



Title	ヒトの聴空間に関する耳介の役割：人頭模型によるシュミレーション実験
Author(s)	田荷, 繁
Citation	北海道大學教育學部紀要, 19, 63-79
Issue Date	1972-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/29066
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_P63-79.pdf



ヒトの聴空間に関する耳介の役割

—人頭模型によるシミュレーション実験—

The Role of the Pinna in Auditory Space —The Simulation Experiment with the Human Head Model—

田 荷 繁

Shigeru Tani

概 要

ヒトの耳の役割は音を知覚させ位置情報と信号情報とを分析することにある。本論文は、空間における音源の位置情報に関して、聴覚の入力部分である外耳がどのような影響力を持つかを調べたものである。ヒトの首から上部の模型を使ったシミュレーションとして耳介の作用を音空間の計測によって知りえた。

プラスチック粘土製の人頭模型に、人工耳介と直線状の外聴道を設けて、鼓膜の位置に小型マイクロホンを組み込んだ。模型を卓上に乗せてスピーカーから音波を放射し、模型を首の中心軸のまわりに360°回転させて、立体空間の音波の情報受音として水平平面極座標への投影を求めた。

純音の周波数を500Hzから4500Hzまで500Hz間隔とした。音波の方向を0°としておき、顔がそこにきたときに両耳に等しい音圧レベルを与えるから、そこで-35dBまたは-40dBに設定して360°、10°間隔の音圧レベル計測を行なった。

計測された耳介つきパターンと耳介なしパターンとの比較検討によって2500Hz以上における耳介の作用を認めた。また、耳介つきパターンの右耳に対して左耳を180°回転せしめて重ねて2500Hz以上において耳介の作用を認め、また1000Hz以上において反射音波に対する耳介の作用を認めた。

耳介つきパターン群と耳介なしパターン群を比較するために、各パターンの直接音波の影響を強く受けているところの最大音圧レベルを基準の0dBとして、パターンの凹凸部レベルと0°の方向におけるレベルとの差をデシベルで求めグラフ化して、その分布から耳介の効果を求めたところ、耳介が付くことによって吸収や干渉の影響を減らして音を聞きやすくしていることが認められた。

目 次

第 1 節	まえがき	第3・5節	発音系と音場
第 2 節	実験の目的	第3・6節	受 音 系
第3・1節	模 型	第 4 節	実 験 結 果
第3・2節	外耳の構造	第 5 節	考 察
第3・3節	人 工 耳 介	第 6 節	あとがき
第3・4節	聴 空 間		

第1節 ま え が き

ヒトの音の知覚には、音源のある方位と位置、および音の信号内容などがある。筆者は前者を位置情報と呼び後者を信号情報と呼ぶ。従来、ヒトの音源定位能力については、頭の前方後方混合などの誤りを100分率で示したり、方位の判別誤りを60分法で示した報告がなされている。他方、外聴道にマイクロホンの先に付けた細管を挿入して、ヒトの外部の音圧と鼓膜のところや外聴道の途中における音圧を測定して、外聴道の共鳴が調べられた。

筆者は以上に加えて外耳が聴覚における入力部分として特に重要であるが、その示す特性がかなり影響力を持つことを調べてみようと考えた。特に、耳介は退化した形で付けられた装置であるけれども、聴覚にかなりの影響力を持つであろう。聴えに対して未だ生の形の聴空間において耳介はどのような作用をなしているかを調べる。

本実験研究では、ヒトの頭部(首から上)の模型に外耳をそなえた物を作って、鼓膜のところに小型マイクロホンを組み込んだ。固定されたスピーカーから純音を出して、外耳の中のマイクロホンの受音音圧を調べる。

500Hzから4500Hzまで500Hz間隔で純音を放射して一つのパターンに36個の計測を行なって、模擬聴空間パターンを作り、そこから耳介の作用を見つけ出して、耳介の効果の推定を行なった。

そのパターンから公式によって感覚に変換できることを示した。

第2節 実験の目的

Stevens と Newman (1934) によると、顔面の前方や頭の後方における音源定位は 4° 位の誤差で行なわれ、外聴道軸の方位に近づくと定位は 16° 位の誤差で行なわれる。周波数別では、3 KHzで $18^{\circ}\sim 21^{\circ}$ 位のピークの誤差を持ち、500Hzでは 12° 位である。前方後方の逆転知覚では150~2000Hzにおいて37%であるのに対して4000Hz以上では17%と小さくなる。Freedman と Fisher (1968) は耳介が付いているので定位はよくなっていることを示し、また首を自由に動かせると定位はよくなることを示した。以上のように外耳の影響のうちで耳介による効果というものがあるということを推察させる。

高度難聴者の報告によると、正常な片耳である程度の

音源定位ができるという。内耳が定位に直接関与することとは、楯円窓にアブミ骨だけが付着していることから考えられないのだが、アブミ骨の可動性がかなり自由であるらしいので、中耳の骨の3度の自由度に関係があるかも知れない。それにしても鼓膜のツチ骨に定位能力を持たせるように伝達させる外耳の影響力は当然考えられてよい。耳介の作用がそのような定位に役立つ効果をどれほど持ち且つ限界を持つかを調べなくてはならない。

外聴道は水平断面と前方断面から見て多少S字状をしているが、それが定位の誤差を増す結果となるであろうことは想像させるが、それならば耳介に音波が当たる段階で外聴道に導入することに関して調べて見る必要がある。耳介は方位選別のために役立っているだろうか。

Wiener と Ross (1946) は外聴道の音圧分布を調べ報告している。それは方位が 0° 、 45° 、 90° のもので周波数の関数としたデーターを示している。1 KHzあたりから音圧が徐々にもち上り4 KHzにおいて20dBの利得を示している。外聴道の径が太ければ太いほど音圧の減衰は少ないであろう。しかしヒトでは音波の損失はほとんどないようである。立体空間の音波がヒトから見た状態で知覚されるので、特に外聴道による変更なしに忠実に鼓膜に伝達されるべきである。忠実ということとは位置情報に関しては定位がきわめてよくできることを要求する。

模型では耳介の入り組んだ構成の再現がむずかしかったので単純な人工耳介とした。外聴道は直線状とした。寸法はハンドブック (S.S. Stevens, 1966) のものとほぼ一致する。この寸法は生体では当然個人差が大きい。求めた聴空間のためのパターンを解読しやすくするために、首の縦方向中心軸が両耳軸を結んだ線と交わり且つ正中面と交るようにした。空間では音源の位置は立体座標や円柱座標で与えられるが、聴覚ではディメンジョンが音波伝播で与えられるから、首を回したときには水平平面極座標の幾何学的な射影ではありえない。投影されたパターンを作ることとなる。

聴空間パターンには耳介の作用量が現れる。それをゾーン尺度を用いて変換すればそれは聴えに現れる耳介の作用量である。音場を教官室内に形成するわけだが、スピーカーは固定して模型の方向に音波の最大値エネルギーを置いて放射する。直接音波のみならず周囲の物体からの反射音波も加わるし、音波の吸収や干渉も考えられる。模型では音波が反射したり回折したりして外耳入口に達するだろう。耳介はある取付角度と大きさを持つ

ているから、模型によって反射され回折された音波にかかわり、集音もするだろう。聴空間パターンとして求めた計測された耳介の作用量をヒトの音の大きさの弁別閾と較べて、それが十分認知可能であるということがわかるはずである。

信号発生器からスピーカー迄を発音系とし、外耳のマイクロホンと耳介からデシベルメーター迄を受音系とする。この二つの系を結合するのが音波である。音波には純音（歪の少ない正弦波）を使ったが、周波数はかなり離散的にならざるをえない。音声などでは、単一の周波数にかかわるのは基本周波数とピッチ感覚位のもので、フォルマントは帯域波である。音波の信号情報に対する外耳の作用についてはまた別の機会に報告したい。

聴空間パターンを作ってみて、水平方位角と定位との関係において、耳介が付くことによって方位角の切れ即ち分解能力といえるものが改善されることが示される。このことは定位の改善に耳介は重要な役割をもっているという Freedman と Fisher の報告を裏づける。彼らの場合は8方向の定位を測定したのである。筆者の実験では360°に対して36個の音圧を計測してパターン化して調べたのである。

従来、音波の到来を示す表示法としてハリネズミ模型⁽¹⁴⁾が使われている。直接音波の針は長い。そしてあらゆる方向にピンが埋め込まれている。身体、特に首から上の部分の作用は無視されている。ヒトの聴感覚と結合させるのであれば、本論文に述べるような身体的作用に関するもの、ここでいえば、耳介の作用の効果などが考慮されてよい。

音場は教室であるから自由空間といえない。反射音波は反響と残響を伴って充満している。音波の放射持続はできるだけ短時間にしたい。また、90°の隅角は進行していた音線と並行に音波をはね返すから、パターン上に顕著な凸部を作る。その他の反射音波もパターン上に凹凸を1500Hz以上で現してくる。耳介の作用は耳介から見た音波の方位によって、かなり異った作用をするわけだから、パターンを解読するときには直接音波と間接音波とに分けて考えてみる必要があるだろう。

ヒトは音がすれば何らかの反応を示す。首を回すことも動機づけの一つである。われわれは知覚上の限界を知りつつ、空間によい条件を作ろうとしているのである。

第3・1節 模 型

頭の模型の寸法を図3・1に示す。この模型は人頭とかなり相似であるけれども、首の位置が後頭連続面から

離れ、首の縦方向の中心軸が外聴道軸（または入口）を結んだ線と顔と正中面と交ったところを交差するように作ってある。このような配慮は得られる聴空間パターンの解読を助けるだろう。

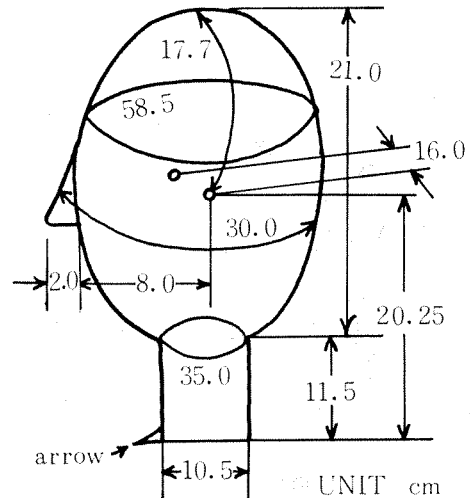


図3・1 模型の各部位の寸法

この模型は教材造形用軟質ポリカラー・プラスチック粘土（ $\frac{1}{8}$ 50）を使って製作した。図3・2は模型の外観である。

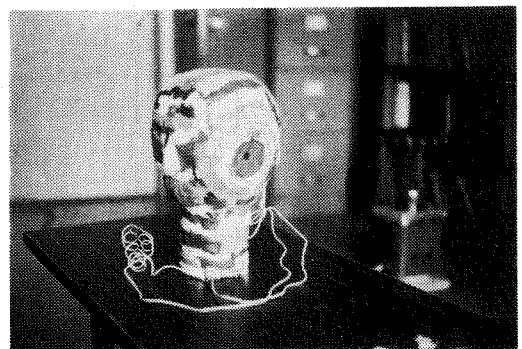


図3・2 人頭模型の外観。左耳プラグが色別されている。

模型の大きさは、年齢25歳、背丈162cmの男性1名のものに近い。頭型顔型は各個人でそれぞれ違う。しかしその差異が聴え自体を変えるほどの作用をしていないだろう。各部位における回折現象はあり、反射現象も各局所で見られる。高い周波数の音波が作用するとき、子どもと大人の違いは勿論のこと、形態による効果が認められてこようが、例えば音声周波数などではそれは無視されよう。

第3・2節 外耳の構造

外耳とは、耳介を含めて鼓膜までのところをいう。図3・3に概略の解剖図を示す。

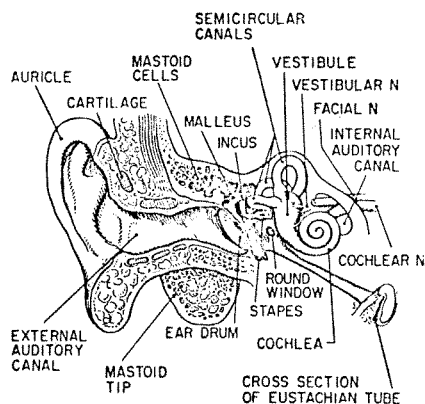


図3・3 ヒトの外耳、中耳、内耳、半規官の位置関係を示す解剖図。

次に、模型の外耳の断面図を図3・4に示す。マイクロホンを包含するプラグである。

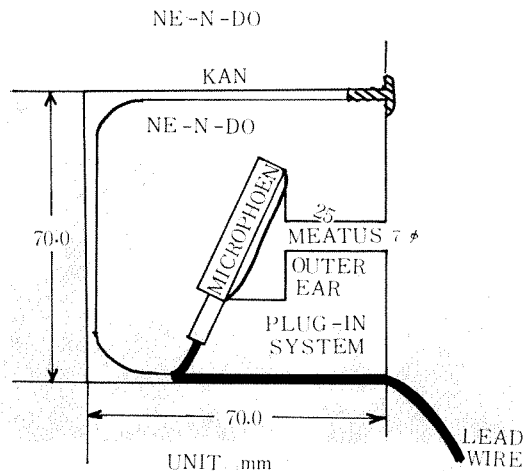


図3・4 模型外耳の断面図。寸法を示す。

外聴道は直線状になっている。クリスタルマイクロホンは径が36mmで割合大きい。従って直線状外聴道の終端部分に空隙（カマボコ型）ができた。中耳の鼓室は2ccの容積をもっている。従って今ここに空隙を作ったとしても特性を変えるほどのことはない。

マイクロホンの出力リード線はプラグの周辺で缶との間隙を通して外部に引出される。マイクロホンの交換や外聴道の形状および寸法の変換が自由に行なえるのを

特徴とする。

第3・3節 人工耳介

これは頭の模型と同じプラスチック粘土で作った。年齢20歳前後の男性学生7名の耳介主要寸法を表3・1に示す。本実験ではその平均値を使った。

(cm)	最大耳介長	最大耳介幅	凹み長	凹み幅
A	6.3	3.0	2.6	2.0
B	6.5	3.0	3.0	1.2
C	5.8	3.0	2.5	2.1
D	6.8	3.0	3.1	2.3
E	5.8	2.7	2.7	1.5
F	6.0	2.5	3.0	1.5
G	6.2	2.7	2.4	2.0
平均	6.2	2.84	2.76	1.8

表3・1 20歳男性7名の耳介寸法。

耳介の外聴道入口周辺の凹みは、側頭面からかなり入り込んだ状態に凹んでいる。それを実現することを本実験ではしないで、耳介の凹みのみにとどめて、それを最大8mmにした。この凹みに耳介上縁から続いてくるヘリックスの端が中隔となっている。しかし、それは7名中3名においては退化して存在しなかったもので、本質的なものではないとして付けなかった。図3・5に人工耳介の寸法図を示す。

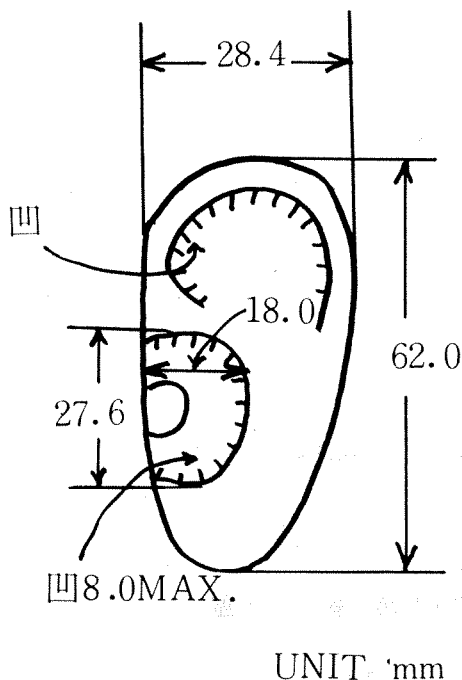


図3・5 人工耳介の寸法図。

この耳介は模型と外聴道周辺で接する。着脱可能である。

耳介の機能については、Petri (1932) が言及している。本質的に集音作用をもち、外観はパラボラ状であり、入り組んだ構造と反射作用があるという。筆者はそれに回折作用を加えたい。模型まで到来した音線がそれらの現象を起こす。

第3・4節 聴空間

模型の首を48cmの高さの木製平面卓44.5×105cm²の上に乗せた。模型はぐらつかない。首の縦方向の中心軸は60分法で方位を記入した紙の極に合致させた。測定に際して模型は10°間隔で時計方向回り(右回り)に回転させられる。首の下部に目印として矢印が付いている。模型のマイクロホンが受ける音圧レベルは、その台紙と同じように描いた極座標紙でデシベルで記入される。逐時記入される。音源は動かさず固定して、音源の条件を不変とした。顔正面が音源に向った状態を便宜上0°としたが、そこで左右耳の受音音圧レベルが-35dBまたは-40dBになるように音出力を調節した。この値はブリアンプの利得によってかわる。従ってヒトの非可聴レベルとは直接には関係をもたない。最大の音圧レベルはパターン上で-21dBであり、最低の音圧レベルは-54dBであった。従って、-20dBから5dB間隔で-55dBまで目盛ってパターン紙とした。

さて、重要なのは単に入射する音波のもろもろの音波空間成分の統合されたものが、マイクロホンに到達することである。水平方位角は分割されて、最大幅30°位で離散的に凸として記録される。

マイクロホンは無指向性のものを使った。マイクロホンが例え傾斜していても心配はない。外聴道の長さが音波長の1/4に相当するときに利得を作るであろう。WienerとRoss (1946) は10dB位高い音を4KHzに記録している。そのような時には立体空間の音の情報(位置と信号のスペクトル)は生の形で伝わらない。音源定位は外聴道の共鳴を逃げて行なわれるべきである。フォルマンのF₁F₂F₃は大丈夫であろうし、F₄もまあ大丈夫であろうが、そこに一致してスペクトルが強くなることもある。

模型を立体幾何学的に作って、パターンの解説を助けた。ヒトの原形は無視していない。凸のように幅の狭く限定されるものの方位のずれなどを見て調べるときに前述したことは特に重要となる。

パターンが-55dB以上のものを記入したものであり

そこで切断してそこを極とすることには多少論議のいることである。微弱な例えば0.0002μbarの音圧は知覚可能とされ、それを0dBとしてヒトの聴力を論ずる意味からは-55dBを極とするのではなく、0.0002μbarを規準とした極座標を考えなければならない。しかるとき、完全な極座標が得られよう。とにかく、パターンの特性は極座標形式で記録される。すると動径 r と偏角 θ で計測時点の音圧レベルは $A(r, \theta)$ で示される。偏角は90°の位置を(0°)として反時計回りを正とする。パターン上の方位角と数学上の偏角とはただちに交換可能である。模型を回転させる方向と反対方向にスピーカー音源を回転させることも可能とされる。定位実験などは全てこの方法を用いる。

受音音圧 $A(r, \theta)$ は三次元の極座標及び円柱座標の平面への射影ではない。むしろ水平平面に投影されたものが三次元での極座標 $A(\rho, \theta, \varphi)$ に近い値にあるといえる。

空間の中での聴えが聴空間であるが、ここで測定される極座標上のパターンはラウドネス・レベルであるからそれを心理学的な感覚量に変換されるべきでありSone尺度のラウドネスに変換されるべきである。変換は次の実験式によって行なわれる。⁽⁶⁾

$$\log N = 0.03L - 1.2 \quad \text{式(3・1)}$$

ここに、 N はラウドネス、 L はラウドネス・レベルである。パターン上のプロット点の各レベルを0.0002μbarを規準とするdB値になおさなければならないのだが、模型において、デシベルメーターの指示値からただちにそれを算出することはむずかしい。耳介の効果量というもののはsone尺度に変換できるのであるから、いちいち変換をすることをしておかない。

第3・5節 発音系と音場

本実験の行なわれた部屋の中の様子を図3・6に示す。天井は多孔板を張りつめたものである。聴空間パターンでは主として模型の前後左右の音波のエネルギー密度が調べられることになるから、どこにどのような物が置いてあるかを知っておく必要がある。物の反射率と吸収率は区々である。むしろ物が色々な状態を作って色々な音波反射をしてほしいのである。

スピーカーは径16cm(パイオニア)で、外寸法22×20×12.5cm³の木製箱に入っている。オーディオ信号発生器(トリオAG-201)は純音発生のための正弦波発振器である。パワー増幅器(ソニーSolid State 1120F)は

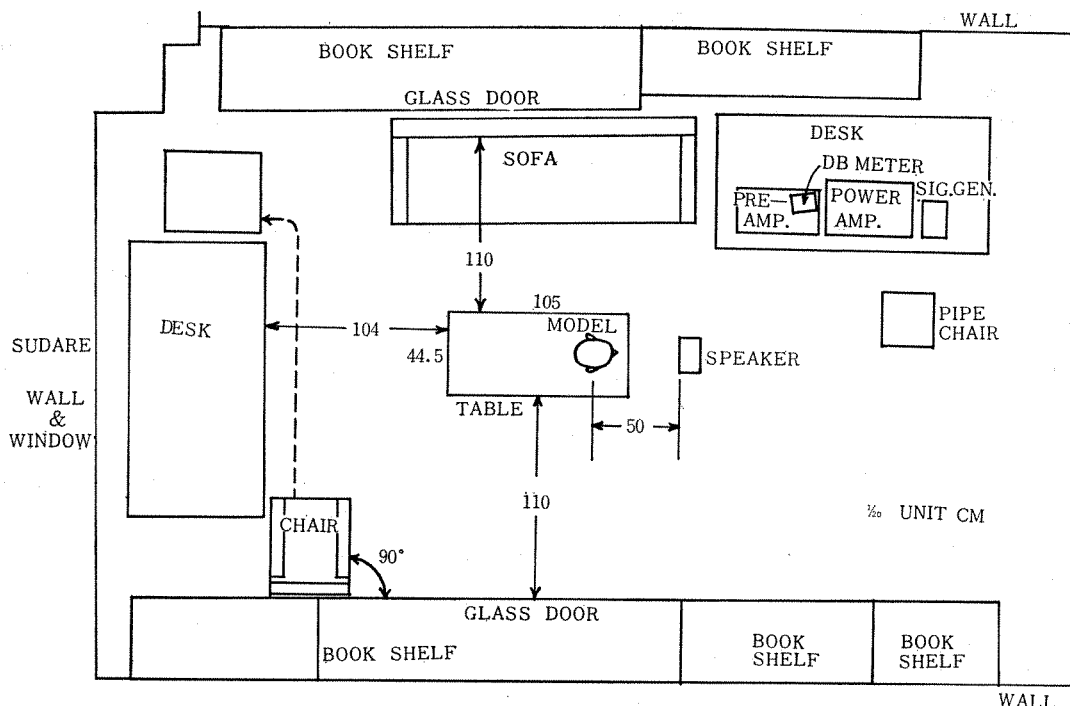


図3・6 測定が行なわれた部屋の状況とスピーカーとモデル模型の配置状態。

出力60w（最大）のもので信号発生器の出力を入力してスピーカーを駆動する。

本実験では発音系と受音系を音波で結合して一つの全系とした。そして、デシベルメーターの指示を -35dB または -40dB になる様に初受音音圧を設定した。

音波は純音で80~100Phonの値をもつ。周波数は500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500Hzである。

反射音波は干渉しあう。位相が一致したとき音の強さは拡張され、逆相のときに減衰する。パターン上の凹部は音波がその水平方位に関してやってこないときと干渉の場合とがある。音場の物を移動したり実験者が動いたりすると 6dB 以下のデシベルメーターの指針の動揺がある。

実験者1名はスピーカーボックスの後方1mのところにパイプ椅子に腰かけていて計測し、立ちて模型を 10° 進める。 0° の前後の方位に模型を動かしてみるとパターンの特性はかなり急に変化する。そのようなところに初設定音圧を置くことは多少問題となる。より減衰した方位から反射音波の影響が現れて来てパターンによくない結果を与える。即ち、直接音波と間接音波との間には、音波の強さの安定度にかかなりの違いがある様である。定位の最もよい方位に初音圧を設定する考え方が一

つ、また直接音波の効果的なところの最大値に初音圧を設定する方法が一つ考えられる。

模型のあらゆる局部で反射と回折が起っている。中でも回折は水平方位の音源のときに顔の輪郭や後頭面の屈曲などで起るものが主要なものである。なめらかな平面では回折は起きない。ヒトの顔形や頭形にかなりの差があっても上に述べたところのものは誰もがもっているのであるから、一様に皆同じ様に聴えを経験しているであろう。

さて、純音接続時間は2秒とした。デシベルメーターの振れに平均400msかかる。刺激間隔は13秒である。その間に模型の方位も動かすのである。

第3・6節 受音系

この項は多少前節と重なり合う。クリスタル・マイクロホン（アイワM-130）、プリアンプ（サンスイMX-10）、デシベルメーター（キクスイVTVM-161A）を使った。MX-10の利得は一定として高域周波数と低域周波数をカットして使った。デシベルメーターのレンジを切換えながら計測を続けた。デシベルメーターにはdBmと記入されている。これは普通 $0\text{dB} = 1\text{volt}$ であるのを $0\text{dBm} = 0.775\text{volt}$ とした規準で読針されるこ

とを意味する。デシベルは本来音圧の比の対数をとって20を掛け合わせたものであるから、倍率のみを比べるとときには規準はどうあってもよい。

マイクロホン感度は -58dB ($0\text{ dB} = 1\text{ V}/\mu\text{bar}$) である。ヒトと模型を対比して考えると鼓膜自体がこのような感度を持つとは考えられないので、外部音圧80~100 Phonからマイク感度を引いて20~40 Phonから上の音圧が実際に当たっていると考えられることもできる。そのとき弁別閾は1 dB前後以下となる。デシベルメーターの読みは外部音圧とデシベルの単位で比較検討できるが、メーターの1 dBの上昇は外部音圧の1 dBの上昇ということになる。

外聴道の径や長さは襲島(1958)によれば誠に区々であり、最大10%から5.5%までの太さである。

聴空間パターンはソーン尺度に変換しないで、耳介の作用量として出て来たものを、20 dB以上の感覚レベルの音の大きさの弁別閾と比較することにした。耳介の作用量が1 dB以上であればヒトはそれを認知するわけである。

もし周波数の推移によって耳介の効果を比較してみるとときには、外部音圧を一定としておいて、メーターの読みをとればよい。

筆者が実験者であるが、2500 Hzと3000 Hzでは鼓膜がより緊張したような感じを受けて不快であったので -40dB としたのである。

第4節 実験結果

図4・1図に周波数500 Hzにおける右耳の聴空間パターンを示す。耳介なしパターンは卵型、耳介つきパターンは空豆型である。図4・2に500 Hzにおける左耳のパターンを示す。卵型パターンはやや大きい。図4・3に500 Hz右耳耳介つきパターンを示すが、左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ねると全く各点 $A(r, \theta)$ が一致する。座標を極座標と見なして極の値は -55dB である。模型の前後左右の方向に生ずる差は検出できない。耳介の作用としては左右耳の音圧レベルを一部縮小して堅固なものとするににある。即ち反射音波がかなり受っており、それに耳介が作用しているのである。

図4・4に1000 Hzにおける右耳パターンを示す。耳介つきパターンは天狗型である。特にこの凸の峰が耳介つきの場合に急になっている。図4・5に1000 Hz左耳のパターンを示す。音源の方位に顔の向いたときに -35 dB の音圧レベルに設定してある。 $(-35\text{ dB}$ は500、1000、1500、2000、3500、4000、4500 Hzのときで、 -40 dB は

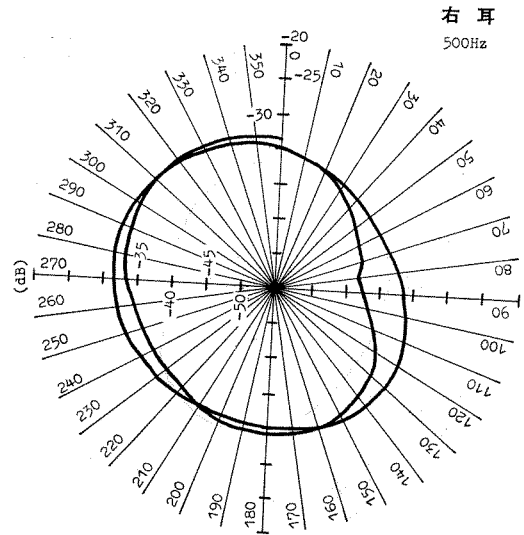


図4・1 500 Hzにおける右耳の耳介つきと耳介なしのパターンを重ねたもの。

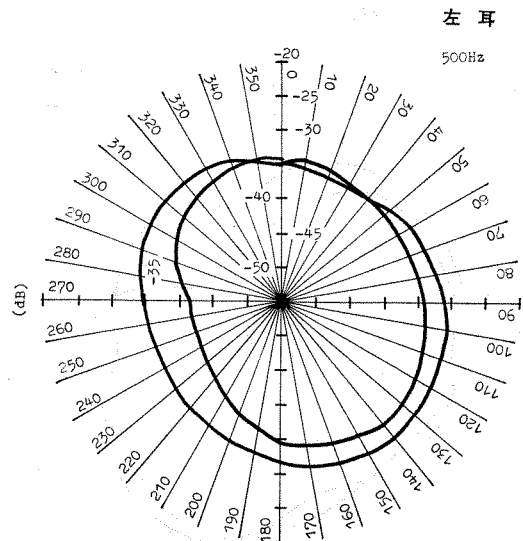


図4・2 500 Hzにおける左耳の耳介つきと耳介なしのパターンを重ねたもの。

2500、3000 Hzのときである) 左耳のパターンは約10 dB右耳パターンよりも小さい。図4・6は右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ね合成したものである。500 Hzと同様に左右耳には 180° の差が影響を与えていることが読みとれるから、耳の位置の効果がでていといえる。領域1は右耳優勢を意味する。

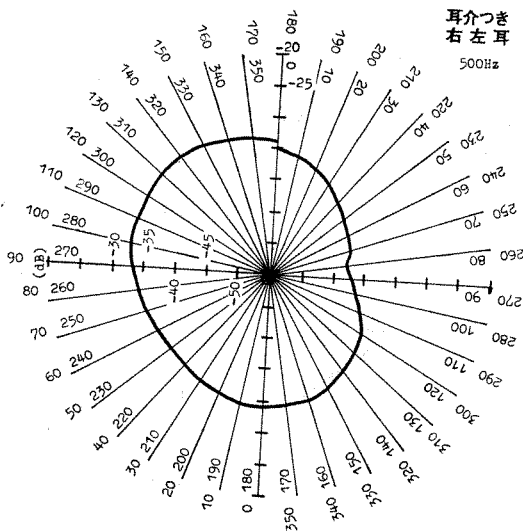


図 4・3 500Hz おける右耳耳介つきパターンに左耳耳介につきパターンを180°回転して重ねた状態を示す。

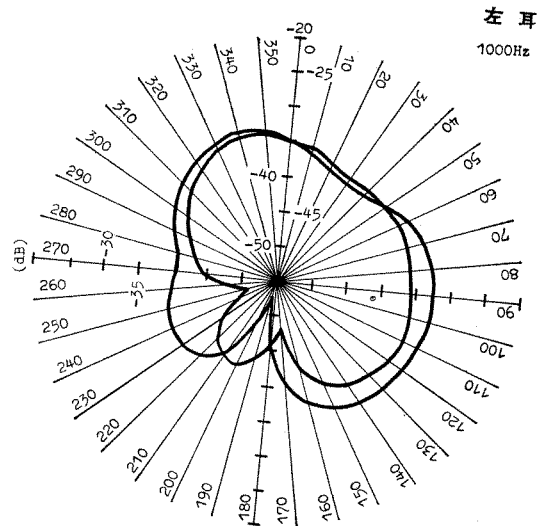


図 4・5 1000Hzにおける左耳耳介つきと耳介なしのパターンを重ねたもの。

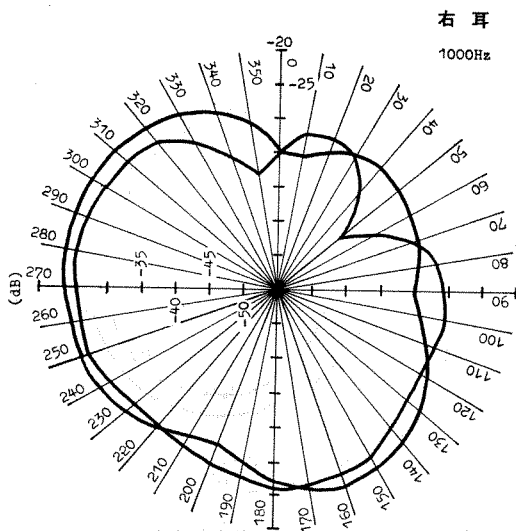


図 4・4 1000Hzにおける右耳耳介つきと耳介なしのパターンを重ねたもの。

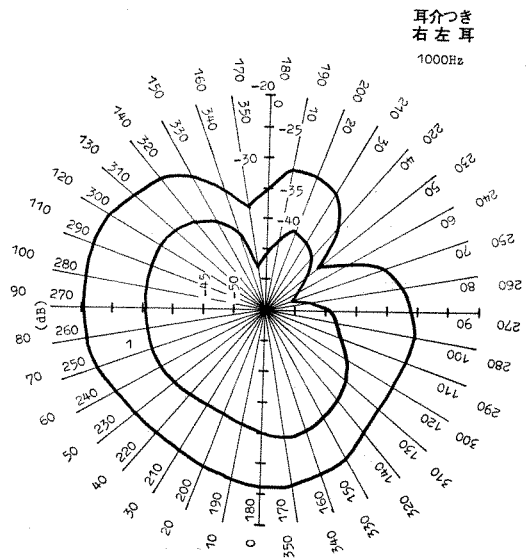


図 4・6 1000Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ねたもので領域1ができています。

図 4・7 に 1500Hz 右耳のパターンを示す。0° 180°の縦軸の左側は直接音波とその回折波にもとづくもので、要するにタコの頭型となり、右側は反射音波が支配的でタコの足部となる。図 4・8 に 1500Hz 左耳のパターンを示す。耳介つきパターンは耳介なしパターンよりも 7 dB 小さい。凸の差はない。図 4・9 に 1500Hz 右耳

耳介つきパターンに、左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ねたパターンを示す。領域 1 が広く右耳優勢である。両パターンはとても相似であるが、0° 180° 軸の右側の凸凹の作る領域 1 と 2 が交互に現れており、左右および前後方に対して模型は差違を持つから、この部分がすでに耳介の効果量を示し始めたといえる。

ヒトの聴空間に関する耳介の役割

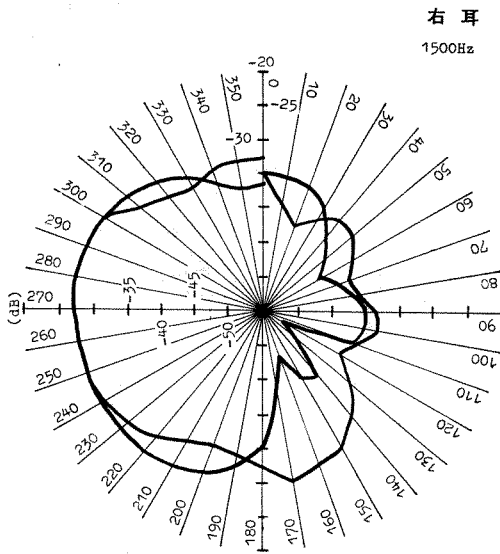


図 4・7 1500Hz における右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

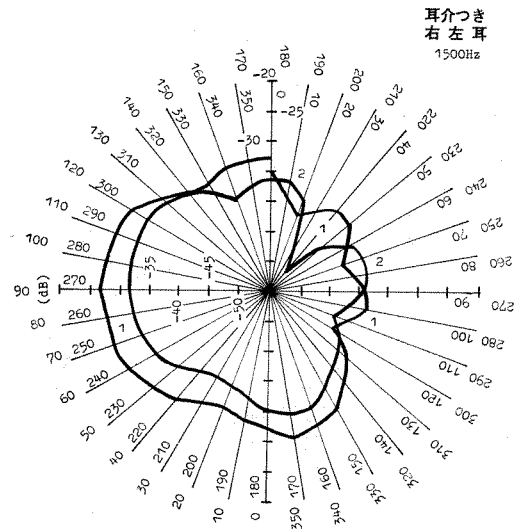


図 4・9 1500Hz における右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ね合成したもの。領域1と2に注目すること。

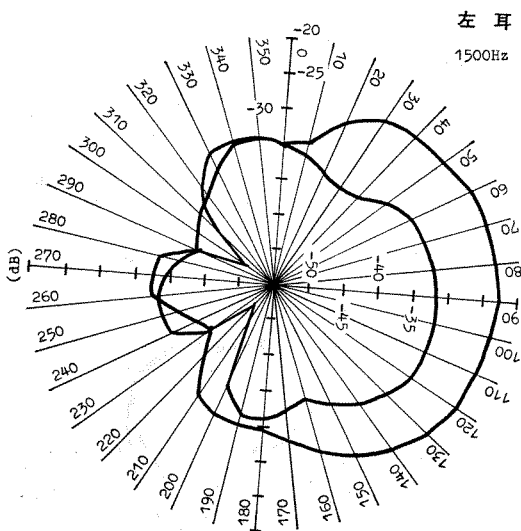


図 4・8 1500Hz における左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

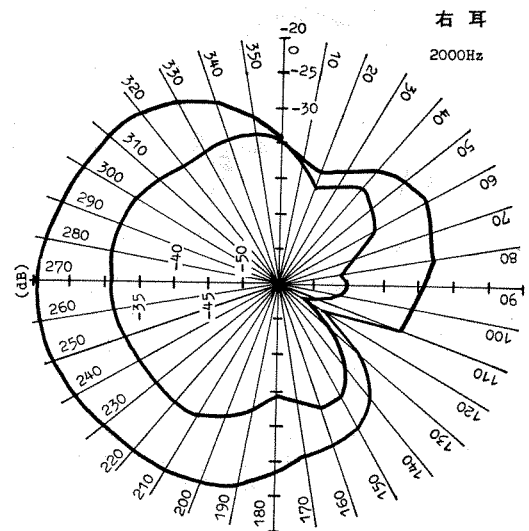


図 4・10 2000Hz における右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

いが、凹凸は 10° のずれを起こしている。右耳介と左耳介とは耳介面の前方と後方の違いとして音波を屈曲させているものと判断される。

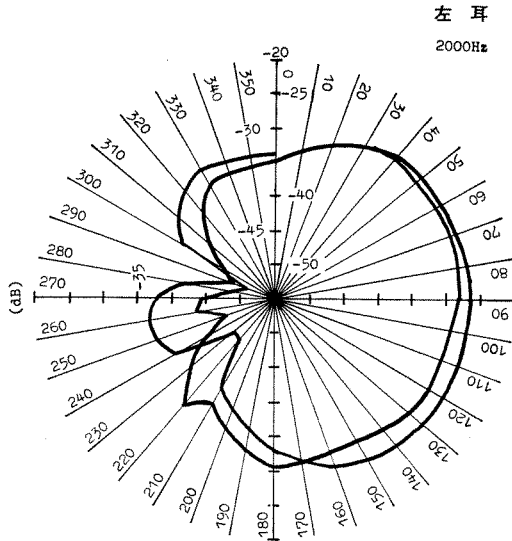


図4・11 2000Hzにおける左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

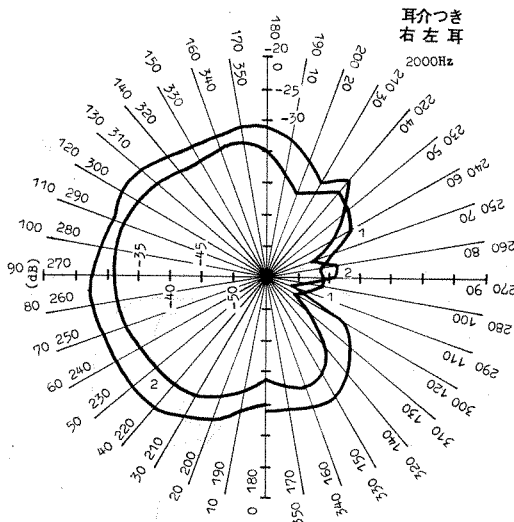


図4・12 2000Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ねた合成パターン。

図4・13に2500Hz右耳パターンを示す。 0° の音圧レベルを始めに -40dB に設定した。耳介つきパターンは花型である。 110° と 130° の凹みが 10° ずれて現れてい

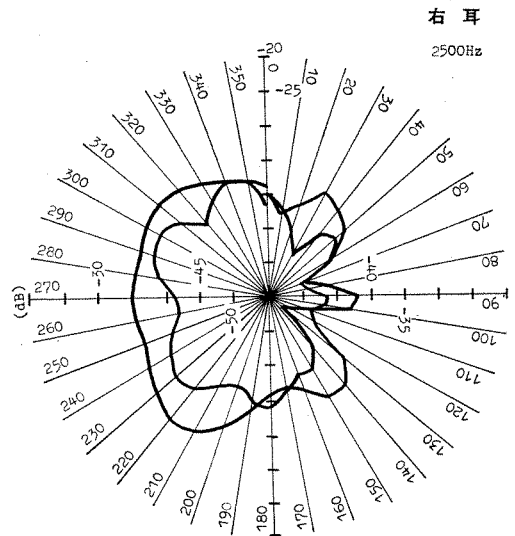


図4・13 2500Hzにおける右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

る。耳介なしパターンは冠型となっている。図4・14に2500Hz左耳パターンを示す。ここで都合上直角座標の考えを導入すれば、第I象限と第IV象限にわたって耳介つきパターンはその音圧レベルを低めている。また耳介なし 270° の大きな凸は、耳介つきで 290° に移り僅に痕跡をとどめるのみである。図4・15に2500Hz右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを 180° 回転せ

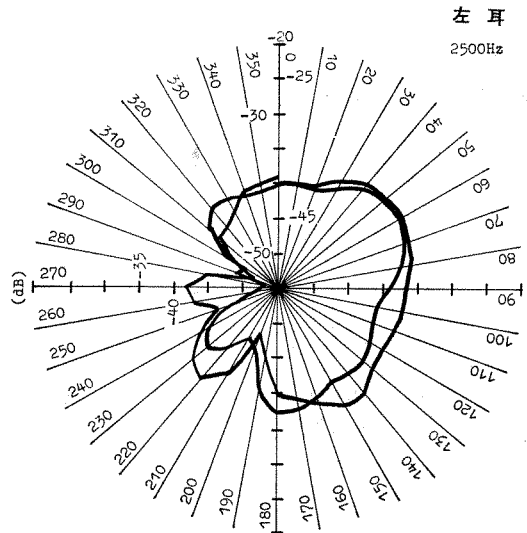


図4・14 2500Hzにおける左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたものの。

ヒトの聴空間に関する耳介の役割

しめて重ねた合成パターンを示す。領域1は右耳優勢で領域2は左耳優勢である。その領域1と2が入り乱れて現れている。320°の領域2は必ずしもこの場合好ましい出現ではない。三次元空間の模型に当たる音波は全て定常であると考える。

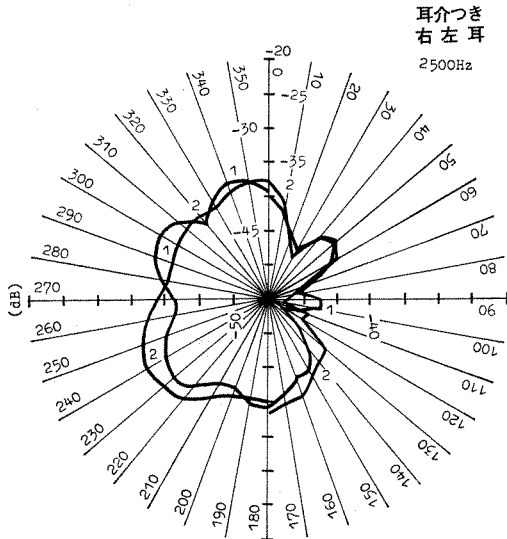


図4・15 2500Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ねた合成パターン。

図4・16に3000Hz右耳パターンを示す。40°の凸は舌型をしている。その角度で耳介つきにはそれは見られない。このとき90°の隅角を形成していた側板つき椅子は、図3・6の破線のように移動させてあった。90°

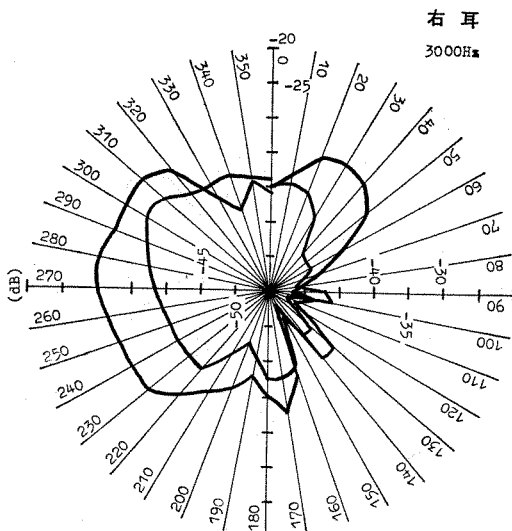


図4・16 3000Hzにおける右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

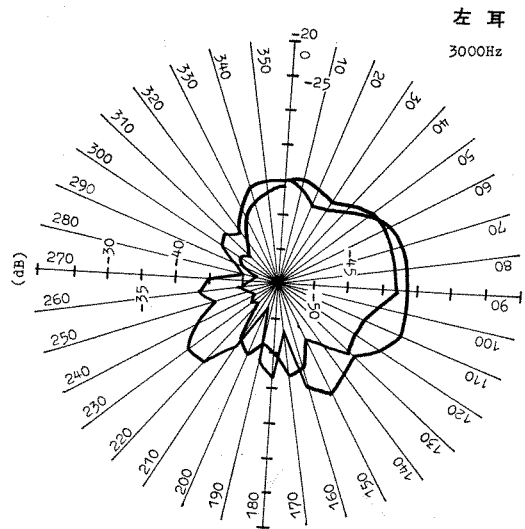


図4・17 3000Hzにおける左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

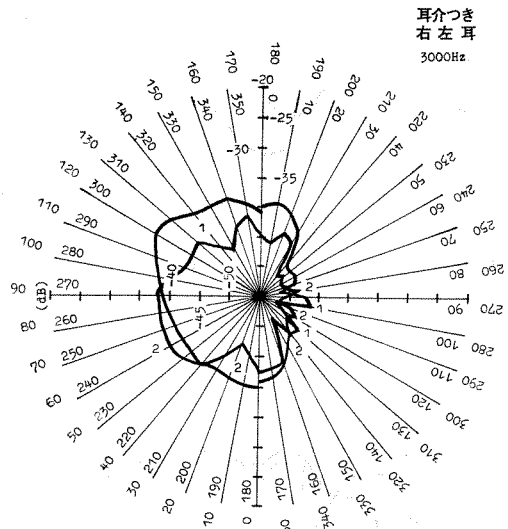


図4・18 3000Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ねた合成パターン。

の隅角では進行していった音圧が並行して帰って来るわけである。舌型部分の方位角は1000Hzの凸と一致する。第II象限から第III象限では耳介つきの音圧レベルが8～9dB小さい。図4・17に3000Hz左耳パターンを示す。230°の凸はやはり舌型で、190°から200°右耳と左耳では離れている。即ち幾何学的外耳の位置とは多少ずれており、1000Hzのときよりも様子が少し違って来ている。図4・18に3000Hzにおける右耳耳介つきパ

ーンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ね合成したものを示す。領域1が2よりも広い。右耳パターンが300°~360°~30°にわたって張り出しており、220°付近でも右耳は大きい音圧レベルを持っている。概して模型の後頭面の回析量は顔面からのと較べて大きいと判断される。領域1と2は耳介の効果量を表わす。

図4・19に3500Hzにおける右耳パターンを示す。耳介つきパターンが最大14dB小さい。耳介つきの凸は12dB位小さく方位角度幅も狭い。図4・20に3500Hzにおける左耳パターンを示す。耳介つきが耳介なしよりも小

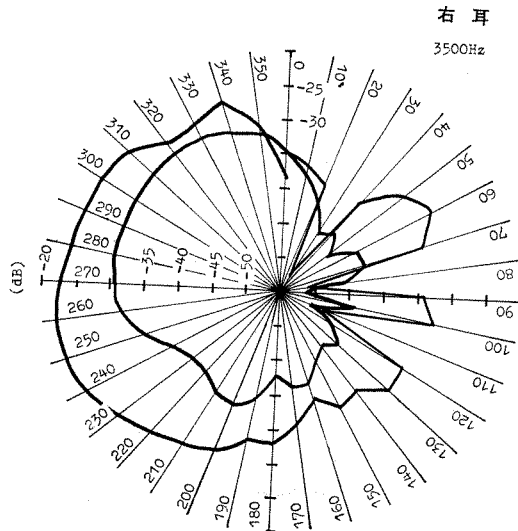


図4・19 3500Hzにおける右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

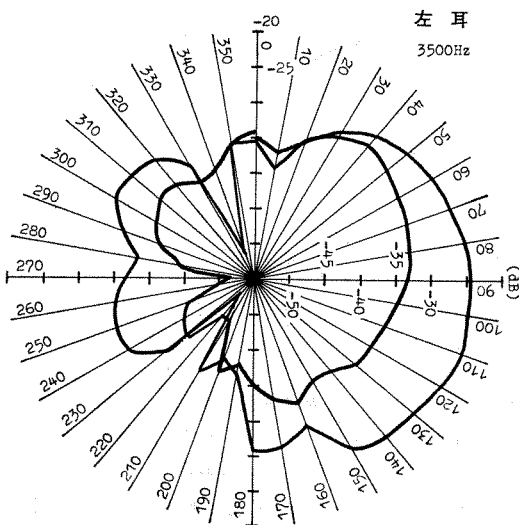


図4・20 3500Hzにおける左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたパターン。

さいのは右耳左耳共同じ傾向である。特にその小ささが2象限一杯にわたっている。図4・21に3500Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転して重ねて合成したものを示す。領域1と2はほぼ等量と判定される。凸は小さく1と2が交互に現れている。交点が255°にあり、領域2即ち左耳優勢が180°軸から左回りに80°幅もはみだしている。90°に凹が重なっているのが特徴的である。

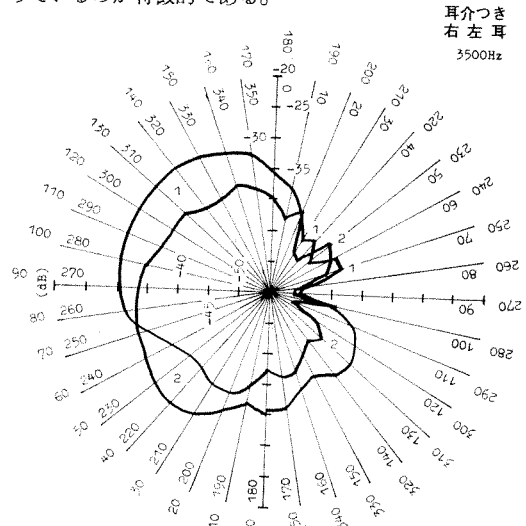


図4・21 3500Hzにおける右耳耳介つきパターンと左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ねた合成パターン。

図4・22に4000Hzにおける右耳パターンを示す。耳介つきパターンは100°の方位角度で耳介なし特性と同

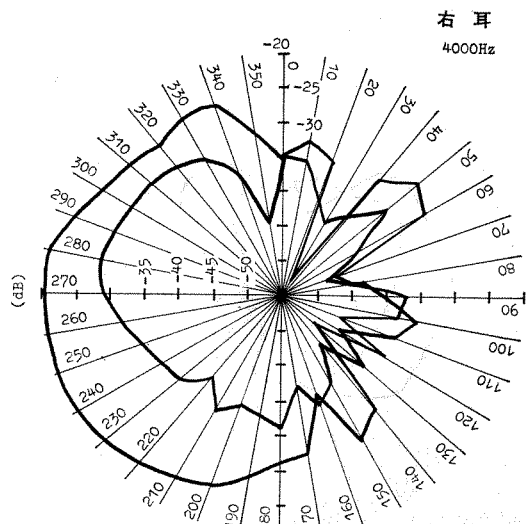


図4・22 4000Hzにおける右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

ヒトの聴空間に関する耳介の役割

じレベルで他全方位にわたって小さく最大 16dB 差である。凸凹が方位にして 10° づつずれている。図 4・23 に 4000Hz における左耳パターンを示す。凸に方位のずれはあるが大きさに変化はない。図 4・24 に 4000Hz における右耳耳介つきパターンと左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ね合成したものを示す。第Ⅲ象限における領域 2 が極めて大きい。凸部も 2 が広い。左耳優勢に対して右耳は耳介の影響を強く受けて小さいパターンを示している。

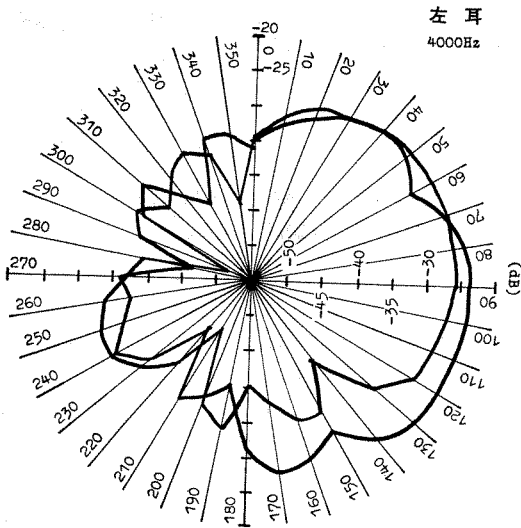


図 4・23 4000Hz における左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

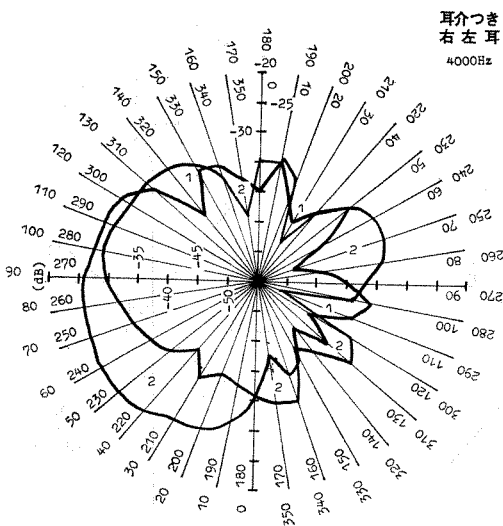


図 4・24 4000Hz における右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを 180° 回転させて重ねた合成パターン。

図 4・25 に 4500Hz における右耳パターンを示す。耳介つきパターンは第Ⅲ象限で低いレベルである。図 4・26 に 4500Hz における左耳パターンを示す。第Ⅰ象限と第Ⅳ象限で耳介つきは低いレベルを持っている。図 4・27 に 4500Hz における右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを 180° 回転したものを重ねた合成パターンを示す。領域 1 と 2 はほぼ同じ広さである。特に 0° 180° 軸の左側の外輪郭線は両耳で同じ大きさの音圧レベルにある。耳介の効果は耳介が付くことによって作られたものとして示されている。

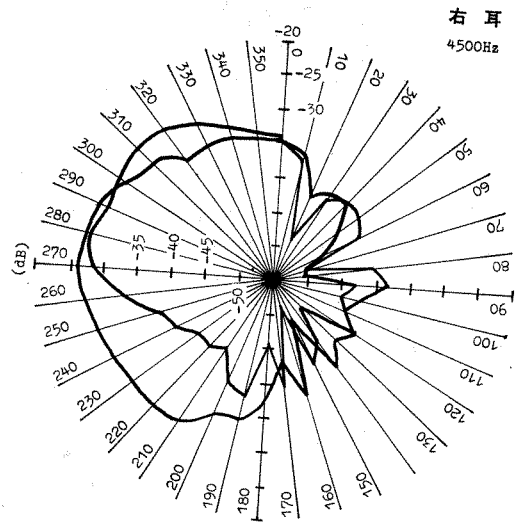


図 4・25 4500Hz における右耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

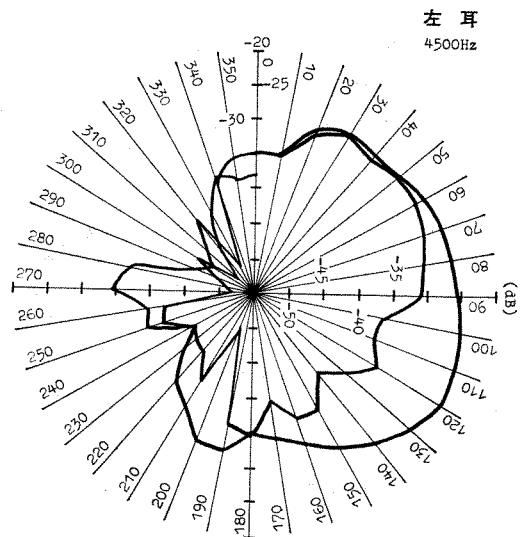


図 4・26 4500Hz における左耳耳介つきパターンと耳介なしパターンを重ねたもの。

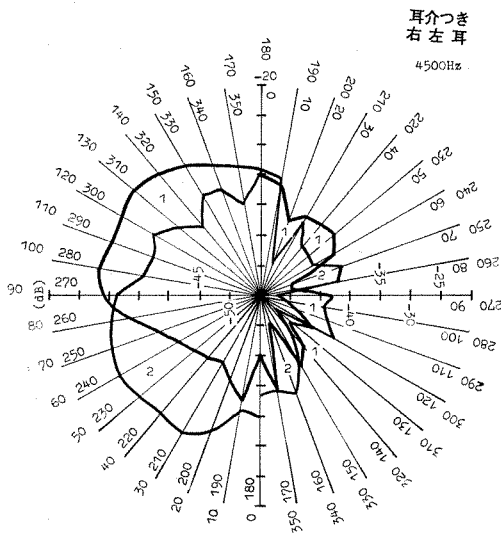


図4・27 4500Hzにおける右耳耳介つきパターンに左耳耳介つきパターンを180°回転させて重ね合成したパターン。

第5節 考 察

生の形で音圧レベルを360°つらねたものをここでは聴空間パターンと呼んでいる。しかしヒトの感覚ではこの音圧レベルを感覚レベルと呼んでいて、SONE尺度に変換したものが実際の聴えの大きさとなる。模型を使った場合には聴えのなくなる閾値というものを規定することができない。従って、感覚レベルからの大きさの弁別閾を求めて、それと聴空間パターンに示される耳介の効果量を比較するのである。幸いにも感覚レベルが20dBでは弁別閾は1dB前後であり、更に感覚レベルが大きくなればそれ以下の弁別閾となり、2500Hzに示された4dB以下の効果量は完全に認知される。2500Hzより高い周波数では耳介の効果は認知されるのである。

まず、500Hzの右耳と左耳のパターンを解説してみる。図5・1と図5・2に示す関係が明らかである。ヒトの聴えの知覚において、マスキングと関係があるが、純音では大きい方の音に聴えのウェイトは常に傾く。そのヒトの特性が実は図4・1と図4・2のパターンに現れるので

あって、図5・1と図5・2でわかるように第I象限に外耳が到っている。当然この場合に第I象限に最も強い音波が存在し、第III象限にもかなりの音圧があるのである。長径方向軸の傾きはいろいろに変ると考えられるのだが、外耳が音源に近よるような傾向を示して行くだろうから、長径軸の傾きは増々大きくなってこよう。

1000Hzにおいて図4・5に示される低レベルに低下する現象がなぜ起きたのであろうか。この周波数が特に選ばれている事実はあるのであるが、凸部が0°軸に近い状態にあり、0°で設定した測定開始時の音圧-35dBが特性の不安定な所に位置をしめているためだろうというのが一つの推測である。次に考えられることは500Hzと同様に長径方向が0°軸の左側に傾いておりその音圧レベルは大きく、それに対して右回りに90°進んだ所に天狗の鼻の如き大きな反射による凸部があるためにパターン全体を拡張するような作用が働いていると考えられる。図4・5のパターンは何らかの損失を受けている。

1500Hzにおいて凸部にすでに耳介の効果の現れて来ていることについては先に記した。右耳優勢左耳優勢として現れる大きな領域1と2が2500Hzから0°180°軸の左側に現れるのだが、それにかかわる前に反射して音源方向から離れた所の方角角に現れる凸に耳介の効果が出ているのである。

3000Hzでは40°と230°の凸部分がガラス戸と椅子の側板(40×33cm)のなす90°の隅角によるものであることは、実験中に隅角の方向に外耳が向いている理由によることを確認した。両耳の位置関係は個体の両側に付属して2個の外耳であり4個ではない宿命である。

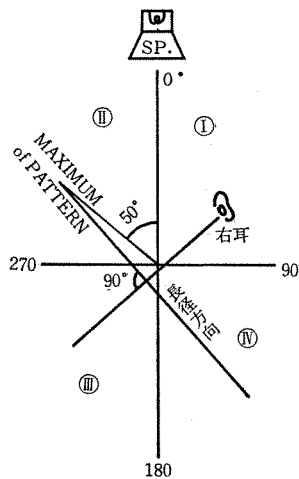


図5・1 右耳耳介つきパターンの解説図。

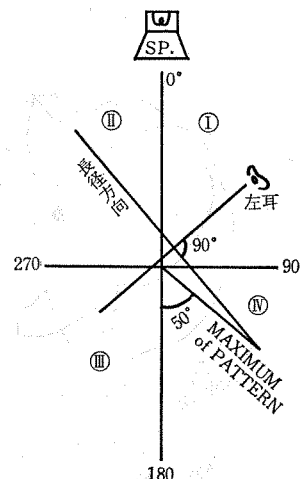


図5・2 左耳耳介つきパターンの解説図。

3500Hz と 4000Hz のパターンに外聴道の共鳴によって幾らかのパターンの拡張のようなものが現れてもよいのだが、凸が 3500Hz 耳介つきで低いレベルにあり 4000 Hz で大きなレベルに上昇していることは明らかに凸に共鳴の効果が負わされているとも考えられる。現れるとすれば凸凹の部分即ち反射音波受聴の場合に限定されるのである。4000 Hz では凸が耳介なしの特性と同等に大きいのである。

4500Hz では図 4・27 に見られるように領域 1 と 2 が均衡した。4000Hz などではそれが均衡していない。模型の右左前後の方向の差違として耳介の効果量は認められるわけで、これは音波との関係において導き出されるのである。考え方を変えれば音波の到来と模型のかかわりあいによって、受聴という形でくいちがいが認知されるわけである。実際の聴えは耳介つきの右耳と左耳の生のパターンその同じ方向の動径 $A(r, \theta)$ の点の軌跡と同じであり、位相と時間がかかわってくる。

われわれが音を聴えとして認知しながら 2 本の指で耳介の裏面を押して耳介を動かしてみるとラウドネスの変化するのが認知される。それは弁別閾 1dB 前後よりも大きな音効果だからである。音量の小さい場合にはラウドネスの変化は認められない筈である。弁別閾が極めて高いからである。

聴空間パターンの各方位角で弁別閾の値は異なる。反射波による効果作用の結果である。パターン上の凹凸のようにその大きさの可変なるものは弁別閾をゆさぶって耳介の効果をとくに重要とさせるのである。

図 5・3 に、右耳耳介つきパターンの凹凸の計測値（音圧レベル）と 0° の計測値とを、パターン上のタコの頭状のところに現れる直接音波の影響を強く受けてい

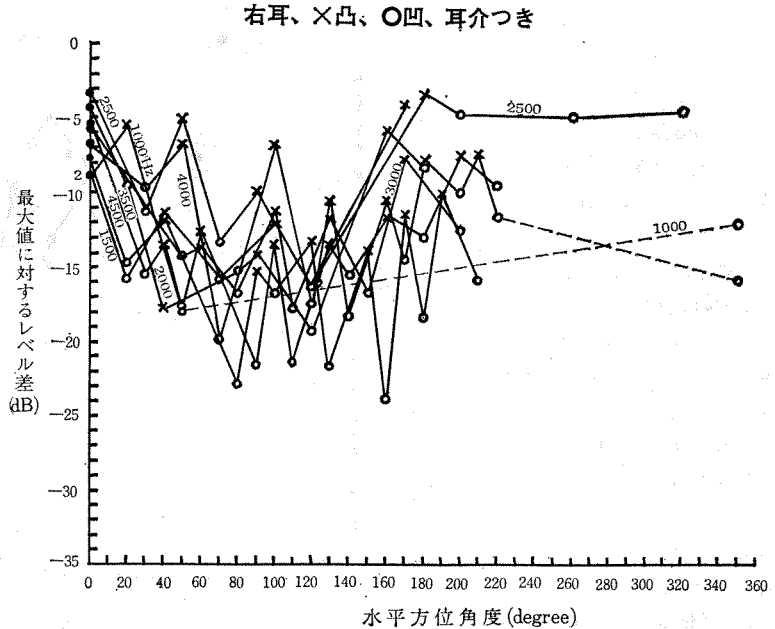


図 5・3 パターン上の最大値を 0dB として凹凸の分布を調べたもの。耳介つき右耳の凹凸分布。1000～4500Hz。

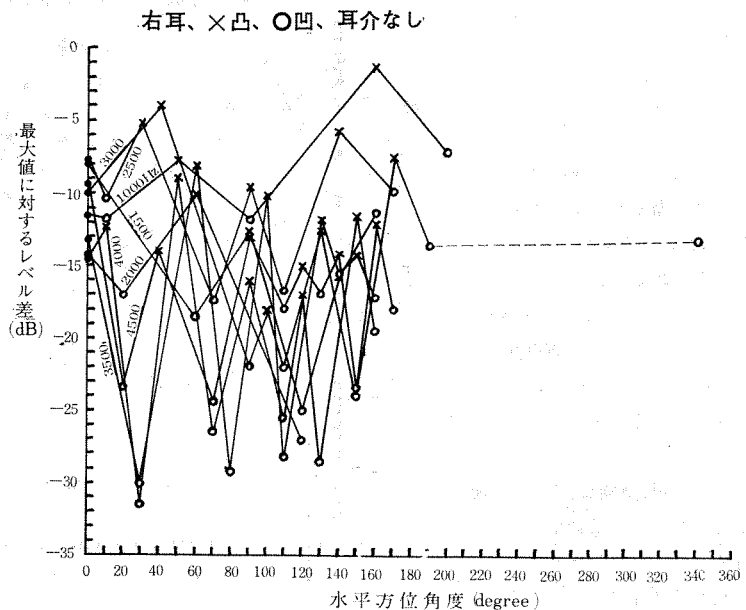


図 5・4 耳介なし、右耳の凹凸分布 1000～4500Hz。

るところの最大値の音圧レベルとの差として示す。凸の場合にそれが 20° 30° といった方位角幅をもつときにはその代表値をとる。以上の操作によって最大値は 0 dB としてよい。凹凸を結んだ線は 0° 又は 20° から 220° まで帯状となって分布している。

図 5・4 はやはり右耳のもので耳介なしパターンから得たグラフである。

図 5・3 と 5・4 を比較してみると、凸部には変化は認められないが、凹部がかなり耳介が付くことによって上昇している。その最大差は 16.5 dB であって、平均的に見て約 8 dB 上昇している。これは耳介の吸収又は干渉波に対する作用で、弱い音もできるだけ聴きやすくする傾向を示す。

次に、 0° の比較であるが、耳介つきは 2500 Hz で 4.5 dB 上昇しており、耳介なしの 4500 Hz と耳介つきの 1000、1500 Hz との間には 5.6 dB の上昇が見られる。 0° は丁度タコの頭状のところから足にかけての推移部分にあたる。このような傾向のもとで凸部の上昇は見られない。

図 5・5 と 5・6 に、耳介つきと耳介なしの左耳のグラフを示す。140° から 350° にかけて凹凸は分布している。耳介つきの凸は多少低下している。凹部の上昇は限られた方位角で観察される。それならば 0° の方位角度の値はどうであろうか。2 dB から 2.7 dB 位耳介つきは上昇している。僅かながらこのように上昇しているが、左耳に対する反射、吸収、干渉、回折などの音波の波及効果が余り期待できないようである。

概して耳介は音波を受容するときに、低い音圧レベルを上昇させて持ち上げるような作用を

するようであって、各パターン上で線形でない重さを加えているのではないかと考えさせる。耳介が付くことにより、信号情報の微細構造は明確にされるだろう。ヒト又は模型に当たる音波の質的なもの、例えば同じ吸収や

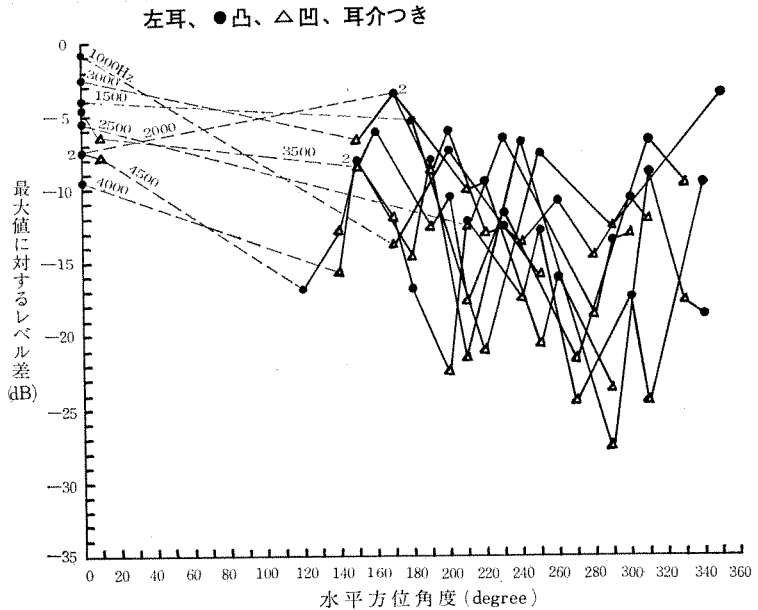


図 5・5 耳介つき、左耳の凹凸の分布。1000~4500Hz。

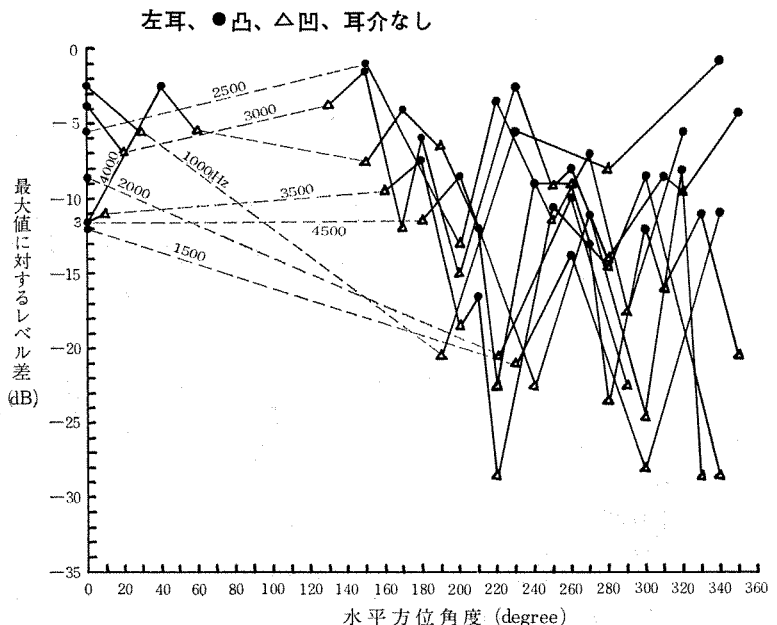


図 5・6 耳介なし、左耳の凹凸の分布。1000~4500Hz。

干渉した音波でも到来方位即ち水平平面極座標への投影され方即ちどれほどに多重化した音波なのかなどが関係して来ているのではなかろうか。凹部の音圧レベルは耳介のところでのみ形成されるのである。

耳介の作用は音波が直接波か間接波か回折波か、間接波の中で反射波か干渉波か吸収された二次音波かなどの選別を行なって任意に適用していると推測させる。

音場の音波反射物体を制御することを今回はしなかった。耳介の効果は反射物体までの距離や反射率、温度、物体の大きさなどによって評価の変るものである。盲目の人の聴空間と種々の関係する現象と限界については、今後研究を続ける必要がある。

第6節 あとがき

以上、今回行なった実験の全貌を紹介する形で論文をまとめた。ヒトの聴空間において位置情報にかかわる構造特性を示し、位置情報と信号情報を結ぶ構造を暗示して来た。耳介の作用と効果が量的な形で示された。

従って、今後の研究のための基礎と見込みが明らかになったと考える。

引用文献

- (1) SANFORD J. FREEDMAN and H. GEOFFREY FISHER, The role of the pinna in auditory localization, The neuropsychology of spatially oriented behavior, The Dorsey Press, Homewood, Illinois, 1968, 135-152.
- (2) PETRI, J., Über aufbau und leistung der ohmuschel. Z. Hals-, -Nasen- u. Ohrenheilk, 1932, 30, 605-608.
- (3) S.S. Stevens editor, Handbook of Experimental Psychology, John Wiley & Sons, Inc., 1951.
- (4) GEORG VON BÉKÉSY and WALTER A. ROSENBLITH, The mechanical Properties of the ear, Handbook of Experimental Psychology, 1075-1115.
- (5) John J. O'Neill, The hard of hearing, Foundation of Speech Pathology Series, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey; 聴力障害〈難聴〉, 佃一郎訳, 日本文化科学社, 昭和43年

- (6) Cyril M. Harris, editor, Handbook of Noise Control, Mc Graw-Hill, 1957.
- (7) G.M. Wyburn, R.W. Pickford and R. J. Hirst, Human Senses and Perception, Oliver & Boyd, Edinburgh and London, 1964.
- (8) Hayes A. Newby, Audiology, Second edition, Appleton - Century - Crofts, New York, 1964.
- (9) FRANCIS M. WIENER and DOUGLAS A. ROSS, The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field, J. Acoust. Soc. Amer., 1946, 18, 401-408.
- (10) S. S. Stevens and E. B. Newman, The localization of pure tones, proc. nat. Acad. Sci., Wash., 1934, 20, 593-596
- (11) S. S. Stevens and E. B. Newman, The localization of actual sources of sound, Amer. J. Psychol., 1936a, 48, 297-306.
- (12) 簗島高編、日本人人体正常数値表、本邦人生理解剖計数研究委員会、技報堂、昭和33年
- (13) 聴覚と音声、電子通信学会、昭和41年
- (14) 五十嵐寿一編、音響と振動、共立出版、昭和43年