



Title	音楽における調性的期待：事象関連脳電位からわかること
Author(s)	石田, 海; 入戸野, 宏
Citation	心理学評論. 2023, 66(2), p. 193-214
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/93351
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

音楽における調性的期待：事象関連脳電位からわかること

What Event-Related Brain Potentials Tell Us

About Tonal Expectancy in Music

石田 海・入戸野 宏

(大阪大学)

Kai ISHIDA and Hiroshi NITTONO

(Osaka University)

Abstract

2 Mental representations of musical regularities such as tonal
3 regularities (e.g., musical scale and rule of functional harmony
4 in Western tonal music) are thought to be sustained
5 representations that apply beyond specific tunes. Behavioral and
6 neuroscience studies have shown that the tonal representations
7 cause schematic expectancies in listeners. Event-related brain
8 potentials (ERPs) with high temporal resolutions are used to
9 measure differences between violations and non-violations of
10 expectancies as neural correlates of tonal expectancy. This paper
11 reviews ERP studies and discusses the information processing
12 content reflected in ERPs (e.g., early right anterior negativity:
13 ERAN; mismatch negativity: MMN). Future directions and
14 remaining issues on the use of electrophysiological measures to
15 understand tonal expectancy processing have also been discussed.

16
17 ***Keywords:*** early right anterior negativity (ERAN), tonal
18 expectancy, music perception, harmony, event-related potential
19 (ERP)

1 要旨

2 調性規則のような音楽的規則性の心的表象（例えば、西洋音楽に
3 おける音階や機能和声の規則）は、特定の楽曲を超えて適用される
4 持続的な表象として考えられている。行動的研究や神経科学的研究
5 は、これらの調性表象が、聞き手にスキーマ的期待を生じさせるこ
6 とを示してきた。時間解像度の高い脳波の事象関連電位 (event-
7 related potential: ERP) を用いて、調性的期待が逸脱した場合と逸脱
8 していない場合の差分を、期待の神経相関として測定してきた。本
9 稿は、調性的期待の逸脱によって生じる ERP を記録した研究をレビ
10 ューし、それらの ERP (例えば, early right anterior negativity: ERAN;
11 mismatch negativity: MMN) に反映される情報処理過程の内容を議
12 論する。電気生理学的手法を用いた調性的期待の理解についての今
13 後の方向性と残された課題を示す。

14

15 キーワード：右前部初期陰性電位、調性的期待、音楽知覚、和声、
16 事象関連電位

17

18

1. はじめに

わたしたちは、聴こえてきた音を体制化することで音楽を知覚し、次の音を予測するという、動的な聴取を行っている (Vuust et al., 2022a)。わたしたちが予測を行っていることには、音楽が意外な展開を示したときや、楽曲で演奏者がミスした場合などに気づくことができる。例えば、よく知っている旋律でピッチやタイミングに間違いが起こると、皮質レベルで逸脱反応が生じ、主観的にも一致していないと感じられる (Besson & Faïta, 1995; Miranda & Ullman, 2007; Nittono et al., 2000)。一致していない感覚が生じるのは、私たちが、それまでに入力された音楽文脈から音楽構造を知覚し、文脈的にもっともらしい音を期待しながら音楽を聴取しているからだと考えられる。期待には、記憶に基づいて生成されるものや (Miranda & Ullman, 2007), 音楽の規則表象に基づいて生成されるものなどがある (Koelsch et al., 2000)。音楽聴取時の予測過程は、行動的研究や神経科学的研究により示されてきた (行動的研究: Bigand et al., 2003; Marmel, Tillmann, & Dowling, 2008; 神経科学的研究: Koelsch et al., 2000, 2007; Seger et al., 2013)。予測的な情報処理は、音楽知覚における局所的または大域的な要素間統合 (統語構造の処理) や (Koelsch et al., 2013), 音を介した運動の同期 (Keller & Koch, 2008), 審美性判断 (Jaśkiewicz et al., 2016) のベースとして考えられてき

1 た (Rohrmeier & Koelsch, 2012)。また, Meyer (1956) は, 音楽における緊張の高まりと解放によって情動が生じると考察するなかで, 3 音楽の知覚・認知過程に予測がかかわっていることを示唆している。

4 本稿では, 音楽の期待のうち, 調性的期待について検討した研究 5 を概観する。調性的期待は, 古くは音楽理論に基づく解釈が行動実 6 験によって検証され, 2000 年代以降から, 神経科学的手法による研 7 究が盛んにすすめられてきた。次節以降では, まず, 調性的期待を 8 主観・行動指標により検討した研究をレビューしながら, 調性的期 9 待とはどのようなもので, どのように生じると考えられてきたかを 10 まとめめる。次に, 神経反応 (主に脳波) を指標に調性的期待を検討 11 した研究をレビューし, 事象関連電位 (event-related potential: ERP) 12 に反映される情報処理の内容から調性的期待にかかわる心的過程を 13 議論する。これらの議論を通して, 調性的期待の情報処理過程につ 14 いて, ERP 研究から示唆されることを整理し, ERP を指標とした調 15 性的期待過程の研究の展望を示す。なお, 本論文ではさまざまな音 16 楽理論に関する専門用語が使われる。その都度, 簡単な説明を加え 17 たが, より詳しい説明を付録にまとめたので参照していただきたい。

18

19 2. 調性の心的表象

20 音階とは, ある音から 1 オクターブの範囲に存在する音が, 規則

1 的に配列された音列を指す。調性とは、ある音が起点（中心音）と
2 して感じられ、その中心音をもとに音階が形成された状態を指す
3 (東川, 2017)。例えば、ピアノの白鍵だけを考えたとき、C 音を起点
4 として 1 オクターブ高い C 音までの音列が、C major の音階（長音
5 階）となり、C major の調性が感じられる。ここで、中心音は音階の
6 起点、すなわち主音となる C 音である。より詳細な解説は付録の 1
7 節から 3 節を参照してほしい。

8 調性的期待は、聴取者が保持している調性表象から生じると考え
9 られてきたが、その心的表象は、特定の音を参照点としてそれぞれ
10 の音が階層的に体制化されたものであることが示されてきた。例え
11 ば、Krumhansl and Shepard (1979) は、先行提示された音階に含まれ
12 る音がプローブ音として提示されると、非音階音が提示される場合
13 より、その音階がよりよく終止（完結）したと感じられることを示
14 した。さらに、その音階音のなかでも、調性の中心音（C major では
15 C）はもっとも強い終止感を与えることや、中心音を根音（3 和音の
16 構成音のうち一番低い音）として長三和音を構成する第 3 音（C
17 major では E）と第 5 音（C major では G）は、中心音の次に強い終
18 止感を与えることを示した。ピッチごとに終止感が異なるという結
19 果は、音楽的ピッチが文脈特有な調性的機能（トニックやドミナン
20 トなどの機能）の階層性に従って知覚されていることを支持する。

1 調性文脈におけるピッチ同士の心理的な関連度を反映して、心理
2 的な距離が生まれることも示されている。Krumhansl and Kessler
3 (1982) は、参加者に、先行提示した音楽刺激とプローブ音 (C-B の
4 半音階 12 音) の一致度を主観的に評定することを求めた。得られた
5 評定値を多次元尺度構成法で分析すると、西洋の音楽理論と対応す
6 るように、相互の心的関連度に応じて調が分布する構造 (調性地図)
7 が見いだされた。調性内の音の関係や調性同士の関係は、心理的な
8 距離をもとに構造化されており、このような構造を、調性的階層性
9 とよぶ (Krumhansl, 1990, 1991; Krumhansl & Keil, 1982; West & Fryer,
10 1990)。

11

12 3. 調性的期待

13 3.1 本稿における調性的期待の定義

14 音楽の予測メカニズムには、音楽聴取時にその場で即座に形成さ
15 れる短期表象に基づく動的期待 (dynamic expectations) や、より長
16 期的な可塑性や学習によるスキーマ的期待 (schematic expectations)
17 などがある (Vuust et al., 2022a)。本稿では、調性的期待をスキーマ
18 的期待の一種として定義し、その場で形成される一時的な表象によ
19 る動的期待と区別して、「調性表象に基づいて聴覚入力を体制化して
20 知覚することで、現在の音楽文脈についての心的モデルが確立され

1 た結果生じる、次の聴覚入力についてのスキーマベースの期待」と
2 定義する。ここで、「期待 (expectancy)」、「予期 (expectation)」、「予
3 測 (prediction)」という用語を、Rohrmeier and Koelsch (2012) に従
4 って、図 1A のように区別する。期待とは、何かが起こることを待
5 ち受けている状態や処理過程を示す概念として用いる。なお、Vuust
6 et al. (2022a) では、主観的な経験として期待 (anticipation) を定義
7 しているが、心理状態としての anticipation に対して、より広義の期
8 待状態が expectancy にあたると解釈できる。予期とは、起こると予
9 測された事象の内容を示す概念として用いる。予測とは、未来志向
10 の情報処理全般を指す概念として用いる。

11 次に、不一致事象を意味する用語を定義する。実験で操作される
12 不一致と聴取者が感じる逸脱感は、完全な対応関係にあるとは限ら
13 ない。そのため、実験的操作とその結果感じられる主観的な感覚と
14 しての不一致を、図 1B のように、本稿独自の定義によって区別す
15 る。客観的に定義できる音楽理論にもとづいた規則と、実際に起
16 った事象との不一致には「不規則性 (irregularity)」を用いる。不規
17 則性は、聴取者が逸脱と感じるかにかかわらず、実験操作における
18 不一致を意味する。一方で、聴取者が生成した予期と実際に起
19 った事象との不一致には「逸脱 (violation)」を使用する。逸脱は、主
20 観的な感覚としての不一致を強調する用語として用いる。

1

図 1

2

3 3.2 調性的期待の存在

4 本節では、実験心理学の分野で提案されてきた、調性的期待に関する
5 知覚・認知のモデルを概観する。調性的期待を喚起する音楽の
6 要素として、ピッチが時間的・空間的に体制化されてできる旋律や
7 和音がある。多くの研究では、旋律や和音進行において、調性的な
8 期待を逸脱させるために音楽理論的に正しくない音を提示し、その
9 ときには得られた主観評定や逸脱検出の反応時間などを指標に、音楽
10 の知覚・認知過程を検討してきた。本節では、旋律と和音に関する
11 2つの代表的な調性的期待過程の心理学的モデルを取り上げる。

12 旋律の期待生成過程に関する有名な理論に Implication-
13 Realization (IR) 理論がある (Narmour, 1991)。IR 理論では、旋律の
14 期待には、生得的で普遍的な知覚法則によるボトムアップ処理と、
15 形式的な知識の獲得によって影響されるトップダウン処理の2つの
16 処理システムがかかわっていると提案している (Narmour, 1991)。ボ
17 トムアップ処理では、生得的なゲシュタルトの諸要因に基づく知覚
18 的グルーピングが行われると、旋律内の2つの音程の関係が定めら
19 れ、旋律の期待が生じると想定している (Krumhansl, 1995;
20 Schellenberg, 1996, 1997; Thompson, Cuddy, & Plaus, 1997)。つまり、

1 どのような音が提示されるのかは、直前の音程によって暗示されて
2 いると考えられている。参加者の音楽経験や音楽文化の差異によら
3 ないこのようなボトムアップの情報に加えて、調性的階層性の知覚
4 にかかわるトップダウンの情報も、旋律の期待に同時に影響してい
5 ると考えられている (Cuddy & Lunney, 1995; Krumhansl, 1995)。例
6 えば、Bigand (1997) の実験 1 では、調性文脈が各音の機能 (特定の
7 調における音の機能、例えば調の中心音など) の知覚に影響すること
8 を報告している。実験では、共通の位置に同じターゲット音を持
9 つ 2 種類の調の旋律 (それぞれト長調とイ短調として知覚された)
10 を提示すると、ターゲット音に対して知覚される調的な安定性
11 (stability) の主観評定値が調性文脈に応じて変化した。具体的には、
12 イ短調として知覚された 1 つ目の旋律で A の音 (イ短調ではトニッ
13 ク) が提示されると、ト長調として知覚された 2 つ目の旋律で同じ
14 音が提示された場合 (ト長調ではスーパートニック) に比べて、評
15 定値が高くなった。このような旋律の期待に対する調性表象の影響
16 は、IR 理論におけるボトムアップ要因などの知覚的影響が統制され
17 た場合にもみられ (Marmel et al., 2008), スキーマベースの調性的
18 期待の存在が支持される。

19 和音における期待は、調性文脈のもとでの和音間の機能的な関係
20 性に基づいて生じる (Butler & Brown, 1984; Krumhansl & Kessler,

1 1982)。和音文脈において調性的期待が生じる過程について、
2 Bharucha (1987) の活性化拡散モデルによる説明が、和音プライミング
3 課題を用いた検討により支持されてきた (Sears et al., 2019;
4 Tillmann, Bigand, & Pineau, 1998; Tillmann & Marmel, 2013)。Bharucha
5 and Stoeckig (1987) は、プライム和音とターゲット和音を継時提示
6 し、ターゲット和音のチューニングが正しいか正しくないかを参加
7 者に判断させた。その結果、2つの和音の調性的関連度が高いほど、
8 正しくチューニングされたターゲット和音に対する判断時間が短い
9 ことが分かった。活性化拡散モデルによると、調性的関連度が高い
10 調のノードが互いにリンクで結合されており、特定の調が活性化さ
11 れると、関連度の高い調の表象から順に活性化されるため、関連す
12 る音に対する反応が促進された結果だと考えられる。こうしたプライ
13 ミング効果は、曲が終止することへの期待ではなく、調性的な安
14 定性の知覚自体によって生じている可能性も示されている
15 (Tillmann & Marmel, 2013)。

16 感覚的なプライミング効果を統制した場合でも和音プライミング
17 効果は生じる。一般的に、プライムとして提示される調性文脈と関
18 連度が高い和音は、関連度が低い和音と比べて、先行文脈に既に出
19 現したピッチを含んでいることが多い。Bigand et al. (2003) はピッ
20 チの共通性によって起こる感覚的プライミング効果を統制したうえ

1 でも、和声機能の表象に基づく和音のプライミング効果が起こること
2 を報告した。この結果は、感覚的・知覚的処理のレベルよりも高
3 次な和声についての心的表象によって和音プライミングが起こっていることを示唆しており、調性表象に基づいた調性的期待の存在を
4 支持する。

5

6 7 4. 事象関連電位を指標とした調性的期待の研究

8 脳は、連続的に提示されていた音の消失 (Horváth et al., 2010) や
9 体性感覚入力の変化 (Shinozaki et al., 1998), 課題遂行におけるエ
10 ラー (Hajcak et al., 2005) などの様々な逸脱事象に対して神経反応
11 を生じさせる。これらの逸脱反応が、情報処理の観点から考察され
12 てきた。調性的期待からの逸脱を検討した神経科学的な研究では、
13 期待の逸脱時の脳波や血中酸素濃度依存 (Blood Oxygen Level
14 Dependent: BOLD) 信号を記録し (Brattico et al., 2006; Ruiz, Koelsch,
15 & Bhattacharya, 2009; Seger et al., 2013), 調性的期待から逸脱した
16 場合から逸脱していない場合を引いた神経反応の差分を、調性的期
17 待の神経相関 (neural correlate) としてきた。音楽は時間的に展開し
18 ていく聴覚事象であるため、神経活動から数秒遅れて生じる BOLD
19 信号 (血中酸素濃度に依存した信号で、その脳領域の活性化の指標
20 となる) よりも、即時的な電気信号、すなわち脳波や脳磁図での検

1 討が適している。そのため，本稿では脳波，特にERPを指標とした
2 研究を中心にレビューする。ERPは刺激の提示に時間的に関連して
3 生じることから，心理学においては，特定の刺激に関する情報処理
4 の指標として用いられる（入戸野，2005）。ERPは，ある事象を起点
5 として生じる脳の電位変化であり，時間ごとに異なる部位や極性で
6 生じる複数の波から構成される。それぞれの波を成分（component）
7 とよぶ。大まかに，初期の成分は知覚処理を，後期の成分はより認
8 知的な処理を反映すると考えられている。ERPを測定することで，
9 特定の事象に対する情報処理のタイムコースを検討することができ
10 る。

11

12 4.1 旋律のピッチ逸脱に対する神経反応

13 旋律文脈において生じる調性的期待から逸脱した音は，刺激に注
14 意していない場合であっても，皮質における聴覚処理の初期段階で
15 前注意的に検出されることが，ERP研究から示されている（Carrus,
16 Pearce, & Bhattacharya, 2013; Chabin, Pazart, & Gabriel, 2022; Fujioka
17 et al., 2005; Marie et al., 2012; Marmel, Perrin, & Tillmann, 2011;
18 Mencke et al., 2021; Miranda & Ullman, 2007; Tew et al., 2009; レビ
19 ューとして，Yu, Liu, & Gao, 2015）。例えば，Brattico et al. (2006)
20 では，旋律の構成音を，低頻度 ($p = .25$) で非音階音に変えたり，

1 ミスチューニングさせたときの ERP 反応を記録した。ある調の音階
2 に含まれない非音階音や、半音の半分の音程（四分音）であるミス
3 チューニング音が提示されると、180 ms 付近で前頭部優勢のミスマ
4 ッチ陰性電位（mismatch negativity: MMN）が生じた。MMN は、音に
5 注意しているかどうかにかかわらず、聴覚的な不規則性が起こった
6 タイミング（オンセット）から潜時約 100–250 ms で生じ、前頭部優
7 勢の陰性電位として記録される（Fishman, 2014; Näätänen et al.,
8 2007）。MMN は、周波数、音圧、持続時間、音源などの音響的特徴
9 の次元で、先行する文脈と異なる音が提示されると生じる
10 （Näätänen, Jacobsen, & Winkler, 2005; Pakarinen et al., 2007）。したが
11 って、前注意的な聴覚的不規則性の検出や、聴覚文脈から抽出した
12 規則表象をベースとした予測誤差信号の指標として解釈される
13 （Lumaca et al., 2019; Sussman et al., 2014; Wacongne, Changeux, &
14 Dehaene, 2012）。

15 Brattico et al. (2006) の、非音階音やミスチューニング音で MMN
16 が生じた結果は、聴取者がある音階表象を形成しており、それに基
17 づいて予測を行いながら旋律を知覚し、期待から外れた音、すなわ
18 ち音階に含まれない音を前注意的に検出したためだと解釈できる。
19 しかし、Brattico et al. では、非音階音とミスチューニング音をオリ
20 ジナルの正しい音に比べて低頻度で提示しているため、提示確率に

1 差が生じており、非音階音に対する知覚的顕著性も異なっていた
2 (Kalda & Minati, 2012)。他のいくつかの研究は、旋律のターゲット
3 位置において、非音階音と音階音を同じ確率で提示し、提示頻度を
4 統制したうえでも、非音階音に対する逸脱検出反応（後述する
5 ERAN）が生じることを報告している (Kalda & Minati, 2012;
6 Miranda & Ullman, 2007)。このようなERP研究の知見から、調性表
7 象から生成された予期と入力された音との比較が 200 ms 前後まで
8 になされていることが示唆される。

9

10 4.2 和声的な逸脱に対する神経反応

11 調性音楽における和音の配置は、階層的な調性文脈において個々
12 の和音がもつ機能によって定められている (Bharucha & Krumhansl,
13 1983; Krumhansl, 1983)。こうした規則は、西洋の音楽学においては
14 和声とよばれ、個々の要素をより大きな構造へと位置づける規則と
15 みなされることから、音楽の統語とよばれる (Asano & Boeckx,
16 2015)。図 2A にまとめたような、階層的な統語構造をもつ音楽につ
17 いて、音楽の統語を参照して、和音などの個々の音楽的要素を統合
18 的に知覚することを、音楽の統語処理とよぶ (Patel, 2003)。調性的
19 期待には、MMN に反映されるような音階表象に基づく期待に加え
20 て、より階層的な規則性がかかわる統語処理に基づく期待も含まれ

1 る。

2

図 2

3 音楽の統語処理を反映する ERP 成分である右前部初期陰性電位

4 (early right anterior negativity: ERAN) は, Koelsch et al. (2000) で

5 初めて報告された。実験では, 音楽訓練歴のない非音楽家を対象に,

6 5 つの四声体和音で構成された和音系列の 3 番目と 5 番目の位置で

7 統語的不規則性 (和声的不規則性) をそれぞれ低頻度 ($p = .25$) で

8 起こしたときの ERP 反応を記録した。Koelsch et al. (2000) で用い

9 られた刺激の例を図 2B に示し, 各和音の機能については, 付録の 4

10 節「機能和声」で補足した。例えば, 系列はトニック (C major では

11 C-E-G) で始まり, 3 番目の位置ではサブドミナント機能 (C major

12 では F-A-C など) の和音などが配置され, 5 番目の位置にはトニッ

13 ク機能の和音 (直前にトニックへの連結を強く期待させるドミナン

14 ト機能 (C major では G-B-D) の和音が配置された) が配置されて

15 終止した。統語的に不規則な和音として, ナポリの和音 (C major で

16 は D♭-F-A♭) が提示された。ナポリの和音は, サブドミナント機

17 能に属し (Piston, 1959), C major の音階に含まれない非音階音を 2

18 つ含む。ナポリの和音の詳細な説明は, 付録の 4 節「機能和声」を

19 参照してほしい。統語的に正しくない音が提示されてから潜時 150-

20 250 ms で, 右前頭部優勢の陰性電位が生じた。言語の統語的不規則

1 性で生じる左前部初期陰性電位 (early left anterior negativity:
2 ELAN; Koelsch & Friederici, 2003 を参照) と類似しているこの成分
3 は、ERAN とよばれた。Koelsch et al. (2000) が和声的な期待、すな
4 わち調性的期待からの逸脱で生じる ERAN を報告して以降、ERAN
5 は音楽の統語処理を反映する代表的な電気生理学的指標とされてき
6 た (Koelsch et al., 2003, 2007; Zhang et al., 2018)。

7

8 4.3 ERAN の性質

9 本論文で定義したスキーマベースの調性的期待は、聴取者が保持
10 している音楽の統語表象に基づく期待からの逸脱で生じる ERAN
11 に反映されると考えられる。本節以降で詳細に議論する ERAN の性
12 質が把握しやすいように、表 1 に、ERAN を指標とした研究と、そ
13 の実験で用いた逸脱の種類をまとめた。文献データベース PubMed
14 と CiNii において、"ERAN chord" (PubMed: 38 件; CiNii: 11
15 件), "ERAN melody" (PubMed: 9 件; CiNii: 3 件) をキーワードに検
16 索した結果から、評論を除いた査読あり論文 51 件 (PubMed と CiNii
17 の重複を考慮) を悉皆的にまとめた (検索日は、2022 年 9 月 14 日)。

18

表 1

19 ERAN が音楽の統語処理、特に機能和声における不規則性を反映
20 した指標であることの根拠となる代表的な特徴として、位置によっ

1 て和声的な逸脱度を操作した場合にその振幅が変動することが知ら
2 れている。例えば、5つの和音で構成された和音系列を刺激とした
3 場合、5番目のナポリの和音に対して生じたERANは、3番目のナ
4 ポリの和音に対して生じたERANより大きな陰性の振幅を示す
5 (Koelsch et al., 2000, 2001; Koelsch, Schmidt, & Kansok, 2002;
6 Koelsch, Schröger, & Gunter, 2002)。この現象について、2つの観点
7 から説明することができる。1つ目は、調性文脈のなかで和音が進
8 行していくにつれ、調性のモデルが確立され、和声的安定性が強化
9 され、次に提示される和音の予期が明確になっていったためである
10 と考えられる。調性文脈が確立され、特定の和音に対してより強い
11 期待が生じたことで、非音階音を含む和音の提示が、より大きな調
12 性的期待の逸脱となつたと考えられる。この場合、調性文脈の確立
13 に基づく期待と、楽曲の終止に関する期待の逸脱が影響した可能性
14 もある (Leino et al., 2007)。

15 2つ目は、機能和声における不規則性が影響した可能性である。5
16 番目の和音は、ドミナントに続いて提示されたため、トニック和音
17 に対する強い期待を生じさせたが、3番目の和音は先行和音がドミ
18 ナントではなかつたため、特定の和音に対する強い期待を生じさせ
19 なかつたと考えられる。さらに、この位置では、サブドミナント機
20 能の和音が置かれることが自然であることから、サブドミナント機

1 能に分類されるナポリの和音は、和音系列の3番目に置かれるより
2 も5番目に置かれた場合に、より大きな逸脱として検出されていた
3 と考えられる。機能和声に基づく逸脱度を反映したERAN振幅の変
4 動は、Garza-Villarreal et al. (2011) や Leino et al. (2007) でもみら
5 れる。

6 ERANは単純な和音系列だけでなく、ネスト構造を示す階層的で
7 複雑な和声系列や (Koelsch et al., 2013; Ma et al., 2018a; Zhang et
8 al., 2018), 実際の楽曲において統語的不規則性を起こした場合にも
9 生じる (Koelsch et al., 2008; Koelsch & Mulder, 2002; Steinbeis,
10 Koelsch, & Sloboda, 2006)。ERANには、和音と和音の連結を規定す
11 る規則性についての局所的な統語処理だけでなく、統語構造において
12 離れた和音を構造的につなぐ大域的・階層的な統語処理の結果生
13 じる期待も反映される。具体的には、図2Aに示したようなABAの
14 ネスト構造について、後のAの終止和音として、前のAと同じ調の
15 トニック和音が提示されることで、前後のAの文脈が結合され、B
16 がネストされた全体構造を知覚することである。したがって、ERAN
17 を指標とすることで、音楽の知識などの表象に支えられた調性的期
18 待の過程を、広いレベルで検討することができる。それと同時に、
19 ERANが生じたときには、どのレベルにおける調性的期待の逸脱を
20 反映しているかを考察する必要があるだろう (Rohrmeier & Koelsch,

1 2012; 同様に表 1 参照)。

2

3 5. ERAN に反映される情報処理過程

4 5.1 ERAN に重畠するその他の電位

5 ERP 波形には、様々な情報処理を反映する複数の成分が時間的・

6 空間的に重畠して現れる。そのため、和声的な不規則性を起こせば、

7 必ずスキーマベースの調性的期待を反映した神経反応、すなわち

8 ERAN だけが記録されるというわけではない。例えば、Koelsch et al.

9 (2000) のように、非音階音を含むナポリの和音を提示すると、ある

10 調では出現しなかった新たなピッチ (例えば C major では、D ♭, A

11 ♭) を含むため、現在の調性文脈との感覚的不協和を反映した神経

12 反応が ERAN に重畠する可能性もある。先行研究における非音階音

13 の提示の有無を表 1 にまとめたが、「有」と示された研究の一部で

14 は、生じた ERP 反応に感覚的不協和が反映されている可能性がある。

15 新しいピッチの出現などの感覚的不協和 (sensory dissonance;

16 Koelsch et al., 2007) によって振幅変動を示す ERP 成分には、聴覚

17 N1 がある。聴覚 N1 は外因性の誘発電位で、前頭部から頭頂部にか

18 けて陰性電位として現れる (Näätänen & Winkler, 1999)。N1 は、潜

19 時約 100 ms でピークを示すが、130–170 ms 付近まで生じる場合も

20 あり (Woods, 1995), ERAN の潜時 (150–250 ms) と重なっている。

1 ERAN に重畠する N1 の影響を統制するためには、(1) 新しいピッチ
2 の出現数を統制する方法、(2) 同じ調に属する音だけで構成される
3 和音を使用する方法、(3) 和声的に不規則な和音に含まれる非音階
4 音を先行文脈に事前に提示しておく方法の 3 つがある。

5 その 1 つ目として、Koelsch et al. (2007) の実験 1 では、図 2C の
6 ダブルドミナント (DD) の和音を用いて、新規ピッチ (基本周波数)
7 の出現数を統制する方法により ERAN が記録された。新規ピッチを
8 2 つ含む (感覚的不協和が大きい) トニックを標準和音として提示
9 したときよりも、新規ピッチを 1 つ含む (感覚的不協和が小さい)
10 ダブルドミナント (C major では D-F#-A) を逸脱和音として提示し
11 たときに ERAN が生じることを示し、新規ピッチの出現数によらず、
12 和声的期待の逸脱反応が生じることが示された。ただし、ダブルド
13 ミナントは、その文脈の調には含まれない非音階音を含むため、新
14 規ピッチクラス (トーン・クロマ) による感覚的不協和が影響して
15 いる可能性があった (C major の場合、黒鍵にあたる F#)。

16 そこで、2 つ目の方法として、Koelsch et al. (2007) の実験 2 では、
17 逸脱和音として、図 2C 上に示した同じ調に属する音 (ピッチクラ
18 ス) だけで構成されるスーパートニックの和音 (ST: C major では
19 D-F-A) を用いて、感覚的不協和の程度を逆転させたうえで ERAN
20 が記録された。新規ピッチを 2 つ含む標準和音と新規ピッチを 1 つ

1 含む逸脱和音（同じ調の和音）を刺激として提示すると、標準和音
2 よりも先行する和声文脈と感覚的により一致していたにもかかわら
3 ず、逸脱和音に対して ERAN が生じた。生じた ERAN は、知覚的・
4 感覚的な影響による N1 や、周波数の出現頻度で生じた MMN とは異
5 なる ERP 成分だと解釈できる。しかし、複雑な和音や転調を含む実
6 際の音楽を用いて、より現実的な状況で調性的期待を検討する場合
7 には、非音階音を含んだ和音に対する ERAN 反応を記録する必要も
8 ある。

9 そこで、3つ目に、図 2C 下に示した刺激のように、和声的に不規
10 則な和音に含まれる非音階音を先行文脈に事前に提示しておく方法
11 がある。Koelsch and Sammler (2008) は、短い音楽系列の終止位置
12 に、和声的に正しくない和音として新規ピッチクラスを含むダブル
13 ドミナントを提示したが、作曲を工夫することで、先行文脈に新規
14 ピッチクラス (C major では F#) が出現するように刺激を作成し、
15 ダブルドミナントに対する感覚的不協和の程度を統制したうえで
16 ERAN を記録した。

17 以上の3つの方法を組み合わせることで、感覚・知覚レベルの処
18 理で生じる外因性の電位を統制したうえで、より高次の調性表象に
19 基づく期待からの逸脱で生じる ERAN を記録することができる。し
20 かし、感覚・知覚レベルの処理だけでなく、聴覚規則の処理にかか

1 わる内因性の MMN 成分も, ERAN に時間的に重畠することがある。

2

3 **5.2 ERAN と MMN に反映される期待過程の異同**

4 ERAN と MMN は, 類似した神経反応であるだけでなく (潜時 150-

5 250 ms 付近で前頭部優勢に生じる), 聴覚的不規則性の検出を反映

6 するという点でも類似している。どちらも, 調性的期待の逸脱の指

7 標となりうる ERP であるが, 異なるレベルの規則に基づく調性的期

8 待を反映する。ERAN は音楽の知識やスキーマに基づく調性的期待

9 を反映する一方で, MMN は必ずしも事前知識を必要とせず, 現在の

10 聴覚文脈から抽出された短期的な規則表象に基づく期待の逸脱を反

11 映する。

12 実験操作に対する ERAN と MMN の応答性の違いを示した最初の

13 研究は, Koelsch et al. (2001) である。Koelsch et al. では, ERAN を,

14 周波数規則の逸脱に対して生じる MMN (physical MMN: 以降

15 phMMN とする) や, 抽象的な規則の逸脱で生じる MMN (abstract

16 feature MMN: 以降 afMMN とする) とは異なる成分であるとしてい

17 る。ERAN は和声的に不規則なナポリの和音の提示で, phMMN は低

18 頻度ピッチの提示で, afMMN はピッチが上昇する系列において, 低

19 頻度でピッチが下降するという不規則性で記録された。3 つの成分

20 は, 異なるブロックで, それぞれ 5 音で構成される系列の 3 番目と

1 5番目の2か所で起こる不規則性によって記録された。その結果、
2 和声的不規則性で生じたERANだけは、系列の位置によって異なる
3 逸脱度を反映して振幅がより大きくなったが(3番目 < 5番目),
4 phMMNやafMMNは、位置による振幅変動を示さなかった。ERAN
5 の振幅変動には調性文脈の確立が影響しており、和音文脈における
6 期待の逸脱度の違いが、ERAN振幅に反映された結果として解釈さ
7 れる(Koelsch et al., 2001)。このことから、ERANは、phMMNや
8 afMMNよりも複雑な調性文脈に即した処理を反映していると考察
9 されている(Leino et al., 2007)。

10 ERANがスキーマ的表象に依存し、MMNがリアルタイムで抽出さ
11 れた短期的な規則表象に依存していることから、統語規則に従った
12 音と従わない音を等確率で提示することで、すでに保持されている
13 統語規則の表象に基づく期待過程を検証することができる。Koelsch
14 et al. (2007)は、5和音の系列の最後の和音を、和声的に正しい/正
15 しくない和音に操作して作成した2種類の系列を等確率で提示した
16 場合にも、和声的に正しくない和音に対してERANが生じたと報告
17 している。等頻度提示では、各条件の和音は同じ回数提示されるた
18 め、現在の音響文脈からは、どちらの和音が規則的/不規則的である
19 のかは定まらない。現在の文脈から規則が抽出できないにもかかわ
20 らず、和声的に正しくない和音が逸脱として検出されるならば、そ

1 これは聴取者がすでに保持している音楽の規則表象に基づいた期待か
2 らの逸脱が反映されていたと考えられる。先行研究における刺激の
3 提示頻度を表 1 にまとめたが、統語的に正しくない音が低頻度で提
4 示されている研究では、MMN 成分が重畠している可能性がある。

5 また、ERAN と MMN は発生する脳領域にも違いがあると推測さ
6 れている。図 3 に示したように、ERAN と MMN は、どちらもシルビ
7 ウス溝周辺領域から生じる成分であるが、その発生源は完全には一
8 致しない。MMN は、前頭皮質の関与も一部あるが (Rinne, Degerman,
9 & Alho, 2005), 第 1 次聴覚皮質の上側頭回に主要な発生源があるこ
10 とが示されている (Korzyukov et al., 2003)。他方、音楽の統語的不
11 規則性に対する ERAN は、上側頭回の関与もあるが、主に下前頭回
12 に発生源が推定されており (Koelsch, Fritz, et al., 2005; Koelsch,
13 Gunter, et al., 2002; Maess et al., 2001), MMN に比べてより前頭側
14 に発生源があるようである。pMMN と afMMN の発生源が完全には
15 一致しないが同じ MMN 成分であるように (Korzyukov et al., 2003),
16 ERAN と MMN はどちらも聴覚的不規則性の検出処理を担う家族成
17 分 (family component) であると考えられる (Koelsch et al., 2001)。

18

19 5.3 ERAN と MMN に反映される情報処理過程

20 Koelsch (2009) に基づくと、ERAN と MMN に反映される予測過程

1 は以下のようにまとめられる。聴覚入力のあと、まずは、音響的側
2 面が処理され、特徴抽出が行われる。次に、聴覚規則をもとに聴覚
3 環境についてのモデルが確立され、そのモデルから次の入力が予測
4 される。実際の聴覚入力と期待した内容の比較において誤差が生じ
5 ている場合には、逸脱検出を反映した ERAN と MMN が生じる。ERAN
6 と MMN は、どのような規則表象に基づいた期待が反映されている
7 かという点で異なり、これらの成分は、それぞれが典型的な実験パ
8 ラダイムにより、記録されてきた。

9 まず、MMN の一般的な記録方法は、聴覚オドボール提示である
10 (Paavilinen et al., 2001; レビューとして, Sussman et al., 2014)。聴
11 覚オドボール提示では、2 種類の音のうち一方が高頻度で、他方が
12 低頻度でランダムに提示される。その結果、低頻度で提示される音
13 は、高頻度で提示される音に対するまれな事象 (oddball), すなわち
14 逸脱音として知覚され、MMN を生じさせる。つまり、その場で抽出
15 された規則性をもとに行われた予測の誤差信号として MMN が記録
16 される (Koelsch, 2009; Vuust et al., 2009; Wacongne, Changeux, &
17 Dehaene, 2012)。こうした MMN の特性を利用して、長調と短調の弁
18 別 (Virtala et al., 2011) が聴覚皮質の初期段階で行われていること
19 も示されている。しかし、この場合は、調性の弁別能力は聴取者が
20 もっている長調と短調の表象に依存するが、MMN が反映する逸脱

1 は，聴覚文脈における提示頻度に基づく規則性から生じた期待の逸
2 脱であり，調性表象から生じる期待の逸脱そのものではない。
3 一方で，ERAN は，統語的に正しい和音と正しくない和音が等確
4 率で提示され，その場で規則性が抽出されないような文脈で記録さ
5 れる。さらに，ERAN は，非音階音を含まない機能和声における不
6 規則性のみでも生じることから（例えば，ドミナントからスーパー
7 トニックへの進行），感覚的な不協和の程度によらず，音楽の統語な
8 どの調性表象に基づいて生じた期待からの逸脱を反映する。よって，
9 ERAN が反映する期待過程では，聴取者がすでに持っている音楽の
10 知識が利用されており，その機能的意義は，学習で獲得された調性
11 表象に基づく逸脱検出，すなわち予測誤差信号（Koelsch, 2009;
12 Koelsch et al., 2000; Koelsch, Vuust, & Friston, 2019）であると考え
13 られる。規則の種類の違いが ERAN と MMN に反映される情報処理，
14 すなわち機能的意義の違いであり（Garza-Villarreal et al., 2011;
15 Ishida & Nittono, 2022; Koelsch, 2009; Pagès-Portabella & Toro, 2020），
16 そのために，両成分に反映される調性的期待の性質に違いが生じる。

17 図 3
18 ERAN と MMN を直接比較した Ishida and Nittono (2022) をもと
19 に，2つの成分に反映される予測過程の違いを図 3 にまとめた。Ishida
20 and Nittono (2022) では 5 和音で構成された和音系列の最後の位置

1 で、音圧逸脱と和声逸脱を単独または同時に起こした。音圧逸脱で
2 は、5和音の系列中で1つの和音の音圧を小さくする低頻度逸脱を
3 起こすことで、その場で抽出された音響的規則性の処理を検討した。
4 和声逸脱では、和声的に正しい和音で終止する系列に対して、正し
5 くない和音で終止する系列を等頻度で提示することで、その場から
6 抽出された規則ではなく、保持されている調性表象に基づく音楽の
7 統語処理を検討した。同時に逸脱が起こると、ERANとMMNの振幅
8 が足しあわされたように加算的に増大した。予測誤差反応が加算的
9 に生じたことは、その場の聴覚文脈から抽出される規則表象とスキ
10 ーマ的な調性表象に基づく予測過程が並列に機能していることを示
11 喫する。

12

6. 調性的期待過程における逸脱検出後の処理

13 図3に示したように、予測誤差が output された後、入力音は聴覚文
14 脈の構造へと統合され、既存の聴覚文脈についてのモデルが更新さ
15 れると考えられる。予測誤差の大きい不規則的な音は、予測誤差の
16 小さい規則的な音に比べて、統合やモデル更新に要する処理負荷が
17 大きくなると考えられる。一般的な聴覚的規則性では、モデル更新
18 は、潜時300–600 msで生じるP300に反映されると考えられてきた
19 (Donchin & Coles, 1988)。一方、音楽の統語処理において行われる統

1 合処理は、ERAN が生じた後の潜時 400–850 ms 区間で前頭部優勢を
2 示す N5 成分に反映されると考えられてきた (Koelsch et al., 2000;
3 Zhang et al., 2018)。N5 は、ERAN が生じない場合であっても生じる
4 ことから、逸脱処理に限らない、より認知レベルの統合処理を反映
5 すると考えられている (Poulin-Charronnat, Bigand, & Koelsch, 2006)。
6 また、逸脱が含まれない和音系列の最初の和音から終止和音に向か
7 うについて、各和音に対する N5 振幅は減衰していくことが示され
8 ている (Koelsch et al., 2003)。N5 の振幅減衰は、和音進行が進むに
9 つれて、調性文脈の聴覚モデルがより安定的に確立されていくこと
10 で、入力された和音の和声文脈への統合の要求度や処理負荷が低下
11 していくことに対応した反応だと考えられている。

12 N5 はさらに、内音楽的な意味処理を反映すると考えられている
13 (Koelsch 2011a, 2011b)。内音楽的意味とは、ある音楽的要素が、別
14 の音楽的要素を参照することで生じる意味である。例えば、C の音
15 は、C major の文脈ではトニック機能となるように、調性文脈において
16 他の音との相対的な関係性によって、ある音の内音楽的意味が定
17 まる。ここで、和声的に不規則な音、すなわち、関係性から予測され
18 にくい音の提示時は、内音楽的意味の処理負荷が高くなり、N5 振
19 幅がより大きくなると考えられている (Koelsch, 2011a)。
20 一方で、音楽的統語の不規則性が起こった時に生じる後期成分と

1 して P600 が報告されることもある (Lagrois, Peretz, & Zendel, 2018;
2 Peretz et al., 2009; Zendel & Alexander, 2020; Zendel et al., 2022)。
3 言語と音楽の刺激において統語的不規則性を起こした場合に、両方
4 の不規則性に対して潜時 450–700 ms 前後で生じる P600 (頭頂部優
5 勢) を報告した Patel et al. (1998) は、P600 を言語と音楽に共通の
6 モデル更新の処理を反映する成分として解釈した。

7 N5 と P600 は、統合処理やモデル更新という類似した処理を反映
8 すると考えられてきたが、両成分の関係は明らかになっていない。
9 Featherston et al. (2013) は、N5 は和音が解決 (不安定な響きから安
10 定した響きへの進行。例えば、ドミナント→トニックの進行) しな
11 い逸脱の場合に生じ、和音統合における混乱や、和音進行によるテ
12 ンションの高まりに関連して生じると提案している。一方で、
13 Featherston et al. (2013) によると、P600 は、不規則的な音に対する
14 意識的で分析的な和音統合を反映するという。ただし、これらの成
15 分が、聴覚モデルへの統合処理やモデル更新を実際に反映している
16 のかどうかはいまだ明らかにされていない。今後の研究において、
17 N5 と P600 が反映する処理機能の解明や、統合によるモデル更新の
18 実証的証拠を示すことが必要である。

19 表 1 には、後期成分の出現の有無もまとめたが、ERAN と N5 や
20 P600 などの後期成分との関係も今後の検討課題である。例えば、予

1 測誤差信号としての ERAN の出現が、モデル更新や文脈の統合のト
2 リガとなっているかどうかは、明らかではない。Poulin-Charronnat et
3 al. (2006) は、逸脱度の小さい和声的に不規則な和音（サブドミナ
4 ント）に対して ERAN は出現しなかったが、N5 は出現したと報告し
5 た。また、Jaśkiewicz et al. (2016) は、和声的な逸脱度を 2 段階に操
6 作して提示すると、より逸脱度が大きい和音進行 (very unexpected)
7 では ERAN と P600 が生じたのに対し、逸脱度が小さい和音進行
8 (unexpected) では ERAN は出現せずに P600 だけが生じたと報告し
9 た。ERAN の出現の有無にかかわらず、統合処理やモデル更新が行
10 われるのならば、ERAN は、単に逸脱検出を反映するだけで、統合
11 処理やモデル更新に直接的に寄与していない可能性もある。今後の
12 研究では、モデル更新や統合処理と ERAN の出現の関係についても
13 検討する必要があるだろう。

14

15 7. まとめと展望

16 本稿では、調性的期待過程を、ERP を指標に検討した研究をレビ
17 ューし、各 ERP 成分の性質とその成分を指標とした研究から示唆さ
18 れる期待過程を考察してきた。時間解像度の高い脳波の一種である
19 ERP を指標とすることで、時間的に展開していく音楽の期待過程に
20 ついて、図 3 のような情報処理のタイムコースを検討することがで

1 きる。例えば、調性的規則における不規則性を起こした場合に、逸
2 脱検出を反映して早い潜時帯で MMN や ERAN が生じる。これらの
3 ERP は予測誤差信号と考えられ (Koelsch et al., 2019), 図 3 に示し
4 たような、短期的な規則表象 (MMN が反映) やより長期的な学習に
5 よる調性表象 (ERAN が反映) をもとにモデルが確立され、それに
6 基づいて次の音 (予期) を期待し、入力音と予期を比較して逸脱検
7 出を行うという予測過程の存在が示唆される。また、その後の潜時
8 帯における N5 や P600 成分の出現は、統合処理やモデル更新を示唆
9 している。予測符号化の観点から、予測誤差が大きいほど、より精
10 度の高い予測のためにモデル更新の要求が大きくなると考えられる。
11 したがって、図 3 に示したように、予測誤差としての ERAN や MMN
12 が生じた後で大きく生じる N5 や P600 は、統合やモデル更新における
13 より大きな処理負荷を反映していると考えられる。このように、
14 ERP を指標としてすることで、調性的期待にかかわる一連の情報処理過
15 程を検討することができる。
16 一方で、調性的期待には、感覚・知覚処理が交絡する場合もある
17 ため、生じた ERP に反映される情報処理の解釈には注意が必要であ
18 る。実験パラダイムや刺激の性質によって規定される情報処理と記
19 録される神経反応の対応関係に注意した上で、調性的期待の処理過
20 程を検討することが重要である。また、各 ERP 成分が反映する処理

1 機能は完全には明らかにされていないため、調性的期待過程を詳細
2 に解明するためには、各 ERP 成分の機能を十分に把握することが求
3 められるだろう。

4 本稿では、神経反応の一般的な性質に焦点を当てたため、音楽訓
5 練歴や文化差は扱わなかったが、調性表象の内容の差異や、獲得過
6 程の個人差は検討課題の 1 つである。例えば、音楽経験が豊富な参
7 加者の ERAN 反応は、音楽経験が少ない参加者よりも大きいことや
8 (Koelsch, Schmidt et al., 2002; Pagès-Portabella & Toro, 2020), 音楽
9 経験の差異によって、同じ和音に対して逸脱神経反応が生じる場合
10 と生じない場合が報告されている (Ma et al., 2018a)。調性的期待に
11 対する経験や学習の影響が実験的に示されているが、個人が保持し
12 ている表象や期待の逸脱度を考慮した ERP 研究は少ない。

13 統語表象などの音楽の規則は、確率学習 (統計学習) で獲得され
14 る可能性が提案されており (Jonaitis & Saffran, 2009; Loui, 2012),
15 計算論モデル (IDyOM) を用いて、音楽知覚の文化差を統計学習の
16 観点から予測することも可能となっている (Pearce, 2018)。しかし、
17 計算論モデルが西洋音楽をベースとして設計されていることや、実
18 証的研究が不足していることに検討の余地がある。西洋音楽をもと
19 に提案された心理モデルや計算論モデルが、日本のような、日本音
20 楽と西洋音楽に暴露されるバイミュージカルな音楽環境において、

1 調性表象の獲得過程や文化化 (enculturation) を説明できるのかを
2 検証することは、日本で調性的期待の研究を行う意義の1つであり、
3 今後の検討課題でもある。

4 個人差や文化差に対して、音楽の予測符号化 (predictive coding of
5 music: PCM) モデルによるアプローチが期待できる。PCM モデルで
6 は、音楽の知覚、行動、感情、学習の処理は、予測誤差を最小化す
7 るベイズ過程であるとされ、音楽を聴取しているときに、脳が「事
8 前の経験」に基づいて予測モデルを展開し、そのモデルに知覚が条
9 件づけられると考える (Vuust et al., 2022a)。本稿で議論した調性的
10 期待過程は、西洋音楽を対象に検討されてきた知見に基づいており、
11 PCM モデルに包含される予測過程である。このモデルが、機能和声
12 のない音楽 (e.g., ガムラン) や一定の拍子をもたない音楽 (e.g.,
13 アクサク) などに親しんでいる非西洋文化圏の人々の音楽知覚にも
14 そのまま当てはまるかどうかは検証が必要である (Savage and Fujii,
15 2022)。しかし、PCM モデルは、ある音楽が事前信念 (経験や学習)
16 に依存して、さまざまな拍や調性として知覚されることを想定して
17 いる点で、西洋音楽のみならず多様な音楽文化への一般化可能性が
18 高く、個人差や文化差を扱いうる (Vuust et al., 2022a, 2022b)。西洋
19 音楽をベースに作られた音楽知覚モデルを、日本を含むさまざまな
20 文化圏に適用し修正・拡張していくことで、人間の普遍的な音楽知

1 覚過程の解明につながると期待される。こうした検討において、
2 ERPは、予測誤差信号が表れる知覚段階から、表象の更新などが行
3 われる認知段階までの情報処理の流れを、継時的に検討できる有効
4 なツールとなるだろう。

5

1 文 献

- 2 Asano, R., & Boeckx, C. (2015). Syntax in language and music: What
3 is the right level of comparison? *Frontiers in Psychology*, *6*, 942.
- 4 Besson, M., & Faïta, F. (1995). An event-related potential (ERP)
5 study of musical expectancy: Comparison of musicians with
6 nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology: Human*
7 *Perception and Performance*, *21*, 1278–1296.
- 8 Bharucha, J. J. (1987). Music cognition and perceptual facilitation: A
9 connectionist framework. *Music Perception*, *5*, 1–30.
- 10 Bharucha, J. J., & Stoeckig, K. (1987). Priming of chords: Spreading
11 activation or overlapping frequency spectra? *Perception &*
12 *Psychophysics*, *41*, 519–524.
- 13 Bharucha, J., & Krumhansl, C. L. (1983). The representation of
14 harmonic structure in music: Hierarchies of stability as a function
15 of context. *Cognition*, *13*, 63–102.
- 16 Bigand, E. (1997). Perceiving musical stability: The effect of tonal
17 structure, rhythm, and musical expertise. *Journal of Experimental*
18 *Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 808–822.
- 19 Bigand, E., Poulin, B., Tillmann, B., Madurell, F., & D'Adamo, D. A.
20 (2003). Sensory versus cognitive components in harmonic priming.

- 1 *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and*
2 *Performance*, 29, 159–171.
- 3 Bonfiglio, L., Virgilito, A., Magrini, M., Piaruli, A., Bergamasco, M.,
4 Barcaro, U., Rosi, B., Salvetti, O., & Carboncini, M. C. (2015).
- 5 N400-like responses to three-chord harmonic sequences with
6 unexpected out-of-key endings: Scalp topography, cortical
7 sources, and perspectives for a clinical use. *Archives Italiennes*
8 *de Biologie*, 153, 1–18.
- 9 Brattico, E., Tervaniemi, M., Näätänen, R., & Peretz, I. (2006).
- 10 Musical scale properties are automatically processed in the human
11 auditory cortex. *Brain Research*, 1117, 162–174.
- 12 Brattico, E., Tupala, T., Glerean, E., & Tervaniemi, M. (2013).
- 13 Modulated neural processing of Western harmony in folk
14 musicians. *Psychophysiology*, 50, 653–663.
- 15 Butler, D., & Brown, H. (1984). Tonal structure versus function:
16 Studies of the recognition of harmonic motion. *Music Perception*,
17 2, 6–24.
- 18 Carrus, E., Pearce, M. T., & Bhattacharya, J. (2013). Melodic pitch
19 expectation interacts with neural responses to syntactic but not
20 semantic violations. *Cortex*, 49, 2186–2200.

- 1 Centanni, T. M., Halpern, A. R., Seisler, A. R., & Wenger, M. J.
- 2 (2020). Context-dependent neural responses to minor notes in
- 3 frontal and temporal regions distinguish musicians from
- 4 nonmusicians. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*,
- 5 20, 551–564.
- 6 Chabin, T., Pazart, L., & Gabriel, D. (2022). Vocal melody and
- 7 musical background are simultaneously processed by the brain for
- 8 musical predictions. *Annals of the New York Academy of Sciences*,
- 9 1512, 126–140.
- 10 Corrigall, K. A., & Trainor, L. J. (2019). Electrophysiological
- 11 correlates of key and harmony processing in 3-year-old children.
- 12 *Music Perception*, 36, 435–447.
- 13 Cuddy, L. L., & Lunney, C. A. (1995). Expectancies generated by
- 14 melodic intervals: Perceptual judgments of melodic continuity.
- 15 *Perception & Psychophysics*, 57, 451–462.
- 16 Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a
- 17 manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*,
- 18 11, 357-374.
- 19 Ellison, D., Moisseinen, N., Fachner, J., & Brattico, E. (2015).
- 20 Affective versus cognitive responses to musical chords: An ERP

- 1 and behavioral study. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*,
2 25, 423–434.
- 3 Featherstone, C. R., Morrison, C. M., Waterman, M. G., & MacGregor,
4 L. J. (2013). Semantics, syntax or neither? A case for resolution
5 in the interpretation of N500 and P600 responses to harmonic
6 incongruities. *PLOS ONE*, 8, e76600.
- 7 Fishman, Y. I. (2014). The mechanisms and meaning of the mismatch
8 negativity. *Brain Topography*, 27, 500–526.
- 9 Fitzroy, A. B., & Sanders, L. D. (2013). Musical expertise modulates
10 early processing of syntactic violations in language. *Frontiers in*
11 *Psychology*, 3, 603.
- 12 Fiveash, A., Thompson, W. F., Badcock, N. A., & McArthur, G.
13 (2018). Syntactic processing in music and language: Effects of
14 interrupting auditory streams with alternating timbres.
- 15 *International Journal of Psychophysiology*, 129, 31–40.
- 16 Fujioka, T., Trainor, L. J., Ross, B., Kakigi, R., & Pantev, C. (2005).
17 Automatic encoding of polyphonic melodies in musicians and
18 nonmusicians. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 1578–1592.

- 1 Garza Villarreal, E. A., Brattico, E., Leino, S., Østergaard, L., &
2 Vuust, P. (2011). Distinct neural responses to chord violations: A
3 multiple source analysis study. *Brain Research*, 1389, 103–114.
4 Guo, S., & Koelsch, S. (2015). The effects of supervised learning on
5 event-related potential correlates of music-syntactic processing.
6 *Brain Research*, 1626, 232–246.
7 Guo, S., & Koelsch, S. (2016). Effects of veridical expectations on
8 syntax processing in music: Event-related potential evidence.
9 *Scientific Reports*, 6, 19064.
10 Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the
11 ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, 42, 151–
12 160.
13 東川清一 (2017) 音楽理論入門 ちくま学芸文庫.
14 Horváth, J., Müller, D., Weise, A., & Schröger, E. (2010). Omission
15 mismatch negativity builds up late. *Neuroreport*, 21, 537–541.
16 Ishida, K., & Nittono, H. (2022). Relationship between early neural
17 responses to syntactic and acoustic irregularities in music.
18 *European Journal of Neuroscience*, 56, 6201–6214.
19 石田海・池田一成・入戸野宏 (2020) 音楽の統語処理に及ぼすバス
20 旋律の効果 生理心理学と精神生理学, 38, 177–184.

- 1 Jaśkiewicz, M., Francuz, P., Zabielska-Mendyk, E., Zapała, D., &
- 2 Augustynowicz, P. (2016). Effects of harmonics on aesthetic
- 3 judgments of music: An ERP study involving laypersons and
- 4 experts. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *76*, 142–151.
- 5 Jentschke, S., Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2005). Investigating
- 6 the relationship of music and language in children: Influences of
- 7 musical training and language impairment. *Annals of the New York*
- 8 *Academy of Sciences*, *1060*, 231–242.
- 9 Jonaitis, E. M. M., & Saffran, J. R. (2009). Learning harmony: The
- 10 role of serial statistics. *Cognitive Science*, *33*, 951–968.
- 11 Kalda, T., & Minati, L. (2012). Detecting scale violations in absence
- 12 of mismatch requires music-syntactic analysis: A further look at
- 13 the early right anterior negativity (ERAN). *Brain Topography*, *25*,
- 14 285–292.
- 15 Keller, P. E., & Koch, I. (2008). Action planning in sequential skills:
- 16 Relations to music performance. *Quarterly Journal of*
- 17 *Experimental Psychology*, *61*, 275–291.
- 18 Kim, C. H., Lee, S., Kim, J. S., Seol, J., Yi, S. W., & Chung, C. K.
- 19 (2014). Melody effects on ERANm elicited by harmonic
- 20 irregularity in musical syntax. *Brain Research*, *1560*, 36–45.

- 1 Kim, S. G., Kim, J. S., & Chung, C. K. (2011). The effect of
2 conditional probability of chord progression on brain response:
3 An MEG study. *PLOS ONE*, *6*, e17337.
- 4 Koelsch, S. (2009). Music-syntactic processing and auditory memory:
5 Similarities and differences between ERAN and MMN.
6 *Psychophysiology*, *46*, 179–190.
- 7 Koelsch, S. (2011a). Towards a neural basis of processing musical
8 semantics. *Physics of Life Reviews*, *8*, 89–105.
- 9 Koelsch, S. (2011b). Toward a neural basis of music perception - a
10 review and updated model. *Frontiers in Psychology*, *2*, 110.
- 11 Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2003). Toward the neural basis of
12 processing structure in music: comparative results of different
13 neurophysiological investigation methods. *Annals of the New York*
14 *Academy of Sciences*, *999*, 15–28.
- 15 Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D., & Schlaug, G. (2005).
16 Adults and children processing music: An fMRI study.
17 *NeuroImage*, *25*, 1068–1076.
- 18 Koelsch, S., Gunter, T. C., v. Cramon, D. Y., Zysset, S., Lohmann,
19 G., & Friederici, A. D. (2002). Bach speaks: A cortical “language-

- 1 network” serves the processing of music. *NeuroImage*, 17, 956–
2 966.
- 3 Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2000).
4 Brain indices of music processing: “nonmusicians” are musical.
5 *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 520–541.
- 6 Koelsch, S., Gunter, T., Schröger, E., & Friederici, A. D. (2003).
7 Processing tonal modulations: An ERP study. *Journal of Cognitive*
8 *Neuroscience*, 15, 1149–1159.
- 9 Koelsch, S., Gunter, T. C., Schröger, E., Tervaniemi, M., Sammler,
10 D., & Friederici, A. D. (2001). Differentiating ERAN and MMN:
11 An ERP study. *NeuroReport*, 12, 1385–1389.
- 12 Koelsch, S., Gunter, T. C., Wittfoth, M., & Sammler, D. (2005).
13 Interaction between syntax processing in language and in music:
14 An ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 1565–1577.
- 15 Koelsch, S., & Jentschke, S. (2008). Short-term effects of processing
16 musical syntax: An ERP study. *Brain Research*, 1212, 55–62.
- 17 Koelsch, S., Jentschke, S., Sammler, D., & Mietchen, D. (2007).
18 Untangling syntactic and sensory processing: An ERP study of
19 music perception. *Psychophysiology*, 44, 476–490.

- 1 Koelsch, S., Kilches, S., Steinbeis, N., & Schelinski, S. (2008).
- 2 Effects of unexpected chords and of performer's expression on
- 3 brain responses and electrodermal activity. *PLOS ONE*, 3, e2631.
- 4 Koelsch, S., & Mulder, J. (2002). Electric brain responses to
- 5 inappropriate harmonies during listening to expressive music.
- 6 *Clinical Neurophysiology*, 113, 862–869.
- 7 Koelsch, S., & Sammler, D. (2008). Cognitive components of
- 8 regularity processing in the auditory domain. *PLOS ONE*, 3,
- 9 e2650.
- 10 Koelsch, S., Schmidt, B. H., & Kansok, J. (2002). Effects of musical
- 11 expertise on the early right anterior negativity: An event-related
- 12 brain potential study. *Psychophysiology*, 39, 657–663.
- 13 Koelsch, S., Schröger, E., & Gunter, T. C. (2002). Music matters:
- 14 Preattentive musicality of the human brain. *Psychophysiology*, 39,
- 15 38–48.
- 16 Koelsch, S., Rohrmeier, M., Torrecuso, R., & Jentschke, S. (2013).
- 17 Processing of hierarchical syntactic structure in music.
- 18 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*
- 19 *States of America*, 110, 15443–15448.

- 1 Koelsch, S., Vuust, P., & Friston, K. (2019). Predictive processes and
2 the peculiar case of music. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*, 63–
3 77.
- 4 Koelsch, S., Wittfoth, M., Wolf, A., Müller, J., & Hahne, A. (2004).
5 Music perception in cochlear implant users: An event-related
6 potential study. *Clinical Neurophysiology*, *115*, 966–972.
- 7 Korzyukov, O. A., Winkler, I., Gumenyuk, V. I., & Alho, K. (2003).
8 Processing abstract auditory features in the human auditory
9 cortex. *NeuroImage*, *20*, 2245–2258.
- 10 Krumhansl, C. L. (1983). Perceptual structures for tonal music. *Music*
11 *Perception*, *1*, 28–62.
- 12 Krumhansl, C. L. (1990). Tonal hierarchies and rare intervals in music
13 cognition. *Music Perception*, *7*, 309–324.
- 14 Krumhansl, C. L. (1991). Music psychology: Tonal structures in
15 perception and memory. *Annual Review of Psychology*, *42*, 277–
16 303.
- 17 Krumhansl, C. L. (1995). Music psychology and music theory:
18 Problems and prospects. *Music Theory Spectrum*, *17*, 53–80.
- 19 Krumhansl, C. L., & Keil, F. C. (1982). Acquisition of the hierarchy
20 of tonal functions in music. *Memory & Cognition*, *10*, 243–251.

- 1 Krumhansl, C. L., & Kessler, E. J. (1982). Tracing the dynamic
2 changes in perceived tonal organization in a spatial representation
3 of musical keys. *Psychological Review*, *89*, 334–368.
- 4 Krumhansl, C. L., & Shepard, R. N. (1979). Quantification of the
5 hierarchy of tonal functions within a diatonic context. *Journal of*
6 *Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *5*,
7 579–594.
- 8 Lagrois, M. É., Peretz, I., & Zendel, B. R. (2018). Neurophysiological
9 and behavioral differences between older and younger adults when
10 processing violations of tonal structure in music. *Frontiers in*
11 *Neuroscience*, *12*, 54.
- 12 Lee, D. J., Jung, H., & Loui, P. (2019). Attention modulates
13 electrophysiological responses to simultaneous music and
14 language syntax processing. *Brain Sciences*, *9*, 305.
- 15 Leino, S., Brattico, E., Tervaniemi, M., & Vuust, P. (2007).
16 Representation of harmony rules in the human brain: Further
17 evidence from event-related potentials. *Brain Research*, *1142*,
18 169–177.

- 1 Loui, P. (2012). Learning and liking of melody and harmony: Further
2 studies in artificial grammar learning. *Topics in Cognitive*
3 *Science*, 4, 554–567.
- 4 Lumaca, M., Trusbak Haumann, N., Brattico, E., Grube, M., & Vuust,
5 P. (2019). Weighting of neural prediction error by rhythmic
6 complexity: A predictive coding account using mismatch
7 negativity. *European Journal of Neuroscience*, 49, 1597–1609.
- 8 Ma, X., Ding, N., Tao, Y., & Yang, Y. F. (2018a). Syntactic
9 complexity and musical proficiency modulate neural processing of
10 non-native music. *Neuropsychologia*, 121, 164–174.
- 11 Ma, X., Ding, N., Tao, Y., & Yang, Y. F. (2018b). Differences in
12 neurocognitive mechanisms underlying the processing of center-
13 embedded and non-embedded musical structures. *Frontiers in*
14 *Human Neuroscience*, 12, 425.
- 15 Ma, X., Tao, Y., & Yang, Y. (2022). Factors inducing complexities in
16 musical embedded structure processing. *Neuropsychologia*, 169,
17 108153.
- 18 Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001).
19 Musical syntax correlates in Broca's area. *Nature Neuroscience*,
20 4, 540–545.

- 1 Maidhof, C., & Koelsch, S. (2011). Effects of selective attention on
2 syntax processing in music and language. *Journal of Cognitive*
3 *Neuroscience*, 23, 2252–2267.
- 4 Marie, C., Fujioka, T., Herrington, L., & Trainor, L. J. (2012). The
5 high-voice superiority effect in polyphonic music is influenced by
6 experience: A comparison of musicians who play soprano-range
7 compared with bass-range instruments. *Psychomusicology: Music,*
8 *Mind, and Brain*, 22, 97–104.
- 9 Marmel, F., Tillmann, B., & Dowling, W. J. (2008). Tonal
10 expectations influence pitch perception. *Perception and*
11 *Psychophysics*, 70, 841–852.
- 12 Marmel, F., Perrin, F., & Tillmann, B. (2011). Tonal expectations
13 influence early pitch processing. *Journal of Cognitive*
14 *Neuroscience*, 23, 3095–3104.
- 15 Mencke, I., Quiroga-martinez, D. R., Omigie, D., Michalareas, G.,
16 Schwarzacher, F., Trusbak, N., Vuust, P., & Brattico, E. (2021).
17 Prediction under uncertainty: Dissociating sensory from cognitive
18 expectations in highly uncertain musical contexts. *Brain*
19 *Research*, 1773, 147664.

- 1 Meyer, L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. Chicago:
2 University of Chicago Press.
- 3 Miranda, R. A., & Ullman, M. T. (2007). Double dissociation between
4 rules and memory in music: An event-related potential study.
5 *NeuroImage*, 38, 331–345.
- 6 Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The
7 mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory
8 processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2544–2590.
- 9 Näätänen, R., Jacobsen, T., & Winkler, I. (2005). Memory-based or
10 afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the
11 evidence. *Psychophysiology*, 42, 25–32.
- 12 Näätänen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus
13 representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin*,
14 125, 826–859.
- 15 Narmour, E. (1991). The top-down and bottom-up systems of musical
16 implication: Building on Meyer's theory of emotional syntax.
17 *Music Perception*, 9, 1–26.
- 18 入戸野宏 (2005) 心理学のための事象関連電位ガイドブック 北大
19 路書房.

- 1 Nittono, H., Bito, T., Hayashi, M., Sakata, S., & Hori, T. (2000).
- 2 Event-related potentials elicited by wrong terminal notes: effects
- 3 of temporal disruption. *Biological Psychology*, *52*, 1–16.
- 4 Paavilainen, P., Simola, J., Jaramillo, M., Näätänen, R., & Winkler, I.
- 5 (2001). Preattentive extraction of abstract feature conjunctions
- 6 from auditory stimulation as reflected by the mismatch negativity
- 7 (MMN). *Psychophysiology*, *38*, 359–365.
- 8 Pagès-Portabella, C., Bertolo, M., & Toro, J. M. (2021). Neural
- 9 correlates of acoustic dissonance in music: The role of
- 10 musicianship, schematic and veridical expectations. *PLOS ONE*,
- 11 *16*, e0260728.
- 12 Pagès-Portabella, C., & Toro, J. M. (2020). Dissonant endings of
- 13 chord progressions elicit a larger ERAN than ambiguous endings
- 14 in musicians. *Psychophysiology*, *57*, e13476.
- 15 Pakarinen, S., Takegata, R., Rinne, T., Huotilainen, M., & Näätänen,
- 16 R. (2007). Measurement of extensive auditory discrimination
- 17 profiles using the mismatch negativity (MMN) of the auditory
- 18 event-related potential (ERP). *Clinical Neurophysiology*, *118*,
- 19 177–185.

- 1 Park, J. M., Chung, C. K., Kim, J. S., Lee, K. M., Seol, J., & Yi, S.
- 2 W. (2018). Musical expectations enhance auditory cortical
- 3 processing in musicians: A magnetoencephalography study.
- 4 *Neuroscience*, 369, 325–335.
- 5 Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature*
- 6 *Neuroscience*, 6, 674–681.
- 7 Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J., Besson, M., & Holcomb, P. J.
- 8 (1998). Processing syntactic relations in language and music: An
- 9 event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*,
- 10 10, 717–733.
- 11 Pearce, M. T. (2018). Statistical learning and probabilistic prediction
- 12 in music cognition: Mechanisms of stylistic enculturation. *Annals*
- 13 *of the New York Academy of Sciences*, 1423, 378–395.
- 14 Peretz, I., Brattico, E., Jrvnenp, M., & Tervaniemi, M. (2009). The
- 15 amusic brain: In tune, out of key, and unaware. *Brain*, 132, 1277–
- 16 1286.
- 17 Piston, W. (1959). *Harmony*. London: Victor Gollancz.
- 18 Poulin-Charronnat, B., Bigand, E., & Koelsch, S. (2006). Processing
- 19 of musical syntax tonic versus subdominant: An event-related

- 1 potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 1545–
2 1554.
- 3 Przysinda, E., Zeng, T., Maves, K., Arkin, C., & Loui, P. (2017). Jazz
4 musicians reveal role of expectancy in human creativity. *Brain*
5 *and Cognition*, 119, 45–53.
- 6 Rinne, T., Degerman, A., & Alho, K. (2005). Superior temporal and
7 inferior frontal cortices are activated by infrequent sound
8 duration decrements: An fMRI study. *NeuroImage*, 26, 66–72.
- 9 Rohrmeier, M. A., & Koelsch, S. (2012). Predictive information
10 processing in music cognition. A critical review. *International*
11 *Journal of Psychophysiology*, 83, 164–175.
- 12 Ruiz, M. H., Koelsch, S., & Bhattacharya, J. (2009). Decrease in early
13 right alpha band phase synchronization and late gamma band
14 oscillations in processing syntax in music. *Human Brain Mapping*,
15 30, 1207–1225.
- 16 Sammler, D., Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2011). Are left fronto-
17 temporal brain areas a prerequisite for normal music-syntactic
18 processing? *Cortex*, 47, 659–673.
- 19 佐藤大介・田原敬・勝二博亮 (2022) 事象関連電位からみた非音楽
20 家の調性感 生理心理学と精神生理学, 40, 209–217.

- 1 Savage, P. E., & Fujii, S. (2022). Towards a cross-cultural framework
2 for predictive coding of music. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*,
3 641.
- 4 Schellenberg, E. G. (1996). Expectancy in melody: Tests of the
5 implication-realization model. *Cognition*, *58*, 75–125.
- 6 Schellenberg, E. G. (1997). Simplifying the implication-realization
7 model of melodic expectancy. *Music Perception*, *14*, 295–318.
- 8 Sears, D. R. W., Pearce, M. T., Spitzer, J., Caplin, W. E., &
9 McAdams, S. (2019). Expectations for tonal cadences: Sensory
10 and cognitive priming effects. *Quarterly Journal of Experimental
11 Psychology*, *72*, 1422–1438.
- 12 Seger, C. A., Spiering, B. J., Sares, A. G., Quraini, S. I., Alpeter, C.,
13 David, J., & Thaut, M. H. (2013). Corticostriatal contributions to
14 musical expectancy perception. *Journal of Cognitive
15 Neuroscience*, *25*, 1062–1077.
- 16 Shin, H., & Fujioka, T. (2018). Effects of visual predictive
17 information and sequential context on neural processing of
18 musical syntax. *Frontiers in Psychology*, *9*, 2528.

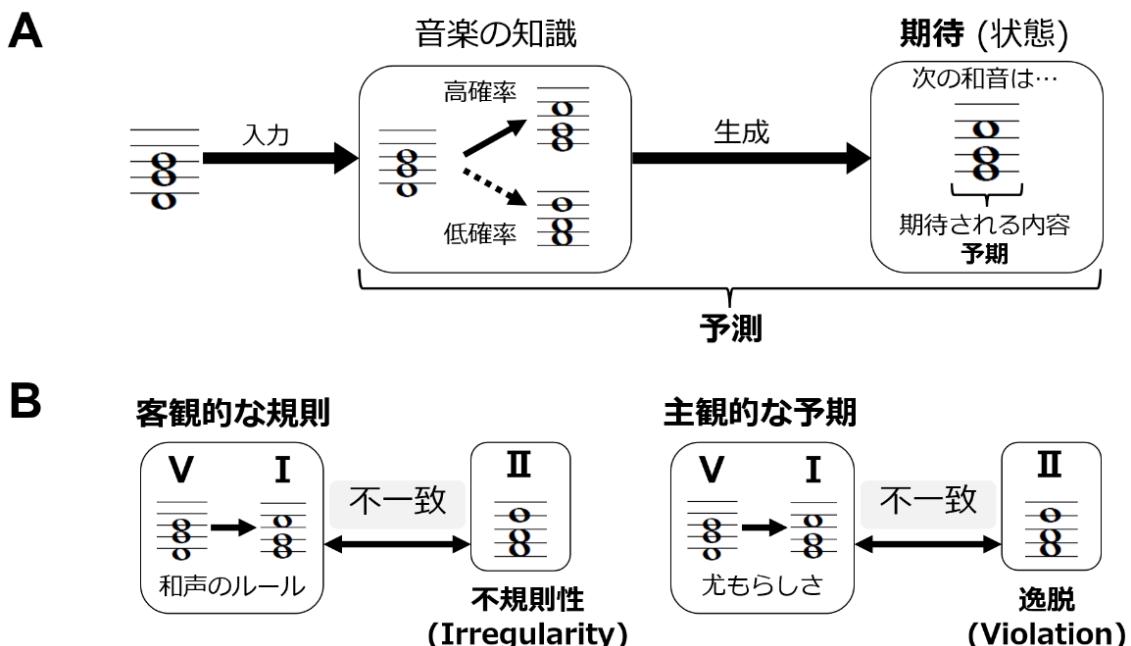
- 1 Shinozaki, N., Yabe, H., Sutoh, T., Hiruma, T., & Kaneko, S. (1998).
- 2 Somatosensory automatic responses to deviant stimuli. *Cognitive*
- 3 *Brain Research*, 7, 165–171.
- 4 Steinbeis, N., Koelsch, S., & Sloboda, J. A. (2006). The role of
- 5 harmonic expectancy violations in musical emotions: Evidence
- 6 from subjective, physiological, and neural responses. *Journal of*
- 7 *Cognitive Neuroscience*, 18, 1380–1393.
- 8 Sun, Y., Lu, X., Ho, H. T., Johnson, B. W., Sammler, D., &
- 9 Thompson, W. F. (2018). Syntactic processing in music and
- 10 language: Parallel abnormalities observed in congenital amusia.
- 11 *NeuroImage: Clinical*, 19, 640–651.
- 12 Sussman, E. S., Chen, S., Sussman-Fort, J., & Dinges, E. (2014). The
- 13 five myths of MMN: Redefining how to Use MMN in basic and
- 14 clinical research. *Brain Topography*, 27, 553–564.
- 15 Tervaniemi, M., Tupala, T., & Brattico, E. (2012). Expertise in folk
- 16 music alters the brain processing of Western harmony. *Annals of*
- 17 *the New York Academy of Sciences*, 1252, 147–151.
- 18 Tew, S., Fujioka, T., He, C., & Trainor, L. (2009). Neural
- 19 representation of transposed melody in infants at 6 months of age.
- 20 *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 287–290.

- 1 Thompson, W. F., Cuddy, L. L., & Plaus, C. (1997). Expectancies
2 generated by melodic intervals: Evaluation of principles of
3 melodic implication in a melody-completion task. *Perception &*
4 *Psychophysics*, *59*, 1069–1076.
- 5 Tillmann, B., Bigand, E., & Pineau, M. (1998). Effects of global and
6 local contexts on harmonic expectancy. *Music Perception*, *16*, 99–
7 117.
- 8 Tillmann, B., & Marmel, F. (2013). Musical expectations within chord
9 sequences: Facilitation due to tonal stability without closure
10 effects. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *23*, 1–5.
- 11 Virtala, P., Berg, V., Kivioja, M., Purhonen, J., Salmenkivi, M.,
12 Paavilainen, P., & Tervaniemi, M. (2011). The preattentive
13 processing of major vs. minor chords in the human brain: An
14 event-related potential study. *Neuroscience Letters*, *487*, 406–410.
- 15 Vuust, P., Heggli, O. A., Friston, K. J., & Kringelbach, M. L.
16 (2022a). Music in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*,
17 287–305.
- 18 Vuust, P., Heggli, O. A., Friston, K. J., & Kringelbach, M. L.
19 (2022b). Reply to ‘Towards a cross-cultural framework for

- 1 predictive coding of music'. *Nature Reviews Neuroscience*, 23,
- 2 641-642.
- 3 Vuust, P., Ostergaard, L., Pallesen, K. J., Bailey, C., & Roepstorff,
- 4 A. (2009). Predictive coding of music – Brain responses to
- 5 rhythmic incongruity. *Cortex*, 45, 80–92.
- 6 Wacongne, C., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2012). A neuronal
- 7 model of predictive coding accounting for the mismatch
- 8 negativity. *Journal of Neuroscience*, 32, 3665–3678.
- 9 West, R. J., & Fryer, R. (1990). Ratings of suitability of probe tones
- 10 as tonics after random orderings of notes of the diatonic scale.
- 11 *Music Perception*, 7, 253–258.
- 12 Woods D. L. (1995). The component structure of the N1 wave of the
- 13 human auditory evoked potential. *Electroencephalography and*
- 14 *clinical neurophysiology Supplement*, 44, 102–109.
- 15 Yu, X., Liu, T., & Gao, D. (2015). The mismatch negativity: An
- 16 indicator of perception of regularities in music. *Behavioural*
- 17 *Neurology*, 2015, 469508.
- 18 Zendel, B. R., & Alexander, E. J. (2020). Autodidacticism and music:
- 19 Do self-taught musicians exhibit the same auditory processing

- 1 advantages as formally trained musicians? *Frontiers in*
2 *Neuroscience*, 14, 752.
- 3 Zendel, B. R., Demirkaplan, Ö., Mignault-Goulet, G., & Peretz, I.
4 (2022). The relationship between acoustic and musical pitch
5 processing in adolescents. *International Journal of Developmental*
6 *Neuroscience*, 82, 314–330.
- 7 Zendel, B. R., Lagrois, M. E., Robitaille, N., & Peretz, I. (2015).
8 Attending to pitch information inhibits processing of pitch
9 information: The curious case of amusia. *Journal of Neuroscience*,
10 35, 3815–3824.
- 11 Zhang, J., Che, X., & Yang, Y. (2019). Event-related brain potentials
12 suggest a late interaction of pitch and time in music perception.
13 *Neuropsychologia*, 132, 107118.
- 14 Zhang, J., Zhou, X., Chang, R., & Yang, Y. (2018). Effects of global
15 and local contexts on chord processing: An ERP study.
16 *Neuropsychologia*, 109, 149–154.
- 17 Zhou, L., Liu, F., Jiang, J., Jiang, H., & Jiang, C. (2019). Abnormal
18 neural responses to harmonic syntactic structures in congenital
19 amusia. *Psychophysiology*, 56, e13394.
- 20

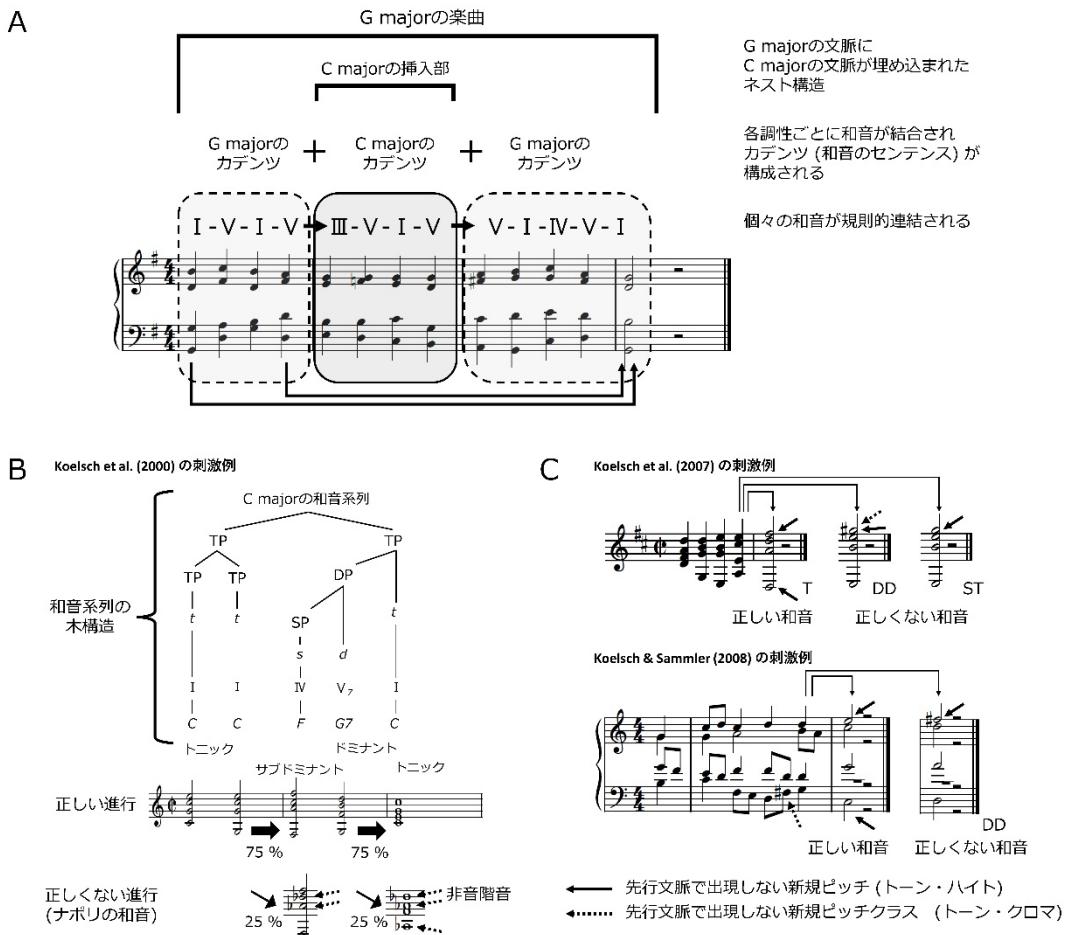
1



2

3 図 1 本稿における用語の定義。A は、期待にかかる用語を整理
4 している。期待 (expectancy) は何かが起こることを待ち受けてい
5 る状態、予期 (expectation) は期待される内容、予測 (prediction)
6 は未来志向の情報処理全般を指す用語として定義する (Rohrmeier
7 & Koelsch, 2012)。B は、実際の事象との不一致をあらわす用語を
8 示す。本稿では、客観的に定義できる不一致を不規則性
9 (irregularity)、主観的に定義される不一致を逸脱 (violation) と呼
10 ぶ。

11



1

- 2 図 2 A. 音楽における階層的な統語構造のイメージ。G major の
 3 文脈に C major の文脈がネストされた ABA のネスト構造を示す。
- 4 B. Koelsch et al. (2000) で用いられた和音系列における統語構造の
 5 イメージ。ナポリの和音において、点線の矢印で示した音は、C
 6 major においては非音階音 (ピアノの白鍵以外の音) に該当する。
- 7 各和音の機能については、付録の 4 節「機能和声」を参照。C. 新
 8 規ピッチと新規ピッチクラスの影響を統制した刺激 (上) と、先行
 9 文脈に新規ピッチクラスを提示しておくことで、ターゲット和音の

1 感覚的不協和の程度を統制した刺激(下)の例。DDはダブルドミ

2 ナント, STはスーパートニックを示す。

3

表 1 ERAN を報告した研究とその研究で用いられた逸脱の種類

要素	関連文献	非音階音 *1	機能和声の 逸脱 *2	局所確率 *3	大域 and/or 局所逸脱 *4	後期成分の 出現 *5
和音	Koelsch et al. (2000) Experiment 1	有	有	低	両方	N5
	Koelsch et al. (2000) Experiment 2	有	有	低	両方	N5
	Koelsch et al. (2000) Experiment 3	有	有	低	両方	N5
	Koelsch et al. (2000) Experiment 4	有	有	等	両方	N5
	Koelsch et al. (2001)	有	有	低	両方	
	Maess et al. (2001)	有	有	低	両方	
	Koelsch, Schmidt, & Kansok (2002)	有	無	低	両方	N5
	Koelsch et al. (2004)	有	有	低	両方	N5
	Jentschke, Koelsch, & Friderici (2005)	無	有	等	両方	
	Koelsch, Gunter, et al. (2005)	有	無	等	両方	LPC
	Koelsch et al. (2007) Experiment 1	有	有	等	両方	P3, N5
	Koelsch et al. (2007) Experiment 2	無	有	等	両方	N5
	Leino et al. (2007)	有	有	低	両方	
	Koelsch et al. (2008)	有	有	等	両方	P3, N5
	Koelsch & Jentschke (2008)	無	有	等	両方	N5
	Koelsch & Sammler (2008)	有	有	等	両方	N5
	Kim, Kim, & Chung (2011)	無	有	等	両方	
	Maidhof & Koelsch (2011)	有	有	等	両方	N5

Sammel, Koelsch, & Friderici (2011)	有	有	等	両方	
Garza-Villarreal et al. (2011)	有	有	低	両方	
Tervaniemi, Tupala, & Brattico (2012)	有	有	低	両方	P3
Brattico et al. (2013)	有	有	低	両方	
Fitzroy & Sanders (2013)	有	有	低	両方	LPC
Bonfiglio et al. (2015)	有	有	低	両方	P3, N400, N5, P600
Ellison et al. (2015)	無	有	等	両方	LPC
Guo & Koelsch (2015)	有	有	等	両方	P3, LPC
Guo & Koelsch (2016)	有	有	等	両方	P3
Jaśkiewicz et al. (2016)	有	無	等	両方	LPC
Przysinda et al. (2017)	有	有	低	両方	P3, LPC
Ma et al. (2018a)	無	無	等	大域	N5
Ma et al. (2018b)	無	無	等	大域	N5
Park et al. (2018)	有	有	等	両方	
Shin & Fujioka (2018)	有	有	等	両方	P3
Zhang et al. (2018)	無	無	等	大域 or 局所	N5
Corrigall & Trainor (2019)	有	有	低	両方	
Lee, Jung, & Loui (2019)	有	有	低	両方	P3
Zhang et al. (2019)	無	有	等	大域	N5
Zhou et al. (2019) Experiment 1	無	有	等	両方	N5, LPC

Zhou et al. (2019) Experiment 2	無	有	等	大域	N5	
Pagès-Portabella & Toro (2020)	有	有	低	両方	P3	
Pagès-Portabella, Bertolo, & Toro (2021)	有	有	低	両方	P3, N5	
Ma, Tao, & Yang (2022)	無	無	等	大域	N5, LPC	
佐藤・田原・勝二 (2022)	有	有	低	両方		
旋律	Miranda & Ullman (2007)	有	無	等	両方	P3, N400? N5, P600
	Marmel, Perrin, & Tillmann (2011)	無	有	等	大域	P3
	Zendel et al. (2015)	有	無	低	両方	P600
	Fiveash et al. (2018)	有	無	等	両方	
	Sun et al. (2018)	有	有	等	両方	N5
	Centanni et al. (2020)	無	無	等	大域	LPC
和音	Kim et al. (2014)	無	有	等	両方	
と	石田・池田・入戸野 (2020)	無	有	低	両方	

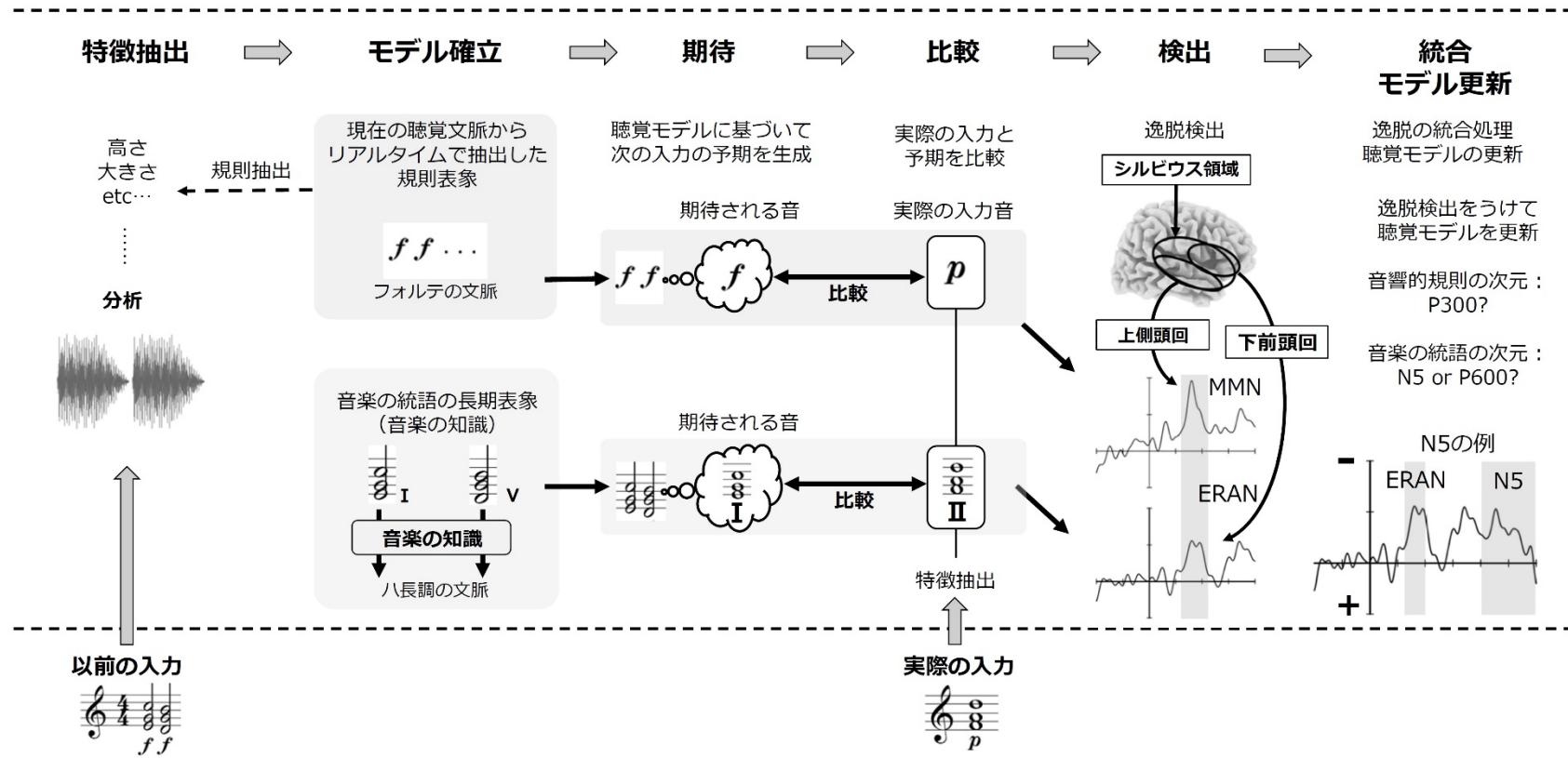
1 PubMed と CiNii において”ERAN chord”(和音), ”ERAN melody”(旋律) で検索してヒットした文献から,
 2 査読あり論文 51 編を悉皆的にまとめた(2022 年 9 月 14 日)。

3 *¹ 逸脱が調に含まれない音(非音階音)を含む場合を「有」, 含まない場合を「無」とした。例えば, C
 4 major の場合, ERAN を生じさせたターゲット和音の構成音にピアノの黒鍵の音が含まれる場合には「有」,
 5 含まれない場合には「無」とした。

6 *² 逸脱が和声における和音機能の逸脱を含む場合を「有」, 含まない場合を「無」とした。例えば, ドミ
 7 ナント機能の和音の後に正しくトニック機能の和音が提示されている場合には「無」, トニック機能以
 8 外の和音が提示されている場合には「有」とした。機能和声についての詳細は付録の 4 節「機能和声」を
 9 参照。

10 *³ 標準音に対して逸脱音が低頻度提示なら「低」, 等頻度提示なら「等」とした。

1 *⁴ 逸脱が大域のみなら「大域」, 一つの刺激内で大域と局所の両方が逸脱しているが, 各逸脱を分離して
2 検討していない場合を「両方」, 分離して検討している場合を「大域 or 局所」とした。「大域」には, 非
3 音階音の出現などの調性逸脱や, 図 2A に示したような A 調-B 調-A 調ネスト構造の曲で, 最初の A 調を
4 別の C 調に変更して, 前後の A 調どうしづつながりにくくする場合(ただし, C 調の中では正しい和音
5 進行)などが該当する。「局所」には, 機能和声の逸脱が該当する。判断基準は, Rohrmeier and Koelsch
6 (2012, 5.1.1. Local vs. Hierarchical processing) を参考にした。
7 *⁵ ERAN が生じた後に, P3 を報告している場合には「P3」, N5 を報告している場合には「N5」, P600 を報
8 告している場合には「P600」, 後期陽性成分 (late positive component: LPC) を報告している場合には「LPC」
9 とした。ただし, いずれの成分も生じなかった場合や報告していない場合には空欄とした。
10



1

2 図 3 音楽の統語に基づく期待過程と音響的規則に基づく期待過程。Ishida and Nittono (2022) で示され
3 た、音楽的統語（和声的規則）と音響的規則（音圧の規則性）の不規則性の並列処理の結果をもとに図を
4 作成した。

Supplementary materials

音楽理論に関する用語解説

1. 音の高さ

5 西洋の調性音楽は、長調-短調の音楽である。調性を感じるために、音の高さ（音高）や
6 音程を知覚することが必要である。音楽における音高は、トーン・ハイト（tone height）とト
7 ーン・クロマ（tone chroma）という2種類の心理属性情報に変換されて知覚される（松永、
8 2020, p.72）。トーン・ハイトは、音高の「高い-低い」を感じる心理属性である（ピッチの知
9 覚）。トーン・クロマは、音高が1オクターブ変化するたびに循環的に似た性質を感じる心
10 理属性である（ピッチクラスの知覚）。トーン・クロマは、同じ音名（C, D, E, …）がつ
11 けられている音は、オクターブ隔てた場合でも等価とみなされるオクターブ等価性を生じ
12 させる。

14 2. 音程

音程とは、2音間の高さの隔たりであり、度数で表される。度数は、2音間に変化記号によって変化されない幹音（シャープやフラットのない音）を想定するときに、幹音いくつ分かで表現される（石桁ら, 1965）。1度から8度までの音程の例を付録図1に示す。西洋音楽における、1オクターブ内の音高ステップ数は、12半音である。



21 付録図1 1度から8度までの音程。長音程、短音程、完全音程の記載は省略した。

1 3. 音階

2 音階とは、ある音を起点として、1オクターブ上の同じ名前の音までが、特定の秩序に従
3 って配列された音列のことである（石桁ら、1965）。例えば、西洋の調性音楽における音階
4 (musical scale) は、12の音高ステップからさらに少ない7つの音高ステップ（5全音と2半
5 音）が、高さ（相対的音高）の順に1オクターブ内に段階的に配列された枠組みを示す。音
6 階の中心音を定めた音高組織は、旋法（musical mode）とよばれる。音階上に中心音が定ま
7 り、その中心音に特定のトーン・クロマが割り当てられた音高組織は、西洋音楽において調
8 (Key) とよばれる（東川、2017）。旋法には、長旋法（全-全-半-全-全-全-半音）と短旋法（全
9 -半-全-全-半-全-全）があり、音高Cを中心音とする長旋法は、C majorとよばれる（付録
10 図2A参照）。半音階の数に相当する12種のトーン・クロマをそれぞれ基準音、すなわち中
11 心音（主音、第1音）とすることで、12の調位（調の位置）が決まる。調位は主音の音名で
12 表される。西洋音楽においては、12調位ごとに、長旋法と短旋法があり、24の調が決まる。
13 付録図2Aに示すように、西洋音階では、音階の中心音（主音）から7番目までの音に対し
14 て、順番にローマ数字（I-VII）を割り当てる。非音階音とは、このI-VIIまでの音に含まれな
15 い音である。具体的に、付録図2Bに示したピアノの鍵盤で考える。C majorの音階は白鍵
16 の音で構成される。C majorにおける非音階音は、黒鍵の音（C majorでは、シャープやフラ
17 ットがつく音）である。

18

A



ローマ数字表記	I	II	III	IV	V	VI	VII	I
英語表記	C	D	E	F	G	A	B	C
日本語表記	ハ	二	ホ	ヘ	ト	イ	□	ハ
イタリア語表記	Do ド	Re レ	Mi ミ	Fa ファ	Sol ソ	La ラ	Si シ	Do ド

B



1

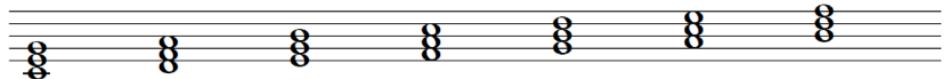
2 付録図2 A. C 音を中心音とする長旋法=C major の長音階。B. C major 音階音に対応する白鍵と、非音階音に対応する黒鍵。

4

5 4. 和音の機能 (機能和声)

6 西洋の調性音楽では、和音も重要な要素となる。和音とは、「一定の秩序にしたがって組み合わされたいくつかの音の集合体 (池内ら, 1964, p.13)」である。和音の基礎となる形体は、8 三和音である。三和音の原型において、最低に位置する音を根音、根音の3度上の音を第3音、根音の5度上の音を第5音とよぶ。音階のI-VIIまでの各音を根音として、それぞれ3和音の原型を形成することができる (付録図3参照)。それぞれは、根音の音度に従って、I度の和音、II度の和音、・・・、VII度の和音とよばれる。もしくは、根音の名称に応じて、英語では、tonic chord, supertonic chord, ..., leading chord, 日本語では、主和音、上主和音、..., 導和音とよばれる (付録図3参照)。

14



ローマ数字表記	I 度の和音	II 度の和音	III 度の和音	IV 度の和音	V 度の和音	VI 度の和音	VII 度の和音
英語表記	Tonic chord	Supertonic chord	Mediant chord	Subdominant chord	Dominant chord	Submediant chord	Leading chord
日本語表記	主和音	上主和音	中和音	下属和音	属和音	下中和音	導和音

1

2 付録図 3 I度からVII度までの音を根音とした三和音（原型）。

3

4 あらゆる和音は、3つの主要な機能（性格）に分類される。トニック（Tonic）、サブドミナ
5 ント（Subdominant）、ドミナント（Dominant）である。これらの和音機能が、和声の諸原理に
6 従って結合されることで、和声のセンテンス（Cadence: カデンツ）が組み立てられる。トニ
7 ックは、調性文脈の基本となる音で、安定感をもたらす。この機能は、I度の和音（C major
8 では、C-E-G）とVI度の和音（C major では、A-C-E）が担う。サブドミナントは、不安定さ
9 や色彩の変化をもたらす機能とされ、II度の和音（C major では、D-F-A）やIV度の和音など
10 （C major では、F-A-C）が担う。ドミナントは、強い緊張感をもたらし、より安定したトニ
11 ックへ連結しようとする期待を生じさせる（解決）。この機能は、主にV度の和音（C major で
12 は、G-B-D）が担う。

13 和音配置は、和音の機能的な関係によって定められている。ある和音が他の和音に連結す
14 ることを和音進行とよぶが、特定の和音がどの和音に連結しうるかは、例外はあるが、付録
15 表1のようにまとめることができる（池内ら, 1964; Piston, 1959）。和音の連結で作られたフ
16 レーズが任意の順に結合されていくことで、より大きな和声文脈（統語構造）が形成される
17 （本文の図2も参照）。このような和声文脈に区切りをつけることを終止とよぶ。終止には、
18 複数のパターンがあるが、全終止が最も強い終止感を感じさせる。全終止は、→V→I（→ド
19 ミナント→トニック）の連結で得られる。本文中で紹介した多くの先行研究では、和声的に
20 正しい全終止に対して、全終止のIの和音をトニック機能をもたない和音に変化させること
21 で、和声的不規則性を起こしていた。

1

2

付録表 1

3

和声進行の一般的なパターンの例

和音	連結しうる和音
I	II, IV, V, VI
II	V, (VI)
III	VI, IV
IV	V, I, II
V	I, VI, IV
VI	II, IV, V
VII	III

4

5

6 本文中では、和声的に正しくない和音として、ナポリの和音が例示される。ナポリの和音
 7 は、主音の短2度上の音を根音とする長三和音である。主音がCであるC majorでは、Cの
 8 短2度上、すなわち半音高いDbの音を根音とする長三和音となり、Db-F-Abで構成される。
 9 そのため、C majorの音階、すなわちピアノの白鍵には含まれない黒鍵の非音階音Db、Abが
 10 出現する。この点で、ナポリの和音は、C majorの文脈において調性的期待を逸脱させると
 11 考えられる。さらに、和音の機能としては、サブドミナントに分類されるため、Koelsch et
 12 al. (2000) の刺激のように、ドミナントの後に提示されると、機能和声の面で不規則的とな
 13 り、和声的な期待も逸脱させると考えられる。

14

15

引用文献（付録で初出のもの）

16 池内 友次郎・長谷川 良夫・石桁 真礼生・松本 民之助・島岡 讓・柏木 俊夫…佐藤
 17 真 (1964) 和声—理論と実習— 1巻 音楽之友社.

- 1 石桁 真礼生・末吉 保雄・丸田 昭三・飯田 隆・金光威 和雄・飯沼 信義 (1965) 新
- 2 装版 楽典—理論と実習— 音楽之友社.
- 3 松永 理恵 (2020) 3 節 音高組織の知覚 大串健吾・桑野園子・難波誠一郎 (監修) 音楽
- 4 知覚認知ハンドブック—音楽の不思議の解明に挑む科学— (pp.72–77) 北大路書房.
- 5