The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

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

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

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

要旨

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-related potential: ERP) を用いて，調性的期待が逸脱した場合と逸脱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ューし，それらの ERP (例えば，early right anterior negativity: ERAN; mismatch negativity: MMN) に反映される情報処理過程の内容を議論する。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後の方向性と残された課題を示す。

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，事象関連電位

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

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，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。

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まとめる。次に，神経反応 (主に脳波) を指標に調性的期待を検討した研究をレビューし，事象関連電位 (event-related potential: ERP) 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。

2. 調性の心的表象

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

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(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 節から 3 節を参照してほしい。

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。例えば，Krumhansl and Shepard (1979) は，先行提示された音階に含まれ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 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 major では E）と第 5 音（C major では G）は，中心音の次に強い終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。

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，心理的な距離が生まれることも示されている。Krumhansl and Kessler (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) 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，調性的階層性とよぶ (Krumhansl, 1990, 1991; Krumhansl & Keil, 1982; West & Fryer, 1990)。

3. 調性的期待

3.1 本稿における調性的期待の定義

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れる短期表象に基づく動的期待 (dynamic expectations) や，より長期的な可塑性や学習によるスキーマ的期待 (schematic expectations) などがある (Vuust et al., 2022a)。本稿では，調性的期待をスキーマ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

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」と定義する。ここで，「期待 (expectancy)」，「予期 (expectation)」，「予測 (prediction)」という用語を，Rohrmeier and Koelsch (2012) に従って，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 et al. (2022a) では，主観的な経験として期待 (anticipation) を定義しているが，心理状態としての anticipation に対して，より広義の期待状態が expectancy にあたると解釈できる。予期とは，起こると予測された事象の内容を示す概念として用いる。予測とは，未来志向の情報処理全般を指す概念として用いる。

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，実際に起こった事象との不一致には「不規則性 (irregularity)」を用いる。不規則性は，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こった事象との不一致には「逸脱 (violation)」を使用する。逸脱は，主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。

図 1

3.2 調性的期待の存在

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，そのときに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。

旋律の期待生成過程に関する有名な理論に Implication-Realization (IR) 理論がある (Narmour, 1991)。IR 理論では，旋律の期待には，生得的で普遍的な知覚法則によるボトムアップ処理と，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 つの処理システムがかかわっていると提案している (Narmour, 1991)。ボ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れ，旋律の期待が生じると想定している (Krumhansl, 1995; Schellenberg, 1996, 1997; Thompson, Cuddy, & Plaus, 1997)。つまり，

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ると考えられている (Cuddy & Lunney, 1995; Krumhansl, 1995)。例えば，Bigand (1997) の実験 1 では，調性文脈が各音の機能 (特定の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) を提示すると，ターゲット音に対して知覚される調性的な安定性 (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，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た場合にもみられ (Marmel et al., 2008)，スキーマベースの調性的期待の存在が支持される。

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性に基づいて生じる (Butler & Brown, 1984; Krumhansl & Kessler,

1982)。和音文脈において調性的期待が生じる過程について，Bharucha (1987) の活性化拡散モデルによる説明が，和音プライミング課題を用いた検討により支持されてきた (Sears et al., 2019; Tillmann, Bigand, & Pineau, 1998; Tillmann & Marmel, 2013)。Bharucha and Stoeckig (1987) は，プライム和音とターゲット和音を継時提示し，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，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 (Tillmann & Marmel, 2013)。

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，先行文脈に既に出現したピッチを含んでいることが多い。Bigand et al. (2003) はピッ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

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支持する。

4．事象関連電位を指標とした調性的期待の研究

脳は，連続的に提示されていた音の消失 (Horváth et al., 2010) や体性感覚入力の変化 (Shinozaki et al., 1998)，課題遂行におけるエラー (Hajcak et al., 2005) などの様々な逸脱事象に対して神経反応を生じさせる。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，期待の逸脱時の脳波や血中酸素濃度依存 (Blood Oxygen Level Dependent: BOLD) 信号を記録し (Brattico et al., 2006; Ruiz, Koelsch, & Bhattacharya, 2009; Seger et al., 2013)，調性的期待から逸脱した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，調性的期待の神経相関 (neural correlate) としてきた。音楽は時間的に展開し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 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

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の指標として用いられる (入戸野, 2005)。ERPは，ある事象を起点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生じる複数の波から構成される。それぞれの波を成分 (component) 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，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る。

4.1 旋律のピッチ逸脱に対する神経反応

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, Pearce, & Bhattacharya, 2013; Chabin, Pazart, & Gabriel, 2022; Fujioka et al., 2005; Marie et al., 2012; Marmel, Perrin, & Tillmann, 2011; Mencke et al., 2021; Miranda & Ullman, 2007; Tew et al., 2009; レビューとして，Yu, Liu, & Gao, 2015)。例えば，Brattico et al. (2006) では，旋律の構成音を，低頻度 (p = .25) で非音階音に変えたり，

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ッチ陰性電位（mismatch negativity: MMN）が生じた。MMNは，音に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，前頭部優勢の陰性電位として記録される（Fishman, 2014; Näätänen et al., 2007）。MMNは，周波数，音圧，持続時間，音源などの音響的特徴の次元で，先行する文脈と異なる音が提示されると生じる（Näätänen, Jacobsen, & Winkler, 2005; Pakarinen et al., 2007）。したがって，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（Lumaca et al., 2019; Sussman et al., 2014; Wacongne, Changeux, & Dehaene, 2012）。

Brattico et al. (2006) の，非音階音やミスチューニング音でMMN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。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

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 (Kalda & Minati, 2012)。他のいくつかの研究は，旋律のターゲット位置において，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 ERAN）が生じることを報告している (Kalda & Minati, 2012; Miranda & Ullman, 2007)。このような ERP 研究の知見から，調性表象から生成された予期と入力された音との比較が 200 ms 前後までになされていることが示唆される。

4.2 和声的な逸脱に対する神経反応

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の和音がもつ機能によって定められている (Bharucha & Krumhansl, 1983; Krumhansl, 1983)。こうした規則は，西洋の音楽学においては和声とよばれ，個々の要素をより大きな構造へと位置づける規則とみなされることから，音楽の統語とよばれる (Asano & Boeckx, 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的に知覚することを，音楽の統語処理とよぶ (Patel, 2003)。調性的期待には，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

る。

図 2

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 (early right anterior negativity: ERAN) は，Koelsch et al. (2000) で初めて報告された。実験では，音楽訓練歴のない非音楽家を対象に，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) で起こしたときの ERP 反応を記録した。Koelsch et al. (2000) で用い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 節「機能和声」で補足した。例えば，系列はトニック (C major では 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 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，サブドミナント機能に属し (Piston, 1959)，C major の音階に含まれない非音階音を 2 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 150–250 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

性で生じる左前部初期陰性電位 (early left anterior negativity: ELAN; Koelsch & Friederici, 2003 を参照) と類似しているこの成分は，ERAN とよばれた。Koelsch et al. (2000) が和声的な期待，すな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 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た (Koelsch et al., 2003, 2007; Zhang et al., 2018)。

4.3 ERAN の性質

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 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 と CiNii において，”ERAN chord” (PubMed: 38 件; CiNii: 11 件)，”ERAN melody” (PubMed: 9 件; CiNii: 3 件) をキーワードに検索した結果から，評論を除いた査読あり論文 51 件 (PubMed と CiNii 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)。

表 1

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

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 (Koelsch et al., 2000, 2001; Koelsch, Schmidt, & Kansok, 2002; Koelsch, Schröger, & Gunter, 2002)。この現象について，2 つの観点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，より大きな調性的期待の逸脱となったと考えられる。この場合，調性文脈の確立に基づく期待と，楽曲の終止に関する期待の逸脱が影響した可能性もある (Leino et al., 2007)。

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 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ナントではなかったため，特定の和音に対する強い期待を生じさせなかったと考えられる。さらに，この位置では，サブドミナント機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

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 振幅の変動は，Garza-Villarreal et al. (2011) や Leino et al. (2007) でもみられる。

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複雑な和声系列や (Koelsch et al., 2013; Ma et al., 2018a; Zhang et 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生じる (Koelsch et al., 2008; Koelsch & Mulder, 2002; Steinbeis, Koelsch, & Sloboda, 2006)。ERAN には，和音と和音の連結を規定す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 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 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，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反映しているかを考察する必要があるだろう (Rohrmeier & Koelsch,

2012; 同様に表 1 参照)。

5. ERAN に反映される情報処理過程

5.1 ERAN に重畳するその他の電位

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・空間的に重畳して現れる。そのため，和声的な不規則性を起こせば，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 ERAN だけが記録されるというわけではない。例えば，Koelsch et al. (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♭) 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反応が ERAN に重畳する可能性もある。先行研究における非音階音の提示の有無を表 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。新しいピッチの出現などの感覚的不協和 (sensory dissonance; Koelsch et al., 2007) によって振幅変動を示す ERP 成分には，聴覚 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けて陰性電位として現れる (Näätänen & Winkler, 1999)。N1 は，潜時約 100 ms でピークを示すが，130–170 ms 付近まで生じる場合もあり (Woods, 1995)，ERAN の潜時 (150–250 ms) と重なっている。

ERANに重畳するN1の影響を統制するためには，(1) 新しいピッチ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音を先行文脈に事前に提示しておく方法の3つがある。

その1つ目として，Koelsch et al. (2007) の実験1では，図2Cのダブルドミナント (DD) の和音を用いて，新規ピッチ (基本周波数) 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) 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，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いる可能性があった (C majorの場合，黒鍵にあたるF#)。

そこで，2つ目の方法として，Koelsch et al. (2007) の実験2では，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

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ず，逸脱和音に対して ERAN が生じた。生じた ERAN は，知覚的・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ある。

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がある。Koelsch and Sammler (2008) は，短い音楽系列の終止位置に，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，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 ERAN を記録した。

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

わる内因性の MMN 成分も，ERAN に時間的に重畳することがある。

5.2 ERAN と MMN に反映される期待過程の異同

ERAN と MMN は，類似した神経反応であるだけでなく (潜時 150–250 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映する。

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研究は，Koelsch et al. (2001) である。Koelsch et al.では，ERAN を，周波数規則の逸脱に対して生じる MMN (physical MMN: 以降 phMMN とする) や，抽象的な規則の逸脱で生じる MMN (abstract feature MMN: 以降 afMMN とする) とは異なる成分であるとしている。ERAN は和声的に不規則なナポリの和音の提示で，phMMN は低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

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，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)，phMMNやafMMNは，位置による振幅変動を示さなかった。ERAN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れる (Koelsch et al., 2001)。このことから，ERANは，phMMNや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されている (Leino et al., 2007)。

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 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

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示されている研究では，MMN 成分が重畳している可能性がある。

また，ERAN と MMN は発生する脳領域にも違いがあると推測されている。図 3 に示したように，ERAN と MMN は，どちらもシルビ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致しない。MMN は，前頭皮質の関与も一部あるが (Rinne, Degerman, & 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とが示されている (Korzyukov et al., 2003)。他方，音楽の統語的不規則性に対する ERAN は，上側頭回の関与もあるが，主に下前頭回に発生源が推定されており (Koelsch, Fritz, et al., 2005; Koelsch, Gunter, et al., 2002; Maess et al., 2001)，MMN に比べてより前頭側に発生源があるようである。phMMN と afMMN の発生源が完全には一致しないが同じ MMN 成分であるように (Korzyukov et al., 2003)，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分 (family component) であると考えられる (Koelsch et al., 2001)。

5.3 ERAN と MMN に反映される情報処理過程

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

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ている場合には,逸脱検出を反映したERANとMMNが生じる。ERAN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ラダイムにより，記録されてきた。

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(Paavilinen et al., 2001; レビューとして，Sussman et al., 2014)。聴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が記録される (Koelsch, 2009; Vuust et al., 2009; Wacongne, Changeux, & Dehaene, 2012)。こうしたMMNの特性を利用して，長調と短調の弁別 (Virtala et al., 2011) が聴覚皮質の初期段階で行われていることも示されている。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

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。

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，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表象に基づく逸脱検出，すなわち予測誤差信号 (Koelsch, 2009; Koelsch et al., 2000; Koelsch, Vuust, & Friston, 2019) であると考えられる。規則の種類の違いが ERAN と MMN に反映される情報処理，すなわち機能的意義の違いであり (Garza-Villarreal et al., 2011; Ishida & Nittono, 2022; Koelsch, 2009; Pagès-Portabella & Toro, 2020)，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。

図 3

ERAN と MMN を直接比較した Ishida and Nittono (2022) をもとに，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 and Nittono (2022) では 5 和音で構成された和音系列の最後の位置

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。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唆する。

6. 調性的期待過程における逸脱検出後の処理

図 3 に示したように，予測誤差が出力された後，入力音は聴覚文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 (Donchin & Coles, 1988)。一方，音楽の統語処理において行われる統

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示す N5 成分に反映されると考えられてきた (Koelsch et al., 2000; Zhang et al., 2018)。N5 は，ERAN が生じない場合であっても生じることから，逸脱処理に限らない，より認知レベルの統合処理を反映すると考えられている (Poulin-Charronnat, Bigand, & Koelsch, 2006)。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うにつれて，各和音に対する N5 振幅は減衰していくことが示されている (Koelsch et al., 2003)。N5 の振幅減衰は，和音進行が進むにつれて，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していくことに対応した反応だと考えられている。

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 (Koelsch 2011a, 2011b)。内音楽的意味とは，ある音楽的要素が，別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 振幅がより大きくなると考えられている (Koelsch, 2011a)。

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

して P600 が報告されることもある (Lagrois, Peretz, & Zendel, 2018; Peretz et al., 2009; Zendel & Alexander, 2020; Zendel et al., 2022)。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 (頭頂部優勢) を報告した Patel et al. (1998) は，P600 を言語と音楽に共通のモデル更新の処理を反映する成分として解釈した。

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。Featherston et al. (2013) は，N5 は和音が解決 (不安定な響きから安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，Featherston et al. (2013) によると，P600 は，不規則的な音に対する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，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実証的証拠を示すことが必要である。

表 1 には，後期成分の出現の有無もまとめたが，ERAN と N5 や 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

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リガとなっているかどうかは，明らかではない。Poulin-Charronnat et 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た。また，Jaśkiewicz et al. (2016) は，和声的な逸脱度を2段階に操作して提示すると，より逸脱度が大きい和音進行 (very unexpected) では ERAN と P600 が生じたのに対し，逸脱度が小さい和音進行 (unexpected) では ERAN は出現せずに P600 だけが生じたと報告した。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検討する必要があるだろう。

7. まとめと展望

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

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 ERP は予測誤差信号と考えられ (Koelsch et al., 2019)，図 3 に示したような，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。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 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，ERP を指標とすることで，調性的期待にかかわる一連の情報処理過程を検討することができる。

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

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められるだろう。

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 (Koelsch, Schmidt et al., 2002; Pagès-Portabella & Toro, 2020)，音楽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，個人が保持している表象や期待の逸脱度を考慮した ERP 研究は少ない。

統語表象などの音楽の規則は，確率学習 (統計学習) で獲得される可能性が提案されており (Jonaitis & Saffran, 2009; Loui, 2012)，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観点から予測することも可能となっている (Pearce, 2018)。しかし，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，

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

個人差や文化差に対して,音楽の予測符号化 (predictive coding of music: PCM) モデルによるアプローチが期待できる。PCM モデルでは,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件づけられると考える (Vuust et al., 2022a)。本稿で議論した調性的期待過程は,西洋音楽を対象に検討されてきた知見に基づいており,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., 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, 2022)。しかし,PCM モデルは,ある音楽が事前信念 (経験や学習) 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高く,個人差や文化差を扱いうる (Vuust et al., 2022a, 2022b)。西洋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

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，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なツールとなるだろう。

文　献

Asano, R., & Boeckx, C. (2015). Syntax in language and music: What is the right level of comparison? *Frontiers in Psychology*, *6*, 942.

Besson, M., & Faïta, F. (1995). An event-related potential (ERP) study of musical expectancy: Comparison of musicians with nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 1278–1296.

Bharucha, J. J. (1987). Music cognition and perceptual facilitation: A connectionist framework. *Music Perception*, *5*, 1–30.

Bharucha, J. J., & Stoeckig, K. (1987). Priming of chords: Spreading activation or overlapping frequency spectra? *Perception & Psychophysics*, *41*, 519–524.

Bharucha, J., & Krumhansl, C. L. (1983). The representation of harmonic structure in music: Hierarchies of stability as a function of context. *Cognition*, *13*, 63–102.

Bigand, E. (1997). Perceiving musical stability: The effect of tonal structure, rhythm, and musical expertise. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 808–822.

Bigand, E., Poulin, B., Tillmann, B., Madurell, F., & D'Adamo, D. A. (2003). Sensory versus cognitive components in harmonic priming.

Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, *29*, 159–171.

Bonfiglio, L., Virgilito, A., Magrini, M., Piaruli, A., Bergamasco, M., Barcaro, U., Rosi, B., Salveti, O., & Carboncini, M. C. (2015). N400-like responses to three-chord harmonic sequences with unexpected out-of-key endings: Scalp topography, cortical sources, and perspectives for a clinical use. *Archives Italiennes de Biologie*, *153*, 1–18.

Brattico, E., Tervaniemi, M., Näätänen, R., & Peretz, I. (2006). Musical scale properties are automatically processed in the human auditory cortex. *Brain Research*, *1117*, 162–174.

Brattico, E., Tupala, T., Glerean, E., & Tervaniemi, M. (2013). Modulated neural processing of Western harmony in folk musicians. *Psychophysiology*, *50*, 653–663.

Butler, D., & Brown, H. (1984). Tonal structure versus function: Studies of the recognition of harmonic motion. *Music Perception*, *2*, 6–24.

Carrus, E., Pearce, M. T., & Bhattacharya, J. (2013). Melodic pitch expectation interacts with neural responses to syntactic but not semantic violations. *Cortex*, *49*, 2186–2200.

Centanni, T. M., Halpern, A. R., Seisler, A. R., & Wenger, M. J. (2020). Context-dependent neural responses to minor notes in frontal and temporal regions distinguish musicians from nonmusicians. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *20*, 551–564.

Chabin, T., Pazart, L., & Gabriel, D. (2022). Vocal melody and musical background are simultaneously processed by the brain for musical predictions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1512*, 126–140.

Corrigall, K. A., & Trainor, L. J. (2019). Electrophysiological correlates of key and harmony processing in 3-year-old children. *Music Perception*, *36*, 435–447.

Cuddy, L. L., & Lunney, C. A. (1995). Expectancies generated by melodic intervals: Perceptual judgments of melodic continuity. *Perception & Psychophysics*, *57*, 451–462.

Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, *11*, 357-374.

Ellison, D., Moisseinen, N., Fachner, J., & Brattico, E. (2015). Affective versus cognitive responses to musical chords: An ERP

and behavioral study. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *25*, 423–434.

Featherstone, C. R., Morrison, C. M., Waterman, M. G., & MacGregor, L. J. (2013). Semantics, syntax or neither? A case for resolution in the interpretation of N500 and P600 responses to harmonic incongruities. *PLOS ONE*, *8*, e76600.

Fishman, Y. I. (2014). The mechanisms and meaning of the mismatch negativity. *Brain Topography*, *27*, 500–526.

Fitzroy, A. B., & Sanders, L. D. (2013). Musical expertise modulates early processing of syntactic violations in language. *Frontiers in Psychology*, *3*, 603.

Fiveash, A., Thompson, W. F., Badcock, N. A., & McArthur, G. (2018). Syntactic processing in music and language: Effects of interrupting auditory streams with alternating timbres. *International Journal of Psychophysiology*, *129*, 31–40.

Fujioka, T., Trainor, L. J., Ross, B., Kakigi, R., & Pantev, C. (2005). Automatic encoding of polyphonic melodies in musicians and nonmusicians. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1578–1592.

Garza Villarreal, E. A., Brattico, E., Leino, S., Østergaard, L., & Vuust, P. (2011). Distinct neural responses to chord violations: A multiple source analysis study. *Brain Research*, *1389*, 103–114.

Guo, S., & Koelsch, S. (2015). The effects of supervised learning on event-related potential correlates of music-syntactic processing. *Brain Research*, *1626*, 232–246.

Guo, S., & Koelsch, S. (2016). Effects of veridical expectations on syntax processing in music: Event-related potential evidence. *Scientific Reports*, *6*, 19064.

Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, *42*, 151–160.

東川清一 (2017) 音楽理論入門　ちくま学芸文庫.

Horváth, J., Müller, D., Weise, A., & Schröger, E. (2010). Omission mismatch negativity builds up late. *Neuroreport*, *21*, 537–541.

Ishida, K., & Nittono, H. (2022). Relationship between early neural responses to syntactic and acoustic irregularities in music. *European Journal of Neuroscience*, *56*, 6201-6214.

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旋律の効果　生理心理学と精神生理学, *38*, 177–184.

Jaśkiewicz, M., Francuz, P., Zabielska-Mendyk, E., Zapała, D., & Augustynowicz, P. (2016). Effects of harmonics on aesthetic judgments of music: An ERP study involving laypersons and experts. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *76*, 142–151.

Jentschke, S., Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2005). Investigating the relationship of music and language in children: Influences of musical training and language impairment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1060*, 231–242.

Jonaitis, E. M. M., & Saffran, J. R. (2009). Learning harmony: The role of serial statistics. *Cognitive Science*, *33*, 951–968.

Kalda, T., & Minati, L. (2012). Detecting scale violations in absence of mismatch requires music-syntactic analysis: A further look at the early right anterior negativity (ERAN). *Brain Topography*, *25*, 285–292.

Keller, P. E., & Koch, I. (2008). Action planning in sequential skills: Relations to music performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*, 275–291.

Kim, C. H., Lee, S., Kim, J. S., Seol, J., Yi, S. W., & Chung, C. K. (2014). Melody effects on ERANm elicited by harmonic irregularity in musical syntax. *Brain Research*, *1560*, 36–45.

Kim, S. G., Kim, J. S., & Chung, C. K. (2011). The effect of conditional probability of chord progression on brain response: An MEG study. *PLOS ONE*, *6*, e17337.

Koelsch, S. (2009). Music-syntactic processing and auditory memory: Similarities and differences between ERAN and MMN. *Psychophysiology*, *46*, 179–190.

Koelsch, S. (2011a). Towards a neural basis of processing musical semantics. *Physics of Life Reviews*, *8*, 89–105.

Koelsch, S. (2011b). Toward a neural basis of music perception - a review and updated model. *Frontiers in Psychology*, *2*, 110.

Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2003). Toward the neural basis of processing structure in music: comparative results of different neurophysiological investigation methods. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *999*, 15–28.

Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D., & Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: An fMRI study. *NeuroImage*, *25*, 1068–1076.

Koelsch, S., Gunter, T. C., v. Cramon, D. Y., Zysset, S., Lohmann, G., & Friederici, A. D. (2002). Bach speaks: A cortical “language-

network" serves the processing of music. *NeuroImage*, *17*, 956–966.

Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: "nonmusicians" are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 520–541.

Koelsch, S., Gunter, T., Schröger, E., & Friederici, A. D. (2003). Processing tonal modulations: An ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 1149–1159.

Koelsch, S., Gunter, T. C., Schröger, E., Tervaniemi, M., Sammler, D., & Friederici, A. D. (2001). Differentiating ERAN and MMN: An ERP study. *NeuroReport*, *12*, 1385–1389.

Koelsch, S., Gunter, T. C., Wittfoth, M., & Sammler, D. (2005). Interaction between syntax processing in language and in music: An ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1565–1577.

Koelsch, S., & Jentschke, S. (2008). Short-term effects of processing musical syntax: An ERP study. *Brain Research*, *1212*, 55–62.

Koelsch, S., Jentschke, S., Sammler, D., & Mietchen, D. (2007). Untangling syntactic and sensory processing: An ERP study of music perception. *Psychophysiology*, *44*, 476–490.

Koelsch, S., Kilches, S., Steinbeis, N., & Schelinski, S. (2008). Effects of unexpected chords and of performer's expression on brain responses and electrodermal activity. *PLOS ONE*, *3*, e2631.

Koelsch, S., & Mulder, J. (2002). Electric brain responses to inappropriate harmonies during listening to expressive music. *Clinical Neurophysiology*, *113*, 862–869.

Koelsch, S., & Sammler, D. (2008). Cognitive components of regularity processing in the auditory domain. *PLOS ONE*, *3*, e2650.

Koelsch, S., Schmidt, B. H., & Kansok, J. (2002). Effects of musical expertise on the early right anterior negativity: An event-related brain potential study. *Psychophysiology*, *39*, 657–663.

Koelsch, S., Schröger, E., & Gunter, T. C. (2002). Music matters: Preattentive musicality of the human brain. *Psychophysiology*, *39*, 38–48.

Koelsch, S., Rohrmeier, M., Torrecuso, R., & Jentschke, S. (2013). Processing of hierarchical syntactic structure in music. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*, 15443–15448.

Koelsch, S., Vuust, P., & Friston, K. (2019). Predictive processes and the peculiar case of music. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*, 63–77.

Koelsch, S., Wittfoth, M., Wolf, A., Müller, J., & Hahne, A. (2004). Music perception in cochlear implant users: An event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, *115*, 966–972.

Korzyukov, O. A., Winkler, I., Gumenyuk, V. I., & Alho, K. (2003). Processing abstract auditory features in the human auditory cortex. *NeuroImage*, *20*, 2245–2258.

Krumhansl, C. L. (1983). Perceptual structures for tonal music. *Music Perception*, *1*, 28–62.

Krumhansl, C. L. (1990). Tonal hierarchies and rare intervals in music cognition. *Music Perception*, *7*, 309–324.

Krumhansl, C. L. (1991). Music psychology: Tonal structures in perception and memory. *Annual Review of Psychology*, *42*, 277–303.

Krumhansl, C. L. (1995). Music psychology and music theory: Problems and prospects. *Music Theory Spectrum*, *17*, 53–80.

Krumhansl, C. L., & Keil, F. C. (1982). Acquisition of the hierarchy of tonal functions in music. *Memory & Cognition*, *10*, 243–251.

Krumhansl, C. L., & Kessler, E. J. (1982). Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of musical keys. *Psychological Review*, *89*, 334–368.

Krumhansl, C. L., & Shepard, R. N. (1979). Quantification of the hierarchy of tonal functions within a diatonic context. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *5*, 579–594.

Lagrois, M. É., Peretz, I., & Zendel, B. R. (2018). Neurophysiological and behavioral differences between older and younger adults when processing violations of tonal structure in music. *Frontiers in Neuroscience*, *12*, 54.

Lee, D. J., Jung, H., & Loui, P. (2019). Attention modulates electrophysiological responses to simultaneous music and language syntax processing. *Brain Sciences*, *9*, 305.

Leino, S., Brattico, E., Tervaniemi, M., & Vuust, P. (2007). Representation of harmony rules in the human brain: Further evidence from event-related potentials. *Brain Research*, *1142*, 169–177.

Loui, P. (2012). Learning and liking of melody and harmony: Further studies in artificial grammar learning. *Topics in Cognitive Science*, *4*, 554–567.

Lumaca, M., Trusbak Haumann, N., Brattico, E., Grube, M., & Vuust, P. (2019). Weighting of neural prediction error by rhythmic complexity: A predictive coding account using mismatch negativity. *European Journal of Neuroscience*, *49*, 1597–1609.

Ma, X., Ding, N., Tao, Y., & Yang, Y. F. (2018a). Syntactic complexity and musical proficiency modulate neural processing of non-native music. *Neuropsychologia*, *121*, 164–174.

Ma, X., Ding, N., Tao, Y., & Yang, Y. F. (2018b). Differences in neurocognitive mechanisms underlying the processing of center-embedded and non–embedded musical structures. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 425.

Ma, X., Tao, Y., & Yang, Y. (2022). Factors inducing complexities in musical embedded structure processing. *Neuropsychologia*, *169*, 108153.

Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001). Musical syntax correlates in Broca's area. *Nature Neuroscience*, *4*, 540–545.

Maidhof, C., & Koelsch, S. (2011). Effects of selective attention on syntax processing in music and language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 2252–2267.

Marie, C., Fujioka, T., Herrington, L., & Trainor, L. J. (2012). The high-voice superiority effect in polyphonic music is influenced by experience: A comparison of musicians who play soprano-range compared with bass-range instruments. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *22*, 97–104.

Marmel, F., Tillmann, B., & Dowling, W. J. (2008). Tonal expectations influence pitch perception. *Perception and Psychophysics*, *70*, 841–852.

Marmel, F., Perrin, F., & Tillmann, B. (2011). Tonal expectations influence early pitch processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 3095–3104.

Mencke, I., Quiroga-martinez, D. R., Omigie, D., Michalareas, G., Schwarzacher, F., Trusbak, N., Vuust, P., & Brattico, E. (2021). Prediction under uncertainty: Dissociating sensory from cognitive expectations in highly uncertain musical contexts. *Brain Research*, *1773*, 147664.

Meyer, L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. Chicago: University of Chicago Press.

Miranda, R. A., & Ullman, M. T. (2007). Double dissociation between rules and memory in music: An event-related potential study. *NeuroImage*, *38*, 331–345.

Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, *118*, 2544–2590.

Näätänen, R., Jacobsen, T., & Winkler, I. (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. *Psychophysiology*, *42*, 25–32.

Näätänen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin*, *125*, 826–859.

Narmour, E. (1991). The top-down and bottom-up systems of musical implication: Building on Meyer's theory of emotional syntax. *Music Perception*, *9*, 1–26.

入戸野宏 (2005) 心理学のための事象関連電位ガイドブック 北大路書房.

Nittono, H., Bito, T., Hayashi, M., Sakata, S., & Hori, T. (2000). Event-related potentials elicited by wrong terminal notes: effects of temporal disruption. *Biological Psychology*, *52*, 1–16.

Paavilainen, P., Simola, J., Jaramillo, M., Näätänen, R., & Winkler, I. (2001). Preattentive extraction of abstract feature conjunctions from auditory stimulation as reflected by the mismatch negativity (MMN). *Psychophysiology*, *38*, 359–365.

Pagès-Portabella, C., Bertolo, M., & Toro, J. M. (2021). Neural correlates of acoustic dissonance in music: The role of musicianship, schematic and veridical expectations. *PLOS ONE*, *16*, e0260728.

Pagès-Portabella, C., & Toro, J. M. (2020). Dissonant endings of chord progressions elicit a larger ERAN than ambiguous endings in musicians. *Psychophysiology*, *57*, e13476.

Pakarinen, S., Takegata, R., Rinne, T., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2007). Measurement of extensive auditory discrimination profiles using the mismatch negativity (MMN) of the auditory event-related potential (ERP). *Clinical Neurophysiology*, *118*, 177–185.

Park, J. M., Chung, C. K., Kim, J. S., Lee, K. M., Seol, J., & Yi, S. W. (2018). Musical expectations enhance auditory cortical processing in musicians: A magnetoencephalography study. *Neuroscience*, *369*, 325–335.

Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, *6*, 674–681.

Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J., Besson, M., & Holcomb, P. J. (1998). Processing syntactic relations in language and music: An event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 717–733.

Pearce, M. T. (2018). Statistical learning and probabilistic prediction in music cognition: Mechanisms of stylistic enculturation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1423*, 378–395.

Peretz, I., Brattico, E., Jrvenp, M., & Tervaniemi, M. (2009). The amusic brain: In tune, out of key, and unaware. *Brain*, *132*, 1277–1286.

Piston, W. (1959). *Harmony*. London: Victor Gollancz.

Poulin-Charronnat, B., Bigand, E., & Koelsch, S. (2006). Processing of musical syntax tonic versus subdominant: An event-related

potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 1545–1554.

Przysinda, E., Zeng, T., Maves, K., Arkin, C., & Loui, P. (2017). Jazz musicians reveal role of expectancy in human creativity. *Brain and Cognition*, *119*, 45–53.

Rinne, T., Degerman, A., & Alho, K. (2005). Superior temporal and inferior frontal cortices are activated by infrequent sound duration decrements: An fMRI study. *NeuroImage*, *26*, 66–72.

Rohrmeier, M. A., & Koelsch, S. (2012). Predictive information processing in music cognition. A critical review. *International Journal of Psychophysiology*, *83*, 164–175.

Ruiz, M. H., Koelsch, S., & Bhattacharya, J. (2009). Decrease in early right alpha band phase synchronization and late gamma band oscillations in processing syntax in music. *Human Brain Mapping*, *30*, 1207–1225.

Sammler, D., Koelsch, S., & Friederici, A. D. (2011). Are left fronto-temporal brain areas a prerequisite for normal music-syntactic processing? *Cortex*, *47*, 659–673.

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家の調性感 生理心理学と精神生理学, *40*, 209–217.

Savage, P. E., & Fujii, S. (2022). Towards a cross-cultural framework for predictive coding of music. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*, 641.

Schellenberg, E. G. (1996). Expectancy in melody: Tests of the implication-realization model. *Cognition*, *58*, 75–125.

Schellenberg, E. G. (1997). Simplifying the implication-realization model of melodic expectancy. *Music Perception*, *14*, 295–318.

Sears, D. R. W., Pearce, M. T., Spitzer, J., Caplin, W. E., & McAdams, S. (2019). Expectations for tonal cadences: Sensory and cognitive priming effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*, 1422–1438.

Seger, C. A., Spiering, B. J., Sares, A. G., Quraini, S. I., Alpeter, C., David, J., & Thaut, M. H. (2013). Corticostriatal contributions to musical expectancy perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*, 1062–1077.

Shin, H., & Fujioka, T. (2018). Effects of visual predictive information and sequential context on neural processing of musical syntax. *Frontiers in Psychology*, *9*, 2528.

Shinozaki, N., Yabe, H., Sutoh, T., Hiruma, T., & Kaneko, S. (1998). Somatosensory automatic responses to deviant stimuli. *Cognitive Brain Research*, *7*, 165–171.

Steinbeis, N., Koelsch, S., & Sloboda, J. A. (2006). The role of harmonic expectancy violations in musical emotions: Evidence from subjective, physiological, and neural responses. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 1380–1393.

Sun, Y., Lu, X., Ho, H. T., Johnson, B. W., Sammler, D., & Thompson, W. F. (2018). Syntactic processing in music and language: Parallel abnormalities observed in congenital amusia. *NeuroImage: Clinical*, *19*, 640–651.

Sussman, E. S., Chen, S., Sussman-Fort, J., & Dinces, E. (2014). The five myths of MMN: Redefining how to Use MMN in basic and clinical research. *Brain Topography*, *27*, 553–564.

Tervaniemi, M., Tupala, T., & Brattico, E. (2012). Expertise in folk music alters the brain processing of Western harmony. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1252*, 147–151.

Tew, S., Fujioka, T., He, C., & Trainor, L. (2009). Neural representation of transposed melody in infants at 6 months of age. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1169*, 287–290.

Thompson, W. F., Cuddy, L. L., & Plaus, C. (1997). Expectancies generated by melodic intervals: Evaluation of principles of melodic implication in a melody-completion task. *Perception & Psychophysics*, *59*, 1069–1076.

Tillmann, B., Bigand, E., & Pineau, M. (1998). Effects of global and local contexts on harmonic expectancy. *Music Perception*, *16*, 99–117.

Tillmann, B., & Marmel, F. (2013). Musical expectations within chord sequences: Facilitation due to tonal stability without closure effects. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *23*, 1–5.

Virtala, P., Berg, V., Kivioja, M., Purhonen, J., Salmenkivi, M., Paavilainen, P., & Tervaniemi, M. (2011). The preattentive processing of major vs. minor chords in the human brain: An event-related potential study. *Neuroscience Letters*, *487*, 406–410.

Vuust, P., Heggli, O. A., Friston, K. J., & Kringelbach, M. L. (2022a). Music in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*, 287–305.

Vuust, P., Heggli, O. A., Friston, K. J., & Kringelbach, M. L. (2022b). Reply to 'Towards a cross-cultural framework for

predictive coding of music'. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*, 641-642.

Vuust, P., Ostergaard, L., Pallesen, K. J., Bailey, C., & Roepstorff, A. (2009). Predictive coding of music – Brain responses to rhythmic incongruity. *Cortex*, *45*, 80–92.

Wacongne, C., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2012). A neuronal model of predictive coding accounting for the mismatch negativity. *Journal of Neuroscience*, *32*, 3665–3678.

West, R. J., & Fryer, R. (1990). Ratings of suitability of probe tones as tonics after random orderings of notes of the diatonic scale. *Music Perception*, *7*, 253–258.

Woods D. L. (1995). The component structure of the N1 wave of the human auditory evoked potential. *Electroencephalography and clinical neurophysiology Supplement*, *44*, 102–109.

Yu, X., Liu, T., & Gao, D. (2015). The mismatch negativity: An indicator of perception of regularities in music. *Behavioural Neurology*, *2015*, 469508.

Zendel, B. R., & Alexander, E. J. (2020). Autodidacticism and music: Do self-taught musicians exhibit the same auditory processing

advantages as formally trained musicians? *Frontiers in Neuroscience*, *14*, 752.

Zendel, B. R., Demirkaplan, Ö., Mignault-Goulet, G., & Peretz, I. (2022). The relationship between acoustic and musical pitch processing in adolescents. *International Journal of Developmental Neuroscience*, *82*, 314–330.

Zendel, B. R., Lagrois, M. E., Robitaille, N., & Peretz, I. (2015). Attending to pitch information inhibits processing of pitch information: The curious case of amusia. *Journal of Neuroscience*, *35*, 3815–3824.

Zhang, J., Che, X., & Yang, Y. (2019). Event-related brain potentials suggest a late interaction of pitch and time in music perception. *Neuropsychologia*, *132*, 107118.

Zhang, J., Zhou, X., Chang, R., & Yang, Y. (2018). Effects of global and local contexts on chord processing: An ERP study. *Neuropsychologia*, *109*, 149–154.

Zhou, L., Liu, F., Jiang, J., Jiang, H., & Jiang, C. (2019). Abnormal neural responses to harmonic syntactic structures in congenital amusia. *Psychophysiology*, *56*, e13394.

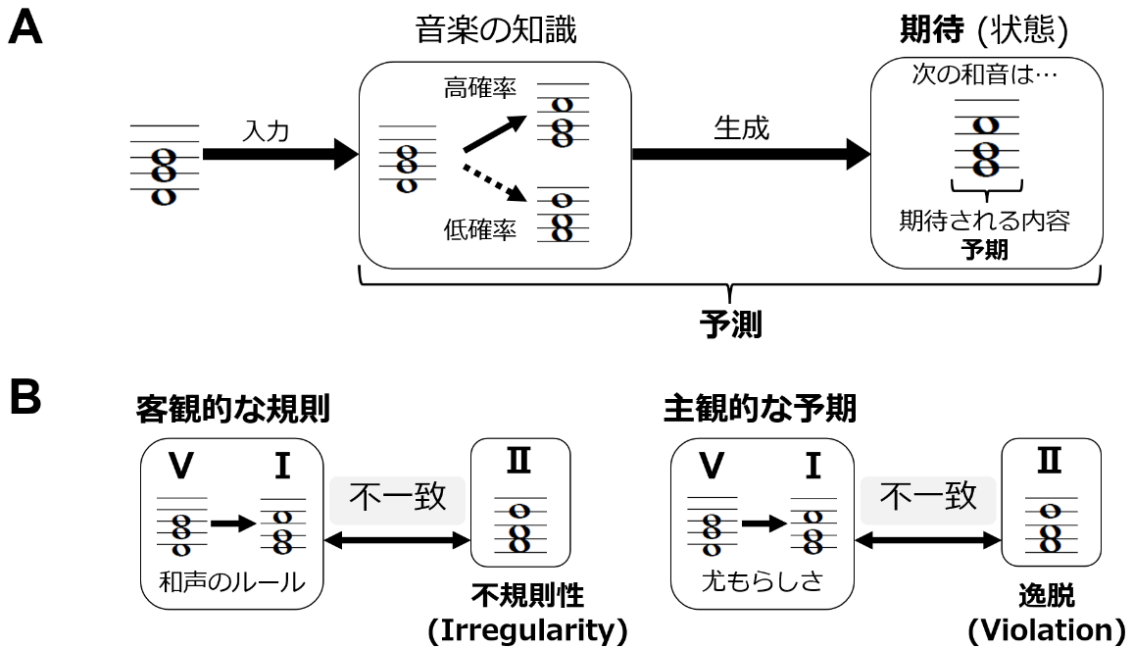


図 1　本稿における用語の定義。A は，期待にかかわる用語を整理している。期待 (expectancy) は何かが起こることを待ち受けている状態，予期 (expectation) は期待される内容，予測 (prediction) は未来志向の情報処理全般を指す用語として定義する (Rohrmeier & Koelsch, 2012)。B は，実際の事象との不一致をあらわす用語を示す。本稿では，客観的に定義できる不一致を不規則性 (irregularity)，主観的に定義される不一致を逸脱 (violation) と呼ぶ。

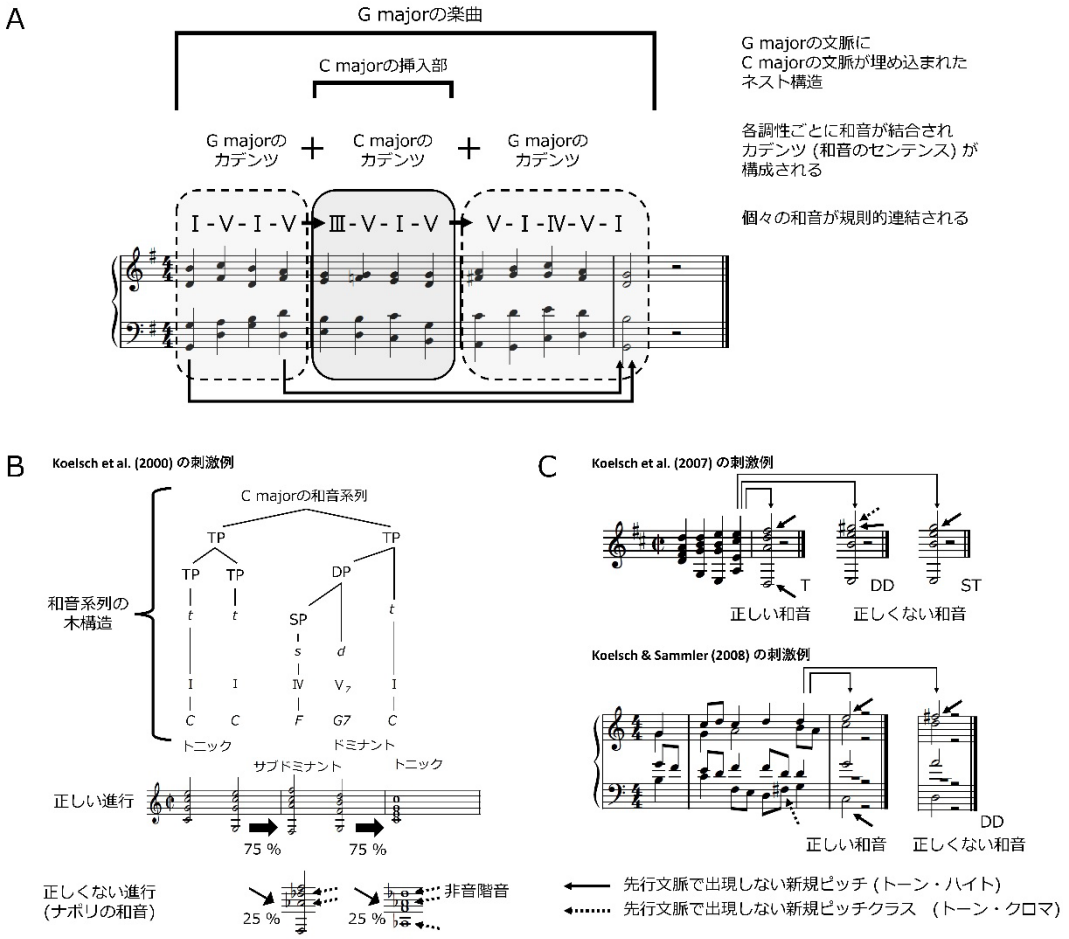


図 2　A. 音楽における階層的な統語構造のイメージ。G major の文脈に C major の文脈がネストされた ABA のネスト構造を示す。B. Koelsch et al. (2000) で用いられた和音系列における統語構造のイメージ。ナポリの和音において，点線の矢印で示した音は，C major においては非音階音 (ピアノの白鍵以外の音) に該当する。各和音の機能については，付録の 4 節「機能和声」を参照。C. 新規ピッチと新規ピッチクラスの影響を統制した刺激 (上) と，先行文脈に新規ピッチクラスを提示しておくことで，ターゲット和音の

感覚的不協和の程度を統制した刺激（下）の例。DD はダブルドミナント，ST はスーパートニックを示す。

1

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

Sammler, 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
和音と旋律	Kim et al. (2014)	無	有	等	両方	
	石田・池田・入戸野 (2020)	無	有	低	両方	

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, 査読あり論文 51 編を悉皆的にまとめた (2022 年 9 月 14 日)。

*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 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」, 含まれない場合には「無」とした。

*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, ドミナント機能の和音の後ろ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」を参照。

*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。

*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 調を別の C 調に変更して，前後の A 調どうしを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 (2012, 5.1.1. Local vs. Hierarchical processing) を参考にした。

*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」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。

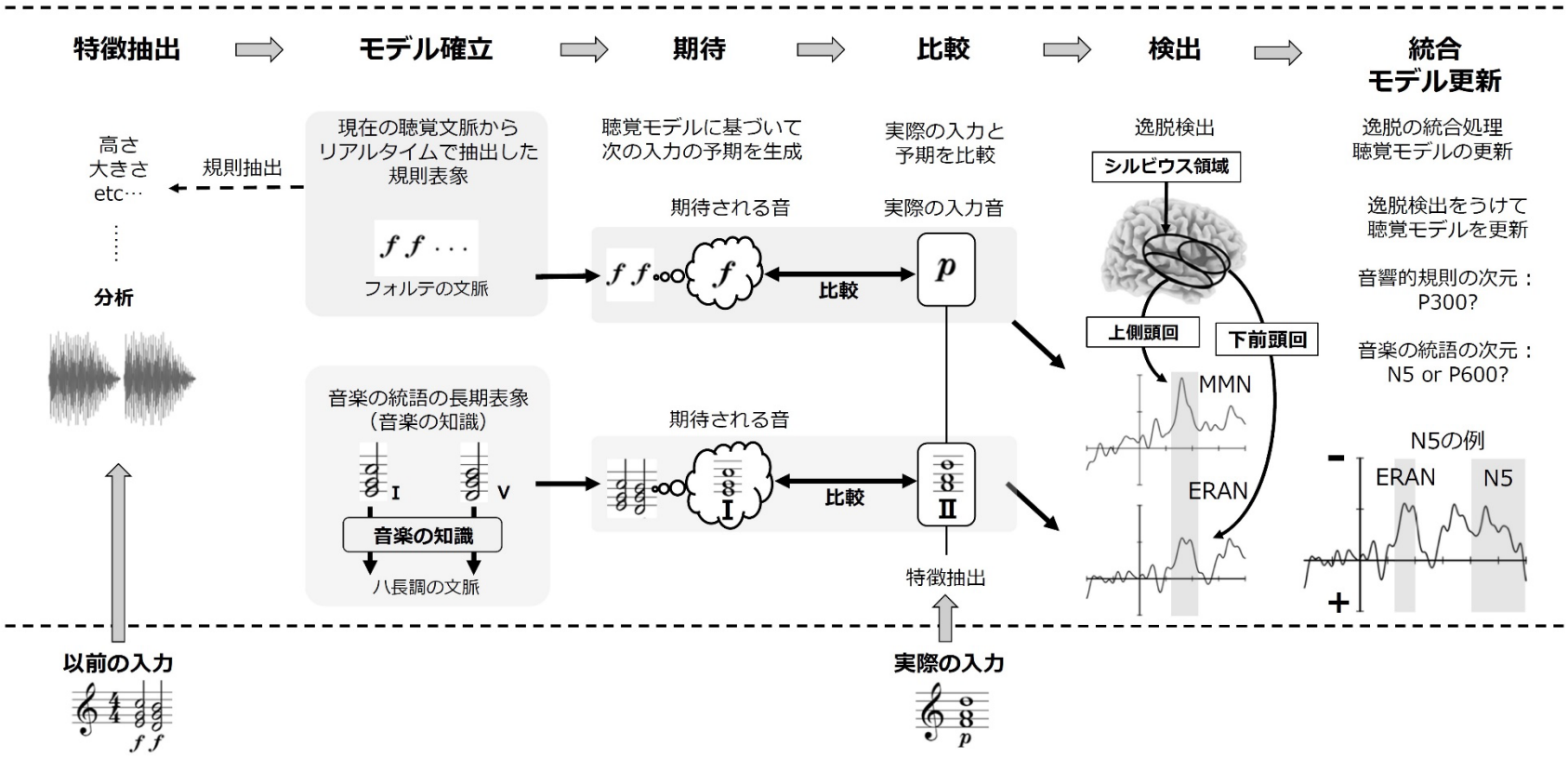


図 3　音楽の統語に基づく期待過程と音響的規則に基づく期待過程。Ishida and Nittono (2022) で示された，音楽的統語（和声的規則）と音響的規則（音圧の規則性）の不規則性の並列処理の結果をもとに図を作成した。

Supplementary materials

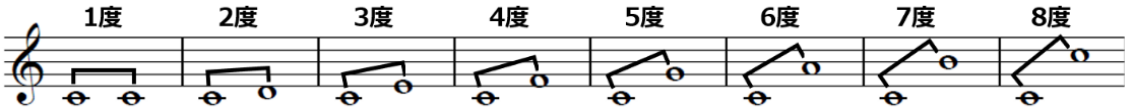
音楽理論に関する用語解説

1. 音の高さ

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は，音の高さ (音高) や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, 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させる。

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。

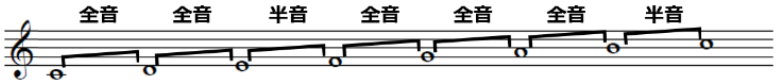


付録図 1　1 度から 8 度までの音程。長音程，短音程，完全音程の記載は省略した。

3. 音階

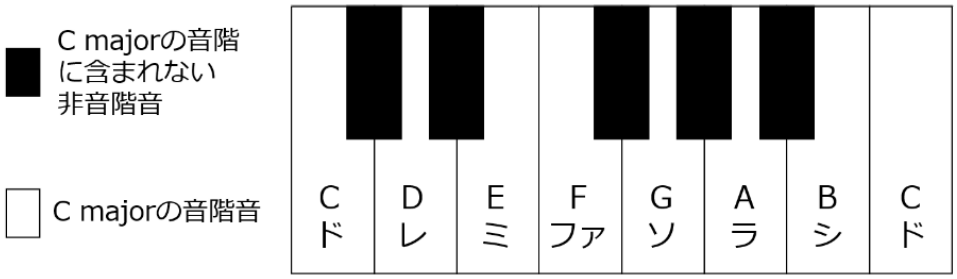
音階とは，ある音を起点として，1 オクターブ上の同じ名前の音までが，特定の秩序に従って配列された音列のことである (石桁ら, 1965)。例えば，西洋の調性音楽における音階 (musical scale) は，12 の音高ステップからさらに少ない 7 つの音高ステップ (5 全音と 2 半音) が，高さ (相対的音高) の順に 1 オクターブ内に段階的に配列された枠組みを示す。音階の中心音を定めた音高組織は，旋法 (musical mode) とよばれる。音階上に中心音が定まり，その中心音に特定のトーン・クロマが割り当てられた音高組織は，西洋音楽において調 (Key) とよばれる (東川, 2017)。旋法には，長旋法 (全–全–半–全–全–全–半音) と短旋法 (全–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。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，シャープやフラットがつく音) である。

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	ニ	ホ	ヘ	ト	イ	ロ	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

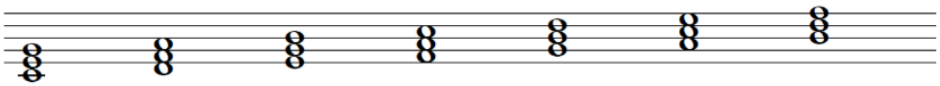
B



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.　和音の機能 (機能和声)

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，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)。



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

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）。

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 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 (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 では，G-B-D) が担う。

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 (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，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で，和声的不規則性を起こしていた。

付録表 1

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

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 の短 2 度上, すなわち半音高い D♭の音を根音とする長三和音となり, D♭–F–A♭で構成される。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 D♭，A♭が出現する。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 al. (2000) の刺激のように，ドミナントの次に提示されると，機能和声の面で不規則的となり，和声的な期待も逸脱させると考えられる。

引用文献（付録で初出のもの）

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

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) 新装版　楽典―理論と実習―　音楽之友社.

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.