論 説

方向感検査の臨床応用

加 我 君 孝

Clinical Application of Sound Lateralization Test

Kimitaka Kaga

(Tokyo University)

Sound localization in the horizontal plane primarily depends on the interaural time difference (ITD) and interaural intensity difference (IID). When sounds with identical ITD or IID are presented to both ears, the sound image is lateralized to the side receiving the earlier or louder stimulus within the head. Currently, ITD and IID discrimination abilities are separately measured with a commercially available self recording apparatus.

In this review, the history and basic science of sound localization is discussed in detail. Moreover, for future clinical application, sound lateralization abilities of patients with peripheral hearing loss, brain stem disorders, and auditory cortex disorders are described pertaining to discrimination of ITD or IID separately using a self recording sound lateralization system.

Key words : sound lateralization, sound localization, interaural time difference, interaural intensity difference, auditory cortex

はじめに

両耳聴は、最近のバーチャルリアリティ技術のうち聴覚の仮想体験を通じてより身近になっている。歴史的には両耳聴によって再現される立体音響が身近になったのはLPレコードの開発からであろう。FM放送が始まる前、ラジオ放送ではNHK第1が右チャンネル、第2が左チャンネルに分けAMの立体放送がされたこともあった。今ではCDにより立体音響の再生も身近になった。両耳聴検査としての応用は、わが国では昭和30年代より行われているが、一般的な検査として普及しているとはいえない。かつてはその検査法が特殊で、自分で装置を作らなければならなかった。最近では市販されている製品もあり、コンピューターでソフトウェアを組んで自分で作ることさえできる。難聴者に対して補聴器の両耳装用は一般化し、人工内耳ですら両耳埋込みの効果も検討されているが、その基礎的研究は少ない。両耳聴

の効果は単耳聴で得られない特長がある。このうち、selective attentionは重要である。別名、カクテルパーティ効果といい、これはT.S. Elliotの戯曲、Cocktail Partyからきており、パーティのうるさい会話の中から自分が聴きたい会話のみ聞き取る能力のたとえで、耳が2つあって初めて可能である。

本稿では、両耳聴検査の歴史的発展、その生理学的基礎、聴覚系の中耳、内耳、脳幹、大脳の障害に分けてその病態生理、そして今後の展望の順に解説を行う。

歴 史

Gulick¹⁾による解説が詳しい。以下抄訳し紹介する。

1. 初期の100年間(18~19世紀)

Venturiが直径40mの円周上にいる正常者や片側難聴の被験者に、フルート音を聴かせて、“強度差”が真の音源定位を生むという説を18世紀末に提案した。その

後この説は19世紀後半まで多くの学者に受け入れられた。1877年 Rayleigh は、この説には問題が2つあることに気がついた。一つは音源が正中にあるときは前後の定位が混乱すること、もう一つは両耳聴の軸が前方にあると、後方には関連する位置があって両耳の音圧比が同じであることである。このことから両耳の強度差が音源定位の手がかりであり、その差が0になると間違いが生じると述べ、さらに強度差は周波数の関数で、高い周波数で最大となり、波形が頭蓋の周囲の長さの4倍になると無視できるとし、周波数の重要性を指摘した。Rayleigh の後も、技術改良によって“強度差仮説”は Preyer (ヘルメット)、Matsumoto (音のカゴ)、Thompson (pseudophone) らによっても支持された。19世紀末になると、音源定位と頭部の動きの関連には三半規管や視覚が重要であると述べる研究者もいた。Laborde の“三半規管仮説”は、頭部を動かさない場合の音源定位の説明ができないが、“聴空間”について考えさせた。音は三半規管を刺激しないからである。以上より19世紀には①両耳の強度差、②頭部運動の2つが重要であるとされた。

2. 20世紀初期(1900~1930)

Helmholz によると位相差が不協和音の理解に重要であるが、位相は協和音には重要でなく、「ヒトは phase deaf である」という見解であった。偉大な Helmholtz が「位相は知覚されない」といったために、音源定位に位相が重要であることがわかるまでに時間がかかることになった。1907年、Rayleigh が 128 Hz の音叉の音をチューブで一方の耳へ、同時にわずかに違う周波数の音を

を反対の耳にチューブで入れると、“binaural beating”が生れることがわかった。“beating tone”は右から左、前後に動いた。Rayleigh は実験を低周波に限った。強度差に比べると位相の役割ははるかに小さいと考えたからである。

1908年、More, Fry, Wilson, Myers らが低周波数では位相差が重要であることを明らかにした。すなわち、両耳強度差は高中音域、両耳位相差は低音域で重要であることがわかった。Mallock は同年、両耳時間差が音源定位の基礎であることを示した。音源からの音が最も近い耳に到着するために時間差が生じるというもので Aggazzotti も1911年と1920年、時間差が最も重要であると報告した。そのため、時間差がどの程度関係するか研究が行われたが Von Hornbostil, Wertheimer が 30 μ sec であると確定させた。位相差と時間差は同一のものである議論もされたが現在は違うことがわかっている。これ以後、①強度差、②位相差、③時間差が確立する。両耳に同一の内容の刺激が入ることを diotic, 異なるものが入ることを dichotic と呼ぶが、現実の世界では、強度、位相、時間も異なるので dichotic な状況となる。ただし、正中では diotic になることがある。

1930年に初めて Békésy が実用的な音源定位の検査法を考え、実験を行った(図1)。

生理学的基礎

脳のなかの聴覚伝導路が明らかになったのは20世紀になってからである。各中継核のなかでニューロンの分布が見かけ上も不思議な形態をとっているのが上オリーブ

図1 Békésy (1930) による、両耳間差による方向感検査のシステム。チューブシステムと呼ばれる¹⁾。(Békésy GV : 1960⁵⁾より改変)

図2 ネコの上オリブ核

HRPを下丘に注入し逆行性に染めたもの。S字状の外側核(LSO)とバナナ状の内側核(MSO)がよくわかる。

核である。これは外側核と内側核からなり、外側核はS字状の形をしている(図2)。脳のなかにこのような形態をとる核は他にはない。1953年 Stotler²⁾は、上オリブ核内側核は、両耳に届いた聴覚信号が初めて出会う部位であることを示した。図3にHRPに染まったニューロンの強拡大を示したが、きわめて樹状突起の多いことがわかる。

1959年, Galambos ら³⁾は内側核のみが両耳よりの入力を持つこと、30%は両耳からの反応のみの刺激に応じ、残りは反対側耳からの刺激のみに応じることを見出した。Van Bergeijk⁴⁾は、次のようなモデルを提唱した。「片側の蝸牛神経核より上行する神経線維は2つに分かれ、一つは反対側の内側上オリブ核へ、他は同側の内

図4 台形体核上オリブ核における両側神経支配の模型図
Stotler 氏細胞の樹状突起が、両側から同時に興奮(E)と抑制(I)を受けることを示す。(Van Bergeijk : 1962⁴⁾より改変)

図3 ネコの上オリブ核のa : 外側核(LSO)とb : 内側核(MSO)のニューロンの強拡大。ニューロンの樹状突起の形が異なる(HRP染色 ×200)。

側上オリブ核へ到達する(図4)．前者は興奮性，後者が抑制性である．交叉性と非交叉性の神経線維は内側上オリブ核へ反対側から到達する．すなわち核の腹内側と背外側へ達する．このようにしてすべてのニューロンは興奮性と抑制性の信号を受ける．究極的には両側の上オリブ核内側核から聴皮質に至る情報量の差によって方向感が生じる」

1930年，Békésy⁵⁾は実験的研究から両耳干渉作用と，時間—強度取引 (time-intensity trade) の現象を報告し，この現象は上オリブ核ですでに生じることが明らかにされたのである．臨床的にも時間差によって生じた方向感の偏りを強度差の調整によって正中に戻したり，逆に強度差によって生じた方向感の偏りを時間差の調整によって正中に戻することができる．また基礎的な研究では，下丘や聴皮質の音源定位がそれぞれ両耳干渉作用を認める報告が多いが，破壊実験で著しく両耳干渉作用が失われるのは上オリブ核である．ただし上位レベルの障害に関する臨床例の報告はもともと少ない．

上オリブ核の役割については Osen⁶⁾が1969年，重要な考えを提案した．すなわち，「外側核と内側核には anterior ventral cochlear nucleus (AVCN 前背側蝸牛神経核) から投射されるが，外側核には小型の球状ニューロン，内側核には大きな球状ニューロンが起源となる．この大小2種類のニューロンは分布が異なる．」その後の研究でもこの違いが証明され，これらは別々の情報を伝達すると考えられるようになった．このようにして，その脳幹の聴覚伝導路の最初の段階で両耳聴のシステム

は平行してできている．内側核，外側核のニューロンは上行し，下丘，内側膝状体，聴皮質でそれぞれの関連の部位がある．図5に Casseday ら⁷⁾による模式図を示した．上オリブ核内側核が両耳からの信号を処理するとすると，図で示すように両耳の時間差があると左右それぞれで AVCN の別々のニューロンが発火して収束するというものである．

方向感検査の臨床応用の基礎

両耳聴検査は，音像定位が脳内で生じることから，現在のような ABR (聴性脳幹反応) や CT, MRI などの診断方法がない時代に，脳内の病巣診断を期待して研究がされた．現在では，病巣診断よりも音源定位あるいは音像定位の検査は，認知機能検査として考えるのが良いと思われる．特に聴覚情報というものが，時間因子 (temporal resolution) であることを身近に体験させる良い検査であり，診断のみならず教育的に有用な検査である．

1960年代に竹尾⁸⁾⁹⁾，寺尾¹⁰⁾，切替¹¹⁾，設楽¹²⁾は，ITD (interaural time difference) 調整装置(図6，7)を製作し，検査音の強度差をえることなく，時間差のみを自由に変えることができるようにし，方向感における時間差と強度差の役割を調べるとともに臨床応用を行った．図6に示すように，2つのマイクロフォンの位置の距離を変えることで時間差を作っている．強度差を作るには，この装置を2台必要とする．この装置による研究の成果を以下にまとめる．

図5 両耳から届いた信号は時間差があると同じ音源でも AVCN の別のニューロンが発火し，同一のニューロンに収束するという模式図 (Casseday JH, et al: 1987⁷⁾ より改変)

図6 ITD 調整装置の図解
(切替一郎, 他: 1964¹¹⁾ より改変)

a. 基礎的事項⁸⁾⁹⁾

1. 両耳に入る音の時間差によって生ずる方向感は楽音, 語音, 騒音などの複雑音に対して敏感であるが, 純音に対してはあまり明瞭ではない。2000 Hz 以上の純音では音像を結ばない。

2. 音の強さは SL 40 dB が最もよく, SL 20 dB, SL 60 dB はこれより劣る。

3. 音の周波数は 600~850 Hz あたりが最も鋭敏である。

4. 切断音の場合には何らかの効果が生じて方向感は鋭敏となる。

5. 両耳間の時間差と強度差の関係は, centering technique と matching technique の2つの方法を組み合わせると時間差 (T) 対強度差 (I) を比較すると

a) 測定法のいかんを問わず 600~850 Hz バンドノイズにおいて最もゆるやかである。

b) 時間-強度取引検査のグラフは centering technique では曲線となり, matching technique では直線となった。

b. 臨床的事項

竹尾⁸⁾は臨床研究の目標を次のように述べている。「両耳聴は単耳聴と異なり, 両耳から上行する信号が中枢に

図7 切替らの ITD 調整装置
形状からお墓と呼ばれた。東大耳鼻科資料室保存。

において組み立てられて, 中枢固有の種々の複雑な現象をひき起こす。単耳聴に比して両耳聴では音のビッチの弁別が容易となり, また両耳語音明瞭度が上昇するなどその1例である。したがって, これらの中枢性の現象を指標にした検査法を確立すれば中枢性難聴を“感音難聴”のなかから取り出すことができるのではないかと考えられる。」これが示すように中枢病変の評価を目標とした。しかし, 当時は ABR や CT, MRI もなく, 被験者を得ること自体が困難であったであろう。

切替らの開発した ITD 調整装置による臨床応用の成果は, 次のようである¹¹⁾¹²⁾。

1. 伝音難聴者では正常者に比して音像成立機転に変わりなく, 患耳を補聴することによって正常者と同様の音像を感知し得る。例外的に音像を結ばない例は, 片側に中耳炎後遺症があり, 音が正円窓より逆位相に入ったため音像が結ばなかったためであり留意が必要である。

2. 感音難聴では, 時間差が両側低音難聴, 頭部外傷, 高音難聴では異常であるが, 平坦型家族性難聴や進行性感音難聴では正常範囲であった。

3. 橋部のグリオーマの1例では正常。

4. 聴覚失認では異常.
5. 脳血管障害で片麻痺の症例の半数で異常.
6. 頭部外傷例では30%で異常.
7. 加齢が進むと時間差の弁別閾値が上昇する¹³⁾.

新しい音像定位検査の方法と臨床応用

音源定位検査には無響室と多数のスピーカーを必要とするが、音像定位検査は故意に両耳間の時間差と強度差を変化させることができ、臨床検査として便利である。音像定位検査としての方向感自動記録装置が佐藤恒正博士ら¹⁴⁾により開発され、市販されている(リオン株式会社 TD-01)(図8)。これは正中よりの音像の移動を自記オーディオメトリーの原理と組み合わせ自動化したものである。

防音室においてヘッドホンを使用し、刺激音として500 Hz のバンドノイズを与え、さらに一側の出力を1 dB ごとに微調整し、被験者が音像を頭蓋正中に感じるようにする。両耳時間差の検査については2 μsec ステップで連続的に変化する。この装置はスタートボタンを押すと時間差0の状態から右の音が徐々に早くなり、被験者が右に音像が移動したと自覚した瞬間に右のボタンを押すと、瞬時に音の移動方向が逆転し音像を正中に戻す方向に動くようにできている。さらに正中を越え、左に音像が移動したと自覚した時点で左のボタンを押すと、また逆に音像が右へ移動するようにできている。このようにして検査を続けると、両耳間の時間差音像定位が可動であれば自記オーディオグラムのような鋸歯状波が得られる(図9)。本装置は最大2 msec までの時間差を作る

図8 佐藤恒正博士とリオン社によって開発された方向感自動記録装置(TD-01)

図9 方向感検査

図10 新しい方向感検査による時間-強さ取引検査

時間差による音像偏倚をレベル差で正中に戻し、各時間差でのポイントを線で結び傾斜で評価する。

ことができる。この鋸歯状波が安定して記録された部分の連続した10個の振幅を測定し、その平均値を弁別閾値としている。一方、両耳強度差音像定位検査では1.25 dB/秒の速度で右側刺激音圧を変化させて、同様に記録し評価する。以下、両耳時間差音像移動弁別閾値(interaural time difference discrimination)をITD、両耳強度差音像移動弁別閾値(interaural intensity difference discrimination)をIIDと略することにする。

時間-強さ取引検査も簡単に記録することができる(図10)。以下に本方法を用いた研究結果を解説する。

発達と加齢

a. 発達

乳幼児の聴力検査で音源定位が指標として使われている。乳児ですでに、音源探索行動があり、脳の発達とともに条件付による音源定位反応が成立する。ヒトの脳の

発生では生下時にはすでに髄鞘化が蝸牛神経では終了しているが、脳幹の中継核は1歳過ぎまで髄鞘化がかかり聴皮質聴放線は2歳過ぎまでかかる。

方向感検査は認知と判断の能力を必要とするため、正確な検査は純音聴力検査と同様に4歳以降でないとはならない。Kaga¹⁵⁾は、TD-01を用いて調べ時間差の発達には左右差はなく、成長とともに閾値は低下するが5歳では20歳代の2倍の閾値になっている(図11)。しかし、音圧差はバラツキが多いが、平均値でみる限り閾値は成長と無関係であることを明らかにした。このことは、

図11 小児の発達とITDの変化 (Kaga M : 1992¹⁵⁾より改変)

純音聴力検査の閾値検査で成人と同様の正常閾値を示すことと同様であろう。ピッチの弁別のように時間因子が中心の音の情報処理は単耳聴でも両耳聴でも発達とともに弁別閾値が低下することを示唆している。逆に方向感検査は、脳神経疾患の音情報に関する発達検査としても可能性のあることを示唆している。

b. 加 齢

Kirikae ら¹³⁾は1964年、加齢による影響を著しく受けるものの一つが方向感の時間差であると報告し、60歳を過ぎると次第に閾値が高くなるがこの理由として、脳幹から聴皮質にかけての加齢による神経系の変化を挙げ、神経線維の数の減少を疑っている。

TD-01を用いた高齢者の研究では、久松ら¹⁶⁾も、500 Hz バンドノイズでは65歳以上の群では、若齢者よりも閾値が高く、加齢による後迷路障害の影響であるという。しかし、著者ら¹⁷⁾は現在の聴覚機能検査を組み合わせ、高齢者を老年医学会の分類、すなわち老齡前期(65~74歳)、老齡後期(75~84歳)、超高齡期(85歳以上)に分けて、純音聴力検査、語音聴力検査、DPOAE、ABR、トークンテストで内耳から聴皮質の機能検査に加え、方向感検査を行ってきた。その結果、加齢による難聴は生理的な加齢では後迷路性の障害よりも、内耳性の難聴の影響が中心であるという見解をもつに至った。図12に筆者ら¹⁷⁾の高齢者の方向感検査の予報的な結果を示す。これをみてもわかる通り、高齢になっても正常範囲の結果を示すものが少なくない。単に平均値をとれば閾値は高くなるが、それをまとめて高齢による後迷路障害という

《60歳代》

《70歳代》

《80歳代》

図12 高齢者の方向感検査の成績、時間差、強度差とも正常な例が少なくない。

■は症例1例を示してある。○は平均値を示す。(加我君孝, 他: 1999¹⁷⁾より転載)

ことはできない。100歳の老人の脳の研究で、水谷¹⁸⁾は最後まで神経病理学的に、視覚系や聴覚系のような特殊感覚系であるという。著者は、真に脳幹の聴覚伝導路や大脳の聴皮質や聴放線の障害例について研究を行ったが、高齢による難聴とは全く異なる病態像であった。高齢になるにつれ、検査を理解させるのに時間がかかり、方向感検査のように認知や集中力と敏しょうな運動能力を要する検査では、むしろ聴覚以外のファクターが結果に反映していることもあり得るので注意が必要である。高齢による難聴の中心は後迷路障害というのは正しいとはいえない。

聴力障害

両耳聴は実際の臨床の場では、先天性難聴の幼小児、および後天性難聴の成人に対しての両耳補聴器装用が、現実的な課題となっている。前者も後者も、音源定位、音の移動知覚、語音知覚の明瞭度の向上、カクテルパーティ効果を可能にすることが期待されている。ただし先天性の場合は、片耳装用だけで対側耳を使わないでいると、成長が進んでから使わない側に補聴器装用を行っても効果が乏しい。すなわち脳の可塑性に臨界期があるため初めから両耳装用が望ましい。このような臨床的な課題の理解のために、末梢性難聴では方向感ほどのような影響を受けるか検討する。

武田¹⁹⁾は伝音難聴、感音難聴および補聴器装用者に対して TD-01 を用いて調べ報告しているので以下に紹介をする。

I. 伝音難聴・混合難聴

a. 片側性伝音難聴、混合難聴例(患側 500 Hz の気導聴力の平均 49.2 dB, 骨導聴力の平均 22.2 dB)。閾値の軽度上昇例が時間差で39%, 強度差で11%, 骨導聴力レベルが 25 dB 以上の混合難聴では閾値が上昇する。

b. 両側性伝音難聴および混合難聴例(気導聴力の平均右 59.1 dB, 左 59.4 dB, 骨導聴力の平均は右 21.6 dB, 左 20.9 dB)。時間差の閾値の軽度上昇例が31%, 強度差では6%であった。

このように伝音難聴が主の症例でも時間差の陽性率が30%以上というのは不思議な感じがするが Hausler ら²⁰⁾, Zurek²¹⁾ はレシーバーからの骨導音の関与を指摘し、その機序について「レシーバーからの刺激音が頭蓋骨を介して内耳へ伝わった場合、両側の内耳は独立した状態ではなくなり、本来の外耳、中耳伝音系を介した気導音と

骨導音は内耳において干渉し音像定位機能を低下させる」と解説している。

II. 感音難聴

a) 片側性感音難聴(500 Hz の平均聴力レベルが 28 dB)。時間差で弁別閾値の上昇を認めたのは18%で、そのうち軽度のものとスケールアウトが半々であった。強度差の閾値上昇を示したのは14%で、いずれも軽度の閾値の上昇を示したにすぎない。

b) 両側性感音難聴(500 Hz の平均聴力レベルは右 43 dB, 左 50.4 dB)。時間差の弁別閾値の上昇を示したものが27%で、そのうち 1/3 はスケールアウトであり、他は軽～重度の閾値上昇を示した。強度差は16%で、軽～中等度の閾値の上昇を示した。

感音難聴の両耳機能検査では時間差が異常をきたす率の高いことが報告されている²²⁾²³⁾。

メニエール病では強度差の異常率が高く、これは蝸牛の補充現象のためであるという。感音難聴の異常例は、他に、神経性難聴の合併例や、検査の理解が難しい例などが考えられ、後迷路障害の関与も否定はできないが、簡単に中枢障害説に帰結することには慎重であるべきであろう。

III. 補聴器装用下の音像定位

補聴器装用下の検査のために、耳掛型補聴器をすっぽり覆うようなレシーバーを新たに開発して検査を行った(図13)。

先天性高度感音難聴で10歳の症例のオーディオグラムを図14に示す。平均聴力は右 84 dB, 左 88 dB であるが、時間差も強度差の閾値も正常範囲内であった。

図13 耳掛型補聴器装用下の方向感検査のために作製した、レシーバー(左)。右は通常検査のためのレシーバー。

a) 先天性両側高度感音難聴児

対象はろう学校の生徒15例, 平均年齢14歳, 平均聴力は4分法で右103.1 dB, 左100.7 dB, 500 Hzについては右が80 dB, 左が90.7 dBであった. 全例が耳掛型補聴器を両耳に装用していた. 時間差, 強度差の両方とも音像移動の弁別も不可が47%, 強度差が不可で音圧差が可能であったものが33%, 共に可能であったのは20%であった. このように時間差の結果が悪い例の多いことは, ダイナミックレンジが狭いこと, 周波数分析能, 時間分解能の高度障害によって, 補聴器による増幅にかかわらず, スケールアウトになったのであろう. だからといって補聴器の両耳装用が意味がないというわけではない. 両耳装用の方が聴覚情報を抽出する能力が向上するからである.

b. 先天性両側外耳道閉鎖症例

先天性両側外耳道閉鎖症例に対し, 現在のところ1個の骨導補聴器がフィッティングされている. 1台の骨導補聴器で両側の内耳が刺激されるからである. 骨導補聴器2台を使用することについては理論的に両耳聴が成立しないので意味がないという考えもある. しかし, 骨導端子を頭蓋骨のさまざまな位置におくと, その位置が同

定できる. しかしこれは振動の位置覚ではない. 著者らは両側の骨導端子を乳突部に置いて, 方向感検査を行ったところ, 時間差も強度差も成立することがわかった²⁴⁾(図15). 両耳骨導 ABR でも両耳の干渉成分が出現することから, 骨導においても両耳聴は存在するものと考えられる²⁵⁾.

c. 後天性両側感音難聴

対象は22例, 4分法による平均聴力は右が57.4 dB, 左が53.8 dB, 500 Hzの聴力は右が56.8 dB, 左が50.9 dB¹⁹⁾であった.

両耳装用者においては補聴器の非装用時, 時間差では32.3%, 強度差では20%で閾値の上昇を認めた. ところが補聴器を両耳に装用させて方向感検査を行うと時間差では80%, 強度差では7%で閾値の上昇を認めた. この原因として補聴器により増強された刺激音の周波数特性の影響や時間因子の左右差やリクルートメント現象の影響などが考えられる. しかし強度差がよく保たれることは, 低周波領域の補聴に良い効果があると思われる. Gelfand²⁶⁾は成人で片耳に補聴器を2年以内使用し, その後の2年以内に両耳補聴にすると両耳効果があるが, 5~6年片耳補聴器装用した人がその後5~6年両耳装

図14 高度感音難聴小児(10歳)症例のオーディオグラム(左)と補聴下のITDとIID両検査(右)とも軽度域値が上昇している。

図15 先天性外耳道閉鎖症例

両側とも外耳道が形成されている(岡村ら²⁵⁾より転載)。

用にしても効果がないという。切替²⁷⁾は両耳用補聴器は単耳用に比べきわめて方向感は良好であるが頭部の陰影効果が関与すると強調している。

聴神経障害

蝸牛神経の役割は音情報の伝送である。片側性聴神経腫瘍では時間差の陽性率は佐藤²⁸⁾によると93%，山田²⁹⁾は100%，武田³⁰⁾は85%，強度差の陽性率は山田²⁹⁾によると85%，武田³⁰⁾は40%と報告している(図16)。陰性例は腫瘍径の小さいものが多い。両側の蝸牛神経障害には聴神経腫瘍および auditory nerve disease³¹⁾, auditory neuropathy³²⁾, 本態性後迷路障害(この2つの名は報告者は違うが同一の病態と考えられる)は、時間差も強度差ともに陽性である。

佐藤²⁸⁾は「聴神経腫瘍例では少なくとも ABR の I 波のみは残存する事実より聴神経幹における伝達障害に

より、II 波以降の同期的発火が不可能となるものであろう。また、方向感成立の際には患側神経幹における情報伝送時にインパルス群の遅延、消失による同期性の変化、消失が起こり、対側耳の対応インパルス群との間の時間因子の正確な保持が不可能となり、上オリーブ核群における正常の整合ができなくなるためと思われる」と述べている。両側の蝸牛神経障害では同じ理由で時間因子ばかりか強度因子まで正確な保持が不可能になるのであろう。では蝸牛神経がどの程度障害されると正確な保持が困難になるのであろうか。Schuknecht³³⁾は聴神経幹の線維自体の持つ冗長性のために20%程度が残存していれば、オーディオグラムの低下はみられないという。方向感検査ではオーディオグラムが正常でも方向感検査の時間差が悪化する例の多いことから、少なくとも20%以上の蝸牛神経の残存が必要と思われる。すなわち、佐藤²⁸⁾のいうように「腫瘍により正常の機能を保有する線維数

図16 聴神経腫瘍とABRと方向感(A:方向感正常, B:方向感異常)

症例1は右AT, 症例6は両側AT. 前者は良好であるが後者は時間差は域値上昇, 強度差は良好(山田勝士, 他:1991²⁹⁾より改変).

の減少により, 純音閾値に関する情報は伝達できるが, 閾値上の時間因子の伝送障害が早期に発生するものであろう」と考えられる.

脳幹障害

脳幹障害の正確な部位診断はABR, MRIの臨床応用によって初めて可能となった. それ以前は眼球運動系の検査が主な診断の手がかりであったが, ABRは脳幹の

聴覚伝導路そのものに由来していることから, 正確な脳幹聴覚伝導路障害部位の聴覚心理研究が可能となった. 山田ら²⁹⁾は図17に示すようなABR異常波形を示す症例では, 時間差の陽性率は100%, しかも強度差も軽～中等度の異常を示すという. 以上の例は脳幹梗塞と脳幹腫瘍例であるが, 多発性硬化症を対象とした研究があり, Van Der Poelら³⁴⁾は, 少なくとも片側のABRのⅢ波に障害があれば時間差音像定位弁別閾値が著明に上昇す

ると報告している。Levine ら³⁵⁾³⁶⁾は、20~1000 Hz の low-pass filtered noise burst と 4~20 kHz の high-pass filtered noise burst の 2 種類の音刺激を用い、時間差と強度差について調べ ABR と比較している。時間差の陽性率が強度差より著しく陽性率が高く (70% : 11%), low-pass noise の方が high-pass noise より顕著である。Ⅲ波が低振幅であると両方の音刺激とも時間差の異常を認めるがⅢ波の潜時の延長だけでは high-pass noise のみが異常、片側の V 波の振幅が異常であると high-pass noise のみが異常で、両側の V 波の振幅が異常であると、low-pass も high-pass も異常を示したと報告している³⁷⁾。

ABR のⅢ波は上オリーブ核に由来することが証明されており、上オリーブ核を中心に核性、核下性、核上性の 3 つに分類をするのはどうであろうか。Ⅲ波が低下あるいは消失し I, II 波のみの場合が核性、I 波のみの場合が核下性、I, II, Ⅲ波のみあるいはⅣ, V 波が低振幅であれば核上性の脳幹聴覚伝導路の障害といてよいと考え

られる。図17にそれぞれのタイプの ABR が示されているが、どのタイプでも時間差も強度差も異常である。Masterton ら³⁸⁾は聴覚伝導路内で上オリーブ核の末梢側の台形体核と中枢側の毛側毛帯核をそれぞれ部分破壊したネコの方向感を比較した。台形体核の破壊では時間差は異常となるが外側毛帯核の破壊では影響がないという。ヒトの I, II, Ⅲ波のみ、すなわち核上性に相当する。

Levine ら³⁵⁾³⁶⁾が指摘するように方向感検査の ABR との比較研究はこれまでの動物実験を参考にすると、ヒトの聴覚伝導路の情報処理の理解に進歩をもたらす、今後の研究の基礎となるであろう。

聴皮質障害

聴皮質の機能は周波数の tonotopicity, すなわち周波数, ON-OFF, 音のパターン, さらに音圧の変化の弁別などで、このような機能により言葉、音楽、環境音が区

図17 脳幹障害と ABR と方向感

症例11は左脳幹梗塞、症例14は小脳・脳幹腫瘍術後。時間差は両者とも悪い。(山田勝士, 他: 1991²⁹⁾より改変)

別され認知される。分析機能はより鋭敏になるが、学習や記憶までが含まれるかは明らかではない。聴皮質や聴放線の障害は、中脳動脈やその分枝の破綻による出血や閉塞によって生じる。頻度の多いのは被殻出血で、出血が吸収されて初めて、障害が被殻の近傍を走る聴放線にも及んでいることがわかる。しかし機能的には、片側性の障害である限り自覚は乏しく、あえて聞いてみると障害と反対側の聴き取りが悪く膜が張ったようであると答える。純音聴力検査では異常はなく、語音聴力検査では、障害と反対側の最高明瞭度が低下し、左右差があるのでわかる。失語はない。両側の聴皮質あるいは聴放線が障害されると、皮質聾あるいは聴覚失認といい、言葉、音楽、環境音のほとんどすべての認知が困難となる。ただし、音としては聴こえ、その強弱もわかる点が内耳性の聾と異なる点である。では音の強弱はどこで認知されるか。細かな強弱は聴皮質で認知されると思われるが、大まかな強弱は現在、脳のどの部位で認知されるか不明である。

1. 片側聴皮質障害

著者らは12例の左聴皮質障害例について調べ³⁹⁾、代表的な3症例の方向感検査のデータそのものを図18-a,

b, c に示した。症例1(a)は左右方向に対照的であるが症例8(b)は時間とともに右へ偏倚している。症例2(c)は左へ偏倚しているが、強度差の方は偏倚がない。12例とも左の損傷例であるが、平均値が418 μ ses でコントロールに比べ、著しく高く有意である。このことは片側の障害例では、時間分解能が軽～中等度低下していることを示唆している。

両耳強度差音像定位検査は11例に行うことができたが、平均値が9.46 dB で、コントロールの平均値が5.5 dB で、約2倍で、きわめて有意($t=4.78$, $p<0.01$)である。音の強度差についても聴皮質が関与していることを示唆している。

音源定位法を用いた過去の研究報告によると、片側の側頭葉損傷では、損傷と反対側の空間での音源定位が低下するというもの⁴⁰⁾⁴¹⁾と、同側あるいは反対側への偏りはないとするもの⁴²⁾⁴³⁾がある。一方、クリックを用いた音源移動法では Walsh⁴⁴⁾によると片側大脳半球損傷例では時間差を区別できるが閾値は上昇するとし、片側の聴皮質を除去しても両耳時間差の区別する力は失われなしとし、われわれの研究結果³⁹⁾と同様である。すなわち左右の聴皮質とも time cue を分析できることが

図18 a. 左聴皮質障害(症例1), b. 左聴皮質障害(症例8), c. 左聴放線障害(症例2), d. 両側聴皮質障害(症例15) (Yamada K, et al: 1996³⁹⁾ より改変)

わかる。ともかく片側の聴皮質が必要である。強度差の閾値については、Bisiach ら⁴⁵⁾は、純音の両耳強度差音像定位検査を片側大脳半球損傷に対して行い、左右のいずれの半球障害でも低下すると報告している。著者らの結果も同様である。

2. 両側聴皮質障害

両側の損傷例では音は聴こえるがその弁別はできない状態になる。代表的な1例の方向感検査のデータそのものを図18-dに示した。強度差の閾値は高く、記録可能で、一方時間差の閾値は弁別できなかった。他の2例も時間差の弁別は全くできなかった。1例では閾値が上昇していた。

Jerger らは両側の側頭葉損傷の2例⁴⁶⁾⁴⁷⁾に対して自由音場の音源定位検査を行い、1例は音源定位能力が低下していたが、もう1例はそうではなかったため音源定位能力は側頭葉損傷と必ずしも関係ないと結論づけた。しかし、両側例では音源定位能力が低下するという報告が多い。このように矛盾した報告が多いのは、病巣の大きさ、位置、病因、重症度、年齢検査方法などが異なるためであろう。

時間差は全く認知できない。しかし強度差の閾値が高くなっているが強度差が両側聴皮質損傷でも可能であることは、恐らく内側膝状体(MGB)から、聴皮質以外の知覚中枢へ投射す伝導路が強度差成立にも関与していると考えられる。MGBは時間差と強度差の信号処理がなされる核であり、聴放線はMGBのニューロンであるからである。

その他の方向感と関連のある問題

a. 片側難聴者の方向感

レシーバー法の方向感検査の弱点に片側難聴者では検査ができないことが挙げられる。両耳聴の特徴に音源定位、音の移動感、カクテルパーティ効果が挙げられるが、実は片側難聴者でも音源定位は可能である。それはなぜであろうか。

及川⁴⁸⁾は移動スピーカ法を用いて片側の難聴と片側の聾症例を調べ、両群とも方向定位能力が劣り患側方向が悪いが、先天性の片側聾では後天性よりも良好であるという。同様に片側聾では悪いとする報告が多い^{49)~51)}。この研究では頭を固定している。恐らく、もし頭部を固定しなければ、頭部を動かして音源を探索し、音源を同定できるものと思われる。これを明らかにする

には、頭部の位置の動きを感受するセンサーを用いて記録し、音源の位置との差を同時に調べる装置を用いれば可能となるであろう。

b. 視覚障害者の方向感

先天盲を初めとする視覚障害者では、純音聴力検査や語音聴力検査で、晴眼者より良いということはないが音源定位能力は優れているという報告がある⁵²⁾。TD-01を用いて矢部ら⁵³⁾は先天性重度視覚障害、後天性重度視覚障害、弱視の3群に分けて調べたところ、先天性、後天性にかかわらず、重度視覚障害群は対象群に比較し有意に弁別閾値が低かったが弱視群とは差がなかったという。

Röder ら⁵⁴⁾は、盲人や視覚を奪った動物では聴覚による弁別能力が高くなるというこれまでの研究について補償的知覚強化現象の性質や一般性がないことを批判し、正面および側方からの音に対する空間的弁別能について調べ、全盲者では側方からの音に対してのみ高い音源定位能力を見出し、全盲者での皮質処理領域の変化は、側方からの音に対して定位能力をあげるような再編成であることを示唆した。

c. バイノーラルステレオ

スピーカでの再生は空間で音が混じりあって左右の耳に届くが、ヘッドフォンでは直接届く。左右の耳のすぐそばに音源があるように感じるヘッドフォンの特異な聴こえ方(binaural effect)を自然なものにしようとするのがバイノーラル研究である⁵⁵⁾。録音は人間の頭部模型の耳にあたる場所に2本のマイクをセットして録音する。この方式で録音しヘッドフォンで聴くと音が頭の外に広がって立体感のある音の再生ができる。時間差、強度差、位相差が管理されるからである。頭部模型およびバイノーラルステレオのCDやLPは市販されている。まさに仮想音響空間を体験できる。バイノーラルの正式な記録の最初は1900年のパリ博覧会であるという。現在は、バーチャルリアリティブームに乗って、各種のステレオ再生方式が市販のオーディオ、テレビなどに組み込まれているが、バイノーラルステレオほどリアルなものはない⁵⁶⁾。

d. 哺乳類の方向感

動物の方向感検査は難しい。スピーカ法による音源定位の条件付けを行って研究することになる。Heffner ら⁵⁷⁾は、多くの種類の哺乳動物を対象に調べ、それぞれの音源定位の閾値を角度で示し、そのマップを作成し

図19 哺乳類の音源定位の閾値

100 msec あるいは 400 msec のノイズバーストによる反応 (Heffner RS, et al : 1994⁵⁶) より改変).

た. イルカ, ゾウ, ヒトは1°程度の閾値であるが実験によく使われる白ネズミは10°と鈍感であることが示されている. ネコでも5°と割合閾値の高いことがわかる(図19).

おわりに

方向感検査のうち両耳時間差は鋭敏なパラメーターであり, 聴覚神経系の蝸牛神経より聴皮質に至る中枢伝導のどの部位の障害でも弁別閾値が増大する. このことは, 聴覚においては“時間”の因子が重大なことを示している. ただし末梢障害でも, 特に蝸牛の障害でも時間差の悪い例がある. これは補聴器によって聴力の損失分を補っても改善しないのは, 蝸牛障害によっても障害が重いと時間分解能が障害され得ること, さらに難聴という状態がある一定期間以上おかれると感覚遮断状態におかれたために脳の可塑性が低下したことなどが原因である可能性も否定できない. 逆にこの事実, 方向感の脳の可塑性の評価の一つに利用でき得る可能性を示唆している.

一方, 両耳強度差は臨床の評価に用いられることが少ないが, 時間差の閾値が高いときに被験者が本検査法に習熟していないか疑われることもあり実施しておきたい. 中枢障害で時間差が悪いときに, 強度差が良い例が少なくないことは, 認知の機序が異なることを示唆している. 両側聴皮質障害でも強度差の域値は高くなるが成立する例があり, 音圧というものの感覚中枢は聴皮質以外の部位にもあるのかもしれない.

耳が2つある意味は大きい. われわれのように“耳”のすべてを扱っている耳科医は, 耳に障害のある人々に

ぜひとも再び両耳が使えるようにすることを目標に考えるべきではないかと思う. その際, 方向感検査は良い尺度であり, 利用をすすめたい.

参考文献

- 1) Gulick WL : Hearing, physiology and psychophysics. pp 181~185, Oxford University Press, New York, 1971.
- 2) Stotler WA : An experimental study of the cell and connection of the superior olivary complex of the cat. J Comp Neurology 98 : 401~420, 1953.
- 3) Galambos R, Schwartzkopf J and Rupert A : Microelectrode study of superior olivary nuclei. Am J Physiol 197 : 527~536, 1959.
- 4) Van Bregtseijk WA : Variation on a theme of Békésy ; a model of binaural interaction. J Acoust Soc Am 34 : 1431~1437, 1962.
- 5) Békésy GV : Experiments in hearing. Mc Graw-Hill, New York, 1960.
- 6) Osen KK : The intrinsic organization of the cochlear nuclei in the cat. Acta Otolaryngol 67 : 352~359, 1969.
- 7) Casseday JH and Covey E : Central auditory pathways in directional hearing. In Directional Hearing (ed by Yost WA and Gourevitch G). pp 109~143, Springer-Verlag, NY Berlin, Tokyo, 1987.
- 8) 竹尾康男 : 音の聴こえの方向感に関する研究(その1). 日耳鼻 67 : 106~117, 1964.
- 9) 竹尾康男 : 音の聴こえの方向感に関する研究(その2). 日耳鼻 67 : 1272~1283, 1964.
- 10) 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.
- 11) 切替一郎, 設楽哲也, 竹尾康男, 他 : 音像成立機転に関する基礎的研究と臨床的応用. Audiology Japan 7 : 1~5,

- 1964.
- 12) 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 69 : 51~69, 1966.
 - 13) Kirikae I, Sato T and Shitara T : A study of hearing in advanced age. Laryngoscope 74 : 205~220, 1964.
 - 14) 佐藤恒正, 鈴木秀明, 八幡則子, 他 : 新しい方向感検査装置及びその応用. Audiology Japan 26 : 659~666, 1983.
 - 15) Kaga M : Development of sound localization. Acta Paediatr Jpn 34 : 134~138, 1992.
 - 16) 久松雄志, 谷野 徹, 佐々木智, 他 : 加齢と方向感. Audiology Japan 40 : 335~336, 1997.
 - 17) 加我君孝, 中村雅子 : 聴覚障害. 新老年学第2版(編集代表折茂 肇). 484~502頁, 東京大学出版会, 1999.
 - 18) 水谷俊雄 : 脳の加齢 — バランスとアンバランス—. 神経精神薬理. 18 : 169~177頁, 1996.
 - 19) 武田英彦 : 片側あるいは両側の難聴者における両耳聴の研究 — 伝音性, 感音性, 神経性難聴と音像定位—. 東京大学医学系研究科. 学位論文, 1999.
 - 20) Hausler R, Colburn HS and Marr E : Sound localization in subjects with impaired hearing. Acta Otolaryngol Suppl 400, 1~62, 1983.
 - 21) Zurek PM : Consequences of conductive auditory impairment for binaural hearing. J Acoust Soc Am 80 : 466~472, 1986.
 - 22) Gabriel KJ, Koehnke J and Colburn HS : Frequency dependence of binaural performance in listeners with impaired binaural hearing. J Acoust Soc Am 91 : 336~347, 1992.
 - 23) Koehnke J, Culotta CP, Hawley ML, et al : Effects of reference interaural time and intensity differences on binaural performance in listeners with normal and impaired hearing. Ear Hear 16 : 331~353, 1995.
 - 24) 岡村るみ, 中村雅一, 加我君孝 : 外耳道形成術後の補聴器装用下の音像定位. 耳鼻臨床 90 : 277~283, 1997.
 - 25) 瀬藤光利, 加我君孝 : 両側性小耳症外耳道閉鎖症例の両側骨導補聴器による音源定位. Audiology Japan 38 : 669~670, 1995.
 - 26) Gelfand SA : Long-term recovery and no recovery from the auditory deprivation effect with binaural amplification ; six cases. J Am Acad Audiol 6 : 141~149, 1995.
 - 27) 切替一郎, 佐藤恒正, 大島弘至, 他 : 補聴器装着時の方向感について. 日耳鼻 67 : 29~31, 1964.
 - 28) 佐藤恒正, 飯塚尚久, 下田雄大, 他 : 方向感検査による小脳橋角部腫瘍の早期診断. 耳鼻臨床 87 : 9~22, 1994.
 - 29) 山田勝士, 加我君孝 : 聴神経, 脳幹障害患者の両耳間時間差音像定位と ABR 波形異常の検討. Audiology Japan 34 : 238~243, 1991.
 - 30) 武田英彦, 熊川孝三, 加我君孝 : 聴神経腫瘍における時間差および強度差による音像定位検査 — ABR 波形異常との比較を中心に—. 日耳鼻 99 : 18~27, 1996.
 - 31) Kaga K, Nakamura M, Shinogami M, et al : Auditory nerve disease of both ears revealed by auditory brainstem responses, electrocochleography and otoacoustic emissions. Scand Audiol 25 : 233~238, 1996.
 - 32) Starr A, Picton TW, Sininger Y, et al : Auditory neuropathy. Brain 119 : 741~753, 1996.
 - 33) Schuknecht HF and Woellner RC : Hearing losses following partial section of the cochlear nerve. Laryngoscope 63 : 441~465, 1953.
 - 34) Van Der Poel JC, Jones SJ and Miller DH : Sound lateralization, brain stem auditory evoked potentials and magnetic resonance imaging in multiple sclerosis. Brain 111 : 1453~1474, 1988.
 - 35) Levine RA, Gardner JC and Kiang NYS : Binaural auditory processing in multiple sclerosis subjects. Hear Res 68 : 59~72, 1993.
 - 36) Levine RA, Gardner JS and Kiang NYS : Effects of multiple sclerosis brain stem lesions on sound lateralization and brainstem auditory evoked potentials. Hear Res 68 : 73~88, 1993.
 - 37) Russolo M and Doli P : Lateralization, impedance, auditory brain stem response and synthetic sentence audiometry in brain stem disorders. Audiology 22 : 50~62, 1983.
 - 38) Masterton B, Jane JA and Diamond IT : Role of brain stem auditory structures in sound lateralization ; trapezoid body, superior olive, and lateral lemniscus. J Neurophysiol 30 : 341~359, 1967.
 - 39) Yamada K, Kaga K, Uno A, et al : Sound lateralization in patients with lesions including the auditory cortex ; comparison of interaural time difference (ITD) discrimination and interaural intensity difference (IID) discrimination. Hear Res 101 : 173~180, 1996.
 - 40) Sanchez-Longo LP and Foster FM : Clinical significance of impairment of sound localization. Neurology 8 : 119~125, 1958.
 - 41) Klingon GH and Bontecou DC : Localization in auditory space. Neurology 16 : 879~886, 1966.
 - 42) Shankweiler DP : Performance of brain-damaged patients on two tests of sound localization. J Comp Physiol Psychol 54 : 375~381, 1961.
 - 43) Gazzaniga MS, Glass AV, Sarno MT, et al : Pure word deafness and hemispheric dynamics ; a case history. Cortex 9 : 136~143, 1973.
 - 44) Walsh, E.G. (1957) An investigation of sound localization in patients with neurological abnormalities. Brain 80 : 222~250.

- 45) Bisiach E, Cornacchia L, Sterzi R, et al : Disorders of perceived auditory lateralization after lesions of the right hemisphere. *Brain* **107** : 37~52, 1984.
- 46) Jerger J, Weikers NJ, Sharbrough III FW, et al : Bilateral lesions of the temporal lobe ; a case study. *Acta Otolaryngol Suppl (Stockh)* **258** : 1~51, 1969.
- 47) Jerger J, Lovering L and Wertz M : Auditory disorder following bilateral temporal lobe insult ; report of a case. *J Speech Hear Disord* **37** : 523~535, 1972.
- 48) 及川 尚 : 音方向感の研究 —特に一側難聴, 一側聾について—. *日耳鼻* **93** : 361~372, 1990.
- 49) Jongkees LBW and Veer RA : Directional hearing capacity in hearing disorders. *Acta Otolaryngol* **48** : 465~474, 1957.
- 50) 服部 浩 : 一側聾の方向感. *臨床耳鼻* **11** : 314~315, 1984.
- 51) 大内 仁, 武山貢次, 立木 孝, 他 : 聴覚による音方向知覚に関する研究. *日耳鼻* **60** : 241~249, 1956.
- 52) Lessand N, Paré M, Lepore F, et al : Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature* **395** : 278~280, 1998.
- 53) 矢部多加夫, 小泉達郎 : 視覚障害者の方向感について. *Audiology Japan* **41** : 485~486, 1998.
- 54) Röder B, Teder-Salejariw, Hilliard SA, et al : Improved auditory spatial tuning in blind humans. *Nature* **400** : 162~165, 1999.
- 55) 菊野宏一 : 究極のバイノーラル録音入門. *Stereo* 2月号 : 130~134, 1990.
- 56) Zuccarelli H : Ears hear by making sounds. *New scientist* **10** : 438~440, 1983.
- 57) Heffner RS, Heffner HE, Kearns D, et al : Sound localization in chinchillas. I ; left/right discriminations. *Hear Res* **80** : 247~257, 1994.

(別刷請求先 : 加我君孝
〒113-0333 東京都文京区本郷7-3-1
東京大学耳鼻咽喉科学教室)