デジタル音源のサンプリング周波数が聴取者の 心理・生理状態に及ぼす影響¹

大湾 麻衣・入戸野 宏 (大阪大学大学院人間科学研究科)

Sampling Frequency of Digital Sound Sources Affects Psychophysiological States of Listeners

Mai OHWAN, Hiroshi NITTONO (*Graduate school of Human Sciences, Osaka University*)

High-resolution audio has a higher temporal and/or depth resolution than compact disks (CDs). Several researchers have suggested that inaudible high-frequency components of high-resolution audio might influence listeners' psychophysiological states. Two types of digital sound sources with the identical frequency structure (<22 kHz) were created at different sampling rates (192 kHz and 44.1 kHz) by filtering out inaudible high-frequency components of an original sound source, which was an excerpt of natural environmental sounds recorded in 192-kHz/24-bit format. Twenty-four university students listened to the three sounds in a random order for five minutes each. Results indicated that the 192-kHz sound source compared to the 44.1-kHz sound source induced higher power in the theta (4.0–8.0 Hz) and slow alpha (8.0–10.5 Hz) bands of the electroencephalogram. However, no apparent differences were found in sound quality or subjective mood. These results suggest that digital sound sources with a higher sampling frequency than CDs influence the physiological state of listeners, although the difference might not be consciously perceived.

Key words: electroencephalogram, high-resolution audio, auditory system, sound quality

【要 旨】 ハイレゾリューション音源はCDより時間方向あるいは振幅方向の解像度が高く、その高周波成分が生理状態に影響を及ぼすという報告がある。本研究では192 kHz/24 bitで録音された自然環境音（オリジナル音源）にフィルタをかけ、高周波成分（ >22 kHz）をカットした2種類の音源（サンプリング周波数192 kHzと44.1 kHz）を作成した。24名の大学生が3種類の音刺激をランダムな順で聴取した。脳波のシータ帯域（4.0—8.0 Hz）とスローアルファ帯域（8.0—10.5 Hz）のトータルパワーは、サンプリング周波数が高い音を聴取しているときの方が高くなった。主観的気分や音質評価には明瞭な条件差が認められなかった。この結果は、CDよりもサンプリング周波数が高い音源は、意識的に違いに気づかなくても生理状態に影響を及ぼすことを示唆している。

2020. 3.28 受稿, 2020.6.23 受理, 2020.7.4 J-STAGE 早期公開, doi: 10.5674/jjppp.2003br

連絡者及び連絡先: 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-2 大阪大学大学院人間科学研究科 入戸野 宏

E-mail: nittono@hus.osaka-u.ac.jp

¹ この論文の審査は機関誌編集副委員長が担当し、著者である編集委員長（入戸野 宏）は審査や採否の判断にまったく関与していない。

デジタルオーディオ変換技術や録音パッケージのデータ量の向上、圧縮方法の改良などによって、新しいデジタルオーディオ形式が登場している。ハイレゾ (high-resolution) 音源は、サンプリング周波数と量子化ビット数のいずれかが従来のCD相当のスペック (44.1 kHz/16 bit, 48 kHz/16 bit) を超えるデジタルオーディオと定義される (電子情報技術産業協会, 2014)。しかし、工学的に優れたスペックであっても、それが聴感に影響するかどうかは自明ではない。

CD相当のスペックでも人間の可聴域 (20—20,000 Hz, 大山ら, 1994) の音はすべて含むことができる。サンプリング周波数を高めたハイレゾ音源はさらに高い周波数まで再現できるが、そのことに実質的な意味があるかどうかについては議論がある。Reiss (2016) はCD音源とハイレゾ音源を弁別する能力について検討した研究のメタ分析を行い、全体としてはチャンスレベルを有意に超えると結論づけた。しかし、その平均正答率は53%に留まっていた。高周波成分を含む音源と含まない音源について主観的な音質評価を行った研究でも、差があったという報告 (Oohashi et al., 2000; Yagi et al., 2003b) と差がなかったという報告 (Kuribayashi & Nittono, 2017; Kuribayashi et al., 2014) が混在している。後者の研究では主観的に報告された気分にも差がなかった。

その一方、高周波音を含む音源が脳活動に影響するという知見がある (大橋, 2017)。その先駆として、Oohashi et al. (2000) は、高周波成分を含む音 (ガムラン音楽) をスピーカで提示すると脳波のアルファ帯域 (8—13 Hz) パワーが後頭部優勢に増大することを示した。また、陽電子断層撮影法 (positron emission tomography: PET) を用いた実験により、脳幹および左視床で局所脳血流が増大することを報告した。高周波成分を含む音を聞くと脳波のアルファ帯域パワーが増大するという知見は、多少の相違点はあるものの複数の研究で追試されている (e.g., Ito et al., 2016; Kuribayashi & Nittono, 2017; Kuribayashi et al., 2014; Oohashi et al., 2006)。また、高周波成分の音圧を増強するとアルファ帯域パワーがさらに増大するという知見 (Yagi et al., 2003a) や、どの帯域の高周波音成分を増強するかによって脳波パワーの増大/減少が変わるという知見もある (Fukushima et al., 2014)。

可聴域を超える高周波音成分を再現するためには、

CDスペックを超えるハイレゾのサンプリング周波数が必要になる。しかし、可聴域を超える音がどのように生体に影響を与えるかは正確には分かっていない。Oohashi et al. (2006) は気導聴覚系では受容できない高周波成分が身体表面から受容される可能性を示唆した。一方、高周波音成分を含まないときでも、サンプリング周波数が高い音源は時間解像度が高い。デジタルデータは離散的であるため、サンプリング周波数が低いと標本化する点の間隔が広がる。その間隔は標準的なCD (44.1 kHz) であれば22.7 μ s, ハイレゾ (192 kHz) であれば5.2 μ sである。再生時には、この間隔がデジタル-アナログコンバータ (digital-analog converter: DAC) によって補間され、さらにアンプとスピーカまたはヘッドホンの振動板によってアナログ信号に復元される。原理的には、サンプリング周波数が高いほど補間される部分が少なくなり、元のデジタル音源に含まれる情報をより忠実に再現できると考えられる。音源収録から再生、耳への伝播、聴覚系での処理といった複数の経路において線形性が保たれないと、高周波音のみならず可聴域においても歪みが生じる (宮坂, 1999)。

サンプリング周波数の高低は別の形で時間解像度に影響する。CDを作成するときは、通常はオリジナル音源をサンプリングしなおす。このとき、高周波成分が低周波成分に姿を変えて波形に混入するエイリアシング (aliasing) を防ぐために、CDで再現可能な周波数 (約22 kHz) を超える音成分はあらかじめハイカットフィルタで除去しなければならない。フィルタは周波数領域に影響を与えるだけでなく、時間的に波形を歪める (脳波分析における同様の現象はLuck, 2014を参照)。フィルタを適用すると音の立ち上がりの波形が時間的にばやけるため、聴感に影響が生じるという主張もある (Stuart & Craven, 2019)。ハイレゾのようにサンプリング周波数を高くすれば、このフィルタの影響を小さくできる。

本研究では、市販されているハイレゾ音源 (サンプリング周波数192 kHz) の自然環境音を、CDと同じサンプリング周波数 (44.1 kHz) にダウンサンプリングした音源とそれを再度192 kHzにアップサンプリングした音源を聴取しているときの心理・生理反応を測定した。ダウンサンプリングすることで高周波成分が失われ、その周波数構造はアップサンプリングしても

変わらない。両者を比較することによりサンプリング周波数の高さが聴取者に及ぼす影響を検討した。また、同じサンプリング周波数192 kHzで高周波音成分を含む音源と含まない音源も比較した。先行研究に基づき、高周波音成分が含まれている音源を聞くときは、含まれない音源を聞くときに比べて、アルファ帯域パワーが増大するという仮説を立てた。また、高周波音成分が含まれていなくても、サンプリング周波数が高い音源と低い音源では聴取時の心理・生理状態が異なるかどうかを探索的に検討した。なお、CDとハイレゾのもう一つの違いである量子化ビット数については本研究では扱わない(勝呂・三浦, 2018参照)。

方 法

実験参加者 聴力に異常がないと自己報告した右利きの大学生24名(男性11名, 女性13名, 20—29歳, $M=21.6$)が実験に参加した。喫煙, 飲酒, カフェイン摂取および激しい運動は前夜から控え, 十分な睡眠をとるよう事前に伝えた。実験にあたって, 所属機関の研究倫理委員会の審査を受け(人行29-072), 実験開始時に書面でインフォームドコンセントを得た。この他に3名が実験に参加したが, 測定値が欠損した2名, 実験途中で眠ってしまった1名(すべて男性)を分析から除外した。

刺激・装置 サンプリング周波数192 kHz, 量子化ビット数24 bitでステレオ収録された屋久島の自然環境音「森の夜明け」(https://mora.jp/package/43000074/TCJPR0000406944_hires/)の冒頭5分10秒間をオリジナル音源(オリジナル192 kHz)とし, 高周波音成分(>22 kHz)を除去した2種類の音源を作成した。一方は元音源のサンプリング周波数を44.1 kHzにダウンサンプリングして生成し(ハイカット44.1 kHz), もう一方はそれをスプライン補間して再び192 kHzにアップサンプリングして生成した(ハイカット192 kHz)。どちらの変換でも量子化ビット数は変更しなかった。音源の加工にはAdobe社 Audition CC 2018(11.0.0.119)を用いた。以上3種類の音源を, ノートPC(Panasonic製CF-SX3EDHCS)上の再生ソフト(Foobar2000 v1.4, <https://www.foobar2000.org/>)からプリメインアンプ(YAMAHA製A-U671)を通して, ヘッドホン(SONY製

Figure 1. 使用した音源の周波数特性。上はデジタルデータ(全区間5分10秒間)のスペクトル, 下はヘッドホンから再生された音のスペクトルを示す。左ヘッドホンから1 cmの位置でBrüel & Kjær製マイクロフォン4939-A-011を用いて計測した冒頭30秒間のピーク音圧である。可聴域を超える帯域における音圧の平均値は本文に記載した。

MDR-Z7, メーカー公称再生周波数帯域: 4—100,000 Hz)で提示した。使用した機器はすべてハイレゾ音源の再生に対応していた。本研究で, 自然環境音をヘッドホンで提示する設定を選んだのは, 学校や職場で周囲を妨害せず個人で作業するときの背景音として聞く状況を念頭に置いたからである。Figure 1に各音源に含まれる周波数成分を示す。デジタルデータには高周波帯域の音源差が明瞭に表れているが, 再生された音における差は小さかった。20,000—30,000 Hzの平均音圧は, オリジナル192 kHzで11.39 dB SPL, ハイカット192 kHzで11.27 dB SPL, ハイカット44.1 kHzで11.27 dB SPLであった(暗騒音は11.28 dB SPL)。

質問紙 アフェクトグリッド(Russell et al., 1989)と音質評価紙を使用した。アフェクトグリッドは, 覚醒度を縦軸, 快情動を横軸とした9×9の格子であり, 現在の気分に当てはまるマスに印を入れるものである。音質評価にはTable 1に示す10の形容詞対によるSemantic Differential(SD)法(7件法, Osgood et al., 1957)を用いた。

Table 1. 主観評価のまとめ

測定		条件		
		High-cut 44.1 kHz	High-cut 192 kHz	Original 192 kHz
気分 (Affect grid) ¹	快 (1: 不快—9: 快)	6.58 (6.06—7.11)	6.75 (6.20—7.30)	6.50 (5.91—7.08)
	覚醒 (1: 眠気—9: 高覚醒)	3.42 (2.90—3.93)	3.79 (3.13—4.45)	3.71 (3.09—4.32)
音の印象評価 (1: 左項目—7: 右項目)	低音がめだつ—高音がめだつ	5.00 (4.61—5.39)	4.88 (4.44—5.31)	5.08 (4.62—5.55)
	きめが粗い—きめが細かい	5.21 (4.86—5.56)	4.92 (4.47—5.36)	4.75 (4.31—5.19)
	耳当たりのわるい— —耳当たりのよい	5.25 (4.85—5.65)	5.33 (4.86—5.81)	5.38 (4.97—5.78)
	響きのわるい—響きのよい	5.58 (5.21—5.96)	5.13 (4.69—5.56)	5.04 (4.46—5.62)
	奥行きのない—奥行きのある	5.42 (4.92—5.91)	5.04 (4.51—5.58)	4.96 (4.32—5.60)
	広がりがない—広がりのある	5.08 (4.56—5.61)	4.88 (4.37—5.38)	4.83 (4.31—5.36)
	人工的な—自然な	5.58 (5.07—6.10)	5.46 (4.93—5.99)	5.25 (4.66—5.84)
	薄い—厚い	4.29 (3.82—4.77)	4.46 (3.92—5.00)	4.25 (3.81—4.69)
	固い—柔らかい	4.67 (4.19—5.14)	4.63 (4.16—5.09)	4.54 (4.03—5.05)
	かわいている— —うるおいがある	5.83 (5.37—6.29) ^a	5.25 (4.81—5.69) ^b	5.29 (4.76—5.83)
音質の総合順位	1: 最低—3: 最高	1.88	2.04	2.08

注) 24名の平均値と95%信頼区間を示す。上付き文字が異なる条件間 (a vs. b) に有意差があった, $p < .05$ 。

¹実験開始時は、快が5.75 (5.20—6.30)、覚醒が4.88 (4.21—5.54) であった。

手続き 実験開始時にアフェクトグリッドに回答を求めた後、3つの音源につき、それぞれ安静2分間と音源聴取5分間を開眼で実施した。音源の提示順序は参加者間でカウンタバランスをとった。各音源の聴取後、アフェクトグリッドと音質評価紙に回答を求めた。実験の最後に、3音源の音質を総合的に判断して順位づけてもらい、3点 (1位) から1点 (3位) として得点化した。

記録 デジタル脳波計 (Brain Products製 QuickAmp) を用いて、安静時と聴取中の脳波を正中線上4部位 (Fz, Cz, Pz, Oz) から鼻尖基準でAg/AgCl電極により測定した。グラウンド電極はFpzに置いた。また、右眼窩上下に設置した電極から垂直眼電図を測定した。電極インピーダンスは10 k Ω 未満とした。サンプリング周波数は500 Hz、記録時のフィルタはDC-100 Hzであった。この他に、心電図、呼吸、皮膚コンダクタンスを測定したが、音源による差が認められなかったため、ここでは報告しない (付録参

照)。

分析 脳波の分析はBrain Vision Analyzer 2.1 (Brain Products製) を用いて行った。256 Hzにリサンプリングしたのち、1—40 Hz (order 8) のバンドパスフィルタと60 Hzのノッチフィルタを適用した。瞬目によるアーチファクトをGratton et al. (1983) の方法により補正した。各音源を聴取している5分間について1分ごとに分析した。分析区間は2秒間 (前後区間との重複は1秒) とし、10%ハニング窓をかけて高速フーリエ変換を行った (窓によって削られたパワーは補正した)。以下の5つの帯域ごとにトータルパワーを求めた (デルタ: 1.0—4.0 Hz, シータ: 4.0—8.0 Hz, スローアルファ: 8.0—10.5 Hz, ファストアルファ: 10.5—13.0 Hz, ベータ: 13.0—30.0 Hz)。信頼性を検討するために、偶数区間と奇数区間で別々にトータルパワーを求めたところ、全帯域の全部位において高い相関が得られた ($r_s > .97$)。そのため、両区間のトータルパワー値を平均し、さらに正規分布に近

づけるため自然対数変換した値 $\ln(\mu V^2)$ を分析に使用した(Allen et al., 2004)。なお、聴取前の安静2分間についても同様の分析を行い、各帯域の脳波パワーに音源による差がないことを確認した(詳細は付録参照)。

本研究は探索的な検討を含むため、まず帯域ごとに3音源×5時点×4部位の反復測定3要因分散分析(analysis of variance: ANOVA)を行った。そこで音源の主効果または音源を含む交互作用が得られた帯域だけをその後の分析に用いた。序論で述べた2つの問いに答えるため、高周波成分の有無の効果(ハイカット192 kHz vs. オリジナル192 kHz)とサンプリング周波数の効果(ハイカット44.1 kHz vs. ハイカット192 kHz)は別々に検討した。

統計検定 有意水準は.05とした。反復測定ANOVAではGreenhouse-Geisserの ε によって自由度修正を行ってから有意性を検定した。平均値の多重比較にはBonferroni法を用いた t 検定(両側検定)を行った。

結 果

主観評価 Table 1に主観測度の平均値を示す。アフェクトグリッドによって測定した快と覚醒について、それぞれ1要因ANOVAを行ったところ、音源による差はなかった、 $F(2, 46) = 0.43$ and 1.14 , $ps = .635$ and $.322$, $\varepsilon = .923$ and $.852$, $\eta_p^2 = .019$ and $.047$ 。SD法による音質評価は、「かわいている—うるおいがある」という項目でのみ音源の効果が有意であった、 $F(2, 46) = 3.95$, $p = .033$, $\varepsilon = .863$, $\eta_p^2 = .147$ 。多重比較の結果、ハイカット44.1 kHzがハイカット192 kHzに比べて「よりうるおいがある」と評価されていた。音質

の総合得点は、数値上はオリジナル192 kHzが最も高く、ハイカット192 kHzがそれに続き、ハイカット44.1 kHzが最低であったが、Friedman検定では有意でなかった、 $\chi^2(2) = .583$, $p = .747$ 。

脳波 Figure 2に、帯域ごとの脳波パワーの時系列変化を示す。シータ帯域とスローアルファ帯域において音源間に差があるように見える。各帯域について音源×時点×部位のANOVAを行ったところ、デルタ帯域で音源×部位の交互作用、 $F(6, 138) = 3.43$, $p = .029$, $\varepsilon = .423$, $\eta_p^2 = .130$ 、シータ帯域で音源×時点の交互作用、 $F(8, 184) = 2.39$, $p = .031$, $\varepsilon = .759$, $\eta_p^2 = .094$ 、スローアルファ帯域で音源×時点の交互作用、 $F(8, 184) = 2.69$, $p = .018$, $\varepsilon = .724$, $\eta_p^2 = .105$ 、がそれぞれ有意であった。その他の帯域における音源の主効果および音源を含む交互作用は有意でなかった。そのため、以降はデルタ、シータ、スローアルファ帯域だけに注目して、仮説の検証を行う。

高周波成分の効果を検討するために、デルタ、シータ、スローアルファ帯域において、2音源(ハイカット192 kHz vs. オリジナル192 kHz)×5時点×4部位のANOVAを行った。その結果、シータ帯域のみで音源×時点の交互作用が認められた、 $F(4, 92) = 2.65$, $p = .047$, $\varepsilon = .869$, $\eta_p^2 = .103$ 。しかし、多重比較の結果、条件の単純主効果はどの時点においても有意でなかった。デルタ帯域とスローアルファ帯域では音源の主効果および交互作用は有意ではなかった。

サンプリング周波数の効果を検討するために、2音源(ハイカット44.1 kHz vs. ハイカット192 kHz)×5時点×4部位のANOVAを行った。デルタ帯域で音源×部位の交互作用が認められたが、 $F(3, 69) = 4.86$, $p = .025$, $\varepsilon = .450$, $\eta_p^2 = .174$ 、音源の単純主効果はいずれの部位でも有意でなかった(付録参照)。シー

Figure 2. 脳波の各帯域におけるトータルパワー(4部位を平均した値)。エラーバーは標準誤差を示す。

タ帯域では音源の主効果が認められた, $F(1, 23) = 5.17$, $p = .033$, $\varepsilon = .833$, $\eta_p^2 = .184$ 。サンプリング周波数の高い音源 (ハイカット 192 kHz) を聞いているときは, ハイカット 44.1 kHz を聞いているときに比べて, トータルパワー値が有意に高かった。音源×時点の交互作用は有意ではなかった, $F(4, 92) = 2.28$, $p = .079$, $\varepsilon = .839$, $\eta_p^2 = .090$ 。スローアルファ帯域では音源×時点の交互作用が認められた, $F(4, 92) = 3.25$, $p = .022$, $\varepsilon = .846$, $\eta_p^2 = .124$ 。多重比較の結果, 聴取開始から2—3分の区間において, ハイカット 192 kHz の聴取時はハイカット 44.1 kHz 聴取時と比べて, トータルパワー値が有意に高かった (修正後 $p = .008$)。

考 察

本研究では自然環境音を用いて, 高周波音成分の有無とサンプリング周波数の高低が音質の知覚や人間の心理・生理状態に与える影響を検討した。その結果, いずれの要因も主観的な音質評価にはほとんど影響を与えなかった。脳波分析では, 高周波音成分を含む音源を聴取するとアルファ帯域パワーが増大するという仮説は支持されなかった。しかし, 含まれる周波数成分は同じでもサンプリング周波数が高い音源を聞くとときは, サンプリング周波数が低い音源を聞くとときに比べて, シータ帯域やスローアルファ帯域のパワー値が2—3分後に大きくなるという結果が得られた。

高周波成分の有無で音源の印象や気分にはほとんど効果がなかったことは先行研究と一致している (Kuribayashi & Nittono, 2017; Kuribayashi et al., 2014)。同様にサンプリング周波数の高低でも主観測定に差が認められなかった。音質評価は10形容詞対のうち1つのみで, ハイカット 44.1 kHz 音がハイカット 192 kHz 音に比べて「うるおいがある」と評価された。同時に行った検定の数を見ると, この結果は偽陽性の可能性がある。Reiss (2016) によれば, CD 音源とハイレゾ音源の弁別成績は, 聴取訓練や刺激提示時間によって変わる。今回の参加者は一般の大学生・大学院生であり, 特殊な訓練を受けたわけではないため, 差が得られなかったことも考えられる。

高周波音成分を含む音源を聞いているときにアルファ帯域パワーが増大しなかった原因として, 以下の

2点が考えられる。1つは, 音の提示方法である。高周波音成分によるアルファ帯域パワーの増大を報告した先行研究 (e.g., Kuribayashi et al., 2014; Oohashi et al., 2000) では, ヘッドホンではなくスピーカを使用している。複数の音提示方法を比較した Oohashi et al. (2006) によると, 高周波音成分の効果はイヤホンを用いて耳に直接音を提示したときには生じなかった。高周波音成分の効果を十分に生じさせるためには, ヘッドホンではなくスピーカが必要なのかもしれない。もう1つは, 音源の種類である。自然環境音には高周波成分が含まれていると言われ (石田ら, 2009), 本研究で用いた音源にも確かに含まれていた。しかし, その量が十分でなかった可能性がある。高周波音成分は金属が触れ合う楽器に多く含まれている (栗林・入戸野, 2015)。そのため, 先行研究で用いられたのは, ガムラン (Fukushima et al., 2014; Oohashi et al., 2000; Yagi et al., 2003a, 2003b) やチェンバロ (Kuribayashi & Nittono, 2017; Kuribayashi et al., 2014) で演奏された音楽であった。このような音源を用いれば, 効果が生じたかもしれない。

他方, 高周波音成分が含まれていなくても, サンプリング周波数の高い音源は, 低い音源に比べて, 聴取時のシータ帯域とスローアルファ帯域のパワーが大きかった。スローアルファ帯域では音が始まってから2—3分間に効果が生じた。シータ帯域では音源×時点の交互作用が有意ではなかったが, Figure 2を見ると同様の変化を示している。シータ帯域とスローアルファ帯域のパワーは全体としては時間経過とともに増加しているので, サンプリング周波数が高い音を聞くことで早い時期に定常状態に達したといえる。聞き始めてから数分後に効果が生じるという時間的変化は, 高周波音成分がアルファ帯域パワーを増大させる効果と類似している (Kuribayashi et al., 2014, 2017; Oohashi et al., 2000)。聴感のわずかな違いは意識には上らないが, 時間的に蓄積されることで脳波上に現れる可能性がある。なお, デジタル音処理では, 変換を繰り返すと量子化ノイズが増えて音質が劣化する可能性が指摘されている (Stuart & Craven, 2019)。変換の回数はハイカット 44.1 kHz 音よりもハイカット 192 kHz 音の方が1回多い。しかし, 後者とオリジナル音の間には主観評価や脳波の差が認められなかったため, 今回得られたサンプリング周波数を下げるこ

の効果は変換自体による劣化の効果ではないといえる。

高周波音成分の効果に関する先行研究では、ファストアルファ帯域 (10.5—13 Hz) に差があることが多かった (Fukushima et al., 2014; Ito et al., 2016; Kuribayashi & Nittono, 2017; Kuribayashi et al., 2014)。しかし、今回はそれよりも低い帯域 (4—10.5 Hz) に差が認められた。アルファ帯域パワーは一般に覚醒度と負の関係がある (Barry et al., 2020)。シータ帯域パワーについては、スローアルファ帯域パワーとともに、日中の覚醒時間が長くなるほど増大するという知見があったり (Cajochen et al., 1995)、感情的に快である音楽を聞いているときに増大するという知見もある (Nemati et al., 2019)。今回の脳波パワー変化に対応する心理的意味は特定できないが、緊張が解けて覚醒が下がったり快の状態になっていたと推測できる。今後、結果の再現性を確認するとともに、記録部位を増やして、音源による差が生じる頭皮上分布や神経発生源についても検討する必要がある。

ハイレゾ音源には、高周波音成分を再現できるという特長だけでなく、サンプリング周波数が高いという特長がある。前者についての研究は多いが、後者についての研究は少ない。本研究はサンプリング周波数の高低も生体に影響を与える可能性を示した。その効果は、意識には上らない程度のわずかな差であり、生じるまでに2分程度聞き続けることが必要だった。今回の結果は1種類の自然環境音と1種類の再生装置を用いて得られた限定的なものである。そのため、サンプリング周波数の高い音源を聞くと、今回と同じ結果が常に得られるという保証はない。ハイレゾ音源はその情報量の多さだけが注目されやすいが、デジタル音源はそのままでは聴取できないため、DACやスピーカ、ヘッドホンといった再生装置の特性によって音質は大きく変わる。CD音源と比べたハイレゾ音源の優位性は、こういったすべての要因を考慮しつつ慎重に検討する必要があるだろう。

謝 辞

音源の選定と提示方法、音圧測定について、山本竜太氏 (株式会社ディジフュージョン・ジャパン) の助言を得た。研究の一部は、日本認知心理学会第16回

大会と第37回日本生理心理学会大会で発表した。本研究は、科学研究費補助金17K18702に基づいて実施した。

引用文献

- Allen, J. J. B., Coan, J. A., & Nazarian, M. (2004). Issues and assumptions on the road from raw signals to metrics of frontal EEG asymmetry in emotion. *Biological Psychology*, 67, 183–218. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.007>
- Barry, R. J., De Blasio, F. M., Fogarty, J. S., & Clarke, A. R. (2020). Natural alpha frequency components in resting EEG and their relation to arousal. *Clinical Neurophysiology*, 131, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.10.018>
- Cajochen, C., Brunner, D. P., Krauchi, K., Graw, P., & Wirz-Justice, A. (1995). Power density in theta/alpha frequencies of the waking EEG progressively increases during sustained wakefulness. *Sleep*, 18, 890–894. <https://doi.org/10.1093/sleep/18.10.890>
- 電子情報技術産業協会 (2014). ハイレゾオーディオの呼称について (25JEITA-CP第42号) Retrieved from https://home.jeita.or.jp/page_file/20140328095728_rhsiN0Pz8x.pdf (2020年3月9日)
- 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 hyper-sonic effects. *PLoS ONE* 9, e95464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095464>
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 55, 468–484. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(83\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(83)90135-9)
- 石田 光男・齋藤 順子・永井 正則・岩間 貴司・山田 博之 (2009). 自然環境の発する音 (超高周波数音) が人に与える影響 山梨県総合理工学研究機構報告書, 4, 51–55.
- Ito, S., Harada, T., Miyaguchi, M., Ishizaki, F.,

- Chikamura, C., Kodama, Y., ... Nitta, K. (2016). Effect of high-resolution audio music box sound on EEG. *International Medical Journal*, 23, 1-3.
- 栗林 龍馬・入戸野 宏 (2015). 耳には聞こえない高周波成分を含む音を発生させる楽器 広島大学大学院総合科学研究科紀要, 10, 35-41. <https://doi.org/10.15027/39146>
- Kuribayashi, R., & Nittono, H. (2017). High-resolution audio with inaudible high-frequency components induces a relaxed attentional state without conscious awareness. *Frontiers in Psychology*, 8, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00093>
- Kuribayashi, R., Yamamoto, R., & Nittono, H. (2014). High-resolution music with inaudible high-frequency components produces a lagged effect on human electroencephalographic activities. *NeuroReport*, 25, 651-655. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000000151>
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- 宮坂 栄一 (1999). 高周波音の知覚について 日本音響学会誌, 55, 569-572. https://doi.org/10.20697/jasj.55.8_569
- Nemati, S., Akrami, H., Salehi, S., Esteky, H., & Moghimi, S. (2019). Lost in music: Neural signature of pleasure and its role in modulating attentional resources. *Brain Research*, 1711, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2019.01.011>
- 大山 正・今井 省吾・和気 典二 (1994). 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房
- 大橋 力 (2017). ハイパーソニック・エフェクト 岩波書店
- Oohashi, T., Kawai, N., Nishina, E., Honda, M., Yagi, R., Nakamura, S., ... Shibasaki, H. (2006). The role of biological system other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect. *Brain Research*, 1073-1074, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.096>
- Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., ... Shibasaki, H. (2000). Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: Hypersonic effect. *Journal of Neurophysiology*, 83, 3548-3558. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.83.6.3548>
- Osgood, C. E., Suci, G. J., & Tannenbaum, P. H. (1957). *The measurement of meaning*. Chicago: University of Illinois Press.
- Reiss, J. (2016). A meta-analysis of high resolution audio perceptual evaluation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 64, 364-379. <https://doi.org/10.17743/jaes.2016.0015>
- Russell, J. A., Weiss, A., & Mendelsohn, G. A. (1989). Affect Grid: A single-item scale of pleasure and arousal. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57, 493-502. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.57.3.493>
- Stuart, R., & Craven, P. (2019). A hierarchical approach for audio capture, archive, and distribution. *Journal of the Audio Engineering Society*, 67, 258-277. <https://doi.org/10.17743/jaes.2018.0062>
- 勝呂 明央・三浦 雅展 (2018). 量子化精度の異なるハイレゾ音源の弁別可能性およびその印象評価音楽知覚認知研究, 23, 111-120.
- Yagi, R., Nishina, E., Honda, M., & Oohashi, T. (2003a). Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception. *Neuroscience Letters*, 351, 191-195. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2003.07.020>
- Yagi, R., Nishina, E., & Oohashi, T. (2003b). A method for behavioral evaluation of the "hypersonic effect." *Acoustical Science and Technology*, 24, 197-200. <https://doi.org/10.1250/ast.24.197>