

オペラ歌唱におけるハイパーソニックエフェクトの検証

森 亮太^{†1} 山本 一公^{†1} 中川 聖一^{†1}

概要: ハイパーソニックエフェクトの存在は近年の研究で明らかにされているが、楽器を対象とした研究しかされておらず、歌声を対象とした研究は行われていない。本研究では、歌声にもハイパーソニックエフェクトが含まれているのか、体表面と聴覚での感じ方の比較を調査した。聴取結果では可聴域を超える成分を含む歌声と含まない歌声の区別が可能と言う結果が得られた。また、25kHz 付近の超高周波成分を含む歌声は、20kHz 以上の周波数成分を除去した歌声よりも評価が高いなどの3つの仮説を立て、スピーカ音の聴取では3つの仮説が支持され、ヘッドホンの聴取では、2つの仮説が支持された。

キーワード: オペラ歌唱、ハイパーソニックエフェクト、非可聴域、スペクトル分析、聴取実験

1. はじめに

1.1 ハイパーソニックエフェクト

ハイパーソニックエフェクトとは、人間の可聴域とされている 20 kHz 程度を超えミクロな時間領域で複雑に変化する超高周波成分を豊富に含む音「ハイパーソニック・サウンド」が、人間の間脳・中脳を中心とする脳の領域〈基幹脳ネットワーク〉を活性化し、心身両面にさまざまなポジティブな効果をもたらす現象をいう [1]。

このような効果をもたらす音として、自然性の高い森林環境音やある種の民族楽器音には、可聴域上限を上回る超高周波数成分を豊富に含むものがあることが報告されている [2]。また、ピアノ等の現代楽器は劇場や会場に可聴域の音を響かせなければいけなく、それを目的とし作られるため可聴域を超える音は出せない [3]。図 1 に、さまざまな楽器音の周波数スペクトルを示す [4]。

歌声に対して「ハイパーソニックエフェクト」に関する研究が著者らの知る限り行われていないので、20kHz 以上の周波数成分をもつオペラ歌手の歌声に対して検証し、その存在についてはスピーカーによる聴取実験による結果を報告した [5]。本稿では、その存否の検証結果に加え、ヘッドホンによる聴取実験結果について報告する。

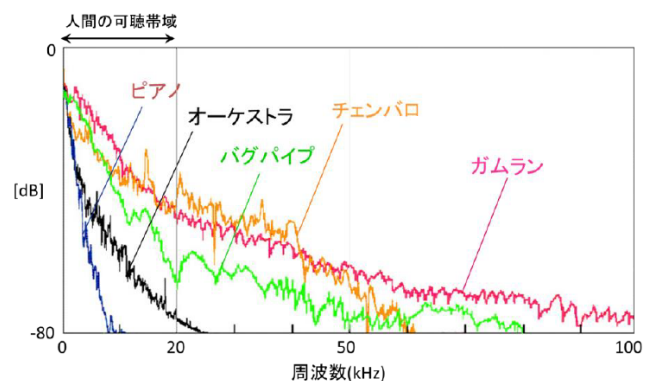


図 1: さまざまな楽器音の周波数パワースペクトル [4]

1.2 ハイパーソニックエフェクト及びハイレゾの研究

ハイパーソニックエフェクトは耳からではなく、何かしらの体表面組織からその音あるいは効果を感じているとされている。この見解に関して、次のような検証実験が行われている [4]。さまざまな銅鑼や鍵盤打楽器を用いたインドネシアのガムラン民族のガムラン音楽は 100 kHz を越える成分を含むとされている。このガムラン音楽を 22 kHz 以上の可聴域を超える成分と 22 kHz 以下の可聴域成分とに分け、ハイパーソニックエフェクトの発現に差が生じるかどうかについて以下の 4 つの条件で検討された。

条件 A: 可聴域と超高周波の両方をスピーカーから実験参加者の全身に呈示する

条件 B: 可聴域と超高周波の両方をイヤフォンを用いて実験参加者の耳（気導聴覚系）のみに呈示する

条件 C: 可聴域はイヤフォンを通じて気導聴覚系に、超高周波はスピーカーから実験参加者の耳以外の

^{†1} 中部大学
Chubu University

全身に呈示する

条件 D：可聴域はイヤフォンを通じて気導聴覚系に、超高周波はスピーカーから実験参加者の全身に呈示するが、実験参加者の身体を遮音材で覆い、スピーカーから呈示される超高周波の体表面への到達を遮断する

この実験の結果、可聴音と可聴域以上の音域の両方をスピーカーから実験参加者の全身に呈示した条件と可聴音を気導聴覚系に、可聴域以上の音域を体表面に呈示した条件ではハイパーソニックエフェクトが発現したが、可聴音と可聴域以上の音域の両方をイヤフォンから呈示した条件ではハイパーソニックエフェクトは発現しなかった。一方、超高周波成分の体表面への到達を遮断した条件では、ハイパーソニックエフェクトの発現は顕著に抑制された [4]。この結果から、可聴域以上の音域の成分のなんらかの受容器が体表面に存在することが推定され、それを特定するための研究もされている [6]。

ハイレゾ音源に関する実験として、ハイレゾ楽曲を基としてハイレゾ音、疑似 CD 音（サンプリング周波数 48 kHz、量子化精度 16bit、MP3 (320kbps) 音、MP3 (128kbps) 音を作成し、これら 4 種の音質の違いを被験者が違いを感じ、聴き分けを行なえるのかを評価した実験がある [8]。ハイレゾ音と CD 音の識別は 100 %できている。さらに、ハイレゾ音源は CD 音源に比べて、「臨場感」「広がり感」「奥行き感」があるという聴取結果が報告されている。

また、ハイレゾ音源と非ハイレゾ音源の識別可能性について、楽音を用いずに検討した実験も行われている [7]。48, 96, 192 kHz の各サンプリング周波数のインパルス、ホワイトノイズを試験用の検査信号として選定し、ハイレゾ音源と非ハイレゾ音源の識別可能性が調査された。スピーカー及びヘッドホンどちらでもハイレゾ音源と非ハイレゾ音源の識別は多くの組み合わせにおいてサンプリング周波数の違いを有意に識別できるとする結果が得られている。

2. オペラ歌手の歌声の分析

2.1 分析対象音声の選定法

分析対象のオペラ歌手の歌声音声を広帯域まで超高周波成分を含んでいると想定し、サンプリング周波数 96 kHz 以上で、オペラ経験のある歌手が歌い、使用楽器の中に 20 kHz 以上を奏でることができる楽器が含まれていないデジタル音源を注意深く数曲選定した。これらの楽曲をスペクトログラムで確認し、可聴域を超えた帯域に歌声が存在し、かつ雑音と同じ帯域に歌声が存在しない楽曲に限定した。その結果として、使用楽器はピアノのみの、サンプリング周波数 96 kHz/16bit の女性ボーカリストのハイレゾ音源を使用した。

2.2 スペクトログラム

サンプリング周波数 96 kHz のハイレゾ音源に対してフーリエ変換に対して用いて分析窓長 20 [ms]、窓シフト長 10 [ms] でスペクトログラムを求めた。図 2 は今回使用した音源のスペクトログラムである。摩擦音の区間で 25 kHz 前後の超高周波数成分が存在することがわかる。また、30 kHz 以上の帯域で録音、AD 変換、符号化に起因する（量子化雑音が超広域帯域に寄せられる）と思われる定常な雑音成分が現われている。

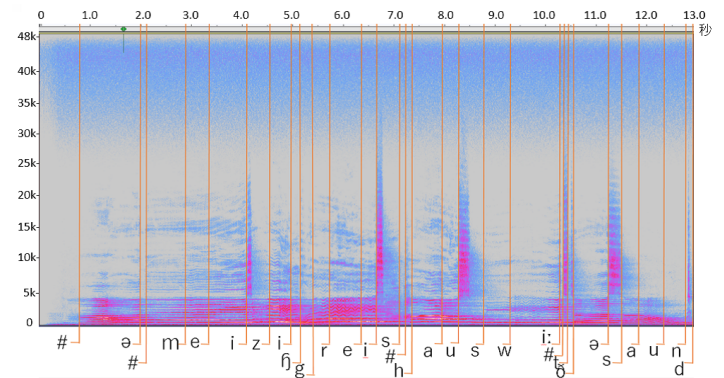


図 2: 分析対象歌声のスペクトログラム

3. オペラ歌手の歌声の加工による比較対照歌声の生成

3.1 加工方法

2 節で選定したハイレゾ音にカットオフ周波数 20kHz 及びカットオフ周波数 30kHz の下式の急峻な LPF をかけることによって高域成分をカットし、量子化精度 24bit で保存した。

$$y(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n_b + 1)z^{-n_b}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n_a + 1)z^{-n_a}} \quad (1)$$

n_a はフィードバックフィルター次数 (実験では 1124 次数)
 n_b はフィードフォワードフィルター次数 (実験では 1246 次数)

$$W = (1 - S) \cdot (f_{Nyquist} - F_{pass}) \quad (2)$$

$f_{Nyquist}$ はサンプリング周波数/2

F_{pass} はカットオフ周波数

s は steepness (実験では 0.9999999999999999)

w は遷移幅 (実験では 20.0000000028kHz)

(実験では 30.0000000018kHz)

図3は今回作成したLPFフィルターのフィルター(周波数)特性である。

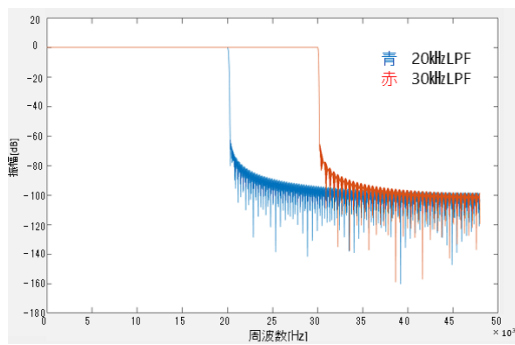
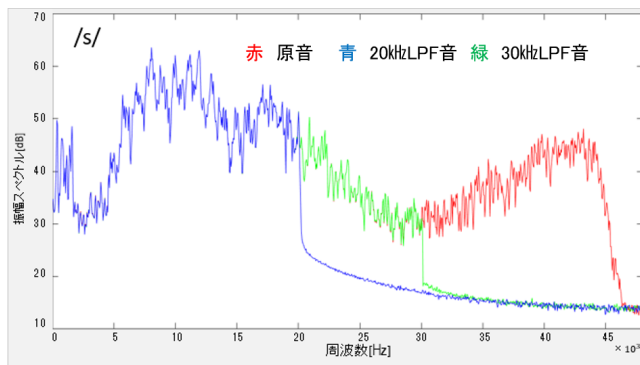
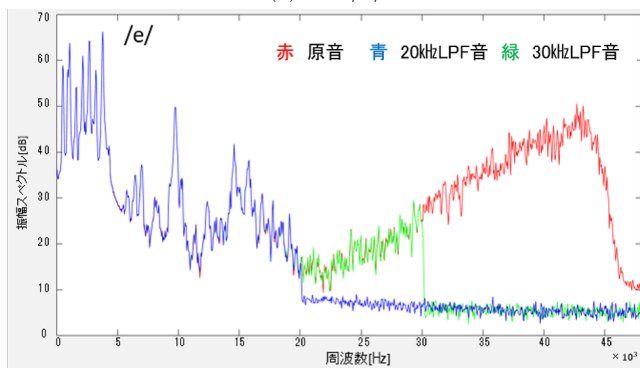


図3: LPFの周波数特性

図4はLPFを適用した音源と原音のスペクトルの図である。図3, 図4ともに, 所望の特性を示していることがわかる。



(a) 母音/e/



(b) 摩擦音/s/

図4: 3音源のスペクトル

3.2 原音声と加工音声の音声分析による比較

20kHzと30kHzのLPFをかけた音源と原音(図2)の母音/e/(6秒付近)と摩擦音/s/(11秒付近)の箇所から連続した3フレームの周波数ビン毎の振幅と対数振幅を求め, 3種類の音源の各組み合わせのスペクトル差の2乗を求めた(フレーム平均). 表1は各周波数帯域の差の2乗和である. 表より, 0~20kHzの周波数帯域では3音源間のスペクトル

差はないと言える. また20kHz~30kHzの周波数帯域では原音と30kHz LPF音, 及び30kHz~48kHzの周波数帯域では20kHz LPF音と30kHz LPF音でスペクトル差はないと言える. 一方, 原音では30kHz~48kHzの周波数範囲で雑音成分が非常に大きいと言える. 母音と摩擦音の比較では, 母音区間の20kHz~30kHz帯域でも周波数成分が観測されているが, 摩擦音区間では, 振幅の2乗で母音区間の約2倍の大きさである. なお, 摩擦音の定常区間の隣接フレーム間のスペクトル距離(振幅の差の2乗)は, 25kHz付近は35kHz付近よりも約1.6倍大きい. つまり, 摩擦音よりも雑音の方が時間的に定常である.

表1: 母音及び摩擦音の音源間のスペクトル差

(a) 対数振幅の差の2乗和

母音/e/			
周波数帯域	原音-20kHz	原音-30kHz	20kHz-30kHz
0~20kHz	7.34×10^{-11}	6.55×10^{-11}	1.65×10^{-11}
0~30kHz	1.53×10^{-8}	1.10×10^{-10}	1.51×10^{-8}
0~48kHz	4.22×10^{-6}	4.21×10^{-6}	1.56×10^{-8}
摩擦音/s/			
0~20kHz	1.98×10^{-10}	8.05×10^{-11}	2.00×10^{-10}
0~30kHz	1.45×10^{-6}	1.73×10^{-10}	1.46×10^{-6}
0~48kHz	5.56×10^{-6}	3.36×10^{-6}	1.46×10^{-6}

(b) 振幅の差の2乗和

母音/e/			
周波数帯域	原音-20kHz	原音-30kHz	20kHz-30kHz
0~20kHz	23.70	17.49	8.18
0~30kHz	30726.88	77.53	30088.47
0~48kHz	390544.74	359154.10	31564.43
摩擦音/s/			
0~20kHz	1.26	0.92	0.56
0~30kHz	54336.73	5.28	54295.08
0~48kHz	240376.05	182251.81	54920.61

3.3 スピーカーからの再生音の分析結果

計算機上で20kHz LPF音と30kHz LPF音は所望通り正しく作成されていることが分かったが, 聴取実験に使用する再生機から音が歪みなく正しく出力されているかを以下の機材を使用して確認を行った.

- ・マイク Earthworks 社 商品名 M30 (周波数特性 3Hz~30kHz)
- ・デコーダー ZOOM 社 商品名 F 8 (周波数特性 10Hz~80kHz)

マイクの周波数特性を図5に示す(製品の仕様書より).

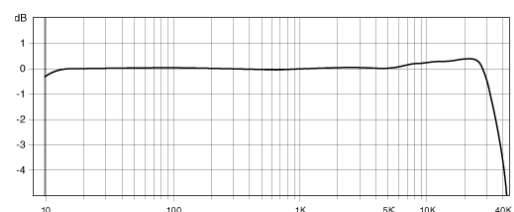
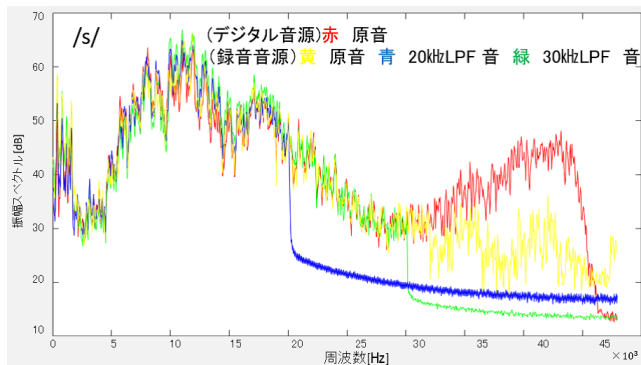
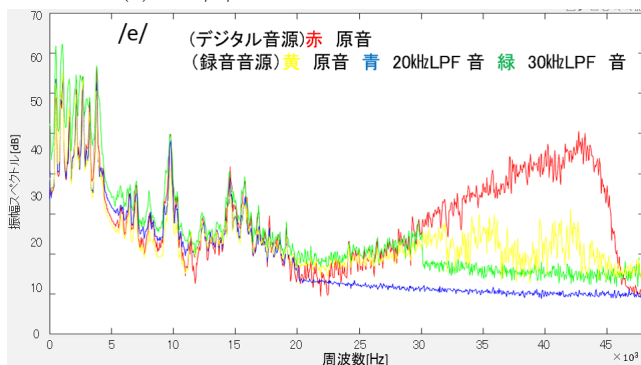


図5: マイクの周波数特性

図 6 に、スピーカーからの再生音の原音、20kHzLPF 音、30kHzLPF 音のスペクトルを示す。0Hz~20kHz までのスペクトルは 3 音源ともほぼ同一で、少なくとも 30kHz 以下では歪みなく出力されていることが分かった。



(a) 母音/e/の再生録音音源のスペクトル



(b) 摩擦音/s/の再生録音音源のスペクトル

図 6: 再生録音音源のスペクトル

4. 原音声と加工音声の聴取比較実験

4.1 比較内容と仮説

20kHzLPF 音対 30kHzLPF 音, 原音対 20kHzLPF 音, 原音対 30kHzLPF 音, 及び同じ刺激を組み合わせた 6 種類を比較する。本実験では、20kHz と 30kHz のカットオフ周波数で LPF をかけた歌声と原音の比較を行うにあたり、以下の評価項目に対して仮説をたてた上で比較を行いその仮説が正しいかを実験により検証する。

評価項目:

1. 高音がはっきりしている
2. 澄んでいる
3. 迫力がある
4. 広がりがある
5. 好き

仮説 1 30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音

ハイパーソニックポジティブ効果は 32kHz からと言われているが [4], これは楽曲による場合で、歌声では過去に研究例がない。本実験で使用した歌声は 25kHz 付近に

成分があり、これにより 30kHz LPF 音の方が 20kHz LPF 音より高い評価結果が出るのではないかと仮説をたてた。

仮説 2 原音 > 20kHzLPF 音

原音が可聴域を超えた周波数成分を含んでいるが、さらに高域に雑音成分も含んでいる。この雑音成分は人工的に意図せず組み込まれてしまっている成分であり、人工的に作られ組み込まれた可聴域を超える成分ではハイパーソニック効果は出現しない [4] ことから、影響が小さいのではと仮定し、原音は 20kHz LPF より高い評価結果が得られるのではないかと仮説を立てた。

仮説 3 30kHzLPF 音 ≥ 原音

これは歌声の成分は 30kHz 付近までしか存在せず、その帯域以上は雑音成分しか存在しないため上の仮説をたてた。雑音成分が無害だった場合” = ” が成り立つと予測される。

4.2 スピーカーによる聴取実験方法

(a) 部屋と機材

本実験では、以下のハイレゾ音源、アンプ、スピーカーを使用した。

- ・ハイレゾ音源
歌手名 森麻季 曲名「アメージング・グレイス」
- ・アンプ DENON 社 商品名 PMA-60
(最大 384kHz・32 ビットの PCM 信号再生可能)
- ・スピーカー FYNE AUDIO 社 商品名 F500
(周波数特性 45Hz~45kHz)

以上の機材を使い図 7 の部屋と配置関係で実験を行った。実験に用いた部屋は大学内の全面有孔ボードで囲まれた防音のスタジオである。

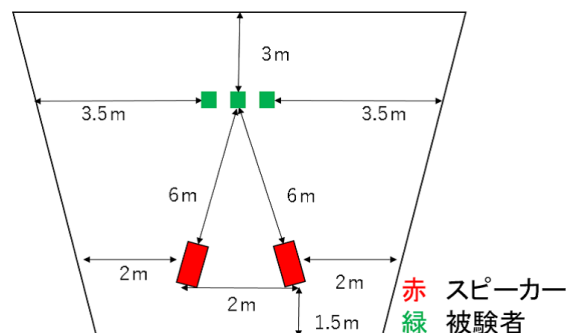


図 7: 部屋と実験の配置関係

(b) 被験者

文献 [7] からハイパーソニック効果の出現は、現役音楽家などの方が結果が良いという報告があるため、普段から歌声を扱う中部大学ボーカル部に所属する男性 9 名を対象とした。

(c) 評価法

2 つの比較対象の優劣を問うサーストンの一対比較法を 4.1

表 2: 聴取実験結果

(a) 項目別の「同じ」と回答した延べ人数

比較対象	1, 高音がはっきりしている	2, 澄んでいる	3, 迫力がある	4, 広がりがある	5, 好き	合計「項目」
20kHzLPF 音同士	11	9	8	10	14	52
30kHzLPF 音同士	10	15	14	13	13	65
原音同士	13	11	14	10	15	63
合計	34	35	36	33	42	180/270 (66.7%)
30kHzLPF 音/20kHzLPF 音	10	7	10	9	6	42
原音/20kHzLPF 音	9	9	8	10	3	39
30kHzLPF 音/原音	8	9	11	9	6	43
合計	27	25	29	28	15	124/270 (45.9%)

(b) 「項目別の仮説通りの回答」及び「仮説と矛盾した回答」の延べ人数

比較対象	項目		1, 高音がはっきりしている		2, 澄んでいる		3, 迫力がある		4, 広がりがある		合計	
	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾
30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音	7	1	9	2	7	1	8	1	31	5		
原音 > 20kHzLPF 音	6	3	6	3	8	2	5	3	25	11		
30kHzLPF 音 ≥ 原音	6	4	5	4	4	3	5	4	20	15		
合計	19	8	20	9	19	6	18	8	76/216 (35.2%)	31/216 (14.4%)		

節で述べた 5 項目の質問を用いて行った。2 つの音を提示し、「どちらの音源が良いか」を判断するために

1. 高音がはっきりしている (高評価) ↔ していない
2. 澄んでいる (高評価) ↔ 澄んでいない
3. 迫力がある (高評価) ↔ 迫力がない
4. 広がりがある (高評価) ↔ 広がりが無い
5. 好き (高評価) ↔ 嫌い

の 5 つの項目をアンケート形式で回答を求めた (「同じ」も含め 3 択)。

(d) 音の提示時間

今回の聴取実験は [1 分の音] → (15 秒休) → [1 分の音] → (45 秒休) を 1 セットとし構成した。ハイパーソニック効果出現の時間遅れの可能性を考慮して評価音を長めに設定し、音の間隔を長くし、ハイパーソニック効果の残留の影響を除去するために、次の評価音対の提示までの間隔を 1 分以上確保するのが一般的であるが、今回は聞き分けれるかという観点で実験を行うため、被験者に疲労感を与えず聞き分けるには十分と思われる長さを提示した。

(e) 提示音の組合せ

原音, 20kHz LPF 音, 30kHz LPF 音の音源を 2 つずつ組合せ、同じ曲の組み合わせは各 2 回、異なる曲の組み合わせは順序の入れ替えも合わせて各 2 回、計 12 セットの組合せをランダムに提示した。

4.3 スピーカーによる聴取実験結果と考察

聴取実験で得られたアンケートの結果を表 2 に示す。表 2(a) の結果から同じ音源の組み合わせに対しては「同じ」の回答数 66.7% に対して、異なる音源の組み合わせの「同じ」の回答数が 45.9% と少ないという結果が得られた。これより、同じ音源の組み合わせに比べ異なる音源の組み合わせの方が異なるように聞こえると被験者が判断できてい

ると推測できる。

次に、先に述べた仮説通りの結果が得られているのか検証した。

仮説 1 に関して、表 2(b) の”30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音”の結果から、仮説通りの合計の項目延数 31 項目に対して矛盾の合計の項目延数は 5 項目であった。以上のことから 30kHzLPF 音と 20kHzLPF 音の歌声を聞き分けることができ、30kHzLPF 音の方が高い評価結果を得られるという仮説が支持されることが分かった。これより、歌声の場合、20~30kHz の間の帯域に人体的影響を与える何かが含まれているのではないかと予測され、これがハイパーソニックエフェクトの影響ではないのかと考えられる。また、表には示していないが、評価項目 5 の「好き」に関しては仮説通りの方が矛盾に対する回答項目数が多くなるという結果は得られた。しかし、他の評価項目と比較すると、回答項目延数の偏りは少なかった。このことから、「好き、嫌い」は個人差に影響される傾向があると言える。

仮説 2 に関して、表 2(b) の”原音 > 20kHzLPF 音”の結果から、仮説通りの合計の項目延数 25 項目に対して矛盾の合計の項目延数は 11 項目であった。このことから可聴域を超えた周波数帯域に存在する雑音成分は影響が小さく、20kHz~30kHz に含まれる成分の影響の方が強いという仮説が支持されることが分かった。

仮説 3 に関して、表 2(b) の”30kHzLPF 音 ≥ 原音”の結果から、仮説通りの合計の項目延数 20 項目に対して矛盾の合計の項目延数は 15 項目と無視できないほど多くあった。このことから他の 2 つ (”30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音”, ”20kHzLPF 音 > 原音”) の比較結果より差は小さかったが、雑音成分を含まない 30kHzLPF 音が雑音成分を含む原音より高い評価を受けることという仮説は弱いながら支持されることが分かった。

表 3: 聴取実験結果

(a) 項目別の「同じ」と回答した延べ人数

比較対象	1, 高音がはっきりしている	2, 澄んでいる	3, 迫力がある	4, 広がりがある	5, 好き	合計「項目」
20kHzLPF 音同士	8	8	5	8	8	37
30kHzLPF 音同士	5	4	6	4	5	24
原音同士	7	7	9	7	7	37
合計	20	19	20	19	20	98/150 (65.3%)
30kHzLPF 音/20kHzLPF 音	2	2	0	2	4	10
原音/20kHzLPF 音	4	3	4	3	3	17
30kHzLPF 音/原音	3	6	6	3	7	25
合計	9	11	10	8	14	52/150 (34.7%)

(b) 「項目別の仮説通りの回答」及び「仮説と矛盾した回答」の延べ人数

項目 比較対象	1, 高音がはっきりしている		2, 澄んでいる		3, 迫力がある		4, 広がりがある		合計	
	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾	仮説通り	矛盾
30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音	5	3	5	3	6	4	5	3	21	13
原音 > 20kHzLPF 音	6	0	5	2	5	1	6	1	22	4
30kHzLPF 音 ≥ 原音	2	5	1	3	1	3	1	5	5	16
合計	13	8	11	8	12	8	12	9	48/120 (40.0%)	33/120 (27.5%)

4.4 ヘッドホンによる聴取実験方法

(a) 部屋と機材

本実験では、以下のハイレゾ音源、アンプ、ヘッドホンを使用した。

- ・ハイレゾ音源
歌手名 森麻季 曲名「アメージング・グレイス」
- ・アンプ DENON 社 商品名 PMA-60
(最大 384kHz・32 ビットの PCM 信号再生可能)
- ・ヘッドホン audio-technica 社 商品名 ATH-D900USB(周波数特性 5Hz~35kHz)

以上の機材を使い環境音が少ない部屋で実験を行った。実験に用いた部屋は大学内の学生実験室である。

(b) 被験者

スピーカーによる聞き分け実験の結果が良かった被験者を対象にボーカル部員の男性 3 名と本研究室の女性 2 名を対象とした。

(c) 評価法

スピーカーによる聴取実験と同じ評価法を用いる。

(d) 音の提示時間

スピーカーによる聴取実験と同じ条件で音を提示する。

(e) 提示音の組合せ

スピーカーによる聴取実験と同じ組み合わせで行う。

4.5 ヘッドホンによる聴取実験結果と考察

聴取結果で得られたアンケート結果を表 3 に示す。表 3 (a) の同じ刺激の組み合わせの「同じ」と回答した合計 (65.3%) と異なる組み合わせの「同じ」と回答した合計 (34.7%) の結果から、同じ刺激の組み合わせか、そうでないかの判断はヘッドホンでもスピーカー同様に識別ができていたことがわかった。

3 つの仮説のうち、仮説 2 の表 3(b) の”原音 > 20kHz-

LPF 音” は支持されている。一方、仮説 1 の”30kHzLPF 音 > 20kHzLPF 音” は少し弱いが支持されている。

しかし、仮説 3 の”30kHzLPF 音 ≥ 原音” は矛盾した回答が多く、仮説とは逆の結果となった。

これらのことから、ヘッドホンでは、どちらの音源の方が良いかは一貫した傾向がなく、ハイパーソニックエフェクトの効果は小さいと言える。つまり、スピーカーでは可聴域を超えた値にある雑音成分の有無よりも、可聴域を超えた歌声成分の有無の方が識別しやすい(効果が大きい)が、ヘッドホンでは逆の結果がえられた。

以上から、歌声にはハイパーソニックエフェクトが含まれており、スピーカーの場合はそれを感じ取ることができ、ヘッドホンでは感じ取ることが難しいと考えられる。この結果は文献 [4] の楽器音の結果を歌声でも支持している。

5. むすび

本実験より、30kHzLPF 音と 20kHzLPF 音を聞き分けられ、アンケート結果から 30kHzLPF 音の方が 20kHzLPF 音よりも高い評価が得られることが分かった。

また、原音の方が 20kHzLPF 音よりも高い評価が得られた。しかし、”30kHzLPF 音 ≥ 原音” の仮説 3 に関しては、スピーカー音ではやや弱いが支持され、ヘッドホンでは支持されなかった。

3 つの仮説が支持された結果は刺激をスピーカーにより全身で浴びた場合のみで、ヘッドホンにより聴覚器官のみに刺激を与えた場合は 2 つの仮説は支持されたが、他の 1 つは否定され一貫した結果は得られなかった。この要因が、ハイパーソニックエフェクトなのではないかという仮説を支持する結果が得られた。但し、ヘッドホンでも原音と 20kHzLPF 音、及び 30kHzLPF 音の違いについての区別はできた。

しかし, まだ断定するには検討を要する. 今回使用した音源は高域に雑音を含むハイレゾ音源で, 本来であれば直接歌声を録音し, 高域周波数付近に雑音がない歌声での同様の実験が必要と考える. 今回の結果がハイパーソニックエフェクトが要因なら脳波 (α 波) の有無でも確認ができると考えられ, 現在要因の特定を検討している.

参考文献

- [1] 大橋力, ハイパーソニック・エフェクトへの招待, 科学 83-3, pp.296-301, 岩波書店 (2013)
- [2] Yagi R, Nishina E, Honda M, Oohashi T: Modulatory effect of inaudible high-frequency sound on human acoustic perception, Neuroscience Letter 351, pp.191-195 (2003)
- [3] 本田学: ピアノが高周波音を出さず、チェンバロが出すのはなぜか, NATIONAL GEOGRAPHIC 2月号 (2014)
- [4] 大橋力: ハイパーソニック・エフェクト, 岩波書店 (2017)
- [5] 森亮太, 山本一公, 中川聖一: オペラ歌手の歌声におけるハイパーソニックエフェクトの存否の検証, 日本音響学会講演論文集, 2-11-14, pp.1215-1218 (2020.3)
- [6] 小野寺英子: ハイパーソニック・エフェクトによる脳賦活に基づく音環境快適化の研究——鉄道の騒音環境改善への応用——, 総合研究大学院博士論文 (2007).
- [7] 山本竜太, 金只直人, 水町光徳: ハイレゾリューションオーディオの音質評価, 産業応用工学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 52-57 (2013)
- [8] 福田祐樹, 石光俊介: 検査信号を用いたハイレゾリューション音源の識別可能性の検討, 日本音響学会講演論文集, 3-P-32, pp.697-700 (2019.9)