

氏 名 (本 籍)	江 端 正 直 (福 井 県)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 1 3 3 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 3 年 3 月 2 6 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 過 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	両 耳 相 互 作 用 に 関 す る 聴 覚 的 研 究
論 文 審 査 委 員	(主 査) 教授 二村 忠元 教授 城戸 健一 教授 北村 晴朗 助教授 曾根 敏夫 教授 大泉 充郎

論 文 内 容 要 旨

緒 言

音を両耳で聞いた場合と単耳で聞いた場合の最も重要な差異は、方向知覚が得られるか否かという点にある。両耳で聞いた場合、方向知覚が生ずるのは、両耳間に相互作用があるからであるが、この相互作用は神経レベルで行なわれているため、聴覚神経系における情報処理機構の解明という点から、聴覚研究の中心課題の一つになっている。聴覚系に限らず、感覚の特性あるいは限界を調べることは、それ自体意味のあることであるが、ここで得られた両耳間の相互作用に関する研究結果は、直接、間接に音の再生技術とか音響設計などに利用される可能性もあり、神経系における情報処理という立場からも解明されなければならない事柄である。すなわち、神経系

における情報の伝達や処理は、巧妙に行なわれているので、このような神経系のもつ優れた機能を工学的に実現すれば、従来のものよりも優れた測定器とか情報処理のための機器の実現できる可能性がある。

この論文では、とくに信号音と妨害音に方向差のある場合に生ずる MLD が注意ないしは構えによる方向の選択性に依存することを明らかにし、さらにこれに関連して“注意”ないしは“構え”が信号の聴取に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。また、両耳間の相互作用に関する研究方法として音像の融合という点に着目して研究を進めた。これまでは、Time-Intensity Trading 理論に代表されるように、音像の移動という点に主眼がおかれていたが、ここでは実際には存在しないような大きな両耳間の差異を与えて、融合音像の得られる限界を求めることにより、両耳間の相互作用がどのように行なわれているかを考察している。また、骨伝導音が、localization と lateralization の違いに重要な役割を演じていることを示唆し、その根拠を示している。

第 1 章 序 論

1.1 聴覚系における情報の伝達

聴覚神経系では、4～5回、シナプスを経過して大脳皮質の聴覚領に達し、他の感覚系に比べると、かなり複雑な構成になっている。これは、聴覚系が触覚という低次の感覚器管から発達し、しかも、触覚などとは比較にならない程複雑な情報の処理を迅速に行なわねばならないという使命が課せられているためであると考えられる。

1.2 両耳からの情報の相互作用

両耳間の相互作用がみられるのは、上オリーブと下丘においてである。上オリーブ核の中の副核は、両耳間の差に相当する出力を出し、ここで方向に関する情報が抽出されているということは、生理学的に明らかになっている。しかし、大脳皮質の聴覚領を取り去った動物では、音の定位ができなくなるということから、下位で抽出された方向に関する情報の最終的な知覚判断には、聴覚領が重要な役割をしていると考えられる。

1.3 両耳相互作用によって生ずる感覚

両耳間に相互作用があるために生ずる感覚として、まず方向知覚が挙げられる。これに関係ある現象として binaural beat があるが、これは、両耳間に位相差のある音の定位と同じであると考えられる。方向知覚は両耳間に生ずるわずかな差によって得られており、両耳間に与えられる差が、ある限界を超えて大きくなると、もはや融合音像は得られず、左右に分離する。どうした場合に、融合音像が得られ、どうした場合に分離するかを説明するには、聴覚信号が神経

系をある程度上行した段階で考察する必要がある。

第2章 方向性情報の処理とそれによって生ずる聴取の改善

2.1 まえがき

両耳受聴によると、音の方向がわかるだけでなく単耳で聞くよりも妨害音の影響を受けにくいという現象がある。すなわち、妨害音中で信号音を聞く場合には、音のやってくる方向が重要な役割を演じているものと考えられる。ここでは、吾々が実際に妨害音中で信号を聞こうとする場合に、意識的あるいは無意識のうちに行なっている事柄や、生理学の分野で明らかにされていることを考慮して一つのモデルを提案している。

2.2 方向性情報による聴取能の上昇

方向に関する情報によって、可聴度の上昇、すなわちMLDが得られるが、この点に関しては、これまでも受話器受聴による報告がある。筆者は、音場における検討を行ない、10 dB位のMLDを得たが、本論文ではさらに音源の遠近についても方向に関してと同様な現象が存在するかどうかを検討した。その結果音源の方向について分離した場合に比べるとMLDの値は小さく約1 dB程度である。

2.3 方向性情報の処理機構に対する検討

妨害音中で信号音を聞く場合、方向に関する情報が刺激音に含まれていると、信号音の聴取が改善されるのは、定位された音の中から、特定の音だけを選択して聞くことができることによると考えられる。選択的な聴取においては、生体において感覚のある特定の部分のみを強調する場合にみられるlateral inhibition構造が役立っていると考えられる。この機構の入力をX、出力をYとすると

$$Y = C \times X$$

ここでCは、出力のS/Nを最大にする重み係数であり、

$$C = a(\Phi)^{-1}(\sigma)$$

で与えられる。この重み関数を用いると入力でのS/NよりもかなりよいS/Nが得られる。このように定位が尖鋭にされても、これによってすぐ信号の聴取能が改善されるとは言えない。妨害音も信号音もよく似た音で両方とも方向性をもっている場合があるからである。こういう場合、最後にどれか一つに注目することによって、特定の音が選択され、MLDが得られると考えられる。

2.4 注意と信号の聴取能との関係

注意というのは、極めて主観的なもので、その大きさを、物理量で測定することはほとんど不可能である。ここでは、特定の音に注意を向けた場合と向けない場合で聴覚系の感度に差があるかどうかを純音の閾値や弁別限について検討している。

2.4.1 注意と閾値の関係

ある音に注意が向けられている場合といない場合の閾値の比較を行なった。被験者に、ある音に注意を向けさせる方法として、ここでは正面からやってくる1100 Hzの音を提示する割合を一番大きくするという方法をとった。こうすれば自然と被験者の注意は、この音に向けられると考えられる。この結果を図1に示す。これから、注意が向けられている場合といない場合では、閾値にかなり差のあることがわかり、その大きさは、妨害ノイズによっても影響を受けることがわかる。このような閾値の差は、特定の方向からくる特定の高さの音に注意を向けていると、他

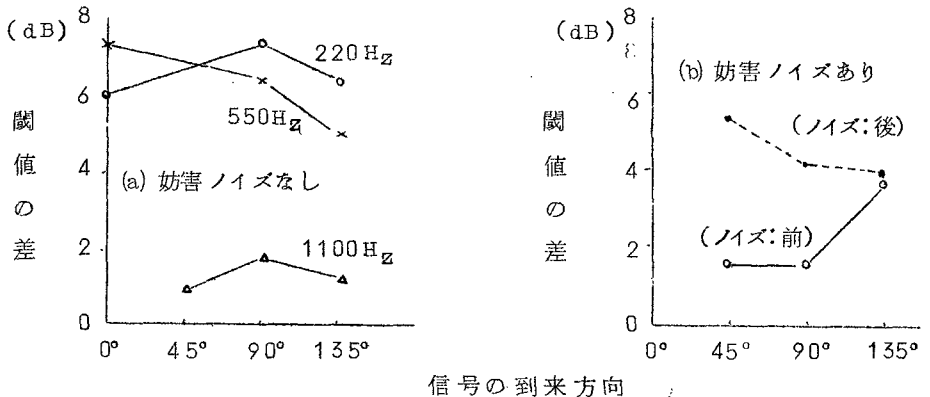


図1. 注意の有無による閾値の変化

の方向からくる高さの異なる音は、抑制を受けて閾値が上昇するために生ずると考えられる。これをモデル的に表わしたのが図2である。

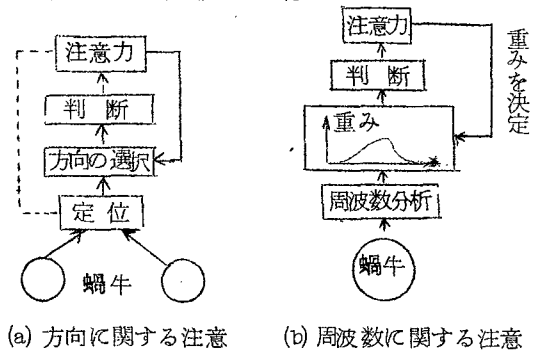


図2. 音の選択聴取における注意力の役割を示す模式図

2.4.2. 信号の生起時刻に関する情報と聴取能の関係

つぎに、信号がいつ現われるかということが信号の聴取にどの程度の影響を及ぼすかを検討した。即ち、信号が現われるとすれば、合図があってから2秒後に現われるという場合と30秒間のうちのいつ現われるかわからない場合の比較を行なった。図3の結果から、信号の生起時刻に関する情報の与えられている場合の方が、与えられていない場合よりも1.5 dB ~ 2.5 dB 閾値が低いことがわかる。また、曲線の傾斜は、被験者が生起時刻を知っている場合の方が急である。このように、信号の生起時刻に関する情報がないと閾値の上昇がみられるが、これは信号がいつ現われるかわからないと注意が散漫になり、小さいレベルの信号音を聞きのがす割合が増すことを意味する。

この部分の聴覚系は図4に示すように入力信号と中枢からの信号(注意)との相互相関をとっているものと考えることができる。

2.4.3. 一時記憶の持続時間と妨害音の注意に及ぼす影響

注意に関連して、2音が継時的に与えられる場合、2音の強さの弁別限が、2音の間隔および中間の妨害音によってどのような影響を受けるかを求めた。その結果、第1音の一次的な記憶は、これに注意を向けていれば、あまり乱されずに数秒程度持続することがわかった。また図5は、妨害音の効果を示すが、信号音と同じ1000Hzの純音が他の二つに比べて大きな妨害の効果をもつ。これは、

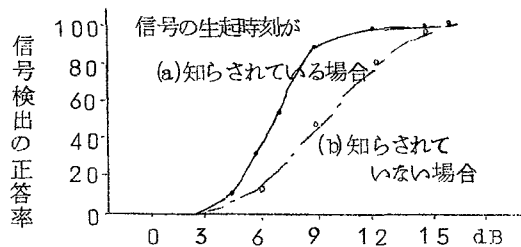


図3. 信号の生起時刻が知らされている場合と知らない場合の聴取力の比較 (信号検出の正答率)

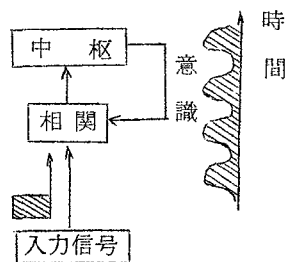


図4. 信号の生起時刻に関する情報による聴取力の上昇を説明する模式図

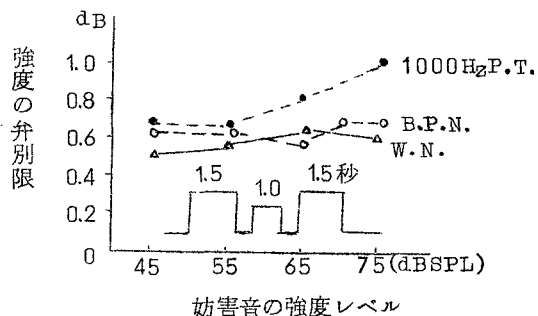


図5. 妨害音の弁別限におよぼす影響 (パラメター: 妨害音の種類)

信号との相関が大きいと考えられる。

2.5 結 論

以上のように、音に方向性のある場合には、聴覚系で方向性の情報を抽出し、各音源をそれぞれの位置に定位する。つぎに、これらの中から、特定の音を選択して聞くという聴覚モデルを提案し、注意を導入した。また、この注意について各方面から検討し、注意を向けている場合としない場合では、聴覚系の感度が数 dB 変化するという結果を得た。このように、従来漠然と注意として扱われてきたものに対して、モデルにより考察し、その機構について解釈を与えた。

第3章 音源の方向（音像の位置）の判断とその機構に関する検討

3.1 まえがき

左右の耳から与えた音が融合して一つの音像になることは、両耳間に相互作用があることを示すものであるが、両耳間にある程度以上の差を与えると分離してしまう。両耳間に与える差のうち、この章では、両耳間に時間差のあるいろいろなパターンの刺激音を与えて、音像の融合限界を求め、その融合機構を検討している。

3.2 エコーの方向の知覚

室内で音を聞く場合、直接音からある程度以上遅れた、十分なレベルを有する反射音は、直接音から分離して感じられる。ここでは、室内における直接音と反射音とを想定し、第1音と第2音が方向的に分離して感じられる最大の時間差を求めた。刺激音にクリックを用い図6のような結果が得られた。第1音は中央に第2音は右に定位されるべき音である。

この図から、2音のレベル差が 20 dB 以内ならば時間差が 10 ~ 20 msec で分離することがわかる。建築音響の分野では 30 ~ 50

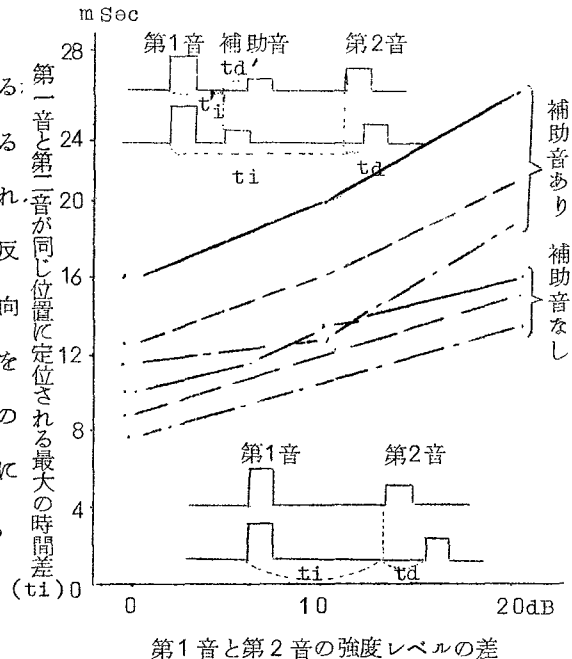


図6. 第1音と第2音が同じ位置に定位される最大の時間差（レベル差および補助音の効果）

msec以上遅れてくるエコーは抑圧しなければならないと言われているが、これ以下の時間差でも聴覚系では、2音を方向的に分離して聞くことができることがわかる。また第1音のすぐあとに、左に定位されるべき音を入れた場合の結果も示してあるが、第1音と第2音が分離する時間差は長くなり、20~30 msecになる。また、第1音と第2音の間を正弦波やノイズでうめると、この時間差はさらに長くなって100~200 msecになる。

次に、かなり長い継続時間をもつ音が両耳に与えられると、図7に示すような音像の軌跡が得られる。ここでは、音像が(1)から(2)に、および(2)から(3)に移動しはじめる最大の継続時間を求めた。(1)から(2)に移動しはじめる最大の継続時間は、約200 msecまた(2)から(3)についての結果は図7に示すように、約600 msecである。これらの値は、異なる方向から2音が放射されている場合に、その2音がどれだけ時間的に隔たっていれば、2音の方向が正確に知覚できるかという値に關係していると考えられる。

以上のように、第1音は、常に正確な位置に定位されるのに対して、後続音の方向は、先行音の影響を受ける。これは、第1音によって、一たん方向の定位がなされてしまうと、他の方向からの音に対しては、ある程度の間、抑制が働くためと考えることができる。

3.3 時間差のある音の融合

この節では、両耳間に時間差のあるいろいろなパターンの刺激音を与えて、音像の融合する時間差の限界を求めた。パラメーターとして、刺激音の感覚レベルおよび継続時間、音源等を取り、これらの効果を求めた。また、両耳に与える音が時間差をもって立ち上がる場合に、遅れて立ち上がる音の継続時間を変えて音の融合限界を求めた。さらに強度レベルに差のある音や、立ち上がり時間に差のある音の融合限界についても検討したが、すべての場合を説明し得るような融合機構をひきだすことは、現段階では、不可能である。即ち音像の融合を考える場合、刺激音のエンベロープだけを問題にしたのでは不十分で周波数成分の時間的変化をも考慮する必要がある、さらに生体における鋭化作用も大きな影響を及ぼすので、この点も考慮に入れる必要がある。

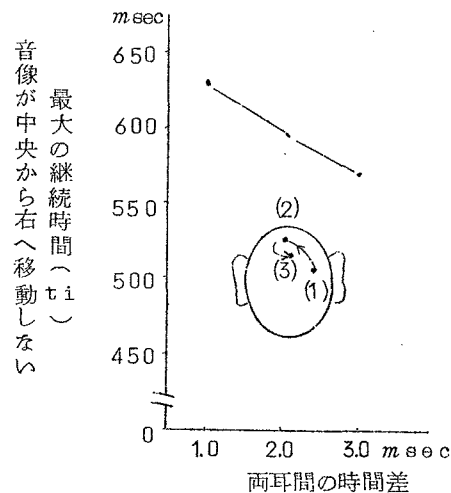


図7. 減衰時のクリックが中央から右へ移動しない最大の継続時間

3.4 localization と lateralization の相違に関する考察

受話器を通して聞いた場合と音場で聞いた場合とでは全く異なる感覚をひきおこすが、その原因は明らかでない。localization と lateralization の相違が何にあるかが明らかになれば、受話器受聴によって音場受聴に代えることも可能となり、この種の研究を進める上に大へん有益である。ここでは、多方面から両者の差異についての検討を行ない、視覚的な効果や頭のわずかなゆれの効果などは、決定的な役割をしているとは考えられず、頭蓋の前面から受ける骨伝導音がかかなり重要な役割をしていることが明らかになった。まず、両耳に 30cm の間隔をもつ 2 本のマイクで受音した音のみを与え、音場からの骨導音を与えた場合と与えない場合について音像のできる位置についての比較を行なった。その結果、骨伝導音を与えられると、音像は前面に移動した。また、骨伝導音を骨伝導レーザーで与えても同様な結果が得られた。また、音源の前後の弁別能力を刺激音の強度レベルを変えて求めた結果、骨伝導音の閾値以下の音では、正確に前後の判断をすることができないということがわかった。これらの実験から、骨伝導音は、後頭部にできる音像を前頭部に移動するのに役立つことがわかった。

第 4 章 周波数成分の差と音像の融合の関係

4.1 まえがき

この節では、音像の分離融合に関係するもう一つの要因である両耳間の周波数成分の差について検討している。

4.2 周波数の異なる正弦音を両耳に与えた場合の音像の融合

両耳に周波数の異なる正弦音を与えた場合の融合音像の得られる限界を図 8 に示す。図から

継続時間が長くなるにつれて、しだいにわずかな周波数の違いで、音像が分離することがわかる。これは、継続時間が長くなるにつれて、周波数の分解能が上昇し、そのために両耳間の応答野の相違が大きくなって音像が分

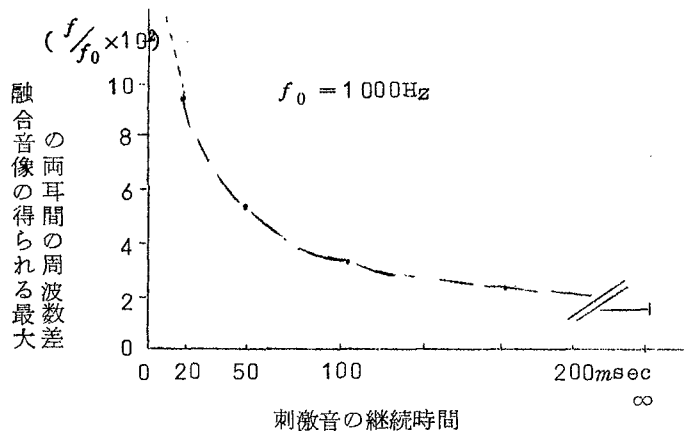


図 8. 継続時間の長さで融合音像の得られる最大の両耳間の周波数差

離するものと考えられる。

4.3 聴覚系の過渡応答に関する考察

聴覚系は、かなり速い時間的变化に追従してゆくことができるだけでなく、周波数の弁別力もかなり鋭い。時間情報の処理と周波数情報の処理とは、一般には相入れない関係にあるが、こういう観点から聴覚系を検討した例はあまりない。ここでは、この点を明らかにするために、基底板の過渡応答およびこれにつづく神経系の応答について検討している。

4.3.1 基底板の過渡応答

まず、基底板の定常振動から、単位インパルス応答を求め、これから任意の時刻における基底板の振動を求めた。計算結果から刺激音の立ち上がり時定数が小さくても大きくても基底板の振動パターン自体には差異がみられないこと、また、立ち上がり時定数が10 msec以下ならば、入力が入ってから20 msec位すると、基底板の振動は、ほぼ定常値に達するということがわかった。

4.3.2 神経系の応答速度に関する考察

聴覚系における周波数分析は、神経系に入ってさらに尖鋭なものにされるが、この尖鋭化の主役をしている lateral inhibition 構造の相互抑制の部分にかなり長い時定数をもつ部分があると考えられる生理学的な根拠がある。そこで、lateral inhibition 構造の部分にかなり長い時定数を含む部分があると考えて解析を進める。入力を X_n 、出力を Y_n とすると

$$Y_n = X_n - A(X_{n+1} + X_{n-1})$$

で、 A は抑制を表わす係数である。これがかなり長い時定数を持ち、

$$A = A_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

とする。過渡状態では、 A は定常値 A_0 よりも小さいので、過渡音に対する応答野は広がる。

4.4 考察

聴覚系では、左右の耳からの信号がある段階で比較され、両耳間の類似度が大きければ音像は融合し、ある値以下ならば分離すると考えられる。そこで先の節で求めた聴覚系内のスペクトルを用いて両耳間のスペクトルの差をとったのが、図9である。結果は、継続時間によらず一定の値を示しているの、周波数成分に差のある音の分離、融合は左右の応答野の差のようなもので判断されていると考えられる。

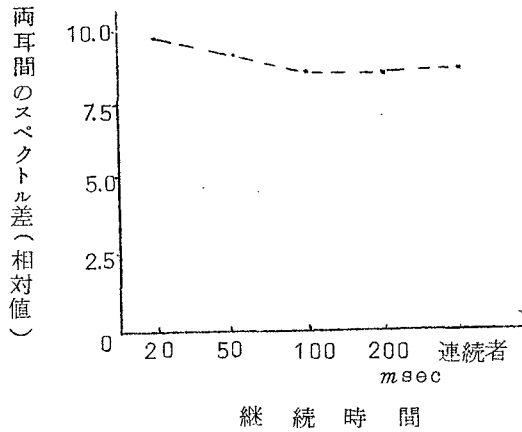


図9. tone burstの継続時間とその継続時間で音像が分離する
 限界の周波数差をもつ音のスペクトル差

第5章 結 論

以上のように本論文では、両耳間の相互作用がどのように行なわれているかについて、心理物理的方法を用いて検討してきた。とくに、信号音と妨害音に方向差のある場合に得られるMLDが注意によって生ずる方向の選択性によって変化することを明らかにし、さらにこれに関連して注意、あるいは構えが、信号音の聴取に大きな影響を及ぼすということを明らかにした。また、両耳間の相互作用に関する研究方法として、これまで、音像の移動という点に規準がおかれていたが、ここでは音像の融合という点に着目して研究を進め、この方法が、両耳相互作用の起こる限界付近での研究に有効であることを示した。さらに骨伝導音がlocalizationとlateralizationの違い、とりわけ音源の前後の判断の手がかりとして重要な役割を演じていることを明らかにしたことは、従来、不明であった両者の差異を生ずる要因の一つを示したという点で意義があると思われる。

最後に、この研究を進めるにあたり、全面的な御支持、御指導いただいた東北大学二村忠元教授、曾根敏夫助教授、有益な示唆と討論の場を与えて下さった本学音響工学研究会の諸氏、そのほか御協力いただいた関係各位に深く感謝する。

文 献

- 1) van Bergeijk, W.A. (1962). "Variation on a Theme of Békésy : A Model of Binaural Interaction," J. Acoust. Soc. Am. 34, 1431-1437
- 2) Ebata, M., Sone, T. and Nimura, T. (1965). "Improvement of Detectability of Pure Tone and Intelligibility of Speech in Noise by Directional Hearing," Rep. Res. Inst. Elect. Comm. Tohoku Univ. 17, 1-20
- 3) Montgomery, W.D. and Broome, P.W. (1965). "Spatial Filter," J. Opt. Soc. Am. 52 1259-1275
- 4) 本川弘一 (1964). 大脑生理学 (中山書店)
- 5) von Békésy, G. (1960). Experiments in Hearing (Mc Graw-Hill Book Co.)
- 6) Flanagan, J.L. (1960). "Models for Approximating Basilar Membrane Displacement," B.S.T.J. 39 1163-1191

審査結果の要旨

両耳受聴と単耳受聴の重要な差異は、方向知覚の有無にあり、これが両耳間の相互作用に起因する現象であることは知られているが、両耳相互作用がどのような条件によって生ずるか、また、どういう形で生ずるかということに係づけて明らかにしている研究は、まだない。本論文は、両耳相互作用を、心理物理学的手法により、体系的に研究したもので、5章より成る。

第1章は、序論で、両耳相互作用を概括的に述べている。

第2章は、音場で信号音を聴取する場合に、方向に関する情報が、妨害音から信号音を分離して聞くのにどの程度影響するかを検討し、これが聴取者の構えによって変わることを明らかにしたもので、注意ないし構えの効果をモデルにより説明している。

第3章では、両耳間に時間差のある音の融合限界を求め、第一音とエコーの時間差が10 msec 以内で2音は方向的に分離すること、また、これは後続音の形態によっても変わることを示し、この時間差が定位に関する鋭化の持続時間によるものと述べている。さらに、骨伝導音が localization と lateralization の相違の一因と考えられることを種々の実験により結論している。

第4章は、左右の耳に周波数成分の異なる音を与えた場合の音像の融合限界を検討したもので、この限界が耳内スペクトル分布の差で決まるものと考えられることを、基底板の応答ならびに側方抑制 (lateral inhibition) 機構の性質から結論している。

第5章は結論であり、前章までに得た結果に基づき、両耳相互作用に関する聴覚モデルを示している。

以上を要するに、本論文は、従来体系づけられていなかった両耳相互作用を、心理物理学的手段によって総括的に研究したもので、音像の融合限界に着目して両耳相互作用に関する新たな研究方法を展開し、さらに、音の方向選択に関する注意ないし構えの効果の導入を行ない、また、localization と lateralization の感覚的相違の原因に関して新たな知見を加えるなど、多くの注目すべき成果を得た。これは音響工学の発展に貢献するところ少なくない。

よって本論文は、工学博士の学位論文として合格と認める。