

Title	音楽・音響再生の高度感性情報再現の評価に重要な評価語解析と無歪み伝送装置の実現で用いられたキー評価語に基づく物理要因・特性の発見及び総合評価-キー評価語-物理要因・特性の関係の実証に関する研究(-高度感性情報の再現に関する心理物理学的研究-)
Author(s)	石川, 智治
Citation	
Issue Date	2001-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/905
Rights	
Description	Supervisor:宮原 誠, 情報科学研究科, 博士

博士論文

音楽・音響再生の高度感性情報再現の評価に重要な評価語解析
と無歪み伝送装置の実現で用いられたキー評価語に基づく物
理要因・特性の発見及び総合評価－キー評価語－物理要因・
特性の関係の実証に関する研究
(－高度感性情報の再現に関する心理物理学的研究－)

指導教官 宮原 誠 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

石川 智治

2001年1月12日

Copyright ©2001 by Tomoharu Ishikawa

目次

1	序論	1
1.1	本論文の要旨	2
1.2	本論文の目的	4
1.3	本論文の構成	5
2	研究の背景	9
2.1	はしがき	10
2.2	従来音響理論に基づいて進められてきた音楽・音響再生の研究	10
2.3	感性情報伝達の研究	13
2.3.1	浅い感性情報伝達の研究	14
2.3.2	深い感性情報伝達の研究	16
2.4	脳科学の研究と深い感性，浅い感性情報伝達の研究との関係	21
3	高度感性情報再現の評価に重要な評価語	25
3.1	はしがき	26
3.2	過去の音質評価語研究との関連	26
3.3	高度感性情報再現に関連する評価語の抽出	27
3.3.1	評価語の調査・収集・グループ化の再検討	27
3.3.2	多次元空間解析（MDS）	30
3.3.3	評価方法	31
3.3.4	多次元空間マッピングの結果	32
3.3.5	代表評価語のクラスタ化（階層的クラスタリング）	34
3.3.6	代表評価語のランクづけとクラスタの意味づけ	35
3.4	高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価と装置の開発中に発見されたキー評価語との相関関係	37
3.5	まとめ	40

4	「無歪み伝送（第一義）」の実現と高度感性情報の再現	42
4.1	はしがき	43
4.2	過去の「無歪み伝送（第一義）」の実現研究との関連	43
4.3	DSP を用いた音響再生装置の伝達周波数特性の補正実験	44
4.3.1	伝達周波数特性の平坦化補正理論	44
4.3.2	補正フィルタ設計方法	45
4.3.3	音響再生システムの構成と動作	46
4.3.4	音響再生装置の伝達周波数特性の補正結果	47
4.4	「高度感性情報の再現」の評価法	48
4.5	評価実験	50
4.5.1	評価条件（評価室，評価者，評価語，評価用音源）	50
4.6	評価結果と考察	51
4.6.1	評価結果の有意差検定	51
4.6.2	評価結果の因子分析と解釈	52
4.6.3	考察	55
4.7	まとめ	55
5	高度感性情報再現に重要な「無歪み伝送（第二義）」条件：電気的特性の発見と実証	57
5.1	はしがき	58
5.2	時間伸び縮み歪（jitter）の発見と実証	58
5.2.1	時間伸び縮み歪（jitter）の発見の経緯	59
5.2.2	DSP 装置ハードウェアに起因する高度感性情報再現に重要な電気的 特性（第二義）の発見実験	60
5.3	超低周波数帯域の再生の発見と実証	66
5.3.1	超低周波数帯域の再生（サーボ型アンプの時定数の大きさ）の発見	66
5.3.2	評価実験	68
5.3.3	評価結果と考察	70
5.4	まとめ	71
6	高度感性情報再現に重要な「無歪み伝送（第二義）」条件：電源に関する電気的特性 と物理要因の発見と実証	73
6.1	はしがき	74
6.2	高度感性情報再現度を向上させた音響再生システムの伝達周波数特性補正実験	75
6.2.1	高度感性情報再現に注目した音響再生システムの改善	75

6.2.2	無歪み伝送条件（第一義）の伝達周波数特性の補正実験とその結果	78
6.2.3	評価実験とその結果及び考察	78
6.2.4	音像の明確化及び音像へのエネルギー集中を目指した高精度な改善	81
6.2.5	音響再生システム内に挿入される DSP は音質改善をもたらすのか？	82
6.3	まとめ	83
7	高度感性情報再現のための仮説 1 と仮説 2 との関係の検討	85
7.1	はしがき	86
7.2	仮説 1 と仮説 2 との関係の検討	86
7.2.1	本研究により得られた事実からの仮説 1 と仮説 2 との関係の検討	86
7.2.2	音楽・音響再生装置開発の歴史から見た仮説 1 と仮説 2 との関係の検討	88
7.3	まとめ	89
8	結論	91
8.1	本研究の成果	92
8.2	今後の課題	94
	謝辞	97
	参考文献	98
	付録	102
A:	代表評価語 35 語	102
B:	高度感性情報再現に重点をおいた評価語の階層的構造関係	106
C:	聴取者の音楽の聴き方の違いに注目した評価語のグループ化と解析	109
D:	高度感性情報再現に重点をおいて多くの実験や検討に基づき設計された音響再生システム	115
1.	CD プレーヤ	115
2.	アンプ	116
3.	スピーカ	116
	本研究に関する研究業績	120

第 1 章

序論

1.1 本論文の要旨

電気信号で伝送される音楽・音響再生の研究では、信号伝送理論に基づき、無歪み伝送の必要条件（：振幅周波数特性、且つ群遅延特性が平坦であること）を満足させることが、第一義に重要である。

オーディオで、上記の無歪み伝送条件を満足するためには、更に、第二義にハードウェアに要求される電気信号諸特性の無歪み伝送条件（例：歪み率が0.1% [-60dB] 程度以下）を満足させることで、原音忠実再生は行えるとして研究が進められてきた。

しかしながら、第一義及び、第二義の無歪み伝送条件を満足させても、高度な音質が要求される場合に、その再生音の音質はあまりにも原音と違うことが明らかになってきた。その音質の違いに大きく関係する第二義の無歪み伝送条件には上記の電気的特性に加えて、物理要因も存在し、それには部品やシャーシの振動などさえあることも明らかになってきている。ここで、これらの物理要因を電気的特性として記述しようとする、例えば歪み率：0.0001% [-120dB] などの値となり、実際上、測定限界を超えるほどの性能の記述が必要となり不可能に近い、物理要因を新たに考慮すべきであることが明らかになってきた。

従来オーディオが、どこまでの原音忠実を求めているのか明確な定義はないが、ここでは“従来オーディオ”が目的とする再生音は、楽譜で表現される情報（メロディ、リズムなど）が再生されていれば良いとして議論を進める。こうすると、上記の第一義及び、第二義の無歪み伝送条件を満足させれば、第二義の無歪み条件の中で音質の違いが生じる物理要因は考慮しなくても、目的の再生音は得られる。ここで、この楽譜情報再生レベルを「“浅い感性”の再生を満足している」とする。現在、その“浅い感性”の再生は可能となっている。

この現状に対し、本研究では人間の感動を喚起させるような、原音に含まれる高度感性情報（“深い感性”）の再生を目的とする。こうすると、上述の第二義の無歪み伝送条件の物理要因を考慮することは避けては通れない程に大きい問題である。

以上より、本研究では、(I) まず、第二義の無歪み伝送条件の未知の電気的特性を明らかにする。(II) 第二義の無歪み伝送条件の物理要因を明らかにする。(III) これらを考慮した高度感性情報を再現する音楽・音響再生装置を開発する。研究は以下のように進めた。

特性、要因の発見の手がかりとして、評価語を使う方法を用いる。具体的には、

(1) まず、“深い感性”を評価語で表せるとして、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現した言葉を本や雑誌などから調査・収集してグループ化した評価語の再検討を行った。次に、その評価語の多次元空間解析により、“深い感性”（高度感性情報）に関連する評価語を求めた。その後、装置の改善を行う実験中に良く用いられたキー評価語と、“深

い感性”（高度感性情報）に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を重要度及び影響度解析により明らかにした。

(2) 次に、従来オーディオ装置を用いて第一義の無歪み伝送条件：振幅周波数特性・群遅延特性の平坦化を実現し、その再生音を(1)で得た評価語群を用いて厳密に評価した。評価に評価語を使った理由は、人間が音楽などを聴いた時に、脳内に生じるある感情や感動を左脳の前頭言語野で言葉に変換して表現することができるという一つの特長を持っているため、それを利用しようと考えたからである。その結果、“浅い感性”の再生は改善されるが、逆に“深い感性”の再生は改善されておらず、劣化さえしていることを明らかにした。この事実から“深い感性”の再生のためには第二義の無歪み伝送の未知の条件が関連していると推測し、繰り返し行った聴取実験の中で観察された実験的事実を手がかりに、その特性、要因の発見を行った。

(2-a) 第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の発見には次の三つがあった。それは、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行う中で、装置の伝送特性を平坦に補正するために用いたDSP装置のハードウェアが、音質劣化の原因となっていることの発見から、一つは、デジタルオーディオのサンプリングの jitter が原因であり、しかも jitter は従来の常識では信じ難い程の僅かな（ns オーダの）量に抑えなければならないことを発見した。もう一つは、一般に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が必要であるということを開発した。三つめは、(2)の実験で用いた音響再生装置の再生能力が“深い感性”の再生を満足する改善にまで至っていないことに注目し、その改善を行う中で、音質に深く関連する重要な電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることを発見した。

(2-b) 第二義の無歪み伝送条件の物理要因では、シャーシの支持や振動制御までもが関連することを発見した。

(3) 特性や要因の発見は、高度感性情報再現システムの開発を目指して聴取実験を繰り返し行う中で、良く用いられたキー評価語との関係を求めながら行われた。(2-a), (2-b)の発見の手がかりとなったキー評価語は、“空気感”及び“胸にしみ込む”であった。

(4) キー評価語：“空気感”，“胸にしみ込む”と、(1)で得られた評価語群を代表する総合評価との相関関係は、(1)で明らかにしたが、それを実際に、主観評価実験することにより確認した。何故ならば、キー評価語を手がかりに発見された特性や要因が総合評価を確かに向上させているかどうかを知ることは重要だからである。

(5) 発見された条件を満たす電気的特性の実現や要因の改善を行ったパイロットシステムを開発し、その再生音を(1)の“深い感性”に関連する評価語群を用いて評価することに

より、発見された各々の特性・要因が、“深い感性”の再生に重要な特性・要因であることを実証した。

本研究で得られた重要な結論は、“深い感性”の再生のためには、当然のことながら、第一義の無歪み伝送条件を満足しなければならないが、第二義の無歪み伝送条件：装置の電気的特性、及び物理的要因に要求される条件を満足しない場合には、(たとえ DSP 装置を用いて、第一義の無歪み伝送条件を満足：特性をかなり平坦に補正させても,) “深い感性”の再生は得られず、かえって劣化してしまうということである。この事実は、宮原が与えた二つの仮説の真偽を、別の三種類の高度感性情報再生システムの試作において実証していく中で、その正当性を確認した。

ここで、第一義、及び第二義の無歪み伝送条件の電気信号上の諸特性と物理的要因の関係を図 1.1 に示す。

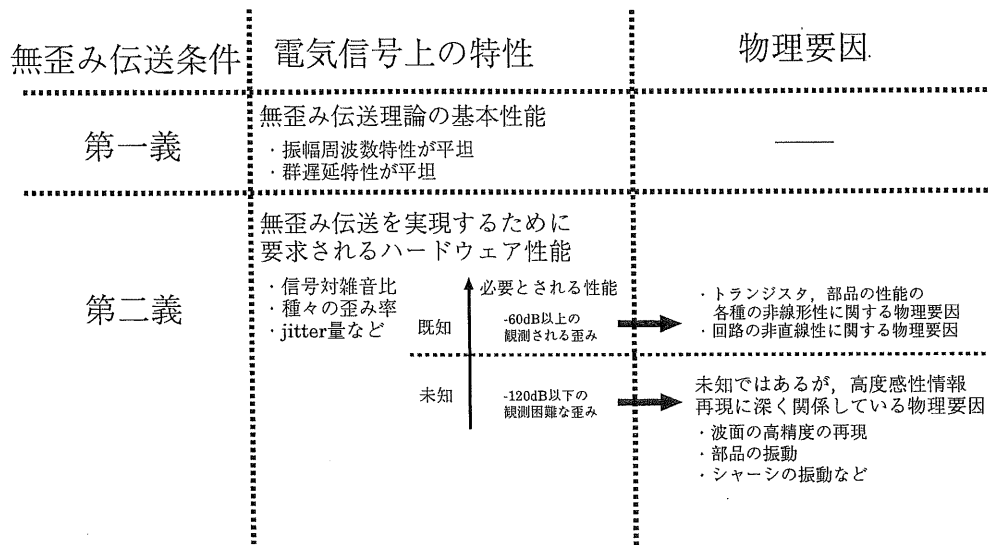


図 1.1: 第一義、及び第二義の無歪み伝送条件の電気信号上の諸特性と物理的要因

1.2 本論文の目的

21 世紀には、人々に感動を与えるような新たなコンテンツが重要である。音楽再生分野に限るが、そのためのインフラとして深い感性（高度感性情報）の伝達が可能な音響再生装置の開発を行う。

しかしながら、従来音響理論では、高度感性情報再現に重要となる第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性、及び、より関連が深い第二義の無歪み伝送条件の物理的要因が明

らかでないため、これに注目した新理論とそれに基づく新たな電気的特性及び物理要因の発見が必要となる。

この重大な問題を解決するために、主観：音質が“主”，客観：再生装置が“従”として、第一に、帰納的研究方法により高度感性情報再現に関連する第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性及び物理要因（暗黙知）の発見（明視知）に努める。第二に、発見された特性・要因を含めた全ての特性・要因を満足するように、従来研究方法；演繹的研究方法で音響再生装置の開発、評価を行う。上記第一，第二は繰り返えし行う。

本研究では、まず、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する多くの言葉を本や雑誌などから調査・収集し、それらを解析して高度感性情報再現の評価に重要な評価語を明らかにする。その後、高度感性情報再現装置を開発する中で発見されたキー評価語と求めた高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を解析的に明らかにする。次に、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足した音響再生装置の実現を行う。ここで、人間は音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現していることを利用して、再生音の音質を評価語を使って評価する。そして、高度感性情報再現との関係を明らかにする。その結果から得られた問題点を整理し、多くの聴取実験の中で、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因の発見を行い、最後に、それらを考慮した高度感性情報再現可能な音響再生装置の開発を行い、ノウハウを含めて、設計諸元をほぼ明らかにする。

1.3 本論文の構成

本論文は8章よりなる。

深い感性（高度感性情報）の伝達を可能にする音響再生システムを開発するためには、無歪み伝送条件（第二義）の新たな電気的特性及び物理要因の発見が重要である。第1章では、本論文の要旨、目的、構成について述べる。第2章では、本研究の重要性、立場、特色を明確に示すために、他の種々の研究について述べる。第3章では、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する多くの言葉を本や雑誌などから調査・収集し、それらを解析して高度感性情報再現の評価に重要な評価語を求める。その後、装置開発中に発見されたキー評価語と高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を明らかにする。第4章では、無歪み伝送条件（第一義）をほぼ満足する音響再生装置の実現し、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現することを利用し、その再生音の音質評価を評価語を使って行い、高度感性情報再現の立場から議論する。その結果、高度感性情報再現のための無歪み伝送（第二義）の未知の条件の

存在を明らかにしたことについて述べる。第5章では、その無歪み伝送条件（第二義）の電気的特性の二つの発見について述べる。それは、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行う中で、装置の伝送特性を平坦に補正するために用いたDSP装置のハードウェアが、音質劣化の原因となっていることの実験から、一つは、デジタルオーディオのサンプリングの jitter が原因であり、しかも jitter は従来の常識では信じ難い程の僅かな（ns オーダの）量に抑えなければならないということの実験について述べる。もう一つは、一般に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が必要であるということの実験について述べる。第6章では、更に、無歪み伝送条件（第二義）の電気的特性の三つめの発見と、重要な物理要因の実験について述べる。それは、第4章の実験で用いた音響再生装置の再生能力が“深い感性”の再生を満足する改善にまで至っていないことに注目し、その改善を行う中で、音質に深く関連する無歪み伝送条件（第二義）の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることの実験と、無歪み伝送条件（第二義）の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することの実験について述べる。第7章では、本研究で得られた事実に基づき、または、音楽・音響再生装置開発の歴史から、高度感性情報再現における仮説1と仮説2との関係について検討する。第8章では、本研究で得られた成果と今後の課題について述べる。

具体的内容は、以下のようである。

第1章は序論である。本論文の要旨、目的、構成について述べる。

第2章は本研究の立場、重要性、特色を明確にするために、本研究の背景について述べる。まず、従来音響理論に基づき、演繹的研究方法に従って進められてきた音楽・音響再生の研究について述べる。それに対し、人間の受けとる感性を主として行われてきた感性情報伝達の研究について述べ、次に、帰納的研究方法を含めた研究方法に従い、感性情報伝達の研究では扱わなかった深い感性情報伝達を対象としたプロジェクト的研究について述べる。最後に、本研究の今後の展開も見据えて、脳科学研究と深い感性、浅い感性情報伝達の研究との関係について述べる。

第3章では、高度感性情報再現の評価に重要な評価語について述べる。まず、高度感性情報を評価語で表せるとして、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する多くの言葉を雑誌や本などから調査・収集してグループ化（KJ法）した評価語の再検討を行う。次に、その評価語の多次元空間における解析（MDS、階層的クラスタリング）を行い、高度感性情報に関連する評価語を明らかにする。また、装置の開発中に発見されたキー評価語と高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との強い相関関係を、重要度及び影響度解析から明らかにしたことについて述べる。

第4章では無歪み伝送条件（第一義）をほぼ満足する音響再生装置の実現と高度感性情報再現の評価について述べる。無歪み伝送条件（第一義）とされる音響再生装置の振幅周波数特性及び群遅延特性の平坦化を、DSP（2048tap）を用いて行う。そして、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表出することを利用し、その再生音の音質評価を評価語を使って行い、高度感性情報再現との関連について議論する。その結果、従来オーディオ評価語に関連する音質は改善されたが、高度感性情報再現は改善されず、逆に劣化してしまうことを明らかにする。その原因は、無歪み伝送条件（第二義）の新たな電気的特性及び物理要因であることと考え、繰り返し行う多くの聴取実験の中で、発見を行う。それらについては、5章、6章にて述べる。

第5章では、無歪み伝送条件（第二義）の新たな電気的特性の二つの発見について述べる。それは、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行う中で、装置の伝送特性を平坦に補正するために用いたDSP装置のハードウェアが、音質劣化の原因となっていることの発見から、一つは、デジタルオーディオのサンプリングの jitter が原因であり、しかも jitter は従来の常識では信じ難い程の僅かな（ns オーダの）量に抑えなければならないことの発見について述べる。もう一つは、一般に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が必要であるということの発見について述べる。上記二つの新たな電気的特性の発見の手がかりとなったキー評価語は、頬や身体に感じる“空気感”であることを示す。そして、キー評価語：“空気感”と総合評価との相関関係を主観評価実験により確認したことについて述べる。また、“空気感”の再生を手がかりに発見された無歪み伝送（第二義）の電気的特性の必要条件を満足させた装置を開発し、その再生音を高度感性情報に関連する評価語を用いて評価することにより、高度感性情報再現に重要な特性であることを実証したことについて述べる。

第6章では、無歪み伝送条件（第二義）の電気的特性の三つめの発見と、重要な物理要因の発見について述べる。それは、第4章の実験で用いた音響再生装置の再生能力が高度感性情報の再現を満足する改善にまで至っていないことに注目し、その改善を行う中で、音質に深く関連する無歪み伝送条件（第二義）の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることの発見と、無歪み伝送条件（第二義）の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することの発見について述べる。上記の電源に関する電気的特性、及び物理要因の発見の手がかりとなったキー評価語は“胸にしみ込む”であることを示す。そして、キー評価語：“胸にしみ込む”と総合評価との相関関係を、繰り返し行った聴取実験により確認したことについても述べる。また、“胸にしみ込む”の再生を手がかりに発見された無歪み伝送条件（第二義）の電源に関する電気的特性、及び物理要因を考慮した装置を開発し、そ

の再生音を高度感性情報に関連する評価語を用いて評価することにより、高度感性情報再現に重要な特性・要因であることを実証したことについて述べる。最後に、高度感性情報再現のためには、当然のことながら、無歪み伝送条件（第一義）を満足しなければならないが、無歪み伝送条件（第二義）：装置の電気的特性、及び物理要因に要求される条件を満足しない場合には、高度感性情報再現は得られず、かえって劣化してしまうということについて述べる。なお、宮原が与えた二つの仮説の真偽を実証しつつ進めた高度感性情報再現システムの開発の中で、この事実の正当性を確認した。その例を付録Dに記す。

第7章では、本研究で得られた事実に基づく、または、音楽・音響再生装置開発の歴史から、波面再生；時間方向の歪みの減少に関連し、“空気感”、“雰囲気”の再現に関連すると考えられる仮説1と、音のパワーの無反射伝達及び瞬時的なエネルギーの放出（音のはき出し）に関連し、“胸にしみ込む”の再現に関連すると考えられる仮説2との関係の検討を行う。

第8章では本研究の成果、今後の課題について述べる。

第 2 章

研究の背景

2.1 はしがき

本章では、本研究の立場、重要性、特色などを明らかにするために、まず、従来音響理論に基づいて進められてきた音楽・音響再生の研究について述べる。そして、“浅い感性”を対象とした感性情報伝達の研究について述べる。これに対し、特に、本研究の背景となり、上記の研究では扱ってこなかった“深い感性”の再生を目的としたプロジェクト的研究について述べる。最後に、本研究の今後の展開も見据えて、脳科学研究の立場から“浅い感性”と“深い感性”との関係について仮説とその検証方法について述べる。

2.2 従来音響理論に基づいて進められてきた音楽・音響再生の研究

線形システムの信号伝送の理論に基づき、線形時不変システムを仮定すると、信号を無歪みに伝送させるためにシステムが必要とする条件は、全周波数に対して伝達関数の絶対値と遅れ時間が一定であることである [1]。

上記の線形システムの信号伝送理論に基づけば、音楽・音響再生装置における無歪み伝送条件は、振幅周波数特性が平坦であること、且つ、群遅延特性が平坦（位相周波数特性が線形）であることである。この無歪み伝送条件が満足されれば、電気信号となった音楽・音響信号は歪みなく伝達されるとしてシステム設計が行われてきた。

具体的には、第一義に周波数特性は人間の可聴周波数帯域（20Hz～20kHz）において、振幅周波数特性、群遅延特性共に平坦であることが目標とされた。第二義としてハードウェアに要求される電気信号上の諸特性の無歪み伝送条件；S/N（信号対雑音）比は約 60dB 以上、歪み率特性は約 0.1%以下などが満足されれば、原音に忠実な再生ができるとされてきた。すなわち、第一義及び、第二義の無歪み伝送条件を満足させることによって、究極の音楽・音響再生装置を目指してきた。

上記方法は、無歪み伝送条件から導き出される第一義、及び第二義の装置の電気的特性に注目し、それらの性能を向上させることによって、システム開発するという、演繹的な研究方法（トップダウン的な方法）[2]である。それを図 2.1に示す。

演繹的研究方法（トップダウン的な方法）は、図 2.1に示すように、まず、第一義、及び第二義の無歪み伝送条件の電気的特性（ P_i ）の性能を向上させることにより、それに関連する音質評価語（心理要因： A_N ）の評価が向上し、その評価を重み（ W_{kj} ）として、線形の荷重和的關係から総合音質（ Q ）が決定されるというものである。すなわち、第一義の無歪み伝送条件の周波数特性、及び第二義の無歪み伝送条件の S/N 比、歪み率などの電気的

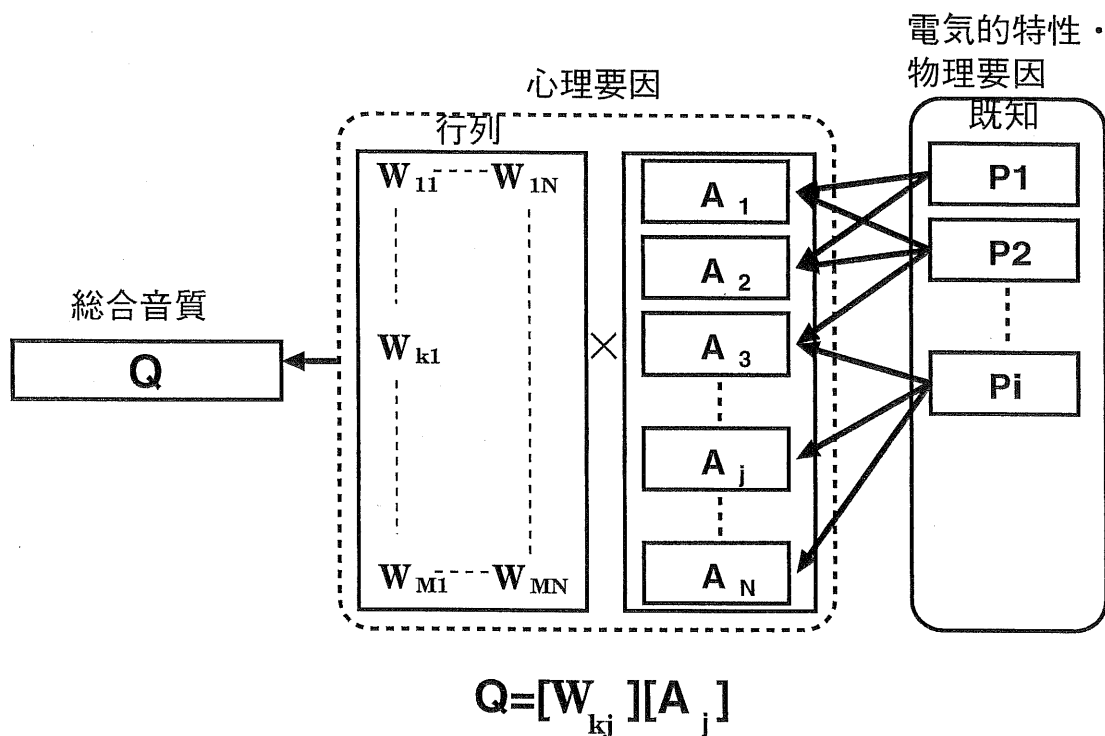


図 2.1: 演繹的研究方法 (トップダウン的方法)

特性の荷重和として音質評価語があり、これらの荷重和として総合音質が決定されるという研究方法である。上記の演繹的研究方法に基づき、現在までに多くの音楽・音響再生装置が開発されてきた。その結果、音質でいえば、所謂、奇麗な音の再現（楽譜 [音階, メロディー, リズムなど] で表現される音楽情報の再現）に於いては、ほぼ満足される音楽・音響再生装置が完成したといえよう。

しかしながら、演奏の“凄み”や鬼気迫る演奏の“雰囲気”などの人間の心に訴えかける情報の再現について、現状の音楽・音響再生装置では多くの不満が残るといわれている。特に名演奏の再生など、高度な感性情報の再現のためには、解決しなければならない本質的な問題である。

オーディオ技術の発達とその技術・音質上の問題点：レコードから DVD-Audio まで

オーディオの技術は、1877年のトーマス・エジソン (T.Edison: 米) の蓄音機の発明以来、科学技術の進歩とともに着々と発達を遂げてきた [3][4]。その再生の目的は原音忠実再生であり、そのために、第一義に無歪み伝送条件（振幅周波数特性、及び群遅延特性の平坦化）を満足すること、更に、第二義にハードウェアに要求される電気信号上の諸特性の無歪み伝送条件（歪み率が 0.1 % など）を満足することで実現できるとされてきた。その

大きな流れ、及び技術と音質上の問題点を以下に述べる。

まず、第一義の無歪み伝送条件を満足する装置の開発が進められた。

トーマス・エジソンの内筒式蓄音機 [フォノグラフ] の発明 (第一技術革命) 以後、1887 年にエミール・ベルリナ (E.Berliner: 独) によって、今日と同じ円盤に音波を横振動で刻む方式のレコード: 平内盤式蓄音機 [グラモフォン] (第二技術革命) が発明された。これは、音の波形の記録を機械式に行い、振幅方向の記録は横振動に、時間方向の記録は溝の進行方向に記録する方式である。

そして、1920 年にベル研究所 (米) で、電気吹き込み方式の研究が開始され、1925 年にビクター・トーキングマシン社より、その技術を応用した録音機 [ニューオーソフォニック・ビクトローラ] (第三技術革命) が発明された。これは横振動を機械-電気変換により電気信号に変えて、増幅などの信号処理ができるようにし、レコードに記録する時には電気-機械変換する方式である。この発明以後、第二義の無歪み伝送条件である電気的特性を改善することを目指して開発は進んでいった。

更に、1948 年には CBA 研究所のピーター・C. ゴールドマーク (P.Goldmark: 米) らによって、LP レコード (第四技術革命) が発明され、長時間記録が可能となると共に、記録媒体が軟材質であることから、スクラッチノイズが激減した。又、レコード盤という媒体に記録するための制約を取り除いた画期的な記録方式として、テープレコーダが発明され、記録時のカッターという電気-機械変換器から解放された。そして、更に長時間化、ステレオ化へと技術は進んでいった。ここまでは、時間方向の変化についての定速で記録されることに関して、駆動回転体により生じる低周期のワウ・フラッター以外の時間方向の歪みは生じなかった。

そして遂に、1971 年に NHK 技術研究所が、(株) 日本コロムビアに指導してデジタル・テープレコーダ PCM-1 を発明し、世界で初めてデジタル技術がオーディオに導入された。これは全てをコード化するため、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性が改善され、原音忠実再生の実現にかなり近付くという多大な期待が寄せられた。しかし、初めて導入された標本化が、重要な問題点: 時間方向に歪みを生じさせ、又、その歪みが音楽性を損なわせていることに世界中の人々は気がつかなかった。近年、その大問題にメスが入られようとしている [5]。

そして、1980 年には現在多く普及しているコンパクト・ディスク・デジタル・オーディオが発明された。この開発は、多くの人間の聴覚知覚に関する実験などの結果を基礎として、サンプリング周波数: 44.1kHz、量子化レベル: 16bit と決定された。CD (コンパクトディスク) は、直径が 12cm と LP の約半分にも関わらず、記録時間は 2 倍以上、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性としては、ダイナミックレンジ、歪み率が 10 倍以上の性能を

持つような改善となった。その結果、音質としてもクリアーな音にする（明瞭度 [6] が向上する）ことにより、成功したと考えられていた。しかしながら、発売当初からの“雰囲気なくなる”，“冷たい音”，“メッキリ・ハッキリ音”，“デジタル臭い音”がするなど一部の人々による批判的な評価が思い出される。

その後、更に多くの情報を記録できるというだけの理由 [7] で、SACD, DVD-Audio が発明された。それは、人間が聴くことのできない周波数帯域（約 100kHz 以上）まで特性をのばし、強度・量として超高周波数帯域の成分を含ませること、量子化レベル数を増やして（24bit など）S/N やダイナミックレンジを大きくする（144dB など）ことなど、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性を改善することを目的として開発された。しかし、これは“デジタル臭い音”が改善されるという印象を受ける程の、大きな改善がなされたとはいえない。最近の我々の研究により、第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性が発見された。それは、僅かな時間方向の歪みが音質に重大な影響を及ぼしていることが明らかになった。現状の音響再生装置の開発では、明らかにされた抑制すべき時間方向の歪み（jitter）の精度（ns オーダ）は考慮されておらず、また、符号化することにより影響がないと考えられたシャーシ、部品の振動などの第二義の無歪み伝送条件の物理要因が、音質へ大きく影響していることを明らかになってきた。しかしながら、現状の音響再生装置の開発は、これらとの関連について全く議論されないままに進められている。なお、上記の第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因の発見は、演繹的研究方法では得られなかったものであり、逆に、総合評価を主とする帰納的研究方法により発見されたものである。このように従来音響理論に基づき進められてきた研究方法だけでは、音質に非常に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性や物理要因を発見することが困難であり、研究方法の見直しや検討を迫られる事態に陥っているのではないかと考えられる。

2.3 感性情報伝達の研究

無歪み信号伝送理論からスタートして、「第一義、及び第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、すなわち、歪みが少なければ（-60dB 程度以下）、音楽信号がどのようなものであろうとも、記録された演奏音に含まれている情報は、伝送される。」という考え方にに基づき、音楽・音響再生装置の研究が行われてきた。これは原音忠実再生にとっては、本質的に正しいことである。しかしながら、実際に、第一義、及び第二義の無歪み伝送条件の電気的特性をほぼ満足させても、高度な音質が要求される場合に、その再生音の音質は、あまりにも原音と違うことが明らかになってきた。その音質の違いに大きく関係する物理要因には部品やシャーシの振動などさえあることも明らかになってきており、これらの第二義の無

歪み伝送条件の物理要因を電気的特性として記述しようとする、測定限界を超える（歪みが 120dB 以下）ほどの性能の記述が必要となり不可能に近いので、物理要因を新たに考慮すべきであることが明らかになってきた。したがって、音質に大きな影響を及ぼす第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性、及び物理要因を明らかにしなければならない。

このデッドロックを解決するために、近年、人間の受けとる感性を主として、感性を伝達するために、重要となる第二義の無歪み伝送条件の電気的特性や物理要因を明らかにするという立場からの研究がスタートした。それらは以下の二つである。

- 感性情報処理の情報学・心理学的研究（文部省科学研究費補助金重点領域研究）[8]
- 日本学術振興会：未来開拓事業プロジェクト研究

以下では、これらについて詳細に説明する。

2.3.1 浅い感性情報伝達の研究

感性情報処理の情報学・心理学的研究（文部省科学研究費補助金重点領域研究）

このプロジェクトでは、図 2.2 に示すような知性と感性の関わり合う浅い感性の伝達に重点をおいた心理物理学的研究が行われた。このプロジェクトの目的・立場、研究方法、成果について以下に詳しく述べる。

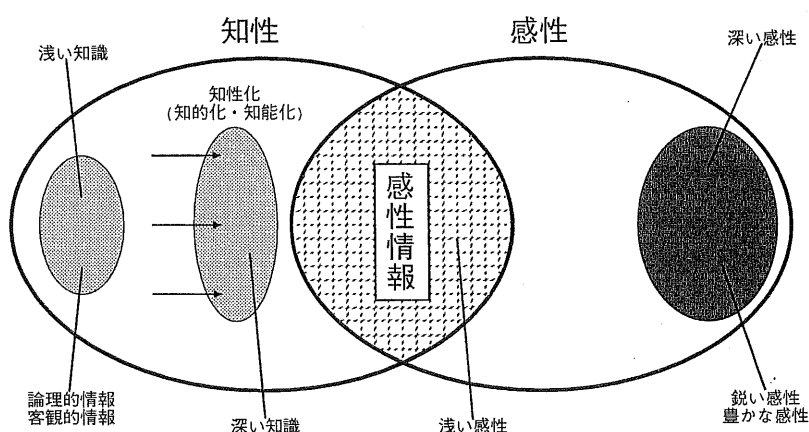


図 2.2: 感性情報処理の研究分野（感性の科学 [サイエンス社]：辻三郎著より抜粋）

このプロジェクトでは、「美しい」とか「快い」といった形容詞で表現される情報の感性的側面を、情報科学の立場から探求することを目的としている。それは、知識の世界から感性の世界にメスを入れ、知識科学に対して感性科学の基礎を確立し、心理学・美学での

個別研究を、情報科学の理論と強力なハード・ソフトを駆使して新しい総合科学を展開することである。そのために、まず対象を画像・音響メディア情報に限定して、感性情報の記述・表現方法を確立させ、それに基づいて感性情報の生成や感性データベースの実現を目指している。

感性情報は、本来主観的で同じ入力に対して一意的に決まらないが、あるグループに対しては類似的結果を得ることが明らかになっている [8]。そこで研究方法としては、イメージ情報から特徴を抽出し、それを人間の心理空間の記述（感性情報の内部表現）に写像する。逆に、感性情報の外部表現の生成モデルをコンピュータ内に作り、そこで作られたイメージ情報を人間が評価してモデルの正当性を検証するなどのパターン情報処理の方法などがとられている。

これまでの研究成果で音楽・音響に関する基本的なものを三つ紹介する。

(1) 音楽演奏における感性情報の研究では、演奏のテンポ、テンポの揺らぎ、ダイナミクス（音の強弱）、音色などが音楽演奏によって演奏者の感性を聴き手に伝えるための音響的情報であるとして、それらをパラメータ化し、コンピュータで演奏させることを目的としている。この研究は基本的にはリズム、メロディーなどの楽譜情報に、演奏の表情づけをコンピュータにより行い、いかに音楽的な表現を得るかということが主であり、音楽を聴くことにより喚起される感動や高度な芸術的印象については全く議論されていない。

(2) 日本の文化の中で特有の“間”に関して、時間的な“間”についての研究も行われている。これは、感性情報伝達のために、人間にとって最適な“間”の長さなどを考えるという意味で重要視されている。これは、音楽のメロディ、リズムに関連の深いものであろう。しかしながら、“気配”、“雰囲気”、“空気感”などといった、人間が体感により捉えていると思われる感性領域まで踏み込んではいない。

(3) 人間が本能的に感じる部分、即ち、生理学的には脳の情動系神経回路に起こるプラスの反応、あるいは脳の報酬系神経回路の活性化によって、感性という心の動きを捉えた研究も行われており、人間の本能的に感じる部分には人間の可聴周波数領域以外の音、即ち、20kHz 以上の高周波のスペクトル成分（パワーのみ）が影響しているということが明らかにされた。これは、実際に脳波を測定し、生理学的に脳が活性化していることを証明した画期的な評価方法であり、疑いもない事実が明らかにされたと考えられる。しかしながら、周波数特性の強度のみに注目しており、本研究スタートのモチベーションともなっている時間的な情報は全く議論されていない。又、音楽により喚起される感動が脳波により十分に計測され得るかについても議論が必要であろう。

又、“浅い感性”を対象とした研究は、現在でも感性工学学会において盛んに行われており、多くの研究成果が得られている。その主な研究としては、対象を音楽とはしていない

が、画像や文字を入力し、それに関連する画像をデータベースの中から検索して表示する画像データベースシステムの研究がある [9][10]。これらの研究の発展系としては、“深い感性”を対象とした画像データベースシステムの実現が望まれであろう。しかしながら、そのためには、“深い感性”の伝達に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因を考慮した画像表示システムが必要不可欠であり、その開発のもとに、実現されると考えている。

2.3.2 深い感性情報伝達の研究

日本学術振興会：未来開拓事業プロジェクト研究

このプロジェクトでは、初めて深い感性（高度感性情報）の伝達のための心理物理学的研究を系統的・理論的に行ったものである。このプロジェクトの立場、研究方法などについて以下に詳しく述べる [11]。

21世紀には、人々に感動を与えるような新たなコンテンツと、それに伴う雇用の創出が重要である。その一つとして、高度な感性情報を言及している先端科学工学分野と芸術分野の融合した新分野の創造が重要と考える。具体的には、人間の感動及び情動を喚起させる、演奏に含まれる高度な芸術的印象（感性情報）の忠実な伝達を可能にする電気音響文化の創成、すなわち、高度感性情報 [5] を音響再生装置で再現するためにはどうすれば良いかを目的とした研究と考える。そのための新しい研究方法を、宮原は従来とは全く違った方法であることを強調するために、「コペルニクス的転回の研究方法」と表現している。その研究方法と、それに基づき発見された特性・要因、結果から立てた2つの仮説について以下に述べる。

高度感性情報伝達を目指す研究方法は、あくまでも感性伝達ができているかどうか“主”であり、信号伝達は“従”とする。従来の研究方法は、信号伝達が“主”であり、それによって感性（高度感性情報）が伝達されるかどうかは“従”，すなわち、装置の出来次第の成行きまかせであった。これに対し、提案の研究方法は従来とは逆に、感性（高度感性情報）が伝わることを“主”に、そのことが可能となるような信号伝達方法を要求する。すなわち、信号伝達は“従”であり、高度感性情報が伝達されない音響再生装置は徹底的に伝達されるまで改善する、とするものである。

なお、高度感性情報が伝達できる装置であっても、美意識と価値観を共有する人の間でしか高度感性情報は伝達されないことは、前提条件として存在する感性情報伝達の場合の特殊事情である（図 2.3）。

上記、前提条件を実際に考える意味で、評価用音源を選択することについての基本的な

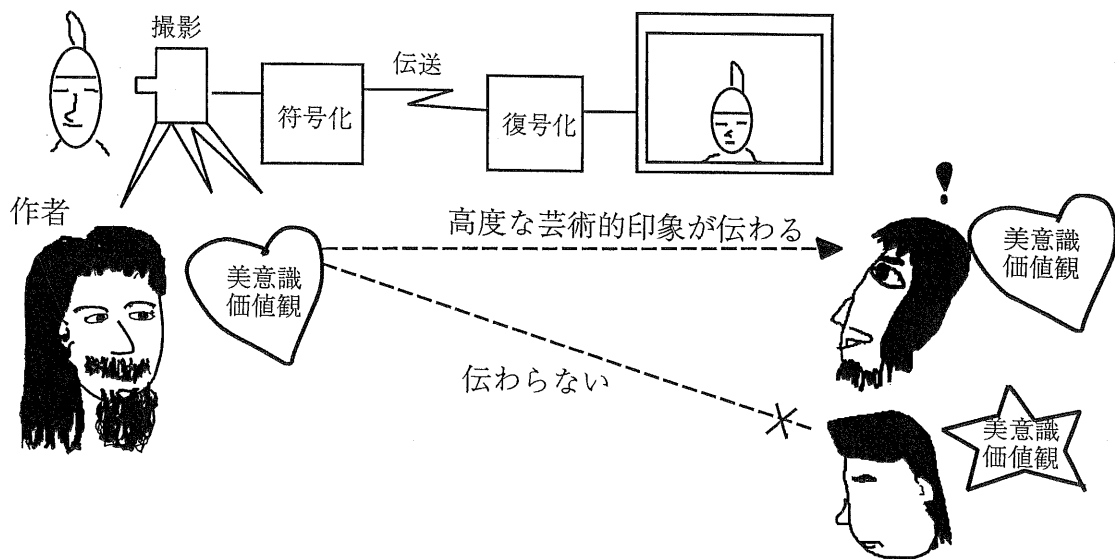


図 2.3: 感性情報伝達的前提条件（美意識と価値観の共有）

考え方を説明する。

(1) まず、CD に含まれている情報をオリジナルと考えて、それを無歪み伝送し、再生することを基本に考える。すなわち、原音を高忠実に再生することを目的とする。(2) したがって、基本的には、なるべく録音状態が推測しやすいものを選択する。(3) その選択された CD の中で、楽譜や音そのものへの思いではなく、演奏者の感情やそれが伝わってくると思われる部分で、実際に感情が伝わるものを対象として更に音源を絞り込む。(4) 結果として、選択されるジャンルなどには特にこだわらないが、聴取者に感動を喚起させるようなものであれば、評価用音源となり得ると考える。

従来の研究方法は演繹的方法のみによるアプローチである。すなわち、既にわかっている一般原則から、論理的な規則のみによって必然的な結論を導く方法である。

これに対し、提案のコペルニクス的転回の方法は、“主”とする高度感性情報再現を目的として、まず、音質の違いに大きく関連する第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性や物理要因（暗黙知）を発見（明視知）するために帰納的方法（ボトムアップ的方法）を取り、次に、発見された電気的特性及び物理要因を含めた全ての特性や要因を満足するように音響再生装置を開発し、その結果を評価試験するというアプローチである。ここで、帰納的方法とは、同種と考えられる事柄を観察して、個々の特殊な存在や事実から、共通の一般的な結論を導き出す方法である。すなわち、後半に行うアプローチは、従来と同様に演繹的方法を取るが、前半に行う、高度感性情報再現のために第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性及び物理要因の発見のアプローチ（帰納的方法）を取ることが、

重要な研究方法である。具体的には、主目的である高度感性情報が再現されているか否かを第一に、ここからスタートする。すなわち、多くの聴取実験を繰り返し行う中で、高度感性情報の再現が大きく変化した時の電気的特性や物理要因及び状態の変化を観察し、第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性の発見、及び、第二義の無歪み伝送条件の重要な物理要因の発見を行っていく。その際、発見された特性・要因の変化に深く関連する言葉をキー評価語（“空気感”など）とする。すなわち、キー評価語を特性・要因の発見の手がかりとする（図 2.4）。その後、キー評価語と総合評価との相関を明らかにし（3.4）、発見された特性や要因と総合評価との関係を求める。そして、演繹的研究方法を取り、発見された必要条件を満たす電気的特性の実現や要因の改善を行ったパイロットシステムを開発し、発見された各々の特性・要因が、高度感性情報の再現に重要な特性・要因であることを実証する。

上記のような新しい研究方法により発見された特性・要因は、図 2.5（推測も含む）にまとめて示されるが、主たる発見は、音楽信号の時間方向の歪み：時間伸び縮み歪（jitter）に関連する (1) 波面の乱れ（“空気感”，“雰囲気”の劣化）と、(2) 音のパワーの無反射伝達及び瞬時的エネルギーの放出（音のはき出し）である。これは各々仮説 1，仮説 2[5]として以下にまとめられる。

仮説 1 人間は、ある時刻の音とそれよりも過去に発せられた音との時間的関わり合いを知覚している。すなわち、信号の振幅方向と時間方向の結合でもたらされる音情報を知覚している。時間方向の歪み知覚の鋭さは振幅方向の歪み知覚の鋭さに匹敵し、「標準化の時間位置精度は信号の量子化精度と同格に重要である」。そして、「nsec. 以上の時間伸び縮み歪が生じている digital audio は音質上問題が生じている」。

具体的には、量子化レベルの 1LSB は 1Nyquist 間隔の $\frac{1}{2^n}$ と仮定すると、16[bit/sample] は 0.35[nsec] に相当する。

仮説 2 更に、「深刻さ”，“凄み”，“胸にしみ込む”などの高度な感性に訴える音の再生のためには、デジタル再生でもアナログ再生でも同様であるが、picosec 精度に時間歪みを抑えて明確な音像を再現し、且つその音像にパワーを集中させ、その音像から音響パワーをよどみなく吐き出させるような音の再現が必要である。」

この実現には、音響再生装置やその素子の時間軸方向の時間揺れを超高精度（picosec.）に押え込むことや、電源、回路、信号経路の再検討、そして音響空間へ音を反射なく放出する条件（無反射伝達）が必要である。

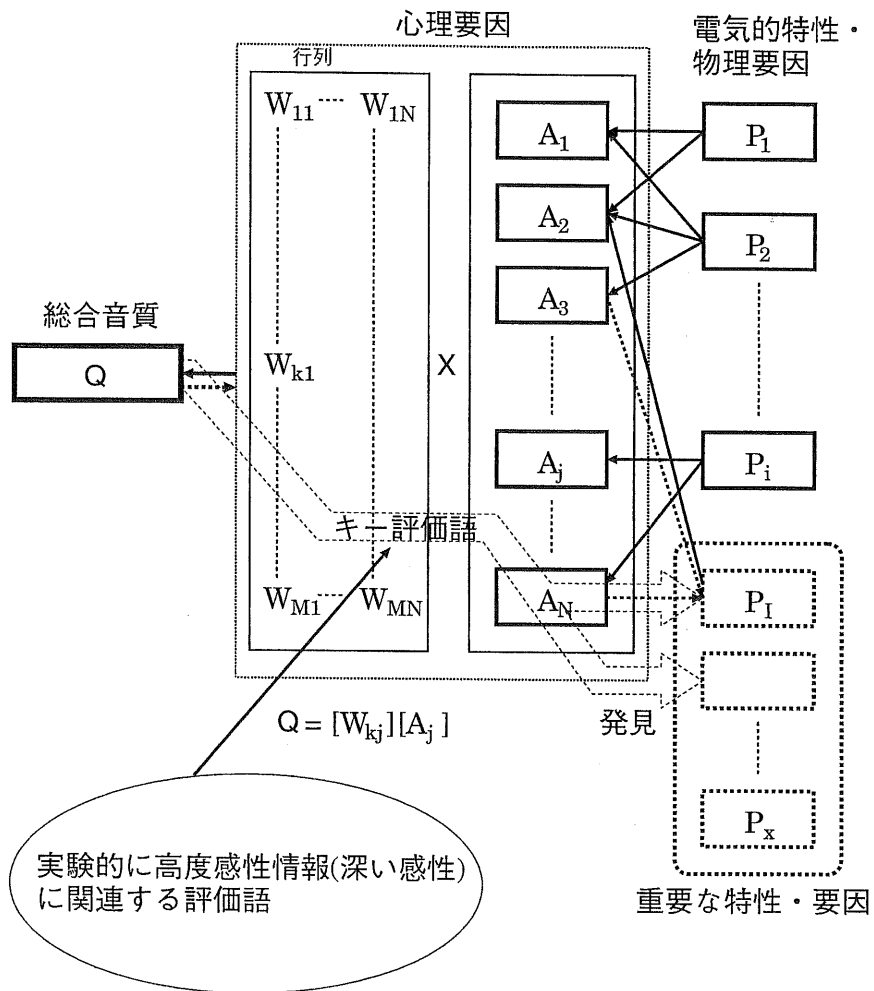


図 2.4: 第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性及び物理要因を発見するための帰納的研究方法

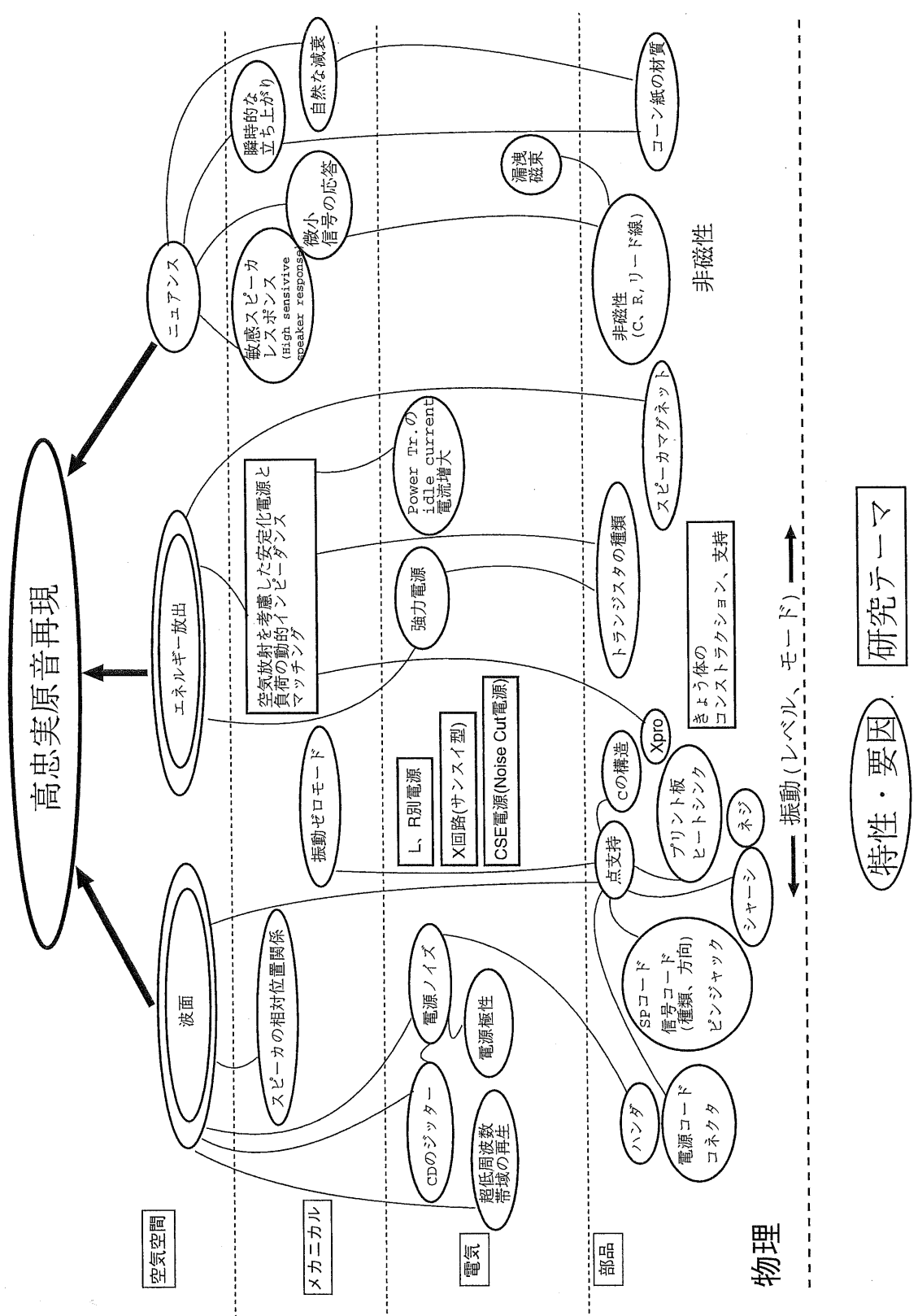


図 2.5: 発見された特性・要因 (推測も含む)

2.4 脳科学の研究と深い感性，浅い感性情報伝達の研究との関係

脳科学では，人間の感情は全て本質的には行動を起こそうとする衝動であり，進化の過程で脳に刻みつけられた反射的な行動指針であるという立場から，情動（“emotion”：動くことを意味するラテン語“motero”に分離を意味する“e-”がついたもの）と脳との関係を明らかにする研究が行われてきた[12][13]．これらの研究の説明と，深い感性，浅い感性情報伝達に関する研究が対象とする情動回路の仮説とその検証の方法について以下で述べる．なお，脳科学と深い感性との関係についての研究は現段階では，全く行われていない．

脳が精神活動の座であり，情動が脳内で起こっている出来事であることは疑いもない事実である．情動の表出が脳の特定の部位で司られているかを明らかにするために，情動の研究は進められた．情動研究の父と呼ばれる，ウィリアム・ジェームス（1884年）は，皮質下の脳組織には特別な「情動中枢」は存在しないことを主張していたが，その後，ドイツのゴルツ（1892年）によって，大脳皮質を外科的に完全に除去したイヌでも，指向性のある組織化された殆んど完璧な情動行動を起こすことが示された．更に，アメリカのキャノン（1927年）らにより，皮質下組織（特に視床）が情動の座であることが明らかになり，その後，バード（1928年）らによって，情動表出に関与しているのは視床下部であることが明らかになった．そして，スイスのヘス（1943年）らの実験により，辺縁系と呼ばれる領域（中隔野，扁桃体，海馬，帯状回など）が，視床下部とともに情動の中心的部位であることが明らかにされた．

この頃には，これらの研究と並行して，情動回路に関する研究も進められてきた．ペイペッツ（1937年）はキャノンやバードの考えに刺激され，臨床データを基礎に，情動発現の脳内回路モデルを提出した．それを図2.6に示す．ペイペッツの回路モデルは，基本的には視床下部は情動表出に，大脳皮質は情動体験にそれぞれ関与するというキャノン，バード説を取り入れている．しかしながら，情動反応に重要である種々の部位，例えば，扁桃体が含まれていないこと，実際に図2.6に示されている順序で情動の情報処理は行われていないなどの問題を抱えていた．

その後，マククリーン（1949年）は辺縁皮質及びそれと神経結合している皮質下組織を辺縁系と呼び，情動および内蔵機能に関与する一つの機能系とする概念（脳の三層構造）を提唱した（図2.7）．

その結果，現在，外界情報入力系には図2.8に示す2つの回路が存在することが明らかになっている．(A)一つは大脳新皮質の各々の感覚野から連合皮質を介して入る回路であり，(B)もう一つは，新皮質へ入る前に，主として視床などを介して入る回路である．

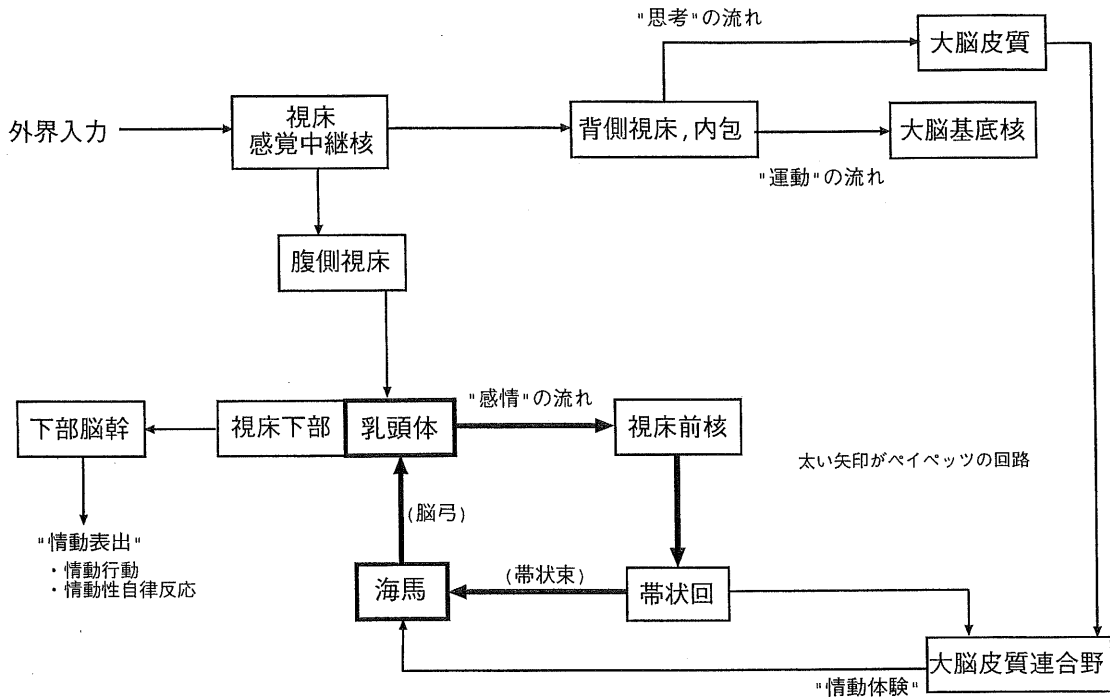


図 2.6: ペイペッツの回路モデル (脳と情動 [共立出版]: 堀哲郎著より抜粋)

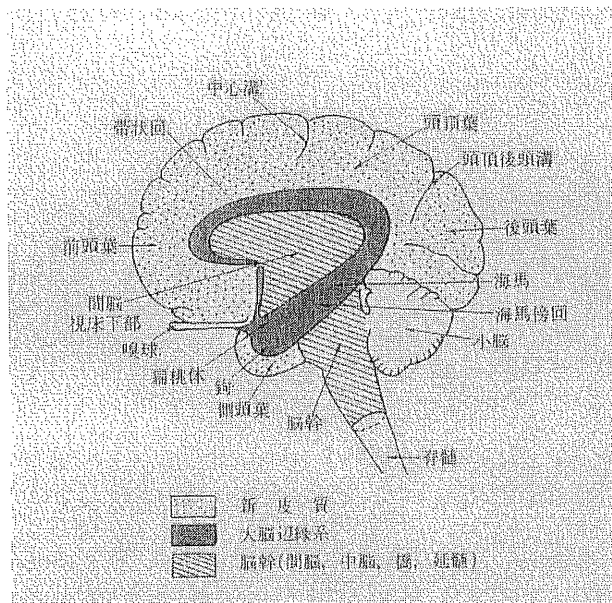


図 2.7: マクリーンの提唱した脳の三層構造 (脳と情動 [共立出版]: 堀哲郎著より抜粋)

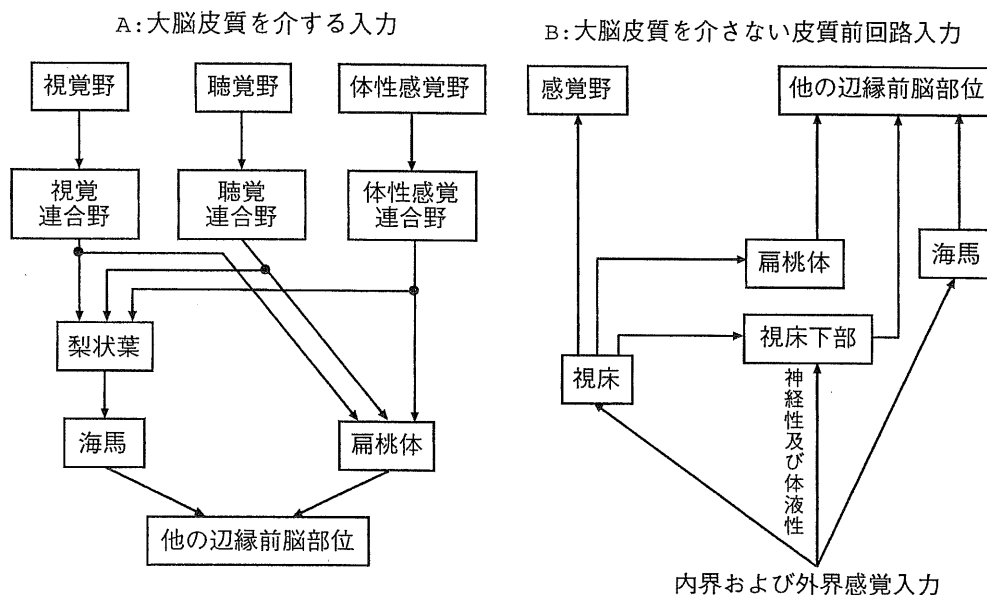


図 2.8: 外界情報入力系の 2 つの情動回路 (脳と情動 [共立出版]: 堀哲郎著より抜粋)

ここで、以下の仮説を立てた。それは、主として浅い感性を対象としてきた感性情報処理学分野では、上記回路の (A) による情動を対象にしており、それに対し、主として深い感性を対象としている高度感性情報の研究は、上記回路の (B) による情動を対象にしているという仮説である。即ち、深い感性は、外界の感覚 (皮膚や骨などを伝わって感じる感覚) が直接、視床に伝わり、脳幹や扁桃体を刺激することによって喚起される情動、感動であると考えている。

上記仮説の検証は、次の方法で行えると考えている。それは視覚野の情報処理過程における S.Zeki(1995) の実験 [14] を参考にする。S.Zeki は入力刺激の種類に対し、ある部位に到達する時間差が生じる場合があることから、脳内には通常の視覚情報処理回路と異なる処理系があるという仮説を立て、その検証を MEG (magneto-encephalography; 脳磁計) を使って行った。すなわち、本研究では入力刺激を“浅い感性”、“深い感性”とし、それに対する扁桃体への信号の到達時間の違い (仮説が正しければ、おそらく浅い感性は 100ms 程度、深い感性はそれ以内と考えている) を測定することにより、仮説の検証が可能ではないかと考えている。しかしながら、現状の測定器での測定を考えた場合、扁桃体の部位が脳の内部に位置しているため、測定可能かどうか、また、MEG を使う状態で、再生音の厳密な評価を行えるかどうかの検討が必要である。そこで、もう一つの方法として、直接情動回路との対応はとれないが、扁桃体の反応を表層でとらえる方法を考える。その場合に、株式会社日立メディコが開発した光トポグラフィ [15] を用いることにより、実際音を聴きながらの測定が可能であると考えている。測定の原理としては、NIRS イメージング

技術を使っており、ヘモグロビンの量の増減によって、脳のある部位の活動の有無を判断している。すなわち、入力刺激を”浅い感性”，”深い感性”とした場合のヘモグロビンの量の増減の違いが捉えられ、観察される扁桃体周辺の部位の活動が生じる時間差を求めることで、仮説の検証となり得るのではないかと考えている。

本研究では、音響再生装置の再生音の評価に評価語を用いて行っているが、上記、仮説の検証が行えれば、評価語を用いた主観的な評価尺度だけでなく、測定される生理学的データが、それを裏付ける、或は、それ以上に評価の正当性を示す、より客観的な評価尺度となり得るのではないかと考えられる。

第 3 章

高度感性情報再現の評価に重要な評価語

3.1 はしがき

人間は、音楽を聴覚知覚及び体感することにより、その脳内に、ある感情・感動が喚起させられ、その印象を優位脳（左）の前頭言語野で言語として組立てることによって表出する。このような考えに基づき、音を評価する言葉の研究は進められてきた。我国における音色、音質評価語の分類や表現は1960年頃から盛んに行われており、心理空間内における様々な表現が明らかにされてきた[16]～[18]。しかしながら、これらの研究は受け手側の音色、音質評価語に対する単純な意味的印象（浅い感性）を扱うといった範囲にとどまっております。深い感性に関する情報までを扱っていない。そこで、音響再生において重要な目的は、演奏音が伝達しようとしている心に訴えかける“情報”，言い換えると『直観的に心に迫るもの』を再現することであるという立場から、深い感性の情報を伝達できる高品位な音響再生の研究はスタートしている[5][19]。ここで、大脳皮質が働くことが意識されず、脳幹に直撃するような直観的に心に迫るものを“高度感性情報”と定義する。例えば「頭の中が真っ白になる」とか「涙が止めどなく流れる」という深い感性レベルの情報である。

本章では、音質評価語の多次元空間における総合音質と高度感性情報との関係から、主として高度感性情報に関連する評価語を明らかにする。

具体的には、高度感性情報を評価語で表せるとして、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を本や雑誌などから調査・収集し、グループ化（KJ法）した評価語の再検討を行う。次に、得られた評価語の多次元空間における解析（MDS、階層的クラスタリング）により、高度感性情報に関連する評価語を抽出する。最後に、装置開発中に発見されたキー評価語と高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を明らかにする。

3.2 過去の音質評価語研究との関連

音色、音質評価語に関する数多くの研究は、1960年代より、音の知覚の性質を探る目的で行われてきた[16]～[21]。そして、音の主因子は第1因子の「美的・叙情的因子」、第2因子の「量的・空間的因子」、第3因子の「明るさ因子」、第4因子の「柔らかさ因子」となること[16][17]が明らかにされ、これらの因子は世代を越えて安定であることが明らかにされた[22]。

更に、「音を聞いた際に人間がいだく感情を表現する評価語」と「音の持つ情報に関する評価語」を加えて評価実験と解析が行われ[23]、感情を表現する評価語は美的因子と相関が強いこと、音の持つ情報に関する評価語は音色とは独立な因子として現れ、「定位情報因

子」,「情報源因子」,「音の存在意義に関する因子」,「懐古・郷愁因子」となることが明らかにされた [23].

しかし, これらは単純な意味的印象(浅い感性)を扱う範囲にとどまる評価語群の解析 [16]~[22] や, 対象とする音の種類を環境音に限定している解析 [23] の結果であり, コンサートホールで聴く“緊張感”を伴う演奏音やその再生音の評価を対象としたものではない. 又, これらの解析は全体的な音の印象を主因子で現すという方法であり, 音質評価語自体の種類などを明確に区別して解析を行ったものではない.

これに対し, 本研究では, 音楽再生における重要な目的は,「演奏者が演奏を介して伝えたい芸術的印象の伝達である」という考えに基づき,「頭の中が真っ白になる」とか「涙が止めどなく流れる」という本能に直接働きかける深い感性のレベル(“本能直撃”, “一音感激”, “心から心へ”等)の情報, 即ち, “高度感性情報”を対象とした [24], 評価語解析を行う. ただし, 高度感性情報の再現は従来の音響再生装置による音楽再生と本質的に異なり, 送り手側と受け手側が伝送される高度感性情報に関して『共通の美意識と価値観』を持っていなければ成り立たないという前提条件がある [25] (図 2.3).

3.3 高度感性情報再現に関連する評価語の抽出

3.3.1 評価語の調査・収集・グループ化の再検討

これまでの研究においては, 人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を, 3年間にわたる多くのオーディオ雑誌から音質評価語を調査して, 延べ 1322 語から 192 語を得て KJ 法 [26][27] によりグループ化し, 30 語の代表評価語を得た [20].

これに基づき種々の評価実験を行ってみた結果, 従来のオーディオ雑誌には高度感性情報に関連すると考えられる評価語は, 殆んどなく, これらの音質評価語だけでは高度感性情報再現の評価に対し不十分である事が明らかになってきた. 又, 得られた 30 語の代表評価語においてイメージが曖昧なものや, 音質評価語のグループ化にやや問題があるものがあることが判明した. そこでこれらのグループ化と各グループを代表する代表評価語の再検討をした. 以下にその詳細を述べる.

具体的には, KJ 法を適用する段階で各代表評価語に属する音質評価語の移動・追加を行った. 更に代表評価語が表すイメージの明確化を図った. その方法は, 1 つの代表評価語を持ってきて, その代表評価語が残りの代表評価語とどのような関係になっているかのディスカッションを行うものである. このように代表評価語間の関係までをディスカッションすることにより, 各代表評価語のイメージをより明確にすることができた. 但し, この

ディスカッションは各評価者が個々の代表評価語に対する曖昧なイメージを明確にする目的で行ったものであり、各評価者の評価における個性の統一を強いたものではない。選出した30語の代表評価語は、KJ法及び代表評価語間の関係のディスカッションを何回も繰り返して行った結果、35語の代表評価語に収束した。なお、代表評価語は“ ”で括弧することとする。文中の‘旧’とあるのは文献[19]に記載された代表評価語である。

新たに作った代表評価語について説明する。

- (1) 高度感性情報に基づくと、“Holographic 音場感”は4chで作られる音場感とは著しく異なった印象である。旧“音場感”ではこの点が不明確なため、“4ch 音場感”と“Holographic 音場感”の2つとした。前者は音の強度のみによって作られる音場感であるのに対し、後者はこれに加えて、音の波面を感じるような、よりNaturalな或は繊細な3次元音場感である。
 - “4ch 音場感”は現行の4ch音響再生装置のような、音の強度のみによって作られる音場感であり、奥行き感・前後感・遠近感、音場感、定位感、広がり・広がり感、密度感、立体感、音像定位、位置感を代表する。したがって、旧“音場感”から音が前に出ている、清冽を“Holographic 音場感”へ、芯のあるを“軟らかさ”に移動した。
 - “Holographic 音場感”はHolographicな3次元空間の音像を表す代表評価語なので、“4ch 音場感”で表される音場感は当然として、更に、音が前に出ている、清冽、浮遊感、押し出し感、音が走る、音に包まれている、気配、音が飛び掛かってくるを代表する。
- (2) 旧“細かい表情の再現・情報量”を“細かい表情の再現”と“解像度”の2つに分割して新たな代表評価語とした。
 - “細かい表情の再現”は音楽的、或は抽象的な情報量であるので、表情豊か、ボーイングの深さ、色気、色彩感がある、余韻が鮮明、エコーが鮮明、ディテールの鮮明さを代表する。残った旧“細かい表情の再現・情報量”の物理的な音質評価語：分解能、解像力・解像度、情報量、セパレーションをまとめて“解像度”とした。
- (3) 旧“S/N感”の静寂感、S/N感を分割してそれぞれを新たな代表評価語“静寂感”、“S/N感”とした。

(4) 旧“自然さ”を“自然さ”と“圧迫感・威圧感”の2つに分割してそれぞれを新たな代表評価語とした。

- “自然さ”はナチュラル・自然，バランスよい，素直な，リニアリティーのよさ，ゆとり，優しい，ソフト，おとなしい，穏やか，グラデーションを代表する．旧“自然さ”から緊張感を“深々さ”に移動し，圧迫感，威圧感はまとめて新たな代表評価語“圧迫感・威圧感”とした。

(5) 旧“柔らかさ”を“軟らかさ”と“柔らかい”の2つに分割して新たな代表評価語とした。

- “軟らかさ”はふやふやな音をイメージする悪い意味の代表評価語であり，あまい，芯のある，軟らかい・硬い・硬を代表することとする．これに伴い，旧“柔らかさ”から優しい，ソフト，おとなしい，穏やかを“自然さ”へ，メリハリ，誇張感を“くっきりさ”に移動した．なお，音質評価語の甘いを平仮名のあまいと改めた。
- “柔らかい”は良い意味の代表評価語であり，柔らかい，柔らかみ・柔らかさ，まるやか，ふくらみ，ふっくらしている，ゆったりしている，ふくよかさ，マイルドを代表する。

(6) 旧“艶”と旧“歪感”から輝き感，きらびやか，派手を除き，まとめて新たに“きらめき”を作った．なお，新しい代表評価語に“艶”と“歪感”は残した。

次に，名前を改めた代表評価語について説明する。

(1) 旧“雰囲気”を“空気感”にした。

- “空気感”は空気感・空気が動く，スケール感を代表する．これに伴い，旧“雰囲気”から雰囲気感を“実在感”へ，浮遊感，押し出し感，音が走る，音に包まれているを“Holographic 音場感”に移動した。

(2) “実在感”は実在感，リアリティー・リアリズム，存在感，実体感，臨場感，雰囲気感を代表する．そして気配，音が飛び掛かってくるを“Holographic 音場感”に移動した。

(3) 旧“深さ”を“深々さ”にした。

- “深々さ”は深み, しっとり, 情感あふれた, 浸透力, 激しい, 緊張感, きれいなだけ, 凄み, 鳥肌が立つ, 深刻な, 心にしむを代表する. これに伴い, 旧 “深さ” からボーイングの深さを “細かい表情の再現” に移動した. また凄み, 鳥肌が立つ, は高度感性情報に注目して新たに加えた音質評価語である.

(4) 旧 “鮮明度” を “くっきりさ” にした.

- “くっきりさ”は輪郭強調をイメージする代表評価語であり, 鮮明・鮮やか, クリアな, 明瞭度, コントラストのくっきり, 音の輪郭がくっきり, 鮮度が高い, 冴え, 純, ピチッと出過ぎる, 写實的, 明るい・暗い, 明快さ, 斬新な, 角がない, あやふや, メリハリ, 誇張感, きつい, 鋭い, 強調感を代表する.

以上により得られた 35 個の代表評価語を表 3.1 に示す (付録 A).

表 3.1: 35 個の代表評価語

代表評価語
Holographic 音場感, 4ch 音場感, 空気感, 実在感 細かい表情の再現, 解像度, 深々さ, 気品, 静寂感 まとまり, 自然さ, 滑らかさ, 安定感, 厚み・こく 線の細さ, 抜け, 躍動感・生命感, 圧迫感・威圧感, 繊細感 透明度, くっきりさ (輪郭強調), 軟らかさ (ふやけた) 柔らかい (良い意味), 温かさ, 艶, 響き, きらめき ドライ・ウェット, 歯切れ・締まり, スピード感, 力感 量感, 歪感, S/N 感, 再生帯域

3.3.2 多次元空間解析 (MDS)

得られた代表評価語 35 語の多次元空間における相対的な位置関係を明確にするために, MDS 法 (多次元尺度構成法) を用いた解析 [21] を行い, 得られた心理空間内で評価語のクラスタ化やランクづけを行うことにより, 高度感性情報に関連する評価語群を抽出する. MDS 法には, Togerson が提案 [28] しているユークリッドモデルに従った方法 [29] を用いた. その方法によれば, Young 及び Housholder の定理 [30] を用いて内積行列から因子分析することにより座標行列を得て, 多次元空間における代表評価語の相対的な位置関係を

明確にできる．内積行列の要素 b_{jk} は原点を特定点でなく，全刺激（代表評価語）の重心にとる式 (3.1) により与えられる．

$$b_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} d_{jk}^2 + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} d_{jk}^2 - \frac{1}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} d_{jk}^2 - d_{jk}^2 \right) \quad (3.1)$$

式 (3.1) では，各代表評価語をユークリッド空間内の点とし，その点間距離を考え得る．式中の N は代表評価語数， j, k はそれぞれの代表評価語 ($0 \sim N-1$)， d_{jk} は代表評価語間のユークリッド距離を表している． b_{jk} は， N 次元空間における代表評価語 j から k へのベクトルのスカラー積を表し， N 次元に拡張した余弦則より求められる [29]．

ここで，式 (3.1) から得られたベクトルのスカラー積 b_{jk} を要素とする内積行列は，Young および Housholder の定理が成立しているが，それは内積行列が非負値行列である場合に，座標行列とその転置行列との積により表すことができる．即ち，式 (3.1) から得られた b_{jk} を要素とする内積行列を因子分析することにより，座標行列を得ることができる [29]．

なお，因子分析は以下の方法で行った．

(1) 因子の抽出方法は座標行列の計算が正確であり，数学的観点から見ても固有値を正にする特徴があることなどから，相関行列の対角成分を 1 として主成分分析を行った．

(2) 因子抽出後の回転方法は因子負荷量の平方の大きさの差異が最大になり，因子負荷量の平方の分散が大きくなることによって，因子が解釈しやすくなる Varimax 回転法を用いた．

(3) Varimax 回転法を利用する際には余計な因子を抱え込まないようにするための因子数の決定が重要である．単一の変量が行列の中であって，抽出可能な全分散に寄与する値を 1 とした時に，因子としてはせいぜい単一の変量の分散を上回る位の分散を持つべきである，という理由から固有値が 1 以上の因子を目安に抽出した．

MDS 法の解析により，心理的空間における代表評価語間の位置関係を明確 [31] にするためには，式 (3.1) 内の代表評価語間のユークリッド距離 d_{jk} が必要である．それを求めるために，次の評価方法を用いた．

3.3.3 評価方法

本研究において用いた評価は表 3.2 に示す尺度，カテゴリ，評価用語の対応を持つ 9 段階評価である．各人が頭の中で表 3.2 に示す感覚尺度に比例する -4 から 4 までの直線尺度を作り，評価された代表評価語間の印象を尺度上に投影していった．また，評価する際，評価しやすいように ITU-R [32] で規定され，カテゴリの等間隔性が保証されている 5 段階の

カテゴリを対応させた。すなわち、尺度値 4：カテゴリ [5] は非常に似ている、尺度値 0：カテゴリ [1][−1] は全く似ていない、尺度値 −4：カテゴリ [−5] は非常にマイナス相関がある、として表 3.2 のような対応で 9 段階評価を行った。

表 3.2: 尺度, カテゴリと評価用語の対応表

尺度	カテゴリ (ITU-R)	評価用語
4	[5]	非常に似ている
3	[4]	かなり似ている
2	[3]	似ている
1	[2]	やや似ている
0	[1],[−1]	全く似ていない
−1	[−2]	ややマイナス相関がある
−2	[−3]	マイナス相関がある
−3	[−4]	かなりマイナス相関がある
−4	[−5]	非常にマイナス相関がある

なお、評価者は、評価の信頼性の観点 [20] から代表評価語の意味を十分に理解でき、且つ、ばらつきのない評価をする成人 4 名である。その評価方法は、1 つの代表評価語がその他の 34 語の代表評価語とどれくらい似ているかを総当たりで評価するものである。これは、縦 35、横 35 の代表評価語の表を用い、縦横の交点は 2 つの代表評価語の相関度を表す尺度値：−4~4 (表 3.2) を記すものである。2.3.1 で記したように、ディスカッションにより各評価者が持っている各代表評価語に対するイメージの曖昧さを除去できたため、各評価者が独立に行ったこの方法において、各評価者の評価の最大誤差は、9 段階評価で“1 段階”となる程の結果を得た。

上記のような評価方法に従い評価した尺度値：4~−4 を、代表評価語間のユークリッド距離 d_{ij} ：0~8 に対応させ、得られた結果を MDS 法により解析した。

3.3.4 多次元空間マッピングの結果

3 次元までの表現ではあるが、抽出された因子の空間的イメージを掴むために第 1,2,3 因子を軸として図 3.1 に示す。(なお、図 3.1 中のプロットについては後述の (4) を参照)

また、抽出された因子数 (次元数) と固有値の関係は図 3.2 に示す通りになった。

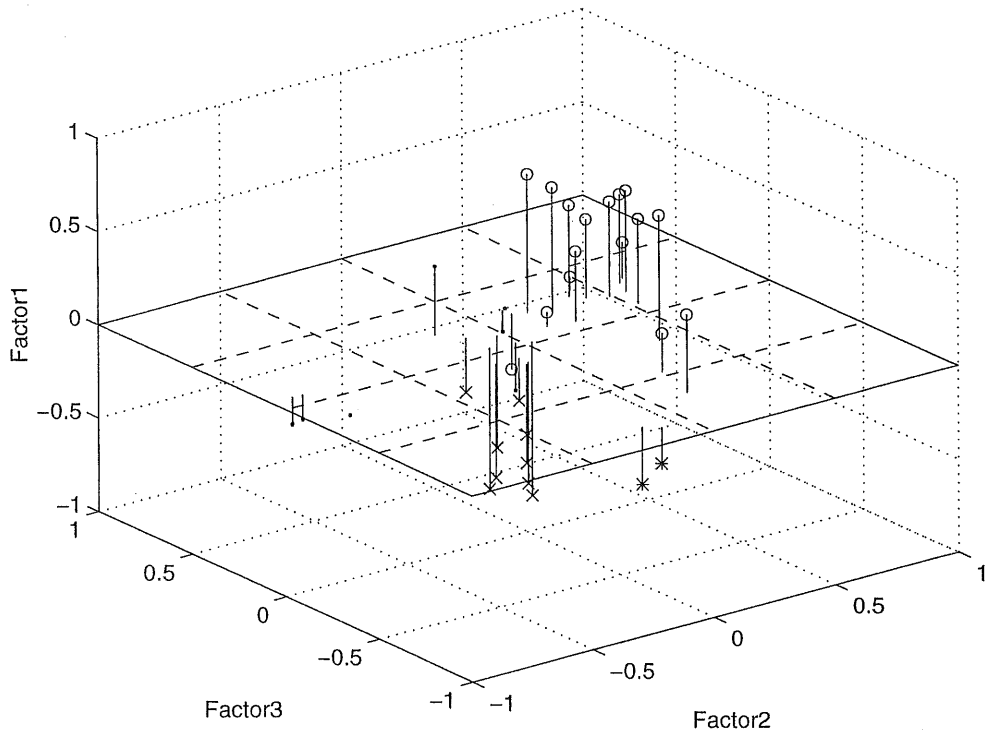


図 3.1: MDS 法による 3 次元空間マッピング

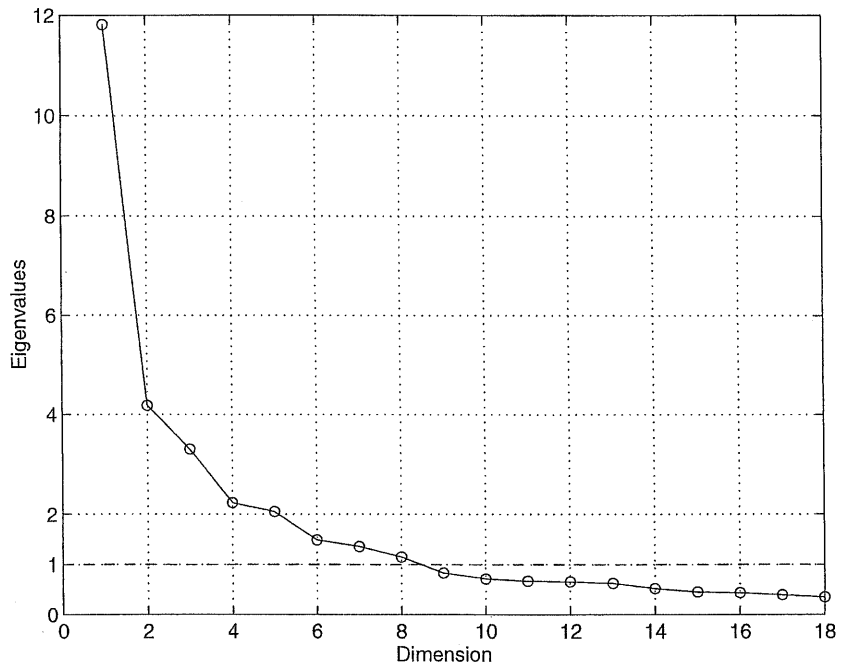


図 3.2: 固有値と次元数との関係

図 3.2より、固有値 = 1 を閾値とすると抽出される因子数は 8 因子であることがわかる。また、75 %分散法と根曲線法による因子数の決定においても 8 因子が得られた。そこで 8 因子までを考察する事とし、これら 8 次元に張られる心理空間においてクラスタ化を試みた。

3.3.5 代表評価語のクラスタ化（階層的クラスタリング）

クラスタ化は次の手順により行った。

- (1) 因子分析によって得られた因子負荷量から、8 次元空間における各代表評価語のユークリッド距離を求めた。
- (2) (1) で求めた距離行列から、手法には階層的クラスタリング [33] 法、パターン集合間の距離としては最近隣距離 [33] を用いてクラスタ化を行った。
- (3) 階層的クラスタリング法では、閾値の決定がクラスタの構成に影響を与える [33]。そこで、まず閾値は、距離行列の平均値 (0.5) とした。その後、閾値を 0.1 きざみで増加させていった。
その結果、閾値 0.5 で 6 クラスタと残余 17 個の代表評価語、閾値 0.6 で 4 クラスタと残余 13 個の代表評価語、閾値 0.7 で 4 クラスタと残余 8 個の代表評価語、閾値 0.8 で 4 クラスタと残余 4 個の代表評価語、閾値 0.9 で 2 クラスタと残余 1 個の代表評価語となった。この中で、各クラスタの集中度の最も良かった、閾値 0.8 で 4 クラスタと残余 4 個の代表評価語のクラスタ化を選択した。なお、これ以外の 4 つのクラスタ化の場合に対しても、本節 (2.3.2) の最終結論を得るまでをチェックし、閾値 0.8 で 4 クラスタと残余 4 個の代表評価語のクラスタ化が妥当であることを確認した。
- (4) 次に各代表評価語の総合音質への重みを考慮して、得られた 4 クラスタの順位を決める。それには、まず各代表評価語に対して 8 因子の因子負荷量に各因子の固有値をかけたものの和 (以下 P とする) を定義した。ただし、因子負荷量は絶対値を取るものとする。そして、各クラスタ内における全代表評価語の P 値の和の平均値を求め、値の最も大きいクラスタをクラスタ I とし、以下順番に名前を付け、表 3.3 を得た。各クラスタの P 値の平均値は、クラスタ I : 9.02, クラスタ II : 8.55, クラスタ III : 7.33, クラスタ IV : 5.87 である。なお、各クラスタ内の代表評価語は P 値の大きい順に記載してある。又、図 3.1 には、クラスタ I : “○”, クラスタ II : “×”, クラスタ III : “*” のプロットで表示した。

表 3.3: 階層的クラスタリング法を用いた代表評価語のクラスタ化

クラスタ	代表評価語
クラスタ I	実在感, 深々さ, Holographic 音場感 空気感, 安定感, 気品, まとまり 柔らかい, 静寂感, 躍動感・生命感 細かい表情の再現, 解像度 自然さ, 抜け, 滑らかさ, 繊細感
クラスタ II	S/N 感, 歪感, きらめき, ドライ・ウェット 再生帯域, くっきり, 艶, 線の細さ 軟らかさ
クラスタ III	スピード感, 歯切れ・締まり
クラスタ IV	量感, 4ch 音場感, 圧迫感・威圧感, 力感
その他	厚み・こく, 響き, 温かさ, 透明度

なお, 各代表評価語に対する P 値から, 総合音質に対する累積寄与率を計算すると, クラスタ I, II で 78.98 %, クラスタ III, IV を加えると 92.4 % になる.

3.3.6 代表評価語のランクづけとクラスタの意味づけ

代表評価語のランクづけ

表 3.3 の各クラスタは 8 次元空間内で 35 語の代表評価語がどのように布置されるかを調べた結果であるから, 各クラスタ内の代表評価語の心理的な距離が近く, 又, 他のクラスタに属する代表評価語とは心理的な距離が遠いという意味は明らかに存在するであろう. しかしながら, 各クラスタの P 値の平均値及び総合音質への (累積) 寄与率のみで, これ以上各クラスタの総合音質に対する重要度を議論することは困難である. なぜならば, 各クラスタの P 値の平均値のみを総合音質に対する重要度と考えた場合, 各クラスタ間に大きな差はないからである. 又平均値では表せない各クラスタ内の代表評価語数も考慮する必要がある. そこで総合音質に対して, 各代表評価語の重要度を考慮した尺度を別に定めて, 各クラスタの総合音質への重要度を議論する. その目的のため, テーマに対する重要度が直接示される衆目評価法 [34] によって, 代表評価語のランクづけを行った.

衆目評価法は以下の手順により行われる. 1. テーマを決める. 2. そのテーマを理解した数人の評価者が 1 つの評価対象 (島) を何点法で, いくつのランクに分けるかを決定する.

表 3.4: 代表評価語の衆目評価法によるランクづけ

代表評価語	級間	ランク
実在感 (20), 深々さ (19) Holographic 音場感 (18), 静寂感 (18) 空気感 (17), 安定感 (17)	17~20	A
気品 (16), 自然さ (16) 躍動感・生命感 (15) 抜け (14), まとまり (14), 柔らかい (14) 細かい表情の再現 (13)	13~16	B
厚み・こく (12), 滑らかさ (11) 繊細感 (10), 歯切れ・締まり (10) 力感 (9), 透明度 (9), 響き (9) スピード感 (9), 艶 (9)	9~12	C
解像度 (8), 量感 (8), 4ch 音場感 (8) 軟らかさ (7), くつきりさ (7) きらめき (6), 圧迫感・威圧感 (6) 温かさ (5), 線の細さ (5)	5~8	D
ドライ・ウェット (4), 再生帯域 (3) S/N 感 (3), 歪感 (2)	1~4	E

3. 各島に付けられた得点の合計をその島自身の得点とし、その得点により、ランク分けをする。その結果、設定テーマに対する島の重要度が示される。本研究では、“総合音質にどれだけ相関が強いかな”をテーマとして5点法で衆目評価法を行い、35個の代表評価語のランクづけ(5ランク)を行った。その結果を表3.4に示す。なお、評価は多次元尺度構成法の時と同じ評価者により行った。

クラスタの意味づけ

表3.4は各代表評価語の総合音質への重要度を直接評価した結果である。総合音質に対する各代表評価語の重要度を検討するには、ランクより各代表評価語の得点の方が詳細な情報を持っていると考えられる。そこで、各代表評価語に対して、表3.4に示す得点を心理的重み付け(w)とし、それとP値との積($P_w : P_w = w \cdot P$)を求める。即ち、 P_w は、統計的

解析の側面を持ちながら、且つ総合音質への重要度を直接反映しているため、総合音質に対する重要度を示す尺度となり得ると考えた。そこで、表 3.3 に示す各クラスター内で代表評価語の P_w 値の平均値を求めると、クラスター I (140.7)、クラスター II (41.5)、クラスター III (68.1)、クラスター IV (45.2) となった。これより、表 3.3 のクラスター I は総合音質に対する重要度が高く、クラスター II, III, IV は P_w 値の平均値がクラスター I の半分にも満たないため、総合音質に対する重要度が低いと考えられる。なお、各代表評価語の得点でなく、ランクに基づいた議論でも、クラスター I (38.5)、クラスター II (14.6)、クラスター III (20.6)、クラスター IV (11.6) とクラスター I が他のクラスターよりかけ離れて重要度が大きいという同様の結果を得た。

以上の議論により、クラスター I の代表評価語が高度感性情報に相関が強い、すなわち、高度感性情報評価語である。また、クラスター II, III, IV の代表評価語は従来のオーディオ評価でよく使われている評価語なので、従来オーディオ評価語は高度感性情報の評価には、あまり相関がないようである。又、その他の評価語は高度感性情報の再現に与える影響が大きいことが、繰り返し行った評価実験から明らかになりつつあるので、高度感性情報評価語に関係が深い評価語として考えている。

3.4 高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価と装置の開発中に発見されたキー評価語との相関関係

ここでは、(1) 高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価と、(2) 再生装置を開発する中で発見された心理物理学的なキー評価語との相関関係を明らかにする。

人間は、音楽を聴覚知覚及び体感することにより、その脳内に、ある感情・感動が喚起させられ、その印象を優位脳（左）の前頭言語野で言語として組立てることによって表出する。したがって、感動・感情を表すために、評価語を用いることができる。前節までに音質に関する評価語をまとめ、音質評価語の多次元空間における総合音質と高度感性情報との関係から、主として高度感性情報に関連する評価語を明らかにした。

一方、キー評価語は、高度感性情報再現を可能するシステム開発を行う中で実験的に発見され、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因の発見の手がかりとなる言葉である。

両者は、言葉（評価語）としては似ているが、キー評価語は (1) で求めた評価語を、まとめていく中には浮かび上がってはこなく、逆に下位（グループ化の中に）に落ち込んでしまう。たとえ、多くの専門的知識や経験を持つ人がまとめたとしても、キー評価語は代

表評価語として浮かびあがってこないのである。

これまでの多くの研究から、キー評価語は物理要因・特性に近いとはいえ、直接的に第二義の無歪み伝送の未知の条件の特性や要因は発見できない。もともと、発見とは系統的にできるものではない。しかしながら、何らかの手がかりが欲しい、それがキー評価語である。例えば、装置を開発する中で、ある特性や要因を変化させた時に、演奏が良くなった、あるいは、高度感性情報が再現されたというだけでは、何もそこからは発見できず、糸口さえ見つからないのである。しかし、そこで演奏の凄みや雰囲気が増した、胸にしみ込んできた、あるいは、空気感を感じたなどの具体的表現ができれば、それを手がかりとして、多くの聴取実験の結果を整理しながら繰り返し行う中で未知の特性や要因の発見、及び装置の開発を進めていくことができる。

これまでに、再生装置を開発する中で発見された心理物理学的キー評価語は、‘凄み（凄さ）’、‘胸にしみ込む’、‘のり’、‘温かさ’、‘緊張感’、‘重心の低さ’、‘空気感’、‘力強さ’、‘音の締めまり’、‘抜け’、‘透明感’、‘響き’、‘奥行き感’の13語である。

これらのキー評価語と総合評価との相関関係を議論するために、衆目評価法により重要度を求めた。具体的には、“総合評価にどれだけ相関があるか”をテーマとして5点法で第3章前半の実験で、信頼の高い評価をした成人2名により行った。これは、総合評価に対するキー評価語の相関度を示している。その結果を表3.5に示す。

表 3.5: 総合評価に対するキー評価語の相関度

キー評価語	級間	ランク
凄み（凄さ）(10)		
胸にしみ込む(9), のり(9), 緊張感(9)	9~10	A
重心の低さ(8), 空気感(8)	7~8	B
力強さ(6), 音の締めまり(6), 温かさ(6)	5~6	C
抜け(4), 響き(4)		
透明感(3), 奥行き感(3)	3~4	D

表 3.5より、総合評価に相関が高いキー評価語は、“凄み”、“胸にしみ込む”、“のり”、“緊張感”などであることを明らかにした。ここで、前節の表 3.4から、総合音質への重要度が高い評価語：“実在感”、“深々さ”の評価が、総合評価を代表するものであると考え、表 3.5の重要度が高い“凄み”、“緊張感”、“胸にしみ込む（心にしむ）”は、評価語のグループ化（付録 A）の段階で代表評価語：“深々さ”の中に含まれてしまった言葉で

あり，同一のグループ内の語であるから．これらキー評価語の重要度が高いのは当然である．衆目評価法により得られるキー評価語の重要度は，直接的な総合評価との相関性を示しているが，キー評価語間の関係は複雑であり，キー評価語と総合評価との相関性を議論しておくべきである．

そこで，総合評価を代表する“実在感”，“深々さ”に対し，間接的であっても影響をも考慮したキー評価語を求める．具体的には，“実在感”，“深々さ”に与える影響を Dematel 法 [35] を用いて求める．ここで，解析で求めらる影響度の大きいキー評価語を，再生音の評価に用いて改善が見られた場合は，同時に，キー評価語が与える影響が大きい総合評価も良くなる考えられる．すなわち，影響度の大きいキー評価語と総合評価とは相関が高いといえる．影響度解析の結果を表 3.6 に示す．

表 3.6: 総合評価を代表する“実在感”，“深々さ”に与える影響度

キー評価語	影響度 (合計)	“実在感”	“深々さ”
凄み (凄さ)	0.935	0.484	0.451
空気感	0.913	0.475	0.438
胸にしみ込む	0.842	0.423	0.419
重心の低さ	0.825	0.426	0.399
緊張感	0.801	0.426	0.375
のり	0.751	0.402	0.349
響き	0.667	0.347	0.32
抜け	0.647	0.338	0.309
力強さ	0.636	0.341	0.295
温かさ	0.594	0.32	0.274
音の締まり	0.546	0.27	0.275
透明感	0.468	0.258	0.21
奥行き感	0.366	0.201	0.134

表 3.6 より，総合評価を代表する“実在感”，“深々さ”に与える影響度が大きいキー評価語は，“凄み”，“空気感”，“胸にしみ込む”，“重心の低さ”などであることが明らかになった．

ここで，キー評価語の総合評価に対する直接的な相関性に間接的な影響度をかけ合わせた結果に基づいて，キー評価語と総合評価の相関関係を議論する．すなわち，表 3.5 と表

3.6より、各キー評価語の重要度と影響度の積を求めることによって、(1) 高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価に相関が高い (2) キー評価語を求める。

その結果、キー評価語群の全体の70%を締める値となる上位6語のキー評価語が明らかになった。それは、(i) 凄み：9.35, (ii) 胸にしみ込む：7.58, (iii) 空気感：7.3, (iv) 緊張感：7.21, (v) のり：6.76, (vi) 重心の低さ：6.60である。ここで、“凄み”は、他のキー評価語に比べてかなり高い値を示すことから、殆んど総合評価を表していると考えても良いであろう。また、“胸にしみ込む”、“空気感”を始めとする残りの5語のキー評価語と総合評価との強い相関関係は明らかに示されたといえる。

以上の考察より、上記の6語のキー評価語を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の特性・要因は、総合評価との強い相関関係が明らかにされているので、高度感性情報再現に重要な特性・要因となると考えられる。その確認は、発見された特性・要因を考慮した装置の再生音の主観評価実験により行われる。

3.5 まとめ

音質評価語の多次元空間解析などから、高度感性情報に関連する評価語を明らかにした。具体的には、これまでに高度感性情報を評価語で表せるとして、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を本や雑誌などから調査・収集し、グループ化(KJ法)した評価語では、高度感性情報再現の評価には不十分であること(評価語の曖昧性など)の問題があったため、グループ化の再検討を行った。その結果、得られた35語の代表評価語と総合評価との関係を求めるために、多次元空間における解析(MDS, 階層的クラスタリング)を行った。そして、定義した重要度の大きさから高度感性情報に関連する評価語(16語)を抽出した。その結果、高度感性情報評価語と従来オーディオ評価で良く使用されていた従来オーディオ評価語とは相関がないことを明らかにした。

その後、装置開発中に発見されたキー評価語(“凄み”、“胸にしみ込む”、“空気感”、“緊張感”、“のり”、“重心の低さ”)と高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を、重要度及び影響度解析により明らかにした。すなわち、上記の6語のキー評価語を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の特性・要因は、同時に総合評価との関係が深いので、高度感性情報再現に重要な特性・要因となると考えられる。その確認は、発見された特性・要因を考慮した装置を主観評価実験することにより行われる。

また、人間は音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現しているので、得られた評価語：高度感性情報評価語およびキー評価語を使うことによって、音楽・音響再生装置の高度感性情報の再現能力は評価できるとして本論文は議論を進める。

なお，高度感性情報再現に重点をおいた評価語の階層構造関係については付録 B に，聴取者の聴き方の違いに注目した評価語のグループ化と解析については付録 C に示す。

第 4 章

「無歪み伝送（第一義）」の実現と高度感性情報の再現

4.1 はしがき

前章（3章）では、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を調査・収集した評価語のグループ化を再検討、及び解析し、高度感性情報の評価に重要な評価語を求めた。その後、装置開発中に発見されたキー評価語と高度感性情報に関連する評価語を代表する総合評価との相関関係を明らかにした。本章では、従来音響理論で第一義の無歪み伝送条件を可能な限り満足させた装置を実現し、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現することを利用して、その再生音の音質評価を評価語を使って厳密に行い、高度感性情報再現の観点から議論を行う。

4.2 過去の「無歪み伝送（第一義）」の実現研究との関連

線形の通信理論に基づけば、音響再生装置に第一義に要求される性能は無歪み伝送条件（振幅周波数特性が平坦，群遅延周波数特性が平坦：位相周波数特性が線形）を満足する事である。これまでに、上記の性能向上及び、第二義にハードウェアに要求される電気信号上の諸特性の無歪み伝送条件を満足させるように様々な音響再生装置の開発が行われてきた[36][37]。また近年、デジタル技術の急速な進歩により、DSP(Digital Signal Processor)などが開発され、デジタルフィルタの設計と実現が可能となり、DSPを用いた音響再生装置の伝達周波数特性の補正に関する数多くの研究[38]～[41]が行われてきた。

しかし、これらの開発や研究は、高精度なフィルタ設計を目的とするもの[42]～[45]、実時間で自動的な補正が行える適応フィルタ等の補正方法に関するもの[46][47]であり、第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の補正による音質改善の効果について、厳密に評価し、評価結果を詳細に解析し、深く議論したものはほとんどない。

そこで、DSPを用いて伝達周波数特性をほぼ平坦（振幅周波数特性、且つ群遅延周波数特性を平坦：直線位相）に補正、すなわち、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足させた音響再生装置を実現する。そして、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現することを利用して、その再生音の音質を評価語を用いて厳密に評価する。そして、高度感性情報再現の立場から、音楽再生における音響再生装置のDSPを用いた伝達周波数特性の平坦化について議論を行う。

4.3 DSP を用いた音響再生装置の伝達周波数特性の補正実験

DSP を用いて音響再生装置の伝達周波数特性（振幅周波数特性・群遅延特性）を平坦に補正するという考え方は、線形システム理論に基づいており、音響再生システム全体を電気通信的に等価回路に置き換えて議論している。次節（4.3.1）の理論が成立するためには、等価回路は最小位相推移回路 [48] である必要がある。そのための必要条件は、機械振動的にはボイスコイルの動きと同一の解析が可能なピストン運動領域と推測され、非線形な動作や最小位相推移の範囲外と考えられる寄生振動や分割振動は振動板上の定在波や共振であり、電気信号での補正、すなわち、ボイスコイルの動きでは制御が困難であるため、補正から除去されるべきである。

また、最小位相推移系であることはシステムの安定性を保証するための必要条件と考えられる。したがって、伝達周波数特性（振幅周波数・群遅延特性）の補正は最小位相推移の範囲内で行う。

ここで寄生振動とは、スピーカが主として高音域において、ボイスコイルの動きに 1:1 に対応しないで振動するものと解釈している。また、分割振動は、ボイスコイルから離れた周辺部に行くほど位相が遅れることと、エッジ付近でのインピーダンスの不整合のために反射されて戻ってくることによって生じる定在波である。

したがって、DSP による信号の制御、すなわち、ボイスコイルの動きでは制御できない振動は、制御対象としないということである。寄生振動は全く制御できないが、分割振動はある程度制御できる可能性はある。しかし、このような非線形現象は正弦波スイープによる周波数特性と実際の音楽信号が入力された場合では、異なった動作をすると考えられる。したがって、寄生振動、分割振動の制御はできないので、これらの影響は除いて信号処理する。

4.3.1 伝達周波数特性の平坦化補正理論

測定される音響再生システムの伝達関数を $H(j\omega)$ とすると入力 $X(j\omega)$ 、出力 $Y(j\omega)$ に対して以下のようなになる。

$$Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega) \quad (4.1)$$

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (4.2)$$

伝送系を有限個の素子によるものと限定すると、 $H(j\omega)$ は $j\omega$ の実係数有理分数式であり、分母の $X(j\omega)$ の零点は左半面にある（Hurwitz 型）。ラプラス平面では、 $H(s)$ の分母の根は全て左平面に限られることと同じである。ただし、 $Y(j\omega)$ と $X(j\omega)$ は互いに素である。

この時、 $Y(j\omega)$ の零点は一般に左右両平面に存在するが、 $Y(j\omega)$ の零点の内、虚数軸を除いて左平面、右平面に存在するものを集めた因子をそれぞれ $Y_1(j\omega)$ 、 $Y_2(j\omega)$ とすると、

$$Y(j\omega) = Y_1(j\omega)Y_2(j\omega) \quad (4.3)$$

と分解され、この分解は $Y(j\omega)$ が決まれば一意的に定まる。したがって、

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y_1(j\omega)Y_2(-j\omega)}{X(j\omega)} \cdot \frac{Y_2(j\omega)}{Y_2(-j\omega)} \quad (4.4)$$

$$= H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega) \quad (4.5)$$

ここで $H_1(j\omega)$ は $H(j\omega)$ よりも位相回転の少ない特性であり、同一の振幅周波数特性を有し、最小移相部分である [49] ため、これを補正フィルタに用いる。すなわち、求めたい補正フィルタ特性 $F(j\omega)$ は、次式の逆フィルタ $H^{-1}(j\omega)$ によって得られる。

$$F(j\omega) = H^{-1}(j\omega) (= H_1^{-1}(j\omega)) \quad (4.6)$$

$$= |H^{-1}(j\omega)| \exp(j\angle H^{-1}(j\omega)) \quad (4.7)$$

4.3.2 補正フィルタ設計方法

(4.7) 式で得られたデータにハミング窓を掛けて逆フーリエ変換したものから FIR フィルタ係数を求め、これらを DSP に転送し、補正フィルタを実現させる。

実際の補正フィルタ係数は、次の手順で得る。

- (1) 振幅周波数特性、及び群遅延特性（位相周波数特性）を周波数分解能 1Hz で測定する。
- (2) 測定した特性から寄生振動や分割振動が生じていると考えられる周波数とクロスオーバー周波数、バスレフの f_0 を確認する。
- (3) その後、特性上で激しい位相回転が生じていない、すなわち、DSP で制御が困難な寄生振動や分割振動が特性上に含まれていない（排除された）と判断できる範囲まで、周波数分解能を粗くして測定する。
- (4) 取り除けない位相回転は近傍の値から外挿し、その測定結果を、DSP で補正が有効な最小位相推移の範囲内とする。

測定は Brüel & Kjær 社の BK2012 を使用し、1. 周波数範囲、2. 周波数分解能、3. 正弦波スイープ時間、4. 平均化回数を測定対象に合わせて設定する。また、補正フィルタ係数を求める時と音楽聴取時とのハードウェア性能の違いによる影響を除くために、DSP の伝達周波数特性 $F(j\omega)$ は、 $F(j\omega)=1$ となるフィルタ係数を設定し、測定する（以後、DSP の伝達周波数特性は $F(j\omega)$ と記述）。

4.3.3 音響再生システムの構成と動作

音響再生システムの構成を図 4.1 に、実験装置、及び測定器等を表 4.1 に示す。これらの機器は、特殊なものではなく、市販されていた一般的（平均的）なものである。

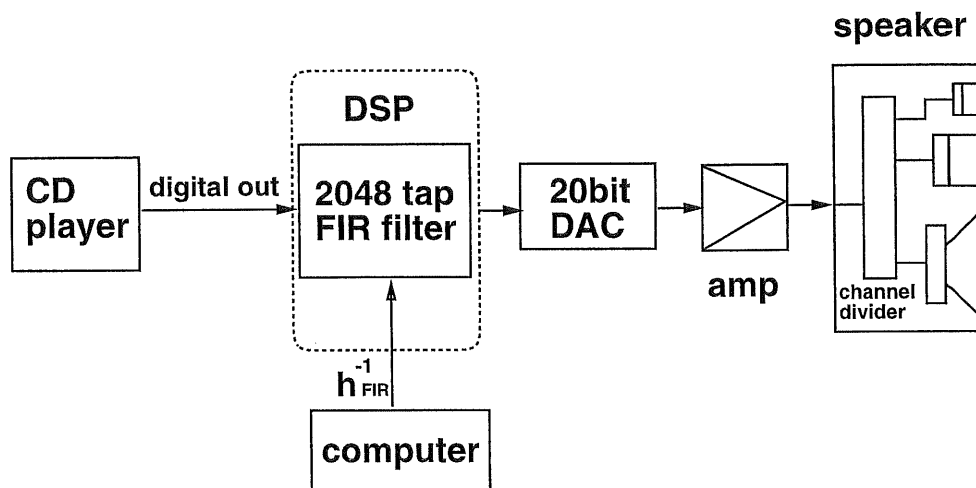


図 4.1: 音響再生システムの構成（片チャンネルのみ示す）

表 4.1: 使用した音響再生システム，測定器とその周辺機器

(音響再生システム)	
CD transport 装置	NEC CD-10
DSP 装置	SONY SR-DX1000
D/A converter 装置	Accuphase DC-91
Premain Amplifier	NEC A-10X
Speaker	YAMAYA NS-1000M
(フィルタ係数転送時に使用)	
DSP Control Software	SONY Xover SR-DX1000
Computer	Apple Macintosh Quadra800
(特性測定時に使用)	
Audio Analyzer	Brüel & Kjær BK2012
A/D converter 装置	Wadia WA4000

音響再生システムの動作を以下に示す。

- (1) CD に記録された音楽信号は CD transport 装置でデジタル信号として読み出され、AES/EBU Format に変換され、DSP 装置に送られる。

(2) 転送されたデジタル音楽信号は、DSP 装置で、予め測定及び計算された音響再生システムの伝達関数の逆特性の FIR フィルタ (2048tap) 係数と畳み込まれることにより補正され、再び AES/EBU Format に変換して DAC 装置に送られる。

(3) 補正されたデジタル・オーディオ信号は 20bitDAC IC でアナログ信号に変換され、プリメインアンプを介してスピーカに送られ、音として空間に放出される。

以上の音響再生装置の伝達周波数特性 (振幅周波数・群遅延特性) の測定を補正前後で行った。その結果を次に示す。

4.3.4 音響再生装置の伝達周波数特性の補正結果

無響室でない場合の Brüel & Kjær BK2012 測定指示 (TSR mode) に従い、スピーカ (ミッドレンジユニット) の正面軸上 50cm において測定した補正前の振幅周波数特性、群遅延特性を図 4.2, 4.3 に、平坦化を目的として補正を行った振幅周波数特性、群遅延特性を図 4.4, 4.5 に示す。なお、測定は周波数範囲: 20Hz~22.05kHz, 周波数分解能: 27.56Hz, 正弦波スイープ時間: 16s, 平均化回数: 16 回で行った。なお、 f_0 は 40Hz, クロスオーバー周波数は 500Hz と 6kHz である。

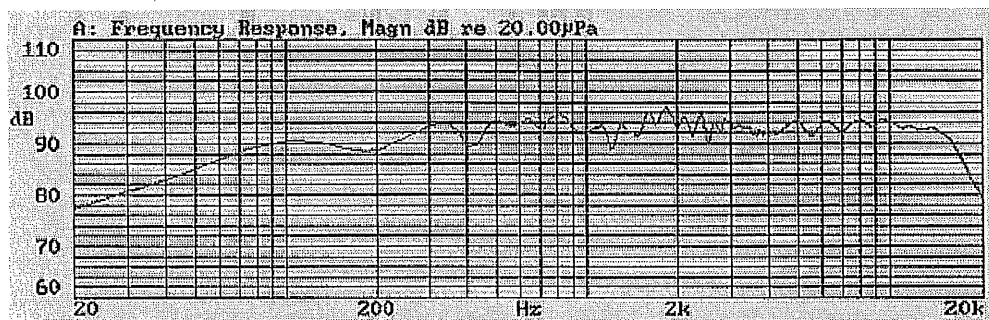


図 4.2: 補正前の振幅周波数特性

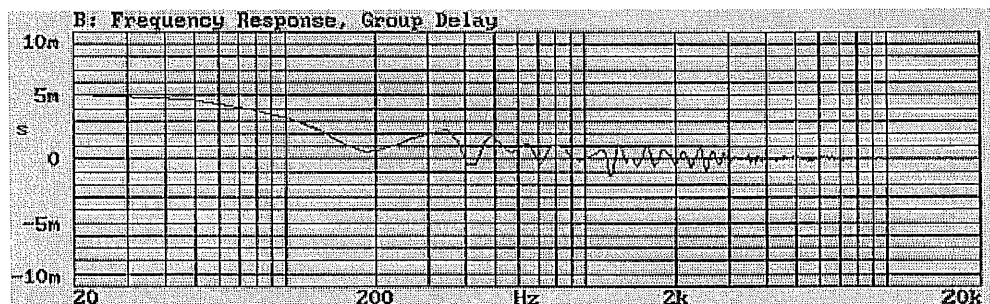


図 4.3: 補正前の群遅延特性

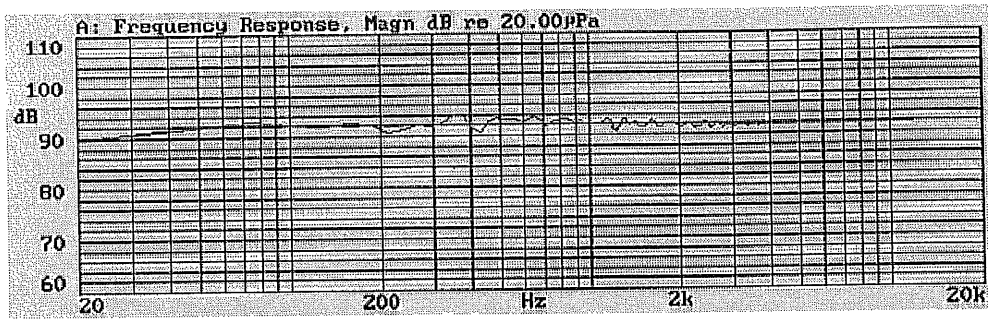


図 4.4: 補正後の振幅周波数特性

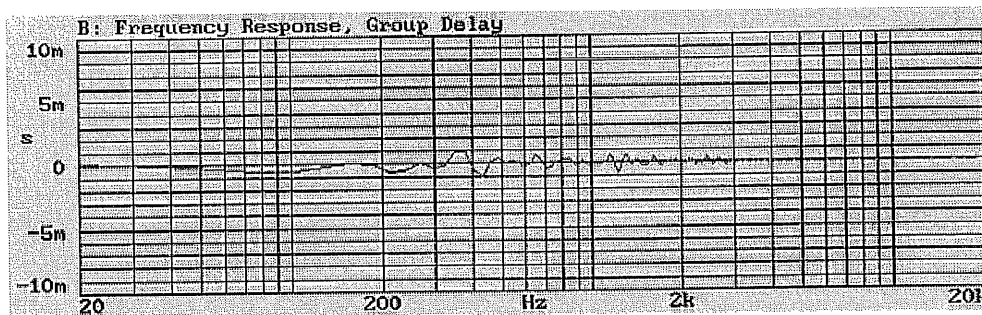


図 4.5: 補正後の群遅延特性

図 4.2, 4.4より, 振幅周波数特性は低域 (20Hz~200Hz) で $\pm 7[\text{dB}] \rightarrow \pm 2[\text{dB}]$, 中域 (200Hz~2kHz) で $\pm 4[\text{dB}] \rightarrow \pm 2[\text{dB}]$, 高域 (2kHz~20kHz) で $\pm 9[\text{dB}] \rightarrow \pm 1[\text{dB}]$ と補正されている. また, 図 4.3, 4.5より, 群遅延特性は低域で $0.5 \sim 5[\text{ms}] \rightarrow \pm 500[\mu\text{s}]$, 中域で $\pm 2[\text{ms}] \rightarrow \pm 1[\text{ms}]$, 高域で $\pm 1[\text{ms}] \rightarrow \pm 400[\mu\text{s}]$ と補正されている. 以上より, 伝達周波数特性はかなり平坦に補正されている [50] ことがわかる.

4.4 「高度感性情報の再現」の評価法

ここでは, 高度感性情報の再現に注目した時に, 音楽・音響再生装置は高忠実再生が出来ているかの評価について, すなわち, 高度感性情報の再現の評価方法を考察する.

高忠実再生を目指しているので, どの再生の実現をもって高忠実再生とするかを考える.

本論文の第1章でも述べたが, 従来オーディオの求める高忠実再生の定義は明確ではない. したがって, 本論文では, 従来音響理論に基づき進められてきた従来オーディオ研究が目指してきた高忠実再生は, 楽譜で表現される情報 (メロディ, リズムなど) が再生されていれば良いというレベルのものであるとして議論している.

これに対し、人間の感動を喚起させるような高度感性情報の再現の研究が目指している高忠実再生は、上記の楽譜情報再生レベルを超えた、演奏の凄みや雰囲気等までもを再生することであるとする。

上記の考えに基づき、高度感性情報の再現の評価方法は以下のように考える。

(1) まず基本的な考え方としては、人間は音楽などを聴くことにより得られる感動は、脳への刺激によって認知されると考えられるから、脳が感じるものが全てと考えて良いであろう。では、その脳への刺激をどのように測定するかということになる。実際の脳への刺激の測定は、脳波、脳電流、脳が直接コントロールしている脈動などを計測することが考えられる。しかしながら、これらを測定することの困難さと、また、この測定値がどのような感動を表しているのかについては明らかではない。例えば、とても嫌な刺激に対する衝撃（反応）かもしれないからである。そこで、脳に刺激が与えられた時に、脳内では、ある感動・感情が喚起されて、その感情を左脳の前頭言語野で言葉に変換して表現していることから、

(2) この人間の長（言語表出の脳内メカニズム）を利用して、高度感性情報の再現の評価に使う。

(3) すなわち、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を高度感性情報の再現の評価に用いることにする。この考えに基づき、第3章では人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を数千語以上収集・グループ化し、高度感性情報の再現に関連する評価語を抽出した。すなわち、抽出された評価語は、高度感性情報の再現を評価するための評価語である。したがって、音楽・音響再生装置の高度感性情報の再現の評価には、解析により抽出したこれらの評価語を用いる。

前節の音楽・音響再生装置の特性補正実験では、第一義の無歪み伝送条件；振幅周波数特性、及び群遅延特性を平坦に補正することを、ほぼ満足することができたといえる。しかしながら、どのレベルの高忠実再生が実現できているのかの評価を行う必要がある。したがって、次節では3章にて得られた35語の代表評価語を用いて、従来オーディオ評価語、及び高度感性情報評価語の評価が改善されるのかに注目して、評価実験を行う。なお、従来オーディオ評価語及び高度感性情報評価語は表4.2のように分類して示す。

表 4.2: 高度感性情報評価語と従来オーディオ評価語

	代表評価語 (35 語)
高度感性情報評価語	Holographic 音場感, 空気感, 実在感 細かい表情の再現, 解像度, 深々さ, 気品 静寂感, まとまり, 自然さ, 滑らかさ, 安定感 抜け, 躍動感・生命力, 繊細感, 柔らかい 厚み・こく, 温かさ, 響き, 透明度
従来オーディオ評価語	スピード感, 力感, 量感, 歪感, S/N 感 再生帯域, 4ch 音場感, 線の細さ 圧迫感・威圧感, くつきりさ, 軟らかさ, 艶 きらめき, ドライ・ウェット, 歯切れ・締まり

4.5 評価実験

4.5.1 評価条件 (評価室, 評価者, 評価語, 評価用音源)

評価場所は JAIST の AV 評価室 (H: 3.4m, W: 5.3m, D: 8m, 残響時間 [125, 250Hz で 0.4s, 500~2kHz で 0.3s, 4kHz で 0.4s]) で行った。この AV 実験室は天井は岩綿吸音板, 内壁は穴あきシナ化粧ラワン合板であり, 床は音楽専用フローリングの根太支持である。スピーカの背面は無穴の全面反射面であり, 対面は全面吸音面である。側面は波形になっており, 吸音面の対面は反射面である。

今回実験に用いた評価用音源を表 4.3 に示す。選択した評価用音源は, 高度感性情報を含む音源として複数の CD の中から探し出したもの [19] である。

被験者は, 評価の信頼性 [20] を考慮し, 多くの人々の中から, 事前に評価教育: 代表評価語の意味を深く理解するための説明とディスカッションを行った成人 9 名とした。その結果, 被験者自身の評価の安定性と評価の信頼性は向上した。評価は, DSP に $F(j\omega)=1$ のフィルタ係数を設定した時の再生音を規準とし, DSP に $F(j\omega) = H^{-1}(j\omega)$ の補正フィルタ係数を設定した時の再生音について行い, 聴取位置は左右 2 つのスピーカ間隔 (1.4m) の中心から垂直の方向に約 3.5m で行った。なお, 聴取位置は補正前と後で変えていない。また, 評価尺度は, ITU-R の 7 段階評価 [+3: 非常に良い, +2: 良い, +1: やや良い, 0: 同じ, -1: やや悪い, -2: 悪い, -3: 非常に悪い][32] を用いた。なお, 評価用音源の提示順序はランダムに行い, 再生は基本的に始めから終わりまで行った。提示回数及び提示時間は被験

表 4.3: 評価用音源

音源 No.	タイトル・曲名・演奏者・CD 番号
音源 1	Les Larmes du Jacqueline (Offenbach): (violoncello)Werner Thomas, ORFEO, C131 851A, No.1
音源 2	REQUIEM, Pie Jesu(Faure): (conductor)Carlo Maria Giumini, (soprano)Kathleen Battle, Deutsche Grammaophon, F35G 20085, No.4
音源 3	EAGLES HELL FREEZERS OVER: “hotel california”, GREFFEN GEFD-24725, No.6

者が評価完了するまで何度も繰り返した。

4.6 評価結果と考察

音響再生装置の伝達周波数特性は平坦に補正されたにも関わらず、総合評価は7段階評価の“0”であった。この理由を詳細に考察するために、各評価語の評価結果について有意差検定を行った。

4.6.1 評価結果の有意差検定

音響再生装置の伝達周波数特性の平坦化により影響を受ける評価語を求めるために、各評価語の評価結果について1群t検定(両側:有意水準5%以下)を行った。その結果、評価の有意差が認められた評価語及びその評価値(平均)を表4.4に示す。

表4.4より、有意差が認められた評価語の内、“量感”、“力感”、“再生帯域”、“くっきりさ”等の評価値は良い。表4.2より、これらは従来オーディオ評価語である。

また逆に評価値が悪い“自然さ”、“繊細感”、“静寂感”は、表4.2より高度感性情報評価語(以後表中では太字で示す)である。したがって、DSPを用いた音響再生装置の伝達周波数特性(振幅周波数特性・群遅延特性)の平坦化は、従来オーディオ評価語に関連する音質を改善させるが、高度感性情報評価語に関連する音質をあまり改善させないばかり

表 4.4: 1 群 t-検定の結果

代表評価語	評価値 (平均)
量感	1.125
力感	0.917
再生帯域	0.917
くっきりさ	0.479
圧迫感・威圧感	0.417
S/N 感	0.333
4ch 音場感	0.25
自然さ	-0.708
繊細感	-0.417
静寂感	-0.333

か、逆に劣化させる場合がある。

以上より、DSP を用いた音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性（振幅周波数特性・群遅延特性）の平坦化は高度感性情報再現度の改善とは独立であり、伝達周波数特性を平坦に補正する以外に考慮すべき第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性及び物理要因が存在していると考えられる。

次に、上記結果を更に深く議論するために、音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化による音質評価結果に対して、因子分析を行った。

4.6.2 評価結果の因子分析と解釈

評価結果の因子分析は、因子数の決定を固有値 1 以上の基準で行い、因子抽出後の回転方法は因子負荷量の平方の大きさの差異が最大になり、因子負荷量の平方の分散が大きくなることより、因子が解釈しやすくなる Varimax 回転法を用いた。その結果、8 因子を得たが、図 4.6 に示すように 3 次元から 4 次元にかけて固有値が急速に小さくなり、データ分散の 70 % を説明することから、3 因子を抽出した。

そして、各評価語の因子負荷量が最大値を示す因子に寄与しているという考えから、第 1 因子 (F1) から第 3 因子 (F3) までに寄与する評価語を表 4.5 に示した。なお、表 4.5 中の各評価語には 1 群 t-検定の結果を、良い評価：○，悪い評価：×，有意差なし：△で記した。

表 4.2, 4.5 より、第 1 因子に寄与している 11 個の評価語の内、殆どどの評価語（：“気

表 4.5: 因子分析の結果

代表評価語	F1	F2	F3
艶 (△)	<u>0.87</u>	-0.057	-0.143
気品 (△)	<u>0.867</u>	-0.066	0.028
深々さ (△)	<u>0.848</u>	-0.026	0.188
響き (△)	<u>0.823</u>	0.246	-0.284
抜け (△)	<u>0.808</u>	0.129	-0.074
細かい表情の再現 (△)	<u>0.796</u>	-0.004	0.094
実在感 (△)	<u>0.783</u>	-0.006	-0.004
透明度 (△)	<u>0.727</u>	0.062	-0.361
躍動感・生命感 (△)	<u>0.668</u>	0.51	0.242
自然さ (×)	<u>0.658</u>	0.014	-0.219
繊細感 (×)	<u>0.652</u>	0.008	-0.141
歯切れ・締まり (△)	0.004	<u>0.916</u>	-0.207
解像度 (△)	0.037	<u>0.879</u>	-0.137
くっきりさ (○)	0.02	<u>0.868</u>	-0.018
再生帯域 (○)	-0.117	<u>0.623</u>	0.344
柔らかい (△)	0.433	<u>-0.607</u>	-0.13
安定感 (△)	0.2	<u>0.593</u>	0.382
Holographic 音場感 (△)	0.317	<u>0.59</u>	182
量感 (○)	-0.024	0.205	<u>0.871</u>
圧迫感・威圧感 (○)	0.03	-0.052	<u>0.856</u>
力感 (○)	0.126	-0.08	<u>0.84</u>
空気感 (△)	0.264	0.277	<u>0.769</u>

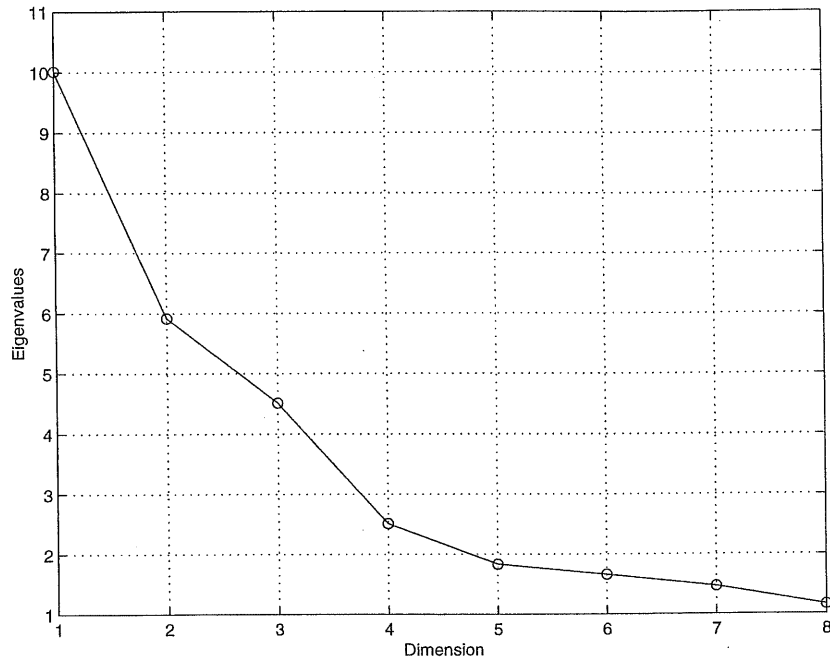


図 4.6: 固有値と次元数との関係

品”, “深々さ”, “響き”, “抜け”, “細かい表情の再現”, “実在感”, “透明度”, “躍動感・生命感”, “自然さ”, “繊細感”の10個の評価語)は, 高度感性情報評価語である事から, 高度感性情報に関連する因子であると解釈できる。

第2因子には, “歯切れ・締まり”, “解像度”, “くっきりさ”, “再生帯域”, “柔らかい”, “安定感”, “Holographic 音場感”が寄与している。ここで“歯切れ・締まり”, “くっきりさ”, “再生帯域”は従来オーディオ評価語, “解像度”, “柔らかい”, “安定感”, “Holographic 音場感”は高度感性情報評価語であるが, 評価の有意差の有無から従来オーディオ再生に関連する因子と解釈できる。

第3因子には, “量感”, “圧迫感・威圧感”, “力感”, “空気感”が寄与している。これらの評価語の内, “量感”, “圧迫感・威圧感”, “力感”は評価の有意差が認められており, かつ, 良い評価を得ていることから, DSPによる音響再生装置の伝達周波数特性の平坦化で改善される音質に関連する因子と解釈できる。また, “量感”, “力感”は寄与率, 評価値共に大きいことから, 第3因子も第2因子と同様に従来オーディオ再生に関係が深いといえる。

4.6.3 考察

表 4.4 より, DSP による音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化は従来オーディオ評価語に関連する音質を改善することが明らかになった. しかしながら, 表 4.5 より, 評価結果全体に対する最も主要な因子: 第 1 因子は, 高度感性情報に関連する因子である. したがって, DSP による音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化は, 従来オーディオ再生に関する音質を改善させること以上に, 高度感性情報の再現度の改善とは独立である, 或は, 再現度を低下させていると解釈される.

ここで, 高度感性情報再現という立場から, 音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性を平坦に補正することについて考察を行う.

DSP を用いた音響再生装置の第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化を行っても, 高度感性情報評価語はあまり改善されないことから, 高度感性情報の再現には伝達周波数特性とは独立に, 従来音響理論では明らかにされていない, 考慮しなければならない第二義の無歪み伝送の未知の条件, すなわち, 第二義の無歪み伝送条件の重要な電気的特性, 及び物理要因が存在していると考えられる. したがって, 高度感性情報再現のためには, これら第二義の無歪み伝送条件の未知の特性・要因の発見は重要であると考えられる. このことについては, 5, 6 章にて明らかにする.

4.7 まとめ

無歪み信号伝送理論に基づき, DSP を用いて第一義とされてきた伝達周波数特性を平坦(振幅周波数特性, 且つ群遅延周波数特性を平坦: 直線位相)に補正, すなわち, 第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足させた音響再生装置を実現し, その再生音の音質を評価した. その評価には, 人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉(評価語)を使う方法をとった. そして, 音楽再生における音響再生装置の DSP を用いた伝達周波数特性の平坦化について, 高度感性情報再現の立場から議論を行った. その結果, 従来オーディオ再生の一般的システムの第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性を DSP を用いてほぼ平坦に補正する事により, “量感”, “力感”, “再生帯域”などの従来オーディオ評価語に関連する音質が改善されることを明らかにした. しかしながら, 高度感性情報評価語はあまり改善されず, 逆に劣化する場合があった. すなわち, 従来音響理論に基づいて開発された音響再生装置をそのまま用いて, 第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化補正を行っても, 高度感性情報の再現度は向上せず, 逆に悪い場合があることを明らかにした.

したがって、高度感性情報の再現には、従来音響理論では明らかにされていない重要な第二義の無歪み伝送の未知の条件，すなわち，実現する音楽・音響再生装置のハードウェア上の性能となる重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性，及び物理要因が存在していることが明らかになった。

昔から巷では，(a) クリック音を聴けば，音響再生装置の音質がわかる．(b) 良い音の再生のためには「Speaker の伝達周波数特性にこだわるな」などと云われて来た．本章で得た結論は，この事の正当性を，ある一面で示している．すなわち，音響再生装置の無歪み（高忠実）伝送は，第一義に周波数領域上で振幅・群遅延周波数特性共に平坦化を検討すべきであるが，それ以上に，第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性及び物理要因が重要であり，それらを発見し，検討すべきである，ということである．

また，ミキシング，マスタリングなどの録音現場では，例え，第一義の無歪み伝送条件の音響再生装置の伝達周波数特性（振幅・群遅延周波数特性）が同一であっても，DSP 装置の違いにより音質が異なってしまうという事実，すなわち，第二義の無歪み伝送条件の未知の電気的特性が存在し，それが大きな音質の違いに現われることは，経験的に常識であると聞いている．本章はこの事実を厳密な評価に基づいて示したことになる．

なお，第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性及び物理要因の発見については，第 5, 6 章にて述べる．

第 5 章

高度感性情報再現に重要な「無歪み伝送
(第二義)」条件：電気的特性の発見と実証

5.1 はしがき

前章（第4章）では、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置を実現するために、一般的オーディオシステムの伝達周波数特性（振幅周波数特性・群遅延特性）を、DSP装置を用いてほぼ平坦化した。そして、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現することを利用し、その再生音の音質を評価語を使って厳密に評価した。その結果、従来オーディオ評価語に関連する音質は改善するが、高度感性情報評価語に関連する音質は改善されない、あるいは、それどころか劣化してしまうことを明らかにした。すなわち、高度感性情報再現のためには、考慮しなければならない第二義の無歪み伝送条件の未知の電気的特性及び物理要因が存在していることを明らかにした。

そこで、本章では第二義の無歪み伝送の未知の条件の内、電気的特性を発見することに努め、その結果、発見された第二義の無歪み伝送条件の二つの電気的特性について示す。

具体的には、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行う中で、装置の伝達周波数特性を平坦に補正するために用いたDSP装置のハードウェアが、音質劣化の原因となっていることの発見から、一つは、デジタルオーディオのサンプリングの jitter が原因であり、しかも jitter は従来の常識では信じ難い程の僅かな（ns オーダの）量に抑えなければならないことの発見である。もう一つは、一般に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が重要であるということの発見である。

上記二つの新たな電気的特性の発見の手がかりとなったキー評価語は、頬や身体に感じる“空気感”であることを明らかにする。そして、キー評価語：“空気感”と総合評価との相関関係を主観評価実験により確認する。また、“空気感”の再生を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性を満足させた装置を開発し、その再生音を高度感性情報に関連する評価語を用いて評価することにより、高度感性情報再現に重要な特性であることを実証する。

5.2 時間伸び縮み歪（jitter）の発見と実証

高度感性情報再現に重要となる第二義の無歪み伝送条件の未知の電気的特性を明らかにするために、多くの聴取実験を繰り返し行った。その結果、(1) 音楽・音響再生装置の伝達周波数特性を平坦に補正する目的で用いたDSP装置のハードウェアが、高度感性情報再現を劣化させる原因ではないかということがわかってきた。具体的には、音響再生システムにDSP装置をハードウェア上のシステムとして挿入した場合と挿入しない場合との再生音

に、たとえ、DSP の伝達周波数特性が $F(j\omega)=1$ であっても、高度感性情報の再現度（特に“空気感”再生）に違いが生じることが実験的にわかってきた。

一方、我々は、多くの聴取実験を繰り返す中で、(2) 第二義の無歪み伝送条件の電気的特性である時間伸び縮み歪 (jitter) を発見してきていた [51]~[53]。

そこで、上記 (1), (2) の実験的事実より、DSP 装置に起因している高度感性情報再現のために重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性が、既に明らかにした時間伸び縮み歪 (jitter) であるのか、それ以外の特性であるのかについて明らかにする。すなわち、DSP 装置のハードウェアの有無による特性の違いを、時間伸び縮み歪 (jitter) を念頭において観察及び測定を行う。

以下では、まず時間伸び縮み歪 (jitter) の発見の経緯について説明し、その後、DSP 装置のハードウェアの有無によるアナログ出力信号の違いの観測及び測定を行った実験について説明する。

5.2.1 時間伸び縮み歪 (jitter) の発見の経緯

我々は、多くの聴取実験を繰り返す中で、大きく高度感性情報の再現度に影響する第二義の無歪み伝送条件の物理要因; (1)CD 盤毎に CD player の電源プラグの差し込み極性を合わせる必要があること、(2)CD のチャック状態を変えるために CD player のトレイの出し入れする必要があること、などを明らかにしてきた。

そのような中で、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性である時間伸び縮み歪を発見した。まず、(1) の電源極性の違いによって、高度感性情報再現（特に“空気感”再現）が大きく変化する（7段階評価で表すと+3の違いがある）CD 盤を発見した。次に、その再生音のアナログ出力信号を測定し、差分信号を求めることにより、時間方向に伸び縮みする歪み：時間伸び縮み歪 [51] を発見した。その測定は、“空気感”を感覚する知覚が時間的に従来の音響システムの精度を遥かに越えるという予測から、特に時間方向の精度に重点をおいて行った。その時間的精度は、サンプリング間隔（ナイキスト間隔）を単位とする桁の精度を遥かに超えて、CD player 出力（アナログ信号）を 256kHz でサンプリングする際に、1/256kHz のサンプリング間隔の約 1/20 の精度で行った。その結果、CD player 出力には 700ns 以下の 140ns（測定限界）の時間伸び縮み歪が存在することを明らかにした。また、求められた差分信号からは、非常にゆっくりとした時間方向の歪みが観測され、高度感性情報再現に深く関係していると考察された。

更に、(2) などの物理要因から、時間伸び縮み歪が生じる原因の一つは jitter であるに違いないという推測を立て、jitter 除去器を用いてアナログ出力信号を測定したところ、時間

伸び縮み歪が大きく減少 (jitter 分布を正規分布として, 平均値で約-60dB 程度減少) したことにより, jitter が原因であることを明らかにした [51].

その後, jitter に注目した多くの実験 [52][53] を行い, 数 ns オーダの僅かな jitter でさえ, 高度感性情報再現を劣化させることが明らかになり, 現段階でデジタル・オーディオ機器の開発には, 総 jitter 量は約 10ns 以下に抑えなければならないことを明らかにした (図 5.1) [53].

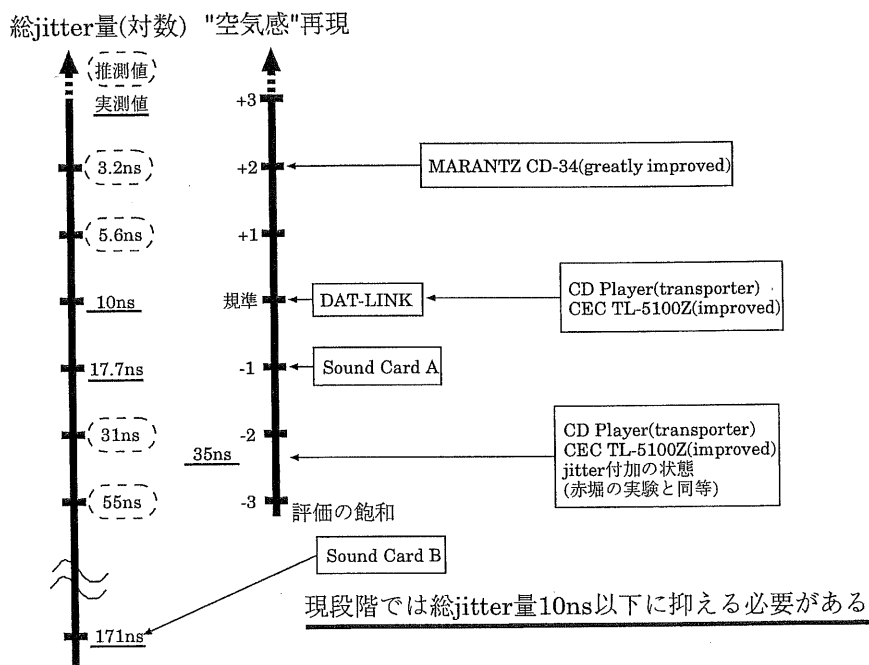


図 5.1: 総 jitter 量と“空気感”再現との関係

また, jitter の発見の手がかりとなったキー評価語は“空気感”であった。そして, “空気感”の再生を手がかりとして発見された jitter 量と総合音質との関係を知るために主観評価実験を行い, 同時に“空気感”と総合評価との相関が高いことを明らかにした [53]. すなわち, 総 jitter 量を約 10ns 以下に抑えなければならないことは, 高度感性情報再現のための第二義の無歪み伝送条件の装置の電気的特性である。

5.2.2 DSP 装置ハードウェアに起因する高度感性情報再現に重要な電気的特性 (第二義) の発見実験

DSP 装置のハードウェアに起因している高度感性情報再現のために重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性が, 時間伸び縮み歪 (jitter) であるのかについて明らかにするた

めに、DSP 装置のハードウェアの有無によるアナログ出力信号の違いの観測及び測定を行った。すなわち、音響再生システムに DSP 装置をハードウェア上のシステムとして挿入した場合（DSP の伝達周波数特性が $F(j\omega)=1$ ）と、挿入しない場合との、アナログ出力信号の観測及び測定である。

DSP 装置のハードウェアの有無によるアナログ出力信号の違いの観測及び測定実験

具体的には、図 4.1 の音響再生装置を用い、インパルス（デルタ関数）を入力し、アンプ出力波形を測定した。CD player からのアナログ出力信号は、CD player のデジタルフィルタ（44.1kHz, 16bit）との演算により、シンク関数が観測される。測定はアドバンテクト社製 FFTAnalyzer: R9211 を用い、サンプリング周波数：256kHz, 量子化レベル：16bit で行った。“波形の時間的位置をできるだけ正確に掴むため、波形が鋭く変化するピークディップ部分に注目し、13 個を選出し、そのピークディップが 1 サンプル（約 4 μ s）以上ずれない”という条件を与えて観測した。この観察は一つ一つのサンプル点が波形（シンク関数）本来のピークディップの位置にあるのか、ないのかについてまで厳密に行った結果ではないが、50 回の試行のうち、条件を満足した回数は DSP 装置がある場合が 5 回、DSP 装置がない場合が 30 回であった。

したがって、差が一様分布であると仮定すると、音響再生システム内に DSP 装置を挿入することにより、信号の時間軸方向の伸び縮み歪み：時間伸び縮み歪 [51] が生じていることを明らかになった。しかも DSP 装置のハードウェアを音響再生システム内に挿入することにより、その歪みの大きさは 6 倍に増加することが観測された。また、次の実験によっても時間伸び縮み歪（jitter）が観測されるのかの確認を行った。

それは、DSP 装置のハードウェアを音響再生システム内に挿入することにより増加する時間伸び縮み歪の量をより厳密に算出する方法である。測定は、ランダムに行い、その結果から時間伸び縮み歪の量を計算し、定量的な比較を行った。

具体的な jitter の算出方法は以下の手順で行った。なお、計算に用いたデータは、ピーク及びディップとその前後 2 ポイント：計 5 ポイントで行った

1. ある時刻でのピーク及びディップの振幅値（平均値，MAX：平均値+標準偏差，MIN：平均値-標準偏差）を実測値から求める。
2. 本来あるべきシンク関数を描き、計算により求めた振幅の平均値があるべき時刻を計算する。
3. MAX 値と MIN 値についても同様に行い、時刻_{MAX}-時刻_{MIN}=時間伸び縮み歪の量とする。

4. ただし、DSPの有無による時間伸び縮み歪の量の違いを純粹に求めたいので、そのまま求めた時刻の差（時刻_{MAX} - 時刻_{MIN}=時間伸び縮み歪の量）を用いるだけでは、ピーク及びディップの位置によって時間伸び縮み歪の量が大幅に異ってくるため、定量的に比較することができない。そこで、シンク関数上の観測ポイントの振幅位置での微係数の比を求めて、それをかけることにより補正を行う。すなわち、振幅の平均値での微係数を求めて、その比をかけることにより、平均値を同じ状態とみなすことにする。その上で時間伸び縮み歪の量を求める。

時刻_{MAX} - 時刻_{MIN}=時間伸び縮み歪の量として、

$$\frac{\text{時間伸び縮み歪の量}_{DSP有}}{\text{時間伸び縮み歪の量}_{DSP無}} \cdot \frac{\text{微係数}_{DSP有}}{\text{微係数}_{DSP無}} = \text{時間伸び縮み歪の量の比}_{有/無}$$

なお、時間伸び縮み歪の量はシンク関数上の異なる位置での時刻の差で計算するため、微係数が小さいほど大きくなり、大きいほど小さくなる。ただし、以上の計算では、(1)トリガポイントの不安定さ、(2)ノイズレベルの増減、(3)実際の時間伸び縮み歪の量の3つを含めた上での時間伸び縮み歪の量の比となる。

上記計算方法で求めた時間伸び縮み歪の量の比は約2~4倍であった。したがって、音響再生システム内にDSP装置がある場合は、ない場合に比して約2~4倍程度の時間伸び縮み歪の量を生じていることが明らかになった。すなわち、5.2.1で得た結果と同様に、デジタル機器であるDSP装置が、時間伸び縮み歪を増加させ、高度感性情報再現を劣化させている一つの原因であることを明らかにした。

しかしながら、アナログ信号上での観測を行っているため、必ずしも時間伸び縮み歪が生じる原因の一つがjitterであるかどうかは明らかではない。そこで、実際にDSP装置のハードウェアの有無によるjitter量の違いを直接測定した。

DSP装置のハードウェアの有無によるjitter量の違いの測定実験

具体的な測定は次のように行った。それは、デジタル・オーディオ・インターフェース(AES/EBU)上で観測されるjitter量を、CD playerのデジタル信号出力(DSP装置無し)とDSP装置のデジタル信号出力(DSP装置有り)で測定、比較する。測定は、AUDIO PRECISION社のAudio Analyzer: SYSTEM TWO CASCADEのjitter測定機能(世界最高精度)を利用し、測定された特性を、FFT機能により計算し、DSP装置のjitterの振幅周波数特性を求めた。FFTを行なうための信号の取り込みにはHanning窓を使用し、32,768ポイント、周波数分解能2Hz、16回平均を行った。

その結果、入力信号に Infinity-Zero を用いた場合で、総 jitter 量 [53] は、音響再生システム内に DSP 装置がない場合は 8[ns]、DSP 装置がある場合は 60[ns] であった。すなわち、音響再生システム内に DSP 装置を入れることによって、jitter 振幅周波数特性の総 jitter 量は、7.5 倍となることが明らかになった。図 5.2 に音響再生システム内に DSP 装置がない場合の jitter 振幅周波数特性を、図 5.3 に DSP 装置がある場合の jitter 振幅周波数特性を示す。DSP 装置がある場合は、jitter 量が高周波数領域において、増加していることが顕著に現われている。

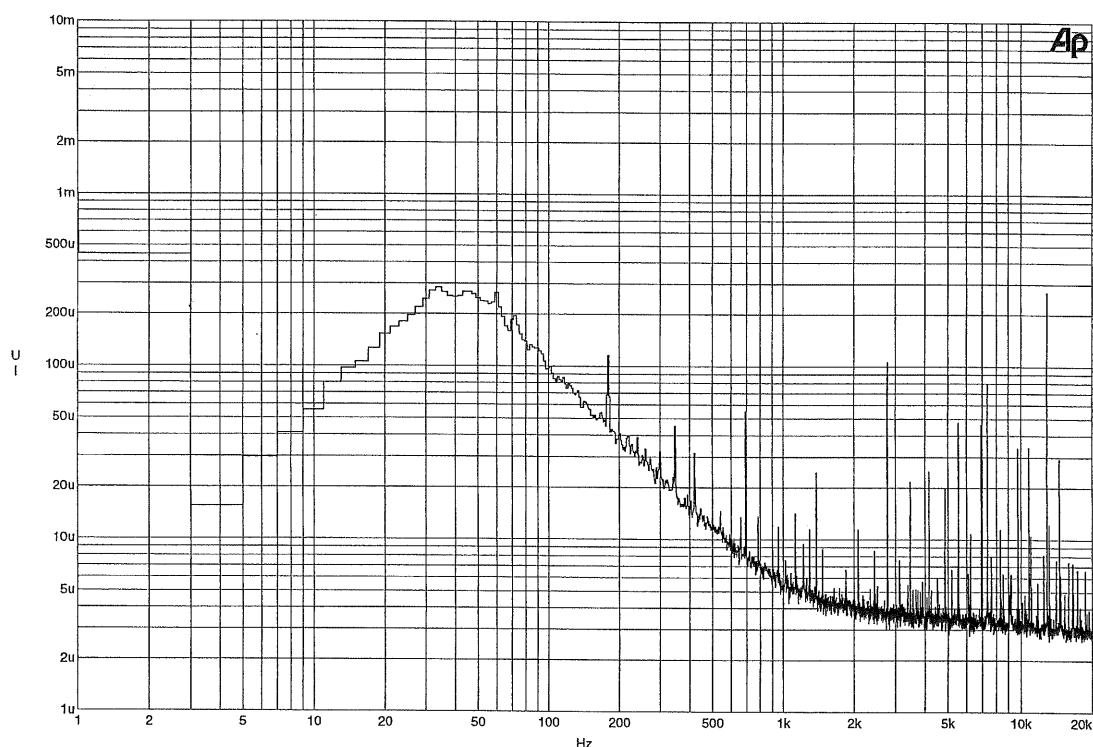


図 5.2: 音響再生システム内に DSP 装置がない場合の jitter 振幅周波数特性

すなわち、音響再生システムに DSP 装置をハードウェア上のシステムとして挿入することに起因して高度感性情報再現が劣化する一つの原因は、時間伸び縮み歪、すなわち、jitter の増加であることが明らかになった。しかも、高度感性情報再現を実現するためには、総 jitter 量を数 ns オーダに抑えなければならないことも明らかになった。

次に、前節 (5.2.1) 及び実験的事実 (1) より、時間伸び縮み歪 (jitter) の発見の手がかりとなったキー評価語は“空気感”である。したがって、キー評価語：“空気感”の再生と総合評価との相関関係を、次の主観評価実験により確認する。

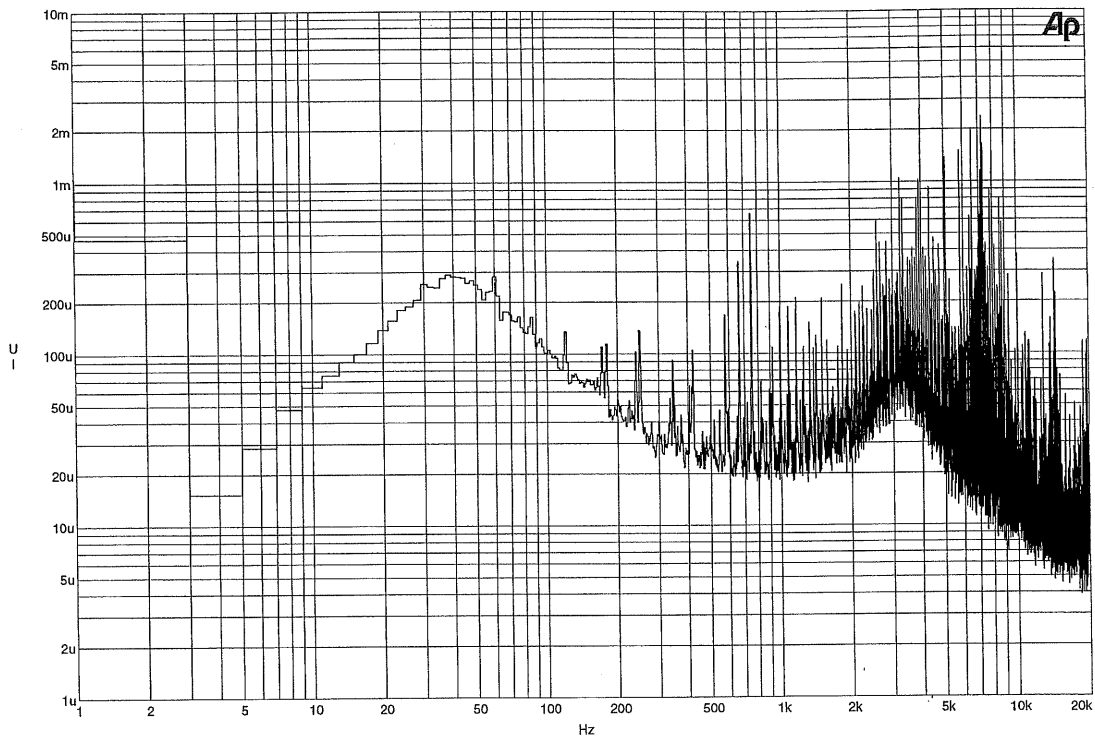


図 5.3: 音響再生システム内に DSP 装置がある場合の jitter 振幅周波数特性

DSP 装置のハードウェアの有無による高度感性情報再現の違いの主観評価実験

具体的には、図 4.1において音響再生システムに DSP 装置を挿入せず、CD transport 装置のデジタル信号出力をそのまま D/A 装置に送り、アナログに変換して、アンプ、スピーカを通した時の再生音を規準として、図 4.1の構成のままの音響再生システムを用いて DSP に $F(j\omega)=1$ のフィルタ係数を設定して再生した時の音の評価する実験である。評価実験場所、音源や方法などの評価条件は 4.3.1 と同様で行った。

その結果、全評価語（35 語）における 7 段階評価は、良くても“0”であり、総合評価は“-1”であった。更に、その評価を 1 群 t-検定した結果を表 5.1に示す。

表 5.1より、評価の有意差が認められた評価語は全て評価値が悪く、特に“自然さ”、“実在感”、“細かい表情の再現”、“躍動感・生命力”、“空気感”等は高度感性情報評価語である。すなわち、音響再生システムに DSP 装置をハードウェア上のシステムとして挿入することにより、時間伸び縮み歪（jitter）が増加し、高度感性情報に関連する音質を劣化させていることが明らかになった。

一方、従来オーディオ評価語：“力感”、“再生帯域”等は多少影響はあるものの、殆どが評価の有意差が認められない。したがって、音響再生システムに DSP 装置をハードウェア

表 5.1: 1 群 t-検定の結果

代表評価語	評価値 (平均)
自然さ	-0.67
実在感	-0.48
細かい表情の再現	-0.46
躍動感・生命感	-0.44
Holographic 音場感	-0.44
響き	-0.44
深々さ	-0.41
厚み・こく	-0.39
力感	-0.39
抜け	-0.37
空気感	-0.35
透明度	-0.3
圧迫感・威圧感	-0.3
再生帯域	-0.26

ア上のシステムとして挿入することによる音質劣化は、従来オーディオ再生にはあまり悪影響を及ぼさないといえる。つまり、DSP 装置を挿入することにより増加する時間伸び縮み歪 (jitter) は、従来オーディオ再生に関連する音質にはあまり影響を及ぼさないことを示している。

キー評価語：“空気感”と総合評価との相関関係の確認

表 5.1 より、総合評価の評価値“-1”に対し、“空気感”再生の評価は“-0.35”であり、劣化度合に違いはあるが、相関関係は確認できる。しかしながら、他の評価語：“自然さ”，“実在感”などの方が、劣化度合いが大きいことから、より高い総合評価との相関性が見られる。これらの結果から考察すると、時間伸び縮み歪 (jitter) 以外にも音質劣化の原因となる第二義の無歪み伝送の未知の条件が存在している可能性があることを表していると考えられる。この一つの原因としては、第二義の無歪み伝送の未知の条件を満足していない音響再生装置は、高度感性情報再現能力が不十分であるために、各評価語自身の再生能力にも違いが生じていると考えられる。例えば、“空気感”は、その再生能力が少ないことが評価結果に影響していると考えられる。また、“自然さ”，“実在感”の評価が大きく劣化している結果になったのは、高度感性情報の再現に関係する未知の条件に、深く関連する評価

語であったのではないかと考えられる。この点については、6章にて明らかにする。

以上より、DSP 装置のハードウェアに起因する、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の一つは、“空気感”の再生を手がかりに発見された時間伸び縮み歪 (jitter) であり、具体的に DSP 装置で生じる総 jitter 量を数 ns オーダに抑えなければならぬことを明らかにした。

その後、実験を進めて、発見された総 jitter 量を数 ns オーダに抑えることの実現に努めているが、jitter の性質など発生メカニズムの解明をしなければならず、実際の装置の開発までには至っていない。しかしながら、非常に CD の偏心が原因で生じる CD player の回転系の jitter を減らす目的で開発された CD transport 装置を用いた再生システムの再生音を、評価語を用いて評価することにより、高度感性情報再現 (特に“空気感”再生) の非常に高い能力を持っていることから、発見された時間伸び縮み歪 (jitter) が高度感性情報再現に重要な特性であることを確認した。

5.3 超低周波数帯域の再生の発見と実証

前節では、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性として、DSP 装置 (デジタル機器) で生じる総 jitter 量を数 ns オーダに抑えなければならぬことを発見した。(1) その発見のきっかけとなった実験のアナログ信号上での差分信号からは、非常にゆっくりとした時間方向の歪みが観測され、それが高度感性情報再現、特に“空気感”再現に深く関係していることがわかってきた。(2) また、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行っていく中でアンプに注目した場合に、特に人間の可聴周波数帯域を超えた非常に低い周波数の再生能力の有無により、高度感性情報再現、主として“空気感”再現が異なることがわかってきた。

上記の実験的事実 (1), (2) を基づくと、アンプの超低周波数帯域の再生が高度感性情報再現 (特に“空気感”再現) に重要であるに違いないという推測に至った。そこで、一般的に良く使用されているサーボ型アンプに注目し、必要とされる第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の発見に努めた。

5.3.1 超低周波数帯域の再生 (サーボ型アンプの時定数の大きさ) の発見

サーボ型メインアンプは、周波数特性の改善、アンプのゲインの安定化、非直線形歪みの低減、雑音の減少、出力インピーダンスの低減などの多くの利点があるため、音楽再生用のアンプとして広く多方面で使われてきた [54][55]。その理論的根拠は、Negative Feedback

(NFB：負帰還)である。NFBとは入力電圧と出力電圧が同相であるような正相アンプの出力電圧の一部を逆相にして入力端に戻すことによって、上記した利点を得る手段である。しかしながら、トランジスタメインアンプは、直流増幅器であるから、DCオフセット成分が発生し、スピーカは中立点が0から移動してしまう。すなわち、DCオフセットが大きいとスピーカを破損してしまう危険性がある。これを避けるために、現存するアンプは、一般に、DC領域に最大のNFBをかけ、メインアンプのDC利得を1にして、上記問題が生じないことを目的として設計が行われている。従来音響理論では、サーボ時定数は人間の聴覚の周波数特性から10Hz程度(約0.016[s])で充分として設計されてきたようである。

前節の実験的事実(1)、(2)に基づき、高度感性情報再現、特に“空気感”再現に注目して実験を進めていく中で、一般的に良く使用されるサーボ型アンプの時定数を大きくしてみる、すなわち、超低周波数帯域を再生してみることにより、高度感性情報の再現度が大きく変わることが発見できた。ここで、この発見の手がかりとなったキー評価語は“空気感”であった。なお、サーボ時定数の大きさと総合評価との関係についての評価実験は次節(5.3.2)で行う。具体的には、サーボ時定数の大きさを、特に“空気感”再現が良くなるように改善したアンプと、何も改善していないアンプとの比較評価実験を行う。そのためにサーボ時定数の大きさの改善を以下のように行った。

サーボ型メインアンプの時定数の大きさの改善

高度感性情報再現という目的に対して選ばれたサーボ型メインアンプのOriginalのサーボ回路部を図5.4に示す。

図5.4より、この場合の時定数は約0.127[s]となり、周波数は約1.255[Hz]である。“空気感”再現に注目して再生音を聴きながら改善した結果、この時定数の大きさは約0.7614[s][約6倍](周波数を約0.2[Hz])とした場合、つまり、 C_{NFB} を47[μ f]→282[μ f]とした場合に、頬や身体で感じる“空気感”再現が大きく改善された。時定数が大きければ大きいほど良いのか、最適値があるのか、その値はアンプによって異なるのかは、考察(5.3.3)に記す。

次に、サーボ時定数の大きさを、特に“空気感”再現が良くなるように改善したアンプと、何も改善していないアンプとの再生音の音質の違いを評価語を用いる方法により、評価する実験を行った。

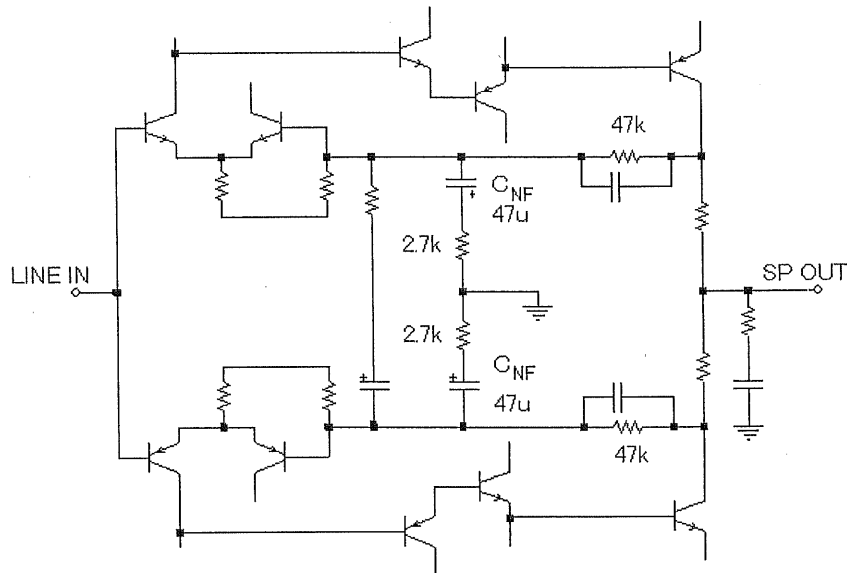


図 5.4: サーボ型メインアンプのサーボ部分の回路図

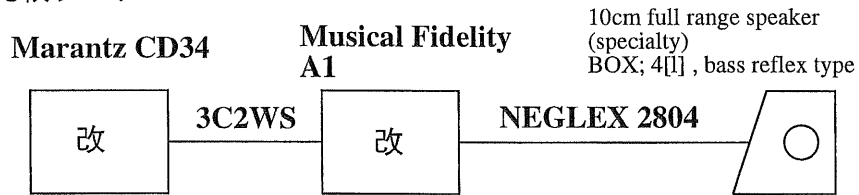
5.3.2 評価実験

評価条件（評価室，評価者，評価語，評価用音源）

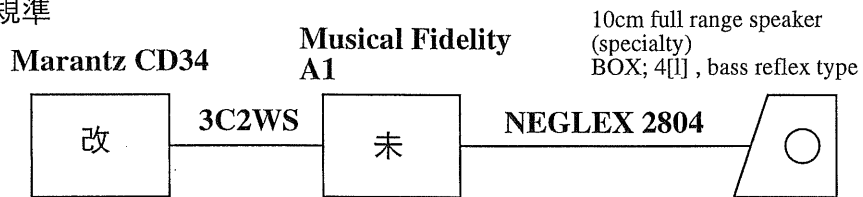
評価は，全く改善していないオリジナルの再生装置の再生音を規準として，“空気感”を再現するようにサーボ時定数を大きくするなどの改善を行った再生装置（付録 D.2）による再生音の評価した（図 5.5）．又，スピーカの振幅周波数特性を図 5.6 に示す．このように常識的には約 100Hz までの低周波数しか再現されないスピーカでも“空気感”再現に関係があることを示すことが，この実験のポイントである．

評価場所は JAIST の AV 評価室（H：3.4m，W：5.3m，D：8m，残響時間 [：125，250Hz で 0.4s，500～2kHz で 0.3s，4kHz で 0.4s]）で行った．被験者は，評価の信頼性 [20] を考慮し，多くの人々の中から，事前に評価教育：代表評価語の意味を深く理解するための説明とディスカッションを行った成人 5 名とした．評価の聴取位置は左右 2 つのスピーカ間隔（1.4m）の中心から垂直の方向に約 3.5m で行った．また，評価尺度は，ITU-R の 7 段階評価 [+3: 非常に良い，+2: 良い，+1: やや良い，0: 同じ，-1: やや悪い，-2: 悪い，-3: 非常に悪い] [32] を用いた．なお，評価用音源の提示順序はランダムに行い，再生は基本的に始めから終わりまで行った．提示回数及び提示時間は被験者が評価完了するまで何度も繰り返

比較システム



規準



未：未改造（オリジナル）
改：改造

注：未の部分の電源は商用（雑用）

図 5.5: 比較評価実験

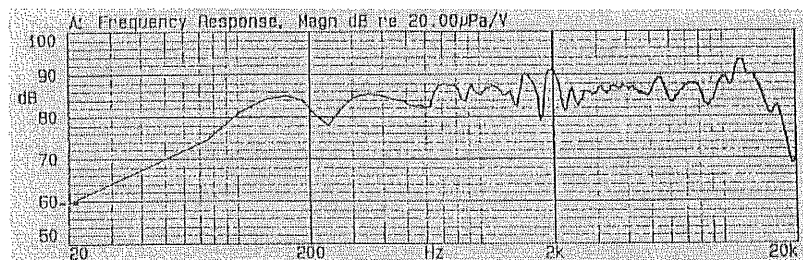


図 5.6: 実験に用いた口径 10cm のスピーカの振幅周波数特性

した。

今回実験に用いた評価用音源とその内容を表 5.2 に示す。選択した評価用音源は、高度感性情報を含む音源として複数枚の音楽リソースの中から探し出し、“空気感”再現が評価できるものを選択した。各評価用音源に対する評価語としては、“空気感”と総合評価は必ず選択し、その音源で評価可能な評価語を選択した。

表 5.2: 評価用音源

音源 No.	タイトル・曲名・演奏者・CD 番号, 内容
音源 1	PIANO CONCERTO No.5 “EMPEROR”(Beethoven): (conductor)Zubin Mehta, (piano)Vladimir Ashkenazy, LONDON, F00L-23016, No.2
	(内容): オーケストラ, ホール, ピアノ
音源 2	CANTATE DOMINO(Oscans Motettkor): Adolphe Adam, proprius, PRCD 7762, No.9
	(内容): 声, コーラス, ホール
音源 3	GOING HOME THE L.A. FOUR: L.Almeida(g), R.Brown(b), S.Manne(d), B.Shank(S,f), “GOING HOME”, EASTWIND EJD-3045, No.1
	(内容): ギター (木), ドラムス, トランペット

5.3.3 評価結果と考察

全く改善を施していないオリジナルの再生装置の再生音を規準として、“空気感”を再現するために、サーボ時定数を大きくするなどの改善を行った再生装置（付録 D.2）の再生音を評価した結果を表 5.3 に示す。なお、評価結果は“空気感”と総合評価の平均値のみを記す。

キー評価語：“空気感”と総合評価との相関関係の確認

表 5.3 より、サーボ型メインアンプのサーボ時定数を大きくすることにより、どの音楽リソースにおいても総合評価が大きく改善（7 段階評価で +1 以上の改善）されていることがわかる。また、キー評価語：“空気感”も、当然ではあるが、かなり（+1 以上）改善されている。したがって、“空気感”と総合評価との相関関係は明らかに確認できた。

表 5.3: サーボ時定数を大きくした時の音質評価の結果

音源	“空気感”の評価	総合評価
1	+1.2	+1.4
2	+2.2	+2.2
3	+1.3	+1.2

また、キー評価語：“空気感”再生を手がかりとして発見された超低周波数帯域の再生と総合評価との間にも、かなりの相関関係があることが明らかになった。したがって、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の一つの電気的特性として、サーボ型メインアンプのサーボ時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が必要であるが発見された。

又、他のアンプについても時定数を大きく（0.127[s]→約0.3[s]：2.3倍）した時に総合評価が良くなり、同時に“空気感”再生も改善されることが明らかになった。すなわち、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の一つである超低周波数帯域の再生の必要性は、再生装置が変わっても確認された。

そして、時定数には最適値が存在し、その最適時定数は、本実験で用いたアンプでは0.8[s]（0.2[Hz]）、他のアンプでは0.3[s]（0.5[Hz]）と必ずしも同じ値にならないことがわかった。この点については回路構成や第二義の無歪み伝送条件の物理要因との関係も含めて更に研究を進めることとする。

したがって、具体的には、高度感性情報再現（特に“空気感”再現）のためには、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性として、サーボ時定数の大きさは少なくとも0.3～0.8[s]程度、周波数では0.2～0.5[Hz]程度に、超低周波数帯域まで特性をのばして設計する必要があることを発見した。

更に実験を進め、発見された特性に基づき開発された高度感性情報再現システム（付録D）は“空気感”再現だけでなく、高度感性情報再現においてかなりの再現能力を有していることを評価実験により確認した。又、この特性の発見は、音楽聴取に対する聴覚や脳のモデル化に重要な事実とも考えている。

5.4 まとめ

本章では、第二義の無歪み伝送条件の二つの電気的特性を発見した。一つは、デジタルオーディオのサンプリングのjitterが原因で、そのjitter量は従来の常識では信じ難い程

の僅かな (ns オーダの) 量に抑えなければならないことの発見である。もう一つは、現在一般的に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が必要であるということの発見である。

上記二つの第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性の発見の手がかりとなったキー評価語は、頬や身体に感じる“空気感”であった。そして、キー評価語：“空気感”と総合評価との相関関係を、主観評価実験により確認した。その中で、DSP 装置の有無による高度感性情報再現の違いの主観評価実験では、時間伸び縮み歪 (jitter) 以外に音質劣化の原因となる第二義の無歪み伝送の未知の条件の存在を示唆する結果を得た。このことについては、6 章にて明らかにする。

その後、更に実験を進め、キー評価語：“空気感”の再生を手がかりとして発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性を満足させる目的で開発された装置及び、実際の開発した装置の再生音を評価することにより、高度感性情報再現に重要な特性であることの実証を行った。

また、上記発見された特性は、宮原の立てた仮説 1 の波面再生に矛盾する結果ではないと考えている。

なお、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の三つめの電気的特性 (電源に関するもの)、及び物理要因の発見については、6 章にて述べる。

第 6 章

高度感性情報再現に重要な「無歪み伝送
(第二義)」条件：電源に関する電気的特性
と物理要因の発見と実証

6.1 はしがき

第4章では、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置を実現するために、一般的オーディオシステムの伝達周波数特性（振幅周波数特性・群遅延特性）を、DSP装置を用いてほぼ平坦化した。そして、人間の特長の一つ；音楽を聴いた時に生じる感動・感情を言葉に変換して表現することを利用して、再生音の音質を評価語によって厳密に評価した。その結果、従来オーディオ評価語に関連する音質は改善するが、高度感性情報評価語に関連する音質は改善されない、あるいは、それどころか劣化してしまうことを明らかにした。すなわち、高度感性情報再現のためには、考慮しなければならない第二義の無歪み伝送条件の未知の電気的特性及び物理要因が存在していることを明らかにした。

前章（5章）では、その未知の条件の内、第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性の二つの発見を行った。それは、多くの聴取実験を繰り返し、高度感性情報再現システムの開発を行う中で、装置の伝送特性を平坦に補正するために用いたDSP装置のハードウェアが、音質劣化の原因となっていることの発見から、一つは、デジタルオーディオのサンプリングのjitterが原因であり、しかもjitterは従来の常識では信じ難い程の僅かな（nsオーダの）量に抑えなければならないことの発見である。もう一つは、一般に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ、すなわち、超低周波数帯域の再生が重要であるということの発見である。

本章では、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の三つめの発見と、物理要因の発見を行う。それは、第4章の実験で用いた音響再生装置の再生能力は高度感性情報の再生を議論するレベルにまで至っていないことに注目した。そして改善中に高度感性情報再現の改善が大きく見られた特性・要因が、高度感性情報再現に重要な特性・要因ではないかと推測した。その結果、音質に深く関連する第二義の無歪み伝送条件の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることの発見と、第二義の無歪み伝送条件の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することの発見を行った。また、上記の特性・要因の発見の手がかりとなったキー評価語は“胸にしみ込む”であった。キー評価語：“胸にしみ込む”と総合評価との相関関係は、繰り返し行った聴取実験により確認した。そして、“胸にしみ込む”の再生を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の特性・要因を考慮した装置を開発し、その再生音を高度感性情報に関連する評価語を用いて評価することにより、高度感性情報再現に重要な特性・要因であることを実証する。最後に、これまで得られた結果をまとめ、高度感性情報再現のについての議論を行う。

6.2 高度感性情報再現度を向上させた音響再生システムの伝達周波数特性補正実験

高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の未知の特性及び要因を明らかにするために、多くの聴取実験を繰り返す中で明らかにされてきた音質に関連する電気的特性及び物理要因を考慮しながら、高度感性情報再現がされるように、第4章の実験で用いた音響再生装置を改善する。そして、その改善の中で、高度感性情報再現に大きく影響する特性及び要因に注目して、繰り返し聴取実験を行い、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因を明らかにする。次に、その発見された特性・要因を改善した装置を用いて、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置の実現を行い、その再生音を評価語を用いる方法で評価する。その結果、発見された特性・要因が高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因であることを実証する。

6.2.1 高度感性情報再現に注目した音響再生システムの改善

実験に用いた音響再生システムの構成を図6.1に、実験装置、及び測定器等を表6.1に示す。

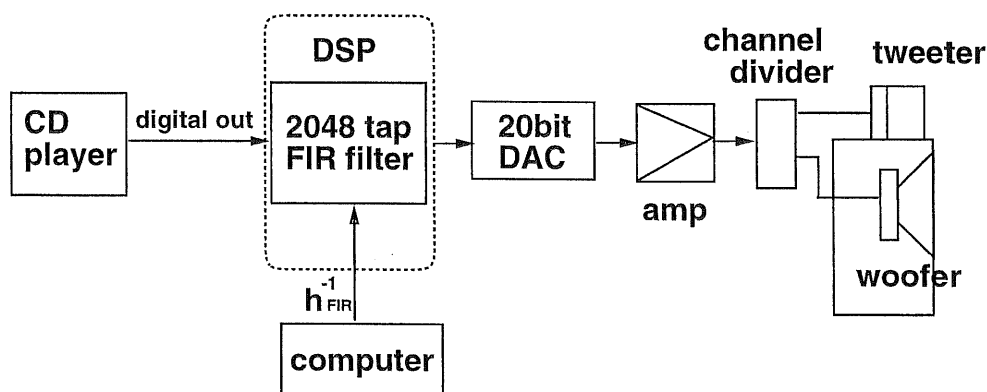


図 6.1: 高度感性情報再現度を向上させた音響再生システムの構成 (片チャンネルのみ示す)

図 4.1, 6.1より、特に第4章で用いた実験システムと異なる点はスピーカシステムである。まず、実験的に音質に関連することが明らかになってきた物理要因; スピーカユニットの Woofer と Tweeter の相対前後位置の調整を行うために、Woofer, Tweeter, 各々が独立に調整可能な 2way スピーカシステムを用いた。この物理要因の発見の手がかりとなった

表 6.1: 使用した音響再生システム, 測定器とその周辺機器

(音響再生システム)	
CD transport 装置	NEC CD-10 (改造)
DSP 装置	SONY SR-DX1000 (改造)
D/A converter 装置	Accuphase DC-91 (改造)
Premain Amplifier	NEC A-10X (改造)
20cm Woofer& Box	FOSTEX (フォスター電機 金井幹康氏作)
Tweeter	FOSTEX T-300A
Audio Cable	Fujikura 3C-2WS
Pin Jack	NEGLEX 7551 スリーブ除去
Cannon Cable	Canare L-4E6S
Cannon Connector	ITT Cannon
(フィルタ係数転送時に使用)	
DSP Control Software	SONY Xover SR-DX1000
Computer	Apple Macintosh Quadra800
(特性測定時に使用)	
Audio Analyzer	Brüel & Kjær BK2012
A/D converter 装置	Wadia WA4000 (改造)

キー評価語は“空気感”の再生であり, この要因は, 宮原が与えた仮説1に関連する波面再生に矛盾しないと考えている. したがって, Woofer は 20cm ユニットの密閉型に近いバスレフ型のボックスを付け, Tweeter はリボン型ではなく, 波面再生に秀れたホーン型を用いた.

また, 表 6.1 中の「改造」は, 高度感性情報再現度を向上する目的で改善, すなわち, 実験的に音質に関連する電気的特性や物理要因の改善を行ったものである. 具体的には, 装置の改善中に良く使われたキー評価語: “胸にしみ込む”, “凄み”, “緊張感”などに注目し, これらの評価が良くなるように, 実験的に音質に関連する電気的特性及び物理要因の改善を行い, 聴取実験で評価を何度も行い, その評価結果を検討して, 更に改善・実験を繰り返し行った.

聴取実験では, 複数枚の音楽リソースを何度も繰り返し試聴し, 高度感性情報が評価できる評価者の音質判断を基に, 高度感性情報の再現度合を確認しながら行った.

実験的に音質に関連する電気的特性, 及び物理要因の改善と, 実際に改善する個所につ

いて以下に詳細に述べる。

I 実験的に音質に関連する電気的特性の改善

– アイドルカレントの改善

結果; アイドルカレントは必ずしも多い方が良いとは限らず, 最適値がある。(このことについては更に研究を進める.)

– 瞬時的なエネルギー供給を可能にするための電源の強化

結果; 整流回路の電解コンデンサに Panasonic Xpro Twin 12000 μ F/63V を外にパラ付けし, しっかりした石台の上に固定する方が良い。

II 実験的に音質に関連する物理要因の改善

(1) 組立てネジの締め具合の改善 (信号の入出力, プリント基盤等) とコード・シャーシの点支持と抑え

結果; ネジは締め過ぎず, 適度に締める方が良い。スピーカーコード, 電源コネクタ及びシャーシは殆んどの場合, 点支持が良い。入出力の信号線は真鍮と高密度ケヤキで挟み, 適度に抑える方が良い。

(2) 構造の補強 (シャーシ)

結果; シャーシはしっかりした材質が良いが, 構造によっては軟らかいアルミなどの方が良い場合もある。音質をチェックしながら構造を cut&try で補強, 場合によっては組立ネジを緩めると良い。

(3) 信号の入出力・ノイズカット・電源部のコンデンサ, 信号出力の抵抗・コードの選択

結果; 各場所に応じて選別する方がよく, 構造, 材質により異なるが, どこに使っても悪いものは悪い。又, 信号出力インピーダンスは低い方が必ずしも良い訳ではなく, 適当な動的インピーダンスとの整合が必要のようである。

実験的に音質に関連する特性・要因の改善を行うことにより, 聴感的に高度感性情報再現能力を向上させた音響再生システムがほぼ実現できた。その装置の開発中に, 顕著に高度感性情報再現の改善が確認されたものとしては, (a) 電気的特性では瞬時的なエネルギー供給を可能にするための電源の強化, (b) また物理要因ではシャーシに関する調整や改善であった。また, これらの改善中に良く使われたキー評価語は“胸にしみ込む”であった。

キー評価語: “胸にしみ込む” と総合評価との相関関係の確認

厳密な評価実験は行っていないが, 繰り返し行う聴取実験により, 次のような結果を得て

いる。(a)の電気的特性の改善では、総合評価は“+1”，キー評価語：“胸にしみ込む”は“+1”，(b)の物理要因の改善では、総合評価は“+0.5”，キー評価語：“胸にしみ込む”は“+0.5”であった。したがって、キー評価語：“胸にしみ込む”と総合評価との相関関係は確認された。

すなわち、多くの聴取実験を繰り返す中で、キー評価語：“胸にしみ込む”を手がかりとして、(a)第二義の無歪み伝送条件の電気的特性；スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることと、(b)第二義の無歪み伝送条件の物理要因；シャーシの支持や振動制御までもが関連することが実験的に発見された。

そこで、上記の特性・要因を含めた改善により、高度感性情報再現を向上させた装置を用いて、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置の実現を行い、その再生音を評価語を用いる方法で評価する。次節(6.2.2)では、第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化補正実験について説明し、その次の節(6.2.3)にて再生音の評価実験とその結果について説明する。

6.2.2 無歪み伝送条件（第一義）の伝達周波数特性の補正実験とその結果

音響再生装置の伝達周波数特性の平坦化の理論、及び補正フィルタ設計方法については第4章と同様に行った。DSP装置による第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性補正結果を図6.2～図6.5に示す。

図6.2、図6.4より、振幅周波数特性は低域(20～200Hz)で $\pm 10[\text{dB}] \rightarrow \pm 3[\text{dB}]$ 、中域(200～2kHz)で $\pm 3[\text{dB}] \rightarrow \pm 1[\text{dB}]$ 、高域(2k～20kHz)で $\pm 30[\text{dB}]$ の激しいピークディップ $\rightarrow \pm 2[\text{dB}]$ とほぼ補正されている。又、図6.3、図6.5より、群遅延特性は低域(20～200Hz)で $1\sim 3[\text{ms}] \rightarrow \pm 1[\text{ms}]$ 、中域(200～2kHz)で $\pm 1.5[\text{ms}] \rightarrow \pm 1[\text{ms}]$ 、高域(2k～20kHz)で $1\sim 2.6[\text{ms}]$ の激しいピークディップ $\rightarrow \pm 1.3[\text{ms}]$ とほぼ補正されている。従来音響理論に基づくと、振幅周波数特性及び群遅延特性は第4章で得られた補正結果とほぼ同等に補正されたと考えている。次に、評価語を用いる方法により、特性補正前後の再生音の評価実験を行った。

6.2.3 評価実験とその結果及び考察

DSPに $F(j\omega)=1$ のフィルタ係数を設定した時の再生音を規準とし、DSPに $F(j\omega) = H^{-1}(j\omega)$ の補正フィルタ係数を設定した時の再生音について評価を行った。聴取位置は左右2つのスピーカ間隔(1.4m)の中心から垂直の方向に約3.5mで行った。なお、聴取位

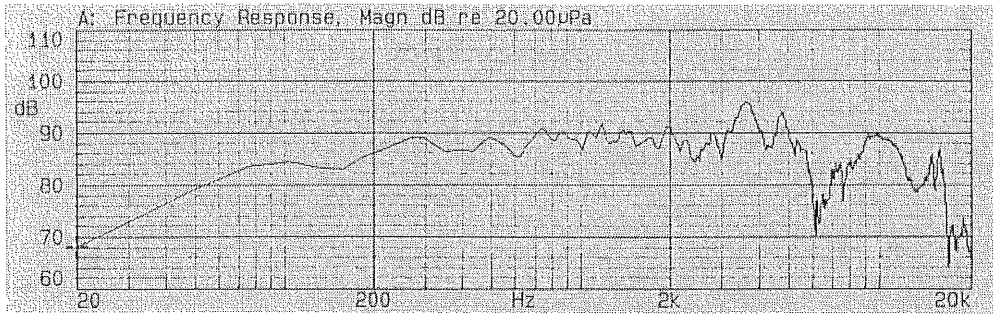


図 6.2: 補正前の振幅周波数特性

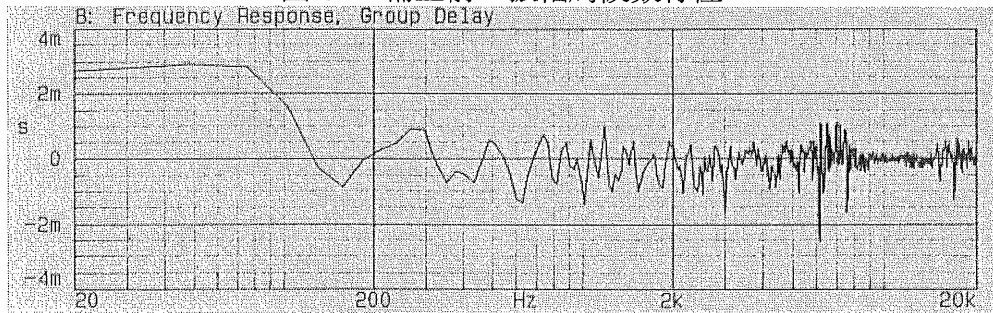


図 6.3: 補正前の群遅延特性

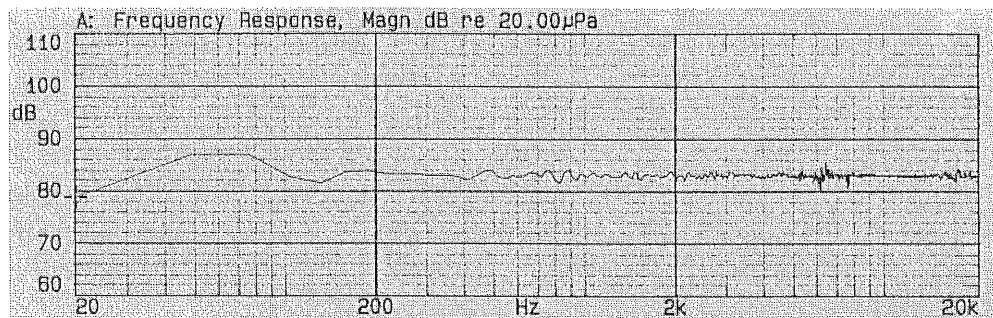


図 6.4: 補正後の振幅周波数特性

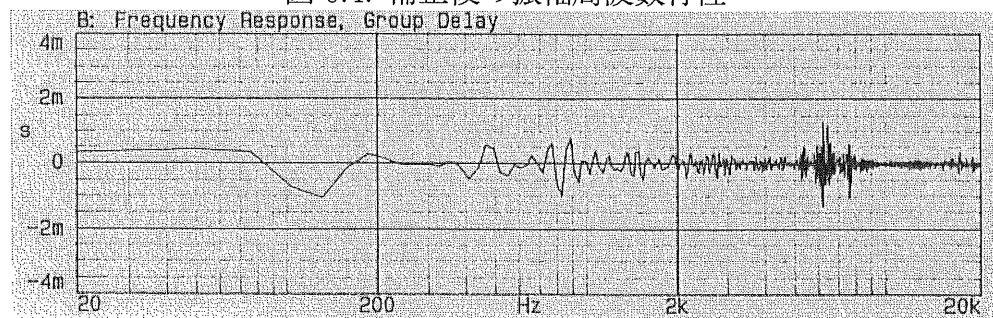


図 6.5: 補正後の群遅延特性

置は補正前と後で変えていない。他の評価実験条件では、評価項目は高度感性情報評価語を用い、被験者は評価教育を行った成人5名で行った。実験に用いた評価用音源を表6.2に示す。なお、評価室、評価尺度、評価用音源の提示などは、第4章と同様とした。

表 6.2: 評価用音源

resources
Les Larmes du Jacqueline (Offenbach): (violoncello)Werner Thomas,ORFEO, C131 851A, No.1
SONATA K.333, Andante Cantabile(Mozart): (piano)Alfred Brendel,PHILIPS,416 891-2, No.8
HOOKED ON DIXIE: JOE “FINGERS” WEBSTER AND HIS RIVER CITY Jazzmen, K-TEL 678-2, No.4
PIANO CONCERTO No.5 “EMPEROR”(Beethoven): (conductor)Zubin Mehta, (piano)Vladimir Ashkenazy, LONDON, F00L-23016, No.2
EAGLES HELL FREEZERS OVER: “hotel california”,GREFFEN GEFD-24725, No.6
シチリアの月の下で: 小林靖宏, “SARA”, 東芝 EMI TOCT-6264, No.1
GOING HOME THE L.A. FOUR: L.Almeida(g),R.Brown(b),S.Manne(d),B.Shank(S,f), “GOING HOME”,EASTWIND EJD-3045, No.1
Enya Watermark: “ Evening Falls...”,WEA MUSIC 25p2-2465, No.8

その結果、全ての音源に対する総合評価の平均値は“+1”となった。しかしながら、改善される音質の違い、すなわち、音楽リソースの違いによる評価結果の違いが生じた。具体的には、打楽器を主体としたリソースなどの総合評価は“+1~+2”と非常に良く評価された。特に、評価語では“Holographic 音場感”、“躍動感”、“空気感”などが“+1~+2”と改善され、音の立ち上がりや“のり”などが良いと言う評価を得た。

一方、声、楽器の表情（切なさ）を主体としたリソースなどの総合評価は“0~+1”と

あまり改善されなかった。特に、評価語では“実在感”，“深々さ”，“細かい表情の再現”，キー評価語では“胸にしみ込む”の評価が“0~+1”とあまり改善されなかった。

すなわち，高度感性情報再現を向上させた装置を用いて，第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性をほぼ満足させることにより，“Holographic 音場感”，“躍動感”，“空気感”などの再生に関連する音質は改善されるが，“実在感”，“深々さ”，“細かい表情の再現”，“胸にしみ込む”などの再生に関連する音質はあまり改善されないことが明らかになった。

この結果と，第4章で得られた結果とを比較して考察する。まず，第4章では高度感性情報再現が全く改善されなかった。逆に悪い場合があったが，本実験では，音響再生装置の高度感性情報再現能力が向上することにより，高度感性情報に関連する評価語の内，“Holographic 音場感”，“躍動感”，“空気感”などは改善された。この結果は次のことを意味する。すなわち，第二義の無歪み伝送条件の特性・要因の改善は，どれか一つが抜けていてもその改善効果が現われにくくなってしまいうということがわかる。したがって，高度感性情報再現のためには，現在わかっている第二義の無歪み伝送条件の特性・要因は全て満足させることが必要である。

そこで，あまり改善がみられない音質は，この第二義の無歪み伝送条件の特性あるいは要因が関係しているのではないかと考察した。このような考えに基づき，更に観察（改めて，評価試聴）を行った結果，第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性をほぼ満足した音響再生装置の再生音は，“音像が薄い”という印象であった。つまり，そこに“実在感”，“深々さ”，“細かい表情の再現”，“胸にしみ込む”などの再現があまり改善されない原因があると考察された。すなわち，第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化により，“音像が広がり”，“Holographic 音場感”は著しく改善されたが，それに伴って，各音像のエネルギー密度が薄くなってしまい，演奏者の伝えたい深い感性（高度感性情報）の伝達に不満が残るという結果となったと考えられる。

すなわち，高度感性情報再現のためには，Holographic な音像が明確に現れ，その音像自身に，エネルギーが集中して再生され，そこから音がこもりなく放射されることが重要であると考えた。

上記の考えに基づき，第二義の無歪み伝送条件の物理要因；シャーシの支持や振動に関する改善を行った。次節ではそれについて説明する。

6.2.4 音像の明確化及び音像へのエネルギー集中を目指した高精度な改善

第一義の無歪み伝送条件をほぼ補正した音響再生システムの再生音を聴きながら，“音像の明確化”及び“エネルギー集中”を求めて，第二義の無歪み伝送条件の物理要因；シャー

シの支持や振動制御などの高精度改善を行った。その改善後、他の条件は変えないで、評価実験を繰り返し行った。

その結果、音像のエネルギー集中度が高まり、全てのリソースに対する総合評価は“+2”と著しく改善された。更に、前実験ではあまり改善されていなかった、キー評価語の“胸にしみ込む”，高度感性情報評価語の“実在感”，“深々さ”などが改善された。

以上の結果より、第二義の無歪み伝送条件の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であること、また、第二義の無歪み伝送条件の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することは、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の三つめの電気的特性、及び物理要因であることを実証した。

以上の結果を踏まえて、次節では、高度感性情報の再現能力という意味で、音響再生システム内に挿入される DSP は音質改善をもたらすのかについて議論する。

6.2.5 音響再生システム内に挿入される DSP は音質改善をもたらすのか？

(1) 本実験で用いた音響再生システム; DSP 装置のハードウェアを用いて第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性を補正した場合の高度感性情報再現能力と、(2) DSP 装置のハードウェアを用いず高度感性情報再現に重点をおいて開発された音響再生システムの場合の再現能力との比較評価を行う。その結果、総合評価としては、(1) は (2) の音質レベルを決して越えることはない。すなわち、DSP 装置により第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性が平坦化された装置の再生音の音質改善は、DSP 装置の挿入による音質劣化度合を越えていないということである。

100 枚以上の CD を試聴した結果、最近の CD は、24bit DSP 或は“高度の信号処理による高音質”と記述されている CD が殆んどであり、従来の常識から考えると、音質向上が期待できるはずなのであるが、大変残念ながら、どの CD も腰高の音、及びバックグラウンドミュージック (BGM) 的な音になってしまっている。すなわち、高度感性情報の再現という意味では、DSP 処理を施していない 1990 年代前半より以前に製造された CD の方が音質的に秀れている。すなわち、現状では DSP 処理を施してしまうことは、高度感性情報の劣化を避けられないままにいるということのようである。

おそらくは、発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因を始めとする、他の第二義の無歪み伝送の未知の条件が関係しているからであると考えられる。

したがって、高度感性情報再現のためには、当然のことながら、第一義の無歪み伝送条件を満足しなければならないが、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因に

要求される条件を満足しない場合には、高度感性情報再現は得られず、かえって劣化してしまうということである。

この事実は、宮原が与えた二つの仮説の真偽を、別の三種類の高度感性情報再生システムの試作において実証していく中でも、その正当性を確認した。

6.3 まとめ

本章では、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の三つめの発見と、重要な物理要因を発見した。具体的には、第4章の実験で用いた音響再生装置の再生能力が高度感性情報の再現を満足する改善にまで至っていないことに注目し、装置の改造を行う中で、高度感性情報再現の改善が大きく現われる特性・要因に着目した。その結果、第二義の無歪み伝送条件の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることと、第二義の無歪み伝送条件の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することを発見した。また、上記の特性・要因の発見の手がかりとなったキー評価語は“胸にしみ込む”であった。そして、キー評価語：“胸にしみ込む”と総合評価との相関関係は、繰り返し行った聴取実験の中で確認した。その後、“胸にしみ込む”の再生を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の特性・要因を考慮した装置を開発し、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置の実現を行い、再生音を評価語を用いる方法で評価した。その結果、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の特性・要因であることを確かめた。最後に、高度感性情報再現の立場から議論を行い、高度感性情報再現のためには、当然のことながら、第一義の無歪み伝送条件を満足しなければならないが、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因に要求される条件を満足しない場合には、高度感性情報再現は得られず、かえって劣化してしまうという結論に達した。

また、発見された第二義の無歪み伝送条件の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であること、及び、第二義の無歪み伝送条件の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することは、宮原の立てた仮説2の音のパワーの無反射伝達及び瞬時的エネルギーの放出（音のはき出し）に矛盾しない結果であると考えている。

なお、第二義の無歪み伝送条件の物理要因；シャーシの支持や振動制御までもが関連することは、最終的に電気信号上にどのように影響し、現われてくるのかの測定・検討を行い、更に研究を進め、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の発見に努めたいと考えている。

また、従来のアンプなどの音響再生装置は、動的インピーダンスマッチングを考慮した

強力電源（音のパワーの無反射伝達及び瞬時的なエネルギー放出; 音のはきだし）を考えて作られていないようである。超重量と強力電源のアンプは現存するが、本章で指摘したような本質を掴んで開発されていないようである。高度感性情報再現度の高いアンプは我々の調査の中には存在しない。

第 7 章

高度感性情報再現のための仮説 1 と仮説 2 との関係の検討

7.1 はしがき

第2章では、現在までに行ってきた多くの実験・研究により発見された特性・要因の関連図を図2.5に示した。その中で、宮原は仮説1, 2を立てた。具体的には、仮説1に関連する物理要因は精密な波面再生であり、仮説2に関連する物理要因は音のパワーの無反射伝達及び瞬時的エネルギー放出（音のはき出し）である。

そして、第5章では、仮説1の波面再生に矛盾しないと考えられる、第二義の無歪み伝送条件の二つの電気的特性を発見した。また、第6章では、仮説2の音のパワーの無反射伝達及び瞬時的エネルギー放出（音のはき出し）に矛盾しないと考えられる、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因を発見した。

そこで本章では、本研究により得られた事実より、また、音楽・音響再生装置開発の歴史より、仮説1に関連する音質と仮説2に関連する音質との関係について検討を行う。

7.2 仮説1と仮説2との関係の検討

7.2.1 本研究により得られた事実からの仮説1と仮説2との関係の検討

第6章では、実験で用いた音響再生装置の再生能力が高度感性情報の再生を満足する改善にまで至っていないことから、これまで多くの聴取実験を繰り返す中で、実験的に明らかになってきた音質に関連する電気的特性及び物理要因に注目して、高度感性情報再現がされるように音響再生システムを改善した。ここで、実験的に音質に関連する電気的特性及び物理要因の関係図（推測も含む）を図7.1にもう一度示す。

図7.1では、物理の階層を空気空間、メカニカル、電気、部品に分類して図式化している。それぞれの特性や要因を結ぶ線は、多くの聴取実験を繰り返し行う中で、直接的な関連が確認されている、もしくは、間接的に関連がありそうであるというもの同士を結んでいる。現在のところ、かなり強引ではあるが、仮説1に関連する波面、仮説2に関連するエネルギー放出、その他のニュアンスの3つに分類されるとして、それらに関連する各層における特性・要因を線で結んで表している。例えば、波面に関連する電気的な特性は、第二義の無歪み伝送条件として発見された jitter と超低周波数帯域の再生、及び、実験的に jitter に関連すると考えられる電源ノイズ、電源極性などがある。更に、実験的にその電源ノイズに関連すると考えられる部品としては、ハンダなどが考えられる。

第6章では、高度感性情報再現がされるように改善した装置を用いて、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置の実現を行い、その再生音を評価語を用いる方法で評価した。

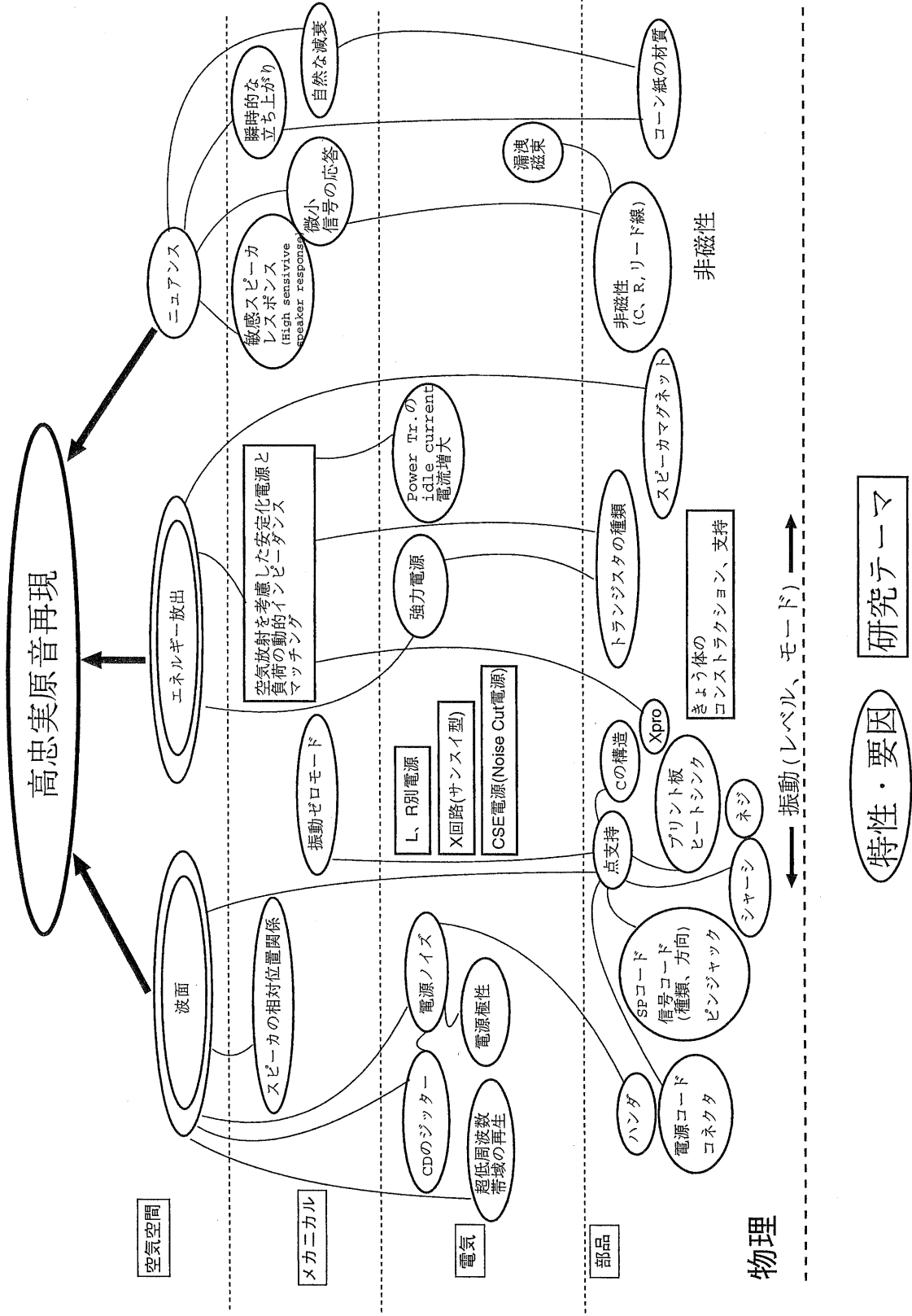


図 7.1: 発見された特性・要因 (推測も含む)

その結果、音像空間が広がって（良い意味）、仮説1に関する音質は改善された。しかしながら、特性を平坦化しただけでは、音像のエネルギー密度が減じてしまい、仮説2に関する音質の改善には至らなかった。そこで、音像の明確化及び音像へのエネルギー集中の目的で、第二義の無歪み伝送条件の物理要因の改善を行った結果、仮説2に関する音質も改善されたという結果となった。

上記結果より、仮説1, 2に関する音質の関係について検討する。仮説1の音質に求められる第二義の無歪み伝送の未知の条件にはあるレベルの精度が必要ではあるが、仮説2に求められるものほど高くないと考えられる。したがって、高度感性情報再現のために要求されるものは、仮説1に関連する音質レベルを再現するために必要とする第二義の無歪み伝送の未知の条件に必要な精度の延長上に、仮説2に関連する音質レベルを再現するために必要となる精度があると考えられる。

ここで、上記の考え方に基づいて、波面再生について考察すると、仮説2に関連する音質レベルの再現に要求される波面再生の精度は、仮説1のそれより遥かに高いのではないかと考えられる。

更に、本論文で発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の jitter 量について考察する。つまり、仮説1に関連する音質レベルを再現するために、必要となる標本化位置精度が ns オーダであるならば、仮説2に関する音質レベルの再現に要求される精度は ps オーダとなると考えられる。

第二義の無歪み伝送条件の物理要因; シャーシの支持や振動制御がこれらに関係しているかどうかは、現在のところ明らかではないが、繰り返し行う実験の中で、定量的な測定の上に明らかにしていかなければならないと考えられる。更に、未知の条件も含めて、図 7.1で示されている一つ一つの特性・要因に対する関係を、実証していかなければならないと考えている。

7.2.2 音楽・音響再生装置開発の歴史から見た仮説1と仮説2との関係の検討

ここでは、音楽・音響再生装置開発の歴史的流れから仮説1と仮説2の関係を検討する。第2章でも説明を行ったが、従来音響理論に基づいて、音楽・音響再生装置の開発が行われていく中で、CDが登場して世の中の人々の殆どがクリアーな音がするという点で音が良いと判断し、LPからCDへ移行した。しかしながら、一部の人々は、“雰囲気なくなる”、“冷たい音”、“メッキリ・ハッキリ音”、“デジタル臭い音”がするなどの批判的な評価をしていた。現在もCD開発の延長上として新たなメディアの開発が進んでいるが、残念

ながら、上記の批判的な評価に対しての音質面での改善は全くされていないようである。

ここで批判をした人々は、何を求めているのであろうかを考察する。LPを聴くある人々は、多少、音像が小さくても、厳しく迫ってくる“凄み”や“胸にしみ込んでくる”悲しさ、切なさを感じることができる音楽を大切にしている。又、コンサートホール、教会などで感じる“緊張感”を音楽に求めている。これは、仮説2に関連する音楽の再生であるといえるだろう。最近開発された某社の卵型スピーカは時間軸の重要性を訴えており、雨や雷の音などの再生は良いようであるが、演奏の“凄み”や“雰囲気”といった仮説2に関連する音楽の再生、又、ボーカルの唱声の“温度感”などの再生に関しても全く考慮されていないと考えられる。

すなわち、現在までの従来オーディオ再生の延長上にある音質が、仮説1に関連する音質であり、これとはほぼ独立に近く、音楽を大切にする人が絶対的に必要としているが、オーディオ開発において、全く手のつけようがなく見過ごされてきているものが、仮説2に関連する音質である。

以上、仮説1と仮説2の関係の検討を行ってきたが、高度感性情報再現の目指す音質は、いずれにしろ、仮説1、仮説2の両方の音質を満足する再生が目標であり、それがなされた時に高度感性情報再現が充分となると考えている。しかしながら、これは容易なことではなく、物理パラメータがあまりにも多いため、楽器作りに似た知識が要求されるであろう。その第二義の無歪み伝送の未知の条件を一つ一つを明らかにしていくことが、これからの科学技術と考えている。

7.3 まとめ

本章では、高度感性情報再現の研究を行っている中で宮原が立てた仮説1と仮説2との関係について検討を行った。そして、これまでに発見された電気的特性、物理要因と音質との関係の考察とまとめをした。具体的には、本研究で得られた事実に基づき、仮説1に関連する音質と仮説2に関連する音質との関係について検討を行った。また、音楽・音響再生装置開発の歴史からも同様に行った。その結果、仮説1に関連する音質レベルの上に、仮説2に関連する音質レベルが存在するという場合、仮説1に関連する音質と、仮説2に関連する音質とはほぼ独立に近い位置関係であるという場合の2つの考えに至った。

宮原の立てた仮説1と仮説2との関係は、仮説の真偽を実証する多くの実験を更に進めていく中で、第二義の無歪み伝送の未知の条件を発見しながら、明らかにしていくが、これまでの従来の超マニアが行っているように、妥協して2m × 2m × 2mの狭い音場空間となるように無理に調整してその中にエネルギーの高密度音を聴くというような方法を取

らず、高度感性情報再現のためには、仮説1と仮説2の両方に関わる音質レベルの再生が絶対に必要である。

付記するが、DSP装置を用いた実験(4章, 6章)及び、種々の試聴実験から、“プリアンプ”は、高度感性情報を失わせながら従来オーディオ評価語における評価をあげているに過ぎないのではないかと考えている。高度感性情報を失わせないプリアンプの実現は、第二義の無歪み伝送条件の物理要因; コンストラクション, 回路, 電源などのどれをとっても至難であろう。一方、この満足すべき第二義の無歪み伝送条件の物理要因が改善されたプリアンプが開発されたならば、これを基にしてDSPを構成することを考えることにより、かなり高度感性情報劣化度の少ない音響再生システムができると考えている。

第 8 章

結論

8.1 本研究の成果

本論文では、人間に感動を喚起させる、演奏に含まれる深い感性（高度感性情報）の忠実な伝達を可能にする音響再生装置の開発を目的としたプロジェクト的研究の中で、基礎的な部分として位置付けられる研究の成果について述べた。

それは、まず、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する多くの言葉を本や雑誌などから調査・収集し、それらを解析して高度感性情報再現の評価に重要な評価語を明らかにした。次に、装置開発中に発見されたキー評価語と総合評価との相関関係を解析的に明らかにした。その後、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足した音響再生装置を実現し、評価語を用いる方法により、再生音を評価し、第二義の無歪み伝送の未知の条件の存在を明らかにした。そして、多くの聴取実験の中で、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因の発見を行い、最後に、それらを考慮した高度感性情報再現可能な音響再生装置（パイロットシステム）の開発を行い、ノウハウの部分も含んでいるが、設計諸元をほぼ明らかにした。

本論文に於ける最大の成果は、『高度感性情報再現のためには、当然のことながら、第一義の無歪み伝送条件を満足しなければならないが、第二義の無歪み伝送条件：装置の電気的特性、及び物理要因に要求される条件を満足しない場合には、高度感性情報再現は得られず、かえって劣化してしまうこと』を明らかにしたことである。そして、その発見された第二義の無歪み伝送条件の三つの電気的特性は、(1) 従来の常識を遥かに越えた精度（ns オーダ）での時間伸び縮み歪（jitter）の抑制、(2) 超低周波数領域の再生、(3) スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力電源の必要性であり、発見された第二義の無歪み伝送条件の物理要因は、シャーシの支持や振動も高精度に制御しなければならないことである。

以下に、各章で得られた成果をまとめる。

第3章では、音質評価語の多次元空間解析などから、高度感性情報に関連する評価語を明らかにした。具体的には、これまでに高度感性情報を経験語で表せるとして、人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉を本や雑誌などから調査・収集し、グループ化（KJ法）した評価語では、高度感性情報再現の評価には不十分であること（評価語の曖昧性など）の問題があったため、グループ化の再検討を行った。その結果、得られた35語の代表評価語と総合評価との関係を求めるために、多次元空間における解析（MDS、階層的クラスタリング）を行った。そして、定義した重要度の大きさから高度感性情報に関連する評価語（16語）を抽出した。その結果、高度感性情報評価語と従来オーディオ評価で良く使用されていた従来オーディオ評価語とは相関がないことを明らかにした。その後、

装置開発中に発見されたキー評価語（“ 凄み ”，“ 胸にしみ込む ”，“ 空気感 ”，“ 緊張感 ”，“ のり ”，“ 重心の低さ ”）と高度感性情報に関連する評価語群を代表する総合評価との相関関係を、重要度及び影響度解析により明らかにした。

第4章では、無歪み信号伝送理論に基づき、DSP を用いて第一義とされてきた伝達周波数特性を平坦（振幅周波数特性、且つ群遅延周波数特性を平坦：直線位相）に補正，すなわち，第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足させた音響再生装置を実現し，その再生音の音質を評価した．その評価には，人間が音楽を聴いた時に生じる感動・感情を表現する言葉（評価語）を使う方法をとった．そして，音楽再生における音響再生装置の DSP を用いた伝達周波数特性の平坦化について，高度感性情報再現の立場から議論を行った．その結果，従来オーディオ再生の一般的システムの第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性を DSP を用いてほぼ平坦に補正することにより，“ 量感 ”，“ 力感 ”，“ 再生帯域 ” などの従来オーディオ評価語に関連する音質が改善されることを明らかにした．しかしながら，高度感性情報評価語はあまり改善されず，逆に劣化する場合があった．すなわち，従来音響理論に基づいて開発された音響再生装置をそのまま用いて，第一義の無歪み伝送条件の伝達周波数特性の平坦化補正を行っても，高度感性情報の再現度は向上せず，逆に悪い場合があることを明らかにした．したがって，高度感性情報の再現には，従来音響理論では明らかにされていない重要な第二義の無歪み伝送の未知の条件，すなわち，実現する音楽・音響再生装置のハードウェア上の性能となる重要な第二義の無歪み伝送条件の電気的特性，及び物理要因が存在していることを明らかにした．

第5章では，第二義の無歪み伝送条件の二つの電気的特性を発見した．一つは，デジタルオーディオのサンプリングの jitter が原因で，その jitter 量は従来の常識では信じ難い程の僅かな（ns オーダの）量に抑えなければならないことの発見である．もう一つは，現在一般的に用いられているサーボ型アンプの時定数の大きさ，すなわち，超低周波数帯域の再生が必要であるということの発見である．上記二つの第二義の無歪み伝送条件の新たな電気的特性の発見の手がかりとなったキー評価語は，頬や身体に感じる“ 空気感 ”であった．その後，更に実験を進め，キー評価語：“ 空気感 ” の再生を手がかりとして発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性を満足させる目的で開発された装置及び，実際に開発した装置の再生音を評価することにより，高度感性情報再現に重要な特性であることの実証を行った．

第6章では，第二義の無歪み伝送条件の電気的特性の三つめの発見と，重要な物理要因を発見した．具体的には，第4章の実験で用いた音響再生装置の再生能力が高度感性情報の再現を満足する改善にまで至っていないことに注目し，装置の改造を行う中で，高度感性情報再現の改善が大きく現われる特性・要因に着目した．その結果，第二義の無歪み伝

送条件の電源に関する電気的特性：スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にするための強力、かつ動的な特性を持つ電源が必要であることと、第二義の無歪み伝送条件の物理要因：シャーシの支持や振動制御までもが関連することを発見した。また、上記の特性・要因の発見の手がかりとなったキー評価語は“胸にしみ込む”であった。そして、キー評価語：“胸にしみ込む”と総合評価との相関関係は、繰り返し行った聴取実験の中で確認した。その後、“胸にしみ込む”の再生を手がかりに発見された第二義の無歪み伝送条件の特性・要因を考慮した装置を開発し、第一義の無歪み伝送条件をほぼ満足する装置の実現を行い、再生音を評価語を用いる方法で評価した。その結果、高度感性情報再現に重要な第二義の無歪み伝送条件の特性・要因であることを確かめた。最後に、高度感性情報再現の立場から議論を行い、高度感性情報再現のためには、当然のことながら、第一義の無歪み伝送条件を満足しなければならないが、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性、及び物理要因に要求される条件を満足しない場合には、高度感性情報再現は得られず、かえって劣化してしまうという結論に達した。

第7章では、高度感性情報再現の研究を行っている中で宮原が立てた仮説1と仮説2との関係について検討を行った。そして、これまでに発見された電気的特性、物理要因と音質との関係の考察とまとめをした。具体的には、本研究で得られた事実に基づき、仮説1に関連する音質と仮説2に関連する音質との関係について検討を行った。また、音楽・音響再生装置開発の歴史からも同様に行った。その結果、仮説1に関連する音質レベルの上に、仮説2に関連する音質レベルが存在するという場合、仮説1に関連する音質と、仮説2に関連する音質とはほぼ独立に近い位置関係であるという場合の2つの考えに至った。宮原の立てた仮説1と仮説2との関係は、仮説の真偽を実証する多くの実験を更に進めていく中で、第二義の無歪み伝送の未知の条件を発見しながら、明らかにしていくが、高度感性情報再現のためには、仮説1と仮説2の両方に関わる音質レベルの再生が絶対に必要であると結論づけられた。最後に、今後の音響再生システム開発の方向と具体的項目を示した。

8.2 今後の課題

深い感性の定量的・客観的測定

第3章では、人間は、音楽を聴覚知覚及び体感することにより、その脳内に、ある感情・感動が喚起させられ、その印象を優位脳（左）の前頭言語野で言語表出するという考えに基づき、評価語の研究を進めてきた。しかしながら、高度感性情報“深い感性”の伝達を評価するためには、評価の安定などの面においても心理的側面だけの評価では限界があると考えられる。そこで、生理学的側面から高度感性情報“深い感性”を定量的に測定する

ことを試みる。ただし、(深い)感動及び情動の測定は、脳波で捉えられる高次脳の反応ではなく、より本質的であると考えられる身体の呼吸、脈波等の変化によって捉える。具体的には、(1)呼期時間・レベル、(2)吸期時間・レベル、(3)心拍周期、(4)身体振動、(5)発汗、(6)体温などを測定し、多変量解析により各主成分を求め、人間の感動量を定量的、且つ客観的に表現し、尺度の構築を行う。それと並行して、生理学データと心理学データとの対応関係を明らかにする。この結果は、深い感性測定への大きな道を開くと確信している。

jitter free の再生装置の開発

第5章では、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性として、デジタルオーディオ装置特有の jitter が高度感性情報再現(特に、“空気感”再現)を大きく損ねているという発見及び実証を行った。そこで、現存する DSP 装置を含めたデジタル・オーディオ装置の回路構成を調査・解析し、 jitter の種類と聴感との関係、 jitter 量の許容限、検知限を定量的に明らかにする。その上で、 jitter 発生メカニズムを明かにし、高度感性情報、特に“空気感”再現の劣化を生じない jitter free のデジタル・オーディオ機器の開発に有益な応用研究を行う。現在、研究、開発中であるが、激的なデジタル再生機器の音質向上となると信じている。

波面再生の定量的測定と理論の検討

高度感性情報再現に注目した研究を進めていく中で、波面再生の重要性が明らかになりつつある。これまでは、仮説1として注目して研究を進めているが、どうにかして波面を定量的に測定する方法を確立し、第二義の無歪み伝送条件の特性や要因などを改善することで実証してきた事実が、最終的に波面再生としてどのように実現されているのかの確信に迫りたい。そして、最終的には波面再生理論の検討を行っていく。

第4章では、インパルスレスポンスの測定などに挑戦して来たが、入力信号の検討や測定の方法、及びデータの解析に至るまでの方法を検討する必要がある。今後は、空間上の波面再生をいかに捉えるか、その手段を検討し、波面の定量的測定、可視化などを行う。これにより、高度感性情報再現の音響再生システムの大幅な発展があろう。

高度感性情報再現を目的としたスピーカ駆動理論と設計、及びその実現

第5章では、発見された第二義の無歪み伝送条件の電気的特性;超低周波数帯域の再生の必要性について述べたが、実際にスピーカを駆動するアンプと駆動されるスピーカとの関係についての理論とその設計を確立したい。それは、従来音響理論は制御理論の $\zeta=0.69$ の臨界制動の考え方のみにとらわれており、高度感性情報再現に注目した時のアンプのスピーカ駆動理論とスピーカ設計の考え方は全く異ると確信しているからである。アンプの

スピーカ駆動能力を考慮した理論と設計方法の確立を、実際の音響再生装置の開発を進めながら目指す。この実現により、人間が身体で感じる深い感性の再現が可能となり、本当にホールにいるような感覚も含めた再現を可能にする音響再生が可能となるであろう。

音響再生により再現される音像の明確化及び音像へのエネルギー集中：音のパワーの無反射伝達及び瞬時的エネルギー放出（音のはき出し）に関連する特性・要因の定量的測定
第6章では、第二義の無歪み伝送条件の電気的特性；スピーカに瞬時的なエネルギー供給を可能にする強力電源が必要であること、第二義の無歪み伝送条件の物理要因；シャーシの支持や振動制御までもが関連していることを発見した。今後は、上記の測定方法などを検討し、それらを定量的且つ客観的に測定し、具体的に、どのような第二義の無歪み伝送条件のコンストラクション、回路構成、電源が良いのかを明らかにする必要がある。更に、第二義の無歪み伝送条件の物理要因が電気信号上に与える影響が、どのような特性に現われてくるのかについて明らかにするために、定量的測定、検討などを繰り返し行う必要がある。そのために、入出力信号（波面）伝達の動的変化とその音質との関係などを明らかにすることは不可欠である。これまでに、DSP装置を用いた実験（4章、6章）、及び種々の試聴実験から、高度感性情報を失わせないプリアンプの実現が重要であり、それが実現されたならば、それを基にしてDSPを構成することを検討することにより、かなり高度感性情報劣化度の少ない音響再生システムの実現が可能となるであろう。しかしながら、そのために、第二義の無歪み伝送条件のコンストラクション、回路、電源などの検討は非常に重要であり、且つ困難であるが、一つ一つ明らかにしていく必要がある。高度感性情報を再現できる音響システムは、これらの改善と共に開発していく。

謝辞

プロジェクト的研究から，本研究の機会を与えて頂き，また本研究を遂行するにあたり，長年にわたり，暖かく，厳しい励ましと懇切なる御指導ならびに御鞭撻を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 教授 宮原誠 博士に深甚なる感謝の意を表します。

本研究を推進するにあたり，日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業のリサーチ・アソシエイトになられてから，今日に至るまで終始ひとかたならぬ御指導と御教示を賜ったとともに，多大なる激励をいただきました小山工業高等専門学校 電気工学科 助教授 小林幸夫 博士に深甚なる感謝の意を表します。

本研究を推進するにあたり，有益なる御助言を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 助教授 小谷一孔 博士，同助手 亀田昌志 博士，剣持 雪子 博士に心より感謝致します。

本研究を推進するにあたり，誠実な御指導を賜りました岐阜県立国際情報科学芸術アカデミー 教授 中山剛 博士に深甚なる感謝の意を表します。

本論文のまとめ，並びに副テーマの遂行にあたり，心からの御助言と御指導を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 教授 國藤進 博士に心より感謝致します。

本論文をまとめるにあたり，草稿の段階から貴重な御助言ならびに御指導を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 教授 赤木正人 博士，並びに帝京科学大学 教授 桑原尚夫 博士に心より感謝致します。

本研究を遂行するにあたり，多大な御教示を賜りましたソニー株式会社顧問，スタート・ラボ 社長 中島平太郎 様，DSP 装置の使用に際し御指導を賜りましたソニーサウンドテック株式会社 高田寛太郎 様，CAV カンパニー 米田道昭様，スピーカ使用に際し御協力を賜りました足立厚 様，金井幹康 様，CD プレーヤーの改造に御協力を賜りましたマランツ株式会社商品企画部 田中良征 様に心より感謝致します。

また，日頃より多大なる議論と激励をいただきました北陸先端科学技術大学院大学の諸先生方，宮原研究室の諸先輩・修了生方，並びに評価実験に協力して頂く事をはじめ，多くの御協力を頂いた宮原研究室の諸氏に厚くお礼申し上げます。

なお，本研究の一部は，日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業の援助によって行われたものです。深謝の意を表します。

最後に，私の研究生活を暖かく見守ってくれた両親，妹，親戚，並びに全ての友人達に心より感謝致します。

参考文献

- [1] B.P.Lathi, "COMMUNICATION SYSTEMS," John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.111-147, 1968.
- [2] 北島宗雄, 宇津木明男, "人間の感覚・感性を計測する," 電子情報通信学会誌, Vol.76, No.3, pp.242-245, March 1993.
- [3] 土井利忠, 伊賀 章, "新版 デジタル・オーディオ -CD, DAT の基礎理論と最新技術-, " ラジオ技術社, 182, 東京, pp.1-8, August 1987.
- [4] 日本オーディオ協会編集委員会, "オーディオ 50 年史," 日本オーディオ協会, 東京, pp.1-37, Dec. 1986.
- [5] 宮原誠, "新世代オーディオ: 音響・音楽の高度感性情報知覚モデル -信号の時間伸び縮み歪みと digital 音-, " 信学技報, EA98-20, pp.23-30 June 1998.
- [6] 早坂寿雄, "技術者のための音響工学," 丸善株式会社, 東京, pp.20-35, July 1986.
- [7] (社) 日本オーディオ協会 AA 懇話会, "次世代オーディオへの課題と提言 ~次世代オーディオに関する調査研究報告書~, " 日本オーディオ協会, 東京, Jan. 1999.
- [8] 辻三郎, "感性の科学 -感性情報処理へのアプローチ-, " サイエンス社, 東京, Jan. 1997.
- [9] 加藤 俊一, 下垣 弘行, 藤村 是明, "画像対話型商標・意匠データベース TRADEMARK," 信学論 D-II, Vol.J72, No.4, pp.535-544. April 1989.
- [10] 加藤 俊一, 栗田 多喜夫, "画像の内容検索 -電子美術館への応用-, " 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.5, May 1992.
- [11] 宮原誠 (project leader), "未来映像音響創作と双方向臨場感通信を目的とした高品位 Audio-Visual System の研究", 平成 9 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクト, JSPS-RFTF97P00601, April. 1997-2001.
- [12] ダニエル・ゴールマン著, 土屋京子訳, "EQ -こころの知能指数," 講談社+ α 文庫, 東京, Sep. 1998.
- [13] 堀 哲郎, "脳と情動 -感情のメカニズム-, " 共立出版, 東京, Sep. 1991.

- [14] DH. ffytche, CN. Guy, S. Zeki, "The parallel visual motion inputs into areas V1 and V5 of human cerebral cortex," *Brain*, 118(Pt 6), PP.1375-1394, Dec. 1995.
- [15] 小泉 英明, 牧 敦, 山下優一, 山本剛, 岩田誠, 吉沢浩志, 渡辺英寿, "光トポグラフィーの原理と応用," *Brain Medical*, Vol.10, No.2, June 1998.
- [16] 北村音一, 難波, 三戸, "再生音の心理的評価について," 電気通信学会電気音響研究会専門委員会資料, Feb. 1962.
- [17] 曾根, 城戸, 二村, "音の評価に使われることばの分析," *日本音響学会誌*, 18, No.6, pp.320-326, June 1962.
- [18] 駒村, 鶴田, 吉田, "スピーカの音質と物理特性の関係," *日本音響学会誌*, 33, No.3, pp.103-115, March 1977.
- [19] 宮原誠, "高品位 Audio-Visual System -先端的技術インフラの研究," *オーディオビジュアル複合情報処理* 13-6, pp.39-46, Jun 1996.
- [20] 宮原誠, 守田, "音質を表現する評価語の調査分析," *日本音響学会誌*, 52, No.7, pp.516-522, July 1996.
- [21] 厨川, 八尋, 柏木, "音質評価のための7属性," *日本音響学会誌*, 34, No.9, pp.493-500 Sep. 1978.
- [22] 北村, 二井, 栗山, 増田, "昭和50年代の青年に関する音色因子の抽出," *日本音響学会聴覚研資* H-51-11, 1978.
- [23] 安部, 小澤, 鈴木, 曾根, "音色表現語, 感情表現語及び音情報関連語による環境音評価," *日本音響学会誌*, 54, No.5, pp.343-350 March 1998.
- [24] 石川, 冬木, 宮原, "音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語," *電子情報学会論文誌*, Vol.J80-A, No.11, pp.1805-1811 Nov. 1997.
- [25] 宮原, 小林, 白井, 林, "高品位電子映像による, 写真に記録されていた"カメラ前の像"再現の可能性," *信学技報*, IE98-82, PP.57-64 Nov. 1998.
- [26] 川喜田二郎, "KJ法," 中央公論者, 東京, 1986.
- [27] 川喜田二郎, "発想法," 中公新書, 東京, 1990.
- [28] W.S.Torgerson, "Theory and methods of scaling," John Wiley & Sons, pp.247-297, 1958.
- [29] 中山剛, 三浦種敏, "音質評価の方法論について," *日本音響学会誌*, 22, No.6, pp.319-331, June. 1966.
- [30] G.Young and A.S.Housholder, "Discussion of a set of points in terms of their mutual distances," *Psychometrika*, 3, 1, pp.19-22, 1938.

- [31] 中山剛, “音質評価モデルについて,” 日本音響学会聴覚研究会資料 H-91-3, pp.13-20, Jan. 1991.
- [32] ITU-R : “Subjective assessment of sound quality,” Recommendation BS1284 1982.
- [33] 鳥脇純一郎, “認識工学 -パターン認識とその応用-,” コロナ社, 東京, pp.76-108 1993.
- [34] 川喜田二郎, “KJ 法 -渾沌をして語らしめる-,” 中央公論社, 東京, pp.171-194 1983.
- [35] 井上勝雄, “Excel による調査分析入門,” 海文堂出版, 東京, pp.93-107 1986.
- [36] 中島平太郎, “ハイファイスピーカ,” 日本放送出版協会, 東京, 1972.
- [37] 石井伸一郎, 中尾寛次, 高橋賢一, 上野孝文, “スピーカの位相特性について,” 電子情報通信学会電気音響研究会資料, EA75-16, pp.17-25, 1975.
- [38] R.J.Wilson, G.J.Adams and J.B.Scott, “Application of digital filters to loudspeaker crossover networks,” 84th Audio Eng. Soc. Convention, 1988 March, preprint No. 2600(F-4).
- [39] 飯田勝彦, “「位相と音質」位相管理と音作り,” AES 東京コンベンション'95 予稿集, E-4, pp.170-173, 1995.
- [40] H.Tokuno, O.Kirkeby, P.A.Nelson, H.Hamada, “Inverse Filter of Sound Reproduction Systems Using Regularization,” IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E80-A, No.5, pp.809-820, 1997.
- [41] M.Karjalainen, E.Piirilä and A. Järvinen, “Comparison of Loudspeaker Equalization Methods Based on DSP Techniques,” J. Audio Eng. Soc., Vol.47, No.1/2, pp.14-31, 1999.
- [42] J.Mourjopoulos, “Digital equalization methods for audio systems,” 84th Audio Eng. Soc. Convention, 1988 March, preprint No. 2598(F-2).
- [43] 興野 登, “デジタル信号処理を用いた 2 ウェイスピーカーシステム実現のための一検討,” 電子情報通信学会応用音響研究会資料, EA89-66, pp.24-32, 1989.
- [44] 日野雅博, 門上大一朗, 木之下英歳, 北尾匡史, 野村康雄, “直接放射形スピーカシステムの線形ひずみの除去 -非線形最適化手法による FIR 型デジタルフィルタの設計-,” 電子情報学会論文誌, Vol.74-A, No.3, pp.588-590, 1991.
- [45] 尾知博, 大田守彦, 金城繁徳, “A Linear Programming Design of Two-Channel Low Delay Biorthogonal Filter Banks,” 電子情報通信学会総合大会資料, A-4-39, pp.170, 1997.
- [46] 栗山譲二, 古川安航, 山本敏博, 東狐徹哉, “アダプティブ・スピーカ -振幅・位相特性自動補正の試み-,” 日本音響学会講演論文集昭和 63 年春, 1-5-10, pp.349-350, 1988.
- [47] 尾知博, 金城繁徳, 比嘉良人, 山口博久, “周波数選択性を有する適応等化器とスピーカの歪み補正,” 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, A-4-15, pp.85, 1997.

- [48] H.W. ボーデ 著, 喜安善市 訳, “回路網と帰還の理論,” 岩波書店, 東京, pp.248-250, 1962.
- [49] 川上正光 著, “基礎電気回路,” コロナ社 電気通信大学講座, 第 13 巻, 東京, pp.257-267, 1960.
- [50] B.C.J. ムーア 著, 大串健吾 監訳, “聴覚心理学概論,” 誠信書房, 東京, pp.322-327, 1995.
- [51] 冬木真吾, 小林幸夫, 石川智治, 宮原誠: “デジタル音楽信号の jitter に起因する高度感性情報の欠落, - “雰囲気”, “空気感” (深々さ) の激減衰化-,” 信学技報, EA97-104, pp.9-16, 1998.
- [52] 赤堀肇, 石川智治, 小林幸夫, 宮原誠: “デジタル・オーディオ・インタフェース (AES/EBU) の jitter と音質の関係,” 信学技報, EA99-40, pp.1-8, 1999.
- [53] 三井実: “音のゆらぎと高度感性情報の再現に重要な物理要因との関係についての研究～波面再生と高度感性情報再現との関係についての研究～,” 北陸先端科学技術大学院大学修士論文 2000.
- [54] 川上正光 著, “電子回路 II,” 共立全書, 第 95 巻, 東京, pp.50-58, Jan. 1955.
- [55] 落合 萌 著, “オーディオ用半導体アンプ設計・解析,” 誠文堂新光社, 東京, pp.277-302, Aug. 1998.
- [56] 辻敦司, 石川智治, 宮原誠: “オーディオシステムに生じる振動が高度感性情報再現に及ぼす影響に関する研究,” 情報処理学会技術報告資料, オーディオビジュアル複合情報処理 30-7, pp.37-42, Sep. 2000.
- [57] 刀根薫, “ゲーム感覚意思決定法 AHP 入門,” 日科技連, 東京, 1986.
- [58] 石川, 小林, 國藤, 宮原, “高度感性情報に注目した音質評価語の階層構造解析,” 信学技報, CQ98-62, pp.15-20, Dec.1998.

付録

A: 代表評価語 35 語

代表評価語	音質評価語	頻度 (weight)
実在感	実在感	10
	リアリティー・リアリズム	8
	雰囲気感	6
	存在感	6
	実体感	4
	臨場感	3
Holographic 音場感	音が前に出ている	2
	清冽(?)	1
	押しだし感	3
	音が走る	1
	音に包まれている	1
	浮遊感	2
	気配	1
	音が飛び掛ってくる	1
深々さ	深み	3
	しっとり	1
	情感にあふれた	1
	浸透力	1
	激しい	1
	緊張感	1
	きれいなだけ	5
	凄み	1
	鳥肌が立つ 深刻な、心にしむ	
空気感	空気感・空気が動く	33
	スケール感	31
安定感	安定感 (High level) (本質)	8
	充実感	1
	腰が座ってる (しっかり)	2
	腰がしっかりしている ・浮いていない	2
細かい表情の再現	表情豊か	8
	ボーイングの深さ	1
	色気	1
	色彩感がある	2
	余韻が鮮明	8
	エコーが鮮明	1
	ディテールの鮮明さ	3
まとまり	まとまっている (演奏上の優劣)	1
	荒れた素振り はみせない	1
気品	気品がある	1
	品のない	1
	端正	1
静寂感	静寂感	1

代表評価語	音質評価語	頻度 (weight)
自然さ	ナチュラル・自然	26
	バランスが良い	7
	素直な	4
	リニアリテイーのよさ	3
	ゆとり	2
	優しい	5
	ソフト	5
	おとなしい	1
	穏やか	1
	グラデーション	1
滑らかさ	滑らかさ	30
	しなやか	13
	スムーズ	3
躍動感・生命感	躍動感	23
	鳴りの良さ	4
	リズム感	1
	スイング感	1
	生き生きした・生氣	11
	生々しい	7
	生命感	1
	楽しい	1
	リッチな音	1
繊細感	繊細感	42
	きめ細かい	22
	粒立ち	21
	緻密さ	11
	精緻	3
	精密感	2
解像度	分解能	23
	解像力・解像度	7
	セパレーション	2
	情報量	4
抜け	抜けが良い・悪い(寒い時に通る)	32
	伸び(余韻が残る)	27
	音離れ	4
	どぼどぼした	1
	こもったような音	1
	吹っ切れている	1
	開放感・解放感	6
柔らかい	ふくらみ(良い意味)	3
	ふっくらしている	3
	ゆったりしている	2
	ふくよかさ	2
	マイルド	1
	(肉付きが良い)	1
	柔らかい	20
	柔らか味・柔らかさ	10
	まろやか	5

代表評価語	音質評価語	頻度 (weight)
くっきりさ	鮮明・鮮やか(ギターのパック)	21
	クリアな(悪いイメージ)	21
	明瞭度	6
	コントラストのくっきり	3
	音の輪郭がくっきり	3
	鮮度が高い	1
	冴え	1
	純	1
	ピチッと出過ぎる	2
	写實的	3
	明るい・暗い	2
	明解さ	1
	斬新な	1
	角がない	1
	あやふや	1
	メリハリ	4
	拡張感	1
	きつい	5
	鋭い	2
	強調感	1
軟らかさ	あまい	5
	芯のある	6
	軟らかい・硬い・硬(悪い意味)	
艶	艶やか・艶(過ぎる程)	34
きらめき	輝き感	4
	きらびやか	1
	派手	1
ドライ・ウェット	ドライ・ウェット(スピーカ)	2
	乾いた	2
	湿っている	1
	屈託のない	1
	無味乾燥な	1
	そっけない音	1
歪感	歪	21
	荒っぽい	5
	ブレンド感	4
	うるさい	2
	耳障り	1
	ギスギスした	1
	ゴリゴリした	1
	素材感	1
	紙臭い	1
	ピーク感	1
	粉っぽい	1
S/N感	S/N感	21
再生帯域	広帯域再生・ワイド	20
線の細さ	線が細い・太い(神経質)(悪)	13
	細い・太い(壊れやすい)	2

代表評価語	音質評価語	頻度 (weight)
歯切れ・締まり	切れがよい・切れ味	17
	張り	15
	デンピングがよい	11
	歯切れがよい	7
	ドライブ感	3
	締まり	8
	タイトさ	7
	スナップが効いている	1
	弾力	6
スピード感	スピード感	6
	立ち上りがよい (感)	6
	反応がよい	3
	レスポンス・インパルス応答がよい	2
	トランジェントがよい	1
	アタック	1
4ch 音場感	奥行感・前後感・遠近感 (低)	28
	音場感	25
	定位感	19
	広がり・広がり感	15
	密度感	9
	立体感	8
	音像定位	5
	位置感	1
圧迫感・威圧感	圧迫感	5
	威圧感	2
力感	力感・力強さ・パワー感	41
	エネルギー感・エネルギー感	21
	馬力感	1
	元気のある	1
	ガッツのある音	1
量感	量感	22
	重量感 (重量)	6
	軽い・軽さ	6
	重さ	2
	鈍重な	1
	重圧感	1
	ドスが効いている	2
透明度	透明感・透明度	73
	澄んでいる・濁り	13
	清澄	4
	見通しがよい	2
厚み・こく	厚みがある	59
	コクがある	15
	重厚さ	4
	薄い	3
	透け透けた音	1
	淡泊な	1
	さっぱりしている	1
	粘り・粘り気がある	1
	重層感	1
温かさ	暖かい・温かい・温かみ・温度感	15
	ぬくもり	3
	クール	3
	冷たい	1
響き	美しい響き	8
	ハーモニーの美しさ	1
	音律的な響き	1

B: 高度感性情報再現に重点をおいた評価語の階層的構造関係

評価語の総合音質に対する重要度を中心軸として、階層を明らかにする。総合音質に対する重要度としては、基本的に衆目評価法のスコアを用いるが、解析的に求めることも考え、AHPによるウエイトも並行して求める。そして、得られた軸上で評価語間の影響度を Dematel 法 [35] により求め、高度感性情報に重点をおいた評価語の階層構造を明らかにする。

まず、人間の直観を利用した衆目評価法とそれを良く近似する AHP により総合音質に対する代表評価語 35 語の重要度（衆目評価法のスコアと AHP のウエイト）を求めた。その結果を表 B.1 に示す。

衆目評価法は 5 点法により 8 名で行い、5 ランクに分割した (A, B, C, D, E)。又、AHP のウエイトの変化量の大きいものから閾値 (1.9, 1.3, 0.7) を決定し、各階層を決定した。その結果、A1, A2, B, C1, C2, DE の 6 階層を得た。この 6 階層内で表 B.1 の各評価語の重要度を見ると、衆目評価法のスコアと AHP のウエイトは、各階層を越えて、評価語を移動させる程の大きな値の違いはない。2 つの解析によりほぼ同様の結果を得たことから、総合音質に対する重要度の尺度としては非常に精度良く求められていると考えられる。又、AHP のウエイトが衆目評価法のスコアを殆ど矛盾なく示していることが言える [58]。

次に、各評価語間の影響度を Dematel 法により求めた。その結果、階層間の影響度の平均値は 0.065 であった。強く影響を与えている評価語及び影響を受けている評価語を明らかにするために、階層間の影響度が 0.1 以上である関係を求め、得られた評価語の階層構造を図 B.1 に示す。

図 B.1 を見ると、上位の評価語同士が影響を及ぼし合っており、下位の評価語からはあまり影響を与えられていないことがわかった。

図 B.1 で示した評価語の階層構造関係は、今後の研究を発展させて行く中で、“浅い感性”と“深い感性”との関係や生理学データとの対応を求めていくための一つの規準となるのではないかと考えられる。

次に、音楽再生という大きな視点に立ち、高度感性情報の再現というものがどのような位置づけで、他のものと何が異なるかを考えると、その聴き方が大きく異なるという結論に達した。そこで、音楽再生の聴き方に注目して、聴取者側の分類を行い、それらに対応する評価語をグループ化し、そのグループ内、及びグループ同士の構造を解析する。

表 B.1: 代表評価語 35 語の総合音質に対する重要度

代表評価語	スコア	ウエイト	階層
実在感	40	9	A1
深々さ	38	9	A1
静寂感	37	6.4	A2
気品	36	7.1	A2
空気感	36	6	A2
躍動感・生命感	35	5.9	A2
安定感	35	5.8	A2
自然さ	32	5.1	A2
Holographic 音場感	32	4.6	A2
柔らかい	30	3.3	B
細かい表情の再現	30	3.2	B
温かさ	27	2.7	B
厚み・こく	26	3.2	B
抜け	26	2.7	B
まとまり	26	2.7	B
響き	22	2.4	C1
滑らかさ	21	2.4	C1
力感	21	1.5	C2
歯切れ・締まり	21	1.2	C2
繊細感	20	1.7	C2
スピード感	20	1.4	C2
透明度	19	1.7	C2
艶	17	1.2	C2
量感	17	1.2	C2
解像度	16	1.6	C2
圧迫感・威圧感	16	1.2	C2
4ch 音場感	15	0.7	D
くっきりさ	14	0.8	D
きらめき	13	0.9	D
軟らかさ	12	0.6	D
線の細さ	10	0.6	D
ドライ・ウェット	9	0.6	D
S/N 感	8	0.5	D
再生帯域	8	0.5	D
歪感	7	0.6	E

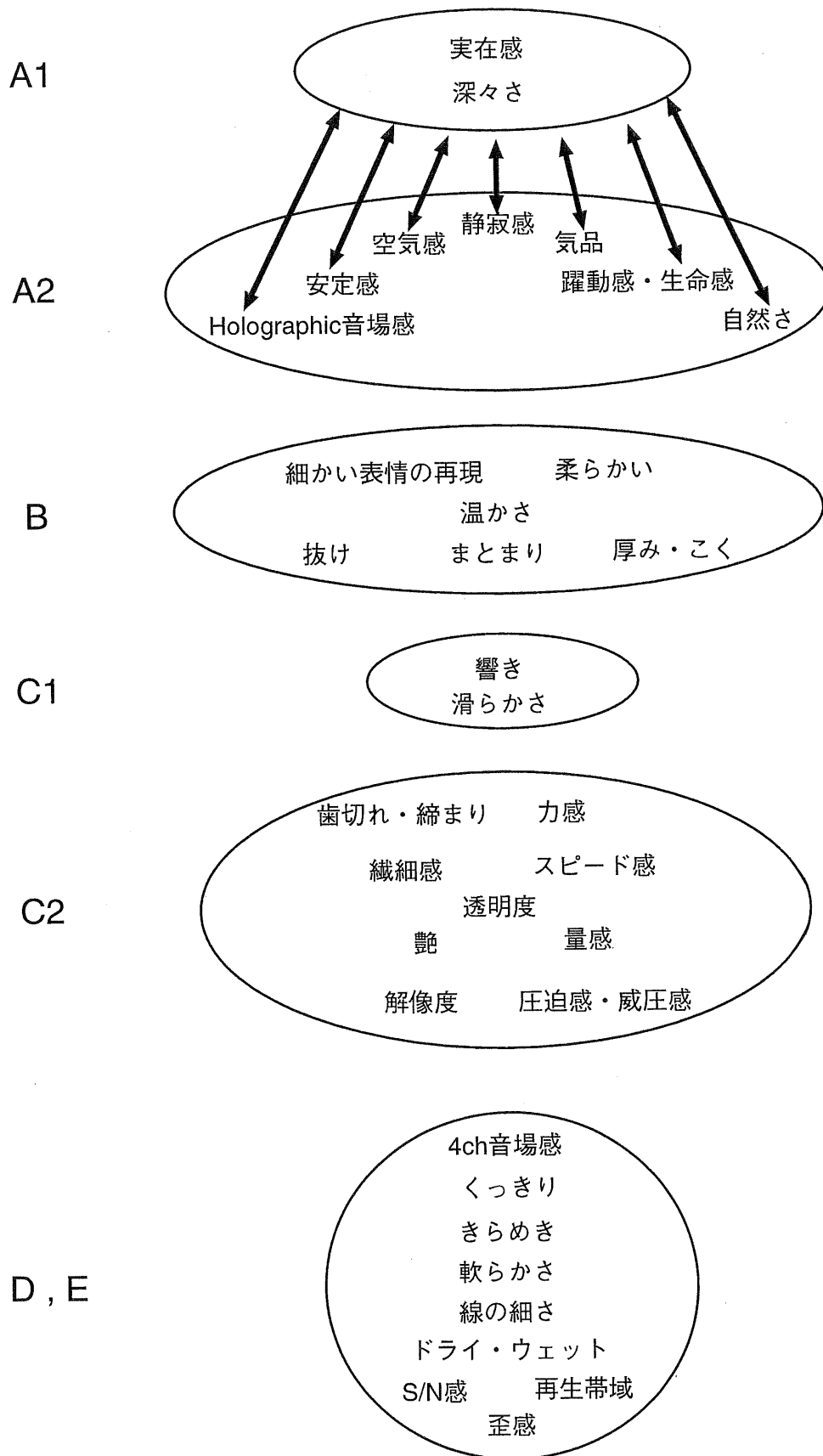


図 B.1: 評価語の階層構造解析の結果

C: 聴取者の音楽の聴き方の違いに注目した評価語のグループ化と解析

音楽再生を聴く人々は、3つのグループに分類されると考えられる。Iは楽譜で表現できる音楽情報を超えた演奏者の心的深みや鬼気迫る雰囲気などの感性を求める人々、IIは音楽をBGMとして聴き、楽譜で表現される音楽情報のみを求める人々、IIIは楽器などの素材から出る音そのものを聴き、物理量を求める人々である。各々のグループに関連すると考えられる評価語をKJ法により分類して図C.1に示す。

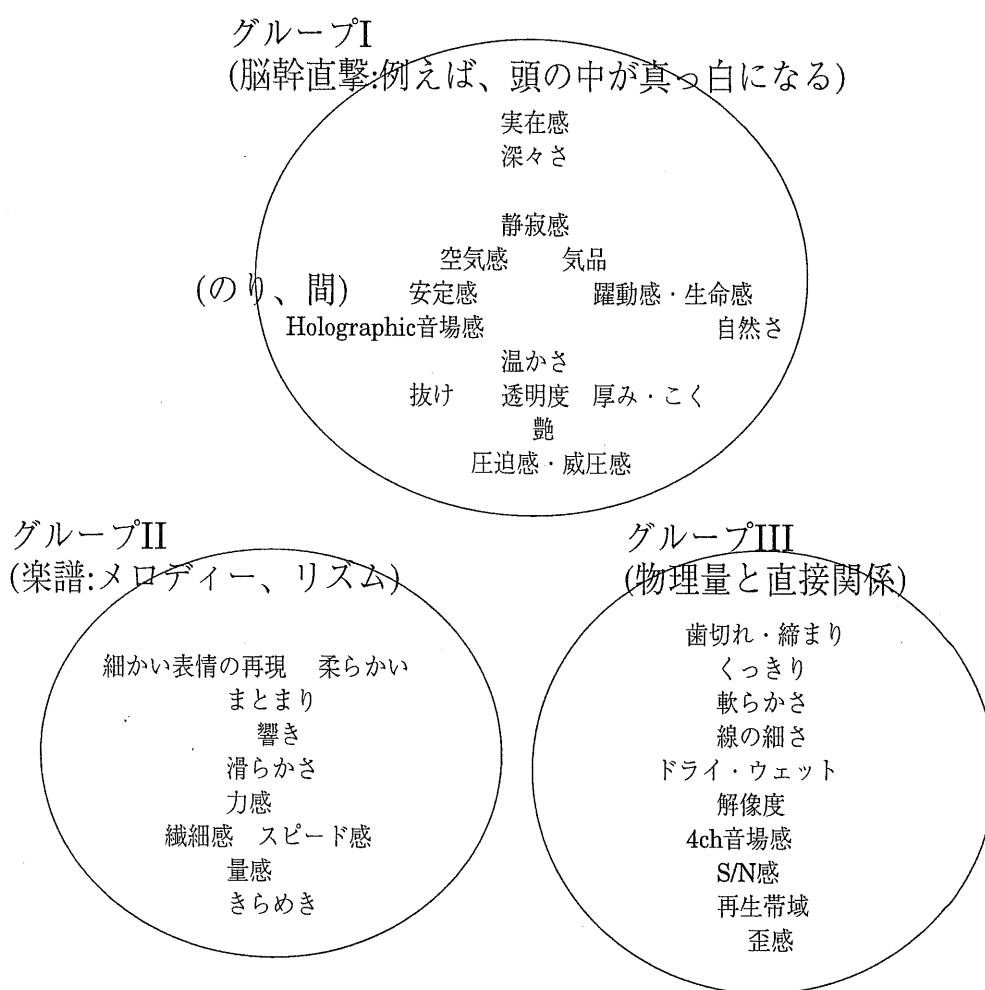


図 C.1: 聴取者の聴き方の違いに注目した評価語の分類

各グループに対する評価語をMDSにより解析する。これまでは、多次元空間内のユークリッド距離を利用して階層的クラスタリングによりクラスタ化を行ったが、この解析法は、クラスタを形成しない評価語（その他に分類される評価語：表3.3）が重要性を持つ場

合があり、局所的な問題を解決するような場合には不適切な方法であるので、得られた多次元の心理空間を構成する軸を解釈するという基本的な解析を行う。各グループにおけるMDSの結果を表 C.1～ C.3 に示す。

表 C.1: グループ I (15 語) に対する MDS の結果

代表評価語	F1	F2	F3	F4
固有値	5.367	2.971	1.808	1.418
Holographic 音場感	0.878	-0.205	0.005	-0.139
空気感	0.756	0.103	-0.166	-0.098
実在感	0.211	-0.016	0.033	0.922
深々さ	0.714	-0.133	0.465	0.111
気品	0.387	0.754	-0.181	-0.452
静寂感	0.762	0.199	-0.423	-0.209
自然さ	0.761	0.068	0.023	0.192
安定感	0.387	-0.043	0.886	-0.06
厚み・こく	-0.408	-0.115	0.745	0.238
抜け	0.2	-0.443	-0.36	-0.521
躍動感・生命感	0.071	-0.809	-0.04	-0.09
圧迫感・威圧感	-0.745	-0.205	-0.154	0.409
透明度	0.022	0.755	-0.547	0.052
温かさ	-0.705	0.228	0.125	-0.257
艶	-0.819	-0.094	-0.163	-0.087

表 C.1 よりグループ I の第 1 軸に寄与する評価語は、“Holographic 音場感”，“空気感”，“深々さ”，“静寂感”，“自然さ”，“圧迫感・威圧感”，“温かさ”，“艶”であり、音場の雰囲気と心へのしみ込みに関連する因子であり、これらは、ジャンルを超えた深い感性情報伝達に関連する評価語として重要であると考えている。第 2 軸に寄与する評価語は，“気品”，“透明度”，“躍動感・生命感”であり、品位を重要とするクラシック，のりを重要とするジャズなどジャンルにとって非常に重要な評価語を表す因子である。第 3 軸に寄与する評価語は“安定感”，“厚み・こく”であり、音楽再生において基本，且つ重要な音像空間の土台に関連し，実験的に“深々さ”への影響が大きい因子である。第 4 因子に寄与する

評価語は，“実在感”，“抜け”であり，音楽再生全体の質に関連する因子である。

表 C.2: グループ II (10 語) に対する MDS の結果

代表評価語	F1	F2	F3	F4
固有値	3.388	2.279	1.443	1.106
細かい表情の再現	-0.071	0.932	0.207	0.245
まとまり	0.796	-0.224	0.141	0.378
滑らかさ	0.73	0.073	-0.502	0.236
繊細感	-0.263	0.859	-0.374	0.161
柔らかい	0.448	0.152	-0.156	0.796
響き	-0.017	0.073	0.968	-0.048
きらめき	-0.074	0.09	0.142	-0.782
スピード感	-0.126	-0.372	-0.207	-0.632
力感	-0.654	-0.567	-0.085	-0.077
量感	-0.386	-0.733	-0.114	0.214

表 C.2 よりグループ II の第 1 軸に寄与する評価語は，“まとまり”，“滑らかさ”，“力感”であり，演奏全体の印象を表す因子である。第 2 軸に寄与する評価語は，“細かい表情の再現”，“繊細感”，“量感”であり，音像の細やかさや量に関連する因子である。第 3 軸に寄与する評価語は，“響き”であり，余韻を表す因子である。第 4 軸に寄与する評価語は，“柔らかい”，“きらめき”，“スピード感”であり，ボーカルの声の柔らかさ，金属系楽器のきらめき，ジャズやロックなどで感じるスピード感など，ジャンル別に対応する印象で，リズムや質感などに関連する因子である。

表 C.3 よりグループ III の第 1 軸に寄与する評価語は，“くっきり”，“再生帯域”であり，現在のデジタルオーディオ再生音の印象を表している因子である。第 2 軸に寄与する評価語は，“軟らかさ”，“歯切れ・締まり”であり，ステップレスポンスなどの物理量と結び付く因子である。第 3 軸に寄与する評価語は，“解像度”，“ドライ・ウェット”，“歪感”であり，これも，第 1 軸同様，デジタルオーディオ再生音の印象を表す，もう 1 つの因子である。第 4 因子に寄与する評価語は，“S/N 感”，“4ch 音場感”であり，音場再生に関連する因子である。第 5 因子に寄与する評価語は，“線の細さ”であり，音像に関連する因子である。

表 C.3: グループ III (10 語) に対する MDS の結果

代表評価語	F1	F2	F3	F4	F5
固有値	2.474	1.968	1.443	1.29	1.102
4ch 音場感	0.303	-0.006	-0.083	-0.78	-0.26
解像度	0.523	-0.012	0.804	0.195	0.093
線の細さ	0.131	0.081	0.029	0.009	0.973
くっきりさ	-0.797	-0.014	-0.239	0.043	0.043
軟らかさ	-0.024	0.979	-0.045	-0.011	0.052
ドライ・ウェット	0.207	-0.01	-0.799	0.028	-0.188
歯切れ・締まり	-0.037	-0.981	-0.041	-0.01	-0.038
歪感	0.268	-0.01	0.765	-0.169	-0.242
S/N 感	0.33	-0.007	-0.169	0.788	-0.286
再生帯域	-0.793	-0.003	0.038	0.0003	-0.137

次に、グループ間の関係を調べるために、全ての評価語に対して影響度を求めた。その結果、グループ I は、グループ II, III より大きく影響を受けていることがわかった。その結果を表 C.4 に示す。ここで、グループ I に対するグループ II, III の評価語の影響度を求めた。グループ II からのグループ I に対する影響度を表 C.5 に、グループ III からのグループ I に対する影響度を表 C.6 に示す。

音楽の聴き方の違いに注目してグループ化することにより、又、付録 B の階層構造関係とは異なる評価語の間関係を示すことができた。

これらの結果は、評価者の違いにより生じる音楽再生の評価の違いをどのように扱っていくかを考察する上の一つの見方になると考えられる。また、評価語と生理学データとの関係が求められてくれば、評価者の違いによる生理学データの違いについても同様に考察できるのではないかと考えられる。

表 C.4: 全評価語に対する影響度

順位	グループ	評価語	受影響
1	I	実在感	3.42
2	I	気品	3.28
3	I	深々さ	3.27
4	I	自然さ	3.23
5	I	躍動感・生命感	3.00
6	I	静寂感	2.82
7	I	空気感	2.75
8	I	Holographic 音場感	2.65
9	I	安定感	2.64
10	II	まとまり	2.55
11	I	抜け	2.43
12	II	細かい表情の再現	2.38
13	II	柔らかい	2.31
14	I	厚み・こく	2.30
15	II	滑らかさ	2.18
16	II	響き	2.21
17	III	歯切れ・締まり	2.12
18	I	温かさ	2.04
19	I	圧迫感・威圧感	1.94
20	I	透明度	1.87
21	II	力感	1.84
22	II	繊細感	1.84
23	II	量感	1.82
24	III	4ch 音場感	1.78
25	III	解像度	1.78
26	II	スピード感	1.77
27	III	くっきりさ	1.65
28	III	線の細さ	1.47
29	II	きらめき	1.47
30	III	S/N 感	1.46
31	III	軟らかさ	1.40
32	III	歪感	1.35
33	I	艶	1.32
34	III	再生帯域	1.21
35	III	ドライ・ウェット	1.14

表 C.5: グループ I に対する影響度 (グループ II)

代表評価語	影響度
響き	1.415
まとまり	1.343
細かい表情の再現	1.131
滑らかさ	1.020
柔らかい	0.986
力感	0.918
量感	0.899
スピード感	0.799
繊細感	0.797
きらめき	0.764

表 C.6: グループ I に対する影響度 (グループ III)

代表評価語	影響度
くっきりさ	1.113
歯切れ・締まり	1.086
軟らかさ	0.968
歪感	0.871
解像度	0.827
ドライ・ウェット	0.821
4ch 音場感	0.814
線の細さ	0.739
S/N 感	0.728
再生帯域	0.640

D: 高度感性情報再現に重点をおいて多くの実験や検討に基づき設計された音響再生システム

以下で示す音響再生システム（CD プレーヤー，アンプ，スピーカ）の開発及び設計は，全て実験的，即ち，帰納的研究方法に従って行ったものである．具体的には，“高度感性情報”の再現に注目し，聴取実験で評価を行い，その評価結果を検討して，次の改善・実験を進める．高度感性情報に関連する評価語群に注目して，これらの評価が良くなるように，これまでの実験的事実や経験的知識を総動員して行った改善である．上記の改善は，第二義の無歪み伝送条件の電気的特性及び物理要因に関するものである．

1. CD プレーヤ

CD player: Marantz CD-34

1. 電氣的改善点

<電源部>

- ・電源ケーブルを MOGAMI NEGLEX 2515 に改変し，ブチルゴムでスパイラル状に巻くが，巻き間隔をあけて固定．プラグをキャプタイヤに改変し，電源ケーブルの方向は音質をチェックして合わせる．
- ・アナログ部電源の整流ダイオードを LOW NOISE Type のものに改変．
- ・外付け大容量電解コンデンサを整流部コンデンサにパラ付け．
 - Panasonic Xpro Twin 12000 μ F/63V + Film コンデンサ 6.8 μ F（プラス側のみ）リード線は柔らかいより線に改変．
 - Panasonic Xpro 10000 μ F/63V + ELNA Cerafine 33 μ F/100V BP

<アナログ信号処理部>

- ・出力カップリングコンデンサの改変; チップ型電解コンデンサ 22 μ /35V \rightarrow ELNA Cerafine 100 μ /50V BP.
- ・信号出力ケーブル（付属の出力ピンケーブルを MOGAMI NEGLEX 2515 + FUJIKURA 3C2WS + NEGLEX 7551（スリーブ取り外し）に改変．

2. 構造的改善点及び改善

- ・裏ぶたの除去．（音を聴いた結果より）
- ・12 ϕ 真鍮ボルトで作成した足に改変し，筐体を直接3点ポイント支持化．支持位置は音を聴きながら決定．
- ・大容量外付け電解コンデンサの支持方法は，大理石台の上に皮を介して置く．

- ・各プリント基板の固定用のネジにスプリングワッシャーを噛ませ、締め具合を音を聴きながら改善。
- ・ケースのネジ、安定化電源のヒートシンク固定用ネジの締め具合を音を聴きながら適度に改善。
- ・出力信号ケーブルにおける NEGLEX 2515 と FUJIKURA 3C2WS との接続点付近を、真鍮ブロックとけやき箸ではさみ、音響振動を防止、高度感性情報の再現には大きな効果があった。

2. アンプ

Amplifier: Musical Fidelity A1 及び A1-20

1. 電氣的改善点

- ・電源ケーブルを OYAIDE L/i-50 に、プラグをキャプタイヤに改変。
- ・電源ユニットと本体接続コードを OYAIDE L/i-50 に改変し、直付け。
- ・入力ピン端子を直出し。
- ・整流回路の電解コンデンサに Panasonic Xpro Twin 12000 μ F/63V を外にパラ付け。
- ・サーボアンプの時定数を増大。(5章をはじめとして多くの実験の結果より)
- ・Pre amplifier 部の除去。
- ・Volume を東京光音 2P-2511S(50k Ω) に改変。

2. 構造的な改善点及び調整

- ・プリント基板（整流）のネジ締めを音を聴きながら調整。
- ・プリント基板、ヒートシンク（天板）の形状を改造。
- ・プリント盤を天板からの吊り下げ構造に改造。
- ・支持足を真鍮の TIP TOES に改変し、支持位置は打診法、振動モードの測定により節の位置に取り付け、大理石の上に皮を介して点支持化。
- ・Volume のつまみをアルミに改変。
- ・筐体、前板、後板、側板を音を聴きながら改変（除去を含む）。

3. スピーカ

スピーカシステム設計

(A) 25cm ウーファーを用いた高品位スピーカシステムの設計に関して基本的な部分では旧音響理論（中島平太郎氏）に従った。

1. スピーカの諸元

- 実効振動半径 $a : 11.075[\text{cm}]$
- 最低共振周波数 $f_0 : 22.25[\text{Hz}]$
- 等価質量 $m_0 : m_0 = m'_0 \frac{f_0'^2}{f_0^2 - f_0'^2} = 34.25[\text{g}] (m'_0 : 9[\text{g}], f_0' : 19.8[\text{Hz}])$
- スピーカの等価な Q $Q_0 : Q_0 = \frac{R_0}{R_m} \cdot \frac{f_0}{\Delta f_0} = 0.184 (R_m : 260[\Omega], \Delta f_0 : 5.8[\text{Hz}], R_0 : 12.5[\Omega])$

B) 音質上, 実験を重ねた理論 (MJ 誌 1979 年 1 月号) と高度感性情報再現の実験からの参正

2. スピーカ BOX の設計 1

スピーカ BOX の設計は, 帰納的研究方法を取り, 高度感性情報の再現に注目し, 聴取実験を何度も繰り返し, 評価結果を検討し実験・調整をした結果, その音質から, 旧音響理論の設計における, 密閉とバスレフの間となった. したがって, まず密閉と考えて設計を進める.

$$V = \frac{3.5 \cdot 10^5 \cdot a^4}{f_0^2 \cdot m_0^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2Q_0^2} - 1}$$

$$V = 311 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{13.77} = 22.59 \cdot 10^3 [\text{cm}^3] = 22.59 [\text{l}]$$

ここで, 現実の設計では考えられない程大きい BOX となる. これは旧音響理論に基づき, 総合的な Q $Q_T = 0.7$ を目指した設計を行っているからである. つまり, 低音再生限界 f_l を計算すると,

$$\frac{f_l}{0.7} = \frac{f_0}{Q_0}$$

$$f_l = \frac{f_0}{Q_0} \cdot 0.7 = 83 [\text{Hz}]$$

となり, かなり周波数が高過ぎる. 本研究でも明らかにしたが, 超低域再生が重要 (5 章) である. したがって, 目標とする総合的 Q_T の変更を行う. (この事実から, 従来とは全く異なる高度感性情報再現におけるスピーカ駆動の新理論があるのではないかと考えている.) 現在まで得られている実験的事実や経験的知識により $Q_T = 0.4$ とする. すなわち,

$$\frac{f_l}{0.4} = \frac{f_0}{Q_0}$$

$$f_l = \frac{f_0}{Q_0} \cdot 0.4 = 48 [\text{Hz}]$$

となる. ここで, 低音再生限界 f_l を盛り込み, V を計算すると以下のようなになる.

$$V = \frac{3.5 \cdot 10^5 \cdot a^4}{f_l^2 \cdot m_0^2} \cdot \frac{1}{(1 - 2Q_0^2)}$$

$$V = \frac{3.5 \cdot 10^5 \cdot 11^4}{48^2 \cdot 34^2} \cdot \frac{1}{(1 - 2 \cdot 0.184^2)}$$

$$V = 70.166 [\text{cm}^3] = 70 [\text{l}]$$

3. スピーカ BOX の設計 2 (実現へ)

外寸は、上底：400[mm]，下底：500[mm]，高さ：700[mm]，奥行き：400[mm]となる駒型の BOX を設計する。それは、高度感性情報再現実験の結果であるが、おそらくは定在波が立ちにくい、形になっているからではないかと考察している。(今後、振動の測定も含めて音質との関係を研究していく。)ここで、板厚は 42[mm] とすると、

$$S = \frac{(400-84)+(500-84)}{2} \cdot (700 - 84) = 225456[mm^2] = 2254.56[cm^2]$$

奥行きが 31.6[cm] より、

$$V = 2254.56 \cdot 31.6 = 71244.096[cm^3] = 71[l]$$

4. ダクト (ポート) 半径 a' [:ダクト面積 S_d から]

旧音響理論 (中島平太郎氏) では、有効振動面積と同等と考えるが、これは高度感性情報再現のスピーカ設計では、実験的に得られた密閉とバスレフの中間型という結果から考えても、あまりにも現実的でない。一方、音質上、実験を重ねた理論 (MJ 誌) では、 S_d は有効振動面積の $1/3 \sim 1/5(1/b)$ とされているが、実験的に得られた密閉とバスレフの中間型を狙う高度感性情報再現のスピーカシステム設計では、更に、この値の 2 倍以上、ダクト (ポート) は小さく設計 ($b = 10$ 程度) する必要がある。ダクトの半径を a' とすると、

$$a' = a\sqrt{\frac{1}{b}}$$

ここで、 $b = 3$ の時、 $a' = 6.4[cm]$ 、 $b = 5$ の時、 $a' = 4.95[cm]$ 、 $b = 10$ の時、 $a' = 3.5[cm]$ となる。したがって、ダクト (ポート) の半径は 3.5[cm] (直径 7[cm]) とする。

5. チューニング周波数 f_b とダクト長 L

音質上、実験を重ねた理論 (MJ 誌) に基づくと、チューニング周波数 f_b は、理想条件では f_0 に対して $1/\sqrt{2}$ であるが、 Q_0 が低いので、高く設定する必要がある。総合的 $Q_T = 0.4$ (高度感性情報再現の評価実験結果より) とすると、 $f_b = f_0 \cdot 1.0 = 22.25[Hz]$ 。

よって、ダクト長は、

$$L = \frac{94000 \cdot a'^2}{f_b^2 \cdot V} - 1.46a[cm]$$

$$L = \frac{94000 \cdot 3.5^2}{22.25^2 \cdot 70} - 1.46 \cdot 3.5[cm]$$

$$L = 28[cm]$$

6. $\gamma_e =$ スピーカスチフネス S_d /キャビネットスチフネス S_0 , $\beta_e =$ 振動板の重さ m_0 /ポート空気の重さ m_p

$$S_c = \frac{1.4 \cdot 10^7 \cdot a^4}{V} = 2.9282 \cdot 10^3, S_0 = m_0(2\pi f_0)^2 = 0.648 \cdot 10^3$$

$$\gamma_e = 4.5$$

$$m_0 = 34, m_p = \rho_0 S_p L + \frac{8}{3} \rho_0 a'^3 + 0.6 \rho_0 \pi a'^3: \rho_0 \text{ は空気密度, } S_p \text{ はダクト面積}$$

$$\beta_e = 2.5$$

結果として、以上の設計・調整結果は、MJ 誌 1979 年 1 月号の pp.211-212 の設計表の $\gamma_e = 4.5$, $\beta_e = 2.5$ に相当する。

本研究に関する研究業績

論文

- [1] 石川 智治, 冬木 真吾, 宮原 誠, “音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.80-A, No.11, pp.1805-1811, 1997.11.
- [2] 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “音響再生装置の伝達周波数特性補正による音質改善: 再生音における高度感性情報の再現と jitter が音質に及ぼす妨害”, 映像情報メディア学会. (採録決定)
- [3] T.Ishikawa, Y.Kobayashi, and M.Miyahara, “The Sound Quality by Improvement of the Transfer Function of a Sound System -The Reproduction of High Order Sensations-”, Audio Engineering Society. (投稿中)
- [4] M.Miyahara, Y.Kobayashi, T.Ishikawa and H.Akahori, “Degradation of Sound Quality Caused by A Jitter in Digital Audio System”, Audio Engineering Society. (投稿中)

国際会議

- [1] T.Ishikawa, S.Fuyuki, and M.Miyahara, “Investigations and Analysis of Assessment Words for Sound Quality for the Reproduction of High Order Sensations”, 16th ICA and 135th ASA Meeting, Seattle, PP, Vol.2, pp.899-900, 1998.6.
- [2] T.Ishikawa, Y.Kobayashi, and M.Miyahara, “Important Physical Factors for The Reproduction of “Atmospheric” - The Relation Between Time Constant of Servo Main Amplifier and “Atmospheric””, J. Audio Eng. Soc. C-7, PP.62-65, 1999.6.

- [3] T.Ishikawa, Y.Kobayashi, and M.Miyahara, “ Improving the Transfer Function of a Sound System to Constant and its Effect on the Reproduction of High Order Sensations ”, WESTPRAC VII, Vol.1, pp.393-396, 2000.10.
- [4] T.Ishikawa, Y.Kobayashi, and M.Miyahara, “ Discovery of new factors for sound quality more important than improvement of the transfer function of a sound system by a DSP ”, WoSPA 2000, Brisbane, 2000.12.

研究会・口頭発表

- [1] 石川 智治, 冬木 真吾, 宮原 誠, “ 音質評価語の多次元空間マッピング”, 電気関係学会北陸支部大, B-29, pp.124, 1996.10.
- [2] 石川 智治, 冬木 真吾, 宮原 誠, “ 音質評価語の多次元空間マッピングとグルーピング”, 信学技報, EA96-58, pp.49-53, 1996.10.
- [3] 石川 智治, 冬木 真吾, 宮原 誠, “ Audio System のデジタルフィルタによる特性補正実験～特性改善と音質評価～”, 信学技報, EA97-16, pp.9-16, 1997.6.
- [4] 石川 智治, 小林 幸夫, 冬木 真吾, 宮原 誠, “ デジタルフィルタによる伝達周波数特性補正実験と高度感性情報の再生に注目した評価”, 信学技報, EA97-94, pp.17-24, 1998.1.
- [5] 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “ 高度感性情報の再生のための DSP による伝達周波数特性補正”, 信学技報, EA98-18, pp.7-14, 1998.6.
- [6] 石川 智治, 小林 幸夫, 國藤 進, 宮原 誠, “ 高度感性情報に注目した音質評価語の階層構造解析”, 信学技報, CQ98-62, pp.15-20, 1998.12.
- [7] 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “ 新しい考えに基づいた音質評価語のグループ化と解析～高度感性情報評価語はどのグループか ～”, 信学技報, EA99-38, pp.75-82, 1999.8.