

音楽における不規則性の検出にかかる神経処理

石田 海

音楽は、さまざまな聴覚的規則によって体制化されて知覚される。例えば、周波数や音色などの音の物理的特徴から、音楽理論を反映したような和音の構造に至るまで、さまざまな規則に基づいて処理される。これまで、聴覚的規則からの逸脱検出が、初期の事象関連電位(event-related potential: ERP)に反映されることが示されてきた(Fisher et al., 2011)。Koelsch et al.(2000)は、機能和声の不規則性に対して生じるERP反応をearly right anterior negativity(ERAN)と名付け、音楽の統語処理を反映していると主張した。ERANは、長期記憶に貯蔵されている音楽の統語表象に基づく逸脱検出に対応しており、単に現在の聴覚文脈を形成する物理的特徴(音色、周波数、音圧など)の逸脱検出に対応する mismatch negativity(MMN)とは機能的に異なる成分として考えられてきた(Koelsch, 2009; Pagès-Portabella & Toro, 2020)。

先行研究では、ERAN振幅は和声文脈における逸脱度に応じて変動するが、MMN振幅は変動しないことから両者の違いが主張されてきた(Leino et al, 2007)。しかし、各ERPは類似した潜時と頭皮上分布を示すうえに、どちらも聴覚的な不規則性に応答性をもつという共通点がある(Koelsch et al., 2001)。これまでの研究からは、神経反応としての両者の関係は明らかになっていない。そのため、本研究では、音楽的統語の不規則性(和音逸脱)と音響的な不規則性(音圧逸脱)の検出が、脳でどのように行われているのかを検討し、ERANとMMNの関係を明らかにすることを目的とした。

実験1では、5和音からなる和音系列の最後の位置で、和声的に逸脱する和音逸脱と音圧が小さくなる音圧逸脱が、単独で起こる場合(単独逸脱)と同時に起こる場合(二重逸脱)を設定した。Koelsch et al. (2000)と同様に、逸脱刺激を低頻度で提示し、無音動画を見てもらい、和音系列は聞き流す状態で、ERPを測定した。Figure 1(左)に、ERPの波形とトポグラフィ(電位の頭皮上分布、Figure 1の中央)を示す。和音逸脱と音圧逸脱に対して生じたERPは、潜時差がなくトポグラフィも類似していた。二重逸脱では、単独逸脱の和と等しい振幅のERP反応が、単独逸脱と同じ潜時でみられた。これは、和音逸脱と音圧逸脱が独立に検出されたことを示す。これらの結果から、音楽的統語と音響的規則の逸脱が、共通の神経システムにより、同時並行で検出されていると解釈できる。ただし、実験1では低頻度提示を行ったことで、生じた神経反応は和声的な逸脱以外にも、提示確率による逸脱を反映していた可能性があった。

実験2では、提示確率の影響を避けるために、和音逸脱が起こる場合と起こらない場合を同確率に操作し、実験1を追試した。その結果、実験1と同様に、和音逸脱に対してERANが生じ、そのERANは音圧逸脱で生じたMMNと、潜時や頭皮上分布の点で類似していた(Figure 1右)。実験2の二重逸脱でも、二つの逸脱要因は加算性を示した。等頻度の和音逸脱に対して生じた神経反応は、長期記憶に含まれる音楽的統語の知識に基づいた逸脱検出を反映していると考えられる。また、実験1(低頻度)と実験2(等頻度)のデータを合わせて分析した場合でも、提示確率は和音逸脱や音圧逸脱の効果には影響を与えるなかった。これらの結果は一貫して、音楽的統語と音響的規則の逸脱が共通の神経システムによって、独立に検出されていることを支持している。

実験3では、実験1と2で提示した刺激が音楽的逸脱として認識されているかを、主観評定によって検討した。刺激とその提示確率は、実験2と同じとし、最後の音が音楽文脈にどれだけ適合しているかを評定してもらった。その結果、和音逸脱の要因だけが、音楽文脈における適合度を低下させた。音楽的逸脱としては認識されない音圧逸脱も、音楽的な和音逸脱と同様のERP反応を生じさせたことから、

異なる種類の逸脱が、共通の神経システムで検出されるということが示された。

実験4では、和音逸脱や音圧逸脱が起こる場合には反応し、起こらない場合には反応しないというGo-Nogo課題により、逸脱検出過程の関係を検討した。その結果、和音逸脱と音圧逸脱が同時に起こった場合には、単独で起こった場合よりも速い検出反応が生じた（冗長信号効果）。冗長信号効果は、二つの信号が融合されて单一の知覚を生じさせる場合には起こらず、別々の知覚が生じる場合にみられる（Schröter et al., 2007）。さらに、冗長信号効果は共活性化モデルによって説明可能であることが示された。共活性化は独立な知覚モジュールからの出力が結合されることで生じると考えられている（Mordkoff & Yantis, 1993）。行動実験の結果からも、音楽的統語の不規則性と音響的不規則性は独立な知覚モジュールで検出されている可能性が示された。

4つの実験で得られた神経反応と主観評定、反応時間の結果から、ERANの性質が考察できる。二重逸脱のERPと単独逸脱のERPには潜時差がなかったが、二重逸脱では単独逸脱よりも反応時間が短くなっていた。つまり、ERP反応は共活性化が起こる前の処理に対応している可能性があり、ERANは主に検出処理だけを反映していると解釈できる。ERAN振幅の大きさは、主観的な逸脱度に影響しないが、逸脱としては認識されていたという結果からも、ERANが単に検出処理だけを反映していることが支持される。

本研究で得られた知見は、2点に集約される。1つは、音楽的統語の不規則性と音響的不規則性の検出は、共通の神経システムによって行われているという点である。もう1つは、各不規則性の検出は、同じ検出システム内でモジュール化されているという点である。ERANとMMNは、逸脱の有無を知っている場合でも検出反応を示すことから（Guo & Koelsch, 2016; Ritter et al., 1999），検出器は高次システムからカプセル化されており、自動的に逸脱検出を行う仕組みだと考えられる。これは、本研究のように、音に注意していないくともERANが生じることからも支持される。検出器は、検出可能な逸脱が入力されると決まった出力を前注意的に吐き出すが、それが、同種の神経成分として表れるERANとMMNであると考えられる。また、検出器内部はモジュール化されており、二つの不規則性が同時に入力されると（二重逸脱）、逸脱次元ごとに独立な検出アルゴリズムが働くと予想される。このことは、各逸脱要因の独立性を示した本研究の結果に加え、実験変数の操作に対するERANとMMNの応答性の違いを示したKoelsch et al. (2001)やLeino et al. (2007)からも支持される。

本研究の結果だけでは、音楽的統語の不規則性と音響的不規則性が、共通の神経システムで検出される際のアルゴリズムやメカニズムを説明することはできない。今後の研究では、各逸脱の検出に共通の神経システムがかかわることを説明できるような理論的枠組みの構築や、逸脱検出にかかわる規則の獲得過程を明らかにする必要があるだろう。加えて、N5や音響的不規則で生じた後期陰性電位が、どのような処理を反映しているのかも、曖昧なままである。N5の機能を「和声的な統合」や「内音楽的な意味の処理」などと記述するのではなく、より詳細な機能的意義の解釈が求められる。（基礎心理学）

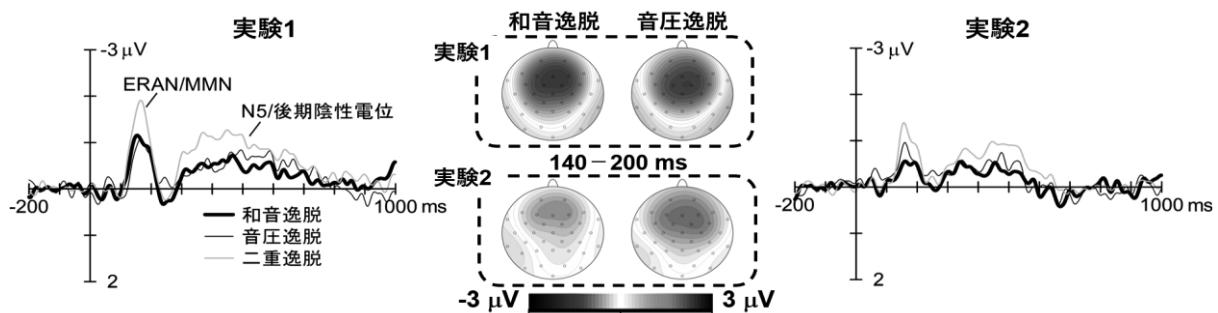


Figure 1. 和音逸脱と音圧逸脱、二重逸脱のERP差分波形(逸脱-標準)とトポグラフィ。