

ハイパーソニックは体のどこから受容されるのか

—受容経路と二次元知覚モデル

八木玲子

やぎ れいこ
東京成徳短期大学

ハイパーソニック・エフェクトを発現させる超高周波を、人間はどこで「聴いて」いるのか——ハイパーソニック・エフェクトを考えるうえで、非常に重要な問題がここにあります。というのも、ハイパーソニック・エフェクトを発現させる超高周波(およそ20 kHz以上の周波数)は、人間の耳では「聴こえない」とされているからです。

本稿では、その受容経路の発見と、それに基づく人間の音に対する〈二次元知覚モデル〉について報告します。

私たちは、一連の実験を通じて、ハイパーソニック・エフェクトを発現させる超高周波が、耳からではなく、耳以外の体表面から受容されることを明らかにしました。また、この独自の知見に基づいて、音知覚の新たなモデルを構成し、提案しました。

1 実験のデザイン

ここでご紹介する実験は、ハイパーソニック・エフェクトの発現に、人の耳、つまり気導聴覚系だけが関与しているのか、それとも耳以外の何らかの器官が関与しているのかという点の確認を目的としたものです。そのために、実験は以下のよう

Which part of the body senses the hypersonic sound?: Receptive mechanism and two-dimensional sound perception model
Reiko YAGI

1-1 呈示刺激

まず、呈示刺激として、あらかじめハイパーソニック・エフェクトを発生させることが確認されている自然音源、バリ島の〈ガムラン音楽〉の超広帯域録音物の周波数成分を、フィルター(境界周波数=22 kHz)を使って可聴域成分(以下〈可聴域〉)と、可聴域をこえる超高周波成分(以下〈高周波〉)とに分割したものを準備します。

1-2 呈示条件

次に、そうして作成した〈可聴域〉と〈高周波〉のそれぞれを、被験者の耳つまり気導聴覚系にのみ選択的に呈示した場合と、気導聴覚系を除く身体表面全体に呈示した場合とについて、両者の間でハイパーソニック・エフェクトの発生に差が生じるかどうかを調べます。

〈可聴域〉と〈高周波〉の呈示の組み合わせとして設定したのは、以下の四つの条件でした。(音源の再生にあたっては、後述の〈バイチャンネル再生系〉を使用しました。〈バイチャンネル再生系〉は、〈可聴域〉、〈高周波〉をそれぞれ別の回路を用いて独立に再生します。)

- 条件A: スピーカーから〈可聴域〉、〈高周波〉の両方を被験者の全身に暴露します。今回用いる音源と実験システムでハイパーソニック・エフェクトが発現することを確かめる再現実験です(ハイパーソニック・エフェクトの発現が知られている標準的な呈示方法²⁾によります)。

- 条件B: オリジナルに作ったバイチャンネル・イヤフォン(後述)を使い、〈可聴域〉と〈高周波〉の両方を被験者の耳(気導聴覚系)のみに呈示し

ます。これにより条件Aと同じ程度のハイパーソニック・エフェクトが発現すれば、ハイパーソニック・エフェクトの受容経路が気導聴覚系にあることがわかります。

・条件C：〈可聴域〉をイヤフォンを経由して気導聴覚系に、〈高周波〉をスピーカーから呈示して被験者の全身に暴露します。これでハイパーソニック・エフェクトが発現すれば、第一に、その発生に関わる気導聴覚系以外の何らかの振動受容系が人間の体表面に存在する可能性が考えられます。第二に、たとえば〈高周波〉によって被験者をとりまく大気の状態などが変化し、その二次的な作用として被験者に特別な反応が惹き起こされたといった音以外の要因が関与する可能性も考えられます。

・条件D：条件Cから示唆される二つの可能性のどちらに該当するかを検討するために、刺戟の呈示方法は条件Cと同一のまま、被験者の身体をすっぽりと覆って、スピーカーから呈示される〈高周波〉をできるだけ完全に遮断し、反応の要因が音か音以外にあるかを確認します。

1-3 計測指標とストラテジー

実験の計測指標としては、ハイパーソニック・エフェクトの発生を鋭敏にとらえることができ、互いに異なる原理に基づく二つの計測・評価手法が採用されました。自発脳波を指標とし、無線伝送方式を使った生理学的計測法²と、最適聴取レベル調整法を用いた行動学的評価法³です。

無線伝送方式による脳波計測は、ケーブルの発する機械振動性のノイズを出さないうに、計測の際被験者がベッド上に仰臥する必要がなく、呈示音を体表面の広い領域に到達させることが容易に実現します。なお、この実験では特に、中心頭頂後頭部の7電極から記録された自発脳波 α_2 帯域パワーの平均(alpha-EEG)を指標に用いました。ここで用いた脳波 α 波リズムのポテンシャルという指標は、私たちの先行研究^{2,4}により、また他の研究グループによる報告⁵によっても、中脳や間脳を含む基幹脳領域の活性化をかなり忠実に反

映することが明らかになっているため、ハイパーソニック・エフェクト発現の指標として適切と考えられます。

基幹脳は、広範囲調節系に属する報酬系の拠点として前頭前野をはじめとする脳内のさまざまな部位にモノアミン神経系を投射しており⁶、報酬系のもつ欲求の発生とその成就にともなう快感の誘起によって⁷、接近行動を誘発すると考えられます。この仕組みに注目して今回の実験のもうひとつの計測対象となったのが、〈最適聴取レベル〉という指標です。これは、被験者が意識できないような、または簡単に言葉で表現することのできないようなわずかな音質の違いを検出可能とする実験手法です^{8,9}。その基本的なストラテジーは、上記の報酬系が導く接近行動のひとつとして、〔被験者はより好ましい音刺戟をより大きな音量で受容するようふるまう〕という行動特性を利用することにあります。この設定下で被験者が〈高周波〉を含む音をより大きな刺戟すなわち音量で受容しようとするふるまうならば、それはハイパーソニック・サウンドによる脳の報酬系の活動の向上、すなわちハイパーソニック・エフェクトの発現を反映する適切な指標となりえます。

この実験では、〈高周波〉を含む音と〈可聴域〉のみの音とを、どちらであるかわからないように再生しながら、被験者自身がリモートコントローラーを使ってアンプのボリュームを操作し、ちょうどよいと感じられる音の大きさに調整します。こうして再生された音量を積分型騒音計で等価騒音レベルとして計量し、多数の実験例について統計処理を行うと、〈高周波〉を含むハイパーソニック・サウンドの呈示下では、〈可聴域〉のみの音に較べてより大きな音量で聴こえるように、無意識的かつ自発的に音量調整が行われることがわかっています³。

2 実験の実際

以上の実験のデザインに基づいて、現場の実験準備を進めました。(なお、本稿で触れていない実験の評

細については、この実験を報告した論文¹⁰をご参照ください。

2-1 実験システム

音の呈示には、ハイパーソニック・エフェクトの研究チームが独自に構成し、一連の実験で使ってきた〈バイチャンネル再生系〉という回路構成をもつシステムを使いました(図1)¹⁰。

従来の音響学の分野で使われてきたシステム(図1-A)では、音源となる電気信号を二つに分岐し、一方はそのまま呈示する「All Pass 条件」とし、もう一方は一定の特性をもった「Low Pass」フィルター——所定の値よりも高い周波数成分をカットする作用をもつ電子回路——を通過させて「Low Pass 条件」として呈示できるように構成されています。したがって、All Pass の信号と、フィルターを通過した Low Pass 信号とは互いに異なる伝達特性をもつ別々の回路を通過して呈示されることとなります。このとき、たとえば、フィルター回路は、通過する Low Pass 信号に無視できない特性の凹凸を生じさせ All Pass 信号との不一致を可聴域内に導く可能性があります。また、信号に含まれる周波数成分によって回路を通過する速度が不均質化する群遅延特性や、フィルター以降のアンプやスピーカーを通過する際、互いに異なる周波数成分間の相互作用によって非線形歪が発生する可能性も避けられません。これらはいずれも音質の違いの原因となりうるため、この伝

統的なシステムを使って呈示した二つの音の間に何らかの音質差が検知されたとしても、それが All Pass と Low Pass との信号成分の純粋な違いによるものとはいいきれず、Low Pass 信号に加わった回路構成上の問題に起因する可能性を否定することが理論的に不可能です。

それに対して、ハイパーソニック・エフェクト研究チームが開発し、この実験でもちいたバイチャンネル再生系(図1-B)では、これらの問題が原理的に回避されています。この回路では、元の電気信号をまず〈可聴域〉と〈高周波〉とに分け、それぞれをスイッチで ON/OFF できるようにし、かつ、双方が完全に独立した回路(バイチャンネル)で空気振動として再生できるようになっています。

図2が、この実験で使ったバイチャンネル方式の音呈示システムです。

音源信号は、22 kHz 以下の可聴音(〈可聴域〉)と、22 kHz 以上の超可聴域の音(〈高周波〉)に分離され、独立に増幅された後、スピーカーまたはイヤホンから、それぞれが別々にあるいは同時に呈示されます。

スピーカーとイヤフォンは、いずれもオリジナルに開発したものを使用しました。イヤフォンは、50 kHz をこえる超高周波まで良好な応答をもちしかもバイチャンネルの構成をもつ既製品が存在しないため、実験に先立って独自に開発したものを使用しました(写真1)。これは、イヤパッドのな

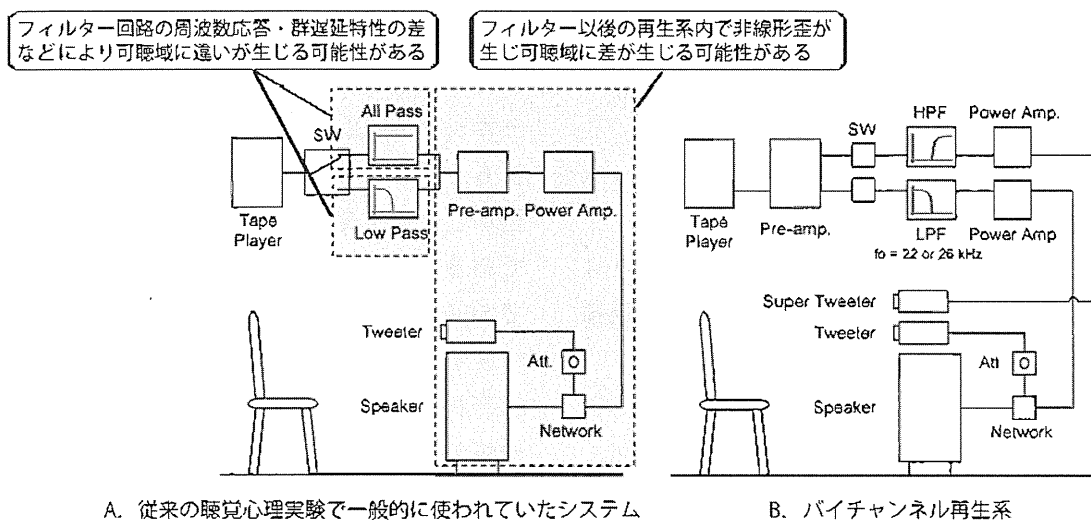


図1—バイチャンネル再生系¹⁰

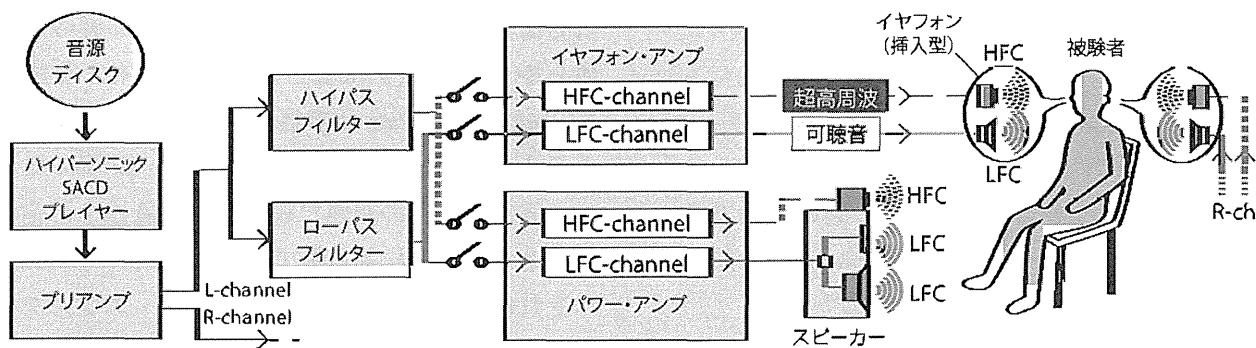


図2—実験システム



写真1—実験に使用したバイチャンネル・イヤホン

い挿入型のイヤホンで、左右チャンネルとも〈高周波〉用と〈可聴域〉用の二つの振動素子を同じ筐体内にもち、〈高周波〉と〈可聴域〉とが独立した回路で再生されるバイチャンネル方式をとっています。

2-2 呈示刺激

これらのバイチャンネル再生系を用いて、1-1項に述べたバリ島のガムラン音楽の超広帯域記録物を再生しました。

使用した音源の電気信号と、それを実際に再生した空気振動を被験者位置で計測したデータが、図3のスペクトル図です。いずれも、実験で使用した音楽全曲200秒間を、FFTアナライザー

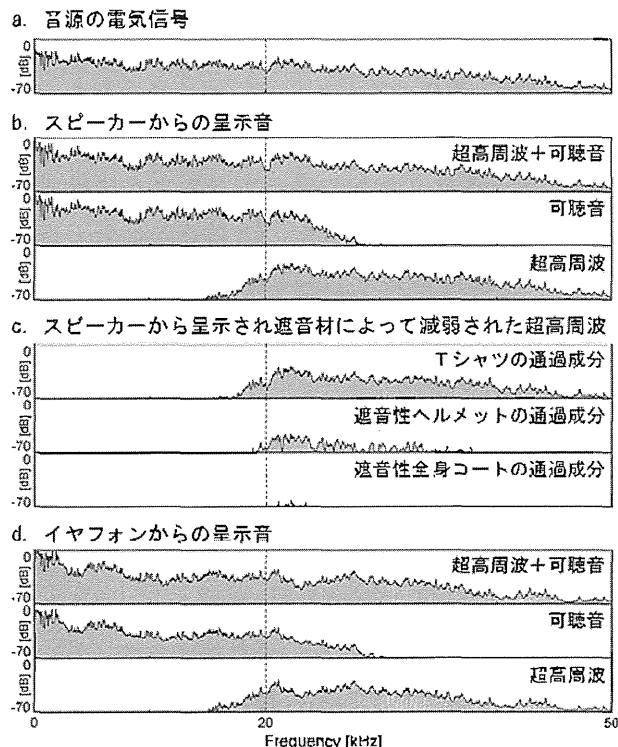


図3—実験で使った音のスペクトル

で解析した平均パワースペクトルを示しています。

図3-aは音源の電気信号です。図3-bのスピーカーから呈示した音を被験者位置で実測した場合も、図3-dのイヤホンから擬似的な耳道に呈示した音を発音体から成人の耳道の平均の長さである3.5 cmの距離で計測した場合も、平均値で50 kHzにおよぶ豊富な高周波成分が含まれています。また図3-cに示すように、被験者を覆う遮音材(2-3項参照)によって、高周波成分は顕著に减弱されています。

2-3 被験者

健康な日本人の被験者が、脳波を指標とする実験と行動を指標とする実験との2種類の実験に参加しました。

ハイパーソニック・エフェクトの発現には情動系や報酬系が深く関わっているので、実験を首尾よく行うためには、被験者の情動系・報酬系神経回路の活性を抑制することなく、いかに快適に実験に臨んでもらえるかが、ひとつの重要なポイントになります。

その点から、それぞれの実験条件下で、被験者にどのような着衣で臨んでもらうかが大きな問題になります。この点について、まず自分自身や研究メンバー自身がさまざまな着衣を体験し、吟味検討を重ねました。

まず、条件A、Cにおいて、被験者の全身に十分なエネルギーをもった超高周波が万遍なくあたるためにもっとも望ましいのは、一切の着衣をつけずに実験に臨んでもらうことです。厚い着衣の場合、超高周波成分が布に吸収されて被験者の体表面まで届かなくなるからです。しかし、実験の目的上いくら望ましいとはいえ、全裸で実験に臨むという状況は通常の被験者にとってあまりにも非日常的でストレスフルなものになり、ハイパーソニック・エフェクトどころではありません。そこで、身につけていても超高周波成分をできるかぎり透過する被験者用の着衣を探すところから準備を始め、薄手のシャツや下着、Tシャツなどを10枚ほど集めました。それらの布の一枚一枚について、スピーカーとの間に介在させたときの超高周波成分の透過の程度を、計測用マイクを用いて被験者位置で調べた結果、お土産品のペラペラのTシャツの中に超高周波成分をきわめてよく通すものがあり、被験者にはこのTシャツを着てもらうことにしました。このTシャツを通して被験者の体表面に届く振動成分を計測したスペクトルが、図3-c「スピーカーから呈示され遮音材によって減弱された超高周波」の上段「Tシャツの通過成分」です。図3-b「スピーカーからの呈示音」下段の超高周波に比べて若干減弱してい



写真2—条件Dの被験者

るものの、このTシャツを着た被験者の体表面には、スピーカーから呈示された超高周波成分の8割程度が届いていると推測されます。

次に問題となったのが、条件D(1-2項参照)のための着衣です。こちらについても、さまざまな上着や帽子、寝袋までもを対象に試用を行った結果、〈高周波〉をもっともよく遮断する組み合わせとして、ダウンコートを着てヘルメットをかぶり、手袋を着用するという宇宙服さながらの格好の中に、ベストな条件が見つかりました(写真2)。

この際、ヘルメットの重量感や束縛感がほとんど気にならなくなるよう工夫を施しました。その他、ダウンコートを着ることによる暖かさから、実験中に被験者が眠ってしまわないための眠気対策など、条件Dの実施にあたってはとくに、「被験者の快適性の確保」に万全の注意を払いました。

2-4 予備実験

本実験に先立ち、すべての被験者に「聴覚に限らずどのような点においても無音状態と異なる感覚を覚えたらボタンを押すよう」指示した上で、実験に用いた〈高周波〉のみを呈示したところ、スピーカーおよびイヤフォンのいずれから〈高周波〉を呈示した場合にも、どの被験者も無音状態との

違いを指摘しませんでした。

このことから、この実験で使った〈高周波〉は、少なくとも意識で捉えることのできるレベルの空気振動として知覚することができないことが示されました。このことは、人間は20 kHzをこえる周波数帯域の弾性振動を音として認識することができないという知見^{11, 12)}に一致しています。

2-5 実験手続き

2-5-1 脳波実験

脳波実験の際、被験者はスピーカーから2 mの位置で安楽に座位をとり、目は自然に開いた状態で、呈示される音を聴きました。

呈示される音は200秒間のガムラン音楽で、被験者には、①〈可聴域〉と〈高周波〉とを両方呈示する〈フルレンジ音〉と、②〈可聴域〉のみの〈ハイカット音〉それぞれの条件について2回ずつ、つまり400秒間呈示し、次の音との間に数分の間隔をあけてA-B-B-Aの順序で呈示しました。このとき、被験者ごとに〈フルレンジ音〉と〈ハイカット音〉がAとB、またはBとAにそれぞれ振り分けられ、その振り分け方は被験者間でカウンターバランスをとっています。

2-5-2 行動実験

被験者はスピーカーから2 mの位置で安楽に座位をとり、目は自然に開けた状態で、呈示されるガムラン音楽を聴きながら、手もとに準備されたダイヤルも目盛もなくアップ・ダウンボタンを押すだけのリモートコントローラーを使って、自分にとって一番聴きたい音量になるよう、ボリュームの調整を行いました。

脳波実験同様、①〈可聴域〉と〈高周波〉とを両方呈示する〈フルレンジ音〉と、②〈可聴域〉のみの〈ハイカット音〉それぞれの条件について、2セッションずつを数分の試行間隔をあけて実施し、呈示順序は被験者間でカウンターバランスをとっています。

ひとつのセッションは、200秒間のガムラン音楽が同じ条件で6回呈示されることで構成され

ており、被験者は、最初の2回は呈示されるままの音量(79.5 dB(L_{Aeq}))で音を聴き、続く3回で音量を好みのレベルに調整し、最後の1回は調整後の音量で音を聴きます。なお、この騒音計では、20 kHz以下の成分の L_{Aeq} のみが計測されるため、22 kHz以上の〈高周波〉が等価騒音レベルの値に影響を及ぼさないことを確認しています。

2-6 結果

2-6-1 脳波実験

脳波実験の結果が図4です。

バーグラフは後頭部脳波 α_2 成分の時間平均値、濃い灰色は〈高周波〉+〈可聴域〉の〈フルレンジ音〉条件、薄い灰色は〈可聴域〉のみの〈ハイカット音〉条件です。左は音呈示全体、中央は後半200秒、右側は最終の100秒間の平均で、バーの高さの差が開くとハイパーソニック・エフェクトが発現したことを示します。右側のマップ図は、〈フルレンジ音〉の条件と〈ハイカット音〉の条件との α_2 成分の差を電極ごとに統計検定してマップ表示したもので、色が濃くなるほど、超高周波によって α_2 成分がより強くなったことを示します。

まず、〈高周波〉と〈可聴域〉との両方をスピーカーから呈示した条件では、これまでの報告どおりハイパーソニック・エフェクトが発現していることが確認されました(図4-a)。

次に、〈可聴域〉、〈高周波〉の両方をイヤフォンから呈示した条件では、〈高周波〉のありなしで脳波は変化せず、ハイパーソニック・エフェクトは発現しませんでした(図4-b)。

一方で、〈可聴域〉をイヤフォンから、〈高周波〉をスピーカーから全身に呈示した条件では、非常に高い統計的有意性のもとにハイパーソニック・エフェクトが発現するという驚くべき結果が得られました(図4-c)。また、スピーカーから呈示された超高周波を遮音材で遮った条件では、ハイパーソニック・エフェクトの発現は顕著に抑制されました(図4-d)。

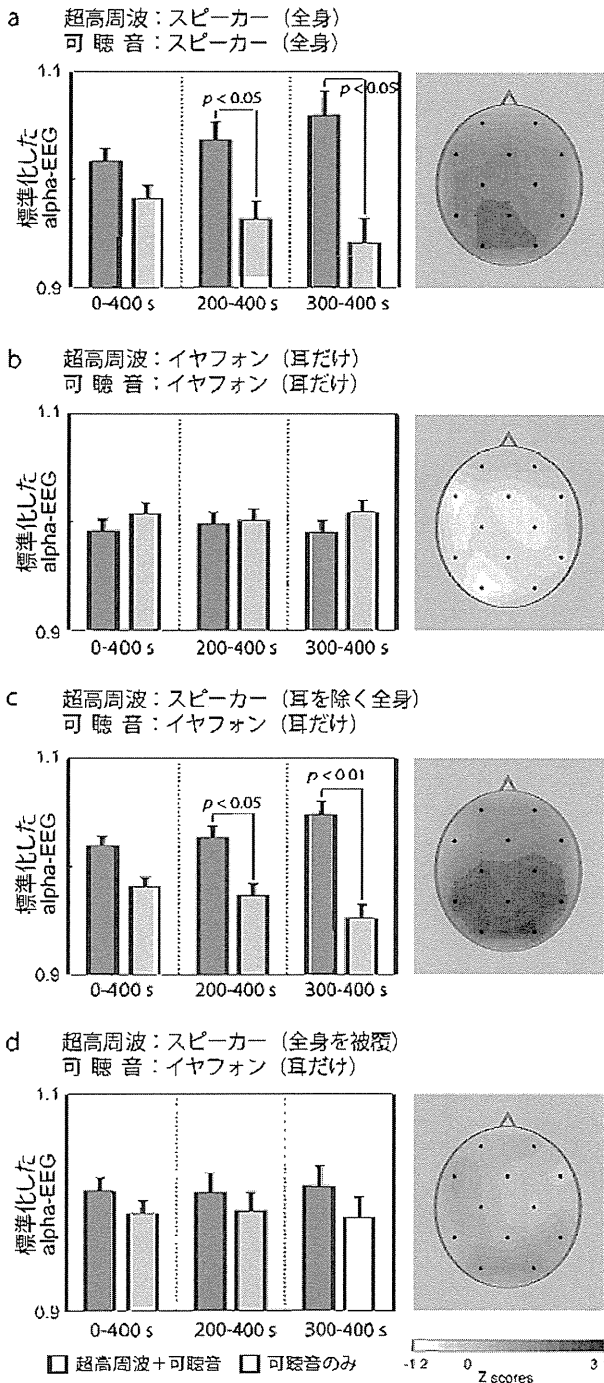


図4—脳波実験の結果

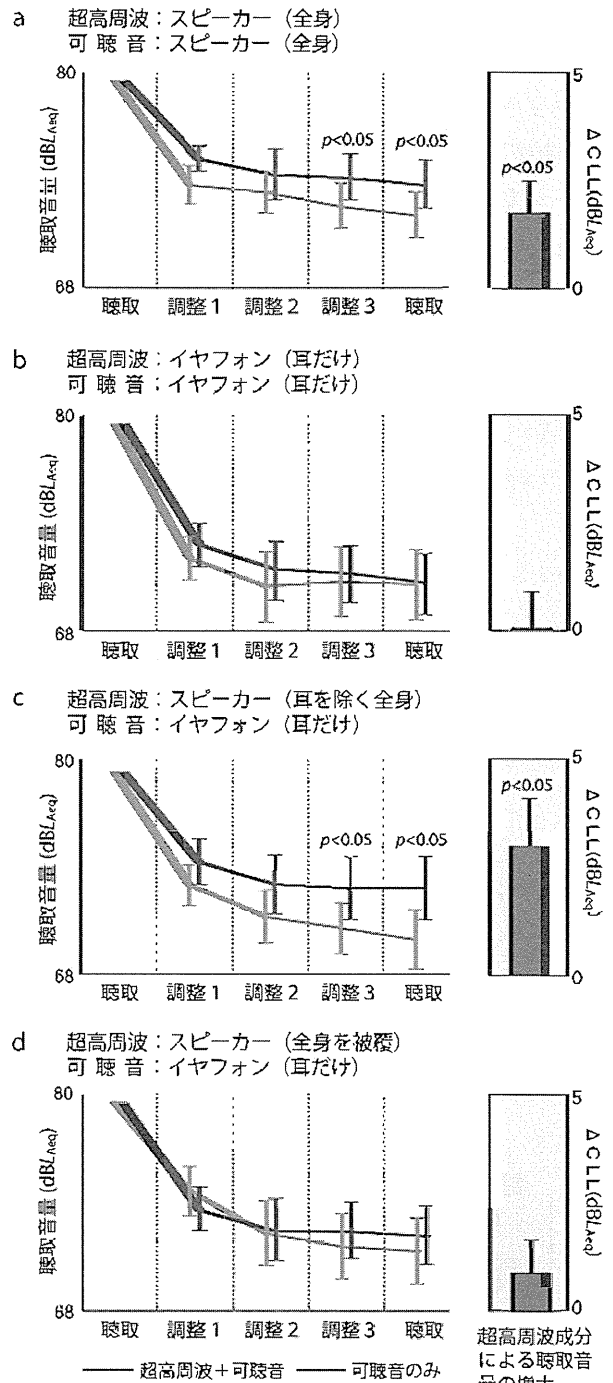


図5—行動実験の結果

2-6-2 行動実験

行動実験からも、脳波実験と並行したまったく矛盾のない結果が得られました(図5)。

中央の折れ線グラフは、各試行における聴取音量を示しており、濃いグラフは〈高周波〉ありの〈フルレンジ音〉、薄いグラフは〈可聴域〉のみの〈ハイカット音〉条件です。右端のバークラフは、最終聴取試行における〈高周波〉の有無による聴取

音量の差であり、〈高周波〉ありの〈フルレンジ音〉条件でより大きな聴取音量を示したときに正の値をとり、ハイパーソニック・エフェクトが発現したとこととその度合いを示します。

〈高周波〉、〈可聴域〉の両方をスピーカーから提示した条件では、これまでの報告どおりハイパーソニック・エフェクトの発現が確認されました(図5-a)。しかし〈高周波〉、〈可聴域〉の両方をイヤ

フォンから呈示したときには、超高周波の有無による聴取音量の差は現れず、ハイパーソニック・エフェクトの発現が認められません(図5-b)。一方、〈可聴域〉をイヤフォンから、〈高周波〉をスピーカーから呈示したときには、ハイパーソニック・エフェクトの発現が明瞭に認められました(図5-c)。さらに、この実験条件下で超高周波を遮音材で遮ると、ハイパーソニック・エフェクトの発現は顕著に抑制されました(図5-d)。これらいずれの条件においても、脳波実験とよく一致した結果が得られています。

2-6-3 実験結果のまとめ

以上により、脳波と最適聴取レベルという原理のまったく異なる指標を使った2種類の実験から、共通の結果が得られました。すなわち、超高周波が耳だけに選択的に呈示された場合にはハイパーソニック・エフェクトは発現せず、超高周波が全身に到達するように呈示されたときにのみハイパーソニック・エフェクトが発現することが示されたのです(図6)。

まず条件A、つまりこれまでの再実験では、従来の報告^{1,3}とよく一致した結果が得られ、ハイパーソニック・エフェクトの発現が確認されました。

次に条件Bです。〈高周波〉と〈可聴域〉の両者ともイヤフォンを経由して気導聴覚系だけに選択的に呈示されたときには、二つの指標いずれにおいてもハイパーソニック・エフェクトの発現は認められませんでした。この条件は、気導聴覚系のみに対して純粋に〈可聴域〉と〈高周波〉とを呈示した設定であり、ハイパーソニック・エフェクトが気導聴覚系のみに関与によって引き起こされるのであれば、それに対応した理想的な状態でハイパーソニック・エフェクトの発現が観察されるはずですが、ところが実際にはこの条件下でハイパーソニック・エフェクトの発現がまったく認められませんでした。

また条件Cで、〈可聴域〉をイヤフォンを経由して気導聴覚系だけに選択的に呈示し、〈高周波〉はスピーカーを経由して気導聴覚系を除く全身に呈示したときには、二つの指標のどちらにおいても、ハイパーソニック・エフェクトの発現が統計

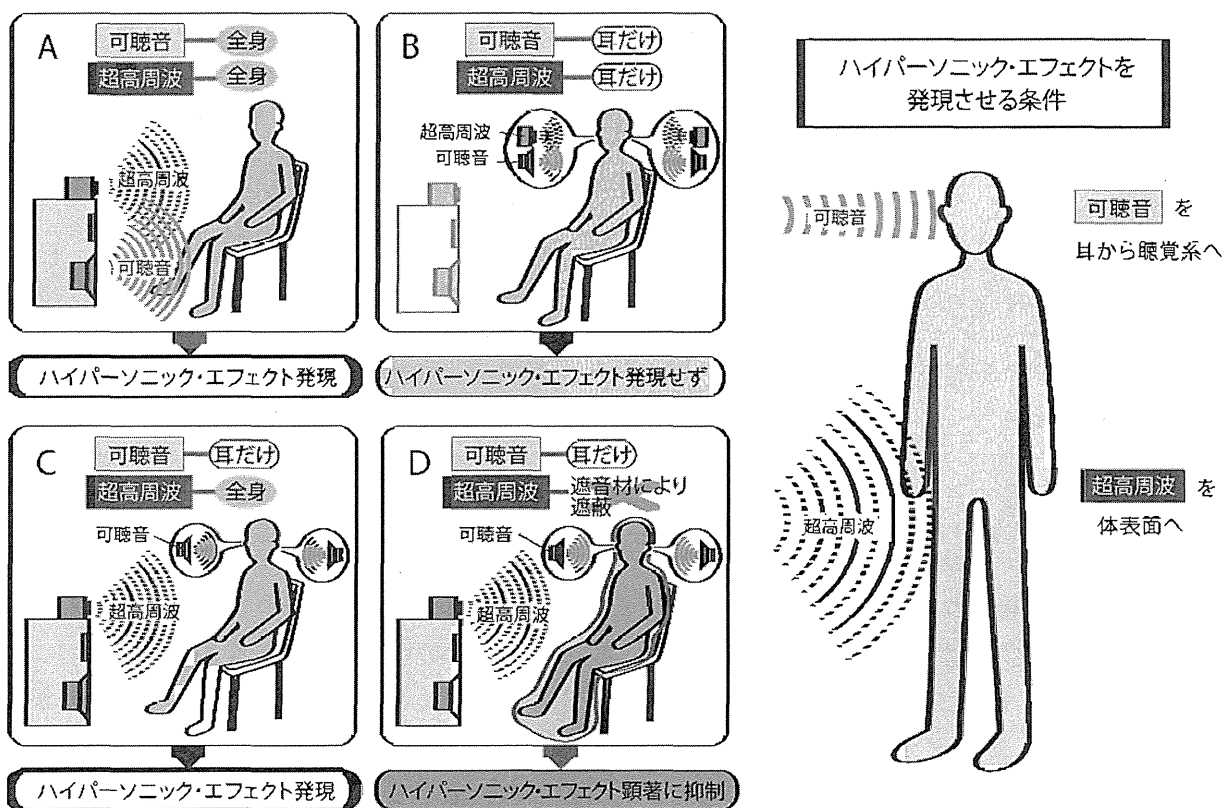


図6—ハイパーソニック・エフェクトを発現させる条件

的有意に観察されました。なお、この実験で用いたイヤフォンは、肉厚の硬質プラスチック製で、スピーカーから大気中に送り出された〈高周波〉がその筐体を透過して耳道に入ることはありません。これらのことから、少なくとも気導聴覚系以外の部位に〈高周波〉を呈示することが、ハイパーソニック・エフェクトの発現に有効であることが支持されたと考えられます。

さらに条件D、つまり条件Cと同じ設定でスピーカーから送り出された〈高周波〉を被験者の身体に達する直前に遮音材を置いて身体表面への到達を妨げると、ハイパーソニック・エフェクトの発現は顕著に抑制されました。このことは、ハイパーソニック・エフェクトを発現させるためには身体表面に〈高周波〉を直接到達させることが必須である可能性を支持します。さらに、この実験において〈高周波〉が遮音材によって著しく減弱させられながらも、わずかながら体表面に到達しているときには、それに見合った状態で α 波ならびに最適聴取音量がともに若干増加する傾向をみせており、被験者に到達する〈高周波〉の量がハイパーソニック・エフェクトの発現強度に関与している可能性が示唆されました。これは、〈高周波〉を増強するとハイパーソニック・エフェクトがより強力に発現するという私たちのこれまでの報告¹³とも矛盾しません。

なお、この実験条件下では、被験者の体表面は、〈高周波〉に対しては高度に遮断されている一方で呼吸による周辺の大気への取り込みは妨げられていません。このことは、〈高周波〉が大気中の化学物質に働きかけることによって、たとえば大気成分の組成の変化といった非生物学的な現象が導かれその反映としてハイパーソニック・エフェクトが発現するといった仮説の成立を困難にしています。

以上の知見をまとめると、ハイパーソニック・エフェクトを発現させるための超高周波の受容部位は、気導聴覚系ではなく体表面に所在すると考えると矛盾なく説明できる結果が得られたといえるでしょう。

3 ハイパーソニック・エフェクトの二次元知覚モデル

ハイパーソニック・エフェクトに関連してこれまで見出されてきた数々の実験事実は、これまでの音響学の知識ではうまく説明できないいくつかの問題を含んでいます。

- 第1に、音響現象であるにもかかわらず、聴覚神経系以外の脳の部位に活性化が起こること。
- 第2に、聴こえない超高周波の有無で音が違って聴こえる一方で、聴覚神経系には活性変化が認められないこと。
- 第3に、音に反応して免疫系、内分泌系の活性が変化すること。
- 第4に、超高周波成分単独でも可聴域成分単独でも起こらず、双方が共存する時にだけ起こること。
- 第5に、反応が即座に現れず、発現に約10秒間の遅延、消退に約100秒間の遅延(残留)をとこなうこと。

こうした特徴をもつハイパーソニック・エフェクトの発現を合理的に説明する脳内メカニズムとして、私たちの研究グループは、可聴音がメッセージ・キャリアーとして作用し、超高周波成分がモジュレーターとして作用するという〈二次元知覚モデル〉を立てています。

図7は、ハイパーソニック・エフェクトの発

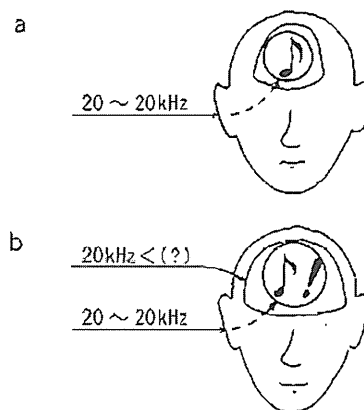


図7—二次元知覚モデルの祖型(1988)

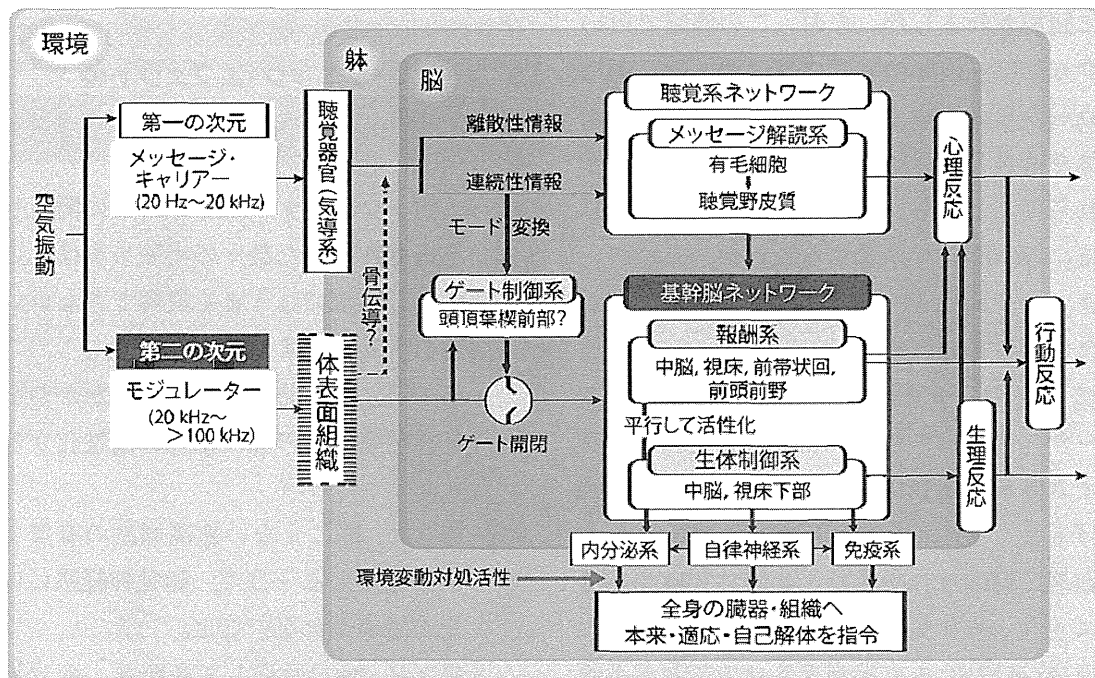


図8—二次元知覚モデル(2013)

見者の大橋が、1988年に提示した二次元知覚モデルの原型です。

このモデルを構成する第一の次元(図7-a)は、可聴範囲の空気振動成分(可聴域)に対する、従来知られているとおりの聴覚反応です。

二次元知覚モデル(図7-b)では、この第一の次元を構成する可聴音が古典的な気導聴覚系で処理され、〈メッセージ・キャリアー〉として作用するものと考えます。第二の次元は人間の可聴域上限をこえる超高周波成分(高周波)に対する反応で、超高周波成分は、何らかの伝達経路を經由して脳の内部状態を変化させ、音刺激をはじめ感覚刺激に対する応答全般を美的快感を誘起する方向に変調させる〈モジュレーター〉の機能を果たすとするものです。

その後、PETを用いた脳機能イメージング研究などを経て、ハイパーソニック・エフェクトに関する新たな知見が得られるたびに、二次元知覚モデルは少しずつ強化され、進化してきました。一方で、このモデルと矛盾する知見は今のところ得られていません。

図8は現在の二次元知覚モデルです。

まず、PETを用いた私たちの先行研究²の主成

分分析法によって第一主成分として抽出された可聴音に反応する領域群——左右脳半球の聴覚野の活性は、二次元知覚モデルの第一の次元(メッセージ・キャリアー)に対応し、同じく第二主成分として抽出された超高周波成分に反応する領域群——基幹脳ネットワークの活性は第二の次元(モジュレーター)に対応します。次に、〈モジュレーター〉である超高周波成分によって第二主成分として励起された第二次元の領域群すなわち〈基幹脳ネットワーク〉の構成を機能面から詳しく観ていくと、それはさらに三つのユニットに類別できます。その第一は〈報酬系ユニット〉で、情動と感性による〈行動制御系〉に該当します。第二のユニットは生命活動の根幹となる自律神経系、内分泌系、免疫系などの調節にあたる〈生体制御系〉に該当し、さらに第三のユニットとして、これらのいずれにも属さない頭頂葉楔前部があります。私たちのグループの先行研究により、この第三のユニットをなす領域が音楽の存在によって脳波β波との相関を顕すことが見出されており、その点からみると、この部位は、超高周波成分によって励起された信号が報酬系に向かう途上に置かれた〈ゲート制御系〉の候補と考えられています。

そして、ここに紹介した実験により、それまで空欄になっていた〈第二の次元〉の〈環境〉から〈体〉、そして〈脳〉への入力経路の有力な候補として、〈体表面組織〉が加わることになりました。

4 ハイパーソニック・エフェクトと非線形歪説

一方、ハイパーソニック・エフェクトの重要な一翼を担う音質差の発生を否定し、あるいは音質差があるにしてもその原因が超高周波振動そのものの影響ではなく、可聴周波数領域に発生する現象として説明可能であるとするいくつかの知見や理論がこれまでに公表されてきました。

たとえば、日本でもっとも権威のある音響学の学会誌に発表された〈非線形歪説〉¹⁴は、この実験の科学史・科学思想上の位置づけを考えるうえでも大変興味深いため、ここで触れておくことにします。

非線形歪説の骨子は以下のようなものです。まず、生理反応から心理・行動反応に及ぶ高度に複合的なハイパーソニック・エフェクトを「音質の差」という「可聴音に対する聴覚系の心理反応」の枠組みに限定します。次いで、「単独では聴こえない超高周波成分と可聴音とを共存させたとき、可聴音だけのときと音が違って聴こえたとしても、それを超高周波成分自体の効果とすることはできない。なぜなら、信号通路内での両成分の相互作用により〈非線形歪〉が発生し、それが導く可聴域内成分の差が音質差を導くからである」と立論し、そうした非線形歪が発生する可能性のある系を、以下の四つに整理しています。①マイクロフォンなどの録音系、②スピーカーなどの再生系、③スピーカーから耳までの空気伝播系、④鼓膜から聴覚神経系で、このうち①については、マイクロフォンおよびヘッドアンプ出力までを、常に一定で結果に差を導かない音源そのものとみなせば、非線形性を厳密に要求する必要はないとしています。

次に、②のレコーダー出力からスピーカーまで

の系における非線形歪の発生について、私たちの研究グループでは、可聴音と超高周波成分とを分離して独立に増幅表示する〈バイチャンネル再生系〉を1984年に構築し¹⁰、その後のすべてのハイパーソニック・エフェクト関連実験で基本的にこれを用いることにより、その可能性を排除しています。

これらに対して、残る③空気中での相互作用と④聴覚系の中での相互作用の可能性については、これまでの音響学の研究手段では容易に調べることができません。しかも、現象を超高周波が導くとする私たちと、超高周波は関与しないとする非線形歪説とは真っ向から対立します。この問題に対し、受容部位を主題にした今回の研究によって鮮やかな決着をつけることができたといえるでしょう。

すなわち、まず、今回の実験で空気伝播系および聴覚系内での相互作用がもっとも発生しやすく、非線形歪説に基づけばもっともハイパーソニック・エフェクトを発現しやすいはずの条件B——同じイヤフォンの中に可聴音と超高周波を一緒に発生させ耳だけに呈示した条件では、その作業仮説に反してハイパーソニック・エフェクトがまったく発現していません。その一方で、可聴音をイヤフォン、超高周波をスピーカーから互いに独立に呈示し、空気伝播系中にも聴覚系内でも相互作用が起こりえない条件の下では、これも作業仮説に反してハイパーソニック・エフェクトが明瞭に発現しています。この結果は、空気伝播系および聴覚系で発生するかもしれない非線形歪は、私たちの発見したハイパーソニック・エフェクトの発現と無関係であるか、無視できる範囲内の影響しかもたないことを支持するものです。

付記

いま振り返ると、右も左もわからない自分が無我夢中でよくも大それた実験をやってしまったのだと、驚きを禁じることができません。この実験が行われた当時、学位を取得したばかりだった私は、研究室の実験スタジオに通いつめる日々を送っていました。朝一番に実験室に入り、部屋の掃除、エアコン管理、機材への電源投入、ケーブル整備に始まり、切れた電球を取り替えたり被験者用のスリッ

バを並べたり……。

そんな駆け出しのひよっこ研究者にとって、音響学の常識からするとあまりにも奇妙で大胆なこの実験の一線に現場のスタッフとして携わることになった経験は、その後、ことあるごとに「真実に迫りうる真に創造的な研究とは何か」という問いを自分に投げかけることとなりました。

ハイパーソニック・エフェクト研究チームに20年以上携わってきたなかでも、この実験はかなり特別で不思議なものでした。それは何よりも、現場での試行錯誤というもの、被験者の快適性確保に関するこまごまとした工夫以外にほとんどなかったことです。一見突飛に思える実験のデザインがいきなり具体的に示され、それをとにかく忠実に実現することで、革命的ともいえる結果を一度で、しかも統計的有意性をもって鮮やかに導くことができました。このとき、自分がまるで、お釈迦さまの掌の中で飛び回っていたかのような印象を抱いたことを思い出します。今考えると、そこには、生命科学における合理的な思考や手続きをはるかに超えた何らかの子見——直観と洞察が関与していたとしか考えられません。(感性脳科学におけるこうした直観や洞察の意味については、本特集の本田論文をご参照ください。)

日々の研究の中で、ともすると目の細分化された問題に視野を奪われ、隘路に迷い込みそうなとき、この経験に立ち還ることで、自分が何に注意を払い何をすべきか、その指針が見えてくることも少なくありません。そして、(お釈迦さまの掌の中で飛び回っていた駆け出しの私)として当時を思い返すとき、そのお釈迦さまとは、[近代合理主義を基盤に洗練を尽くした限定的専門分化]ではなく、その対極に位置する(原始的非効率的な自然哲学風の全方

位非分化方式]がもたらす豊穡な知的活性の土壌であることを実感するのです。

文献

- 1—T. Oohashi et al.: Brain Research, 1073-1074, 339(2006)
- 2—T. Oohashi et al.: J. Neurophysiol. 83, 3548(2000)
- 3—R. Yagi et al.: Acoust. Sci. Technol., 24, 197(2003b)
- 4—S. Nakamura et al.: Electroencephalographic evaluation of the hypersonic effect. Society for Neuroscience 34th Annual Meeting, San Diego, USA(2004)
- 5—R. I. Goldman et al.: NeuroReport, 13, 2487(2002)
- 6—L. W. Role & J. P. Kelly: The brain stem: cranial nerve nuclei and the monoaminergic systems. In: Principle of Neural Science, E. R. Kandel et al. eds., Appleton and Lange, Connecticut. (1991)
- 7—J. G. Thompson: The Psychobiology of Emotions, Plenum Press, New York(1988)
- 8—S. Cullari & O. Semanchick: Percept. Mot. Skills, 68, 186(1989)
- 9—難波精一郎・桑野園子: 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社(1998)pp. 164~166
- 10—入橋力・他: 日本音響学会聴覚研究会資料 H-84-42(1984)
- 11—J. D. Durrant & J. H. Lovrinc: Bases of Hearing Science, Lippincott Williams and Wilkins, Hagerstown(1977)
- 12—W. B. Snow: J. Acoust. Soc. Am., 3, 155(1931)
- 13—R. Yagi et al.: Neurosci. Lett., 351, 191(2003a)
- 14—宮坂栄一: 日本音響学会誌, 55 巻 8 号, 569(1999)

50 年前には

雨雪中の放射能ふえる 1月29日の内閣放射能対策本部の発表によれば、この1カ月の全国の放射能観測の結果を検討し、裏日本の雨や雪に放射能がふえ、とくに米子では総降水量は2500ミリ・キュリー/cm²(昨春同本部が決めた暫定指標の緊急事態第1段階)をこえたと発表した。

発表によると昨12月17日~1月15日、全国14カ所の測候所での測定では、裏日本は軒なみに高く、札幌864、秋田979、輪島1886、米子

2523、福岡1184で、表日本は、釧路634、東京310、大阪55、室戸岬22と低めである。これは昨年末のソヴェトの大型核実験の結果によるものと思われる。

なお食品の汚染は、野菜中のストロンチウム90が10月以来ほぼ横ばい、牛乳中のストロンチウム90は10月に比べやや高い値を示している。

『科学』第33巻第3号(1963)「科学時事」より

2
質感の認知2.2
感性的質感認知への脳科学的アプローチ

[正会員] 本田 学†

キーワード 報酬系, 情動, 快感, 脳機能イメージング, モノアミン神経系

1 ま え が き

脳に入力される感覚情報は、視覚・聴覚といったモダリティごとに固有の分析の情報処理が行われる一方、全感覚モダリティの情報が“感性・情動神経系”（または“報酬系”）で統合され、快・不快や美醜など、その動物にとっての価値判断が行われる。感覚情報の質感認知は、美しさ・快さといった感性・情動反応の形成に大きな影響を及ぼすと同時に、逆に感性・情動系の総合的な反応、すなわち、感覚情報を受容する主体の快・不快といった情動状態が各感覚モダリティの質感認知を修飾することは、日常的によく経験される現象である。このように、さまざまな感覚モダリティの質感情報がもたらす快・不快・美・醜など、明示的または暗黙的を問わず、生体にとっての価値判断を伴う感性・情動反応を“感性的質感認知”と呼ぶ。

こうした質感認知と感性・情動との密接な関係にもかかわらず、現在活発に始められつつある質感認知研究の大部分は、各感覚モダリティに固有の情報処理を対象としており、質感認知に対する感性・情動神経系からのアプローチは、大きな空白地帯となっている。その一因として、人間の脳機能に対して非侵襲的にアプローチすることが可能な脳計測装置のもつ大きな限界がある。例えば、現在、人間の脳活動を非侵襲的に調べる上で有力なツールとして広く使われている磁気共鳴機能画像法 (fMRI) は、ジェット機並みの約140dBの騒音を発生する。このように、脳機能イメージングのストレスフルな計測環境や手技自体が、感性・情動反応を担う報酬系に対してネガティブな影響を及ぼし、快・不快や美醜を伴う脳の繊細な感性的質感反応を捉える上で大きな限界となっていることは無視できない。

そこで本稿では、まず感性的質感認知を支える報酬系神経機構とその特性について概説した後、感性的質感認知に脳科学からアプローチする場合の問題点について述べる。そして最後に、筆者らの研究グループが取組んでいる、人

間の可聴域上限をこえる超高周波空気振動により、音の感性的質感認知が顕著に向上する現象“ハイパーソニック・エフェクト”を題材として、その研究を進めるなかで、感性的質感認知を客観的に捉えるためにどのような工夫を行ってきたかについて解説する。

2 感性的質感認知を支える神経機構とその機能

脳に病変や損傷をもつ人の症状とそれらの部位とを対応づけて理解する臨床神経学と、動物を対象とした実験的アプローチの貴重な知見が蓄積され、人間の感性的質感認知の基盤となる感性・情動神経系の候補はおおよそ明らかになってきている。それらは“脳幹”（特に中脳背内側部の中脳水道周囲灰白質），“視床下部”，“前脳基底部”，“扁桃体”や“前帯状回”を含む“大脳辺縁系”，“前頭葉眼窩部”などである¹⁾。

これらの中でも、快感や美しさといったポジティブな情動の発生に重要な役割を果たしているのが、脳幹から大脳皮質や大脳辺縁系に投射するドーパミンなどを神経伝達物質とする“モノアミン（作動性）神経系”である。例えば、ネズミのモノアミン神経系の特定の場所に電極を埋め込み、ネズミが自らスイッチを操作して、自分の報酬系神経回路に微弱な電流を流して刺激できるようにすると、強い快感が発生することが知られている。このため、ネズミは快感を求めて自己刺激のためのスイッチ押しを何度も繰り返す。モノアミン神経系の刺激によって誘発される快感は、ネズミの行動を非常に強力に支配するため、ネズミが最も忌避する刺激の一つである身体への電気ショックを与えても止めることができない。また、摂食行動すら忘れて1分間に5,000回以上もスイッチを押し続けるため、死に至ることすらあると言われている。

こうした動物の行動を強力に制御する情動神経系は、そもそも動物にとってどのような機能をもっているのだろうか。行動の自由度が飛躍的に上昇した高等動物においては、自分の周りの環境情報をとらえ、それが自分の生存に適しているか否かを判断し、適切な行動を発現することにより生存値を高めることが可能になる。一方、動物が遭遇

† 国立精神・神経医療研究センター (NCNP) 神経研究所 疾病研究第七部 "Approach from Brain Science to Kansei Aspect of Shitsukan Perception" by Manabu Honda (Department of Functional Brain Research, National Center of Neurology and Psychiatry, Tokyo)

する環境条件と、その動物が取り得る行動のレパートリーとの組合せは膨大な数に上る。そうした状況下、生存にとって最適な行動を選択するためのレーダの役割を担っているのが、情動神経系と考えられる。すなわち、その動物にとって最適な生存環境にいるとき、快感が最大・不快感が最小になり、そこから離れるに従って快感が低下し不快感が上昇するように情動神経系の作動特性をセットしたとする。すると、そうした神経回路をインストールされた動物は、起こりうるすべての状況についての行動プログラムを予め準備しておくなくても、快感が上昇し、不快感が低下する方向へと行動を制御することにより、生存値を高めることが可能になる。すなわち、情動神経系の本質的な働きは、最適生存環境を選択するためのレーダであると言える。感性的質感認知を取り扱う際にも、背景にあるこうした情動反応の生物学的意義を押さえておく必要がある。

人間以外の動物では、こうした情動による行動制御が生存戦略として有効に機能していることはほぼ間違いない。しかし、人間においては、情動に身を任せた行動が生存に不利に作用し破滅を導くことが頻繁に起こりうる。この点を整理して考える上で、大橋力が提唱した「情動・感情・理性・感性による行動制御モデル」²⁾は有効性が高い、その概要は以下の通りである。

高等動物の行動を制御する脳機能は階層構造をなしている。最も深層にあるのは、“脳幹”が担う“情動”であり、プリセットされた行動プログラムとそれに伴う始源的な快・不快反応によって反射的に制御されている。次の階層は、脳幹の働きを、より効果的に達成する方向へ直線的に増幅し、自覚できる“感情”を生み出す大脳辺縁系である。一方、こうした情動・感情に直線的に支配された行動が成就し難いことから、忍耐を伴う待ち伏せや迂回など、情動・感情に負のフィードバックをかけ成功率を高めているのが、大脳新皮質を拠点とする“理性”の働きといえる。

このモデルの絶妙な点は、目先の利害計算に閉塞しがちな理性を、時間的空間的により大局的見地から制御し、直感や洞察を含む全脳的思考へと誘導して「真善美」一体の境地に昇華させる働きとして“感性”をモデル化し、それを担う脳のハードウェアとして、最も始源的な脳幹から理性の座である前頭葉に投射する“内側前脳束”を含むモノアミン作動性神経系を位置づけた点である。

こうしたスキームのなかで、感性的質感認知が具えるべき属性を捉え直してみると、一方においては「生存と直結した環境情報を判断するための手がかりとして機能すること、もう一方では「理性や行動を有効に制御する」ことが、基本的な属性として浮かび上がってくる。

③ 脳機能から感性的質感認知へのアプローチ

感性的質感認知は、単一の感覚モダリティにおける特定の感覚信号パラメータの分析的情報処理だけではなく、他のパラメータや異なる感覚モダリティの情報が集約され

て、最終的に快・不快といった情動反応と密接に関連しながら生み出される。したがって、脳の機能を仮想的なモジュールに細分化し、各モジュールの加算集合体として脳機能を捉えようとするパラダイムでは、感性的質感認知に対する効果的なアプローチが困難である。

確かに、人間の脳機能を構成する素過程が、ある程度の独立性をそなえた機能モジュールとして脳の中の特定の部位に存在することは、微視的レベルでも巨視的レベルでも明らかになりつつある。しかし、地球生命の進化の産物である脳の最大の特徴は、単にこれら機能モジュールの加算集合体としてではなく、モジュールどうしが高度な相互依存性や機能相関性を発揮し、きわめて全体性・包括性の高いシステムを形成しているところにある。まさに「システムは要素の総和を超える」ものとなっているのである。

例えば、人間が自分自身の感覚・思考・判断・行動を自覚しモニタする<意識>の働きや、「赤い」という質感を伴ってリンゴを認識する<クオリア>などは、必ずしも脳の特定位に局在するのではなく、さまざまな脳部位が高度な相関性をもったネットワークとして活動することによって生み出されるという考え方が主流になりつつある。このことは、生物が環境情報を捉え、環境に対して働きかけるための機能が集積した器官として、脳が進化的に形成されてきたという事実立ち戻って考えてみると、理解しやすいかもしれない。すなわち、単細胞生物以来、どのような進化的段階の生物においても、個体と環境とのインタフェースを担うために必要充分な全体性・包括性を有した仕組みが備わっていたと考えて差し支えないであろう。例えば、脳の視覚系で考えてみると、色・形・動きなど、現在の霊長類の脳で観察されるような、視覚情報のさまざまな個別的属性を処理するための専門分化したモジュールがアプリオリに存在し、それらの加算集合体として脳が形成されているわけではない。環境を総体として捉える何らかの統合システムがまず先に存在し、個体と環境との間の相互作用の中で、より効率的な情報処理を行うことが進化圧になり、必要に応じて独立性をもった機能モジュールが徐々に分化生成されてきたと考えるのが自然である。

こうした観点から、感性的質感認知のもつ全体性・包括性といった特性を考慮した場合、脳神経系の働きを、独立した機能モジュールが加算的に組合さったもの、というモデルに沿って理解し再構成しようとするアプローチには、大きな限界が隠されている可能性が否定できず、注意を払う必要がある。

これらの限界は、人間の感性的質感認知に対して脳機能の側面からアプローチすることを試みる場合、特に非侵襲的な脳機能イメージングを活用して人間の感性的質感認知を解明しようとするときに、大きな摩擦となって顕在化する。

1990年代以降に爆発的な進歩を遂げた一群の非侵襲脳機能計測手法、すなわち、非破壊的に脳の活動状態を観測する手法の開発により、さまざまな人間の脳活動を客観的に

捉えることが可能になった。これら脳機能イメージングと総称される手法を駆使して、感覚、運動、認知、言語、思考など、人間のさまざまな脳機能が画像化されてきた。

ところが、感性的質感認知にともなう脳活動の計測には、独特の大きな障壁が存在する。例えば、①同一の刺激に対して引き起こされる感性反応が、人によって極めて多様で、普遍性が見いだせないことが多い。また、②刺激によって誘導されるはずの美や快の反応が、被験者をイメージング装置の中に入れた途端に消失してしまう。あるいは、③刺激に対する感性反応を支える脳機能の時間特性と実験パラダイムとの不整合により、確かに存在する感性的質感の違いを捉えることができない、などである。これらの要因が重層的に作用し、感性的質感認知の基盤となる情動・感性反応、なかでも美や快などポジティブな心の動きは、現在の脳科学的な手法をもちいて計測することが極めて困難である。

この障壁を前にして、美と快の計測を試みる従来の脳科学研究では、やむを得ず言語によって強制的に分類され、ラベル付けされた、情動・感性の本体とは似て非なるものに対する反応を、アリバイ的に計測しているものが大部分である。その様相は、情動・感性といった心の働きをあたかも物体のように客観的に計測しようとする試みが、近世哲学の祖ルネ・デカルトが提唱した、精神と物質とを完全に分離して認識し操作する「物心二元論」の呪縛から逃れ切れていないかのようなのである。見方を変え、デカルト的な知識構造に立脚して構築された脳機能イメージングは、少なくともそのままでは情動・感性、ひいては感性的質感認知の客観的計測手法として有効性を発揮しえないこと、それを可能にするためには、デカルト的二元論を超克するアプローチによる現行の脳機能イメージング手法の再構築が必要不可欠であることが理解できる。

以下に、これらの問題点を掘り下げるとともに、それを克服しようとする先人の工夫ならびに私たち自身のささやかな試みについて紹介する。

4 個別性を超える実験デザインの再構築

感性的質感認知を対象として脳活動の客観的計測を試みる時、最初に直面するのが、特定の刺激に対する人間ひとりひとりの応答反応の個別性である。例えば、「人間に美と快感を導く人為的に組み立てられた音のシステム」²⁾である音楽が導く応答反応の個別性は、その典型的な例といえる。商業音楽の増殖、異なる文化ごとの伝統音楽の相互浸透、放送やパッケージメディア、さらにインターネットを通じた個別配信により指数関数的に高まる流動性と拡散性などによって、現在私たちが享受することのできる楽曲の候補は数知れないものになっている。こうした状況の中で、幼児期にたまたま経験し刷り込まれた音楽によって形成される人の嗜好の多様性は、はかり知ることができない。ある人にとって感動をもたらす楽曲が、別の人にとっては単

に退屈なものとししか聴こえないことは決して珍しいことではなく、個別の楽曲に対する応答に科学的な検討に値する普遍性や共通性を見出すことは事実上不可能に近い。

一方、感性的質感認知の個別性を前提としつつ、巧妙な実験モデルを構築することによってこの困難な問題を克服したロバート・ザトーレらの音楽の感動に関与する脳部位についての研究³⁾は、音楽にとどまらず、広く感性的質感認知の個別性を取り扱う上で、啓示に満ちている。ザトーレらはまず実験に参加する被験者ごとに、「背筋がぞくぞくする」あるいは「身震いする」ほど強力な音楽刺激として働きかける曲目と、その中の箇所とを申告させた。こうして10名の被験者に、自分で選んだ感動をもたらす音楽とそうでない音楽とをセットにして聴かせ、その時の脳血流をPETをもちいて計測し比較した。巧妙なのは、それぞれの被験者にとって感動を引き起こさない対照となる音楽を、他の被験者に感動をもたらす楽曲の中から選ぶよう組合せを工夫したのである。そして、感動する音楽とそうでない音楽とを聴いているときの脳血流を、被験者全員をまとめて比較することにより、曲目の違いによる物理的な音刺激の違いが相殺され、感動の有無によって神経活動が変化する脳部位のみが見事に描き出された。この実験の結果、音楽を聴いて「身震いする」ような感性的質感認知が得られたときに神経活動が高まることが示されたのは、ポジティブな感情をもたらす脳の報酬系、すなわち、脳幹に属する中脳背内側部、前頭葉下面、前帯状回などである。逆に扁桃体など負の感情にかかわる脳の「警告系」とよばれる部分では、活性が抑制された。すなわち、音楽がもたらす感動という感性的質感認知は、報酬系を活性化するとともに警告系を抑制するという、「鉛と鞭」の神経回路の作用として発現することを見事に描き出したのである。

5 感性的質感認知を捉えるための計測環境の再構築

次に、実際に脳機能イメージングをもちいて、美や快などポジティブな心の動きと関連の深い感性的質感認知に伴う脳の反応を計測するにあたり、決定的な障壁となるのが、イメージングの手法自体が、被験者に不安や恐怖など無視できないネガティブな心理的・情動的バイアスを与える点である。

脳機能イメージングの多くは、元来、医療目的で開発されたものであり、病気にともなう異常所見を検出することを重視した設計になっている。そのため、検査室のしつらえや調度を含む計測環境や、検査手法が原理的にもっている計測時の厳しい制約条件が、美と快に関わる感性的質感認知の計測を非常に困難なものにする。例えば、脳の微弱な電気現象を検出する脳波は、外來の電磁ノイズの影響を受けやすいため、被験者は、電磁シールドされた檻や密室の中に閉じ込められ、接着剤によって頭皮に固定された無数の電極を装置に繋がれ、寝心地の悪いベッド上で計測が

行われることが多い。また、ポジトロン断層撮像法 (PET) では、大型装置のベッド上に頭部を拘禁された状態で、腕の血管に注射針を刺されて放射性同位元素を注入される。機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) では、窮屈なトンネルに拘禁された被験者がジェット機なみの騒音に曝露される。実際、健康な被験者の10名から20名に一人は、潜在的にもっている閉所恐怖症の傾向が検査時に顕在化してパニック状態に陥り、検査の中止を余儀なくされる。こうしてみると非侵襲脳機能計測の多くは、質感認知を感性的側面から検討する場合、ほとんど「破壊検査」ともいえるべき乱暴さを持っている。

こうした劣悪な計測環境は、感性的質感認知の計測に決定的なインパクトを与える。脳の中に広がる美と快を発生させる報酬系神経回路は、内部に高度で複雑な構造を含みながらも、全体として一つのまとまった神経回路網を構成している。そこには視覚、聴覚などさまざまな感覚系からの情報だけでなく、臓器感覚や他の脳部位で処理された情報などが流入するという全方位開放型の性質をもち、それらの包括的統合的反応として、情動・感性が誘導される。つまり、従来の脳機能イメージングのように、計測環境自体が強い嫌悪や恐怖を誘導し、美と快といった報酬反応を高度に抑制するような環境下では、目指す感性的質感認知を誘発することが極めて困難になる。たとえ痕跡程度の美と快の反応が誘発されたとしても、計測環境自体が発する情報によって誘導される振幅の大きなネガティブな情動・感性反応のノイズに埋もれてしまう危険性が大きい。

したがって、感性的質感認知に伴う脳の反応を捉えるためのイメージングでは、鋭い感性をもった実験者が、脳機能イメージングの計測環境や制約条件がもつネガティブな心理的影響を一つ一つ丹念に排除する、あるいは問題にならないレベルまで軽減することが重要になる。

以下に、私たち自身が行った“ハイパーソニックエフェクト”⁴⁾⁵⁾、すなわち、人間の可聴域上限をこえる空気振動の高周波成分を豊富に含む音によって、脳内の情動・感性にかかわる神経回路が活性化し、音の感性的質感認知が顕著に向上する現象の発見に至る研究の中での具体的取組みの一例を紹介する。

一般に、20kHzをこえる高周波は、単独では人間に音として知覚されない。ところが、耳に聞こえない高周波成分を豊富に含む音は、それを除外した音に較べて、耳に快く響くという感性的質感認知の顕著な向上が、多くの音楽家や音響エンジニアなど「音の料理人」の体験から証言されてきた。しかし、従来の正統的な音質評価実験をもちいた心理学的検討によると、20kHz以上の高周波成分を含むか否かは音質にまったく影響を及ぼさないとされている。そこで私たちは、従来の音響心理学が採用する主観的音質評価とは異なる切り口の生理学的アプローチを導入し、20kHz以上の高周波成分の有無により、感性的質感認知に関わる脳の反応に何らかの違いが生じるかどうかを検討した。

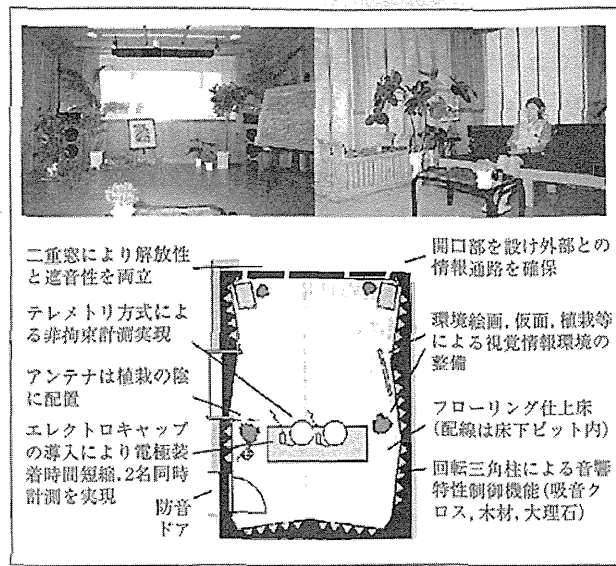


図1 美と快に関わる感性的質感認知の脳機能計測を実現するために構築した脳波実験室

まず、優れた時間分解能をもち、比較的単純な装置構成によって計測可能な頭皮上脳波の計測から着手することとし、その既成技術と計測環境を根本的見直すところから探索的検討を開始した。通常の脳波検査室は病院や研究棟の奥に閉ざされた密室として存在することが多い。また、音響実験室は音をしめ出すことを優先して、視覚的にも完全な遮蔽状態をつくる。これに対して、私たちは、遮音処理をした二重ガラス窓を屋外に向けて大きくとり、自然光と外の景色を確保した実験室を構築した。内装は木質系を基本とした自然志向のデザインに仕上げ、室内各所に自然を描いた環境絵画や観葉植物などを配した。さらに見えるものが誘発する連想が被験者に実験中であることを意識させる度合いを減じるように、スピーカ以外の実験機器のすべてを視野外におき、ケーブル類は床下のピット内に納めるなどの工夫を行った(図1)。

被験者から脳波を記録する方法についても吟味しなおした。電極装着が被験者に与えるネガティブな効果を最低限に抑えるため、電極を縫い付けたキャップを短時間で安定した装着ができるよう改良し、平均5分程度で多チャンネル電極の装着を可能にした。また、脳波データをワイヤレスで伝送するシステムを改良し、被験者がケーブルに拘束されずに自在に行動しながら計測に臨むことを可能にした。また、電極からヘッドアンプまでの電線を短くすることによって共振周波数を上げ、体動にともなう混入するノイズを大幅に減弱するとともに、電磁シールドを施していない実験室でも電源ノイズを受けることなしに計測を可能にした。

こうした工夫を積み重ねることにより、被験者があたかも高級オーディオが置かれた洒落たリスニングルームで音楽を楽しむような計測環境を構築することに成功した。その結果、20kHzを超える高周波成分を豊富に含む音を聞き

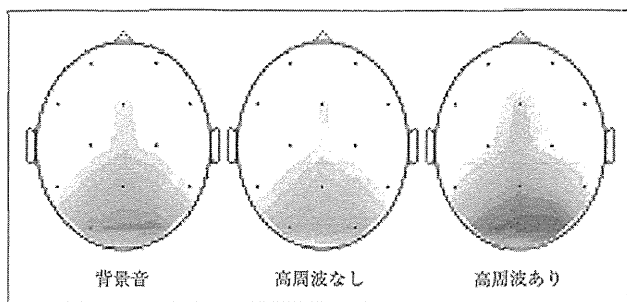


図2 可聴域上限を超える高周波成分を豊富に含む音による後頭部脳波 α 帯域成分の増強

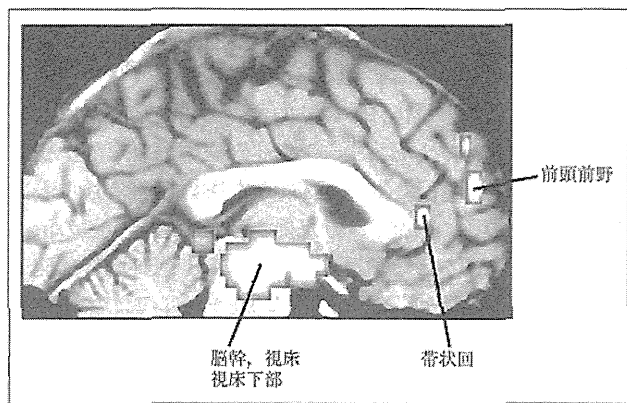


図3 可聴域上限を超える高周波成分を豊富に含む音によって活性化された美と快に関わる感性的質感認知をささえる神経回路

ているときには、それを除外した音を聞いているときに比較して、脳の基底状態を反映すると考えられている後頭部から記録される自発脳波のアルファ帯域 (8~13Hz) の成分のパワーが、統計的有意性をもって増大することを発見した (図2)。

脳波は良好な時間分解能をもつものの、空間解像度が低く、検出された脳波の変化が脳内のどこで発生したかが曖昧である。そこで次に、高い空間解像度をもって脳活動を観測できるPETを用いて、これと脳波とを同時計測することにより、感性的質感認知に伴う脳の活動部位を同定することを試みた。病院内にあるPET検査室を休日に借り切り、脳波室同様の計測環境の改善を図った。室内の音響特性を改善し、放射性同位元素を体内に投与するチューブや注入機が被験者の視界に入らないよう、植栽などをたくみに配置した。被験者がベッド上に仰臥するため、室内の温湿度を快適に保つようことさらの注意を払い、温度を25~27℃、湿度を60~70%にコントロールした。

こうして得られた脳血流データから、20kHz以上の超高周波成分を豊富に含む音を聴いているときには、同じ音から超高周波成分だけを除外した音 (すなわち同じ可聴域成分のみ) を聴いているときと比較して、中脳、視床、前帯状回、前頭前野などに分布する報酬系神経回路と、脳幹、視床下部など生体の恒常性をつかさどる部位を総合的に活性化することが見出されたのである (図3)。これらの場所は、ザトーレらが音楽の感動に関連する脳部位として見出

した神経回路と高度に一致している。

6 報酬系の特性に応じた実験デザインの再構築

最後に、感性的質感認知をささえる報酬系神経回路の特性が、従来の脳機能イメージングの計測対象となってきた感覚、運動、認知、言語、思考などの脳機能に関連した神経回路の特性とは異なることが、深刻な問題に繋がることについて触れる。脳の中で情動・感性をささえる神経回路の中核をなすのは、脳幹に拠点を置くモノアミン系およびオピオイドペプチド系の神経伝達物質が作動する一群の神経系である。これらの神経伝達物質は、単純な感覚あるいは運動神経系などで興奮を伝達する、例えばグルタミン酸などの神経伝達物質とは、極めて異なった挙動を示すことが知られている⁶⁾。神経伝達物質がシナプス間隙に放出されると、受け手側の神経細胞の表面にある受容体に、ちょうど鍵と鍵穴のように結合して興奮を伝達する。この際、グルタミン酸による興奮伝達にかかわる受容体は、細胞膜のイオンチャネルというゲートに直結しているため、鍵がはまるとたちまちゲートが開いて、イオンが受け手側の神経細胞に流入して興奮を引き起こし、はずれると即座にゲートが閉まり興奮が停止する。その過渡応答はミリ秒単位のオーダーである。これに対して、美と快をつかさどるモノアミン系やオピオイドペプチド系の神経伝達物質の受容体は、いわば鍵穴とゲートが離れたところにあり、受け手側神経細胞内の第二メッセンジャーを含む、より複雑で間接的な代謝経路を介して興奮を引き起こすため、効果の発現に時間的な遅れが生じ、神経伝達物質が受容体から離れてもその効果が残留する。さらに、オピオイドペプチド系の神経伝達物質は、主として受動的な拡散によってシナプス間隙から消失するため、シナプス間隙内の滞在時間が長くなる。こうした分子生物学的なメカニズムにより、美と快を伴う感性的質感認知に関わる神経回路は、刺激に対して数秒から分単位、長い場合は時間単位の遅延と残留を伴う過渡応答を示す。

したがって、こうした神経回路の時間特性を考慮しない実験パラダイムを組むと、感性的質感認知に関する脳の反応を正確に捉えることができなくなってしまう危険性がある。先に紹介した、人間の可聴域上限を超える高周波成分の有無が音質におよぼす影響について、CDのフォーマットを決定するために1970年代に行われた心理学的音質評価実験は、その典型的な例といえる⁷⁾⁸⁾。それらの実験では、例外なく、二つの音試料の音質を比較するために、1秒以下から長くても20秒までの短い音の試料が、0.5ないし1秒程度のわずかな間隔で切替えられて呈示され、それらが同じ音質であるか否かを被験者に判定させていた。実際、国際無線通信諮問委員会 (CCIR, 現ITU-R) は、人間の短期記憶の限界を根拠に、こうした実験法を推奨している。これに対して私たちは、先に述べた感性的質感認知に関わる

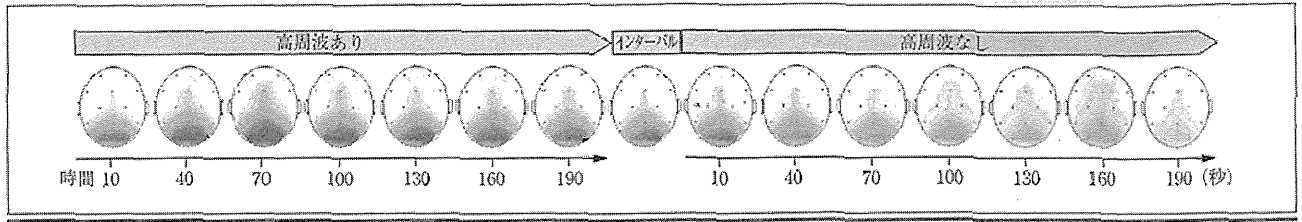


図4 可聴域上限を超える高周波成分の有無による脳波 α 帯域成分の継続的变化

神経回路の時間特性を考慮して、従来の実験パラダイムの常識からすると極めて異例であるが、200秒の楽曲全体を音刺激としてもちいた。そして脳の反応を時間分解能に優れた脳波を用いて計測したところ、高周波成分を含む音を呈示したときに発生する脳波アルファ成分の増強は、音刺激の呈示から数秒以上遅れて現れ、刺激呈示終了後も数十秒から百秒程度残留することを見いだした(図4)。

この所見は、美と快を伴う感性的質感認知をささえるモノアミン系あるいはオピオイドペプチド系の神経回路の時間特性と整合性が高い。同時に、なぜ従来の主観的音質評価実験では可聴域を超える高周波成分の有無による音の質感の違いを検出できなかったかを、合理的に説明している。すなわち、それらの実験で用いられた短い音試料を短時間で切替えるパラダイムでは、脳の反応が刺激の切替えから大幅に遅れることにより、現在聴いている音に対する反応と以前に呈示された音に対する反応とが混ざり合ってしまう、必然的に二つの音の質感の違いを判別することが困難になってしまったと考えられる。実際、200秒の楽曲全体をもちいて、高周波成分を含む条件と含まない条件との間に十分な休息をとって主観的音質評価実験を行うと、高い統計的有意性をもって音の質感の違いが検出された。このことは、従来の主観的音質評価法では、体験的に高周波成分が音の感性的質感認知に及ぼすポジティブな効果を確信している「音の料理人」を被験者としても、高周波成分の有無を音の質感の差として検出できなかったという奇妙な事実を説明可能にする。なぜなら「音の料理」に際しては、時間をかけて素材を味わうのが通常であり、彼らの体験的確信は、音の断片を頻繁に切替えて聴くような、主観的音質評価実験で広く用いられている不自然な聴取状況のもとで得られたものではないからである。

こうした先行研究が陥ったピットフォールは、脳波や機能的磁気共鳴画像法など、時間分解能の比較的良好な脳機能イメージングをもちいて感性的質感認知に関わる脳活動を計測する際にも、同じ問題を引き起こすため、十分な注意が必要である。同時に、美と快を伴う感性的質感認知に関わる脳機能に迫るうえで、従来の単一の学問パラダイムからアプローチすることが、深刻な限界を呈することを示唆している。

7 む す び

以上、感性的質感認知に対して、脳科学的側面からアプローチする際の問題点について、筆者らが取り組んできた音の感性的質感認知に関する研究を題材として具体例をあげながら解説した。最後に、感性的質感認知の研究には、第14世ダライ・ラマが言うところの「経験の現象学的な側面をきちんと扱う確固たる一人称的な方法論」と「客観主義的な視点に立つ脳の研究」とを架橋する研究者としての活性が不可欠であることを指摘しておきたい。感性的質感認知へのアプローチは、「脳と心の科学」をデカルトの物心二元論や心脳問題の軛から解放し、新しい人間理解のパラダイムの開拓へと私たちを導いていくことが期待される。

(2012年2月10日受付)

〔文 献〕

- 1) J. LeDoux: "The Emotional Brain: the Mysterious Underpinnings of Emotional Life", Simon and Schuster (1996)
- 2) 大橋 力: "音と文明~音の環境学とはじめ", 岩波書店 (2003)
- 3) A.J. Blood and R.J. Zatorre: "Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion", *Proceedings of National Academy of Science U.S.A.*, 98, 11818-11823 (2001)
- 4) T. Oohashi, E. Nishina, M. Honda, Y. Yonekura, Y. Fuwamoto, N. Kawai, T. Maekawa, S. Nakamura, H. Fukuyama and H. Shibasaki: "Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect. *Journal of Neurophysiology*", 83, 3548-3558 (2000)
- 5) T. Oohashi, E. Nishina and M. Honda: "Multidisciplinary study on the hypersonic effect. In: *Inter-areal Coupling of Human Brain Function*", edited by H. Shibasaki, H. Fukuyama, T. Nagamine and Mima T, Elsevier Science, pp.27-42 (2001)
- 6) J.G. Nicholls, A.R. Martin and B.G. Wallace: "from Neuron to Brain: A Cellular and Molecular Approach to the Function of the Nervous System", Sinauer Associates (1992)
- 7) T. Muraoka, Y. Yamada and M. Yamazaki: "Sampling-frequency considerations in digital audio", *Journal of Audio Engineering Society*, 26, 252-256 (1978)
- 8) G.H. Plenge, H. Jakubowski and P. Schone: "Which bandwidth is necessary for optimal sound transmission", 62nd Audio Engineering Society Convention Preprint, 1449 (1979)



本田 学 1988年、京都大学医学部卒業。京都大学大学院医学部博士課程修了。米国国立保健研究所研究員、自然科学研究機構生理学研究所助教授などを経て、2005年より、国立精神・神経医療研究センター神経研究所。脳機能イメージングをもちいた高次脳機能障害の病態解明、音の感性的質感認知の神経機構、音響情報をもちいた情報医療の開発、非侵襲脳刺激による機能的治療法の開発などに従事。博士(医学)。

感性的質感認知の脳内機構

本田 学

脳に入力される感覚情報は視覚・聴覚といったモダリティごとに固有の分析的情報処理が行われる一方、全感覚モダリティの情報が感性・情動神経系(または報酬系)で統合され、快・不快や美醜などその動物にとっての価値判断が行われる。感覚情報の質感認知は美しさ・快さといった感性・情動反応の形成に大きな影響を及ぼすと同時に、逆に感性・情動系の総合的な反応、すなわち感覚情報を受容する主体の快・不快といった情動状態が各感覚モダリティの質感認知を修飾することは、日常的によく経験される現象である。このように、様々な感覚モダリティの質感情報がもたらす快・不快や美醜などの感性・情動反応を「感性的質感認知」と呼ぶ。

質感認知と感性・情動との密接な関係にもかかわらず、現在活発に始められつつある質感認知研究の多くは、各感覚モダリティに固有の情報処理を対象としており、質感認知に対する感性・情動神経系からのアプローチは必ずしも十分とはいえない。その原因の一つとして、個別性が大きい情動・感性反応を普遍的な現象として捉えることの難しさが挙げられる。また、それに関連して、感性的質感認知の基盤となるヒトの脳機能を客観的に捉える手法が大きな限界を持っていることも無視できない。例えば、現在、ヒトの脳活動を非侵襲的に調べるうえで有力なツールとして広く使われている磁気共鳴機能画像法(fMRI)は、ジェツ

ト機並みの140 dB相当の騒音を発生する。このように、脳機能イメージングのストレスフルな計測環境や手技自体が、快・不快や美醜を伴う脳の繊細な感性的質感反応を捉えるうえで大きな問題となり得る。

そこで本稿では、まず感性的質感認知を支える報酬系神経機構とその特性について概説したのち、感性的質感認知に非侵襲脳イメージングの立場からアプローチする場合の留意点と、筆者らの研究グループが取り組んでいる、ヒトの可聴域上限をこえる超高周波空気振動により音の感性的質感認知が顕著に向上する現象(ハイパーソニック・エフェクト)を題材として、その研究を進めるなかで、感性的質感認知を客観的に捉えるためにどのような工夫がなされたかについて解説する。

感性的質感認知の基盤となる 情動系神経機構

感性的質感認知は何らかの形で快・不快の感覚と密接に関連している。ヒトの豊かな心の動きの基盤となる快・不快を生み出す神経回路の候補は、脳に病変や損傷を持つヒトの症状を調べる臨床神経学と、動物を対象とした実験的アプローチの知見が蓄積されることにより、おおよそ明らかになってきている¹⁾。それらは大きく脳幹、視床下部、大脳辺縁系から構成されており、情動神経系

Neural mechanism of KANSEI aspect of SHITSUKAN perception

Manabu Honda : 国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 疾病研究第七部(〒187-8502 東京都小平市小川東町4-1-1)

と呼ばれる。また、快・不快の感覚が動物に与える意味に着目して、快感を「報酬」、不快感を「懲罰」、それぞれを生み出す神経回路を「報酬系」、「懲罰系」と呼ぶ場合もある。

快・不快の感覚を直接生み出すのは脳幹と視床下部と考えられている。1953年、オルズとミルナーは、ラットの脳幹の特定の場所に電極を刺し、ラットが自らスイッチを操作して弱い電流を流して刺激できるようにすると、ラットが電気刺激を受けようとスイッチを何度も繰り返して押すことを見出した。これを「脳内自己刺激」と呼ぶ。彼らが電極を埋め込んだ場所は、脳幹の側坐核と呼ばれる報酬系の代表的な神経核(神経細胞の集合体)の一つである。報酬系の刺激によって誘発される快感はネズミの行動を非常に強力に支配するため、ネズミが最も忌避する刺激の一つである身体への電気ショックを与えても止めることができない。また、食欲を上回る欲求を誘発するため、摂食行動を行うことなく1分間に5,000回以上もスイッチを押し続け、死に至ることすらあるといわれている。

このように電気刺激によって強力な快感を発生させるのが、脳幹から大脳皮質や大脳辺縁系に投射するドーパミンなどを神経伝達物質とするモノアミン(作動性)神経系である。その代表格であるドーパミン神経系は中脳の腹側被蓋野(A-10)というところから発し、内側前脳束や視床下部外側野を通過して扁桃体、帯状回、前頭葉など脳内の様々な部位に投射する。

一方、脳のほぼ中心にある視床下部は繁殖、摂食、水分調節、睡眠、体温調節など、生存に直結する重要な機能を担っている。例えば、視床下部の前方内側にある内側視索前野は性行動と深く関連し、外側視床下部は摂食中枢とも呼ばれる。同じく視床下部の後核は体温の調節、室傍核は体内の水分の調節を行っている。これら視床下部の一部の核は、血液中の化学物質の濃度変化を直接感知するケミカルセンサーとして働き、身体状態の物質的変化に迅速に対応できるようになっている。同時に視床下部は自律神経系や内分泌系の最初中枢でもある。例えば、強い感動を覚えたときに顔が赤くなったり汗をかいたり、恐怖を感じた

ときに毛が逆立ったりするのは、視床下部の働きである。

このように視床下部は身体と脳とのインターフェースとして体内環境をたえずモニターし、動物が生存を維持するため適切なときに適切な行動をとるための原動力である性欲、食欲、睡眠欲をはじめとする様々な生理的欲求を発生させる神経回路として機能している。そのため、脳幹や後に述べる大脳辺縁系などと密接な神経連絡を持っている。

一方で、電気刺激によって怒りなどの不快感を発生させる脳の部位が存在することも知られている。例えば、ネコの視床下部の腹内側核というところに微弱な電気刺激を与えると、毛を逆立てたり、捻り声を上げたり、飛びかかってきたりする。こうした怒りや恐れなどの不快感をもたらす脳内の場所は、快感を発生させる神経回路と近接して存在しており、脳幹の上部にある中脳の中心灰白質を含む背側被蓋野や、視床、内側視床下部などが挙げられる。これら懲罰系の神経回路では、アセチルコリンやサブスタンスPという神経伝達物質が関与していると考えられている。

快・不快といった原初的な感情や生理的欲求を踏まえて、喜怒哀楽といった自覚できる主観的な感情を生み出し、快・不快や好き嫌いを判定しているのが大脳辺縁系と呼ばれる脳の部分であり、扁桃体、海馬体、帯状回などからなる。大脳辺縁系は脳の深部に位置し、視床や視床下部などの間脳を取り囲むような構造をしている。進化的には古い皮質(古皮質)であり、情動や記憶に重要な役割を果たしている。すなわち、大脳辺縁系の機能は大脳新皮質などと比較して、より動物に普遍的な機能といえることができる。なかでも扁桃体は好き嫌いの判断、すなわち自分にとってそのものが有益か、有害か、無意味かを判断している。この能力がなければ動物は危険や敵から身を守ることができない。例えばサルは通常、ヘビやクモに対して強い恐怖心を示すが、その両側の扁桃体を除去すると、ヘビやクモのおもちゃを平気で掴んだり、食べようとしたりする。すなわち、好き嫌いの判断回路が狂ってしまう。