

## は じ め に

わたくしたちの研究プロジェクトは、自然音のなかにふくまれる可聴域上限（20kHz）をこえ音としてはきこえない超高周波成分が、快適性を指標する脳波  $\alpha$  波パワーを増大させるとともに、音をよりうつくしく快適に感受させる効果をもつことを発見し、この現象をハイパーソニック・エフェクト（Hypersonic Effect）となづけた。このハイパーソニック・エフェクトの発見について、わたくしたちは1991年10月、ニューヨークでおこなわれたオーディオ・エンジニアリング・ソサエティ1991年大会で最初の報告をおこなった。

いうまでもなく人間に知覚できる音の周波数上限が20kHz以下であることは数十年来の学界の定説であり、すでに一般常識になっている。たしかに、これを疑問視する見解が一部にねづよく主張されてきたものの、それを支持する実証的な根拠はこれまで提出されていなかった。そのような状況のなかでわたくしたちがおこなった、ハイパーソニック・エフェクトについての報告は、従来の定説の限界を実証的にしめすものであったことからたかい注目をあつめ、おおくの質問、コメントがあった。しかし、わたくしたちの主張をくつがえす反論はひとつもなかった。そしてこの報告は、人間の音知覚についてのあたらしい発見として、日本およびアメリカの新聞で報道されるところとなった。

わたくしたちはその後、ハイパーソニック・エフェクトに関連するかずおおくの学会報告をつづけており、それらに対して、国内外の研究機関からの論文請求をはじめ、複数の研究機関における追試、実験システムの見学、共同研究の申し込みなどがつづいている。一方、電子機器産業界も顕著な反応をみせており、ハイパーソニック・エフェクトを考慮したプロ用および民生用オーディオ機器の開発と、その一部の市販とがすでにはじまっている。こうした状況は、テレビ、新聞、雑誌などのジャーナリズムで頻繁に紹介され、それらを契機にさまざまなアプローチが学界・官界・産業界・一般社会からよせられている。

わたくしたちの研究プロジェクトではひきつづき、現在もハイパーソニック・エフェクトについてさまざまな基礎および応用研究を展開し、すくなくとも知見を蓄積してきた。とくにこの研究は、その基礎から応用までを、すべて日本オリジナルの発想と技術とに依拠して成果をあげてきた。その内容が海外の情報ネットワークから国内に波及するパターンをかたちづくっていないため、日本で充分ひろく周知されるにいたっていない。そうしたことから、この研究全体にわたって、最新の情報や装置系の詳細などについての記述をふくむ論文の要求がたかまっている。そこで、このような学術的・社会的要請にこたえて、ハイパーソニック・エフェクトについてのこれまでの知見を集大成するとともに、最新の研究成果をもちこんだこの研究報告「可聴域上限をこえる高周波の生理的・心理的效果（ハイパーソニック・エフェクト）について」をまとめることにした。

なお、この研究をおこなっている「高度化教授・学習のためのメディア機能の研究開発」プロジェクトは、「放送教材の改善のための音響効果に関する研究開発」（平成2～3年）、「多媒体（マルチメディア）による教授・学習過程の多元的評価分析」（平成4年度）を継承するもの

で、平成5年度からは、「電子メディアによる学習環境高度化の研究」に発展的にひきつがれている。そのアプローチは、さまざまなメディアおよび関連科学技術を活用して、人工的メディアと人間との調和状態を脳の反応から直接しらべ、大学教育がもつめるメディアを利用した高度な教授・学習をより効果的かつ安全に実現することをめざしている。こうした研究戦略は、脳科学、情報科学の発展により、メディアから供給される音響映像の影響を脳をきずつけることなく検出・分析・評価するという待望されてきた手法の開発可能性が射程にはいつてきたことを前提とするものである。これによって、従来のいわば“勘と経験”だけにたよるよりも格段に学習効果のたかいメディア教材や教授・学習方法をうみだすことが期待できる。その一方では、人工メディアに接する頻度がたかまるにつれ、これまで潜在的にしかあらわれていなかった電子的映像音響と人体との不適合による影響が一気に顕在化するおそれがでてきている。感受性の鋭敏なわかい世代が長時間接する教育メディアからこのような負の要因を早期に検出・排除し安全性を確保することも、教育行政上緊急の課題といえよう。

人工メディアが人間生活のあらゆる側面へのかかわりをふかめている現代において、こうしたメディアと人間との適合性について科学的・実証的・総合的な研究をおこなうことは、おおきな社会的需要をもつものでもある。ハイパーソニック・エフェクトについての研究は、以上のような目的をもつこのプロジェクトの中心的な研究課題としてとりくまれているものである。

#### 「電子技術による学習環境高度化の研究」プロジェクト

主 査 大橋 力 (放送教育開発センター教授)

副主査 仁科エミ (放送教育開発センター助教授)

小田 晋 (放送教育開発センター客員教授  
・筑波大学社会医学系教授)

柴崎 浩 (放送教育開発センター客員教授  
・京都大学医学部教授)

山崎芳男 (放送教育開発センター客員教授  
・早稲田大学理工学総合研究センター教授)

河合徳枝 (財団法人国際科学振興財団専任研究員)

不破本義孝 (財団法人国際科学振興財団専任研究員)

## 第 I 部 この研究の視点

人間の感受性に影響をおよぼす音＝空気振動の周波数範囲、とくにその上限が20kHzをこえるかどうかについては、現在なお、よく一致した見解がえられていない。アカデミックな立場の正統的な見解は「人間は20kHz以上の周波数成分を音として感知することはできない。また厳密に制御された心理学的音質評価実験でも16kHz以上の高周波の存在は音質差として検出されない。よって20kHz以上の周波数成分は人間の感受性とは無関係である」と要約されよう。これに対して、高度に洗練された商業音楽の制作に実際にたずさわっている現場のミュージシャンやミキシングエンジニアたちの見解は「20kHz以上の高周波成分はあきらかに音質に影響を与える」というものである。第 I 部では、この研究のきっかけのひとつになっているこのような見解の対立をうんだ背景と、この問題に対するわたしたちの研究戦略についてのべる。

### 第 1 章 人間に感じとることのできる空気振動周波数範囲についての従来の研究

#### 1.1 可聴域上限に関する音響学および聴覚生理学的研究

わたしたちの耳には、すべての空気振動がきこえるわけではない。日本工業規格 (JIS) 用語<sup>1)</sup>では、弾性波のうち正常の耳をもつひとがきくことのできる周波数範囲のものを“音”と定義しているが、アメリカ標準 (ANSI) では一般にはきくことのできない超音波や超低周波音もふくめてすべての弾性波を sound すなわち音として定義している<sup>2)</sup>。

人間に音としてきこえる空気振動の周波数についての最初の本格的な音響学的研究は、1830年にフランスのサバルが、ファンと歯車とをくみあわせた装置を発音源にして実験をおこない、8 Hz～24kHz (24000Hz) の音がきかれると報告した研究にさかのぼるといわれている。しかしながら20世紀以前の研究は、実験音をパイプオルガンや音叉などによって発生させるほかに方法、とくに計測法におおくの限界があったため、かなりあいまいな結果しかえることができなかった。その後、電子技術の発展とともに、精度のたかい測定がおこなわれるようになり、1903年、ウィーンが受話器をもちいて50Hz～16kHz という可聴域を報告した。これはベル研究所からのより精密な報告がなされるまでは、一般に評価をえていた。1920年代に可聴域に関する研究はひとつのピークをむかえ、ベル研究所を中心に複数の研究がなされた (図1.1)。1922年、ウェーゲルが可聴域値をみずからの実験によって上限20kHzと報告<sup>3)</sup>し、さらにベル研究所ではこの値を再検討して、個人差・年齢差はあるが平均的な数値として、人間の最高可聴音域は20kHzであると提唱した。こうした研究にもとづいて、ロビンソンとグッドソンは純音

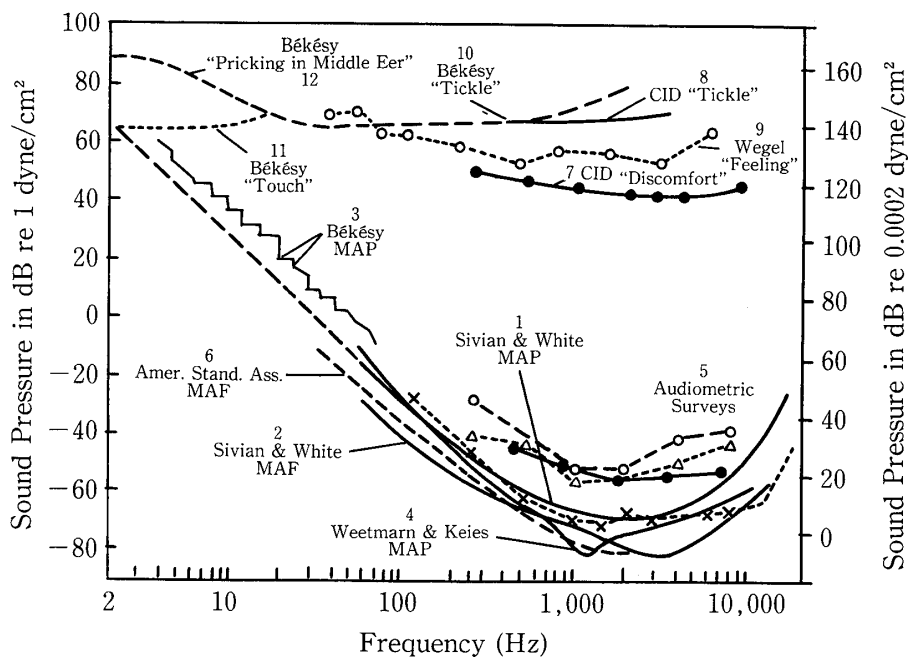


図1.1 可聴域上限に関する諸研究<sup>4)</sup>

の音のおおきさについての等感覚曲線 (図1.2) を発表した<sup>5)</sup>。こうして受話器と空気伝導とによる測定をもとに人間の可聴域の上限は20kHz という定説ができあがっていった。それらは音楽、会話、音声に必要な伝送帯域の最大公約数的な値といえる。とくに音楽に関係する記録・伝送帯域に注目したものとしては、スノウの報告<sup>6)</sup>がよく知られており、特定の楽器については15kHz における高域制限による音質変化が検知されうるとしている。これらの研究は、その後

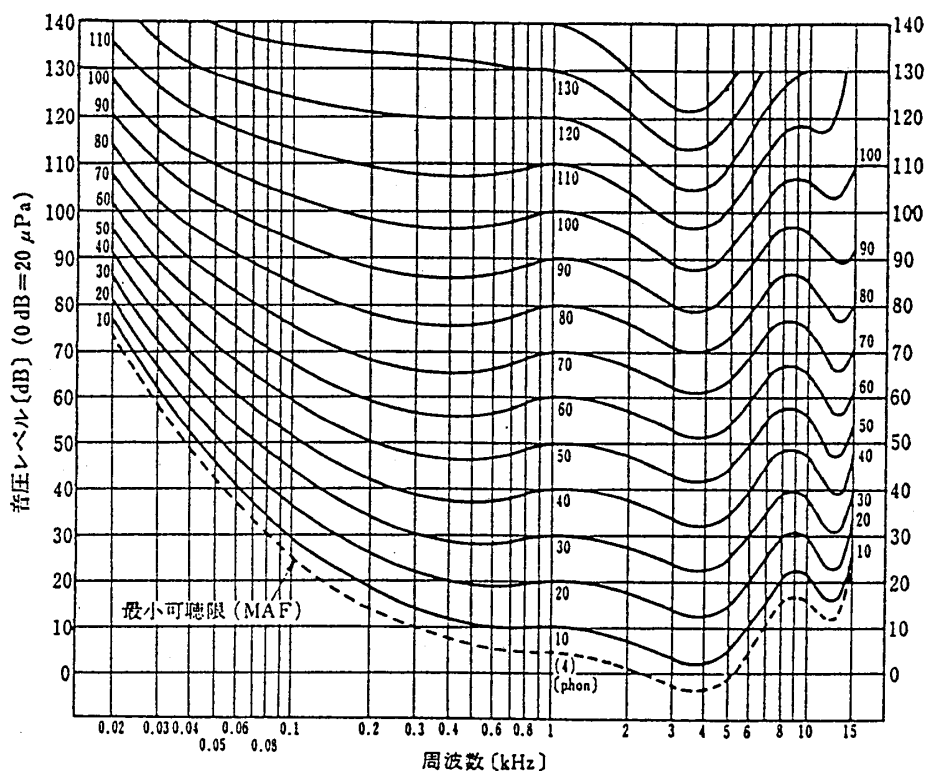


図1.2 純音の音の大きさの等感覚曲線 (ロビンソン-ダッドソン曲線)<sup>5)</sup>



の電気通信・記録技術の発達と関連して、信号伝達帯域の拡大とコスト増大との二律背反的な矛盾をどこで妥協させるか、という問題を解決するやくわりに任じる傾向をつよめる途をたどることになった。

一方、聴覚についての生理学・解剖学的研究からも可聴域上限へのアプローチがおこなわれている。たとえば、ベケーシは内耳内の基底膜の共振周波数について実験値を発表し、そのなかで理論的には内耳内基底膜の共振周波数が20kHz以上にもおよぶことを示唆している<sup>7)</sup>。それにもかかわらず可聴域上限が20kHzであるというのは、中耳の機構がそれ以上のたかい振動数を能率よく伝送できず、内耳まで高周波がつたわらないためであると説明している。一方、中耳の機構をバイパスして直接、内耳の前庭窓に機械的振動をあたえると、人間は50kHzでも、100kHzでも音として感じるができるといわれている。

また最近になって、この中耳の伝達メカニズムについてあたらしい説がとねえられている。それによると、たしかに中耳の3つの耳小骨（槌骨、砧骨、鐙骨）が機械的なフィルターの役割をはたしており、20kHz以上の成分は内耳にはつたわらない。しかしこの機械的フィルターは非線形な動作をし、たとえば正弦波を入力したとすると、信号の正のサイクルと負のサイクルのうごきがことなり、高調波歪を生じる。このたかい周波数の高調波歪を内耳が検知することによって、音のこまかな位相の検知や音源の正確な定位が可能になるという<sup>8)</sup>。これによると、特に非定常性のたかい音については、こまかな位相のちがいが中耳内ではたす役割は無視できないものになるとかんがえられる。また、人間の頭蓋骨を直接振動させるトランスデューサをもちいて聴覚器官によらない聴感覚いき値が測定され、20kHz以上の振動がなんらかの聴感覚をおこすことがしめされている。

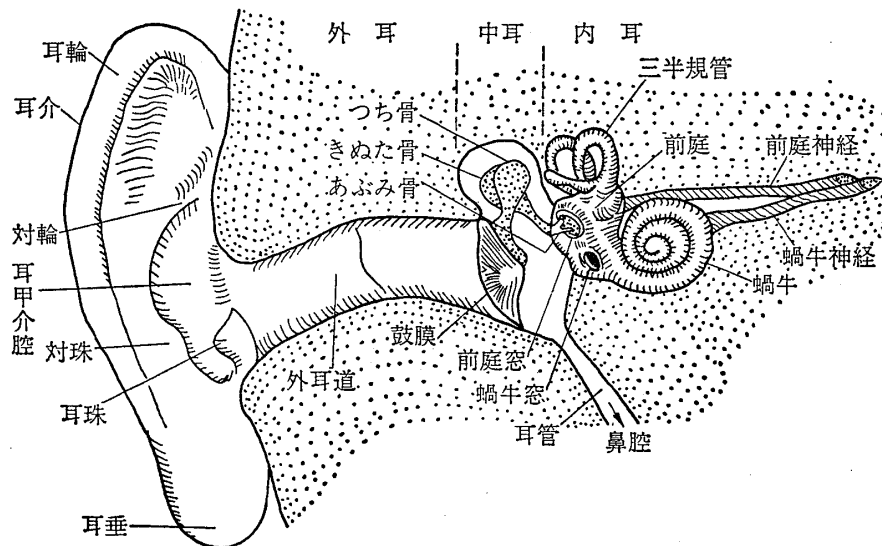


図1.3 人間の聴覚器官の構造<sup>9)</sup>

## 1.2 デジタル・オーディオ規格決定のための一連の研究

デジタル・オーディオの実現が射程距離にはいつてきた1970年代からは、あたらしい電気通信・伝送の分野から通信・伝送の効率化という要請を背景に、音声音響信号の周波数帯域を確認する研究がおこなわれた。とくに、デジタル・オーディオのサンプリング周波数決定に

関連して、さまざまな詳細な研究が積みかさねられた。

これらはすべて、一対比較法による心理実験である。呈示音に電氣的再生音をもちい、これを電氣的な高域制限フィルターにより操作することで、一対比較実験を構成している。そして高域制限フィルターの制限開始周波数を変化させ、再生音に対する反応を心理的反應として検出する方法がもちいられてきた。日本の村岡<sup>10)</sup>やドイツのブレンゲ<sup>11)</sup>をはじめとするおおくの研究による結論はほぼ一致して、可聴周波数の上限を16kHz以下としている。

このように、人間に音としてきこえる空気振動の周波数上限は、20kHzをこえない。また、音楽を構成する要素のなかの高周波成分が音質知覚におよぼす影響をCCIR (Comité Consultatif International des Radio Communications) が公式にさだめた心理学的音質評価法<sup>12)</sup>に準拠してしらべると、15kHz以上の高周波成分の有無は、音質のちがいとして識別されない。このような根拠によって、現在、国際的に、オーディオ信号の周波数上限は20kHzで十分とされ、もっとも主要な音楽ソースになっているCD (コンパクト・ディスク) のサンプリング周波数は、44.1kHz (理論的に22.05kHzまで伝送可能)、DATのサンプリング周波数は、48kHz (理論的に24kHzまで伝送可能) にさだめられている。

### 1.3 音楽ソフト制作の現場における高周波対応機材への欲求

一方、レコーディング・スタジオを拠点に活動しているミュージシャンやミキシング・エンジニア (ミキサー) たちのなかには、20kHz以上の高周波成分を電子的に強調あるいは制限すると音質が変化すること、そして可聴域をこえる高周波までカバーした特性をもつ機器が音質的にすぐれていることを主張する意見がねづよく存在している。ところが、そうしたひとびとを被験者として公式法に準拠した音質評価実験をおこなっても、15kHz以上の高周波のある・なしは音質差として検知されない<sup>10)</sup>。それにもかかわらず、この実験結果に納得できないアーティストやミキサーがすくなく存在し、現在、スタジオ用デジタル・オーディオ機材には、サンプリング周波数96kHz以上のものが、音質のよさを評価されてよくつかわれている。つまり、可聴域をこえる高周波の感性的な反応については、学術側の明示的・客観的・普遍的なアプローチと、芸術・技術側の非明示的・主観的・個別的な認識との結果が一部で対立している (図1.4)。

録音芸術にたずさわるアーティストおよびエンジニアは、たとえていえば音の調理人のようなものである。音質造成にあたっての操作内容とその効果との因果関係を十分明確に把握し、ある水準以上で確実に制御できなければ淘汰の対象にもなりうるだろう。いいかえれば、かれらの業務が支障なく遂行されている背景として、感性反応という非明示的で予測困難なプロセスが、芸術家・技術者の内部においては実質的に相当程度明示的で予測可能な性質をおびていることを意味する。しかしそれを科学的な明示的言語に変換することはできないがゆえに、アーティストの感性反応と、研究者によって正統としんじられている方法でみちびかれた結論とが一致しない場合、学術的手続きでみちびかれた結論が真とされたままの矛盾が無視放任されやすい。

このプロジェクトの代表者である大橋は、アーティスト：山城祥二として、自分の作曲・指揮したレコードを、これまでLP 9枚、CD14枚制作している。これらのレコードを制作する初

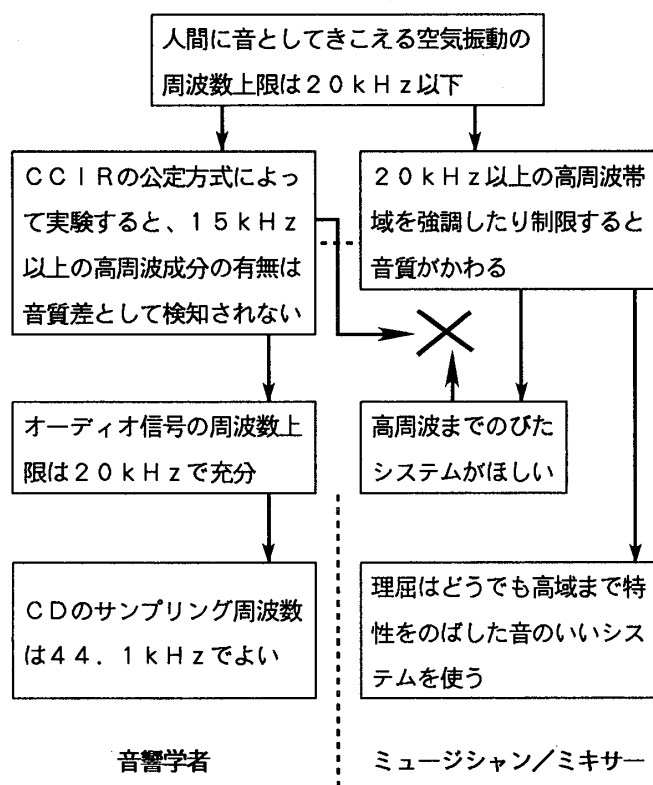


図1.4 可聴域をこえる高周波の効果についての混乱

期の過程で、大橋は、LPをカッティングする際、人間には音として聞こえない50kHz以上の帯域をイコライジングすると、音質が微妙な、しかしけっして無視できない変化をしめすことを体験した。以後、自作品のレコードをつくるとき、カッティング時の超高周波領域（超高域）イコライジングを、重要な音づくりの武器にするようになった。その後CDが登場するにおよんで、おなじアナログ・マスター・テープからつくられたLPとCDとをくらべると、CD化された作品では、超高域イコライジングの効果が発揮されず、その面においては音質があきらかにおとって聞こえた。もちろんLPとCDとの音質を変化させる要因はすくなく存在するはずだから、それを高周波の分布の差と確定することはできない。しかし、いわゆる“職人的感覚”に類する感性反応によって、その主たる原因が超高域成分の排除に帰するにちがいないという判断をいただくにいたった（図1.5）。こうした状態を前提にして、アーティスト山城の体験が研究者大橋のそれと分化せず完全に共有化されている研究システム・モデルをたてた。LPとCDとの音質差の決定的な要因が、超高域のパワーの差によるであろうという判断は、アーティスト山城祥二の内部ではまったく明快なものである。この感性的な感覚と認識とが研究者大橋に共有化された時点で、再検討の契機がえられる。すなわち感性上あきらかに差のある高周波をふくむ音とそれを除外した音とが、現行の主観的評価実験法では差別化できず、「音質差のないもの」という結論がみちびかれるとすれば、ここで採用された方法をみなおすという対応をとることは必然性のあるものになる。

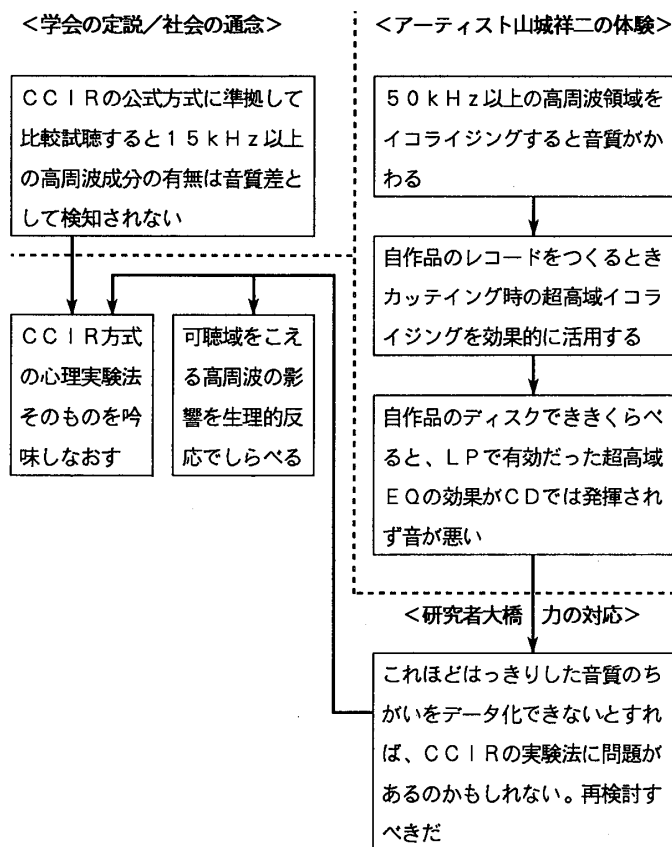


図1.5 サイエンティストとアーティストとの融合

#### 1.4 可聴域下限をしたまわる低周波の生理的影響に関する環境科学的研究

可聴帯域外の音としては知覚できない空気振動が人間におよぼす影響にかかわる現象として、超低周波の問題をさけてとおることはできない。1970年代に、可聴域以下の低周波音や振動（現実には100Hz以下の低周波音と混在することがおおく、これらをあわせて「低周波空気振動」とよぶ）は、直接的には被害者に知覚できないにもかかわらず、その存在が人間に対して深刻な負の影響をおよぼすという性質をもつことがあきらかになり、非常にとりあつかいにくい環境問題の原因となった。その基礎研究として、低周波による心理的圧迫感と強力な弾性波による肺などの身体器官の共振によるおもわれる血管反射（血圧）反応や大脳誘発電位が環境科学の分野で報告されている<sup>13,14</sup>。こうした単純には知覚できない音現象に対しては、生体情報計測などのあたらしい手法を導入した、多元的なアプローチが有効性をしめしており、人間に知覚されない帯域の振動現象を検討対象から除外することの危険性をしめしている。

低周波公害あるいは騒音公害は、音のエネルギーとしては非常に微弱なものにすぎないにもかかわらず、その負の影響は耐えることのできない水準に達する。そしてその影響の内容は、不快感あるいは苦痛感といった感覚分野の現象として自覚されるだけでなく、自覚できない深刻な生理的打撃にもつながることをおしえている。これは、情報環境要因の影響が、脳・神経系という生体内情報処理装置によっておおはばに増幅され、人間生存をおびやかすほどのレベルの現象として発現するという機構をもつことにもとづく。

## 第I部 この研究の視点

デカルト以降の近代科学は、はっきりと自覚できるころのはたらき(意識)や、だれがどこではかってもおなじ値がえられる物体の空間的なひろがり(延長)のように、人間の知覚によってまぎれもなくとらえうるものに限定して対象にするという近代科学に特有の態度をつよめてきた。その一方で知覚できないものや、あいまいな構造を本質とするものを対象にできない、あるいはあえて対象から排除するという限界を必然的にともなってきた。それは、はっきりした物的証拠や因果関係が立証されないかぎり、科学的認識とはしないといういっけん厳正な姿勢をみちびいている。しかしそうした姿勢が、無色・無味・無臭で一時にかなりの量を摂取してもとりたてて影響のでないメチル化水銀の毒性を否定し、あの水俣病をのばなしにしたことにむすびついている。これは、デカルト的近代科学のアプローチ法がのこした負の遺産の典型例といえるのではないだろうか。音としてきこえない低周波が、人間に生理的な被害をもたらすという事実の発見は、意識できる知覚にのみ依存する西欧近代科学のアプローチの限界をうきぼりにした例といえる。

### 〈文 献〉

- 1) JIS Z 8106-1961、音響用語一般。
- 2) ANSI S. 3.20-1973, Psychoacoustical terminology.
- 3) Wegel R.L.: The physical examination of hearing and binoural aids for deaf, Proceedings of the national academy of sciences 8, 7, 1922.
- 4) Stevent, S.S. ed.: Handbook of Experimental Psychology, p.995 に JIS を加えた。
- 5) Robinson, D.W. and Dadson, R.S.: Threshold of hearing and equal-loudness relation for pure tones and loudness function, J. Acoust. Soc. Am., 29, p.1284, 1957.
- 6) Snow, W.B.: Audible frequency ranges of music, speech and noise, J. Acoust. Soc. Am, 3, pp. 155-166, 1931.
- 7) Bekesy, G.: Experiments of hearing, McGraw-Hill, 1960.
- 8) ジョンソン、K.O.: 人間の聴覚細胞は90kHz にも反応する、無線と実験、pp.125-127、1990.
- 9) 日本音響学会編: 聴覚と音響心理、コロナ社、p.2、1978.
- 10) 村岡輝雄、山田恭裕、山崎正実: VTR を反応した PCM 録音再生システムにおける聴感的検討について、信学技報、EA-78-32、pp.19-24、1978.
- 11) Schoene, P., Plenge P, Jakubowski, H.: Genugt eine bandbreite von 15kHz fur electroakustische ubertrangs systeme, Runtunktechnische Mittei Lungen, 23, 66.1-9, 1979.
- 12) CCIR Recommendation 562, 1978, 1986.
- 13) 時田保夫: 住環境における Infrasound、日本音響学会建築音響研究委員会資料、AA90-01、1990.
- 14) 栗原洋四、永村寧一: 低周波空気振動と可聴音の被分効果の計測法に関する研究、環境庁環境保全研究成果集 (II)、4、p.170、1980.

## 第2章 この研究のアプローチ法について

### 2.1 可知覚領域だけでなく非知覚領域をも対象とする

以上のように、人間の可聴域上限に関する研究にはすくなく限界がある。可聴域をこえる振動を、あらゆる意味で人間に影響をおよぼさないものだと断定することはできない。直接知覚できないが人間になんらかの作用をおよぼす可能性をもった現象や、あいまいで客観的な把握が困難な構造をもった情報のとりあつかいなどは、物理的・客観的指標によって明示的・確定的に把握できるものにくらべて差別されやすく、無視されやすかった傾向を否定できない。

こうした近代科学の限界についてとくに注目し、わたくしたちは、あらためて、可聴域上限をこえる空気振動が人間におよぼす影響を、“可知覚”領域だけでなく“非知覚”領域をも対象にしてしらべることにした（図2.1）。

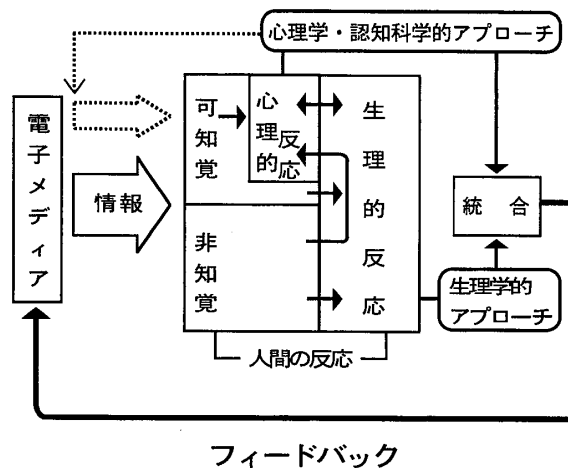


図2.1 可知覚・非知覚領域へのアプローチ

現在の心理学・認知科学的方法は、意識可能な“可知覚”の領域への適用が強調されるかわら、“非知覚”あるいはあいまいさがおおきい現象、言語系との緊密な対応をとりにくい現象などには限界をとめないやすい。そこで、可聴域をこえる高周波のような知覚が困難な要因の影響をしらべるにあたっては、これまでの心理学的実験法とはできるだけ原理をことにするものを補強することにし、より有効性が期待できるものとして、生理学的指標の活用を検討した。

### 2.2 「生物学的評価レファレンス」を設定する

人間という生物にとってもっとも適合性のたかい音空間とはどのようなものかについて合理的にアプローチする道をひらく必要がある。物質・エネルギー代謝系として人間をとらえると、大気のように環境として体をつつむものはもとより、水・食物など環境から体内にはいつてくるものについても、その内容について、種として共通の一定の要求基準を生物学的にもっている。温度・湿度そして栄養素などが、生体の要求によくあった状態で過不足なく供給され、あるいは代謝できることが生存上必須であることは、あらためていうまでもない。

一方、音のような情報的環境入力をこうした原則の例外とすることができるかどうか、物質の場合のような種として固有の生物学的要求基準はないのかどうかについては、物質的栄養要求性や薬物耐性とおなじような精密な検討はおこなわれていない。しかし、高度な騒音の影響<sup>1-3)</sup>あるいは情報削減実験<sup>4)</sup>、感覚遮断実験<sup>5)</sup>などの具体的な事実からみると、音にかぎって、あるいは情報にかぎってこうした生物学的要求性のわくぐみの例外とすることはほとんど不可能である。むしろそれは危険な独断というべきだろう。現状では、物質とおなじように、情報についても、一定の要因が過不足なく供給されることが必須であるという仮説のうえにたつことが妥当であり、すくなくとも安全であろうとおもわれる。もしそうであるならば、どのような音響構造が、現生人類というおなじDNAを共有するひとつの種のもつ生物としての要求基準に合致しているかということが問題になる。これを明確にすることは、きわめて困難な課題であるにちがいない。しかし、現実的に有効とおもわれるひとつの作業仮説をたてることができる。

適応の生物学によれば、すべての生物種は、地球上に実在するある特定の環境に、ちょうど鍵と鍵穴との関係のようにあらゆる面で適合するよう設計されている。そして、種にとって本来のこの基本設計ではしのぎきれない環境変動に直面したとき、潜在的に準備されていた適応のプログラムが、危機管理用のソフトウェアとして起動される（図2.2）<sup>6)</sup>。この前提にたつと、人類としての本来性がたかく、適応レベルがひくいライフスタイルをまもって生活しているひとびとのすむ自然環境のもつ音響構造を、人類の基本設計によくあった音環境の仮想モデルとして選択することが可能になる。

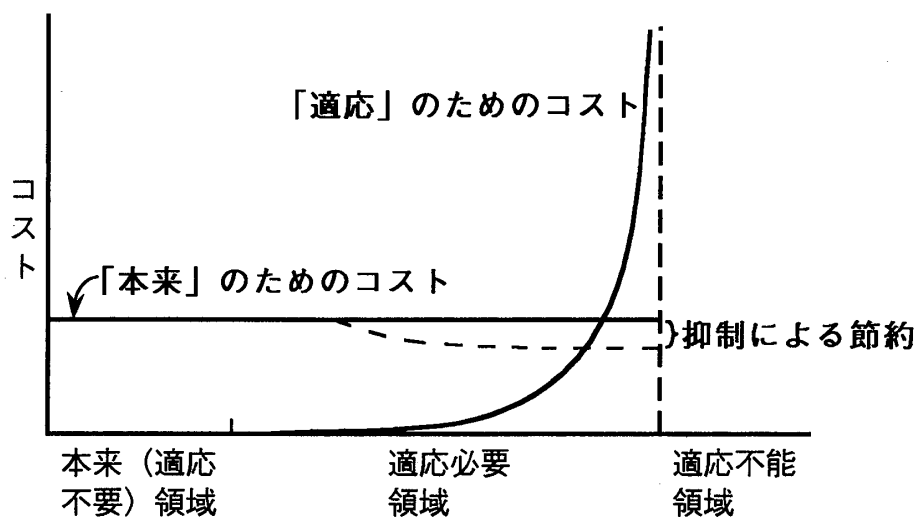


図2.2 本来—適応モデル

以上の作業仮説にもとづいてまず人間が平常とりかこまれつづけている音空間すなわち音環境についてその最適モデルをかんがえてみると、人類学的にみてもっとも本来性のたかい狩猟採集のライフスタイルをとるひとびとが居住のために能動的に選択してきた、ホモ・サピエンス誕生のゆりかごといわれる熱帯降雨林の音環境を、最有力な候補としてとりあげることができる。また、本来は熱帯降雨林であるべき地点において、自然環境にはげしい変容をくわえず

生態系と共生することに成功している人類の居住をとりまく自然の音環境も、人類の基本設計にちかい音のレファレンスとして、ひとつの候補になりうるだろう。そこで、環境音のもつ物理構造についてのすぐれた解析手段を開発して、一方でこうした自然性のたかい音環境の音響物理上の構造を分析し把握するとともに、もう一方では人為的影響が深刻におよんでいる都市空間のさまざまな地点における音環境の分析を同様におこなって、この両者を比較することが有効とおもわれる。なぜならそれは、音環境悪化の実体を知りその改善をはかるうえで、もっとも基本的な知見をあたえてくれるはずだからである。このアプローチは、かつて大気や水などの汚染度を把握するためにおこなわれておおきな成果をおさめた、環境評価の原則的発想を踏襲するものといえる。

いうまでもなく、もうひとつの重要な対象領域として、人類がみずから、さまざまな手段によって音を発生させ、快適な音空間を造成する“音楽”、および“音楽”をサブシステムとして包含するさまざまな“パフォーマンス”の領域がある。音楽は、音環境とちがって人類の生存時間中のある限定された部分でおこなわれる。そしてその人間へのはたらきかけは、一般に、環境音よりもより強力な傾向がみられる。この領域に対しても、音環境と並行して、同様の手法によりアプローチすることにした。

### 2.3 音の物理構造と人間の生理反応とを連関させてとらえる指標を開発する

大気や水の汚染のような環境要因をあつかう自然科学上の概念道具としては、“物質”の概念が機能し、化石燃料の浪費や地球温暖化については、“エネルギー”（エントロピー）の概念が役割をはたしている。ところがおなじ環境要因であっても、音楽や景観といったこと gara については、物質の概念は直接の接点をもつことができず、エネルギー（エントロピー）概念とむすぶことは理論的には不可能ではないかもしれないが、現実的にはあきらかに意味をなさない。こうした問題を直接あつかうことが可能な自然科学的ツールとしては、現状では情報概念が実用上ただひとつのものといつてよからう。こうした問題に本格的にとりくむためには、環境要因をおおきく物質・エネルギー・情報の三種のカテゴリーに類別し、この三つの次元から総合的に問題を把握する「情報環境学」<sup>7)</sup>のあたらしい接近法が有効性を発揮する。

情報が人間におよぼす影響は、物質・エネルギー的にみると無視できるほど微弱でありながら、生命活動を左右するほど重大な結果をみちびく場合がすくなくない。プラス、マイナスいずれかのがわからなくても非常に鋭敏なその反応は、脳・神経系という生体内情報処理機構をとおして増幅されて結果が発現するという例外のない原則にもとづいている。ある種の環境情報の影響は、脳・神経系そのものの領域内にそのおもな結果をとどめる。しかし、おおくの場合、脳・神経系にひきおこされた反応は、ホルモンなどの化学的メッセンジャー系を介して、全身の臓器・器官・組織そして細胞にまで、その影響をおよぼすことになる。

別の側面からみると、脳・神経系がおこなっている情報処理の具体的な過程になっているインパルス伝達、およびシナプス伝達の実体は、すべて化学反応にほかならない。これらの点に着目すると、生体内の情報現象を、分子生物学を媒介にして物質科学のがわからとらえなおす可能性をひらくことができる。

たとえば、近年情報環境との関連が注目されはじめたうつ病、分裂病などは、脳内のモノア



ミン系神経伝達物質の代謝が、正常なレベルを負あるいは正のがわに逸脱するという事象をその実体に行っている。こうした症状は、情報環境要因を実験的に操作することによってみちびくことができるだけでなく、特定の薬物を投与することによってもひきおこすことができる。しかも物質・情報のどちらの操作でつくられた場合にも、脳のモノアミン代謝活性の異常というハードウェアからみて同質の現象にいきつく。したがって、この化学伝達の異常を抑制することができる薬品をあたえると、物質・情報どちらの要因による異常の場合でもおなじように、その症状がおさえられる<sup>8)</sup>。

このように、脳・神経系においては、情報的環境入力と物質的環境入力とのあいだにかなり高度な相互変換性、あるいは“等価性”がよこたわっていることを否定できない。いいかえれば、脳にとっては、大気や水が脳活性の変異をみちびく物質、たとえばレセルピンやコカインに汚染されたのとおなじような打撃を、情報環境の変容、たとえば視聴覚情報の遮断によってこうむるおそれがあるのである。

近代以降定着した、「人間の脳はきわめて柔軟性のたかいもの」という通念にはたしかに一面の正当性がある。とくに、行動主義を背景にして、人間の脳に事実上無限にちかい可塑性を期待する発想が、たとえばアメリカ文化の影響を比較的つよくうけた学者や知識人のなかで、つい最近まで支配的だった。このことから、自然の音や景観、あるいは文化現象のような環境情報入力については、物質とちがって、二次的な学習や“なれ”によって人間との不適合は解消できるとするかんがえかたが、いまもってかなりの勢力をのこしている。しかし最新の脳科学の知識は、こうした態度が、たとえば薬物耐性を習慣化や訓練によって無限に強化しようとするくわだてることにもいた、自然の摂理を無視する暴挙であることをおしえてくれる。この観点からみて、環境問題や教育問題など、かなり強制されたかたちで情報入力がおこなわれる社会的現象については、手遅れにならないうちにしかるべき対応をとる必要があることを指摘しなければならない。

視・聴・嗅・味・触など五感にうったえる正・負の情報要因について検討するうえで、脳・神経系をはじめとする生体情報処理機構ときりはなしてあつかうやりかたはあまりにも限界がおおきい。こうしたことがらが、現在の通念からすると文化的・社会的カテゴリーに属し、その領域での問題処理のアプローチ法が存在しているにしても、今後はできるだけ、脳・神経系の生物学・情報学を本格的に活用した自然科学的手法を中枢にすえつつ全体を統合した、超領域型のアプローチに移行することがのぞましい。そこでわたくしたちのこの研究は、そのようなあたらしいパラダイムにもとづいてすすめることにした。

## 2.4 音の物理構造と人間の心理反応とを連関させてとらえる

音の人間に対する影響は、脳の高次構造が関与しうる情報現象である。したがって、そうした高次の情報処理が反映する心理的、あるいは文化的側面にまで考慮をはらう必要がある。それと同時に、脳という可塑性に限界をもつ生体内情報処理機構における直接的・生理的な反応を基礎とするという側面も無視することはできない。このことからすると、音の影響の範囲を、人間にたやすく自覚できるものだけに限定するのは危険で、人間には直接自覚できにくいような影響についても、みおとさないように注意しなければならない。この視点からみると、従来

の研究手法にはさまざまな限界や問題がある。たとえば現在もっとも正統的な評価方法とされている CCIR の推奨する一対比較法は、L. サーストンの原理にもとづくもので、10～15秒程度のながさのふたつの音試料を一対にして1秒前後の間隔をおいてつづけて被験者に呈示する。かりにこの方法で高周波成分の知覚におよぼす影響をしらべる場合、被験者にわからないよう一対の一方または両方の高周波をカットしたものを準備し、カットしない対とまぜて呈示する。そして対をなすふたつの呈示音が「おなじ」か「ちがう」かを一対ごとに判断させ、その正解の分布を統計的に検定して音質差が知覚されているかどうかを判断するというものである。この方法は、「被験者がいかなる音を体験したにせよ、その影響が残留してのちの呈示音の知覚におよぼす効果は、無視できるレベルをこえない」という暗黙の前提なしにはなりたたないものといえる。なぜなら、もしもある音との接触によって脳にひきおこされた現象が無視できない時間残留し、それが以後の音知覚になんらかの影響をおよぼすならば、その残留時間内に呈示されたつぎの音の知覚に、まえの呈示音の効果がオーバーラップして結果を混乱させるおそれがでてくるからである。

このような限界を克服するために、意識・認知可能な領域を対象にしたアプローチとともに、音・振動の物理構造と、脳・神経領域の現象とをむすびつけた自然科学的、実証的な研究がもためられている。近年の計測工学や脳科学の飛躍的な進展は、このようなアプローチを可能にするみちを急速にひらきつつある。

### 2.5 評価結果をハード・ソフト全体に反映させたシステムを開発する

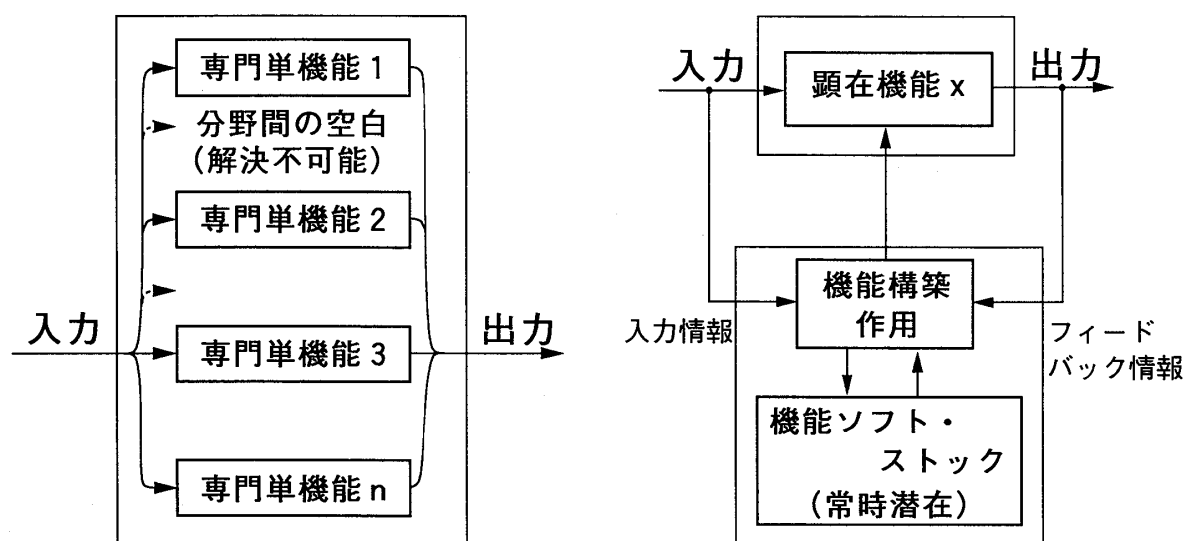
この研究は、実験室内での試行にとどまらず、その社会的な応用や実用化を念頭においてすすめている。したがって、研究成果を反映させたハードウェアを開発し、それに対応したソフトウェアを同時に開発し、それらをさらに評価して、その効果を確認するというフィードバック回路をもたせる。

そのために、現時点で可能な先駆的技術を最大限注入して、人類が体験するであろうすべての空気振動を収録・合成・編集・呈示可能にしたシステムおよびそれに準じた電子映像システム、それらを被験者に受容させ脳活性や心理反応をはばひろく計測するシステム、そしてそのデータを解析するシステムを有機的に一体化したシステムを設計、構築した。

### 2.6 既存の研究手法、装置系などを全面的にみなおす

問題解決のスタイルのちがいに関連して、あたえられた問題へ対応するときの姿勢を、出力機能主導型問題解決方式（出力主導型）と入力問題主導型問題解決方式（入力主導型）とに類別してとらえるかんがえかたがある（図2.3）<sup>9)</sup>。出力主導型のアプローチでは、単機能の問題解決要素を有限個準備しておき、あたえられた問題をそれらのうちの適合性のたかいひとつ、または比較的少数のいくつかにわりふる。これは現在の専門化社会に一般的なやり方で、既存の専門的手法をそのまま、あるいは若干調整して対応させることを原則とする。このアプローチでは、専門のもつ処理機能をあきらかにこえることがらについては、解決責任は免じられる。純学術的研究はこのような性質をおびやすい。

それに対して入力主導型のアプローチでは、あたえられた問題に対応して、最善とおもわれ



- 専門機能の限界を越える問題解決不可能性は許される    ○既存の方法論の限界による問題解決不可能性は免責されない  
 ○専門分野については知識・能力の欠落は免責されない    ○問題解決にかかわりのない知識・能力の欠落は問わない

図2.3 出力主導型と入力主導型問題解決方式

る解決法を構築することが原則になる。そのために、既存の問題解決要素を適切に選択構成することはもとより、それらに限界がみとめられたときは、あたらしい方法を開発して対処することがもとめられる。つまりこのアプローチでは、在来の方法論の限界による問題解決不可能性は免責されない。環境・医療・軍事などにかかわる研究はこうした性格をもつことがおおい。したがって方法論を固定せず、つねにその開発・整備をはかることが重要な課題になる。

こうしたふたつの路線のなかから、わたくしたちは後者の入力主導型方式に注目して音と人間との適合、調和にアプローチするみちをえらんだ。それは、この研究を単に学問のための学問におわらせることなく、具体的な効果に結びつけて実践的に検証していきたいとかがえたこと、そして、入力問題主導型の研究実例をできるだけかずおおく成立させることが、専門分化を原則にした近現代の知のわくぐみを妥協なく克服することにつながるのではないかとかがえたことによる。

わたくしたちはさきに、「情報環境学」という学際的領域を提案し、そのパラダイムを設定する過程で、分野を超越した課題、とりわけ“もの”と“ところ”との双方にかかわる問題に対しては、対象や方法に関係なく起用できる概念道具で構成された知的システムを準備することが必要であることを主張した。そして、現時点で“もの”と“ところ”との架橋に実際上有効なやりかたとして、情報学と分子生物学とのふたつの次元で対象をとらえることを提案した<sup>7)</sup>。その原則はここであつかう快適性や美にかかわるところのはたらき、すなわち“感性情報処理”へのアプローチにもそのまま適用できるとかがえる。わたくしたちが設定した感性情報処理モデルにおいては、起点と終点とが脳の神経生理学的なしくみに帰することなどから、情報学と分子生物学とを背景にした生理学的側面が相対的に強調されたアプローチになっている。しかし、わたくしたちはけっして生理学それ自体から出発したのではない。テーマに即して、入力主導方式の立場で最善のアプローチ法を模索してきた結果として、当初はけっして主軸ではなかった生理学的側面が相対的にクローズアップされてきたにほかならない。

## 第 I 部 この研究の視点

### <文 献>

- 1) 長田泰公：騒音の健康被害、公衆衛生院研究報告、vol.22、1973.
- 2) 安藤、服部：日本音響学会誌、62、p.199、(1977)
- 3) 三宅晋司、田中豪一、藤岡秀樹、細川敏幸、新岡 正、齊藤和雄：日本衛生学雑誌、36(1)、p.164(1981).
- 4) 北村晴朗、大久保幸郎(編)：刺激のない世界、新曜社、(1986).
- 5) Zuckerman, M.: Perceptual isolation as a stress situation, A review, Archives of General Psychiatry, 11、pp.255-276、1964.
- 6) 大橋 力：情報環境学、朝倉書店、p.254、1989.
- 7) 大橋 力：情報環境学、朝倉書店、pp.2-26、1989.
- 8) 野村総一郎：うつ病の動物モデル、海鳴社、1984.
- 9) 大橋 力：情報環境学、朝倉書店、pp.46-52、1989.

## 第II部 あたらしい方法論の開発

この研究は、従来経験のないあたらしい課題を数おおく解決しながら前進する状況のもとにおかれた。そのため、既存の方法論のルーティーンな適用だけでことたりるものではなく、きわめて多方面にわたり、あたらしいシステムや手法を開発しなければならなかった。そうしたとりくみの結果、全体として、これまで例のないオリジナルな方法論の体系を構築するところとなった。第II部では、こうして開発された方法論を、超広帯域空気振動とその人間への影響にアプローチするためのシステム、すなわち超広帯域音声信号の記録・再生・分析をおこなうハードウェア・ソフトウェアの開発、そして視聴覚情報環境と脳との適合性をしらべるための生体影響評価手法の開発等を中心にして総合的にのべる（図3.1）。

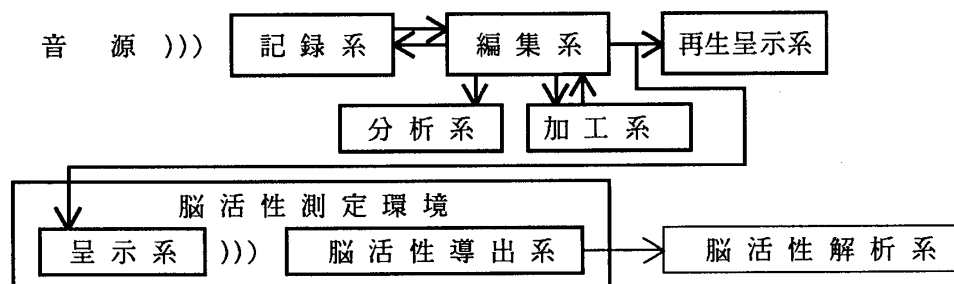


図3.1 実験システム概念図

## 第3章 超広帯域空気振動へのアプローチ手法の開発

### 3.1 録音系

まず、この研究の構想するあたらしいアプローチ法を実現するうえで適合性のたかい性能をそなえた既存の機材がないかどうかを探查した。すでにのべたように、既存の収録・分析機器は、人間の可聴域上限を20kHzとする学説を前提としてつくられているため、対応可能周波数帯域が20kHzをこえるものは、一般音響分析用途の機材としてはほとんど存在しないという状況下にあることがわかった。そこで、特殊用途用のものをふくめて探索の対象をひろげ、応用可能な材料をもとめた。

#### 3.1.1 入力部

たまたま、デンマーク Bruel & Kjaer (B & K) 社から40kHzまでフラットな特性をもつ

スタジオ録音用マイクロフォン B&K4007という機種が発売された。スタジオ用であるために、高性能の割にはかなりの堅牢さをそなえている。そこで、この機種を導入して環境音の収録に使用した。周波数特性を図3.2にしめす。ところが、実際にこれを持ちいて予備的な収録・分析をおこなってみると、ある種の音楽や環境音の周波数帯域は40kHzをはるかにうわまわっており、このマイクロフォンの周波数特性では対応しきれない場合があることが判明した。

そこで、周波数特性の面から、B&K 社4135型フリーフィールド・コンデンサーマイクロフォンを選択した（写真3.1）。この機種は測定室内でつかうことを前提にした計測専用マイクとして開発されたもので、周波数応答としては  $4\text{ Hz} \sim 100\text{ kHz} \pm 2\text{ dB}$  というすぐれた性能をもっている（図3.3）。しかし、いくつかの点でこの研究目的と適合しない。第一に出力レベルがひくく動作が不安定で雑音を発生しやすい。専用のプリアンプがあるが、測定用のため雑音レベルがたかく、周波数レンジもせまい。第二に成極電圧が DC200V（通常は12～48V）ときわめてたかく、特別仕様の専用ファンタム電源装置を必要とする。このたかい成極電圧は、たとえば屋外で使用すると結露に起因するショートによってダイアフラム（振動板）を一瞬間に破壊し、修復することができないといった限界につながっている。

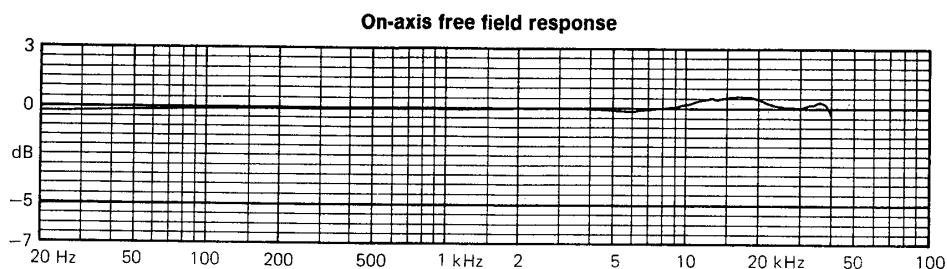


図3.2 B&K4007の周波数特性



写真3.1 B&K4135

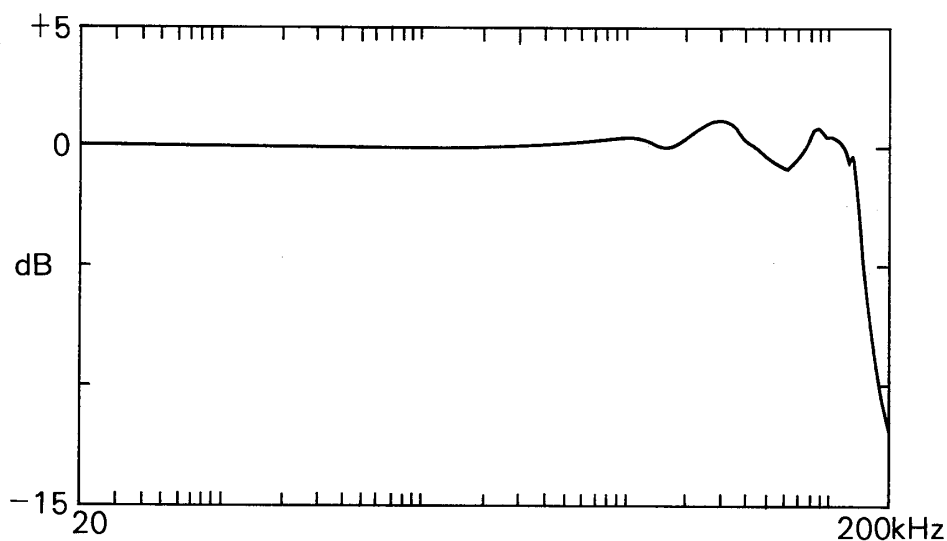


図3.3 B&K4135マイクロフォンの周波数特性

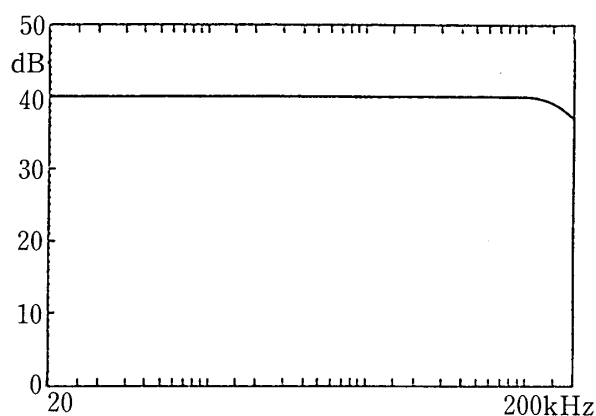


図3.4 B&K ME-3213(改)ヘッドアンプの周波数特性

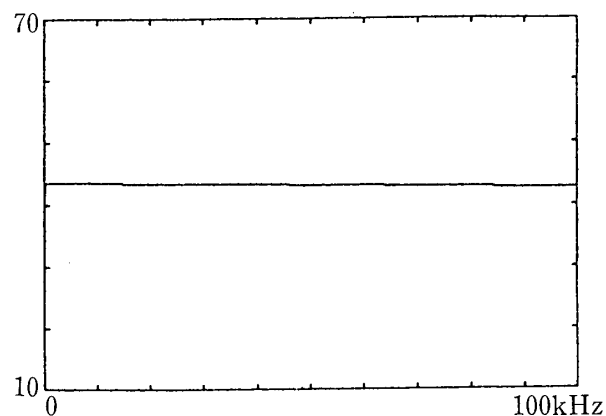


図3.5 SONOSAX SX-M2ヘッドアンプの周波数特性

そこで、これらの問題について対策を講じた。まず第一の問題、低出力レベル低 S/N の克服のためには、高性能のプリアンプを対応させることとし、高周波特性に限界のある B&K 社 ME-3213 プリアンプをメーカーの協力によって改造して、200kHz まで平均な特性のものをつくり、これをつかった(図3.4)。ただしこれでも S/N 的には満足すべきレベルに達したとはいえない。そこで最近の機器についてさらに調査をつづけた結果、スイス SONOSAX 社のポータブルマイクアンプ SX-M 2 型の使用によって、かなりの改善がえられた(図3.5)。

第二の問題である成極電圧のたかさはいかんともしがたいが、計測時以外はつねに、マイクカプセルおよびヘッドアンプの部分を気密容器のなかにシリカゲルとともに格納し、半導体湿度計によって常時モニターしながら湿度を20%以下にたもち、さらにカプセル～ヘッドアンプ部を随時熱風式ドライヤーでブローすることによって、動作の不安定化および結露ショートによる破損を防止することに成功した。しかし、以上のような対応によっても、熱帯雨林など高湿度条件下では、30分間以下で連続使用の限界に達することがしばしば経験された。

### 3.1.2 記録部

#### 3.1.2.1 アナログ磁気テープ記録

##### (1) nagra IV-S (改)

レコーダーは、既存のフィールド用テープレコーダーとしては現在もっとも優秀で信頼性が高いたかいという定評のあるスイス・NAGRA社のポータブル・レコーダーNAGRA IV-Sを素材にしてその周波数応答特性(図3.6)を改良し、40kHzまでフラットな特性をもたせた改造機をつくった(写真3.2)。しかし、実際にこの装置をつかって実験してみると、さきにのべたようにある種の音楽や環境音の周波数帯域は40kHzをはるかにうわまわっていて、このレコーダーの

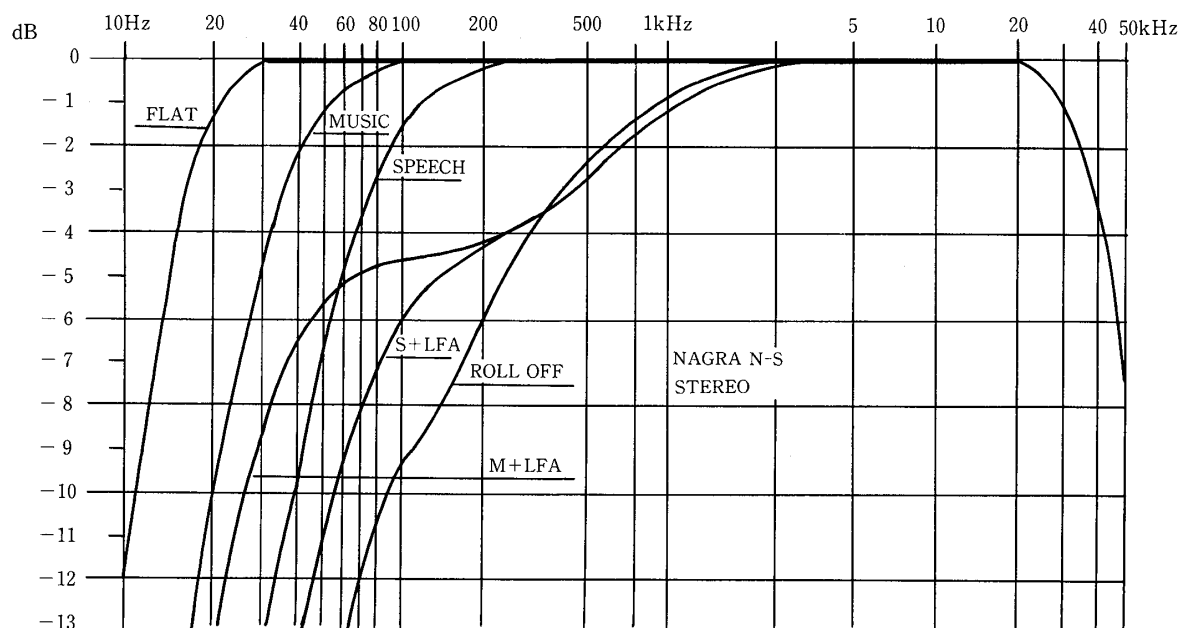


図3.6 ポータブル・レコーダーNAGRAIV-Sの周波数特性



写真3.2 ポータブル・レコーダーNAGRAIV-S(改)



周波数特性では対応しきれないことが判明した。

(2) B & K7006

そこで、さらに、より高周波録音が可能なレコーダーについて調査した。その結果、B&K社の計測用ポータブル・データレコーダーB&K7006は、60kHzまでフラットな特性をっており、しかもバッテリー駆動により交流電源のないフィールドでもつかえる仕様をもつことがわかった。そこで、このレコーダーを導入した（写真3.3）。その周波数特性を図3.7にしめす。

ところが、このレコーダーは、環境音のような微弱な音源を対象に設計されたものではないので、B&K4135マイクロフォンをそのまま接続して環境音を録音するには、入力レベルがひくすぎてつかえない。またS/N比が充分でなく、分析に耐える音素材の録音はわずかな例外をのぞき不可能だった。そこでS/N比を改善するために、コンパンダーユニット ZM-0054を導入し



写真3.3 計測用ポータブル・データレコーダーB&K7006

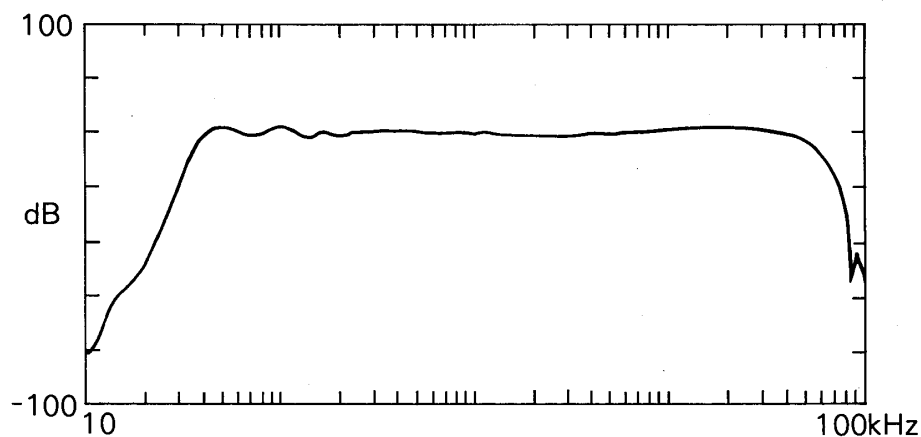


図3.7 計測用ポータブル・データレコーダーB&K7006の周波数特性

た。このコンパンダーユニットは、入力信号に応じて自動的に入力レベルを圧縮し、再生時にはこれを復元することができる。これによって S/N 比70dB 以上の信号の記録・再生がある程度可能になった。

### 3.1.2.2 高速標本化マルチビット量子化によるデジタル記録とその高度化

デジタル記録されたデータは、解析手法の高度化や処理速度の高速化がめざましいコンピュータへの転送について原理的にたかい適合性をもつ。ただし、音響機器としてのデジタル記録装置は、人間の可聴域上限を20kHz であるとする定説にもとづいてすべての規格が策定されたため、本研究が対象とする可聴域をこえる高周波をふくむ広帯域信号が記録可能な機種は存在しない。いいかえれば、一旦規格がさだめられたデジタル音響技術分野においては、規格をこえるような広帯域信号をあつかう技術の高度化はすでに皆無といえるほどみられなくなった。そこで、本プロジェクトでは広帯域信号のデジタル記録が可能な装置系の探索を、音響分野にかぎらず信号処理分野をはじめとするはばひろい分野に対しておこなった。

その結果、工学分野において複雑な現象を精密に解析するために、信号を高速標本化あるいは高量子化ステップで AD 変換をおこない記録する技術が、音響技術とは独立に高度化をすすめていることがわかった。共通規格という制限条件がない純粋な信号処理分野においては、より高速、高精度に信号をあつかうことを可能にする方向で、技術開発競争がつづけられてきている。

#### (1) 高速データ変換集録システムの導入

探索の結果、最高標本化周波数500kHz×16ビット量子化が可能な AD/DA 変換機(パベック電子開発㈱；MD-8000mk II) が存在することがわかった。この AD コンバーターによって、理論的には DC～250kHz までの超広帯域信号を、16ビットという十分なダイナミックレンジでデジタル信号化することが可能になる。最高速度500kHz で信号の標本化をおこなった場合、1秒間のアナログ信号が1メガバイトものデジタルデータに変換される。秒当たり1メガバイトのデータをリアルタイムでたくわえることのできる媒体は、現在のところ高性能の半導体記録素子いわゆる RAM (ランダム・アクセス・メモリー) のみである。このシステムではデータの第1次貯蔵に16メガバイトの容量をもつデータロガー(DL-8800)をもちいている(図3.8)。

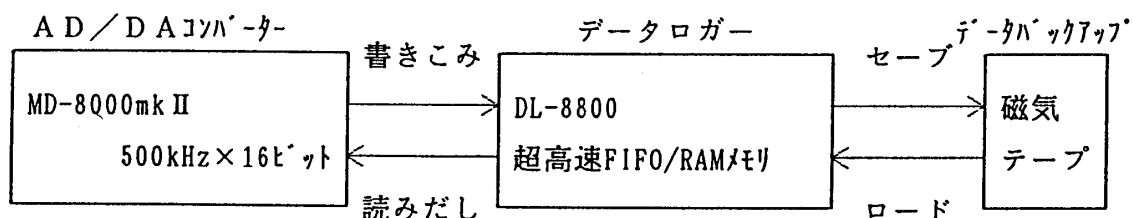


図3.8 高速データ変換集録システム

RAM に対するデータの書き込み・読み出し方式のメリットは、まず高速度でデータの入出力がおこなえることであろう。そして、速度以上にわたくしたちが注目し、評価している RAM のメリットは、データの信頼性と再現性が非常にたかいことである。これは、データの記録と保

持とに磁気材料をもちいないことによっている。RAM への書き込みは電氣的におこなわれ、さらにデータの保持に関しては、メガヘルツ単位のクロック周期のなかでつねにデータの監視と保守がおこなわれる。データエラーの発生確率は、磁気を利用するほかのどのメディアあるいはコンピューターデバイスよりもひくい。

RAM 記録のデメリットは、そのメリットが原理的な面にあるのに対して、技術的・現実的な面にある。最大のデメリットは電源の供給が停止した瞬間に RAM 上のすべてのデータがうしなわれることである。そのため一旦 RAM に記録したデータを MT (マグネティックテープ) にバックアップし、再度そのデータを使用する際には、MT から RAM 上にデータ転送をおこなう必要がある。つまり、最初に記録したデータを装置の電源をおとさず再生する場合の信頼性は高度にたかいが、バックアップから転送されたデータは、MT への書き込み時と MT からの読み出し時との2度にわたって磁気-電気変換をへることをさけられず、データの再現信頼性がたとえわずかでであろうと低下することを容認しなければならない。この点はいかにしても克服しなければならない技術的な問題であった。

また、このシステムの連続データ記録時間は、さきほどの最高速度500kHzの標本化を2chの信号に対しておこなった場合、 $16\text{MB (メモリ総容量)} \div 2\text{ MB (1秒間のデータ)} = 8\text{秒}$ である。メモリー容量に起因するこの限界は、ごく短時間のデータを解析する目的には問題はすくないが、ある程度連続したデータの解析をおこなう場合や、生体反応を観察するためにある一定時間以上の広帯域信号を再生する場合には致命的な限界となる。

### (2) 高速データ変換集録システムの高度化 (その1) メモリーとインターフェースの増設

さきにのべた高速データ変換集録システムの2つの問題、すなわち①データのバックアップに関して MT にのみ対応しているため、データのバックアップ→再ロードという2回の磁気-電気変換をさけられないこと、②データの高速性・精密性が単位時間当たりのデータ量を非常におおきなものとするために、16MB の RAM 容量では8秒間程度しか連続してデータ記録できないことについて改善をはかった。

前者に関して、MT にかわるメディアを探索した。要求される仕様としては、①データの書き込み・読み出しに磁気をもちいないこと、②大容量であること、③リムーバブル・メディアであることがのぞましい、④データの書き込み・読み出しが高速であることがのぞましい、⑤メディアの機械的強度、時間的耐久力がすぐれていること、などである。

#### ・ハードディスク

まず代表的な記憶装置であるハードディスクについて検討した。ハードディスクは数百メガバイト～数ギガバイトと大容量化がすすみ、データ転送速度も MT にくらべればはるかに高速である。つまり容量と速度の点ではこのシステムにとって非常に魅力的な仕様をもっている。ところが、リムーバブルという点に関しては、対応している機種はごく限られている。また最大の問題点として磁気記録をもちいないハードディスク装置はなく、さらにメディアの機械的強度に関してもハードディスク装置は非常に繊細であり、適当ではないと判断した。

#### ・MO (光磁気ディスク)

MO は、読み出しにレーザー光をもちい、大容量、リムーバブル、書き込み・読み出しも比較的高速といった特徴をもつメディアであり、本研究との適合性はたかいことが予想された。

MOの動作原理は、まずレーザー光で媒体表面をその結晶の方向が周囲の磁界の向きにそろう温度(キュリー点)まで加熱することによって、一旦自由状態にみちびく。同時に0、1のビットにあわせて方向をかえた磁界をかけることにより結晶の方向を制御する。これが書き込み動作である。読み出し時は、レーザーを媒体にあて、その媒体反射面の結晶の方向によってことなる角度で回転された反射光の回転角度を検出する。このようになりかなり複雑なメカニズムをもっていることと、なによりもその記録過程で磁気をもちいていることにより無視できない問題をもつことがわかった。そこで、導入を一旦保留し、より適合性のたかいメディアをもとめて探索を続行した。

#### ・OD(光ディスク)

ODは、日本で独自に開発された方式で、書き込み読み出しにレーザー光のみをもちい、磁気をもちいない以外は、MOによく似た特徴をそなえている。この点に注目し、検討をくわえた。ODの動作原理は、媒体表面を加熱する温度と時間を制御することにより、表面を結晶相かまたは非晶相(アモーフス)かに変化させることで書き込みをおこない、それぞれの反射率のちがいを検出することで読み出しをおこなうというものであり、MOに比較して非常にシンプルなメカニズムをもつものである。そのための利点として、書き込みスピードがより高速であること、磁気をもちいた結晶の方向変調ではなく、結晶か非結晶かという相変化型であるためデータの保持状態が安定し、より長寿命であることがあげられる。そこで、当該システムのデータバックアップメディアとしてODを採用することにした。採用したODは、データ容量片面500メガバイト両面1ギガバイトの追記・書換両用型光ディスク(松下電器製)である。

#### ・GPIBインターフェース

バックアップメディアの高度化に対応するために、それまでスタンドアローンとして運用してきたこのシステムを、GPIBインターフェースを介してUNIXワークステーションと接続し、データを光ディスクに転送し、直接ファイルを作成することを可能にした。これによって、アナログ信号→デジタルデータ→半導体メモリー→光ディスクという磁気変換記録をいっさい介さないデータ記録、保持システムのプロトタイプが実現した。実用上のこのシステムの難点はGPIBインターフェース部でのデータ転送速度が低速なことで、データのストアに数時間を要した。

#### ・メモリーの増設

メモリー容量を16メガバイトから176メガバイトに増設し、連続データ記録可能な時間を拡張した。この拡張により、たとえば、400kHz標本化でデータとりこみをおこなった場合の記録時間は、16メガバイト容量時には20秒間であったのに対し、220秒間と長期化することができた。

#### (3) 高速データ変換集録システムの高度化(その2)メモリーの増設、データ管理・解析システムの整備とAD/DAコンバーターの高音質化

##### ・AD/DAコンバーターの高性能・多チャンネル化

このシステムは、入力チャンネルとして最高500kHz標本化が可能なADコンバータ1台と400kHzでDAが可能なDAコンバーター2台から構成されている。つまり入力1チャンネル、出力2チャンネルのシステムであった。このシステム構成によって、高精度の記録・解析を実現するという目的は十分に達成したとおもわれる。つぎの段階としてこのシステムを広帯域信

## 第II部 あたらしい方法論の開発

号の再生装置としても応用することを構想した。しかし、この段階のシステム構成によっては、モノラル記録、モノラル再生のみ可能である。モノラルとステレオとでは、音を聴いたときにうける現実感がまったくことなるのは周知のとおりであり、再生装置として機能するには最低2 ch以上のAD/DAユニットが必要である。また解析手法の高度化に対応するという観点からは4 ch以上の入出力をそなえていることがのぞましい。

そこで、AD/DAチャンネル数の増設をおこない、あわせてDAにともなう歪の発生をおさえるディグリッチャーをくわえ、高音質化をはかった。

### ・メモリー増設

メモリー容量を176メガバイトから444メガバイトに増設し、連続データ記録可能な時間を拡張した。この拡張により、例えば、400kHz 標本化でデータとりこみをおこなった場合の記録時間は、176メガバイト容量時には220秒間であったものが、555秒間（約10分）とすることができた。

・ワークステーションとの間のインターフェースを GPIB から SCSI に高度化し、制御ソフトウェアの開発をおこなった。これにより、本システムのデータ入出力制御、およびデータの加工・編集、解析、管理をすべてワークステーション上からおこなうことが可能となった。

・本システムの現時点における仕様はつぎのとうりである。

量子化ビット数：AD、DA とも16ビット

AD コンバーター：200kHz 標本化×4ch

500kHz 標本化×2ch（新方式）

500kHz 標本化×1ch（旧方式）

DA コンバーター：200kHz 対応×4ch

500kHz 対応（ディグリッチャー付き）×2ch

400kHz 対応×2ch

周波数特性：DC～250kHz（500kHz 標本化時）

FIFO メモリー：444メガバイト（超高速書き込み読みだし DRAM）

インターフェース：SCSI

ホストコンピューター：SUN SPARC STATION 10

バックアップメディア：1 ギガバイト光ディスク（1GB Optical Disk）

連続記録可能時間長：555秒（200kHz 標本化×2チャンネル記録時）

アナログ入出力端子：BNC

電源：AC100V

### 3.1.2.3 超高速標本化1ビット量子化によるデジタル記録とその高度化

前節では、実験室用として、最大標本化周波数500kHz、量子化ビット数16bitのAD/DA変換機の導入とその高度化についてのべた。ただしこのシステムはかなり大型で交流電源を不可欠に要求するため、実験室以外の場所での使用は事実上不可能にちかい。また、記録したデータの再生は基本的にこのシステムでなければ不可能である。

そこで、フィールドでの使用が可能で、操作のよいシステムを開発する可能性があるかどうか

か、方式そのものの検討をふくむ AD/DA 変換システムについての調査をおこなった。そのなかで、パイオニア株式会社山本武夫博士から、音場解析等の目的のために早稲田大学理工学総合研究センター山崎芳男教授が開発したあたらしい信号処理方式がこの研究の目的に適合性がたかいのではないかと助言をえた。そこでさっそくこの方式すなわち“YY 符号化による高速標本化 1 ビット方式”<sup>1)</sup>について検討したところ、原理的にみてこの研究への有効性はいちじるしくたく、従来のどの方式にくらべても圧倒的な有効性をもつであろうとの結論がえられた。

以上にもとづき、山崎教授に正式に協力をもとめ、この研究の目的に高度に適合したあたらしい AD/DA 変換システムの開発をおこなった。

(1) プロトタイプ “1 号機” (768kHz 標本化 1bit 量子化×2ch)

こうして以下の性能をもった実用水準の試作機がつくられた。

— 超広帯域ポータブル AD/DA コンバーター試作機の規格 —

- ・記録方式：YY 符号化による高速標本化 1 bit 方式
- ・標本化周波数：768kHz, 705.6kHz
- ・量子化ビット数：1
- ・チャンネル数：2
- ・周波数伝送特性：DC～50kHz (−1dB)  
DC～100kHz (−3dB)
- ・エンファシス特性：220 $\mu$ s, −2.2 $\mu$ s
- ・入力端子：BNC×2 (アナログ)  
光・同軸各 1 (ディジタル)
- ・出力端子：BNC×2 (アナログ)  
光 ×2 (ディジタル)  
同軸 ×1 (ディジタル)  
ヘッドホン用ステレオ×1

(上のディジタル入出力は、現在市販されている DAT と、そのディジタル I/O を介して接続でき、48kHz または 44.1kHz フォーマットによって記録、再生をおこなうことが可能である。)

- ・電源部：単 2 電池 12 本  
メーター (VU 計、電源電圧計兼用)×2

以上は AD/DA 変換部と電源部とにわかれたセパレート方式であり、AD/DA 部のサイズは 250×150×70(mm)、重量は 1,200g、電源部のサイズは 160×220×70(mm)、重量 1,300g、というきわめて小型軽量のものである。実測した周波数特性は図 3.9 にしめすとおり、DC～100kHz までほぼ平坦であるうえ、音質も自然性のたかいきわめてすぐれたものとなった。通常の DAT をつかってデータを記録できるため、2 チャンネル同時記録で最大 120 分の連続動作が可能になっている。以上を総合的に評価すると、現存する可搬型 AD/DA のなかで、国際的にみてももっとも高性能のものではないかとおもわれる。テストの結果、実験室内はもとより、熱帯雨林、山地、熱帯水田農耕地帯などの自然環境内で安定して動作することがたしかめられた。

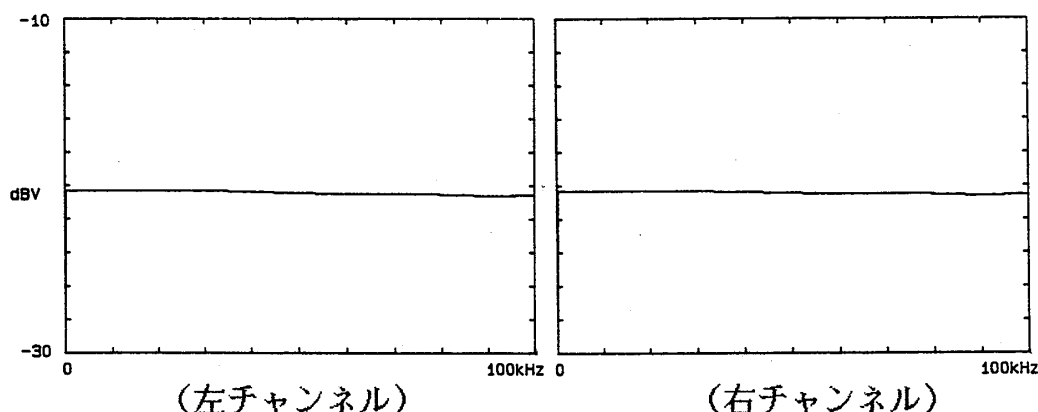


図3.9 超広帯域ポータブル AD/DA コンバーターの周波数特性

(2) 2倍速 DAT を利用した4チャンネル化

その後、ソニーマグネスケール(株)から、DAT のテープ走行速度を2倍にあげ、単位時間当たりのデータ記録密度を倍にすることで、1台の DAT で4 ch の入出力を可能とするポータブル・データレコーダーPC-204が発表された。このPC-204の内部 AD/DA 基盤を、山崎教授の高速標本化1 bit 方式を組み込んだ基盤に改造することで、超広帯域記録が可能で AD/DA 部とテープ走行部とがコンパクトに一体化したシステムを構築することができた。

また同時記録・再生チャンネル数が2 ch → 4 ch と倍増した。これによりたとえば、ことなる特性をもつマイクロフォンをそれぞれステレオでもちい、それらを同時に記録し、のちに同時に再生することが可能になった。

さらに、電源の面でも、充電可能の電源パックである NP-1B ニッカドバッテリーの採用により、つかいすてのアルカリ乾電池を多数用意する必要から解放された。このバッテリーパック NP-1B の規格は、業務用映像収録機材をはじめ、他のおおくの機材でも採用されている業界共通規格である。このことは、電源システムを NP-1P システムでシステム化して用意すれば、映像記録系などとの同時運用が非常に効率的になるというメリットをうんだ。

〈超広帯域デジタル・マルチレコーダーPC-204改 Ver. I の仕様〉

標本化周波数 768kHz

量子化ビット数 1ビット (YY 符号化)

チャンネル数 4

電 源 AC100V~250V または DC12V (NP-1B)

(3) 2倍速 DAT を利用した帯域&ダイナミックレンジ拡大化

山崎教授の YY 符号化による1 bit 高速標本化方式は、通常の DAT と同容量のビットレート(単位時間あたりに使用するデータの量)でも、物理特性と音質の点でたかい優位性をもっている。この方式は、ビットレートをさらに増やすことで記録帯域をひろげ、ダイナミックレンジをおおきくすることができる。そこで、さきにのべた4 ch 倍速・倍記録帯域 DAT データレコーダーPC-204を改造し、信号1 ch に対して記録トラックを通常の倍の2 ch をわりあてることによってチャンネルあたりのビットレートを拡大することを可能にした。この改造により必要に応じて2または4チャンネルのいずれかの記録チャンネル数をスイッチ切り替えて選択できる。記録ch数を半分の2 ch としたとき、標本化周波数をこれまでの2倍の、1.536MHz

にすることができる。その結果、理論的には768kHz まで、実用的なダイナミックレンジを確保できる帯域としては300kHz 程度までというポータブルのシステムとしては究極的なワイドレンジの記録が可能となった。この条件で、計測用 DAT テープをもちいた場合、90分間の連続記録が可能である。

〈超広帯域デジタル・マルチレコーダーPC-204改 Ver.IIの仕様〉

標本化周波数 768kHz または1.536MHz を選択可能

量子化ビット数 1ビット (YY 符号化)

チャンネル数 768kHz の場合 4

1.536MHz の場合 2

電 源 AC100V~250V または DC12V (NP-1B)

(4) 8ch デジタル・マルチレコーダーを利用した帯域&ダイナミックレンジ拡大化と多チャンネル化

山崎教授の高速標本化1ビット方式の標本化周波数をたかめることによる特性・音質の改善効果がめざましいものであることがわかったので、つぎのステップのシステムの高度化として、さらに標本化周波数をたかめることと、記録チャンネル数を拡張することをターゲットとした。AD/DA 部の高速化は山崎教授の設計による専用の IC の開発によって実現できた。データ記録系として適合性のたかいシステムを探索し、ヤマハ楽器製造株式会社から独自の規格をもつデジタルレコーダーユニットとして発売された DRU 8 を選択した。DRU 8 は、20ビット量子化×48kHz 標本化という規格をもったチャンネルを8トラックそなえている。このトラックふたつをさきほどと同様ひとつのチャンネルの記録にわりあてれば、1.92MHz というたかい標本化周波数を使用することができる。その場合でも記録チャンネルは4チャンネル確保できる。DRU 8 はメディアとして専用のメタル・パーティクルテープをもちい、現時点では連続記録可能時間は最大でも20分とややみじかい時間に制限されている。しかし中規模の実験用途のシステムとして、かなりたかい完成度に達したシステムということができる。

〈超広帯域デジタル・マルチレコーダーDRU 8改の仕様〉

標本化周波数 1.92MHz

量子化ビット数 1ビット (YY 符号化)

チャンネル数 4

電 源 AC100V

(5) スタジオ用多チャンネル・デジタル・マルチトラック・レコーダーの活用

現在おもに商業音楽の制作につかわれている最高級のスタジオ用デジタル・マルチトラック・レコーダーを母体にして、YY 符号化による次世代の録音機を開発する構想を現在すすめている。

#### 3.1.2.4 超高速標本化1ビット量子化によるデジタル記録方式の応用

超広帯域信号の収録・編集のためのシステムとその高度化について前節にのべた。収録・編集用機材はいずれも母胎となる機械が高価であるかまたは特殊用途であるため、これらをそのまま一般用にもちいることにはさまざまな限界がある。一般運用のためには、機材やメディア



の入手が経済的にも容易であることや、母胎となる機材がすでに一般的に利用されていることが必要条件になるとかんがえられる。このような観点から、収録ののち編集をへて最終的利用のかたち、いわゆる完パケの状態にあるソフトウェアに超広帯域信号を移植し、DA コンバータのみを併用する再生を目的とした実地運用システムの検討と開発をおこなった。

### (1) DAT デジタル・オーディオへの対応

DAT (デジタル・オーディオテープ) 規格は、16ビット直線量子化方式によるシステムで、標本化周波数は48kHz または44.1kHz または32kHz のいずれかを選択する。DAT はいまのところカセットテープやCD (コンパクトディスク) ほどの一般性は獲得していないが、パーソナルなデジタル・オーディオ・メディアとなる可能性はおおきい。業務用としてはすでにさかんにもちいられている。

DAT とおなじ使用目的で競合しているあたらしいデジタル・オーディオ・メディアに MD (ミニディスク) 規格や DCC (デジタル・コンパクト・カセット) 規格がある。しかし、MD や DCC はデジタル信号に特殊な圧縮変調をかけて記録し、再生時に復調する方式をとっている。わたくしたちの方法は、独自の方式で符号化された超広帯域デジタル信号であるため、メディアには純粋なデジタルメモリーとしての機能のみをもつことが要求される。つまり入力されたデジタル信号をそのまま変化させずに再生出力しない MD や DCC などのメディアは、わたくしたちの方式に利用できない。

DAT を利用した再生系は、DAT 本体と、本体からのデジタル出力信号をアナログ信号に変換する DA 変換機との2台 (DA 基盤を本体内部に収納してしまえば本体のみ) から構成される。この場合 DA とソフトウェア (DAT テープ) とを移動することによって、デジタル出力をもつ DAT があればその機種をとわず超広帯域信号の再生が可能になる。この場合の超広帯域デジタル信号フォーマットは、データ転送容量が DAT と同一になる標本化周波数768 kHz×1ビットである。

### (2) D-2 映像規格への対応

現在の映像の業務用デジタル・レコーダーの主要な規格には、D-1 (コンポーネント・デジタル)、D-2 (コンポジット・デジタル)、D-3 (コンパクト・コンポーネント・デジタル) の3種類がある。いずれの規格においてもデジタル・オーディオトラックをそなえている。超広帯域デジタル信号をこれらのデジタル・トラックに記録することができれば、1ビット DA コンバーターと D-2 レコーダー等との組み合わせにより、超広帯域音声信号を高品位の

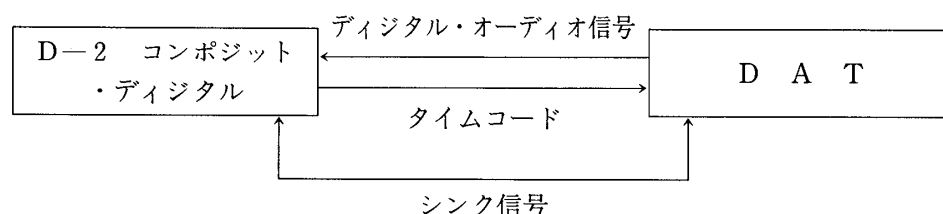


図3.10 D-2デジタルビデオレコーダーへのYY符号化デジタル信号のコピー

デジタル映像とともに再生することが可能になる。そこで、D-2 規格デジタル・ビデオレコーダーと試験教材とをもちいて技術的検討をおこなった。その結果、下記にしめすように D-2 レコーダーに業務用 DAT レコーダーをワードシンクおよびタイムコード同期運転させながらおこなうと、DAT に記録された超広帯域 1 ビット信号を D-2 へデジタルコピーすることが可能であることがわかった (図3.10)。

### (3) デジタル・オーディオトラック付 S-VHS への対応

S-VHS 方式の VTR はメディアとして一般性がたかくかつ高品位である。そこで、3.3.2 で実用可能にした超広帯域デジタル信号の記録法を応用して、最近登場したデジタル・オーディオトラック付 S-VHS への 1 ビット信号の記録をこころみ、ほぼ期待どおりの記録をおこなうことができた。ただし、デジタル・オーディオトラック付 S-VHS VTR は民生用なので、業務用機器からのデジタル・オーディオ信号をそのままうけつけることができない。そのため映像と 1 ビット音声信号のコピー作業にあたっては適切なデジタル・フォーマットコンバーターを使用する必要があることがわかった (図3.11)。

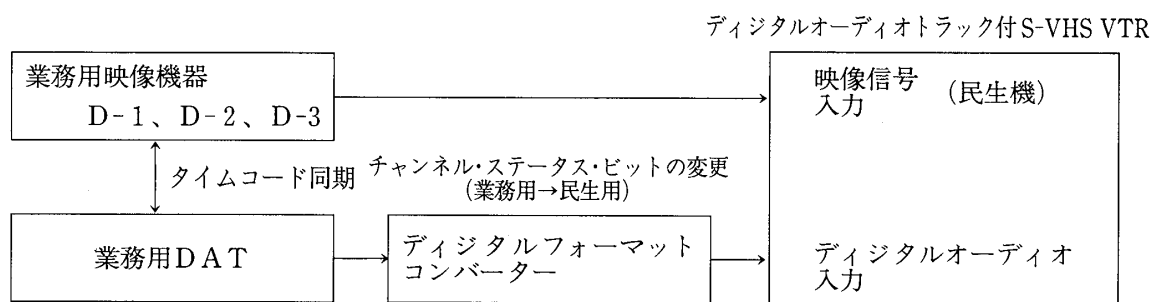


図3.11 民生用 S-VHS への超広帯域音声信号と高品位映像信号のコピー

### (4) CD への対応

より操作性がよく、半永久的な保存が可能な CD をもちいた記録手法を検討した。その結果、いわゆる CD-R との適合性がたかいことが判明した。CD-R で記録された CD は記録の最後に TOC 情報を書き込むことで通常の CD プレーヤーでの再生が可能となる。そのため 1 ビットデジタル信号を書き込んだ CD を再生し、そのデジタル出力を山崎方式の DA コンバーターに入力すれば、手軽に超広帯域信号の再生が可能となる。再生のみの利用を想定した場合、CD プレーヤーにくわえて、AD よりも構造が格段にシンプルな DA コンバーターのみそなえることによって超広帯域信号の再生が実現する。CD プレーヤー自体の普及はすでに相当なレベルにあるので、教育用途あるいは音環境造成用途など実社会への応用の実現可能性をおおきく前進することが期待できる。そこで市販の CD プレーヤーを材料にしてこのようなシステムを試作した。CD に記録する場合の標本化周波数は、705.6kHz である。

以上にのべてきたように超高速標本化 1 ビット量子化によるデジタル記録方式は、AD/DA 部は専用のものが必要になるが、記録部に関しては現在一般的に使用されているデジタル・オーディオ規格において実現可能であることが確認された。ただし、データ圧縮をとみな

表3.1 これまでに開発した超広帯域信号記録・再生システム

型式	もととなる レコーダ-規格	標本化 周波数	チャンネル 数	タイムコード 同期運転	AD/DA間 インターフェース	電 源	特 徴
I	DAT	768kHz	2	○（再生時 業務用レコーダ- を使用）	光 コネクタ AES/EBU	乾電池 AC100V	一般的な DAT規格
II	PC-204 （倍速4 チャンネルDAT）	768kHz	4	×	内蔵	NP-1Bバッテリー パック AC100-250V	ソニー（株）独自の 規格
		1.536MHz	2				
III	DRU8	1.920MHz	4	○	パナソニック	AC100V	ヤマハ（株）独自の 規格
IV	D-2 （デジタル 映像規格）	768kHz	4	○	AES/EBU	AC100V	業務用標準 機
V	S-VHS（デジタル オーディオ トラック付）	768kHz	2	△（ノーマルオーディオ トラックを利用 TCマスターのみ）	光 コネクタ	AC100V	民生用標準 規格
VI	CD （CD-R）	705.6kHz	2	×	光 コネクタ	乾電池 AC100V	民生用標準 規格 大量供給可

う規格や、あるいは独自のデータ補正をおこなう機種では、この方式は採用できない。

現在までに開発をこころみ、すでに稼働している超広帯域信号の記録・再生システムを表3.1にまとめた。

### 3.2 編集系

本プロジェクトがこれまでに収集した超広帯域音素材やこれから収集する音素材をいかした実験用音素材の調整、あるいは評価用教材の製作をおこなうためには、音素材のなんらかの加工編集が不可欠である。加工・編集をくわえることによる信号の劣化をゼロにすることは不可能であり、現実にはかならずなんらかの劣化、すなわち歪やノイズの発生、情報の欠落などが発生する。これらの信号の劣化を最小限にとどめることは最重要課題のひとつである。

いちばん有効な対策は、編集・加工の過程を最大でも1回に制限すること、そして、編集・加工過程で信号の経路となる機器の物理的特性を極限までたかめることだろう。編集加工系のなかでもっとも重要な影響をもつ機器は、編集卓（ミキシング・コンソール）である。コンソールは、マイクの直後からマスター記録装置への最終的な出力のあいだ、あるいは音素材の再生装置からの入力をうけ直接呈示系、またはさらに最終的なマスターとなる記録装置への出力のあいだの、すべての信号経路をうけもっている。つまり、万一コンソール自体が信号におよぼす負の影響がおおきいものである場合は、研究目的に使用できない。反対に、信号の高度な加工をコンソールを使用せずにすくないプロセスでおこなうことは困難である。そこで、計測機に匹敵する物理特性をそなえながら、先端的な回路技術によって高度な編集も可能であるとい

う、両立の困難なふたつの要求をたかいレベルで満たす機種が市場に存在しないかどうかを探索した。

### 3.2.1 超広帯域コンソールの選択

超広帯域信号の伝送は、その記録よりは比較的技術的困難度がひくい。ただし、記録系で実現したような超広帯域信号を実験水準で通過させうる機種は少数にかぎられる。本プロジェクトの目的に適合する機種であるかどうかは、技術的な問題はもちろんであるが、むしろその機種の設計思想が適合性のたかいものであるかどうか、より決定的に左右される。

というのは、20kHz以下の可聴帯域の特性は、研究用途でなくとも、一般ユーザーの関心の集中する帯域であるため、カタログにもかならず掲載され、さらにその仕様にするされるクオリティーをはかるパラメーターにも共通のものがおおい。ところが、20kHzをこえる超高周波帯域に関してはそれを記載する要請は一般的にかならずしもたかくない。そのため、慣例的に20kHz以上の帯域の特性の記載はメーカーの判断にまかされている。実状をさらにいえば、20kHz以上の帯域の特性をどのようにするかは、一般的なユーザーの関心もひくい帯域であるため、その内容を左右する唯一の変数はメーカーの設計思想である。

20kHz以上の超高周波帯域の成分は、不用意な設計のなされた電気回路のなかではしばしば、ノイズや歪の発生原因となる。この現象があるため高周波帯域信号の扱いについての方針はおおきくふたとおりにわかれる。ひとつの方針は、20kHz以上の帯域を入力部でカットして回路から排除するというものである。いうまでもなくこの設計がなされた機種は検討対象外となる。他方は、高周波帯域の信号とそれ以下の可聴帯域の信号とを区別せず広帯域にわたる高品位伝送をめざすという方針である。検討対象となるのは、後者の設計思想でつくられた機種である。比較は、f特による比較および広帯域音声の録音と再生による比較試聴実験によっておこなった。

表3.2 比較をおこなった3種類の概要

機種名	チャンネル数	自動化機能	イコライザー	ムービングフェーダー
AMEK MOZART (MZ15RNモジュール)	56 / 56	フェーダーレベル (VCA), MIX・ EQ・AUX etc (スイッチング)	4バンドパラメ トリック, Q可変	—
DDA 232	56 / 32	同上	4バンドパラメ トリック, 中域の2 ch.のみQ可変	DISK MIX
Soundcraft 3200	48 / 32	同上	同上	GML

図3.12 AMEK MOZART コンソール  
の周波数特性 (サーボ解析結果)

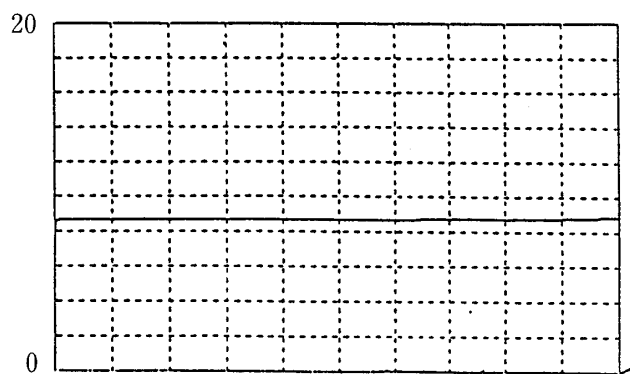


図3.13 DDA 232 コンソール  
の周波数特性 (サーボ解析結果)

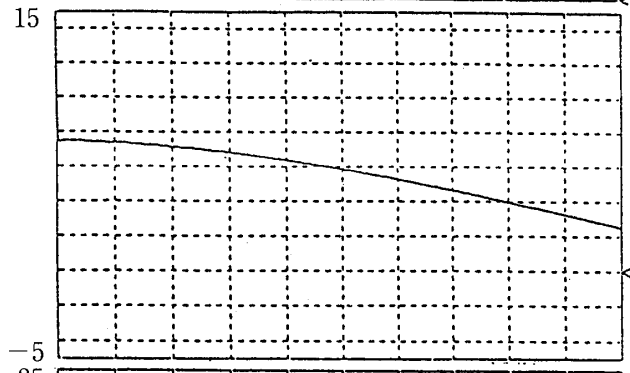


図3.14 SOUNDCRAFT3200 コンソール  
の周波数特性 (サーボ解析結果)

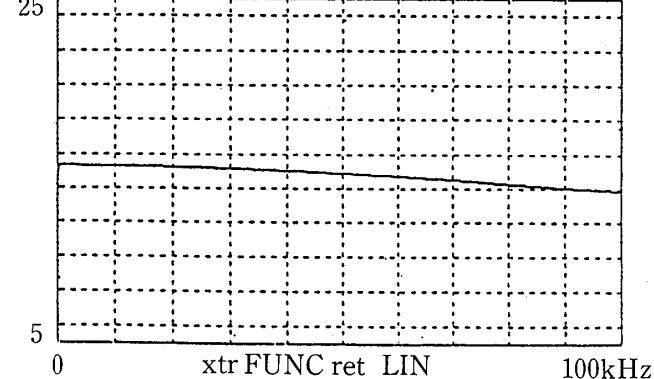


表3.3 音質比較実験の結果

機種名	サーボ解析 (DC-100kHz)	録音試験			
		声	打楽器	アンサンブル	計
AMEK	< + 0.2 dB	+++	++	++	++++++
DDA	- 5.0 dB	++	+	++	++++
Soundcraft	- 1.5 dB	±	++	++	++++

比較をおこなった3機種の概要は以下のとおりである。

図3.12～3.14にしめるように、とくに周波数特性のちがいはいちじるしかった。

比較実験の結果、物理特性としてこの研究の要求水準をみたしたのは、AMEK 社 MOZART のみだった。つぎに、実際に音を録音して音質チェックをおこなった。周波数分布が超高周波域におよび、はげしいゆらぎ構造をもつガムラン音楽およびブルガリアン・ポリフォニーを録音し、プロフェッショナルのレコーディング・エンジニアをくわえて音質評価をおこなった。その結果、AMEK 社の MOZART は聴感的に傑出していて、この研究にきわめて適合性がたかいことがたしかめられた（表3.3）。そこで、この機種を導入し、これを中心として編集系を構築することにした。

### 3.2.2 導入した超広帯域コンソールの機能と特性

AMEK 社 MOZART コンソールの機能と特性の概略は以下のとおりである。

コンピューター制御 VCA オートメーション・ミキシング機能

(VCA OFF 可能)

ムービングフェーダー・オプション対応可能

チャンネル数：入力56チャンネル

(最大112チャンネル)

出力56チャンネル

AUX 回線数：16

周波数特性（実測値）：DC～100kHz±0.2dB 以内

S / N 比：85dB 以上

イコライザー：4バンド・パラメトリック、Q可変

## 3.3 呈示系

呈示系、すなわち電氣的に記録・再生された超広帯域信号をふたたび空気振動に変換するシステムは、研究者が信号をモニターし、なんらかの加工編集の効果を確認し、最終的に被験者に空気振動をあたえるという研究のすべての過程において、決定的な役割をはたす重要な系である。

呈示系は、電氣的増幅装置（アンプリファイアー）と電気－空気振動変換装置（スピーカー）とから構成される。超広帯域信号の高忠実度伝送あるいは変換の実現は、スピーカーでは、いちじるしく困難度がたかく、本プロジェクトの目的と適合性のたかいスピーカーは既存の機種には存在しなかった。そのため、スピーカーシステムは常にオリジナルに開発する必要があった。本節ではスピーカーシステムの開発について、まず簡易実験用システムについてのべ、さらに本格的なモニターシステムの開発についてのべる。

### 3.3.1 バイチャンネル再生系の開発

従来、音響学分野での正統的な音質差評価用の再生装置は、共通の音源とスピーカのあいだに、フィルターを介在させた回路と、それを介在させない回路とのふたつをもうけ、スイッチ

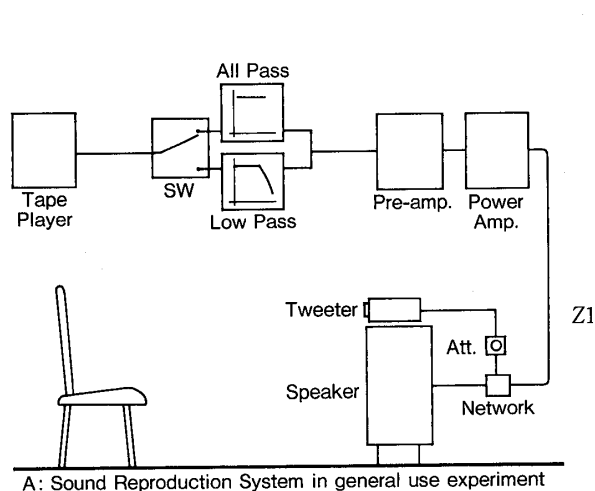


図3.15 従来の聴覚心理実験で一般的につかわれている装置系

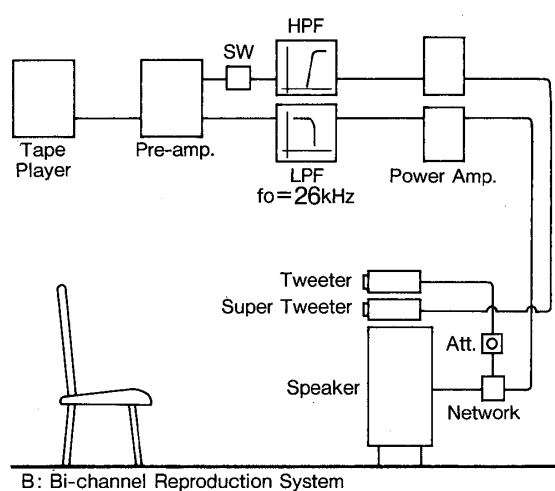


図3.16 バイチャンネル再生系

でどちらか一方を選択するというものである（図3.15）。この回路をもちいた実験では、もし、音質差がみいだせなければとくに問題は発生しない。しかし、もし、音質差が検知された場合、その原因がフィルター回路によっておこるいくつかの変化、すなわちフィルター通過周波数帯域の周波数応答特性の差、群遅延特性の差、混変調歪の差、フィルターで遮断した高周波成分のある・なしの差、のうちいずれに帰するものかを特定できない。つまり、この回路は原理的に、音質差が検知できないことを前提として設計された「予断にもとづく実験装置」というこ

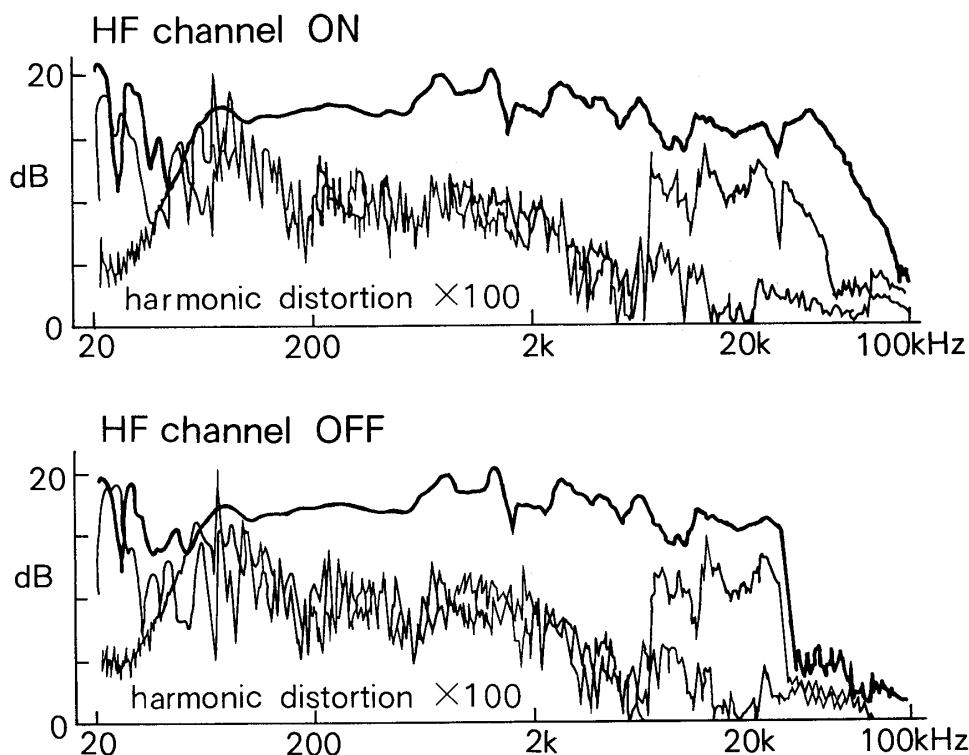


図3.17 バイチャンネル再生系の周波数応答特性

とができる。したがって、現行のこのシステム構成は本研究には採用することができないと判断した。

そこで、それらの問題を回避するために、音源の成分をまず特定周波数以上の高周波成分とそれ以下の低周波成分とに分離し、それぞれを完全に独立して再生呈示することのできる“バイチャンネル再生系”を開発した（図3.16）。

以下にのべる本研究で開発したスピーカーシステムは、すべてこのバイチャンネル再生系に該当する構成をとっている。まず、もっとも基本的なバイチャンネル再生系実験用スピーカーシステムの概要についてのべる。

26kHz 以下の可聴帯域チャンネル用にフォステクス社16cm フルレンジユニットとパイオニア社ベリリウムリボンツイーター（PT-R7III）とをクロスオーバー周波数6.5kHz でうけもたせ、26kHz 以上の超高周波帯域チャンネル用にさらに別のパイオニア社ベリリウムリボンツイーター（PT-R7III）をくわえた。このシステムはフルレンジユニット1つと同一のリボンツイーター2つとから構成されている。再生可能周波数上限は80kHz まではほぼフラット、85kHz 以上までレスポンスを有する（図3.17）。

### 3.3.2 環境音造成用小型スピーカー

つぎに、実験室外のさまざまな場所で簡便に設置でき、広帯域信号を再生することを目的とした比較的シンプルなスピーカーシステムを開発した。設計・調整は大橋がおこない、製作は（株）情報環境研究所の協力をえた。フルレンジ再生用ユニットの選択には、国内外のメーカーの代表的なユニットを実際にバッフルにマウントし、ユニットを切り替えながら比較試聴した。その結果、もっともすぐれた聴感成績をしめしたグイアトーン P601を採用した。高域用ユニットには前項とおなじくパイオニア社ベリリウムリボンツイーター（PT-R7III）を採用した。このユニットの特徴としては、まずフルレンジユニットである P601への入力パワーアンプから直接おこない、通常のように高域ユニットとの間にクロスオーバー周波数をもうけず、ツイーターへの入力信号の低域遮断周波数を15kHz、18kHz、20kHz と可変にし、使用環境にあわせて超高周波特性を調整可能にした点である。

### 3.3.3 超広帯域・超高トランジェントスピーカー“OOHASHI MONITOR”の開発

前節までは比較的小規模のスピーカーシステムの開発についてのべた。本節以降では、記録再生系の物理特性の高度化および実験システムの高度化に対応するために、ユニット自体の開発をふくむ、より本格的なシステムの開発についてのべる。

まず、本プロジェクトの研究目的に対して十分に機能するスピーカーを既存のモデルを対象に探索した。その結果、十分な性能を有するスピーカーは、本格的なスタジオモニターのなかにも存在せず、既存のスピーカーをもちいることによって目標を達成しえないことがわかった。そこで、これをあらたに設計・製作することにした。

#### 3.3.3.1 開発の構想

開発の構想を以下にのべる。



- ① 20Hz～最低100kHz 以上の超広帯域にわたって良好な周波数応答をもつこと。
- ② すぐれた自然楽器音や自然環境音のもつマイクロなゆらぎ構造を視野にいれ、音の質、音色の変化をかんじとりやすい周波数帯域にはとくに高度な過渡応答特性を確保すること。

②については、時間的にマイクロなゆらぎや瞬間的なインパルスへの追従という動特性はこれまできわめて厳格には問題にされてこなかった。従来の音楽聴取用スピーカーは一般にこのような動特性の忠実度を極限的にたかめることをめざしておらず、音の質やねいろに対して感性的に敏感な帯域をいかにこちよくならすかという、いわば楽器としての効果をめざして設計される傾向下にある。物理特性よりも聴感上のこのましさを優先した設計がなされる点では、厳密な忠実度を要求されるはずのスタジオ用モニタースピーカーにおいてさえ、例外ではない。物理特性の忠実さを徹底的にきわめるといいう方針がとられていないトランジェント性能に問題のあるスピーカーは、本研究には適合しない。

可聴帯域は、とりわけハイ・トランジェントの鋭敏なトランスデューサーによって振動させる必要がある。このような特性をたかい水準で達成することは困難である。通常この問題をクリアするためにとられる方法は、マルチウェイ方式とよばれる方式である。これは20～30Hz から20kHz の周波数帯域を、3ないし4ウェイ(帯域)に分割し、それぞれの帯域を別々のスピーカーによってドライブするというものである。この方式は、周波数分析をおこなった場合、一見、良好な特性を実現しやすいというメリットをもつ反面、おおくの問題点をもっている。そのひとつは、呈示系のなかにならずチャンネル・ディバイダー(帯域分割器)を介することになり、この回路のなかで分割された信号間で干渉歪や分割帯域ごとの伝達速度のちがいに起因する位相ズレ等の歪が発生することがさけられない点である。また、本来1本の時系列で変化している信号を空間的にことなる位置、ことなる振動体で再生するために聴取位置での位相再現性がいちじるしく低下することをさけられない。以上のような問題をもつマルチウェイ方式をとることはこのましくない。

原理的にこうした問題を回避する方法は、1枚の振動板で低周波から超高周波までのすべての帯域の振動をカバーすることである。しかし、これを理想的に実現した場合、現時点では、スピーカーとしての実用性をたもつことがむずかしい。そこで、実際に1枚の振動板でカバーすべき帯域について検討した。

時間的にマイクロなゆらぎやインパルスなど、音色の微妙なちがいを決定する成分に対して感性的にもっとも鋭敏な帯域は、約1 kHz を下限とするそれ以上の可聴帯域である。この帯域を1枚の振動板でカバーすることができればおそらくトランジェントの点において画期的な性能を有するスピーカーとなり、本研究の目的に対しても十分に機能することが期待される。スタジオモニターとしてこの帯域をうけもたせる忠実度のたかいスピーカーユニットの形式としては、コンプレッション・ドライバで駆動するホーン型がのぞましい。そこで、1枚の振動板で1 kHz 以下から最低でも20kHz 以上までの帯域を十分にカバーするホーン型ユニットという、従来の常識をこえた仕様をもつスピーカーユニットの開発を基本的な前提としてシステムを構想した。

開発は次の2段階をへることとした。

- ① プロトタイプ

## ② リファレンスモデル（プロトタイプにサブウーファーをくわえる）

本構想を実現する開発能力を有するメーカーを探索した。その結果、パイオニア株式会社は、すぐれたスタジオ用ホーンスピーカーの製造実績をもち、高周波領域の再生技術にたけている。本プロジェクトにおいてもこれまで超広帯域再生用として使用してきたリボンツィーターのメーカーでもある。パイオニアの技術開発部の中でも業務用スピーカーユニット“TAD”開発チームが最適と判断し共同開発者として選択した。

つぎに設計段階にはいった。

### 3.3.3.2 プロトタイプの開発

超高周波帯域を担当するスーパーツィーターには20kHz～100kHz以上の再生を余裕をもっておこなう性能が要求される。高周波電気振動を忠実に空気振動に変換するためには、かるさと剛性との両方をかぎりなくたかめることが要求される。従来、高周波再生にもっともすぐれた素材と方式は、本研究でも採用してきたように金属の薄膜を静電容量の変化によって振動制御するリボンツィーターであった。ところが最近この方式をしのぐ可能性をもつ究極的ともいえる振動板素材が開発された。それは、炭素分子をいったん蒸気化し、その後ゆっくりと鋳型上に蒸着してつくられるアモルファス・ダイヤモンド薄膜振動板である。軽さおよび硬さ（剛性）の点でいまのところこれをしのぐものはない。そこで、本研究にとってもっとも重要な超高周波帯域の再生にこのアモルファス・ダイヤモンド薄膜ドームツィーターを採用することにした（図3.18-19）。とはいえ、この素材は1枚の製作に数週間を要することから、単体のユニットは市販品としては入手不可能である。研究開発用として特別に供給をうけることができたため利用可能となった。

つぎにシステムを中心となる1kHz以下から20kHz以上の帯域を担当するユニットの開発についてのべる。本開発でもっとも力点をおいたこのようなユニットは従来例がなく、適当な名称すら存在しない。開発方針として基礎となるドライバーを改造して性能を達成することを検討した。しかし中高域用のドライバーでは高トランジェントの点で十分な性能がえられない。そこで、スーパーツィーター用のドライバーユニットの低域再生限界をさらにひくい帯域にのばして、これを中低域からつかうという構想をたてた。改造に使用したユニット（図3.20）は、本来5kHzまたは10kHz程度から40kHzにおよぶ帯域をうけもつべく設計されたスーパーツィーター用ベリリウム振動板ドライバーユニットである。これを改造し適切なホーン（図3.21）とくみあわせることによって1kHz以下からの再生を可能にすることに成功した（図3.22）。

つぎに改造したホーンツィーターによってはカバーしきれないよりひくい帯域を補強するウーファーについて検討した。ホーンツィーターで究極的にたかめられたトランジェントと、そこで確定した音色とに適合する性能と音色とをもつ低域再生ユニットは、既存品には適当なものをみいだすことはできなかった。そこで、ウーファーについても他のあたらしく開発したユニットとの間で矛盾がないものがあらためて開発された（図3.23-24）。これらのユニットによってスピーカーシステムを組みあげ、物理特性と感性評価とをくりかえして、プロトタイプを完成した。

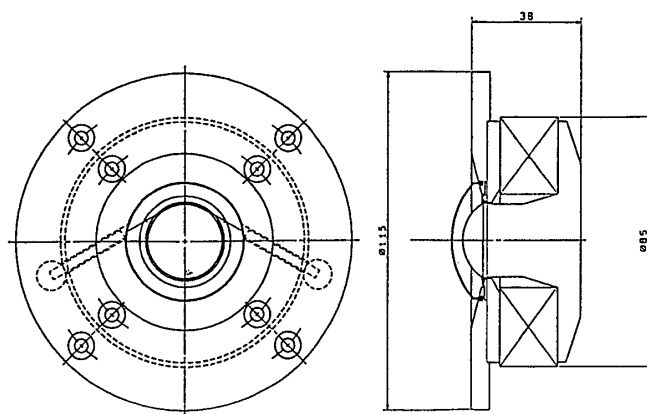


図3.18 スーパーツイータ構造図

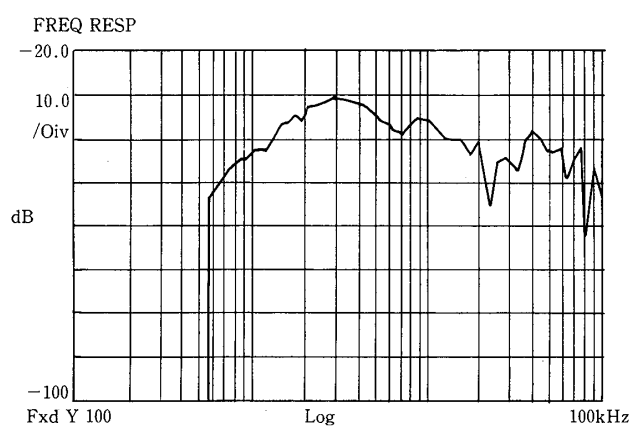


図3.19 スーパーツイータ周波数応答特性

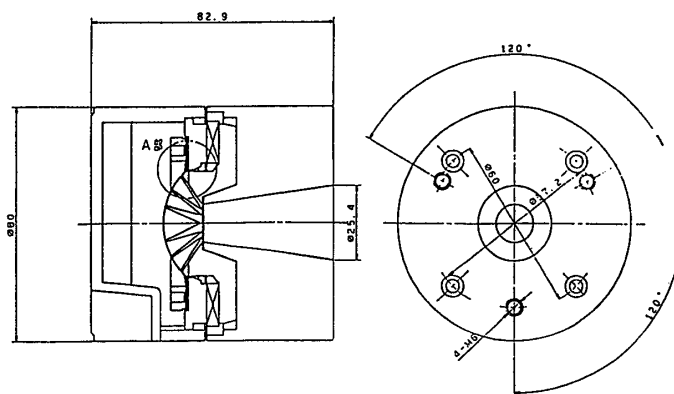


図3.20 コンプレッション・ドライバー構造図

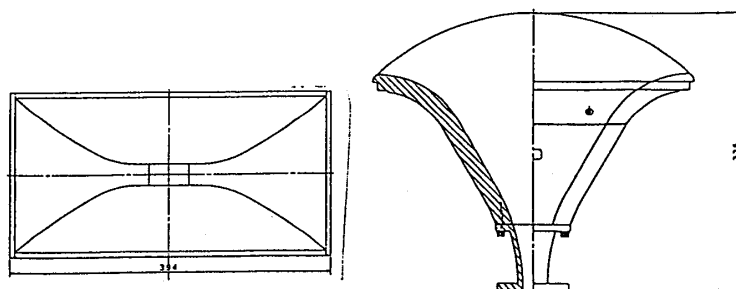


図3.21 ホーン構造図

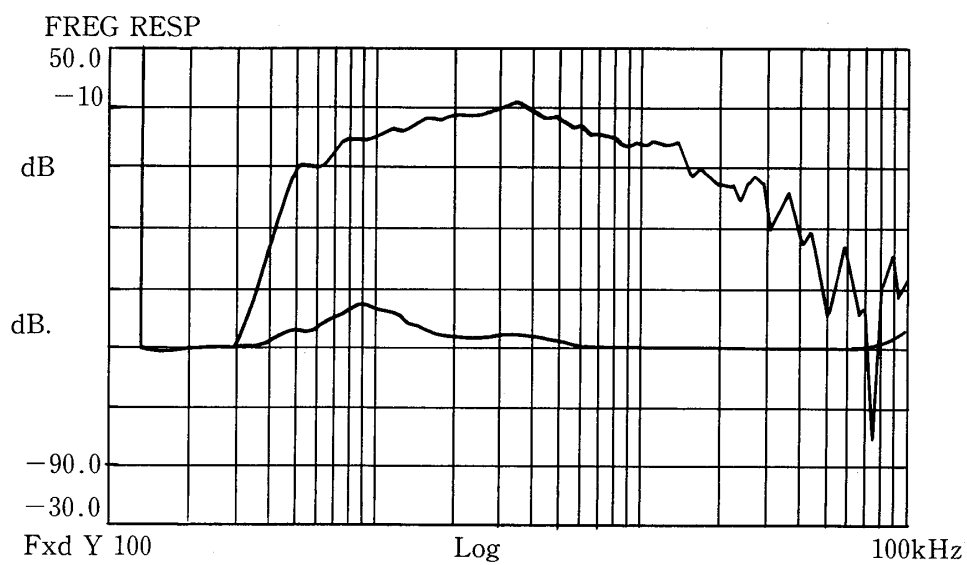


図3.22 ホーンスピーカー音圧特性、インピーダンス特性

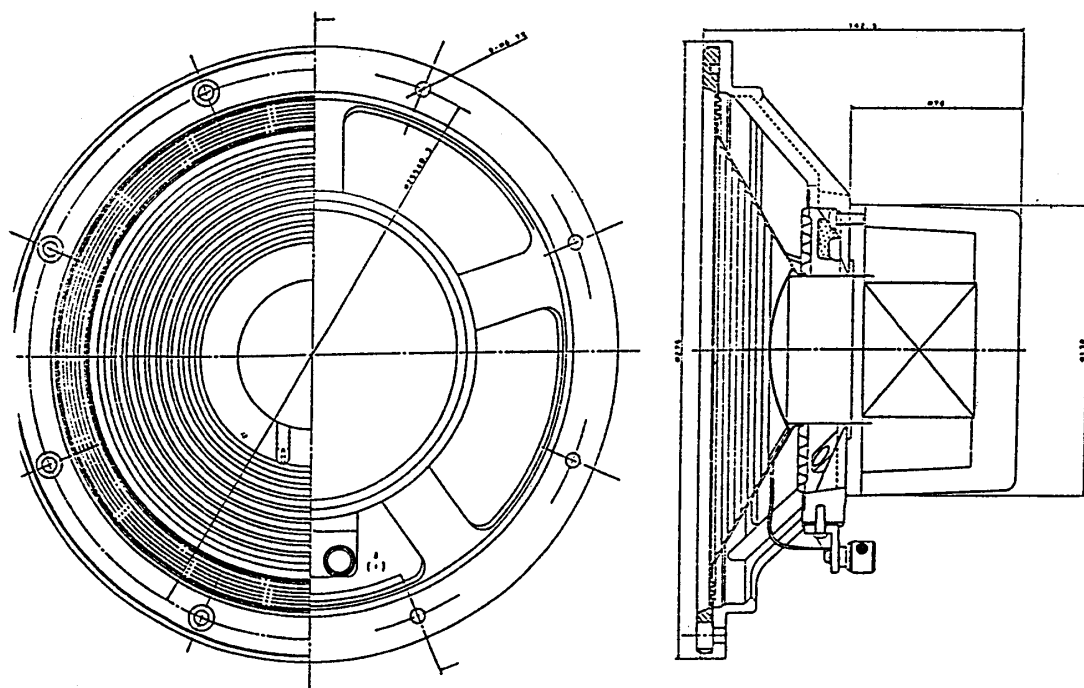


図3.23 オリジナル25cm ウーファー構造図

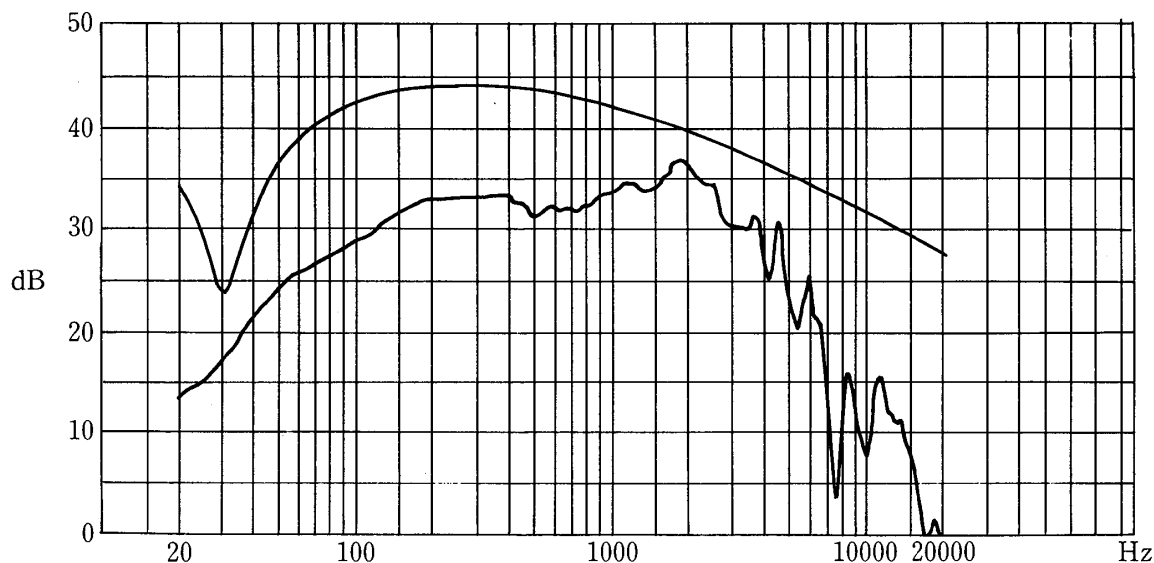


図3.24 オリジナル25cm ウーファー音圧特性、アドミタンス特性

ここで開発したプロトタイプモデルの同型機種は、放送教育開発センター以外でもすでに音響研究やリラクセーション情報環境シミュレーターなどにおいて複数台稼働している。

### 3.3.3.3 リファレンスモデルの開発

本格的なスタジオモニターとしてもちいるには、プロトタイプ単体では低域の再生能がやや力不足である。このような点を改善するために一般的にとられる方法は、内部の結線を変更し、本来の3ウェイにさらにサブウーファーをくわえて4ウェイとするものである。

この方法ではすべてのユニットの背面はひとつの箱のなかの空間を共有するかたちとなる。それぞれのユニットは振動するとき、箱の内側にもおなじ振動数で変化する圧力の変化を生じさせる。たかい周波数帯域をうけもつユニットの表面積と振幅は一般的にちいさいため、これが箱内部の空間の圧力変化をつうじてひくい帯域をうけもつ振動板にあたえる影響は比較的ちいさい。一方、ひくい帯域をうけもち一般的に表面積も振幅もおおきい振動板は箱の内部にも相当おおきな圧力の変化をうみだす。この背面圧力（バックプレッシャー）による相互作用は、とくに中高域を担当する敏感な振動板によりつよくはたらき、高忠実度の再生をさまたげる。よって、このような一般的な方法をとることはできない。このような影響をさけるためプロトタイプで高トランジェント性能を実現したシステムに、エンクロージャー自体が独立した40cm径のサブウーファーユニット2個をくわえるという方法をとることにした（図3.25）。ただし、この独立したサブウーファーユニットを空間的に分離した構成にした場合、設置方法が複雑になり、視覚的にもこのましくなることから、外見上はひとつのスピーカーとし、エンクロージャーを内部で完全にふたつに分離した（図3.26）。

#### 〈デザイン〉

デザインは、音響設計上矛盾が生じないことを設計技術担当者と確認をとりつつ、スタジオおよび実験室での使用に適した色彩とかたちとを大橋を中心にしてオリジナルに設計した。それにもとづいて、パイオニア技術陣側で微調整をおこなった。デザインは、モニタースピーカー

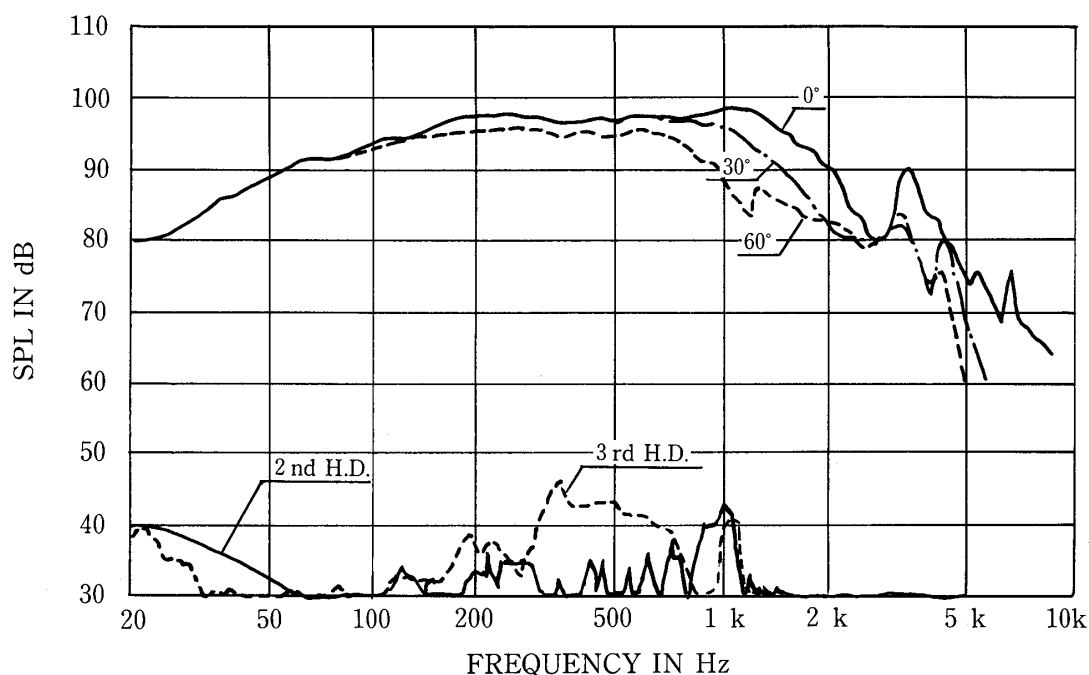


図3.25 サブウーファー (TL-1601b) 音圧特性

という性格上、一般的にはあまり重視されているとはいえないが、人が対面して長時間作業する大型の機材であるから、道具としての完成度を最終的に決定する非常に重要な要素のひとつである。そのような意味でもあたらしい次元をひらくことをめざしてデザイン作業をおこなった。最終的には、端正なプロポーションをもち、色彩はライトブルーとライトグレーを基調としたあかるくおちつきのある、これまでにないデザインとした。

#### 〈最終調整〉

いずれのタイプのスピーカーシステムでも同様であるが、微妙なセッティングやコンディショニングのちがいが原因で音質自体が劇的に変化することから、システムの最終的な微調整のもつ意味は非常におおきい。本システムではプロトタイプ、リファレンスモデルともに基本的なシステムがくみあがってからのち、1年ちかい期間にわたり大橋自身が製作工場に出向いて調整にあたった。調整のための試聴にもちいる音源にはとくに注意した。なぜなら設計・製作過程の試聴にもちいる音源はできあがるスピーカーの性質に決定的な影響をあたえるからである。つまり、高トランジェントの性能の実現を目的として調整をおこなう場合、当然であるが高トランジェントの信号がふくまれない音源をもちいても調整の結果が目的に対して肯定的なのか否定的なのか判断することが不可能になる。今回の調整に使用した音源は、さきにのべた1ビットYY符号化方式のDATにより大橋みずからが録音した超広帯域信号をふくむガムラン等の音源である。これらの音源をレコーダーごともちこみ、厳密なチェックをくりかえした結果、音質と解像度とを両立させたスタジオモニターとしても画期的な機能をもつリファレンスモデルが完成した(図3.27)。

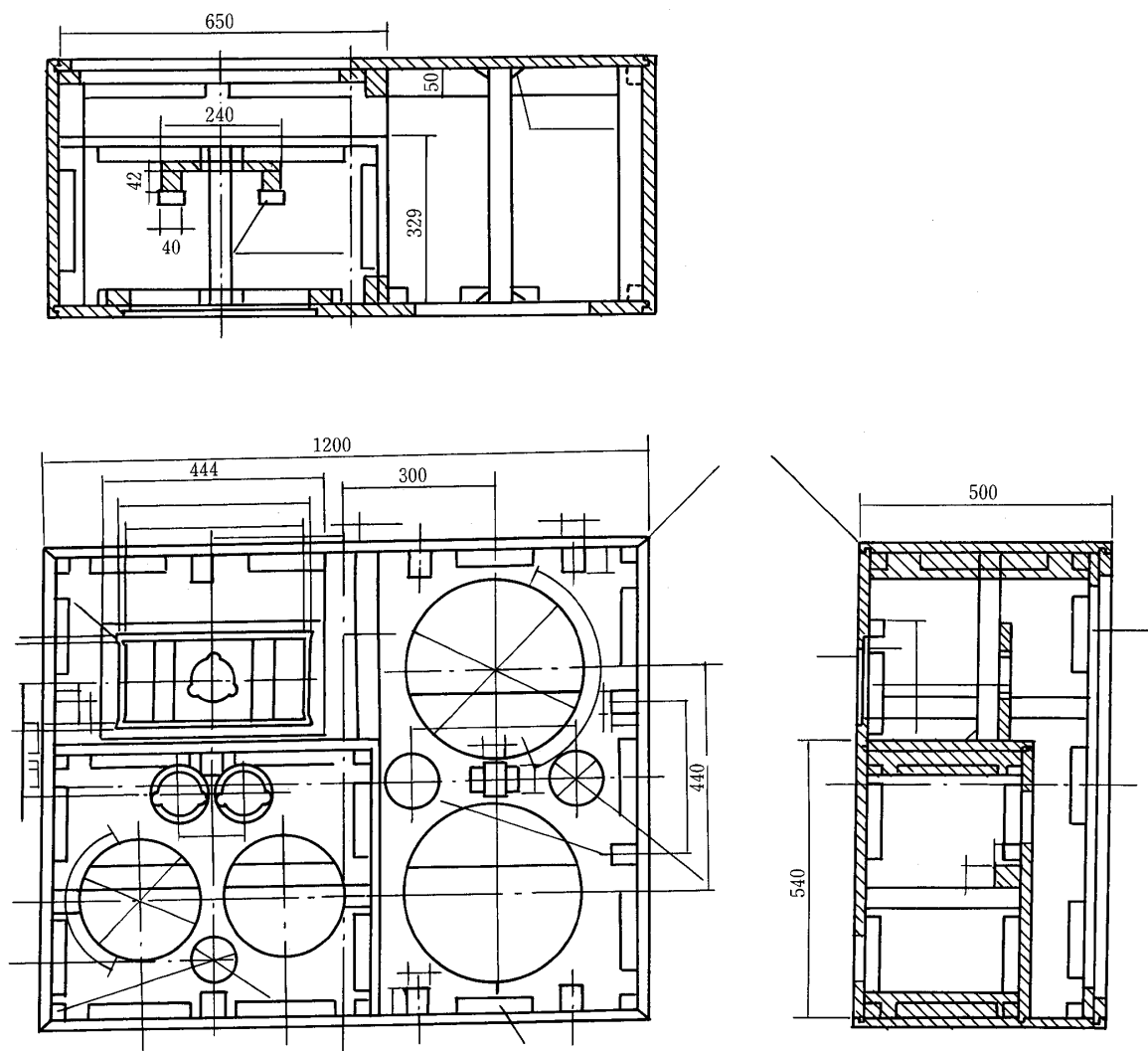


図3.26 エンクロージャーキャビネットの構造

#### 〈アンプリファイアの選択〉

このスピーカーを駆動するパワーアンプリファイアには、スピーカーで極限までたかめられた広帯域のトランジェント性能を最大にひきだすものを選択する必要がある。まず業務用スタジオでもちいられている国内外の代表的なプロフェッショナル・パワーアンプリファイアについて実際にリファレンスモデルと結線し、比較試聴をおこなって検討した。ところが、このスピーカーの鋭敏さと忠実度とが従来の概念をこえているため、パワーアンプのちがいによる音質差がはなはだしく、とりわけアンプの力量不足が顕著にみとめられた。可能なかぎりひろい範囲にわたって検討した結果、アキュフェーズ社の純A級パワーアンプA100が現状では卓越した適合性をしめしたので、これを採用した。

#### 〈リファレンスモデルの仕様〉

基本設計：大橋 力（文部省放送教育開発センター）  
デザイン：大橋 力、当 摩 昭 子（東京電力株式会社）

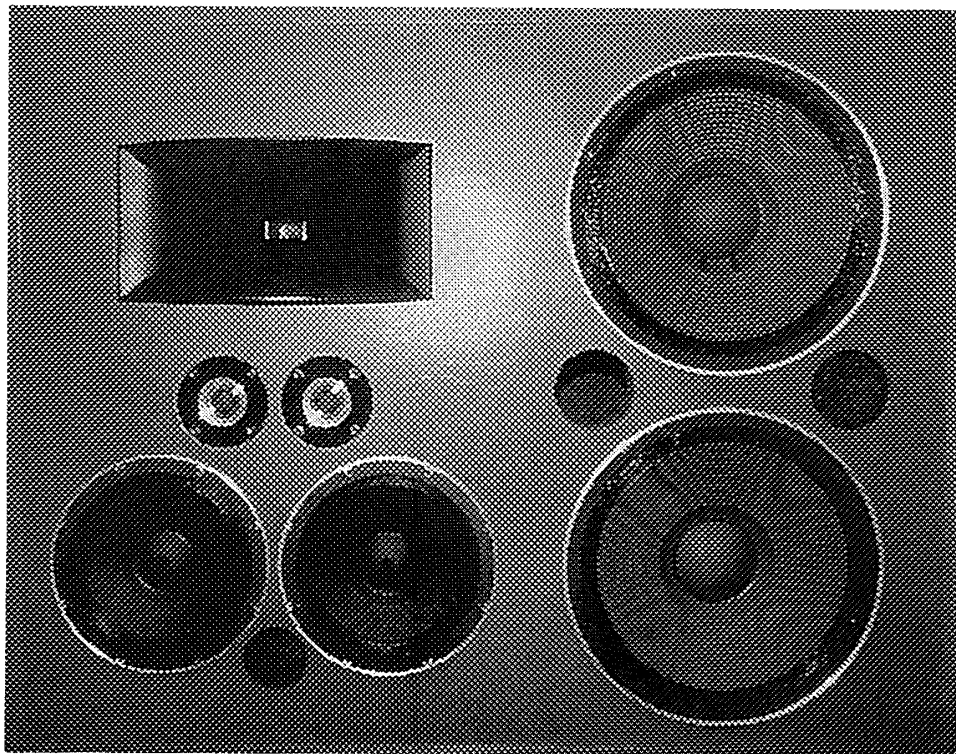


写真3.4 リファレンスモデルの外観

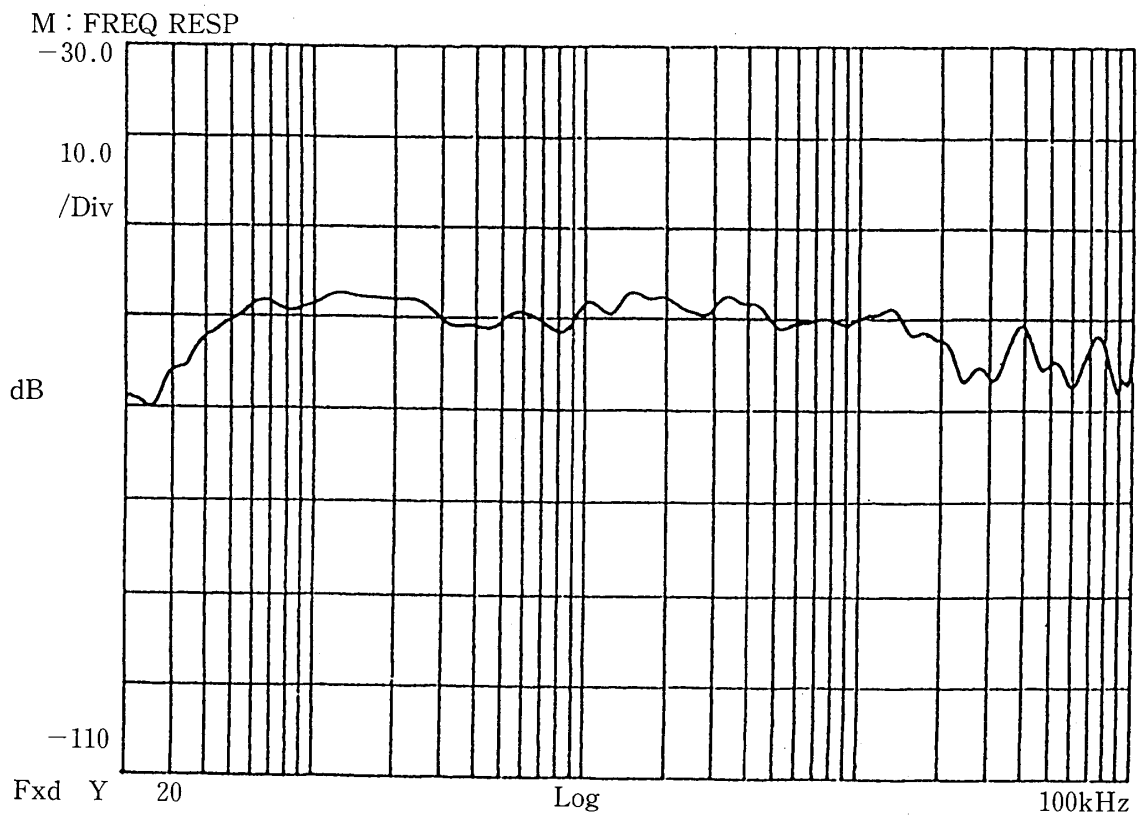


図3.27 リファレンスモデル周波数特性



## 第II部 あたらしい方法論の開発

実機設計、製作：小谷野 進 司 (パイオニア株式会社)

スピーカー部

使用ユニット：

70Hz以下 ……………TAD TL-1601b×2コーン

TAD ブランドで世界中のスタジオでもちいられているスタンダードモデル。

70Hz～900Hz ……オリジナル TL-1001×2コーン

オリジナルコンプレッションドライバーに音質を合わせるために TL-1601b とおなじコンセプトであらたに設計された25cm ウーファー。

- 1) フィルムラミネートコーン
- 2) アルニコ7マグネット

900Hz～30kHz……オリジナル ET-1501コンプレッション・ドライバー

超広帯域・高トランジェントを実現するシステムの中核となるまったくあたらしいコンプレッションドライバーユニット。

- 1)  $\phi 35$ 口径のベリリウム振動板
- 2) 再生帯域 500～40kHz
- 3) サマリウムコバルトマグネット

オリジナル TH-1501ホーン

- 1) イタヤカエデ材のけずりだしによるオリジナルウッドホーン
- 2) 水平指向角 60度

30kHz～100kHz ……オリジナル ST-1001×2ドーム

- 1) 非結晶質ダイヤモンド振動板
- 2) 再生帯域 2kHz～100kHz
- 3) 20,000ガウスの磁気回路

キャビネット：アピトン合板をもちいた高剛性、低共振構造キャビネット

インピーダンス：4  $\Omega$

再生周波数帯域：22～100,000Hz

許 容 入 力：定 格 300W

最 大 900W

出力音圧レベル：95dB/W/m

最大出力音圧レベル：120dB/m

外 形 寸 法：1200(W)×950(H)×582(W)mm

(エンクロージャー奥行500mm)

重 量：170kg

エレクトロニックデバイダー部

入力端子 感度/インピーダンス：最大 8 V/40K $\Omega$  (平 衡)

20K $\Omega$  (不平衡)

クロスオーバー周波数：70Hz

減衰特性：-12、-18dB 切り替え

出力端子 レベル/インピーダンス：100Ω（平衡）

50Ω（不平衡）

出力レベルコントロール：0 ～ -20.5dB

（左右独立0.5dB ステップ）

S N 比：100dB

電源：AC100/117/220/240V 50/60Hz

外形寸法：445(W)×109(H)×373(D)mm

重量：9.1kg

### 3.4 実験環境の構築……メディア機能分析室

メディア機能分析室は、編集・分析室と呈示室とのふたつから構成されている。設計は、いずれも音響スタジオ設計者として世界の第一人者である豊島政美氏（ビクター音響設計事務所）に依頼した。

#### 3.4.1 編集・分析室

編集・分析室（写真3.5）は、超広帯域音声信号の記録・再生・加工・編集・分析をおこなう機能と、脳波をはじめとするさまざまな生体情報の記録・再生・分析をおこなう機能とをもっている。



写真3.5 編集・分析室

## 第II部 あたらしい方法論の開発

音声系統は超広帯域対応の AMEK 社“MOZART”コンソールが編集系としてシステムの中  
心となり、その周囲にすでに述べた記録・再生系、加工系、分析系、モニター系が配され、コ  
ンソールとのあいだで入出力回路をもっている（図3.28）。

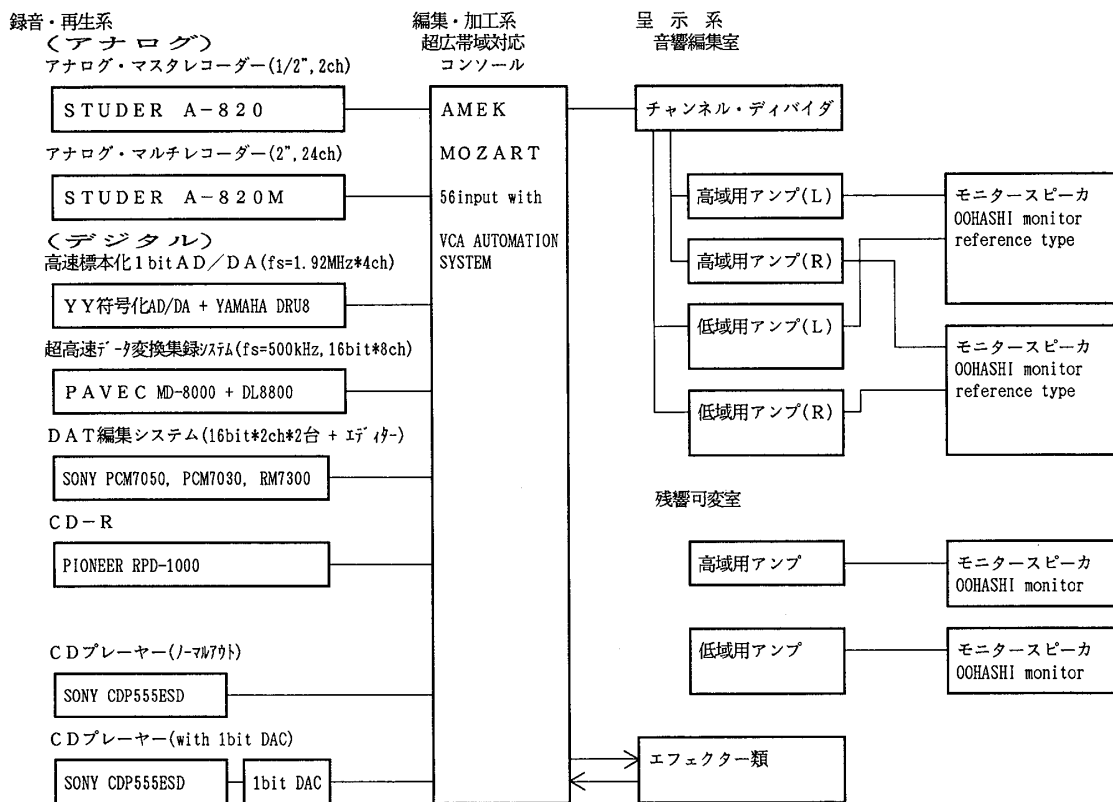


図3.28 編集・分析室システムブロックダイアグラム

記録・再生系はおおきくアナログ系とデジタル系とに分かれる。アナログ記録・再生系は、スチューダー社 A-820シリーズの2インチ・マルチチャンネルレコーダー（24ch）と1/24インチマスターレコーダー（2ch、タイムコードトラック付）を選択した。いずれもノイズリダクションシステムにドルビーSRカードをそなえている。これらのレコーダーはアナログレコーダーとしては究極的な性能を有しており、テープスピード30ips（76cm/秒）で使用した場合の周波数レスポンスは70kHzにおよぶ。さらに、これらふたつのレコーダーはシンクロナイザーによって1/1500秒以下の精度での同期運転が可能である。

デジタル記録・再生系は、超高速標本化16ビット直線量子化データ変換・半導体メモリー記録・再生システム、超広帯域1ビットYY符号化テープレコーダー、業務用DAT、CD-Rで構成される。

加工系は、リバーブ・ディレイ等をおこなうデジタル・シグナルプロセッサ、真空管素子をもつコンプレッサー、当研究で開発した18k～80kHz帯域の調整が可能であるオリジナル超広帯域パラメトリック・イコライザー等から構成される。

分析系は、音声信号、生体情報のいずれにも対応可能なシステムとして、100kHz×2チャンネル

ネルFFT (CF-360：小野測器)、および半導体メモリーレコーダーと SCSI インターフェースでむすばれたワークステーション (SS10：サン・マイクロシステムズ) 上の信号解析ソフトウェアで構成される。また、生体情報、とくに脳波に対応するシステムとして、28チャンネルデータレコーダー (XR-9000：TEAC) および脳波画像解析システム (MCE-5200：日本光電) で構成される。

編集・分析室のメイン・モニタースピーカーには、オリジナルに開発した22Hz～100kHzの再生が可能である超広帯域・高トランジェントモニター・リファレンスモデルを使用する。また、スモール・モニタースピーカーには、ジェネレック社 S-30NF モデルを使用した。

コンソールと隣室の呈示室との間には、マイク・ラインの平衡回線を48ch、モニター回線6ch×2系統、計測用同軸-BNC端子回線10ch、ステレオ出力回線3系統がすべて壁コンセントあるいは床下ピット内にもうけられている。

### 3.4.2 呈示室

#### 3.4.2.1 開発の基本構想

呈示室は、実験用のさまざまな視聴覚情報を被験者に呈示する機能と、被験者から脳波をはじめとする生体データを検出し、隣室の分析室に送信する生体情報計測機能とをあわせもつ必要があることはいうまでもない。こういった呈示室の機能のほかに、けっして過小評価してはならない重要なポイントは、さまざまな電子機器を駆使してつくりだされる実験的な情報環境以前に、呈示室が素地としてもつ部屋そのものの情報環境が、被験者に相当おおきな心理的影響をあたえるということである。これまでの生体情報計測・研究においては、その計測室内の情報環境についての配慮はけっして十分とはいえない。それは、生体情報計測手法が、病理的現象発見という医療目的のもとで開発されてきたことと無関係ではないだろう。しかし、健常者を対象にして、しかも持続的な情報環境要因の影響を生理学的に把握する実験研究をおこなううえでは、実験室の情報環境は、結果にきわめておおきな影響をおよぼす。

ところが、こうした実験室の設計がおこなわれる場合、そのような条件があることは、十分考慮されないというよりもむしろ、積極的に無視されているともとれるケースがおおい。

たとえば、音響情報の呈示を目的にした実験室となれば、とにかく音の反射特性を最大限コントロールできるように、半面に反射材、もう半面に吸音材をとりつけた円柱ですべての壁面が構成されたり、生体情報の計測に重点をおくとなると、実験者ではない被験者にとって、見慣れない計測機器が恐怖心をかきたてられるように設置されているといったケースはすくなくない。ある実験機能、たとえば音響特性を実現するためには、ほかの要因、たとえば視覚環境として居心地のいいものかどうか、被験者に違和感をいだかせはしないかなどといった側面はある程度犠牲にされても仕方がないとする態度の方が一般には支配的である。

しかしそのように、特定のかぎられた面では非常に高度に機能を達成しているにもかかわらず、その他の面、すなわち被験者が情報環境からどの程度決定的な影響をうけるのかについての洞察にかけた設計がなされている実験室においては、病理現象の抽出は可能ではあっても、より高次の感性的生体情報を抽出することは困難にならざるをえない。

電子メディアによる情報環境造成機能、音響特性制御機能、生体情報測定機能と、被験者に

とって快適で不安感がなく日常生活となんらかわらない情報環境とを同時に実現することは非常に困難であるにちがいない。しかし、この課題を高次元で達成することなしには、本研究の目的に十分かなうデータをえることは期待できない。

以上のような感性情報論的検討がくわえられ、あたらしいコンセプトにもとづいた呈示室を、機能はもとより内装にいたるまで細心の注意をはらって設計・構築した。

### 3.4.2.2 呈示室の概要

まず、音響反射特性がことなる3面をもつ回転三角柱で構成された音響特性制御機能をもつ壁面をあらたに開発した。三角柱の各面は、吸音性のたかいジャージクロス表装されたグラスウール、ピアノなどにもちいる桜材、インド産大理石ということなる音響反射特性をもつ素材をもちいて構成した。この合計32本の三角柱を独立に回転制御することにより、室内に多様な音響特性を実現することが可能となった。さらに天井面には、ジャージクロス表装のグラスウー

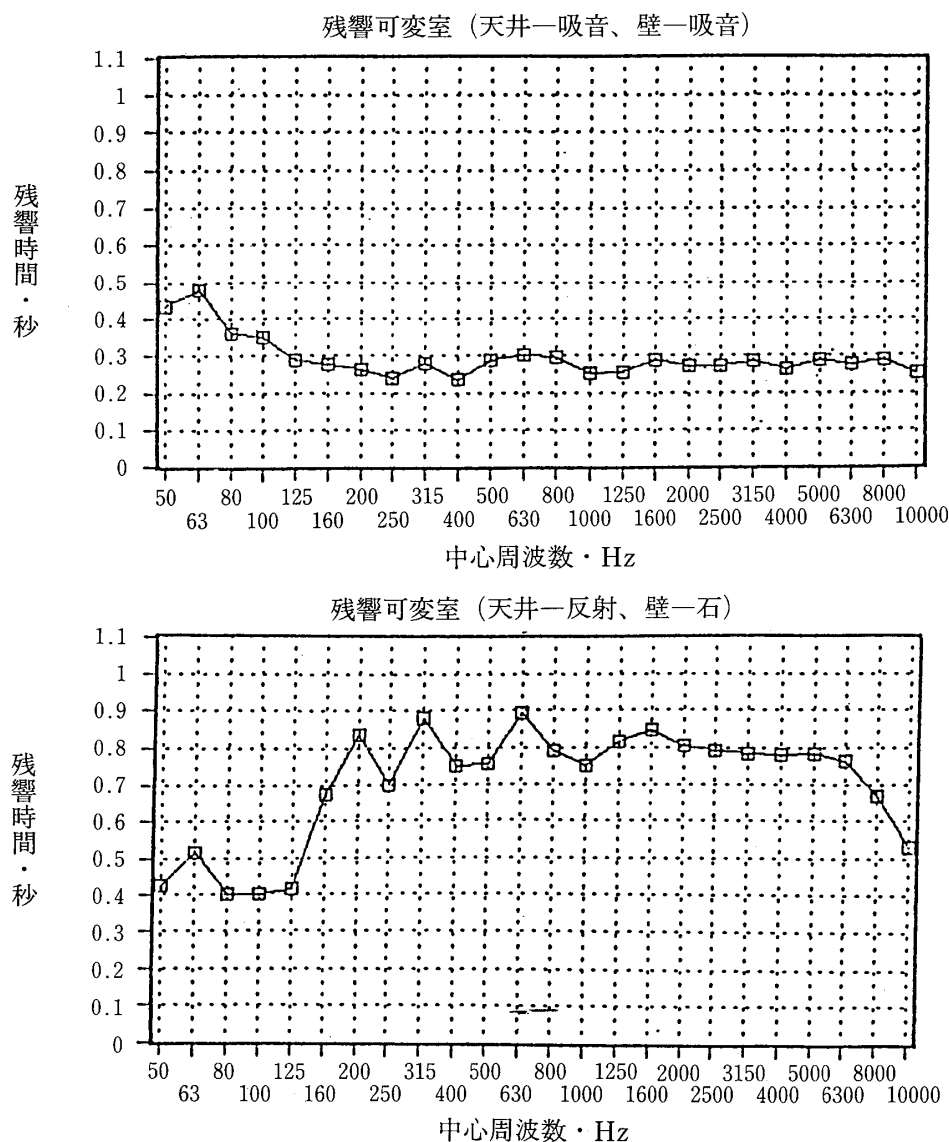


図3.29 呈示室残響時間周波数特性

ル吸音面と、その手前に桜材の引き戸をもうけ、これを開閉することにより音響特性制御効果をたかめた（図3.29）。

また呈示室の四辺の壁面のうち一面は、屋外が一望できるガラス窓とし、従来の遮音型実験室にはみられない開放感を演出することに成功したが、同時に強力な吸音処理をほどこした二重窓にすることによってたかい遮音性能をも保証した。

内装は、回転三角柱以外の面は木質系に統一し、床面はフローリング仕上げとした。配線類はすべて床下ピットにておこなったほか、最低限必要なハードウェアも被験者の視野にはいらぬよう配慮した。さらに植栽や環境絵画などを配置し、被験者ができるだけリラックスできるよう視聴覚情報環境の整備がなされた（図3.30）。

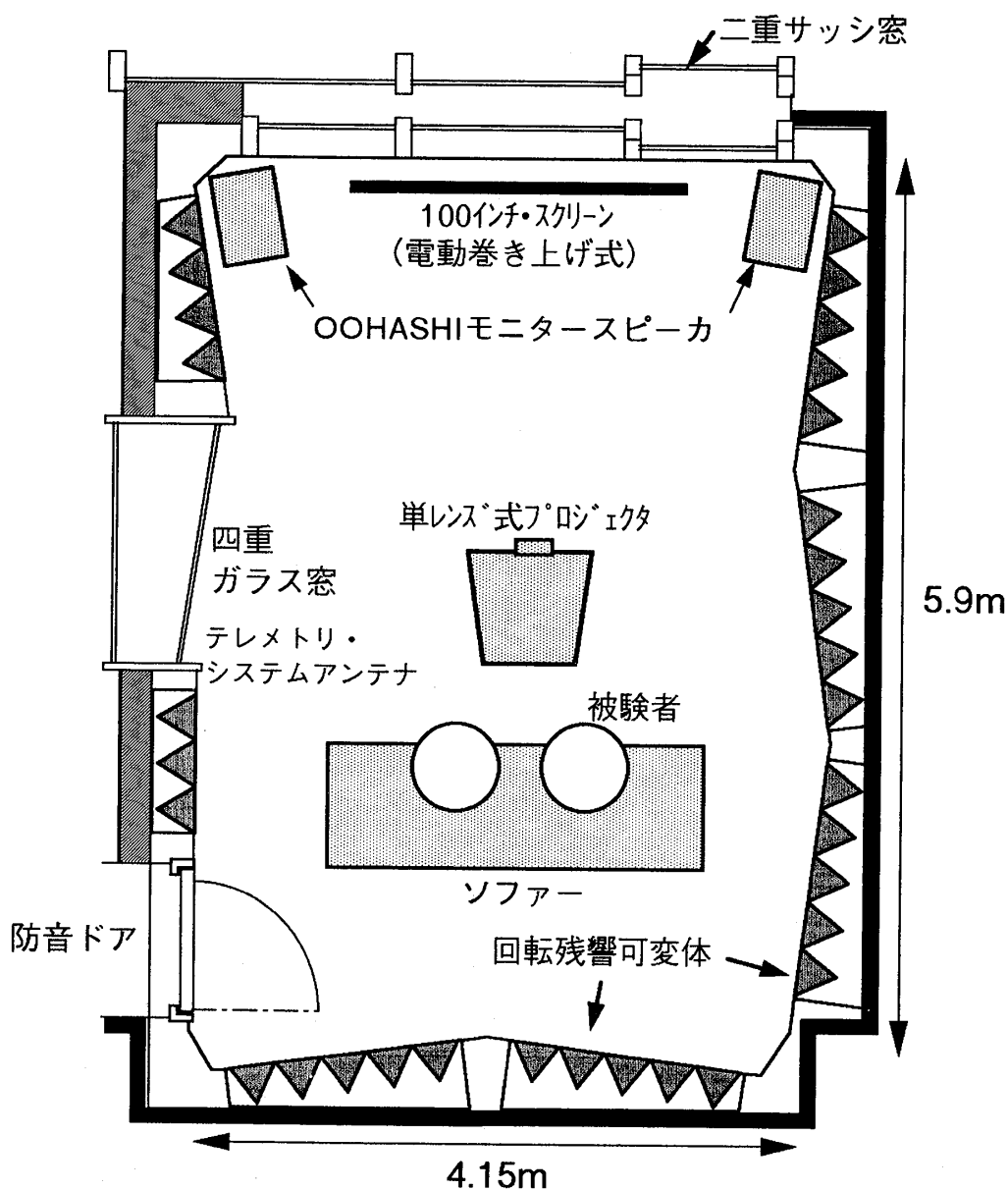


図3.30 呈示室レイアウト

これとおなじ発想で、被験者が身につけるウォークマン程度のFM送信機以外には、生体情報計測機器は一切呈示室内にはおかず、壁面のめだたない位置に受信用アンテナを設置し、隣室の分析室にデータ送信する方式をとった。

この呈示室に、人類が体験しうるほとんどすべての物理構造をもった音響情報を呈示しうる超広帯域・高トランジェントモニタースピーカー“OOHASHI MONITOR”を設置し、“情報環境シミュレーター”の役割をはたす不可欠の装置として機能を発揮させている。

### 3.5 空気振動の物理構造分析方法

#### 3.5.1 周波数分布解析とゆらぎ構造解析

音のもつ空気振動という物理構造の側面について分析するにあたって、現行の音圧レベルというような素朴な量的尺度だけをつかうやりかたを脱し、適切な質的評価指標をみいだすため、周波数分布解析と、ゆらぎ構造解析に着目した。

##### 3.5.1.1 周波数分布解析

どのような不規則現象も、種々の周波数の振動を合成したものとかんがえることができる。周波数成分の分布の観察により振動の性質が非常に明快にあらわされ、効果的な分析をおこなうことができる。

時間軸波形  $x(t)$  に対して、そのフーリエ変換は

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt$$

とあらわせる。 $X(f)$  は周波数  $f$  の成分波の振幅であり、 $|X(f)|^2$  はそのエネルギーをあらわしている。周波数  $f$  とその振動のエネルギー  $|X(f)|^2$  の関係をエネルギースペクトルという。

観測の対象となる区間  $T$  が無限の場合には、単位時間あたりの平均エネルギーをとり、これをパワースペクトル  $P(f)$  という。(単にスペクトルとよぶ場合もある)

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} [T^{-1} \cdot |X(f)|^2]$$

また、 $x(t)$  が確率変数の場合には、 $|X(f)|^2$  の期待値についてパワースペクトルを定義する。

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E[T^{-1} \cdot |X(f)|^2]$$

パワースペクトルの観察により、周波数分布をしらべる。

##### 3.5.1.2 ゆらぎ構造解析

ある振動現象について、そのパワースペクトルを両対数軸座標空間にえがかせたときの回帰直線の勾配、すなわちスペクトルの勾配をしらべると、ゆらぎ現象の性質が分類できる<sup>2)</sup>。この方法をゆらぎ構造分析と定義する。

完全にランダムで時間的相関がないようなゆらぎは、周波数に無関係に一定の値をとる。すなわち勾配が0となる。逆に完全に周期的な振動は、線スペクトルとなり、勾配が無限大となってしまう。自然界のゆらぎ現象で比較のおおくみられる、ローレンツ型のスペクトルでは、

$$P(f) = \frac{4ab}{1 + (2\pi af)^2}$$

とあらわせるので、両対数軸上であらわすと勾配が-2となる。また、勾配が-1のゆらぎは $1/f$ ゆらぎとよばれ、いろいろな現象においてあらわれることが知られている。

〈音圧ゆらぎ・振幅ゆらぎ・周波数ゆらぎ〉

音の周波数スペクトルを、両対数軸のグラフ上に記述すると、空気の粗密波である音圧のゆらぎそのものを解析することができる。

また、音のつよさをあらわす振幅や、音のたかさをあらわす周波数も時間的に変化しているはずである。これらのゆらぎはつぎのようにすると解析できる。

振幅ゆらぎについては、音圧の実効振幅

$$A_i = A(i \cdot \Delta T) \sqrt{(\Delta T)^{-1} \int x(t)^2 dt}$$

をもとめ、この時系列データのスペクトルを両対数軸上に記述する。

周波数ゆらぎについては、一定時間内に音圧波形が0点をとる頻度 $n$ として、瞬間的な周波数を

$$f_i = f(i \cdot \Delta T) = (2\Delta T)^{-1} \cdot n$$

と定義して時系列データをもとめ、同様に分析する。

### 3.5.2 高速フーリエ変換 (FFT) による分析

パワースペクトルをもとめるにあたって、まず、現在最も洗練された周波数分析法のひとつとしてひろく利用されている自動化された専用機をつかった高速フーリエ分析 (FFT=Fast Fourier Transform) を採用し、迅速、簡便にデータをえる体制を準備した。機種としては、自動FFTアナライザーの製造で定評のある小野測器製のCF-360FFTアナライザーを選択した。

FFTは、1965年CooleyとTukeyによって発表された、フーリエ成分を迅速にもとめるアルゴリズムである<sup>3)</sup>。驚異的に計算時間が短縮できることからまたたくまにひろまった。

ながさ $N$ の時系列 $x_0 \cdots x_{N-1}$ に対して、有限複素フーリエ変換は次のようにあらわされる。

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j \exp(-i2\pi kj/N) \quad (k=0, 1, \cdots, N-1)$$

$x$ は上式の逆変換として

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(i2\pi kj/N) \quad (j=0, 1, \cdots, N-1)$$

とあらわされる。ここで、 $N=8$ の場合について、 $W$ を

$$W = \exp(i2\pi/8) = \cos(\pi/4) + i\sin(\pi/4)$$

とおくと、次の行列方程式がえられる。



$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W & & W^7 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^7 & \cdots & W^{49} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_7 \end{bmatrix}$$

これはつぎのように分解することができる。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 + D_4 \\ D_1 + WD_5 \\ D_2 + iD_6 \\ D_3 + W^3D_7 \\ D_0 - D_4 \\ D_1 - WD_5 \\ D_2 - iD_6 \\ D_3 - W^3D_7 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} C_0 \\ C_2 \\ C_4 \\ C_6 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_7 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} C_1 \\ C_3 \\ C_5 \\ C_7 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & i & -1 & -i \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -i & -1 & i \end{bmatrix}$$

これによって演算回数がおおはばに減少し、計算時間が短縮されることになる。

### 3.5.3 FFT による分析の限界

FFT による分析は、高速・高機能で手軽に操作できる専用機の登場などにより現在きわめて洗練された段階に達し、ほとんどリアルタイムにちかいスペクトル分析を可能にして、おおきな成果をもたらしている。

しかしわたしたちが目的としている音と人間との高度な適合性を詳細に検討するという点からは、いくつかの限界があることも事実である。

#### 3.5.3.1 時間的にミクロな非定常性の解析の限界

高周波を豊富にふくむ音楽や自然環境音は、マクロな時間のとらえ方では定常的にみえるが、ミクロにとらえてこまかい時間間隔に分割すると、非定常的な時系列がたくさんみられる。音の変化を本質とする音楽はもとより、環境音でも、たとえば虫が鳴きはじめたり鳴きやんだり、木立がざわめいたり、といった突然的な事象をふくむ非定常的な過程は自然現象として頻繁にある。また虫や鳥の鳴くパターンは一定ではなく一日のなかでも刻々と変化しつづけている。

音に快適性を感じる要素として、そのような非定常性を独断的に無視することはできない。したがって、快適な音の指標をかんがえるとき、マクロな統計的特徴をとらえるだけでは片手おちになるおそれがおおきい。ミクロな時間尺度でとらえた微細な変化についても、考慮する必要がある。

FFT をふくむこれまでの方法はすべて、マクロな視点にたったものであった。つまり、FFT では、データをとりこんではスペクトルを計算し、くりかえし加算平均して確率的誤差を縮少し、全体をならして、特徴的なスペクトルの構造を抽出する。こうした手順の中で突発的、非定常的な変化の情報は失われる。

### 3.5.3.2 ゆらぎ構造解析の限界

現在、音響分野でつかわれている周波数および音響パワーのゆらぎを分析する方法<sup>3)</sup>は、音楽や環境音にそのまま応用するのがむずかしい。

通常の解析方法では、周波数ゆらぎの場合、波動の時系列データが単位時間内にゼロ点を通する回数をかぞえてその時系列の周波数を定義している。また音響パワーの場合、おなじく時系列データから、単位時間内の振幅の積分値を求めてパワーを定義している。このような方法が有効なのは、対象となる楽器など単一または少数の音源が特定されていて、そこから発せられる音源の周波数や音響パワーが明確に定義できるもの、いわば不純物のない相手を対象にした場合である。

それに対して音楽や環境音などの自然音の場合は、特定することができない多種多様の発音源が膨大な数さまざまな地点に存在する。それぞれの発音源が固有のゆらぎをしめし、複雑な音空間をつくっている。したがって時系列データをおって周波数、パワーを定義するシンプルな方法では、結果は混頓とするばかりで意味のないものがでてくることが予想される。また、バンドパスフィルターなどで特定の周波数帯域をぬきだすこともかんがえられるが、周波数や帯域幅の選び方などが恣意性に支配され、本質をおおきくみあやまってしまうおそれがある。

### 3.5.3.3 自然音分析に対する FFT の原理的不適合

FFT は波動解析の標準的な方法として信頼性がたかく、非常におおくの分野にわたって応用されている。とはいえ、その前提となる作業仮説に由来する限界があることも否定できない。そうした原理的な限界を考慮せず手法をブラックボックス視してでてきた結果をうのみにすると、致命的な誤解をまねくおそれがある。

FFT でスペクトルをもとめる場合、測定した時間内に現れた波形を全体の一部であるとかんがえ、おなじ波形が無限にくりかえされていると仮定する。ただし、ただくりかえしただけではつなぎめが不連続になってスペクトルがおおきくゆがんでしまうため、よくしられているとおり、つなぎめが連続になるように、適当なウィンドウ関数（たとえばハニング・ウィンドウ）をかける。この操作によって、実際の波形とかなりおおきなちがいが生じる可能性がある。このため、安定したスペクトルをえるためには、長時間の測定時間が必要になる。逆にいえば測定時間にちかい周期をもつひくい周波数帯域では、データは非常に不安定になる。このことは、実際の音の分析にあたって、無視できない問題になりうる。また、スペクトルがピークをもつ

場合、上記の操作の結果実際よりもピークの幅がひろがってしまう。

フーリエ関数は原理的に、時間経過による振幅変化のない関数であるため、爆発音、衝撃音のように時間とともに振幅がはげしく変化する時系列データには適合性がひくい。このため最近では、フーリエ関数のかわりにウェーブレット関数という、時間と周波数との両方を変数にもつ関数を基底関数にもちいて分解する方法がつかわれるようになってきた。ただし、この方法は、一過性の非定常振動過程の分析には有効だが、音楽や環境音のように連続であって、マクロにとらえれば定常的な性質をもった音の分析には適合性がたかいとはいえない。

### 3.5.4 最大エントロピー法 (MEM) の可能性

以上のように、複雑な自然音の分析には、シンプルでおおまかな方法では限界があり、繊細で複雑な対象をあつかえる高度な手法が必要であることがわかる。

このため振動現象を分析するためのさまざまな手法についてしらべた結果、音分析の中心となるスペクトル推定法として、最大エントロピー法(MEM) が適合性がたかいのではないかとかんがえるにいたり、これを軸にした音のあたらしい分析手法を開発することをこころみた。

最大エントロピー法 (MEM) は、1967年 J. Burg により地球物理学の分野で提案された。この分野では、地震波のような、短時間で不安定な波動をあつかうため、FFT では解析に限界があった。Burg は、情報エントロピーの概念をとりいれ、これが最大になるように自己相関関数を推定し、それからスペクトルをもとめる、という方法がもっとも合理的であると提案した。MEM は短時間の測定データから正確なスペクトルを予測するうえでは圧倒的に FFT にまさることがしめされた<sup>4,5)</sup>。しかし、一般の研究者には Berg の研究論文が目につくチャンスがすくなくなかったこと、当時 FFT が圧倒的な普及をしめし、不便をかんじていなかったことなどから、他の分野で応用されるようになったのはごく最近のことである。

一方、これとは独立に、赤池は1969年、自己回帰式をもちいたスペクトル推定法を発表し<sup>6,7)</sup>、これが MEM とおなじアルゴリズムであることが後年あきらかにされた。赤池は、セメント回転窯の制御についての研究の過程でこの方法を開発している<sup>8)</sup>。制御すべきパラメーターは温度、圧力など多数あり、それ以前の制御法は数式モデルにもとづき理論的に設計されていたが、攪乱によわく、経験的判断におとるという状態だった。赤池はこの原因を、システムが統計的不規則変動をしめすという認識がかけている点にあるとかんがえ、統計的手法をつかってシステムの特性を把握することを提案した。統計的分析法には周波数領域からのアプローチと時間領域からのアプローチとがあるが、複雑な相互作用をもつフィードバックをふくんだシステムでは、周波数領域からだけのアプローチでは解析が不可能であることを洞察し、自己回帰表現による線形予測式をもちいた実用的な方法を提案した。そして各パラメータの変動データに多変数自己回帰式を適用し、各々の相互関係を解析して成果をあげている。

近年になって、MEM はみじかい測定時間で高分解能のスペクトルを推定することができる画期的な方法として、さまざまな分野で注目をあつめるようになった。

MEM の非常にすぐれた特徴は、みじかい測定時間のデータからでも、分解能のよい安定したスペクトルがえられることである。この理由は、有限な測定時間内のデータに対する根本的なとりあつかいかたにある。MEM では、測定した時間内のデータだけしか前提にせず、波形を

まったくゆがめることがない。この点に FFT にくらべ分解能、安定性ともにすぐれ信頼性のたかいスペクトルがえられるひとつの根拠がある。また測定時間をこえたながい周期性の推定にも活用できる。

さらに FFT でえられるのが離散的なスペクトルデータであるのに対して、MEM では連続したスペクトルデータがえられるという特徴がある。このため、FFT のようにえられたデータを内挿して連続したスペクトルにするという手続きが不要であり、二つ以上のスペクトルの間の比較や、ピークの形状、勾配のような詳細な分析においてもはるかに信頼性がたかい。

この方法の最大の欠点は、おそらく、手法が非常に複雑で計算時間がながくかかることだろう。しかし、コンピューター、とりわけ一般的なワークステーションの高速大容量化にともなって、この問題はちいさくなりつつある。

### 3.5.5 MEM を応用した自然音のゆらぎ構造分析方法の開発

#### 3.5.5.1 MEM の理論<sup>3)</sup>

時系列データ  $x_i (=x(i \cdot \Delta t))$  に対し、情報エントロピー  $H$  を最大にする条件は、自己相関関数  $C_k = E\{x_i \cdot x_{i-k}\}$ 、( $E\{\}$  は期待値) をつかって

$$\frac{\partial H}{\partial C_k} = 0 \quad (1)$$

とあらわせる。 $H$  は  $\{x_i\}$  の同時確率分布を  $p(x_0, \dots, x_m)$  とすれば、

$$H = - \int p(x_0, \dots, x_m) \log p(x_0, \dots, x_m) dv$$

と定義される量であるが、 $p$  が Gauss 分布であれば、

$$H = \frac{1}{2} \log [\text{Det } C_m]$$

$$C_m = \begin{bmatrix} C_0 & \dots & C_{-m} \\ C_1 & \dots & C_{-m+1} \\ \vdots & & \vdots \\ C_m & \dots & C_0 \end{bmatrix}$$

となる。

エントロピー密度  $h$  とすると、

$$\begin{aligned} h &= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{H}{m+1} \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log [\text{Det } C_m]^{1/(m+1)} \\ &= (1/4f_N) \int_{-f_N}^{f_N} \log P(f) df + \frac{1}{2} \log 2f_N \end{aligned}$$

ここで  $f_N = 1/(2\Delta t)$  は Nyquist 周波数とよばれる。

また、自己相関関数とスペクトルの関係式 (Wiener-Khintchine の関係式)

$$p(f) = \Delta t \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp(-i2\pi f k \Delta t) \quad (2)$$

より、(1)式は

$$\int_{-f_N}^{f_N} \frac{\exp(-i2\pi f k \Delta t)}{P(f)} df = 0 \quad (k > m+1)$$

であるから、 $1/P(f)$  が有限な級数で展開でき、次のようにかくことができる。

$$1/P(f) = (\Delta t P_m)^{-1} \left\{ \sum_{k=0}^m \gamma_k \exp(i2\pi f k \Delta t) \right\} \cdot \left\{ \sum_{k=0}^m \gamma_k^* \exp(-i2\pi f k \Delta t) \right\}$$

これを(2)式と比較し、 $\exp(i2\pi f \Delta t)$  の等ベキの項から、次の連立方程式がみちびかれる。

$$\begin{bmatrix} C_0 & \cdots & C_m \\ C_1 C_0 & \cdots & C_{m-1} \\ \vdots & & \vdots \\ C_m & \cdots & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma_{m1} \\ \vdots \\ \gamma_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで $\{\gamma_{mk}\}$ は予測誤差フィルターとよばれる未知係数で、 $m$ を以後モデル次数とよぶ。 $P_m$ は予測誤差フィルターからの平均出力である。Burgのアルゴリズムでは、 $C_m$ も未知とするため、連立方程式よりも未知数の数がおおくなる。この点を解決するために、あらたな判断基準として“予測誤差フィルターに信号を前向きにとおす場合と逆向きにとおす場合の平均出力 $P_m$ を最少にする”を導入する。

これからみちびかれる方程式

$$\frac{\partial P_m}{\partial \gamma_{mm}} = 0$$

をくわえて漸近的に解をもとめ、これから MEM スペクトル

$$P(f) = \frac{\Delta t \cdot P_m}{\left| 1 + \sum_{k=1}^m \gamma_{mk} \exp(i2\pi f k \Delta t) \right|^2}$$

を計算する。

一方、赤池の方法では、自己回帰式

$$\hat{x}_i = a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \cdots + a_m x_{i-m}$$

これに順次 $x_{i-k}$ をかけて期待値をとれば、

$$C(k) = a_1 C(k-1) + a_2 C(k-2) + \cdots + a_m C(k-m) \quad (k=1, 2, \dots, m+1)$$

これは式(1)と同等である。したがって、MEMによるスペクトル解析は、確率過程に自己回帰式をあてはめることに相等的い。

### 3.5.5.2 分析方法

MEMの特徴を活用しこれを応用した音のゆらぎ構造分析方法の開発をこころみた。以下こ

の方法についてのべる。

音楽や環境音は時間的にマクロにみると定常的性格がつよく、ミクロにみると非定常性がきわだってくる。このミクロな変化を解析するために、まず時系列データをみじかい時間区分に分割し、それぞれの区分ごとに MEM スペクトルを計算して時系列にならべることにした。

ミクロな変化を的確にとらえるためには、みじかい時間のデータで安定なスペクトルをえることが重要である。これには MEM がその威力を発揮する。FFT の場合、加算平均によって確率的誤差を減少させる操作が必須で、加算平均する前の生のスペクトルは、確率誤差がおおきくたいへん不安定である。したがって、真の構造と確率誤差とを判別し、真の構造の微細な変化までとらえることは困難といえる。また FFT では測定時間をみじかくするとそれだけ信頼性がおちるので、ミクロな分析のため短時間で分割しようとする、スペクトルの信頼度がますますおちるという結果になる。したがって、MEM の安定性を前提としてはじめて、この方法は有効になる。

つぎに、えられたおおくのスペクトルデータをメモリーすることとした。この操作は、単にスペクトルの観察だけでおわるのではなく、次のステップとしてより高度な、あるいは細緻な分析をおこなうために必須といえる。仮に音声学のように個々のスペクトル・パターンの把握が最優先の課題である場合は、メモリーしないで表示だけにおわらせることにも意味があるだろう。しかし音楽や環境音の分析においては、個別的なパターンの観察にとどまらず、普遍的な特徴を抽出することがより優先する目的となる。メモリーしたスペクトルデータからさらにピーク周波数やパワーなどの2次データを抽出して分析することが重要である。

しかしすべてのスペクトルデータをメモリーするためには膨大なメモリー容量が必要であり、メモリー容量の限界が解析時間長の限界にもつながる。

そこでわたくしたちは、MEM スペクトルを導出する過程でえられた予測誤差フィルター ( $\gamma_{m1}, \dots, \gamma_{mm}$ ) と、予測誤差の分散 ( $P_m$ ) とに着目した。式(2)からわかるように、これらの変数をもとめることができれば、あとは自動的に任意の周波数のパワーがもとめられる。したがってこの  $m+1$  個の変数は時系列データの特徴のすべてを表現するものとかんがえることができるので、これらを時系列データの特徴量と定義する。この特徴量の数値さえメモリーしておけば、いつでもスペクトルが再現できることになり、おおはばなデータの圧縮が可能になる。

小野測器製 CF-360 自動 FFT アナライザーでは1スペクトルにつき400ポイントのスペクトルデータをとっている。それに対して、わたくしたちが今回おこなった分析では、メモリーすべき特徴量の数は20~60程度であったため、約1/10のデータ圧縮になっている。

さらに、えられた時系列にならんだスペクトルデータを観察し、詳細なゆらぎ構造の様子を把握することとした。音楽や環境音には多様で複雑な発音源が存在しう。しかし、以上にのべた手順でスペクトルにして観察すれば、周波数帯域ごとに分離された状態でゆらぎの様子を観察することができる。

さらにまた、観察したゆらぎの特徴をふまえて、定量的にゆらぎの分析をする。

たとえばピークの周波数のゆらぎを解析したり、着目する周波数帯域にしばって積分値を計算しパワーのゆらぎをもとめることなどがかんがえられる。ここで、さきにメモリーしておいた特徴量から、その周波数帯域だけを指定して計算をおこなうことができる。

FFTの場合、離散的なスペクトルしかえられないので、周波数範囲を指定するとそのなかでえられるデータの数はいまってしまう。それに比べ、MEMでは連続したスペクトルをとるゆえに任意の周波数で計算できるので、着目した周波数範囲のなかで、周波数幅をちいさくしておおきのスペクトルデータを計算するということが可能になる。この点でもMEMの特徴が有利にはたっている。

〈モデル次数の決定について〉

モデル次数  $m$  については、そのとりかたによってスペクトルがおおきくかわってくるので注意を要する。赤池らは、最終予測誤差 (FPE=Final Prediction Error) を定義して、これが最小になる  $m$  をとることを提案している。

$$\text{FPE} = E[(x_i - \hat{x}_i)^2]$$

であるが、赤池によれば、

$$(\text{FPE})_m = \left(1 + \frac{m+1}{N}\right) P_m = \frac{N+(m+1)}{N-(m+1)} S_m^2$$

また FPE が最小となる  $m$  はあまりおおきくならないよう、 $M < (2 \sim 3)\sqrt{N}$  にとどめるのが妥当だとしている。

わたくしたちはこの FPE を採用することにした。ただし、ひとつひとつのスペクトルについてモデル次数を決定することは計算過程がふえ煩雑になるばかりでなく、連続した一列の時系列データにことなるモデル次数を適用することで不必要な構造の変化をまねくおそれがある。そこで、同一系列についてのモデル次数は固定することにした。スペクトルの分析のまえに、あらかじめそれぞれの系列ごとに FPE が最小となるモデル次数  $m$  の統計をとり、もっとも出現頻度のたかい  $m$  をもってその系列のモデル次数  $m$  とした。

以上のように、自然音のゆらぎ構造をより精密に分析する方法について検討する過程で最大エントロピー法の有効性に着目し、これを中核にした、あたらしい音分析法の開発をこころみた<sup>9)</sup>。まだ端緒についたばかりだが、このこころみは、音楽や環境音の性質を特徴づける指標を抽出し、評価にむすびつけるうえで、これまでの方法のもつ限界をかなりおおはばに打破でき、現実の有効性が期待されるのではないかとかんがえる。

#### 〈文 献〉

- 1) 山崎芳男、量子化雑音のスペクトル分布に着目した高速 1 bit 広帯域信号処理、AES 東京コンベンション '91 予稿集、pp.168-171、1991.
- 2) 武者利光：ゆらぎの科学、講談社、1980.
- 3) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、pp.84-94、pp.210-236、1977.
- 4) Vlrych: Maximum Entropy Power Spectrum of Truncated Sinusoids, J. of Geophysical Research, 1972.
- 5) Chen & Stegen: Experiments with Maximum Entropy Power Spectra of Sinusoids, J. of Geophysical Research, 1972.
- 6) Akaike: Fitting Autoregressive Models for Prediction, Annals of Institute Statistical Mathematics, 1969.
- 7) Akaike: Power Spectrum estimation Through Autoregressive Model Fitting, Annals of Insti-

tute Statistical Mathematics, 1969.

8) 赤池・中川：ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、1972.

9) 大橋力：日本音楽の音とゆらぎ、小島美子・藤井知昭編『日本の音の文化』、第一書房、pp.27-60、1994.



## 第4章 生体情報を指標にして人間と音との関係をしらべる方法の開発

### 4.1 指標の設定

#### 4.1.1 なぜ生体情報を計測するのか

空気振動を実体とする音楽のうつくしき、環境音のころよきなど、感性情報の評価は、これまで主としてアンケート調査や心理実験など、主観的調査と統計処理とにもとづく方法によっておこなわれてきた。これらの方法は高度に洗練をかさねている反面、現在では成果の質・量両面にわたる飽和、研究効果・効率の遞減がめだちはじめている。また、主観的検討法が原理的にもっている信頼性の限界も無視できない問題となっている。ひとと音との適合性を追求していくためには、こうした限界を克服しなければならない。そのために現在もとめられるのは、主観的調査という対象者の内観に依存するアプローチのみによるのではなく、その心身の状態を意識・無意識をとわず、直接的、定量的に把握できる生理指標をみだし、効果的に活用することだろう。とりわけ、可聴域をこえ、音としては知覚できない高周波成分の共存がおよぼす影響をしらべるにあたっては、“非知覚”あるいは“あいまいさ”がおおきい現象、言語系との対応がとりにくい現象には限界をとめないやすい心理的・認知的手法に全面的に依存するのをさけることが有効とかがえられる。その面で画期的な信頼性の向上が期待される自然科学的なアプローチ法として、生体情報計測、なかでも脳の活性の変化を直接しらべる手法に注目した。

#### 4.1.2 手法の探査

脳の活動状態を外部から観測する手法の開発は近年きわめて活発におこなわれている。簡単にそれらを概観すると、①脳内神経伝達物質の代謝状態を、血液中の伝達物質の濃度変化を指標として推定する方法、②シナプス放電の包括的な情報を脳の表面電位から推定する方法（EEG＝脳波計測）、③同上の情報を磁場の变化から推定する方法（MEG＝脳磁気計測）、④脳内血流量、あるいは脳内代謝活性を放射性同位元素をトレーサーとして断層画像化する方法（PET、SPECT）、⑤脳内エネルギー代謝を核磁気共鳴を利用して計測する方法（ファンクショナルMRI）、⑥その他の自律神経系に関与する生体指標、たとえば心電、筋電、皮膚電導度などを参照する方法など、かなり多岐にわたる。ただし、これらの手法のほとんどが元来、医療目的のために開発されたもので、しばしば莫大な設備投資を必要とするうえ、計測機器が音を呈示あるいは聴取するうえで障害となるような構造をもつものが多い。しかも、ほとんどすべての手法が、測定時に、被験者に無視できない心理的圧迫感をあたえるおそれをもっている。したがって、これら既存の方法は、病気や生理的異常の発見などの用途には有効であっても、快適性評価や感性情報研究のためにそのまま使用することはむづかしく、いわば換骨奪胎する必要がある。また、生理指標をつかった従来の手法では、実験場所・機会・頻度などもいちじるしく限定される場合が多く、多数の実験をおこなって統計処理をほどこすうえでは現実的とはいえない。そこでわたしたちは、実際にさまざまな方法について模索をおこなった結果、既成技術の根本的なおとし、二、三の問題点を高水準で克服することを前提とすれば、脳活

動のよくしられた指標である脳波（EEG）を利用する方法の再開発をおこなうことが、もっとも有望であろうという結論に達した。

脳波をもちいた分析は、まず自発脳波に注目し、 $\alpha$  波（8～13Hz）、 $\beta$  波（13～30Hz）、 $\theta$  波（4～8 Hz）、 $\delta$  波（1～4 Hz）などの周波数帯域別に分析することがふるくからおこなわれてきた。その後誘発脳波（EP）への注目がたかまり、最近ではそれをより発展させた事象関連電位（ERP）の応用がさかんになっている。これらの方法がもつ音質評価指標としての有効性をみると、環境音あるいは音楽など、長時間連続して聴取される音現象に対する人間の脳の適合性を評価するこの研究の目的に対しては、単発刺激に対する一過性の反応を検出する誘発電位系の指標を中心とすることは適当でない。まとまった時間連続して入力する環境情報に対する心身の反応をトータルに把握しようとするこの研究の目的には、より不安定で計測・分析が困難なものではあるが、脳の「基底状態」を反映する自発脳波の方がはるかに指標として妥当といえる。とくに、覚醒状態下でのこころよさ・平安感・快適性あるいは集中性などの指標としてよくしられているだけでなく、不快な音によって抑制され、快適な音で活性化されることも報告されている  $\alpha$  波は注目される。そこで、この帯域の電氣的活性を脳と情報環境との適合性の中心的な指標とするつぎのような作業仮説のもとに、脳波による生体影響評価法の開発作業をすすめた。

## 4.2 脳波による生体影響評価法の再開発

### 4.2.1 “ $\alpha$ 波活性＝本来性指標” 仮説

脳波研究のおおきな領域をしめる誘発脳波の研究では、当然のことながら「刺激＝反射」モデルにもとづき、ある情報入力に対する反射的出力として脳電位活性をとらえる。一方、自然脳波については、入＝出力関係についてのモデル化は誘発脳波ほど明確にはなされていない。しかし、実態としては、誘発脳波の発想と実質的に区別のつかない「刺激＝反射」的なとらえ方が支配的な状態にある。それはたとえば、 $\alpha$  波は初期条件としては発生しておらず、なんらかの情報入力のレスポンスとして出現する、といったかんがえかたである。それは、これまで“こころ”へアプローチする学術領域の主流だった行動科学や認知科学の発想とも軌を一にしている。たとえば、音の快適性の評価を脳波を指標としておこなおうとするときでも、「無音状態」をスタンダードとし、そこになんらかの音が呈示されたとき、脳波にどのようにパワーが出力してくるかををはかる、という方法がほぼ例外なく採用されている。現象論的にみると、このモデルは、音の評価を自然脳波にゆだねるという実験にもみかけ上矛盾なく適用できるようにみえる。しかし、このモデルでスタンダードになる無音状態は、人類にとってはその生物種としての成立以来、ほとんど例外的にしか遭遇することのないきわめて特異的で非正常な音環境であり、「本来の音環境」を想定すると、それとはもっともへだたりのあるものの一典型といってもよいだろう。したがって「無音状態」とは、ある意味で人類にとってきわめてつよい異常な刺激として作用する可能性がたかい。

それに対して、人類の遺伝子設計に合致した生態系と推定されている熱帯雨林は、環境音がきわめてゆたかな環境である。いいかえれば人間と音との適合性を評価する際の音環境のスタンダードは、そのようなゆたかな音環境とする方がすくなくとも生物学的により妥当性がたか

いといえるのではないかとかんがえられる。この観点を実験に反映させるために、 $\alpha$  波の活性について大橋の「本来－適応モデル」<sup>1)</sup>を基礎にして、ひとつの作業仮説をたてた。「本来－適応モデル」とは概略次のようなものである。

地球生命の基本プログラムは、細胞の一成分である DNA に記述されている。それは、普段からよみおこされ稼働状態にセットされている“本来のプログラム”と、普段はよまれず万一の場合に状況に応じてよみだされる“適応のプログラム”との二群から構成されている。こうしたプログラム体系に支配された生命の活性は必然的に、「本来－適応」という二重性をもつ。本来の活性は生物の種ごとに固有のもので、地上に存在するある特定の生態系の環境条件に、鍵と鍵穴のようにかみあうよう設定されている。つまり、種にとってその生態系が本来の棲み場所になり、その生態系からの環境入力に対応する活性が、本来の活性として常時稼働状態におかれる。またその生態系では生起する確率がひくい事象に対応する活性は、“適応”のためのものとしてソフトウェアあるいは素材レベルに待機させられ、生存コストの節約がはかられる。環境の変動など本来の活性だけで対応がつかない事象に遭遇した場合、一定のエネルギーをついやして適応のための活性が顕在化し、危機をのりきる。適応の活性が起動された場合でも本来の生存コストはあまり節約されないのが普通で、そのために、適応作用は生命にとって一方的な負担の増大をまねき、本来よりものぞましくないフェーズとなる。したがって生物は、そのライフスタイルをより適応をさけてより本来にちかづくように制御する。高等動物の脳にセットされた“情動”すなわち快・不快原則により行動を制御する神経回路はあきらかに、こうした効果をもっている。それは最適環境・最適行動が選択されたとき最大の快感・最小の不快感をあたえ、最適点をはなれるにしたがって快感の低下・不快感の増大を発生させると観察されるからである（図4.1）。

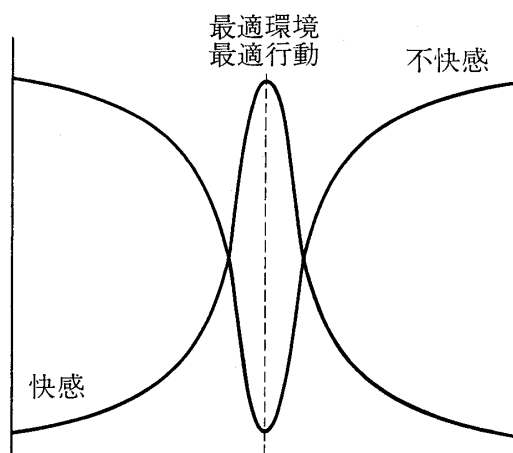


図4.1 本来－適応モデル

わたくしたちは、この本来－適応の状態が脳波に反映するものとかんがえた。すなわち人類にとって本来の環境のなかで、本来の生命活性がもっとも高度に実現している平安な状態、つまり適応がもっともすくない状況下において快適性が増大し、 $\alpha$  波はその活性をもっともたか

める。また、本来からの乖離＝適応の高度化にともなってストレスが発生・増大し、それに対応して $\alpha$ 波の活性は低下する、すなわち「 $\alpha$ 波は本来性の指標になりうる」と仮定したのである。これと対照的に、 $\beta$ 波を適応の度合の指標、あるいは適応を誘起する要因となるストレスの指標と仮定した。

#### 4.2.2 本来－適応モデルからみた従来の脳波測定法の問題点

$\alpha$ 波が“本来性”の指標であるならば、環境中にストレスや心理的不安をうむ情報的な要因が存在し、なんらかの“適応”を要求される場合、そのパワーが抑制されるはずである。そこで、従来の脳波測定法のなかに $\alpha$ 波の出現を抑制するような情報環境要因がふくまれていなかったかどうかを検討した。

従来、脳波計測は、わずかの例外をのぞいて、医療機関というそれ自体心理的に負のバイアスをとめないやすい環境内でおこなわれてきた。また、脳波が数 $\mu\text{V}$ ～数十 $\mu\text{V}$ 程度の非常に微弱な電気現象であり、外来電磁誘導ノイズの影響を受けやすいことから、電磁シールドされ、密室化したきわめて圧迫的な雰囲気をもつ専用の脳波検査室に被験者をおき、体動を禁じることが推奨されてきた<sup>2)</sup>。そうでない場合でも、検査室内の椅子やベッドなどの調度は医療用のものが使用されることがおおく、その視覚環境は恐怖をかきたてるような非日常的な雰囲気をもち、感性への影響という面からみると、人間にとって自然な本来的環境との顕著な差は否定できない(図4.2, 図4.3)。

もちろん、疾病の指標となる異常脳波の検出やきわめて短時間の反射的な誘発脳波反応の観察のためには、こうした測定環境はほとんど結果に影響をおよぼさないだろう。しかし、自発脳波の成分であり快適性や心理的平安を反映して持続的に出現する $\alpha$ 波を観察する場合、被験者にとって不安やストレスの原因になる測定環境は、それ自体が結果に影響をおよぼす要因になりうる。本来－適応モデルからみると、こうした測定環境に由来する情報入力、 $\alpha$ 波の出現に対して抑制的にはたらくものとかがえなければならない。すなわち、従来の典型的な脳波計測法では、測定環境それ自体が $\alpha$ 波の出現を抑制するというバイアスをもっていた可能性

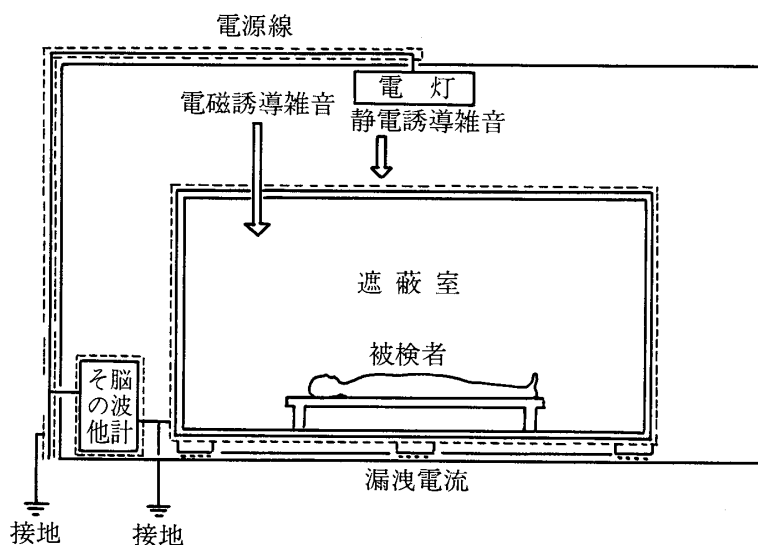


図4.2 シールドルーム<sup>2)</sup>

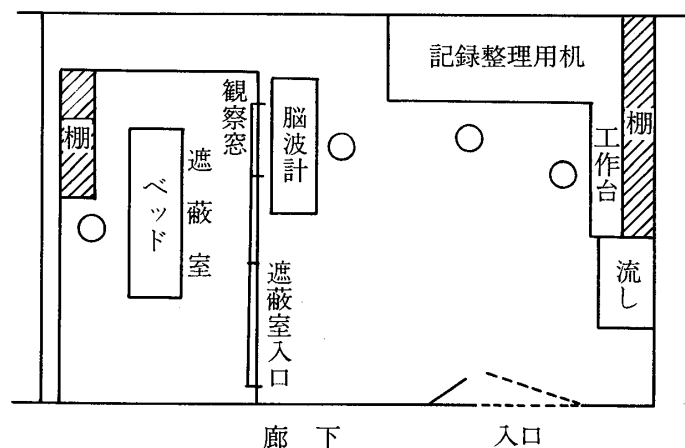


図4.3 脳波計測室の例<sup>2)</sup>

を否定できない。

ところが現実には、こうした問題が意識される以前に設定された計測法が長期にわたってルーティーンに反復されてきたあまり、それ自体の限界や欠陥が念頭にのぼりにくいものになっている。そのため、脳波計測環境のもつこうしたバイアスに着目しつつ、 $\alpha$ 波の挙動をあらためて吟味してみるという課題は盲点にかくされ、検討対象外におかれてきた観がある。

したがって、この課題は検討にあたいする。この問題にアプローチするうえでは、わたくしたちの“本来—適応モデル”にもとづく作業仮説からすると、脳波測定にともなう被験者の心理的負荷を可能なかぎり排除することがひとつの鍵になるとかんがえられる。

#### 4.2.3 被験者の心理的ストレスを高度に排除した脳波計測システムの構築

##### (1) 計測環境の構築

さきに指摘したように、情報環境質の評価を目的とする場合、脳波計測室それ自体のもつ情報環境が被験者におよぼす負の影響を無視することはできない。そこで計測室自体の情報環境を、できるだけ心理的なストレスを排除し、かつ多様な居住環境のシミュレーションを可能にし、しかも電子機器による映像・音響呈示と生体情報の計測とをともに高度に実現できるよう構成することにした。そのために、地球上のさまざまな情報環境をシミュレートする機能と脳波など生体情報の計測機能とをあわせもつ実験室を設計・構築した。この実験室については、すでに第三章でのべたが、もう一度脳波計測の視点からその特徴をあげることにする。

① なによりも被験者が心理的ストレスをこらむらず、目を開いた状態でもリラックスできる条件を設定しうる構造・機能を重視した。テレメトリーシステムを採用することによって検査室がシールドルームである必要から開放されることを前提に、遮音処理をした二重ガラス窓をおおきくとした開放感のある17m<sup>2</sup>の実験スペースを確保した。内装は木質系を基本とし、一見ログハウス風の自然指向デザインに仕上げた。さらに室内各所に観葉植物や自然をえがいた環境絵画等を配した。照明はすべて、調光自由の白熱灯をつかい、適度なめりはりをもちながらソフトな光環境を間接照明によってつくりだすことを可能にした(写真4.1)。

この部屋の最大の特徴は、特有の緊張をしいるような情報環境をさけること、検査室である

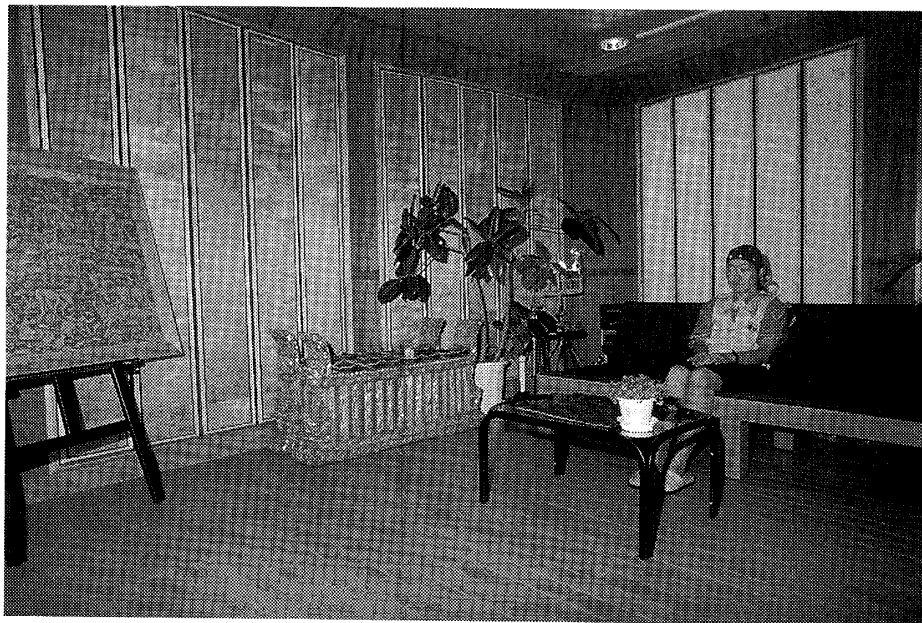


写真4.1 実験室の様子

ことをわすれさせるものであることである。被験者にとって、居心地がよくリラックスできる雰囲気をもたせる点で、かなり高度に目標を達成できたとかんがえられる。

② できるだけ多様な音響空間をシミュレートでき、しかも自然性をうしなわないために、前にのべたとおり、部屋の壁面の材質を変化させることによって音響特性を制御するあたらしい方式を開発した。部屋の四方の壁面の内3面までを回転式の三角柱（一辺30cm）32本により構成し、この三角柱の三つの面を3種類のことなる音響特性をもつ素材、すなわちインド産の大理石、桜材、吸音素材+ジャージクロス外装でつくった。1本1本の三角柱を回転調整することで、部屋のなかにひびきのうつくしい多種多様の音響空間をつくりだすことができる（第3章参照）。

## (2) 脳波導出系

① 迅速・確実な電極装着方法を採用することにした。脳波すなわち頭皮表面の電位を検出するためには、まずセンサーとなる電極を頭皮上の特定の位置に電気的および機械的にのぞましい安定した状態で固定しなければならない。従来の方式では、この電極装着という過程それ自体が被験者への無視できない心理的バイアスになる。これまでのやりかたは、まず頭皮上にメジャーをつかって電極ごとの測定位置を設定し、つぎに電極ひとつひとつを、頭髪をかきわけ頭皮を露出させて導電性のペーストをもちいてはりつけるというものである。この方法では、十数個の電極すべてを装着するためには熟練者でも30分程度を要し、電極ペーストの抵抗値が安定し実験を開始できる状態になるまでに、電極装着開始から最短でも1時間程度かかるのが常態だった。この拘束感や圧迫感のため、被験者は、個人差はあるものの実験開始時点で相当程度疲労し、実験に嫌悪や不快感をおぼえるといった心理的に負のバイアスが発生するだけでなく、覚醒水準も非常に不安定な状態となる。とりわけ目をとじた状態でおこなう実験では、時間経過にしたがって睡眠にかたむく傾向がしばしばみとめられた。

こうした影響を回避するためには、電極装着にかかる時間を可能な限り短縮することがもっとも有効な対策とかがえられる。そこでわたくしたちは、あらかじめ電極がぬいつけられた伸縮性のキャップ（エレクトロキャップ、ECI社）の有効性を検討した。その結果、この方式では、電極装着時間を5分程度にまで短縮し、ただちに実験をおこなうことが可能であることがたしかめられた。ところが、このキャップは頭皮上の電極の出力を数メートルにおよぶながいケーブルで脳波計に直結する伝統的な方式をとっているため、雑音誘導をまねきやすいという、この研究にとって致命的な問題をもっていた。そこで以下にのべるようにその改善をおこなった。

② 雑音の防御と拘束感の排除をたかいレベルで実現することにつとめた。脳波計の初段増幅器は非常に微弱な頭皮上の電位変化を高利得で増幅しなければならない。そのため、入力回路のインピーダンスがきわめてたかくなり、外部からの影響が、雑音としてひろわれやすいものになるという宿命をもっている。とりわけ、交流電源ラインからの電磁誘導、および被験者の体動によるリード線のゆれにもとづくノイズの発生は、しばしば致命的なものになる。そのため、先にのべたシールドルームの使用が必要となり、また被験者には測定中は極力体をうごかさないことが要求され、非常につよい拘束感が発生する。

そこで、このふたつの雑音発生要因を排除するとともに、拘束性を高度に打破することを目的として、テレメトリーを応用したつぎのようなシステムの改造をおこなった。すなわちエレクトロキャップ上、電極から十数センチの至近な位置に小型のヘッドアンプをおいて初段増幅をおこなうとともにインピーダンス変換し、入力回路の共振周波数を脳波よりもたかい帯域にシフトさせて外部ノイズの影響をうけにくくした。ついで、その出力をウォークマン程度のポータブルFM送信機におくり、これによって多重変調した脳波データを送信するシステムとした（図4.4）。電磁誘導をうけにくく、被験者の体動もノイズになりにくいこのシステムで、計測中の被験者の姿勢や動作の自由度が飛躍的にたかまり、拘束感はおおはばに低減できた。

以上のような対応の総合的な効果として、被験者は脳波測定中であることをそれほどつよく意識せず、日常とほとんどかわらない状態で実験に対応することが可能になった。

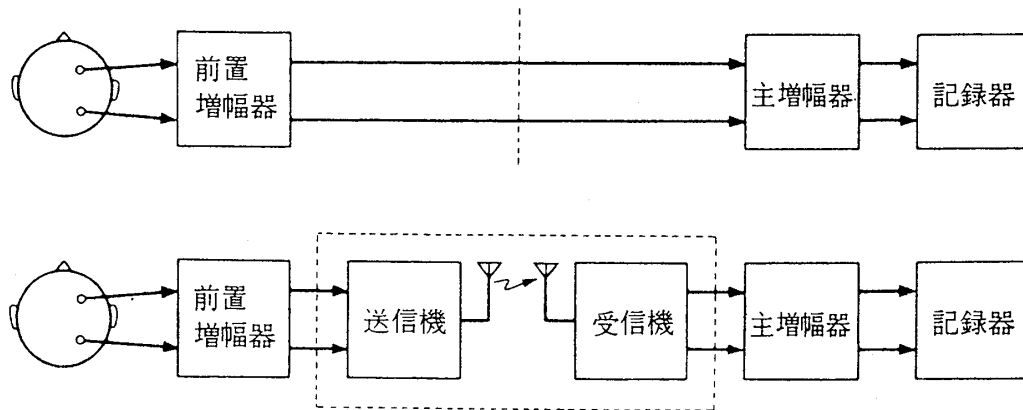


図4.4 一般の脳波記録とテレメータによる脳波記録

#### 4.2.4 BEAM (Brain Electrical Activity Map) による画像解析手法の開発

解析については、複数の電極からえたデータをもとに、より構造的な把握を可能にする脳波の画像解析手法の開発をこころみた。

BEAM は、1970年代後半に Duffy<sup>3)</sup>によってその基本的概念およびシステムがつけられた。以来、実用化・高精度化がすすみ、分析方法のバリエーションが豊富になってきている。この研究では、日本光電製 EEG マッピングシステム MCE-5200を導入し、これに附属するソフトウェアをプロトタイプとして方法論の開発をおこなった。このプロトタイプは、頭皮全体に対して22個の電極を配置し、それらの電極間をこまかいドットマトリクスにおいて各ドットごとの等価的電位を推算し、その値にもとづいて脳波電位の等高線地図をえがかせるというものである。これをもとにしてわたくしたちがこの研究で開発した方法はつぎのようなものである。計測効率の向上と同時2人測定とを実現するために、設定電極数の圧縮をおこなった。すなわち、図4.5中に白丸でしめした12ヶ所に電極を配置し、それらの電極から導出した脳波について、FFTにより帯域別平均パワーの平方根を算出し、各電極位置におけるその帯域の脳波の等価的電位とした。これを図中にしめした推算法によって処理し、25ヶ所の電極位置における値に拡張する。

ついで、図4.6のように、隣接する4つの電極位置で囲まれた平面を12×15ドットに区分し、直線補間法をもちいて、各ドットごとの電位値を線形補間した。こうしたドットは、頭皮上にグリッド状に仮定した2540点に設定される。このような補間によって各ドットごとにえられた値と前記の25電極位置の値、計2565点の電位値をもとに、EEG マッピングシステム(日本光電 MCE-5200)によって、頭皮上での電位分布を15段階に色分けしてしめす等電位図をえがかせ、グラフィックに表現するのである(図4.7)。この画像を Brain Electrical Activity Map (BEAM) とよぶ。

このシステムで BEAM をえがきだすには、2人の被験者のそれぞれについて、所定の12ヶ所の電極から導出したデータを必要とする。当初この研究で使用していたテレメトリアル方式の脳波計は、脳波10チャンネル、生体電位2チャンネル計12チャンネルからのデータ収集に対応するものであったため、チャンネル数が不足するところとなった。そのためチャンネル数を増設して24チャンネルとし、頭皮上22チャンネルの脳波計測に対応できるようにした。さらに、データレコーダーで記録する際に、この実験では重要な意味をもたない前頭部のデータをより



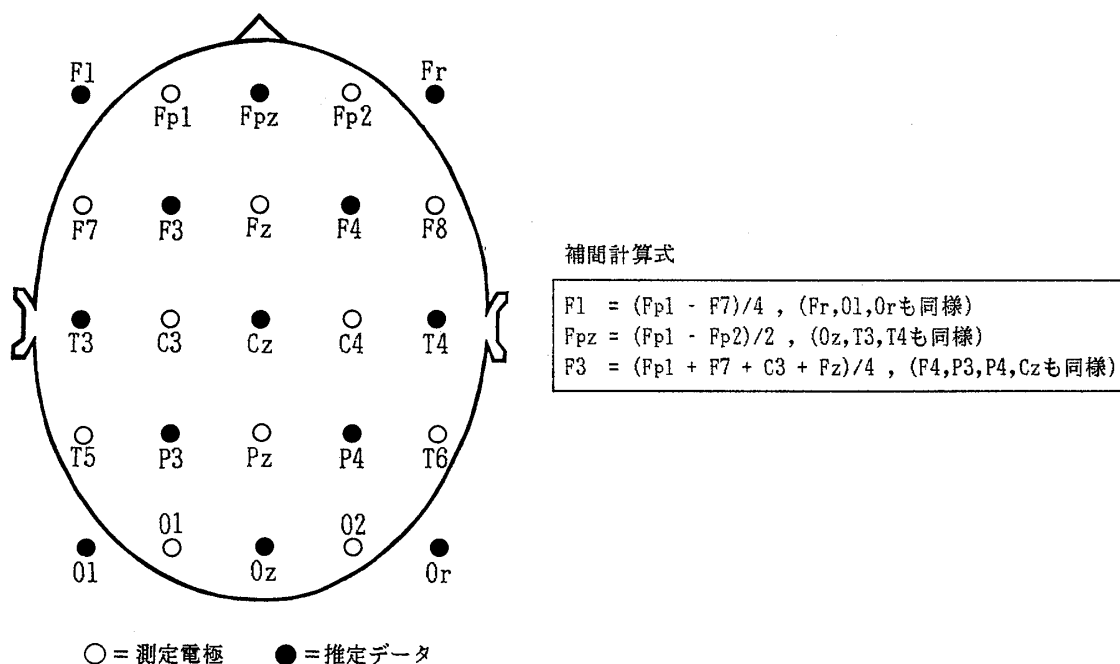
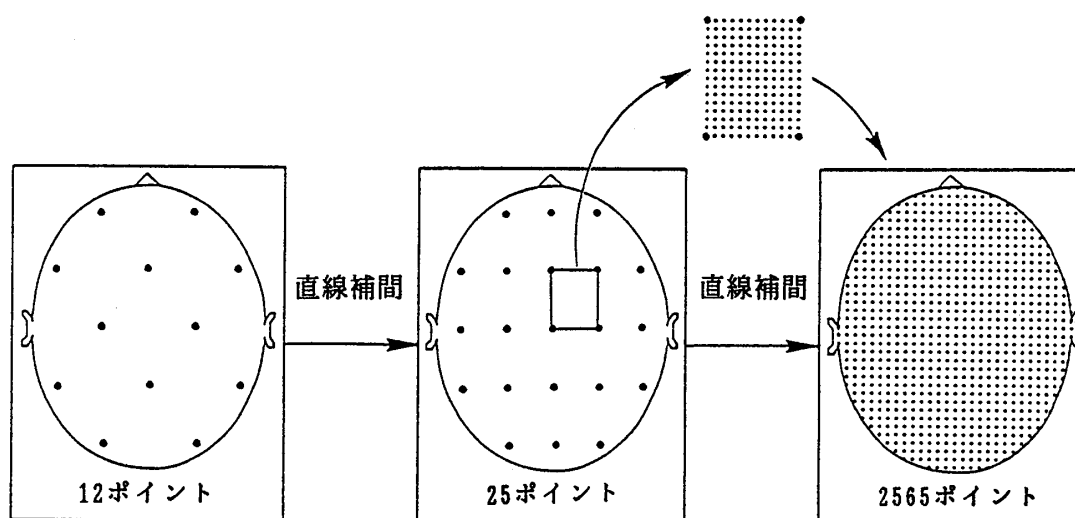


図4.5 使用した電極位置と補間計算式



### 頭皮上2565ポイントにおける 脳波α波帯域（8.0－13.0Hz）の等価電位算出法

図4.6 補間点の設定

つよい圧縮の対象にした。右前頭部から導出した脳波を2つに分岐させて、左前頭部のデータを右前頭部のデータで代替させることにした。これによって、11ヶ所の電極から導出したデータからでもBEAMをえがきだすことができるようになり、2名の被験者について同時に実験をおこなうことを可能ならしめるとともに、実験の効率を大幅に向上させることができた。

これに対応して、従来この研究で使用していた7チャンネル・データレコーダーではチャンネル数が不足となった。そのため、国内では現時点で最大のチャンネル数28チャンネルを有す

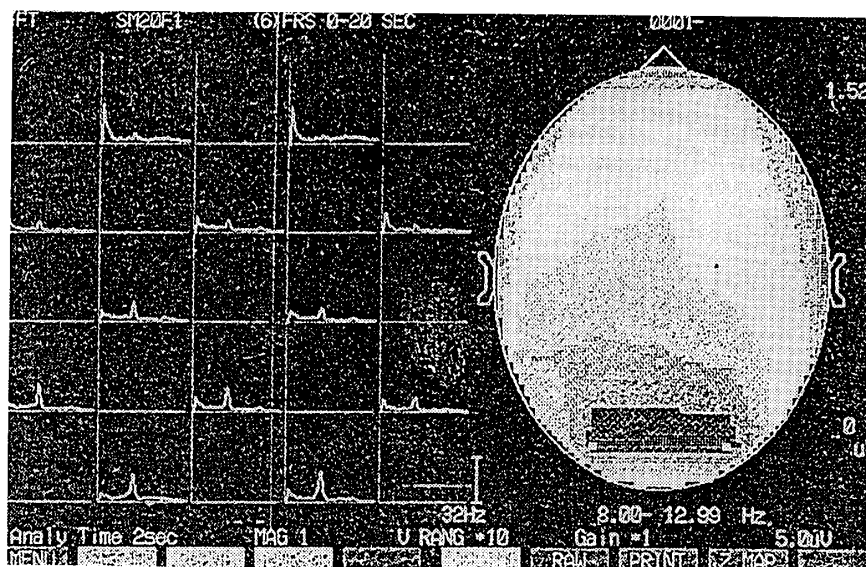


図4.7 BEAM の例

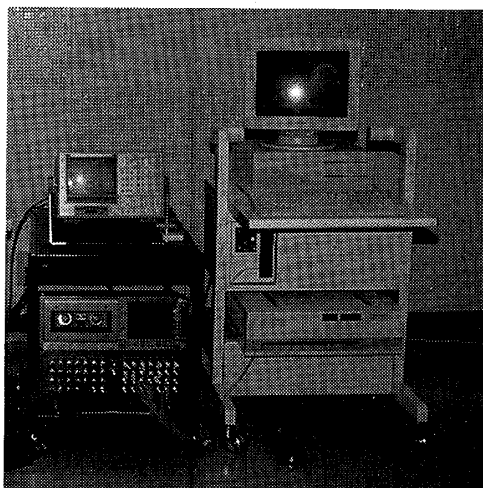


写真4.2 EEG マッピングシステム日本光電 MCE-5200およびデータレコーダーTEAC XR-9000をくみこんだシステム

るデータレコーダーTEAC XR-9000を記録用に採用した（写真4.2）。

#### 4.2.5 BEAM による $\alpha$ 波活性の定量化手法の開発

すでにのべたように、EEG マッピングシステムにより、頭皮上にグリッド状に仮定した2553点および実際の電極位置12点、あわせて2565点における帯域別の電位値をえることができる。そこで、この値をすべて加算して電位の総和値 ( $\mu V$ ) を計算するアルゴリズムをつくり、プログラムを作成した。この電位の総和値は、頭皮上でみいだされた帯域別のパワーをトータルに指標するものとみなせる。なお、この場合、計算された帯域別の電位の総和値のなかには、たとえば  $\alpha$  波帯域を例にとると、 $\alpha$  波帯域中の  $\alpha$  波に由来しない不規則電位も存在している。そ

こで、この不規則電位を一種のノイズとみなし、ノイズレベルの補正をおこなうことにし、さまざまな実測経験を勘案して以下のような計算法を設定した。

$$\text{Sum} = (\text{noise level} \times 2565)$$

Sum ; 2565ドットそれぞれの電位の総和

noise level ;  $0.3\mu\text{V}$

ノイズレベルとしては、これまで蓄積したデータにもとづいて検討し、 $\alpha$ 波帯域については $0.3\mu\text{V}$ とした。こうしてもとめた各実験条件ごとの電位の総和値の比をとって、その帯域におけるパワーの増減率 $V(\%)$ とした。以下、この方法を脳波帯域別総パワー相対値算出法、そして、これらの値を比較することを脳波帯域別総パワー相対値比較法とよぶことにした。

#### 4.2.6 目を開いた状態における $\alpha$ 波活性の指標化<sup>4)</sup>

##### (1) 目をとじた状態下の $\alpha$ 波を指標とする情報環境質評価手法の限界

これまでの定説では、脳波 $\alpha$ 波は目を閉じた状態で観察され、目を開くと消失または減弱するとされている。そのため、 $\alpha$ 波に注目したさまざまな実験のほとんどすべては、目を閉じた状態であられる脳波を解析対象としてきた。しかし、単に聴覚情報環境質の評価という観点からみても、人間は目を閉じた状態でのみ音をきくとはかぎらず、睡眠時以外では目を開いた状態で音をきいているのが常態といえる。したがって、目を閉じた状態でなければ $\alpha$ 波を指標とする実験ができないということは、 $\alpha$ 波という生理指標をもちいるかぎり、人間がとりうる状態のうち、ごく特殊な状態だけしか検討対象にできないという点でおおきな限界になる。

また、景観など視覚情報環境について、 $\alpha$ 波を生理的指標として評価をおこなうことは、目を閉じていては不可能であることはいうまでもない。

##### (2) 開眼時にあらわれる $\alpha$ 波の挙動に関するいくつかの見解

医学分野では従来、開眼による $\alpha$ 波の減衰が不十分であったり欠如している場合には、脳機能とくに覚醒系の機能障害が予想されるとされてきた<sup>2)</sup>。こうした通念のなかで、比較的はやい時期に、目を開いた状態下でも $\alpha$ 波が出現するというつぎのような報告がおこなわれている。

###### ① 禅の高僧の瞑想時にみられる $\alpha$ 波について<sup>5)</sup>

禅の瞑想時に半眼状態で $\alpha$ 波が出現するというケースが特殊な例としてはあるが報告されている。

###### ② 剣道のたちあい時にみられる $\alpha$ 波について

いわゆる剣道の名人など武道の練達者がたちあい時にとる無念無想の状態、あるいは八方眼といわれる状態においては、開眼状態で持続的に $\alpha$ 波が出現するといわれる。

###### ③ 最近の臨床脳波学者の見解<sup>6)</sup>

最近の計測法の進歩にともなって、脳波学者の一部に、目を開いた状態でもしばしば $\alpha$ 波が観察されることを指摘する見解がみられるようになった。

わたくしたちはこのような指摘に注目した。すなわちこれらは、従来の古典的計測法にともなう拘束感等が被験者の生理的・心理的状态に影響をおよぼし、これが $\alpha$ 波の挙動に抑圧的作用をあたえていたことを反映したものと解釈することができる。したがって、計測に対するそ

うした影響を克服するために、“ $\alpha$ 波の本来性指標仮説”にもとづいてさきに開発した脳波計測法をさらに改良することによって、 $\alpha$ 波パワーを視覚をふくむ情報環境質の総合的な評価指標となしえるかもしれない。こうした観点にたつて、目を開いた状態下であられる脳波 $\alpha$ 波の様態の観察、および目を開いた状態下であられる $\alpha$ 波パワーを数量化する手法の検討をおこなった。

#### 4.2.7 目を開いた状態下であられる脳波 $\alpha$ 波の様態の観察

##### (1) 時間波形による開眼時の脳波 $\alpha$ 波の観察

これまでにのべてきた脳波測定にかかわる基礎的・技術的な改良の目を開いた状態で $\alpha$ 波をしらべるうえでの有効性を確認するために、以下の実験をおこなった。10名の健常な被験者(男

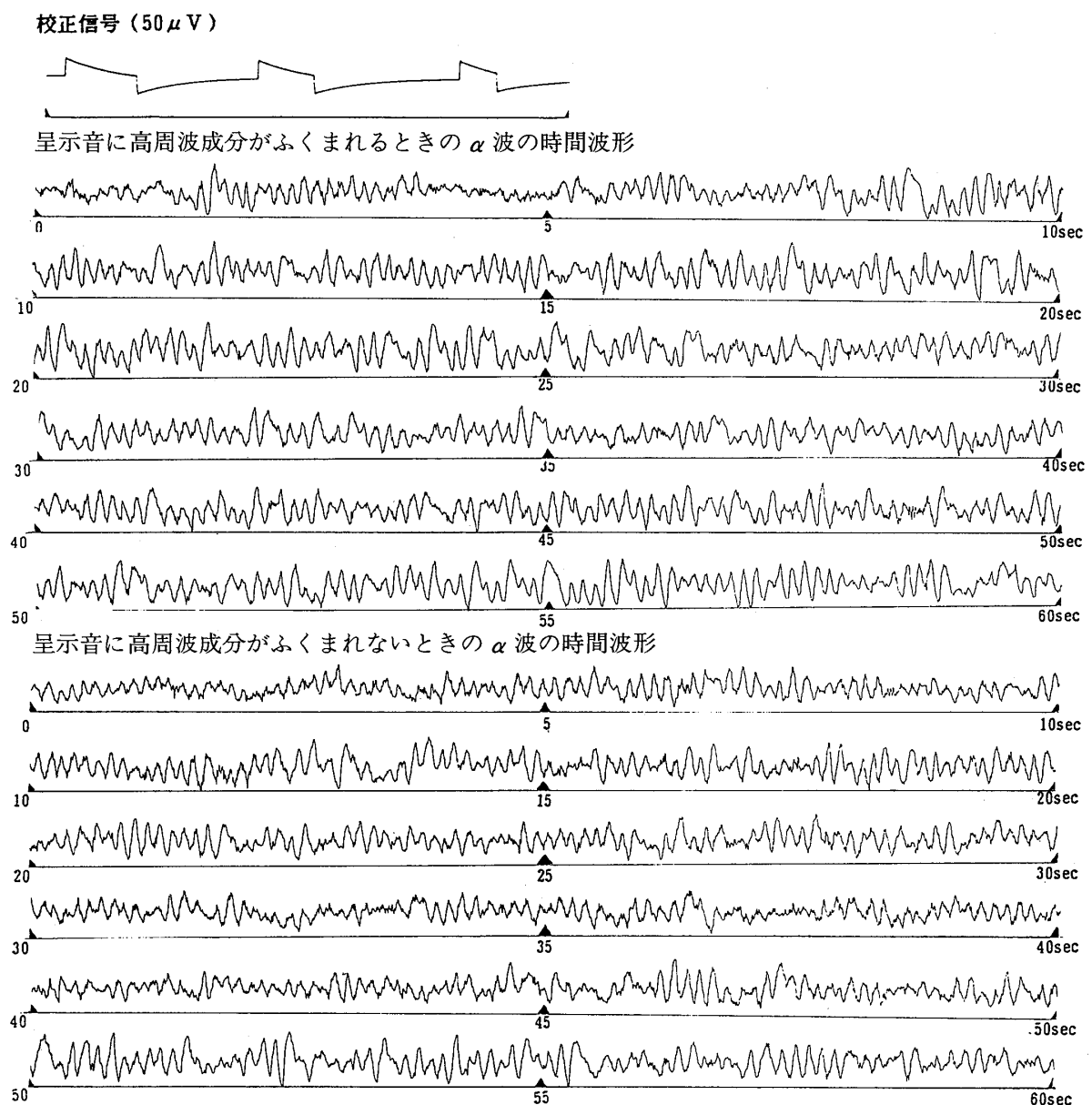


図4.8 同一被験者の正中頭頂部(Pz)において開眼状態下で比較的大振幅の $\alpha$ 波が観察された時間波形(高周波成分をふくむガムラン音を呈示しているとき)と比較的小振幅の $\alpha$ 波が観察された時間波形(高周波成分をカットしたガムラン音を呈示しているとき)(各60秒)

しらべるうえでの有効性を確認するために、以下の実験をおこなった。10名の健常な被験者(男性5名、女性5名、年齢22~34才)について、目を開いた状態で、可聴域をこえる高周波成分を豊富にふくみハイパーソニック・エフェクトの発生が期待されるガムラン音と、その26 kHz以上の高周波成分をカットしたガムラン音とを呈示し、その際の脳波の時間波形の変化に注目して観察をおこなった。音呈示装置・条件等は、3.3でのべた方法に準拠した。

その結果、10名の被験者のうち6名が目を開いた状態で明瞭な $\alpha$ 波波形を持続的にしめし、高周波成分が豊富に存在したときの $\alpha$ 波パワーは高周波成分が存在しない時の $\alpha$ 波パワーをうわまわる傾向をしめした。この実験において、音の変化に対応する $\alpha$ 波振幅の典型的な変化が観察された一被験者の正中頭頂部電極(Pz)における60秒間の時間波形を図4.8にしめす。

## (2) 脳波画像解析による開眼時の脳波 $\alpha$ 波の観察

わたくしたちはさきに、目を閉じた状態であらわれる $\alpha$ 波パワーを指標とした音環境質評価法を開発した際に、脳波の挙動をとらえるうえで脳波画像解析が有効性を発揮することをみいだした。それは、頭皮全体の $\alpha$ 波分布状態を把握することによって、ノイズの混入など実験の異常を検出でき、また「閉眼状態下での $\alpha$ 波は一般に後頭部を中心に分布するものがおおい」というように脳波の挙動を確認できるなどによって、実験の信頼性をたかめうることに由来している。

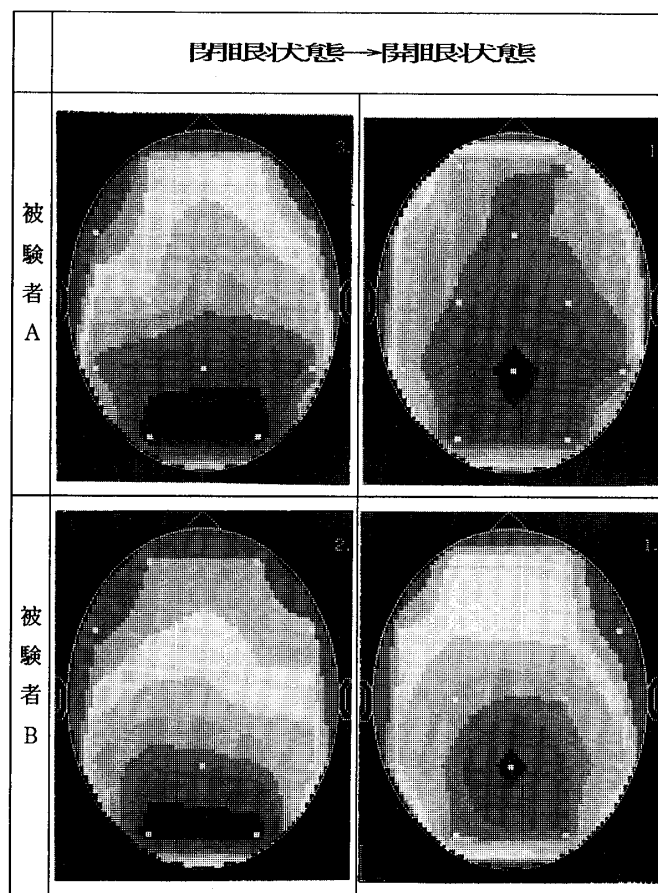


図4.9  $\alpha$ 波パワーの分布状態の変化

そこで、この実験において目を開いた状態で明瞭な  $\alpha$  波を出現させた各被験者について、目を開いた状態と目を閉じた状態とにおける  $\alpha$  波パワーの頭皮上分布を脳波画像解析によって観察し、開眼および閉眼という二つの状態下で  $\alpha$  波パワーの頭皮上分布になんらかのちがいがどうかを比較検討した。その結果、目を閉じた状態では  $\alpha$  波パワーが後頭部 ( $O_1, O_2$ ) を中心に分布するものがほとんどであるのに対して、目を開いた状態では概して正中頭頂部 (Pz) を中心に分布するものがおおいという傾向がみいだされた (図4.9)。

### (3) 開眼状態であらわれる $\alpha$ 波の空間分布におよぼす眼球運動筋電ノイズの影響

BEAM によってしめされた開眼状態と閉眼状態との  $\alpha$  波パワー空間分布にみられるもうひとつの特徴的な相違点として、予測されたことではあるが、被験者のほぼ全員について、開眼状態では前頭部に顕著なパワーの発生がみられた (図4.10)。いうまでもなくこれは、開眼にともなう眼球運動筋の、ホワイトノイズ様にひろい周波数帯域をもつ筋活動電位のうち  $\alpha$  波帯域に相当する成分のパワーであり、本来の  $\alpha$  波のパワーではない。各被験者の BEAM について詳しく検討したところ、このパワーの影響は、先にのべた  $\alpha$  波パワーの頭皮上分布の中心とみられる正中頭頂部 (Pz) 付近よりも後頭部側の領域には、ほとんど波及しないものがおおいことがわかった。このことから、目を開いた状態において  $\alpha$  波パワーを指標として定量化する際には、前頭部のデータを排除することで、眼球筋電ノイズの影響を実用上支障のない程度にまで低下させられるとの判断に達した。

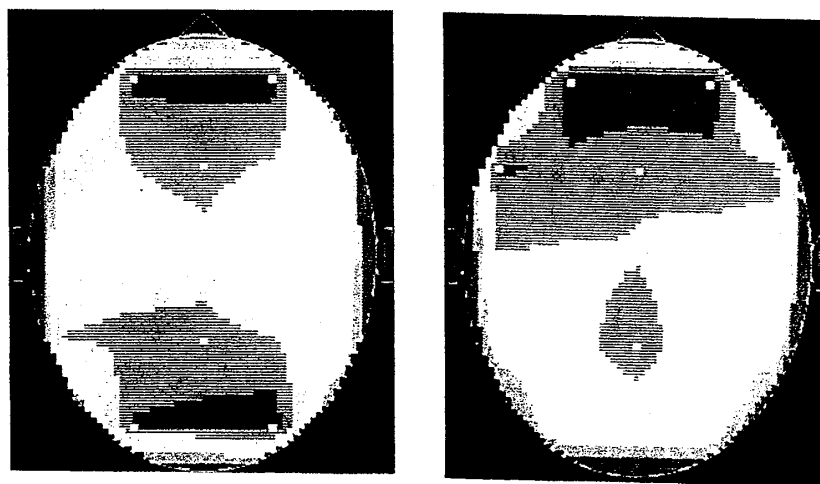


図4.10 開眼状態で  $\alpha$  波帯域の BEAM にあらわれる眼球運動の影響

#### 4.2.8 FFT スペクトルデータの加算平均による自発脳波の時間的不安定性の圧縮

脳波は外部的要因および内部的要因に敏感に反応するため、たとえば数秒～十数秒程度の区間データを対象として解析した結果からなんらかの結論をみちびくことは危険であり、個別データのばらつきが解釈の多義性や恣意性をみちびきやすい。ある特定の情報環境をモデルとして設定し、それに対応する脳の持続的な反応をみるためには、そうした脳波の単発的あるいは一時的な反応の影響を排除しなければならない。そのための検討をおこなった結果、すくなくとも60秒以上、可能ならば100秒以上の時間波形データを対象としてFFTへとりこみ、時間

平均をとると、結果の安定性は顕著にたかまることがわかった。

#### 4.2.9 目を開いた状態下における $\alpha$ 波パワーの数量化手法の開発

##### (1) 数量化に際しての注意点

データの安全性を確保するために、まず、時間波形を視察し生データに筋電ノイズをはじめ不良な要因がないことを閉眼条件よりもいっそう慎重に確認する必要がある。つぎに、FFT による周波数スペクトル・データに、 $\alpha$  波帯域固有のピークが存在することを確認しなければな

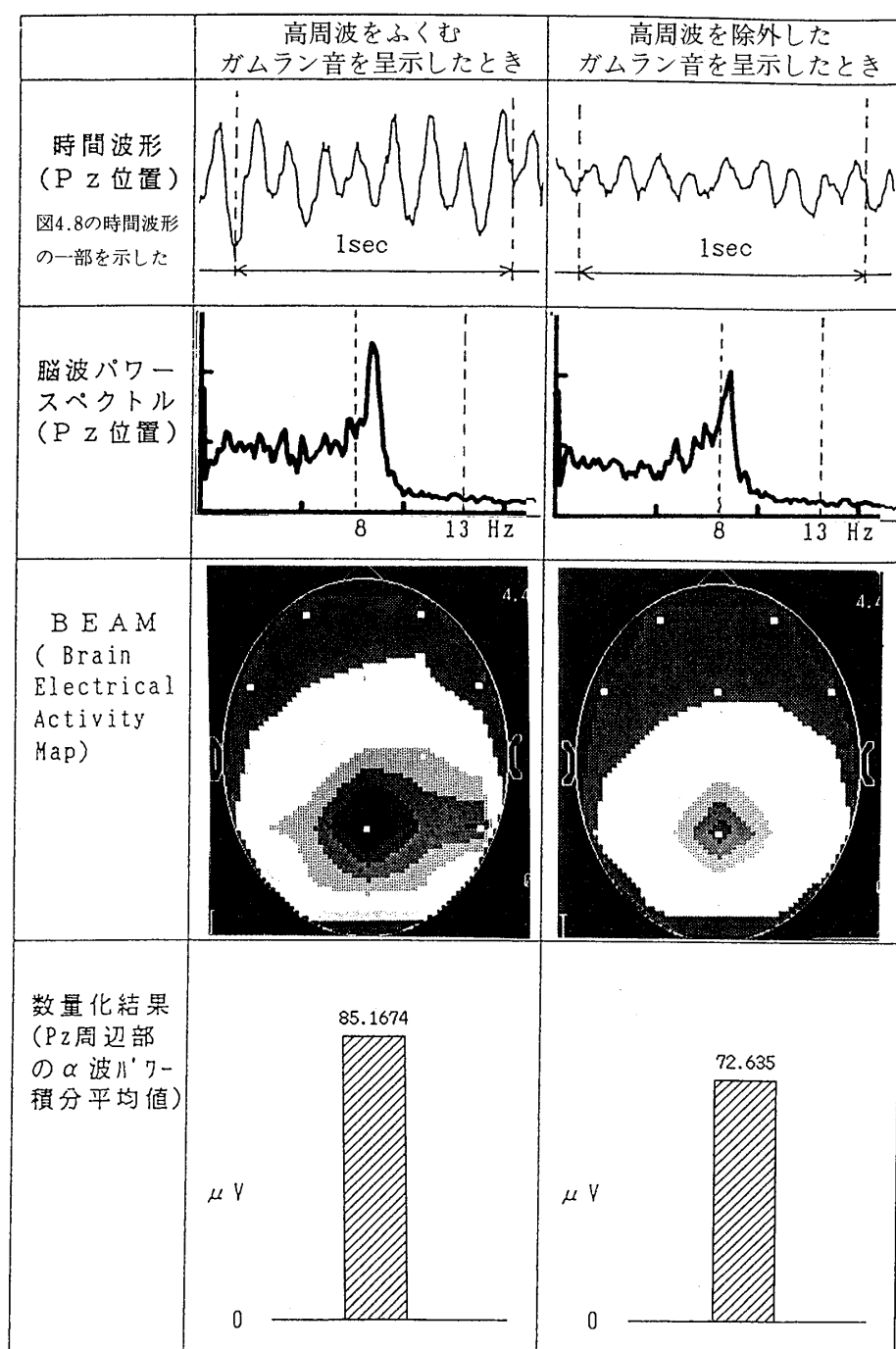


図4.11  $\alpha$  波パワー数量化手法のモデル

らない。さらに、マルチポイントのデータから BEAM を作成し、頭皮全体の  $\alpha$  波パワー分布に異常がないことを確認できれば、一応数量化の基礎となる資格をもったデータがえられたものと判断してよいのではないかとかんがえられる。

## (2) 数量化の対象とすべき頭皮上領域の検討

比較的多数の被験者で、目を開いた状態下の  $\alpha$  波パワー分布は正中頭頂部 (Pz) 付近にピークをもち、この周辺を中心にしてパワーが増減している。したがって、単に S/N がたかくダイナミックレンジのおおきなデータをえることだけを考慮すれば、Pz のような  $\alpha$  波パワー分布のピーク位置についてピンポイント的に解析すればよいことになる。

しかし実際には、ピークポイントは被験者によって多少のばらつきがあり、解析対象位置を Pz に固定してピンポイント的におこなうことには危険がともなう。このことを考慮して、方針をかえて被験者ごとに  $\alpha$  波のピーク位置をしらべ、それにあわせて解析対象位置を変更していくという方法をとったとすると、前記の問題は解決するものの手順が大幅に複雑になり、これが実用上かなりの障害になることをさげられない。

そこで、Pz 電極を中心としつつ、その近傍の電極の影響を適切に反映させるように解析対象領域を設定するのが妥当であろうと判断した。そこで、Pz 電極とこれに隣接した電極とのあいだで直線補間されたデータで構成される領域について、そのなかに適切な範囲を設定することにし、BEAM の視察と、数値シミュレーションをくりかえした。その結果、BEAM を構成する全 2565 点中、Pz を中心に前後 10 ポイント  $\times$  左右 9 ポイント = 90 ポイントの領域を対象として数量化した場合、被験者の個体差の影響をうけにくく、実験的に設定した情報環境条件のちがいをかなり安定して反映するデータがえられることがわかった。そこで、現時点における実用条件として、この領域を解析対象領域とすることにした。

また実験によって、 $\alpha$  波のピークポイントが、Pz よりもより後頭部に位置するパターンをしめすこともある。そうした場合には、頭皮全体領域を 3 分割した後頭部の 1/3 領域を対象とすることにより、良好な結果がえられることがわかった。そこでこのような場合には後頭部 1/3 領域を解析対象領域とする方法を採用することにした。

## <文 献>

- 1) 大橋 力：人間のシステム化に機能する二つのプログラム、放送大学教材 人間と社会環境、放送大学教育振興会、pp.88-97、1989.
- 2) 大熊輝男：臨床脳波学第 4 版、医学書院、1991.
- 3) Duffy, F.M. et al. Brain Electric Mapping, A method for extending the clinical utility of EEG and Evoked potential data, Ann Neurol., 5. pp.302-332, 1979.
- 4) 不破本義孝・大橋力・仁科エミ・河合徳枝・高田智史・田中基寛：目を開いた状態で観察される  $\alpha$  波活性を指標とする情報環境の評価について、第 9 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集、pp.209-216、1993.
- 5) Hirai T.: Psychology of Zen. Tokyo, Igaku Syoin, 1974.
- 6) 井上健・篠崎和弘：アルファ波 (III)、臨床脳波、vol.33、NO.1、pp.52-58、1991.



## 第Ⅲ部 人類をとりかこむ空気振動の物理構造とそれに対する人間の感受性

第Ⅱ部にのべたとりくみによって、わたくしたちの研究を効果的にすすめるあたらしい強力な方法論を、体系的につくりだすことができた。そこで第Ⅲ部では、このあたらしい方法論によって、人類をとりかこむ空気振動がどのような物理構造をもっているか、そしてそれに対して人間の感受性はどのように反応しているかについて、くわしく検討した内容をのべる。

人類が遭遇する可能性のある地球上の空気振動について、汎地球的かつ汎文化的な視野にたって横断的にしらべた研究は、これまでほとんどみられない。わたくしたちはまず、人類という生物にとってもっとも本来的とかんがえられる自然環境、そしてそれからもっともへだたっているとかんがえられる人工環境のあいだにひろがるさまざまな音環境のなかから典型的な対象をえらび、地球諸地域におもむいて現地で直接、高精度録音をおこなった。こうしてえられた音試料について、その音響物理学的構造を、第Ⅱ部で開発したあたらしい高度な指標をもちいて分析した。また、音文化の面でそれぞれ固有の特徴をもついくつかの典型的な民族の音楽についても現地録音をおこない、環境音とおなじ指標によって分析した。このようにしてあきらかになった人間をとりかこむ空気振動の世界が、従来の通説や常識をおおきくこえていたことをのべる。

つぎに、こうしてわたくしたちがえたあたらしい知見のなかでもとりわけ注目される、「快適な音には可聴域をこえる高周波成分が豊富にふくまれている」という事実に着目し、この高周波が人間になんらかの効果をあたえているかもしれないという作業仮説をたて、それを生理的・心理的指標によって検証することをこころみた。その結果、可聴域をこえる高周波の存在によって人間の生理・心理が快適性をたかめる影響をうけるという現象、すなわち「ハイパーソニック・エフェクト」をはじめて発見することができた。これらの成果は、人間の脳のふるまいを起点にして、文化や思想にまでアプローチをひろげることがうながす契機となる、啓示に富んだ材料をもたらしている。

## 第5章 人類をとりまく空気振動の物理構造の解析

### 5.1 環境音の物理構造の解析

#### 5.1.1 典型的な環境音の収録

第2章3節に述べた超広帯域音環境情報デジタル記録システムによって、典型的な環境音の収集をおこなった。さきにのべた熱帯雨林など、人間本来の音環境の仮想モデルとしてえらんだ対象および都市のきわめて人工的な騒音環境の音を収集した<sup>1,2)</sup>。それらの対象はつぎのよ

うなものである。

#### 5.1.1.1 自然性のたかい環境音の収録

##### 1) パナマ・バロ・コロラド島の自然環境音

バロ・コロラド島はパナマ運河内にある面積15.64km<sup>2</sup>の比較的小型の島で、米国スミソニアン熱帯科学研究所が所有し、学術目的のために原生の熱帯雨林を理想的に保存しているものである。同研究財団の許諾、協力のもとに、1991年6月28日～7月4日の7日間この島に滞在して、環境音の収録をおこなった。この森林内では、多種多様な動植物を起源とする環境音が量的にもきわめて豊富である。それにもかかわらず、感性的には、全体の印象はきわめて快適な静寂感が支配的だった。

時間、空間的にさまざまな測定ポイントを設定して収録をおこなった。起伏のおおい地形の複雑な原生雨林のなかを機材すべてを手はこびで移動し、しばしば80%をこえるたかい湿度とたたかいながらマイクロフォンをはじめとする精密な機器を動作させるために、作業は困難をきわめた。最大の障害になったのは、マイクロフォン系のトラブルの多発である。AD/DA系はまったく支障なく作動した。ただし、可聴周波数帯域にくらべてそれをうわまわる高周波領域のパワーが相対的につよい虫の声などがおもな入力になった場合には、VUメーターの目盛りのうえでは低レベルでありながら、エンファシスで強調された高周波域でクリッピング歪みが発生する。そのため、VUメーターが指標としてまったく機能しないという事態が発生した。これを解決するためには、現在のところ、収録音をリアルタイムでAD/DA変換し、直接聴覚によってモニターしながらレベルをコントロールするしか方策がない。このことから、昆虫や鳥獣などの発する音を主体にする熱帯雨林固有の音を収録するためには、密林のなかに機器とともにひそんで、身じろぎもせず100%リアルタイム・モニターをおこなうというきわめて過酷な作業を余儀なくされた。

##### 2) バリ島農村の自然環境音

インドネシア・バリ島は南緯8度に位置する面積約5600km<sup>2</sup>の火山性の島で、ゆたかな降雨にめぐまれている。中心部に3000m級の山をいただき、全島が海にむかってなだらかに傾斜している。その斜面を利用して有名な“ライステラス”とよばれる水田がすみずみまでひらかれた、典型的な水田農耕地帯である。これを周辺の未開の島々と比較すると、本来は熱帯雨林が全島をおおっていたであろうことは想像にかたくない。自然との共生にたけたバリ島の伝統社会は、その居住空間にゆたかな植栽をとりいれており、それらを生息の場にして昆虫や鳥獣をはじめとする動物たちも稠密に生存している。

このようなバリ島農村の居住空間は、原生の熱帯雨林を水田開発するにあたって十分に抑制されたかたちで人為的加工がくわえられた、すぐれて自然性のたかい環境のひとつといえる。その環境音の感性的評価をいうならば、まさに快適のひとつにつきる。こうした環境音の構造を分析し、熱帯雨林のそれと比較してなんらかの共通性をみいだせるならば、うつくしい、あるいは快適な音のもつ物理構造上の指標を追求するうえで、きわめておおきな収穫になるだろう。

そこでバリ島のなかでももっとも降雨量がおおいといわれるギャニヤール県に所在するウブ

ド村に環境音収録の拠点をもうけ、周辺のさまざまなポイントで録音をおこなった。そのおもなものは植栽のゆたかな住居の庭園、水田とその周辺、寺院や集会所などである。

バリ島での収録で問題になったのは、ひとつにはバロ・コロラド島とおなじ高温多湿によるマイクの障害である。もうひとつは、観光開発を主因とする自動車およびモーターバイクの激増で、それらによるノイズが混入しない収録をおこなうためには、深夜から早朝にかけての時間帯をえらぶしかなかった。ただし、エンジンノイズがまったく存在しない音状況のなかに車両が侵入してエンジン音がたかまってくる過程のドキュメントから、エンジンノイズによる音環境構造の変質状況がかなり明確に把握できたことは、ひとつの収穫といえる。

#### 5.1.1.2 都市環境音の収録

自然からのへだたりができるだけおおきい環境音を収録するうえでは、わが国の東京都内は世界的にみてもっとも妥当な対象のひとつといえるだろう。そこで、ひとつの観測地点を大型のトラックをふくむ自動車やバイクの音などのエンジンノイズが主体となる環状6号線に面した地点に設定し、もうひとつの観測地点を市街地固有の人間の雑踏による音とエンジンノイズと鉄道をはしる電車の音とが交錯する JR 大塚駅南口広場に設定して収録をおこなった。

#### 5.1.2 高速フーリエ分析 (FFT) による環境音の分析

自然性が高度にたもたれた快適な音環境では、音あるいは空気振動が、質・量両面できわめて豊富である。その主力は動植物起源の自然音で、静寂さを感じさせる環境でありながら、実測された音圧レベルが、都市騒音の場合には不快感につながる50dB (SPL) をこえるというような例がめずらしくない。これをFFTで解析したデータにより物理構造の面から分析してみた<sup>1-4)</sup>。

##### 5.1.2.1 周波数分布の比較分析

周波数分布のうえでは、快適な自然環境音は、可聴域上限である20kHzをはるかにうわまわる高周波領域にまで、かなり顕著なパワーがみとめられることにひとつの特徴がある。それに対して都市の音環境では、屋外ではエンジンをはじめとする機械騒音の存在が支配的であり、自然性のたかい音環境に比較して低周波領域へのかたよりがおおきく、可聴域以上の高周波の比率はずっとひくい。さらに、コンクリートや新建材をつかったあたらしい建造物のなかでは、屋外の騒音が遮断され、きわめて音のすくない環境がつくりだされている。この場合、たかい周波数の成分ほどより遮断されやすく、屋内に伝達される環境音はほぼ5 kHz以下の帯域にかぎられるという一般的な傾向がみられる (図5.1)。こうした空間内に機械装置や電子機器などが設置されると、しばしば、可聴周波数帯域をはずれた高周波域に、機器類の発する周期振動のするどいピークが孤立してあらわれる。

##### 5.1.2.2 音圧ゆらぎ構造の比較分析

また自然環境音と都市環境音との音圧ゆらぎ構造を比較すると、以下のような特徴がある (図5.2)。まず50Hz～1 kHzの低周波帯域では、自然環境音の場合、都市環境音にくらべると非常

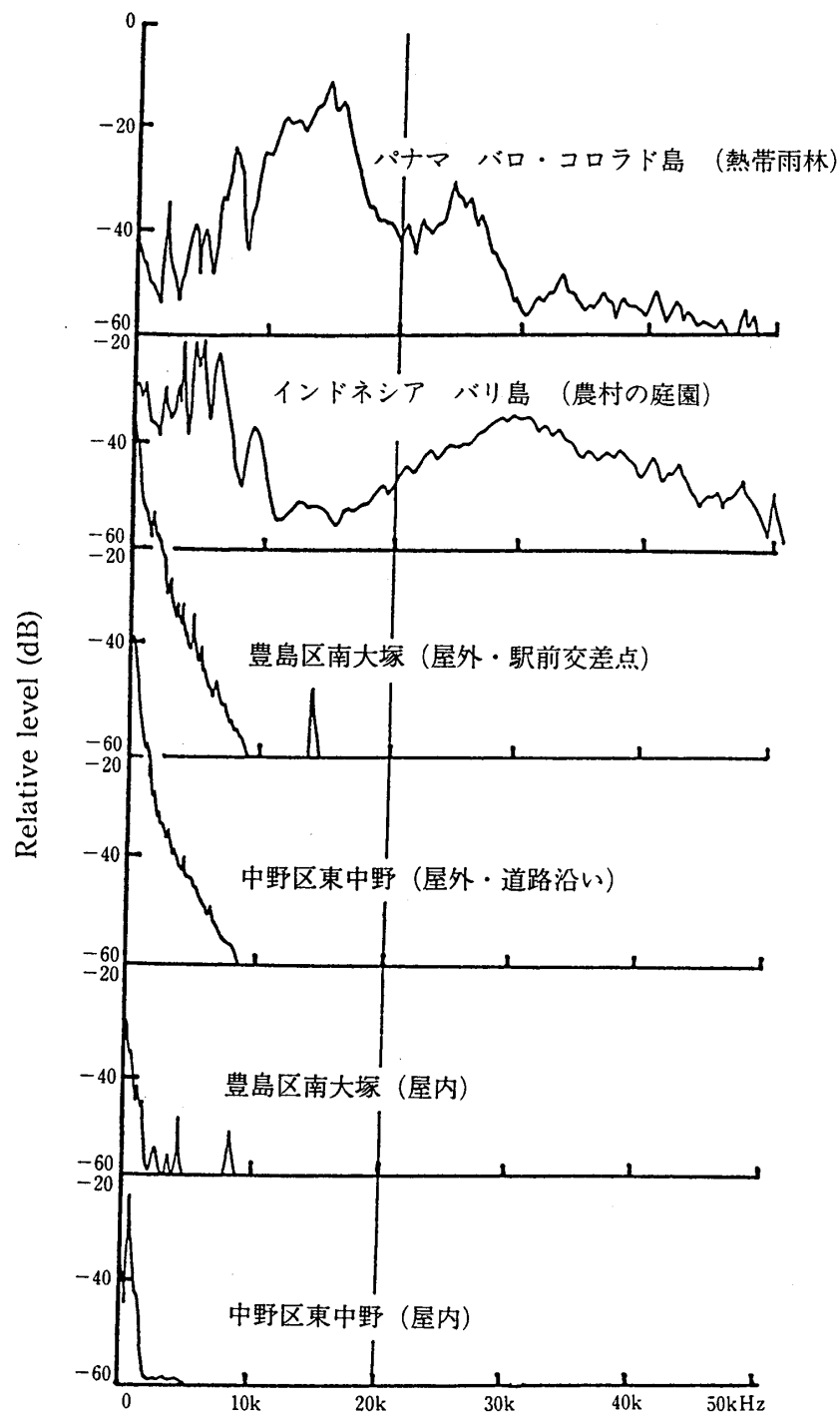


図5.1 自然性のたかい環境音と都市環境音の周波数分布

にひくいレベルで水平にちかいカーブをえがき、かなり微弱なランダム性の空気振動が存在するにすぎないことをしめしている。これに対して都市騒音では、低域側できわめてたかく、高域側にむかってゆるやかに低下するカーブがみられ、つよいパワーのランダムノイズと周期振動とがまじりあった状態で存在することをしめしている。都市の屋内では、スペクトルはひくい周波数領域で低下し、周期性のつよい低周波音が選択的に屋内に侵入していることがわかる。

つぎに 1 kHz～10kHz の中間帯域では、自然環境音の場合、パワースペクトルは起伏にとんだかずおおくのピークをともなう特徴的なパターンをしめしつつ高域にのびている。微弱なラ

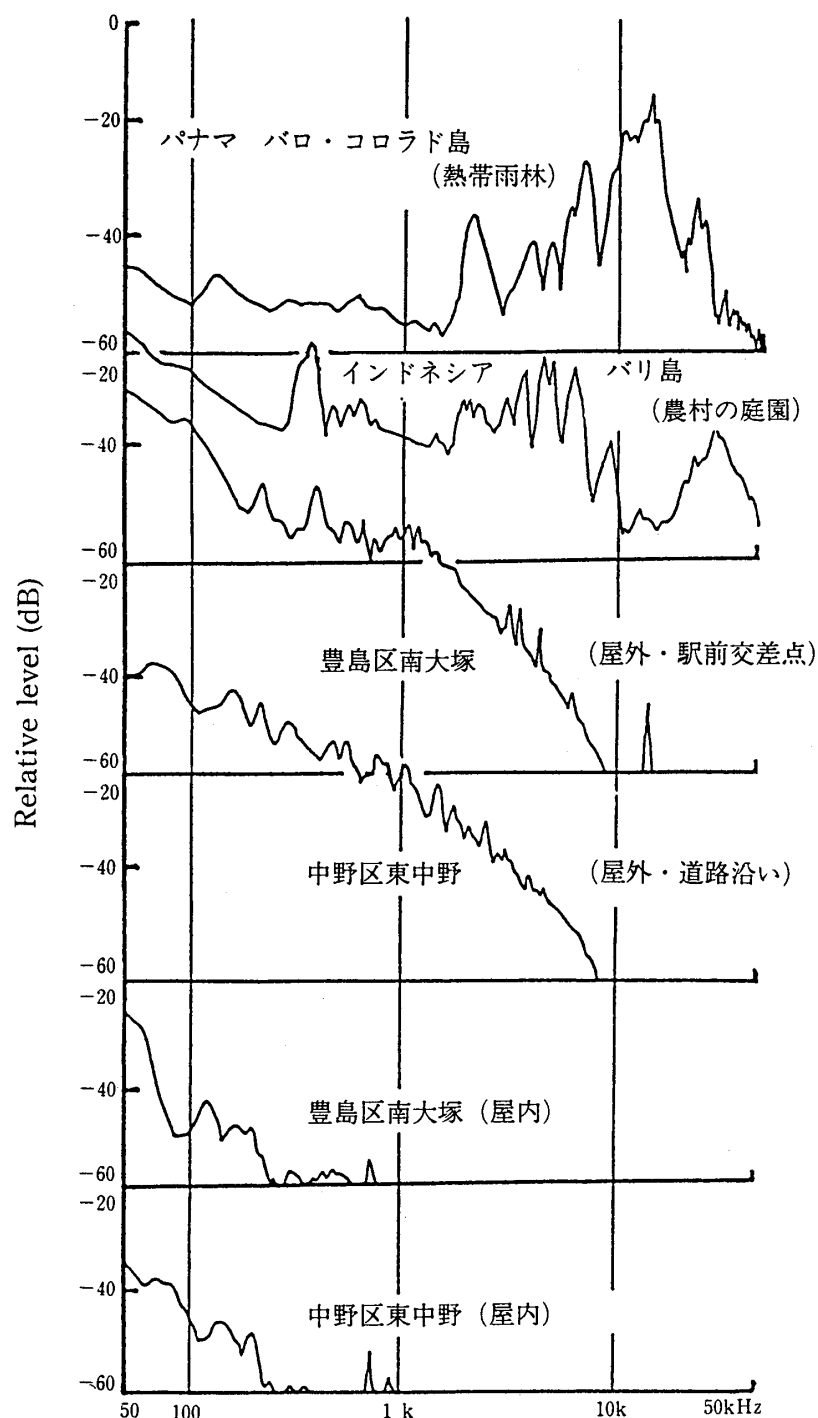


図5.2 自然性のたかい環境音と都市環境音のゆらぎ構造

ンダム性のゆらぎと、倍音をともなう高度な構造をもった周期振動とが共存したかたちで、鳥や虫の声など音色の固有性がたかい多様な音源が、時間・空間的ひろがりをもって分離のよい状態で存在していることを反映したものとかんがえられる。それに対し、都市騒音のスペクトルにはこうしたピークがあまりあらわれず、よりあいまいで混沌とした音空間の構造を反映している。都市騒音の場合、中間帯域のある地点から急峻な傾斜でパワーがおち、周期的振動の性質がたかいことをしめす。ときにはそのなかに、機械装置を起源とするするどいピークがあらわれることがある。都市の屋内では、パワー自体が計測できない。

さらに10kHz 以上の高周波帯域をみると、自然環境音では、中間帯域のパワーをひきついで高域までスペクトルがのびをしめす。さらに、20kHz 以上で特異的なゆるやかなかたちで起伏するピークがみられる場合がしばしばある。このパワーの主力は昆虫など動物を起源とする高周波である。この中間帯域から高周波帯域へのスペクトル全体の勾配は、快適性のたかい自然環境音が、周期的な振動とランダムノイズとの双方の性格をあわせたゆらぎの性質をもっていることをしめしている。都市騒音の場合、高周波帯域には、機械の発する周期振動のするどいピークがまれに観測されることがある以外には、みるべきパワーが存在せず、こうした構造を論じることができない。

### 5.1.3 最大エントロピー法 (MEM) による環境音の分析

#### 5.1.3.1 連続 MEM スペクトルによる比較分析

前章でのべた方法により、最大エントロピー法 (MEM) により求めたスペクトルデータを時系列にそって連続して並べ、ゆらぎの様子を観察した<sup>5)</sup>。

分析は1回のスペクトルあたり、サンプリング周波数128kHz、データ長0.008sec、最大分析周波数50kHz で分析した。ここでは間隔をおかずに連続してスペクトルをとった。

結果の一部を示す (図5.3~6)。

まずデータの精度をみると、ひとつひとつのスペクトルは、安定したピークとスペクトル形状をもち、確率的ノイズの影響はすくない。図5.1で示した、256回加算平均した FFT スペクトルと比べてもよく似た安定したスペクトルであり、十分信頼できる水準にあるといえる。なお図5.1はシステムノイズをのぞいたデータだが、図5.3~6ではシステムノイズの処理はしていない。

それぞれの素材のゆらぎ構造をみると、自然性のたかい環境音には、はっきりしたピークがいくつかあり、もっともパワーがおおきくゆらぎのすくないピークと、パワーがすこしちいさくてかなり大幅にゆらいでいるピークがあることがわかる。高周波側は確率的誤差の影響ですこしわかりにくいだが、ゆるやかなピークの形がゆっくりと変化している。

都市環境騒音は、構造化の程度がひくくのっぺりとしたスペクトルを示し、ゆらぎもこの時間内ではほとんど認められない。

また、自然環境音の各スペクトルを1秒ずつ時間間隔をあけてサンプリングしてみた (図5.7)。途中で突然スペクトルの形が変わっており、突発的な非定常的变化をよくひろっていることがわかる。

#### 5.1.3.2 振幅ゆらぎ構造の比較分析

また、前章でのべた方法により、MEM により音の振幅のゆらぎのスペクトルをもとめ比較をしてみた (図5.8,9)<sup>1,2)</sup>。自然環境音の場合、スペクトルは2kHz ちかくまでなだらかな勾配で下降している。このことから、いわゆる  $1/f$  のような、ランダムノイズと周期振動の中間の性質をもつ音の強弱のゆらぎが存在し、しかもその変化が非常にはやい領域までにおよんでいることがわかる。これに対し都市騒音ではひくい周波数に急な勾配をしめす部分がみられるが、それ以外の部分ではランダムノイズの性質をしめす。

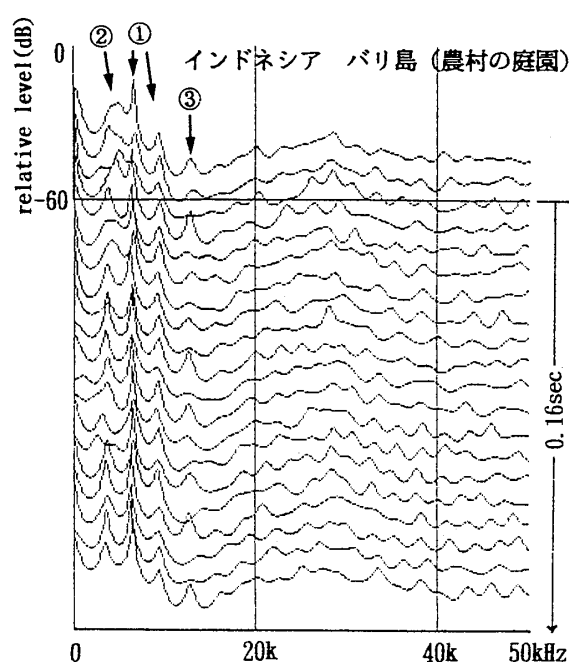


図5.3 自然性の高い環境音の連続 MEM スペクトル  
インドネシア・バリ島（農村の庭園）

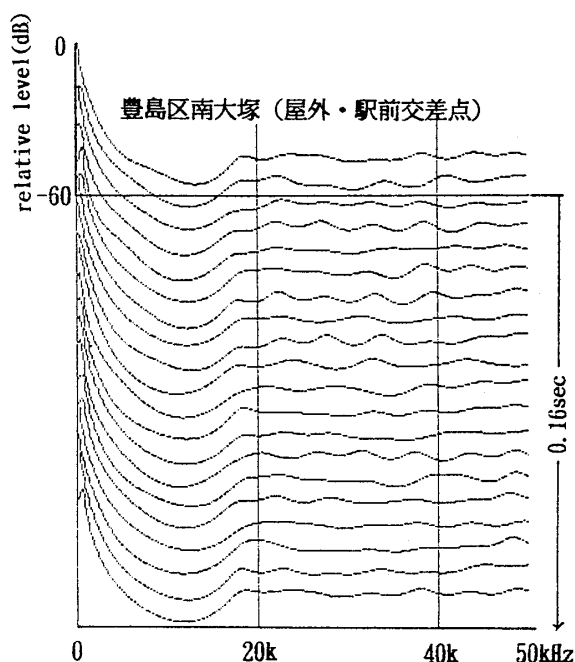


図5.5 都市騒音環境音の連続 MEM スペクトル  
豊島区南大塚（屋外・駅前交差点）

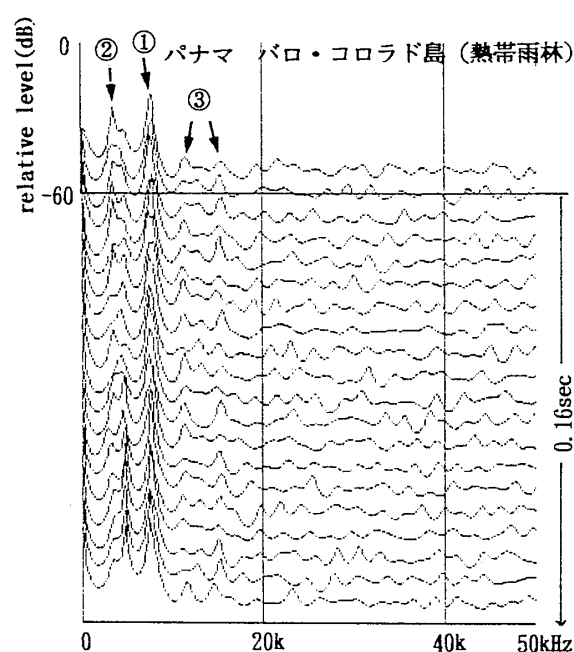


図5.4 自然性の高い環境音の連続 MEM スペクトル  
パナマ・バロ・コロラド島（熱帯雨林）

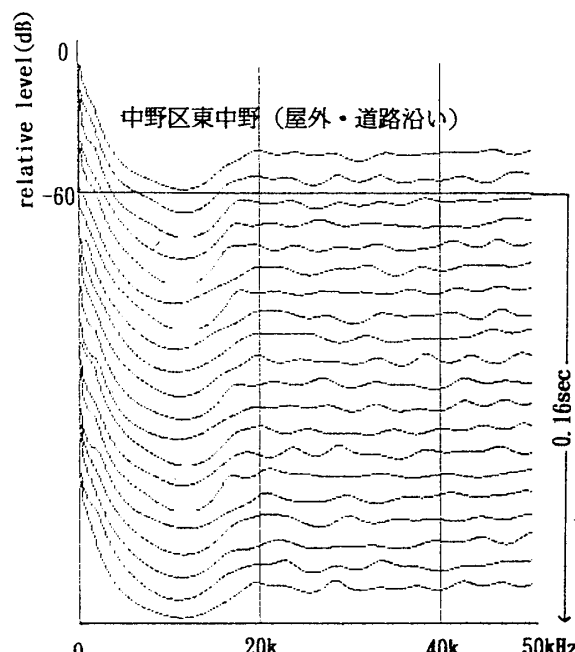


図5.6 都市騒音環境音の連続 MEM スペクトル  
中野区東中野（屋外・道路沿い）

また、周波数のゆらぎ構造では、予想されたことではあるが、スペクトルは特徴的な勾配をしめさない。その原因は、都市環境音の場合、さまざまな周波数の音が混在していてそれぞれ独自にゆらいでいるとかがえられること、また自然環境のなかの音源は、おおきく音程が変化するものはすくないとおもわれることなどにあるといえよう。

以上のように、MEM による環境音解析のこころみはまだ端緒についたばかりだが、これまでの方法では限界のあった、微細な構造にまで立ち入って分析できる可能性をつかんだ。環境音の性質を特徴づける指標を抽出し、評価にむすびつけるうえで、これまでの方法のもつ限界を

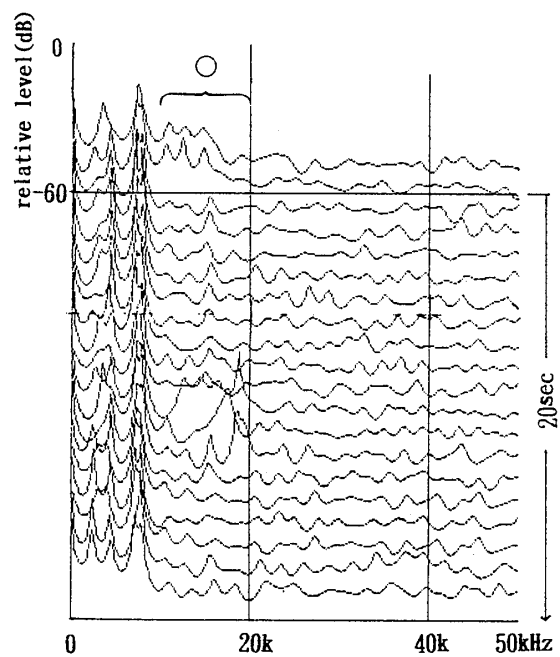


図5.7 1秒おきにサンプリングした自然性のたかい環境音の連続 MEM スペクトル

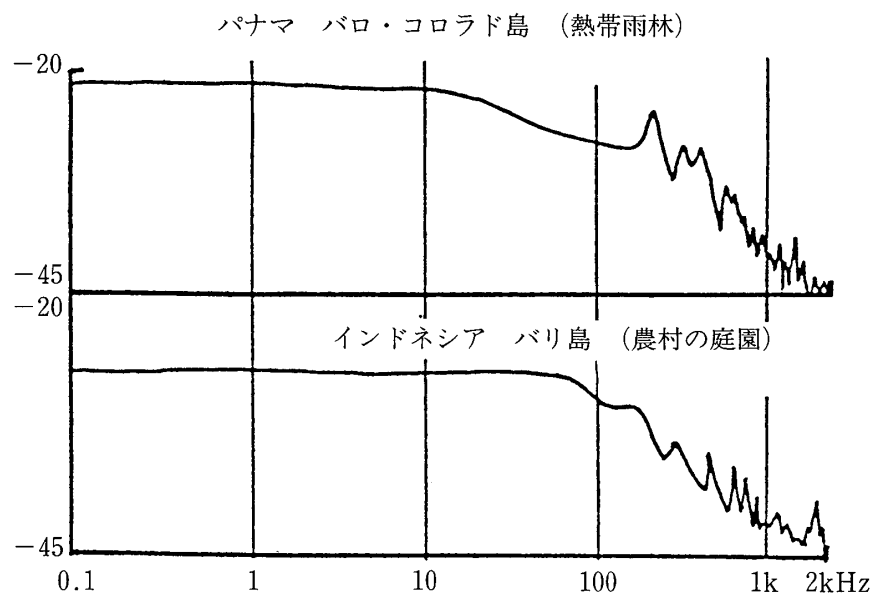


図5.8 MEMによる自然性のたかい環境音の振幅ゆらぎ構造



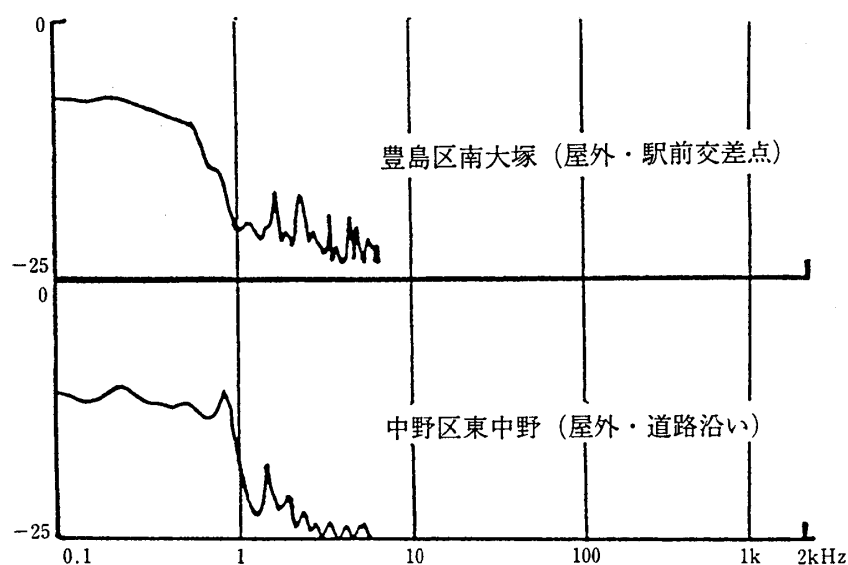


図5.9 MEMによる都市環境音の振幅ゆらぎ構造

かなりおおはばに打破でき、現実の有効性が期待できるとかんがえる。

## 5.2 音楽の物理的振動構造の解析

音楽は、人類をとりまく空気振動を構成する要素として独特な人為的音源になっている。とくに情報通信環境が高度化するとともに、メディアをつうじて供給される情報の比率がたかまっている現在の都市環境においては、パーソナルな音環境をかたちづくる要素として、音楽は無視できない影響力をもち、さまざまな種類の音楽についてその物理構造の特徴を把握しておく必要があるとかんがえられる。

### 5.2.1 音楽の周波数分布について

#### (1) いろいろな音楽の周波数分布構造の比較

音楽や楽器について研究する場合、これまでは圧倒的に、西欧芸術音楽の領域に素材をもとめる傾向がつよく、それについて日本の楽器がとりあげられてきた。このような選択は、文化的なかたよりによって、重要な材料を対象外におくおそれがある。そこでわたくしたちは、人類全体を視野にいれ、できるだけ傾向のことなる材料をあつめて分析するように心がけた。

具体的にはピアノ音楽、ブルガリアの民族発声による女声合唱、同じくブルガリアのカバ・ガイダ (バグ・パイプの一種)、アジア地域からは、わが国独自の発展を遂げた能管、そして熱帯雨林性の自然の音環境との調和をたもちつつ、高度な文化的発展を遂げているインドネシア・バリ島のガムラン音楽をとりあげ、これらの音楽の周波数分布構造について比較を試みた。収録方法は、すべてわたくしたちが開発したポータブルの超広帯域録音システムによる現地収録である。分析は、周波数分布構造についてはFFT解析手法を、ゆらぎ構造についてはMEM解析手法をもちいた。

周波数分布構造の比較結果を図5.10にしめす。とくに金属打楽器アンサンブルであるガムラン音楽は、100kHzをこえる成分を豊富にふくんでいることがわかる。また、わが国の能管では

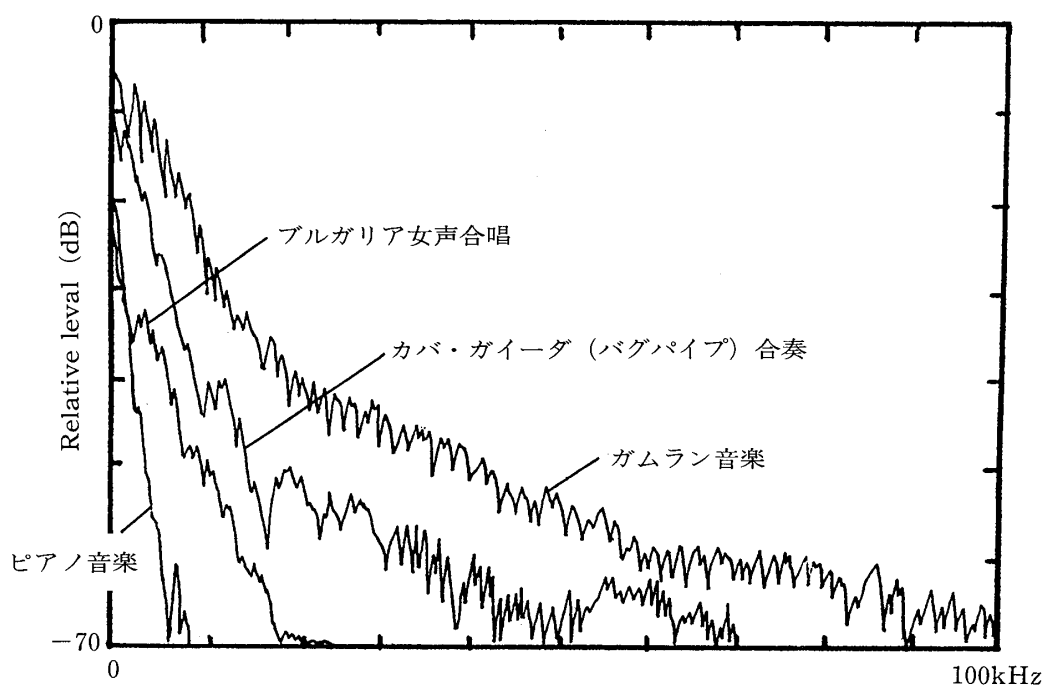


図5.10 ことなる文化圏に属する音楽の周波数分布構造の比較

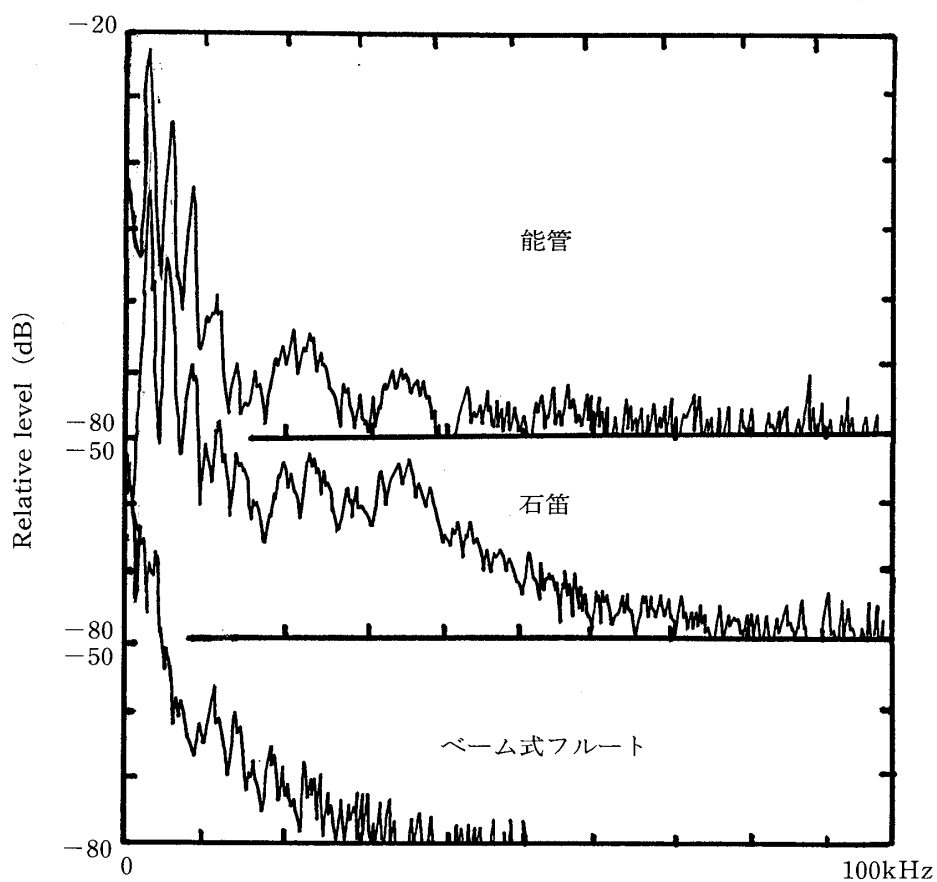


図5.11 ことなる文化圏に属する管楽器の周波数分布の比較

100kHz、ブルガリアのカバ・ガイーダでは70kHzに達するほどの豊富な高周波成分をふくんでいる。さらにおどろくべきことに、人の声だけで構成されるブルガリアの女声合唱が、平均されたFFTで20kHzをうわまわり、瞬間的には30kHzをこえる高周波を発生させていたことがわかった。そして、合唱などにくらべてはばひろい音域をもつ楽器として、しばしば1台のオーケストラとよばれることもあるピアノ音楽は、10kHzをこえる成分は、瞬間的にもあまり観察されることがなかった。

つぎに、“笛”というおなじ管楽器について、日本古代の石笛と能管、そして中世ヨーロッパのベーム式フルートの比較分析をおこなった。笛という人類に普遍的な楽器の発する音が、文化圏に対応して物理構造上の特徴をしめすかどうかを、ヨーロッパのオーケストラでつかうベーム式フルート、古代日本の神おろしの神事に使用されたと推定されている石笛、そして能管を材料にしてしらべた。図5.11にみられるように、石笛はきわめて豊富な高周波を、たかい周波数領域にわたって保存している。また能管は、低域成分に対する高周波の減衰がいちじるしい。そしてこの両者はともに、100kHzに達する高周波をもっている。それに対してベーム式フルートは、ずっと高周波の割合がひくい。

ガムラン音楽や能管では、かなり意図的・積極的に高周波成分を発生させるための楽器製造上、あるいは演奏上の工夫がみられる。客観的にその根拠がのべられたことはないが、結果論的・状況証拠的な解釈がゆるされるならば、これらの楽器をはぐくんできた文化圏においては、音楽、あるいは楽器の進化過程に影響をあたえてきた要素として、可聴域をこえている高周波成分の共存をよりこのましいものと感じる感性が存在しているのではないかとおもわれる。

たとえば、ガムラン・アンサンブルにもちいられる楽器は、かならず2台以上の対をなして構成されており、その対のおなじ鍵盤の音程は微妙にずらしてチューニングされている。そのために対の楽器でおなじ鍵盤を同時に打鍵したときにそれぞれの楽器から発生する空気振動が、空气中で複雑に変調しあい、1台の楽器では発生し得ない高周波成分を効率的に発生させるという工夫がこらされている。

また、わが国の能管は、竹を素材にした縦笛であるが、わざわざまるい竹を縦に割り、内側と外側を反対にして円筒形を再構成してつくられる場合がおおい。つまり、筒の内表面を、竹の外皮のかたい部分で構成することにより、より豊かつ容易に高周波を発生させることを可能にしている。

これらの楽器の発展は、その楽器や音楽が使用される状況で、もとめられる機能をより満足に果たすという方向にむかって、感性的な確かな判断によって歴史的に継続してすすめられてきたのかもしれない。ブルガリアのカバ・ガイーダや女声合唱にも同様な傾向をみとめることができる。

ピアノについては、その前身であるクラビコードやハープシコードなどの楽器がより広帯域の周波数分布をもっていたにもかかわらず、また楽器製造技術的にも、他の文化圏にくらべてより有利な条件をそなえているにもかかわらず、非常にせまい周波数分布をもつ方向に進化してきている点が注目される。

### 5.2.2 音楽のなかの時間的にミクロなゆらぎ構造について<sup>6)</sup>

西欧芸術音楽では、五線譜上の音符との対応がはっきりなりたつ音、つまり一定の高さ、強さ、音色という指標がいずれも一定時間変化せずにたもたれる定常的構造をもった音を“楽音”、それら指標のひとつ以上が変化する音を“非楽音（噪音）”として区別したうえで、楽音を音楽にとって本質的なものとしている。

しかし、情報学あるいは聴覚生理学的にみると、音楽を構成する音は、時間的に連続して変化するある種の非定常現象、すなわち“ミクロなゆらぎ構造”を原理的に要請されている可能性がきわめてたかい。音楽のもつこの側面は、楽音のように感覚のうえで明示的でなく、高さ、強さ、音色といった比較的単純明確な物理的指標に変換することもできない。それゆえ、高度に体系化された西欧芸術音楽の世界では、ミクロな非定常構造は、マクロな定常構造にくらべて圧倒的に軽視されてきた。というよりは、事実上無視されてきたというべきだろう。その結果、西欧音楽それ自体、あるいはその発想法の影響をつよくうけた世界では、音楽を他の音と区別する決定的な属性のひとつであろうミクロな非定常構造が、忘却されたにひとしい状況をみちびいている。

もしも音楽におけるミクロな音のゆらぎを物理構造として指標化するならば、こうしたかたよりを打破することが期待できるだろう。たとえば、音楽を構成する音粒子のひとつひとつにすぐれた内部構造をあたえることでおきな成果をあげながら、それにふさわしい評価が現在なおえられているとはいえないある種の民族音楽と、周期的・定常的現象を重視するあまりミクロな音構造の変化をほとんど考慮の対象外においてきた西欧芸術音楽とを、ゆらぎ構造のうえで精密に比較するといったきわめて興味ある検討が可能になる。

そこで最大エントロピー法 (MEM) をもちいて、日本伝統音楽、西欧芸術音楽、その他の音楽とのあいだのゆらぎ構造の比較をおこなってみることにした<sup>6-8)</sup>。実験条件の概要はつぎのとおりである。音源としてはすべてCDをもちい、まずサンプリング周波数51.2kHzでAD変換した時間軸データをつくり、時間長20msec (1024データ) ごとに最大周波数20kHzでMEMスペクトルをもとめた。こうしてえられたスペクトル群を時間軸にそってならべ、そのスペクトルの変化する状態を観察してゆらぎ構造を把握した。

この方法によってえられた結果のなかから、ここでは典型的な二、三の例についてのべる。

まず、管楽器についての例をしめす。西欧音楽としてブリテン『青少年のための管弦楽入門』の最初にあるピッコロソロの部分、日本音楽として尺八『三谷菅垣』の冒頭にちかい比較的音の安定した部分を選択し比較した (図5.12)。

楽譜でくらべると、前者はこまかい音符がびっしりならぶのに対して、後者はひとつの音符が何秒間もつづき、圧倒的に前者の方が変化に富んでみえる点で対照的である。

一方、スペクトルの変化の様子をみると、ピッコロソロではまず、音程の変化をしめす過程がはっきりと描写されている。そのアタック部分ではおおきくスペクトルがみだれているが、すぐに収束し、約40msec後には安定している。この音程変化部分をのぞくと、その前後の音の持続部分ではほとんどスペクトルの構造がかわらず、音構造が安定し、ゆらぎがきわめてすくないことがわかる。これにくらべて尺八では、おなじ基音がたもたれ音程は変化していないのに、基音以外の倍音構造は大規模な変動をみせている。とりわけ、10kHzをこえるたかい周波

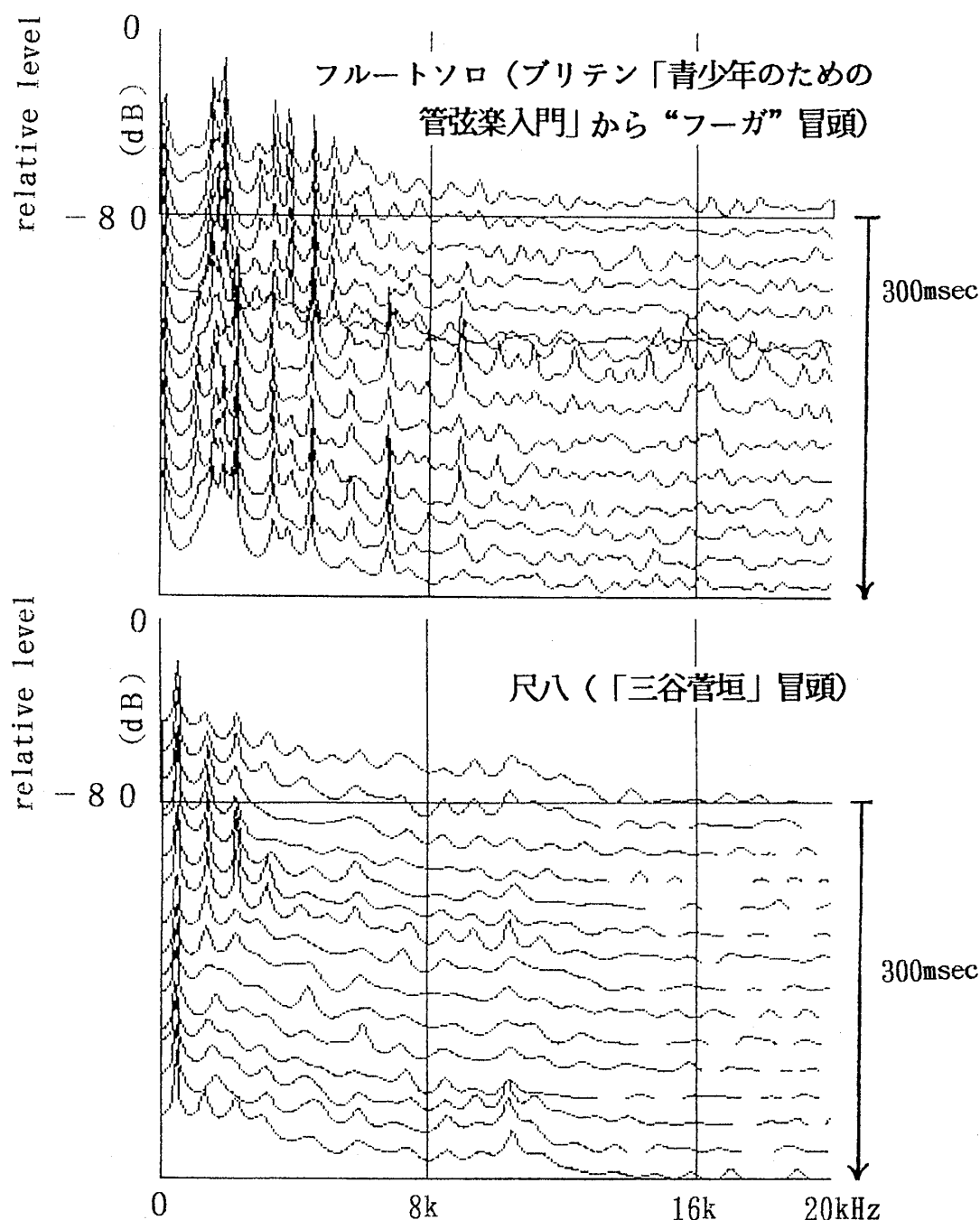


図5.12 管楽器における西欧音楽と日本音楽とのマイクロなゆらぎ構造の比較

数領域におよんでさまざまな山が複雑に変化するゆらぎ構造がはっきりととらえられており、きわめて興味ぶかい。ここにみられる変化のはやさは、設定した20msec 以内の時間幅以下のものもみられ、ピッコロソロの持続部分にくらべると次元をことにするはやくかつはげしい変化をしめしている。この分析結果からみると、ここでとりあげたふたつの素材に関するかぎり、尺八ではマイクロなゆらぎによって音構造の変化をつくり、ピッコロの曲ではこまかいパッセージによって音構造の変化をつくっているということが出来るかもしれない。

つぎに、声楽についておなじ手法で比較してみた。西欧音楽としてシェーンベルクのオペラ

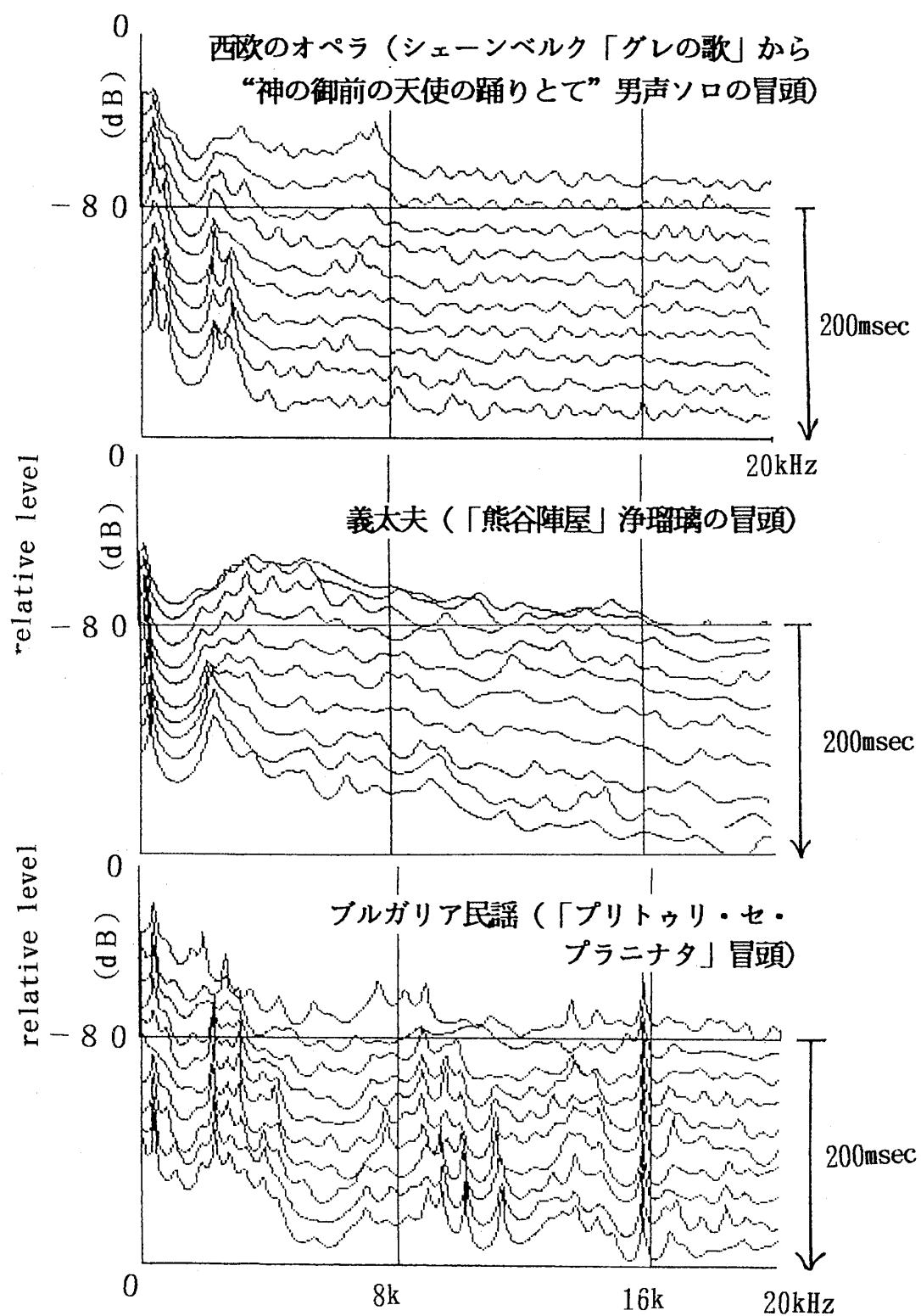


図5.13 声楽における西欧音楽、日本音楽、東欧音楽のミクロなゆらぎ構造の比較

『グレの歌』、日本音楽として義太夫『熊谷陣屋』、東欧音楽としてブルガリア民謡『プリトゥリ・セ・プラニナタ』を選択した。すべて伴奏のないソロの箇所をえらび、冒頭の声のアタックをふくんだ部分を分析した（図5.13）。

まず、フィッシャー・ディスカウによってベルカント唱法でうたわれた西欧の歌曲では、アタック部分に特徴的なややながい過渡的過程がみられる。この過程が約60msecほどで収束したあとは5kHz以下に周期性の成分が集中し、それ以上の周波数帯域では急激にパワーが落ちてホワイトノイズにちかい成分がひくいレベルで分布する。こうしたスペクトルがきわめて安定した状態で持続している状態は、まさに理想的な楽音的構造にちかいものといえる。スペクトルの構造は全体として、さきの実験でしらべたピッコロの音とよく似ている。

これにくらべ、日本の義太夫では、アタックの過渡的過程がきわめてながく拡張され、楽音型のスペクトルに移行するまでの過渡状態が約140msecにおよび、複雑ではげしい変化を大規模にくりひろげている。さまざまな倍音がたかい周波数帯域まで豊富にふくまれていることをしめすスペクトルがおおきな変化をたえまなくつづけている状態を、グラフは明瞭にとらえている。ここにえられたデータからみると、実験条件として設定した20msecという分割時間は粗にすぎ、変化の過程を連続的に描写するにいたっていない箇所がいくつかみとめられる。これらは、msec オーダーのすばやいやゆるぎ構造が存在することを推定させる。グラフ全体は、西欧の声楽よりは日本の尺八によりよく似たかたちをみせているところが注目される。

東欧文化圏の声楽を代表するブルガリア民族唱法でうたわれた民謡曲のスペクトルは、女声であることを反映して、周期成分のピークが男声による二例よりもシャープにかずおおくたち、周期性のたかい豊富な倍音成分の存在をしめす。また高周波帯域までスペクトルがゆるやかにのび、ノイズ成分のおおいなだらかな山もみられる。アタック部分の不安定なスペクトルから楽音型スペクトルへの移行は比較的はやい。しかし移行したあとおなじスペクトル構造で安定するのではなく、ミクロな変化を刻々つづけている。とくに、たかい周波数帯域において複雑な構造の変化が顕著にみられる。ただしその変化の速度は義太夫や尺八ほどはやくはなく、数十msecのスケールでよりゆっくりゆらいでいる。この点からみると、東欧ブルガリアの民族唱法は、ミクロなゆるぎ構造において西欧音楽と日本音楽との中間的な性格をもっているともいえる、興味ぶかい。

この方法でえがきだした前記のスペクトル時系列の変化全体を総括的に観察すると、笛と声という音源の種類のちがいがあるにもかかわらず、日本音楽である尺八と義太夫とはたがいによく似たパターンをしめしている。西欧音楽のピッコロとバリトンとはよく似た、日本音楽とはことなるもうひとつのパターンをみせている。そして日本音楽はミクロなゆるぎがよりゆたかであり、西欧音楽は定常的な性格がよりつよい。ここでは割愛した他のさまざまな素材についての分析結果もふくめて、西欧音楽が定常的性格がつよくミクロなゆるぎがとぼしいのに対して、日本の音楽がずっとはやくはげしいミクロなゆるぎ構造をもっているという傾向は、ほぼうごかしがたいところではないかとおもわれる。つまりミクロなゆるぎ構造というあたらしいきりくちで音楽を分析すると、楽器のちがいよりも文化のちがいといったソフトウェアの差が、より強調されて表現されるという非常に興味ぶかい傾向がみられる。

ここでおこなった人為的に造成される音環境としての音楽についての検討は、たとえば本来

の自然性のたかい音環境との物理構造上の差がいちじるしい都市の音環境をメディアテクノロジーによって改善するといったところみをおこなう際に、どのような物理的性質をもった音をどのように使用していくのが適切かについて貴重な示唆をあたえることになるものとかんがえる。

#### 〈文 献〉

- 1) 大橋 力：快適な音環境の情報学、放送教育開発センター研究紀要第7号、pp.53-101、1992.
- 2) 大橋 力：放送教材の改善のための音響効果に関する研究開発(2)、放送教育開発センター研究報告44、1992.
- 3) 大橋 力：音環境、『都市と環境－現状と対策』中村英夫編、ぎょうせい、pp.159-168、1992.
- 4) 仁科、大橋、河合、不破本：超広帯域環境音収録・分析システムによる音環境の周波数分布の検討、1992年日本建築学会学術講演梗概集、PP.425-426、1992.
- 5) 大橋、森本、仁科、不破本、河合：周波数分布とゆらぎ構造とからみたアメニティ・サウンド、第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集、PP.545-552、1993.
- 6) 大橋 力：日本音楽の音とゆらぎ、小島美子・藤井知昭編『日本の音の文化』、第一書房、pp.27-60、1994.
- 7) 大橋 力：生理学から感性情報処理へ、科学研究費補助金重点領域研究「感性情報処理の情報学的・心理学的研究」公開シンポジウム予稿集、pp.21-40、1993.
- 8) 大橋 力：視聴覚メディアがつくる感性情報の物理構造分析とその表現効果の評価、文部省科学研究費補助金重点領域研究平成5年度成果報告書「感性情報処理の情報学・心理学的研究」、pp.99-102、1994.



## 第6章 可聴域上限をこえる高周波の生理的影響

### 6.1 目 的

第5章では、人類をとりまくさまざまな音楽や環境のもつ空気振動の物理構造について検討した。その結果、快感誘起性のたかい音楽や快適な自然の音環境と人工性のたかい不快な音環境との間で無視できない物理構造のちがいが見いだされた。とりわけ、こころよい音楽や音環境には可聴域をこえる高周波空気振動が豊富に存在していることがわかった。人間には音としてきこえないこの空気振動成分の顕著な存在が、人間の脳に対してなんら影響をもたないのかどうかについては、これまでかならずしも本格的な検討がおこなわれてきたとはいえない。

そこでわたくしたちは、「快適性のたかい自然環境音中の高周波成分が、人間のすこやかな生存に対してなんらかのポジティブな要因として機能する可能性がある」という仮説をたて、その検証をこころみることにした。そのために、高周波成分が豊富にふくまれている楽器音を素材として、高周波成分の有無が脳の活性に影響をおよぼすかどうか、およぼすとすればそれはどのような影響であるかについて、わたくしたちがオリジナルに開発した生体情報計測・分析手法をもちいて検討した。

### 6.2 方 法

#### 6.2.1 音 素 材

実験用の音素材として、インドネシア・バリ島の青銅製打楽器をおもな要素にしたアンサンブル、ガムラン音楽をえらんだ。その理由は、さきにのべたように、ガムラン音楽には20kHz以上の高周波成分が豊富にふくまれていることによる<sup>1,2)</sup>。わたくしたちは、バリ島で鑄造されたガムラン・フルセットを日本にはこび、テープレコーダー等の記録系を使用せず、計測用マイクロフォンを直接FFTアナライザーに接続して計測をおこなった。その結果、バリ島のガムラン音が100kHzをこえる超高周波成分を豊富にふくんでいることをみいだした。図6.1に、テュッティ(a)および高音部楽器11台(b)でガムランの“G”の音高をもつ鍵盤を連続して打鍵した20秒間のデータの時間平均をしめす。

テュッティでは高周波成分は計測限界100kHzをこえている。また、図6.1は、こうしたガム

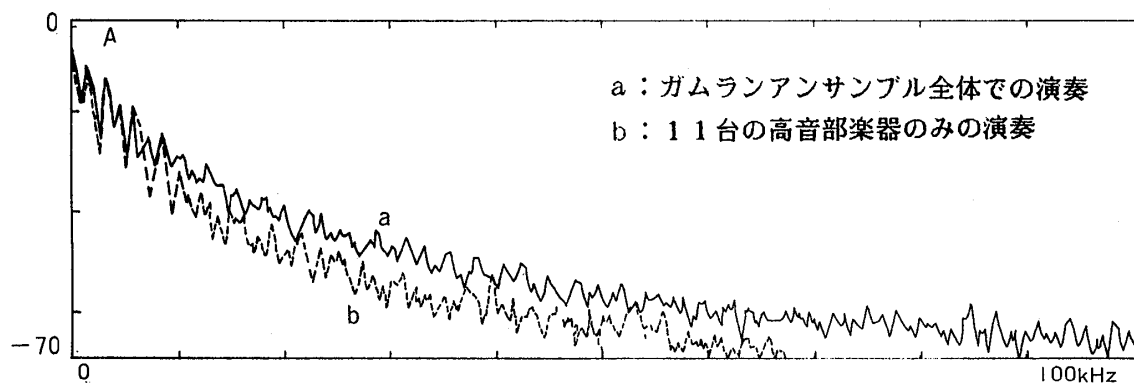


図6.1 FFT アナライザで記録したガムラン音のパワースペクトル

ランの高周波成分が、数おおくの楽器が同時に打鍵されることにもとづく相互作用によって発生または増大している可能性を示唆している。

生理的影響をしらべる実験の音素材をえるために、わたくしたちはバリ島におもむき、ウブド村タガス・カンギナンに所在する国際的に著名なアンサンブル“グヌン・ジャティ”に演奏を依頼し、205秒の楽曲“ガンバン・クタ”を現地の野外劇場で録音した。録音には、第2章でのべた超広帯域録音システムを使用した。

この録音の周波数パワースペクトルを図6.2にしめす。これは呈示用の音源にするためにテープレコーダに録音したガムラン音のフォルテの部分75秒間をとりだし、その部分についてFFTでもとめた時間平均パワースペクトルである。図のように80kHzにおよぶ高周波成分をふくんでいることがわかる。

図6.3は、図6.2とおなじ音素材の1曲全体すなわち205秒間の時間平均パワースペクトルである。全曲の平均値として30kHzを十分にうわまわる高周波成分をもっていることがわかる。このように単に特定の箇所に限らず、曲全体としてみてもいちじるしくたかい周波数領域にまで豊富なパワーが分布していることが確認できた。これは、可聴域をこえる高周波成分の人間への影響を検討する場合の呈示用音源として十分資格があるものといえる。そこでこの音試料を

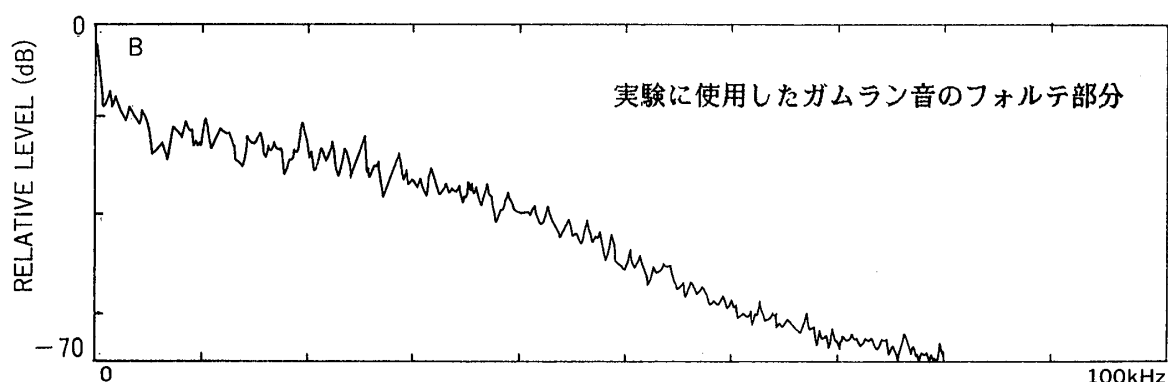


図6.2 実験に使用したガムラン音のフォルテ部分のパワースペクトル

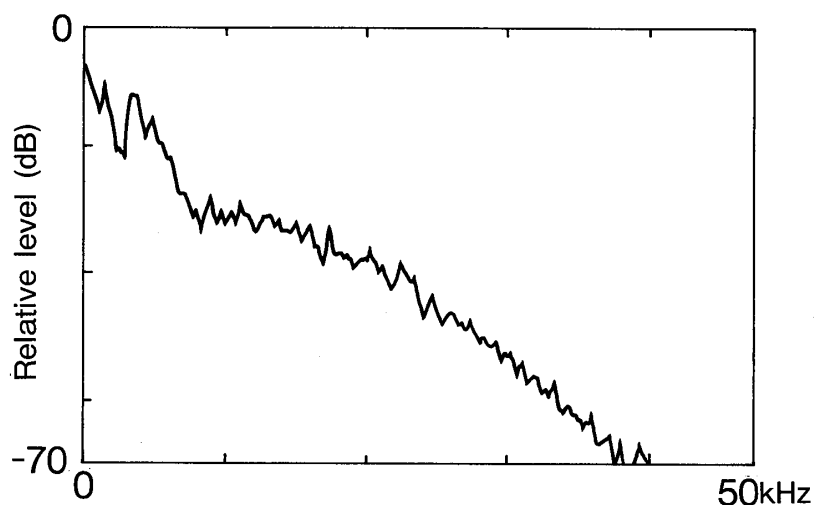


図6.3 実験に使用したガムラン楽曲全曲のパワースペクトル

使用することとした。

## 6.2.2 音呈示資料の調整

現地で収録した205秒間の音試料（楽曲“ガンバン・クタ”）をまったくおなじ条件でくりかえし4回ダビングした。ついで、1回分ずつを10秒間のタイミングテープでつないで、音呈示用試料を作成した。この試料をつかって、高周波共存音（FRS=full range sound）と高周波除去音（HCS=high cut sound）とを比較する実験、および、ガムラン音の高周波成分のみ（HFC=high frequency component）の影響をしらべる実験をおこなった。また、ホワイトノイズをバイチャンネル再生系のハイパスフィルターを通過させたのち、イコライジング処理し、ガムラン音の高周波成分の全呈示時間3分25秒間の時間平均パワースペクトルに近似の周波数パワー分布をもたせた高周波成分をつくり、呈示音としてつかった。実験につかったガムラン音の高周波成分およびホワイトノイズ起源の高周波成分のパワースペクトルを、図6.4にしめす。また被験者の聴取位置で計測したFRSおよびHCSのパワースペクトルを図6.5にしめす。

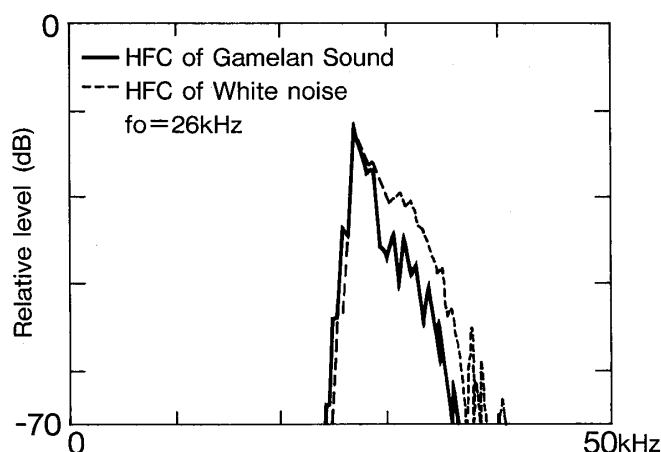


図6.4 ガムラン音の高周波成分およびホワイトノイズ起源の高周波成分のパワースペクトル

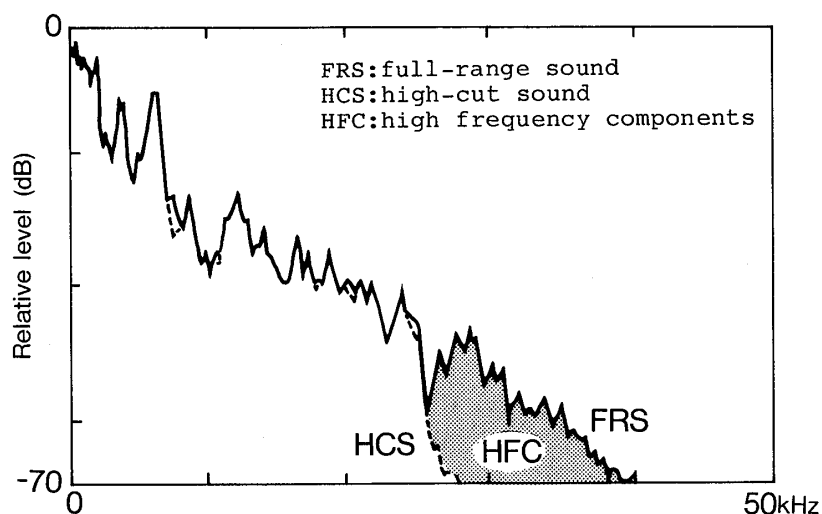


図6.5 被験者の聴取位置で計測したFRSおよびHCSのパワースペクトル

### 6.2.3 音呈示装置

第3章にのべたように、従来の音呈示系の原理的問題点を回避したバイチャンネル再生系をもちいた。

### 6.2.4 被験者

健常な男性10名、女性6名、計16名（年齢20～34才）の大学生または大学卒の会社員を被験者とした。

### 6.2.5 実験手順

専用実験室において、バイチャンネル再生系をもちいて、ガムラン音による205秒の音試料をくりかえし再生・呈示した。この時、被験者に告知せずに高域側チャンネルを ON/OFF して、FRS が HCS かを選択した。

まず、FRS と HCS とを交互に1回ずつ予備的に呈示した。この手続きによって被験者の呈示音に対する反応が大幅に安定化するからである。つづいて2分間のインターバルをおき、FRS → HCS → FRS → HCS というように、FRS と HCS とを交互に切りかえながらそれぞれを2回ずつ合計4回呈示した。各呈示音間の時間間隔は10秒とした。なお半数の被験者では FRS を先に、のこりの半数の被験者では HCS を先に呈示した。この間、被験者は閉眼状態下におかれた。

再生音圧レベルは被験者の要求にしたがって設定した。その最大値は、おおむね80dB～91dB (SPL) だった。

### 6.2.6 脳波の導出および分析方法

第3章でのべた生体情報計・分析システムをもちいた。脳波の導出部位は国際10—20電極法に準じた12箇所（2名同時計測の場合は11箇所）とした。被験者の心理的負荷を低レベルに抑制するため、脳波テレメトリアル・システム日本光電 WEE-6124（改）をもちい、被験者の行動を拘束せず、かつ非侵襲下でデータをとった。音呈示の前後をふくめ約30分間連続して脳波を導出し、データレコーダーに磁気記録した。データレコーダーの出力端子からデータを EEG マッピングシステム日本光電 MCE-5200に入力して、そのFFT分析結果および帯域別の BEAM をリアルタイムでディスプレイ上に表示し、実験中の被験者の状態を把握するためのモニターとして使用した。

データ解析は、第4章にのべた方法にもとづいて BEAM による画像解析、および帯域別脳波総パワー相対値比較法によっておこなった。指標としては、平安・快適な状態の指標といわれる脳波  $\alpha$  波帯域パワーに主として着目して分析および検討をおこなった。

## 6.3 結 果

### 6.3.1 高周波成分が脳波 $\alpha$ 波帯域におよぼす影響の時間的特性

まず高周波成分が脳波  $\alpha$  波帯域の活性におよぼす影響について、その時間的変化をしらべた。

典型的な3名の被験者について、FRS 呈示中とそれにつづく HCS 呈示中の  $\alpha$  波活性の変化を20秒区間ごとに加算平均して画像化した BEAM を、図6.6にしめす。

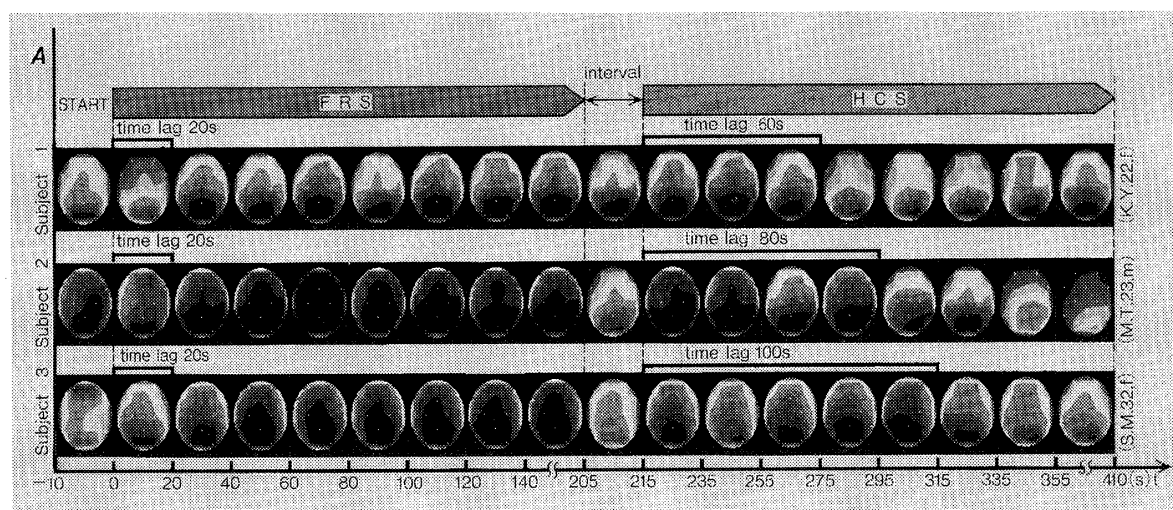


図6.6 高周波成分の存在・除外による  $\alpha$  波パワー (20秒毎) の時間的変化をしめす BEAMs

3名の被験者とも、FRS が呈示されると  $\alpha$  波の活性がたかまり、HCS が呈示されるとその活性が低下した。3名ともすべて、その影響があらわれるのに時間遅れあるいは  $\alpha$  波抑制現象がみいだされ、FRS が呈示されはじめてから  $\alpha$  波が十分活性化されるまでに約20秒がつかやされていることがわかった。また HCS が呈示されはじめてから  $\alpha$  波の活性がひくいレベルに安定するまでに、被験者1では約60秒、被験者2では約80秒、被験者3では、約100秒がつかやされている。FRS と HCS との呈示順をかえた被験者4でも同様の傾向がみとめられた。

以上の検討により、高周波の存在による  $\alpha$  波の活性化現象は、たちあがりにもその消滅にも、無視できない過渡的な時間の経過を要するものであることがみいだされた。

### 6.3.2 高周波成分が脳波 $\alpha$ 波帯域におよぼす“スイッチング効果”

ここで観察された高周波による  $\alpha$  波パワーの増大・減少にかかわる時間的な遅延を考慮して、より以前に呈示された音に対する反応、あるいはその影響の残留効果をさけるため、音呈示開始から60秒間の脳波データはFFT分析の対象から除外することにした。そして音呈示開始60秒後から120秒間の時間平均パワースペクトルをもとめた。このような計算法によってえられた FRS と HCS とを交互にきりかえながら4回呈示したときの  $\alpha$  波パワーの時間的変化を表現した BEAM を、図6.7にしめす。呈示された音の中に超高周波成分があるかないかに対応して、 $\alpha$  波の活性が増減をくりかえしていることがわかる。

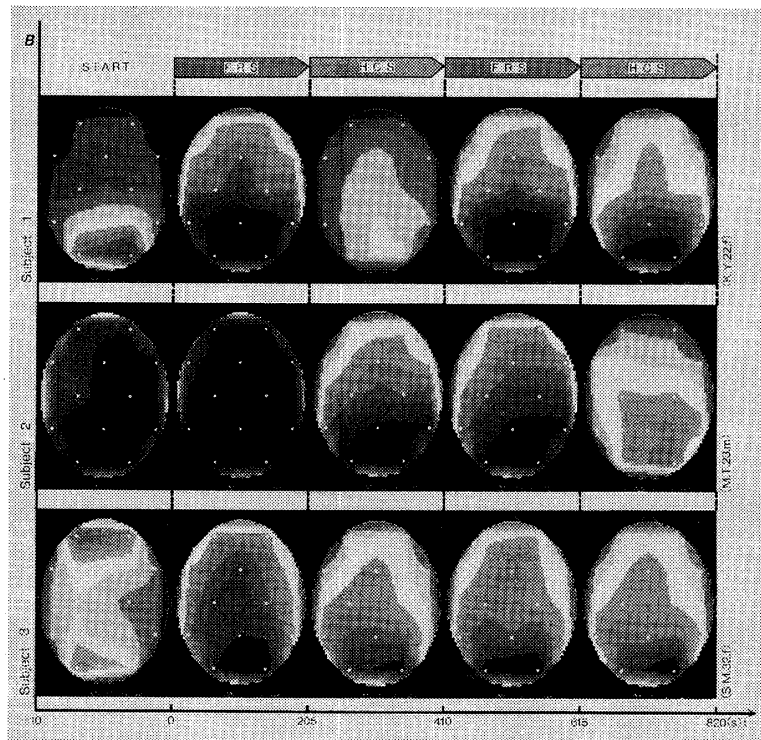


図6.7 高周波成分の有無による  $\alpha$  波パワーの時間的变化をしめす BEAMs

### 6.3.3 ガムラン音を呈示したときの高周波成分の存在による脳波 $\alpha$ 波パワーの増大

観察された高周波による  $\alpha$  波パワー増大反応が時間的な遅延をもつこと考慮して、音呈示開始60秒後から120秒間の時間平均パワースペクトルを16名の被験者全員についてもとめた。

つぎに、帯域別脳波総パワー相対値比較法をもちいて、高周波成分の  $\alpha$  波パワーにおよぼす影響を定量化した結果を、表6.1にしめす。FRSを呈示すると、16名中12名の被験者で、HCSが呈示された時に比べて  $\alpha$  波活性が増大した。被験者によっては120%をうわまわる増大をしめすものもあったが、その減少は、最大の被験者でも4%以下だった。

脳波、とくに  $\alpha$  波の活性は時間的変動がかなりおおきいものなので、従来の方々に比べて安定性が大幅に向上しているこの実験法においても、5%程度の活性の増減は、誤差範囲とかがえる方が危険がすくない。したがって、この実験条件下においては、高周波成分の存在は、過半数の被験者の  $\alpha$  波を活性化し、一部の被験者にはそのような影響をしめさなかったといえることができる。

また、この結果についてt検定をおこなったところ、危険率1%、つまり、99%の信頼性で、 $\alpha$  波の活性化が有意に生じていることがうらづけられた（表6.1）。全体的傾向としては、高周波の共存によって  $\alpha$  波が活性化される傾向は否定できないといえよう。

### 6.3.4 ガムラン音の高周波成分のみの呈示実験

帯域別脳波総パワー相対値比較法をもちいて、ガムラン音の26kHz以上の高周波成分（HFC）のみの呈示が  $\alpha$  波パワーにおよぼす影響を定量化した結果を、表6.2にしめす。16名の被験者群のなかで、HFCのみの呈示によって  $\alpha$  波が増大する者は7名存在し、そのなかでも

表6.1 ガムラン音に高周波成分が存在することによる脳波  $\alpha$  波帯域の活性化

音 素 材	ガ ム ラ ン 音 F R S / H C S
被 験 者	変 化 率 ( % )
1	1 3 4 . 9
2	1 2 2 . 1
3	9 8 . 5
4	5 5 . 7
5	4 0 . 6
6	3 5 . 4
7	1 7 . 7
8	1 3 . 2
9	1 2 . 3
1 0	1 0 . 9
1 1	1 0 . 2
1 2	8 . 3
1 3	- 0 . 8
1 4	- 2 . 5
1 5	- 3 . 1
1 6	- 3 . 3
平均	3 4 . 4
t 値	2 . 8 3
危険率 %	1 . 0

F R S : Full Range Sound (可聴音+高周波音)

H C S : High Cut Sound (可聴音のみ)

5 %以上の明瞭な増大がみとめられた被験者は、6名だった。増大の最大値は約69%、減少の最大値は約-90%だった。また、可聴域をとまなう実験で高周波の存在によって  $\alpha$  波帯域が活性化した被験者が、HFCによってかならずしも  $\alpha$  波活性をしめすともかぎらなかった。全体と

表6.2 ガムラン音の高周波成分のみの呈示による脳波  $\alpha$  波帯域の活性化

音 素 材	ガ ム ラ ン 音 H F C / 無 音
被 験 者	変 化 率 ( % )
1	6 8 . 5
2	6 2 . 9
3	- 1 4 . 2
4	- 1 . 9
5	- 2 2 . 2
6	- 1 . 4
7	5 . 7
8	- 2 . 9
9	- 8 9 . 3
1 0	- 2 9 . 5
1 1	3 . 1
1 2	7 6 . 8
1 3	- 4 . 1
1 4	1 0 . 0
1 5	- 1 . 6
1 6	1 1 . 0
平均	4 . 4
t 値	- 0 . 1 7
危険率 %	n . s .

H F C : High Frequency Components (高周波音のみ)

n . s . : No Significance (統計的な有意差がみられない)

して、可聴音が共存した実験にくらべ、高周波成分の影響は判然としない。

t 検定をおこなった結果、高周波成分のみの呈示による  $\alpha$  波活性の変化には有意差はみいだせなかった。

#### 6.3.5 ホワイトノイズから抽出した高周波成分の呈示実験

帯域別脳波総パワー相対値比較法をもちいて、ホワイトノイズから抽出した26kHz 以上の高周波成分の呈示が  $\alpha$  波パワーにおよぼす影響を定量化した結果を、表6.3にしめす。

表6.3 ホワイトノイズから抽出した高周波成分の呈示による脳波  $\alpha$  波帯域の活性化

音 素 材	ホ ワ イ ト ノ イ ズ H F C / 無 音
被 験 者	変 化 率 ( % )
1	3 4 . 2
2	5 . 0
3	- 6 1 . 6
4	- 6 . 9
5	- 2 4 . 6
6	- 1 9 . 5
7	1 . 9
8	4 . 9
9	- 9 6 . 6
1 0	- 2 3 . 0
1 1	- 0 . 6
1 2	5 5 . 9
1 3	- 2 4 . 1
1 4	- 1 4 . 1
1 5	0 . 3
1 6	- 3 . 6
平均	- 1 0 . 8
t 値	- 0 . 6 8
危険率 %	n . s .

H F C : High Frequency Components (高周波音のみ)

n . s . : No Significance (統計的な有意差がみられない)

16名の被験者群のなかで、HFC だけの呈示によって  $\alpha$  波が増大する者は6名存在した。そのなかでも5%以上の明瞭な増大がみとめられる被験者は2名にすぎなかった。増大の最大値は約55%、減少の最大値は約-97%だった。ガムランの HFC に対する反応と、このホワイトノイズの HFC に対する反応には、被験者ごとに若干の類似性があるといえるかもしれない。しかし、全体としては、可聴域が共存した実験やガムランの HFC をもちいた実験にくらべると、高周波成分の効果はほとんどみいだされなかったといえる。t 検定をおこなった結果、高周波成分の有無による  $\alpha$  波活性の変化には有意差はみいだせなかった。

#### 6.4 考 察

これまでの主観的音質評価法にかえて、BEAM を利用した生理学的指標による検討をおこなった結果、もともと可聴域をこえる高周波成分を豊富にふくむガムラン音 (FRS) を呈示し



たとき、そうした高周波成分を除外した音 (HCS) を呈示したときにくらべて、脳波  $\alpha$  波のパワーが顕著にたかまるというこれまでまったく知られていない現象が、統計的有意性の裏付けのもとにみいだされた。このような現象を発見することは、従来の内観的実験方法では原理的にも実際的にも不可能である。この点において本研究の戦略は適切なものであったことがしめされたといつてよかろう。さらにこの際、被験者により差はあるが、FRS の呈示をはじめてから  $\alpha$  波が十分に活性化されるまでに、おおむね20秒がついやされ、また、この  $\alpha$  波の活性がひくいレベルに達するまでに、HCS の呈示をはじめてから60秒から100秒間という時間がついやされる傾向があることがわかった。さらに、FRS と HCS とをきりかえながら連鎖的に呈示すると、それに忠実に反応して  $\alpha$  波のパワーも増減をくりかえす状態が観察された。これら音呈示と脳電位の変化とのあいだにみられる時間差についての知見は、可聴域をこえる高周波成分の人体影響メカニズムを解明する場合、価値ある基礎情報になることが期待される。

なお、実験対象となった16名の被験者群のなかで、FRS 呈示の時に、HCS の場合にくらべて  $\alpha$  波のパワーが増大したもの12名に対して、それが減少したものが4名みられた、ただしその減少は最大でも約5%以下の微減だった。つまり、可聴域をこえる高周波成分の共存は、過半数の被験者に対して  $\alpha$  波の活性化をもたらしている。

ところが、ガムラン音にふくまれる高周波成分、およびホワイトノイズから抽出した高周波成分のみを呈示した場合、可聴音をともなった実験とくらべて、 $\alpha$  波のパワー増大は有意にはみとめられなかった。つまり高周波成分による  $\alpha$  波パワー増大という効果は、自然の高周波成分が可聴音と共存するときにかぎって、明瞭にみとめられたといえる。

さきにのべたように、こうした  $\alpha$  波の活性化は、健常者の場合、平安・快適な生理・心理状態の指標となる<sup>3)</sup>。あるいは、禅の瞑想のように、意識の変容とともに一種の快感を知覚する特異な状態下でも観察される<sup>4)</sup>。以上の結果から、高周波成分は、人間の脳の活性に影響をおよぼし、それは快適性の向上に機能するという推論がなりたつ。

#### <文 献>

- 1) Oohashi, T., Kawai, N., Nishina, E.: "Trance generation model" for high frequency sounds. 1st Intern. Conference of Music Perception and Cognition, pp.291-294, 1989.
- 2) 大橋力、仁科エミ、河合徳枝、松尾梨江子：ガムラン音の高周波成分による脳波パワースペクトルの変化、日本音響学会講演論文集、pp.365-366、1990.
- 3) 三宅晋司、田中豪一、斉藤和雄：不快音の脳波に及ぼす影響、日本衛生学会誌、**39**(2)、pp.523-534、1984.
- 4) 平井富雄：坐禅の脳波的研究——集中性緊張開放による脳波変化——、精神誌、**61**、pp.76-105、1960.

## 第7章 可聴域上限をこえる高周波成分が脳にあたえる影響の残留について (サーストンの理論にもとづく一対比較法の限界についての検討)

### 7.1 目 的

この研究で開発した脳波を指標とする生体情報計測・分析手法によってえられた結果からみるかぎり、可聴域上限をこえる高周波成分の存在が、人間の脳の活性になんらかのポジティブな影響をおよぼすことは否定できない。ところが、従来の心理学的アプローチによる音質評価法では、こうした高周波成分の影響は検出されていない。反対に、人間に音としてきこえる空気振動の周波数帯域の上限が20kHz以下であるがゆえに、それ以上の周波数は人間の音響知覚に影響をおよぼさないとする通念がすでに一般的なものとなっている。それを支持するような音響心理学領域の研究結果がしめされていることはさきにのべたとおりである。

一方、現実社会のなかには、このような通説と調和しない状況がみられる。たとえば、音に対する感覚をビジネスの手段にしているため音質評価にきわだって敏感なはずの録音エンジニアたちのなかには、人間の可聴帯域上限20kHz説を肯定しないものがすくなくない。また、サンプリング周波数が44.1kHzであるため22.05kHzまでしか記録できないコンパクト・ディスク(CD)にくらべて、より高域まで記録可能なアナログ・ブラック・ディスク(LP)の方が音質がよいという主張が、オーディオ・マニアのあいだにいまもねづよく存在している<sup>1)</sup>。こうした傾向を反映して、先端的な録音スタジオで使用されているデジタル・オーディオ装置には、最近、サンプリング周波数が可聴域をカバーするために必要な40kHzよりも2倍以上高速なものがふえている。たとえば、もっともすぐれたシンセサイザーといわれた Synclavier 9600、6400 (New England Digital Co.) や Fairlight CMI-3 (Electronics Sound and Picture Co.) はともにサンプリング周波数が100kHzである。また、1990年に発表され、その音質がこれまでになく上質であると評価されているスタジオ用デジタル・マスター・レコーダー三菱 X-86HS のサンプリング周波数は96kHzである。しかし、こうした可聴域をこえる高周波成分への嗜好性をもつエンジニアをふくむ被験者群を対象にして、現在、もっとも信頼性のたかい音質評価法としてつかわれている、CCIR (Comité Consultatif International des Radio Communications) の勧告による“一対比較法”をもちいてしらべると、15~16kHz以上の高周波の有無を音質差として識別することができないという結果がえられている<sup>2)</sup>。

そこで、このような混乱した状況が生じている原因、そして従来の定説とこの研究でえられた結果とが一致しない原因について検討をこころみた。まず、可聴域上限に関する先行研究を概観し、その実験手法や実験条件などの特徴を検討した。ついで、人間の可聴域上限に関する諸研究においてもっとも一般的かつ決定的な手法として使用されている一対比較法について、それ自体の限界や欠陥の吟味をとまなう実験モデルを構築し、生体情報計測実験で使用した素材と実験系とをもちいて検討をおこなった。

### 7.2 可聴域上限に関する先行研究の検討

人間の音響知覚に影響をおよぼすオーディオ周波数の上限が20kHz以下であるとする説は、

1920年代にアメリカ・ベル研究所を中心としておこなわれた研究によってふるく確立した定説である<sup>3,4)</sup>。その後、この説は、おもにデジタル・オーディオにおける標本化周波数の決定に関連して、1980年前後に日本や西ドイツでおこなわれた再検討によってうらづけられた。人間の感受性の上限になっている音の周波数をしらべた研究報告のいくつかのものについて、その実験手法をしらべてみると、それらのほとんどすべては、サーストンの提案した心理実験法をもとに CCIR が策定した“一対比較法”ないしその改変法を共通して使用していることがわかった。たとえば、この種の研究のもっとも代表的な例のひとつである Plenge らの研究<sup>5,6)</sup>は、スパイク状インパルス音を音源にして、CCIR 方式をモデファイした一対比較法による実験をおこない、可聴域上限が15kHz 以下であると結論している。

Plenge らの研究とならんで代表的な例といえる村岡らの研究は、176人という多数の被験者をつかい、年齢別の成績などをふくめた詳細にわたる検討を、CCIR 方式の一対比較法をモデファイしたいわゆる A・B-X テストによっておこない、これも16kHz 上限説を支持する結果をえている<sup>2)</sup>。

これらにさきだっておこなわれた田辺らの研究<sup>7)</sup>、あるいはその後おこなわれた東らの研究<sup>8)</sup>も CCIR 方式の一対比較法に準拠するものである。そして、これらの研究はすべて、感受可能周波数上限として15~20kHz を主張し、伝送帯域上限として20~22kHz を十分なものとしている。これらの主張は、以後のデジタル・オーディオにおける標本化周波数の決定の基礎になった。

以上のように、おもにデジタル・オーディオの標本化周波数決定に関連して1980年前後におこなわれた人間の感受可能周波数上限に関する研究は、そのすべてが、決定的手法として CCIR の勧告に準拠するサーストン方式の一対比較法にのみ依存しているという特徴が共通してみいだされた。一対比較法とは、ふたつの刺激を被験者に呈示し、2 刺激の大小関係に関する判断にもとづいて尺度値をもとめる方法である。被験者に自覚できる反応だけが検出される典型的な心理学的実験法であり、このサーストンの方式の場合、SD 法のように評価尺度に言語を使用することがないため、言語のもつ多義性や被験者の解釈の介在を排除することができ、さまざまな心理尺度構成法のなかでももっとも厳密で信頼性のたかい手法とみなされている。しかしながら、この方法でみちびかれた結論は、わたくしたちの生理学的実験の結果や、オーディオ・エンジニアたちの経験的認識とは調和しない。そこでわたくしたちは、CCIR 方式の一対比較法にはたして限界がないかどうか、あるならばそれを顕在化させることができないかを考慮した実験モデルをくみ、この方法の信頼性について吟味してみた。

### 7.3 CCIR の勧告する一対比較法による高周波成分の有無による音質差の検知実験

#### 7.3.1 方 法

CCIR の勧告する主観的音質評価法はつぎのようなものである<sup>9)</sup>。おなじながさ(10秒~20秒、あるいはそれ以下のながさ)の2種類の音試料A, Bを用意し、その一方または両方をくみあわせて一対とし、ブラインドホール下でこの対を連続的に被験者にきかせ、対をなすふたつの試料がおなじ音質のものとしてきこえたか、たがいにちがってきこえたかをこたえさせる。試料対はふつう、A-A、A-B、B-A、B-B のくみあわせのもの各5対ずつ計20対が時系列

上にランダムに配置されて呈示される。こうしてえられた回答を統計的手法で検定して、正解が有意水準に達していた場合、A と B とのあいだに音質差のあることが知覚されたと判定するのである。さらに、この勧告のなかでは、聴覚記憶時間のながさがきわめて不確定であるため、かならず即時比較法がつかわれるべきであると強調されている。そのため、一対の音試料間の呈示間隔は1秒程度とされている。また、被験者の疲労を考慮して長時間連続して実験をつづけることをさけ、実験のなかごろで休憩をとることが推奨されている。この方法は、音響工学領域で音質差を識別するための唯一の国際的公定法として採用されており、20Hz～20kHz という現行のオーディオ伝送周波数帯域も、他の方法による確認をおこなうことなく、この方法による実験結果だけにもとづいて決定されている。

そこで、それらの実験条件を踏襲しつつ、この方法のもつ限界を顕在化させることを意図した実験を設計した。ここでわたくしたちが注目したのは、わたくしたち自身が発見し、可聴域をこえる高周波成分をふくむガムラン音による  $\alpha$  波パワー増大に際しての、 $\alpha$  波パワーの独特な過渡応答特性である。すなわち、高周波成分の共存によっていったん増大した  $\alpha$  波パワーはひきつづいて高周波をカットした音が呈示されても、60～100秒間という無視できない長期間にわたってそのパワーを保持する。そこでもしこの  $\alpha$  波パワーが脳内の音質知覚に関与するなんらかの神経回路の活性を反映していると仮定するならば、そうした活性上昇の遅延状態下では、高周波成分を除去したハイカットサウンド（HCS）が高周波成分を保有したフルレンジサウンド（FRS）と同等に知覚される可能性がでてくる。したがって、より頻繁に FRS に接する実験条件下では FRS と FCS との弁別がよりあいまいになるかもしれない。反対に、より頻繁に HCS に接する実験条件下では、FRS と HCS との弁別は、よりあいまいさのすくないものになりうるかもしれない。そこでこの両者の対比可能ならしめるような実験手順を構成した。

音試料は、BEAM 実験でつかったガムラン音楽をえらんだ。そのなかの12秒のフレーズをとりだし、呈示間隔を3秒とする試料対をつくった。ただし、音試料の呈示順序は、5～10分間の休憩をあいだにはさんだ一方の実験（部分実験[X] これが実験の前半になるか後半になるかは被験者によりことなる）においては HCS—HCS および HCS—FRS の対を各5対ずつ計10対、もう一方の実験（部分実験[Y]）においては FRS—FRS および FRS—HCS の対を各5対ずつ計10対、それぞれランダムにくみわせて呈示した。

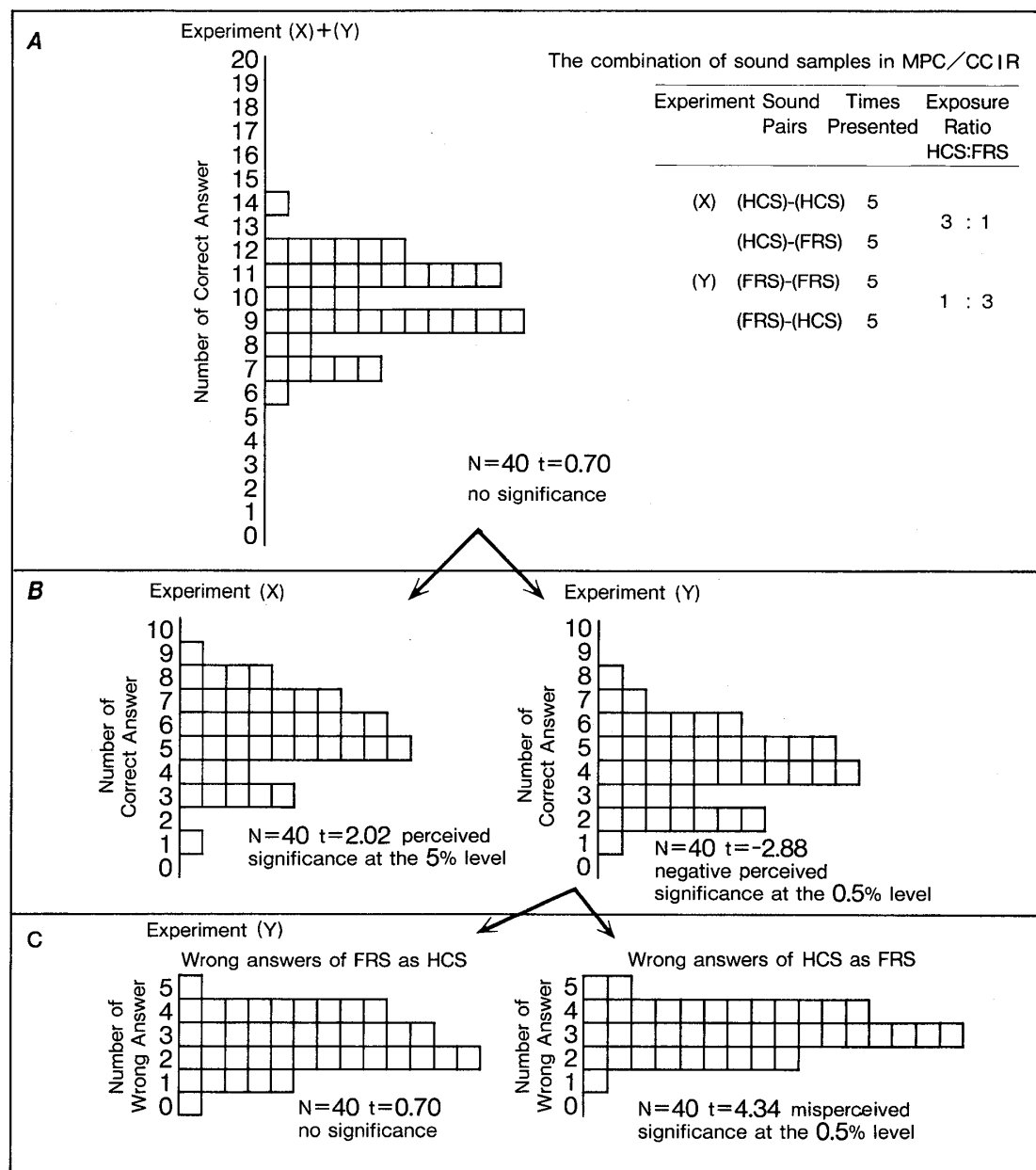
実験[X]では FRS と HCS との出現比率は1：3で HCS が多く、実験[Y]では反対に3：1で FRS がおおく呈示される。実験[X]と[Y]とをあわせると、FRS と HCS との出現比率は1：1である。CCIR の勧告する方法を採用した場合、この実験とおなじ呈示音のくみあわせはある確率で出現する。したがってこの実験で選択した呈示音のくみあわせは、正統的な CCIR の推奨する一対比較法のなかで起こりうるもののなかにふくまれ、その規定するところに抵触しない。

被験者は、男性11名、女性29名、計40名（年齢18才～40才）の大学生または大卒の会社員とした。音呈示にはバイチャンネル再生系をもちい、ブラインドホールド下で、呈示した一対の音試料がおなじにきこえるか、ちがってきこえるかを被験者に回答させた。こうしてえられたスコアをt検定で統計的に検討し、FRS と HCS との間に音質差が知覚されているかどうかをしらべた。

### 7.3.2 結 果

識別実験から得られた成績を CCIR 方式の一対比較法に該当するデータ処理方法で検定したときの、高周波の有無による音質変化識別実験の正答数の分布を図7.1Aに示す。

これはさきにのべた部分実験 [X] と部分実験 [Y] との両者のスコアを加算したものである。縦軸が正答数を、□の数がその正答数をだした被験者の数をしめす。t 検定でしらべると、この成績は偶然の正解率である二項分布とのあいだに有意差がなく、「高周波の有無による音質差が知覚されていない」ことをしめす。正解数平均値も5.8で偶然正解にちかい。つまり、実験 [X] と実験 [Y] とを合わせたデータ処理をおこなうと、この実験は従来報告されている CCIR に準拠した一対比較法実験の結果とよく一致するということになる。



FRS:full-range sound  
HCS:high-cut sound  
MPC:method of paired comparisons

図7.1 音質変化検知実験における正答数の分布

つぎに、高周波に接する頻度がひくい実験 [X] とその頻度がたかい実験 [Y] とをべつべつに集計した正答数の分布を図7.1Bにしめす。

さきにのべたように、実験[X]では、高周波を共存させた音と除外した音との出現比率は1：3で除外音がおおく、実験[Y]ではその比は実験[X]と反対に3：1で共存させた音がおおく呈示されるように設定されている。図にしめされたとおり、高周波成分に接する機会が相対的にちいさく設定されている一方の部分実験[X]では、有意水準5%という値で、「高周波成分が共存するかしないかが音質のちがいとして識別されている」ことがわかった。また、高周波成分に接する機会がおおく設定されているもう一方の部分実験[Y]では、0.5%というたかい有意水準で、「高周波成分が共存するか否かが音質のちがいとして“負の識別”をされている」というより注目すべきユニークな成績がえられた。高周波成分の有無が音質差として知覚されない場合、ただしい回答が偶然の正解分布である二項分布と有意差のない分布をしめすのに対し、この負の識別という成績は“まちがった回答の比率が二項分布（偶然起こりうるまちがい）よりも確率的におおい”という特異な現象が起こっていることをしめす。この両者をひとつにまとめてしまった図7.1Aの集計条件下では、たがいに逆の傾向をもった[X]および[Y]双方の有意性をもったデータが加算によって相殺されて、みかけ上、音質差が識別されないという成績をみちびいていたことがわかる。

さらに、高周波に接する頻度がたかい実験[Y]における誤答数の分布をしらべた。その結果を図7.1Cにしめす。左の図は、実験[Y]で「高周波を除外しない音を、除外した音であると誤認した」ケースである。この結果と偶然起こるであろうあやまりとのあいだに有意差はみとめられない。右の図は「高周波を除外した音を、除外しない音であると誤認した」ケースである。この誤認が偶然のあやまりを統計的にうわまわって起こっていることが、0.5%というきわめてたかい有意水準でしめされている。これは「たかい頻度でFRSが呈示されている過程のなかでHCSが呈示されると、HCSがFRSとして知覚されやすい」という現象が起きていることをしめす。

#### 7.3.3 考 察

この結果はつぎのように整理できる。すなわち、正統的なCCIRが推奨する一対比較法としての条件をみたしている実験全体（部分実験[X]+[Y]）に着目すると、高周波の有無に対する識別成績は偶然の正解率と有意差がなく、従来の研究<sup>2-8)</sup>を追認するものとなっている。ところが、そのなかで高周波に接する機会がすくないように設定された一方の部分実験[X]にだけ着目すると、“高周波の有無が音質差として識別されている”という結果がえられる。それに対して、高周波に頻繁に接するように設定されたもう一方の部分実験[Y]にだけ着目すると、“負の識別がおこなわれ、偶然起こりうるまちがいよりもあやまりがおおい”という特異な結果がえられる。この実験[Y]におけるまちがいの内容について吟味すると、“FRSが頻繁に呈示される条件下ではHCSがFRSとしてあやまって知覚されやすい”ことが、0.5%というきわめてたかい有意水準でしめされる。以上の結果から、FRS固有の効果が残留し、HCSのひきおこす反応にかさねあわされて音質差の識別に負の影響をおよぼしていることが示唆される。

一方、さきの実験でしめされたとおり、26kHz以上の高周波を共存させたガムラン音を呈示

すると、 $\alpha$  波のパワーは FRS 呈示開始後約20秒をついやしてゆっくりたちあがり、呈示終了後も60秒以上100秒程度まで、その活性が残留する傾向があることがみいだされている。つまりこの反応はいわば“慣性”がおおきい。 $\alpha$  波パワーの増大が指標するところの脳の活性の変化が音響知覚に影響をおよぼす可能性は、わたくしたちのこの実験の結果からみると、かなり濃厚であるとおもわれる。

ところが、CCIR 方式の一対比較法においては、聴覚記憶時間の不確定性が重視されている反面、こうした反応の残留可能性に対する考慮がほとんどはらわれてはいない。つまり、20秒以下のながさの音試料が数秒間隔で連続して呈示されるので、ある音刺激にともなう高周波成分による脳の活性変化が起こるまえにつぎの音刺激が呈示されてしまう、あるいは、ある音刺激によって生じた脳の活性変化が消失するまえにつぎの音刺激が呈示されてしまう、ということが起こりうる。

以上の検討により、CCIR の推奨する一対比較法を唯一の決定的な手法としておこなわれた従来の可聴域上限に関する実験検討には、すくなくとも原理的な問題が内蔵されていることが示唆された。

#### 〈文 献〉

- 1) 長岡鉄男：アナログは不減です、「長岡鉄男のいい加減にします PART I」、音楽之友社、pp. 124-129、1987.
- 2) 村岡輝雄、山田恭裕、山崎正実：VTR を応用した PCM 録音再生システムにおける聴感的検討について。信学技報、EA78-32、pp.19-24、1978.
- 3) Snow, W.B.: Audible frequency ranges of music, speech, and noise. J. Acoust. Soc. Am. **3**, pp. 155-166, 1931.
- 4) Fletcher, H. and Munson, W.A.: Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. J. Acoust. Soc. Am. **5**, pp.82-108, 1933.
- 5) Plenge, G., Jakubowski, H. and Schoene, P.: Which bandwidth is necessary for optional sound transmission. Preprint of 62nd AES conv., 1979.
- 6) Schoene, P., Plenge, G., Jakubowski, H.: Genugt eine bandbreite von 15kHz furelectroakustische ubertrags systeme. Runtfunktechnische Mittei Lungen, **23**, pp.1-9, 1979.
- 7) Tanabe, H. and Fujita, T.: Upper limit frequency for progre sound transmission. Tech. Rep. Speech Acoust. Soc. Jpn., pp.231-232, 1979.
- 8) 東邦治、盛田章、溝口章夫：高品質オーディオ機器における音声信号の所要伝送帯域、日本音響学会講演論文集、pp.323-324、1982.
- 9) CCIR Recommendation, 562, 1978, 1986.

## 第8章 可聴域上限をこえる高周波成分の有無が音質知覚におよぼす影響について（シェッフェの一对比較法による検討）

### 8.1 方 法

前章の実験[X]の結果は、適正な音呈示手順を設定されるならば、心理実験によって高周波成分の有無が音質差として検知されうる可能性を示唆するものとみることができる。この場合、高周波による特異的な反応の残留の影響を抑制することがひとつのポイントとなる。そこでつぎに、この点を考慮した実験を計画し、あわせて、そうした高周波成分の有無は、どのような音質のちがいとして被験者にとらえられているか、その心理的影響も検討することにした。

研究手法としては、一对比較法のなかでも、さきにみいだされた問題をさけることができるかもしれないシェッフェの一对比較法<sup>9)</sup>を応用した実験を設計した。これは、一種の統計的検定論を背景に、対象にある評点をあたえて、その評点の分散分析をおこなうことにより、対象間の差の有無の検定をおこなおうとするものである。この方法を採用するならば、呈示音に対する印象の持続時間に拘束されて短時間の連続した音呈示をおこなう必要性から解放される。また、複数の音質評価尺度についての判断を同時にもとめることができるので、高周波成分が被験者にどのような心理的影響をあたえているかを検討することができる。このシェッフェの一对比較法をつかって音質評価実験をおこない、ガムラン音の高周波成分が、人間におよぼす心理的影響を検討した。

音試料は、前章でつかったガムラン音による205秒の試料（楽曲“ガンバン・クタ”全曲）を使用した。順序効果をさけるため、FRS—HCSの対を1回、HCS—FRSの対を1回それぞれ呈示した。対と対との呈示間隔は3分以上とった。被験者としては男性15名、女性11名、計26名（年齢18才～31才）の大学生または大卒の会社員をえらんだ。

音呈示にはバイチャンネル再生系をもちい、ブラインドホールド下で、呈示した一对の音試料について、10種類の音質評価尺度のひとつひとつに対する判断を5段階の評価軸上に回答させた。その際、“どちらでもない”という回答は、避けられるならば避けることを要請した。

えられたスコアについて、ヤードスティックによって検定をおこない、FRSとHCSとの音質差評価の有意性を各評価尺度ごとにしらべた。

### 8.2 結 果

結果を表8.1にしめす。ガムラン音の26kHz以上の高周波成分の有無は、被験者間で共通するある種の音質の差として知覚されていることがしめされた。「柔らかい/固い」「余韻型/アタック型」「各楽器音がつりあっている/特定の楽器音が目立つ」「耳あたりがよく響く/刺激的に響く」という4つの音質評価尺度では1%の有意水準で、「ニュアンスの変化が大きい/ニュアンスの変化が小さい」という音質評価尺度では5%の有意水準で、高周波の有無によって音質差が検知されることが支持された。

つまり、高周波成分が共存するかしないかによって、ガムラン音の音質に対してかなり明瞭なちがいが知覚されていることがわかる。26kHz以上の高周波成分が共存するとき音はよりや



表8.1 シェッフェーの一対比較法による高周波成分の心理的影響の検討

評 価 語 対 (FRS / HCS)	音質差を識別したと 判断される信頼度
柔らかい / 硬い	99% (q=5.33)
余韻型 / アタック型	99% (q=5.01)
各楽器音がつりあっている / 特定の楽器音がめだつ	99% (q=4.57)
耳あたりがよく響く / 刺激的に響く	99% (q=4.44)
ニュアンスの変化が大きい / ニュアンスの変化が小さい	95% (q=3.63)
低音がめだつ / 高音がめだつ	— (q=2.25)
厚い / 薄い	— (q=1.70)
軽い / 重い	— (q=1.13)
好き / 嫌い	— (q=1.12)
きめが細かい / きめが荒い	— (q=0.14)

わらかく耳あたりよい、あるいは音楽としてより興趣のふかいものとして感受される作用をもつものに対して、高周波成分を除外すると、音はよりかたく刺激的に感受されている。

### 8.3 考 察

以上の結果からみて、高周波成分の心理的影響は、快感誘起または不快感の抑制として類別するのが妥当とかがえる。これは、第6章の生体計測実験において観察された現象、すなわち高周波成分によって、こころよさやリラクゼーションの指標となる  $\alpha$  波が増大するという結果ともよく符合している。

それでは、正統的な、そしてより鋭敏なはずの CCIR の推奨する一対比較法では音質差なしと判定された FRS と HCS とが、より鋭敏さに欠けるはずのシェッフェーの一対比較法によって音質差ありという結果にみちびかれた理由はなんだろうか。CCIR の推奨する一対比較法ではみじかい音試料を連鎖的に40回呈示したのに対して、シェッフェーの一対比較法では205秒におよぶ楽曲全体を FRS、HCS 各2回を限度にして呈示している。つまり残留効果に対する防備は前者に比較して後者が格段にたかい。このちがいが両者の結果をことなるものにしたとおもわれる。つまり、おそらく高周波によるなんらかの効果の残留によって CCIR 方式の一対比較法は結果が混乱し、高周波の有無を音質差として識別することが困難になる。それに対して、シェッフェーの一対比較法による音質評価実験では、残留効果の影響が大幅におさえられたことによって、高周波の有無が呈示音の音質差として知覚され、高周波の存在によって音質がよりこころよく興趣豊かに感じられる傾向があることが統計的に支持されたものとかがえられる。

なお、CCIR の勧告による一対比較法は、音試料のながさについては10秒前後、そしてふたつの呈示音のあいだの無音時間間隔については1秒以下とできるだけみじかくとることを推奨している。これは、ふたつの音の比較をながい無音時間間隔をおいておこなうと、感覚記憶や短期記憶がうしなわれて鋭敏な判断がむずかしくなることをさけようという意図をもっている。つまり人間の感覚を尺度にしてふたつの事象を比較するとき、両者のあいだの空間・時間のへだたりをおおきくとるにしたがって、微少なちがいほどその識別が困難になるという原則によ

### 第Ⅲ部 人類をとりかこむ空気振動の物理構造とそれに対する人間の感受性

る。たとえば2本の線分のながさを比較する場合、はなしてくらべるよりもちかくにならべてみた方が、より微細なちがいをみいだしやすい。これとおなじように、よりみじかい時間感覚で音をくらべた方が、より微妙なちがいまで識別できる可能性がたかまる。いいかえると、比較する両者を時間的または空間的によりおおきくへだてると、その距離に対応してより微細なちがいほど識別が困難になり、より歴然たるちがいの方が識別可能性を保持しやすい。

ただし、対象になる現象が時間的非対称性、たとえば順序効果や残留効果などを無視できないレベルでもっている場合、このルールは単純にはあてはまらなくなる。わたくしたちのシェッフェの方式による一対比較実験では、高周波をふくむ音の影響が脳内に数10秒～100秒以上も残留することを考慮して、サンプルの呈示時間を2分以上にながびかせたうえに、両サンプル呈示間に20～30秒のインターバルをおいた。これは、残留効果を減じるためには呈示時間およびインターバルをよりおおきくとすることが有効であるのに対して、サンプル間の音質差を微細な相違までとらえるためには呈示時間およびインターバルをできるだけみじかくすることが有効であるという二律背反構造のなかで、双方が両立できる点をねらって設定したものである。この実験条件は、従来のやり方にくらべると、微細なちがいが無視されやすく、歴然たるちがいがあった場合はじめて、識別が可能になるという限界をもっている。したがって、わたくしたちの実験で、呈示音のあいだに20～30秒というながい時間間隔をおいたにもかかわらず、統計的に有意な差がみいだされたことは、[記憶がうすれてちいさな差が埋没した後にも、ふたつの呈示音のあいだに明瞭に識別できるおおきな音質のちがいが存在していた]と解釈するのが妥当であろうとかがえられる。

#### 〈文 献〉

- 1) Scheffe, H.: An analyses of variance for pariod comparisons. Am. statis. Assoc. J., 47, p.381, 1952.

## 第9章 ハイパーソニック・エフェクト仮説による二次元知覚モデル

### 9.1 目 的

これまでのべてきたように、わたくしたちは、ガムラン音の中にふくまれる可聴域をこえる高周波成分が、快適性の指標として周知の脳波  $\alpha$  波パワーを顕著にたかめるとともに、音をよりうつくしくこころよく知覚させる効果をもつことをみいだした。その後の研究によって、こうした現象はガムラン音以外のさまざまな自然音によってもひきおこされうることがわかった。わたくしたちは、この効果を仮に“ハイパーソニック・エフェクト”(Hypersonic effect)とよぶことにした。このような現象は、これまでのところ、わたくしたち以外にまだ報告された例をみない。また、この現象は、人間の聴覚に関するこれまでの知識や理論では、まったく説明することができない。そこでわたくしたちは、この現象を説明することが可能な知覚上のモデルを構築することにした。そのために、あらためて学際的なモデリング・アプローチをこころみた。

### 9.2 ガムラン音のもつ26kHz 以上の高周波成分が“非知覚性”であることの確認

これまでの実験で、ガムラン音中の26kHz 以上の高周波成分をとりのぞくと、それをふくんでいた音と音質がかわってきこえることが統計的に裏付けられている。ただし、ここで変数として[共存－除外]という操作の対象になったガムラン音の26kHz 以上の高周波成分について、それ自体が何らかの聴覚上の反応をひきおこしていないかどうかについては、たしかめられておらず、この点は確認を要する。

わたくしたちがこの研究のために開発し使用してきたバイチャンネル再生系は、従来方式のものとはちがって、フィルタで分けられた高周波成分および低周波成分を、同時に、あるいはそれぞれ独立して再生することができる機能をもっている。そこで、この機能を活用して、これまでの実験で可聴域をこえる高周波として供試されたガムラン音の26kHz 以上の高周波領域だけを再生呈示し、それが被験者になんらかの聴覚反応をひきおこし検知されるかどうかをしらべた。被験者には、それまでの心理実験の被験者となった男性11名、女性29名、計40名(年齢18才～40才)の大学生または大卒の会社員をあてた。

音呈示はバイチャンネル再生系の高域側からおこなった。被験者がなんらかの音の再生を検知したとき挙手するよう要請し、ガムラン音の高周波成分を不規則に ON-OFF した。その結果、高周波成分を再生したとき、それに対応して挙手がおこなわれた被験者はひとりも存在し

表9.1 ガムラン音の高周波だけの再生呈示の検知実験結果

全被験者数	検知可能	検知不可能
29名	0名	29名

なかった（表9.1）。

この結果は、わたくしたちが発見した可聴域をこえる高周波成分の共存による音質知覚の変化は、それが音として聴こえたことによるものではないことを示唆している。であるとすれば、べつな角度からの説明が必要になる。

### 9.3 $\alpha$ 波パワーの残留効果に注目した推論

さきにのべたとおり、高周波成分の共存によって増大した脳波  $\alpha$  波パワーは、その誘因となった高周波成分の呈示を停止したあと60秒～100秒という長期間にわたって残留する。この現象の有力な背景として、シナプス・ジャンクションにおける化学的伝達機構のもつ時間特性（図9.1）を考えることができる。

運動神経や聴覚系など時間的な反応の迅速性が貢献する神経系のシナプス・ジャンクションでは、もっともすどい過渡応答をもつアセチルコリンを神経伝達物質とする伝達系が主な役割を演じている。アセチルコリンは、シナプス前ニューロン終末から放出され、シナプス後膜のレセプターに達してメッセージを伝達したのち、シナプス間隙に存在する酵素アセチルコリンエステラーゼによって酢酸とコリンとに加水分解されて活性をうしなう。この伝達物質の放

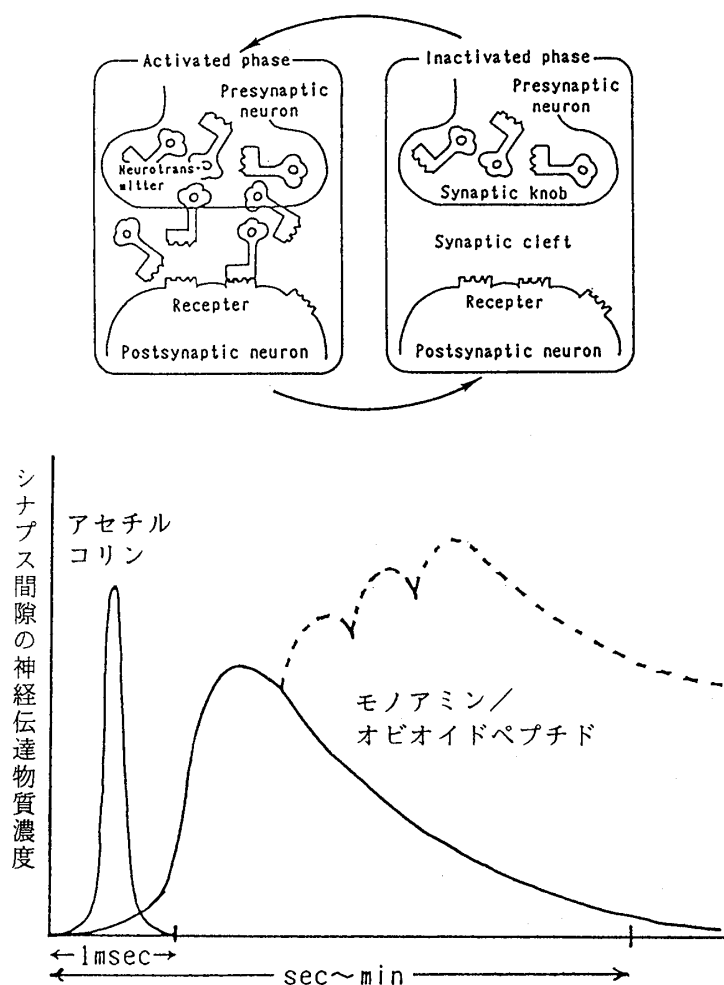


図9.1 シナプス間隙における神経伝達物質の放出・消去の時間特性

出から分解までの作動の1サイクルに要する時間は、代表的な運動神経で約1 msec となっている。

これに対して、モノアミン類やオピオイドペプチド類などの神経伝達物質は、シナプス間隙からの消去が、再吸収や自然流出など、より長時間を要する機構にゆだねられ、入力信号の累積的な効果が、シナプス間隙への神経伝達物資の蓄積となってあらわれ、顕著な時間的残留をみちびきうる<sup>1-4)</sup>。

こうした時間的特性は、シナプス後膜でのシナプス後電位形成にかかわるイオンチャンネルの開閉メカニズムとも連結している。迅速な過渡応答が有意義なアセチルコリン作動系では、イオンチャンネル自体がレセプター蛋白をかね、アセチルコリンの到着によりただちにゲートをひらき、アセチルコリンが離脱するとただちにゲートがとじる。

それに対して、モノアミン作動性神経系やオピオイドペプチド作動性神経系では、シナプス後膜に所在するレセプターは、基本的にイオンチャンネルの作用はもたず、神経伝達物質（リガンド）の結合によって、後膜内に露出した部分が酵素活性を発現する。この酵素のはたらきによって二次伝達物質がシナプス後ニューロン内に合成され、これがイオンチャンネルにはたらきかけてゲートをひらく。したがってこれらの系では、シナプス後細胞内で情報のカスケード増幅が時間的な遅延をともしつつみちびかれる。このように、モノアミンやオピオイドペプチドが活動する神経回路は、一旦活性化されると、かなりの時間その状態を保持する傾向がつよい。

このような一般的傾向を考慮すると、高周波成分の存在によるハイパーソニック・エフェクトは、神経伝達物質としてモノアミン類あるいはオピオイドペプチド類が作動する神経系との密接な関連のもとにあることが予測できる。

#### 9.4 情動反応の快適化に注目した推論

第8章でのべたシェッフェの一对比較法は、本来の可聴域をこえる高周波成分をふくむガンラン音が、そこから高周波成分を除外した音よりもよりうつくしく、こころよく感じられることを統計的にうらづけた。これらは脳内でひきおこされた生理的・情動的な反応の表出としてみることができる。このようなプラスの情動反応を発生させる脳の部位は、大脳辺縁系やその周辺に分布する「情動系の神経回路」である可能性がたかい。

この仮説は、こうした快感誘起性の神経回路が、前項で指摘したモノアミン作動性神経系やオピオイドペプチド作動性神経系ときわめて密接に関連している、というよりは一般にそれら自体を本体とするという事実によっても支持される。

#### 9.5 人間の音知覚にかかわる二次元知覚モデルの提案

以上の検討にもとづき、「可聴域をこえそれ自体は音としてきこえない高周波成分を豊富にふくむ自然音は、その高周波成分を除去した音よりもよりこころよく知覚される」という現象を、弾性波に対する人間の反応は2次元の構造をもつというあたらしいかんがえかたによって説明するモデルをつくった。(図9.2)

人間に受信される空気振動情報の第1の次元は、20～20kHzのいわゆる可聴領域である。こ

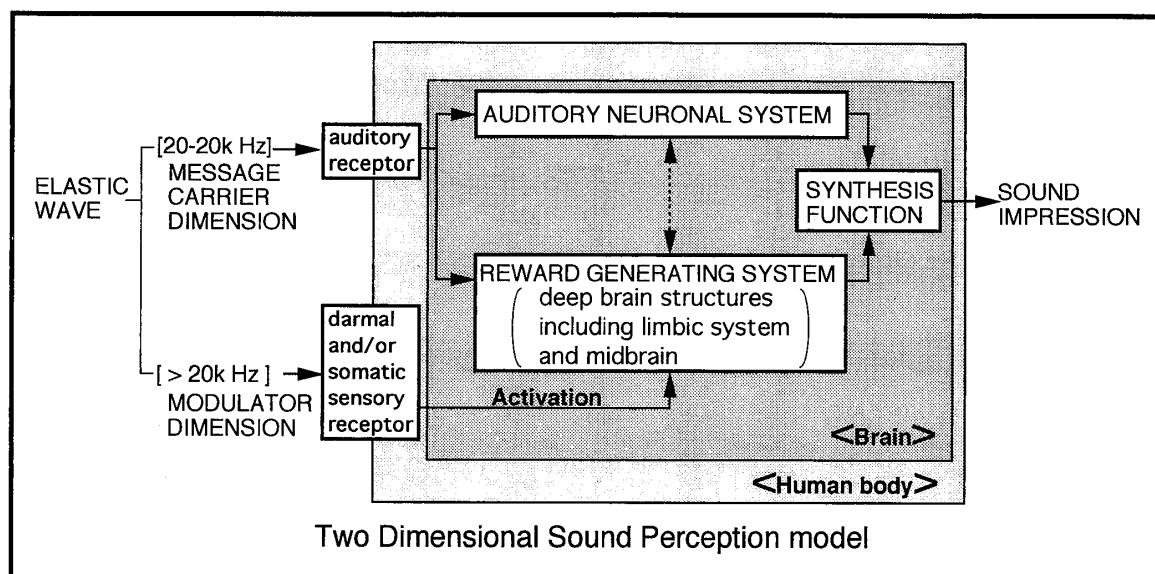


図9.2 弾性波に対する感受性の二次元モデル

の次元は“メッセージ・キャリア”として機能し、よく知られているとおり聴覚神経系で処理される。その反応の時間的残留性はきわめてみじかく無視できる範囲にある。第2の次元は、おそらく20kHz 付近を下限とし、今回の実験の周波数分割点26kHz を十分にうわまわり、50kHz 以上にその上限をもつかもしい高周波帯域である。この帯域は“モジュレーター”として機能し、情報入力に対する人間の感受性を快感の誘起または負の刺激の緩和の方向に変調させる。この変調作用は時間的残留性あるいは慣性がおおきく、音呈示がおわったあと無視できない時間にわたって、その効果が残留する。ある音に対する人間の印象は、以上ふたつの知覚次元の結合の結果として形成される。高周波成分による変調作用に関与するであろう神経系としては、快感誘起および慣性のおおきさという性格から、大脳辺縁系を中心にするカテコールアミン作動性神経系やオピオイドペプチド作動性神経系などがその候補としてかんがえられる。高周波成分によるこれらの神経の起動に、聴覚神経系が影響をおよぼす可能性を否定することはできない。しかし、より主体となるのは、体性感覚受容系かもしれない。また上記の脳内モジュレーター機能性神経回路それ自体が高周波成分によって直接励起される可能性も否定できない。なぜなら、人間のからだ自体が弾性波の良導体だからである。

以上の二次元知覚モデルによって、第6章でみいだされた高周波成分による脳波  $\alpha$  波パワーの増大が時間的な遅延および残留といった時間特性をしめしたことについて、さきにあげたカテコールアミン作動性神経系あるいはエンドルフィン作動性神経系などが関与している可能性が推定される。

とりわけ、カテコールアミン作動性神経系は、ネットワークとして一旦活性化されると、その活性をしばらく保持する傾向が比較的つよいともいわれる<sup>2,3)</sup>。このような性質をもった報酬神経回路を高周波成分の入力にもとづく神経情報が高度に刺激した場合、この神経系に属するニューロンおよびそれらが構成するネットワークは、高周波成分の入力がなくなっても、しばらくのあいだは、残留する伝達物質の受容状態下におかれ、あるいは活性の保持状態下におかれつづける可能性がある。これは、脳波  $\alpha$  波パワーを指標にして把握された脳の活性化現象の

もつ時間的遅延特性ときわめて整合性がたかい。

人間の耳に音としてきこえる周波数の上限が20kHz以下であることは、おそらくたしかだろう。しかし、この研究の結果およびここに提案した二次元知覚モデルからすると、よりたかい周波数の弾性波が、いわゆる可聴音に対する脳の感受性を変調させ、その有無によっておなじ音をちがったものにかんじさせる可能性が濃厚である。このことを考慮するならば、高周波成分がそれ単独では音としてきこえないからといって、これを無視することないし排除することには問題がある。

以上を要約すると、人間の音響知覚に影響をおよぼす周波数の上限を、これまでの定説のように単純に20kHzとすることは不可能かもしれない。空気振動に対する人間の感受性は、20kHzをおおはばにうわまわり、音としてきこえない高周波領域にまでおよんでおり、かつそれが間接的ながらいわゆる可聴帯域音の知覚に確率的な影響をおよぼしているとかんがえる方が、わたくしたちの実験結果からみるとより妥当であろうとおもわれる。

#### 9.6 サーストンの方式にもとづく一対比較法を音質評価にもちいることへの疑義

わたくしたちがみいだしたあたらしい知見を視野にいれてCCIRの勧告する一対比較法について再検討してみると、20秒以下のみじかい音試料が連鎖的に多数回呈示されるという点におおきな方法論上の問題がみいだされる。 $\alpha$ 波パワーでみるかぎり、あきらかにまえの呈示音の影響が残留している時間内に、複数の音試料がつぎつぎにかさねて呈示されるからである。つまり、CCIRの推奨する一対比較法に忠実な実験を想定すると、音試料が可聴域をこえる高周波成分を十分にふくんでいた場合、その影響によって脳はほとんど全実験時間にわたり変調状態におかれつづけることがかんがえられる。このような場合、実験結果が音質差の知覚をしめすものか、脳の内部状態の変調を意味するものか判然としない。この点からみると、CCIRの勧告するサーストンの方式による一対比較法には無視できない危険がともなっているといわなければならない。

また、さきにのべたように、おもにデジタル・オーディオ標本化周波数決定に関連して1980年前後におこなわれた人間の感受可能周波数上限に関する研究は、そのすべてが決定的手法としてサーストンの方式による一対比較法にのみ依存しているうえ、今回みいだされたような高周波成分による変調作用やその残留効果による一対比較法の限界について考慮し、それを回避する対策を実験方法にともなわせるということをおこなっていない点でも共通している。

効果が残留する現象に関する問題は、音試料が、“音楽”のような興味や快感に関する脳の神経回路に影響をおよぼす可能性をもった素材である場合にはとくに、避けることはむずかしいだろう。しかも、検討対象となっていることがらが“感受可能な周波数上限”でなく快感誘起をともなった他の事象であってもおこりうることは重要な問題である。こうした複雑なしくみを想定する以前に設定された素朴な手法によってみちびきだされた従来の知見については、再検討が必要といわざるをえない。

現在公式的に採用されているデジタル・オーディオ標本化周波数は、唯一、サーストンの原理にもとづく一対比較法による実験の結果を根拠にしている。そこで、これらのなかで現行規格決定にもっともおおきな影響をおよぼしたとかんがえられる代表的な研究について、ここ

であらためて吟味してみることにする。

まず、非常に著名なドイツの Plenge ら<sup>5)</sup>の研究をとりあげる。この研究ではノイズ・ジェネレーターで発生させた白色雑音に対してフィルターによる高域制限をほどこし（図9.3）、サーストンの方式による一対比較法をおこなって15kHz 以上の高周波の有無は音質差として検知されないという結論をみちびいている（表9.2）。

この実験を、わたくしたちがみいだしたハイパーソニック・エフェクトの残留という性質を

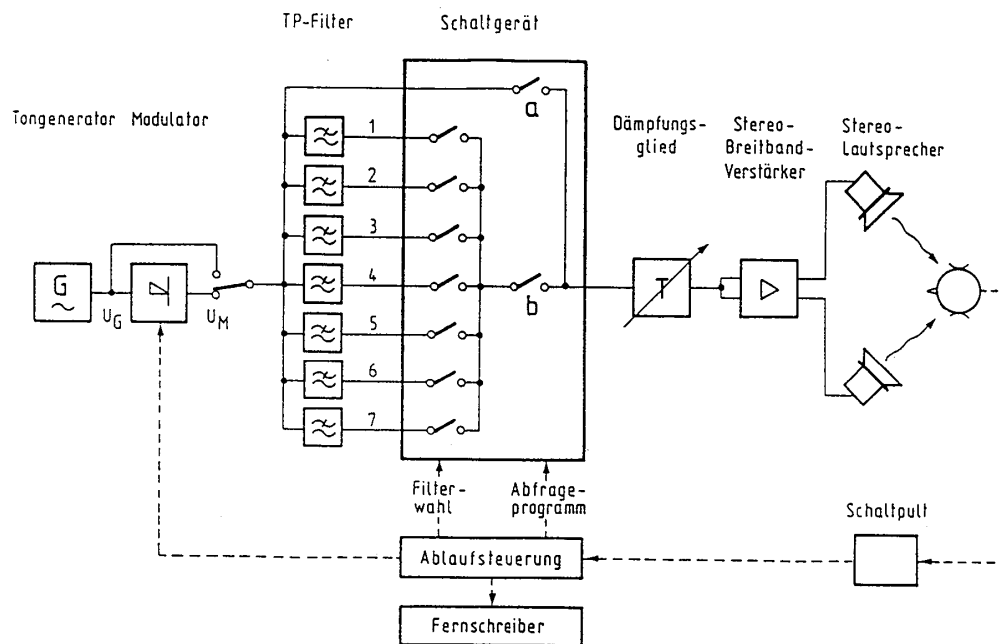


図9.3 Plenge らの実験システム

表9.2 Plenge らのえた結果

Filter	Mean value $\bar{h}_r$ and standard deviation $\Delta h_r$ for					
	a) all 43 subjects		b) 21 sound engineers		c) 22 non-sound eng.	
	$\bar{h}_r$	$\Delta h_r$	$\bar{h}_r$	$\Delta h_r$	$\bar{h}_r$	$\Delta h_r$
1	58 %	$\pm 18 \%$	55 %	$\pm 17 \%$	61 %	$\pm 18 \%$
2	56 %	$\pm 12 \%$	56 %	$\pm 11 \%$	56 %	$\pm 13 \%$
3	57 %	$\pm 14 \%$	52 %	$\pm 10 \%$	62 %	$\pm 15 \%$
4	51 %	$\pm 12 \%$	49 %	$\pm 14 \%$	53 %	$\pm 10 \%$
5	51 %	$\pm 8 \%$	51 %	$\pm 9 \%$	51 %	$\pm 7 \%$
6	54 %	$\pm 11 \%$	51 %	$\pm 13 \%$	56 %	$\pm 9 \%$
7	52 %	$\pm 8 \%$	52 %	$\pm 8 \%$	53 %	$\pm 8 \%$



考慮にいられて吟味すると、まず、呈示音がきわめて短時間のものであることが問題になる。この実験の呈示音となっているのは音楽ではなくスパイク状インパルスで、そのながさは図9.4に示すとおり1秒間にみたない。このようにみじかい音がつぎつぎに呈示された場合、ハイパーソニック・エフェクトがその発生に約20秒間、その消失に60秒～100秒間のおくれをとともなうことから、つぎのような現象がおこる可能性が否定できないものとなる。第1に、呈示音がハイパーソニック・エフェクトを発生させた場合、その効果の発現までに1秒間以上の時間を要したとすると、呈示音のながさが1秒間にみたないため、その効果が発生した時点ではすでに音の呈示は終了して、つづいて呈示される別の呈示音に対してその効果が発揮されてしまう。第2に、一旦ハイパーソニック・エフェクトが発生した場合、それはすくなくとも60秒間残留するので、それ以後呈示されるであろう数十個におよぶ呈示音に、その効果がオーバーラップすることになるだろう。したがってそれらの呈示音が高周波をふくんでいてもいなくても、被験者はそれを高周波をふくんだ音としてあやまって知覚する傾向がつよまり、結果に混乱が生じるおそれがある。

また、Plenge らは、図9.4にしめされているように、ノイズ・ジェネレーターの出力をまずローパスフィルターに通して、超高周波成分を排除している。このフィルターは遮断周波数25kHz、約30dB/oct. というかなり急峻な傾斜をもっている。この条件は、わたくしたちの実験でハイパーソニック・エフェクトを発生させた26kHz 以上の高周波成分を除去するという偶然の効果を発生させるものになっている。つまりこのシステムは、あらかじめ人間に影響をあたえる音の周波数上限はせいぜい20kHz 程度であるという予断にもとづいて構成されたものということができるかもしれない。その結果、ハイパーソニック・エフェクトを発見することはきわめて困難なものとなっている。さらに、実験に使用されたスピーカーの再生特性もしめされておらず、実験の際、実際に被験者にどのような信号が到達していたかについてもあきらかにされていない。この研究は、すぐれた構想と周到な準備のもとに注意ぶかく遂行され、信頼性のたかい結果をみちびいたものとして、音響心理学分野でたかい評価をうけ、デジタル・オーディオ・サンプリング周波数策定のうえで、とりわけ32kHz というフォーマットを制定するうえで決定的な役割をはたしている。しかしここでわたくしたちが指摘したいくつかの点においては、無視できない予断や不備があったことを否定できないのではないかとおもう。

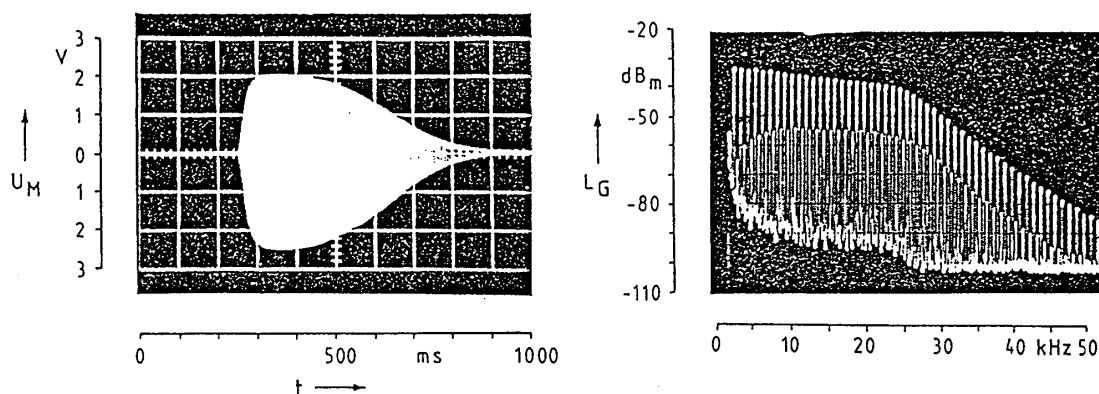


図9.4 Plenge らが使用した音素材

つぎに、デジタル・オーディオ・サンプリング周波数の制定にあたって決定的な役割をはたした点で Plenge らの研究と双璧をなす、わが国の村岡ら<sup>7)</sup>の研究をとりあげてみよう。この研究は、サーストンの方法をモディファイした、いわゆる A・B-X テスト方式で構成されている(図9.5)。被験者は手元のスイッチによってふたつの音試料 A と B と(そのうち一方はフルレンジ、一方はハイカットされている)を任意に選択して試聴したのち、未知の音試料 X を呈示させてそれが A か B かを判定する。この場合、呈示音のながさが10秒前後に設定されるので、ここで呈示された高周波成分をふくむ音がハイパーソニック・エフェクトを発生させた場合、呈示音によってひきおこされた脳の内部状態の変化は、呈示終了後60秒以上にわたって残留する。そのため、Plenge らの実験とおなじく、高周波の効果が、あとから呈示した音にオーバーラップするという問題を生じる。とりわけ被験者が熱心にくりかえしきりかえて呈示音

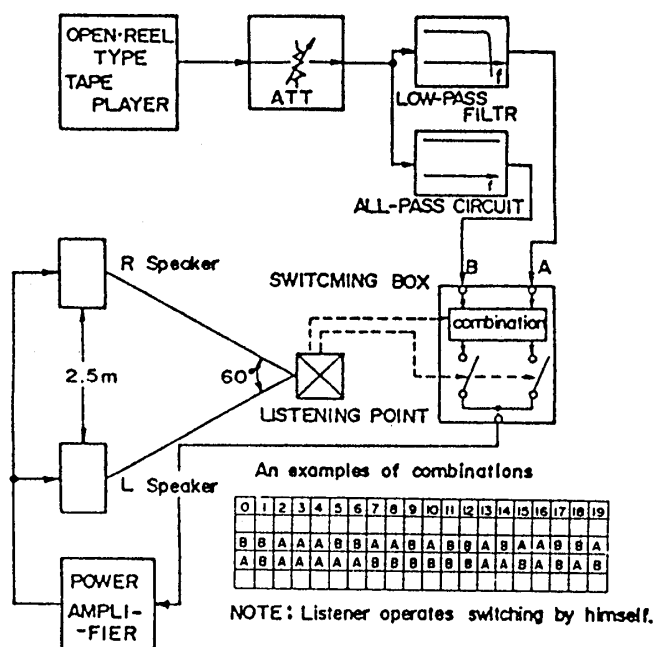


図9.5 村岡らの実験システム

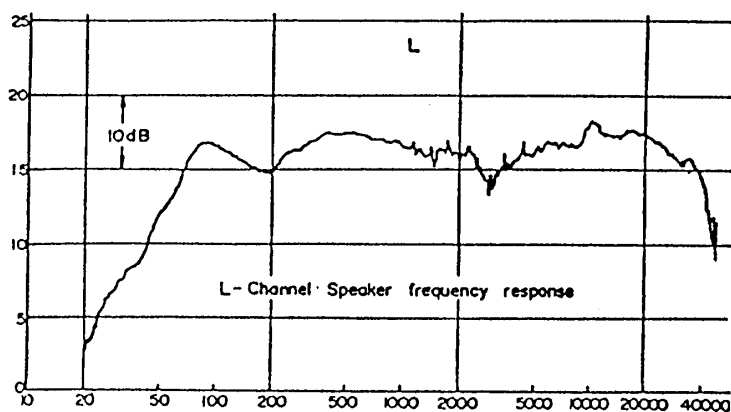


図9.6 村岡らの使用したスピーカの特性

A・Bを聴く行動をとった場合、ハイパーソニック・エフェクトをおこしうる成分をふくんだ実験素材であればそれだけ、結果はよりいちじるしく混乱することが予測される。

これとは別に、村岡らの報告で使用されたスピーカの特性をみると、図9.6のように20kHz以下の帯域から急激に減衰しており、わたくしたちの実験でハイパーソニック・エフェクトを発生させた26kHz以上の高周波の再生には、かならずしも適性がたかいとはいえない。これは偶然にも、Plengeらのもちいた25kHzローパスフィルターの採用と同様の問題をみちびいている。

さらに、村岡らは、極端に正答率のたかい被験者とひくい被験者とを分析の対象から除外してしまっている。このことは、そのような成績をみちびいたメカニズムに対する検討のてがかりを無視することにつながり、問題がのこされているとおもわれる。

#### 〈文 献〉

- 1) Albert, B., Bray, D., Raff, M., Roberts, H. and Watson, J.D.: Molecular biology of the cell, 2nd ed., Garland Publishing, New York, pp.1092-1095, 1989.
- 2) Cooper, J.R., Bloom, F.E., and Roth, R.H.: The biochemical basis of neuropharmacology, 3rd ed., Oxford, New York, p.145, 1978.
- 3) Kuffler, S.W., Nicholls, J.G. and Martin, A.R.: From neuron to brain, 2nd ed., Sinauer Associates Inc., Sunderland Massachusetts, pp.314-317, 1988.
- 4) McGeer, P.L., Eccles, J.C. and McGeer, E.G.: Molecular neurobiology of the mammalian brain, 2nd ed., Plenum Press, New York, pp.55, 63, 297, 300, 311, 1987.
- 5) Plenge, G., Jakubowski, H. and Schoene, P.: Which bandwidth is necessary for optional sound transmission. Preprint of 62nd AES conv., 1979.
- 6) Schoene, P., Plenge, G., Jakubowski, H.: Genugt eine bandbreite von 15kHz fur elektroakustische ubertragsysteme. Runtfunktechnische Mittei Lungen, **23**, pp.1-9, 1979.
- 7) 村岡輝雄、山田恭裕、山崎正実: VTRを応用したPCM録音再生システムにおける聴感的検討について、信学技報、EA78-32、pp.19-24、1978.

## 第10章 LP と CD とが再生する音のちがいについて

### 10.1 研究の背景

音楽メディアとしてのアナログ・ディスク (LP) が全盛期にあった1982年、デジタル方式のコンパクト・ディスク (CD) が登場した。CD が流通しはじめた当初は、LP とくらべて CD の音質を疑問視する見解が、音楽愛好家や技術関係者のあいだですくなくみられた。しかし、CD の音質の欠陥に関わる感性的評価にもとづく議論は、そのクリアな音質、たかい S/N 比、操作性のよさなどのメリットに圧倒されて、勢力のある世論にはなりえず、数年のうちに LP の製造システムそれ自体が解体・消滅に瀕するにいたった。ところが最近、CD の音にうるおいのなさ、ものたりなさ等を指摘する声が復活し、LP の音質を支持する主張が増殖する傾向にある。また、LP に対する社会的需要も一度底をうった後、復活のきざしをみせている。

わたくしたちの研究プロジェクトの一員である大橋は、作曲家山城祥二として、LP と CD ということなる録音メディアをもちいた音楽作品の制作にたずさわった経験から、いわゆる感性的評価という面で、LP からの再生音には CD のおよばない美点があるという主張があながち否定しきれないことに注目した。LP の爛熟期には、レコード盤制作の全工程でいわば秘術をつくした技術開発競争がおこなわれていた。そのなかで山城は、カッティング段階で減衰しがちな可聴域上限 (20kHz) を大幅にうわまわる高周波領域を強調することが、LP の音質向上に無視できない効果をうむことを体験し、これを音づくりのおおきな武器としていた。当時は日本ビクター株式会社による CD-4 (compatible discrete 4-channel) とよばれる、30kHz の高周波を搬送波としてもちいる 4 チャンネル記録再生方式の実用化によって、LP の溝にすくなくとも 45kHz 程度の高周波成分までききこむことが技術的に可能になっていた。ところが、サンプリング周波数 44.1kHz である CD には、当然ながらこうした可聴域をうわまわる高周波帯域の成分はふくまれていず、そのイコライジングによる効果はみられるはずがない。アナログ・ソースをもちいておこなわれた編集段階での音と、CD に記録された音とのあいだに歴然たる音質のちがいがあることは、おおくのスタジオ技術者によって指摘されてきた。現在でも、20 kHz 以上の高周波が音質に影響をおよぼすことを主張するスタジオ技術者はすくなく存在し<sup>1)</sup>、100kHz におよぶ周波数特性をそなえている音響機材や、100kHz におよぶサンプリング周波数をもつデジタル機器などが、その音質のよさを評価され、流通している。

一方、LP と CD というメディアの音質差をめぐるこれまでの議論をふりかえてみると、客観的根拠をとまなう科学的アプローチがなされてきたとはいいがたい面があった。こうした状況について山田は、「今までは厳密な測定実験によっても裏づけができなかったのが、一般にはあまりまともにうけとめられず、どちらかというそれは古くからなれている、のちほどのべるように、いくらか『色の付いた』、あるいは故意に『色付けされた』再生音質の特性に対する郷愁的愛着に過ぎないのではないかとされていた。」<sup>2)</sup>とのべている。

わたくしたちが、ハイパーソニック・エフェクトに関連しておこなった主観的音質評価実験の結果では、高周波共存音と高周波除外音との音質差評価結果は、一般に LP と CD の音質上のちがいといわれているところとよく符合していた<sup>3)</sup>。

そこでわたくしたちは、LP から CD への過渡期においておなじ音楽ソース(50kHz 以上に達する豊富な高周波成分をふくんだアナログテープ)から製作された LP と CD とをもち、まずその同一箇所について再生信号の周波数分布を比較し、ついで両者の再生音がみちびく生理的反応の差を、特に高周波成分の有無に注目して比較するとともに、両者について感性的評価実験をおこなった。

## 10.2 おなじソースからつくられた LP と CD とが再生する電気信号の物理構造を比較する

### 10.2.1 使用した音楽ソースについて

LP と CD との厳密な音質比較実験が困難な理由のひとつに、まったくおなじ音楽ソースから対等な条件でつくられた LP と CD とがきわめて希少であることがあげられる。つまり、LP、CD それぞれの特性を充分にいかし、それぞれの録音メディアの頂点をきわめたといえるような音質をもち、しかも当初から LP、CD 両メディアでの発売という企画意図をもってつくられた作品はそれほど多くはない。かつ、これを分析対象としてとりあげる場合、録音からカッティングにいたる全工程で、どのような操作がくわえられたかを研究者が知悉していることがのぞましい。これは研究者が音楽制作にふかく関与していなければのぞめない。この研究は、幸運にもこのようなむずかしい条件を理想的にクリアした LP、CD が存在したことによって実現した。

ここで検討対象となった音楽ソースは、『輪廻交響楽』という 4 つの楽章からなる作品で、1986 年にビクター音楽産業株式会社(現株)ビクター・エンタテインメント)から LP (VIH-28257)、CD (VDR-1200)、カセットテープ (VCF-10280) という 3 種のメディアで発売された。作曲は山城祥二こと大橋 力、演奏は芸能山城組である。

この作品は、CD というあたらしいメディアの特性を極限まで発揮させた作品を開発することをレコード会社から要請されて、創作された。当時は、LP よりも格段にひろいダイナミックレンジ、過渡特性のよさといった CD のメディアとしてのつよみを意識的に発揮させた作品はまだきわめてすくなかったからである。物理的に振動としての構造からみると、いわゆるクラシック音楽は一般に、過渡的变化は比較的なだらかで持続した音が主体をしめる傾向がたつよく、ダイナミックレンジはおおきい。ポップスやジャズ系の音楽は、アタック音を中心にして過渡的变化がおおきく、ダイナミックレンジは比較的せまいという傾向がある。

それに対して、この作品では、従来の LP ではそのダイナミックレンジや過渡特性の記録・再生に限界があった非西欧圏の楽器、たとえばインドネシア・バリ島の青銅の打楽器アンサンブル・ガムランやさまざまな民族楽器、そしてポップス系の楽器類がとりいれられた。これに、合唱、シンセサイザーなどをくみあわせ、妥協のない音づくりがめざされた。ガムランは、瞬間的には 100kHz をうわまわる超高周波を豊富にふくみ、そのダイナミックレンジもきわめてひろく、複雑な過渡特性をもっている<sup>4)</sup>。楽器のもつこうした特性にあわせて、マイクロフォンは B&K 4007、同 4006、NEUMANN U87、SCHOEPS 269、同 54U、同 5U など、高性能のコンデンサーマイクロフォンが選択された。また、空間移動感等を造成するために、ダミーヘッドマイクロフォンも使用された。

なお、当時は、録音・編集現場において、アナログからデジタルへの転換期にあたってい

たため、この作品では、4つの楽章のうち1、2、4楽章は OTARI MTR-90II-24マルチトラックレコーダーによるアナログ録音、3楽章だけは VICTOR DAS-900を使ってデジタル録音がおこなわれた。編集は、アナログ・システムでおこなわれた。ミックスダウンの段階では、STUDER A-80によってLP用アナログマスターがつくられ、DAS-900によってCD用デジタルマスターがつくられた。わたくしたちは、録音から編集、カッティングにいたるすべての工程に、作曲家あるいは演奏者としてたちあい、その作業に参画している。

### 10.2.2 方 法

前述の『輪廻交響楽』のLPとCDとについて、その第3楽章『散華』のなかの「金剛明咒」180秒間に対し、FFTによる周波数分析をおこなってその再生信号の周波数特性を比較した。この部分は、日本の声明と仏教の打楽器、ガムランの楽器の一部、シンセサイザーによって演奏されている。また、とくに高周波がおおいと予想されるガムラン構成楽器の一種ゲントラックが演奏されている箇所（約5秒間）については、これをくりかえしとりこんで加算平均をとった。

LPの再生には MICRO SX8000IIをもちい、ピックアップ・カートリッジには、DENON DL-103-LC OFC、DENON DL-1000、SATIN M-21Pを使用した。いずれもLP爛熟期に登場したカートリッジで、その音質のよさには定評がある。CDの再生は、CDプレーヤーVICTOR ZL-Z711をもちいておこなった。

分析には小野測器 CF-360FFTアナライザーをもちい、LP・CDの再生音を直接とりこんで、パワースペクトルをもとめた。ウィンドウ関数はハニング・ウィンドウ、データ長は4 msecで時間解像度1024point、最大分析周波数帯域100kHz、周波数分解能は125Hzである。

### 10.2.3 結 果

実験の結果を図10.1～10.4に示す。同一箇所についてのLP・CDのパワースペクトルをかさねて表示した。実線は、LP再生音のパワースペクトル、破線はCD再生音のパワースペクトルをしめす。LP・CD双方のデータにわずかながら同程度のシステムノイズがふくまれているが、両データの比較には支障はないと判断した。

図10.1は、ピックアップ・カートリッジに DENON DL-103-LCOFC を使用して再生したLP再生音とCD再生音とのパワースペクトルを比較したものである。CDでは、22kHz以上の帯域には音が記録されていないのに対して、LPでは50kHzにおよぶ高周波帯域まで音が再生可能な状態で記録されていることがしめされている。20kHz以下の帯域では、LPとCDとの波形はほぼ一致している。ただしCDの方が、10kHz付近でのおちこみや、10～15kHz付近でのピークが若干おおい。DENON DL-1000を使用して再生したパワースペクトルを図10.2にしめす。LPでは、60kHzをうわまわる高周波が記録・再生されていることがしめされた。可聴域でのLPとCDとのパワースペクトルのちがいは、DL-103による再生音よりもちいさい。SATIN M-21Pを使用した結果を図10.3にしめす。ここでも、LPには60kHzにおよぶ高周波成分が記録されていることがみいだされた。M-21Pによる再生信号では、DL-103-LCOFCやDL-1000でみられたような高周波帯域でのパワーのもりあがりはみられず、可聴域からなだらかに高域

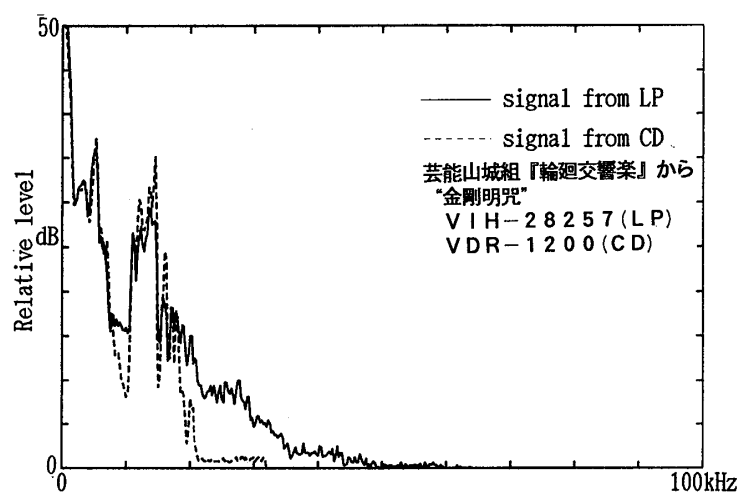


図10.1 LPとCDの再生音のパワースペクトル(1)  
 (cartridge: DENON DL-103-LCOFC)

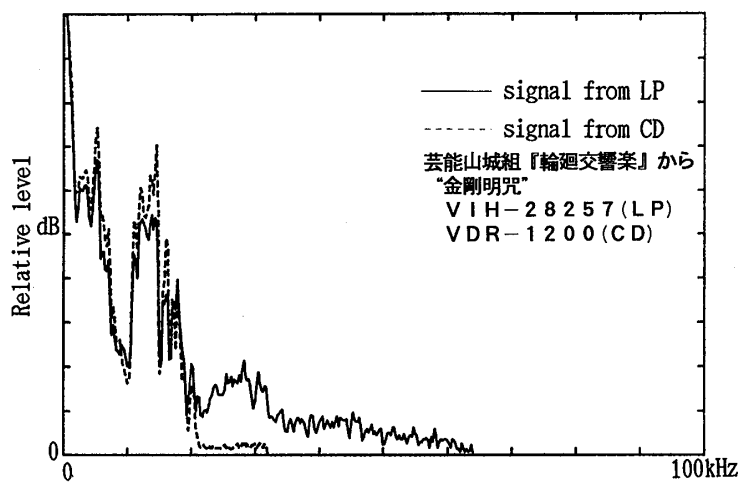


図10.2 LPとCDの再生音のパワースペクトル(2)  
 (cartridge: DENON DL-1000)

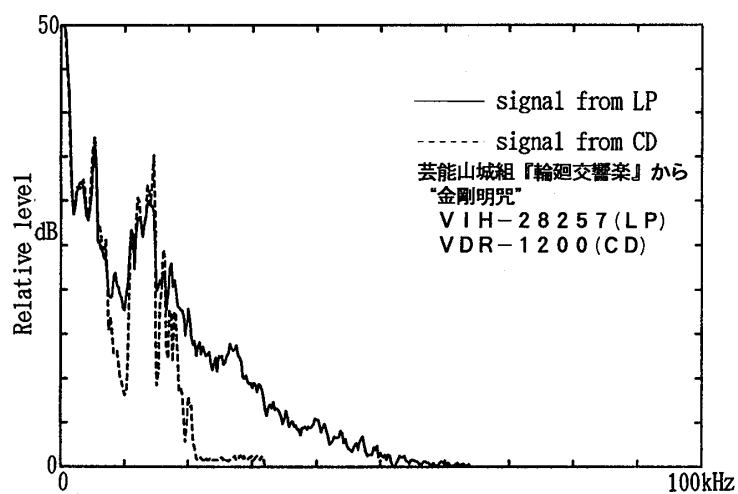


図10.3 LPとCDの再生音のパワースペクトル(3)  
 (cartridge: SATIN M-21P)

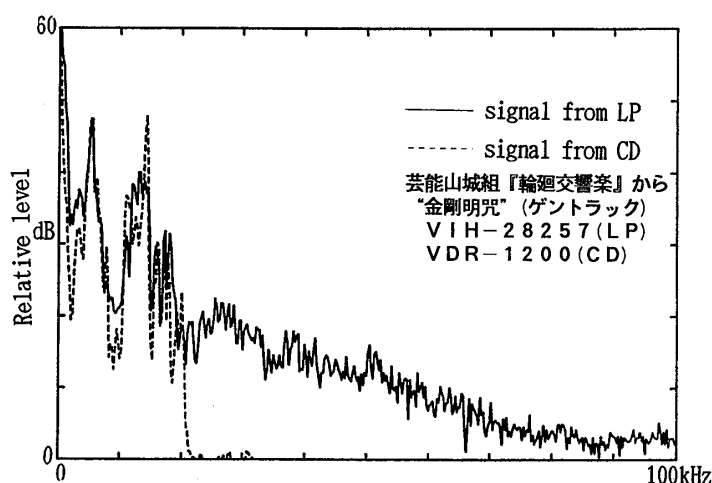


図10.4 LPとCDの“ゲントラック”（鈴の一種）再生音のパワースペクトル  
(cartridge: DENON DL-1000)

までバランスよくパワーが分布している。高周波パワーの総量としては、このM-21Pがもっとも豊富に高周波成分を再生していた。

図10.4は、DL-1000をもちいて、曲中のガムランの楽器のひとつゲントラック（鈴の一種）がならされている箇所をくりかえしとりこんで、1分間の加算平均パワースペクトルをもとめ、CDで同様に処理した場合と比較したものである。このデータでみるかぎり、LPでは100kHzあるいはそれをうわまわる高周波成分が、再生可能な状態で記録されている可能性があることを否定できない。

#### 10.2.4 考 察

今回とりあげた素材に関するかぎり、LPに50kHzをうわまわる高周波が再生可能な状態で記録されていることにはほぼ疑問の余地はないものとかんがえられる。瞬間的ながら100kHzに達する信号が検出されたことは、注目される。また、使用するカートリッジによって、再生信号にふくまれる高周波領域のパワースペクトルにかなりのちがいがみとめられた。これは、カートリッジのちがいによる音質差との関係で興味深い。CDには当然ながら、22kHz以上の高周波は記録されていなかった。

この結果からみると、優秀なカートリッジとスピーカとを使用すれば、LPからは可聴域上限である20kHzをはるかにうわまわる音を再生しうるといえる。事実、わたくしたちが開発・使用している先述のダイヤモンド薄膜製ドーム型ツイーターをそなえた超広帯域スピーカ・システム(OOHASHI MONITOR)で再生すると、聴取位置で測定したLP再生音とCD再生音との周波数分布のちがいは歴然たるものだった。

### 10.3 おなじソースからつくられたLPとCDとの再生音がひきおこす生理的反応の比較検討

#### 10.3.1 目 的

さきにのべたように、LPには50kHzをうわまわる高周波が再生可能な状態で記録されてい



るだけでなく、瞬間的には100kHzに達する信号を記録・再生していることがわかった。また、使用するカートリッジによって、再生信号にふくまれる高周波領域のパワースペクトルにかなりのちがいが生じることがみられた。CDには当然ながら、22kHz以上の高周波は記録されていなかった。また、優秀なカートリッジとスピーカーとを使用すれば、LPからは20kHzをはるかにうわまわる音を再生しうることもわかった<sup>5)</sup>。

そこでひきつづき、LP再生音とCD再生音とが生理的反應のちがいをひきおこすかどうか、ちがいがあった場合、それは可聴域をこえる高周波成分の共存によるハイパーソニック・エフェクトに関連がないかどうかにとくに注目して、両者を比較検討することにした。そのために、第4章に述べた脳電位活性を指標とする生理学的なメディア評価手法<sup>3,6)</sup>を導入した実験を計画・実施した。

### 10.3.2 材料と方法

#### (1) 音 素 材

前項とおなじ『輪廻交響楽』を音試料としてえらんだ。4楽章からなるこの『輪廻交響楽』の第4楽章『転生』のなかの「鼓動のバリエーション」「幻視のガムラン」あわせて160秒間を音試料として使用した。この部分は、インドネシア・バリ島の巨竹打楽器アンサンブル・ジェゴグ、青銅の打楽器アンサンブル・ガムラン、シンセサイザー等によって演奏されている。

LP再生上の不安定要因を排除するために、LP、CDそれぞれから再生されたアナログ電気信号を、山崎の高速標本化1ビット方式<sup>7)</sup>によって一旦AD変換・デジタル記録し、これを再生して比較をおこなうことにした。LPの再生用プレーヤーとしてMICRO SX8000IIをもちい、ピックアップ・カートリッジには、DENON DL-1000を使用した。CDの再生には、CDプレーヤーSONY CDP-X555ESAをもちいた。AD/DA変換は、山崎の高速標本化1ビット方式により標本化周波数1.92MHz、量子化ビット数1ビットでおこない、信号はYAMAHA DRU-8(改)で磁気テープに記録した。

#### (2) 再 生 系

被験者への音呈示には、CDの記録周波数上限にあたる22kHz以上の成分と、それ以下の成分とをわけてそれぞれ独立に再生するバイチャンネル再生系<sup>8)</sup>をもちいた。すなわち、DRU-8(改)のステレオ再生音をそれぞれ分岐させ、その一方をON/OFFスイッチを介して遮断周波数22kHzのハイ・パス・フィルター(7次連立チェビシェフ、NF製FV661)に入力し、もう一方をおなじく遮断周波数22kHzのロー・パス・フィルター(7次連立チェビシェフ、NF製FV661)に入力した。ハイパス、ローパスそれぞれのフィルター通過後の信号は、完全に独立したアンプリファイアおよびスピーカー(100kHzまで再生可能なオリジナル3ウェイ・スピーカー、OOHASHI MONITOR)をもちいて再生した。このバイチャンネル再生系は、前述のとおり、通常方式における「フィルター通過またはバイパスのどちらかをえらぶ操作」にともなう再生信号になんらかの影響をあたえる可能性をもつ過程が排除されている。

この実験では、(a) LP再生音(LPのFull Range Sound=LP-FRS)、(b) CD再生音、(c) LP再生音から22kHz以上の高周波成分をカットした音(LPのHigh Cut Sound=LP-HCS)を再生呈示した。

### (3) 被 験 者

19～27才の健常な大学生と社会人8名（男性4名、女性4名）を被験者とした。

### (4) 実験手順

4章でのべたものとおなじシステムおよび指標を使用した。実験にさきだち、被験者の耳の位置にマイクロフォン B&K4135をおいて計測した呈示音のパワースペクトルを図10.5にしめす。

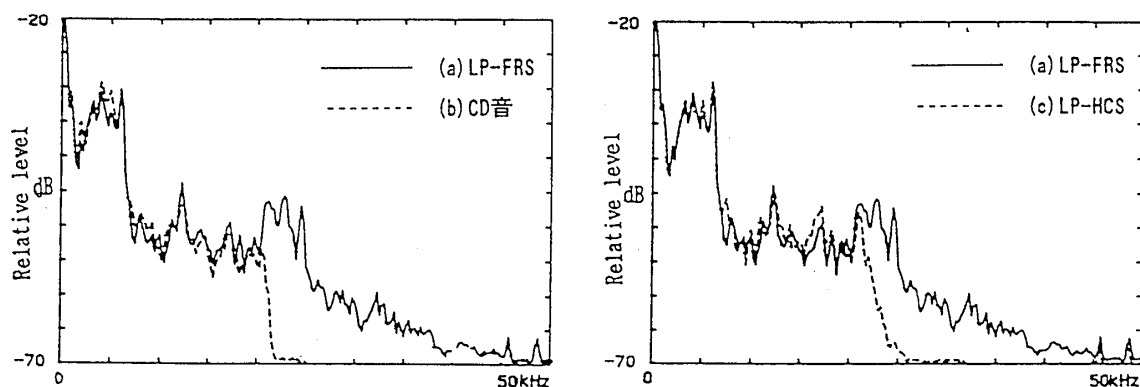


図10.5 被験者位置で計測した呈示音のパワースペクトル

この場合、LP 中にふくまれる一方、CD 中にはふくまれていない高周波の効果をとらえるため、LP 再生信号中の高周波成分を CD に近似のレベルに制限した条件をくわえて全体の呈示音の組合わせを構成した。(a) LP-FRS には平均値で50kHz におよぶ豊富な高周波成分がふくまれており、(b) CD 音には22kHz 以上の成分はふくまれていない。また、(c) LP-HCS には、25kHz 以上の高周波成分はふくまれていない。

被験者に脳波導出用電極を装着し、まず安静開眼状態で2分間の脳波を記録した。つぎに、おなじく開眼状態で、上記の(a)～(c)の3種の再生音を各1回づつ、ランダムな順序で、ブラインド・ホールド下で被験者に呈示した。そののち数分間の休憩をとり、呈示音の順序をランダムに変更して同様の実験をくりかえした。この間の被験者の脳波は、すべて第4章でのべたシステムで連続して記録し、分析をおこなった。

脳波データの解析にあたっては、まず第一に、わたくしたちがさきにみいだしている[高周波共存による $\alpha$ 波パワーの増大は高周波を排除しても60秒以上にわたって残留する]という現象<sup>3)</sup>を考慮して分析をおこなった。すなわちこの場合には、(a)～(c)の3種2回づつの音条件について、それぞれ音呈示開始直後60秒間のデータを除外し、60～150秒の90秒間のデータを解析対象として、まず、画像解析によって被験者ごとの脳波等電位図をえがいた。ついで、8名の被験者のデータを加算し、全被験者の脳活性の変化を総合した平均脳波等電位図をえがいた。さらに、眼球運動等に由来するノイズに汚染されにくく、開眼条件下で高周波の影響を反映しやすい領域であることがみだされている頭頂部の電極(Pz)を中心とする頭皮上30分の1の面積をしめる領域のデータ<sup>4)</sup>を素材にして、8名の被験者の $\alpha$ 波パワー平均値を算出し、比較検討をおこなった。第2に、呈示過程での $\alpha$ 波パワーの変化する状態を追跡した。前記の方法にもとづき、音呈示開始から30秒きざみに $\alpha$ 波パワー平均値によって脳波等位図を作成し、時間軸

上に配列して比較検討をおこなった。

### 10.3.3 結 果

呈示した3種類の音、LP-FRS、LP-HCS、CD音それぞれについて、8名の被験者の $\alpha$ 波パワー平均値によってえがいた脳波等電位図を図10.6に、またこの $\alpha$ 波パワーの数量化結果を表10.1にしめす。いずれも、LP-FRSが呈示されたときの $\alpha$ 波のパワーがもっともおおきく、ついでLP-HCS、CD音の順でその値が低下している。数量化データをt検定をもちいて統計的に検討したところ、LP-FRSとLP-HCS、およびLP-FRSとCD音とのあいだの差には、危険率0.01で有意性がみとめられた。LP-HCSとCD音とのあいだの差には有意性はみとめられなかった。

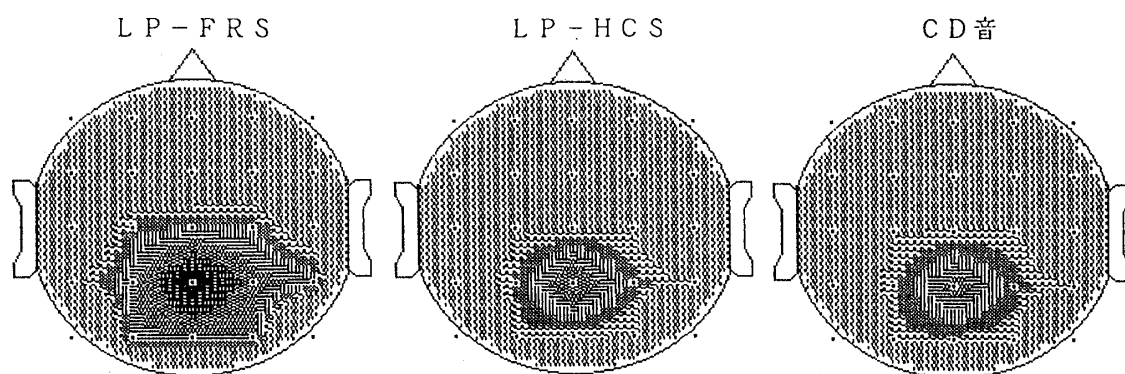


図10.6  $\alpha$ 波パワー平均値によってえがいた脳波等電位地図（8名の被験者平均）

表10.1  $\alpha$ 波パワーの数量化結果

呈示音	LP-FRS	LP-HCS	CD音
$\alpha$ 波パワー 平均値	20.5 ( $\mu$ V)	1.89 ( $\mu$ V)	1.86 ( $\mu$ V)

つぎに、LP、CDそれぞれの再生音呈示状態下の $\alpha$ 波データについて、 $\alpha$ 波抑制が観察された音呈示開始後30秒間の区間をのぞき、音呈示開始30秒後から呈示終了までの150秒間のデータについて $\alpha$ 波パワーの全被験者平均をもとめ、画像解析をおこなって脳波等電位図をえがき、音呈示前の安静時2分間のデータからも等電位図をえがいて、3者を比較した(図10.7)。この画像から、音を呈示していない実験前の $\alpha$ 波パワーに対してLP音呈示中の $\alpha$ 波パワーがあきらかに増大する一方、CD音では $\alpha$ 波パワーが若干低下する傾向がみとめられた。そこで、音呈示開始直前と、呈示終了直前30秒間の $\alpha$ 波パワーを数量化し、t検定によって解析したところ、LP音では、 $\alpha$ 波パワーの増加が危険率0.025で支持された。CD音による $\alpha$ 波パワーの低下現象は統計的有意水準にいたらなかった。LP音呈示中の $\alpha$ 波パワーが、CD音呈示中のパワーをうわまわっていることは、危険率0.025で有意にしめされた。

さらに、音呈示過程30秒区間ごとの、8名の被験者すべての $\alpha$ 波パワー平均値からえがいた脳波等電位図の変化する状態を、図10.8にしめす。音呈示開始直後の30秒間は、LPの再生音の場

合、 $\alpha$  波パワーがいったんよりひくいレベルに抑制されるのに対して、CD 再生音ではそうした反応はみられなかった。つづく30～60秒区間でLP 再生音では顕著にパワーが増大した。その後は、LP 再生音では  $\alpha$  波がたかいレベルではほぼ一定して推移しているのに対して、CD 再生音では徐々にパワーが低下していくという傾向がみとめられた。

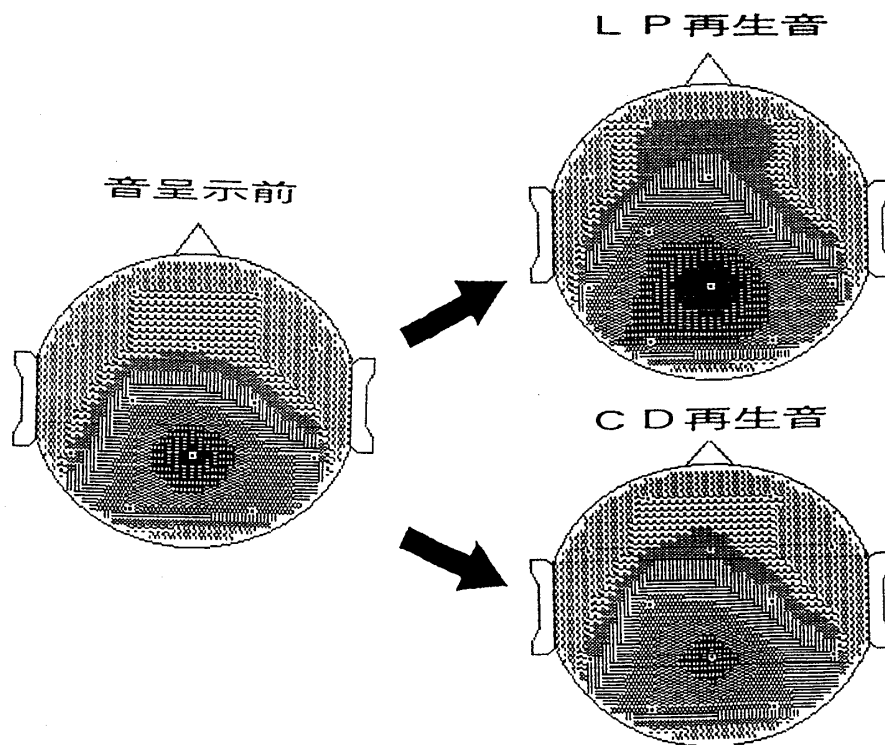


図10.7 音呈示前後の  $\alpha$  波パワーの変化

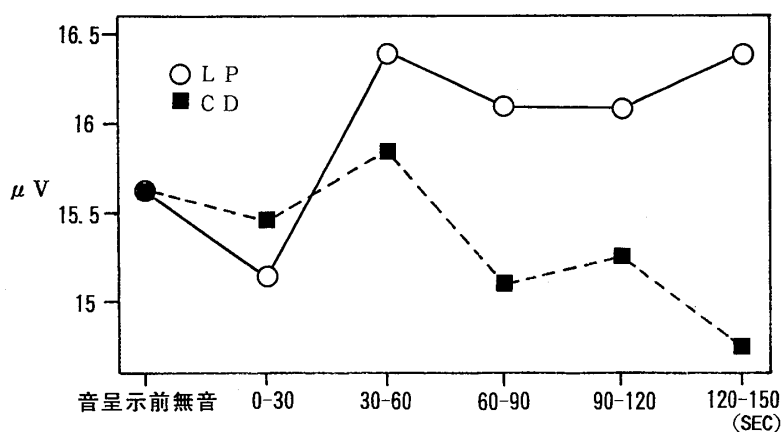


図10.8  $\alpha$  波パワー平均値の時間的变化  
(8名の被験者平均)

#### 10.3.4 考 察

この生理学的評価実験によって、LP 再生音は、快適性の指標である  $\alpha$  波パワーを音呈示前の状態よりもあきらかに増大させ、その状態をかなり安定して維持する効果をもつことが観察された。それに対して、CD 再生音には、時間とともに  $\alpha$  波パワーを減少させていく傾向がみられた。メディアをもちいた音楽聴取は数十分間以上におよぶ場合がおおいので、高周波成分の有無による生理的影響のちがいは時間とともに増幅され、より顕著なものになっていく可能性がたかい。このことには、脳と音環境との調和という面からも注意すべきではないかとおもわれる。これに関連してわたくしたちは、48kHz、16bit の現行規格 DAT 再生音を十分間以上呈示したとき、 $\alpha$  波のパワーがきわめておおはばに低下することを観察している<sup>10)</sup>。

#### 10.4 おなじソースからつくられた LP の再生音と CD の再生音とがみちびく感性反応の比較検討

わたくしたちは、第6章でのべたように、ハイパーソニック・エフェクトのおおきな側面として、[可聴域をこえる高周波成分を豊富にふくんだ自然音が、その高周波成分を除外したものよりもより快適に知覚される効果]をみだしている<sup>3)</sup>。この現象を考慮にいれると、LP と CD との音質差のすくなくとも一要因として、LP に豊富にふくまれ CD にはほとんどふくまれていない可聴域をうわまわる高周波成分が、LP と CD との音質のちがいに参与している可能性がかんがえられる。そこでこのことをたしかめる実験をこころみた。

##### 10.4.1 実験方法

- (1) 材料および音呈示系：すべてこれまでの実験とおなじものをつかった。
- (2) 感性反応比較実験：第9章でのべたように、わたくしたちは、CCIR が推奨しているサーストンの原理にもとづく一対比較法は、高周波成分の影響の残留によって結果が混乱する可能性をもち、高周波をふくんだ音の音質評価にもちいるうえで問題があることを指摘している<sup>3)</sup>。この方法では、10～15秒程度のながさのふたつの音試料を一対にして、1秒前後の間隔をおいてつづけて被験者に呈示する。そのため、直前に呈示した音試料に高周波が豊富にふくまれている場合、その影響がつぎの音試料呈示時の反応にオーバーラップすることを回避できない。そこで、高周波を豊富にふくむ音試料をもちいる実験においては、そうした混乱をふせぎうるシェッフエの一対比較法を利用してきた<sup>5)</sup>。今回もシェッフエの方法を採用し、2分以上のながさのふたつの音試料を一対にして十分な間隔をおいて呈示する条件を設定して、まえに呈示した高周波共存音の影響をうけにくくした。両者の呈示後、被験者たちに20の評価語対について5段階の評価をもとめ、結果を t 検定によって統計的に解析した。

##### 10.4.2 結 果

主観的音質評価実験の結果を表10.2～3にしめす。まず、LP 再生音 (LP-FRS) と CD 再生音とを比較すると、20の評価語対のうち7つの評価語対で、両者の音質差が検知されているという結果がえられた(表10.2)。すなわち、[LP 再生音は CD 再生音よりも、よりやわらかく(危険率0.01)、厚く、みみあたりよく、うるおいがあり(以上、危険率0.025)、おくゆきがあり、

第Ⅲ部 人類をとりかこむ空気振動の物理構造とそれに対する人間の感受性

表10.2 主観的音質評価実験の結果（その1）

LP-FRS—CD 音	危険率
柔らかい—固い	0.01 (q=3.10)
厚い—薄い	0.025 (q=2.76)
耳当りよく響く—刺激的に響く	0.025 (q=2.49)
うるおいがある—かわいている	0.025 (q=2.37)
奥ゆきのある—奥ゆきのない	0.05 (q=1.94)
リラックスした—緊張した	0.05 (q=1.92)
雰囲気豊かな—雰囲気が乏しい	0.05 (q=1.87)
疲れない—疲れる	— (q=1.78)
ニュアンスの—ニュアンスの	— (q=1.73)
変化が大きい—変化が小さい	— (q=1.73)
情報が豊か—情報が少ない	— (q=1.73)
自然な—人工的な	— (q=1.59)
軽い—重い	— (q=1.56)
きめこまかい—きめがあら	— (q=1.50)
広がりがある—広がりのない	— (q=1.48)
低音がめだつ—高音がめだつ	— (q=1.44)
静か—にぎやか	— (q=1.31)
余韻型—アタック型	— (q=1.27)
リアリティがある—リアリティに欠ける	— (q=1.17)
好き—嫌い	— (q=0.67)
楽器がつり—特定の楽器	— (q=0.34)
あっている—がめだつ	

表10.3 主観的音質評価実験の結果（その2）

LP-FRS—LP-HCS	危険率
楽器がつり—特定の楽器が	0.005 (q=3.72)
あっている—めだつ	
ニュアンスの—ニュアンスの	0.005 (q=3.52)
変化が大きい—変化が小さい	
広がりがある—広がりのない	0.01 (q=3.00)
情報が豊か—情報が少ない	0.01 (q=2.94)
リアリティがある—リアリティに欠ける	0.025 (q=2.81)
軽い—重い	0.025 (q=2.67)
柔らかい—固い	0.025 (q=2.49)
奥ゆきのある—奥ゆきのない	0.025 (q=2.49)
自然な—人工的な	0.025 (q=2.34)
疲れない—疲れる	0.025 (q=2.28)
うるおいがある—かわいている	0.05 (q=2.25)
耳当りよく響く—刺激的に響く	0.05 (q=2.18)
雰囲気が豊か—雰囲気が乏しい	0.05 (q=2.09)
厚い—薄い	0.05 (q=1.96)
余韻型—アタック型	— (q=1.79)
リラックスした—緊張した	— (q=1.73)
きめこまかい—きめがあら	— (q=1.62)
静か—にぎやか	— (q=1.58)
好き—嫌い	— (q=0.87)
高音がめだつ—低音がめだつ	— (q=0.76)

表10.4 主観的音質評価実験の結果（その3）

LP-HCS—CD 音	危険率
耳当りよく響く—刺激的に響く	— (q=1.43)
自然な—人工的な	— (q=1.21)
楽器がつり—特定の楽器	— (q=1.27)
あっている—がめだつ	
余韻型—アタック型	— (q=1.04)
疲れない—疲れる	— (q=0.90)
柔らかい—固い	— (q=0.86)
静か—にぎやか	— (q=0.80)
好き—嫌い	— (q=0.55)
うるおいがある—かわいている	— (q=0.52)
低音がめだつ—高音がめだつ	— (q=0.49)
奥ゆきのある—奥ゆきのない	— (q=0.48)
雰囲気が乏しい—雰囲気が豊か	— (q=0.44)
ニュアンスの—ニュアンスの	— (q=0.42)
変化が大きい—変化が小さい	
軽い—重い	— (q=0.35)
薄い—厚い	— (q=0.33)
リアリティがある—リアリティに欠ける	— (q=0.31)
きめこまかい—きめがあら	— (q=0.28)
情報が豊か—情報が少ない	— (q=0.15)
緊張した—リラックスした	— (q=0.15)
広がりがある—広がりのない	— (q=0.14)

リラックスでき、雰囲気がゆたかである（以上、危険率0.05）]と感じられていることがしめされた。

つぎに、LP-FRS と LP-HSC とを比較すると、20の評価語対のうち CD と比較した場合よりもおおい14対で両者の音質差が検知されていることがしめされた(表10.3)。LP-FRS は、その22kHz 以上の成分をカットした LP-HCS にくらべて、[より楽器がつりあい、ニュアンスの変化がおおきく(以上、危険率0.005)、ひろがりがあり、情報がゆたかで、自然で(以上、危険率0.01)、リアリティがあり、かるく、やわらかく、おくゆきがあり、つかれず(以上、危険率0.025)、うるおいがあり、みみあたりよく、雰囲気ゆたかで、厚い(以上、危険率0.05)]と感じられている。この結果をみると、LP と CD との比較の際に音質差が有意に検知されていた7項目のうち6項目がふくまれている。つまり、LP 再生音と高周波を除外したそれとのあいだのちがいは、LP 再生音と CD 再生音との主観的音質評価実験の結果と、非常に共通性がたかい。しかもその差は、項目数からも統計的検定値からも、LP と CD との差よりもよりいちじるしいことがしめされており、きわめて興味ぶかい。一方、LP-HCS と CD 音との比較においては、どの評価語対においても統計的に有意な差はみいだせなかった(表10.4)。つまり、LP 再生音から高周波成分をのぞくと、CD 再生音とあまり区別がつかないことがしめされた。

#### 10.4.3 考 察

LP と CD とが記録している音声信号には予想以上におおきなちがいがあった。LP が100 kHz に達する高周波を再生可能な状態で記録していたことは驚嘆に価する。

脳波等電位図の比較および  $\alpha$  波パワーの数量化結果は、LP に豊富にふくまれ CD では除外されている可聴域以上の高周波成分が、 $\alpha$  波のパワーを増大させていることをしめしている。

感性反応比較実験についてみると、LP-FRS と CD 音とのあいだ、そして LP-FRS と LP-HCS とのあいだに音質差がみとめられた。この研究の作業仮説からみて、LP-FRS と、それから CD の記録周波数上限である22kHz の以上の成分をとりのぞいた LP-HCS とのあいだに顕著な音質差が検知され、しかもその内容が LP-FRS と CD 音とのあいだに知覚された音質差と共通性がたかいことは、LP-HCS と CD 音とのあいだに音質差が検知されなかったこととあわせてきわめて興味ぶかい。これによって、LP と CD との音質差のおもな要因が、LP 再生音に豊富にふくまれる半面 CD 再生音にはほとんどふくまれていない可聴域上限をこえる高周波成分の有無とつよくむすびつく。これらの結果から、LP 再生音に豊富にふくまれ、CD 再生音にはふくまれない可聴域上限をこえる高周波成分が誘起するハイパーソニック・エフェクトが、LP と CD との生理的・感性的な反応のちがいをみちびきだしている可能性がたかいという作業仮説は有力な支持材料をうることができたのではないかとかんがえる。

LP と CD とのあいだの音質のちがいは、社会的におおきな関心をよんでいる。しかし、両者のあいだに生じているとされる差異の実体、あるいは、いわれるような差異を生じる原因などについては、これまで、現代科学の標準的な水準からの説明がほとんどなされていないといつてよいのではないだろうか。わたくしたちは、できるだけ性能や信頼性がたかい評価手法を開発しながら、さまざまな音メディアがみちびく人間の反応を、こころ＝感性、からだ＝生理の両面から総合的に比較検討してきた。この実験結果から、LP と CD というふたつの電子メディアが人間にもたらす反応のちがいが、心理、生理両面で無視できないこと、そうしたちがいをみちびく要因のおそらく最大のものが、LP には相当にふくまれうるが CD にはほとんどふく

まれない可聴域をこえる高周波成分によるであろうことが、かなり明確になったのではないかとおもふ。今回使用した音源は、前述の山崎教授の高速標本化1ビット方式によりデジタル処理されたものなので、ここにみいだされた差は、アナログ方式かデジタル方式かという論議の対象にはならない。したがって、現在のCDにいわれる音質の限界の打破は、LPに復古する以外に、高速標本化1ビット方式など他の高域応答特性を拡張する手段によっても、打破することが可能とかがえられる。

〈文 献〉

- 1) Schoepe, Z., Rupert Neve Interview, Sound & Recoding Magazine, 10 (5): 31-34, 1991.
- 2) 山田尚勇、音楽鑑賞における快感の1要素について、学術情報センター紀要、No.5、1992.
- 3) Oohashi T., Nishina E., Kawai N. Fuwamoto Y, & Imai H., High frequency components above the audible range affects brain electric activity and sound perception, 91st Convention of the Audio Engineering Society, 3207, New York, 1-25, 1991.
- 4) 仁科エミ、大橋 力、河合徳枝、不破本義孝、当摩昭子、ガムラン音高周波成分の生理的影響について、日本音響学会平成4年度春季研究発表会講演論文集、397-398、1991.
- 5) 大橋 力・仁科エミ・不破本義孝・河合徳枝：同じ音楽ソースからつくられたLPとCDとの間の再生信号・感性反応のちがい、第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集、pp.57-64、1993.
- 6) 不破本義孝・大橋 力・仁科エミ・河合徳枝・高田智史・田中基寛：目を開いた状態で観測される $\alpha$ 波活性を指標とする情報環境の評価法について、第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集、pp.209-216、1993.
- 7) 山崎芳男、量子化雑音のスペクトル分布に着目した高速1 bit 広帯域信号処理、AES 東京コンベンション '91予稿集、168-171、1991.
- 8) 大橋 力・仁科エミ・河合徳枝：環境高周波音の生理的・心理的機能に関する“トランス誘起モデル”とその検証、日本音響学会聴覚研究会資料、H-88-86、pp.1-8、1988.
- 9) Sheffe H., An analysis of variance for paired comparisons, L. Am. Stat Ass, 47, 381-400, 1952.
- 10) 大橋 力：快適な音環境の情報学、放送教育開発センター研究紀要第7号、pp.53-101、1992.



## 第IV部 ハイパーソニック・エフェクト応用のこころみとその評価

都市では動植物をはじめとする自然環境音発生源が極度に減少する一方で、車両や機械などの騒音発生源が激増し、それに対応して建築物の遮音性を高度化した結果、屋内では、壁を透過することのできるひくい周波数の成分をのぞいて、ほとんど音がないような環境が出現している。それに対して、自然性のたかい音環境では、周波数スペクトルのうえでは可聴域上限である20kHzをはるかにうわまわる高周波領域にまでかなり顕著なパワーがみとめられる。また都市環境音と自然環境音とでは、そのゆらぎ構造の面でも、おおきなへだたりがある。つまり、現在の都市の音環境については、プラス要因としての音が減少し、マイナス要因としての音が増大するという二重の打撃がおよんでいることがわかる。したがって、ここに直面している問題を解決するためには、マイナス要因の排除だけではかたておちであり、プラス要因の補完をかくことができない。このような理由から、都市の屋内外に、環境のプラス要因としてはたらく音源を今後復活ないし造成することは、困難ではあるが避けることのできない課題といえる。その主力は、発生する音のクオリティーが物理構造の面からみてもっとも優秀な、そして脳・神経系との親和性が歴史的、経験的に確認されている点でもっとも安全な動植物性の音源でなければならないだろう。そうすることによって必然的に起こる昆虫や微生物などの増殖が、生物との共生について科学的・技術的検討がたちおくらしている現在の都市計画や環境衛生と抵触しないための工夫など、関連して発生する問題のたくみな解決も準備されなければならない。

しかしながら、精密な科学技術的作業環境など、動植物の共存が不可能な空間や、既存の高層高密度住宅屋内などでは、自然の音源を導入する方途は事実上とざされている。そこで、こうした空間では、電子メディア技術によってしかるべきバックグラウンド環境音を補完的に再生し、原環境音とあわせて適切な音環境を造成することが、一定範囲でゆるされてよいだろうとかんがえる。これについては、人間と音環境との関連についての科学的な検討と、たかい水準の技術とを本格的に応用することによって、かなりの効果を期待することができる。第IV部では、その実例として、この研究でみいだされたハイパーソニック・エフェクトを応用し、その有効性が貢献しているとかんがえられる事例を紹介する。

### 第11章 情報遮閉性作業空間の音環境を改善する<sup>1)</sup>

#### 11.1 モデル空間の設定

きわめて高度に遮閉され、外部からまったく自然環境音が到達できない先端技術の作業空間やオーディオ・ビジュアル装置による学習環境などが、いま急激に増加しつつある。こうした

空間では、集中性のたかい高度な作業や学習を長時間にわたって持続する必要があり、脳に対する負担は非常におおきい。そのため、そうした空間が、脳とどの程度調和する情報環境の特性をそなえているかがきわめて重要な問題となる。

このような問題をもっている作業空間の典型例として、大型工場の中央制御室の音環境をとりあげ、簡単なシステムをつかって、ハイパーソニック・エフェクトの応用による音環境改善の可能性を、予備的に検討してみた。まず、わたくしたちが開発した音環境の物理構造解析手法をもちいて、この部屋の前環境音の計測と解析とをおこなった(図11.1)。その結果、この中央制御室の前音環境は、大型機械の動作音、電子機器の冷却ファン・ノイズ、空調ノイズを主な音源とする低域側にわたった周波数スペクトルをもち、それに機器類の発するランダムなノイズや30kHz～50kHzといった超高周波領域に鋭いピークをもつ発振ノイズがくわわることによって、自然の快適な音環境とはほどとおい構造をもっていることがわかった。

## 11.2 超広帯域音環境造成システムのハードウェア

この作業空間に、可聴域をこえる超高周波領域まで再生可能な図11.2にしめすバイチャンネル再生装置系を設置し、この空間の前環境音に、高周波成分を豊富にふくむ環境音と高周波成分をカットした環境音とを交互に再生付加できるようにした。再生装置系は、前章でのべた高周波附加～除外実験でもちいたシステムを、作業の障害にならないように極力コンパクトにくみなおして使用した。

## 11.3 超広帯域音環境造成システムのソフトウェア

作業空間において使用するバックグラウンド環境音は、作業のさまたげになってはならないことはいうまでもない。作業者の集中力をそいだり、注意をひいたりすることがないようにするためには、旋律をもった音楽などを使用することはかならずしも適切とはいえない。そこで、

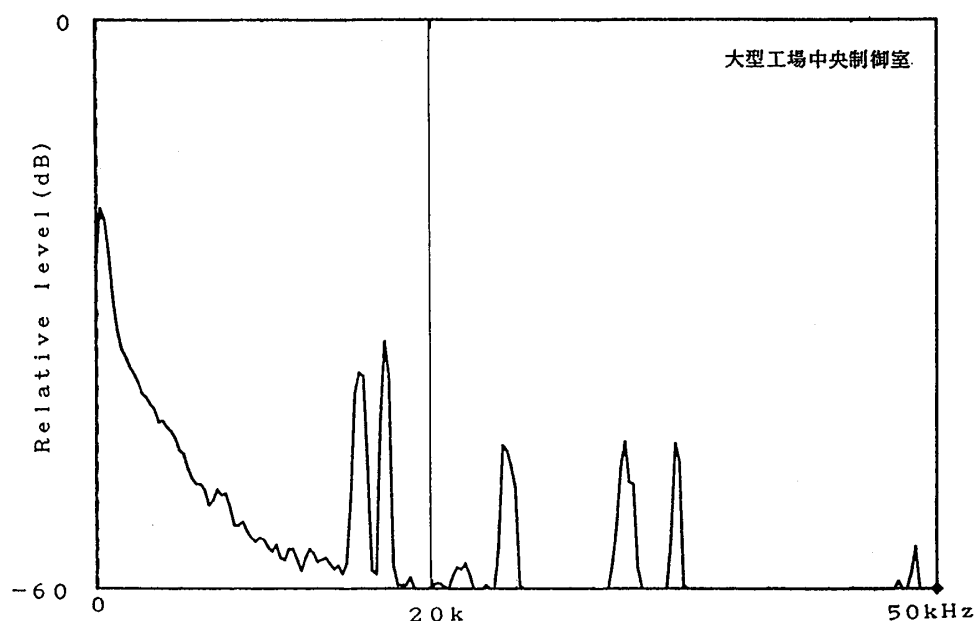


図11.1 情報遮閉性執務空間の前環境の周波数分布

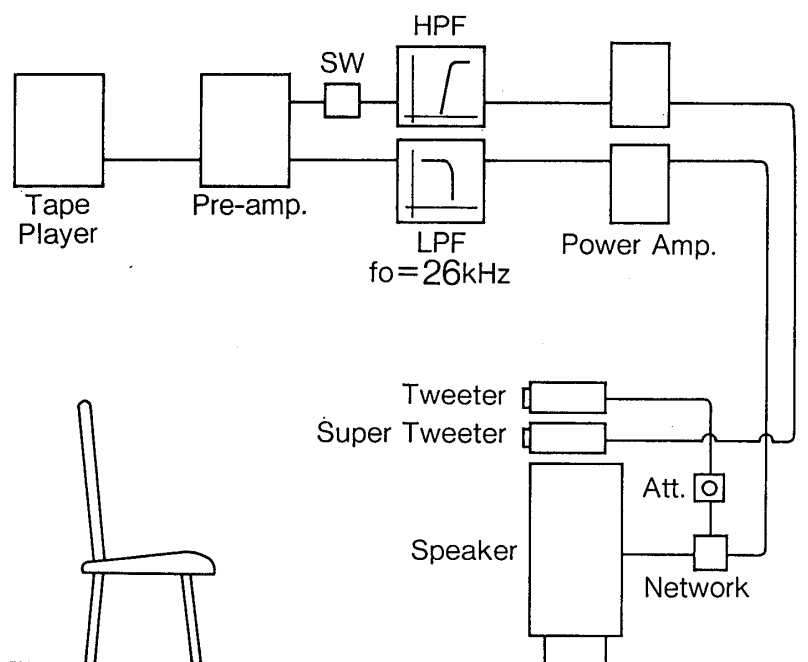


図11.2 超広帯域音環境造成システム・ブロックダイアグラム

ここで使用する音素材として、ハイパーソニック・エフェクトを期待できる優秀な音素材であり、かつ作業者にその存在を意識されにくい自然環境音をえらぶこととし、インドネシア・バリ島の快適な自然環境で収録した鳥や虫の声をふくむ環境音を選択した。

#### 11.4 超広帯域音環境造成システムの評価

##### (1) 造成された音環境の物理特性

以上のハードウェアおよびソフトウェアの機能が目的の水準を達成しているかどうかについて、まず、このシステムによって造成された音環境の物理特性の測定を行った。被験者を用いる生理的影響の評価もあわせておこなうため、聴取者の耳の位置にマイクロフォンをおいて、再生された上記の環境音を計測・分析した。その結果、50kHz におよぶ豊富な高周波成分が被

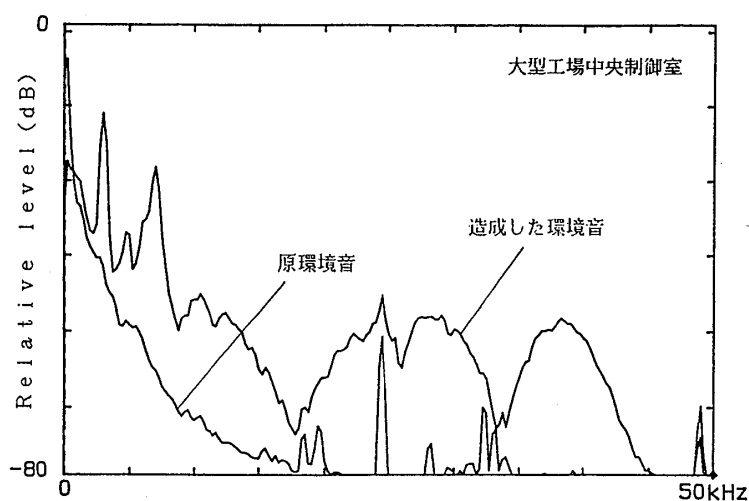


図11.3 原環境音と造成した環境音

験者まで到達していることが確認された。また電子機器のおおい作業室に特有の、超高周波領域のするどいピークをもった発振ノイズを、附加した環境音がつつみこんでいることも確認した(図11.3)。

## (2) 生理的指標による音環境造成システムの評価

さきに開発した脳活性計測法をもちいて、原音環境そのままのとき、高周波を豊富にふくむ自然環境音を附加したとき、そして高周波をカットした自然環境音を附加したときの3種類の条件下における被験者の脳活性を連続的に記録し分析した。いずれも音の呈示時間を3分間とし、順次切り替えて呈示した。自然環境音付加条件の実験では、高周波をカットしたか、カットしていないかは被験者には知らせなかった。実験は目を閉じた状態でおこなった。

まず、原環境におかれた被験者の脳電位活性をしらべると、 $\alpha$ 波の活性がひくいレベルにおさえられ、不快感やストレスを十分に排しきれていないことが示唆された。つぎに高周波を豊富にふくむ環境音を、その再生音圧が、ひかえめな音量ながら原環境音の高周波のピークなどの機械騒音をカバーするレベルに達するように供給した(図11.3)。その結果、被験者の脳電位は $\alpha$ 波の活性を上昇させ、状況が改善されたことを指標するようになった。さらにこの場合、可聴域をこえる高周波成分をバランスよく豊富にふくんだ環境音が附加されているときの方が、そうした高周波成分をカットした環境音が附加されているときよりも $\alpha$ 波パワーがより増大することがみいだされた(図11.4)。

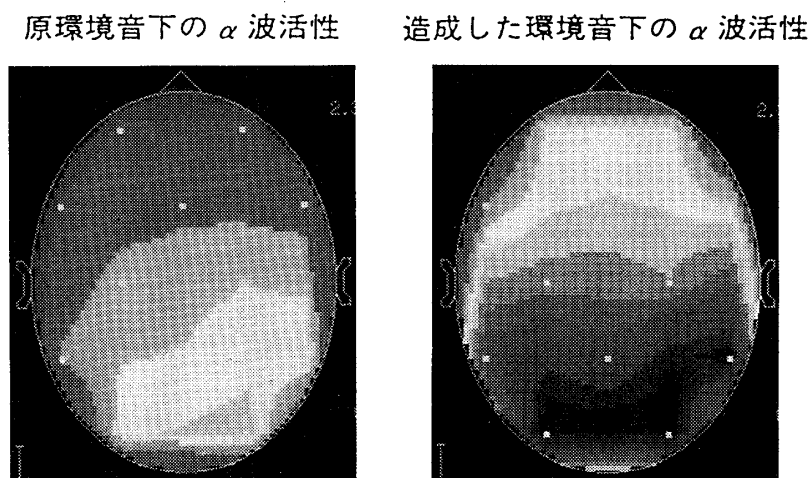


図11.4 高周波環境音再生による脳電位の変化

## (3) 考 察

現代の都市環境においては、遮閉性のたかい人工的な空間のなかで高周波成分が特異的に遮断されながら、他方では、電子情報機器に由来する超高周波領域にピークをもつ発振ノイズにさらされるという、人類がこれまで経験したことのない特異的な環境で長時間の勤務が必要な状況がひろがっている。ここでとりあげた、24時間体制で稼働しつづける大規模プラントの監視・制御室などでは、このような状況を完全に消滅させることは困難だろう。

この章でわたくしたちが予備的な開発をこころみた超広帯域音環境造成システムとその評価実験の結果は、このような状況を改善できる可能性があることを示唆している。高周波成分を

#### 第IV部 ハイパーソニック・エフェクト応用のところみとその評価

豊富にふくむ良質の自然環境音を適切に供給することによって、こうした現実の音環境の欠陥を人為的に補完し、負の影響を回避すること、いいかえれば音環境の安全性を確保し、快適な音環境を電子メディアによって造成する可能性があることを期待させるものといえる。

#### 〈文 献〉

- 1) 大橋 力：快適な音環境の情報学、放送教育開発センター研究紀要第7号、pp.53-101、1992.

## 第12章 ハイパーソニック・エフェクトを応用したリラクセーション環境シミュレーターの開発と評価

### 12.1 目 的

ここでは、前第11章の予備的検討の成果にもとづいて、より本格的な音環境改善システムの開発にとりくんだ。

現在、“シンクロエナジャイザー”や“ボディソニック”など、視聴覚情報刺激によってリラクセーションをもたらす機器がつぎつぎと開発され、ブームになっている。これは、ストレス社会のなかにあって効果のたかいリラクセーション・システムへの需要がたかまっていることをしめしているといえる。

ただしこれらのこころみが、この研究が指摘した情報と人間の脳との間のきびしい関係にみあうレベルに達しているかどうかについては、はなはだ不透明な状態にある。これらが脳が生物学的に要求する質と量とを適切にみたます情報を供給していない場合、リラクセーションや人間にやさしい環境づくりという当初の目的をはたすことが不可能であるだけでなく、むしろ負の効果をおよぼすおそれもある。不自然で刺激的な電子音やフラッシュ光を多用する一部のシステムにみられるような、自然性と極端にかけはなれた特殊な情報の過剰入力をおこなうことによって、脳に生理的なダメージがあたえられる危険性も否定できない。そのため、電子技術によって情報環境を直接操作するこころみについては、できるだけ自然の環境にちかづけることを念頭において、慎重な態度でのぞむ必要がある。

### 12.2 リラクセーション環境シミュレーターの構築

#### 12.2.1 コンセプトデザイン

人類のゆりかごといわれる熱帯雨林の情報環境は、巨大な樹木をはじめとするゆたかな植生や、そこに生きる獣、鳥、虫などさまざまな動物の発するメッセージによって、目をたのしませ耳をよるこぼせる情報にみちあふれている。ところが都市空間では、そうした自然の景観や音源が減少し、人工的建造物や機械のすがた、そしてエンジンノイズにおきかえられてきた。この不快な刺激からのがれるために、都市の生活空間はコンクリートの壁をめぐる結果、人間の基本設計に適合した環境情報がほとんど皆無にちかい状態まで欠乏するにいたっているおそれがおおきいことについては、すでに指摘したとおりである。こうしたことに対する苦痛や不安は社会的に無視できないものになってきている。そこで、わたくしたちが発見したハイパーソニック・エフェクトを活用して、悪化した都市の情報環境を効果的に改善する“リラクセーション環境シミュレーター”を構想した。これは、自然がもっていた快適な情報環境を、先端的科学・技術の支援によって都市のなかに近似的によみがえらせることをこころみる機能をそなえた実験空間である。居住性に留意してデザインされたスタジオ機能性空間に、オーディオ・ビジュアル再生システムを中心にして、1/f ゆらぎ構造を造型にとりいれた壁、森林の香りに近似させた空調、さらにリラックス効果を意識してデザインされた椅子など、環境トータルのシミュレーションを可能にする全体構成をとることにした（図12.1）。

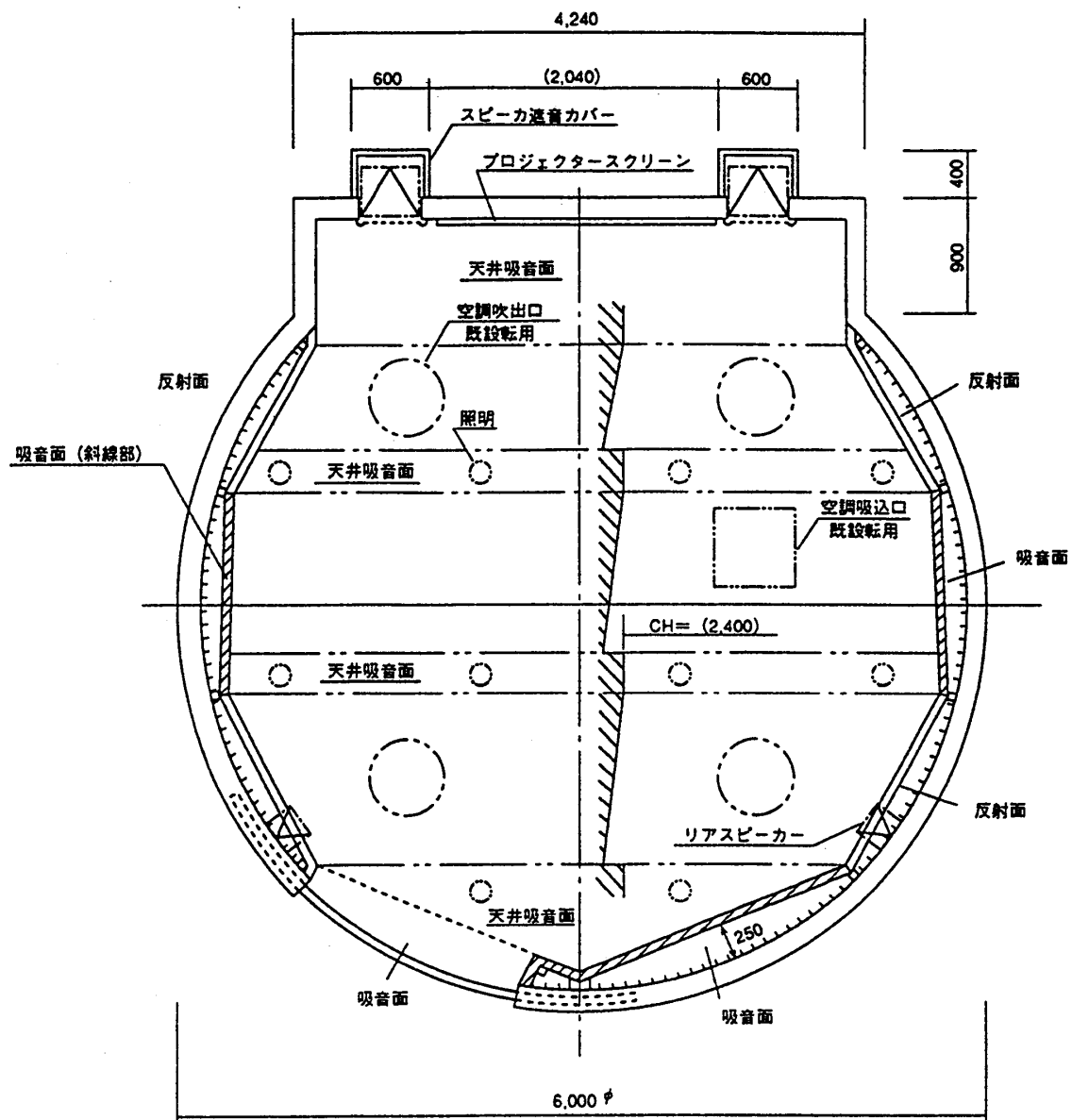


図12.1 リラクゼーション環境シミュレーターの平面図

## 12.2.2 ハードウェアの構築

### (1) 基本造形

居住性をたかめることと、高度なオーディオビジュアル情報の再生とを同時に実現することにとくに留意して、当プロジェクト大橋のコンセプトデザインにもとづき、世界的に著名な音楽スタジオ音響設計技術者であるビクター音響設計事務所の豊島政実氏に設計を依頼した。

この空間は図12.2に示すように、直径約4 mの円筒形の形状をもち、壁には吸音処理がほどこされている。前面に、100インチプロジェクター、モニタースクリーンとスピーカーが埋めこまれている。これにプロジェクター本体とサラウンドスピーカーとを天井から吊り下げて設置した。パワーアンプや音質調整用のグラフィックイコライザーなどは、目ざわりにならないように、シミュレーター外部スクリーンのうら側に設置した。

造形的な面でのおおきな特徴としては、武者利光東京理科大学教授に設計を依頼して、“1/f

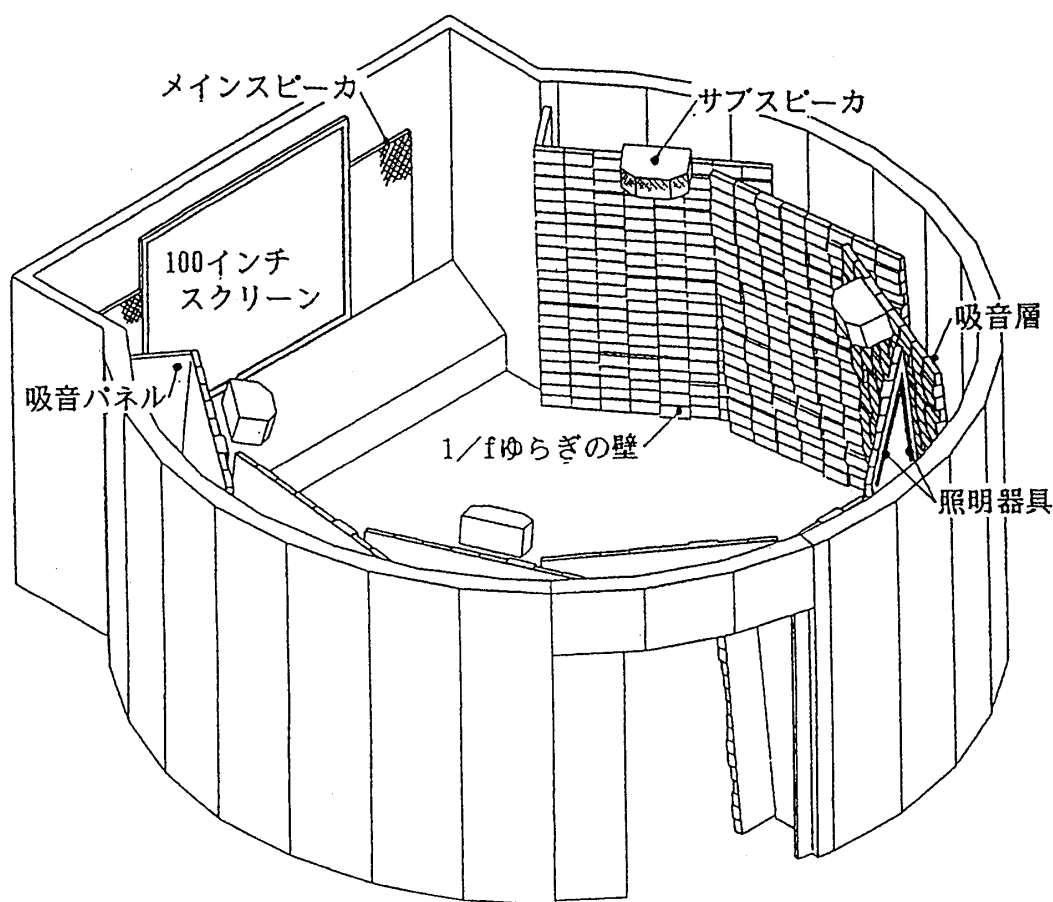


図12.2 リラクセーション環境シミュレーターの鳥瞰図

ゆらぎ”構造をもった音響反射板をつくり、シミュレーター空間内に設置した。また、空調系に鳥居鎮夫東邦大学名誉教授の開発による“香りの空調装置”を導入し、森林などの自然環境情報を嗅覚面で近似することとした。

## (2) ハイパーソニック・エフェクト応用システムの開発

### ① 超広帯域音声信号復調系

このシミュレーターには100kHzにおよぶ超広帯域の音声信号と、高品位の映像を時間的に同期させて再生する能力が要求されている。

このシミュレーターの超広帯域音声信号復調系には、第3章でくわしくのべた早大理工総研山崎芳男教授が開発した高速標本化1ビット方式によるAD/DA変換システムをS-VHSまたはEDベータビデオデッキとくみあわせて使用した。このシステムによって100kHzまでほぼフラットな記録再生を可能にすることができた。

### ② 超広帯域対応スピーカーの採用

スピーカーとしては、第3章で開発過程およびその仕様について詳述した、可聴音の中・高域の動特性を極度に向上させたあたらしいスピーカー・システム(OOHASHI MONITOR)のプロトタイプを採用した。以上のようにして、100kHzまで再生可能な“超広帯域音環境造成シ



システム”を、シミュレーター全体の柱として構築した（図12.3）。

### ③ 映像呈示系

電子景観情報の再生は、三菱電機製投射型100インチ単レンズプロジェクターを設置し、映像のソースは、当初 ED ベータ規格ビデオデッキから送り出すことにした。このビデオテープのノーマル音声トラックに SMPTE タイムコードを記録し、それに 1 ビット信号を記録した業務用 DAT を追従させることで、映像と音声との同期を達成した（第 3 章を参照）。

その後、日本ビクターはじめ数社から S-VHS テープにデジタル信号を深層記録する方式が発表されたので、これを利用してビデオ信号とディジタル・オーディオ信号とを同一のテープに記録することを企画し、このシステム開発を実現した。さらに、1 ビット用の DA 基盤をその VTR に内蔵することで、超高精度の音声と高品位の映像との同時再生を非常にシンプルなシステムで実現することに成功した。

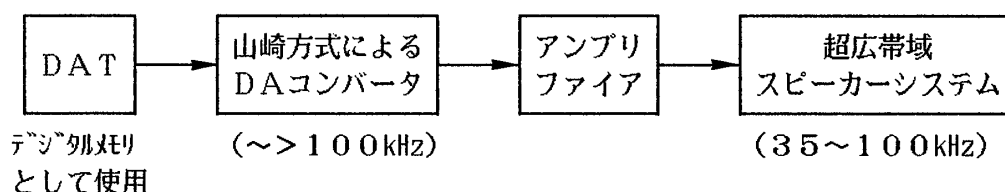


図12.3 リラクセーション環境シミュレーター超広帯域音環境造成システム

### 12.2.3 ソフトウェア

前述のハードウェアに対応して、ソフトウェアは山崎方式による超広帯域音声情報を中核にすえ、これと有機的に連関する視覚情報をもとに合わせたオーディオ・ビジュアル・ソフトウェアを試作した。山崎方式による超広帯域ディジタル・レコーダーをつかって蓄積してきた自然環境音、楽器音、人間の声などさまざまな音素材を資源として、そのなかから、リラクセーションに効果がたかいたかんがえられる音素材をえらんだ。

つぎに、これらの素材をくみあわせて、ソフトウェアを制作した。

ただしここにも重要な問題がある。それは、個々の素材の物理特性がいかにすぐれていようと、完成したソフトウェアが環境音楽あるいは、芸術作品としてみても一定以上の水準に達していなければ実用にならないということである。この課題は高度な芸術的センスや感性機能を要求するため、通常は研究者や技術者にとっては非常に困難な領域となり、その結果研究者の手をはなれて、科学的背景を高度に把握できない芸術専門家の手にゆだねられることがおおい。そのために、最終的に、開発コンセプトと矛盾をもっていたり、ハードウェアの性能を充分活かすきれない作品ができあがるという結果をみちびく可能性がきわめてたかい。

そこでわたくしたちは、ソフトウェアの構成、演出、編集のすべてを、ハードウェアの開発コンセプト、および支援技術開発と高度に融合し、一体化してすすめることにした。関連分野全体に精通した大橋が作業の統合にあたり、このシミュレーターの機能を十分に発揮し、かつハイレベルの芸術性をあわせもったオリジナルのソフトウェアを開発することにとりくみ、おおむね目的を達成することができた。

およそ30分のながさをもつこのオーディオソフトウェアは、自然性と洗練とが高度に融合し

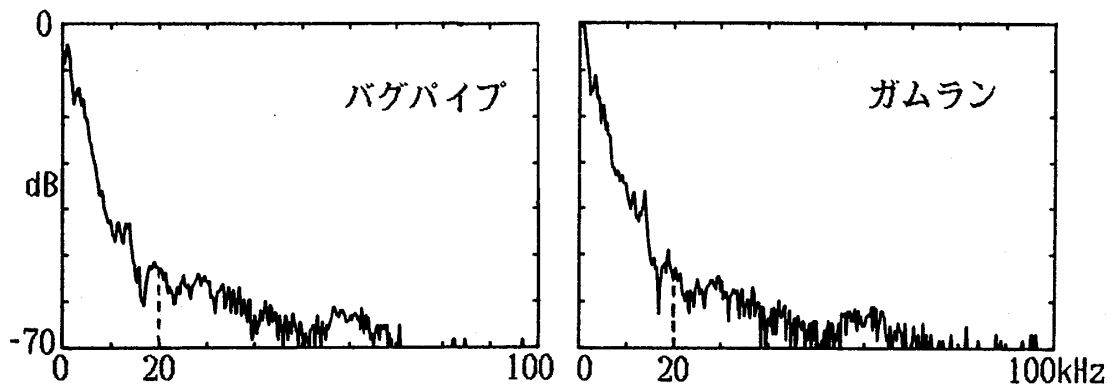


図12.4 リラクセーション環境シミュレーター内の再生音の周波数スペクトル

たブルガリア民族合唱やおなじくブルガリアの民族楽器ガイダの演奏、ガムランとシンセサイザーとをくみあわせてつくられたオリジナル作品などで構成された音楽、さらに熱帯降雨林のすぐれた環境音などを素材としている。音声信号は、50kHzをゆうにこえる高周波成分をもち（図12.4）、現在の規格によるデジタル・オーディオではけっしてあじわうことのできないつよいリラクセーション効果をもった音空間を造成することを可能にしている。視覚情報は、このソフトウェア制作のためにブルガリアでの現地ロケによって撮影された良質の環境映像を、音声情報にあわせて編集した。

### 12.3 リラクセーション情報環境シミュレーターの評価実験

#### 12.3.1 目 的

このリラクセーション環境シミュレーターの来場者は1500名をこえ、いずれも好評をえている。たとえば「人間の耳には聞こえないとされてきた高周波を含む音を、特殊な装置を使って再生、聞き手の『心地よさ』を高めてリラックスできる部屋」<sup>1)</sup>、「高周波をたっぷり浴びたせいなのか、体が軽く感じる。寝不足ぎみの頭も妙にすっきりした。」<sup>2)</sup>、「この空間に身をゆだねると、熟睡した後のようなすっきりした気分が味わえる。」<sup>3)</sup>というような報告がなされている。また、おおくの来場者がソフトウェア再生開始後10分前後でねむってしまうという現象が観察されており、緊張状態からの急速な解放が実現していることを示唆している。

そこでわたしたちは、こうしたリラクセーション効果がどのように発生しているかについて、生理学的評価実験をおこなって検討した。

#### 12.3.2 方 法

音素材は、山崎方式の768kHz・1ビットで記録されたシミュレーター専用音源と、同一のマスターテープから現行のDAT規格、すなわち48kHz・16ビットで記録された音源との2種類を用意した。4名の被験者におなじ映像を4回ずつ呈示しつつ、一人の被験者が各音声方式を2回ずつ体験するように実験をデザインした。

評価指標は、実績のあるBEAMとし、脳波を、これまでにのべてきた実験と同様テレメトリアル方式を用いて収集記録した。ただし実験者及び実験装置は、被験者の気にならないように全てシミュレーターの外に配置した。

データ解析は、 $\alpha$  波パワーに注目して画像解析をおこない、これを数量化した後に t 検定による統計解析をほどこした。

映像呈示中は、同一被験者内および被験者間で  $\alpha$  波ポテンシャルの大きな変動がみられるのでこれを避け、映像呈示直前と呈示終了直後との目を開いて安静にしている状態のパワーを比較することにした。

### 12.3.3 結 果

わたくしたちが開発したソフトウェアを、高速標本化1ビット方式で記録再生すると、被験者において、オーディオ・ビジュアル信号呈示開始直前の  $\alpha$  波活性にくらべて呈示終了直後の  $\alpha$  波の活性があきらかに増大していることが、t 検定による危険率1%、つまり、99%の有意性でうらづけられた。ところが、オーディオ信号の処理方式を現行の信号処理方式、すなわち48 kHz 標本化16ビット量子化 (24kHz 以上の高周波はカットされる) 条件にきりかえると、この効果はうしなわれるだけでなく、呈示前よりも  $\alpha$  波パワーがむしろ低下するという無視できない現象が観察された。

図12.5に、典型的な被験者の  $\alpha$  波パワーの変化の様子をしめした。可聴域をこえる高周波成分をとまなう1ビット方式による音声呈示された後では、音の呈示が始まる前よりも  $\alpha$  波のパワーが増大しているのに対し、可聴域をこえる高周波を再生できない現行方式では、統計的有意性には至らないものの、むしろそのパワーが低下している。図12.5でとりあげた被験者では、4回の条件の切り替えに追従して、パワーの増減がはっきりとスイッチングする現象が観察された。

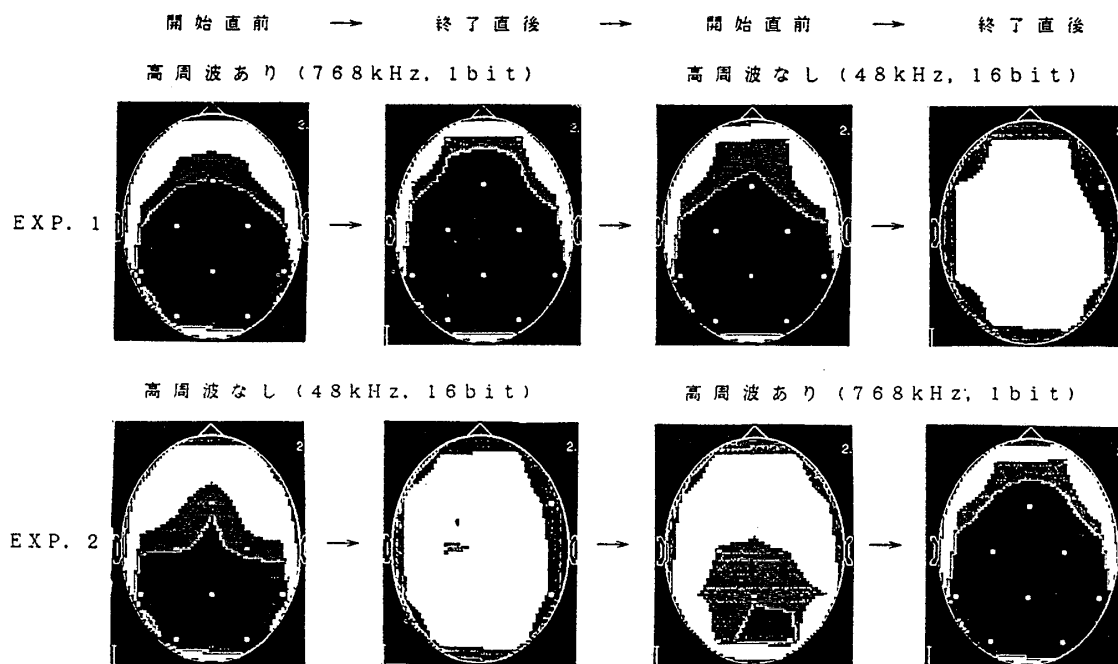


図12.5 リラクセーション環境シミュレーターによる映像音響呈示前後の  $\alpha$  波パワーの変化

#### 12.3.4 考 察

快適性の指標とされる  $\alpha$  波パワーが、広帯域再生が可能な高速標本化1ビット方式による信号処理条件で再生された音声呈示の場合に統計的に有意に活性化したことは、快適な音環境を実現するための手法として、ハイパーソニック・エフェクトの活用がきわめてたかい応用価値をもつことを示唆する。

同時に、可聴域をこえる高周波を記録再生できない現行方式による音声呈示の前後で、 $\alpha$  波パワーが低下する傾向が観察されたことが注目される。この現象は、統計的には有意なものではなかった。しかし、これは、現行規格によるCDやDATをすぐれた環境音の支援なしに単独・長時間聴取することが、脳にとって快適性を減じ、不快感やストレスをみちびくおそれがあることを警告する結果といえる。メディア情報によるマイナスの影響の検出とその改善とは、とりわけ学習環境や作業環境における安全性確保の立場から、なによりも優先性の高い課題である。したがって、この点については今後より詳細に検討していく必要があるとかがえていく。

#### <文 献>

- 1) 朝日新聞1991年10月26日夕刊、科学面。
- 2) 武末高裕：聴こえない高周波の役目、人にやさしい技術23、ウェッジ3月号、pp.54-55、1992。
- 3) 片山一弘：「快眠」「リラックス」を追求するねむり文化ギャラリー $\alpha$ 、企業文化探訪6、ザ・ウォッチャー、NO.14、pp.30-31、1992。

## おわりに

ハイパーソニック・エフェクトについては、この現象をはじめて報告した1991年のオーディオ・エンジニアリング・ソサエティー（ニューヨーク）での発表以来現在まで、学界だけでなく一般社会からもたかい関心がよせられている。

学術的には、「人間の感覚・知覚に影響をおよぼす空気振動の周波数上限は20kHzをこえない」というこれまでの定説が単純には成り立たないことを実証した点で、音響学、音響心理学、認知科学など関連する分野に無視できない衝撃をあたえている。とりわけ、この現象が、これまでの人間の感覚・知覚・認知にかかわる知識ではほとんど説明できないあたらしいタイプの反応であるため、一部の脳神経科学者たちのつよい注目をあびている。人間の感覚にかかわるこれまで知られていなかったこのあたらしい反応機構を解明することにより、基礎的学術研究の発展のうえで、貢献をはたすことが期待される。

応用面では、音響技術分野において、学術分野よりもむしろ鋭敏な反応がみられている。ハイパーソニック・エフェクトを発生させるために不可欠な20kHzを大幅にこえる高周波は、現在のデジタル・オーディオ・メディアでは記録・再生できない。そこで、現行DATのテープ走行を倍速化するとともにサンプリング周波数をオクターブ上昇させた機器が開発・発売され、すぐれた音質によって市場で成功している。また、同様な発想でCDを倍速回転させたプレーヤーの試作機が複数のメーカーから発表され、音質の向上が評価されている。さらに、現行CD等には記録されていない可聴帯域を超える高周波を豊富に、しかも再生可能な状態で記録しているメディアとして、LPがあらためて注目されはじめた。このように、わたくしたちの研究をおもな契機にしてさまざまな動きがおこり、デジタル・オーディオ信号処理の規格についても、世界的に現行規格をみなおす機運が胎動している。

このような応用面での動きは、学習メディアと人間との適合性を画期的に向上させ、メディアによる教育の安全性と効果とをたかめるというこのプロジェクトの目的にふさわしい展望を開いている。とくに、現行のオーディオ、ビデオ・メディアは、人間の脳神経系との調和・適合を十分科学的に評価する手法が確立する以前に規格が制定されたため、本論文でみるとおり、人間の脳にとって無視できない負担を生じている。わたくしたちは、この研究の中で、ハイパーソニック・エフェクトのメディアへの導入によって、この負担がきわめて効果的に解除されるだけでなく、高度に適切に設定された条件下では、試聴前よりも脳の状態をより適正化させる可能性があることを実験的にしめした。

このような画期的な展望や可能性を有効に活用し、安全確実にメディア教育に導入するうえからも、ハイパーソニック・エフェクトの脳内発生機構について解明し応用の基礎を築くことが、今後課せられたおおきな課題となっている。そのためには、脳の深部構造の機能を非侵襲的に計測する研究、神経分子生物学的指標による評価研究などを推進する必要がある。また、ハイパーソニック・エフェクトを実際的に実現できるハードウェア、ソフトウェアの開発・整備もいそがなければならない。さらに、これらによって、より本格的なモデル学習環境およびモデル教材を構成し、その効果を現実にシミュレートする技術開発的研究も必要である。こ

れらに対しては、ATM 環境の整備をはじめとする高速・大容量情報通信技術の実用化や仮想現実感造成技術の進歩などが、きわめて有利に作用するものと期待される。

以上のようにこのプロジェクトは、基礎・応用両面において、その目標にふさわしいみのりあるあゆみをすすめてつづくと同時に、今後へのゆたかな展望をひらくにいたったと総括している。また、国内外の存来の研究の模倣や追従におちいることなく、独自性のたかい方法、内容そして結果をちみびいてきたことも、このプロジェクトのおおきな特徴といえよう。このような面をふくめて、今後もいっそうゆたかなみのりをもたらしよう邁進したいとかがえている。

なお、このプロジェクトの研究は、きわめて独自性がたかいゆえに、研究用のハードウェア、ソフトウェアをはじめ、多分野にわたってあたらしく高度な装置や手法をうみだす工夫を必須とする宿命のもとにおかれた。わたくしたちの力はそれに対して限界のおおきいものであり、さまざまな方面からのご指導、ご支援によってそれらへの対応がはじめてなりたった。ここに衷心から感謝もうしあげたいとおもう。とりわけ、長期にわたり何人もの有力な研究員を無償で出向させてくださっている(財)国際科学振興財団、この研究に不可欠な高速標準化信号処理システムを開発・製作・提供しつづけてくださり、つねにご指導をたまわっている早稲田大学理工学総合センター・千葉工業大学山崎芳男教授、脳活性計測についてお手あつくいきとどいたご指導、ご協力をいただいている京都大学医学部柴崎浩教授、同米倉義晴助教授、同大学院本田学氏はじめ脳病態生理学教室の皆様、筑波大学社会医学系小田晋教授、同森田展彰助手に、深謝もうしあげる。また、共同研究のなかでさまざまなご支援・ご協力をいただいた東京電力(株)の三井恒夫最高顧問、同桜井武一電力技術研究所長、同西川信行エネルギー環境研究所長(当時)、同当摩昭子主任(当時)、ロフテー(株)磯貝重彰社長、情報の提供・機材の開発・提供、ソフトウェアの試作などさまざまの貴重な協力、ご助言をいただいた国立学術情報センター山田尚勇副所長、東京大学山崎弘郎名誉教授、同安岡正人教授、同高橋弘太講師(当時)、(株)脳機能研究所長武者利光博士、パイオニア(株)山本武夫博士、同橋本忠純部長、同小谷野進司氏、ソニー(株)中島平太郎博士、(株)ソニー・ミュージック・エンタテインメント間孝次氏、日本ビクター(株)豊島政実部長、合成音響設計家浦田恵司氏、ビクター・エンタテインメント(株)高田英男課長、同吉岡恵一郎エンジニア、(株)ビデオテック森俊文部長、アキュフェーズ(株)芝原昂一部長、同高松重治部長、日本光電工業(株)細谷次治参事、山田博行氏はじめ多数の皆さまに感謝もうしあげる。

最後に、実験に従事していただいた渡部一成(現・計量計画研究所)、服部和憲(現・富士通)、今井浩(現・ワコール)、小野寺英子(現・東日本鉄道文化財団)、高田智史(現・東芝)、田中基寛(現・三菱電機)、森本雅子(東京大学大学院)、八木玲子(国際科学振興財団)、佐山弘樹(東京大学大学院)氏をはじめ多数の皆様、そして被験者としてご協力いただいた皆様にあつく御礼もうしあげる。

なおこの研究費の一部は、文部省科学研究費(重点領域研究「視聴覚メディアがつくる感性情報の物理構造分析とその表現効果の評価」および奨励研究「景観の光学的物理構造と人間の生物学的適合性評価について」)によるものである。