



# 超高周波成分の帯域の相違が自発脳波 $\alpha 1$ 活性に及ぼす影響

Alpha 1 EEG activity affected by frequency range of inaudible high-frequency sounds

福島亜理子<sup>1</sup>, 八木玲子<sup>2</sup>, 河合徳枝<sup>3,4</sup>, 本田 学<sup>5</sup>, 仁科エミ<sup>6</sup>, 大橋 力<sup>3</sup>  
 FUKUSHIMA Aiko<sup>1</sup>, YAGI Reiko<sup>2</sup>,  
 KAWAI Norie<sup>3,4</sup>, HONDA Manabu<sup>5</sup>, NISHINA Emi<sup>6</sup>, OOHASHI Tsutomu<sup>3</sup>

- 1) 江戸川大学基礎・教養教育センター (〒270-0198 千葉県流山市駒木 474, fukushima@edogawa-u.ac.jp)
- 2) 東京成徳短期大学 (〒114-0033 東京都北区十条台 1-7-13, yagi@tsc.ac.jp)
- 3) 国際科学振興財団 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-24-16, nkawai@fais.or.jp)
- 4) 早稲田大学研究院 (〒169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1)
- 5) 国立精神・神経医療研究センター神経研究所 (〒187-0031 東京都小平市小川東町 4-1-1, honda@ncnp.go.jp)
- 6) 放送大学 (〒261-8586 千葉県千葉市美浜区若葉 2-11, nishina@ouj.ac.jp)

**概要:** 超高周波を含む音が深部脳を活性化するハイパーソニック・エフェクトの発現強度が超高周波成分の帯域の相違に応じて変化することを、先行研究において脳波  $\alpha 2$  活性を指標として見出した。本論文では、より遅い周波数成分である脳波  $\alpha 1$  の増減を分析して  $\alpha 2$  のそれと比較した。その結果、可聴音に共存させる周波数帯域に応じて、脳波  $\alpha 1$  活性も増減することが見出された。 $\alpha 1$  の増大は、可聴音と同時に 80–88 kHz 帯域成分を呈示した時に有意に増大し、24 kHz より低い高周波成分を付加した時に低下傾向が見られた。以上の結果は  $\alpha 2$  の超高周波の周波数に対する挙動と相似する。

**キーワード:** ハイパーソニック・エフェクト、超音波、自発脳波、 $\alpha 1$

## 1. はじめに

可聴域上限をこえる超高周波成分を豊富に含む音が間脳・中脳を含む深部脳の活動を高め心身を賦活する現象（ハイパーソニック・エフェクト）が発見され、ハイレゾ音響の進展を先導している[1]。この現象は、深部脳の領域脳血流量の増大、脳波  $\alpha$  波活性の増強、免疫活性の上昇、ストレス性ホルモンの減少、音のより快く美しい受容の誘起、音をより大きく聴く行動の誘導など多岐にわたる複合的な心身賦活反応を伴うことから、音響コンテンツにとどまらず医療応用をはじめとする広範な社会応用も期待されている[2]。

著者らはさきに、この深部脳活性化効果の強度が超高周波成分の帯域の相違に応じて変化することを見出した[3]。すなわち、80–96 kHz の超高周波が可聴音と共存すると深部脳活性は顕著に高まる一方、16–32 kHz の周波数成分が共存すると深部脳活性は低下する。このとき深部脳活性の指標として用いた自発脳波は、中心-頭頂-後頭部の 7 電極（電極名：C3, C4, T5, T6, Pz, O1, O2）から導出された脳波  $\alpha 2$  (10–13 Hz 帯域) 成分であった。これは、ハイパーソニック・エフェクト発現時に行われた領域脳血流と

脳波との同時計測によって、これらの電極から導出された  $\alpha 2$  成分が、視床、中脳（上部脳幹）、間脳（視床下部および視床）を含む脳深部領域を中心とし前頭葉眼窩部から前頭前野と帯状回前部に広がる神経機能ネットワークの領域脳血流との相関関係が確認されたことに基づく[4]。

一方、超高周波成分を可聴音と共存させた場合に、脳波のより遅い周波数成分である脳波  $\alpha 1$  (8–10 帯域など) が優勢に変化するという報告もある[5][6]。一般に、 $\alpha 1$  が優勢になる心身の状態と  $\alpha 2$  が優勢になる状態とでは、覚醒水準に違いがあるとされる。ハイパーソニック・エフェクトの応用に向けて、 $\alpha 2$  とともに  $\alpha 1$  など他の帯域の脳波の挙動についても知見を得ることは有用と考えられる。

そこで本論文では、超高周波成分の帯域の相違が脳波  $\alpha 1$  (8–10 Hz) 活性に及ぼす影響を分析し、先行研究で示された  $\alpha 2$  活性の挙動と比較した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 概要

超高周波成分の帯域の相違がハイパーソニック・エフェクトの発現時の脳波  $\alpha 1$  活性に及ぼす影響を調べるため

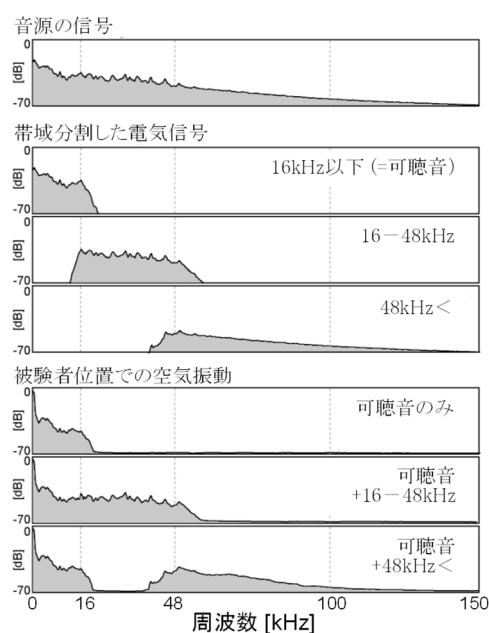


Fig. 1 呈示した音源の周波数パワースペクトル (全 200 秒間の平均)

に、まず、超高周波成分をより低い帯域とより高い帯域とに大きく 2 分割して効果を比較する〈第一の実験〉を行い、続いて超高周波成分をより詳細に 12 分割して検討する〈第二の実験〉を行った。

## 2.2 呈示音源

超高周波成分を任意の周波数で分割してその効果を比較するために、広帯域にわたって十分豊富な非定常的高周波を含む呈示音源を作成した。呈示音源は、自然性の高い超高周波を豊富に含み、かつ反復聴取に耐えうる感性的にもすぐれた作品であることが不可欠である。これらの条件を満たす音源素材として、先行研究で実績のあるインドネシア・バリ島の青銅製打楽器アンサンブル“ガムラン”に着目し、その伝統曲の演奏音を、独自に開発した超広帯域録音システムによって 5.6448 MHz 標準化・1 bit 量子化フォーマットで現地収録した。これを用いて、上限が 100 kHz をこえる豊富な超高周波成分を含む 200 秒間の呈示音源を作成し、実験に使用した。

## 2.3 呈示システム

可聴域と超高周波帯域とをそれぞれを独立に増幅し空気振動に変換するバイチャンネル再生方式[7]を発展させ、周波数可変呈示システムを構築した。すなわち、16 kHz 以上の帯域について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 (CF-6FL、NF 回路設計ブロック) を導入した。これにより、超広帯域再生システムから再生した音源信号の 16 kHz 以下の可聴域成分 ([可聴音]) をスピーカー (OOHSI MONITOR OP.1、特注) から、バンドパスフィルタリングを行った高周波成分 ([超高周波]) をスーパーツイーター (パイオニア製 PT-R9、およびオリジナルプリントドリップン型ツイーター) から再生呈示した。

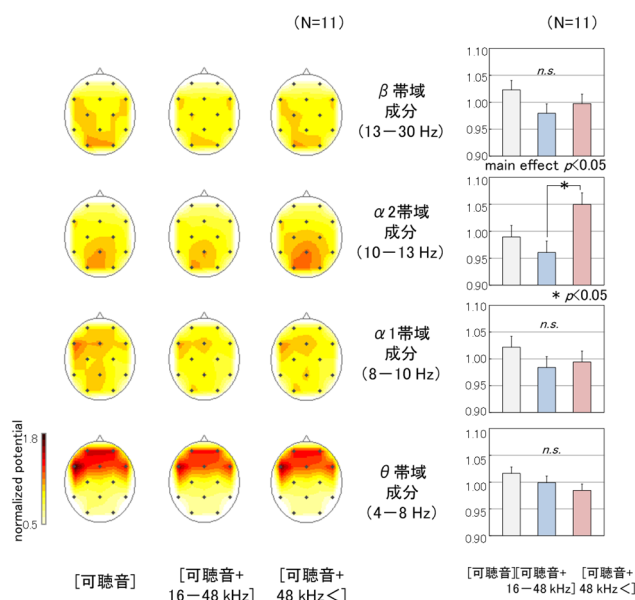


Fig. 2 各帯域の脳波等電位図 (BEAM) (左) および中心頭頂後頭部 7 電極の平均値 (右) (各条件 後半 100 秒間、全被験者平均)

## 2.4 評価指標

ハイパーソニック・エフェクト発現の指標として、脳の全体的な活動を反映する自発脳波を用いた。国際 10-20 法に基づき、頭皮上 12 電極から耳朶連結を基準電極として導出した脳波信号を、独自に改良を加えたテレメトリ脳波計測システムによって無線伝送した。記録したデータから、先行研究[3]で指標として用いた  $\alpha 2$  成分 (10-13 Hz) に加え、脳波  $\alpha 1$  成分 (8-10 Hz)、 $\beta$  成分 (13-30 Hz)、 $\theta$  成分 (4-8 Hz) を抽出し、定量化した。

## 2.5 実験手続

〈第一の実験〉では、[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し、16 kHz までの [可聴音]のみ、[可聴音+16-48 kHz]、[可聴音+48 kHz<]という 3 条件を比較した。Fig. 1 に呈示音の周波数パワースペクトルを示す。電気信号が相当忠実に空気振動に変換され、検討対象周波数帯域は実験参加者に十分な水準で到達している。

〈第二の実験〉では、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、これに [可聴音+96-112 kHz]、[可聴音+112 kHz<] の 2 条件を加えて、合計 12 条件をそれぞれ [可聴音] のみのコントロール条件と比較する 12 の実験を行った。いずれの実験においても、各条件の呈示順序は実験参加者間でカウンターバランスをとった。

## 2.6 実験参加者

〈第一の実験〉には、健常で正常な聴力を有する 12 名が参加した。このうち、実験当日に体調不良を申告した

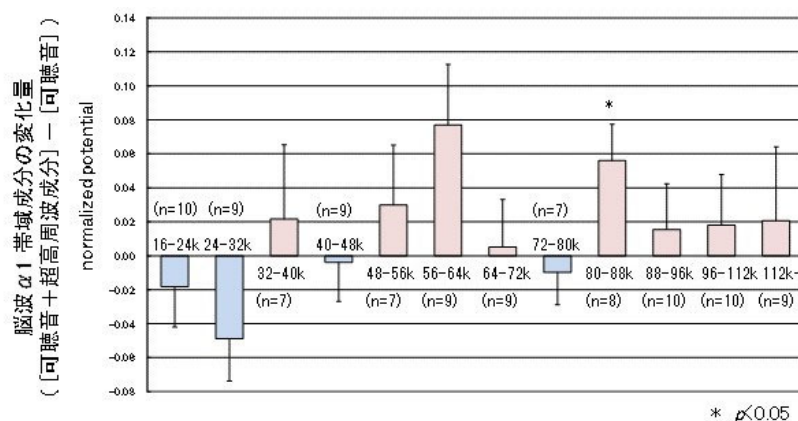


Fig. 3 可聴音と共存させた超高周波各帯域成分に対応する脳波 $\alpha 1$ ポテンシャル  
(各 200 秒間の音呈示の後半 100 秒間の平均値、全被験者平均と標準誤差)

1 名を除く 11 名（男性 6 名、女性 5 名、平均年齢 44.5 歳）から得られたデータを有効とした。

〈第二の実験〉では、12 の実験それぞれに健常で正常な聴力を有する 10 名が参加した。このうち、実験当日に体調不良を申告した者や事前の指示のとおり睡眠をとれなかった者を分析対象から除いた。実験参加者母集団は、健常な成人合計 19 人（男 9 人、女 10 人、年齢 20 才～71 才）であった。

すべての実験参加者は過去に神経学的あるいは精神的な病歴をもっていないことを確認した。またガムラン音楽の演奏または聴取経験があった。事前に十分な説明を行い、実験参加者となることについて書面で同意を得た。実験は、国立精神・神経医療研究センター倫理委員会の承認を得、ヘルシンキ宣言に規定されたヒトを対象とする医学研究に関わる倫理基準に従って実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 ハイパーソニック・エフェクトの発現確認

まず、本実験のために収録・構築した呈示音源と呈示システムの性能を確認するために、16 kHz 以下の[可聴音]と、[可聴音]に 16 kHz 以上の[超高周波]を共存させた音とを呈示し、聴取中の自発脳波を計測し分析した。その結果、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 $\alpha 2$ ポテンシャルが増強され（それぞれ  $p < 0.05$ ）、ハイパーソニック・エフェクトの発現が確認された。

#### 3.2 第一の実験：帯域を 2 分割する実験

続いて、[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し、16 kHz までの [可聴音]のみ、[可聴音+16～48 kHz]、[可聴音+48 kHz<]という 3 条件を提示し、自発脳波を計測した。

Fig. 2 は、音呈示 200 秒間の後半 100 秒間に計測された脳波の全実験参加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を除外しうる中心-頭頂-後頭部 7 電極から得られたポテンシャルの全実験参加者平均値を示す。

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、 $\alpha 2$ においては、先行研究で報告した通り、音条件による主効果が統計的に有意に認められ ( $p < 0.05$ )、シェッフェ法で検定した結果、[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 ( $p < 0.05$ ) [3]。それに対して、 $\alpha 1$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ の各成分においては、超高周波条件による主効果の違いは認められなかった。

#### 3.3 第二の実験：帯域を 12 分割する実験

第一の実験によって、周波数帯域の相違が脳活動への影響に差を導く可能性が示唆された。そこで、超高周波成分を 12 帯域に分割し、明瞭な増減を示した $\alpha 1$ および $\alpha 2$ ポテンシャルを指標として、同様の実験を行った。

Fig. 3 は、各実験の音呈示 200 秒間の後半 100 秒間の脳波信号から求めた、各実験条件下における脳波 $\alpha 1$ ポテンシャルの[可聴音]だけを呈示した場合に対する変化量を示している。Fig. 4 は、先行研究[3]において $\alpha 2$ 成分を同様に分析した参考データである。いずれにおいても、バグラフとエラーバーは、全実験参加者平均と標準誤差を示す。Fig. 3 における $\alpha 1$ ポテンシャルの変化は、Fig. 4 に見られる $\alpha 2$ の変化ほど明瞭ではないものの、32 kHz 近辺よりもより低い帯域の共存では、可聴音だけ呈示した場合よりも $\alpha 1$ ポテンシャルが減少し、それより高い帯域では変わらないかまたは増大する傾向を示している。

続いて、各実験において計測した脳波ポテンシャルを[可聴音]だけを呈示した場合のポテンシャルに比較した増減を、1 変量の t 検定によって検討した。その結果、脳波 $\alpha 1$ では、80～88 kHz を可聴音とともに呈示した際に統計的に有意な増大を示した ( $p < 0.05$ )。一方、16～24 kHz、24～32 kHz の高周波を付加した条件では、[可聴音]よりも低下傾向を見せたが、統計的有意性は認められなかった。

### 4. 考察

本実験で、可聴音に共存させる周波数帯域に応じて、脳波 $\alpha 1$ 活性も増減することが見出された。 $\alpha 1$ 活性の増大は、可聴音と同時に 80～88 kHz 帯域成分を呈示した時に統計的に有意に増大した。これは、 $\alpha 2$ 活性の増大が 80～88

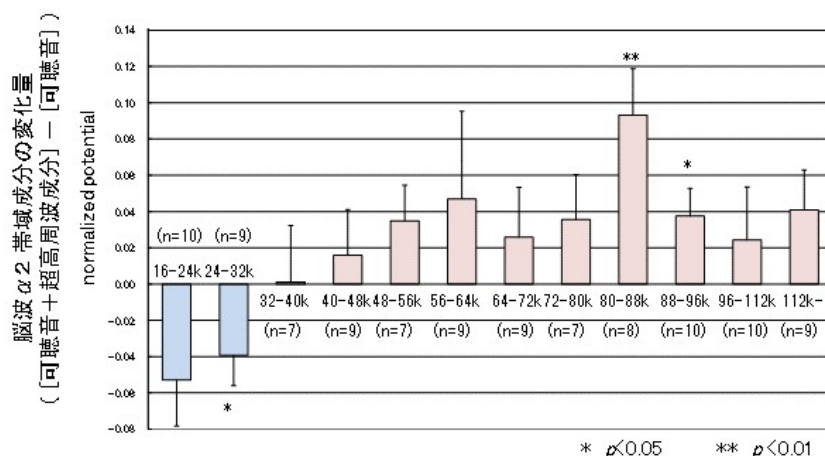


Fig. 4 可聴音と共存させた超高周波各帯域成分に対応する脳波 $\alpha 2$ ポテンシャル[3]  
(各 200 秒間の音呈示の後半 100 秒間の平均値、全被験者平均と標準誤差)

kHz および 88–96 kHz 帯域成分を呈示したときに最大化した先行研究[3]の結果と相似している。一方、24 kHz より低い周波数の高周波成分を付加した場合に、有意ではないものの低下傾向が見られた。このことは、34–32 kHz を付加した際に $\alpha 2$ 活性が統計的に有意に低下したと相似する ( $p < 0.05$ )。つまり、 $\alpha 1$ 活性は $\alpha 2$ 活性ほど明瞭ではないものの、超高周波成分の周波数に依存して変化すること、その変化は $\alpha 2$ の変化と相似していることが示された。また、今回の実験では、超高周波成分の帯域の相違が自発脳波の $\alpha 1$ に及ぼす影響は、 $\alpha 2$ に対する影響よりも明瞭ではなかったと言える。

では、 $\alpha 1$ の方が超高周波成分の有無に対してより顕著に反応したという他の報告と、本研究の結果との違いをどのように説明できるだろうか。それは、使用する音源の種類や実験条件の違いに由来する可能性が考えられる。すなわち、無響室において「閉眼」状態で溪流の音や波の音を聴取する実験条件[5][6]においては、覚醒水準は比較的低い状態にあり、 $\alpha 1$ が優勢になった可能性がある。一方、本実験では、リスニングルーム様の実験室に快適性を阻害しない視覚環境を整備した上で、「開眼」状態でガムラン音楽の聴取を行った。加えて、休憩中に軽く身体を動かすことを促すなど、覚醒水準の維持につとめた。つまり、本実験では覚醒水準は比較的高い状態で保たれていたため、 $\alpha 2$ の方が $\alpha 1$ よりも実験条件に対してより鋭敏に反応を示したのかも知れない。実際、他研究者による研究において、虫の音を音源として用いた場合に、溪流の音を用いた実験と比較して、 $\alpha 2$ の変化がより著しかったとする報告もある[8]。

いずれにしても、快適性の指標として脳波 $\alpha$ 活性の活用が有用であることに相違はない。今後、 $\alpha 1$ と $\alpha 2$ との挙動の違いについてさらなる知見を蓄積し、それぞれの発現機構に関する脳科学的知見の進展を見守りつつ、ハイパーソニック・エフェクトの解明につなげたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Oohashi T, Nishina E, Honda M, Yonekura Y, Fuwamoto Y, Kawai N, Maekawa T, Nakamura S, Fukuyama H, Shibasaki H (2000) Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect, Journal of Neurophysiology, 83, 3548-3558.
- [2] 小野寺英子、仁科エミ、中川剛志、八木玲子、福島亜理子、本田学、河合徳枝、大橋力 (2013). ハイパーソニック・コンテンツを活用した駅ホーム音環境の快適化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.18, No.3, pp.315-325
- [3] Fukushima A, Yagi R, Kawai N, Honda M, Nishina E, Oohashi T (2014) Frequencies of Inaudible High-Frequency Sounds Differentially Affect Brain Activity: Positive and Negative Hypersonic Effects. PLoS ONE 9(4).
- [4] Honda M, Kawai N, Yagi R, Fukushima A, Ueno O, Onodera E, Maekawa T, Nishina E, Oohashi T (2013) Electroencephalographic index of the activity of functional neuronal network subserving the hypersonic effect, ASIAGRAPH Vol.8 No.2 pp.41-46.
- [5] 小川通範, 崔 鍾仁, 堀田健治, 山崎 憲 (2003) 超音波領域の音が脳波に及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本音響学会 2003 年春季研究発表会講演論文集, 985-986.
- [6] 山崎 憲, 堀田健治, 齊藤光秋, 小川通範 (2008) 溪流の音に含まれる超音波が人間の生理に与える影響について, 日本音響学会誌, 64(9), 545-550.
- [7] Oohashi T, Nishina E, Kawai N, Fuwamoto Y and Imai H (1991) High Frequency Sound Above the Audible Range Affects Brain Electric Activity and Sound Perception, Audio Engineering Society 91st Convention (New York) Preprint 3207, 1-25.
- [8] 伊藤隆道, 崔 鍾仁, 堀田健治, 山崎 憲 (2003) 自然界の超音波領域の音が脳波に及ぼす影響, 日本音響学会研究発表会講演論文集 2003(2), 729-730.