研究論文：論文

ピアノ音色和音聴取時における脳波パワー変動

山本佐代子*, 廣瀬百合子**, 佐川泰広***, 武田昌一****

*お茶の水女子大学大学院人間文化研究科, **一橋大学大学院

国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所, *帝京平成大学大学院情報学研究科

EEG POWER VARIATION WHILE LISTENING TO CHORDS OF SYNTHETIC PIANO TONES

Sayoko YAMAMOTO *, Yuriko HIROSE **, Yasuhiro SAGAWA *** , Shoichi TAKEDA ****

* Ochanomizu University, 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8610, Japan

** Hitotsubashi University, 2-1, Naka, Kunitachi-shi, Tokyo, 186-8601, Japan

*** Research Institute of National Rehabilitation Center for the Disabled, 4-1 Namiki, Tokorozawa, Saitama, 359-8555, Japan

**** Teikyo Heisei University, 2289-23 Uruido, Ichihara-shi, Chiba, 290-0193, Japan

Abstract: Nine young male Japanese non-musicians listen to 48 chords. The 48 chords consist of four kinds of triads. Each triad is composed of three synthetic piano tones. The subjects' EEGs of 10 electrodes are measured. Principal component analysis shows that variation of EEG power for about five seconds while listening to chords consists of two factors. The first factor, mainly composed of δ -band and θ -band power, is related to time course. The second factor, mainly composed of α -band and β -band power, is related to processing of triads. The analysis also shows that the activities of left-temporal and frontal lobe vary depending on the chord compositions. And the activities of right-temporal lobe vary by listening to major triads. The activities of left-occipital lobe vary by listening to diminished triads. β -band power of frontal, temporal, right-parietal and right-occipital lobe is reduced by listening to augmented triads.

Keywords: Brain, Chords, Music

1. まえがき

音楽は、調やビート、リズム、旋律、和声などさまざまな要素が多次的に重層して形成され、聴取者や演奏者にさまざまな感覚をもたらす。我々の研究の目的は、脳波等の生理指標を調べることで、音楽がもたらす感覚を解明していくことにある。

従来、音楽傾聴時の脳波反応を α 波や β 波に着目して解析を行った例は、筆者らの研究[1]を含めて数多く見られる[2-4]。しかし、音楽がもたらす感覚の要因を明らかにするためには、音楽そのものより、音楽を構成する要素に着目するアプローチも重要と考えられる。そのために、本研究では和声を構成する要素である和音に着目した。

和声進行を考えた場合、一つの音を聞いた時、その音だけに集中するのではなく、先行音からの変化の認知、後続音への準備、というように処理を時間経過にそって行う。我々は一つの仮説として、和声進行の中の和音ではなく、独立して提示された単独の和音であっても、和音聴取時の脳内活動は時間経過と共に変化するのではないかと考えた。実際の楽曲においても、和音提示後1秒以内に次の音が提示される場合や、和音提示後2～3秒後に次の音が提示される場合が存在し、和音提示後数秒内での音提示間隔の相違が聴取者に異なった感覚をあたえる。そこで我々は、和音提示後の数秒にわたる脳内活動の変化を脳波という生理指標から捕

らえることを試みた。

これまで、和音認知の脳内過程についての研究は、1、2秒程度の短時間の現象については脳波や脳磁図を加算平均した事象関連電位や誘発電位を用いた検討[5-6]、数秒にわたる感覚記憶の機能については心理実験的な検討[7]に例を見ることが出来る。それに対して、加算平均を行わない自発脳波を用いた数秒にわたる和音聴取時の脳内活動についての研究例はほとんど見当たらない。

今回我々は、現代日本人において音楽の音として幼少期から特に親しみのあるピアノ音による4種類の3和音（根音と3度上の音、5度上の音、の3音からなる和音：長3和音、短3和音、減3和音、増3和音に分類される）に着目した。図1に各和音の譜例を示す。長3和音と短3和音が協和音、減3和音と増3和音が不協和音である。

これらピアノ音による4種の3和音を聴取したとき、我々現代日本人は4種の3和音それぞれに安定感や不安定感、好悪等の印象をもつ。筆者らによる日本人に対する心理評価テストによると、長3和音には安定感を感じ、長3和音と短3和音を好む傾向が認められた。さらに、減3和音は不安定感を認めながらもやや好むという傾向も認められた[8]。このような3和音聴取時の印象や余韻の相違は脳内活動の相違に起因すると考えられる。

音楽等によりもたらされる感覚を脳内活動としてとらえ定量化する手法としては、武者らが「感性スペクトラム分析法

長3和音 短3和音 減3和音 増3和音

図1：3和音譜例

(Emotion Spectrum Analysis Method = ESAM)」を開発している[9-10]。筆者らも別途、EWI と呼ばれる電子管楽器による音楽演奏時と聴取時の脳波反応の分析をESAMを用いて行っている[11]。

現状では、ESAM が必ずしも感性計測の最も優れた手法であることが保証されているわけではないので、筆者らはESAM 以外にも種々のアプローチで感性の脳内活動を計測する試みを行っている。その一つとして、和音聴取時数秒間の脳波パワーの検討を行い、和音種類による脳内活動の差異が、脳波パワーに影響を与えることを示唆する結果を得ている[12]。

そこで本論文では、複数被験者の複数回の和音聴取時脳波パワー変動を被験者ごとに標準化し、和音種類ごとに集計した脳波パワー変動から和音聴取に関する変動成分を主成分分析により抽出することを試みる。なお、本研究とESAM による分析結果の比較検討は別の機会に行いたい。

2. 実験方法

2.1. 被験者

被験者は20代から30代前半の日本人男性9名で、専門的音楽経験はない。

2.2. 刺激和音

刺激和音は、長3和音12パターン、短3和音12パターン、減3和音12パターン、増3和音12パターンの4種計48パターンで、音色はソフトMIDI(Roland VSC-3.2)により合成されたピアノの音色である。提示時間は各和音4秒間である。

2.3. 脳波測定条件

脳波測定部位は国際10-20法にしたがって、10部位(Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P3, P4, O1, O2)とし、基準電極は右耳A2とした。測定に使用した脳波計は、(株)NF回路設計ブロック・(株)脳機能研究所製のESA-16である。サンプリング周波数は200Hz、24dB/oct、ローパスフィルター60Hz、12dB/oct、ハイパスフィルター0.53Hz、6dB/oct、とし、50Hzハム除去フィルターを使用した。

2.4. 実験手続き

被験者は脳波測定用電極を頭部に装着した後、シールドルーム内の椅子にゆったりと着座した。

まず被験者は、安静閉眼(30秒間)し、その後CDにあらかじめ録音された和音を聴取した。CDには4種の3和音48パターンが順不同に録音されており、和音提示時間4秒間の後に無音が4秒間続き、その後次の和音が提示されるという繰り返しである。音量は被験者がこちよく感じられる音量にあらかじめ設定してある。被験者は閉眼のまま48パターンの和音を傾聴した。48パターンの各和音の提示タイミングに合わせて、実験者が脳波計に提示タイミングをキー入力した。

3. 脳波解析方法

3.1. 脳波パワーの算出

図2に示すように、各被験者の電極ごとの脳波データから、和音の提示タイミングを基準時刻0サンプル($t=0$ 秒)とし、-256サンプル($t=-1.28$ 秒)、0サンプル($t=0$ 秒)、256サンプル($t=1.28$ 秒)、512サンプル($t=2.56$ 秒)、768サンプル($t=3.84$ 秒)、1024サンプル($t=5.12$ 秒)を中心とした各512サンプル(各2.56秒間)計6個の時間区間を切り出した。以下、この各時間区間の時刻を時間区間の中心時刻 t で示す。

切り出した時間区間各々に対してハニング窓をかけてFFTを行い2.56秒ごとの、 δ 波帯域(1Hz~4Hz)、 θ 波帯域(4Hz~8Hz)、 α 波帯域(8Hz~13Hz)、 β 波帯域(13Hz~25Hz)のパワー P を求めた。ただし、

$$P = \int_{f_L}^{f_H} S(f) df$$

ここで f は周波数、 $S(f)$ はある部位の脳波信号の周波数におけるパワー、 f_L 、 f_H はそれぞれ各帯域の最小周波数と最大周波数(例えば α 波なら $f_L=8$ [Hz]、 $f_H=13$ [Hz])である。これにより、一つの和音パターンにつき、和音提示タイミング前後約8秒間の1.28秒間隔の各帯域パワー値が得られる。

これを48パターンの和音に対して同様に行った。和音は8秒ごとに提示されるので48パターンの和音聴取時間全体を通しての脳波の各帯域パワー値を算出する事になる。 δ 波帯域を例にとると、一人の被験者の一つの電極位置で、288個((1パターンの和音につき6時間区間)×48パターンの和音)の2.56秒間 δ 波帯域パワー値が得られる。 θ 波帯域、 α 波帯域、 β 波帯域も同様である。

図2：脳波データの切り出し

図3: パワー変動と主成分 X, Y

3.2. 和音種類ごとの平均標準化脳波パワーの算出

次に長3、短3、減3、増3の4種の和音聴取による脳波パワー変動の差異を検討するために、電極位置ごとに、被験者9人分のδ波帯域、θ波帯域、α波帯域、β波帯域の各帯域のパワー値を4種の和音種類ごとに集計し平均をもとめる。

しかしながらδ波帯域、θ波帯域、α波帯域、β波帯域の各帯域のパワー値は、被験者による差異が大きい。そこで各電極位置で、各帯域のパワー値の標準化を被験者ごとに行った。すなわち一人の被験者のδ波帯域を例にとると、一つの電極位置での2.56秒間δ波帯域パワー値288個から平均と標準偏差を求め、

$$\text{標準化パワー値} = \frac{(\text{288個の各パワー値}) - (\text{平均パワー値})}{\text{パワー値の標準偏差}}$$

とした。これにより、一人の被験者の一つの電極位置での288個のδ波帯域パワー値は標準偏差1、平均ゼロのデータに変換される。このとき用いたδ波帯域パワー値288個は48パターンの和音を聴取している時間全体を通してのパワー値であるので、平均値ゼロは和音聴取時における平均的なδ波帯域パワー値をゼロとした事に等しい。他の電極位置、他の帯域パワー値の標準化も同様に行った。これを9人の被験者すべてに対して行った。

次に、各電極位置で、被験者9人分の標準化パワー値を、長3、短3、減3、増3の4種の和音種類ごとに集計し、時間区間ごと、帯域ごとに標準化パワー値の平均を求めた。この平均値を $\delta_{ij}(t)$ 、 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ とする。ただし、 i は和音種類： $i=1 \sim 4$ の順に、長3、短3、減3、増3、 j は電極位置： $j=1 \sim 10$ の順にFp1, Fp2, ..., O1, O2である。また、時刻 t に関しては和音提示後の時間区間に着目し、 $t=0$ 秒, 1.28秒, 2.56秒, 3.84秒, 5.12秒である。各和音種類は12パターンあり、9人分なので、108個の標準化パワー値の平均となる。

この標準化パワー値の平均は、例えば電極位置 j における $\delta_{ij}(t)$ を考えると、「和音 i の処理に関する時間区間 t でのδ帯域標準化パワー」と「和音処理以外に関するδ帯域標準化パワー」の108個の平均から成ると考えられる。ここで、和音処理以外の処理は和音処理とは異なり、和音の提

示タイミングとは無関係であるため、108個の「和音処理以外に関するδ帯域標準化パワー」の値はばらつき、負の値もとると考えられる。このため、和音処理以外の108個の平均値は「和音 i の処理に関する時間区間 t での平均的δ帯域標準化パワー」に比べ相対的に小さく考えられる。従って、 $\delta_{ij}(t)$ は、「和音 i の処理に関する時間区間 t でのδ帯域標準化パワー」が強調されると考えられる。 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ も同様である。

3.3. 平均標準化パワー値の主成分分析

和音聴取時の脳波パワー変動の全体的な様子を把握するために、3.2項で求めた、和音種類ごと、時間区間ごと、帯域ごとの標準化パワー値9人分の平均 $\delta_{ij}(t)$ 、 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ に対して電極ごとに主成分分析を行った。

ある電極位置 j における標準化パワー値の平均： $\delta_{ij}(t)$ 、 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ は、和音種類 $i:4$ 個と時間 $t:5$ 個の変数により計20個である。この20個のパワー値の変動は、3.2項で述べたように、主として和音聴取に関する脳波パワーの変動部分と、相対的に小さな和音聴取以外に関する脳波パワーの変動部分からなっていると考えられる。たとえば図3に示すように、ある電極位置 j における標準化パワー値の平均： $\delta_{ij}(t)$ 、 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ を軸 δ 、 θ 、 α 、 β が張る4次元空間内に表した時（ただし図は3次元のみ示す）、このとき大部分が軸 X 、 Y が張る2次元部分空間に含まれるならば、この2次元の部分空間が和音処理聴取に関する脳波パワーの変動に関連するのではないかと考えられる。

我々の仮説は、独立して提示された単独の和音であっても、和音聴取時の脳内活動は時間経過と共に変化し、その脳内活動の時間変化は和音の種類によって異なると言うもので、和音聴取に関する脳波パワー変動は、2つの変数、和音種類 i と時間経過 t に関連すると考えた。

そこで、まず、このような2次元の部分空間を表す軸 X 、 Y 等を求め、次に得られた軸 X 、 Y の各々が実際に和音種類 i と時間経過 t に関連するかを検定することとした。

軸 X 、 Y を求めるために、電極位置 j ごとに主成分分析を行うこととした。主成分分析は、電極位置ごとの標準化パワー値の平均値 $\delta_{ij}(t)$ 、 $\theta_{ij}(t)$ 、 $\alpha_{ij}(t)$ 、 $\beta_{ij}(t)$ を用いて

$$X = a_{1,1} \cdot \delta + a_{1,2} \cdot \theta + a_{1,3} \cdot \alpha + a_{1,4} \cdot \beta$$

$$Y = a_{2,1} \cdot \delta + a_{2,2} \cdot \theta + a_{2,3} \cdot \alpha + a_{2,4} \cdot \beta$$

但し、 $(a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3}, a_{1,4})$, $(a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3}, a_{2,4})$ は固有ベクトル

なる互いに直交する主成分 X 、 Y を電極位置ごとに求めた。

次に、求めた電極位置ごとの主成分 X 、 Y の各々について、和音種類 i と時間経過 t との関連性について検定を行った。

検定は、電極位置ごとの主成分 X 、 Y の式を用いて、被験者9人の48パターンの和音に対する標準化パワー値から主成分の値： $X_{ijk}(t)$ 、 $Y_{ijk}(t)$ をまず求めた。ただし、 i は和音種類： $i=1 \sim 4$ の順に、長3、短3、減3、増3、 j は電極位

図4：和音提示からの時間経過と和音種類が脳波パワー変動に及ぼす影響の大きさ

置: $j=1 \sim 10$ の順に Fp1, Fp2, ..., O1, O2, k は被験者: $k=1, 2, \dots, 9$, t は時刻: $t=0$ 秒, 1.28 秒, 2.56 秒, 3.84 秒, 5.12 秒である。この $X_{ijk}(t)$ 、 $Y_{ijk}(t)$ に関して電極位置 j ごとに時間経過 t と和音種類 i に関する分散分析を行った。

4. 結果と検討

4.1. 時間経過と和音種類がパワー変動全体に与える影響

主成分 X、Y 各々に関して時間経過 t と和音種類 i に関する分散分析を行った結果、どの電極位置でも主成分 X、Y のうち一方が、和音提示からの時間経過 t と有意に関連が認められた。(Fp1: $p=0.0007$, Fp2: $p=0.0001$, F3: $p=1 \times 10^{-20}$, F4: $p=9 \times 10^{-29}$, T3: $p=0.02$, T4: $p=2 \times 10^{-19}$, P3: $p=2 \times 10^{-16}$, P4: $p=2 \times 10^{-20}$, O1: $p=0.0003$, O2: $p=2 \times 10^{-5}$)。

また、主成分 X、Y のうち時間経過 t と関連しない方の成分は、前頭部 Fp1, Fp2 と左頭頂部 P3 以外で、和音種類 i との関連が有意に認められた (F3: $p=0.05$, F4: $p=0.03$, T3: $p=0.03$, T4: $p=0.002$, P4: $p=0.05$, O1: $p=0.009$, O2: $p=0.02$)。ただし、前頭部 Fp1 と Fp2 に関しては時間経過 t と和音種類 i の交互作用が有意に認められている (交互作用 Fp1: $p=0.01$,

Fp2: $p=0.009$)。

図4に、2つの主成分 X、Y のうち時間経過 t あるいは和音種類 i との関連が有意に認められた主成分に関して、 δ 、 θ 、 α 、 β 帯域の標準化パワー値の変動全体に対する影響の大きさを寄与率で示す。ただし、検定により時間経過 t あるいは和音種類 i との関連が認められた主成分をそれぞれ「時間経過が主に影響する主成分」「和音種類が主に影響する主成分」として示してある。どの電極位置においても時間経過に関連が認められた主成分の変動と和音種類に関連が認められた主成分の変動の合計が標準化パワー値の変動全体の 70% から 90% に影響している。

また、左頭頂 P3 では、和音種類 i と関連が認められる主成分は存在しない。これは左頭頂近傍には言語処理に関連した角回があり、言語処理は行うが和音処理は行わない可能性を示唆する。

4.2. 時間経過に関連する主成分

4.2.1. 主成分への各帯域の寄与と主成分の時間変化 図5に時間経過と関連が認められた主成分の固有ベクトル ($a_{1,1}$, $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $a_{1,4}$) を各帯域に関する成分で示す。大きいほど各帯域パワ

図5：各帯域パワーの時間経過成分への寄与

図6：時間経過と関連する主成分の時間変化 (全電極位置での平均±標準偏差)

図7: 各電極位置での時間経過関連主成分値

一の時間経過成分への寄与が大きい事を意味する。図からどの電極位置においても δ 波帯域と θ 波帯域の寄与が大きいことがわかる。

図6に時間経過と関連が認められた主成分の時間変化を被験者9人の48パターンの和音全体での全電極平均で示す。図の誤差バーは電極間の標準偏差である。和音提示からの時間経過0秒つまり和音提示前後の2.56秒間での値が大きい。和音提示後のみで考えると1.28秒間での値である。これは誘発電位として検討が加えられている時間帯であり、時間経過と関連が認められた主成分は誘発電位と関係していると考えられる。

また後頭部 O2, O1 では図5に示すように α 波帯域の寄与が負になっていることは、後頭部では和音提示後の1.28秒間で δ 波帯域と θ 波帯域のパワー値の増大に伴い、 α 波帯域のパワー値が減少することを意味すると考えられる。

4.2.2. 左右側頭 (T3, T4) での差異 図7に、時間経過と関連が認められた主成分の、電極位置での差異を示す。和音提示からの時間0秒と5.12秒に関して図示した。左側頭 T3 において、0秒 (和音提示後1.28秒間) と5.12秒で主成分の値に差が認められない。T3においては和音提示後の1.28秒間

が他の時間と比較して特徴的でない事がわかる。図6で時間0秒において標準偏差が大きかったのは左側頭の電極 T3 で時間経過と関連する主成分の値が他の電極とは異なり小さかったためである。

また図4から、時間経過と関連する主成分は、右側頭 T4 ではパワー値変動全体の72%を占めているが、左側頭部 T3 では42%を占めるに過ぎない。さらに同じく図4で左側頭 T3 では右側頭 T4 と比べて和音種類と関連する主成分が占める割合が多くなっている。

これより右側頭部 T4 と左側頭部 T3 では和音聴取に対して処理が異なっていることが予想される。右側頭 T4 では誘発電位に関連するような短時間の処理を行い、左側頭 T3 では右側頭部 T4 より時間をかけた和音処理を行っている事が推測される。左側頭部は言語処理に関連する部位であり、和音処理と言語処理の関連性を示唆する。

4.2.3. 減3和音聴取時の右前頭 Fp2 での主成分値の増大 また、時間経過と関連する主成分は、前頭部 Fp2 でのみ和音種類の影響も有意に認められた ($p=0.005$)。図8に Fp2 での和音種類別の値を示す。図の各点は被験者9人の和音種類別主成分値108個の平均である。減3和音が他の和音と比べて大きい。時間経過と関連する主成分は δ 波帯域と θ 波帯域の寄与が大きい。図9に Fp2 での δ 波帯域の被験者9人での和音種類別標準化パワー値108個の平均の時間変化を示す。 θ 波帯域の時間変化は図示しないが、図8と図9から減3和音の δ 波帯域標準化パワー値の変動が、減3和音の時間経過に関連した主成分値に大きく影響していることがわかる。減3和音に関しては、和音提示0秒と1.28秒の時間区間で、右前頭部 Fp2 において、 δ 波帯域の脳波パワーが大きく、他の和音とは異なる処理を行っている事が推測される。

4.3. 和音種類に関連する主成分

4.3.1. 主成分への各帯域の寄与 図10に和音種類と関連が認められた主成分の固有ベクトル ($a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3}, a_{2,4}$) を各帯域に関連する成分で示す。大きいほど各帯域パワーの和音種類に関連する主成分への寄与が大きい事を意味する。ここで P3 の記載

図8: Fp2における時間経過関連主成分の和音種類による時間変化の違い

図9: Fp2における δ 波帯域パワーの和音種類による時間変化の違い

図10: 各帯域パワーの和音種類成分への寄与

が無いのは図4に示したように電極位置P3においては、和音種類に関連が認められる主成分が存在しなかったためである。図10からどの電極位置においてもβ波帯域の寄与が大きいことがわかる。

また、図5の時間経過と関連が認められた主成分の場合と図10の和音種類と関連が認められた主成分とを比べると、α波帯域の寄与が図10で大きい事がわかる。実際、4.3.2項の(2)で後述するが、前頭Fp1、Fp2と左側頭T3においては、β波帯域の標準化パワー値の変動傾向とともにα波帯域の標準化パワー値の変動傾向が、和音種類と関連する主成分の変動傾向に大きく影響している。図11に、和音種類と関連する主成分の固有ベクトル成分のうち、α波帯域に関する成分とβ波帯域に関する成分の大きさを比で示す。図では値が大きいほどα波帯域の寄与がβ波帯域の寄与に比べて大きい事を意味する。図から、特に左側頭T3ではα波帯域の寄与が大きく、α波帯域の寄与が少ない右側頭T4とは対照的である。4.2.2項で時間に関連が認められた主成分において右側頭T4と左側頭T3の差異を述べたが、ここでも右側頭T4と左側頭T3で差異がある。

またFp1、Fp2、T4、O1では、和音種類と関連する主成分が、和音種類の影響以外に時間経過の影響も認められている。4.1章に述べたように、前頭Fp1とFp2では和音種類と時間経過の交互作用が有意である(交互作用Fp1: $p=0.01$, Fp2: $p=0.009$)。一方、和音種類と関連する主成分は、右側頭T4と左後頭O1では、和音種類と時間経過の交互作用は認められないが、時間経過との関連(時間経過との関連T4: $p=0.01$, O1: $p=0.0006$)が有意に認められている。これら4つの電極部

図12: O1でのθ波帯域標準化パワーの変動

図11: 和音種類成分への寄与(α波帯域とβ波帯域)

位Fp1、Fp2、T4、O1では、図10において和音種類と関連する主成分へのθ波帯域の寄与が他の電極に比べて大きい。

図12に時間経過との関連は有意に認められたが和音種類との交互作用は認められなかった右側頭T4と左後頭O1のうち例としてO1での、被験者9人でのθ波帯域標準化パワー値の和音種類別108個の平均の時間変化を示す。図12からθ波帯域標準化パワー値の時間変化は和音種類による交互作用はなく、θ波帯域パワー値が和音種類に関わらず時間とともに変化している。一方、図13に和音種類と関連する主成分で、和音種類と時間経過との交互作用が認められた前頭Fp1、Fp2のうち、例としてFp1でのθ波帯域標準化パワー値の時間変化を示す。図の各点は被験者9人の和音種類別標準化パワー値108個の平均である。図13からθ波帯域標準化パワー値の時間変化が和音種類によって異なり、θ波帯域パワー値の時間経過と和音種類間で交互作用があることが推測される。和音種類と関連する主成分のうち、時間経過と関連が認められたものは、その時間経過との関連性が主成分を構成するθ波帯域標準化パワーの変動と関連があると推測される。

4.2章でも時間経過と関連する主成分はδ波帯域とθ波帯域が主に関連していた。θ波帯域のパワー値はδ波帯域とともに和音処理の時間経過と関連性が強いことが推測される。

4.3.2. 和音種類に関連する主成分値変動の和音による差異
和音種類に関連する主成分は、(1)増3和音聴取時の広汎な部位での主成分値の低下、(2)左側頭と前頭での和音種類ごとに異なる主成分値変動、(3)長3和音聴取時の右側頭での主成分値の増大、(4)減3和音聴取時の左後頭での主成分値の増大、が特徴である。

図13: Fp1でのθ波帯域標準化パワーの変動

図14: F3における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

(1) 増3和音聴取時の広汎な部位での主成分値の低下 増3和音では、測定電極 10 位置のうち 8 電極位置 Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P4, O2 で、和音種類と関連する主成分の値が、他の和音と比べて低下している。しかしその低下する時間帯は前頭から左側頭にかけての Fp1, Fp2, F3, F4 T3 と右側の側頭から後頭にかけての T4, P4, O2 では異なっている。

例として、左前頭 F3 と右後頭 O2 での和音種類と関連する主成分の時間変化を図 14、図 15 に示す。図の各点は被験者 9 人の和音種類別主成分値 108 個の平均である。図 14 から左前頭 F3 では、増3和音は和音提示後 0 秒と 2.56 秒の時間区間で、和音種類と関連する主成分の値が他の和音と比べて小さい。図 15 から右後頭 O2 では、増3和音は和音提示後 0 秒から 2.56 秒の時間区間で連続して、和音種類と関連する主成分の値が他の和音と比べて小さい。

前頭部 Fp1, Fp2, F3, F4 と左側頭部 T3 では、図 14 同様、和音提示直後 0 秒と 2.56 秒の時間区間で、増3和音の和音種類と関連が認められた主成分値が他の和音と比べて小さい。

右頭頂から後頭 P4, O2 では、図 15 同様、和音提示後 0 秒から 2.56 秒の時間区間で連続して、和音種類と関連する主成分の値が増3和音で他の和音と比べて小さい。右側頭 T4 では、増3和音提示後の和音種類と関連する主成分値低下の連続する時間区間は、右頭頂 P4、右後頭 O2 より短く、和音提示後 0 秒から 1.28 秒の時間区間である。

これら増3和音での和音種類と関連が認められた主成分値の低下は、増3和音聴取時のβ波帯域標準化パワー値の低下が影響している。例として左前頭 F3 のβ波帯域標準化パワー和音種類別 108 個の平均値の時間変化を図 16 に示す。図 14 と図 16 から、β波帯域標準化パワーの低下が、和音種類と関連する主成分値の増3和音での低下に影響していることがわかる。

今回β波帯域として検討した 13Hz～25Hz はβ波帯域としては低周波である。この帯域のβ波帯域パワー値の低下がその部位での皮質の活動の抑制を意味するとは必ずしも言えない。しかしながら、前頭と左側頭では、和音提示直後と和音提示

図15: O2における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

から 2.56 秒の時間区間での 2 度β波帯域のパワー値が増3和音は他の和音と比べて低下した。右側頭から右後頭にかけては和音提示直後から 1.28 秒の時間区間、もしくは 2.56 秒の時間区間まで連続して、増3和音は他の 3 和音と比べてβ波帯域のパワー値が低下した。

以上より、増3和音は前頭から側頭と右頭頂から右後頭 (Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P4, O2) にて、他の和音とは異なった処理が行われている事が示唆される。

(2) 左側頭(T3)前頭 (Fp1, Fp2) での和音種類ごとに異なる主成分値変動 左側頭 T3 と前頭 Fp1, Fp2 では、和音種類と関連が認められた主成分値の時間変化が増3、減3、長3、短3和音の各和音種類で異なっている。またその時間変化の様子は左側頭 T3 と前頭 Fp1, Fp2 では異なっている。

左側頭 T3 での時間変化を図 17 に、前頭に関しては例として左前頭 Fp1 での時間変化を図 18 に示す。図の各点は被験者 9 人の和音種類別主成分値 108 個の平均である。図 17、図 18 とともに、和音種類と関連が認められた主成分値の時間変化が増3、減3、長3、短3和音の各和音種類で異なり、左側頭

図16: F3におけるβ波帯域標準化パワー値の和音種類による時間変化の違い

図17:T3における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

図18:Fp1における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

T3 と前頭 Fp1、Fp2 では、和音種類ごとに異なった処理が行われている事が示唆される。

増3和音に関しては、(1)項で述べたので、ここでは他の減3、長3、短3和音について述べる。減3、長3、短3和音では、左側頭 T3 と前頭 Fp1、Fp2 で、 β 波帯域標準化パワー値の変動傾向とともに α 波帯域標準化パワー値の変動傾向が、和音種類と関連する主成分の変動傾向に影響している。

減3和音では左側頭 T3 (図 17) と前頭 Fp1 (図 18) とともに和音種類と関連する主成分が2.56秒の時間区間で極大となっている。しかしながらその極大は左側頭が前頭にくらべて大きく、左側頭 T3 (図 17) と前頭 Fp1 (図 18) では極大に影響している帯域が異なっている。図 19、図 20 に、左側頭 T3 と前頭 Fp1 で、減3和音に関して、 α 波帯域と β 波帯域の時間変化を示す。図の各点は被験者9人での標準化パワー値108個の平均値である。左側頭 T3 では2.56秒の極大は α 波帯域と β 波帯域パワー両方によるものである。一方前頭では2.56秒の極大は、 β 波帯域の和音提示直後からの緩やかな減少に α 波帯域の2.56秒での増加加わったものである。減3和音は左側頭 T3 と前頭 Fp1 とでは、処理が異なっている事が示唆される。

長3和音は左側頭部 T3 (図 17) と前頭部 Fp1 (図 18) とともに、1.28秒の時間区間と3.84秒の時間区間で、和音種類と関

連する主成分が極大に成っている。しかしながら、左側頭 T3 (図 17) と前頭 Fp1 (図 18) では減3和音同様極大に影響している帯域が異なっており、左側頭では前半の1.28秒の極大は β 波帯域パワーによるもので、後半の3.84秒の極大は α 波帯域パワーによるものである。一方前頭では、前半の1.28秒の極大は α 波帯域パワーによるもので、後半の3.84秒の極大は α 波帯域と β 波帯域パワー両方によるものである。長3和音は左側頭 T3 と前頭 Fp1、Fp2 とでは、処理が異なっている事が示唆される。

短3和音は左側頭部 T3 (図 17) と前頭部 Fp1 (図 18) とともに和音種類と関連する主成分がはじめの1.28秒の時間区間で増大しその後低下する。短3和音においては、左側頭部 T3 と前頭 Fp1、Fp2 で、 α 波帯域 β 波帯域ともに、1.28秒の時間区間まで増大しているが、その後低下している。

(3)長3和音聴取時の右側頭T4での主成分値の増大 右側頭 T4 での和音種類と関連が認められた主成分の時間変化を図 21 に示す。図の各点は被験者9人の和音種類別主成分値108個の平均である。増3和音に関しては(1)項にて述べたので、ここでは長3和音に関して述べる。長3和音では、和音提示後から2.56秒の時間区間まで他の和音と比べて和音種類と関連する主成分の値が大きい。和音種類と関連する主成分値の長3和音聴取時の右側頭 T4 での増大は、(1)項の増3和音で

図19:T3における減3和音聴取時の α 波・ β 波帯域パワー値の時間変化

図20:Fp1における減3和音聴取時の α 波・ β 波帯域パワー値の時間変化

図21: T4における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

図22: O1における和音種類と関連する主成分の和音種類による時間変化の違い

のβ波帯域の影響同様、長3和音聴取時のβ波帯域標準化パワー値が影響している。

右側頭 T4 では、長3和音和音提示後から 2.56 秒の時間区間まで、他の3和音と比べてβ波帯域標準化パワー値の増大があり、長3和音が右側頭 T4 にて他の3和音と比べて異なった処理が行われている事が示唆される。

(4)減3和音聴取時の左後頭 O1 での主成分値の増大 左後頭 O1 での和音種類と関連する主成分の時間変化を図 22 に示す。図の各点は被験者 9 人の和音種類別主成分値 108 個の平均である。左後頭 O1 で和音種類と関連する主成分の値が、減3和音提示直後の時間区間 (0 秒から 1.28 秒) で他の和音と比べて大きい。これは(1)項の増3和音でのβ波帯域の影響同様、減3和音聴取時のβ波帯域標準化パワー値が影響している。左後頭 O1 で減3和音聴取直後の時間区間 (0 秒から 1.28 秒) で他の3和音と比べてβ波帯域標準化パワー値の増大があり、減3和音が左後頭 O1 にて他の3和音と比べて異なった処理が行われている事が示唆される。

5. 総合的考察

専門的音楽経験のない 20 代から 30 代前半の日本人男性 9 名において、ピアノ音による 3 和音 4 種各 12 パターン聴取時約 5 秒間での頭部 10 部位 (Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P3, P4, O1, O2) の δ、θ、α、β 波帯域の標準化脳波パワー変動の和音種類別平均値に主成分分析を適用して、和音の種類による脳内処理の差異を明らかにする検討を行った。その結果、和音提示後直後の 1, 2 秒間のみならず和音提示後の数秒間においても和音種類によって異なる処理が行われている事を示唆する結果を得た。(1) 3 和音聴取時の脳波パワー変動は頭部 10 部位のいずれも、時間経過と関連した成分と和音種類と関連した成分で 70% から 90% をしめる。(2) 時間経過と関連した成分は、主に δ 波帯域と θ 波帯域の変動で構成され、左側頭 T3 以外の頭部 10 電極すべての部位で、和音提示後 1.28 秒間でのみ値が大きく、左側頭 T3 以外は誘発電位と関係していると考えられる。(3) 和音種類と関連した成分は、主に α 波

帯域と β 波帯域で構成され、左頭頂 P3 では存在しない。左頭頂近傍には言語処理に関連した角回や縁上回があり、角回・縁上回近傍では言語処理は行いが和音処理は行わない事を示唆する。(4) 協和音の長 3 和音は図 23 左に示す T3、T4、Fp1、Fp2 に、他の和音と異なる特徴が見られる。長 3 和音は、両側頭部 T3、T4 で和音提示後から 1.28 秒の時間区間で β 波帯域パワー値が増大し、前頭 Fp1、Fp2 で α 波帯域パワーが増大している。右側頭 T4 では 2.56 秒の時間区間まで β 波帯域パワー値は他の 3 和音と比べて大きい。その後 3.84 秒の時間区間で、左側頭 T3 の α 波帯域パワーが増大し、前頭 Fp1、Fp2 で α 波帯と β 波帯域パワーが増大する。(5) 協和音の短 3 和音は図 23 中左に示す T3、Fp1、Fp2 に他の和音と異なる特徴が見られる。短 3 和音は左側頭 T3 と前頭 Fp1、Fp2 で和音提示後 1.28 秒の時間区間で α 波帯域と β 波帯域パワー値が増大している。(6) 不協和音ではあるがアンケート結果[注 8]によるとやや好まれる減 3 和音は、図 23 中右に示す Fp1、Fp2、T3、O1 で他の和音と異なる特徴が見られる。和音提示直後、左後頭 O1 と前頭 Fp1、Fp2 では β 波帯域パワーが増大して緩やかに減少し、和音提示後 1.28 秒の時間区間まで右前頭 Fp2 で δ 波帯域パワーが増大し、その後 2.56 秒の時間区間で、左側頭 T3 で α 波帯域と β 波帯域パワーがともに増大する。(7) 不協和音の増 3 和音は、図 23 右に示す 8 部位にて β 波帯域パワーが低下している。前頭 Fp1、Fp2、F3、F4 と左側頭 T3 では和音提示直後と 2.56 秒の時間区間の 2 度、また右側頭 T4 では和音提示直後から 1.28 秒の時間区間まで連続して、さらに右頭頂 P4 から右後頭 O2 では和音提示直後から 2.56 秒の時間区間まで連続して、他の和音と比較して β 波帯域パワー値が低下している。この結果は、和声進行の中で不協和音は独立して知覚され他の和音と相互関係を持たない、という Regnault らの結論[5]との関連性を示唆する。(8) 左側頭 T3 と前頭 Fp1、Fp2 は、4 種の和音それぞれに対して特徴的な脳波パワー変動を示し、左側頭 T3 と前頭 Fp1、Fp2 では、和音種類ごとに異なった処理が行われている事が示唆され、この部位が和音にかんする重要な処理を行っている部位であることを推測させる。(9)

図 23：各 3 和音で特徴的な部位（黒丸表示部位）

左側頭 T3 は、右側頭 T4 とくらべて時間経過と関連する成分が占める割合が大きくなり、かつ時間経過と関連する成分の変動自体も大きくないことから、右側頭 T4 と左側頭 T3 では和音聴取に対して処理が異なっていることが予想される。右側頭 T4 では誘発電位に関連するような短時間の処理を行い、左側頭 T3 はより時間をかけた和音処理を行っている事が推測される。

6. むすび

6.1. まとめ

専門的音楽経験のない 20 代から 30 代前半の日本人男性 9 名において、ピアノ音による 3 和音聴取時約 5 秒間の脳波パワー変動に主成分分析を適用して、和音の種類による脳内処理の差異を明らかにする検討を行った。その結果、和音提示後直後の 1, 2 秒間のみならず和音提示後の数秒間においても和音種類によって異なる処理が行われている事を示唆する結果を得た。しかしそれが脳の認知プロセスとどのようにかわっているのかなど明らかにすべき問題点もある。

6.2. 今後の課題

今回脳波測定部位は 10 部位であったが、今後測定部位を増やし、3 和音聴取時の脳内活動をより詳細な時間的空間的分析を加え誘発電位との関連も含めて検討していき、その詳細を今後詰めて行きたい。さらに、今回は MIDI により合成したピアノ音のみを刺激として用いたが、音色や言語の影響について調べるために、他の楽器音、コーラス音を刺激としても用いた場合についても検討する。

謝辞

本研究は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター補助金ならびに帝京平成大学学内特別研究費からの助成に基づくものである。また、本研究の機会を与えてくださった元帝京平成大学教授武者利光博士に謝意を表したい。

参考文献

- 1) 武田昌一, 藤方佐知栄, 加藤修一: 種々の音楽あるいは非音楽刺激を与えたときの脳の反応の脳波計測による解析, 日本音響学会平成 6 年度春季研究発表会講演論文

集, pp. 621-622, 1994

- 2) 岩城達也, 塚本真紀, 岩永誠: 音楽の反復聴取が覚醒水準に及ぼす影響, 音楽知覚認知研究, 4, pp1-9, 1998
- 3) 小田聡, 難波良司, 柳原正文, 堀泰雄, 片山昭: 現代的音楽聴取が脳波ならびに循環機能に及ぼす影響, Neurosciences, Vol.18, pp83-86, 1992
- 4) 難波良司, 柳原正文, 堀泰雄, 片山昭: 音楽の脳波ならびに循環機能に及ぼす影響について, Neurosciences, Vol.19, No. Suppl 1, pp177-180, 1993
- 5) P. Regnault, E. Bigand, M. Besson: Different Brain Mechanisms Mediate Sensitivity to Sensory Consonance and Harmonic Context: Evidence from Auditory Event-Related Brain Potentials, J. Cognitive Neuroscience, Vol.13, No.2, pp241-255, 2001
- 6) 柴玲子, 根本幾: 和音認知の脳磁図の解析, 信学技報, MBE2003-18, pp. 29-32, 2003
- 7) Darwin C. J., Turvey M. T., Crowder R. G.: An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: Cognitive Psychol., Vol. 3. pp255-267, 1972
- 8) 廣瀬百合子, 山本佐代子, 武田剛, 武田昌一, 武者利光: 特定の音程と和音に対する知覚認知の傾向について, 日本音響学会 2002 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 661-662, 2002
- 9) 武者利光: 「こころ」を計る, 日経サイエンス, Vol.26, No.4, pp.20-29, 1996
- 10) Musha, Y. Terasaki, H. A. Haque, and G. A. Ivanitsky: Feature extraction from EEGs associated with emotions, Artif. Life Robotics 1, pp.15-19, 1997
- 11) 武田昌一, 加藤修一, 金井康之, 山本佐代子, 武者利光: 感性スペクトラム分析法 (ESAM) による楽器 (EWI) 演奏時の感情変化の計測, 日本音響学会平成 10 年度秋季研究発表会講演論文集, pp. 425-426, 1998
- 12) Y. Hirose, S. Yamamoto, Y. Sagawa, S. Takeda, and T. Musha, : The EEG responses of dissonance: evidence in the time process and the area of the brain, Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (ISMA Nara), 3-S2-4, Nara, Japan, pp.1-8 (Mar.-Apr.2004)