

学位論文要旨

ハーモニー処理における音楽的期待に関する  
心理生理学的研究

広島大学大学院教育学研究科  
教育人間科学専攻

D082025

橋本 翠

# 目 次

## 第1章 背景と目的

- 第1節 ハーモニー処理に関する心理生理学的研究
- 第2節 これまでの研究の問題点
- 第3節 本研究の目的

## 第2章 ハーモニー処理における音楽的期待を反映する ERP (ERAN)

- 第1節 調性階層性の異なる刺激に対する ERAN の比較 (実験 1)
- 第2節 ERAN に及ぼす逸脱刺激の提示確率の影響 (実験 2)
- 第3節 ERAN に及ぼす選択的注意の影響 (実験 3)
- 第4節 ERAN に及ぼす空間的処理課題の影響 (実験 4)

## 第3章 総合考察

- 第1節 本研究の成果と意義
- 第2節 今後の課題

## 第1章 背景と目的

### 第1節 ハーモニー処理に関する心理生理学的研究

音楽を構成する様々な要素（例えば、メロディ、ピッチ、リズムなど）が音楽の認知において果たす役割について、多くの研究が行われている。その中で、ハーモニーは音楽の重要な構成要素の一つであるにもかかわらず、それに関する研究は比較的少ない。しかし、近年、ハーモニーの認知処理について、脳内過程に焦点をあてた心理生理学的な研究が報告されるようになってきている。音楽認知研究では、時間の進行に伴う認知の変化を捉えることが重要であり、脳活動などを連続的に記録することが可能な心理生理学的手法が有効であると考えられるためである。

例えば、Koelsch, Gunter, Friederici, & Schröger (2000) は、ハーモニーの逸脱に対する処理を反映する事象関連電位 (event-related potentials, 以下 ERP) 成分として、early right anterior negativity (ERAN) を報告している。ERAN は、潜時約 200 ms 付近で振幅が最大となる右前頭部優勢な陰性電位であり、音楽的期待からの逸脱あるいは音楽的構文の処理を反映すると考えられている。また、Leino, Brattico, Tervaniemi, & Vuust (2007) は、ハーモニーの規則の処理を反映するとされる early anterior negativity (EAN) を報告している。このように、ハーモニー処理に関する ERP 研究の成果は徐々に蓄積されてきているものの、発生機序を含め、これらの ERP 成分が反映する処理過程の詳細はまだ明らかでない。

### 第2節 これまでの研究の問題点

Koelsch et al. (2000) や Leino et al. (2007) のような研究は、ハーモニーによって形成される音楽的文脈からの逸脱に対して惹起する ERP 成分が存在することは示しているが、その性質については明らかにしていない。まず、最もよく検討されている ERAN でさえ、それがハーモニー処

理に特有な成分であるかどうかは直接的には示されていない。また，ERAN と同様，高頻度の標準刺激から逸脱した刺激に対して出現する ERP 成分として，ミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity, 以下 MMN) が報告されている (Näätänen, Paavilainen, Rinne, & Alho, 2007)。Koelsch (2009) や Koelsch, Gunter, Schröger, Tervaniemi, Sammler, & Friederici (2001) は，MMN と ERAN の出現条件などに関する類似性を指摘しており，両者の違いは未だ明確になっていない。さらに，音楽的文脈が形成されるメカニズムについて，図式的期待 (図式，すなわち特定の音楽文化に長期間暴露されることにより形成される一般的心的表象に基づく期待) と事後的期待 (聴き手が聞き慣れた曲における演奏の間違いに気づく場合のように，個々人の記憶表象に基づいて形成される期待) という 2 種類の音楽的期待 (Bharucha, 1994) の関与が提案されているが，それらと ERAN の関連性について直接的に言及した研究はない。

### 第 3 節 本研究の目的

本研究では，まず ERAN が MMN とは異なるハーモニー処理に特有な ERP 成分であることを示す。さらに，ERAN が反映するハーモニー処理の特性について，図式的期待との関連を検討する。

ハーモニーのもつ，他の音楽構成要素とは異なる特徴として，調性階層性がある。調性階層性とは，調性をもつ音楽を聴いたとき，心内では，その調のもととなる主音が最も安定する重要な音の高さとして認知されることであり，その安定性が主音を初めとし，次に主音以外の主和音構成音，その他の全音階音，非全音階音という順で階層的になっている性質のことである (Krumhansl, 1979, 1990; Krumhansl & Shepard, 1979)。実験 1 では，調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱感が異なる 3 つの条件を設定し，ERAN がハーモニー処理に特有の成分であることを示す。

MMN は高頻度標準刺激系列中に挿入された低頻度逸脱刺激に対して出現する。一方で、調性階層性は、特定の音楽的環境に長期間晒されることによって形成されるものであり、ERAN が調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱によって惹起されるのであれば、実験事態における逸脱刺激は低頻度である必要はないと考えられる。そこで実験 2 では、逸脱のない標準刺激の確率が、逸脱刺激の確率に比べて小さい場合にも ERAN が出現することを示すことによって、ERAN が MMN とは異なる ERP 成分であることを示す。

従来の見解では、ERAN は、MMN と同様、前注意的過程を反映すると考えられてきた。しかし、実験 2 で示すように ERAN と MMN の発生機序に違いがあるとすると、ERAN 惹起における注意のはたらきについて再検討する必要がある。そこで、刺激に対する注意の有無に関わらず出現するという MMN の性質を ERAN も持つかどうかを明らかにするために、実験 3 で選択的注意が ERAN に及ぼす影響について検討する。

実験 4 では、ハーモニー処理における音楽的期待の特性について探索的に検討する。音楽的期待の基礎となる調性階層性が脳内でどのように表象されているかは不明であるが、その脳内表象は、音の関係性についての空間的表現に含まれる情報を何らかの形で保持している可能性が示唆されている (Bharucha, 1994)。このことから、調性階層性が空間的性質をもつ心的表象として表現されると仮定し、空間的処理を妨害する心的回転課題の遂行が ERAN に及ぼす影響について検討する。

なお、本研究では、ハーモニーからの逸脱刺激としてナポリの六の和音 (主音の短 2 度上の音を根音とする長三和音) を用いた。また、全ての実験の参加者を非音楽家 (学校教育以外の音楽専門教育の経験が 5 年より短い者) とした。

## 第2章 ハーモニー処理における音楽的期待を反映する ERP (ERAN)

### 第1節 調性階層性の異なる刺激に対する ERAN の比較 (実験1)

**目的** 実験1では、ERANがハーモニー処理に特有な成分であることを示すことを目的とした。ハーモニーの持つ調性階層性に注目し、調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱感が異なる3つの条件間で、逸脱刺激に対するERANを比較した。

**方法** **実験参加者** 課題の遂行に支障のない聴力をもつ12名の成人が実験に参加した。**刺激** 和音進行を刺激とする2条件(ナポリの六条件と7th条件)とメロディを刺激とする1条件(メロディ逸脱条件)を設定した。ナポリの六条件(以下、Neapoli)は調性からも期待からも逸脱した条件、7th条件(以下、7th)は調性からは逸脱するが期待からはそれほど逸脱しない条件、メロディ逸脱条件は、和音が提示されないので調性階層性に基づく逸脱感が小さい条件であった。刺激は、4つの声部によって構成された5つの和音による和音進行で、1-4番目の和音の提示時間はそれぞれ600ms、5番目の和音提示時間は1200msであった。32種類の異なる和音進行を無作為順に配した計160個の和音を続けて提示した。全和音進行のうち、50%がある音階内のみの音からなる和音進行に基づいた逸脱のない和音進行(in-key)、25%が和音進行の3番目にナポリの六のコードまたは7thコードを配置した和音進行、25%が和音進行の5番目にナポリの六のコードまたは7thコードを配置した和音進行であった。

メロディ条件の刺激は、ChorübungenのNo.46(d)を用いた。15音からなるメロディで、1-14番目の音提示時間は600ms、15番目は1200msであった。逸脱音は、刺激の3番目もしくは8番目に配置した。

これらの刺激は、ピアノの音色で作成し、60cm離れて置かれたスピ

一カーから提示した。ただし、全刺激のうち 20%は、2-5 番目のいずれかの和音、または 2-14 番目のいずれかの音を弦楽器音で提示した。

**課題** 参加者の課題は、ピアノ音以外の音色の出現回数を数え、各ブロック終了後、口頭で報告することであった。課題遂行中の参加者から脳波を記録し、ERP を算出した。

**結果と考察** 全条件で 20 回以上の加算回数を得られた 8 名について分析した。Neapoli 条件と 7th 条件の ERP を Figure 1 に示した。刺激提示後 190—210 ms の区間平均電位について逸脱位置 (3, 5) × 刺激の種類 (in-key, Neapoli, 7th) × 部位 (F3, F4) の反復測定分散分析を行った結果、位置 × 刺激の交互作用が有意傾向 ( $F(2, 14)=3.34, p<.06$ ) であり、in-key よりも Neapoli で ERP は陰性であった。3 番目の和音に対する ERP や、メロディ条件の逸脱音に対する ERP では、音刺激による振幅の違いはなかった。この結果は、ERAN が調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱によって惹起される、ハーモニーに特有の ERP 成分であることを示す。

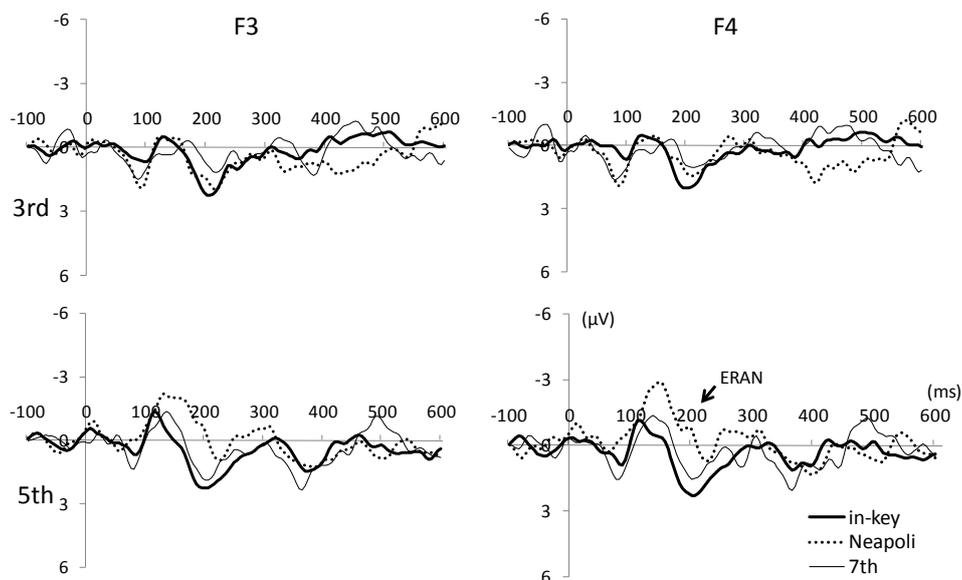


Figure 1. Neapoli および 7th 条件における 3 番目 (上側) と 5 番目 (下側) の和音に対する ERP 総加算平均波形 (実験 1)

## 第 2 節 ERAN に及ぼす逸脱刺激の提示確率の影響 (実験 2)

**目的** 実験 1 では、ERAN が調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱によって惹起される、ハーモニーに特有の ERP 成分であることが示された。ERAN は、先行する音刺激と物理的特性が異なる刺激によって誘発される MMN と同様の成分であるという解釈が存在する。これについて、Koelsch (2009) は、MMN が今聴取している音の関係性によって構築される規則性のモデルに基づくのに対し、ERAN は長期記憶にすでに存在する統語的な規則性の表象との照合で構築されるモデルに基づいているのではないかと考察しているが、2つの成分が異なることを示す証拠は十分でない。MMN は標準刺激と逸脱刺激の比率により影響受けることが知られており、逸脱刺激の提示頻度が低いほど MMN の振幅は大きい。そこで実験 2 では、標準刺激の提示頻度を操作することで、ERAN が MMN とは異なる ERP 成分であることを示すことを目的とした。

**方法** **実験参加者** 課題の遂行に支障のない聴力を持つ 16 名の成人が実験に参加した。**刺激** 実験 1 の Neapoli 条件と同じ刺激を用いた。ただし、Neapoli 音が入っていない和音進行を標準刺激とし、その提示頻度が 10%、30%、50%となる 3 条件を設定した。また、弦楽器音の代わりにハーモニカ音を用いた。**課題** 実験 1 と同じであった。

**結果と考察** Figure 2 に、F3, F4 部位における第 5 和音に対する ERP 総加算平均波形を示した。Neapoli 波形から in-key 波形を引き算した差分波形の刺激後 160—220ms の区間平均電位 (ERAN 振幅) を算出し、逸脱位置 (3, 5) × 提示確率 (10%, 30%, 50%) × 導出部位 (F3, F4) の 3 要因反復測定分散分析を行なった。その結果、逸脱位置 ( $F(1, 15)=8.54$ ,  $p<.01$ ) と導出部位 ( $F(1, 15)=8.65$ ,  $p<.01$ ) の主効果が有意であり、標準刺激の提示確率に関わらず、ERAN は 3 番目の和音に対するよりも 5 番目

の和音に対して大きく、F3 よりも F4 で大きかった。逸脱刺激の提示確率が標準刺激の確率に比べて大きい場合にも ERAN が観察されたこと、および確率の影響を受けなかったことから、ERAN は MMN とは異なる ERP 成分であることが確認できた。

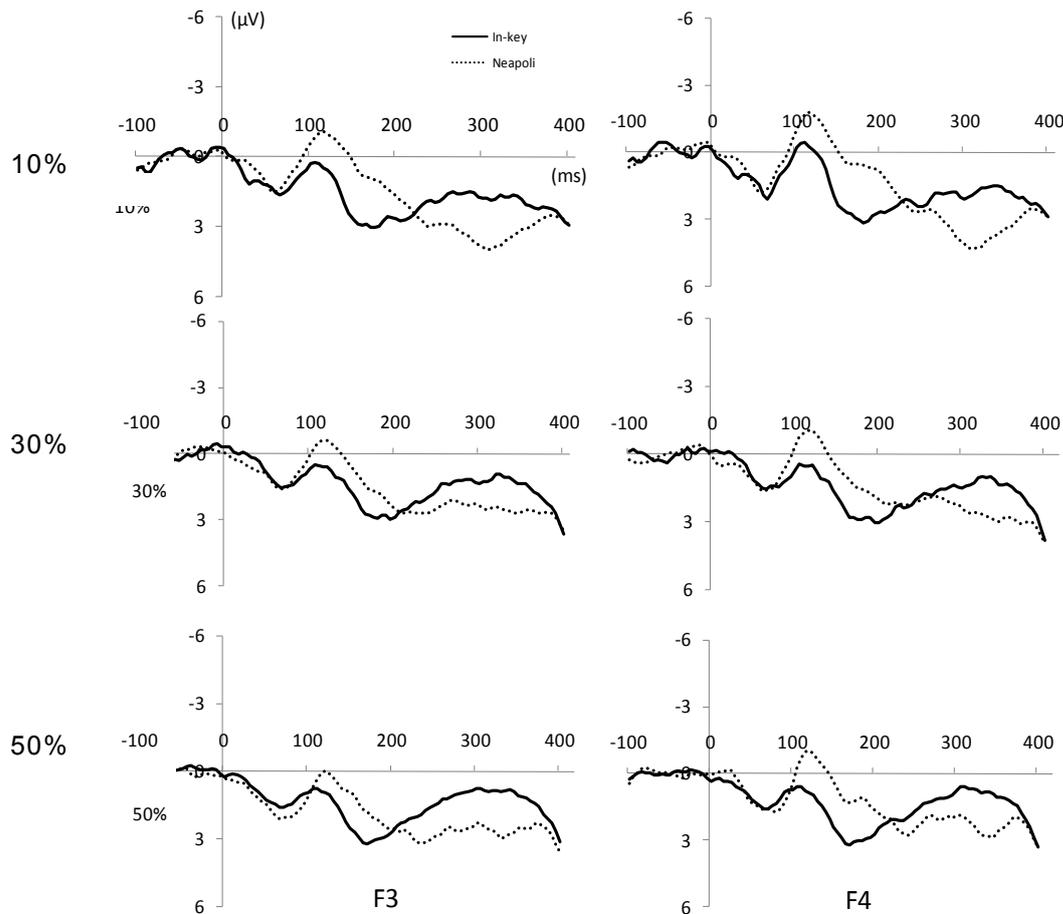


Figure 2. F3, F4 部位における第 5 和音に対する ERP 総加算平均波形。標準刺激 10%条件においても ERAN が出現した (実験 2)。

### 第 3 節 ERAN に及ぼす選択的注意の影響 (実験 3)

**目的** 実験 2 で、標準刺激の提示確率が逸脱刺激の確率に比べて小さい場合にも ERAN が観察されたことから、ERAN は MMN とは異なる ERP 成分であることが確認できた。実験 3 ではさらに、注意を向けていない状況でも生じるといふ MMN の特徴的な性質を ERAN も持つのかどうか

を明らかにするために、音楽に注意を向けていない状況下でも ERAN が惹起するかどうかを検討した。

**方法 実験参加者** 課題の遂行に支障のない視力と聴力を持つ 12 名の成人が実験に参加した。 **刺激** 実験 1 の Neapoli 条件および 7th 条件と同じ刺激を用いた。朗読刺激として、男性の声で朗読した日本の昔話 10 話を用いた。 **課題** 同時に聞こえてくる音楽刺激と朗読刺激のうち、音楽刺激に注意を向ける（音楽）注意条件と、朗読刺激に注意を向ける（音楽）無視条件を設けた。注意条件の課題は、音楽刺激中のピアノ音以外の音の数を数えることであった。無視条件の課題は、音楽刺激を無視し、朗読される物語の内容を理解し、各実験ブロック後の質問に答えることであった。

**結果と考察** 刺激後 330—350 ms 区間の平均電位を算出し、注意条件（注意、無視）×刺激（in-key, Neapoli）×部位（F3, F4）の 3 要因反復分散分析を行った結果、注意の主効果（ $F(1, 11)=8.21, p<.05$ ）と注意×刺激×部位の交互作用（ $F(2, 22)=4.17, p<.05$ ）が有意であった。ERAN は、注意条件の第 5 和音に対する F4 導出の ERP においてのみ観察された。ERAN が出現するために必要な調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱の検出には、選択的注意が必要な認知処理が関与する可能性が示唆された。

#### 第 4 節 ERAN に及ぼす空間的処理課題の影響（実験 4）

**目的** 実験 3 までの結果から、ERAN は、MMN とは異なり、単に先行する音刺激によって形成される期待からの逸脱によって出現するのではなく、長期に渡って聴取者の心内に構築されてきた調性階層性に基づく図式的期待からの逸脱によって出現すると考えられる。しかし、この調性階層性と ERAN との関連性については従来の研究では全く言及されていない。実験 4 では、調性階層性が脳内において空間的性質をもつ心

的表象として表現されていると仮定し、心的回轉課題の遂行が ERAN に及ぼす影響について調べることにより、この仮定が妥当であるかどうかを検討した。2 次元的視覚探索課題条件では ERAN が出現するが、3 次元的心的回轉課題条件では、ERAN 生起が妨害されると予想した。

**方法 実験参加者** 課題の遂行に支障のない視力と聴力を持つ 12 名の成人が実験に参加した。**刺激** 実験 1 の Neapoli 条件および 7th 条件と同じ刺激を用いた。**課題** 実験参加者は、立体図形の心的回轉課題 (以下 3D)、2 次元図形の探索 (以下 2D)、または静止画像の観察 (対照課題, 以下 CON) を行った。各課題の遂行中に、音楽刺激を提示した。

**結果と考察** 全条件で 20 回以上の加算回数の得られた 10 名について分析した。F3 と F4 から導出された第 5 和音に対する ERP について、Neapoli 波形と in-key 波形の差分波形、および 7th 波形と in-key 波形の差分波形を算出し、Figure 3 に示した。

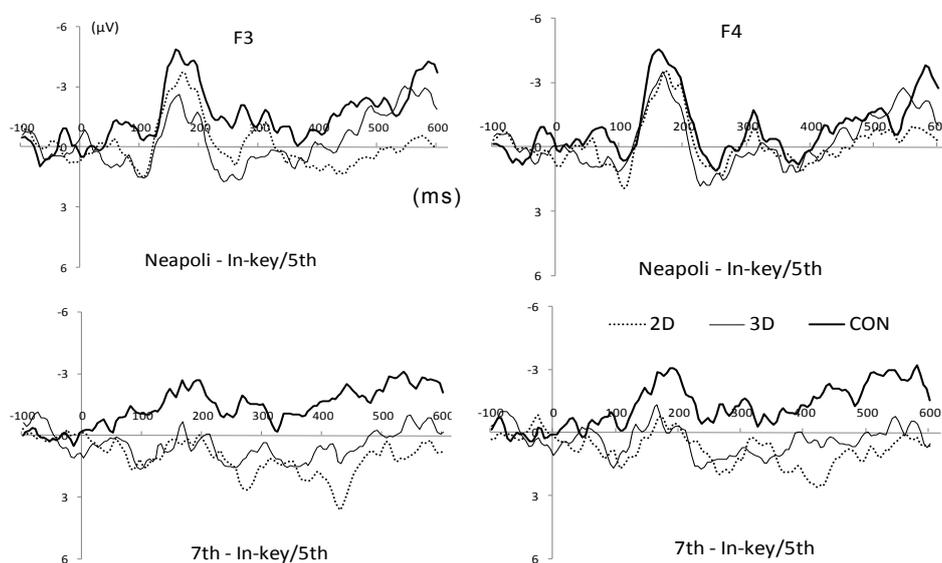


Figure 3. F3, F4 部位の第 5 和音に対する ERP 差分波形。対照条件 (CON) と視覚探索課題条件 (2D) では、心的回轉課題条件 (3D) に比べて大きな ERAN が観察された (実験 4)。

統計的に有意な結果ではなかったが、Neapoli 波形と in-key 波形の差分波形の刺激後 300 ms 前後では、CON 条件、2D 条件で出現している小さな陰性電位が、3D 条件においては観察できなかった。3 次元的性質を持つ心的回転課題が ERAN 生起を妨害する可能性、すなわちハーモニー処理における調性階層性が空間的処理と関連している可能性が示された。

### 第 3 章 総合考察

#### 第 1 節 本研究の成果と意義

本研究は、ERAN が MMN とは異なるハーモニー処理に特有な ERP 成分であることを示すこと、および ERAN が反映するハーモニー処理の特性について検討することを目的とした。

実験 1 では、ハーモニーの持つ調性階層性に注目し、調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱感が異なる 3 つの条件間で、逸脱刺激に対する ERAN を比較した。その結果、メロディ条件では ERAN 様の成分は確認されなかった。このことから、ERAN はハーモニー処理に特有の ERP 成分であり、調性階層性に基づく音楽的期待からの逸脱を反映していることが示された。実験 2 では、標準刺激が低頻度であっても ERAN が惹起されることを確認し、ERAN が先行する音刺激の形成するパターンからの逸脱に対する MMN (e.g., Sussman & Gumenyuk, 2005) とは異なる ERP 成分であることを示した。さらに実験 3 では、MMN の特徴的な性質である自動性に着目し、ERAN が音楽に注意を向けていない状況下でも惹起するのかどうかについて検討した結果、ERAN が出現するためには、選択的注意を必要とする認知処理が関与する可能性が示唆された。

これらの結果から、ERAN が反映するハーモニー処理について、以下のように考えられる。Koelsch (2009) は、ERAN は MMN とは異なり、

長期記憶にすでに存在する統語的な規則性の表象との照合で構築されるモデルに基づいていると考えている。実験 2 において ERAN が惹起したのは、標準刺激が低頻度であっても、長期記憶に存在する図式的期待との照合によって逸脱音を検出できたためであると考えられる。

実験 4 では、長期記憶内において調性階層性がどのように表現されているかについて、空間的処理課題の同時遂行の影響という観点から検討した。その結果、調性階層性が脳内においても空間的性質をもつ心的表象として表現されている可能性が示された。以上のように、ERAN をハーモニー認知における具体的処理内容と関連づけることができたことは、本研究の大きな成果である。

## 第 2 節 今後の課題

本研究では、音楽認知を支えるメカニズムとしての調性階層性の脳内表現の性質について、明確な結論は得られていない。調性階層性と空間的表現との関連性については、ERAN 成分の電源推定など、神経処理レベルでのさらなる詳細な検討が必要である。

音楽療法の領域や音楽教育場面において、音楽認知に関する個人差や発達度が重要となってくる場面が多数存在する。音楽認知の個人的特性や、言語的反応が十分できない乳幼児における発達的变化にアプローチする手段として、脳活動を反映する指標を用いた心理生理学的な研究が有効であると思われる。

## 引用文献

- Bharucha, J. J. (1994). Tonality and expectation. In R. Aiello & J. A. Sloboda (Eds.), *Musical perceptions*. New York: Oxford University Press. pp. 213-239.

- Koelsch, S. (2009). Music-syntactic processing and auditory memory: Similarities and differences between ERAN and MMN. *Psychophysiology*, 46, 179-190.
- 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., Tervaniemi, M., Sammler, D., & Friederici, A. D. (2001). Differentiating ERAN and MMN: An ERP study. *NeuroReport*, 12, 1385-1389.
- Krumhansl, C. L. (1979). The psychological representation of musical pitch in tonal context. *Cognitive Psychology*, 11, 346-374.
- Krumhansl, C. L. (1990). *Cognitive foundations of musical pitch*. Oxford: Oxford University Press.
- Krumhansl, C. L. & Shepard, R. N. (1979). Quantification of the hierarchy of tonal functions within a diatonic context. *Human Perception and Performance*, 5, 579-594.
- Leino, S., Brattico, E., Tervaniemi, M., & Vuust, P. (2007). Representaion of harmony rules in the human brain: Further evidence from event-related potentials. *Brain Research*, 1142, 169-177.
- 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.
- Sussman, E. S., & Gumenyuk, V. (2005). Organization of sequential sounds in auditory memory. *NeuroReport*, 16, 1519-1523.