G.OUCHI, M.D., K.TAKEYAMA, M.D., T.TSUIKI, M.D., A.TOSHIMA, M.D.
AND Y.KOSEKI, M.D.: ON THE SOUND LOCALISATION
FACULTY BY MEANS OF THE AUDITORY SENCE

聴覚による音方向知覚に関する研究

東北大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任 立木豊教授）

大 内 仁 武 山 貢 次
ミナモト ヒロシ タケヤマ コウジ

立 木 孝 豊 島 昭 夫 小 関 芳 晃
タチキ ナガトシ トヨシマ アキラ コセキ ヨシヒサ

I. 緒 言

最近社会的要求から立体音響に関する研究が盛んに行われる様になつて来ているが、若しこれを生理学的立場から見るならば、それは聴覚に由来する立体感の問題であり、特に立体感の中で重要な要素を占める音方向知覚の問題と云うことになるであろう。

然し一般に音方向知覚という現象は、日常よく吾々が経験する事実であるにも拘らず、実際には非常に漠然とした、而も主観的要素を多く含む現象である様に思われる。そして又音方向知覚を行うためには聴覚だけでなく、五官全体の知覚又は意識作用の協同が必要であり、複雑な因子が作用するものと考えられる。そこで聴覚だけに由来する音方向知覚の問題を研究するためには、次の様な点に就いて充分注意しなければならない。即ち先ず聴覚以外の他の知覚作用をなるべく除外すること、及び主観的現象をなるべく客観的に把握すると云う点である。

吾々は以上の2点について特に注意しつつ聴覚だけに由来すると思われる音方向知覚の研究を試み、或る結果を得たので茲に発表して大方の御批判を仰ぐ次第である。

尚研究に際して東北大学工学部永井研究室の協力を得た。

II. 聴覚のみによる音方向知覚の有無及びその程度に就いて

本研究は、一つは指示法、他は口答法を以て行つた。

(A) 指示法

実験には図1に示す装置を用いた。即ち先ず視覚

図1 方向定位測定装置

の影響を除外するために、被検者を目隠して廻転椅子に坐らせ、全く不定の方向にゆっくり廻転し、自己の位置に対する被検者の orientation が消失したことを随めた後、断続せる各種純音を聴取せしめた。そして被検者に聞えて来たと思う方向を指示せしめ（主観的方向線）、それを実際に音源のある方向（客観的方向線）と比較し、兩者の開き角度を誤差角度として測定した。被検者は両側正常耳を有する10名であり、当教室防音室内に於て実験を行つた。廻転は眩暈等を起さないように極めて緩徐に行い、しかも廻転中止後測定迄に暫時の休止期をおき、不測の誤差などに対しては特に意を用いた。

その1例を図2に示したが、この際横軸には音源に対する頭位を、縦軸には誤差角度を示した。

この図から判るように、一般に聴覚だけに由来する音方向定位能力は、存在することは明らかと思われるが、その程度は予想以上に粗雑であり、特に音源が頭の後方にある場合には著明に不良で、平均50~60°の誤差角度を示した。これに比し割合正確であるのは、音源が真横又は斜前方にある場合であり、平均20~30°であつた。尚各サイクルによる誤

図2 正常耳指示角度の誤差

図3 各周波数に於ける指示角度の誤差平均

差角度を検討して見た結果は図3に示すようにまちまちであり一定の傾向は見られなかった。

従来音源のわずかな移動を認識し得る能力は、前・後・側方の順に悪化すると云われているが、上述の実験では前後に不良で、左右に良いという全く逆の成績を示している。この点に就て考察を加えて見るならば、先ず本実験では主観的方向と客観的方向との数学的な差をそのまま誤差と見做した点に於て従来の方法と異つてゐる。即ち例えば後方を前方と答えた時には、生理的には僅かの誤りであつても、これを数学的に処理すれば 180° という最大の誤りとなつてしまうのである。元来漠然と方向を認識する能力と、その僅かな変化を認識する能力とは、必ずしも同一でなければならぬと云うことは

ない。従つてこれを同等に同時に評価することは困難なことである。後方音源の場合の誤差角度の平均が、 $50 \sim 60^\circ$ であつたということは、それが常に $50 \sim 60^\circ$ 位の誤差をしていたと云うことではない。従つてその意味ではこの様にたゞ誤差角度の平均のみを目標とすることは方向知覚能力の実態を示す目安としては必ずしも妥当ではない。そこで吾々は更に primitive な方法を用いてその実態を知ろうとした。

(B) 口答法

即ち、実験装置は(A)に同じ。異なる所は刺激音が雑音であること、及び応答の方法が検査者の指定するいくつかの方向の中の一つを口答せしめた点である。

即ち先ず音源が正しく前或は後正中方向に来るように回転を中止し、「前」、「後」或は「不明」のいずれかを答えさせる。次いで同様のことを前後左右の四方向で行い、次に八方向、更に十六方向の鑑別までを行わせた。

その結果、前後二方向の時は、音源が前正面の時は殆ど正答するが、後正面の時は前と答えることがあつた。四方向では後→前を除いて他は正答したが、八方向になると既に隣接方向の誤りを生じ、十六方向では更に誤りが多くなる。

(A)の場合と全く異つた条件で行われた本実験も、その結果は全く同様に次の二つの項目を結論としてあたえてくれる。即ち第一は聴覚のみによる音方向知覚の能力が存在するという事、第二に然し乍らその程度は極めて低いものであるということ、の二つである。

III. 聴覚に由来する音方向知覚の生理学的要因に就て

聴覚に由来する音方向知覚が存在するならば、それは果して如何なる生理学的要因に基くものであるか。この問題を追求するために、先ず古くから云われている両耳の作用、及び耳介の作用に就て検討を行つた。

(A) 両耳の作用

先ず片耳聴者5名を選び、上述の方法(指示法)によつて方向知覚能力を検査した。その1例を図4

図4 片耳聴者(左耳)

に示したが、両側正常耳の場合(太線)に比べて、片耳聴者では(細線)一般に誤差角度は著明に増加を示し、之は特に難聴耳が音源の方向に向つてゐる時に著明であつた。

そこで吾々は更に、先述の口答法を用い、正常聴力者を対照として検討を行つた。即ち正常聴力者の一側外耳道を指頭を以て密閉した状態で検査を行つたが、両耳開放の場合と異り、既に左右の鑑別すら不能な場合があり、八方向の鑑別は甚だしく困難で、又特に大きな個人差が認められた。片耳聴者の場合の如く、開放側に音源がある場合の方が、閉鎖側にある場合よりも正答し易い傾向がある。

即ち吾々はここで両耳の作用が少くとも何等かの形で音方向知覚に関係していると云うことを窺ふことが出来た。と同時に片耳だけでも場合によつては或る程度の音方向判断を行い得るものと推定し得た。

(B) 耳介の作用

耳介の影響を出来るだけ除外しようという目的を以て、両側ともに耳介の上からガーゼ、ボール紙(中央に小孔あるもの)をあて、その上から先端に小孔ある硝子製の円錐形の管をあてた状態で検査を行つた。検査は口答法で行つた。

その結果は、前後方向の鑑別が全く不能になりすべて前と答えたが(右後は右前、左後は左前)、左右方向は正確であつた。

IV 両耳に於ける物理的因子の作用に就いて

前項に於て吾々は少くとも両耳の作用が音方向知

覚に関係するであろうことを推定し得た。然らば方向を判断する両耳の作用は一体何によつて規定されるのであろうか。或る音が音源から左右の耳に達するまでには、その時の距離とか頭位とかによつて種々な変化を受け、必ずしも左右全く同じ音のまゝであるとは限らない。とすれば、その相異が音方向知覚に何等かの関係をもつていてもよさうである。そこで吾々は両耳に於ける音の物理的な相異に就て、その音方向知覚との関係を追求した。実際にはその相異は極めて複雑なもので、それを全く同一に再現することは困難なことであるが、吾々は先ずその最も顕著となる強さの差、及び時間の差に就て検討を加え、更により忠実に microphone によつて再現する方法を用いて吟味した。

(A) 強さの差に就いて

正常者の両耳にレのーバーをあて、図5に示す如き方法で両耳に異なる強さの同一純音をあたえ、音像

図5 実験装置

図6 両耳にあたえた音の強さの差と、音像偏位角度との関係

(1) 両側正常

の偏位角度と強さの整との関係を見ると、図6の如き結果になる。即ち両耳聴に於ては強い方に音像が偏位して知覚されると云える。

そこでこの両耳の差が、如何なる差として感知され、音像の偏位に寄与しているかを吟味する目的を以て、次の二箇の実験を行つた。先ず第一に一侧を耳栓し、聴閾にレベルの差をつけて実験すると、明らかに音像は弱放側に偏するが、そのレベル差（聴力損失）をそのまま補正すると、両耳開放の場合と等しい偏位を示す（図7）。

図7 両耳にあてた音の強さの整と音像偏位角度との関係

(2) 一側耳栓

一側の聴閾上昇に対する補正を行つたもの

第二に一侧を雑音で遮蔽して同じく聴閾にレベル差をつけて検査すると、同様に正常側に偏るが、この場合はそのレベル差をそのまま補正しても正常の場合と同等にはならない（図8）。何故にこのような現象が起るのであろうか。耳栓によつて起る聴閾上昇は、所謂伝音障科であつて閾値上の聴力（ラウドネス）に変化はないが、雑音遮蔽の場合は一種の内耳性難聴の型を示し、Recruitment 様の現象によつて閾値上聴力が変化するということが知られている。そこで上記実験の成績をラウドネスと云ふ観点から補正すると、図9に示す如く略かに正常と同様の音像偏位を示すことが判つた。即ち両耳聴に於て音像の偏位を示す両耳に於ける強さの差は、両耳に於けるラウドネスの差として働いているものと推定することが出来る。

図8 両耳にあてた音の強さの整と音像偏位角度との関係

(3) 一側遮蔽

一側の聴閾上昇に対する補正を行つたもの

図9 両耳にあてた音のラウドネスの整と音像偏位角度との関係

(一側遮蔽の場合)

(B) 時間差に就いて

実験方法は図10に示すように stethoscope を用いてその一端から検査が「カ、キ、ク、ケ、コ」を発音し、その時生ずる音像の位置を指示せしめた。この際一方の管の長さを適当に変化せしめる事によつて、両耳間に時間差を作つた（但し音速は 340m/sec として計算した）。その結果は図10に示す様に 0.15ms の時間差で 30° 程度、0.3ms で 50~60°、0.45ms で 70°、0.6ms で殆ど 90° の偏位を来した。このように管を用いる実験では音方向偏位は著明で

図 10 時間差と偏位度との関係

図 11 時間差による偏位の仕方
(強さの差を補正した場合)

あるが、この場合管の長さによつて音の強さが変化することは当然で、この強さの変化を補正しなければ真の時間差は得られない。そこで次の方法でこれを補正して観察した。即ち図 11 に示すように検者

の発音を microphone 2 channel-Amp. 更に 2 ケの同型の cristal receiver に導き、両方の管端から出る音の強さを等しい様に加減した。その結果図 11 に示す様に時間差による音像の偏位は著明で、又 Hornboster u. Wertheimer の実験成績とも良く一致している。即ち彼等によれば 30σ (0.03ms) で偏位し始め、 630σ (0.63ms) で殆ど真横まで偏位すると云う

次に時間差と強さの差との関係を検討してみた。方法は初め時間差を与えて音像を偏位せしめておき、次に音の強さの差によつて音像を再び正中位まで来るようにし、この時要した音の強さの差 (db) を読むのである。その結果は図 12 に示したように 0.15ms の時間差によつて生ずる音像の偏位は 4~5 db の強さの差に相当し、同様に 0.3ms に対しては 7db、0.45ms は 10db、0.6ms は 11db 程度の強さの差に相当するものであることが解る。又それら相互は互に変換し得る刺激であることが推定出来る。

図 12 時間差と強さの差との音方向定位に於ける競合

(C) microphone と耳との比較

実験方法は図 13 に示す様に被検者 A の両耳に相当する部分に 2 ケの microphone をおき、被検者 A を廻転椅子に坐らせ、音源に対して頭位を変化せしめつゝ、この時間側別々に到達した音を catchi、更に 2-channel-Amp. を通して 2 ケのレシーバーに導き、別室にいる被検者 B に聴取せしめ音像の位置を指示せしめた。被検者は両側正常耳を

図 13 実験装置

図 15

図 14 実験結果

太線は音源方向

- 1: 250~, 2: 500~,
3: 1000~, 4: 1500~,
5: 3000~

外輪は音像が頭の外に結像した場合

[A]

[B]

有する5名である。その結果は図14に示した様に音像は頭蓋の外に結ぶこともあるし、又は頭蓋の内に結ぶこともある。一般に low cycle では頭蓋内に、high cycle では外に結ぶ傾向を示した。また結像した点と実際の音源の方向との間には或る程度の相関を認めるが、先述指示法の成績と比較するとその誤差は著しく増加する傾向を示した。レシーバーを両耳に装着して音像定位を行う場合には、一般に音像は頭蓋後頭部に結像するものであるが、本実験でも音像が後方に結び易い傾向を示した。

以上の実験を基として次の様なことが考えられる。即ち図15に示す様に両側正常耳で音源定位を行う場合(A)に、両時間に生ずる音の強さの差、

時間の差、位相の差等の物理的な相異を生ずるが、これを若し microphone で忠実に捉えたならば、それを再び忠実に再現した(B)に於て、音定位に関しては(少くとも物理量に於ては)全く等価なものと考えることが出来る。然し上述の実験はこの二者間に甚だしい相異を認めるのである。この事實は一方音方向定位に於て耳には microphone には無い微妙な機能を有するものであるということを教えると同時に、両耳に於ける物理的な関係のみを対象として検討するならば、大きな過誤に陥るであろうことを教えてくれるものと思う。そしてその相異は、一つには耳介、外耳道、更には内耳等の生理学的な点にあり、他は更に複雑な中枢性の、特に心理学的要因に在ると云うことを肯ずかしめるものである。

V. 考 按

吾々は日常生活に於て、例えば自動車が何処から来てどの方向へ走つて行くとか、又ラジオが何処でなつてゐるとか、割合正確に推定出来ることを経験し、吾々には音の方向知覚があると漠然と考えている。然し厳密な意味で聴覚だけに由来する音方向知覚が一体存在するものであろうか、又あるとすればどの程度正確なものであろうか、この点に関しては必ずしも明確な解答を与え得るとは限らない。そこで先ずこの二つの問題に関して基礎的実験を行つたのであるが、その結果、聴覚だけでも或る程度の音方向判断は可能であるということ、及びそれは然し吾々が漠然と考えているよりはるかに粗雑なものであるということを知つた。即ち日常生活に於て割合正確に音源を推定し得るのは聴覚以外の他の知覚作用の協同によるためであらうと推定することが出来る。これは Young の実験からも確実に知ることが出来る。

さて、以上の様に粗雑ではあつても確かに聴覚だけで音方向定位が可能であるとすればそれは生理学的に何に基因するものであろうか。そこで両耳の場合と、片耳の場合とに於ける定位能力の精度を比較すると、片耳の場合に於て明らかに両耳の場合に劣ることを見た。即ちこれは聴覚だけで音方向知覚を行うためには両耳の存在が先ず第一に必要な条件であることを確認したのである。然し片耳でも或る程度方向判断が可能であるということは、必ずしも両耳でありさえすれば良いと云うのではないことを示している。即ち Meyer の云うように音が耳に入る前の作用、即ち頭蓋とか、耳介の作用も欠くべからざる要因であらう。事実耳介の作用を除外して行つた実験に於て、前後の鑑別が全く不能になつたという事実は、少くとも外耳の形態が音方向知覚に関与しているであらうという推論を肯定せしめる。

ともあれ上述の如く両耳の存在が音方向知覚に於て、片耳のみの場合より明らかに優つてゐるという事実から、両耳間に於ける音の物理量の差が方向知覚に寄与するのであらうと考えることが出来る。物理量と云つてもそれは極めて複雑な変化を示すものであるが、吾々はこゝではその中で最も主要と思われる強さと、時間の差に就て検討した。その結果、

強さの差に関しては少くとも両耳に於けるラウドネスの差が頭蓋内音像の偏位を規定することを知り、又時間の差に関しては Hornboster u. Wertheimer 等の主張する様に音方向定位に、それが関与するであらうことを認めた。次に時間差と強さの差とは音像偏位に対しては互に競合し合うことが出来るということを推定し得た。

さて以上の様に、強さの差とか、時間差という様な物理的な因子が、両耳性という点に於て音方向定位に大きな関係を持つてであらうということが推定されたので、これを若し microphone で忠実に捉えた場合に、それをそのまま全く無関係の人の両耳に再生すれば、前者と全く同様の感覚を生ずることが出来るであらうか。吾々の実験の結果は然し乍ら全く異つた定位の傾向を示し、その定位能力が甚しく悪化する事実を示した。従つて吾々はこの事から次の様に推論することが出来る。即ち聴覚に由来する音方向定位には、両耳性、特に両耳に於ける音の物理的因子の相異のみが関係するのではないと云うことである。

次に吾々は実際の聴聴者に就いて考察を試みた。即ち図 16 に示す方法で音像の変化を被検者に指示せしめてその軌跡を画いた。この際先述の如く両耳間に聴閾の差があれば、これが正常者と全く同一にはならないことは確実であるから、その点に就て補

図 16

図 17

図 18

正を行い、音像が正中位にある点から測定を始めた。その結果は図 17 及び図 18 に夫々示すように伝音器性難聴では聴力差を補正しさえすれば略正常耳の場合と同等になるが、内耳性疾患の場合は甚しく不規則で、音像定位は極めて不確実である。これ

は先項、ラウドネスの差の際に述べた事実と全く一致するものであるが、単に雑音遮蔽の場合と異り、更に複雑な内耳病変のために種々な現象、例えば Diploacusis とか耳鳴とか、又吾々に不測の症状等によつても定位能力が乱されと考えられよう。

以上の如く、吾々が聴覚によつて音方向定位を行うには、それぞれ異つた意味に於て、正常な外耳の形態、正常な中耳、内耳の機構、正常な両耳の作用を必要とするものであり、そのどれが欠けても音方向定位は悪化するものであると考えることが出来る。又吾々が音源の存在を認識するのは、音が聞えたという感覚であり、その定位を行う根本のきつかけは両耳に達する音の物理的因子であることは確実であるが、実際に吾々が音源を認識しその方向定位を行うには、他の幾多の知覚作用の協同をまつてはじめてなされるものであることは当然である。吾々は宮城県立盲学校の好意によつて先天盲 5 名に音方向定位能力の検査を行つたが、聴閾自体には変りがないのに、その音方向定位は正常者に比して明らかに勝っている事実を認めた（勿論この際も聴覚以外の知覚を出来るだけ除外して行つた）。この事実は視覚という最も重大な知覚を失つている長年月の間に、耳に達する物理的因子は正常者に等しいのに、それをたゞ一層正確に音方向定位と結びつけることが出来るようになって來たと解釈すべきであろう。そう考えれば、音方向定位の能力は個人個人によつてその生活環境、生活史、心理状態等によつて大きく変わってくることは当然で、近年北川氏等が批判したように、従来の多くの実験成績の間に多くの矛盾が介在して然るべきで、むしろ隣室のラヂオが判ること、防音室内での実験成績とを同等に比較しようということが既に大きな過誤であることは否めない。

以上の実験結果、及び考察に基いて、吾々は主として次の三項を結論として認めたい。即ち、1) 聴覚のみによる音方向定位能力は存在すること、及び然し乍らその精度は必ずしも高くないこと、2) 正常な音方向定位を行うためには、正常な外耳、中耳、及び内耳の機能と、正常な両耳の作用を必要とすること、然し乍らそれだけで常に正確な音方向定位が可能で陥るという訳ではなく、又或る場合にはその中の何れかに欠陥があつても或る程度の方向定

位は可能であること。3) 日常生活に於て通常吾々が経験している音源位置判断と、防音室内で行う音方向定位実験とは、そのメカニズムに於て異なるものであることである。

最後に今回吾々が検討しなかつた両耳に於ける位相差の問題に触れてみたい。両耳に於ける音の位相の差も古くから位置判定の一つの要素になり得るだろうと考えられ、多くの実験がなされて来た。唯純音に於ける位相の差は、時間差の一つと見做し得るものではないだろうか。若しそうであれば、一般 low cycle には位相差が、high cycle では強度差が著明である点を考え合せると、前者は主として位相差が、後者は主として強度差が方向判定の基盤になると考えてもよさそうである。たゞ方向判定は実際にはむしろ純音でない場合が大部分であり、そうなると位相差の問題は必ずしも容易に実験的解決を望むわけにもいかないと思う。いずれにせよ今後の問題として検討をつづけたい。

参 考 文 献

- 1) *Engelhardt, A.*: Das stereokustische Hören, medizinische, 16, 1953.
- 2) *Hornboster u. Wertheimer*: Über die Wahrnehmung der Schallrichtung, Berichte der Academie, 388, 1920.
- 3) *Kietz, H.*: Das Problem des räumlichen Richtungshörens, Ztschr. L.R.O., 31, 1952.
- 4) *Meyer*: Physiologische anatomische Elemente der Schallrichtungsbestimmung, Arch. f. O.N.K. Heilk., 147, 1940.
- 5) *Stevens and Davis*: Auditory Localisation, Hearing, its Psychology and Physiology, New York G. Wiley & Sons, Inc. 1948.
- 6) 北川, 古川, 岡: 音の方向知覚に関する研究, 耳喉, 21, 1948.
- 7) 染: 音の方向感知に関する実験的研究, 日耳鼻, 48, 1942.
- 8) 武山, 豊島: 耳の音方向定位に関する研究, 日耳鼻, 58, Suppl., 1955.
- 9) 立木, 小関: 聴覚に於ける方向感に関する考察, 耳喉, 27, 1954.
- 10) 和田: 音響心理学, 11) 八木: 音響科学, 第3章.

御指導、御校閲を賜りたる恩師立木豊教授に深甚なる感謝の意を表すると共に、御助力を抱いた本学工学部永井研究室に深謝します

なお本論文の一部は、昭和29年10月、山形市に於ける第4回日本耳鼻咽喉科学会東北岩手地方会合同学会（第88回東北地方会）及び第56会日本耳鼻咽喉科学会総会に於て、武山、豊島がそれぞれ口述及び誌上発表した。

原稿到着＝昭和31.8.13日）