | P> t  | [0.025 | 0.975] |
|-------|---------|---------|---------|-------|--------|--------|
| const | 0.0601  | 0.006   | 10.713  | 0.000 | 0.049  | 0.071  |
| PC1   | -0.2464 | 0.006   | -43.101 | 0.000 | -0.258 | -0.235 |
| PC2   | -0.3037 | 0.005   | -56.209 | 0.000 | -0.314 | -0.293 |
| PC3   | 0.0694  | 0.006   | 12.503  | 0.000 | 0.058  | 0.080  |
| PC4   | -0.2165 | 0.006   | -38.453 | 0.000 | -0.227 | -0.205 |
| PC5   | 0.0934  | 0.006   | 16.889  | 0.000 | 0.083  | 0.104  |
| PC6   | 0.1827  | 0.006   | 31.670  | 0.000 | 0.171  | 0.194  |
| PC7   | 0.0783  | 0.005   | 14.437  | 0.000 | 0.068  | 0.089  |
| PC8   | -0.0486 | 0.005   | -8.904  | 0.000 | -0.059 | -0.038 |
| PC9   | -0.0246 | 0.005   | -4.507  | 0.000 | -0.035 | -0.014 |
| PC10  | 0.0368  | 0.006   | 6.579   | 0.000 | 0.026  | 0.048  |
| PC11  | -0.0255 | 0.005   | -4.712  | 0.000 | -0.036 | -0.015 |
| PC12  | -0.0883 | 0.006   | -15.490 | 0.000 | -0.099 | -0.077 |
| PC13  | -0.0077 | 0.005   | -1.499  | 0.134 | -0.018 | 0.002  |

表 7 回帰係数/Back In The USSR

|       | coef    | std err | t       | P> t  | [0.025 | 0.975] |
|-------|---------|---------|---------|-------|--------|--------|
| const | 0.0562  | 0.005   | 10.845  | 0.000 | 0.046  | 0.066  |
| PC1   | -0.1938 | 0.005   | -36.251 | 0.000 | -0.204 | -0.183 |
| PC2   | -0.2860 | 0.005   | -55.892 | 0.000 | -0.296 | -0.276 |
| PC3   | 0.0556  | 0.006   | 9.731   | 0.000 | 0.044  | 0.067  |
| PC4   | -0.2320 | 0.005   | -45.475 | 0.000 | -0.242 | -0.222 |
| PC5   | 0.1202  | 0.005   | 22.641  | 0.000 | 0.110  | 0.131  |
| PC6   | 0.2036  | 0.005   | 39.779  | 0.000 | 0.194  | 0.214  |
| PC7   | 0.0617  | 0.006   | 11.007  | 0.000 | 0.051  | 0.073  |
| PC8   | -0.0672 | 0.006   | -11.282 | 0.000 | -0.079 | -0.056 |
| PC9   | 0.0303  | 0.006   | 5.321   | 0.000 | 0.019  | 0.041  |
| PC10  | 0.0372  | 0.005   | 7.311   | 0.000 | 0.027  | 0.047  |
| PC11  | -0.0322 | 0.005   | -6.358  | 0.000 | -0.042 | -0.022 |
| PC12  | -0.0807 | 0.005   | -16.267 | 0.000 | -0.090 | -0.071 |
| PC13  | -0.0214 | 0.005   | -4.037  | 0.000 | -0.032 | -0.011 |

表 8 回帰係数/Ob-La-Di Ob-La-Da

|       | coef    | std err | t       | P> t  | [0.025 | 0.975] |
|-------|---------|---------|---------|-------|--------|--------|
| const | 0.0840  | 0.005   | 16.076  | 0.000 | 0.074  | 0.094  |
| PC1   | -0.2311 | 0.005   | -44.332 | 0.000 | -0.241 | -0.221 |
| PC2   | -0.2815 | 0.005   | -55.837 | 0.000 | -0.291 | -0.272 |
| PC3   | 0.0867  | 0.005   | 17.048  | 0.000 | 0.077  | 0.097  |
| PC4   | -0.2278 | 0.005   | -47.280 | 0.000 | -0.237 | -0.218 |
| PC5   | 0.1154  | 0.005   | 23.423  | 0.000 | 0.106  | 0.125  |
| PC6   | 0.1825  | 0.005   | 37.163  | 0.000 | 0.173  | 0.192  |
| PC7   | 0.0854  | 0.005   | 17.768  | 0.000 | 0.076  | 0.095  |
| PC8   | -0.0628 | 0.005   | -12.693 | 0.000 | -0.073 | -0.053 |
| PC9   | -0.0165 | 0.005   | -3.322  | 0.001 | -0.026 | -0.007 |
| PC10  | 0.0346  | 0.005   | 6.735   | 0.000 | 0.025  | 0.045  |
| PC11  | -0.0156 | 0.005   | -2.991  | 0.003 | -0.026 | -0.005 |
| PC12  | -0.0796 | 0.005   | -15.327 | 0.000 | -0.090 | -0.069 |
| PC13  | 0.0340  | 0.005   | 6.302   | 0.000 | 0.023  | 0.045  |

で導入した対数関数 ( $y = \log(t+1)$ ), 傾き正の 1 次関数 ( $y = t$ ) は曲の概括的な音楽的緊張の推移を簡易的に表すことが可能であると言える。またこの事実より, 人が曲を聴いている時は, 大域的に見ると音楽的緊張は上昇傾向にあると考えることができる。PC1 を見ると, 音高, 最高音, 最低音, 平均値というメロディの音の高さに関する特徴量が音楽的緊張に強く影響していると言える。これは従

来研究を支持する内容である。PC4 を見ると, メロディ期待値, 上に凸の 2 次関数 ( $y = -(t-a)^2$ ), 和声が音楽的緊張に強く影響していると言える。メロディ期待値に関しては従来研究を支持する内容となった。上に凸の 2 次関数 ( $y = -(t-a)^2$ ), 和声に関しては, 本研究で導入した特徴量が大きく貢献したことが明らかになった。PC5 を見ると, ローカルテンポ, 非和声音, 和声, 上に凸の 2 次関数 ( $y = -(t-a)^2$ ) が音楽的緊張に強く影響していると言える。ローカルテンポに関しては従来研究を支持する内容となった。また, 本研究で導入した非和声音は音楽的緊張モデルに大きく貢献したと考えられる。PC6 を見ると, メロディ期待値, 上に凸の 2 次関数 ( $y = -(t-a)^2$ ) が音楽的緊張に強く影響していると言える。これも同様に従来研究と本研究の特徴量を支持する内容となった。

PC1, PC2, PC4, PC5, PC6 に続いて影響が高い主成分は PC3, PC7 などである。PC3 を見ると, ローカルテンポ, 密度, 非和声音, 和声が音楽的緊張にやや影響を及ぼすことが確認できる。また, PC7 を見ると, 傾きが音楽的緊張にやや影響を及ぼすことが確認できる。

## 5.2 精度が低い楽曲の特徴

交差検証の結果, 精度が悪かった曲の特徴について考察する。まず, (2) All You Need Is Love については, 全体を通して変拍子の曲であり他の曲と異なるものであったと考えられる。また, 曲の終盤に同じフレーズを長く繰り返した後, 急に違うフレーズを入れ, また同じようなフレーズを曲が終わるまで単調に繰り返すという展開があった。図 3 の実験値を見ると, 170 秒から 200 秒にかけて音楽的緊張の値が下降している。このとき, 楽譜上では同じフレーズが何度も繰り返されていた。200 秒から 220 秒あたりの実験値を見ると, 音楽的緊張の値が上昇している。このとき, 楽譜上では新しいフレーズが出現していた。220 秒から曲の終わりまでの実験値を見ると, 音楽的緊張の値が下降している。このとき, 楽譜上では同じフレーズが単調に何度も繰り返されていた。このような結果から, 同じフレーズの繰り返しは音楽的緊張の値を下降させていると考えられる。同じフレーズを繰り返すのも他の曲にはない特徴である。以上の原因から音楽的緊張の実験値と推定値が大きく外れる結果となったと考えられる。(5) The Long And Winding Road については, 図 7 の実験値を見ると, 曲の開始から 150 秒経過したあたりから音楽的緊張の実験値が急激に上昇している。このとき, 楽譜上では今までに出現していなかったフレーズが新たに出て現れている。この予測外のフレーズが出現するという展開が音楽的緊張の実験値を上昇させた可能性がある。Meyer の主張する「予測と裏切り」による音楽的緊張への影響を踏まえると, 「一般的な曲は拍子が一定なのに対し, 聴取した曲が変拍子である」ことや, 「一般的に曲中では似たフレーズが繰り返し展

開するのに対し、途中で新しいフレーズが盛り込まれている」など、これらの特徴は音楽的緊張を高めるために有効であったと考えることができる。今回導入した特徴量は、変拍子やフレーズの単調さという楽曲の特徴を含んでいなかったため、予測値が大きく外れた可能性が考えられる。

## 6. おわりに

本研究の目的は、音楽的緊張のモデルを構築し、音楽が情動を引き起こす仕組みを「緊張」という観点から解くことである。従来研究で提案されている音楽的緊張に寄与する特徴量について再検討し、延長的簡約木に代わる新たな特徴量をモデルに導入した。また多重共線性の影響を考慮するために主成分回帰を行い、新たな音楽的緊張の線形予測モデルを構築した。ビートルズの楽曲5曲に対して、交差検証を行い当該モデルの精度を測定した結果、精度が一番良い曲は決定係数の値が0.755であった。また、モデルの回帰係数を確認したところ、本研究で導入した特徴量が大きく貢献していた。新しく簡易的に設定した特徴量で、従来研究の特徴量に代わる役割を果たすことが可能となった。精度が低い楽曲の特徴について考察を行ったところ、フレーズの単調さや変拍子など、音楽的緊張に関与していると考えられる新たな特徴量の発見が得られた。今後の展望として、まずは曲数を10曲まで増やして交差検証を行う。学習データが増えるにつれて予測の精度がどのように変わるかを観察したい。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、丁寧かつ熱心なご指導・ご教授を賜りました寺井あすか准教授に心より感謝申し上げます。本研究はJSPS 科研費 16H01744 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Ball, Philip.: The Music Instinct: How Music Works and Why We Can't Do Without It. London, Bodley Head (2010). 夏目大 (訳) : 音楽の科学: 音楽の何に魅せられるのか?, 河出書房新社.
- [2] Bigand, E., Parncutt, R., & Lerdahl, F.: Perception of musical tension in short chord sequences: The influence of harmonic function, sensory dissonance, horizontal motion, and musical training, *Perception & Psychophysics*, Vol.58, No.1, pp.125-141 (1999).
- [3] Farbood, M. M.: A Quantitative, Parametric Model of Musical Tension, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology (2006).
- [4] Farbood, M. M.: A global model of musical tension, *Proc. the 10th International Conference of Music Perception and Cognition*, pp.690-695 (2008).
- [5] Gabrielsson, A.: Emotion perceived and emotion felt: Same or different?, *Musicae Scientiae, Spec Issue*, 2001-2002, 123 - 147 (2002).
- [6] Hevner, Kate.: The affective character of the major and minor modes in music, *The American Journal of Psy-*

- chology*, Vol.47, No.1, pp.103-118 (1935).
- [7] Hindemith, Paul.: A composer's world, Anchor, Garden City, New York, (1961).
- [8] Huron, David Brian.: Sweet anticipation: Music and the psychology of expectation, MIT press, (2006).
- [9] Jehan, T.: Creating music by listening. Diss. Massachusetts Institute of Technology, School of Architecture and Planning, Program in Media Arts and Sciences (2005).
- [10] Kivy, Peter.: Music alone: Philosophical reflections on the purely musical experience, Cornell University Press, (1991).
- [11] Krumhansl, C. L.: A perceptual analysis of Mozart's Piano Sonata K. 282: Segmentation, tension, and musical ideas, *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, Vol.13, No.3, pp.401-432 (1996).
- [12] Lerdahl, F.: Tonal pitch space, Oxford University Press (2004).
- [13] Lerdahl, F., & Krumhansl, C. L.: Modeling tonal tension, *Music Perception, An Interdisciplinary Journal*, Vol. 24, No. 4, pp.329-366. (2007).
- [14] Margulis, E. H.: A model of melodic expectation, *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, Vol.22, No.4, pp.663-714 (2005).
- [15] Meyer, Leonard B.: Emotion and meaning in music, University of Chicago Press, (1956).
- [16] Meyer, Leonard B.: Explaining music: Essays and explorations, Univ of California Press, (1973).
- [17] 大村英史, et al.: 音楽情動研究の動向: 歴史・計測・理論の視点から, *日本音響学会誌* Vol. 69, No. 9, pp.467-478, (2013).
- [18] Plutchik, Robert.: The nature of emotions: Human emotions have deep evolutionary roots, a fact that may explain their complexity and provide tools for clinical practice, *American scientist*, Vol. 89, No.4, pp.344-350, (2001).
- [19] 東条敏, 平田圭二: 音楽・数学・言語: 情報科学が拓く音楽の地平, 近代科学社 (2017).