慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	両耳聴空間の音質・音韻評価と心理物理的伝達関数に関する研究
Sub Title	
Author	吉田, 登美男(Yoshida, Tomio)
Publisher	慶應義塾大学大学院社会学研究科
Publication year	1998
Jtitle	慶応義塾大学大学院社会学研究科紀要 : 社会学心理学教育学 (Studies in sociology, psychology and education). No.48 (1998.) ,p.89- 101
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	学事報告 : 博士
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00069 57X-00000048-0089

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

デルとして拡張可能であることが示唆されている。

以上のように，本論文は，ピアノ音楽の演奏技能を創造的技能として把握し，そこにおける熟達化が，練習の集積により技能がより速く，より正確に，かつ自動的になる変化のみでなく，より洗練された課題表象を生成する能力や評価基準の構築を可能にする認知的体制の変化を含むことを，実験的，体系的に研究したところに独創性があり，熟達化の研究史上大きな意義を持つものといえよう。より具体的には，(1) 熟達者の旋律記憶が領域固有の先行知識の柔軟な適用に基づいて促進されるものであること，(2) 熟達者の練習は楽曲の洗練された構造表象を実現する演奏表現表象の探索として特徴づけられること，(3) 彼らが演奏時の音量変化を適切に分化して評価しうる基準を発達させていること，などを巧妙な実験により明らかにした点が評価される。さらに，ここで呈示されたピアノ演奏領域での熟達化のモデルを，他の創造的技能領域すなわち邦楽演奏，視覚芸術作品の創作，剣道の3領域にまで拡張しうるかに関して，興味深い議論を展開している。

しかし，熟達化研究の困難さのゆえもあって，本論文にいくつかの欠点や限界があることも指摘しておかなければならない。その第一は，熟達者の有能さを強調するあまり，初心者の持つ潜在的な能力が軽視されがちなことである。最近の日常的認知の研究などから考えると，人々は公式の練習開始以前に，しばしば受容している音楽の基本的な理解を持つと想定されるが，本論文では，初心者の認知は熟達者のそれと対比的にとらえられ，過小評価されているきらいがある。第二は，熟達化がもっぱら知的な変化として扱われていることである。著者自身のより最近の研究からしても，熟達化が価値や同一性の変化の過程でもあることは明らかで，その点本論文は，やや見方が一面的といわざるをえない。第三に，実験の技術的，理論的側面は概してよく吟味されているが，なお若干の問題がある。例えば，実験材料を検討すべき次元以外に関して等価とすること，実験の計画や結果の説明において利用される概念（課題表象，スキーマ，作業記憶）を明細化することなどに関し，改善の余地があろう。

審査者としては，本論文を高く評価すると同時に，著者が博士の学位取得に満足することなく，一層の研鑽をつんで，音楽ならびに類似の領域における熟達化のより妥当な定式化とそれにもとづく実証的研究を推進する国際的な原動力になることを期待するものである。

心理学博士（平成11年2月22日）

乙　第3253号　吉田登美男

両耳聴空間の音質・音韻評価と心理物理的伝達関数に関する研究

〔論文審査担当者〕

主査　慶應義塾大学文学部教授・大学院社会学研究科委員　文学博士　小谷津孝明

副査　慶應義塾大学文学部教授・大学院社会学研究科委員　教育学修士　冨安　芳和

副査　慶應義塾大学理工学部教授・大学院理工学研究科委員　工学博士　安西祐一郎

副査　慶應義塾大学名誉教授　文学博士　印東　太郎

内容の要旨

本研究の論理

本研究は音声又は音楽の両耳受聴時の音質及び音韻伝達に関する音響心理学の問題を扱う。研究の方法論は，音質または音韻の伝達量を心理尺度によって数量的に評価し，評価結果の実験値を現象論として扱う。次いで，数学的操作あるいは数学的解析によってこれらの実験値を支配する法則を誘導する。すなわち，研究論理としては，A：従来理論の疑問に対する否定の否定による原理追求の研究論理と，B：厳密に観測された実験値を根拠とし，現象論をAufhebenして実体論を構築する研究論理を用いる。この否定の否定の論理Aと，実体論へAufhebenする論理Bとは，広く多用される研究論理で，筆者も前例に倣った。

1　序文

本研究は，以下の4つのテーマを次の5章に分割して述べる。第1テーマは音響ホールの音質に関する研究を述べた（第2章）。第2テーマは立体音響に関する研究で，3章は原理の究明，4章は音質に関する各論を述べた（第3，及び第4章）。第3テーマは両耳の音質の心理物理的伝達関数理論を誘導するための実験と解析的研究を述べた（第5章）。第4テーマは両耳の明瞭度の心理物理的伝達関数を誘導するための実験と解析的研究を述

べた（第6章）。また，第1章では序文，第7章では考察を述べた。付録には3つの章を付け加えた。これらの研究手法では，職業的被験者を訓練しThurstone尺度またはConstant Sum法あるいは明瞭度指数などの，何らかの加算則を持つ心理尺度と因子分析法を以て2，3，4章では音質を評価し，5，6章では音質または音韻の心理物理的伝達関数を数学的操作によって誘導し，積分式の形で加算則の成立する解を求めた。

本論文が工学的見地から記述しているとのご指摘に対して事前に一言。工学は物理学の子供で，また物理学の一分野が音響学である。音響学はそれが生れた時から音響心理学と音響生理学とを同時に誕生して来た。従って音響工学は音響心理学の恩恵を受ける立場にある。しかるに筆者の研究命題について従来の音響学は明快な回答を何ら用意していなかったのである。筆者は音響工学の必要上やむを得ず音響心理学の世界を新たに開拓せざるを得なかった。ここに述べる一連の研究は本来音響心理学が解決すべき問題であったが，当時の音響心理学の専門家は残念ながらその恩恵を与えて呉れなかったのである。筆者は工学の必要上から一歩，音響心理学の世界に足を踏み出した結果がこのような研究成果となったのである。

2　オーデトリアムのミクロな音質評価と音質の原理の解明

音響ホールの音質問題ではSabineらによって提唱された最適残響時間の概念があった。これは残響現象を時間軸だけに着目し，時間構造をマクロに見る経験則で誤差が多かった。筆者はこれに対して，座席毎の音質を音響心理学的にConstant sum法を用いて，「歯切れの良さ」「残響の快さ」「残響の長さ」「音の豊かさ」「音の柔らかさ」「総合点」の6種の音質について心理尺度を作ってミクロに評価した。この結果ホールの音質分布図が求まった。オーデトリアムのミクロな音質分布を直接観測する可能性と手段を筆者は最初に提供した。次いでこのような音質評価分布図の数値化された結果を現象論として扱い，オーデトリアムの音質問題の実体論にAufhebenする手段として因子分析法を採用した。因子分析の結果，2つの因子を得た。第1因子は「音源音と反響音との時空間構造での纏まりの良さ」を表し，第2因子は「音声の明瞭さ」を表した。両因子間の相関は全くなかった。この結果から第1因子の解釈は，ヒトは両耳聴効果により，原音の方向と反響音の到来方向とその時間構造とを同時に認識し，その「時空間構造での纏まりの良さ」を評価した結果この因子が「音の良さ」「豊かな音」を支配したと考える。第2因子は音声の明瞭さを支配する。互いの因子同志は独立である。以上の重要な2つの結論をえた。この結果は従来のSabineらの最適残響時間なる概念に基づく常識とは逆の結論で，「音の良さ」と「音声の明瞭さ」との関係は独立であり互いに両立する条件が存在するとの重要な結論に達した。

すなわちヒトは音響の時間と空間構造を含んだ，4次元空間の音を認識して居り，ホールの音質評価も4次元空間の認識に基いて評価すべき事を指摘した。また音声の伝達と音楽の演奏用にそれぞれ異なる最適残響時間を提唱していたSabineらの従来の時間構造 $Q(t)$ に限定した単純な物理的モデルによる着想は一面的見解として認める。しかし，筆者はホールの音質にとってより一層重要な要素は，音源と反響する音波の時空間 $Q(t, x, y, z)$ 構造がヒトの自然な聴体験にとって遙かに重要で，「音質の良さ」と「音声の明瞭さ」とは独立で両立できることを提唱した。この音響心理学上の重大な新しい原理的提案はその後の音楽ホール及び解放空間である競技スタジアム等の設計に多用され，また実証された。

欧米では，石造りのホールを先ず建築し，音響美学的欠陥を数十年から百年以上もかけて改築する習慣が常識であり文化である。逆に彼らは音質を予測する手段を持っていない。日本では筆者の手法で予測する手段を獲得したことと，ホールを単独の目的に使うのではなく多目的ホールとして利用するケースが多い。その為にホールの幾つかの重要な部分が可動方式となっている設計が多く見かけられる。筆者達が設計に関与しなかったケースを除いて，音響美学的な改修という習慣や文化は基本的使用目的の変更時以外で存在しない。この文化の違いの故に，改修の機会は無く，唯一度の機会しかないと言われるオリンピックスタジアムの設計に本原理が生かされてきた。ロサンゼルス，バルセロナ，長野オリンピックスタジアム等の音響美学的設計には，筆者のこの「音の良さ」と「音声の明瞭さ」とを両立可能な原理的アルゴリズムが採用されたのである。

3　立体音響の心理学的原理の探求

立体音響の研究では，第3章において立体音響の原理の探求を，第4章において最適な立体感を効果的に演出する為の各論をのべる。立体音響の実験は最初Fletcherが，3チャネル立体音響の実験を行い，田の字の方形配置した9名の音像位置の再現実験を行った。彼は両耳効果によって，音源の方向と遠近が再現できる事を定量的に証明したことになる。しかし彼は，なぜ「音が美しく聞こえるか」との命題には回答を与えなかった。第3章

はこの命題に対する明快な回答を出すことである。

研究手法として，立体音響の美を構成する感覚量をThurstone Scaleを用いて定量的に観測する方法を取った。立体音響の音の良さを表現する多数の「形容詞」の中から，尺度化可能な条件を満足する品質，例えば“Clearness”“Vividness”“豊かさ”“快さ”“音の分離”“残響感”などの9種類の品質を選択した。両耳受話器受聴と無響室における両耳解放受聴の2つの受聴形式で，合計14本の品質尺度で「立体音響の美しさの構成要素となる感覚量」を評価し定量化した。かように立体音響の「音の美しさ」を構成する要素品質の感覚量が客観的に定量化されたことは，「立体音響の音を美しく感ずる」という心理的現象を感覚量で以て厳密に定量的に陳述できたことに相当する。その結果，次のステップとして，この現象論から「なぜ立体音響の音が美しいのか」という実体論への展開またはAufhebenが容易になった。Aufhebenの手順として，すべての各品質間の相関係数を求め，次いでこの相関係数表を因子分析法に従って因子分析した。分析結果は，ただ2つの因子が分析され互いの相関係数は−0.42であり，残差因子は充分少なかった。

2つの因子のうち，第1因子は「音の美しさ」を表現する形容詞と音の分離と遠近を表す形容詞を支配していた。従ってこの因子は両耳効果による音の分離と方向と遠近を認識する効果と「豊かさ」「快さ」とは同義効果をもたらすことを意味し，これに方向性因子と命名した。次の第2因子は周辺の残響を抑制する因子であった。通常の自然聴空間体験では，対話中，意識している音を選択的に聞く一方，同一空間に充満している残響などを，その空間の広さとして意識しているものの，周辺の音を抑制し，聞きたい音だけを意識的に選択して聴取している。残響や周辺のノイズなどは認識する対象と無関係であれば，恣意にまたは無意識に選択し抑圧できる。実はこの選択・抑圧効果も両耳効果の重要な要素であったが従来音響心理学では見逃されて来た問題であった。

上記の2つの因子は何れも自然聴空間において，ごく自然に体験していることである。自然聴空間の聴取では，A：多数の音源と反響音がある場合，特定の音源を意識的に選択聴取することが可能である。一方，B：周辺の特定音以外の妨害音を抑制し排除する聴取形態も存在する。自然聴空間は常にこの選択聴取Aと抑制聴取Bとの2つの独立な聴取形態によって構成されている。則ち，自然聴空間の聴取とは，数々の音を選択すべきものと，排除すべきものとに恣意的に弁別して認識しているのである。ヒトは両耳聴効果によって音の空間構造の情報を得て，殆ど無意識に聴取形態を選択と抑制に分別しているのである。聴取の選択と抑制との間の相関係数は−0.42で，両者は負の相関でかつ殆ど独立である。

従来，音に関する科学や技術では，音の持つ時間構造の情報だけに注目し空間構造情報への関心が薄かった。本来ヒトは自然聴空間で，時間軸と空間軸の(t,x,y,z)の4次元空間情報を認識していたのである。古くWeberが，ヒトは両耳効果によって「音の方向と奥行きを認識する能力」がある事を指摘した。しかしHi-Fi再生において両耳効果が「原音の美しさを再現する能力」がある事までは予想していなかった。従来の1チャネル再生では空間軸情報が除外され時間軸情報だけを伝送した。2チャネル立体再生では，原音場の自然聴空間に近い聴空間体験を再現出来た。その故に，自然聴空間の「原音の場」で聞く「生の時空間情報を持った本来の美しい音」を立体音響方式が伝送し，再現し，認識されたと考える。以上の手順と論理をへて立体音響の心理的効果の原理解明の結論を得た。

4　立体音響の音質伝送品質に関する実験的各論

前章において「立体音響が何故美しい音を再生するのか」との原理解明を行った。本章ではこの原理に基づいて臨床上の問題すなわち最も効果的な立体音響の方法論を検討する。

第1実験

1チャネルと2チャネルとの比較を，周波数制限，非直線歪みの場合について比較した。判断基準の品質尺度は“自然度”“残響感”“分離”“広がり”などである。

何れのケースでも1チャネル（モノーラル）再生に比べて2チャネル（ステレオ）再生の方の品質が高く，1チャネルのHi-Fiであっても2チャネルのLow Fidelityの方が優れた音質を提供していることが判明した。

第2実験

録音現場で最も問題視される音源とマイクロホンの距離の問題を取りあげた。この実験は，また「データの安定性，再現性」の評価の為に，6ヶ月の間に同様の実験を3回繰り返した。またクライテリオン品質として「分離の良さ」を採用することにして，クライテリオン品質の安定性を確認した結果，何れのケースでも観測誤差として許容範囲内に充分収まることが確認できた。この確認データが発表された後，筆者の研究手段に対する一部の方々の心理尺度に対する不信感による手厳しい疑念と非難の声が減った。

第3実験

「分離の良さ」クライテリオン品質を用いて再生音場の音質分布図をConstant sum法を用いて評価した。マイク位置が一定の場合再生音場の「分離の良さ」の分布は2等辺三角形の頂点が最も良好な再生が出来ると言われてきた。評価結果は2等辺三角形の頂点が良好であることが判明したと同時に，左右へのズレも観測した。その結果は「馬の背型」分布になった。つまりスピーカに近い中心は良いが左右にズレると前方では却って後方でのズレより影響が大きい。後方に行くと全体の品質は下がるが左右のズレが少なくなる。

なおこの実験はConstant sum法で行ったが，刺激対数を減らす為に中央線をダブらせて2回実験をした。後に中央線で両者を重ねて見たが，両者の誤差は極めて少ない値であった。

第4実験

第3実験との関連で各座席毎にマイク間隔とマイク距離とを変えて，最適マイクロホン・アレンジメントを評価した。非常に大量のデータが観測された。結果として，この第2，3，4実験のデータが録音現場（臨床現場）で最も頻繁に使用されたと聞いている。なおこの時の心理尺度構成法は不完備型のサーストンの一対比較法を用いた。

評価結果は，一対比較法による距離尺度なので，定和法に比べて相対値となり，データの見方が多少面倒になる。しかし，概略をいうと，

1. マイク間隔が15 cmは立体音響効果がかなり少ない。ヒトの鼓膜間隔の平均値が17 cmであることからいうと，この場合は必ずしも効果的とは言えない。
2. マイク間隔40 cmから360 cmまでは総じて立体音響効果が大きい。
3. 音源とマイクの距離は重要で，一般的に音源に近い方が明確に立体音響効果が大きい。
4. しかしこの範囲内で時に聴取場所によっては良くない間隔と距離の組み合わせがある。

以上の結果になった。

本章の狙い

本章の狙いは立体音響の臨床面を対象とした。臨床の場として例えば立体音響の録音ミキサー，録音スタジオ設計者，ステレオ装置の設計者，狭い自動車内にステレオシステムを納入する音響メーカ，自動車会社，大型オーデトリアムの大型音響システム設計者などを対象にした。これらの現場で，彼らが簡単な比較実験を行うときの，「使いやすさ」「データの安定性」「データの再現性」「実験の容易性」「批評家への納得性」などを重視した。

5　音声の自然度伝達関数に関する研究

本章の目的は，電気的伝送系の周波数と減衰率（音量またはラウドネス）を規定した時に伝送可能な自然度（個人の特定の声質）を数値として予測する手段を提案することである。Schäfer（1938）や越川（1958）らが，周波数と自然度との関係を観測し，既に報告していた。しかしその後彼らは解析的な研究を行っていない。筆者はラウドネスによって自然度が大幅に変化する事を発見した。また最適ラウドネスで最大値を通り抜けて更にラウドネスを増やすと自然度は急激に減少する。これは平坦特性ばかりでなく，帯域制限でも同様である。従って，自然度はラウドネスと周波数制限の両者の関係で捉えるべきと考えた。以下第1実験から追加第4実験までを説明する。

第1実験　ラウドネスと自然度

実験結果は自然度は10 Soneまでは緩やかに増加し10 Soneを結節点として急速に増加し44 Soneで最大値を取る。それ以上のラウドネスの増加では自然度は急速に減少する。

第2実験　周波数制限の場合

1/4オクターブフィルターで，低域または高域をカットする。ラウドネスも同時に減少するのでラウドネス減少に伴う自然度の変化を混入させないため，ラウドネス減少分を計算で求め実験値で確認した値でラウドネス補正をした。HPFとLPFによる周波数のみによる自然度変化量を観測した。両者ともほぼ傾斜は同じで，両者の交点，則ち自然度が半分になる周波数は1,050 Hzであった。Schäferや越川の交点とほぼ同様の結果を得た。

第3実験　非直線歪みを加えた場合

2次歪みと3次歪みをそれぞれ独立に加えた。結果は−35 dBから歪みの影響が現れる。約2%の歪みで，音声の歪み可知限界の経験則に合う。また3次歪みの影響は2次歪みより大きい。これも経験則に合う。心理尺度で1 j.n.d.の差を与えるLPFとHPFの等価値を見ると，3次歪みでは−20 dB，2次歪みでは−15 dB，HPFでは380 Hz，LPFでは約5 kHzが互いに等価歪みと見なすことができる。

自然度の数学的解析における仮説の設定

第1仮説：周波数帯域を微少周波数帯域に分割し，そこに含まれる自然度成分の総和が全体の自然度を構成する。

第2仮説：自然度の周波数依存と，ラウドネス依存とは独立で，複合するとき，互いに相加則が成立する。

この2つの仮説に従い，以後数学的解析を行う。

解析第1段階：自然度密度関数の誘導（微分解）

基準化した自然度を Q とし，周波数について微分解を求める。$D_q=\partial Q/\partial f$ を求めこれを自然度密度関数と定義する。

解析第2段階：積分解

第1仮説による積分解の構成

i 番目の微少帯域の感覚レベルが z の時，これに含まれる自然度は，

$$\Delta Q_i(1-k_i(z)) \qquad \text{5-1 式}$$

と表示される。

従って全体の自然度は上述の第1仮説より

$$Q=\Delta Q_1(1-k_1(z))+\Delta Q_2(1-k_2(z))+\cdots$$

$$+\Delta Q_n(1-k_n(z))=\sum_{i=1}^{n}\Delta Q_i(1-k_i(z)) \qquad \text{5-2 式}$$

ここで Q は0から1まで基準化して，

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta Q_i=1 \qquad \text{5-3 式}$$

従って5−3式は次式のようになる。

$$Q=1-\sum_{i=1}^{n}k_i(z)\Delta Q_i \qquad \text{5-4 式}$$

しかるに，ΔQ_i は帯域幅 Δf_i 内の最大自然度要素であるから，自然度に関する自然度密度と帯域幅の積としてあらわされる。従って5-1式より，

$$\Delta Q_i=\frac{\partial Q}{\partial f}\cdot\Delta f_i \qquad \text{5-5 式}$$

5-5式を5-4式に代入して，更に一般に，k が f と z の関数であるとすれば，$k_i(f.z)$ として5-4式を f に関して積分表示をすると

$$Q=1-\sum_{i=1}^{n}k_i(f,z)\frac{\partial Q}{\partial f}\Delta f_i$$

ここで $\Delta f_i\to 0$ として，

$$Q=1-\int_0^{\infty}k(f,z)\frac{\partial Q}{\partial f}df \qquad \text{5-6 式}$$

を得る。周波数特性フラットで自然度最大のときのラウドネスを N_0 とすると，

$Loudness=N_0$ なら　　$Q=1$ となる。

このとき各帯域ともに

$$k_i(z)=0 \qquad \text{5-7 式}$$

となるはずである。

解析第3段階：積分解（ラウドネスとピッチの積）

第2仮説による構成

心理空間のラウドネスとピッチの微小変化を ΔN, ΔP とすれば，自然度の微少変化量は，

$$\Delta N\times\Delta P \qquad \text{5-8 式}$$

となる。この式はラウドネスの加算則そのものである。

誘導仮説の提案

そこで，第2仮説からの誘導仮説として自然度の変化量は，$\int\delta NdP$ 即ちラウドネスの微少面積と，自然度密度関数 $D_q=\partial Q/\partial f$ の積に依存する。との誘導仮説を作る。

すると，自然度の変化 $q(j.\ n.\ d.)$ と，減衰帯域の減衰量 α dB との関係を $q(\alpha)$ とすれば，上記の仮説によって，

$$q(\alpha)=a(f)\int_0^1\frac{\partial Q}{\partial f}\delta N_x(\alpha)dx$$

$$=a(f)\int_0^{\infty}\frac{\partial Q}{\partial f}\delta N_f(\alpha)F(f)df=a(f)C \qquad \text{5-9 式}$$

を得る，ただし，$\delta N_f=N_1(z_1(f))-N_2(z_2(f))$　　5-10式

ここで，x: 基底膜上の座標またはピッチ軸上の座標

z_1: 変化前の帯域感覚レベル

z_2: 変化後の帯域感覚レベル

N_1: z_1 に対応するラウドネス成分

N_2: z_2 に対応するラウドネス成分

$a(f)$: チャネルによって定まる比例定数

$F(f)$: Békésy の基底膜上の周波数分布図又は Stevens のピッチのメル表示

ここで，5-9式を検討するために，次式を計算してみる。

$$C=\int_0^{\infty}\frac{\partial Q}{\partial f}\cdot\delta N_f F(f)df \qquad \text{5-11 式}$$

第4追加実験による定数の決定

ここで，5-11式を解くために，幾つかの代表的チャネルについて，実験を追加して行う。目的はチャネル毎の，それぞれの定数 $a(f)$, C を求めるためである。

第4実験追加結果と定数の算出及び計算結果

各定数は本来1 Hz当たりの定数として定義すべきものと考えると，積分の中に組み込まれるべき性質のものである。

従って定義を次のように書き換える。

$$a(f)=\frac{\int_{f_1}^{f+\Delta f_1}\Phi(f)df}{\Delta f_1} \qquad \text{5-12 式}$$

5-12式から $a(f)$ を係数として扱わず関数 $\Phi(f)$ として定義し，5-9式に代入すると，

$$q(\alpha)=\int_0^{\infty}\Phi(f)\delta N_f(\alpha)\frac{\partial Q}{\partial f}F(f)df \qquad \text{5-13 式}$$

更に5-13式において $\delta N_f(\alpha)$ は本来帯域感覚レベル $z(\alpha)$ の関数であるから，改めて，$\delta N_f(z)$ と表示する。すると

5-6 式と 5-13 式より，

$$\int_0^\infty k(f, z)\frac{\partial Q}{\partial f}df=\int_0^\infty \Phi(f)\delta N_f(z)\frac{\partial Q}{\partial f}F(f)df$$

5-14 式

を得る。この式から

$$k(f, z)=\Phi(f)\delta N_f(z)F(f) \qquad 5\text{-}15\text{ 式}$$

となり，結局 5-6 式は次の式に集約できる。

$$Q=1-\int_0^\infty \Phi(f)\delta N_f(z)\frac{\partial Q}{\partial f}F(f)df=1-\int_0^\infty k(f, z)D_q\,df$$

5-16 式

以上の手順を経て目標の積分解が求まった。

理論値と実験値との照合

以上の手順を経て実験値と理論値との両者を照合した結果，極めて高い一致を見た。こうして，音声の自然度という個人が持っている固有の自然度を電気的に伝送する場合，周波数とラウドネスの関数として，解析的にその減少量を心理物理的伝達関数として扱う道筋が明確になり，電気音響的物理条件を規定すれば容易に推定可能となった。

本研究の論理

本研究は最初から音声の自然度伝達関数問題の解決を意図して解析的実験を計画した。その手法は H. Fletcher の加算則に基づく積分解を得るアルゴリズムを流用した。Fletcher との相違点は 1) 加算則のある明瞭度指数誘導の煩雑さを避けるために Thurstone Scale を用いた。2) 明瞭度密度関数に相当する自然度密度関数を定義したが，これ以外に周波数とレベルに関する固有の関数を定義したことの 2 点である。この本研究アルゴリズムでは，実験を徹底的に厳密に行い，論理の積み上げの中から問題が複雑になるにつれて，例えば数学的に積分定数を探すために，追加実験を行って現象論を疑問の余地がないまでに実験を積み上げる。そうした結果は既に現象論を完全に捉えたことになり，それ以後は，加算則にのっとり，純粋に数学的に解析を進め微分解から積分解を求めて，実体論まで Aufheben した。Fletcher の前例にならい音質の心理物理的伝達関数を積分解（すなわち加算則）で記述できたことは加算則の応用例として重要な意義を持つと考える。

応用例

本研究の応用例として，身近な物ではインタホンの音質設計がある。玄関を訪問する相手が誰か判定できるメリットは大きい。また，最近のデジタル携帯電話の帯域圧縮技術では，音声の自然度を変えないで極端に帯域を圧縮するが，この場合音韻伝達と音質伝達の両者を完全に両立させなければならない。この新しいシステムの設計に，筆者の基礎研究成果が今日でも生かされていると聞いている。またさらに本研究の高度な応用例として，非常に微妙な音を聞き分けられる立場にある放送用マイクロホンの設計にも重要な役割を持つ。また劇場やオーデトリアムなどのアナウンスシステムの設計にも役立つ。最近の話題として，著名音楽家が愛用しているマイクロホンは殆ど筆者のオリジナル設計であるが，これらは，個々の演奏家によって，彼らの音楽性に基づいた主張や個性的特徴を付ける工夫がなされている。このような場合にも筆者の基礎的研究の高度な応用例がある。

6　両耳の明瞭度指数推定理論の構築

Fletcher は電話回線網の設計に当たって，通話了解度の確保に関して長期間，綿密で厖大な研究を行った。しかし両耳の明瞭度の問題は完全に無視されたままであった。筆者は両耳現象を対象に研究する立場からこの研究を行い，ラウドネスパラメータなる新概念を提案して両耳の音韻の心理物理的伝達関数を誘導することができた。

第 1 実験と第 2 実験

何れも日本電電公社明瞭度試験クルーが無響室で両耳，左耳，右耳の 3 条件で，音源スピーカが正面にある場合と，右方向 14.5° にある場合とで試験を行った。可変条件は音量の減衰量 α dB だけで，スピーカ出力を 0 dB O.T.R. とし，音源から 2 m の線上で 4 名が同時に聴取試験を行う。減衰量は 0 dB から −10 dB ステップで −40 dB までとした。

実験結果は両耳が最も感度が良く次いで左耳（数年間の経験は左耳），右耳の順であった。この結果を Fletcher の国際標準の計算理論に従って計算した結果，左耳は熟練度が 1.2，右耳が 1 であった。両耳の明瞭度は以下に提案する方法で計算する。

片耳の明瞭度指数の計算（次式は国際基準の計算法に従う）

$$\bar{A}_m=\frac{1}{P_{l,r}}\int_0^\infty \bar{W}_m\{\underline{E}(\alpha, f)\}\tilde{D}(f)df=\bar{A}_m(\alpha, f)$$

where α in dB, f in Hz.　　6-1 式

ここで左耳と右耳の熟練度をそれぞれ，$P_l=1.2$，$P_r=1$ とする。

提案解の解析

実験結果の考察：両耳明瞭度計算理論の構築

（ラウドネスパラメータ法の提案）

6-1 式の計算法は既知の計算法で片耳だけの明瞭度を計算したもので，両耳の明瞭度は理論式がないので計算

手段がなかった。

筆者はここに新しく提案するアルゴリズムを導入してこの問題を解決したいと考えた。

両耳の明瞭度指数の誘導アルゴリズム

単耳の明瞭度指数はすでに述べたように，6-1 式にて表わされる。

$$\bar{A}_m=\frac{1}{P}\int_0^\infty \bar{W}_m\{\underline{E}(\alpha,f)\}\bar{D}(f)df=\bar{A}_m(\alpha,f)$$

where α in dB, f in Hz. 6-1 式

同様に，単耳のラウドネスは 6-2 式で表わされる。

$$\bar{N}_m=\int_0^\infty \bar{N}_f\{\underline{Z}(\alpha,f)\}\bar{F}(f)df=\bar{N}_m(\alpha,f) \qquad 6\text{-}2\text{ 式}$$

一方，両耳のラウドネスは単耳の 2 倍で定義されるので，次の 6-3 式で表わされる。

$$\bar{N}_b=2\int_0^\infty \bar{N}_f\{\underline{Z}(\alpha,f)\}\bar{F}(f)df=2\bar{N}_m(\alpha,f) \qquad 6\text{-}3\text{ 式}$$

ここで，m, b のサフィックスはそれぞれ片耳，両耳の意味である。

6-1 式から 6-3 式までの手順は，既に Fletcher, French, Steinberg, and Stevens 等によって完成された論理である。これを見て分かることは，両耳の明瞭度指数だけが，上記のように，未定義になっていた。

以下に述べる仮説，及びそれらに付随する数学的演算は，この前提条件を全て利用して新しいアルゴリズムを構築する。

仮説の設定によるアルゴリズムの構築

第 1 仮説　両耳明瞭度指数 A_b の存在を仮定する

筆者の研究はこの空白を埋める新しい方法を提案するものである。

まず，6-4 式のように，未定義の両耳の明瞭度指数が存在するとの仮説を設定する。

第 1 仮説　$\bar{A}_b=\bar{A}_b(\alpha,f)$　5-4 式

第 2 仮説　片耳ラウドネスパラメータの存在を仮定する

次に，片耳のラウドネスと明瞭度指数との間に，6-1 式と 6-2 式から，減衰量 α を消去して，6-1 式と 6-2 式とを結合させる。この結合に要するパラメータを 6-5 式のように数学的に定義し，G_m を単耳のラウドネスパラメータと呼ぶ。

第 2 仮説　$\bar{A}_m(f)=\bar{G}_m\{\bar{N}_m(f)\}$　6-5 式

第 3 仮説　両耳のラウドネスパラメータの存在を仮定する

第 3 仮説　$\bar{A}_b=\bar{G}_b\{\bar{N}_b(f)\}=\bar{G}_b\{\bar{N}_l(f)+\bar{N}_r(f)\}$
$=\bar{G}_b\{2\bar{N}_m(f)\}$　6-6 式

ここで N_l, N_r はそれぞれ左耳と右耳のラウドネスである。

以上の仮説は単なる論理的仮説の設定であり，数学的手順としても矛盾はない。

第 4 仮説　ラウドネスパラメータは片耳でも両耳でも等しいと仮定する

この仮説に論理的根拠はない。実験的に保証されるかどうかである。

第 4 仮説　$\bar{G}_m=\bar{G}_b=\bar{G}$　6-7 式

もし，この仮説が実験的に保証されると両耳の明瞭度指数が推定できることになる。

第 4 仮説による帰結

もし第 4 仮説が実験的に証明されるなら，未定義の両耳の明瞭度指数が次式によって数学的手段で求められる。すなわち，

第 4 仮説による帰結

$$\bar{A}_b(f)=\bar{G}\{2\bar{N}_m(f)\}=\bar{G}\{\bar{N}_b(f)\} \qquad 6\text{-}8\text{ 式}$$

第 4 仮説の実験による仮説の証明

実験結果はラウドネスパラメータが両耳，片耳共に同じ関数である事を示めした。したがって 6-7 式と 6-8 式の有効性が保証された。この保証結果は極めて重要な意義をもつ。すなわち，ラウドネスパラメータが片耳，両耳ともに同一関数であることを利用して両耳の明瞭度を容易に推定できることを意味する。

理論計算のプロセス

まず，両耳の明瞭度指数を第 1 仮説に従い次式で定義する。

$$\bar{A}_b=\frac{1}{P}\int_0^\infty \bar{W}_b\{\underline{E}(\alpha,f)\}\bar{D}(f)df=\bar{A}_b(\alpha,f) \qquad 6\text{-}13\text{ 式}$$

ここで $\bar{W}_b$ 関数は未定義（次項で定義する）だが，存在を仮定する。第 4 仮説が実験によってラウドネスパラメータが両耳片耳何れも共通であることが証明されたので

$$\bar{A}_b(f)=\bar{G}\{2\bar{N}_m(f)\}\equiv\bar{G}\{\bar{N}_r(f)+\bar{N}_l(f)\} \qquad 6\text{-}14\text{ 式}$$

から自動的に両耳の明瞭度指数が求まる。

W_b 関数の数値計算による誘導

以上の経過で両耳の明瞭度指数を求める道を作ったが，その都度ラウドネスを計算してからでないと，明瞭度を求めることが出来ない不便さがある。

筆者は，この不便さを救済するために，理想系での両耳の明瞭度指数をラウドネスパラメータを利用して数値計算で求めた。その結果を逆算して W_b 関数を誘導した。この誘導結果を利用して誰でも計算出来る簡単な計

算図表を提案した。

7　5章，6章の考察

5・6章に述べた論理は仮説帰納法を用いて実験値による現象論を数学的手法によって Aufheben して，最終的に音質と音韻の心理物理的伝達関数を誘導する理論を構成した。

この二つの章に述べた論理はいずれも加算則の厳密な応用例であり，心理尺度としての加算則の持つ機能をフルに利用した例と考える。音質の場合 Thursone の尺度はそれ自体が加算則を持っている。音韻伝達ではラウドネスと明瞭度指数と称される加算則のある関数が誘導できていた。その利便性を追求した結果，両耳の明瞭度指数を数学的操作によって誘導できた。この理論の構成によって音質を設計するとかオーデトリアムなどの音韻伝達を予測することが可能となった。従来欧米追従型の音響心理学の工学における応用技術はこの時点からソフト面で欧米技術を追い越すことができた。これら理論の応用が我が国のオーディオ技術の発展に多少でもお役に立てたかも知れないと考えている。

8　結び

本研究の発端は恩師永井健三先生から頂いた「立体音響の美しさの原理の探求」であった。当初この研究は一体どこから攻めたら良いのか，全く見当がつかない難問であった。印東先生の書かれたご本にお目にかかりその後立体音響研究会でご指導頂いてから一気呵成に研究が進展した。Thurstone Scale, Constant Sum Method, Factor Analysis など一連の心理尺度構成法や因子分析法などをご指導頂いて目から鱗が落ちた。先生のご指導の成果が2章のオーデトリアムの品質評価で Constant Sum Method と Factor Analysis を使い，3章の立体音響の原理の探求では Thurstone Scale と Factor Analysis を採用させて頂いた。また4章では Thurstone Scale と Constant Sum Method を採用させて頂いた。5章では音声の音質の心理物理的伝達関数の理論式の誘導に加算則の成立する尺度として Thurstone Scale を採用しその加算則と解析性とを徹底的に利用させて頂いた。6章では Fletcher 流の加算則の成立する明瞭度指数 (Articulation Index) と，同じく加算則の成立する Loudness の持っている解析性を徹底的に応用した。

6章は日本電電公社時代の音響研究室の三浦種敏先生のご協力で出来た実験をそののち十年ばかりかけてブラッシュアップしたものである。三浦先生からは，工学での心理実験の基本として，プロの心理実験被験者を常雇いして彼女達を徹底的に訓練する事を教わった。被験者たちはその後東北大学，松下通信工業においても採用した。プロを選別し，訓練して5章に述べた研究だけでなく，実際の音響ホールの評価や，多くの音響機器の評価に長く応援して貰った。工学や工業でわざわざ高い人件費を払ってこのようなプロを使うのは，データの安定性，再現性，信頼性などを追求するからであり，さらに数学的解析性をもギャランティーすることを要求される。一方人間が評価するので評価そのものに対する本質的不信感がある。品質の定義や内容，品質水準にアイマイさが残ることや，それがもとで水掛け論になることなどを極度に嫌われる。まして国際間のビジネスを行う場合，2章から6章に述べたような一連の研究成果に基づいたデザインコンセプトを持つか持たないかで決定的に優位な地位を得ることができる。

また一方学問的に見た場合，2，3，4章では，加算則のある心理尺度に基づく音質の評価とその数値結果を現象論と位置づけて，実体論への Aufheben の手段として因子分析法の導入によって重要な音響心理学的現象の原理解明を行った。5，6章では Fletcher の考案したラウドネスと明瞭度指数の加算則による積分解を参照して，両耳のケースでの音質伝達関数と音韻伝達関数の加算則による積分解を求めた。この研究もまた論理的に現象論を綿密に観測して，その後の数学的解析によって実体論への Aufheben を試みた。その結果として心理学的に重要な解析性の確認がとれた上に工学的応用の手段を提供した。特に後の二つの章ではこのような数学的解析を可能にした学問的背景として Fletcher や Stevens や Békésy たちの完成度の高い学問が存在していたことを忘れてはならない。筆者はこの完成度の高い学問の成果とアルゴリズムを利用して，5章・6章に述べたような新しいジャンルを開拓した。

この成果は（心理学的に変換された）周波数を横軸に（心理学的に変換された）レベルを縦軸に取って面積を求める（伝達される心理量の総量を求めるすなわち積分する）加算則に基づく計算理論で有名な Fletcher や Zwicker によるラウドネス計算図表の理論と比較ご検討頂ければ幸いである。5章・6章に述べた2つの極めて解析的な研究は明らかに工学への応用を意図したものだが，その研究の根幹となる中身は純粋に音響心理学そのものである。5章・6章の筆者の研究以前に音響心理学ではこのような研究は Fletcher がその基本的レールをひいたのである。残念ながら彼の研究成果は意外に知られていない。この2つの章で，筆者の研究が一種の異和感を与えるのはそのような事情もあるのではないかと

考えている。

さて，本論文でのべた音響心理学は，今日の現実の社会でも極めて重要な意義をもつジャンルである。最近全世界共通の携帯電話の方式をどう決めるかが，大問題になっている。デジタル時代に入って音声の性質の非常に細かい事まで精通していないと，こういう方式の設計ができない。問題が高度になればなるほど，特に5章で述べた基礎的研究が重要になってくる。むしろ現代の技術では，このような基礎的な音響心理学の研究を完全に咀嚼していないとデジタル技術の正解が作れない。しかるに，極く一部の人たちを除いてここに示したような研究内容が意外に広く知られていない。

筆者は既に69歳になったが，このような一見古い研究を今頃，埃を被った事を纏めようと考えたのは，実はこのような音響心理学の基礎的知見は，むしろ現代に於いて，一層新しいからなのである。古いにも拘わらず今日このような基礎的な学問をマスターしていないと新しいシステムの設計に困惑するのである。

以上述べたように，基礎的な研究の生命は想像以上に長いのである。そのような事情もあって，筆者は今を遡る40年前後の古い研究を今日になって，ある種の使命感をもってまとめることを決意したのである。

論文審査要旨

吉田登美男君提出の学位請求論文『両耳聴空間の音質・音韻評価と心理物理的伝達関数に関する研究』は，音響工学の立場にある著者が計量心理学的，実験心理学的手法を習得駆使し，その半生をかけ文字どおり情熱と精魂を傾注して行ってきた，①オーディトリアムの設計に不可欠なホール音響の音質評価，②立体音響音質の豊かさ美しさを追究する実験心理学的研究，③音響品質と音響伝送系の物理特性を結びつける心理物理伝達関数の理論的構築，ならびに④音声・音韻伝送における両耳聴明瞭度予測理論の構築等に関する真に独創的な研究の成果とその確かな足どりを纏め上げた，正に一大労作である。実験の数は20を越え，その一つ一つが入念に設計され，高精度の実験装置システムの上で丹念に実施された。結果として高質で膨大なデータが産出・整理・解析されていることは論文の随所でうかがい知ることが出来る。

本論文の構成を示せば以下の通りである。

緒言
第1章　序論
第2章　オーディトリアムのミクロな音質の認知と評価
第3章　立体音響の音質の美しさの認知と心理的評価に基づく原理の解明
第4章　立体音響の音質の心理的評価に関する実験的各論
第5章　音声の自然度の心理物理伝達関数の構築
第6章　両耳の明瞭度指数推定理論の心理物理的構築
第7章　結論と考察

第7章は，事実上，総括であるので，以下に第1章より6章までの概略を述べる。

第1章序論では，本研究が音声伝送では神格的存在と言われる H. Fletcher の思想の延長上にあること，しかしその明瞭度理論は単耳聴空間しか扱っておらず，両耳聴空間へ拡張されなければならないこと，通話品質のみならず全ての音響品質は最終的には人の心理評価によるべきこと，その評価は厳密な科学的方法論に則って計量処理さるべきこと，それを現象論と呼ぶならば，次にはその現象の原理の発見と理論式の構築を行い，実体論へと止揚すべきこと，そして最終目標は高品質を産み出す再生系の最適化理論の構築で，それを通して人の役に立つものをつくること，学問は役に立つことが大切で，そのためには常にオリジナリティーを第一とすべきことなど，著者の研究に臨む姿勢が熱っぽく語られている。

第2章では，まず，オーディトリアム設計に関し Sabine (1900) に代表される従来の理論がホール内部の体積と壁面の吸音状態によって定まる残響時間をマクロに捉え，これを最適化することしか考えていないこと，これでは座席毎で音質も音韻の明瞭度も異なってくる事実に対応できないこと，その原因は結局のところ，音源と受聴者間の方向性，言わば，音の空間次元が無視されていることにあると指摘する。そして著者は，ホール品質の設計は受聴者の主観的音響品質のホール内分布を抜きにしては出来ないと考え，ちょうど調査依頼のあった仙台市公会堂ホールにおける音響品質の座席空間分布を心理実験によって評価測定することにした。刺激音にはオーケストラ，テナー独唱，女声文章朗読等のテープ再生音を用い，品質測定の指標には定和法による心理尺度値が用いられた。定和法と一口に言っても被験者は座席をいちいち移動しては刺激音を聴き，その品質の印象を前の座席でのそれと比較判断して行くのである。結果の信頼性を高めるため，品質概念の把握および定和法の利用に関してはサーストンの一対比較法も併せ，別途入念な予備実験が重ねられている。

音響品質の評価項目は，「豊かさ」，「柔らかさ」，「歯切れの良さ」，「残響の長さ」，「残響の快さ」，「総合点」が

とり上げられ，それらのホール内分布を詳細に記述することが出来，ホール改造や新築の設計に資する豊富な知見が得られた。1例を挙げれば，女声文章朗読の「歯切れの良さ」感はホール中央正面に向かってステージ前面で最高によく両壁面側および後部座席に移るにつれて“馬の背”状に劣化するが，オーケストラ音での「豊かさ」や「総合点」は，前面では良くない。それはテナー独唱でも見られたことだが，ステージ直前では「残響の快さ」が抑えられるためである。

次には，上記6音響品質間に内在する構造を探るため，上の実験で得られた結果を利用して品質間因子分析を行い，「高級品質」（音色，纏まりの良さ）及び「明瞭さ」（歯切れの良さ）の2因子が存在し，とり上げた品質項目がこれら2因子の直交空間のなかに意味的整合性のある構造をもって明確に分離されることを見い出している。

第3章では，その結果を踏まえ，「立体音響の音質の美しさ」を追究するための必要かつ十分な評価項目は何かを決定するため，音楽評論家がよく使用する評価語彙を蒐集整理したり，2部合唱の1・2チャンネル再生音を比較させる実験を行ったりした。その結果，立体音の品質評価項目としては，①「vividness」，②「clearness」，③「臨場感」，④「多数音源の分離」，⑤「雑音と信号音の分離」，⑥「遠近感」，⑦「不快な残響感」，⑧「拡がり感」，⑨「快さ」，⑩「豊かさ」等，10項目が妥当であるという結論を得た。その上で，ミキシングレベルを2チャンネル立体再生からモノーラル再生に至るまで7水準に変化させ，それぞれのミキシングレベルのサーストン尺度値を上記の10品質項目別に求める実験を，ヘッドフォン着用での両耳分離聴条件と無響室自由音場での両耳同時聴条件とで行った。尺度値の定性的分析から，②④⑤⑧⑨⑩等のグループ，①③⑥等のグループ，そして⑦が分離された。第1グループは“音の分離が良いために生まれた高級品質”であり，第2グループは“臨場感や3次元的拡がり感があるために生まれた高級品質”，第3は“周辺に意識される不快な残響感”である。次いで，この解釈を確認するために，品質間因子分析を行ったところ，3因子が抽出され，因子構造の階層的分析から，“方向性の再現因子”F1と“背景音抑制因子”F2が有意な因子とされた。その命名には些か刺激錯誤の節がないではないが，「聴空間においてF1が立体音のよさを“図 figure”として浮かび上がらせ，F2が不快な残響や雑音を“地 ground”として沈ませるよう機能している」という結論は，それが著者の言う現象論から実体論へのAufhebenかどうかは別として，著者一流の独創的見解と言ってよい。

また，これらの成果が，以後，著者を始め多くの他研究者をして「分離の良さ」や「残響感」を指標とした再生系の物理的特性の改良を図る研究に進ませたという歴史的事実も付言しておかねばならない。

第4章では，その一部として，再生系の最適化を目標に著者が「分離の良さ」，「残響感」および「自然度」の心理尺度をインデックスにして行った実験が紹介される。「自然度」とは‘その人の音声がその人のそれらしく聴こえること’である。ハイパスフィルターを通して再生された音声は，一般にその遮断周波数が低いほど自然度は損なわれない。

いま，その遮断周波数を4水準選び，立体再生とモノーラル再生の場合について自然度のサーストン尺度値を求める実験を行うと，遮断周波数が150～600 Hzの間で1.2～0.5 s-j. n. d.も立体再生の方が自然度が高い。これは立体再生系とモノーラル系では帯域幅が2倍も違ってくるということに相当する。次いで「音声聴取を妨害する残響感」および「分離の良さ」について同様の条件で行った実験結果は，いずれも2チャンネル立体再生の方が断然優位であることを示した。また，「分離の良さ」と非直線歪みとの関係はクリルファクター11～30 dBといった悪い条件でも2チャンネル再生の方が優位であることを示した。立体放送が始まった当時，上記の周波数帯域と歪み率の問題は現実的制約であったが，これらの結果はNHK第1・第2放送での立体放送普及に役立ったと言われる。

ところが，当時，心理尺度など信頼できないと研究を疑問視する風潮がないではなかった。これに対して再現性を確認するための実験が行われた。立体音響効果を改善するためマイクと音源の距離をどうすべきかというNHKからの要望もあった。刺激音源は先述の2部合唱2チャンネル再生音とし，マイク～音源間距離を20 cm～5 mまで7水準に変化させ，「分離の良さ」に関するそれぞれのサーストン尺度値を求める実験を，両耳分離聴条件で2回，無響室2チャンネル同耳聴（解放）条件で1回行って比較し，いずれの場合も「分離の良さ」はマイク～音源間距離に対して同軌跡の減衰曲線を描き，その再現性は極めて高いことが保証された。

他方，音響品質の自由音場（講義教室）内分布を求めるのにサーストンの一対比較実験では前の座席での判断を記憶していやすく，問題がある。そこで定和法を用いることにした。結果の聴取座席位置に関する分布は，第

2章で述べたサーストン尺度による場合と同様，やはり“馬の背”状になった。数値そのものは定和法尺度とサーストン尺度では一致しないが，これは定和法尺度が‘比例’に関する判断に，サーストン尺度が‘差’に関する判断に，それぞれ基づくことに起因するもので，人間が行うこの2種類の判断結果の間には常に見られる非線形の形である。

こういった結果に力を得て，次に2チャンネル立体再生録音のための最適マイクアレンジメントを探索する実験を行うことにした。録音音場の音源～マイク配置は，正面音源に向かってマイク間隔を横15～360 cmの間で5水準，奥行き距離を70～320 cmの間で4水準とり，計5×4＝20ポイントを選定し，それぞれのポイントに対する「分離の大きさ」のサーストン尺度値を，再生音源からの聴取位置が中央線上1～3.8 mの間の各5席ごとに求める実験が行われた。結果の一例を述べれば，マイク間隔は40 cm以上なら行われた実験範囲すなわち240 cmまで音質の良い分離感が得られた。一方，人間の両耳間間隔が15 cm前後であるからマイク間隔もそれと同等にするのがよいという説は棄却されている。その他，この実験の結果は録音再生に携わる放送技術者に貴重な情報を与えた。

さらに第5章では，その前半部において，正調通話系を用いた一連の両耳分離聴実験を行い，①サーストン尺度値で表された音声の自然度がラウドネスレベルに関して非線形の関係にあり，全帯域濾波条件では約44ソーン（90 dB）で最大値をとり，500 Hz以下の低周波成分を遮断した条件では30ソーンで最大値をとり，いずれもそれ以上のレベルでは急速に低下する。②次に，ラウドネスを23.5ソーンに固定し，低・高域遮断条件の関数として自然度の変化を求めると，1,050 kHzを境に高・低両側に50%ずつ自然度損失が配分されており，カットオフ周波数が低音域200 Hz以下，高音域6 kHz以上では殆ど損失がない。この結果はカットオフに伴うラウドネス減少分を補正した条件で得られたもので，いわば‘純粋な’自然度周波数帯域特性である。また，③非直線歪みが自然度に与える影響についても実験が行われ，2次歪み3次歪みのいずれも－35 dB，歪み率で約2%が検知限となる，と報告している。

就中①②の結果は，音響・音声の品質というものが周波数特性と音量の両者が共時的に張る2次元的ドメインの中で決定づけられるべきことを改めて教えており，本章後半部で“自然度を周波数ドメインと結びつける心理物理的伝達関数（自然度密度関数）を求める”アルゴリズムに関し重要な示唆と資料を与えている。

さて，その自然度密度関数を得るために，著者はまず受聴能の限界帯域性を考慮し，第1仮説：周波数帯域を微小周波数帯域Δfに分割し，そこに含まれる自然度成分の総和が全体の自然度Qを構成する，をたてる。すなわち，

$$Q=\sum_i \Delta Q_i(1-k_i(z))$$

ただし，ΔQ_iはi番目の微小帯域に含まれる自然度要素の最大値，zは帯域感覚のレベル，$1-k_i(z)$は帯域感覚のレベルがzのときの有効自然度割合，である。いま，Qは[0, 1]の範囲で基準化されるものとし，その積分解を求めれば，

$$Q=1-\int_0^\infty k(f, z)\partial Q/\partial f\, df$$

が得られる。ここで，$D_q=\partial Q/\partial f$が目的の周波数ドメインでの自然度密度関数であるが，数値的には上記②で実測された自然度周波数帯域特性をf(in Hz)で（偏）微分して得られる。

ところで，この（実測）自然度密度関数はラウドネスレベルが23.5ソーンの時のものである。総体としての自然度は，前述①で見たように，ラウドネスの変化によっても制限を受ける。上記Qの積分解はこの制限にも耐えうるものでなくてはならない。そこでいま，誘導仮説：微小帯域においてα dB減衰させたときの自然度の変化量$q(\alpha)$はラウドネスとピッチの微小変化の総体$\Delta N \times \Delta P$と自然度密度関数との積に依存する，とすると，

$$q(\alpha)=a(f)\int_0^\infty D_q\, \delta N_f(\alpha)F(f)df=a(f)\cdot C$$

ただし，$F(f)df$はピッチ（Mel）軸上の微分，$a(f)$はピッチ軸上の変化の総体を自然度へ変換するときの比例定数（自然度の固有関数と呼ぶ）である。

従って，ちょうどあるメル帯域でα dB減衰させたときの自然度の変化を心理尺度値で求め，両者の間に一定の関係が見られれば$a(f)$およびCを定める道が拓ける。著者は250 Mel単位のメルバンドフィルターを用いて394–670 Hzおよび670–1,000 Hzの帯域幅内でα dB減衰させた時の自然度変化のサーストン尺度値を求める実験を，帯域外マスキングのある場合とない場合とで行い，ある程度満足できる結果を得，それぞれの場合の定数$a(f)$およびCを定めている。

ところで，自然度固有関数$a(f)$は本来fの関数であり，より広域で確認され，決定されなければならない。そこで今度は，メルバンドフィルターを低域から広域に

向けて順に $i=1$〜8 番目まで累積的に，しかしラウドネス減衰量は一定に保ちつつ挿入し，低域音が常に聞こえている状態になるよう配慮して，それぞれの場合の自然度のサーストン尺度を求め，隣り合う自然度の差をとってこれらをメルバンド中心周波数の関数としてプロットすると見事な比例関係が得られ，これにもとづき 1 Hz 当たりの固有関数 $a(f)$ の周波数特性も求めることができた。これはその性質上，よく知られている周波数弁別域曲線と対応するはずである。結果は見事な一致を見せた。

さて，これで上の誘導仮説の妥当性も同時に保証されたことになるが，その基底には，第 2 仮説：自然度の周波数依存とラウドネス依存とは相互に独立であり，もし複合するなら互いに加算則が成り立つ，がある。その検証を目的として，低中域の 3 通話帯域内で再生した音声刺激をさらに 1/2 オクターブバンドフィルターにより濾波し，その減衰量を $\alpha=0$〜15 dB 変化させ，各減衰量に対する自然度のサーストン尺度を求める実験が行われた。得られた自然度の尺度値を減衰量のラウドネス変換値（ソーン）に対してプロットすると，いずれの場合も比例関係が成り立つことからこの仮説も妥当であるとされた。この妥当性は，さらに 394–670 Hz (500〜750 Mel) メルバンドを $\alpha=0$〜32 dB 減衰させた場合でも 24 dB までの範囲で再確認され，行われた最大減衰量 32 dB 辺りから非線形性が認められることが分かった。上記加算則仮説は，中程度のラウドネス水準では，間違いなく成立すると言える。

最後に第 6 章では，ホール内受聴で音響・音声品質の「豊かさ」や「快さ」と相関が高いのは音源の「分離の良さ」いわば「明瞭度」と「遠近感」であり，また，第 2・第 3 章の因子分析でも「歯切れの良さ因子」と「方向性の再現因子」が抽出されている。一方，電話音声の伝送品質に関しては，従来，明瞭度理論が単耳の場合しか存在していない。そこで著者は「明瞭度」に焦点を合わせ，「両耳受聴における明瞭度」の予測理論を心理物理学的に構築することにとりかかる。

まず，単耳聴の場合の明瞭度指数 A_m は，国際基準にしたがい，

$$\bar{A}_m=1/p\int_0^\infty \bar{W}_m\,\underline{E}(\alpha,f)\bar{D}(f)df$$

ただし，p は受聴者の熟練度

$\bar{W}_m$ は明瞭度重み関数（上付線は心理量たることを強調）

$\underline{E}(\alpha,f)$ は実効感覚レベル（下付線は物理量たることを強調）

$\bar{D}(f)$ は 1 Hz 当たりの明瞭度指数貢献度（上付波線は仲介関数たることを強調）

ところで，単耳のラウドネス $\bar{N}_m$ は $\bar{Z}(\alpha,f)$ を帯域感覚レベルとして，

$$\bar{N}_m=\int_0^\infty \bar{N}_f\{\underline{Z}(\alpha,f)\}\bar{F}(f)df=\bar{N}_m(\alpha,f)$$

両耳のラウドネス N_b は，

$$N_b=2\int_0^\infty \bar{N}_f\{\underline{Z}(\alpha,f)\}\bar{F}(f)df=2\bar{N}_m(\alpha,f)$$

ここで問題は，両耳聴明瞭度指数 $\bar{A}_b$ をなんとか単耳ラウドネス $\bar{N}_m$，つまりは人間サイドの音声スペクトル，そのピークファクター，最小可聴値，臨界帯域幅，そして再生系サイドの電気音響特性等から定まる実効感覚レベル $\underline{E}(\alpha,f)$ から予測することができないかである。それには，まず単耳聴明瞭度指数同様，両耳聴明瞭度についても，

$$\bar{A}_b=1/p\int_0^\infty \bar{W}_b\,\underline{E}(\alpha,f)\bar{D}(f)df$$

と定義し，次に，

$$\bar{A}_m(f)=G_m(\bar{N}_m(f)),\ \bar{A}_b(f)=G_b(\bar{N}_b(f))$$

を充たす，単耳・両耳のラウドネスパラメーター G_m・G_b が存在し（第 3 仮説），さらに，

第 4 仮説として $G_m=G_b=G$ を仮定すると，

$$\bar{A}_b(f)=G(2\bar{N}_m(f))=G(2\bar{N}_f\{\underline{Z}(\alpha,f)\}\bar{F}(f)df)$$

となって，両耳明瞭度指数が単耳明瞭度指数から求められることになる。

ただ，$G_m=G_b=G$ の仮定は全く恣意的な仮定であり，実証されねばならない。そこで著者は，音源が正面および右 14.5 度方向 2.2 m の位置に置かれた条件，および音源と反対側 24.5 度方向 2.7 m の位置に 60 dB の Hoth ノイズを配置した条件で，音声減衰量 $\alpha=0$〜50 dB のそれぞれに対する単耳聴・両耳聴の場合の明瞭度測定実験を行い，①すべての明瞭度指数の実験値がラウドネス軸上で同一軌跡上に並ぶ結果を得，ラウドネスパラメーター $G_m\cdot G_b$ が同一関数に従っていることを示した。$G_m=G_b=G$ の仮定は問題なく検証されたことになる。両耳分離聴実験でならともかく，自由音場での両耳同時聴実験でこの結果が得られたことは驚異的な発見である。また，②同実験で得られた両耳明瞭度指数の実験値は単耳明瞭度指数の実験値および三浦（付録：1 “通話品質” 参照）による単耳明瞭度指数の実験値を使って計算された予測値とよく一致することを得た。そしてまた，その流れから予測されることであるが，③従来の明

瞭度理論による明瞭度（%）指標の上でも整合性のある結果が導かれている。これら一連の結果により，拡張構築された両耳聴明瞭度理論は見事に実証されたと言える。その学術的価値は極めて高い。

しかも，$\bar{A}_b(f)$ の予測計算は実際には非常に煩雑なのであるが，それを避け，実効感覚レベル $\underline{E}(\alpha, f)$ から簡便に図式計算で求める方法（ラウドネスパラメーター法）を開発している。そしてまた，それによって得られた両耳明瞭度から逆に両耳・単耳明瞭度重み関数 $\bar{W}_b$，$\bar{W}_m$ を求める方法を詳述しており，それらの実用的価値も高く評価されよう。

以上，本論文の概要と一応の評価を述べてきた。その特色を一言で言えば，両耳受聴における音質・音韻の再生品質の解析と評価，ホール音響の時空間的特性の解析と評価，および両耳明瞭度理論の構築に関し，従来の物理工学的研究の流れをよく知りつつ，一貫して実験計量心理学的方法—とくに被験者の判断を定和法やサーストンの一対比較法により心理量として数量化し条件分析あるいはモデル構成を行う方法—を導入し，重要な知見を得ていることである。心理量や因子分析法を建築物の音響設計や音響機器の設計に利用することなど，今でこそ一般的になっているが，著者が本研究を始めた 1950 年代は，すくなくともわが国では未だ端緒についたばかりであった。本研究はそうした開拓時代の息吹きを自ずとよく伝えており，著者の研究思想，熱意と勇気には心からの敬意を表したい。

用いた因子分析の具体的な技法の記載や一部実験手続に関する記述には不足もあったが，著者は方法・技術の利用にあたっていろいろと工夫を凝らし（例えば，最適マイクアレンジメント実験における一対比較法の不完備型デザインや定和法における比率下敷きの利用など），また，いくつもの本実験で事前に入念な予備実験を行っていること，さらに，これでもかこれでもかと確認実験を行っているあたりは，実験心理学専門の立場から見ても頭が下がる。ただ，一つ遺憾であったのは，録音マイクの位置と「分離の良さ」の定和法による評価実験の解析において，観測比率判断値行列に適用されたカイ自乗検定が理論的に不適切であったことである。しかしそれはむしろ定和法に習熟するための予備解析においてであり，研究全体の流れを損なうものではない。

全体を通してみて，各種音響品質のホール内分布を明らかにしたことや音質・音韻の再生品質の心理物理特性を次々に明らかにして来たことがもつ実用的価値は真に大きなものがある。ここにその研究成果と社会的応用との具体的関連性が述べられていれば，それだけで学位論文として通ると言ってよい。しかし，何と言っても本論文の白眉は，第 5 章　自然度密度関数の決定とその実験的検証，および，第 6 章　両耳聴明瞭度理論の構築とその実験的検証，であろう。

改めて言うまでもなく両耳聴自然度密度関数は両耳受聴における心理的聴空間と物理的音響空間とを橋渡しする理論的に重要な関数である。その意味で，同関数をめぐる理論的かつ実験的な知見は学術的意義が高いばかりでなく，アナログ・デジタル電話回線・インタホン等の伝送特性に関する設計方針の策定，パブリックアドレス放送，ホール・ミュージアム等の拡声装置の伝送特性や音量の決定等に広く利用され，その応用価値は今日でも極めて大きいものがある。

他方，単耳聴明瞭度理論を両耳聴明瞭度理論へ拡張構築すべきことは，長らく気付かれずにいた。その意味では，本研究は H. Fletcher (1953) 以来の快挙である。著者の慧眼と構築を完成させた力量を讃えるべきであろう。そしてまた，今日まで積み上げられてきている明瞭度関係の資料は極めて潤沢である。新理論の検討および将来にわたる応用的適用には事欠かない。結果としてこの成果はロサンゼルスおよびバルセロナのオリンピックスタジアム，諸オーディトリアム，はては両国国技館といった大規模建設物の新築・改装設計等に際して広く応用されることになった。本研究の社会への実用的貢献度は十分に高いと言わねばならない。

以上，本論文は正に著者の半生に亘る，真に高質な学術的・実用的研究の集大成と言える。その一つ一つが真に高く評価さるべきものであることは繰り返し述べた。著者は，すでに 1958 年，工学博士（東北大学）を取得しているが，本論文にはその学位請求論文の一部が重複引用されている。その内容と程度は，緒言の中に明記するよう，事前にお願いした。それを見れば分かるように，引用個所はいずれも論文構成の必要上なされたもので，毫も本論文全体の価値を傷つけるものではない。

以上の所見から，本論文は著者が博士（心理学）の学位を授与されるに十分値するものであることを認める。

心理学博士（平成 11 年 2 月 24 日）

乙　第 3254 号　中野　敬子

Type A 行動パターンの行動分析学的研究