

音を通じて世界を窺う聴覚の仕組み

平原達也

日本電信電話㈱



1. はじめに

電話機と蓄音器の発明により、距離と時間を超えて音を扱うことができるようになったのは19世紀後半のことである。それから125年、音を伝送したり蓄積したり加工する様々な技術は飛躍的に発展してきた [1]。そして、電話・放送などの音を扱う情報サービスと、オーディオ装置や電子楽器など音を操る道具は広く社会に普及し、日常生活基盤の一部になっている。その結果、表面的には音を処理する聴覚の役割や特性が改めて問題にされることは少なくなっている感がある。

一方、いわゆるマルチメディア情報（絵・文字・音声・音楽・映像）の中では映像の重要性が強調される傾向がある。これは、情報量の多さの故にこれまで映像を扱うことが困難であったためである。720×480ピクセルのカラー映像の情報量は約250Mbit/sで、MPEG2で圧縮しても平均4.8Mbit/sにもなる。CDの音は約1.4 Mbit/s、MP3（MPEG1 Audio Layer III）で圧縮すると1/10～1/12の128kbit/s程度になる。このように映像と音の情報量の差は1～2桁ほどある。

光センサーであるヒトの網膜の視細胞は片目で12,600万個、一次視神経は約120万個、一次視覚野には約10億個（両側）の神経細胞があり、大脳新皮質の約25%は視覚に関連した領域と言われている [2-4]。一方、音センサーであるヒトの内毛細胞は片耳で約3,000個、一次聴神経は約3万個、一次聴覚野には約1億個（両側）の神経細胞があり、聴覚関連の領域は大脳新皮質の2%

程度と言われている [5,6]。このように、情報処理を担う神経細胞数の差も1桁ほどある。また、世界的に見ても、聴覚研究者数は視覚研究者数の十分の一程度と少ない。

これらをもって、ヒトは見る動物であるとか、「百聞は一見に如かず」といって視覚メディアの方が聴覚メディアよりも情報伝達の上で重要である、と主張する向きもある。しかし、映画「アマデウス」の中に出てきた楽音を禁じられたバレエのシーンや音を止めたテレビは、ラジオドラマや音楽と比べるとあまりにも殺風景である。また、音が聞こえにくくなった老人は散歩する際に後ろから来る車などが分からず怖い、チャイムや電話の呼び出しも気づかない、家族との意志疎通に難儀する、と訴える。「視覚障害は人と物との間に障害をつくり、聴覚障害は人と人との間に壁をつくる。」とはヘレン・ケラーの言葉である。

五感にはそれぞれ得意な領分があり、それらをうまく使い分けたり組み合わせながら、私たちはコミュニケーションをはかたり周囲の状況を理解している。つまり、どちらが重要という主張はあまり意味がない。それよりも、バーチャルリアリティなどの新しい道具を創りだすにあたって、情報の受け手である人間の感覚情報処理特性や嗜好をそれなりに知っておくことが肝要である。本論文では、聴覚系の仕事、音の聴かれ方、音を聴く仕組み、音と他の感覚との相互作用について述べる。

2. 聴覚系の仕事

聴覚系の仕事としてよく知られているのは、音がどの方向から来たのかを判断する音源定位機能と、それが何の音であるかを判断する音源識別機能の二つである。しかし、この二つだけが聴覚系の仕事ではない。そもそも聴覚系は、音を通じて身に迫る危険を察知して回避行動を起こしたり、餌を見つけたり、異性を誘引して繁殖のためのプロトコルを確認したりするために発達してきた遠方感覚系である。その役割は、自分の周りの状況を把握するための情報や、相手が伝えようとしているメッセージを解読するための情報を、耳に到達した音の断片から適切、頑健、かつ迅速に脳のなかで創りだし、自分が次に取るべき行動を決める一助とすることにある。

音声メッセージを解読するコミュニケーション音の処理は音源識別機能の一つとも言える。しかし、コミュニケーション音は往々にして生物学的に意味のある特別な音響信号で、カテゴリー知覚がなされ、言語処理系を駆動するとともに、その受け手は同じコミュニケーション音を出す発声システムを持つ。そこで、コミュニケーション音の処理機能は、一般音の識別機能とは別に考えたほうがよい。

また、聴覚系は自らの発声音を常にモニタして発声を安定させている。遅延聴覚フィードバック現象として知られるように、自分の声を数百ミリ秒遅らせて聞かせると思うようにしゃべれなくなってしまうし [7]、個々の子音の構音にも聴覚的なフィードバックが関与していることが分かってきている [8]。このような発声音の制御も聴覚系の重要な機能の一つである。

さらに、聴覚系には常に音を聞いていて新奇な音音が聞こえるとその音に対して自動的に注意を向ける仕組みがある。電話の呼び出し音、サイレン音、コンピュータの警告音、自動車のクラクション音などは、このような音を通じた早期警報機能を利用している。この警報機能は他のモダリティに負荷がかかる作業中でも注意を喚起したり、目覚まし時計の音のように睡眠中の脳を覚醒させることすらできる。

このほか、ガラスをひっかく音を聞くと背筋がぞくぞくしたり、音楽を聞くとリラックスしたり気分が高揚したりすることは日常的に経験する。このように音は感情を喚起し、自律神経系の活動を変化させ、その結果として私たちの行動に影響を与える。このように聴覚には情動系を賦活する機能もある [9]。

3. 心理物理学的にみた音を聴く仕組み

本章では、錯聴現象を題材とした心理物理実験を通じて明らかになりつつある、音を聴く巧みな仕組みについて述べる。

3-1 ダイナミックな音を聴く仕組み

私たちの耳は、物理的には同じ音であっても、その音を聞く前後の状況によって、異なった音として聞くことがある。例えば、いくつかのスピーカーを周囲に並べてその一つから音を出すと、どのスピーカーから音が出たかが分かる。しかし、あるスピーカーから出した音をしばらく聞いた直後には、本来の位置から少しずれて音が出ているように聞こえ、このずれは先行する音の位置に反発する方向に生じる (図1)。この聴覚定位残留現象を利用してヒトの両耳間時間差の処理機構を系統的に調べた結果、両耳間時間差処理モジュールは少数の緩やかな両耳間時間差検出特性を持つフィルタを利用していること、入力音に応じてそのフィルタの利得が動的に変化していることなどが分かってきた [10-12]。

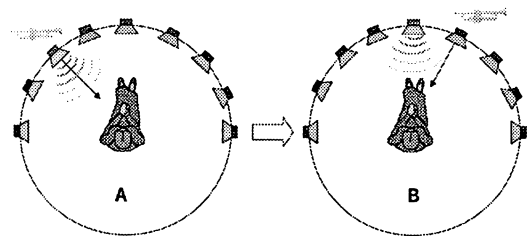


図1 ある方向からの音をしばらく聴いてから (A) 別の方向の音を聴くと (B)、少しずれた方向から聞こえてくる音源定位残留現象。

また、右から左へと音源が空間的に移動する音をしばらく聞かせた後で、物理的に静止した音源を聞かせると、その音源は左から右へと移動しているかのように聞こえる。この聴覚的運動残留現象を系統的に調べた結果、聴覚系には特定の音源移動方向に選択的に応答する神経機構がありその神経機構の感度が直前の入力に応じて時々刻々と変化していること、音源の動きや聴取者の頭部の動きが音源の位置判断の精度を高めることなどが分かってきた [13, 14]。

これらの結果は、聴覚系の初期の段階位には両耳間時間差成分 (ITD) やその時間変化成分 (Δ ITD) といった属性を専門に処理する情報処理モジュールがあり、それらのモジュールの処理特性が時間的・空間的な音環境によって時々刻々と変化していることを示唆している。こ

のようなモジュールとして、このほかにも音の高さ（ピッチ）、振幅変調成分（AM）、周波数変調成分（FM）などを専門に扱うものがあることが検証されつつある。

なお、このようにモジュールの処理特性が時間的に変化してしまうと、外界の状況を反映する物理的な特徴がいつも同じように表現されないために困ると思われるかもしれない。しかし、注目する刺激の周囲を細かく分析できたり変化を強調したりできるために、大局的に見ると、処理特性が固定されている場合よりも効率的に情報を処理できると言えよう [10]。

3-2 多数の音を聴く仕組み

多数の図形を同時呈示した場合に視覚系が同時に処理できる図形の数に限界は7～8個と言われている。ところが、聴覚系が同時に処理することができる音源の数は意外に少なく、たかだか2つ程度でしかない。

1秒程度の短い単語音声を複数用意し、それらを重ね合わせて呈示して話者の数を答えさせると、重ね合わせた音声は2つまでならばほぼ完全に話者数を答えることができるが、3つ以上の音声を重ね合わせた場合には話者数が過小評価されて正しい話者数を答えられなくなる（図2）。しかも、この処理限界は、音声の周波数的・時間的・空間的な重なり具合を操作してもほとんど影響されず、音の種類にも依存しない [15]。

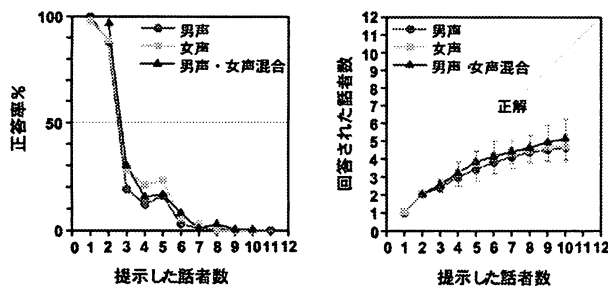


図2 複数の男の声だけを用いても、複数の女の声だけを用いても、男と女の声を混ぜ合わせても、3人以上の声を混ぜ合わせると話者数を当てることができなくなる。（左図）そのとき、回答された話者数は常に過小評価される。（右図）

このことは、聴覚系は瞬時的に2つの音を処理するのが精いっぱいであることを示唆している。指揮者のようにオーケストラの演奏の中から多数の楽器の音色を聞き取ることができる人もいれば、雑踏の中で何人もの話声を聞き取ることができるという聖徳太子のような人もいるかもしれない。このような人々も、ある瞬間瞬間で見ると2つの音を処理するのが精いっぱいなのだが、注目する対象音

をつぎつぎと移動させることによって、全体としては3つ以上の楽器や話し声の流れを聞き取っていると考えられる。

3-3 一部が欠けた音を聴く仕組み

聴覚系は聞こえてくる音の一部が欠損していてもそれらを補って聞くことができる。ピーという純音を0.1秒毎にオン・オフさせると当然ピー、ピー、ピーと断続的な音が聞こえてくる。この断続的な音の無音区間にザッという雑音を入れて、ピーザッピーザッピーザッ……と純音と雑音が交互に現れるようにすると、ザッ、ザッ、ザッ……という断続する雑音の中に、ピーという純音がずっと連続して鳴っているように聞こえる。（図3）同じ現象は音声や楽音のような複雑な音でも生じる。例えば、音声を0.1秒毎にオン・オフすると、音声の断片しか聞こえてこないで、何を言っているのかは分かりづらくなる。ところがこの無音区間に雑音を埋め込むと、ザッ、ザッ、ザッ……という断続する雑音の中に、あたかも連続した音声があるかのように聞こえ、その内容を聞き取ることができるようになる [16]。

このような補完現象はいつでも生じるわけではない。補完される音を十分にマスクすることができるような音響的な性質を持っている雑音を埋め込んだときに限り、欠落した音が聞こえてくる。つまり、音が無いという情報は音の切れ目を明示するが、音の切れ目が他の音によってマスクされると、聴覚系は切れ目が無い連続した音として聴いてしまうのである。このように脳は内部で使う情報を創り出すことによって、多くの音が混在している実際の音環境において、本来つながっている音は他の音が混入してもつながったように聴くことを助けている。

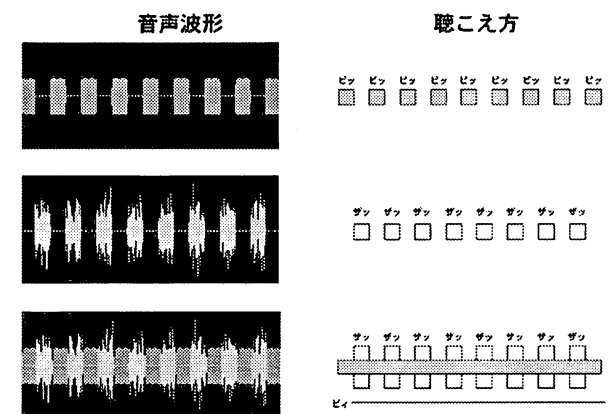


図3 雑音が音の欠落した部分を補完する現象

4. 神経生理学的にみた音を聴く仕組み

本章では音を聴く仕組みを実現している生理学的な実体の理解の現状を概説する。詳細については参考文献に挙げた教科書や総説を参考にされたい。[5,6,17-20]

4-1 音を拾う聴覚末梢系の仕組み

外耳・中耳・内耳を聴覚末梢系と呼ぶが、この部分の仕組みはかなり明確になっている。(図4、図5)

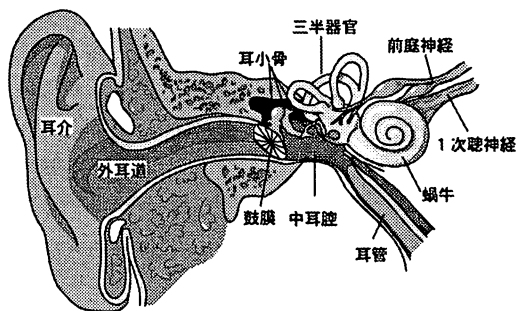


図4 聴覚末梢系の構造

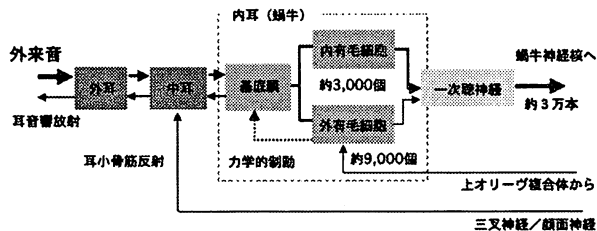


図5 聴覚末梢系のブロック図

頭部と複雑な形状を持つ耳介は音響系の伝達特性(頭部伝達関数 HRTF: Head Related Transfer Function)を形成し、同じ音源であっても方向によってスペクトルに色付けして音の到来方向の検出に一役かっている。外耳道の奥にある鼓膜を振動させた外耳道内の空気振動は耳小骨連鎖を通じて蝸牛へと伝わる。

内耳は音響信号の受容器である蝸牛と平衡感覚の受容器である三半器官とで構成され、硬い側頭骨の内部に埋もれている。蝸牛の基底膜振動系は入力音を周波数成分に分ける多数の帯域フィルタバンクとして機能している。基底膜の先端から根元に向かって、各フィルタの中心周波数は対数的に並ぶ。その帯域幅は低域ほど狭く、周波数的にも時間的にも非対称な応答特性を持つ。また、この基底膜の進行波を利用した機械的なフィルタは、入力音圧レベルに応じて共振の鋭さ、共振周波数、利得の3つを同時にダイナミックに変化させ、弱い音に対しては共振の鋭さと利得を増加させ信号のS/Nを上げている。

基底膜上には内側に1列、外側に3列の有毛細胞が整然と並んでいるが、約3000個しかない内毛細胞が末梢から上位への情報伝達チャンネルとして機能し、その3倍もある外毛細胞は主として基底膜の振動を力学的に制御する能動的な制動装置として機能している。基底膜の変位は内毛細胞の受容器電位に変換され、それらにシナプス結合している一次聴神経の発火を引き起こす。一次聴神経を発火させるのに必要な基底膜の変位は、最小可聴閾付近ではわずかに数ナノメータ程度である。

このように、聴覚末梢系の仕事は主として音響信号の符号化であり、音響信号に含まれる特徴の抽出は次節に述べる聴覚中枢系の仕事である。

4-2 音の特徴を搾り出す聴覚中枢系の仕組み

視覚系では視神経の発火パターンが一段の中継で大腦皮質に至るが、一次聴神経の発火パターンは脳幹にある神経核で数段階の処理を経た後によく大腦皮質に達する。(図6、図7)

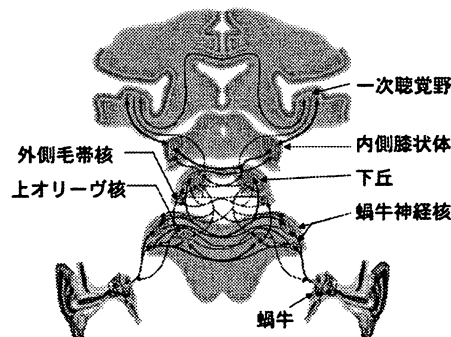


図6 聴覚中枢系の構造

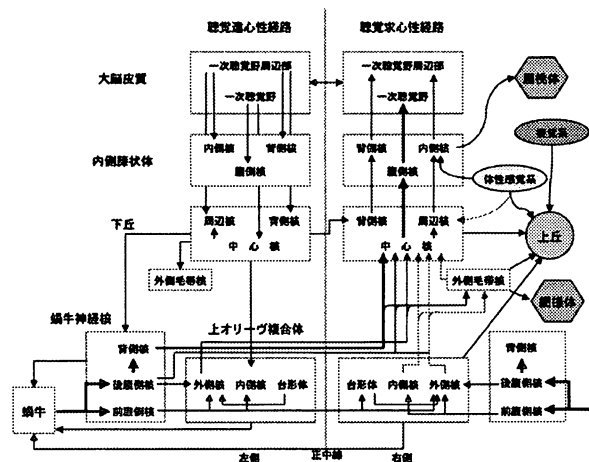


図7 聴覚中枢系の配線図。右側には主な求心性経路を、左側には主な遠心性経路を描いてある。実際には、両側とも求心性・遠心性の両経路がある。

聴覚系の第1中継核は蝸牛神経核で、3つの領域に分かれている。ここには一次聴神経が二股に分岐して投射しており、前腹側核は一次聴神経の発火パターンをほぼそのまま両側の上オリーブ複合体に中継する。後腹側核と背側核は一次聴神経の発火パターンから入力音の周波数・時間的特徴を強調あるいは抽出して反対側の下丘へ送る。なお、ネコなど随意に耳介を動かせる動物では、頭部伝達関数によって形成される高域スペクトルの谷を背側核のニューロンが検出して耳介の動きを補正し、音源定位に役立っている。耳介を動かさないヒトでは背側核は退化している。

第2中継核は上オリーブ複合体で、左右の蝸牛神経核からの求心性神経が初めて収束する。ここでは両耳に入ってきた音の両耳間時間(位相)差と両耳間音圧差が荒く抽出され、音源定位に用いられる源情報となる。

第3中継核は外側毛帯核で、蝸牛神経核と上オリーブ複合体からの投射を受け、主として下丘へ投射する。腹側核は音の検出や音響驚愕反応などに関与し、蝸牛神経核から覚醒を司る網様体へ至る一部であるといわれている。背側核はコウモリやイルカ等のこだま定位を利用する動物において良く発達しているが、サルやヒトでは明確ではない。

第4中継核は中脳にある下丘で、中心核、背側核、周辺核の三つの領域に分けられる。中心核には蝸牛神経核や上オリーブ複合体からの投射が集まり、ボトムアップ情報としての複数の特徴要素の抽出をほぼ完成させる。周辺核は中心核から聴覚情報を受けるとともに、体性感覚情報を受ける。一方、背側核への求心性神経の投射は少なく、逆に大脳皮質聴覚野から遠心性神経の投射を強く受けている。なお、メンフクロウの下丘の外側縁にはフクロウの頭を取り巻く外界の空間を反映するように各音源の位置に敏感なニューロンが並んでいる。また、下丘からは上丘の深層部への投射があり、上丘では聴覚的な空間マップが表現されている。

第5中継核は視床にある内側膝状体で、腹側核、背側核、内側核の3つの領域に分けられる。腹側核は下丘中心核からトポロジカルな投射を受け、一次聴覚野に投射している。背側核は下丘背側核からの投射を受け、一次聴覚野の周辺領域に投射している。内側核は、下丘周辺核からの投射を受け、多種の感覚情報入力を統合する。また、内側核からは情動処理を担う扁桃体へ投射がある。内側膝状体の3つの領域は並列に情報を聴覚野各部に送ると同時に、聴覚野からの遠心性神経の投射を受けてお

り、大脳の制御下で下丘から送られてくる情報を統合していると考えられている。なお、ヒゲコウモリでは、2つの成分の組み合わせに感度の良い組み合わせニューロンが内側膝状体の内側核と外側核にあり、生物学的に意味のある特徴要素の抽出が成されている。

4-3 音情報を再構成する高次聴覚系の仕組み

世界的な脳科学研究の高まりに伴って神経科学の対象は末梢系からより高次系へと移っている。コウモリやメンフクロウといった特殊な聴覚機能を持つ動物の聴覚野における情報表示についての理解は進んでいるが、サルやヒトの聴覚野については音情報の表現のされ方や情報処理機能単位もまだ分かっていない。蝸牛で場所表現された周波数マップが聴覚野では複数再現されている、といった域を出ていない。

近年、PETやfMRIやMEGを利用してヒトの脳活動を非侵襲に計測することが比較的容易にできるようになり、言語音や視聴覚相互作用などの処理部位の推定が進められつつある。しかし、聴覚系が扱うような比較的早い時間変化を伴う音情報に対する大脳皮質活動を非侵襲に観測する技術は時間・空間分解能の点でまだまだ未熟であり、高次聴覚系の処理メカニズムに関する構成的な議論ができるようになるのはまだ時間がかかるであろう。

4-4 遠心性神経の仕組み

聴覚野や脳幹の各神経核からは下位の神経核に対して多くの遠心性神経の投射がある。聴覚野からは内側膝状体と下丘へ、下丘からは外側毛帯核と上オリーブ核と蝸牛神経核へ、上オリーブ核からは蝸牛の外有毛細胞を制御する遠心性神経の投射までである。内側膝状体から下丘への投射だけが無い。

これらの遠心性神経系は、脳幹神経核における情報処理を調節して短期的な再組織化を引き起こすと考えられ、その結果として聴覚野の回路も再組織化される。そして入力音と行動とが連合すると、短期的な再組織化が固定されて、動物は音の意味を学習するとも言われている[21]。

5. 聴覚と他の感覚との相互作用

聴覚経路では視覚と体性感覚情報を受ける神経核があるし、上オリーブ複合体、外側毛帯核、下丘からは視覚、体性感覚、運動系などが集まる上丘への投射がある。つまり、聴覚と他の感覚とは大脳皮質より下位の系

でも独立ではない。

視覚刺激が音知覚に影響を及ぼすことはよく知られている。例えば、/ba/という唇を閉じて発音する有声子音で始まる音節を、/ga/という唇を閉じない有声子音を発話する唇の動きを見ながら聞くと、/ba/ではなく/da/のように聞こえてしまうMcGurk効果、スピーカーとディスプレイとが多少離れていても、ディスプレイの映像から音が出ているように聞こえてしまう腹話術効果などについては詳細に調べられている[22-26]。

一方、聴覚刺激が視知覚に影響を及ぼすことはあまり知られていない。例えば、実験室的環境下ではあるが、視覚刺激の呈示順序判断が音刺激によって影響を受けたり、単一の視覚的フラッシュに複数の短音刺激が伴うと複数のフラッシュが見えるかのように誤って知覚される。また、直線あるいは交差する経路上を動く二つの視覚刺激は、衝突後に反発するようにも見えるし、すれ違うようにも見え、運動の解釈は多義的である。ところが、二つの物体が重なった時点で音を鳴らすと、それらの視覚刺激は衝突して反発する運動として知覚され、視知覚の多義性が解消される[27]。

この他では、衛星中継回線やインターネットなど伝送経路で遅延が生じ、映像と音声との同期がある程度以上ずれてしまうと、違和感が生じる[28]。また、突然空から轟音が聞こえて来たとき、何が起こったのかときよろきよるとあたりを見回し、飛び去る機影を見つけてホッとするという経験もあるだろう。さらに、自動車の運転中や歩行中に重低音のクラクション音が聞こえ、大型トラックが後ろから来ているのかと思いきや、小型自動車しか見えないのでしばらく戸惑うといった構図にも、様々な場面で遭遇する。

これらは、私たちの脳が耳や目から入る情報を総合的に咀嚼する過程、すなわち経験を積んできた日常的な物理世界の「常識」とのずれが生じたために起こる。私たちが暮らす世界では、音と映像はほぼ同時にやって来ると思い込んでいるし、形状が大きなものは低い大きな音を出すということが「常識」となっている。これらに関連して、最近では、脳が世の中の出来事の時間的特性をどのように表象しているかについての議論がかしましい。

体性感覚・味覚・嗅覚と聴覚との相互作用についてはあまり知られていない。回転機構を持つ機械の調子を判断するのに手や指を通じた振動と耳を通じた音を使う場合や、不幸にして視覚機能を失ったり視覚能力が衰え体性感覚と聴覚で世界を把握することが必要な場合には、両

者の相互作用が起こるのである。

また、感覚情報処理における運動による環境との相互作用という観点も重要である。私たちの聴覚系はただ単に耳に到達した音情報を咀嚼するのではなく、自らの体や頭を動かして積極的に音情報を取り入れようとするし、手をたたいたり声を出したりしてその響き具合を元にして自分の周囲環境の情報を得る。耳介の運動情報と音の情報とが聴覚系の2次神経で処理されていることは前述したとおりである。このような能動的な環境との相互作用を前提とした情報処理は聴覚に限ったものではない。

6. おわりに

私たちの脳の一部である聴覚系は、進化の過程で獲得された音情報処理の基本構造と、個体が生活する環境で遭遇した様々な経験によって調節された音情報処理特性およびその過程で学習した「常識」に基づいて、周囲の様子や相手が伝えようとしているメッセージの内容が首尾一貫性を保つように、多くの場合は自分にとって都合の良いように、自らが使う情報を再構成しているのである。

したがって、人間の情報処理の基本構造や処理特性のツボをはずした刺激は効果が無いばかりか、害をもたらしかねない。モノメディアはさほどでもないがマルチメディアには人間を動かす力があるために、五感を総合的に扱う新しい道具を創りだすに当たっては、細心の注意が必要である。逆に、ツボを押さえて五感刺激をうまく操ることができれば耳を騙すことができ、耳は騙されたことになかなか気がつかない。また、相手のツボを押さえたメッセージを送ることができれば、大げさな身振りや言葉を虚しく飛び交わすことなく、最小限の情報のやり取りで意志の疎通がはかれコミュニケーションが成立する。

このような脳が情報を再構成し易いように刺激を操る方法、別の言葉で言えば脳の想像力(イメージーション)を掻き立てる方法を極めることも、人間の能力を拡張すると言う意味において、バーチャルリアリティ技術の一つであろう。そして、それらは、音を聴く仕組みをはじめとして人間の情報処理のからくりを探る有効な道具ともなるであろう。

参考文献

1. 特集—音響学における20世紀の成果と21世紀に残された課題—、日本音響学会誌 vol.57, No.1, 3-112 (2001)
2. 金子章道 他訳:「ニューロンから脳へ」第3版、廣

- 川書店 (1998)
3. Stevens, C.F.: An evolutionary scaling law for the primate visual system and its basis in cortical function. *Nature*, Vol. 411, 193-95. (2001)
 4. Van Essen D.C., Drury, H.A.: Structural and functional analyses of human cerebral cortex using a surface-based atlas, *J. Neuroscience*, Vol. 17, 7079-7102. (1997)
 5. J. O. ピクルス「聴覚生理学」、谷口郁雄 監訳、二瓶社 (1995)
 6. Moore, J.K.: The human auditory brain stem: A comparative view, *Hearing Research*, Vol.29, 1-32. (1987)
 7. 河原英紀：声を使って聴覚を探る、*日本音響学会誌* Vol.53, No.9 731-737 (1997)
 8. Honda, M. & Fujino, A.: Articulatory Compensation and Adaptation for Unexpected Palate Shape Perturbation, *Proc. 6th International Conference on Spoken Language Processing*, 170-173. (2000)
 9. LeDoux, J.E.: Emotion circuits in the brain. *Annu. Rev. Neuroscience*, Vol.23, 155-184. (2000)
 10. 柏野牧夫：人間の聴覚系の科学—空耳からみた脳の戦略—、*NTT R&D* Vol.47, 393-398 (1998)
 11. 柏野牧夫、西田眞也：錯覚の情報学 (3) 音源の位置で伸び縮みする聴覚の空間、*日経サイエンス*, Vol.30, No.4, 68-69 (2000)
 12. Kashino, M. & Nishida, S.: Adaptation in the processing of interaural time differences revealed by the auditory localization aftereffect. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol.103, 3597-3604. (1998)
 13. 植松尚、柏野牧夫、平原達也：聴覚運動残効の周波数選択性、*日本音響学会聴覚研究会資料* H-97-32, 1-8 (1997)
 14. 柏野牧夫、西田眞也：錯覚の情報学(9) 仮想現実感をつくり出す秘術は？、*日経サイエンス*, Vol.30, No.10, 126-127 (2000)
 15. Kashino, M. & Hirahara, T.: One, two, many-Judging the number of concurrent talkers. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol.99, 2596. (1996)
 16. 柏野牧夫、西田眞也：錯覚の情報学 (1) 騒音の中でつながる途切れた音、*日経サイエンス*, Vol.30, No.2, 124-125 (2000)
 17. 力丸裕：音響・聴覚系の生理学、視覚と聴覚、川人光男他編 (岩波書店、東京) pp.129-179 (1994)
 18. 平原達也：聴覚のメカニズム、*視聴覚情報科学、ATR 国際電気通信基礎技術研究所編* (オーム社、東京) pp.145-200 (1994)
 19. 小島久幸：聴覚皮質の神経経路、*日本音響学会誌* Vol.53, No.5 383-391 (1997)
 20. 平原達也：聴覚末梢系における音情報表現、*日本音響学会誌* Vol.51, No.7 565-571 (1995)
 21. 菅乃武男、他：皮質遠心系と行動上意味のある音の処理：展望、*日本音響学会誌* Vol.57, No.3 244-250 (2001)
 22. 積山薫：視覚と聴覚の接点、*日本音響学会誌*, vol.54, No.6, 450-456 (1998)
 23. 丸山欣哉、佐々木隆之：視覚と聴覚間の相互作用諸効果、*日本音響学会誌* vol.52, No.1, 34-39 (1996)
 24. 小宮山撰：視覚と聴覚による音像知覚、*日本音響学会誌* vol.52, No.1, 46-50 (1996)
 25. 近藤公久、笈一彦：音声情報と同時に提示される文字情報の音声知覚に与える影響、*日本音響学会誌* vol.51, No.7, 548-557 (1995)
 26. 近藤公久：マルチモーダルな知覚過程、*電子情報通信学会誌* vol.78, No.12, 1230-1233 (1995)
 27. 下條信輔、他：知覚モダリティを越えて：視聴覚に及ぼす聴覚の効果、*日本音響学会誌* vol.57, No.3, 219-225 (2001)
 28. 栗田孝昭：音声遅延と映像遅延が通信品質に及ぼす影響、*日本音響学会誌* vol.52, No.1, 57-62 (1996)
- 【略歴】**
 平原達也 (HIRAHARA Tatsuya)
 1978年北海道大学工学部卒業、1983年同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。工学博士。同年、日本電信電話公社入社。以来、横須賀電気通信研究所、ATR 視聴覚機構研究所、MIT-RLE、NTT 基礎研究所、米国 Eaton-Peabody 聴覚生理研究所、国際電気通信基礎技術研究所で、音声工学と聴覚科学の研究開発および研究マネジメントに従事。2000年より NTT コミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部長。電子情報通信学会、日本音響学会、米国音響学会会員。