

## 論文の内容の要旨

論文題目 可聴域をこえる超高周波成分の周波数帯域が脳活動に及ぼす影響

氏名 福島 亜理子

### 1. 背景と研究の目的

メディア技術を人間の感覚感性とりわけ脳との適合性の観点から評価し適切な知見を提供することは、ますます重要になっている。人間の感覚感性とメディア技術との接点にある興味深い現象として、可聴周波数上限（20 kHz）をこえ複雑に変化する超高周波成分がある種の可聴周波数成分と共存すると、人間の間脳・中脳を含む脳深部及びそこから脳全体に投射する神経ネットワークが活性化して心身が賦活される現象（ハイパーソニック・エフェクト）が発見されている。この現象は、領域脳血流の増大、脳波α波の増強、免疫活性の上昇、ストレス性ホルモンの減少、音をより快く美しく感受させる反応、音をより大きく聴く方向へと行動を誘導する作用など、心身両面での多岐にわたるポジティブで複合的な効果を導く。そのため、芸術領域から医療・公衆衛生に及ぶ幅広い応用が期待されている。ただし、呈示される超高周波成分の周波数とハイパーソニック・エフェクト発現との関連についての知見は、未だ十分とはいえない。とくに、多様な音響規格が並存する現在の状況において、この効果が周波数依存性を持ち、それを発現させる作用のより強い、またはより弱い、さらには負の作用をもつような特定周波数帯域が存在するかどうか、存在するとしたらそれはどの帯域でその度合いはどれほどか、などが未知である。これらを知ることは、この現象を応用する上で必須であるけれども、本格的にはいまだ検討されていない。そこで本研究では、これまで可聴域・超可聴域の各成分に大別し一括して検討されてきた超高周波の効果に対して、音楽を試料として帯域をより細かく分割し、超高周波成分の周波数帯域が脳活動に及ぼす影響を検討した。

### 2. 超高周波成分の周波数の影響を検討する実験手法の構築

超高周波成分を特定の周波数帯域に分割してその効果を調べるためには、100 kHz を超える広帯域にわたる高複雑性超高周波成分を豊富にしかもバランス良く含む実験用呈示音源が必要になる。しかし自然性の高いそのような音源を発掘し収録することはきわめて困難で、周波数帯域を細分化して行う実験を阻む要因となっていた。この問題を解決するために、100 kHz を超える帯域まで十分豊富な超高周波成分を含み反復聴取に耐えうる感性的特性を具えた録音対象を探索し、そうした条件を満たす楽器と技量をもつインドネシア・バリ島の青銅製打楽器オーケストラ“ガムラン”の一演奏グループを選択した。その演奏を、オリジナルに開発した超広帯域録音システムによって 5.6448 MHz 標本化・1 bit 量子化フォーマットで現地収録し、100 kHz をこえる豊富な高複雑性超高周波成分を含む 200 秒間の実験用音源を作成した。

音呈示に当っては、音源信号を 16 kHz 以下の可聴域成分（[可聴音]）と、上限下限ともさまざまなカットオフ周波数を設定できる周波数可変フィルタによってバンドパスフィルタリングを行った高周

波帯域成分（[超高周波]）とに分割し、それぞれを独立に増幅し空気振動に変換・呈示するバイチャンネル再生系を構成した。

ハイパーソニック・エフェクトの発現指標としては、脳の全体的な活動を反映する自発脳波を用いた。独自に改良を加えたテレメトリ脳波計測システムを用い、国際 10 - 20 法に基づく頭皮上 12 電極から耳朶連結を基準電極として脳波信号を導出し、先行研究で実績のある  $\alpha 2$  成分(10 - 13Hz)を抽出し定量化して指標とした。あわせて、 $\alpha 1$  成分(8 - 10 Hz)、 $\beta$  成分(13 - 30 Hz)、 $\theta$  成分(4 - 8 Hz)も計測した。

### 3. 超高周波成分の周波数と脳活動との関連性の基礎的検討

まず、新たに作成した実験用音源を、16 kHz 以下の[可聴音]と 16 kHz 以上の[超高周波]とに分割して呈示し、16 kHz 以上の超高周波成分の共存によって脳波  $\alpha 1$  および  $\alpha 2$  ポテンシャルが有意に増大し、ハイパーソニック・エフェクトが発現することを確認した ( $n=12$ ,  $p<0.05$ )。

次に、[超高周波]を 48 kHz を境に[16 kHz - 48 kHz]と[48 kHz 以上]という 2 つの帯域に分けて呈示することによって、16kHz までの [可聴音]のみ (コントロール条件)、[可聴音+16 - 48 kHz]、[可聴音+48 kHz<]という 3 条件を設定し、それぞれで発現する  $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  ポテンシャルを比較した。実験参加者は健康で正常な聴力を有する 12 名で、このうち体調不良者を除く 11 名のデータを有効とした。図 1 は、呈示音の周波数パワースペクトルである。電気信号が忠実に空気振動に変換され、検討対象周波数が被験者に到達していることを示している。図 2 は、音呈示 200 秒間の後半 100 秒間に計測された脳波のうちの  $\alpha 2$  成分について、全被験者平均脳波等電位図 (BEAM) と、眼球運動によるアーチファクトの混入が軽微な [中心 - 頭頂 - 後頭部 7 電極] (C3, C4, T5, T6, Pz, O1, O2) から得られたポテンシャルの全被験者平均値を示す。

得られたポテンシャルを変数として分散分析を行った結果、 $\alpha 2$  ポテンシャルにおいて、音条件に

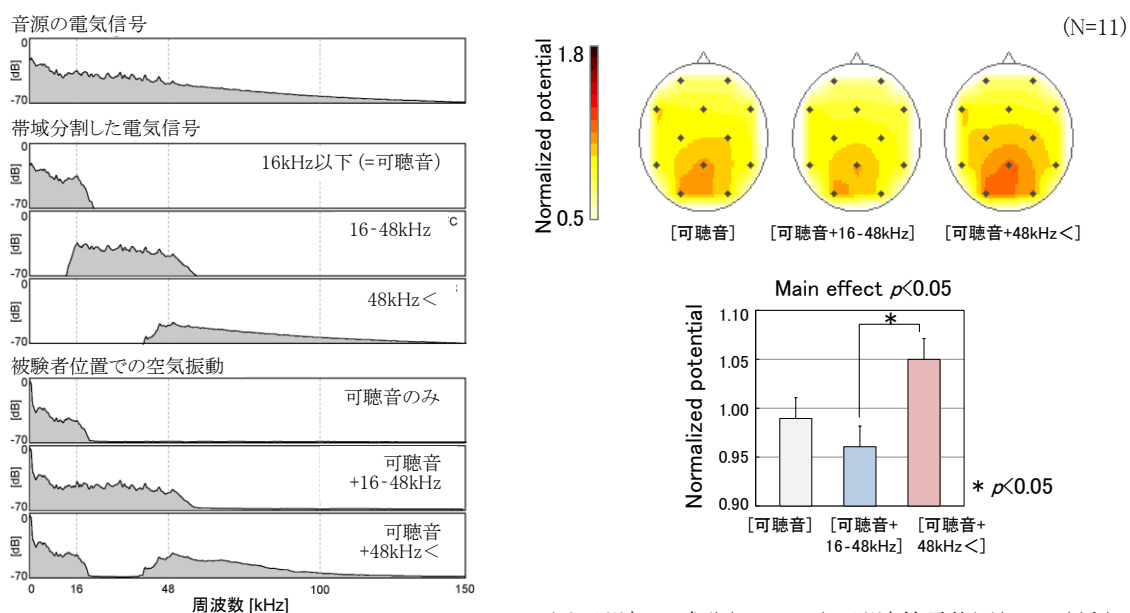


図1 呈示した音源の周波数パワースペクトル (全200秒間の平均)

図2 脳波  $\alpha 2$ 成分(10-13Hz)の脳波等電位図(BEAM)(上) および中心頭頂後頭7電極からの  $\alpha 2$ ポテンシャルの平均値(下) (各200秒間の音呈示の後半100秒間のデータ、全被験者平均と標準誤差)

よる主効果が統計的に有意に認められた ( $p < 0.05$ )。続いてシェッフエ法で検定した結果、[可聴音 + 16 - 48 kHz]よりも [可聴音 + 48 kHz <]の方が、 $\alpha 2$  ポテンシャルがより高いことが統計的に有意に示された ( $p < 0.05$ )。  $\beta$ 、 $\alpha 1$ 、 $\theta$  各帯域成分においては、超高周波条件による主効果の違いは認められなかった。

すなわち、48 kHz 以上の超高周波成分の共存は、コントロール条件およびそれ以下の成分を共存させた条件よりも脳波  $\alpha 2$  ポテンシャルの活性をより高めることが見出された。反対に、有意水準には至らないものの、48kHz 以下の成分の共存によって  $\alpha 2$  成分の活性がわずかに低下する傾向が見られた。これらの結果は、超高周波成分の効果は一様でなく、周波数によって正負強弱の違いがある可能性を示唆している。

#### 4. 脳活動に影響を及ぼす周波数の詳細な検討

上記により、超高周波成分の共存が脳活動に及ぼす影響が周波数に依存する可能性が示唆された。そこで、超高周波帯域をさらに細かく分割して同様の実験を行った。すなわち、16 kHz 以上の超高周波成分を 8 kHz 帯域ごとの 10 帯域に分割して [可聴音 + 16 - 24 kHz]、[可聴音 + 24 - 32 kHz]、[可聴音 + 32 - 40 kHz]、[可聴音 + 40 - 48 kHz]、[可聴音 + 48 - 56 kHz]、[可聴音 + 56 - 64 kHz]、[可聴音 + 64 - 72 kHz]、[可聴音 + 72 - 80 kHz]、[可聴音 + 80 - 88 kHz]、[可聴音 + 88 - 96 kHz] の 10 条件を設け、これらよりもさらに高い帯域を 2 つの帯域に分割して [可聴音 + 96 - 112kHz]、[可聴音 + 112 kHz <] の 2 条件を設定した。脳波  $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$  ポテンシャルを指標としてこれら合計 12 条件それぞれを、[可聴音] のみを呈示するコントロール条件と比較する 12 セットの実験を行った。各実験の参加者は 10 名とし、体調不良者や睡眠条件の不適合者を除き有効なデータとした。

図 3 は、[可聴域 + 超高周波帯域成分]を呈示したときの脳波  $\alpha 2$  ポテンシャルを [可聴音のみ]を提示したコントロール条件下の  $\alpha 2$  ポテンシャルと比較した増減値を算出し、各帯域成分ごとに示している。各実験とも、200 秒間音を呈示し、その後半 100 秒間のデータを計測対象にした。各実験で得られた  $\alpha 2$  ポテンシャル変化量の全体像は、超高周波成分の効果が周波数に応じて連続的な値を取りながら増減する様子を示している。 $\alpha 2$  ポテンシャルは、32 - 40 kHz 近辺よりも低い帯域成分を共存させた時には可聴音だけを呈示したコントロール条件よりも減少し、それよりも高い帯域成分を呈示した時には周波数に対応してさまざまな値に増大した。この結果は、先に行った 48 kHz を境に超高周波成分を 2 分割して呈示した場合の実験結果と矛盾しない。

続いて、各実験において計測された  $\alpha 2$  ポテンシャルを [可聴音]だけのコントロール条件下でのポテンシャルと比較した増加・減少値を 1 変量の t 検定によって検討した。その結果、80 - 88 kHz の帯域成分を付加した実験と、88 - 96 kHz の帯域成分を付加した実験では、 $\alpha 2$  ポテンシャルが統計的に有意に増大した (それぞれ  $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ )。一方、24 - 32 kHz の超高周波を付加した条件では、[可聴音]よりも  $\alpha 2$  ポテンシャルが統計的に有意に低下した ( $p < 0.05$ )。

脳波  $\alpha 1$  ポテンシャルは、 $\alpha 2$  ポテンシャルほど明瞭ではないが、周波数にある程度依存して活性が増減し、80 - 88 kHz 呈示において統計的に有意な増大を示した ( $p < 0.05$ )。

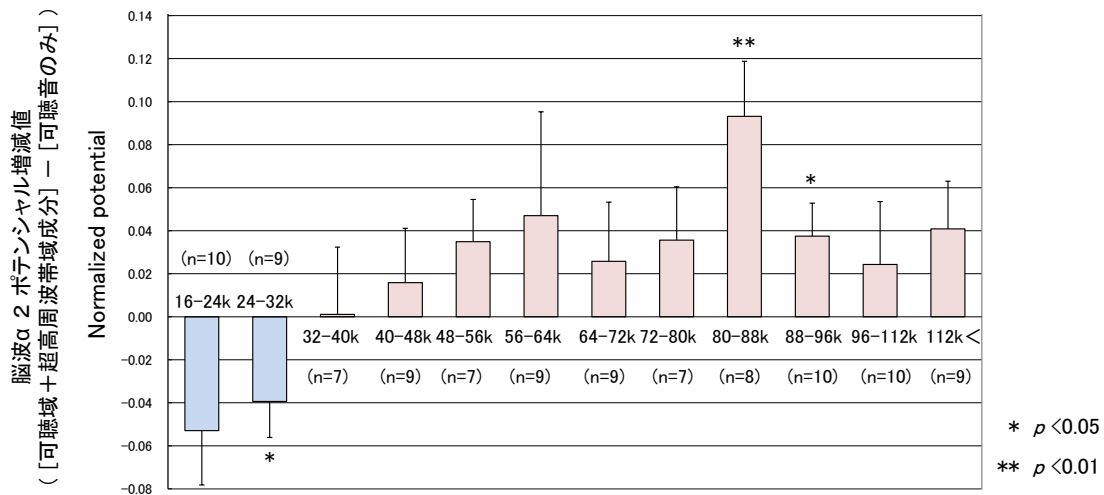


図3 可聴音と共存させた超高周波各帯域成分に対応する脳波  $\alpha 2$ ポテンシャル (各200秒間の音呈示の後半100秒間のデータ、中心頭頂後頭7電極の平均値、全被験者平均と標準誤差)

## 5. 考察と結論

この研究では、これまでおよそ 20 kHz 以上の帯域が一括して検討されていた超高周波成分の効果について、16 kHz から 100 kHz をこえる周波数までを帯域別に詳細に検討し、可聴音に共存させる超高周波成分の周波数によって脳波  $\alpha 2$  ポテンシャルの増減効果に相違があることを見出した。 $\alpha 2$  ポテンシャルの変化は、可聴音と同時に 80 - 96 kHz 帯域成分を呈示した時にもっとも顕著な増大と統計的有意性を示した。ハイパーソニック・エフェクトの発現状態が超高周波成分の周波数に依存することを示すこれらの知見は、この現象を応用する上でも、発現メカニズムの解明など基礎研究においても、有用な材料を提供することが期待される。

一方、24 - 32 kHz 帯域成分を可聴音と共存させた時には、脳波  $\alpha 2$  ポテンシャルが顕著に、しかも統計的有意に低下することが見出された。この帯域は、現在普及しつつある高品位の音楽メディアのうち 96 kHz 標本化 PCM フォーマットが対応している領域であり、その周波数成分にネガティブな効果がある可能性が示唆されたことには注意を要する。先に述べた、再生周波数の上限を 48 kHz に設定した実験において、脳波  $\alpha 2$  ポテンシャルの活性が向上せず低下する傾向を見せたことから、超高周波成分の生理的・心理的効果を有効かつ安全に活用するためには、48 kHz 以上の周波数成分の再生が少なくとも安全であり、もしかすると必須であるかも知れない。

すでに、可聴域上限をこえる超高周波を含む高密度高品質の音響データが、DVD-Audio、Super Audio CD、Blu-ray などの高品位なパッケージメディアや、ネットワークからダウンロードしたり USB メモリなどに記録するオーディオファイルとして、市場に供給されはじめている。これらに含まれる 192 kHz 標本化による PCM 方式や 2.8 MHz、5.6 MHz 標本化による DSD 方式などのいわゆるハイレゾリューション・オーディオは、その音質が高く評価され、急速に普及しつつある。これらのコンテンツの規格や再生システムについて、今後は人間の脳に及ぼす影響や感覚感性との適合性の観点から本格的な検討がなされるべきではないかと考える。