JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ピアノ曲に対する情動分析を基にした音楽評価に関する研究
Author(s)	吉田，貴子
Citation	
Issue Date	1997-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1065
Rights	
Description	Supervisor:堀口 進，情報科学研究科，修士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修 士 論 文

ピアノ曲に対する情動分析を基にした音楽評価に関する研究

指導教官　堀口 進 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

510127　　吉田 貴子

1997 年 2 月 14 日

Copyright © 1997 by Takako Yoshida

目 次

1 序論 **1**

1.1 本研究の背景と目的 1

1.2 本論文の構成 3

2 音楽における感性情報処理 **5**

2.1 はじめに 5

2.2 コンピュータによる自動演奏 5

2.2.1 名演奏模倣システム 6

2.2.2 ルールによる演奏家モデル 6

2.3 音楽演奏と聴取印象 7

2.3.1 音楽と聴取印象 8

2.3.2 SD 法 9

2.3.3 音楽聴取印象研究における課題 9

2.4 まとめ 10

3 ピアノ演奏における形容詞を用いた聴取印象分析 **11**

3.1 はじめに 11

3.2 楽譜データと演奏 11

3.3 音楽評価方法 12

3.3.1 評価語として用いる形容詞 17

3.3.2 形容詞の種類 17

3.4 ローカルテンポの変化に対する聴取印象 18

3.4.1 ローカルテンポ変更方法 18

3.4.2 試聴実験 (1) 19
3.4.3 実験結果 20
3.4.4 試聴実験 (2) 20
3.4.5 実験結果 24
3.5 ヴェロシティの変化に対する聴取印象 24
3.5.1 ヴェロシティ値変更方法 24
3.5.2 試聴実験 (3) 28
3.5.3 実験結果 28
3.5.4 試聴実験 (4) 29
3.5.5 実験結果 33
3.6 まとめ 33

4 ピアノ演奏における聴取印象の多変量解析 38
4.1 はじめに 38
4.2 因子分析による実験評価 38
4.2.1 因子分析 39
4.2.2 因子分析による評価結果 42
4.3 多次元尺度構成法による実験評価 47
4.3.1 多次元尺度構成法 48
4.3.2 多次元尺度構成法による評価結果 50
4.4 まとめ 53

5 結論 54
5.1 まとめと結論 54
5.2 今後の課題 55

謝辞 56

参考文献 57

図 目 次

1.1 感性情報の位置づけ 2
1.2 研究の流れ 4

3.1 楽譜 13
3.2 ローカルテンポ 14
3.3 ヴェロシティ 14
3.4 SD 法に用いられる評価記入用紙の例 15
3.5 評価記入用紙 16
3.6 試聴実験 (1) の実験結果 1 21
3.7 試聴実験 (1) の実験結果 2 22
3.8 試聴実験 (1) における形容詞対の相関図及び相関係数 23
3.9 試聴実験 (2) の実験結果 1 25
3.10 試聴実験 (2) の実験結果 2 26
3.11 試聴実験 (2) における形容詞対の相関図及び相関係数 27
3.12 試聴実験 (3) の実験結果 1 30
3.13 試聴実験 (3) の実験結果 2 31
3.14 試聴実験 (3) における形容詞対の相関図及び相関係数 32
3.15 試聴実験 (4) の実験結果 1 34
3.16 試聴実験 (4) の実験結果 2 35
3.17 試聴実験 (4) における形容詞対の相関図及び相関係数 36

4.1 試聴実験 (1) に対する因子分析の結果 43
4.2 試聴実験 (2) に対する因子分析の結果 44
4.3 試聴実験 (3) に対する因子分析の結果 45

4.4 試聴実験 (4) に対する因子分析の結果 46
4.5 試聴実験 (1) の多次元尺度構成法結果 51
4.6 試聴実験 (3) の多次元尺度構成法結果 52

表 目 次

3.1　音楽に使われる形容詞についてのアンケート調査結果 17

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

近年の急速なコンピュータの発達と共に人間と機械の関係は大きく変化した。これまでの機械は、人間の手足の代わりとして「力の代行」を行うことを主としていた。コンピュータの出現と発達は、人間の記憶力よりもはるかに優れたデータの記憶と管理及びそれに伴う様々な処理を可能にしたことにより、「力の代行」だけでなく、さらに「知識の代行」をも可能にしたと言われている [1]。現在では、コンピュータの果たす役割は人間を支援するために様々な分野へと広がっている。

しかし、コンピュータの発達、普及が進むと同時に、コンピュータの無機質さ、柔軟性の欠如、無神経さも指摘されるようになってきた。これは、人と人とのコミュニケーションには存在するが人とコンピュータとの間にはない「人間らしさ」に対する要求が高くなってきたことの現れではないかと考えられる。現在、Human Interface や Human Computer Interaction 等の分野においては、人に優しいシステムの実装が取り組まれるようになってきている。

このような背景を反映して、人間を中心としたシステムを考えるために、近年、人間の「感じ方」を観測し、解析する研究が行われるようになってきた。これは人間が感じる「感性的」な情報を情報処理の立場でとらえ、その抽出や表現の方法論を科学的に追求しようとする研究であり、「感性情報処理」と呼ばれる分野として盛んになってきている。この研究分野は、人間の感性を解き明かすことではなく、人間と同じ応答をするモデルを構築することを目的としている。また、ここで扱われている「感性的」な情報とは「感性

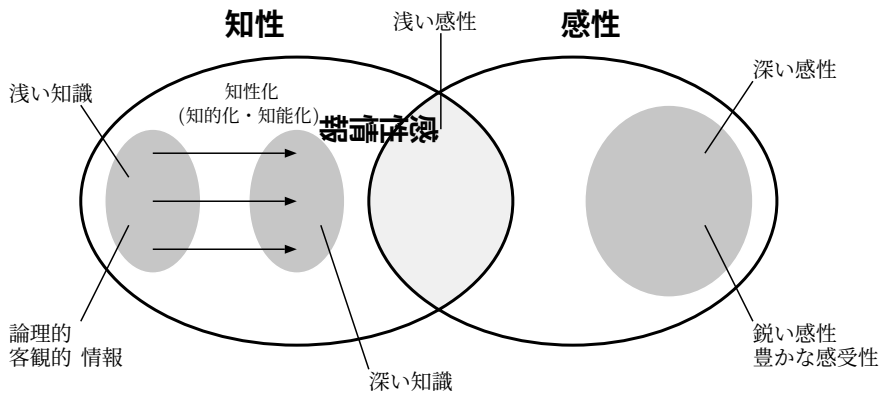


図 1.1: 感性情報の位置づけ

の情報的側面」であり、これは図 1.1に示した知性と感性のオーバーラップした浅い感性の領域を指している [2][3]。すなわち「人間ならばどのように感じるか」といった感じ方をデータとして持ち、あたかも人間のような応答をするモデルを構築することが目的とされている。

この「感性情報処理」の研究分野においては、音楽に対する研究も行われている。近年コンピュータを用いた音楽演奏が可能となり、さらにその簡易化が進んだことに加えて、AV 機器が高度に発達したことにより、音楽の自動演奏は様々な分野で取り入れられるようになった。しかし、楽譜をデータとして入力しただけでは、時計のように正確な音の列が演奏されるだけで面白みが感じられない。そこでコンピュータによる自動演奏をより「人間らしい」演奏にするために、感性情報処理分野において音楽の研究が行われるようになってきた。現在、自動演奏に関する研究や人間と計算機がセッションを行うための研究等が報告されてきている。これらの研究では、様々な方法を用いてコンピュータの演奏をより「人間らしい」演奏に近づける工夫と試みが行われている。

しかし技術が向上したにも関わらず、コンピュータによる自動演奏は面白みのある演奏と言うにはほど遠く、人間の演奏と比肩できるまでには至っていない。これは「人間らしい」演奏を作成するための知識が非常に経験的かつ専門的で難しく、また複雑であることが原因であると考えられる。これを解決するためには、演奏の「人間らしさ」と音楽に含まれる様々な要素との関係を明確にすることが非常に有効であると考えられる。

そこで本研究では、「人間らしい」自動演奏の実現を目的として、音楽に含まれている様々な要素と人間が音楽を聴いた時に持つ印象との関係についての分析を試みた。ここ

で、音楽に含まれる様々な要素を物理的にとらえ、「物理パラメータ」と呼ぶこととする。また、物理パラメータには楽譜情報と演奏情報のどちらも含まれるとする。本研究は、ピアノ曲に含まれる物理パラメータが聴取印象へ及ぼす影響を調査した。具体的には、物理パラメータとしてローカルテンポとヴェロシティを取り上げ、これらを様々に変更した曲を作成して被験者に聴かせ、被験者の聴取印象の変化を調べた。聴取印象には形容詞を用いた。

様々な物理パラメータと聴取印象 (形容詞) との関係が明らかになれば、音楽に対して人間と同じような評価をするシステムの構築が可能になると考えられる。人間の評価を近似できるシステムが構築されれば、コンピュータによる自動演奏において、目的に応じて必要な物理パラメータを取捨選択できるようになると考えられる。また、応用として音楽療法や作曲・編曲支援が考えられる。以上に述べた本研究の流れを、図 1.2に示した。

1.2 本論文の構成

本論文は 5 章で構成される。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、現在までに行われている自動演奏に関する研究並びに感性情報処理分野における音楽に関する研究について述べ、その問題点を明らかにする。

第 3 章では、聴取印象と物理パラメータの関係を分析するために行った実験の手法と、具体的な試聴実験方法及びその実験結果について述べる。

第 4 章では、試聴実験結果を因子分析、多次元尺度構成法によって分析した結果について考察を行う。

第 5 章は結論である。

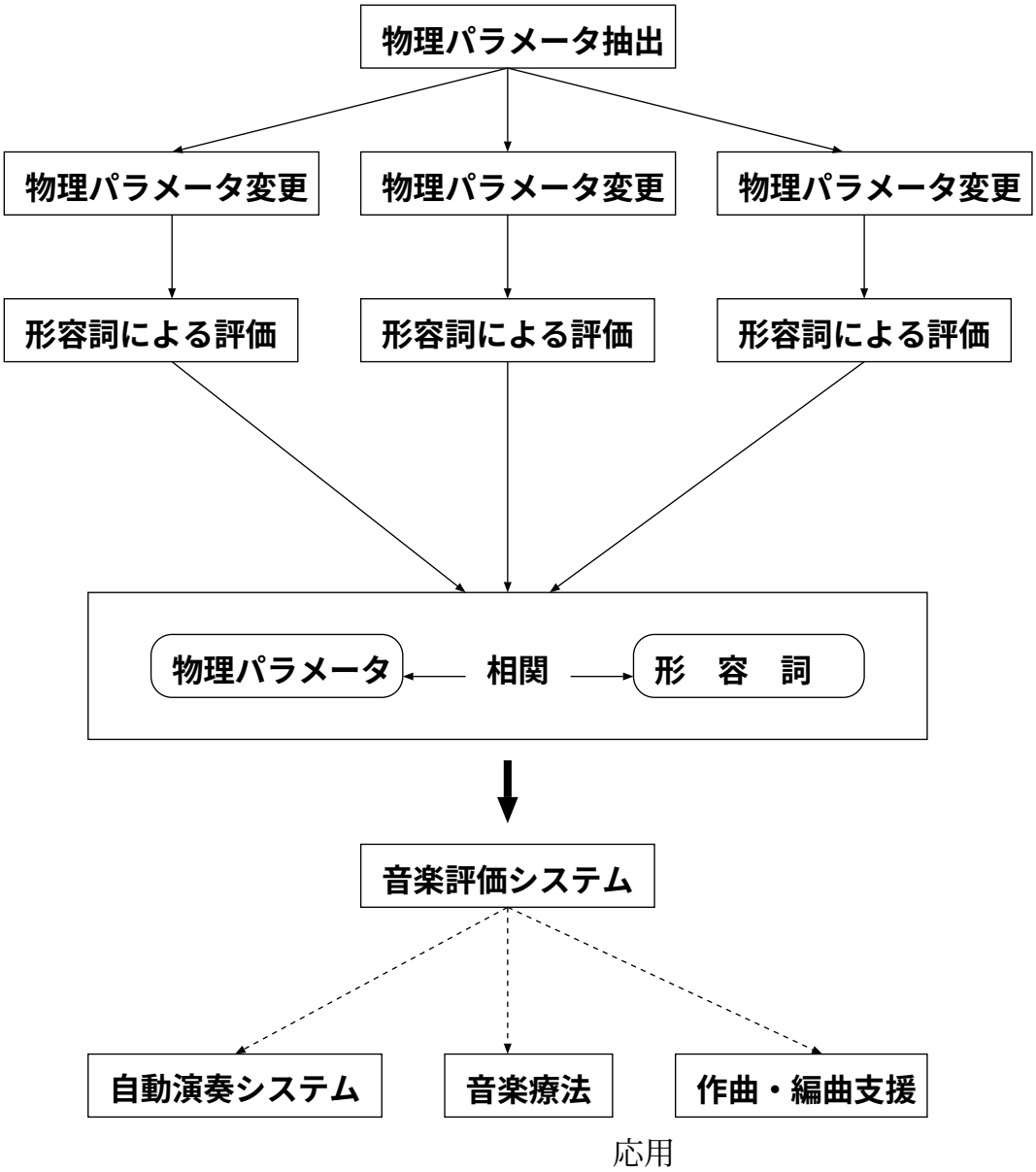

物理パラメータ抽出
物理パラメータ変更
物理パラメータ変更
物理パラメータ変更
形容詞による評価
形容詞による評価
形容詞による評価
物理パラメータ
相関
形　容　詞
音楽評価システム
自動演奏システム
音楽療法
作曲・編曲支援
応用

図 1.2: 研究の流れ

第 2 章

音楽における感性情報処理

2.1 はじめに

音楽に関する研究は、近年になりようやく盛んになってきた。現在、「人間らしい演奏をする自動演奏システム」、「人間と競演するパートナーシステム」など、システムを構築するための研究や、「音楽における “間” 」に関する研究、「音楽演奏意図と聴取者の印象の関係」に関する研究などが行われるようになってきている。本章では、「感性情報処理」分野の研究例のひとつとして、「人間らしい」自動演奏を行うシステムの構築を目的としている「自動演奏システム」の研究を取り上げ、現在の手法並びにその問題点を述べる。さらに、音楽の演奏と聴取印象の関係を調査している研究についてその成果並びに問題点を述べる。

2.2 コンピュータによる自動演奏

近年、MIDI などの楽器電子制御技術の発達により、音楽の自動演奏に関する技術も飛躍的に進歩した。それに伴い、いかに「人間らしい」演奏を実現させるかという問題に対する研究も行われるようになってきた。

現在、自動演奏システムに関する研究分野においては、楽譜どおりの正確な演奏を行うだけのシステムではなく、「人間らしい」音楽性のある演奏が可能であるシステムの構築を目的として研究が行われている。この目的実現のために、ピアノ独奏に関して次のような 2 種類の手法が提案されている [1]。

2.2.1 名演奏模倣システム

名演奏模倣システムとは、採譜システムを用いて名演奏の分析を行い、そのデータに基づいて演奏データを作成する方法である。あらかじめ入力してある楽譜情報と演奏情報との対応づけを行い、各音符の強さやタイミングなどの細かな演奏情報を得るという手法である。高見ら [4] は名演奏模倣に関して、より忠実な再現を可能にするための試みを行っている。まずコンピュータを用いて著名演奏家のピアノ演奏を楽譜データと照らし合わせ、音符の音響データを抽出し、その演奏を再現するシステムを作成する。このシステムに演奏合成されたデータをさらに分析して自ら修正するような学習機能を組み合わせることによりより忠実な再現を実現しようとしている。また高見ら [5] は、演奏情報を数値化する手法の提案を行っている。まず、録音されたピアノ演奏の音響信号を用い、音響分析により周波数及びその振幅を抽出して周波数マップという演奏データを作成する。次に自動認識により楽譜データをコード化する。最後に DP マッチングを用いて演奏データと楽譜データの対応をとることにより、演奏情報を数値化するという手法である。

これらの「名演奏模倣システム」の研究においては、名演奏家の行った演奏データを模倣することにより「人間らしさ」を実現している。このため、収集できる名演奏データの数に限界があり、往年の作曲家や名演奏家による演奏の再現は不可能である。この研究は、コンピュータが楽曲を解釈しながら人間らしい演奏を行う自動演奏システムを構築するための第一段階的研究であると言えよう。

2.2.2 ルールによる演奏家モデル

ルールによる演奏家モデルとは、楽譜情報の構造を解析し、人間ならばどのように演奏するかといった演奏家モデルを通して、「人間らしい」演奏を出力する方法である。宮田ら [6] は、楽譜データに演奏者のルールを加味して演奏者の特徴を持った演奏データを生成することにより「人間らしい」自動演奏の実現を試みている。まず、リズムのゆらぎと音の強さの変化を演奏データとして用い、時系列データとして波形分解を行った結果を演奏者情報としている。そして、得られた演奏者情報を楽曲構造と発想記号の要素に対応させて学習させるという自動演奏方法を提案している。Frydén ら [7] は、Analysis–by–Synthesis 法を用いてメロディに対する演奏ルールの抽出方法を提案し、さらに抽出したルールに対しての検討を行っている。Analysis–by–Synthesis 法とは、まず初めに楽譜情報にルール情報を付加したデータを作成する。次に実際の演奏情報のデータとの比較を繰り返して

ルールが演奏データに近づくように学習・更新するという手法である。Friberg ら [8] は、Analysis–by–Synthesis 法を用いて作成した演奏ルールが、調性音楽だけでなく無調音楽にも適応可能かどうかの検証を行っている。この研究は前段階として Friberg[9] が調性音楽を用いて Analysis–by–Synthesis 法により様々な演奏ルールを作成している。Friberg ら [8] は、[9] で得られた演奏ルールから抜粋、変更を加えた 8 個のルールを無調音楽に適用して演奏データを作成した。そして、作成された音楽を用いて現代音楽の演奏家及び作曲家に対し試聴実験を行った。その結果、ルールを適用して行った演奏は、ルールを全く用いない演奏よりかなり良い評価を得た、と報告している。

このように、ルールを用いた自動演奏に関する研究は多数行われている。これらの方法は、模倣システムのように名演奏家の演奏データを収集できなければ再現不可能である、ということはない。名演奏家の演奏特徴をルールにすることで、ある程度「人間らしい」演奏が実現可能であると考えられる。しかしルールを基にした自動演奏は、ルールを増やせば増やすほど演奏がより「人間らしい」ものに近付くと考えられるため、名演奏に近付けるにはルールを爆発的に増やさなければならないと考えられる。これを回避するためには、ルールが聴取印象に与える作用を明らかにすることが必要である。ルールの作用が解明すれば、ルールの爆発的増加を防ぐことが可能であると同時に、自動演奏のための効果的なルールを選択することができると考えられる。

2.3 音楽演奏と聴取印象

自動演奏システム構築に関しては前節で述べた問題が残っている。現在、音楽に対する人間の聴取印象を分析することによって、聴取印象に対して影響力の大きい物理パラメータを解明しようとする研究が行われるようになってきた。これらの研究によって聴取印象と物理パラメータの関係が明らかになれば、ルールの選択が可能になる等、前節に述べた自動演奏に関する問題はかなり解決されると考えられる。さらに自動演奏だけでなく、人間が音楽を演奏する場合にも重要視しなければならない物理パラメータをとらえることが可能となると考えられる。そこで本節では、音楽と聴取印象との関係に関して現在行われている研究を報告する。

2.3.1 音楽と聴取印象

音楽演奏と聴取印象に関しての研究については田口 [10] が報告しているように、十分に研究されているとは言えない。近年音楽聴取印象に関して報告された研究としては、次のようなものが挙げられる。

徳弘ら [11] は、楽譜が持っている情報と聴取印象との関連について調べている。情動に影響を与えている楽譜情報の要因を調べるために、楽曲 50 曲を選び、楽器の影響がないように正弦波を用いて試聴曲を作成し、試聴実験を行っている。試聴実験は評定尺度法に基づいて行い、さらにその結果を因子分析及び正準相関分析により分析している。実験の結果、楽曲中に含まれる音のうち分布密度の高い音名と情動に深い関係があることを報告している。また、従来から知られているように、調性が楽曲の聴取印象に大きく関わっていることも報告している。

また、音楽演奏に対する聴取印象を調べる研究も行われている。Nakamura[12] は、演奏者の表現と聴取者の聴取印象との間に関係している物理的な要素を調査するための実験を行っている。実験手順はまず、ヴァイオリン、リコーダー、オーボエの演奏家に同一曲についての解釈を考えさせ、その解釈を各々楽譜に記入させる。次に、楽譜に記入された解釈を基にして演奏させ、それを録音する。その後、試聴実験として録音した演奏を音楽に精通している被験者に聴かせ、演奏者が楽譜に与えた解釈を推測して記入させる。これにより、演奏者の意図した解釈が聴取者へどのように伝わっているかを調べている。結果的には、クレッシェンド、デクレッシェンドに関しては演奏者の意図がかなりよく伝わっているのに対し、ピアノ、フォルテに関しては演奏者の意図と聴取者の知覚に一致性はあまり見られず、曲の構造や前後関係にかなり依存しているらしいという報告をしている。

末岡ら [13] は、演奏者の演奏意図と聴取印象との関連について報告している。この研究では、まず、複数のピアノ奏者にショパンのワルツを 3 種類の演奏意図 (A: 自分が最も良いと思うように、B: あっさりと、C: 別れの悲しみをこめて) で演奏させ、それを録音して試聴実験を行っている。試聴実験には SD 法を使用し、22 の形容詞対を評価語として用いている。試聴実験は 24 種類の演奏に対して、各形容詞対につき 7 段階で被験者に評価をさせている。さらに、SD 法による評価結果を Kruskal の多次元尺度法 [24] を使用して分析し、その結果を心理空間内の表現と見なして、布置の解釈を行っている。田口ら [14] は、コンピュータを用いてショパンのワルツを 16 通りに自動演奏させ、その聴取印象について末岡ら [13] と同様の試聴実験を行い、聴取印象の変化を調べている。奥宮ら

[15] も、MIDI の演奏データを用いてモーツァルトのピアノソナタの演奏を変化させた曲を作成し、これを用いて末岡 [13] らと同様の試聴実験を行い、聴取印象変化の調査を行っている。

2.3.2 SD 法

前節で述べた聴取印象の調査を行う研究においては、聴取印象の測定に、しばしば SD 法 (Semantical Differential Method) が用いられている。SD 法はオスグッドの意味論から出発したものであるが、意味論から分離して、ある対象・刺激に対して人間がもつイメージの測定・操作のための道具として用いられることも多い。SD 法の手順は、まず始めに「明るい–暗い」のようないくつかの形容詞対を用いて対象の評定を行わせる。これらの形容詞対は、それぞれ単一次元の特性を抽出すると仮定して尺度と呼ばれる。評定が行われたあと、意味空間を次元数の少ない、より簡潔なものにするために、用いられた尺度間の相関行列に基づいて尺度を整理する。これには、主として因子分析が用いられる。因子分析は複数の変数間の相関行列に基づいて共通因子を見いだしていく数学的方法である。尺度がある因子と関わっている程度は因子負荷量と呼ばれるが、因子分析は、共通因子がいくつあるかを明らかにすると同時に尺度ごとの因子負荷量も求まる。

つまり SD 法の方法としては、評定尺度法を行い、その結果を因子分析を用いて分析する、という流れをとる [1][17]。

2.3.3 音楽聴取印象研究における課題

音楽演奏と聴取印象の関係を調べるために、聴取印象に強い影響力のある物理パラメータを求めることを目的として以上のような研究がなされてきた。しかし、これらの研究においても依然として物理パラメータが聴取印象へ与える影響は明確にされていない。また、各物理パラメータの聴取印象への影響が明確化されていないため、複数の物理パラメータによる相乗・相殺効果も判明していない。しかし、自動演奏や人間の音楽演奏に応用するためには、個々の物理パラメータが与える影響を明確化することが課題となる。

また、聴取印象の研究においては、SD 法を用いた評価が行われている。しかし、評価語として用いられる形容詞対が、音楽を評価する対として妥当であるかどうかの検証は行われていない。評定尺度法において形容詞対を尺度とする場合、対が対義語となっていることが必要である。よって形容詞対の妥当性を検討しなければならない。また、音楽要素

によって影響を受ける形容詞と受けない形容詞があると考えられるため、各物理パラメータに反応する形容詞を調べることも今後聴取印象を調べて行く上で重要な課題である。

2.4 まとめ

現在「人間らしい」音楽の自動演奏を実現する方法として、名演奏を模倣する方法及び演奏情報から得られたルールを楽譜データに加えて「人間らしい」演奏に近づける方法が考えられている。しかし、これらの方法には限界がある。そこで、より効果的に「人間らしい」演奏を実現するために、音楽演奏と聴取印象との関係を調べる研究が行われてきている。聴取印象の研究は、様々な方法で試聴曲を作成して実験を行い、SD 法を用いて評価させるという方法が使われている。しかし、聴取印象に影響のある物理パラメータは明確にされておらず、また、評定尺度に用いる形容詞に関しても模索段階である。

以降の章では、聴取印象と音楽要素との関係を明確にするために行った実験とその結果について述べる。

第 3 章

ピアノ演奏における形容詞を用いた聴取印象分析

3.1 はじめに

本章では、聴取印象と物理パラメータとの関係を調べるために行った実験について、その説明と方法及び結果を述べる。

従来研究における聴取印象の調査は、試聴実験を行い、その結果を分析して傾向を調べるという方法がとられている。本研究も、従来研究と同様の手順を用いて聴取印象と物理パラメータとの関係を調べた。

以下に、試聴実験の対象として試聴曲を作成する際に用いた物理パラメータの説明、実験評価に用いた形容詞について、及び試聴曲作成方法を述べる。そして最後に、行った試聴実験の結果を示す。

3.2 楽譜データと演奏

芥川 [18] によると、異なった演奏者が同一の曲を演奏したときに、それぞれ異なった表情が生まれるのは、次に示す物理パラメータに基づいている、と言われている。

- テンポ (演奏速度)
- アゴーギク (テンポのゆらぎ・ローカルテンポ)

- ダイナミクス (音の強弱・ヴェロシティ)
- 音色の差異

従来研究における聴取印象の分析では、これらの変化について明確に述べられていない。

本研究では芥川 [18] が示した物理パラメータのうち、ローカルテンポ及びヴェロシティに着目して試聴実験を行った。これらの物理パラメータは楽譜には明記されていないが、演奏においては演奏者の解釈により多種多様に変化する。図 3.1に楽譜を示し、ある演奏者が図 3.1の曲を演奏したときの、ローカルテンポの時間的な変化の様子を図 3.2に、ヴェロシティの時間的な変化の様子を図 3.3に示す。

図 3.2及び図 3.3においても見られるように、楽譜には一定のテンポや音の強弱しか示されていないにも関わらず、演奏ではそのローカルテンポやヴェロシティの値は様々に変化している。

本研究はローカルテンポ及びヴェロシティに着目し、これらの物理パラメータに変化を加えることによって試聴曲を作成した。そしてこれらの物理パラメータに関係する聴取印象の変化について調査を行った。

3.3 音楽評価方法

実際に試聴実験を行って聴取印象の調査を行う場合、試聴曲の評価方法を考えなければならない。ひとつの方法として、従来研究に使用されている SD 法が挙げられる。SD 法は、形容詞対を評価尺度として用い、図 3.4に示したような用紙に試聴曲の評価を記入させる方法である。しかし図 3.4からも分かるように、SD 法に用いられる形容詞対は実験者側が形容詞対を決定して提示する。このため、被験者が形容詞対を対義語の組合せと考えないことが起こる場合もある。このような不適切な形容詞対が多く含まれていると、的確な試聴曲の評価が得られない、と考えられる。

そこで本研究では、SD 法の手順は使用するが、形容詞対を用いずに、形容詞各々について 5 段階の評価得点を設け、被験者に音楽評価させた。本研究の試聴実験に用いた評価記入用紙を図 3.5に示す。

図 3.1: 楽譜

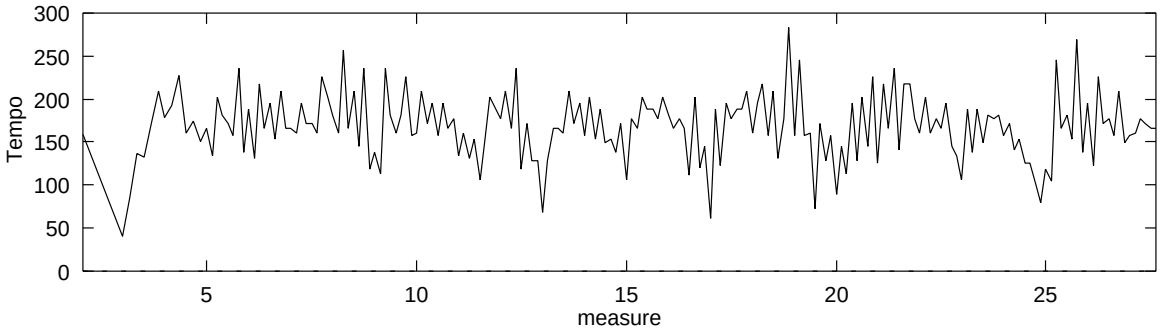


図 3.2: ローカルテンポ

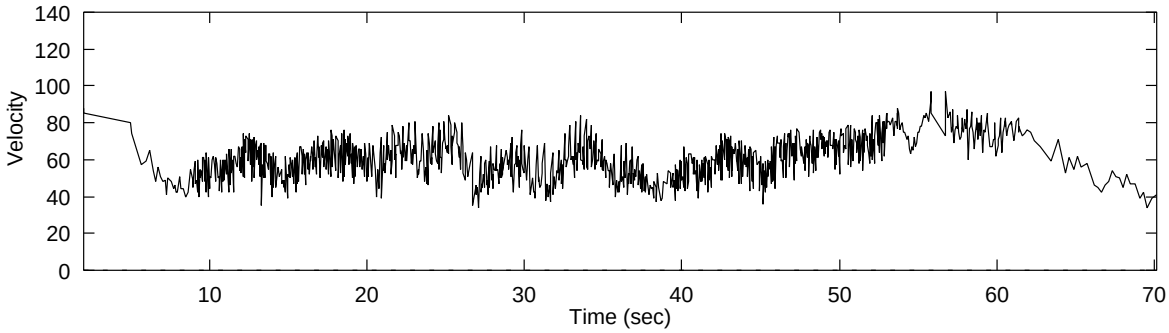


図 3.3: ヴェロシティ

	非常に	かなり	少し	どちらでもない	かなり	非常に	
明るい							暗い
面白い							面白くない
澄んだ							濁った
鋭い							鈍い
涼しい							暑苦しい
堅い							柔らかい
勇ましい							かよわい
暖かい							冷たい
粗い							細い
のんびりした							せわしい
貧しい							豊かな
浅い							深い
厳しい							やさしい
激しい							おだやかな
厚い							薄い
潤いのある							乾いた
丸い							角ばった
くどい							あっさりした
淋しい							賑やかな
重い							軽い
悲しい							うれしい
動的							静的
きまじめな							ユーモラスな
生き生きした							生気のない

図 3.4: SD 法に用いられる評価記入用紙の例

音楽１

音楽を聴いて、以下のアンケートにお答えください。

1-A.今の音楽は

好き　　嫌い

1-B.次の形容詞が今の演奏にどの程度当てはまるかを５段階で評価してください。

（ 1.全然そう感じない　2.あまりそう感じない　3.まぁまぁそう感じる
4.だいたいそう感じる　5.そう感じる　）

1.重い	1	2	3	4	5
2.せかせかした	1	2	3	4	5
3.ゴツゴツした	1	2	3	4	5
4.軽い	1	2	3	4	5
5.ゆったりした	1	2	3	4	5
6.不自然な	1	2	3	4	5
7.あっさりした	1	2	3	4	5
8.自然な	1	2	3	4	5
9.速い	1	2	3	4	5
10.なめらかな	1	2	3	4	5
11.大げさな	1	2	3	4	5
12.遅い	1	2	3	4	5
13.激しい	1	2	3	4	5
14.細かい	1	2	3	4	5
15.くどい	1	2	3	4	5

図 3.5: 評価記入用紙

表 3.1: 音楽に使われる形容詞についてのアンケート調査結果

形容詞	アンケート回答人数	形容詞	アンケート回答人数
重い	8	軽い	12
せかせかした	2	ゆったりした	2
ゴツゴツした	0	なめらかな	4
不自然な	1	自然な	1
あっさりした	2	大げさな	1
速い	7	遅い	7
激しい	8	細かい	1
くどい	1		

3.3.1 評価語として用いる形容詞

用いた形容詞は、奥宮ら [15] が SD 法に用いた形容詞対に従った。ただし、その中から 12 個の形容詞を選び、対とせず、個々形容詞を評価語として扱った。さらに、被験者に形容詞の対を意識させないように、無関係の形容詞を 3 個追加した。

ここで、評価語の数については特に限定されているわけではないが、SD 法においては 15 前後が適当であろうと言われているため、上記のような形容詞の数にした。あまりに数が多いと被験者に負担を強いることになると考えられるためである。

3.3.2 形容詞の種類

本実験で用いた形容詞の種類が音楽を評価する言葉として適切であるかの検討を行う必要がある。しかし、音楽の評価に適切である形容詞は明らかになっていない。評価語としての形容詞のグルーピングを行っている研究に上田 [19]、宮原ら [20] の報告が挙げられる。しかし、これらの中で扱われている評価語は音響及び音色について用いられる言葉であるため、そのまま音楽の評価に用いることはできないと考えられる。

そこで、音楽を形容する時に用いられる形容詞を調査し、今回用いた形容詞が音楽の評価語として適当であったかどうかの検討を行った。

表 3.1は調査の結果である。本実験で用いた形容詞は音楽を評価するためには不完全で

あるが、音楽を形容する言葉として使用されるものであることが分かった。

以上の検討を基に、試聴実験を行った。

3.4 ローカルテンポの変化に対する聴取印象

まず、物理パラメータとしてローカルテンポを取り上げた。ローカルテンポの変更によって変化する聴取印象を調べるために試聴実験を行った。

初めに、試聴曲作成のためのローカルテンポ変更方法について述べる。

3.4.1 ローカルテンポ変更方法

演奏データからローカルテンポを抽出した後、以下の方法で変更を加えて試聴曲を作成した。

ローカルテンポ抽出

$N+1$ 拍の拍を持つ演奏データについて、第 i 拍目 $(i=1,...,N+1)$ の音の発音時刻を t_i(分) とする。ここで、この第 i 拍目の音に対応する楽譜上の拍数をΔB_i(拍) とするとき、t_iにおけるローカルテンポ T_i(拍/分) を次の式で定義する。

$$T_i = \frac{\Delta B_i}{t_{i-1} - t_i} \tag{3.1}$$

平均ローカルテンポ算出

式 (3.1) で求めたローカルテンポの平均$\overline{T}$(拍/分) を、次の式で求める。

$$\overline{T} = \frac{\sum_{k=1}^{N} T_k \Delta B_k}{\sum_{k=1}^{N} \Delta B_k} \tag{3.2}$$

ローカルテンポ変更

各 T_iの平均$\overline{T}$からの偏差 d_iを次の式で求める。

$$d_i = T_i - \overline{T} \tag{3.3}$$

この d_iをα倍 (αは実数) に変化させることにより、ローカルテンポの分散を変化させて試聴曲を作成する。すなわち、変化後の第 i 番目のローカルテンポ T_i'(拍/分) を次のように

して求める。

$$T'_i = \alpha \times d_i + \overline{T} \tag{3.4}$$

発音時刻算出

変化後の第 i 拍目から次の第 $i+1$ 拍目までの時間$\Delta T'_i$(分) は$\Delta B_i / T'_i$で得られる。これより、変化後の第 i 拍目の発音時刻 t'_iは、次の式で求められる。

$$t'_i = \begin{cases} 0 & (i = 1) \\ \sum_{k=2}^{i-1} \frac{\Delta B_i}{T'_i} & (i > 1) \end{cases} \tag{3.5}$$

3.4.2 試聴実験 (1)

以下の方法で試聴実験を行った。

試聴曲

上級奏者が演奏した Chopin 作曲「Fantasie–Impromptu cis moll Op.66」の第 5 小節目から第 24 小節目までの 20 小節の MIDI データを用い、試聴曲を作成した。曲は図 3.1に示されている。ローカルテンポは倍率αを$-1.5, -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ の 9 通りに変化させた。変更したローカルテンポを用いて 9 曲の MIDI データを作成した後、YAMAHA Clavinova CVP-83 で再生し DAT に録音した。一つの試聴曲の長さは約 60 秒であった。

被験者

37 名をランダムに選び、実験を行った。37 名のうちピアノ演奏経験のある者は 16 名、クラシック音楽を普段から聴いている者は 23 名、両方に当てはまる者は 10 名であった。また、試聴曲のもととなった曲を知っている者は 36 名であった。

実験方法

雑音の少ない部屋に被験者を集め、スピーカーを用いて DAT に録音した試聴曲を聴かせた。試聴曲評価の開始前に、変更を加えていない倍率 1.0 の試聴曲を 1 回聴かせ、その後、作成した 9 個の試聴曲をランダムな順序で提示した。

3.4.3 実験結果

ローカルテンポを変更した 9 曲の試聴曲に対して被験者が評価した結果について、被験者間の平均をとった。図 3.6及び図 3.7に実験結果のグラフを示す。グラフの縦軸は平均評価得点を、横軸は変更倍率αを表している。

さらに、これらの平均値について、奥宮ら [15] の論文において対として用いられていた形容詞どうしの相関係数を求めたところ、図 3.8の相関図及び相関係数のようになった。

この結果から、ローカルテンポのみを変化させた場合、ほぼ-0.9 以上の相関係数が得られた形容詞は (重い, 軽い)、(なめらかな, ゴツゴツした)、(自然な, 不自然な)、(速い, 遅い) の対が挙げられる。また、やや低い負の相関係数が得られた形容詞は (ゆったりした, せかせかした) の対が挙げられる。これよりローカルテンポのみを変更した場合、奥宮ら [15] の実験に使用された形容詞対はほぼ対義語の対であると見なして良いことが分かった。

3.4.4 試聴実験 (2)

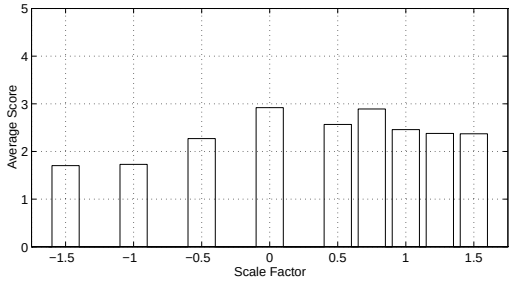
次に、ローカルテンポの変更方法は試聴実験 (1) の場合と同じだが、ヴェロシティの大きさを常に一定にして実験を行った。ヴェロシティは、次節で述べるヴェロシティの平均を使用した。

試聴曲

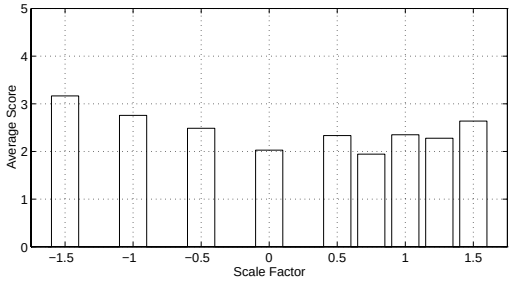
試聴実験 (1) と同じ「Fantasie-Impromptu cis moll Op.66」の MIDI データを用いた。ただし、ヴェロシティを一定にし、ローカルテンポの変更倍率αを$-1.0, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5$ の 5 通りに変化させて試聴曲を作成し、DAT に録音した。一つの試聴曲の長さは約 60 秒であった。

被験者

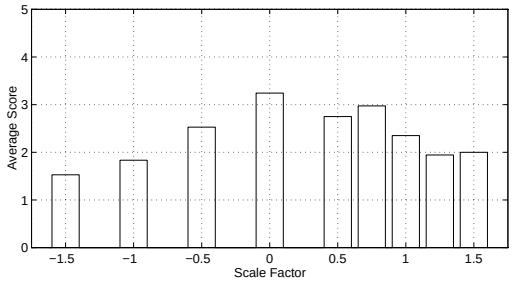
学生 24 名をランダムに選び、実験を行った。24 名のうちピアノ演奏経験のある者は 16 名、クラシック音楽を普段から聴いている者は 23 名、両方に当てはまる者は 10 名であった。また、試聴曲のもととなった曲を知っているものは 21 名であった。



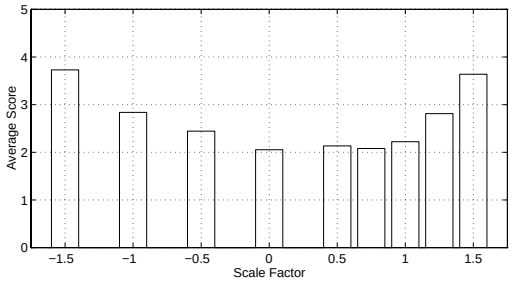
軽い



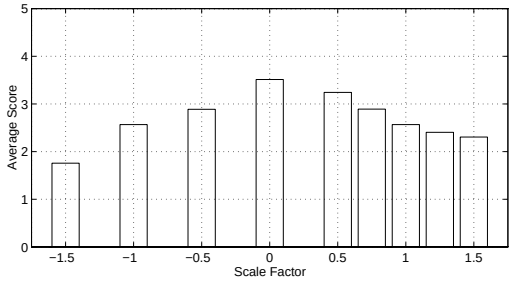
重い



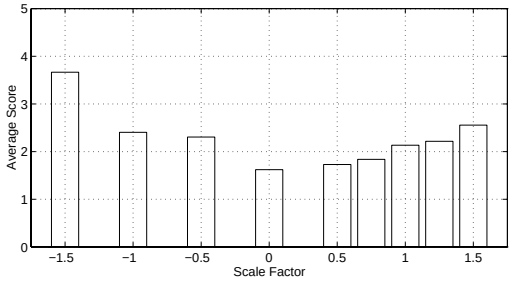
あっさりした



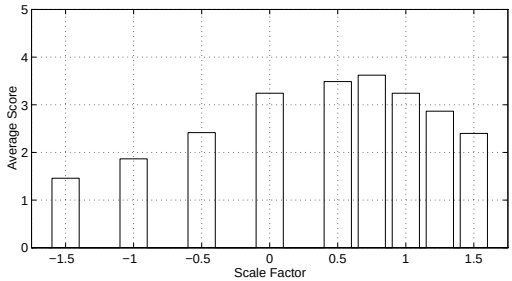
大げさな



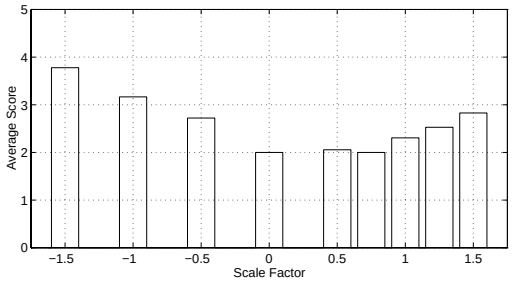
速い



遅い

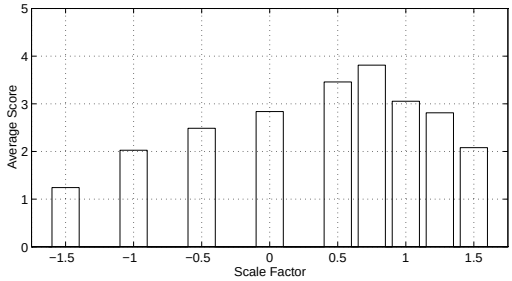


なめらかな

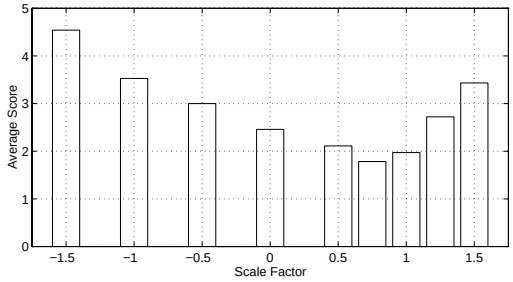


ゴツゴツした

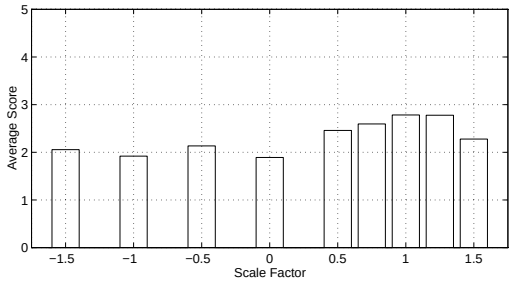
図 3.6: 試聴実験 (1) の実験結果 1



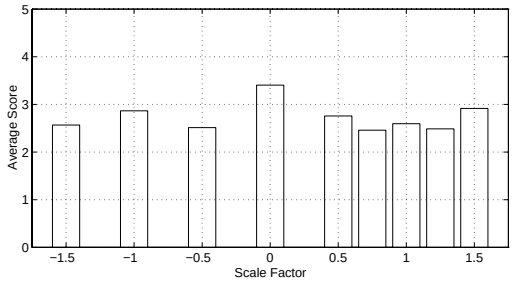
自然な



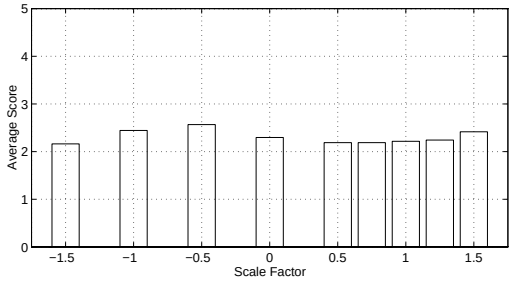
不自然な



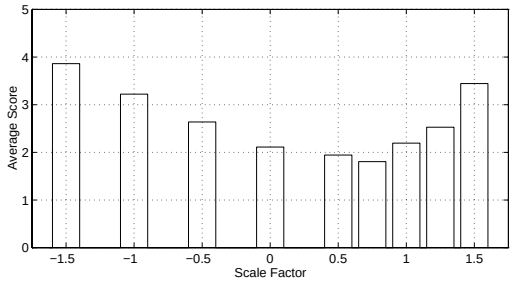
ゆったりした



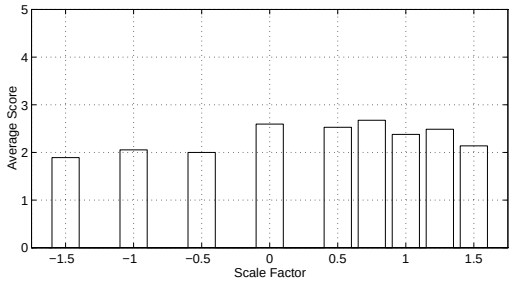
せかせかした



激しい

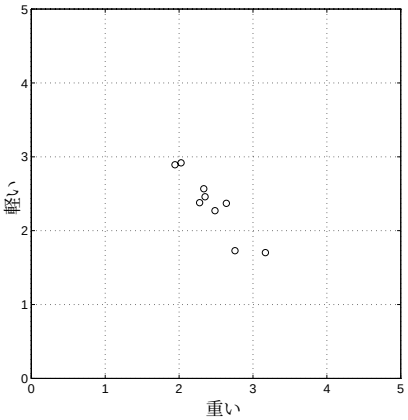


くどい

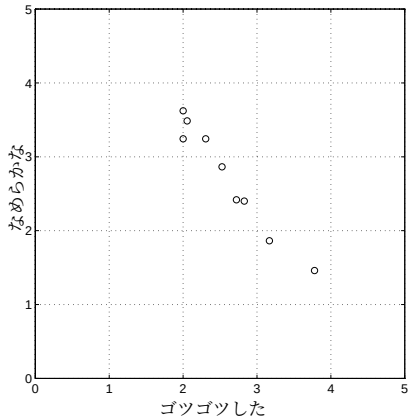


細かい

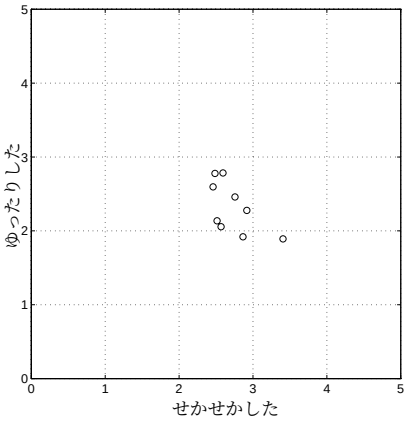
図 3.7: 試聴実験 (1) の実験結果 2



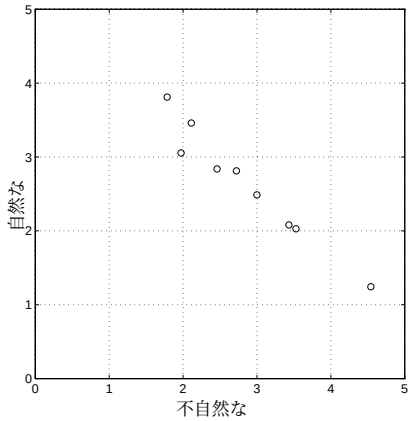
相関係数 $r = -0.93$



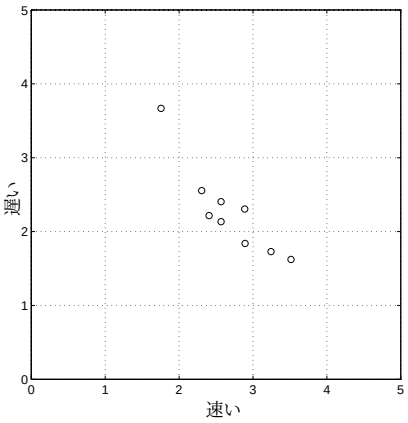
相関係数 $r = -0.98$



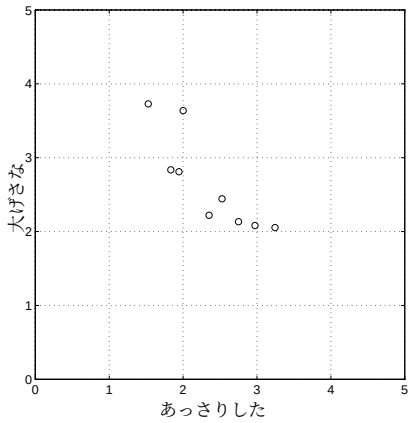
相関係数 $r = -0.61$



相関係数 $r = -0.97$



相関係数 $r = -0.90$



相関係数 $r = -0.85$

図 3.8: 試聴実験 (1) における形容詞対の相関図及び相関係数

3.4.5 実験結果

5 曲の試聴曲に対して被験者間の平均をとった。結果を図 3.9及び図 3.10に示す。グラフの縦軸は平均評価得点を、横軸は変更倍率αを表している。

また、これらの平均値について、奥宮ら [15] の論文において対として用いられていた形容詞どうしの相関係数を求めたところ、図 3.11の相関図及び相関係数のようになった。試聴実験 (1) の結果と比較すると、平均評価得点の変動が試聴実験 (1) の結果に比べ少ないことが分かる。これは、ヴェロシティを常に一定の値にしたために、試聴実験 (1) の試聴曲より曲が平坦に聴こえたためではないかと考えられる。また、相関係数に関しては試聴実験 (1) の結果とほぼ同じとなった。(せかせかした, ゆったりした) の対は試聴実験 (1) よりさらに低い負の相関係数となった。また、(速い, 遅い) の対は試聴実験 (1) とは異なり相関係数が低い負の相関係数となった。

3.5 ヴェロシティの変化に対する聴取印象

次に、物理パラメータとしてヴェロシティを取り上げた。ヴェロシティ値を変更することによって変化する聴取印象を調べるために、試聴実験を行った。

3.5.1 ヴェロシティ値変更方法

演奏データから、全てのヴェロシティ値を取り出し、次のような手順で変更を加えて試聴曲を作成した。

平均ヴェロシティ値算出

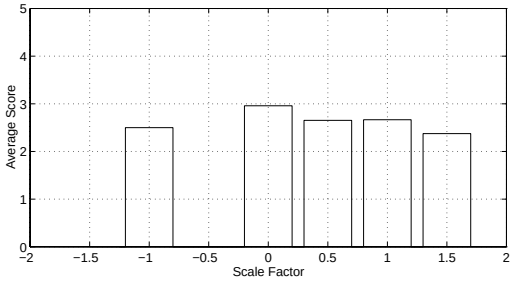
N個の音列を持つ演奏データについて、各音のヴェロシティ値を$V_i(i = 1, 2, \cdots, N)$とする。このとき平均ヴェロシティ値$\overline{V}$は次式で求められる。

$$\overline{V} = \frac{\sum_{i=1}^{N} V_i}{N} \tag{3.6}$$

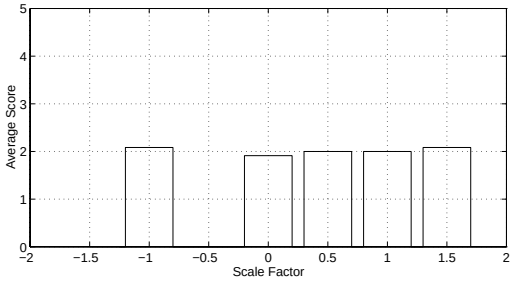
ヴェロシティ値作成

各V_iの平均$\overline{V}$からの偏差f_iを次の式で求める。

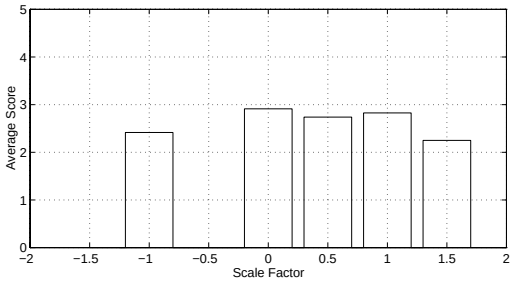
$$f_i = V_i - \overline{V} \tag{3.7}$$



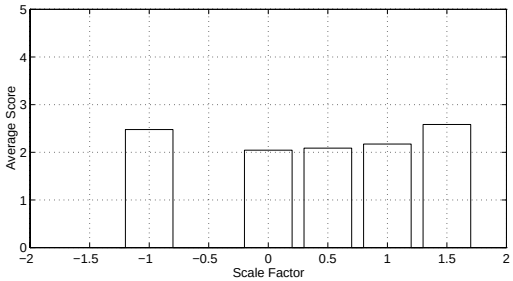
軽い



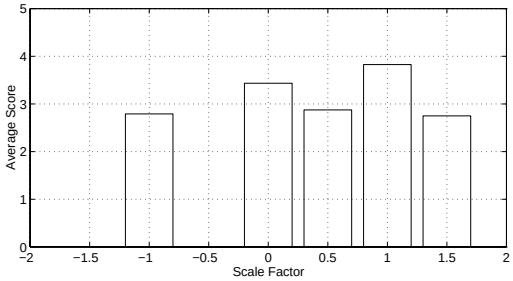
重い



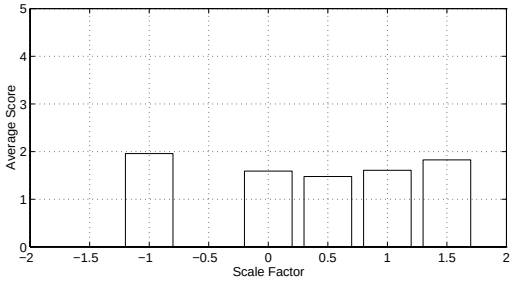
あっさりした



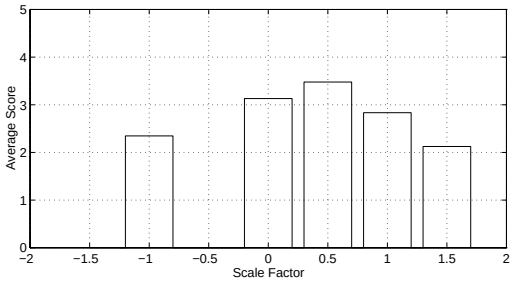
大げさな



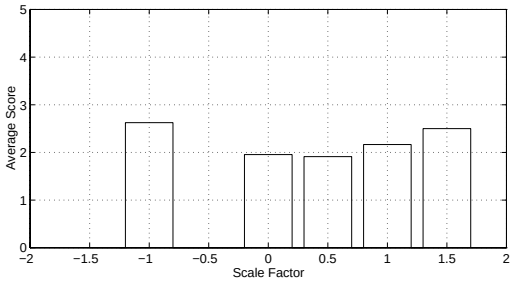
速い



遅い

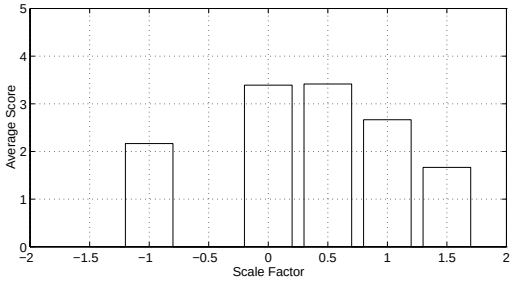


なめらかな

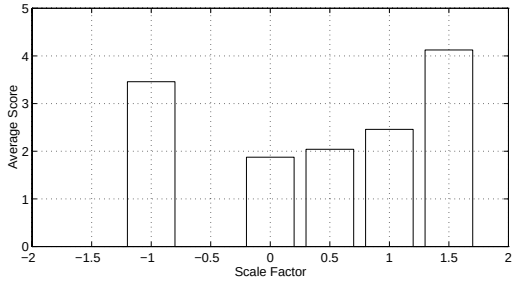


ゴツゴツした

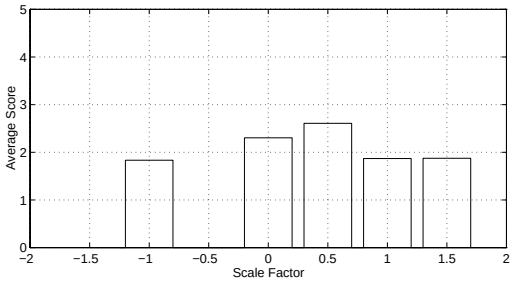
図 3.9: 試聴実験 (2) の実験結果 1



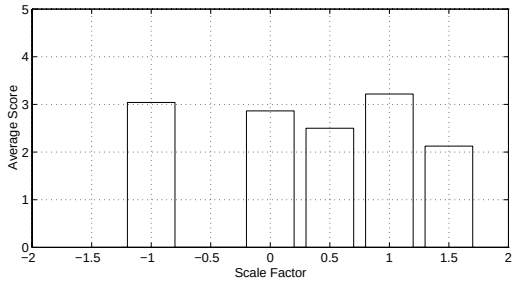
自然な



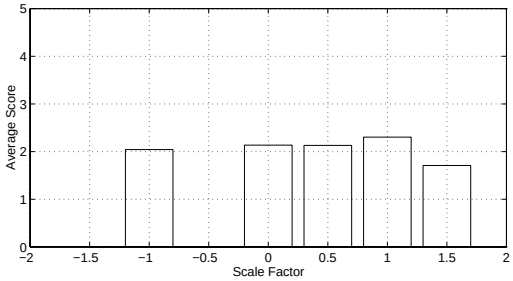
不自然な



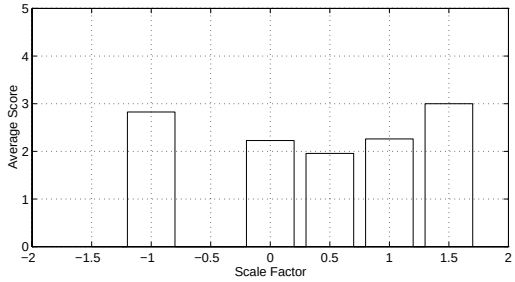
ゆったりした



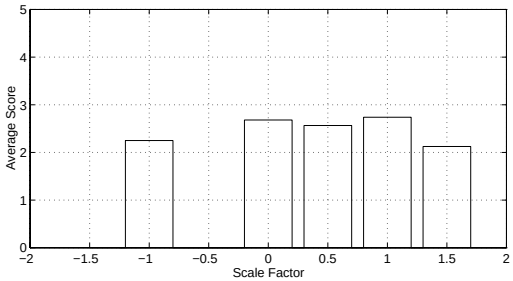
せかせかした



激しい

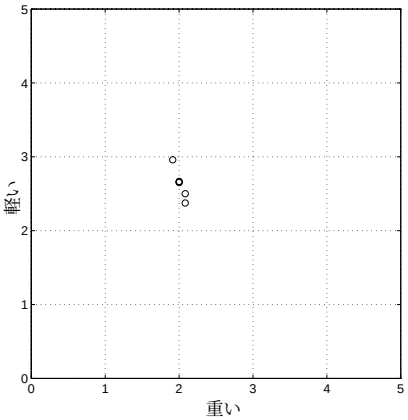


くどい

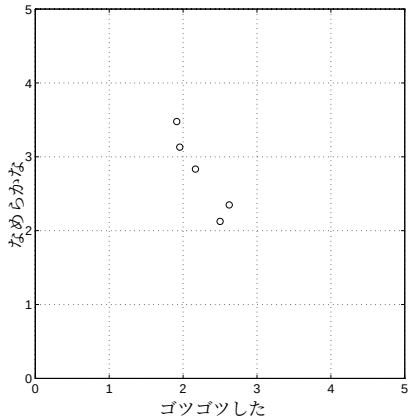


細かい

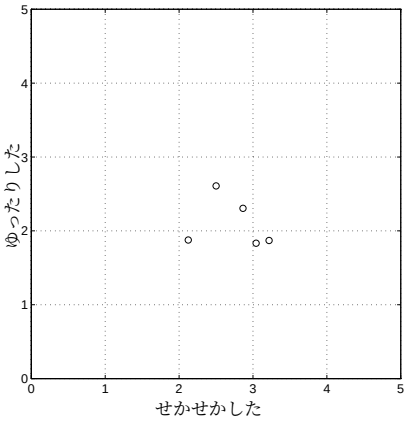
図 3.10: 試聴実験 (2) の実験結果 2



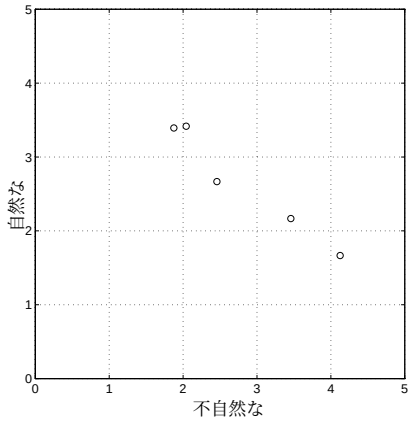
相関係数 $r = -0.98$



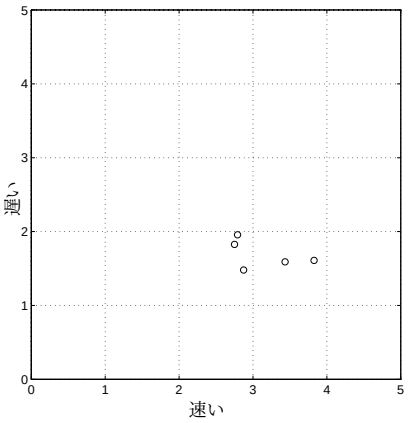
相関係数 $r = -0.94$



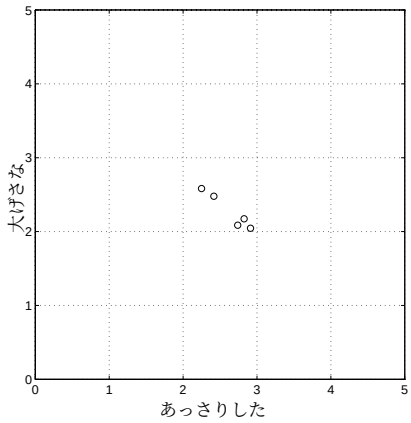
相関係数 $r = -0.25$



相関係数 $r = -0.98$



相関係数 $r = -0.47$



相関係数 $r = -0.97$

図 3.11: 試聴実験 (2) における形容詞対の相関図及び相関係数

この f_i をβ倍 (βは実数) に変化させることにより、ヴェロシティ値の分散を変化させて試聴曲を作成する。ここで、変化後の第 i 番目のヴェロシティ値を仮に $v'_i(i = 1, 2, \cdots, N)$ とする。このとき、v'_iを次の式で求める。

$$v'_i = \beta \times f_i + \overline{V} \tag{3.8}$$

ここで、変化後の正式なヴェロシティ値を V'_i とする。MIDI データはヴェロシティ値の最大値が 127、最小値が 0 であるので、v'_iが 127 を越える場合、及び v'_iが負の値をとる場合は次のようにして変化後のヴェロシティ値とした。

$$V'_i = \begin{cases} 127 & (127 < v'_i) \\ v'_i & (0 \leq v'_i \leq 127) \\ 0 & (v'_i < 0) \end{cases} \tag{3.9}$$

3.5.2 試聴実験 (3)

以下の方法で試聴実験を行った。

試聴曲

試聴実験 (1) と同じ Chopin 作曲「Fantasie–Impromptu cis moll Op.66」の第 5 小節目から第 24 小節目まで 20 小節の MIDI データを使用した。ヴェロシティ値は倍率βを $-2.0, -1.0, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の 7 通りに変化させた。変更したヴェロシティ値を用いて MIDI データを作成した後、YAMAHA Clavinova CVP–83 において再生し、DAT に録音した。一試聴曲の長さは約 60 秒であった。

被験者

学生 23 名で実験を行った。23 名のうちピアノ演奏経験のある者は 5 名、クラシック音楽を普段から聴いている者は 13 名、両方に当てはまるものは 4 名であった。また、試聴曲を知っている者は 22 名であった。

3.5.3 実験結果

ヴェロシティを変更した 7 曲の試聴曲に対して被験者が評価した結果について、被験者間の平均をとった。図 3.12及び図 3.13にその結果のグラフを示す。グラフの縦軸は平均評

価得点を、横軸は変更倍率βを表している。

また、これらの平均値について、奥宮ら [15] の論文において対として用いられていた形容詞どうしの相関係数を求めたところ、図 3.14の相関図及び相関係数のようになった。

この結果から分かるように、平均評価得点に関してはヴェロシティを変更した場合もローカルテンポを変更した場合とほぼ類似する結果が得られた。ただし、形容詞「不自然な」はβが負のときに試聴実験 (1) の場合よりも高い評価得点を得ている。これは、βが負のとき試聴曲はメロディがほとんど聴こえなくなるため、伴奏だけが大きく聴こえる、非常に不自然な曲だったことを反映していると考えられる。また、速さに関する形容詞はローカルテンポの時のように影響を受けず、どの倍率βに対しても同じような得点を得た。これに伴い (速い, 遅い) の対についての相関係数はほとんど 0 に近い値となった。この形容詞の対は対義語になっていないのではなく、これはヴェロシティの変化に対してほとんど影響を受けないことを表していると考えられる。その他の形容詞の対の相関係数はすべて-0.9 以上であり、強い負の相関のあることが分かった。

3.5.4 試聴実験 (4)

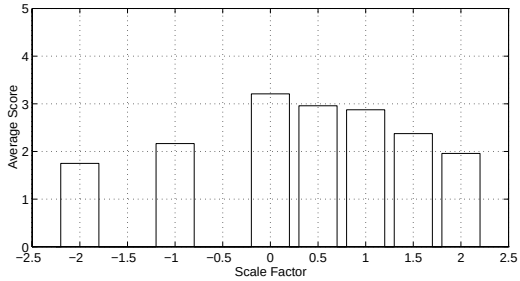
次に、ヴェロシティの変更方法は試聴実験 (3) と同じであるが、ローカルテンポの大きさを常に一定にして実験を行った。ローカルテンポの値は、前節で述べた平均ローカルテンポの値を使用した。

試聴曲

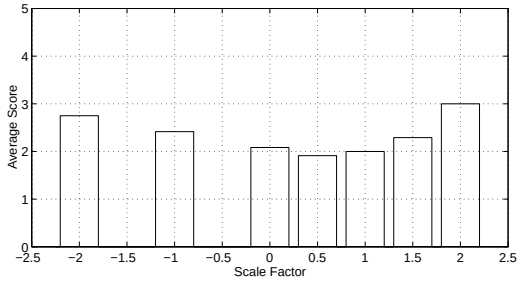
試聴実験 (1) と同じ Chopin 作曲「Fantasie–Impromptu cis moll Op.66」のの MIDI データを使用した。ヴェロシティ値は倍率βの値を$-1.0, 0.0, 1.0, 2.0$ 倍の 4 通りに変化させて試聴曲を作成し、DAT に録音した。一試聴曲の長さは約 60 秒であった。

被験者

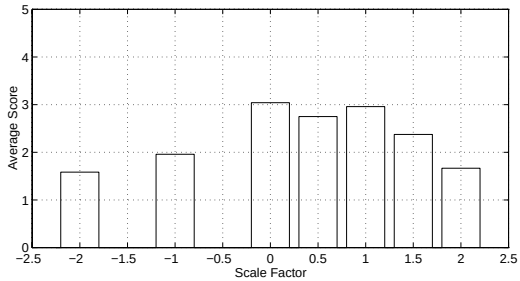
学生 23 名で実験を行った。23 名のうちピアノ演奏経験のある者は 7 名、クラシック音楽を普段から聴いている者は 12 名、両方に当てはまるものは 4 名であった。また、試聴曲を知っている者は 21 名であった



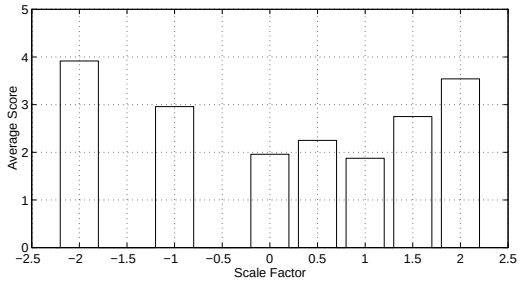
軽い



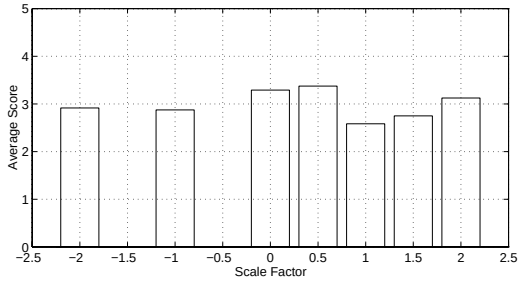
重い



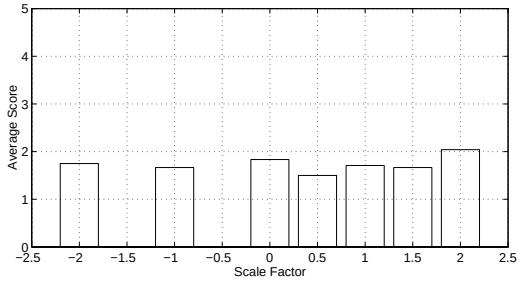
あっさりした



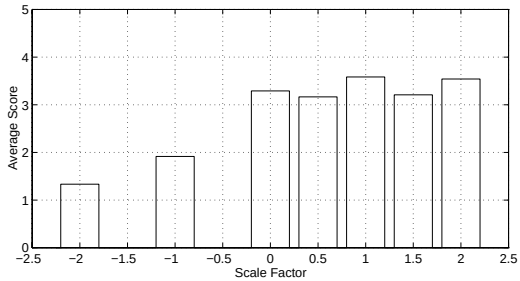
大げさな



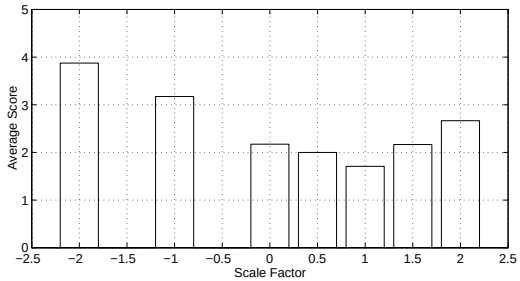
速い



遅い

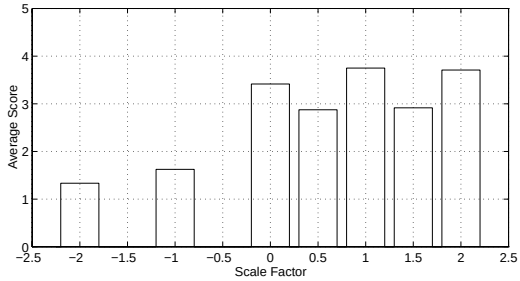


なめらかな

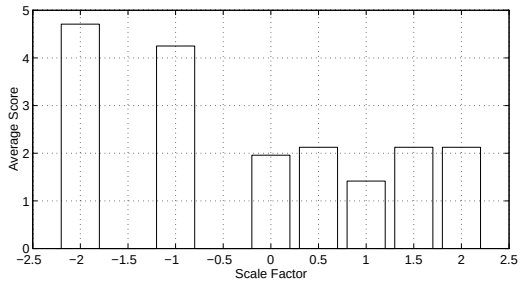


ゴツゴツした

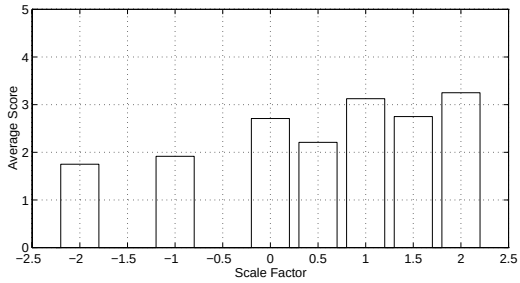
図 3.12: 試聴実験 (3) の実験結果 1



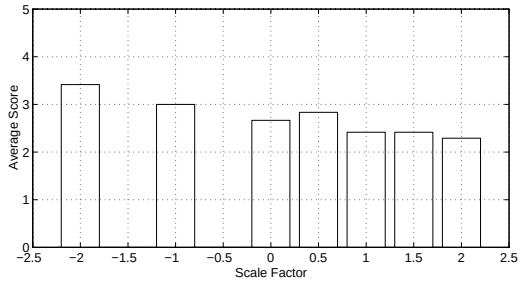
自然な



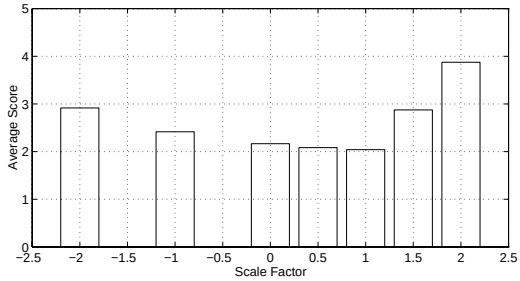
不自然な



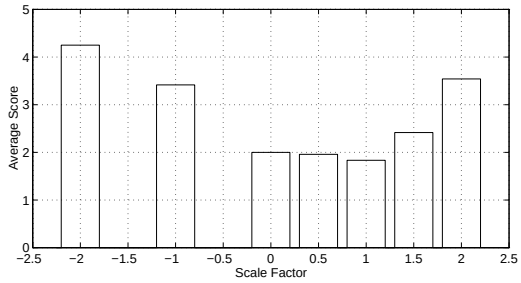
ゆったりした



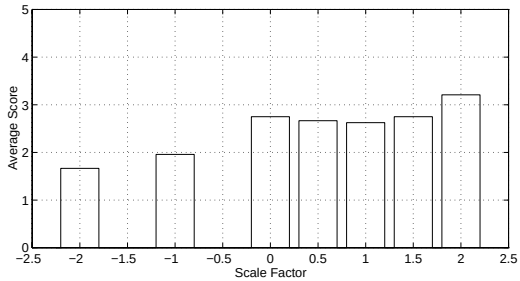
せかせかした



激しい

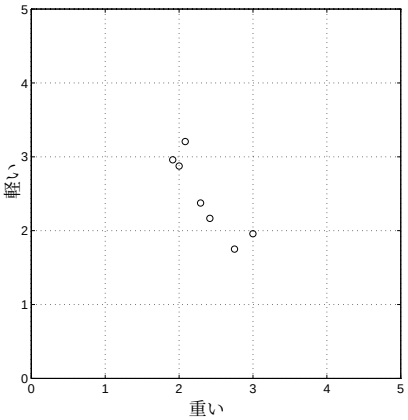


くどい

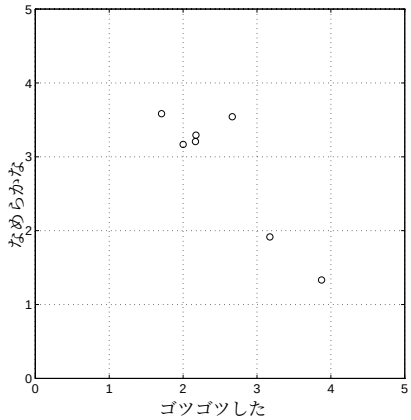


細かい

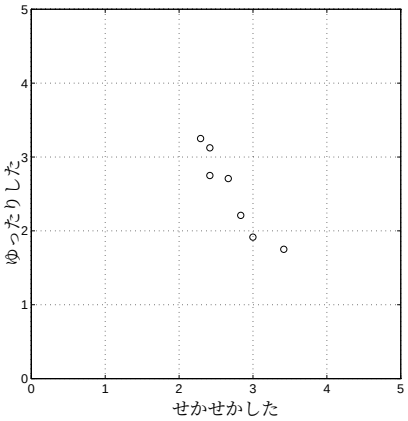
図 3.13: 試聴実験 (3) の実験結果 2



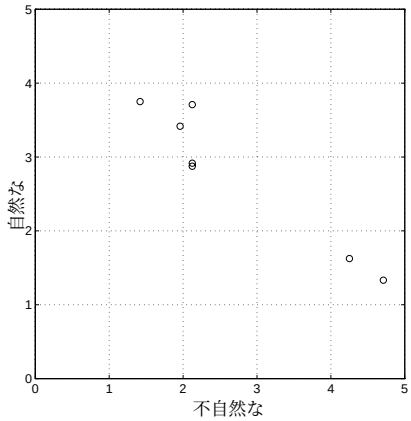
相関係数 $r = -0.92$



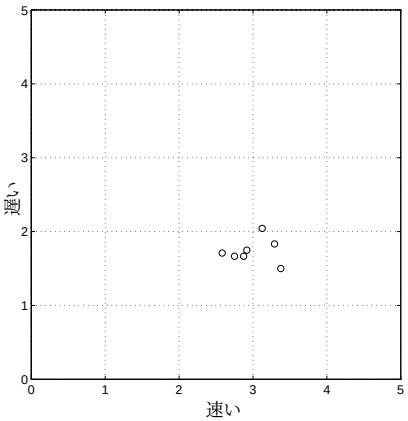
相関係数 $r = -0.98$



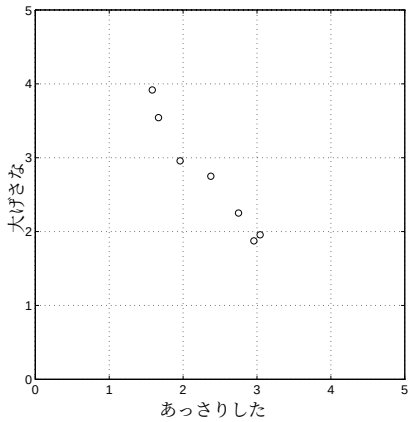
相関係数 $r = -0.95$



相関係数 $r = -0.99$



相関係数 $r = -0.03$



相関係数 $r = -0.96$

図 3.14: 試聴実験 (3) における形容詞対の相関図及び相関係数

3.5.5 実験結果

ヴェロシティを変更した 4 曲の試聴曲に対して被験者が評価した結果について、被験者間の平均をとった。図 3.15及び図 3.16にその結果のグラフを示す。グラフの縦軸は平均評価得点を、横軸は変更倍率βを表している。

また、これらの平均値について、奥宮ら [15] の論文において対として用いられていた形容詞どうしの相関係数を求めたところ、図 3.17の相関図及び相関係数のようになった。実験結果のグラフから分かるように、試聴実験 (3) に比べると平均評価得点の値の変動が少ないことが分かる。これは、ローカルテンポを一定にしたことにより常に一定テンポの試聴曲となるため、試聴実験 (3) の試聴曲より単調な試聴曲となったためと考えられる。ただし、形容詞「不自然な」に関してはβの値が負の時にやはり高い評価得点を得ていることより、メロディが聴こえないことに対する不自然さを反映しているものと考えられる。相関係数については試聴実験 (3) の場合とほとんど同じ結果となった。ただし、この実験は試聴曲の数が少なかったため、相関に関して信頼性の高い結果は得られていない可能性がある。

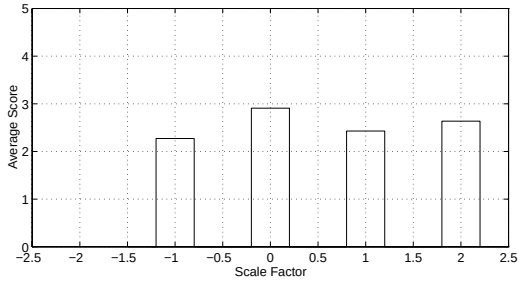
3.6 まとめ

聴取印象と物理パラメータの関係を調査することを目的として試聴実験を行った。本章ではその実験方法及び実験結果について報告した。

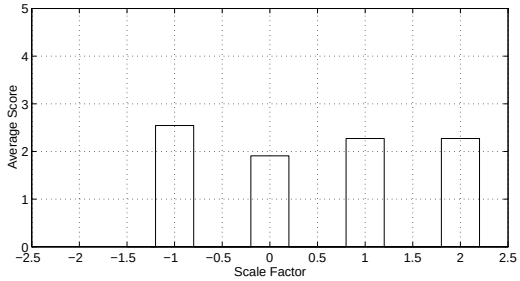
具体的には、ローカルテンポ及びヴェロシティを物理パラメータとして取り上げ、それらに変更を加えて聴取印象の変を調査した。

実験の結果、これらの物理パラメータが変化することによって聴取印象は大きな影響をうけることがわかった。ローカルテンポの変化に対しては、なめらかさ、自然さの形容詞が最も良く反応した。それと比較すると重量感などの形容詞は反応が大きくなかった。ヴェロシティを一定にした場合、自然さ以外の形容詞についてはヴェロシティに変更を加えなかった場合よりも平均評価得点の値の変動が少なく、試聴曲が似たような曲になっていたと考えられる。

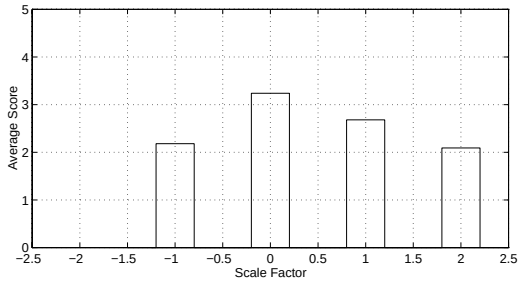
また、ヴェロシティを変化させた場合は、重量感や大げささ、自然さなどに反応がみられ、とくにヴェロシティの変化倍率βを負にした場合は不自然さが強調される反応だった。これは、メロディが良く聴こえなくなるためと考えられる。速さに関してはローカルテン



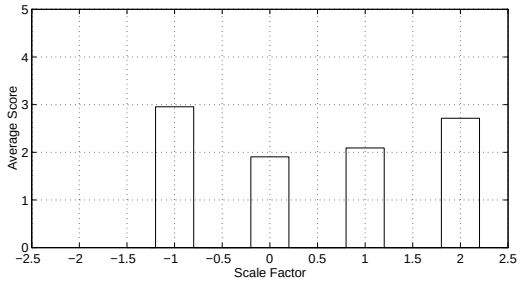
軽い



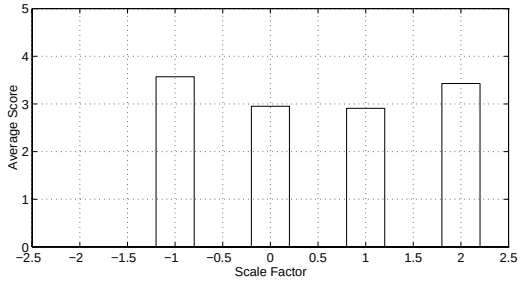
重い



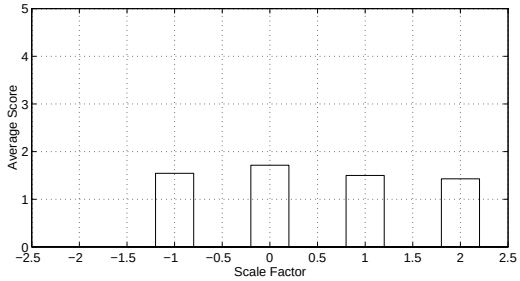
あっさりした



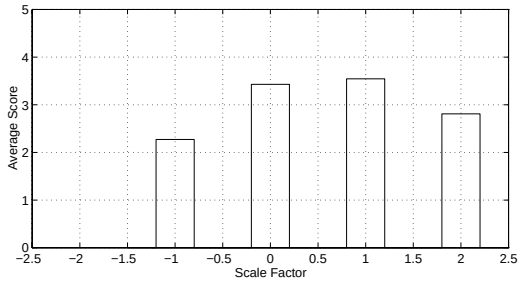
大げさな



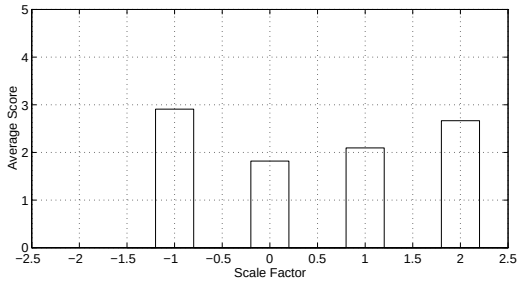
速い



遅い

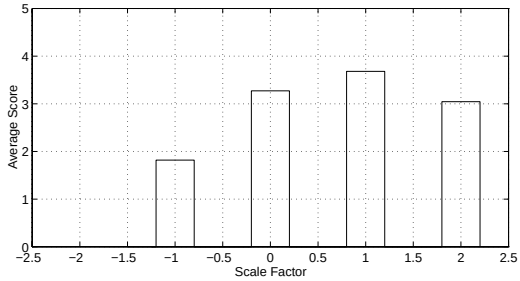


なめらかな

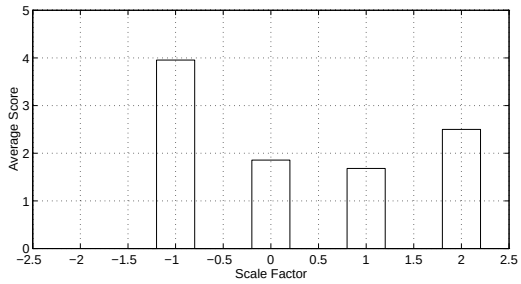


ゴツゴツした

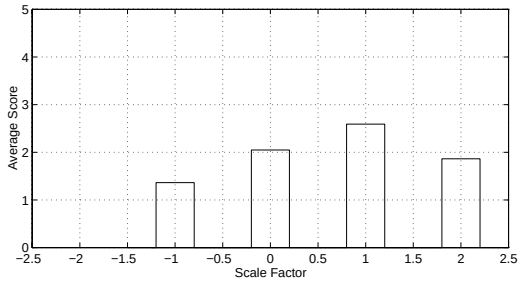
図 3.15: 試聴実験 (4) の実験結果 1



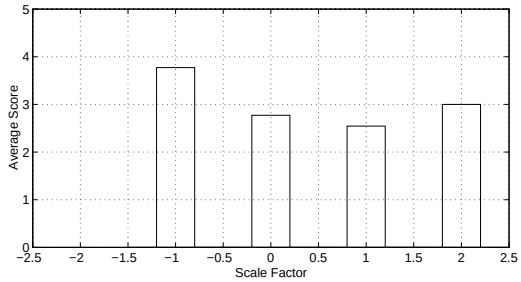
自然な



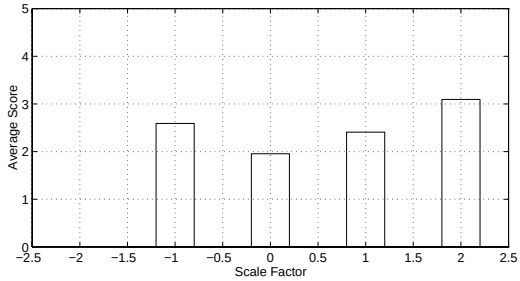
不自然な



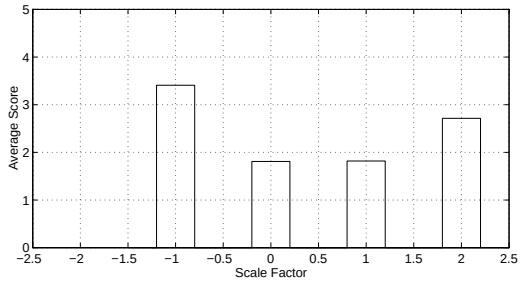
ゆったりした



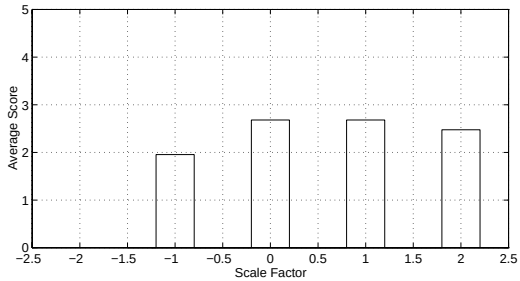
せかせかした



激しい

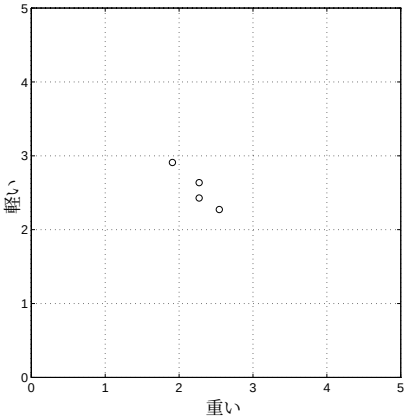


くどい

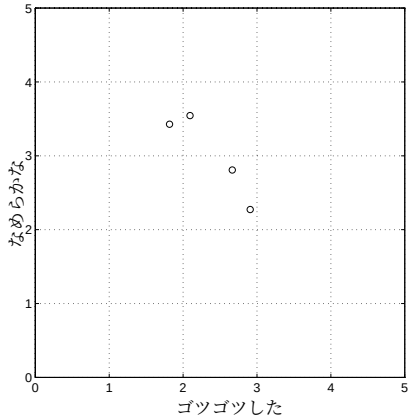


細かい

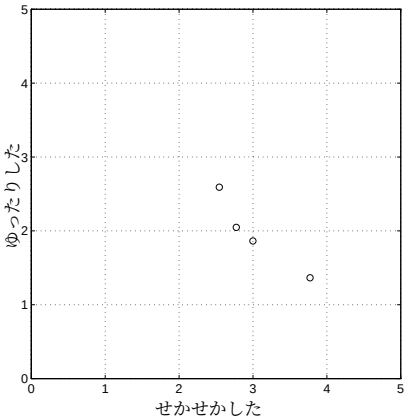
図 3.16: 試聴実験 (4) の実験結果 2



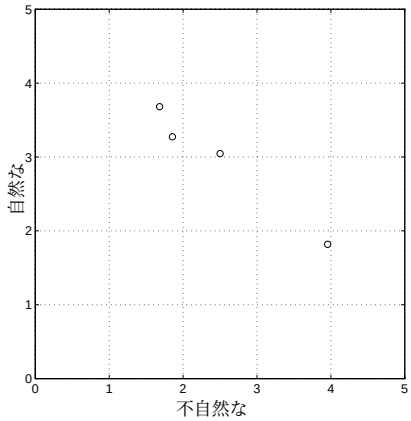
相関係数 $r = -0.95$



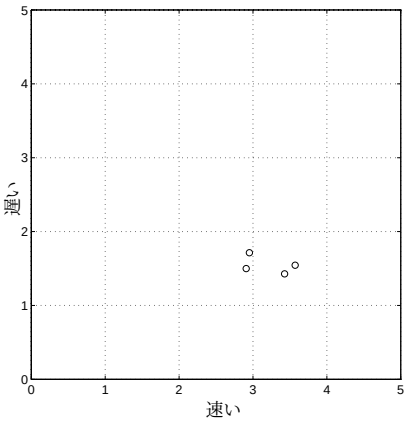
相関係数 $r = -0.94$



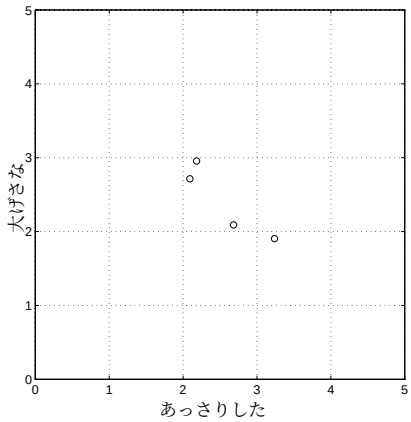
相関係数 $r = -0.95$



相関係数 $r = -0.99$



相関係数 $r = -0.46$



相関係数 $r = -0.92$

図 3.17: 試聴実験 (4) における形容詞対の相関図及び相関係数

ポを変化させた時ほど反応が見られず、ヴェロシティは速さに対してあまり影響を与えないものと考えられる。また、ローカルテンポを一定にした場合はやはり平均評価得点の変動が小さくなった。

ただし、自然さについての形容詞にはどの場合も反応が大きく現れていた。これらは被験者が試聴曲のもととなった曲を知っているかどうかにも左右されると思われる。被験者が曲を知っている場合、適切な演奏を記憶しているため、適切な演奏と異なる演奏方法に対し、不自然である、という評価をすると考えられるためである。今回の実験において「Fantasie–Impromptu cis moll Op.66」を聴いたことがないと答えた被験者は、全体の3%であった。

形容詞の対については奥宮ら [15] の論文に用いられている形容詞対について検討した。その結果、ほぼ全部の形容詞はかなり高い負の相関係数をとることが分かった。しかし、物理パラメータの変化に対して反応しない形容詞があることも判明した。

以上のことを踏まえ、次章では得られた結果についてさらに分析を試みる。

第 4 章

ピアノ演奏における聴取印象の多変量解析

4.1 はじめに

複数の互いに相関する変量のデータについて解析を行う場合、数学的手法としては統計学の一部門である多変量解析を用いる方法が考えられる。多変量解析は、変量の種類が複数あるデータについて、その変量間の相関関係を解析することを最も重要な目的としている。現在も、気象学、計量経済学等、様々な分野において多変量解析分野の手法が用いられており、その解析から得られた相関関係は将来の予測、変量の分類・合成に使用されている [21]。

本研究の最終的な目的は物理パラメータと聴取印象との相関関係を基にした人間の心理的空間の表現と人間の音楽評価の予測である。これより、今回の実験によって得られた結果について、多変量解析を用いて解析を行うことは、本研究の目的に沿った自然な解析方法であると考えられる。

4.2 因子分析による実験評価

本章では、多変量解析の一つである因子分析法を用いて解析を行う。この因子分析法とは、複数の変量データについて、各データが持っている特別な要素 (特殊因子) 及びデータ誤差による解析への影響を除去し、全ての変量に共通して含まれる因子を見出そうとする解析方法である [22][23]。

因子分析は SD 法において尺度の共通因子を見つけ出すことにも用いられている方法で

ある。本実験で使用した形容詞についても実験結果より共通因子を見つけ出すことによって各試聴曲を表す次元数を減らすために、因子分析を行う。

4.2.1 因子分析

因子分析においては、平均 0、分散 1 に標準化された第 j番目 $(1 \leq i \leq n)$ の変数 t_iが次のような一次のモデル式で表されると仮定する。

$$t_i = \sum_{\alpha=1}^{m} a_{i\alpha} f_\alpha + u_i \qquad (i = 1, \cdots, n) \tag{4.1}$$

今回の実験結果について、各試聴曲に対する平均評価得点を標準化したものを式 (4.1) のモデルに当てはめるとする。すなわち、変数 t_iを 15 個の形容詞に対する平均評価得点であるとする $(i = 1, \cdots, 15)$。

ここで、$f_1, \cdots, f_m$は各共通因子 $F_1, F_2, \cdots, F_m$の標準得点である。これは共通因子得点と呼ばれ、どの変数 t_iに対しても共通である。共通因子得点 $f_1, f_2, \cdots, f_m$はそれぞれ平均 0、分散 1 であり、互いに無相関 (線形独立) であると仮定する。$a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{im}$は共通因子が各変数に対して持つ重みである因子負荷量を表す。u_iは共通の因子で説明されない、t_i独自の変動である特殊因子得点を表す。特殊因子も $f_1, f_2, \cdots, f_m$とは無相関であり、また変数が異なれば互いに無相関であると仮定する。

ここで平均評価得点 t_iと t_jの相関係数 r_{ij}は、平均 0、分散 1 であることより、式 (4.1) を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \left(\sum_{\alpha=1}^{m} a_{i\alpha} f_\alpha + u_i\right)\left(\sum_{\beta=1}^{m} a_{j\beta} f_\beta + u_j\right) \\ &= a_{i1}a_{j1}{f_1}^2 + \cdots + a_{im}a_{jm}{f_m}^2 \\ &\quad +(a_{i1}a_{j2} + a_{i2}a_{j1})f_1 f_2 + (a_{i1}a_{j3} + a_{i3}a_{j1})f_1 f_3 + \cdots + (a_{i1}a_{jm} + a_{im}a_{j1})f_1 f_m \\ &\quad + \cdots + a_{i1}f_1 u_j + a_{j1}f_1 u_i + \cdots + a_{im}f_m u_j + a_{jm}f_m u_i \\ &\quad + u_i u_j \end{aligned} \tag{4.2}$$

ここで、共通因子得点 $f_1, f_2, \cdots, f_m$はそれぞれ分散 1 であるので次式が成り立つ。

$${f_1}^2 = {f_2}^2 = \cdots = {f_m}^2 = 1 \tag{4.3}$$

また、f_kとf_lの相関係数$r_{f_k f_l}$及びf_kとu_iの相関係数$r_{f_k u_i}$は、互いに無相関であることより、次式も成り立つ。

$$r_{f_k u_i} = 0, \qquad r_{f_k f_l} = 0 \tag{4.4}$$

また、特殊因子は変数が異なれば互いに無相関だとすると、次式が成り立つ。

$$r_{u_i u_j} = 0 \tag{4.5}$$

以上の式(4.3)、(4.4)、(4.5)を式(4.2)に代入すると、次の結果が得られる。

$$r_{ij} = a_{i1}a_{j1} + a_{i2}a_{j2} + \cdots + a_{im}a_{jm} \qquad (i \neq j) \tag{4.6}$$

$$1 = r_{ii} = {a_{i1}}^2 + {a_{i2}}^2 + \cdots + {a_{im}}^2 + {u_i}^2 \tag{4.7}$$

また、次式も成り立つ。

$$r_{ij} = r_{ji} \tag{4.8}$$

ここで平均評価得点$t_i, t_j (i, j = 1, 2, \cdots, m)$の相関係数$r_{ij} (i, j = 1, 2, \cdots, m)$を要素とする行列を相関行列$\boldsymbol{R}$とする。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

ここで、次のような行列を考える。

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{R}^+ = \begin{bmatrix} h_1 & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & h_2 & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & h_m \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} 1-h_1 & & & \text{\Large 0} \\ & 1-h_2 & & \\ & & \ddots & \\ \text{\Large 0} & & & 1-h_m \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

$h_i(i=1,2,\cdots,n)$ は共通性と呼ばれるもので、次式を表している。

$$h_i = {a_{i1}}^2 + {a_{i2}}^2 + \cdots + {a_{im}}^2 \qquad (i=1,2,\cdots,n) \tag{4.12}$$

ここで、相関行列$\boldsymbol{R}$ について、先に求めた関係式(4.6)、(4.7) から、次の行列の関係式が求まる。

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^t + \boldsymbol{U} \tag{4.13}$$

$$\boldsymbol{R}^+ = \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^t \tag{4.14}$$

ここで、行列 A の基本構造を次のように表す。

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{W}^t \qquad \text{ただし、}\boldsymbol{V}^t\boldsymbol{V} = \boldsymbol{I}, \boldsymbol{W}^t\boldsymbol{W} = \boldsymbol{I} \tag{4.15}$$

すると、$\boldsymbol{R}^+$の基本構造は次のようになる。

$$\boldsymbol{R}^+ = \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^t \tag{4.16}$$

$$= (\boldsymbol{V}\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{W}^t)(\boldsymbol{W}\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{V}^t) \tag{4.17}$$

$$= \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Delta}^2\boldsymbol{V}^t \tag{4.18}$$

ここで、$\boldsymbol{R}^+$ の基本対角行列 $\boldsymbol{\Delta}^2$は$\boldsymbol{R}^+$の p 個の固有値$\lambda_k(k=1,2,\cdots,p)$ を対角要素として、次のように書ける。

$$\boldsymbol{\Delta}^2 = \boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_m \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

基本正規直交行列$\boldsymbol{V}$ はλ_kに対応する固有ベクトル v_kからなり、次のように表せる。

$$\boldsymbol{V} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \cdots & v_p \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

$$\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{\Lambda}^{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & & & 0 \\ & \sqrt{\lambda_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sqrt{\lambda_m} \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

とおく。すると、

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Delta} \tag{4.22}$$

は$\boldsymbol{R}^{+} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{t}$の解である。ここで、$\boldsymbol{R}^{+}$の解は一般に 1 通りには定まらない。今、任意の正規直交行列$\boldsymbol{T}$について、

$$\boldsymbol{T}^{t}\boldsymbol{T} = \boldsymbol{I} \tag{4.23}$$

によって、変換

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{T}^{t} \tag{4.24}$$

を行うと、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{R}^{+} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{t} = (\boldsymbol{B}\boldsymbol{T}^{t})(\boldsymbol{B}\boldsymbol{T}^{t})^{t} && (4.25) \\ &= \boldsymbol{B}\boldsymbol{B}^{t} && (4.26) \end{aligned}$$

となるので、$\boldsymbol{B}$も解となる。そこで、$\boldsymbol{R}^{+}$から一つの解$\boldsymbol{A}$が得られたら、何らかの便宜的基準を設けて回転を行い、

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{T} \tag{4.27}$$

を求め、解釈の付けやすい解 Bを因子負荷行列とすることがしばしば行われている。良く用いられる回転として Vari-Max 回転が挙げられる。

以上のような手順で相関行列$\boldsymbol{R}$から$\boldsymbol{A}$あるいは$\boldsymbol{A}$を回転させた行列$\boldsymbol{B}$を求め、因子分析による解析を行った。

4.2.2 因子分析による評価結果

因子分析結果を図 4.1、図 4.2、図 4.3及び 4.4に示す。左側に因子分析を行った時の結果を、右側にはさらに Vari-Max 回転を行ったときの結果を示す。ただし、A,B,C,D,E,... は試聴曲を表しており、A から順に一番倍率の小さい試聴曲を示す。

因子分析結果より、各共通因子が何であるかを推測しなければならない。ここで、各試聴曲の平均評価得点と因子分析の結果を比較し、共通因子の推定を行った。しかし、推測

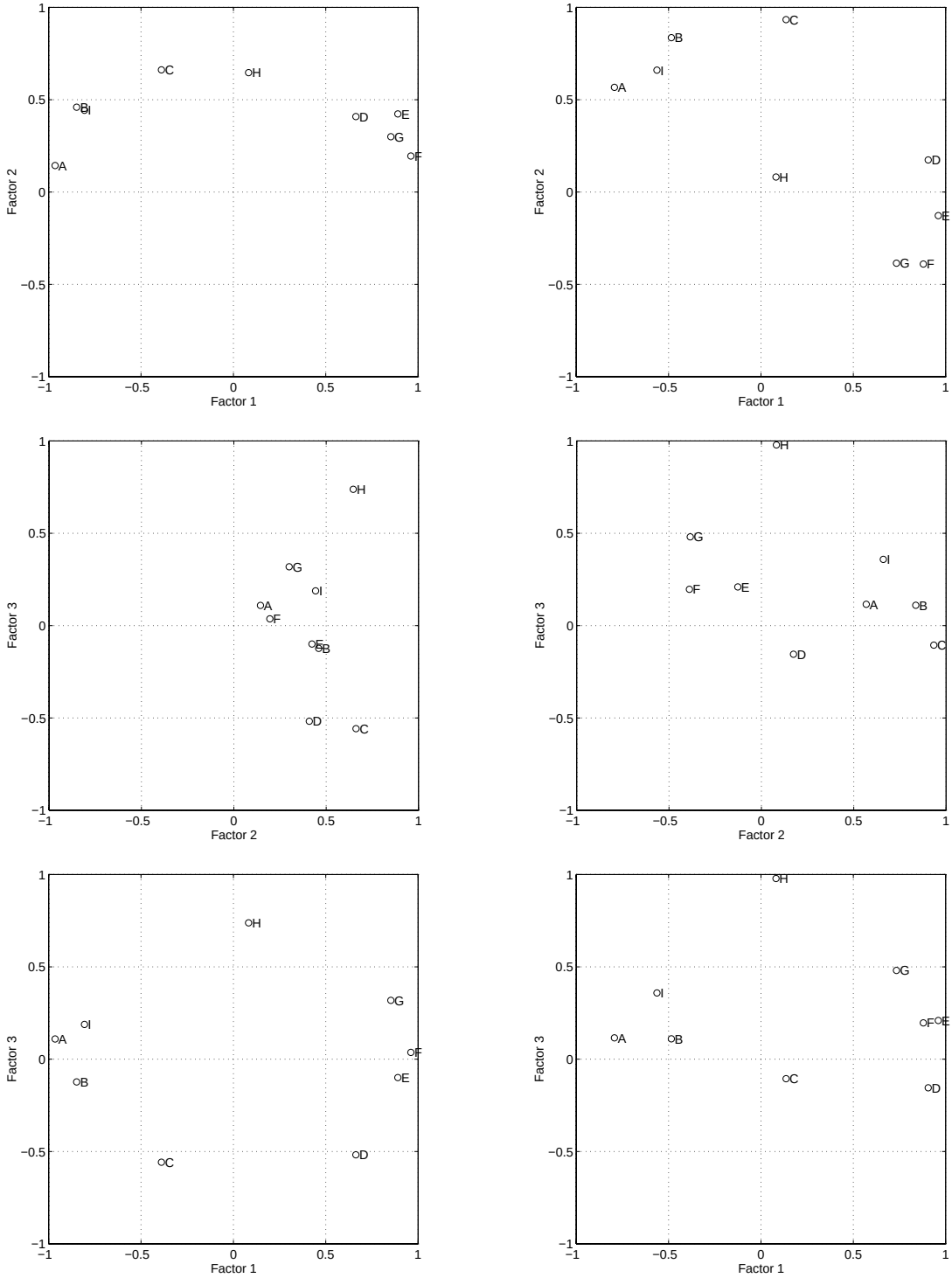


図 4.1: 試聴実験 (1) に対する因子分析の結果

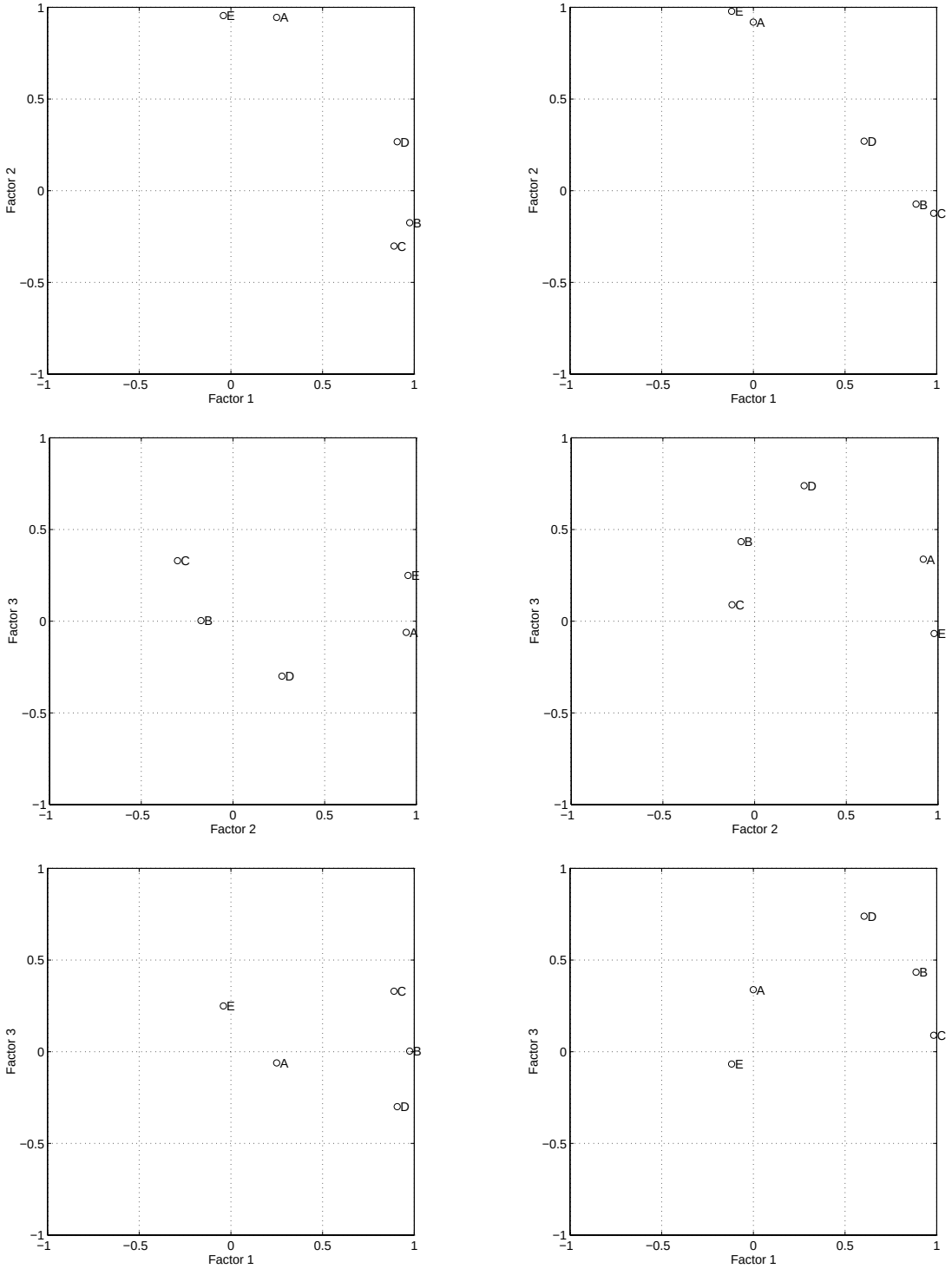


図 4.2: 試聴実験 (2) に対する因子分析の結果

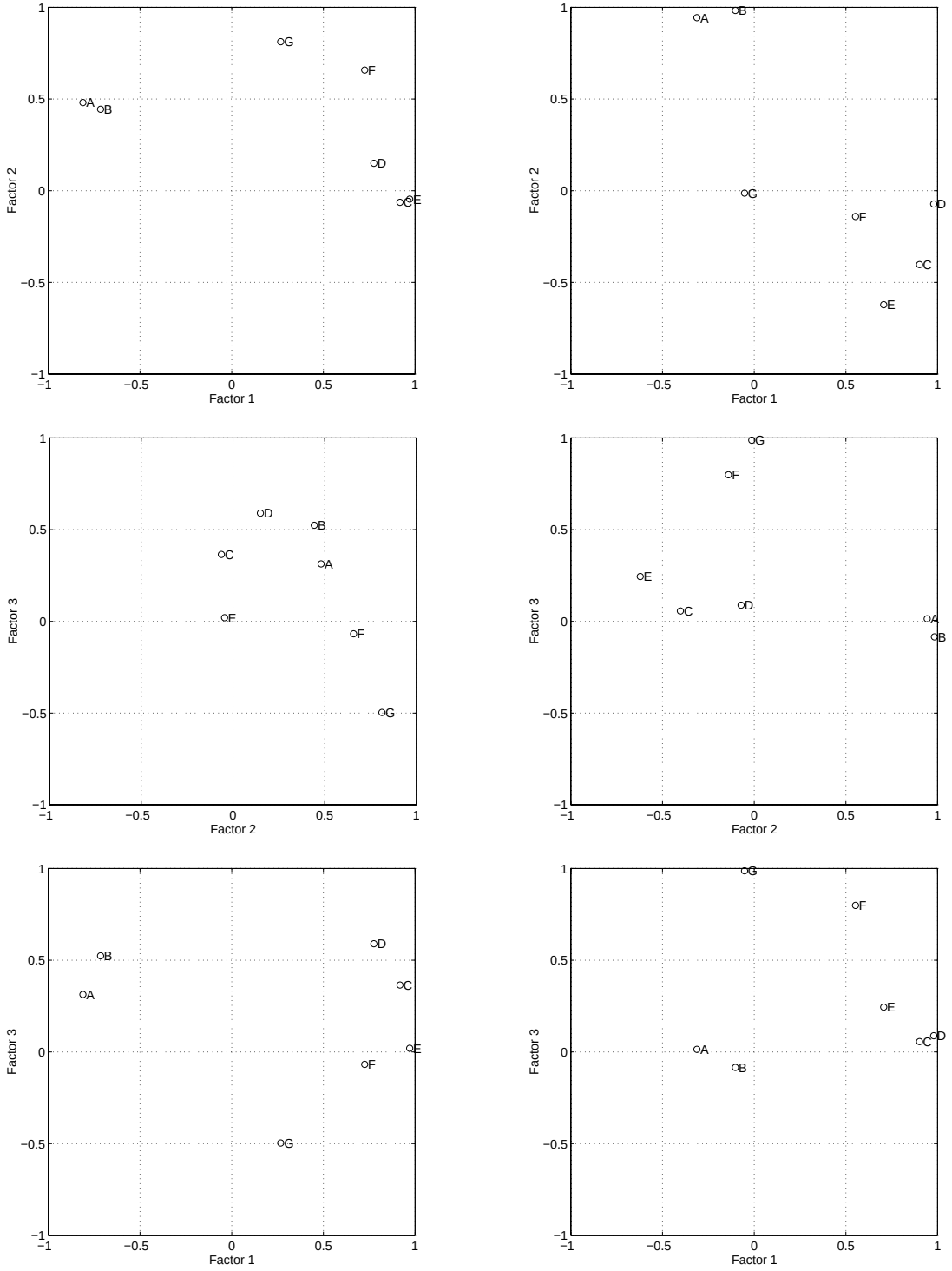


図 4.3: 試聴実験 (3) に対する因子分析の結果

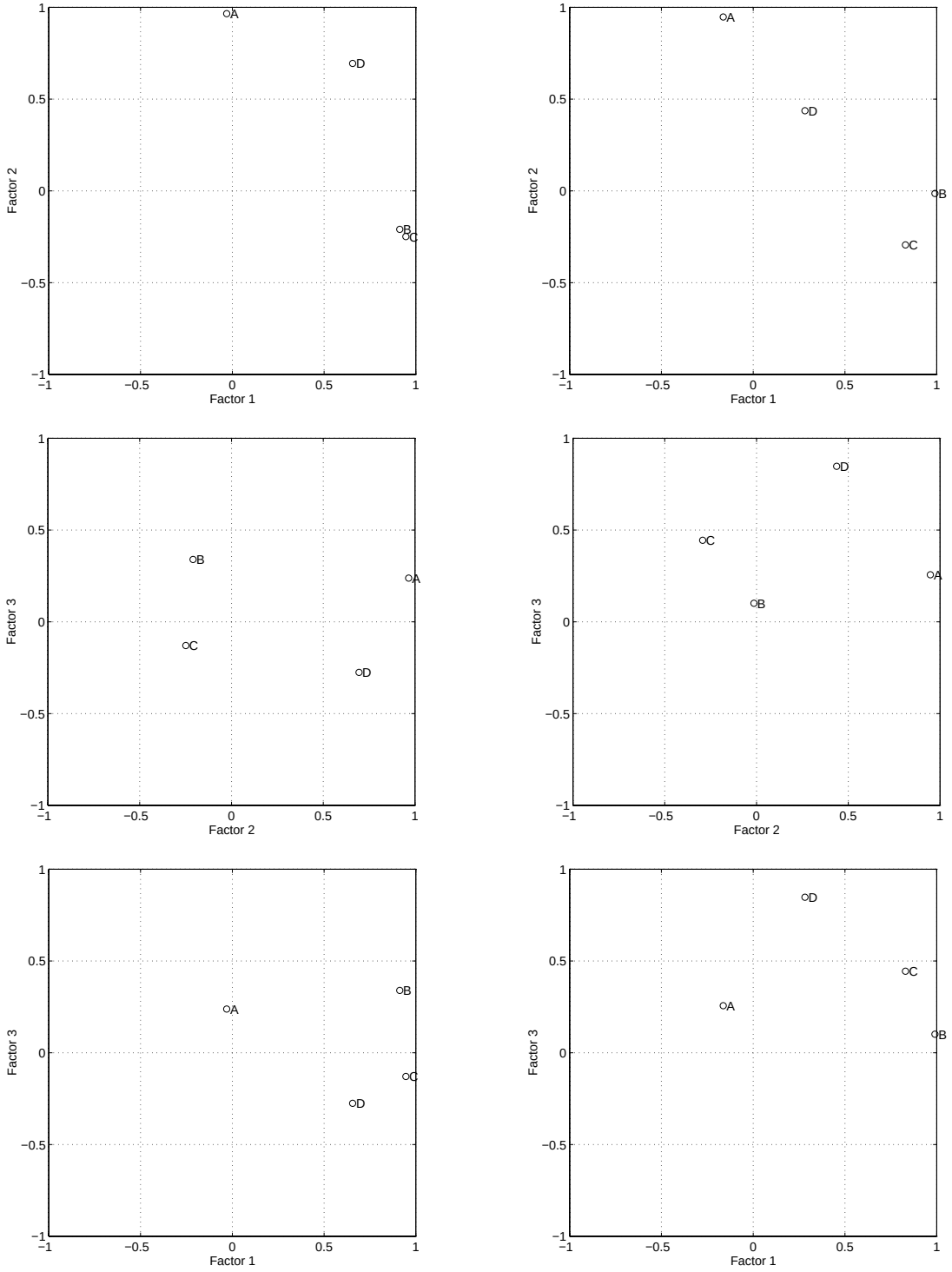


図 4.4: 試聴実験 (4) に対する因子分析の結果

可能な因子と全く推測できない因子があった。ここでは、形容詞と照らし合わせることにより推測可能な因子について述べる。

試聴実験 (1) に関しては、因子 2 が音楽性を表していると考えられる。因子 2 の傾向は「自然な」「不自然な」「なめらかな」といった形容詞の傾向に沿っていると見ることができる。試聴実験 (2) に関しては、因子 1 と因子 2 が $y = x$ で回転したような関係になっていることが分かる。これから、因子 1 と因子 2 は相反する関係にある形容詞と深く関わっていると見ることができる。よって、因子 1 と因子 2 は音楽性に着目して (自然な, 不自然な)、(なめらかな, ゴツゴツした) のような組合せになっていると考えられる。試聴実験 (3) に関しては、因子の推測ができなかった。試聴実験 (4) は試聴実験 (2) の傾向と同じような傾向が見られる。すなわち、因子 1 と因子 2 は相反する関係にある形容詞と深く関わっており、(自然な, 不自然な)、(なめらかな, ゴツゴツした) のような組合せになっていると考えられる。

因子分析の結果に対して因子の推測を行ったが、推測不可能な因子が多かった。これは、因子得点の傾向がどの形容詞の傾向とも当てはまらない場合であり、このときは推測不可能である。これを回避するためには、形容詞の選択方法を考えなければならない。

4.3 多次元尺度構成法による実験評価

前節の因子分析では、実験で得られた各試聴曲に対する得点を基に相関係数を求め、因子行列を特定した。しかし、因子分析は間隔尺度や比率尺度の水準で測定されたデータを用いなければならず、すなわち、(積率) 相関係数を算出することが許されていなければならない。ここで、心理学的空間は線形的に表すことができない可能性を考えると、試聴実験で用いた評価尺度の間隔は、心理空間内において必ずしも一定であるとは限らない。このため、各試聴曲に対して得られた得点は評価得点の順序関係 (大小関係) を表しているに過ぎず、その値を計算に使用した評価にはかなりの危険性が含まれている可能性がある、と考えられる。

そこで、試聴実験によって得られた結果が各試聴曲のその形容詞に対する大小 (順序) のみを表していると捉え、非計量的多次元尺度構成法による解析を行った。非計量的多次元尺度構成法 (略して非計量的 MDS) においては、比較的制約のゆるい前提を設けて「非計量的」データ、すなわち順序データを分析し、「計量的」構造を発見しようとするものである。ここで、「非計量的」ということは距離が定義されていない、ということを意味

している。

今回多次元尺度構成法によって解析を行うにあたり、非類似度として各試聴曲間のユークリッド距離を使用した。すなわち、各形容詞を軸としてとらえ、各試聴曲が 15 次元空間内の点であると考える。そして、15 次元間のユークリッド距離を計算して非類似度とした。

4.3.1 多次元尺度構成法

多次元尺度構成法については多数の研究がなされており、それによって様々な解析方法が考案されている [21]。ここでは最小 2 乗基準を設けることによって当てはまりの評価した、クラスカルの方法を利用した [24]。クラスカルの考案した非計量的多次元尺度法のひとつである MDSCAL 法は、数多い非計量的多次元尺度法の中で最も広く使われている方法のひとつである。他の方法との相違は最小 2 乗近似$\hat{D}$の推定方式に関する部分である。

今、尺度化すべき対象が n 個あり、$S_1, \cdots, S_n$であったとする。データとして集合 $\{S\}$ から 2 個ずつとって作った組 (S_i, S_j) に対してその類似度あるいは相違度 P_{ij}が与えられ、対象間の関係を空間的に概念化してその遠近を順序尺度の水準で表現していると見なせるものとする。簡単のために$\frac{n(n-1)}{2}$通りの組合せすべてについて P_{ij}が与えられ、かつ

$$P_{ij} = P_{ji} \tag{4.28}$$

という対称性があるものとする。

多次元尺度によって対象のそれぞれに対応づけられる r次元の空間における点を $P_1, \cdots, P_n$ とし、その座標を $(x_{11}, \cdots, x_{1r}), \cdots, (x_{n1}, \cdots, x_{nr})$ とする。このとき

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nr} \end{bmatrix} \tag{4.29}$$

を空間配列行列とよぶ。ここで、任意の点 P_iと P_jの間の距離 D_{ij}がユークリッド距離関数

$$D_{ij} = D(\boldsymbol{X}_i, \boldsymbol{X}_j) = \left[\sum_{t=1}^{r} (x_{it} - x_{jt})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4.30}$$

によって定義されるものとする

ここで、仮にデータが誤差を含まないとすると、P_{ij}とD_{ij}との間には未知の単調変換f:

$$D_{ij} = f(P_{ij}) \tag{4.31}$$

が存在すると考えられる。任意の互いに相異なるi, jおよびk, lについて、類似度のデータの場合に

$$P_{ij} < P_{kl} \tag{4.32}$$

となるとき、D_{ij}とD_{kl}について

1. $D_{ij} > D_{kl}$
2. $D_{ij} \geq D_{kl}$

のどちらかが成立するものとする。

ここで、実際のデータ$\{P_{ij}\}$には誤差が含まれていると考えられるのでP_{ij}とD_{ij}は必ずしも厳密に単調な対応をしない。そこで、ひとつの方法として、損失関数

$$L = L(\boldsymbol{D}, \hat{\boldsymbol{D}}) \tag{4.33}$$

を定義し、Lを最小にするようなD_{ij}の最小2乗近似$\hat{D}_{ij}$を考える。このとき、$\boldsymbol{P}$と$\boldsymbol{D}$の間には$\hat{\boldsymbol{D}}$が媒介するので

$$f(P_{ij}) = \hat{D}_{ij} \overset{L}{\sim} D_{ij} = D(X_i, X_j) \tag{4.34}$$

と図式化することができる。クラスカルの方法では、損失関数Lを

$$L = S^2 = \sum_{ij} (D_{ij} - \hat{D}_{ij})^2 \tag{4.35}$$

と定義し、Lを最小化するために反復法を用い、適当な初期空間配列$\boldsymbol{X}^{(\mathrm{o})}$から出発して逐次近似的に最終解$\boldsymbol{X}$に到達するように計算を行う。ここで、s回目の反復段階で$\boldsymbol{X}^{(s)}$から$\boldsymbol{D}^{(s)}$を得たとき、その$\boldsymbol{D}^{(s)}$に対して、

$$L = L(\boldsymbol{D}^{(s)}, \hat{\boldsymbol{D}}^{(s)}) \tag{4.36}$$

を最小にするような変換$\boldsymbol{T}$:

$$\hat{D}_{ij}^{(s)} = \boldsymbol{T}(D_{ij}^{(s)}) \tag{4.37}$$

が存在し、$\hat{D}_{ij}$の推定値が定まるとされる。クラスカルは、この変換$\boldsymbol{T}$を規定するために単調回帰法というものを提供している。単調回帰法とは、$\boldsymbol{P}$の大きさの順に要素 P_{ij}を並べ、この順に対応させて$\boldsymbol{D}$の要素 $D_{ij}^{(s)}$ を並べたとき、与えられた Dの値の順位が$\boldsymbol{P}$の値の順位と一致していないとき、順位の一致していないブロックの平均をとって、$\boldsymbol{P}$と同順位の$\hat{\boldsymbol{D}}$を得る方法である。これによって、$\boldsymbol{P}$に対して$\boldsymbol{D}$が準弱単調として求まっていない場合でも、$\hat{\boldsymbol{D}}$を準弱単調性にすることができる。

これより損失関数$\boldsymbol{L}$は$\boldsymbol{D}$ だけの関数として表現できる。

$$L = L(\boldsymbol{D}, T(\boldsymbol{D})) \tag{4.38}$$

そこで、もし L がいたるところで連続で微分可能ならば L を最小にするのは

$$\frac{\partial L}{\partial X} = \left[\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{D}} + \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{T}(\boldsymbol{D})} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{T}(\boldsymbol{D})}{\partial \boldsymbol{D}}\right] \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \boldsymbol{X}} = 0 \tag{4.39}$$

のときである。これを用いて各反復段階ごとに勾配$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{X}}$を評価し、

$$\boldsymbol{X}^{(s+1)} = \boldsymbol{X}^{(s)} - \alpha \left[\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{X}}\right]^{(s)} \tag{4.40}$$

によって、L の最急勾配の方向にステップの大きさαだけ$\boldsymbol{X}$を動かす方法 (最急降下法) を使用する。

先程求めた損失関数 L の平方根 Sは粗ストレスと呼ばれている。

この方法の欠点は、はたしてストレスの最小値に到達しているのか、それとも局所的極小値に落ち込んでしまったのかどうかわからないという問題が残る。

4.3.2 多次元尺度構成法による評価結果

多次元尺度構成法を行った結果を試聴実験 (1) 及び (3) について図 4.5及び図 4.5に示す。SAS パッケージを用いて多次元尺度構成法を適用したが、試聴実験 (2) 及び (4) に関しては、1 次元の布置のみしか計算されなかった。また、いずれの試聴実験結果もストレスが 0.25 以下にならず、非常に非常に悪い当てはまりとなった。

さらに、試聴実験 (1) 及び (3) の結果に関しても、尺度とした形容詞との相関を計算しても軸が何を表すか明確化されない。さらに、重回帰分析によって布置の解釈を行おうと試みたが、全ての重相関係数の値が 0.5 以下となり、布置の解釈として同じ座標上に表すことができなかった。

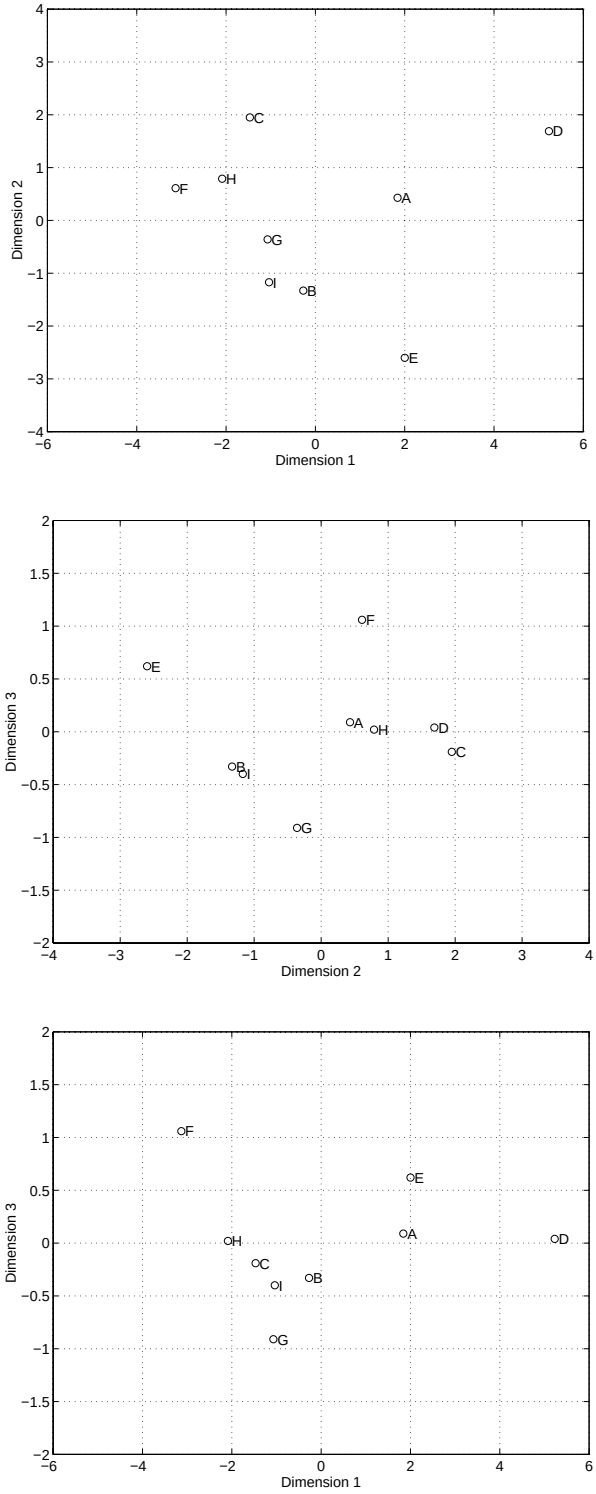


図 4.5: 試聴実験 (1) の多次元尺度構成法結果

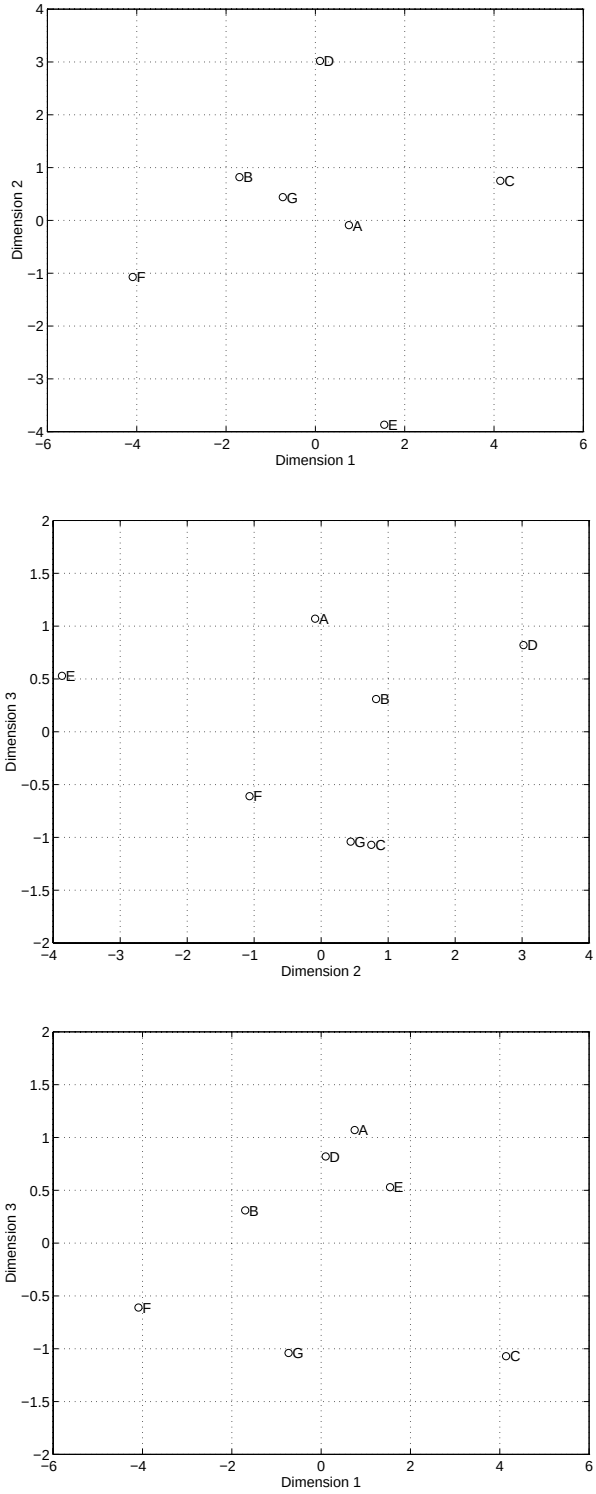


図 4.6: 試聴実験 (3) の多次元尺度構成法結果

このような結果となった原因のひとつとして、多次元尺度構成法は 2 点の非類似度により多次元を低次元にしようと試みているため、相対的に距離関係が保たれているような布置の結果になったのではないかと考えられる。

4.4 まとめ

３章で行った実験の結果について、因子分析及び多次元尺度構成法を用いて解析を行った。これらの分析方法により、心理空間を仮定し、その中における試聴曲の位置関係を解析することにより、試聴曲間の関係と心理的位置を布置より分析することができる。

因子分析の結果においては、試聴曲の音楽性にかなり左右されていることが分析結果より推定された。しかし、多次元尺度構成法に関しては、心理空間表現は得られなかった。これは試聴曲間の相対的な距離を用いて解析が行われることが原因ではないか、と考えられる。

第 5 章

結論

5.1 まとめと結論

コンピュータによる音楽の自動演奏をより「人間らしい」ものにするために、様々な工夫がなされるようになった。しかし、現在研究されている自動演奏システムに関しては、名演奏模倣システムやルールベースによる演奏家モデルなど膨大なデータやルールが必要となる方法に留まっている。これらの方法においては、データの入手が困難な場合には実現不可能であったり、考えられる全てのルールを取り入れることによってルールが爆発的に増加したりすることなど、自動演奏システムの構築に妨げとなる大きな要因を含んでいる。

これを解決するためのひとつの手段として、人間の音楽の聴き方、感じ方を分析し音楽演奏を聴く時に聴取印象に与える影響の大きい物理パラメータを解明することによって、「人間らしい」自動演奏に重要な情報を選択して扱うことが可能となる。これは扱うデータ量を減らすことができ、またルールの爆発的増加も防ぐことが可能であると考えられる。

本研究では、音楽の物理パラメータを変更させることによって音楽の聴取印象がどのように変化するかを調べ、これによって聴取印象に影響の大きい要素の抽出とその効果を明らかにすることを目的としている。

今回はローカルテンポ及びヴェロシティを変化させることによって試聴曲を作成し、試聴実験を行った。具体的には、試聴曲を被験者に聴かせその聴取印象を形容詞を用いて評価させる方法をとった。従来研究においては SD 法を用いて実験が行われている。しか

し、SD 法の形容詞対を選択する段階で実験者側の主観によって形容詞対が選ばれている場合が多く、実際に対として扱うことが妥当であるかの検討はなされていない。そこで、形容詞を対として使用せずに各評価語として扱い、試聴実験を行った。

この結果、形容詞については必ずしも対にならない形容詞の組が従来研究においては用いられていることが分かった。また、これらの形容詞に関する聴取印象について、ローカルテンポやヴェロシティが変化することによって形容詞が受ける影響を観察することができた。

またさらに、これらを多変量解析を用いて分析を行った。因子分析においては、音楽性に関しての影響がかなり大きく現れていることが判明した。しかし、多次元尺度構成法においては、心理空間表現が得られなかった。これには非類似度としてユークリッド距離を用いていることによる影響が出ているのではないかと考えられる。

今回行った実験においては、被験者の多くが知っている曲を試聴曲として用いたため、音楽性に関して不自然とする傾向が大きく現れた。また、評価語として形容詞を選択する場合、ある意味に偏らない形容詞を選択して実験を行うことが重要であると考えられる。

以上のようにして実験を行い、その評価の分析を行った。

5.2 今後の課題

今回用いた手法では、曲の提示方法や形容詞の選択方法によって結果に大きな影響を与える。

これは、生理学的アプローチを行うことにより、より詳しい裏付けが可能になることと考えられる。またアンケートによる調査の必然性の検討が必要である。

さらに、心理空間表現方法として、多次元尺度構成法における表現形式のような、非計量的データを扱う手法の開発も必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始温かく見守ってくださり、御指導、御鞭撻を賜わりました北陸先端科学技術大学院大学 堀口 進 教授に 深く感謝いたします。また、様々な面で御指導、御助言を賜わりました阿部 亨 助教授に 深く感謝致します。また、様々な御助言を賜わりました ジョンホプキンス大学 I.Fujinaga 助教授、自動演奏に関して様々な知識を与えてくださった 堀口研究室 星芝 貴行 氏、貴重な御意見をくださり、さらに試聴実験を快く受けてくださった 当研究室の皆様に深謝致します。さらに、様々な御助言と議論の場を与えてくださり、さらに試聴実験に快く参加してくださった多くの友人に心より感謝致します。

参考文献

[1] 原島博 監修, 井口征士, 猪田克美, 田辺新一, 長田典子, 中村敏枝 : “感性情報処理”, 電子情報通信学会編ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ, オーム社 (1994).

[2] 井口征士 : “感性情報処理が目指すもの”, 情報処理学会誌, Vol.35, No.9, pp.792–798 (1994).

[3] 井口征士 : “感性情報処理 –音楽と感性–”, 計測と制御, Vol.30, No.3, pp.195–198 (1991).

[4] 高見啓史, 今井正和, 井口征士 : “Analysis–by–Synthesis 法によるピアノ演奏の模倣”, 日本音響学会講演論文集, pp.393–394 (1987).

[5] 高見啓史, 片寄晴弘, 井口征士 : “ピアノ演奏における演奏情報の抽出”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J72–D–II, No.6, pp.917–926 (1989).

[6] 宮田昌彦, 日垣文寿, 佐伯隆, 花光悟, 澤辺大一, 野村康雄 : “ピアノの自動演奏システムの一構築法”, 日本音響学会講演論文集, pp.529–530 (1992).

[7] L.Frydén, J.Sundberg : “Performance Rules for Melodies: Origin, Function, Purposis ”, ICMC Proceedings, pp.221–224 (1984).

[8] A.Friberg, L.Frydén, L.Bodin, and J.Sundberg : “Performance Rules for Computer–Controlled Contemporary Keyboard Music”, Computer Music Journal, Vol.15, No.2, Summer, pp.49–55 (1991).

[9] A.Friberg : “Generative Rules for Music Performance: A Formal Description of a Rule System”, Computer Music Journal, Vol.14, No.2, Summer, pp.56–71 (1991).

[10] 田口友康 : “音楽音響研究の最近の動向”, 日本音響学会誌, Vol.52, No.11, pp.885–890 (1996).

[11] 徳弘一路, 山井浩二, 橋本清 : “楽曲と試聴者の情動の多変量解析”, 日本音響学会誌, Vol.44, No.11, pp.833–841 (1988).

[12] T.Nakamura : “The communication of dynamics between musicians and listeners through musical performance”, Perception & Psychophysics Vol.41, No.6, pp.525–533 (1987).

[13] 末岡智子, 大串健吾, 田口友康 : “ピアノ演奏の聴取印象と演奏の物理的特徴の関連性”, 日本音響学会誌, Vol.52, No.5, pp.333–340 (1996).

[14] 田口友康, 大串健吾, 大前努, 山崎広子, 真木ゆき : “ピアノの計算演奏に対する聴取者の反応 –ショパンのワルツの一節による実験–”, 日本音響学会誌, Vol.49, No.1, pp.19–27 (1993).

[15] 奥宮陽子, 大串健吾 : “ピアノ演奏の表情について”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA95–38, pp.23–30 (1995).

[16] 大串健吾 : “音楽演奏とコミュニケーション”, 日本音響学会誌, Vol.52, No.7, pp.558–562 (1996).

[17] 岩下豊彦 : “SD 法によるイメージの測定”, 川島書店 (1983).

[18] 芥川也寸志 : “音楽の基礎”, 岩波新書, 岩波書店 (1971).

[19] 上田和夫 : “音色の表現語に階層構造は存在するか”, 日本音響学会誌, Vol.44, No.2, pp.102–107 (1988).

[20] 宮原誠, 守田幸徳 : “音質を表現する評価語の調査分析”, 日本音響学会誌, Vol.52, No.7, pp.516–522 (1996).

[21] 中谷和夫 : “多変量解析”, 社会科学・行動科学のための数学入門 6, 新曜社 (1978).

[22] 河口至商 : “多変量解析入門 I, II”, 森北出版 (1973).

[23] 竹内啓 監修, 市川伸一, 大橋靖雄, 岸本淳司, 浜田知久馬 : “SAS によるデータ解析入門 [第 2 版]”, SAS で学ぶ統計的データ解析 1, 東京大学出版会 (1987).

[24] J.B. クラスカル, M. ウィッシュ (高根芳雄 訳) : “多次元尺度法”, 人間科学の統計学 1, 朝倉書店, (1980).