

ハイパーソニック・エフェクトについて

*大橋 力、**仁科エミ、+不破本義孝、+河合徳枝、++森本雅子

*ATR人間情報通信研究所・千葉工業大学、**放送教育開発センター、
+財団法人国際科学振興財団、++東京大学大学院

〒619-02 京都府相楽郡精華町

あらまし 26kHzをこえる高周波成分は、それ単独では人間に音としてきこえないにもかかわらず、それをふくんだ音は、それを除外した音にくらべて、脳波 α 波ポテンシャルを統計的に有意に増大させるとともに共存する可聴音をより快適に感受させる効果をもつことをみいだした。この高周波成分のもつ感性効果「ハイパーソニック・エフェクト」について、研究の経緯、使用したシステム、高周波成分の生理学的・心理学的効果などについて概観する。

キーワード ハイパーソニック・エフェクト、高周波成分、脳波 α 波、生理学的・心理学的評価

“H y p e r s o n i c E f f e c t”

OOHASHI Tsutomu, NISHINA Emi, FUWAMOTO Yoshitaka, KAWAI Norie & MORIMOTO Masako

*ATR Human Information Processing Laboratories, **National Institute of Multimedia Education
+Foundation for Advancement of International Science, ++The University of Tokyo

Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02

Abstract We have developed a new system for sound presentation and a novel technique to measure brain electric activity, and used them to determine if high frequency components above the audible range can influence sound perception in ways not discerned by the method of paired comparisons. We report that high frequency sound induces activation of α -EEG rhythms that persist in the absence of high frequency stimulation, and can affect perception of sound quality.

key words Hypersonic Effect, High frequency, α -EEG, Physio-psychological Evaluation

1. はじめに

人間に音として聞こえる空気振動の周波数帯域の上限は、個人差はあるものの20kHzをこえることはきわめてまれで、ふつう15kHz前後に限界をもつ人がおおい。またオーディオ信号にふくまれる高周波成分が音質におよぼす影響も、Plenge¹⁾、村岡²⁾らをはじめとする実験によって、16kHz以上の帯域ではみとめられないことがしめされている。しかし、商業ベースで販売される高水準の音質をもつレコードをつくっているミュージシャンやミキサーたちのあいだでは、可聴域上限を1~2オクターブ以上うわまわる高周波までカバーした特性をもつ機材が、より音質がすぐれているとしてこのんでつかわれている。また、LP全盛期には、50kHzをこえる高周波帯域のイコライジングが、音質向上を目的として一部でおこなわれていた。LPとCDとを比較すると、LPの音質の方がよりこのましいという見解は、職業的音楽家やミキサーだけでなく、一般ユーザーのなかでも無視できない勢力となっている。これを説明する根拠として、LPは50kHz以上まで高周波を記録・再生できるのにCDはほぼ20kHzが上限となることが指摘されている。つまり、可聴域をこえる高周波の感性反応については、音にかかわる感性情報処理の実質をあつかう芸術家・技術者の認識と、それを客観的に評価しようとする研究者の認識とが、無視できないへだたりをもち、それに対する説得力のある説明も妥当性のたかい仮説もなりたないまま推移してきた。

一方、感覚情報に対する人間の反応を計測する生理学的手法は、とくに脳科学と計測技術の進歩によって近年いちじるしい前進をみせている。わたくしたちは、従来の主として音響心理学的手法に限定されたアプローチをみなおすとともに、生理学的手法を積極的に導入して、可聴域をこえる高周波成分の人間への影響をあらためて検討することを構想した。

2. 高周波成分の生理的影響の検討

2.1 材料と方法

①音試料：早稲田大学山崎芳男教授が開発した高速標準化1ビット方式³⁾によるデジタル・レコーダ（サンプリング周波数1.92MHzまたは3.072MHz）を中心に、広帯域にわたって高忠実度の録音が可能なシステムを構成して、実験用の音試料候補を収集した。それらの周波数パワースペクトルを分析した結果、楽器音の一部に、可聴域上限をこえる高周波成分を

豊富にふくむものがみいだされた。なかでもインドネシア・バリ島につたわる青銅製打楽器アンサンブル“ガムラン音楽”は、瞬間的には100kHzに達する豊富で強力な高周波成分をもち、この研究に適合性のたかい呈示用音試料となりうることがわかった⁴⁾。

②再生系：高周波成分の存在・除外に関与する回路構成が実験内容を混乱させることをふせぐために、信号を22kHzまたは26kHz以上の成分とそれ以下の成分とにわけてそれぞれを独立に再生する“バイチャンネル再生系⁵⁾”（Fig. 1）を開発した。また、超高帯域におよぶ忠実な再生を実現するために、100kHzまでほぼ平坦な特性をもつスピーカを開発した。これらによって、被験者の身体位置で、音源とした電気信号にほとんどひとしい高周波をふくむ空気振動を実現することを可能にした。

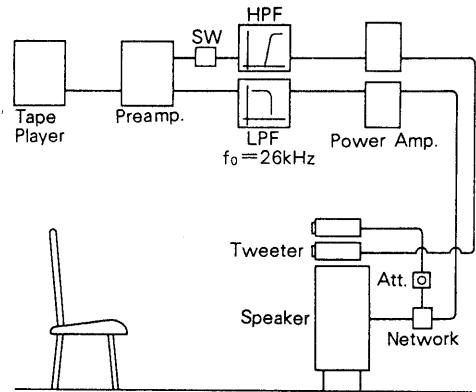


Fig. 1 バイチャンネル再生系

③脳波を指標とする計測法の改善：対象者の心身の状態を意識・無意識両面にわたって直接的・定量的に把握できる生理的指標を活用することは、さまざまな領域で待望されている。わたくしたちは、メディア情報の影響を敏感かつ総合的に反映しうる現実的な生理指標として、まず、自発脳波に注目した。ただし従来の脳波計測法は、病理現象検出をおもな目的として設計されているので、わたくしたちはこれを健康人のメディア情報に対する感性反応の計測に応用可能にする手法を開発してきた。すなわち、無線でデータ送信をおこなうことで被験者に行動の自由をあたえるテレメトリーの導入、心理的・生理的ストレスをおおはばに低減させた計測環境の構築などを中心に、計測方法全体をあらためてくみたてた。同時に、長時間の脳波データによる画像解析⁶⁾、数量化、統計的検定の導入などによって、信頼性の

よりたかい分析法を開発した。

④**実験手順**：バリ島で録音したガムラン音楽(205秒)を音試料とし、パイチャンネル再生系をもちいて、高周波を豊富にふくむガムラン音(Full Range Sound: FRS)と、そこから26kHz以上の高周波をカットしたガムラン音(High Cut Sound: HCS)とをくりかえし再生し、目をとじた状況の被験者に呈示して、そのあいだの脳波を連続して記録・分析した。また、26kHz以上の高周波成分のみの呈示もおこなった。被験者は健康な男女16名である。

2.2 結果⁷⁾

被験者により差はあるものの、FRSの呈示をはじめてから約20秒後に脳波 α 波ポテンシャルが顕著に上昇することがみだされた。これについでHCSを呈示すると、音呈示開始後60秒~100秒経過した時点で α 波ポテンシャルが低下するという傾向がみだされた。

この反応のもつ時間的おくれを考慮して、音呈示を開始して60秒経過した後からのデータのみを対象として、高周波成分の有無による α 波帯域のパワーの変化を定量的に検討すると、大多数の被験者で、HCSが呈示されたときにくらべて、FRSが呈示されたとき、 α 波ポテンシャルが増大する(Fig. 2)。こうした「可聴域をこえる高周波による α 波ポテンシャルの増大」は、危険率0.01以下で支持された。

しかし、ガムラン音楽の26kHz以上の高周波成分だけを呈示して無呈示の場合と比較する実験では、 α 波ポテンシャルの増大は有意の水準に達しなかった。

同様の実験結果が、目をひらいた状態、ビデオ映像を呈示した状態でもえられている。

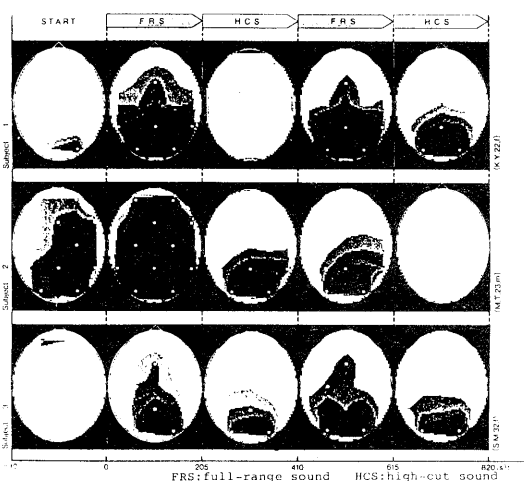


Fig. 2 高周波共存・除外による α 波ポテンシャルの変化

2.3 脳血流を指標とする高周波成分の生理的影響⁸⁾

わたくしたちは、より直接的に脳の活性を計測しうるポジトロン断層法(PET)をもちいて、高周波成分の生理的影響を検討した。12名の被験者をもちいた実験により、自然の高周波が共存する音を呈示したとき、その22kHz以上の高周波成分をカットした音を呈示したときとくらべて、脳幹および視床の血流量が統計的に有意に増大することをみだしている。いずれも生命維持や感性情報処理に重要なかわりをもつ脳深部の重要な臓器に活性化がみられることが注目される。しかも、視床の血流量と α 波ポテンシャルとのあいだにつよい相関が観察されており、電子メディアの人体影響を検討するうえで重要な知見がえられつつある。

3. 高周波成分の心理的効果についての検討⁷⁾

3.1 Thurstoneの一対比較法による検討

①**目的**：これまで音質のちがいを評価するための心理実験の基準にされてきたCCI Rの推奨する一対比較法⁹⁾は、Thurstoneの原理¹⁰⁾にもとづくもので、10秒前後のみじかい音試料をふたつ対にして、1秒前後のごくみじかいインターバルをはさんでつづけて聴かせ、ふたつの音の質がおなじかちがうかをこたえさせる。この方法は、脳がただひとつの内部状態しかもたず、つねに同一モードの情報処理をおこなうことを前提にすれば、期待した信頼性を実現できる可能性が高い。ところが高周波をとまなう音は、約20秒の遅延のち α 波のポテンシャルを増大させ、一度増大したそのポテンシャルは、高周波をのぞいたあと60~100秒という長時間残留している。つまりこの遅延や残留の期間は、脳の活性がベースラインとは別な状態に変化していることを予測させる。

②**方法**：そこでわたくしたちは、これまで採用されてきた心理実験法の限界を摘発しつつよりの確に感性反応を検出できるような心理実験の手続きを工夫して実験をこころみた。この実験は、生理学的評価実験と同一の音試料および再生系をもちいておこなわれた。この実験は、内部がふたつの実験モジュールで構成され、一方は高周波への接触頻度がたかくその残留効果がよりいちじるしいように、もう一方はそれがより希薄であるように、全体としてみると従来CCI Rが勧告している国際的な基準に合致するように設計されている。被験者数は40名である。

③**結果**：まず、全体を一括した従来の公定法を踏

襲する内容に該当するわくぐみでt検定をおこなうと、先行諸研究と同様に、可聴域をこえる高周波の有無は音質差として知覚されないという結果がえられる。ところが、おなじ実験を、モジュールごとに独立して統計処理をおこなうと、高周波に接する機会がすくないように設定された一方の実験モジュールからは、危険率0.05以下というひくい有意水準ながら、可聴域をこえる高周波の有無が音質差として知覚されているという結果があらわれた。もう一方の高周波に接する頻度のたかいモジュールからは、高周波の有無が負に知覚されている、つまり偶然におこるまちがいよりもずっとまちがいがおこりやすいという特異な結果が危険率0.005以下というたかい有意性であらわれた。この両者を一括した全体では、正・負の有意性が相殺されて、有為な差がみかけ上、消失していたことになる (Fig. 3)。

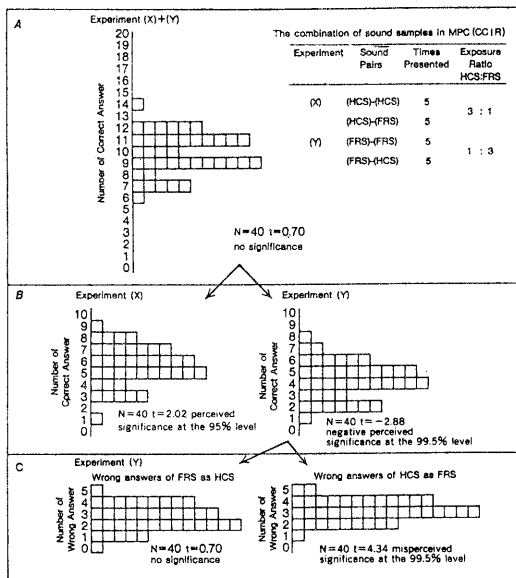


Fig. 3 Thurstoneの対比較法による音質変化検知実験の結果

3.2 Scheffeの対比較法による検討

①方法：最大100秒まで観察されている高周波の効果の残留時間を十分うまわる205秒のガムラン音楽をつかい、26kHzにカットオフ周波数を設定して、いろいろな音質を表現した評価語対について回答をもとめるシェッフェの方式¹¹⁾による対比較法によって、高周波の有無がどのような音質差として知覚されているのかをしらべた。被験者は26名である。

②結果：かなりたかい有意水準で高周波の有無が

音質差として検知されていることがしめされた (Table 1)。高周波をカットしない音は、高周波がカットされた音よりもよりやわらかく、余韻ゆたかで、楽器のバランスがよく、耳あたりがよく、ニュアンスの変化にとむものとして知覚されている。またこの実験でつかわれた22kHz以上の高周波成分だけを抽出し、それを単独で全被験者に呈示する実験をおこなったところ、これを音として検知した被験者はひとりもいなかった。

以上の結果をまとめると、ガムラン音の26kHz以上の高周波成分は、それ単独では人間に音としてきこえないにもかかわらず、それをふくんだ音は、それを除外した音にくらべて、脳波α波のポテンシャルを有意に増大させるとともに、音をより快適に感受させる効果をもつ。この効果をわたくしたちは「ハイパーソニック・エフェクト」と名づけた。

Table 1 Scheffeの対比較法による主観的音質評価実験の結果

高周波共存音-高周波非共存音	信頼度
柔らかい-固い	99.9% (q=5.33)
余韻型-アタック型	99.5% (q=5.01)
各楽器音が釣り合っている-特定の楽器が目立つ	99.5% (q=4.57)
耳当たりよく響く-刺激的に響く	99.5% (q=4.44)
リズムの変化が大きい-リズムの変化が小さい	95.0% (q=3.63)
低音が目立つ-高音が目立つ	- (q=2.25)
厚い-薄い	- (q=1.70)
好き-嫌い	- (q=1.12)
きめがこまかい-きめがあら	- (q=0.14)

4. 音響知覚の二次元モデル

それではこのような高周波の効果は、どのようなモデルによって説明できるだろうか。高周波をともなう音を呈示したとき観測される脳波α波ポテンシャルの増大が高周波成分を除外したあとかなりながい時間にわたって残留することは、脳内神経伝達機構の面からみると、高周波によって活性化される神経系では、神経伝達物質のシナプス間隙での消失がゆっくりおこなわれること、そしてシナプス後ニューロンのイオンチャンネル制御において、二次伝達メッセンジャーが関与していることがかんがえられる。一方、Scheffeの対比較実験の結果は、高周波成分の共存が音の快適感をたかめるという心理的効果をともなっていることをしめた。これは、高周波の共存が、快感誘起に機能する神経系の活性化に関連していることを推定させる。以上のべたふたつの性質をあわせもった神経回路としては、脳の深部

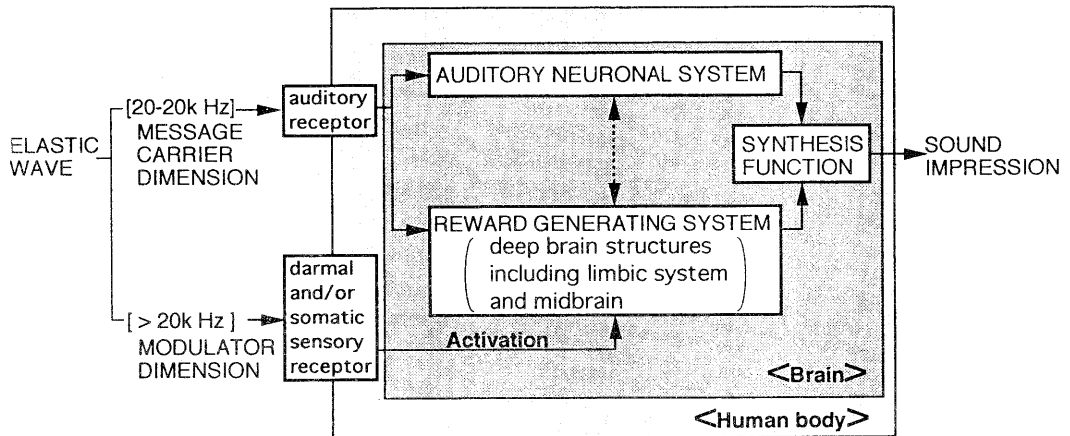


Fig. 4 音響知覚の2次元モデル

構造を中心にひろがるモノアミン作動神経やオピオイドペプチド作動神経など、報酬系神経回路がもっとも有力なその候補とおもわれる。

以上の背景にもとづいて、わたくしたちは、人間の音に対する感受性について、つぎのような二次元知覚モデルをたてた (Fig. 4)。すなわち、そのひとつの次元は20Hz~20kHzのいわゆる可聴帯域で、メッセージ・キャリアーとしてはたらき、聴覚神経系で処理される。もうひとつの次元は20kHzをこえる高周波領域で、モジュレーターとして作用し、聴覚系とはべつな体性感覚系を経由して、あるいは直接に、報酬系神経回路にはたらきかけて、脳の感受性をプラスの情動反応を増幅する方向へと変調させる。そしてこのふたつの次元の反応が合成されることによって、音ないし空気振動に対する印象が形成されるというモデルである。このような脳の報酬系神経回路網のはたらきを考慮にいれた相互作用モデルをたてることによって、快適な自然音にふくまれる「可聴域をこえ音としてはきこえない」高周波成分が強調されるか制限されるかに対応して可聴域の音質が左右されるという現象を、おおきな矛盾なく解釈することができるのかんがえている。

5. LP・CD再生音をもちいた高周波成分の生理的・心理的影響の検討^{1,2)}

5.1 材料と方法

この研究のひとつの出発点はCDという音楽メディアの登場にあった。そこで最後に、LPからCDへの過渡期において、50kHzをこえる豊富な高周波成分をふくんだ同一のアナログテープを共通の音源と

して製作されたLPとCDとをえらび、その同一箇所を音試料として、LP・CD再生音が被験者におよぼす感性効果を検討した結果をのべる。

呈示する音試料は、[LP再生音 (LPのFull Range Sound=LP-FRS)]、[CD再生音]のほかに、LPにだけふくまれている可聴域をこえる高周波の効果抽出するために、[LP再生音からCDの記録周波数上限にあたる22kHz以上の成分をカットした音 (LPのHigh Cut Sound=LP-HCS)]を準備した。被験者は心理実験は10名、生理実験は8名である。

5.2 結果

まず、高周波成分がみちびく感性反応の遅延・残留効果に配慮した心理実験をおこない、LP再生音 (LP-FRS)とCD再生音との間に、そしてまたLP音とそれから高周波成分をとりのぞいたLP-HCSとの間にはよりおおきく、統計的に有意の音質差が検知されることをあきらかにした。LP-FRSとLP-HCSとの音質のちがいは、LP再生音とCD再生音との音質のちがいと共通性がたかい。そのうえ、LP-HCSとCD音との間には、統計的に有意の音質差は検知されなかった。これらの結果は、LPとCDとの音質のちがいのおおきな要因が、LPにだけふくまれCDにはふくまれていない可聴域をこえる高周波の有無におおきくかかわっていることを示唆する。

つぎに、音をきいているときの脳電位活性を比較計測してみると、LP-FRSが呈示されているときのα波のポテンシャルはかなりたかく、LP-HCSとCD音が呈示されているときには、その値はずっと低下していることがしめされた。α波ポテンシャルを数量化して検定をおこなったところ、LP音とLP-H

CS、およびLP音とCD音とのあいだのポテンシャルの差には、危険率0.01で有意性がみとめられた。LP-HSCとCD音とのあいだのポテンシャルの差はいさく、有意差はみとめられなかった。さらにLP再生音は、音をきくまえにくらべて α 波をあきらかに増大させ、その状態をかなり安定して維持することが観察された。それに対してCD再生音では、時間とともに音をきくまえよりも α 波のポテンシャルを減少させていくという注目すべき傾向がみられた。

メディアをもちいた音楽聴取は数十分以上におよぶ場合がおおいので、高周波成分の有無による生理的影響のちがいは時間とともに蓄積、増大し、より顕著なものになっていく可能性がたかい。とりわけこの実験において、CDの音をながくきいていると、音をきくまえよりも快適性の指標になる α 波のポテンシャルが低下していくことには注意を要する。人間の脳とメディア情報環境との調和の面から慎重に検討する必要があるとかがえられる。

文 献

- 1)Plenge, G. et al.: Which bandwidth is necessary for optional sound transmission. Preprint of 62nd AES conv., 1979.
- 2)村岡輝雄ほか: VTRを応用したPCM録音再生システムにおける聴覚的検討について、信学技報EA78-32、19-24、1978.
- 3)Yamasaki Y.: Signal processing for Active Control- AD/DA Conversion and High Speed Processing, Proc. of International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, 21-32, 1991.
- 4)大橋 力ほか: 民族楽器音に含まれる可聴域をこえる高周波成分について、日本音響学会平成7年度秋季研究発表会講演論文集、937-938、1995.
- 5)大橋 力: 音環境に対する人間の感受性に関する基礎的研究、文部省「環境科学」特別研究昭和61年度告、R52-1、68-84、1987.
- 6)Duffy, F.H. et al.: Brain electric activity mapping, A method for extending the clinical utility of EEG and evoked potential data, Ann. Neurorol., 5, 309-332, 1979.
- 7)Oohashi T. et al.: High Frequency Sounds above the Audible Range Affect Brain Electric Activity and Sound Perception, AES 91st Convention Preprint 3207, 1-25, 1991.
- 8)Oohashi T. et al.: Activation of Deep Brain Structure by Sound Frequencies above the Audible Range in Human, Proc. of Fourth IBRO World Congress of Neuroscience, 378, 1995.
- 9)CCIR Recommendation 562, 1978, 1986.
- 10)Thurstone, L.: A low of comparative judgement, Psychol. Rev. Vol. 35, 273-286. 1927.
- 11)Sheffe, H.: An analysis of variance for paired comparisons, L. Am. Atat. Ass. 47, 381-400, 1952.
- 12)大橋 力ほか: LPとCDとの音質のちがいに ついて-生理学的・感性科学的検討、信学技報HC94-18、15-22、1994.