

## 和音の近親関係が P300 におよぼす影響

— 背景和音中のターゲット和音の計数課題において —

荒生弘史・織田潤里・行場次朗・坂本勉

音楽の処理過程と事象関連電位 (event-related potentials: 以下 ERP とする) の関係を検討する場合、その多くは音楽的予期との関連で進められ、ある程度の長さをもつ音楽的な文脈と、それに続く音に対し惹起する ERP を分析することに主眼がおかれてきた。

たとえば、メロディを刺激として用いた場合は、メロディから逸脱する刺激に対し、後期陽性成分 (late positive component: 以下 LPC とする) の振幅が増大することがほぼ一貫して報告されている (Besson & Macar, 1987; Verleger, 1990; Paller, McCarthy, & Wood, 1992; Besson & Faïta, 1995)。Besson & Faïta (1995) の最近の研究では、ERP に影響をあたえる要因がさらに詳しく検討され、メロディの調性に適合する範囲内で逸脱する場合 (全音階音による逸脱) よりも、その調性に適合しない場合 (非全音階音による逸脱) の方がより大きな振幅をもつ LPC が出現することや、このような効果が既知性の低い (unfamiliar) 曲よりも既知性の高い (familiar) 曲においてより顕著であることが示されている。また、非全音階音による逸脱のときは、LPC の振幅が最大となるだけでなく、その潜時が他の条件にくらべて短かいことも報告されている。

刺激として和音を用いた実験でも、和音列による文脈から音楽的に逸脱した和音 (文脈の調性とは非近親な関係にある和音) に対して、陽性成分 (P300 の一種とみなされた) が増大することが報告されている (Janata, 1995)。この場合、強い予期を促す先行文脈 (3 個の和音) の終了後、何も提示されない空虚時間が設けられ、この間に被験者は最もあり得る (best possible) 和音をイメージすることが要求され、その後に ERP 計測の対象となる和音が提示された。

一方、和音によるプライミング効果 (e.g., Bharucha & Stoekig, 1986; Bharucha, 1994; 荒生・行場, 1997) や先行和音に続く単音についての評定実験 (Krumhansl, 1990) などであるように、和音は一度提示されただけでもその後の音楽事象の処理への影響が大きい。たとえば、プライミング効果の実験においては、プライム和音とターゲット和音の音楽的關係が非近親であるより近親である方がターゲット和音についての判断時間が短いことが報告されており、2 個の和音が継時提示されるという単純な状況であっても、予期などのトップダウン的処理過程あるいはスキーマ的処理が実際に働くことが示唆されている (Bharucha & Stoekig, 1986; 荒生・行場, 1997)。

そこで本研究では、P300 の測定に一般的に用いられる手続き、すなわち、一定テンポでなり続ける背景音が時折りターゲット音と置き換わり、被験者にはターゲット音の計数を求めるという単純な実験手続きを用いて、和音の音楽的な近親性が P300 におよぼす影響を検討する。具体的には、背景和音 (試行内では同一) に対し、音楽的に近親であるターゲット和音と非近親であるターゲット和音の 2 種を用意し、これらを同じ低確率で背景和音と時折り入れ替えて提示する (それぞれ近親条件、非近親条件と呼ぶ)。被験者には背景和音と異なる和音が現れたらその数を数えることを求める。もし、被験者のもつ音楽的なスキーマや予期が働き、近親な和音よりも非近親な和音の方がスキーマに非適合的 (予期されにくい) ならば、それに対応してより大きな陽性成分が見られるはずである。ただし、刺激を繰り返して提示することにより、音楽的逸脱に対する陽性成分の振幅増大が起こりにくくなることを考慮すると (Besson, 1997)、本実験においても試行回数が増えると近親性の違いによる振幅差が減少することが予測される。

## 方 法

### 被験者

正常な聴力をもつ大学生、大学院生 11 名。全員が右利きであった。このうち 6 名は 3 - 14 年 (平均 7.5 年) の音楽経験 (ピアノレッスンなど) があり、5 名はそのような経験がなかった。なお、極端に大きな振幅をもつ ERP 波形を示した 1 名の被験者 (非経験者) のデータは分析から除外された。

## 刺激

和音はすべて長和音を用い、背景和音をCとC#の2種とした。どちらの背景和音においてもターゲット和音はGとF#の2種であった。ただしこれらのターゲット和音は、背景和音がCとC#のいずれであるかにより、背景との音楽的近親性が入れ替わるようになっている。つまり、Cが背景和音である場合は、Gは背景と音楽的に近親であり、F#は非近親である。逆にC#が背景である場合はF#が近親、Gが非近親となる。これらの近親関係をもとに、それぞれを近親条件、非近親条件と呼ぶ。

和音は、Krumhansl, Bharucha, & Kessler (1982) にならい、すべての和音に同じスペクトル包絡を用い、純音を合成することにより作成された。聴取上の音色はオルガンに近いものであった。この手法では、長三和音における根音、第三音、第五音の音程に相当する周波数成分の純音を5オクターブの範囲(77.8 Hzから2349 Hzまで)で合成する(標本化周波数48 kHz)。スペクトル包絡の低域側あるいは高域側の終末部は、閾値まで徐々に減衰するようになっている。各和音は同じ周波数帯域内にそれぞれの成分音のスペクトルをもつので、和音間の音の高さの違いを最小限におさえることができる。また、最低音、最高音があいまいに知覚されるので、和音の転回の問題をさけることができるとともに、最高音によるメロディー知覚を最小限におさえることができる。持続時間は、たち上がりたち下がりそれぞれ10 msを含めて500 msであった。

## 手続き

背景和音がCであるセッションとC#であるセッションのどちらについても各被験者のERPの測定を行った。どちらのセッションを先に行うかは被験者間でカウンターバランスした。1セッション内では、和音8個分の系列を1ユニットとし、100ユニットがランダムな順序で提示された。8個の和音からなるユニット内では、7個を背景和音とし、1個を背景と近親か非近親であるターゲット和音とした。100ユニットのうち50ユニットがそれぞれ近親条件と非近親条件であった。したがって、全体を通してターゲット和音の出現確率は近親条件、非近親条件のどちらも6.25%であった。なお、ユニット内の系列位置1-3までは必ず背景和音とし、系列位置4-8のうちの1箇所をランダムに選びそこにター

ゲット和音を配置した。提示のペースは1秒間に1和音であった。

被験者への教示内容は、背景和音と異なる和音(ターゲット和音)が出現したらその数を数えることと、ターゲット和音出現時に瞬目しないこと、および眼球や身体の動きを最小にすることであった。教示後、被験者に実際に数ユニット分の刺激を提示し、課題についての理解を促した。測定時には、100ユニットを4ブロックに区切り、ブロックごとに計数結果の報告を求めた。1ブロック内のユニット数は15-35の範囲で変動させた。

## 測定と装置

国際10-20法に準拠し、Cz、Pz、C3、C4の4箇所から両耳朶結合を基準電極(ただしピアス装用の被験者には耳朶付近に電極をとりつけた)、FPzを接地電極として脳電位を導出した。電極には、銀-塩化銀電極を使用し、電極間抵抗値を原則として5K $\Omega$ 以下とした。低域と高域の遮断周波数はそれぞれ0.1 Hz、20 Hz、標本化周波数は500 Hz、時定数は1.6 sであった。

測定とデータ処理に誘発電位検査装置(日本光電、MEB-5504)を用い、刺激の制御、提示にAVタキストスコープ(岩通アイセル、IS-702)とコンピュータ(COMPAQ、PROLINEA 4100)、アンプ(PIONEER、A-01)、スピーカ(コーラル、8A7)を用いた。ターゲット和音の立ち上がりと同期したトリガ信号をAVタキストから誘発電位検査装置に送り、その時点から1秒間の脳電位をアーチファクト混入時を除き各条件ごとに加算平均した。ベースラインはトリガ前24 msの間の平均値であった。

## 結果

ほとんどの被験者のERP波形には、潜時300 ms以降で頂点に達する陽性成分(P300)が認められた。第1、第2の各セッションにおいて、試行順が早い方から25個の波形について加算平均すると、音楽経験のある被験者群では、第1セッションにおいて近親条件よりも非近親条件における陽性成分が大きく誘発されるケースが多く見られた。Figure 1はその一例である。音楽経験のない被験者では、そのような傾向はほとんど見られなかった。

Figure 2は、第1セッションにおける経験群（6名）のデータより、潜時300–430 msにおける陽性側の最大振幅の平均値をまとめたものである。特にCzあるいはC4で、近親（related）よりも非近親（unrelated）の場合の方がより大きな振幅を生じていることがわかる。これらについて、近親性（近親、非近親）と部位（Cz、Pz、C3、C4）の2要因による分散分析をおこなった結果、近親性と部位の交互作用に有意性傾向が認められた（ $F(3,15) = 3.1, p < .061$ ）。近親性または部位の主効果は有意ではなかった（それぞれ、 $F(1,5) = .84, ns$ ;  $F(3,15) = 1.5, ns$ ）。この交互作用は、近親性の違いにより振幅差が生じる場合、部位によりその傾向が異なることを示している。Figure 1からは、この振幅差が中央から右半球優位に出現する傾向がうかがえる。

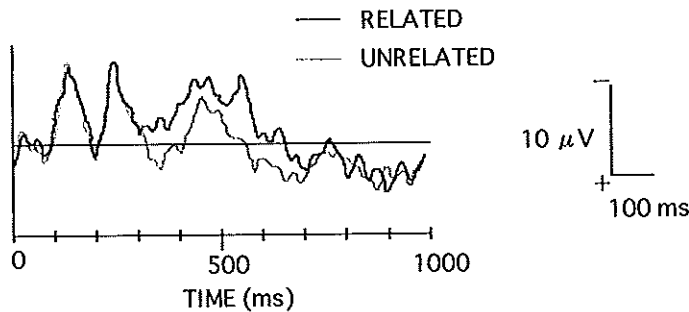


Figure 1. An experienced listener's ERPs to related and unrelated target chords at C4. They were obtained from averages of over first 25 waveforms without artifacts.

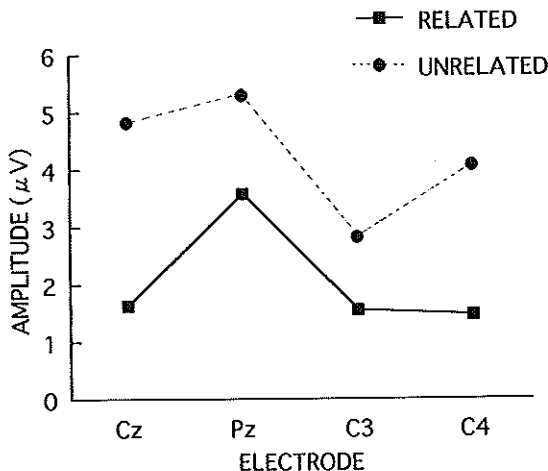


Figure 2. Mean of the maximum amplitude at each electrode for related and unrelated target chords in the latency range of 300–430 ms. These data are obtained from waveforms of experienced listeners in session 1.

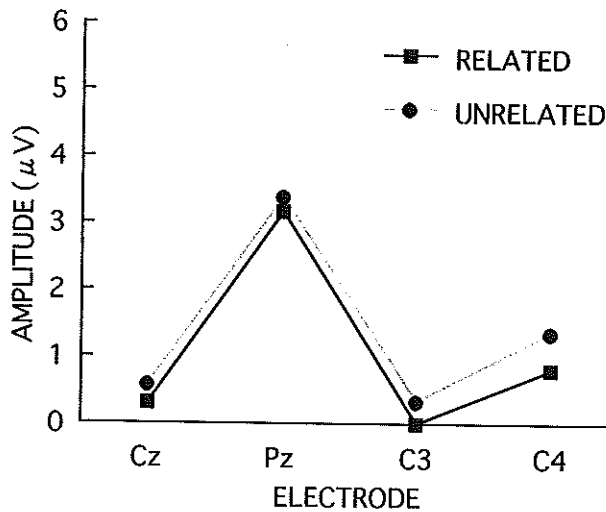


Figure 3. Mean of the maximum amplitude at each electrode for related and unrelated target chords in the latency range of 300 – 430 ms. These data are obtained from waveforms of experienced listeners in session 2.

Figure 3は、第2セッションにおける経験群のデータを同様にまとめたものである。和音の近親性の違いによる振幅差がほとんど消失し、部位差のみがあらわれていることがわかる。同上の2要因の分散分析を行った結果、部位の主効果のみが認められた ( $F(3,15) = 13.0, p < .001$ )。関連性の主効果および両要因の交互作用は有意ではなかった (それぞれ,  $F(1,5) = .04, ns; F(3,15) = .03, ns$ )。

Figure 4は、第1セッションにおける非経験群(4名)のデータを同様にまとめたものである。近親性の違いによる振幅差がほとんど生じていないことがわかる。同上の2要因の分散分析の結果、関連性あるいは部位の主効果、両要因の交互作用とも有意ではなかった (それぞれ,  $F(1,3) = .01, ns; F(3,9) = .55, ns; F(3,9) = 2.1, ns$ )。また、第2セッションにおける非経験群のデータについて、同様の2要因の分散分析を行ったが、関連性あるいは部位の主効果、両要因の交互作用とも有意ではなかった (それぞれ,  $F(1,3) = 1.8, ns; F(3,9) = .89, ns; F(3,9) = 1.3, ns$ )。以上はP300の振幅についての結果であるが、被験者によっては、特に関連条件において波形上のピークがはっきり現れない場合もあったので、潜時による分析は行わなかった。

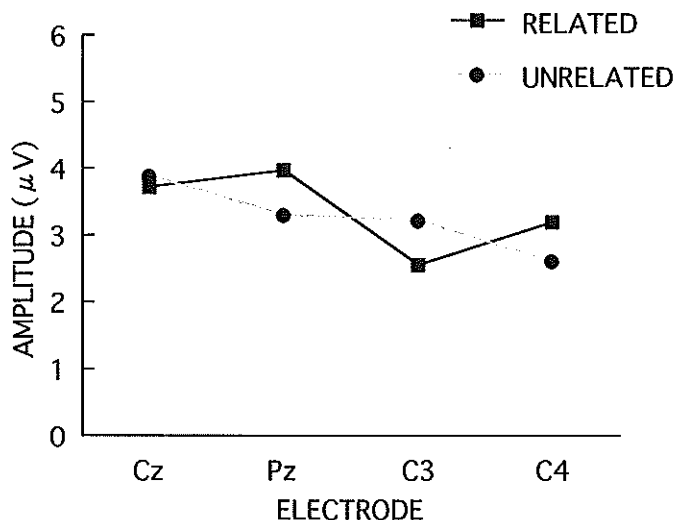


Figure 4. Mean of the maximum amplitude at each electrode for related and unrelated target chords in the latency range of 300 – 430 ms. These data are obtained from waveforms of unexperienced listeners in session 1.

## 考 察

本研究では、背景和音中出现する近親あるいは非近親なターゲット和音を計数する課題を行う際、両者に対し惹起するP300様成分に違いが見られるかどうかを検討した。その結果、音楽経験者では、前半（第1セッション）において、近親和音にくらべ非近親和音に対して、中央から右半球優位により大きなP300様成分が発達する傾向がみられた。しかし、後半（第2セッション）では、近親性の違いによってP300様成分の振幅に差異が生じる傾向はみられなかった。非経験群の被験者については、前半、後半とも、近親性の違いによる振幅差は見られなかった。

音楽経験のある被験者から得られた結果は、非近親和音に対し惹起するERPの後期陽性成分の振幅が特に刺激の繰り返し回数が少ないときに増大するという予測に一致するものであり、先行研究（e.g., Janata, 1995; Besson, 1997）で得られた知見との整合性も保たれる。

P300の振幅の規定要因の一つには、刺激の出現確率があげられている（e.g., Duncan-Jonson & Donchin, 1977）。低い出現確率の刺激が大きなP300を惹起する

というものである。しかし、本実験では近親和音と非近親和音の出現確率は等しいため、この要因のみでは結果を説明できない。ここでは、出現確率ではなく、主観的確率 (subjective probability) が低いほど P300 の振幅が大きくなるとする考え方 (e.g., Horst, Johnson, & Donchin, 1980; Donchin & Coles, 1988) による解釈が有効であろう。つまり、調性的体制化 (e.g., 阿部, 1987) あるいは音楽的なスキーマによる処理 (e.g., Krumhansl & Castellano, 1983) が和音の認知に関与するのであれば、背景和音に対し近親な和音についての予期は生じやすく、非近親な和音についての予期は生じにくいはずである (Bharucha & Stoekig, 1986; 荒生・行場, 1997)。したがって、予期されやすい近親和音よりもそうではない非近親和音の方が主観的確率はより低くなり、これが ERP に反映されたと考えることができる。主観的確率による考察は Janata (1995) も行っている。

一方、特に音楽経験のない被験者は、近親性の違いによる振幅差をほとんど示さなかった。たとえば、後続音の適合度についての評定実験では、音楽経験者が音楽的スキーマに依存し、音階などを反映した評価を行う一方で、非経験者は音高などのより低次の情報に多く依存した評価を行うことが知られている (Krumhansl, 1990)。本実験状況においても、特に非経験者では、調性的体制化あるいはスキーマ的処理が経験者ほど作用せず、むしろ、音高などのより低次の情報に依存した処理がおもに働くため、近親和音と非近親和音の主観的確率に差異が生じにくいことが推測される。

近親性の違いによる振幅差が減少するもう一つの要因は、刺激を繰り返し提示することであった。これまでの考察との関連でいうと、近親和音と非近親和音の出現率が等しい刺激系列を繰り返し提示されることにより、両和音の主観的確率の違いがしだいに減少し、両者の間の差異が生じにくくなるため、P300 の振幅差が減少すると考えられる。刺激を繰り返し提示することにより、音楽的逸脱による振幅変動が減少することは、Besson (1997) でも報告されている。

Janata (1995) の研究では、音楽的な逸脱との関連が見られた陽性成分は右半球優位に出現した。本研究でも、近親性の違いによる振幅差が最も生じやすかった部位は中央あるいは右半球であり、Janata (1995) の報告とも一貫する結果が得られたといえる。それらに加え、和音によるプライミング実験を分割脳患者を被験者として行った研究においても、和音進行における予期に関する機能が右半



球に側性化している可能性が示唆されており (Tramo & Bharucha, 1991)、和音に関する予期やスキーマ的処理に右半球が深く関与していることが示唆される。

音楽の処理過程とERPの諸成分とを関連づける試みは、音楽的な予期やスキーマの特性などの認知心理学的知見が集積されつつある現在、音楽の処理過程を探る上での一つの有効な手法になりえると考えられる。たとえば、本実験でみられたような振幅変動が、音楽理論的な近親性、あるいは和音の文脈適合度 (Krumhansl, 1990) をどの程度反映するのかといった問題をさらに検討することや、和音のプライミング効果の実験にERPの測定を加え、その結果と反応時間データをもとに、認知心理学的理論やモデル (たとえば、活性化拡散モデル (Bharucha & Stoekig, 1986)) を検証および精緻化することなどが今後の課題としてあげられる。また本稿では、和音に関する予期に右半球が深く関与している可能性を指摘したが、結論を導き出せるほど十分な証拠はまだそろっていない。この点については、今後、ERP変動の成因の検討や、種々の脳活動イメージ化手法による検討を待ち、慎重に議論を進める必要があるであろう。

謝辞：本論文の作成にあたり、貴重な御助言を頂きました九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科中島祥好助教授に深く感謝いたします。なお、本論文の一部は、平成8年度国立大学特定研究費 (代表者 田窪行則)、および、文部省科学研究費 (基盤研究 (C) (2)、課題番号 09610538、代表者坂本勉) により補助を受けている。

## 引用文献

- 阿部純一 1987 旋律はいかに処理されるか 波多野誼余夫 (編) 音楽と認知  
東京大学出版会 Pp. 41-68.
- 荒生弘史・行場次朗 1997 和音の同定課題における先行和音提示効果 音楽知覚認知研究, 3, 25-31.
- Besson, M. 1997 Electrophysiological studies of music processing. In I. Deliège & J. Sloboda (Eds.), *Perception and cognition of music*. Hove: Psychology Press. Pp.217-250.
- Besson, M., & Faita, F. 1995 An event-related potential (ERP) study of musical expectancy: Comparison of musicians with non-musicians. *Journal of Experimental*

- Psychology: Human Perception & Performance*, **21**, 1278-1296.
- Besson, M., & Macar, F. 1987 An event-related potential analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, **24**, 14-25.
- Bharucha, J. J., & Stoeckig, K. 1986 Reaction time and musical expectancy: Priming of chords. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **12**, 403-410.
- Bharucha, J. J. 1994 Tonality and expectation. In R. Aiello & J. Sloboda (Eds.), *Musical perceptions*. New York: Oxford University Press. Pp.213-239.
- Donchin, E. & Coles, M. G. H. 1988 Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral & Brain Sciences*, **11**, 357-374.
- Duncan-Jonson, C. C., & Donchin, E. 1977 On quantifying surprise: The variation in event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology*, **14**, 456-467.
- Horst, R. L., Johnson, R., Jr., & Donchin, E. 1980 Event-related brain potentials and subjective probability in a learning task. *Memory and Cognition*, **8**, 476-488.
- Janata, P. 1995 ERP measures assay the degree of expectancy violation of harmonic contexts in music. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **7**, 153-164.
- Krumhansl, C. L. 1990 *Cognitive foundations of musical pitch*. New York: Oxford University Press.
- Krumhansl, C. L., Bharucha, J. J., & Kessler, E. J. 1982 Perceived harmonic structure of chords in three related musical keys. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **8**, 24-36.
- Krumhansl, C. L., & Castellano, M. A. 1983 Dynamic processes in music perception. *Memory and Cognition*, **11**, 325-334.
- Paller, K. A., McCarthy, G., & Wood, C. C. 1992 Event-related potentials elicited by deviant endings to melodies. *Psychophysiology*, **29**, 202-206.
- Tramo, M. J., & Bharucha, J. J. 1991 Musical priming by the right hemisphere post-callosotomy. *Neuropsychologia*, **29**, 313-325.
- Verleger, R. 1990 P3-evoking wrong notes: Unexpected, awaited, or arousing? *International Journal of Neuroscience*, **55**, 171-179.