

ハイレゾオーディオが聴取者に与える影響とそのメカニズムの検討

大湾 麻衣

デジタル録音が実現して以降、音響工学の文脈ではより良い音質を目指して技術的な開発が進められてきた。デジタル化の黎明期に発明された CD はサンプリング周波数 44.1 kHz, 量子化ビット数 16 bit という規格で、約 22 kHz までの音を再生することができる。これは人間の聴覚閾値(およそ 20-20,000 Hz)をカバーしている。ハイレゾリューション(以下ハイレゾ)オーディオは、従来の CD に比べて高解像度であり、より原音に忠実な録音・再生ができるとされている。その規格は一般に 96 kHz/ 24 bit や 192 kHz/ 24 bit が採用され、人間の聴覚閾値を大幅に上回る高周波音成分を含むことができる。工学的な発展の傍ら、ハイレゾオーディオが聴取者に与えるメリットについて音響心理学の分野で議論がなされてきた。

Reiss(2016)は、メタ分析を行い、ハイレゾ音源と CD スペックの音源は容易に弁別できるわけではないが、オーディオ愛好家や詳しい説明を受けて訓練を行った人などはチャンスレベルを超えて弁別できる可能性があることを示した。ハイレゾ音源が生体に与える影響として、可聴域を上回る高周波成分を含む音を聴取すると、含まない音を聴取した時と比べて、脳波のアルファ帯域のパワーが増大することが複数の先行研究で報告されている(e.g., Oohashi et al., 2000; Kuribayashi et al., 2017)。自律神経系への影響についての結果は一貫していない(e.g., 影響有:Harada et al., 2016; 無:Kuribayashi et al., 2014)。

これまでの研究から、ハイレゾオーディオには何らかのメリットがあることが示唆されているが、その現象が生じるメカニズムは明らかでない。本研究では、高周波音成分を実現するサンプリング周波数の高さに注目して、2 つの実験を行った。サンプリング周波数が高いことには、3 つのメリットがある。第 1 に、高周波音成分を含むことができるということである。しかし、聴覚閾値を上回る高周波音成分は気道聴覚系では受容されないため、高周波音成分そのものが単独で生体に影響するとは考えにくい。第 2 に、録音時の帯域制限が小さいため、フィルタリングによって生じる音波形のぼやけ(歪み)を軽減できることである。低いサンプリング周波数で録音する場合、その仕様では表現できない高周波数成分がノイズとして混入すること(エイリアシング)を防ぐために、ハイカットフィルタ(以下、エイリアシングフィルタ)を適用する。この工程によって、周波数構造が変わるだけでなく、波形に時間的な歪みが生じる。第3に、サンプリング点の間隔が狭く、再生系(デジタル-アナログコンバータ)の伝達特性に左右されにくいいため、音源データをより忠実に再現できることである。実験Ⅰでは、自然環境音を用いてサンプリング周波数の高さが聴取者に与える影響を探索的に検討した。実験Ⅱでは、サンプリング周波数の高さやエイリアシングフィルタに由来する音波形のぼやけが聴覚処理に及ぼす影響について聴性誘発電位を用いて検討した。

実験Ⅰ:サンプリング周波数の違いが聴取者の心理・生理状態に及ぼす影響

先行研究で報告されている高周波音成分の影響を確認することに加え、ハイレゾ音源の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。森の中の自然音を録音したハイレゾ音源(オリジナル 192-kHz サンプリング)を 44.1 kHz にダウンサンプリングした音源(22-kHz ハイカット 44.1-kHz サンプリング)と、それを再度 192 kHz にアップサンプリングした音源(22-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング)を作成した。これらの3種類の音源を各 5 分 10 秒間ずつ開眼安静状態で聴取している間の脳波を測定した。提示順序は参加者間でカウンターバランスをとった。高周波音成分の影響を検討するため、22 kHz を超える周波数を含むオリジナル音源と 22-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング音源を聴取しているときの脳波を比較したが、先行研究に反して高周波音成分の有無によるパワーの差は認められなかった。他方、サンプリング周波数の高低による影響を検討するため、周波数構造が等しい 22-kHz ハイカット 192-

kHz サンプリング音源と 22-kHz ハイカット 44.1-kHz サンプリング音源を聴取しているときの脳波を比較したところ、サンプリング周波数の高い音源を聴取すると、低い音源を聴取するときに比べて、聴取開始から 2-3 分後に、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) のパワーが大きくなった。覚醒度・快情動及び主観的な音質評価には信頼できる差がなかった。

実験Ⅱ：フィルタリングした音源に対する聴性誘発電位の測定とフィルタの影響の可聴性の検討

実験Ⅱは 2 つに分けて実施した。実験Ⅱa では、エイリアシングフィルタがもたらす波形の歪みの影響を検討した ($N = 24$)。持続時間 0.1 ms のクリック (オリジナル 192 kHz サンプリング) と、それにエイリアシングフィルタを適用して高周波数成分を除去した 2 種類の音源 (22-kHz ハイカット 192-kHz サンプリングと 11-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング) を作成した。3 種類のクリックをそれぞれ 4,000 回提示し、音の入力から皮質に至るまでの聴性脳幹反応 (auditory brainstem response: ABR, 提示後 10 ms 間) と大脳皮質における聴性中間反応 (MLR: 提示後 125 ms 間) を加算平均により求めた。さらに、3 種類の音源がそれぞれ弁別できるかを ABX テストを用いて総当たりで測定した。実験Ⅱb では、サンプリング周波数を下げることの影響を検討した ($N = 6$)。オリジナル 192-kHz サンプリングのクリックと、それにエイリアシングフィルタをかけてサンプリング周波数を下げた 2 種類の音源 (24-kHz ハイカット 48 kHz サンプリングと 12 kHz ハイカット 24 kHz サンプリング) を作成し、実験Ⅱa と同様に ABR の測定と ABX テストを実施した。

Figure 1 に、聴性誘発電位の波形を示す。実験Ⅱab ともに ABR には音の違いによる有意差が認められなかった。MLR についても、同様にエイリアシングフィルタやサンプリング周波数の効果はなかった。ABX テストについて、実験Ⅱa では 11-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング音源と他の 2 音源との弁別成績は有意であったが、オリジナル 192 kHz サンプリング音源と 22-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング音源は弁別できなかった。実験Ⅱb では、12-kHz ハイカット 24-kHz サンプリング音源と他の 2 音源との弁別成績は有意であったが、オリジナル 192-kHz サンプリング音源と 24-kHz ハイカット 48-kHz サンプリング音源は弁別できなかった。主観報告では、11-kHz ハイカット 192-kHz サンプリング音源や 12-kHz ハイカット 24-kHz サンプリング音源について、“クリック以外の付加音が聞こえた”、“高く聞こえた”などの内省が得られた。まとめると、聴覚閾値を下回るところまでハイカットフィルタをかけて高周波成分を除去すると聴感に影響を与えるが、その場合でも、初期の誘発電位成分には変化がなかった。

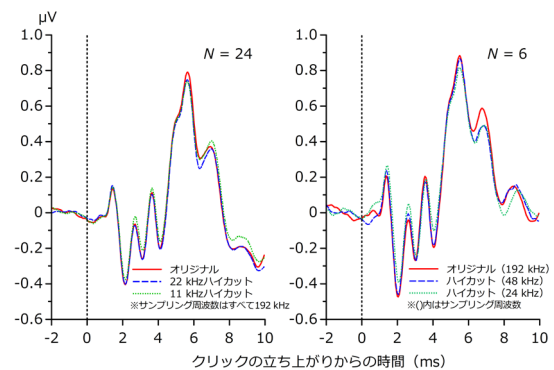


Figure 1. 聴性脳幹反応の総加算平均波形

総合考察

実験Ⅰでは、サンプリング周波数が高い音源を聴取すると、高周波音成分の有無によらず、脳波のシータ帯域及びスローアルファ帯域のパワー値が増大することが示された。実験Ⅱでは、エイリアシングフィルタ波形にぼやけ (歪み) を生じさせたり、サンプリング周波数を下げたりしても、初期の聴性誘発電位の波形は変わらないが、可聴域に含まれる高周波成分までフィルタによって除去すると、聴感や弁別成績に影響することが示された。自然音の録音を用いた実験Ⅰでは、聴取時の脳波パワーにサンプリング周波数の影響が認められた。他方、人工的なクリックを用いた実験Ⅱでは、初期の聴覚神経処理にサンプリング周波数の影響は認められなかった。これらの結果から、ハイレゾオーディオの優位性は、(1) 高次な周波数 (倍音) 構造を持つ自然音に対してのみ生じる、(2) 聴覚処理の後期段階で生じると考察できる。今後、ハイレゾオーディオが聴取者に与える影響を調べる研究では、人工的な音を使うのではなく、生態学的妥当性の高い自然音の切り抜きなどを用いるのが望ましいだろう。(基礎心理学)