

スーパーツイータの置き方で聴取者の脳波が変わる？ － 体表面上の高周波音レベルの違いによる生理的影響

寺尾健太郎¹ 川勝真喜¹

概要：高周波音が豊富に含まれる音源がヒトにポジティブな影響を与えるハイパーソニック・エフェクトの発現する機構を調べるために、耳元以外に到達する高周波音の音圧レベルを変化させた場合の生理的影響を脳波(α 波)の測定から検討した。また、可聴音を知覚できない状態で音源を呈示した際の生理的影響を脳波(α 波)の増加の有無によって検討した。その結果、耳元の音圧レベルは変えずに耳元以外の音圧レベルを変化させることで α 波パワーに違いが有意に見られた。また、ノイズキャンセリングイヤホンと音のマスキング効果を用いて、音を知覚できない状態で実験を行ったところ、 α 波パワーの増加が見られた。

キーワード：ハイパーソニック・エフェクト、高周波、超音波、 α 波、音圧レベル

1. はじめに

ヒトの聴覚が知覚できる上限周波数は個人差があるものの、約 20 kHz までと広く知られている。しかし、可聴域を超える周波数成分を豊富に含んだ自然音や楽曲を聞くことで、脳幹および視床の血流量増加や NK 細胞の活性化、認知症高齢者の行動・心理状態を緩和するといった報告がある^{[1]-[6]}。このようなヒトにポジティブな影響を与える現象はハイパーソニック・エフェクト (Hypersonic Effect: 以下、HSE) と呼ばれている。

Oohashi らは 20 kHz 以上の高周波音を含む音源を聴かせた際に、高周波音を含まない音源を聴かせた際と比較すると、脳幹や視床下部での血流量と自発脳波 α 波の有意な増加がみられると共に、視床の脳血流量と α 波には有意な相関見られた ($p < 0.0001$) と報告した^[1]。さらに、用いた音源の可聴域を取り除いた高周波音のみの場合には有意差がみられなかったとも報告している。山崎らは高周波音の音圧を変化させる実験で、耳元に到達する高周波音の音圧レベル (Sound Pressure Level: 以下、SPL) を、1/3 オクターブ分析において可聴音の SPL の約 70~84% の大きさで呈示した際に α 波帯域のパワーが最大になると報告した^[7]。また仁科は、イヤホンで高周波音と可聴音を聴覚系のみで呈示する条件では α 波帯域のパワーの有意な増加はなく、体表面に高周波音が到達する状態で音源を呈示する条件では有意な増加がみられたことから、高周波音は体表面組織で受容しているという仮説を立てている^[2]。こうした HSE のメカニズムに関する研究や、より効果的な条件に関する研究は行われているが未だに明確な発現メカニズムは解明されていない。また、他研究者の研究において耳元の周波数特性や SPL を示すことはあっても、胸や足元といった体表面部位での周波数特性や SPL を示す例は見られない。

そこで本研究では、HSE の発現要因と聴覚の関連性を知ることとして、耳元の高周波音の SPL を固定し、その他体表面部位の高周波音 SPL を変化させることで HSE の発現にどのような影響を与えるのか検証した。さらに、聴覚との関連性を感覚的に呈示音源が聴こえない状態では人間にどのような影響を与えるのかを脳波 (α 波) から検討した。

2. 実験方法

以下に音源呈示システム、呈示音、被験者、脳波測定方法を示す。

2.1 音源呈示システム

実験中に外部からの影響を除くために防音室を使用し、室内に椅子を設け、そこから約 1.6 m 離れた位置にスピーカ (JBL 4312E) とスーパーツイータ (Pioneer PT-R4) を配置した。音源には高周波音を豊富に含み複雑に変化するガムラン音楽を用いており、22 kHz 以上の周波数成分を遮断した可聴音のみの音源である HCS (High Cut Sound) と、22 kHz 以上の高周波音を含む音源である FRS (Full Range Sound) の二種類を用意した。可聴音はパワーアンプ (Denon PMA-390AE) を通してスピーカから、高周波音はパワーアンプ (Onkyo TX-8150) を通してスーパーツイータから呈示できるようにシステムを構成した。

先行研究に基づき^[7]、耳元での高周波音の SPL を、可聴音を基準 (約 60 dB) として、約 76% にあたる約 46 dB とした。マイクで収録した音を 1/3 オクターブ分析した結果を図 1 に示す。なお、この音圧調節の分析においては可聴領域を中心周波数において 20 Hz~20 kHz とし、高周波領域を中心周波数において 25k~40k Hz とする。

¹ 東京電機大学システムデザイン工学研究科

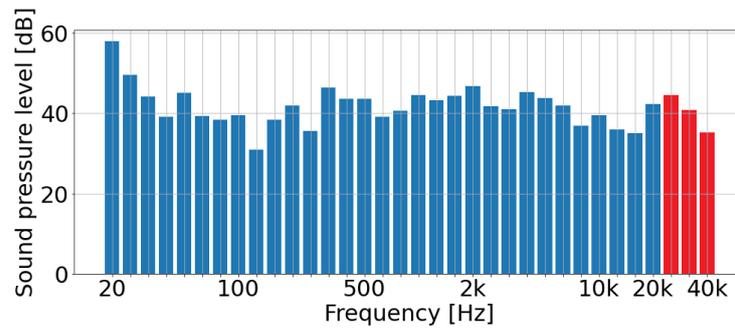


図 1 1/3 オクターブ分析の結果 (赤は高周波音)



a. Vertical b. Horizontal

図 2 スーパーツイータ (Pioneer PT-R4) の外観

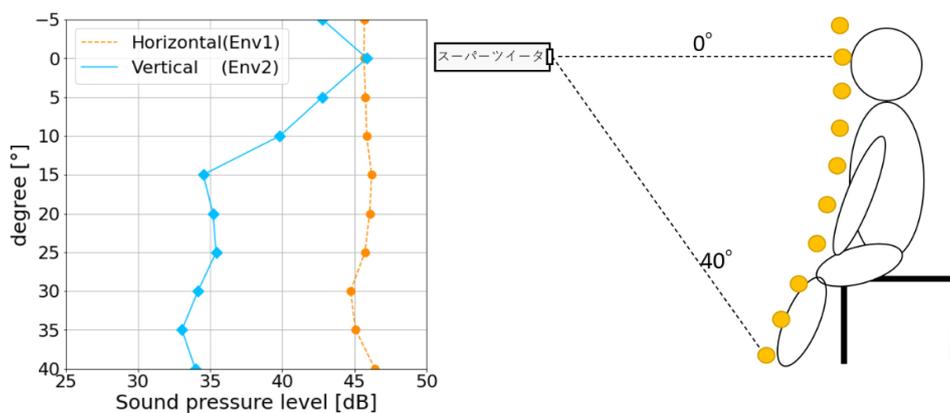


図 2 スーパーツイータの指向角度 SPL と計測点

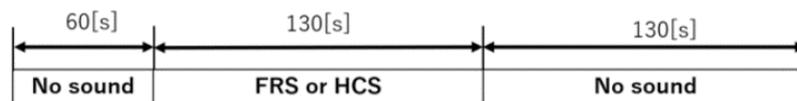


図 3 実験のタイムチャート

2.2 実験 1 : 設置方法の違いによる実験

今回使用したスーパーツイータは, 図 2a に示す縦型リボンの構造のため水平方向と垂直方向で指向性が大きく異なる. 図 3 左にスーパーツイータの垂直方向と水平方向に対する指向角度の SPL を示し, 図 3 右に指向角度に対応する体表面上の計測位置を示す. こうした, 垂直方向の角度によって音圧レベルが異なる特性を利用し, スーパーツイー

タを 90° 回転して設置することで, 図 3 左のように高周波音が体表面全体に耳元と同様の SPL が呈示される Horizontal (Env1) と, 高周波音が耳元以外で大きく低下している Vertical (Env2) という 2 種類の音源呈示条件を用意し, 体表面全体に到達する高周波音の SPL によって HSE の発現にどのような影響を与えるのか実験を行った.

2.3 実験2：呈示音源を知覚できない状態での実験

Horizontal (Env1) のスピーカ配置でさらに、被験者にノイズキャンセリング機能を備えたイヤホン (Apple AirPods Pro) を装着して実験を行った。音源呈示中にノイズキャンセリング機能を使用した状態でも、わずかに音が聴こえることがある。そのため、実験中はイヤホンからホワイトノイズを呈示することで音をマスキングし、呈示音源が音楽として認識できないようにした。なお、このホワイトノイズは被験者自身に実験開始前に音の大きさを調整してもらった。これらの処置の結果、被験者 10 人のうち 7 人は音呈示有無の区別も認知できないと報告し、残りの 3 人の被験者は可聴域内の高周波成分の一部が断片的に聞こえたと報告した。

2.4 被験者

被験者は聴覚が正常な学生 (男性 10 名, 年齢 21~23 歳) である。被験者には高周波音が体表面に届くように、上半身は裸で下半身は半ズボンに着替えてもらった。実験中、被験者には閉眼で安静状態を保つように教示した。また、

呈示音が HCS, あるいは FRS のどちらなのかは被験者に伝えていない。FRS と HCS 音の違いについて、何らかの違いを報告したのは、実験1の被験者のうち1名であったが、どちらが FRS かを言い当てる事はできなかった。

2.5 測定手順

音呈示時間は 1 回 130 秒 (図 4) として、計 4 回呈示した。4 回の音呈示は FRS - HCS - HCS - FRS と HCS - FRS - FRS - HCS の 2 種類の順番を被験者毎にランダムに選んで呈示した。なお前の実験の影響が残らないように、各実験の間には 10 分以上の休憩時間を設けた。図 4 に音呈示のタイムチャートを示す。

2.6 脳波測定

HSE の発現指標として、Oohashi^[1]らにより FRS 時に増加し、脳内血流量との相関関係が示されている脳波の α 波帯域のパワーを使用した。 α 波は 8~13 Hz とされているが、本稿では α 波帯域全体 (8~13 Hz), $\alpha 1$ 波帯域 (8~10 Hz), $\alpha 2$ 波帯域 (10~13 Hz) と 3 つに分類して評価を行

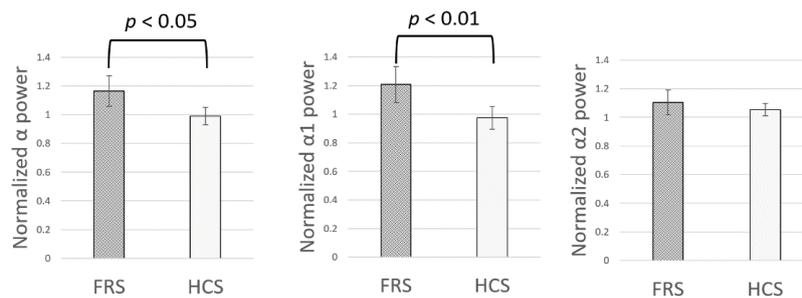


図 5 実験 1 : Horizontal (Env1) での正規化 α 波パワーと標準誤差

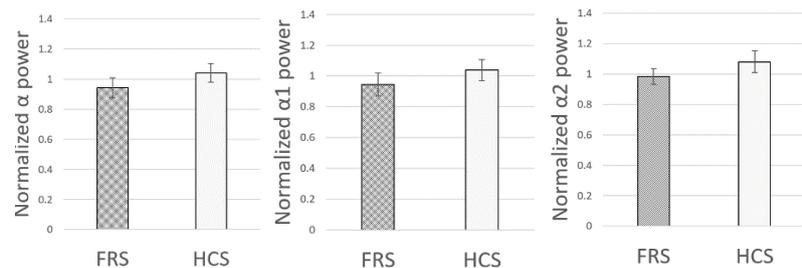


図 6 実験 1 : Vertical (Env2) での正規化 α 波パワーと標準誤差

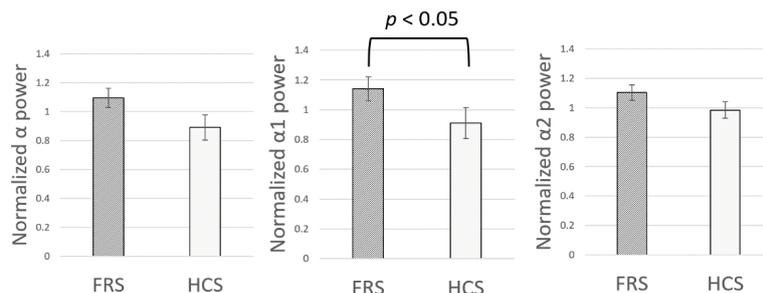


図 7 実験 2 : ノイズキャンセリングイヤホンあり (Horizontal) での正規化 α 波パワーと標準誤差

った。脳波計(ミュキ技研 Polymate II)を国際 10-20 法に基づいて、Cz(正中中心部)、Pz(正中頭頂部)の2か所、両耳耳朶を基準電極として配置し、サンプリング周波数 500 Hz で記録した。その中で α 波の出現が多くみられた Pz の脳波を解析で使用した。音呈示部の後半 60 秒間と前後の無音部後半 30 秒間に対して 512 点、50%のオーバーラップ処理を施して高速フーリエ変換を適用し、 α 波パワー平均値を算出した。脳波には個人差がある。その差を無くするために、算出した音呈示時のパワー平均値は無音部のパワー平均値を基準として正規化を行った。

3. 実験結果

3.1 2種類の音源呈示システムでの結果

正規化した α 波帯域の全被験者パワー平均値と標準誤差を図 5, 6 に示す。正規化パワー平均値は各帯域で、対応のある片側 t 検定を行った。

図 5 は Env1 での実験結果である。Env1 では α 波帯域全体 ($p < 0.05$)、 $\alpha 1$ 波帯域 ($p < 0.01$) で統計的有意差が見られた。

図 6 は Env2 での実験結果で、どの帯域でも統計的有意差は見られなかった。

3.2 音源を知覚できない状態での実験結果

正規化した α 波帯域のパワー平均値を帯域ごとに対応のある片側 t 検定を用いて比較した。帯域毎の正規化平均パワーを図 7 に示す。 $\alpha 1$ 波帯域のみ統計的有意差が見られた ($p < 0.05$)。

4. まとめ

実験 1 では、耳元の高周波音の音圧レベルを合わせて実験を行った。仁科の考察^[2]では高周波音が体表面に到達するように高周波音を呈示する必要があると述べている。しかし、Env1, Env2 とともに高周波音が体表面に到達するように音源を呈示したものの、HSE の効果が見られたのは Env1 のみという結果となった。これは HSE の発現には耳元の高周波音 SPL を考慮するだけでなく、その他体表面部位にも HSE 発現に関する重要な要因が存在しており、耳元以外に高周波音を受容する部位が存在する、もしくは体表面全体に到達する高周波音のパワーが影響を与えていると考える。

実験 1 の結果から顔表面、特に聴覚は HSE 発現に寄与しないと仮説を立て、可聴音を知覚できない状態で実験を行った。その結果、 $\alpha 1$ 波帯域の増加が統計的有意にみられた。一方、Oohashi らは高周波音のみを呈示した際には HSE の発現が見られず、HSE の発現には可聴音が必要であると考察している^[4]。Oohashi らの実験と我々の実験 2 との共通点は可聴音を被験者が知覚していないか、しにくい状況であることであり、相違点は体表面上への可聴音の呈示の有

無である。これらのことから、音を知覚できる状態でもとも体表面に音が到達していれば HSE が発現する事が示された。

これらのことから、HSE には、① 体表面へ当たる高周波音の SPL が高い事が必要、② 聴覚上の知覚はなくても良い、という事が示され体表面の関与が示唆された。体表面の関与が HSE に重要という事は、仁科ら^[2]の考察とも一致する。ハイレゾ音源を聴く場合、身体に高周波音が届くようにスーパーツイータの位置や角度を調整することで、心地よさや音の聴こえ方に変化が見られる可能性があると考ええる。

なお、実験 1, 2 どちらでも $\alpha 1$ 波帯域で有意に増加し、 $\alpha 2$ 波帯域では有意な増加が見られなかった。これは福島らの報告^[8]どおり、閉眼時には $\alpha 1$ 波帯域が優勢になるという仮説と一致する。そのため、開眼状態で実験を行うことで実験結果に変化が現れる可能性も考えられる。

年齢に関係なく効果が見られる^{[5][6]}HSE は、音楽療法や公共施設での応用が期待される。今後も HSE 発現要因について実証的な検討を続けていきたいと考えている。

参考文献

- [1] T. OOHASHI, "Inaudible High-Frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersonic Effect". J. Neurophysiol, 2000, 83, 3548-3558.
- [2] 仁科エミ, "ハイパーソニック・エフェクトの発現メカニズムに関する研究の進展". 日本音響学会誌, 2009, 65, pp45-45.
- [3] 大橋力ほか, "ハイパーソニック・エフェクトについて". 情報処理学会研究報告, 1997, pp29-34.
- [4] 仁科エミほか, "超高密度複雑性森林環境音の補完による都市音環境改善効果に関する研究". 日本都市計画学会 都市計画論文集, 2005, pp169-174.
- [5] 川勝真喜ほか, "受動的音楽療法における高周波非可聴音が認知症高齢者の行動・心理状態に及ぼす影響". 日本音楽療法学会誌, 2020, 20, pp132-142.
- [6] 岡田裕之ほか, "高周波非可聴音による脳賦活, 若年者と健常高齢者に対する PET と EEG による検証". 日本レーザー医学会誌, 2015, 36, pp167-175
- [7] 山崎憲ほか, "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, 2008, pp545-550.
- [8] 福島亜理子ほか, "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". 第 25 回バーチャルリアリティ学会大会, 2020, 3D1-2.