DIRECTIONAL HEARING: INTERAURAL TIME Difference Limen

TAKAO SHIMOYAMA, M.D.

Department of Otolaryngology, School of Medicine, Kitasato University.

(Director: Prof. T. Shitara, M.D.)

Experiments were performed on the discrimination of interaural time for lateralization images on the midline, using filtered 10 microsec. duration pulse with repetition rate 100 PPS as stimulus sound. Employing simplified AB method, interaural time DLs (ITDL) were investigated as a function of sensation level of stimuli, cut-off frequency of presentation filter (hi-pass, low-pass, and band pass), and aging of subjects.

1) ITDLs in 0.7 and 2 kHz (f_0) half octave bands decreased rapidly until the stimulus level reached to 40 dB SL, beyond which they were approximately constant.

2) When half octave band filters were used at 50 dB SL presentation level, ITDLs gave approximately same value in 0.5, 0.7 and 1 kHz bands, but they rapidly increased in 2 and 4.6 kHz bands.

Employing wider frequency band filtering, ranging from $1/2$ to $3\ 1/2$ octaves, every of which contained 0.7 kHz $1/2$ octave band, it was found that cutting off higher frequency rather than lower frequency seemed to improve ITDL. ITDL curves cut-off frequency of high pass and low pass filters crossed at around 800 Hz.

These findings suggest that the frequency range of 0.7 kHz in terms of $1/2$ octave band plays an important role in sound lateralization.

3) ITDLs in 0.7 kHz $1/2$ octave band at 50 dB SL were measured in 54 subjects including every decade of age. Average ITDL increased with advance of age, being the smallest ITDL (28 microsec.) in twenties and the largest in sixties or more.

79A—0459. 20522

方向感に関する基礎的研究

——主に両耳時間差弁別域値について——

北里大学医学部耳鼻咽喉科（主任：設楽哲也教授）

下山 高 生

I. 緒 言

音の方向感とは両耳分離能、両耳合成能とともに両耳機能の一つであるが、なかでも最も顕著な現象であり、日常生活においても重要な役割を果たしている。臨床的にも後迷路性障害の診断に役立つものとして研究が進められている。方向感とは音源の方向により両耳に達する音に、時間差と強度差が生ずることから成立するものである。

時間差は低音部において重要な役割を果たしており、強度差は高音部において頭蓋の陰影効果のために左右差が一層明瞭となる。ここでは主に時間差について検討した。

1) 方法について

方向感の検査は自由音場に speaker を置きその方向を指摘させる free field method と earphone または receiver を装用させ、両耳間の時間差、強度差を変化させ

て音像移動を測定する earphone method に大きく分けることができる。free field m. で外界の音源を定位する場合は localization というが、earphone m. では音像が頭蓋内に結ぶため lateralization と呼び区別している。free field m. では、立木⁸⁵⁾、大内⁸⁷⁾、藤垣⁴⁷⁾、石母田⁸³⁾、Longo⁴⁸⁾、Nordlund⁵⁴⁾⁵⁵⁾ らによる基礎的および臨床的研究があり、Tonning⁷⁶⁾⁷⁷⁾⁷⁸⁾ は補聴器を使用した場合の方向感について報告している。earphone m. では Rser⁶⁰⁾⁶¹⁾、切替⁸⁶⁾、竹尾⁸¹⁾⁸²⁾、寺尾⁸³⁾⁸⁴⁾ が無響箱内のマイクロホン距離差を利用した ITD (interaural time difference) 調整装置を用いて主に基礎的研究を行い、設楽⁶⁵⁾ は同じ方法による感音難聴の細別診断を試みている。また服部²¹⁾²²⁾、久保田⁴²⁾ は人頭大の模型の両側面にマイクロホンを置き、模型の角度を変えることによって生じた時間差、強度差をステレオテープレコーダーに録音して臨床的検査を行っている。Klump⁴⁰⁾、Zwislocki⁹¹⁾、McFadden⁵⁰⁾ は electric delay line や phase shifter などの電気回路を用いて、位相差の研究を行っている。設楽⁶⁷⁾ (1969) は周期性のある連続パルスを利用した方向感検査装置を開発した。この装置は水晶発振器、二進回路、ゲート回路、波形整形回路等を組合わせて、周期性を持たせた二系統のパルス音を任意の時間差で発生できるようになっている。精度の高い時間差を容易に設定でき、AB 法による検査を自動的に行うことのできるデジタル型装置である。著者はこの装置を用い、検査音の強さや周波数帯域と方向感との関係等について研究した。

2) 音呈示レベル

時間差による方向感とは、検査音の強さを変化することによって影響を受ける。竹尾⁸²⁾ は T vs I (Time vs Intensity) 曲線より、音の強さ 40dB において最も時間差の影響が大きく、それより弱くても強くても時間差の占める役割が減少すると述べている。Zwislocki⁹¹⁾ は位相差弁別能は 70dB・SL を中心に最も良いとしている。このように検査音の強さが大きく影響するものとするれば、検査音として適当な強さを決定するためにその特性を知る必要がある。第一に音呈示レベルの影響について調べた。

3) 周波数との関係

方向感の成立は高音部と低音部で強度差と時間差の重要性に差が認められ、高音部では強度差、低音部では時間差が重要な働きを担っている。Mills⁵¹⁾ によるとその移行部は約 1,200Hz である。竹尾⁸¹⁾⁸²⁾、寺尾⁸³⁾ は帯

域雑音の T vs I 曲線の比較を行い、時間差の役割の大きいのは 600~850Hz であると述べている。著者は周期的パルスを濾波(フィルタ)した複合音を用いて、各帯域における両耳時間差弁別域値 Interaural Time DL (以下 ITDL と略す)を測定し、域値の最も低い帯域を求めた。さらに広帯域と狭帯域の比較等を行い、方向感成立に重要な成分の分析を試みた。

4) 正常値および年齢変化

方向感検査として臨床的に実用化するために ITDL の正常値ならびに年齢変化について検討した。時間差弁別については Klump⁴⁰⁾ が雑音、クリック、純音における実験結果を示している。Matzker⁴⁶⁾ は断続純音を用い、音像が正中部に結ぶ時間差の範囲 Richtungsband を測定し、認識しうる左右の時間差の最小値は 0.018msec という結果を出している。さらに年齢変化については 6~17歳の15名と21~30歳の12名の間には差が認められず、36歳以上では次第に Richtungsband が広くなる、つまり方向感が鈍くなることを述べている。切替⁸⁵⁾⁸⁷⁾⁸⁸⁾ は50歳以上の高齢者では T vs I 曲線の傾斜が大きくなり、音像偏倚のために占める時間差の役割が、若年者よりも小さいことを示し、正中部における時間差音像移動弁別域値の平均は、若年者群 0.053msec、高齢者群 0.082msec と増大していると報告している。年齢変化は検査結果の判定にも重要なポイントとなるとともに、中枢性の変化が大いに関与しているものであるから、方向感に現れてくる影響を十分に認識していなければならない。これらの点について従来の結果との比較検討を行った。

II. 実験装置および実験方法

1) 実験装置

使用した装置は方向感検査の目的で設楽により考案されたものである。この装置は精密な時間差を作り出すために 10μsec 間隔のカウンターを用いたもので、ダイヤル操作により 10μsec ステップの時間差を自由に選択できる。検査音としては二組の周期性のある連続パルスを用い、上記の方法で時間差を与え、レシーバーを通して各耳へ導いた。音呈示は規準音 A と検査音 B、あるいは A と A を一組として at random に行うが、A-A あるいは A-B の選択は対比較法プログラミング装置によった。この装置は A-A あるいは A-B の組を選択する 100 個のスイッチをもち、これをセットすることによって 100 組の音呈示を自動的に行うことができる。装置のブロックダイアグラムを図 1 に示した。

a) パルス発振器

図1 実験装置のブロックダイアグラム

周期性のある連続パルスを発振する二個の発振器が組み込まれており、1PPS より 1,000PPS の範囲で発振できる。二個の発振器には $10\mu\text{sec}$ ステップのカウンタにより時間差が与えられる。

b) 一対比較法プログラミング装置

A-AまたはA-Bの組合せ組がセットされ、呈示時間にしたがつて自動的に音呈示を行う。

c) リオン製 SA 2701 B 型 1/2 オクターブステップ フィルター

d) リオン製ミキサー、アッテネーター、増幅器

e) リオン製 AD-02 型 レシーバー

2) 実験方法

検査音は帯域フィルターを通した連続パルスすなわち複合音を用いた。連続パルスの pulse rate は 100PPS とした。検査は防音室内で行った。まず被検者を着席させ、適正にレシーバーを装用させる。最初に複合音における各自の最小可聴値を測定し、正常範囲内であることを、および左右差が 5dB 以内であることを確かめる。次に約 $50\text{dB} \cdot \text{SL}$ において左右耳に強度差のない場合、音像が正中部に結ぶのを確認し、これを規準音とする。もし正中部に結ばない場合は 1dB ステップで最大 5dB まで強度差を補正し、音像を正中部に移動させ規準音とした。5dB 以上となる場合は不適格とした。これで調整を終り、被検者の馴れと検査に対する理解を充分にするため検査音を聞かせ、音像移動を行ってみせる。同時に ITDL の概略の値を知り、検査を始める両耳間時間差 Δt の大きさについて大体的見当をつける。検査に入り第一音としてまず規準音 A を与え、次に第二音として Δt によって音像を側方へ移動させた検査音 B、あるいは規準音 A を与え、第一音と第二音の間に音像のずれがあるか

図2 2組の連続パルスの模式図

どうかを判定させた(図2)。つまり第二音がBであるかAであるかを第一音と比較して判別させ、A、Bあるいは○、×などによって記載または口述させた。音呈示は第一音1.5sec、休止1.0sec、第二音1.5secとし、次の組との間隔は2.0secとした。ITDLの測定は音像移動が明瞭に認識できるような大きな Δt で10組ほど判別の練習を行わせ、続いて多くの場合 $100 \sim 150\mu\text{sec}$ の Δt より始め、A-AまたはA-Bの組を各10組、合計20組聴取させて正答率を求めた。次第に Δt を小さくしていき、正答率75%の Δt を ITDL とした。これは確率 1/2 の選択であるため、全く弁別できない場合に50%の正答率となるからである。もし Δt を次第に小さくして正答率が不安定である場合は、被検者の不馴れのためであることが多く、適宜聴取組数を増加して、安定したところで域値を求めた。

a) 音呈示レベル

ITDL が音呈示レベルによつてどのように変化するかを調べた。被検者はこの検査に習熟した正常聴力者3名である。周波数帯域は予備実験により最も ITDL の小さいと思われる $600 \sim 850\text{Hz}$ とし、音呈示レベル $10 \sim 70\text{dB}$ ・

SL の範囲で 10dB ごとに ITDL を求めた。80dB・SL 以上では検査を行わなかったが、その理由は不快感のため弁別に注意を集中しにくいこと、臨床検査ではこれ以上のレベルは必要ないことなどである。1,200~2,400Hz においても同様の検査を行ない比較した。

b) 周波数帯域

ITDL が検査音の周波数帯域によつてどのように変化するか、5つの方法によつて実験を行つた。音呈示レベルは原則として 50dB・SL とした。第一は 1/2 オクターブの周波数帯域では、どの帯域で ITDL が最も小さくなるか、425~600, 600~850, 850~1,200, 1,200~2,400, 4,800~6,800Hz の各帯域で測定した。各帯域の波形を図

図3 帯域フィルターを通した周期性のある連続パルスの波形 (duration 10 microsec.)

3に示した。第二は600~850HzにおけるIDTLと、この帯域を中心とした広帯域におけるIDTLの比較を行った。帯域フィルターの低域遮断周波数を低い方にのぼしたときは106~850, 300~850Hz, 高い方にのぼしたときは600~1,700, 600~3,400, 600~6,800Hzの帯域をとった。第三は40dB・SL, 600~850HzにおけるITDLが600~2,400Hzに帯域を広げることによってどのように変化するかを調べた。この際600~850Hzの減少を防ぐために、帯域を広げる場合の音圧増大は放置した。第四は1,700~2,400Hz, 50dB・SLにおけるITDLと850~2,400HzにおけるITDLを比較した。この場合も帯域を広げる際の音圧増大には操作を加えなかった。第五はlow-passフィルターとhigh-passフィルターの組合せによる方法である。high-passフィルターの遮断周波数を低くとした場合のITDLは、高くとした場合のITDLより小さい

low-passフィルターでは逆のことがいえる。425, 600, 850, 1,200Hzの4つの周波数でhigh-passフィルターを用いた場合のITDL曲線と、low-passフィルターを用いた場合の曲線の交点を求めた。

c) 正常値および年齢変化

本院健診センターを受診した20~70歳の54名について、年代別にITDLの平均値を求め、正常値および年齢変化について検討した。正常範囲を越える聴力像を示す者、中耳疾患を有する者は除外した。音呈示レベルは50dB・SL, 周波数帯域は600~850Hzとした。

III. 実験成績

1) 音呈示レベルの影響

40dB・SLにおいて Δt を変化させた時の正答率曲線の一例を図4に示した。 $\Delta t=10\mu\text{sec}$ では正答率50%で、全く音像移動弁別は不能である。20~30 μsec では正答率は70~85%と良好になり、40~50 μsec では約90%に安定している。この場合のITDL, つまり正答率75%を示す Δt は約25 μsec である。10~70dB・SLにおける10dBごとのITDLを図5に示した。10dB・SLではITDLは80 μsec 以上であるが、呈示レベルが高くなるにつれて低下し、40dB・SL以上では40 μsec 以下に安定する傾向がみられる。図5には設案によるpulse rate 1,000/21PPSの場合のITDL曲線も同時にSubj Aとして示した。これはやや低い呈示レベルでも域値が低いようであるが、大略同様の傾向をとっている。以上によると時間差による方向感、低い音呈示レベルでは悪く、快適レベルにかけて良好となり安定することがわかる。次に検査音

図4 時間差と正答率の関係を示す一例 (600~850Hz)

図5 音呈示レベルと両耳時間差弁別域値(ITDL)の関係(600~850Hz)。Subj Aは設案によるものでPulse Rateは1000/21PPSである。

の周波数帯域を1,200~2,400Hzとし、音呈示レベルとITDLの関係を調べ、図6に示した。この場合も600~850Hzにおけると同様に、呈示レベルが高くなると域値は低下し安定する傾向がみられたが、各音圧レベルでの域値が高く、しかも個人差によるばらつきが大きい。

2) 周波数帯域の影響

a) 425~6,800Hzの間に425~600, 600~850Hzなど5個の1/2オクターブ帯域をとり、各々におけるITDLを求めた。図7はそれをグラフにしたものである。音呈示レベルは50dB・SLとした。425~600, 600~

図6 音呈示レベルと ITDL の関係 (1200~2400Hz)

図7 1/2 オクターブ帯域における ITDL

850, 850~1,200Hz の各帯域においては域値は低く 40 μsec 以下である。1,700~2,400, 4,800~6,800Hz と高音域になるにしたがつて域値は上昇し, 80 μsec , 160 μsec となっている。4,800~6,800Hz では被検者 3 名のうち 2 名は音像形成が不明瞭のため, 域値測定ができなかった。

b) a の結果では 425~600, 600~850, 850~1,200 Hz の各帯域においては ITDL はほぼ近似しているが, 予備実験, 雑音における実験結果などより, 600~850Hz において方向感が最も良いようであるから, この帯域に

図8 600~850Hz を中心として帯域を広げた場合の ITDL

図9 600~850Hz より 600~2400Hz へ帯域を広げた場合の ITDL

重点を置いて以下の検査を行った。すなわち600~850Hz における ITDL と, この帯域を含む 5 つの広帯域106~850, 300~850, 600~1,700, 600~3,400, 600~6,800Hz における ITDL を比較した。この場合帯域を広げても音呈示レベルは一定 (50dB・SL) になるようにした。この結果を示したのが図8である。600~850Hz における ITDL は 3 名とも 20 μsec と最も低い値を示し, 高音域あるいは低音域へ帯域を広げるにつれて, 域値の上昇が認められる。この域値の上昇は帯域を広げる際に音呈示レベルを一定に保つたため, 広い帯域に含まれる 600~850Hz の成分が減少したことによるのではないかと考えられる。この結果も 600~850Hz の重要性を裏付けるものである。

c) 帯域を広げる際に 600~850Hz の成分が減少しないようにした場合 ITDL はどうなるであろうか。つまり 600~850Hz より帯域を広げる時に, 音圧を一定に保

つ操作を加えなければ、音圧は大きくなり 600～850Hz の成分の減少を防ぐことができる。この方法により 600～850Hz (40dB・SL) と 600～2,400Hz における ITDL を比較した。この場合は被検者は 2 名であるが、図 9 に示すように帯域を広げても域値の上昇はほとんどみられない。帯域を広げた場合の音圧上昇は不快レベルに達するほどのものではなく、音呈示レベルと ITDL の関係より、40dB・SL 以上では域値はほぼ安定しているので、この結果に対する音圧変化の影響は無視できると思われる。実験 b, c, の結果より帯域を広げる場合、600～850Hz の成分が減少すると ITDL は上昇するが、これを一定に保つと上昇はみられないことがわかる。

d) 実験 b, c の結果を別の方向から確かめるために、ITDL の高い高音域から低音域へ帯域を広げることによって起る域値の変化を調べた。図 10 は 1,700～2,400 Hz (50dB・SL) と 850～2,400Hz における ITDL を示したものである。1,700～2,400Hz における ITDL は約 75 μ sec であるが、850～2,400Hz では 20～30 μ sec となっており、帯域を広げて低音成分を含ませることにより著明な域値低下が確認された。

e) 低音域で high-pass フィルターをかけた場合の ITDL は、遮断周波数を高音域へ移すとともに高くなってくる。これは弁別に必要な有効成分が、フィルターの移動とともにカットされて少なくなるために起る現象である。逆に低音域で low-pass フィルターをかけた場合 ITDL は高いが、遮断周波数を高音域へ移すと次第に低

下してくる。これはカットされていた有効成分が、遮断周波数の移動とともに増加してくることによる。425, 600, 850, 1,200Hz の 4 点において high-pass フィルターを用いた場合の ITDL 曲線と low-pass フィルターを用いた場合の曲線を図 11 に示した。両曲線の交点は矢印のようにほぼ 600～850Hz の間に認められる。このことから 1/2 オクターブのような狭帯域の ITDL を比較する場合は、600～850Hz において最も域値が低くなるであろうと推測される。

図11 425, 600, 850, 1200Hz の4点において high pass または low pass フィルターを用いた場合の ITDL

以上5つの実験より ITDL は周波数帯域によって変化し、高音域では高く、600～850Hz において最も低い、すなわち Δt が最も能率的に弁別されることが明らかである。高音域になると音像形成そのものが不明瞭となり、4,800～6,800Hz ではほぼ限界となるようである。

3) 正常値および年齢による域値の変化

周期的パルスを濾波した複合音を用いて時間差による方向感検査を行う場合、音呈示レベルと周波数帯域のおよぼす影響については明らかとなつたので、次に実際に臨床に用いる場合に必要な正常値について検討した。また内耳あるいは聴覚神経系の老人性変化が、聴覚中枢路の検査である方向感検査にどのように表われてくるかについても合わせて検討を加えた。検査音の周波数帯域は最も域値の低い 600～850Hz とし、音呈示レベルは少々誤差があつても域値の安定している 50dB・SL とした。図 12 は 20～70 歳代の年齢相応の聴力を有する被検者 54 名について ITDL を測定し、横軸に年齢、縦軸に Δt をとり両者の相関を示したものである。年齢とともに ITDL の上昇傾向がみられ、両者の相関係数は 0.497** である。

図10 1700～2400Hz より 850～2400Hz へ帯域を広げた場合の ITDL

図12 ITDL と年齢の相関を示す。

表1 両耳時間差弁別域値の年代別平均値および標準偏差

年齢	例数	平均 (μsec)	標準偏差
20 ~ 29	8	27.8	6.7
30 ~ 39	14	37.6	15.5
40 ~ 49	14	45.4	18.0
50 ~ 59	7	42.0	14.5
60 ~ 69	6	55.0	17.0
70 ~ 79	5	65.2	21.4
20 ~ 79	54	43.2	19.0

回帰直線はITDLをY、年齢をXとすると $Y=0.64X+14$ という式で表わすことができる。各年代における平均域値は表1に示した。20歳代において最も低く28μsecであり、70歳代では65μsecと明瞭な差がみられる。

IV. 文献考察

方向感検査は後迷路性難聴の鑑別診断に有効とされ、脳腫瘍、脳出血、頭部外傷をはじめ内耳性難聴、伝音性難聴についても検査結果が検討されている。岡崎⁵⁸⁾、Longo⁴³⁾は頭蓋内疾患について臨床的検査を行い、脳幹交叉後より側頭葉に到るまでの聴覚路に障害をおよぼす疾患においては方向感の低下がみられ、しかも障害部位と反対側で著しいと述べている。しかし、Nordlund⁵⁵⁾はfree field m. で、皮質障害より下部聴覚路障害において著明な方向感低下が生じるとしている。

内耳性難聴では頭蓋内疾患におけるような方向感の高度障害はみられず、Jongkees²⁹⁾はしばしば方向感低下がみられるが、聴力低下の程度との間には相関はないと述べており、Nordlund⁵⁵⁾はわずかに方向感低下がみられると記している。

伝音性難聴については Jongkees²⁹⁾は、慢性中耳炎では方向感低下はなく、鼓室形成術後も正常値を示すが、耳硬化症では術前術後とも方向感が悪いとしている。このように多くの業績によつて方向感検査の診断的意義は、かなり明瞭になつてきたようであるが、いまなお聴覚中枢、末梢、内耳、中耳等の障害が方向感におよぼす影響力については、完全な意見の一致をみていない。

ここで方向感の成立機序や障害部位との関係について、文献的考察を行つてみたいと思う。聴覚路の第一次ニューロンは双極ニューロンである蝸牛神経で、蝸牛軸内にあるラセン神経節細胞の末梢突起が、蝸牛毛細胞に分布し、中枢突起は延髄にある蝸牛神経核に入っている。第二次ニューロンには交叉性及非交叉性のものがあり、蝸牛神経核を出て同側または他側の台形体背側核に達する。さらに外側毛帯を経て、下丘、内側膝状体より皮質聴領に到るのであるが、全経路5次のニューロンより成っている。渡辺⁸⁸⁾は聴覚の神経機構で特別なこととして、内耳から大脳皮質に到る間に多くの中継核を経由することをあげ、各中継核におけるシナプス機序の重要性を推測している。Ades²⁶⁾は他の感覚系と異なる点として、両側性に重複していること、さらに交叉部、連合部における著しい交通をあげている。左右の交通部位としては第一に台形体、第二に外側毛帯における Probst の交連、第三に下丘の交連、第四に脳梁による皮質聴領の交通がある。

方向感の成立機序に関してでは、Békésy⁴¹⁾(1930)による説がある。左右の耳からの刺激を受けた中枢の核における、興奮した細胞の数の左右差を、高位中枢が感受することによるとするものである。その後、David¹¹⁾(1959)やその他の研究者による latency hypothesis とよばれる仮説が発表された。これは両耳より刺激を受ける中枢の核において、左右より到達する刺激の時間差により、興奮するニューロンの部位が異なり、この部位の偏倚を高位の中枢が感受するというものである。左右の強度差については、神経興奮の潜伏期が強度差により変化することから、潜伏期の差つまり時間差に変換されて、核におけるニューロンの興奮部位に影響するとしている。さらに Bergeijk³²⁾(1962)は左右にある一対の上オリブ副核が、それぞれ両耳よりの神経を受けていることから、同側よりの神経を抑制神経、対側よりの神経を興奮性神経と考え、時間差および強度差によつて左右の上オリブ副核に興奮性の左右差が生じるという説を発表した。Galambos¹⁸⁾(1959)は微小電極を用い、猫の上オリブ

副核において両耳相互作用が起きることを確かめている。Goldberg¹⁹⁾(1969)は犬の上オリーブ核において両耳相互作用を行うニューロンを binaural neuron と総称した。このうち高い特徴周波数をもつニューロンに、音強度の変化に対し鋭敏に働くものと、左右の強度差に敏感なものがあるのを認め、低い特徴周波数をもつニューロンは左右の位相差に鋭敏であることを報告している。さらに上位の神経伝達機序については、最近多く取り上げられている time sensitive neuron が関与していることは間違いないものと思われる。Rose⁵⁹⁾(1966)は細胞のなかには特徴時間差とでもいうべき特性を持つものがあり、刺激音の周波数に関係なく、一定の時間差でスパイク数が最多となるものがあると述べている。切替³⁷⁾³⁸⁾(1969)は方向感の成立において、0.02msec から 0.6msec の短い時間差が処理されるのは time locked impulse の存在を示すもので、tonotopical な考え方のみでは説明できないとしている。Aitkin¹⁾(1970)は猫の外側毛帯背側核のニューロンの88%が両耳刺激に反応し、1,000Hz 以下で phase-locking があるのを認めている。Brugge⁹⁾(1970)は外側毛帯背側核の phase sensitive neuron に 300~1,600Hz で放電を認め、対側興奮性同側抑制ニューロンでは両耳の音強度差に反応することを示した。下丘について Rose⁵⁹⁾(1966)はニューロンのスパイク数が最大となるずれ、すなわち characteristic delay があり、これはそのニューロンの感受する周波数の範囲で一定となるのを認めた。皮質聴領について Hirsch²⁷⁾は低周波数純音により誘発された表面が陽性の電位の大きさと潜伏期が、両耳時間差の変化に依存していることを示した。Brugge⁹⁾(1969)は猫の皮質聴領 AI, AII のニューロンが、200~2,400Hz において両耳時間差に感受性があり、スパイク数は両耳時間差の関数であることを発見した。以上のように最初に両耳よりの刺激を受ける上オリーブ副核より皮質聴領まで、低周波数を特徴周波数とするニューロンにおいて、time sensitivity が認められることは、上オリーブ副核で感受された時間差が、それを特徴時間差とするニューロンによつて皮質聴領まで伝えられるであろうという推測をもたらす。両耳強度差の影響つまり T vs I trade については、Whitworth⁸⁹⁾(1961)、竹尾⁸²⁾(1964)が考案しているように、時間差を trade する強さの役割が、末梢における潜伏期を短縮させることによるという理論がある。(Deatherage¹²⁾, David¹¹⁾)

Deatherage¹³⁾(1959)は潜伏期を測定し、大きな強度差を trade することのできる時間差の大きさと、音の強さ

による潜伏期の変化がほぼ一致して 1~2msec であることを確めた。潜伏期の成立機序には 3 つあり、第一はニューロンを発火させるに必要なエネルギーを蓄えるために要する時間で、neural delay または utilization time とよばれるものである。第二に基底膜上を進行する波の space-time pattern に基づく travelling wave delay、第三にイヤホンや耳が刺激を発するに充分な displacement を得るに要する時間、displacement delay ともいうべきものがある。

高音域の方向感では強度差が重きをなしており Mountcastle⁵²⁾(1968)は 3,000Hz 以上に特徴周波数のある神経では、両耳強度差に敏感であるとしている。Goldberg¹⁹⁾(1969)は高い特徴周波数をもつニューロンを両耳刺激の方が単耳刺激よりスパイク放電頻度が大きくなる EE ニューロン (excitatory-excitatory neuron) と一側耳刺激で興奮性、他側耳刺激が抑制作用を起す EI ニューロン (excitatory-inhibitory neuron) に分け、渡辺⁸⁷⁾(1970)はさらに同側耳興奮性、他側耳抑制性のニューロンも認めている。すなわちこの EI ニューロンが左右耳の強度差に敏感であることを確かめている。さらに Brugge⁸⁾(1969)は皮質聴領の一群のニューロンは、両耳強度差に非常に鋭敏であるが、音圧の変化には鋭敏でないと記している。このように中枢路においては、それぞれ時間差に反応するニューロン、強度差に反応するニューロンがあり、方向感を司つていると考えられる。

聴覚中枢路の障害部位と方向感低下の関係について、主に動物実験の結果を通覧してみると、片側皮質聴領除去では Strominger⁷³⁾(1969)は猫の AI (auditory area I), AII, Ep (posterior ectosylvian gyrus), IT (insular temporal cortex), SII (somatic area II), SS (suprasylvian gyrus) を除去し、音源定位能の低下を認めた。彼は手術後の猫が術側の餌箱を選ぶ回数が増加するのを観察し、皮質聴領の損傷が反対側の聴空間により大きな影響をもっているためであると解釈している。Whitfield⁹⁰⁾(1972)もやはり猫の片側皮質聴領 (AI, AII, Ep, IT) を除去し同様の結果を得ている。臨床的にはすでに述べたように片側大脳半球に比較的大きな病巣があると、反対側により著明な方向感低下が起きる。(岡崎⁵⁸⁾, Longo⁴³⁾, Matzker⁴⁸⁾, Klingon³⁹⁾, Szikszay⁷⁵⁾)

両側皮質聴領除去について Neff⁵³⁾(1956)は AI, または AI, AII, Ep を除去した猫について、重篤な方向定位障害を観察したが、条件を易しくすることによつて行動の改善を認めた。

Strominger⁷³⁾(1969)は AI, AII, Ep, IT, SII, SS 除去により完全に方向定位が失なわれるとし、IT, SII, SS などの部位は皮質投影部位の一部と考えている。Masterton⁴⁵⁾(1967)は AI, AII, Ep のみの除去でも完全に方向定位能が失なわれると述べている。さらに彼によると、猫の台形体交叉線維の切断によって時間差弁別域値が $50\mu\text{sec}$ 以内から $500\mu\text{sec}$ に増大した。上オリーブ核の一侧破壊では方向感の高度の障害は認められないが、外側毛帯の切断ではより強い障害をきたし、再学習が非常に困難になる。両側下丘の破壊では全くその機能が失なわれる。Strominger⁷⁴⁾(1970)は猫の両側下丘の acoustic brachium を切断することによって方向定位不能となるとしている。

V 考 按

1) free field method と earphone method

方向感検査には大きく分けて free field m. と earphone m. があるが、ここでそれぞれの得失を検討しておこう。free field m. の利点は音源が外界にあり生理的刺激であること、補聴器を装着した場合の方向感検査も可能であることである。欠点は臨床的には種々簡易法が用いられるが、厳密には完全な無響室が必要であり、費用、space の問題が起きてくること、また時間差と強度差を分離して音呈示できないことである。earphone m. の利点は一般の防音室で行うことができ、space もあまり要しないこと。時間差 Δt と強度差 ΔI を分離して時間差だけを変えたり、強度差だけを変えることができること。これによって Δt または ΔI の各々の弁別域値測定や呈示レベルの影響、周波数の影響を調べることができ、方向感成立機序の解析に便利である。欠点は音像が頭蓋内に生じ、非生理的であること、補聴器を装着した場合の検査が困難なことなどである。

earphone m. の場合の音像定位の方法は主に 1) centering method, 2) matching method, 3) 正中部に对照音像を与え検査音のずれの有無を判定させる方法 (AB 法) があり、その他外界の指標 external pointer を用いる方法 (Toole⁷⁹⁾)、左右の判定を行わせる方法などがある。centering m. とは両耳時間差 Δt により偏移した音像を正中へもどすに要する強度差 ΔI を測定し、 $\Delta t/\Delta I$ すなわち T vs I ratio を求める方法で T vs I trade を利用したものである。T vs I 曲線の勾配が小さいほど時間差に鋭敏であるといえる。しかしこの方法は竹尾⁸²⁾、Babkoff²⁾ が述べているように、 Δt の大きさを表わす尺度として ΔI を用いることにより、複雑な因子が入り込

んでくるという不利がある。matching m. は検査音に Δt を与えて音像を側方へずらし、比較音に強度差を与えて同じ位置に音像を偏移させるに要する強度差 ΔI を求める方法である。centering m. と異なる点は T vs I trade によらないことである。この方法については境⁶²⁾の詳細な研究がある。AB 法とは検査音に Δt を与えその音像の位置が正中位の对照音と同一であるか否かを判定させる方法であり、方向感の良否を直接時間差で表わすことができる。また对照と比較するという単純な仕事であり、客観性の高い結果が得られる。

2) 装置の特徴

1960年代より我が国では earphone m. による方向感実験が数多く発表されているが、実験方法として多く用いられたのは、2つのマイクロホンのスピーカーからの距離差により時間差を作る方法である。これには特殊な音響箱を用い音源より2つのマイクロホンまでの距離差を変えても、音の強さが一定となるようにし、時間差と強度差を別々に操作できるようにしたもの(切替⁸⁰⁾、竹尾⁸¹⁾、寺尾⁸³⁾、設楽⁸⁵⁾、岡崎⁵⁸⁾) 人頭大の模型の両側面にマイクロホンを置き、音源との角度を変えてステレオテープレコーダーに録音する方法(服部²⁶⁾、久保田⁴²⁾) などがある。著者の用いた装置は二組の連続パルスをカウンターによる時間差でずらすもので、ダイヤル操作により $10\mu\text{sec}$ ステップの精度の高い時間差を自由に選択できる。さらに AB 法による刺激音の二対呈示が自動的に行われる装置を内蔵し、呈示時間や刺激間隔も自由に選択できる。音像定位の指標として对照音の音像を正中位に与えるため、被検者は音像移動を正確に認識することができる。検査結果は正答率により客観的に評価できるなどの特徴がある。設楽⁸⁶⁾はこの装置を用い両耳に強度差あるいは時間差を与えて音像を偏移させ、その位置における両耳時間差弁別域値について報告している。

マイクロホン移動による方法、phase-shifter、本実験に用いた装置の三者の特徴を表2に示した。マイクロホン移動による方法は、その移動とともに2dB以内の強度変化を伴うために精度にやや難がある。また周波数は音

表2 earphone method の各種と特徴

	精 度	周 波 数	検 査 音
マイク移動	定 性 的	300~ 2000Hz	純音、雑音
Phaseshifter	定 量 的	全	純 音
本 装 置	定 量 的	全	パ ル ス

響箱内における定在波形成の問題があり、300～2,000Hzに限定される。phase-shifter は定量的で全周波数に適用できるが、検査音は純音に限られる。本装置では時間差を完全に独立して変化でき定量的であるが、検査音はパルス（複合音）に限定される。

3) 実験結果の検討

a) 音呈示レベル

両耳における位相差や時間差の弁別域値は検査音の呈示レベルによる影響を受ける。これについては Zwislocki⁸²⁾(1956)、竹尾⁸²⁾(1964)の報告がある。Zwislocki は tone pulse を用い呈示レベルと両耳間位相差弁別域値の関係を調べ、域値は低レベルでは高く、快適レベルで最も低くなり、高レベルでは再び高くなることを示している。このように呈示レベルとともに位相差弁別域値が変化することの説明として、音波と神経放電の同期性に関連した仮説を述べている。すなわち、呈示レベルが低い場合は低周波でも同期性が悪いと推測され、したがって位相差弁別能も悪くなる。快適レベルでは音波と神経放電が1:1で同期しており弁別能が良好で、さらにレベルが高くなると音波と神経放電の比率が一定しなくなり、したがって弁別能が悪くなるというものである。竹尾は band noise を用い、3つの呈示レベル20dB、40dB、60dBにおいて T vs I ratio を比較し、40dBでは20dBの T vs I ratio より小さい値であるが、60dBではかえって大きな値となっている。その理由として60dBの場合は強音を聞かせることになり、疲労および順応の要素が加わること、音像に揺がりや偏在感が生じ測定に困難さが加わることなどが関係しているのではないかと推測している。さらに弱い音や中等度の強さの音では、外毛細胞の働きが主体をなし、強高音の場合には内毛細胞の働きがこれに加わることにより、これら両毛細胞の機能差も影響しているであろうと考案している。これについてさらに詳細に検討してみると、Riesz⁸⁰⁾(1928)は強度差弁別域値 ΔI と感覚レベル I の関係を示している。すなわち横軸を I とし縦軸を ΔI と比弁別域 $\Delta I/I$ の両者で表わしている。これをみると I の増大とともに ΔI は小さくなり、約60dB・SL以上では $\Delta I/I$ がほぼ一定となっており、著者の時間差弁別域値 Δt と呈示レベル I の関係曲線に近似している。Shower & Biddulph⁸⁰⁾(1931)による周波数の比弁別域 $\Delta f/f$ と感覚レベルの関係を見ると、これも類似の曲線となつている。ただ $\Delta f/f$ が30dB・SL以上で一定となるのが相違点である。このように時間差のみならず強度差、周波数の弁別においても

呈示レベルの影響がみられ、レベル上昇とともに域値が低下し、あるレベルに達すると一定となる共通の現象が認められる。この現象つまり弁別域値曲線に音呈示レベルとともに変化する部分とほぼ一定の部分があることについては、まず第一に内耳において内毛細胞、外毛細胞という特性を異にする2種類の感覚細胞の存在が無視できない。時間差弁別について考えると内毛細胞と外毛細胞において蝸牛神経の走行と支配が異なることに注目せねばならない。蝸牛神経は毛細胞に分布する際に2つのタイプがあり、一つは放射状神経で一個または非常に少数の毛細胞に結合している。もう一つは螺旋状神経で非常に多くの毛細胞に結合している。放射状神経は内毛細胞に螺旋状神経は外毛細胞に多くみられる。Bergeijk⁸¹⁾(1964)は両耳聴において小さな時間差を検出するには、刺激の始まる時間を正確に伝える必要があり、長い時定数をもつと思われる螺旋状神経より放射状神経のほうが有利であることから、放射状神経が刺激のタイミングのシグナルを伝えているらしいと推測している。また基底膜上の進行波の速度は前庭窓より2mmのところでは150m/sec、終端35mmのところでは毎秒数mと測定されている(勝木⁸⁰⁾)。したがって基底膜に沿って多数の外毛細胞に分布している螺旋状神経は進行波による刺激到達の時間を正確に伝えるには不適であり、放射状神経の方が有利と考えられる。これら時定数および解剖学的相異点より内毛細胞が刺激到達の時間を伝えるものとする、ITDL 曲線における低音呈示レベルの部分は、内毛細胞の働きが充分でないためにITDLが高く、音呈示レベルの上昇とともに内毛細胞の働きが良好となり域値が低下し、約40dB・SLで一定となるのであろうと考えられる。強度差弁別域値曲線についても同様のことが推測される。つまり外毛細胞は基底膜の中央部、振幅が最も大きい部位にあり、刺激の有無の検出に鋭敏で、内毛細胞は基底膜内側にあり強度差の弁別に鋭敏とされている。周波数弁別についても放射状神経に支配される内毛細胞の方が鋭敏であろうと想像される。時間差、強度差および周波数弁別域値曲線が音呈示レベルの上昇とともに低下し、あるレベルで一定となることについて両毛細胞の機能差によるものであろうと推測したが、各曲線において域値あるいは比弁別域が一定となるレベルは30～60dB・SLの間にあり各々異つているが、内毛細胞の感受性の相異によるものかどうか不明である。

以上は内毛細胞が方向感の情報処理に重要な働きを担っているという仮定に基づく解釈であるが、この仮定と

相入れない現象も認められる。すなわち内毛細胞が優位に働いていると思われる60dB・HL以上の内耳性難聴において、方向感が極端に悪いという事実である。この点強度差弁別についてはSISI検査を行った場合、低感覚レベルにおいても弁別能が良いことから、内毛細胞優位と考えて無理がないようである。したがって時間差弁別においては外毛細胞が優位であろうという仮説も成立する。この仮説に基づく40dB・SL以下で音呈示レベル上昇とともにITDLが低下しているのは、外毛細胞の機能が音呈示レベル上昇とともに良好となるためであろう。40dB・SL以上では外毛細胞の機能が極限に達し、音呈示レベルが上昇しても一定値をとると考えた方が解釈しやすい。

さらに蝸牛神経核のレベルでもこのような現象と合致する実験結果がみられる。Goldberg²⁰⁾(1966)は純音の持続刺激による猫の蝸牛神経核ニューロンの発火率を調べ、反応の異なる二種のニューロンを認めている。一つは音圧を次第に強めると発火率も高くなり、40dB・SPL以上では90dB・SPLまでほぼ一定となるmonotonic曲線を示すものである。もう一つは音圧とともに発火率が高くなり40～50dB・SPLで最高となつて、それより強い音圧では発火率がかえって低下するnonmonotonic曲線を示すものである。これら二種のニューロンの蝸牛神経核における比較は、調べられた17個のうちnonmonotonicが4個、残りがmonotonicであつたとしている。どちらも40～50dBで頭打ちとなつているのは、音呈示レベルとITDLとの関係曲線に類似している。すなわち発火率が高くなると時間差による方向感も良くなり、発火率が頭打ちになると方向感も一定となると考えられる。Goldbergの実験は2.8KHz以上の純音で行つたものであるが、低周波数でも二種類のニューロンの存在、類似の曲線の得られる可能性はあると思われる。

時間差の影響力の大きい呈示レベルは、Zwislocki⁹⁾によると50～90dB・SLでありなかでも70dB・SLにおいて最も大きいと述べている。竹尾⁸¹⁾は40dBで最も大きく60dBでは小さくなることを示しているが、これはT vs I tradeによる実験結果であり、時間差の影響力を強度差で測定していることからくる相違と思われる。つまり強さの増強と感覚的な大きさの増加とは比例しないので、強さを規準にした成績と域値を規準にした成績とに差があつてもおかしくない。著者の方法はZwislockiの実験に近く、検査音はtone pulseと周期性のある連続パルスの違いがあるが、結果はほぼ一致したものとな

つた。

方向感検査に適当な音呈示レベルについて考えてみよう。音呈示レベルとITDLの関係をみると、レベル変化によりITDLの変化する部分とほぼ安定している部分がある。したがって方向感検査として軽度難聴者を含めた一般に使用するには、多少音呈示レベルの誤差があつても域値の安定している40dB・SL以上で検査するのが妥当であろう。しかしあまり音が大きくなると聞きずらく、疲労も早いので50dB・SL程度が適当と思われる。さらに600～850Hzと1,200～2,400Hzの両帯域におけるITDL曲線を比較してみると、600～850Hzにおいて全体的に域値が低く、測定値の個体差も少ない。したがって検査音の周波数帯域としては600～850Hzの方が適当であろう。

b) 周波数帯域

free fieldにおいて純音を用い周波数による方向感の鋭敏度を調べたStevens⁷¹⁾⁷²⁾は、約3,000Hzで方向判定の過誤が最も多くなることおよび前後方向の過誤が約3,000Hz以上で急激に少なくなることを示した。Licklider²³⁾はこの事実は方向感が時間差と強度差の二つの要因から成り立っており、約3,000Hzがその移行部であるために両要因の働きが悪く、方向感が鈍いのであろうと述べている。Mountcastle⁵²⁾もfree fieldにおける純音の方向感の低周波数では角度にして5～10°の過誤であり、2,000～4,000Hzでは20～25°となり、それより高い周波数では再び誤りの角度は小さくなると述べている。このように時間差と強度差の移行帯が約3,000Hzとする実験結果に対し、約1,500Hzとする報告もみられる。Mills⁵¹⁾はtone pulseを用い各周波数における正中部の角度弁別域値を測定し、約1,500Hzに高域値のピークがあることを示している。Sandel⁶⁹⁾はtone pulseを正中部の規準音として聴取させ、white noiseを規準音に合致させる方法を用いてやはり約1,500Hzに高域値のピークをもつ曲線を示している。さらにMills⁵¹⁾はtone pulseの時間差弁別域値をdichoticとdioticにおいて対比し、どちらも約1,500Hz以上で急激な域値上昇のみられること、および強度差のdichoticとdioticにおける対比では約1,500Hz以上で両弁別域値曲線がほぼ一致し低下していることより、約1,500Hzが時間差の移行帯であろうと論述している。Zwislocki⁹⁾も述べているように1,300Hzでは位相差の弁別域値は、測定困難であるほど高いことは一般に認められており、3,000Hzを移行帯とするよりは1,500Hzのほうが妥当のようである。

次に時間差のみを取り上げて dichotic な方法による周波数との関係を検討してみよう。Zwislocki⁹¹⁾ は tone pulse を用い周波数と位相差弁別域値の関係を調べ、250Hz より 1,000Hz まで次第に域値が上昇し、約 1,300 Hz で急激に上昇する曲線を示している。またこれを $\Delta t = \Delta \phi / 360f$ という式で周波数と時間差弁別域値の関係になおした曲線では、800Hz で最低点となる。すなわち最も域値が小さくなることを示している。帯域雑音における方向感に対する時間差の占める役割の大きい帯域については竹尾⁸¹⁾⁸²⁾、寺尾⁸⁴⁾の報告がある。竹尾は3つの帯域 300~425, 600~850, 1,200~1,700Hz において T vs I trade 曲線を描き、その勾配が最もゆるやかであった 600~850Hz において時間差の占める役割が最も大きいとしている。寺尾は各帯域における弁別可能な時間差を比較し、やはり 600~850Hz において最も鋭敏であると結論している。著者の実験による周期的パルスを通波した複合音においても、各帯域の ITDL の比較、帯域幅を変えた場合の域値の変化、各周波数において low-pass filter を用いた場合の域値を結んだ下降曲線と high-pass filter を用いた上昇曲線の交点の周波数の検討などから、やはり 600~850Hz の帯域で時間差弁別域値が最も低く、方向感において重要な帯域であることが明らかとなった。すなわち時間差弁別域値は純音では約 800Hz で最も低く、帯域雑音、周期的パルスを通波した複合音では 600~850Hz で最も低いという結果である。Flanagan¹⁶⁾ (1965) は蝸牛モデルを用いた実験で、広帯域パルスでは基底膜のほぼ中央約 1,500Hz に相当する部分の振幅が最も大きいことを認め重要視している。それは重要な神経活動は、基底膜の振幅の最も大きい部位から発せられるという仮説に基づいたものである。しかし狭帯域の雑音または連続パルスの場合は、当然最大振幅部位も変ってくるはずであり、1,500Hz 近辺が最も重要であるとはいえないわけである。純音では約 1,300Hz で急激な時間差弁別域値上昇がみられるが、連続パルスでもほぼ同様で、帯域別の域値を比較すると 850~1,200Hz までは 20~40 μ sec と小さな値であるが、1,700~2,400Hz では約 80 μ sec と上昇し、4,800~6,800Hz では3名の被検者のうち1名は約 160 μ sec で2名は音像形成不明瞭で域値測定不能であった。このように周期的パルスを通波した複合音では純音より高い周波数まで時間差の弁別が可能であるが、4,800~6,800Hz では極めて困難となる。純音において高周波数では時間差弁別能が急激に悪くなる原因としては、設楽⁸⁵⁾、竹尾⁸¹⁾が述べているように第一は

神経の不応期の問題、つまり神経の不応期は 1msec 以上と考えられ、1,000Hz 以上では興奮が周波数に追従しないと考えられること。第二に Kieze⁸²⁾ (1957) のいうように、位相差が半波長以上になると位相差の逆転を生じ、方向感の低下または消失をきたす。つまり高周波数になると半波長の長さが短くなるために位相差の逆転を生じやすいという解釈がある。

時間差弁別域値と周波数の関係について述べたが、強度差あるいは周波数の弁別域値と周波数の関係はどうであろうか。Riesz⁸⁰⁾によると強度差の比弁別域 $\Delta I/I$ は約 2,000Hz で最小となつている。また Shower⁸⁰⁾によると周波数の比弁別域 $\Delta f/f$ も 2,000Hz を中心として最も小さくなつている。強度差および周波数弁別能が同じく 2,000Hz で最も安定し、良好である理由は明らかでないが、人間の聴覚系が 2,000Hz を中心として最高の機能を発揮するようにできているようである。ただ時間差弁別においては、前述した不応期の問題などに関連して 1,000Hz 以下で最も弁別能が良くなるものと思われる。

方向感成立にはどのような音の種類あるいは波形が有効であろうか。音の種類について切替³⁸⁾、北川³²⁾は複雑なほど方向感が良好であり、雑音、複合音、純音の順で悪化すると述べている。連続パルスのような複合音において純音より方向感が良い理由として、Licklider²⁵⁾ (1951) は複合音ではその各々の成分が独自の両耳位相差、強度差をもっていることならびに位相差の効果が低周波数に限られないであろうことをあげている。Blauert⁷⁾ (1972) は 1.6KHz 以上では包絡波形の差による方向感が成立すると述べている。また高域複合音の時間情報は蝸牛の基部の振動から送られるとする Deatherage¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾、Whitworth⁸⁹⁾ の説に対し境⁹²⁾は検査音として振幅変調音を用い、高域雑音を片耳に与えた場合に定位の変化がみられなかったことより、最も強く興奮していると思われる搬送周波数付近の神経が、信号のレベル変化に伴って活動して時間情報を上位神経に伝えていると推論している。純音より複合音のほうが高音域まで方向定位が可能であるとはいうものの、4,800~6,800Hz では非常に困難となることはすでに示したとおりである。このことは分離点の測定結果からも推定することができる。音像が正中に結ぶ位置から時間差によつて音像を側方へずらしていくと、ついに音像を結ばなくなり、左右に分離して聞こえるようになる。この時の時間差を分離点というが、設楽⁸⁷⁾が周期的パルスを通波した複合音を用いて行つた実験によると、図13の如く高音域になるにつれて小さな時

図13 周期性のあるパルス音の音像分離点曲線。縦軸は時間差、横軸はパルス音の濾波帯域の中心周波数、曲線は3名の被検者の成績を示す。

間差が分離点となっており、音像形成が狭い時間差の範囲内でのみ成立することがわかる。

どのような音刺激が有効であるか検討してみると、雑音、複合音では600~850Hzの帯域において最も方向感が良いことが証明されており、純音においてはZwislocki⁹⁾が800Hz周辺で最も良いという結果を出している。このように各種の音で一致して600~850Hzの帯域が有効ということより、蝸牛毛細胞の同帯域相当部位に刺激を与

えることが重要であろうと推測される。ここで600~850Hzの帯域フィルターを通した周期性のある複合音の波形を見ると、図3のように減衰波の周期的な反復である。帯域を高音域へ移した場合あるいは図14のように広帯域とした場合減衰が早くなりシャープな感じの波形になる。これら各帯域の波形を比べると、シャープな600~3,400Hzの方が方向感が良さそうであるが、実際はなだらかな600~850Hzの方が良いことが証明されている。周波数成分は600~850Hzでは600, 700, 800Hzの3つより成っており、600~3,400Hzでは29の成分より成っている。つまり600~850Hzの帯域の成分が充分であれば方向感は良く、帯域を広げることによってその成分が相対的に減少すると悪化すると考えられる。その成分が減少しないように帯域を広げた場合、方向感が悪化しないことはすでに証明された。以上のことより複合音における方向感の良否は、刺激音波形によるのではなく周波数成分によることが明らかである。しかし雑音、複合音、純音の間では各々の波形が方向感の良否に大きく関与しているようである。雑音では波形が非常に複雑で、同じ波形の繰り返しがないことより、時間差によるずれを容易に検出できると考えられる。周期性のある複合音では雑音より波形が単純で、やや時間差によるずれの検出が困難となる。しかし純音と比較してみると、減衰波であること、包絡波の大きな周期をもつことのために方向感的良好である。純音になると小さな同一波形の繰り返しであり、ずれを検出しにくいことが想像できる。つ

図14 帯域フィルターを通した周期性のある連続パルスの波形。(600~3,400Hz)

まり純音が内耳で A-D 変換された場合、同じ大きさのインパルスが等間隔で続くために、時間差によるずれは先行刺激と後行刺激のずれとして認識されるとともに、後行刺激と次の先行刺激が同じく時間差のずれとして認識され、先行後行の区別がつきにくいという面がある。これに比べ周期性のある複合音では、包絡波の大きな周期が A-D 変換後も保たれるために、先行後行刺激の混同が起こりにくく、良好な方向感が得られるのであろうと考えられる。

c) 正常値

各種の音における時間差弁別域値を調べてみると、竹尾⁸¹⁾は楽音、言語音、騒音のような複雑な音ほど鋭敏であり、続いて切断純音、連続純音があげられるとしている。Klump⁴⁰⁾は 1,000Hz の切断純音で 0.011msec, Zwislöck⁹¹⁾は 800Hz の tone pulse で 0.013msec, Matzker⁴⁸⁾は切断純音において 125~8,000Hz の各周波数で 0.018msec と各々かなり小さな値を出している。band noise では Klump⁴⁰⁾は 150~1,700Hz で 0.009msec, Campbell¹⁰⁾は 1,300Hz 以下で 0.012~0.021msec, 寺尾⁸³⁾、竹尾⁸¹⁾は 600~850Hz で 0.044msec と値のばらつきがみられる。クリックの反復刺激では Békésy⁸⁾は 0.019msec, Klump⁴⁰⁾は 0.011msec としている。上に述べた 3 つの音について域値を出している Klump⁴⁰⁾のみにしてみると、150~1,700Hz の帯域雑音が 0.009msec で最も良く、1,000Hz の切断純音とクリックの反復刺激が 0.011msec で同じ程度ということになるが、前者と後二者の域値差はわずかに 0.002msec であり、これら 3 つの音の方向感に対する最も良い周波数または帯域においては、両耳時間差弁別域値に大きな差はないといえそうである。周期性のある連続パルスでは、クリックの反復刺激に近い値となることが予想されるが、結果としては約 23 μ sec とかなり大きな値が得られる。しかし帯域雑音における域値よりは小さい値である。この最小値は熟練した被検者のものであり、そのまま正常値とすることはできない。さらにすでに述べたように年令変化が認められるために、各年代における平均値を正常値の目安とすべきである。

両耳時間差を次第に大きくしていくと音像は正中位より一側に偏し、ついに真横から聞こえるようになる。この時の時間差を計算により求めた Hornboster & Wertheimer²⁸⁾は 0.63msec という値を出している。Matzker⁴⁸⁾は切断純音を用い、0.648msec で真横に聞こえることを報告している。語音を用いた大内⁵⁷⁾や 600~850Hz の帯

域雑音を用いた竹尾⁸¹⁾も 0.6~1msec とほぼ同様の結果を出している。Nordlund⁵⁴⁾は free field において人工骨頭を用い、両耳相当部にマイクロホン装着し、スピーカーより発したクリック音の時間差を測定している。これによると両耳の時間差は音源が 85~100° の方向にある時最高となり 0.73msec であった。すなわち free field では 0.73msec より大きい時間差はありえないわけであるが、earphone m. では可能である。earphone m. によりさらに時間差を大きくしていくと、音像は同位置（真横）に止まり、Matzker⁴⁷⁾は 2msec を越えると音像が分裂することを述べている。しかし周期的パルスで濾波した複合音を用い、音像分裂の起こる時間差（分離点）を測定した設楽⁶⁷⁾によると、300~4,000Hz の範囲で周波数が高くなるにつれて分離点は小さくなっているが、4,000Hz においても 2msec より大きい（図 13）。600~850Hz では約 5msec であるが、600~700 μ sec で真横に移動した音像は、さらに時間差を増大しても同位置に止まり、約 5msec で分裂するのである。

d) 年令変化

聴覚の年令変化⁸¹⁾は、高音部純音聴力域値の低下や歪語音明瞭度の悪化⁸⁴⁾として顕著に現われている。設楽⁶⁶⁾、⁶⁹⁾、⁷⁰⁾は純音聴力の年令変化は 20 歳代を過ぎるとすでに始まって徐々に進行しているが、難聴を自覚するのは 50 歳代以降であると述べている。さらに語音明瞭度について、純音聴力がほとんど正常に近い老人においても、域値上昇の大きい若年者の難聴耳より歪語音明瞭度が悪いという現象は、内耳の高音部の障害とする考え方では説明できないことであり、聴覚伝導路、皮質聴領の障害を疑うべきであるという見解を示している。切替³⁷⁾は分節語音検査に現われた年令変化について、聴覚の情報伝達における time redundancy の減少によるものであると述べている。両耳合成能検査では Matzker⁴⁸⁾が高齢者においては若年者に比べて合成能が低下することを認めている。純音聴力検査は主に内耳の年令変化を示し、歪語音検査、両耳合成能検査は聴覚中枢路の年令変化を捉えているわけであるが、中枢路の検査法の一つである方向感検査においても、年令変化が認められている。Tonn- ing⁷⁸⁾は free field m. において、白色雑音の方向感が高齢になるほど悪いとしている。竹尾⁸¹⁾、切替³⁵⁾、³⁷⁾、⁸⁸⁾は T vs I 曲線の勾配が高齢者において急であることより、時間差による方向感が加齢とともに悪くなることを示している。著者による ITDL の年令分布をみても、ITDL の増大と年令増加の間に相関係数 0.497** の相関関係が

認められた。回帰直線は ITDL を Y 、年齢を X とすると $Y = 0.64X + 14$ という式で表わすことができる。すなわち時間差による方向感は 20 歳代より加齢とともに悪化している。幼児期より 10 歳代については検討していないが、Viehweg⁸⁶⁾ は語音をスピーカーより聴取させ、非常に若い年代では方向感が悪いと述べている。Matzker⁴⁹⁾ は高齢者について両耳クリックテストの結果、60 歳以上で誤答率が高くなり、中心であると感ずる幅が広くなるのを認めた。また一側優位性について、右手ききの人は音源が左方にあると感じ、左手ききの人は右方にあると感じる傾向も 60 歳を越えると著明になるとしている。

聴覚の年齢変化について純音聴力検査、語音明瞭度検査、両耳合成能検査、方向感検査によつて把握される現象を簡単に述べたが、これらはどのような聴覚路の変化によつて起るのであろうか。内耳の変化として、長期間の環境騒音曝露による毛細胞の変化、高血圧や動脈硬化に起因する血管条の萎縮、代謝障害による基底膜のリポイド沈着、さらに弾性低下が考えられている。岩田ら²⁴⁾ は網膜中心動脈硬化度と聴力損失の程度との間に密接な関係を認めている。野村⁵⁶⁾ は高齢者 30 人の組織学的および組織化学的検索の結果、毛細胞の消失は基底回転で最も著明であること、求心性および遠心性の神経線維は基底回転の卵円窓付近で変化が著しく、蝸牛頂へ向つて軽くなっていることを報告している。この結果は老人性難聴の高音部低下を説明するのに充分であるとともに、Deatherage¹³⁾¹⁴⁾、Whitworth⁸⁹⁾ のいう基底膜基部が高音域の時間情報伝達に重要な役割を果しているとする説をとりあげれば、方向感の年齢変化にも関係があると考えることができる。Schuknecht⁶⁴⁾ は老人性難聴と他の内耳性難聴の区別について、レクルートメント現象をあげている。彼はレクルートメント現象が毛細胞の部分的消失と、ラセン神経節細胞が正常かほとんど正常の場合に生じる現象であるという仮説に基づいて、薬物、炎症、音響外傷ではレクルートメント現象がみられるが、老人性難聴では膜迷路の変性変化 epithelial atrophy と聴覚路の神経線維脱落による neural atrophy の両者よりなることから、レクルートメント現象はみられないと説明している。ラセン神経節細胞の変化の原因としては、細胞の老化の他に内耳道底の過剰骨化が考えられている。さらに上位の伝導路核および皮質聴領については Matzker⁴⁷⁾、切替ら³⁴⁾³⁷⁾、牧島⁴⁴⁾ により、いずれの部位でも細胞数の減少、細胞の縮小、色素沈着、核の濃染などの所見が認められている。

これらの老人性変化と聴覚現象として現われた機能低下との関連について、Matzker⁴⁹⁾ は脳幹部神経節細胞の減少はシナプスの減少を続発し、高音部聴力損失を含む聴能力低下に決定的要因となつていと述べている。切替³⁸⁾ は病理学的には内耳ラセン器、ラセン神経節、聴覚伝導路の各レベルの神経核細胞、皮質細胞の萎縮、変性が認められているため方向感の低下は当然と考えられると記している。Köning⁴¹⁾ は周波数弁別能は全ての可聴周波数範囲において加齢とともに低下し、50 歳代後半における急激な低下は、上位聴覚路の神経変性の始まりと一致しているとしているが、これについて Matzker⁴⁹⁾ は時間差を認知する能力の低下と平行していると述べている。すなわち時間差を認知する能力と周波数弁別能は互に密接な関係にあり、ともに上位聴覚路の神経変性に関連して悪化するもののようである。

VI. 結 語

1. 二組の連続パルスを用いた時間差発生装置を使用し、両耳時間差弁別実験を行い装置の特徴を述べた。
2. 検査音は主に 600~850Hz の帯域フィルターを通した周期的パルスを濾波した複合音で、音呈示レベルによる interaural time DL (ITDL) の変化を測定した。低レベルでは ITDL 値は高く、レベルが高くなるにつれて低下し、40dB・SL 以上では 40μsec 以下で安定する傾向がみられた。80dB・SL 以上では実験を行わなかった。
3. ITDL の最も低い周波数帯域は 600~850Hz である。帯域を広げるとその値は上昇する。
4. 年代別の平均 ITDL は 20 歳代で最も低く、28μsec、70 歳代では 65μsec であった。年齢増加と ITDL 上昇の間には、危険率 1% の相関関係がみられた。回帰直線は ITDL を Y 、年齢を X とすると $Y = 0.64X + 14$ という式で表わすことができる。

文 献

- 1) Aitkin, L.M., Anderson, D.J. & Brugge, J.F.: Tonotopic organization and discharge characteristics of single neurons in nuclei of the lateral lemniscus of the cat. J. Neurophysiol. 33 ; 421-440, 1970.
- 2) Babkoff, H.: Binaural interaction of transients: interaural time and intensity asymmetry. J. Acoust. Soc. Amer. 53 ; 1028-1036, 1973.
- 3) Békésy, G.v.: Über das Fechnersche Gesetz und seine Bedeutung für die Theorie der akustische Beobachtungsgefehler und die Theorie des Hörens. Ann. Physik., 7 ; 329-359, 1930.

- 4) *Békésy, G.v.*: Zur Theorie des Hörens. Ueber das Richtungshören bei einer Zeitdifferenz oder Lautstärkenungleichheit der beiderseitigen Schalleinwirkungen. *Physik. Z.* 31 ; 824-835, 1930.
- 5) *Bergeijk, W.A.*: Variation on a theme of Békésy: A model of binaural interaction. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 34 ; 1431-1437, 1962.
- 6) *Bergeijk, W.A.*: Physiology and psychophysics of binaural hearing. *Intl. Audiology* 3 ; 174-185, 1964.
- 7) *Blauert, J.*: Zur Auswertung interauraler Signalunterschiede beim räumlichen Hören. *Aachen HNO* 20 ; 313-316, 1972.
- 8) *Brugge, J.F., Anderson, D.J., Hind, J.E. & Rose, J.E.*: Time structure of discharges in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey in response to complex periodic sounds. *J. Neurophysiol.* 32 ; 386-401, 1969.
- 9) *Brugge, J.F., Anderson, D.J. & Aitkin, L.M.*: Responses of neurons in the dorsal nucleus of the lateral lemniscus of cat to binaural tonal stimulation. *J. Neurophysiol.* 33 ; 441-458, 1970.
- 10) *Campbell, R.A.*: Just noticeable differences for changes of interaural time differences as a function of interaural time differences. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 31 ; 123, 1959.
- 11) *David, Jr., E.E., Guttman, N. & van Bergeijk, W.A.*: Binaural interaction of high-frequency complex stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.* 31 ; 774-782, 1959.
- 12) *Deatherage, B.H. & Hersh, I.J.*: Auditory localization of clicks. *J. Acoust. Soc. Am.* 31 ; 486-492, 1959.
- 13) *Deatherage, B.H., Eldredge, D.H. & Davis, H.*: Latency of action potentials in the cochlea of the guinea pig. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 31 ; 479-486, 1959.
- 14) *Deatherage, B.H.*: Binaural interaction of clicks of different frequency content. *J. Acoust. Soc. Amer.* 33 ; 139-145, 1961.
- 15) *Field, J.*: Handbook of physiology. 609-610, American Physiological Society, Washington D.C., 1959.
- 16) *Flanagan, J.L.*: Speech analysis, synthesis and perception. 109-114, Springer-Verlag, New York, 1965.
- 17) 藤垣照：音方向覚の研究。耳臨，62；1459-1483, 1969 (昭44)。
- 18) *Galambos, R., Schwartzkopf, J. & Rupert, A.*: Microelectrode study of superior olivary nuclei. *Amer. J. Physiol.* 197 ; 527-536, 1959.
- 19) *Goldberg, J.N. & Brown, P.B.*: Response of binaural neurons of dog superior olivary complex to dichotic tonal stimuli: Some physiological mechanisms of sound localization. *J. Neurophysiol.* 32 ; 613-636, 1969.
- 20) *Goldberg, J.M. & Greenwood, D.D.*: Response of neurons of the dorsal and posteroventral cochlear nuclei of the cat to acoustic stimuli of long duration. *J. Neurophysiol.* 29 ; 72-93, 1966.
- 21) 服部浩：音方向感テスト オージオロジー，7；145-146, 1964 (昭39)。
- 22) 服部浩：耳鼻臨床用簡易方向感テスト法。耳臨，62；89-95, 1969 (昭44)。
- 23) 石母田実：感音性難聴に対する各種聴力検査成績の検討。日耳鼻，71；968-979, 1968 (昭43)。
- 24) 岩田重信・他：老人の聴力障害と動脈硬化。臨床耳科，1；90-91, 1974 (昭49)。
- 25) *Handbook of experimental psychology.*: John Wiley Co., New York, 1951.
- 26) *Handbook of physiology.*: American Physiological Society, Washington, D.C., 1959.
- 27) *Hirsh, J.E.*: Effect of interaural time delay on amplitude of cortical responses evoked by tones. *J. Neurophysiol.*, 31 ; 916-927, 1968.
- 28) *Hornbostel, F.M. von & Wertheimer, M.*, 1920: 寺尾より。
- 29) *Jongkees, L.B.W. & Veer, R.A.V.D.*: Directional hearing capacity in hearing disorders. *Acta Otolaryng.* 48 ; 465-474, 1957.
- 30) 勝木保次：生理学大系VI感覚の生理学。医学書院，東京，1967 (昭42)。
- 31) 河村正三：聴覚の年令的变化。日耳鼻，73；998-999, 1970 (昭45)。
- 32) *Kietz, H.*: Neue Vorstellungen in der Theorie des Hörens. *Z. Laryngol.* 36 ; 241-253, 1957.
- 33) 北川信太郎：音の方向知覚に関する研究。耳喉，21；47-52, 1949 (昭24)。
- 34) *Kirikae, I., Sato, T. & Shitara, T.*: A study of hearing in advanced age. *Laryngoscope* 74 ; 205-220,

- 1964.
- 35) *Kirika, I.*: Auditory function in advanced age with reference to histological changes in the central auditory system. *Int. Audiol. (Leiden)* 8 ; 221-230, 1969.
- 36) 切替一郎・他：音像成立機転に関する基礎的研究と臨床的応用。オーディオロジー，7；1-6，1964（昭39）。
- 37) 切替一郎・他：聴力の年齢変化。オーディオロジー，12；173-177，1969（昭44）。
- 38) 切替一郎，佐藤恒正：方向感検査の臨床的応用。生体の科学，21；394-406，1970（昭45）。
- 39) *Klingon, G.H. & Bontecou, D.C.*: Localization in auditory space. *Neurology* 16 ; 879-886, 1966.
- 40) *Klumpp, R.G. & Eady, H.R.*: Some measurements of interaural time difference thresholds. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 28 ; 859-860, 1956.
- 41) *König, E.*: Pitch discrimination and age. *Acta Oto-laryngol.* 48 ; 475-489, 1957.
- 42) 久保田肇：中枢神経性難聴の鑑別診断に関する臨床的考察。日耳鼻，69；1953-1981，1966（昭41）。
- 43) *Longo, L.P.S., Forster, F.M. & Auth, T.L.*: A clinical test for sound localization and its applications. *Neurology* 7 ; 655-663, 1957.
- 44) 牧島和見：老人性難聴に関する臨床病理学的研究。耳鼻，13；補冊3，1967（昭42）。
- 45) *Masterton, B., Jane, J.A. & Diamond, I.T.*: Role of brainstem auditory structures in sound localization. I. Trapezoid body, superior olive, and lateral lemniscus. *J. Neurophysiol.* 30 ; 341-359, 1967.
- 46) *Matzker, J. u. Springborn, E.*: Richtungshören und Lebensalter. *Z. Laryngol.* 37 ; 739-745, 1958.
- 47) *Matzker, J.*: Attempt at explanation of directional hearing on the basis of very fine time-difference registration. *Acta Oto-laryngol.* 49 ; 483-494, 1958.
- 48) *Matzker, J. u. Welker, H.*: Die Prüfung des Richtungshörens zum Nachweis und zur topischen Diagnostik von Hirnerkrankungen. *Z. Laryngol.* 38 ; 277-294, 1959.
- 49) *Matzker, J.*: Binaural Click-Test im Alter: Abhängigkeit der zerebralen Hörsymmetrie von Rechts-oder Linksabhängigkeit. *Z. Laryng. Rhinol.* 48 ; 470-475, 1969.
- 50) *McFadden, D., Jeffress, L.A., & Lakey, J.R.*: Differences of interaural phase and level in detection and lateralization: 1000 and 2000Hz. *J. Acoust. Soc. Amer.* 52 ; 1197-1206, 1972.
- 51) *Mills, A.W.*: Lateralization of high-frequency tones. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 32 ; 132-134, 1960.
- 52) *Mountcastle, V.B.*: Medical physiology. The C.V. Mosby Co., Saint Louis, 1968.
- 53) *Neff, W.D., Fisher, J.F., Diamond, I.T. & Yela, M.*: Role of auditory cortex in discrimination requiring localization of sound in space. *J. Neurophysiol.* 19 ; 500-512, 1956.
- 54) *Nordlund, B.*: Physical factors in angular localization. *Acta Oto-laryng.* 54 ; 75-93, 1962.
- 55) *Nordlund, B.*: Directional audiometry. *Acta Oto-laryng.* 57 ; 1-18, 1964.
- 56) 野村恭也：老人性難聴。浴風園調査研究紀要，49；53-59，1969（昭44）。
- 57) 大内仁・他：聴覚による音方向知覚に関する研究。日耳鼻，60；241-249，1957（昭32）。
- 58) 岡崎徹：聴能から見た頭蓋内障害部位の判定に関する臨床的研究。日耳鼻，73；599-624，1970（昭45）。
- 59) *Rose, J.E., Gross, N.B., Geisler, C.D. & Hind, J.E.*: Some neural mechanisms in the inferior colliculus of the cat which may be relevant to localization of a sound source. *J. Neurophysiol.* 29 ; 288-314, 1966.
- 60) *Röser, D.*: Die zentralen Vorgänge beim Richtungshören. *Archiv Ohren- usw. Heilk. u. Z. Hals- usw. Heilk.* 177 ; 57-72, 1960.
- 61) *Röser, D.*: Die zentralen Vorgänge beim Hören differenter Schallbilder. *Archiv Ohren- usw. Heilk. u. Z. Hals- usw. Heilk.* 174 ; 568-583, 1960.
- 62) 境久雄，井上恒夫：振幅変調音による音像定位の考察。NHK技術研究，23；452-460，1971（昭46）。
- 63) *Sandel, T.T., Teas, D.C., Feddersen, W.E. & Jeffress, L.A.*: Localization of sound from single and paired sources. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 27 ; 842-852, 1955.
- 64) *Schuknecht, H.F.*: Presbycusis. *Laryngoscope* 65 ; 402-419, 1955.
- 65) 設楽哲也：方向感検査法および一側歪語音検査法による感音性難聴の細別診断。日耳鼻，補冊3号；51-69，1966（昭41）。

- 66) 設楽哲也：聴力の年令的变化。医学のあゆみ，62；415-419，1967（昭42）。
- 67) 設楽哲也・他：周期性のある連続パルスを利用した方向感検査装置とその応用。オーディオロジー，12；291-292，1969（昭44）。
- 68) 設楽哲也・他：時間差による音像弁別域値。オーディオロジー，14；363-364，1971（昭46）。
- 69) 設楽哲也：初老と耳鼻咽喉科。臨床成人病，2；435-438，1972（昭47）。
- 70) 設楽哲也：加齢と耳。臨床成人病，3；1861-1866，1973（昭48）。
- 71) Stevens, S.S. & Newman, E.B.: The localization of pure tones. Proc. Nat. Acad. Sci. 20；593-596，1934。
- 72) Stevens, S.S. & Newman, E.B.: The localization of actual sources of sound. Amer. J. Psychol. 48；297-306，1936。
- 73) Strominger, N.L.: Localization of sound in space after unilateral and bilateral ablation of auditory cortex. Exp. Neurol. 25；521-533，1969。
- 74) Strominger, N.L. & Oesterreich, R.E.: Localization of sound after section of the brachium of the inferior colliculus. J. Comp. Neurol. 138；1-18，1970。
- 75) Szikszay, I. und Gloning, K.: Zur Schalllokalisation bei verschiedenen zerebralen Läsionen. Pract. otorhinolaryng. 31；212-217，1969。
- 76) Tonning, F.M.: Directional audiometry. 5. The influence of azimuth on the preception of speech in patients with monaural hearing loss treated with hearing aids (CROS). Acta Otolaryng. 74；37-44，1972。
- 77) Tonning, F.M.: Directional audiometry. 4. The influence of azimuth on the perception of speech in aided and unaided patients with monaural hearing loss. Acta Otolaryng. 73；44-52，1972。
- 78) Tonning, F. M.: Directional audiometry. 8. The influence of hearing aid on the localization of white noise. Acta Otolaryng. 76；114-120，1973。
- 79) Toole, F.E., Sayers, B.McA.: Inferences of neural activity associated with binaural acoustic images. J. Acoust. Soc. Amer. 38；769-779，1965。
- 80) 聴覚と音声。技報堂，東京，1966（昭41）。
- 81) 竹尾康男：音の聴えの方向感に関する研究。その1，方向感における時間差と強度差の関係。日耳鼻，67；106-117，1964（昭39）。
- 82) 竹尾康男：音の聴えの方向感に関する研究。その2，基礎的事項と臨床的応用への可能性。日耳鼻，67；1272-1283，1964（昭39）。
- 83) 寺尾彬：両耳聴における音像移動弁別域値に関する研究。日耳鼻，67；982-991，1964（昭39）。
- 84) 寺尾彬・他：両耳聴における音像偏倚度に関する研究。日耳鼻，72；194-199，1969（昭44）。
- 85) 立木孝，小関芳晃：聴覚に於ける方向感に関する考察。耳喉，27；239-241，1955（昭30）。
- 86) Viehweg, R., Campbell, R.A.: Localization difficulty in monaurally impaired listeners. Ann. Otol. 69；622-634，1960。
- 87) 渡辺武：方向感覚。生体の科学，21；372-383，1970（昭45）。
- 88) 渡辺武：聴覚の複合音分析の神経機構に関する基礎的研究。NHK技術研究，23；442-451，1971（昭46）。
- 89) Whitworth, R.H. & Jeffress, L.A.: Time vs intensity in the localization of tones. J. Acoust. Soc. Amer., 33；925-929，1961。
- 90) Whitfield, I.C., Cranford, J., Ravizza, R. & Diamond, I.T.: Effects of unilateral ablation of auditory cortex in cat on complex sound localization. J. Neurophysiol. 35；718-731，1972。
- 91) Zwislocki, J. & Feldman, R.S.: Just noticeable differences in dichotic phase. J. Acoust. Soc. Amer., 28；860-864，1956。

稿を終るに臨み御校閲を賜った佐藤靖雄教授に深甚の謝意を捧げるとともに、終始御指導を頂いた設楽哲也教授、竹内義夫助教授に衷心より厚く御礼申し上げます。また御助力頂いた新美成二学士、小林範子嬢に深く感謝の意を表します。

なお本文要旨は第17回，18回および第19回日本オーディオロジー学会において発表した。

（原稿受付 昭和51.11.8日急載）