

第4章 物理的評価の方法

4.1 複合音の音色に対応する物理的表現

4.1.1 総合的な音色の差異の表現

いくつかの複合音の物理的性質があらかじめ与えられているときに、それらの複合音間の音色の差異を定量的に予測し計算するためにいくつかの研究がなされている。いずれも定常複合音に関するものであるが、Plomp⁽¹⁾は、管・弦楽器のうち9種類の楽器音（基本周波数：319Hz）から1周期分を抜き出し、コンピュータによってこれを数百周期分だけ接続した定常音を用い、心理実験により各複合音間の音色の差異度を求めた。そしてこれらの複合音間の音色の差異度Dを予測する式として、聴覚系の周波数分析能は1/3オクターブバンドに近いことから、1/3オクターブバンド毎の音圧を物理的パラメータとして、次のような式を提案した。

$$D_{ij} = \sqrt[p]{\sum_{n=1}^m |L_{in} - L_{jn}|^p} \quad (1)$$

ここで、 D_{ij} は複合音*i*と複合音*j*のスペクトル構造の差異を表現する値であるが、 p の値を変化させ最適値を見いだすことにより、音色の差異度の予測式とするのである。また、 L_{in} は複合音*i*の第*n*バンド内の音圧、 m は全体のバンド数（=24）である。上述の楽器音の他に、パイプオルガンの音、母音などの音色の差異度と D_{ij} の相関係数を最大にする p の値を求めたところ、ほぼ p は0.75-2.0の範囲の値をとり、このときの相関係数は0.8-0.85付近の値となり、 $p=1$ あるいは2で（1）式はかなり良い予測式となることがわかった。

4.1.2 音色の各要素の1次元尺度化

音色は多次元的な性格をもつものであるが、従来の研究結果⁽²⁾ などから音色は大まかにいって三つの要素的な性質、すなわち、金属的性質、美的性質、および迫力的性質に分析できることが明らかになってきた。ここでは音色の各要素の1次元尺度化について述べる。

(1) 金属的性質の心理尺度構成

Bismarck⁽³⁾⁽⁴⁾ は、鋭さ(Sharpness)に代表される金属的性質が複合音の音色を支配するうえで最も重要であることを示し、ついで純音と狭帯域雑音の鋭さの心理尺度構成を行った。その結果、鋭さは純音の場合には周波数の上昇とともに増加し、狭帯域雑音の場合には中心周波数の上昇とともに増加した。また、これより先にStevens and Volkman⁽⁵⁾ は、純音の高さの尺度化を行い、またGuirao and Stevens⁽⁶⁾ は、音のちみつさ(density)

尺度化を行っている。

図4. 1は、鋭さ、高さ、ちみつき、に関する心理尺度をまとめて示したものである。横軸は純音の周波数あるいは狭帯域雑音の中心周波数である。縦軸は1 kHzの場合の心理尺度値を基準とした相対尺度値である。この図から、5 kHz以上の高さの感覚を除いては、鋭さ、ちみつき、高さ、はきわめて近い性質をもっていることがわかる。

なお、Bismarckは、鋭さと、かたさ、明るさ、高さ、のそれぞれの間の相関係数は0.93, 0.91, 0.83と非常に高くなると述べているが、これらのことは、いわゆる金属的性質が成分周波数の周波数領域に密接に関連していることを示している。したがって、金属的性質の代表的尺度である鋭さの物理的評価の理論式として次のような式が提案されている。すなわち、音色の鋭さSは、

$$S = \frac{\sum_{z=1}^{24} N(z) \cdot g(z)}{\sum_{z=1}^{24} N(z)} \quad (2)$$

として示される。ここで、z は聴覚の臨界帯域番号、N(z)はz番目の臨界帯域のラウドネス、g(z)の重み関数で、周波数の上昇とともに増加する単調増加関数である。g(z)としては、図4. 1に示す太い実線（帯域雑音・鋭さ）を用いる。便宜的には、臨界帯域フィルターの代わりに1/3オクターブバンドの帯域フィルターを用いてもよい。

ところで、ここでひとつの問題が生じる。もともと音色と高さは独立のはずであるが、高さは鋭さなどと非常に相関が強いという結果が得られた。このような矛盾は、同じ高さという言葉でも音色の領域の高さが別があり、高さには、2面性があるのではないか、あるいは高さを音色の要素と考えるべきではないか、などの疑問を提起するが、この問題の解決は将来に待たなければならない。

(2) 美的性質の物理的評価

音楽の演奏において、オクターブ関係（基本周波数比 1:2）にある2音はよく協和し、ついで完全5度（基本周波数比 2:3）、完全4度（3:4）などの関係にある2音もよく協和することが古くから知られている。協和性は美しさとか快さに近く、音色の美的性質に対応するものである。

Plomp and Levelt⁽⁷⁾ は、まずはじめに2周波複合音の協和度を周波数間隔の関数として心理実験により求めた。図4. 2は実験結果を理想化して示したものである。図において、横軸は2純音の周波数差を臨界帯域幅を単位として表し、縦軸は相対的な協和度

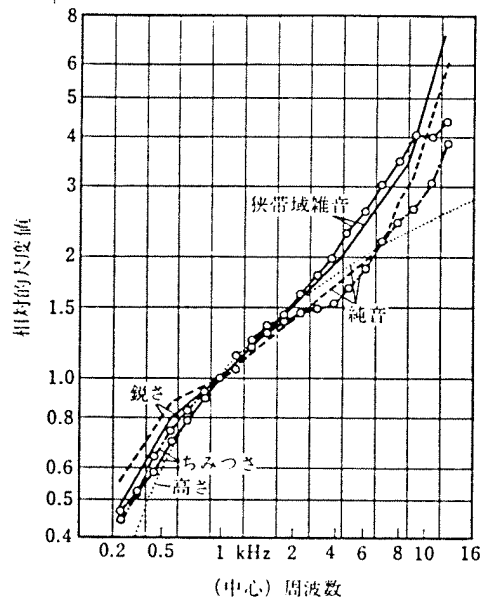


図4. 1 鋭さ、ちみつき、高さの周波数依存性(Bismarck)

(左) および不協和度 (右) を表している。

ここで臨界帯域幅とは、聴覚機能が24の帯域フィルターの帯域幅をいい、中心周波数が1,000Hzの場合は160Hzである。図4.2から、2純音の周波数間隔が臨界帯域幅の1/4倍(中心周波数が1,000Hzのとき40Hz)のとき、2周波複合音は最も不協和になる。この場合に生じる濁り感をラフネス(roughness)と呼ぶ。

Plomp and Levelt は、図4.2に示した2周波複合音の協和性を基礎にして、2つの複合音が同時に提示されたときの協和性の計算理論の構成を行った。その方法としては、2つの複合音のすべての成分を周波数軸のうえに並べ、隣接する2周波成分の不協和度を図4.2の右側のスケールよりもとめ、それらの値を加算するのである。すなわち、不協和度Dは、

$$D = \sum_{i=1}^{N-1} I_i \cdot I_{i+1} \cdot h(\Delta f) \quad (3)$$

で計算できる。ここで、Nは成分音の数、 I_i は第i成分音の強さ(dB)、 $h(\Delta f)$ は隣接する2つの成分音の周波数差 Δf によって定まる不協和度である。 $h(\Delta f)$ は図4.2に示すように臨界帯域幅の1/4の点で最大となる。

図4.3は2つの6周波複合音が同時に提示されたときの協和性(相対不協和度)の計算結果である。図において横軸は1つの複合音の基本周波数を250Hzとしたときの他方の複合音の基本周波数を表し、縦軸は相対的な不協和度を表す。この図によれば、経験的に知られているように、基本周波数が簡単な整数比の場合に協和性が良くなることが示されている。

ついで Kameoka and Kuriyagawa⁽⁸⁾は、Plomp and Leveltと同様に協和性を計算する理論を構成した。図4.4は、2周波複合音の協和性についての実験結果を理想化し、計算用に整理されたものを示す。横軸は2純音の相対的周波数偏差、縦軸は協和性(絶対お

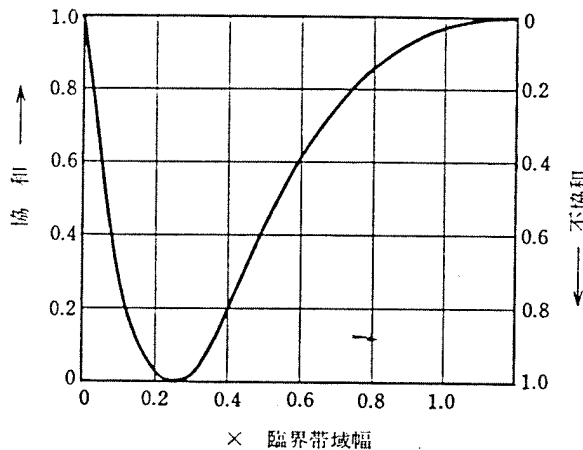


図4.2 2成分複合音の協和度 (Plomp and Levelt)

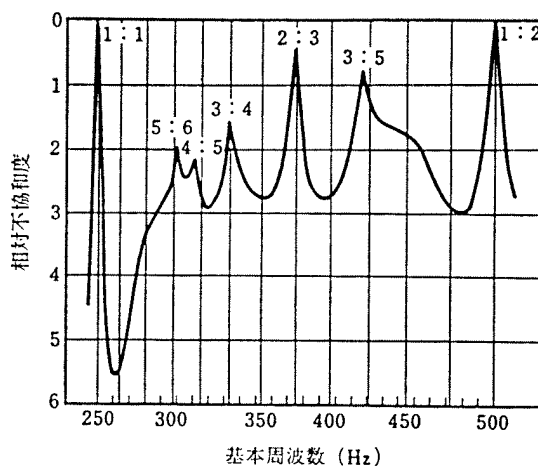


図4.3 2つの6成分複合音を同時に聞いたときの相対不協和度の計算結果 (Plomp and Levelt)

よび相対不協和度) を表している。2つの複合音が同時に提示されたときの協和性の計算は次のようにして行う。

すなわち、Kameoka and Kuriyagawa は、Plomp and Leveltの場合とは異なり、すべての成分の対に対して不協和度を計算し、これらを直接に加算するのではなく、いったん物理量に対応する不協和強度に変換し、各不協和強度を加算し、その結果を心理量に対応する絶対不協和度に変換して協和性を計算する。

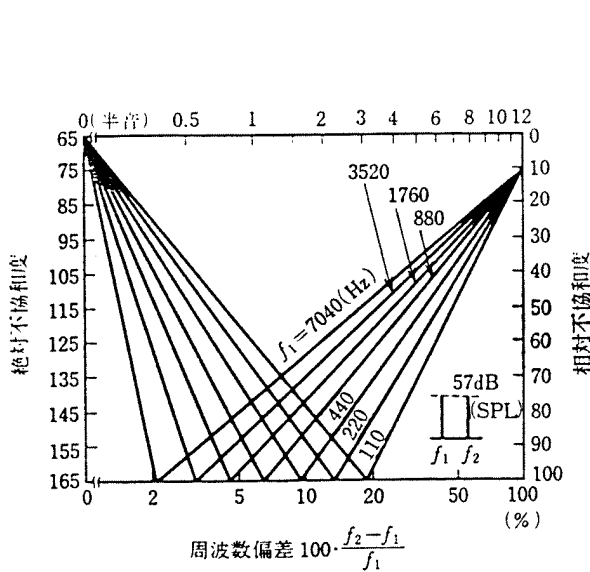


図4.4 2成分複合音の不協和度 (Kameoka and Kuriyagawa)

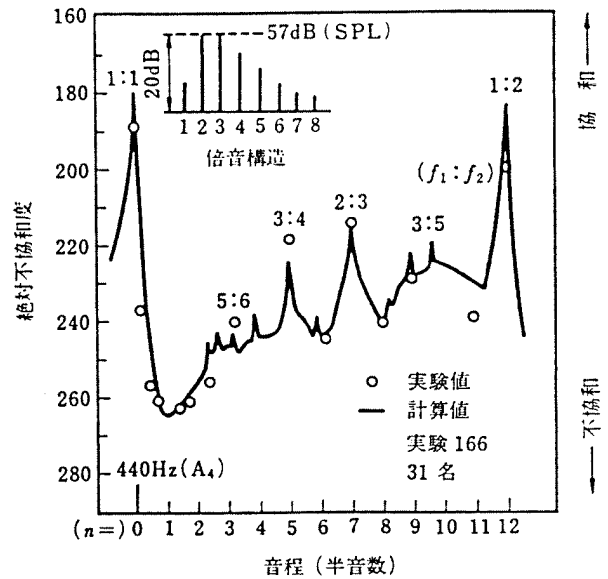


図4.5 2つの8成分複合音を同時に聞いたときの不協和度の計算値と心理実験値の比較 (Kameoka and Kuriyagawa)

図4.5は2つの8周波複合音が同時に提示されたときの協和度を計算した結果と心理実験結果を比較したものである。横軸は1つの複合音の基本周波数が440Hzの場合の、2つの複合音の基本周波数差を半音数で表している。図は計算値と実験値がかなり良く合っていることを示している。

(3) 迫力的性質の物理的評価

音色のこの側面は、主として音の大きさに強く支配される。すなわち、迫力的性質を表す指標をPとすれば、

$$P = \sum_{z=1}^{24} N(z) \cdot W(z) \quad (4)$$

として近似的には評価することができよう。ただし、 $W(z)$ は、聴覚の周波数特性 (騒音計のA特性に対応) を表す重み関数である。

また、 P を時間領域で表現すると、 L_{eq} に対応する。すなわち、

$$P = 10 \log_{10} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P^2(t)}{P_0^2} \alpha t \quad (5)$$

としてもよい。ただし、 t_1, t_2 は観測開始、終了時間、 P_0 は基準音圧 ($=20 \text{ Pa}$)、 $P(t)$ はA特性回路を通した音圧波形である。

4. 1. 3 音の動的性質の音色への影響

音色は、音の立ち上りなどの振幅包絡線、短時間スペクトルの時間的変化などによって大きく変化する。例えば図3.5に示すように、楽器音は振幅包絡線によって音色はかなり大きく変化する。また岩宮ら⁽⁹⁾によれば、音を数ヘルツの変調周波数で振幅変調や周波数変調すると(ビブラート音)音色に迫力、豊かさ、美しさが加わる。さらに橋本ら⁽¹⁰⁾によれば、継続時間の短い音は長い音に比べてパワーが等しければより大きく聴こえる。これは聴覚が音の立ち上りに対してより強く反応する性質に基づくものである。以上のように、音の動的性質と音色の関連性についてはいくつかの研究があり、また経験的に知られていることも多いが、現在の段階ではこの関連性が系統的に明確になっているとは言えない状況であり、今後の研究が待たれる。

4. 2 音響特性の物理特性と音質との対応

4. 2. 1 周波数特性

一定の入力条件の下での機器の出力の電圧あるいは音圧などの周波数依存性を周波数特性あるいは周波数レスポンスという。周波数特性の違いによって、音質あるいは好みがどのように変化するかについては、下記のように調べられている。

Eisenberg and Chinn⁽¹¹⁾は、音声やさまざまな音楽を素材として、再生周波数帯域幅と音質の良さ(好み)の関連性について実験を行った。周波数帯域を狭帯域(ほぼ150-4000Hz)、中帯域(ほぼ70-6000Hz)、広帯域(ほぼ40-10000Hz)の3種類に分け、約500人の評定者について良さとの関連を調べたところ、一般に広帯域よりも狭帯域や中帯域の音質が好まれるという結果が得られた。ただし、素材の内容によって、ある程度は好みの判断は変化した。我妻ら⁽¹²⁾は、グラフィックイコライザーで再生系の周波数特性に山形および谷形特性をつくり、音質表現語との関連を調べた。その結果、音の良さは低中域特性と密接な関係があり、低中域成分を適当に増強すると音の良さが上昇することを見いだした。中山ら⁽¹³⁾は、カセットテープの周波数特性と音質の良さ(好み)の関係の分析を行った。その結果、大多数の評定者は低音域、中音域の周波数成分がある程度強い音を良いと判断し、高音域に対する評価は人によってまちまちであり、この要素が音質の良さの

個人差を生ぜしめる重要な要因となっていることを見いだした。さらに、中低音域の他に、周波数とは直接関係しない粒状性の良さ（ざらざらした感じが少ない）が音質の良さを支配する要因となっていることを示した。

さらに、Gabrielsson and Sjogren⁽¹⁴⁾は、音の明確さ、柔らかさ (Softness: 鋭さとはほぼ逆方向の性質) が音質の良さに結びついていることを見いだしている。

小谷津ら⁽¹⁵⁾は、低域および高域をそれぞれ強調、平坦、抑制して組み合わせた9種類の周波数特性の再生系を通した10種の楽曲を評定者に提示し、周波数特性と好みの関係を調べた。一般的には低域強調、高域平坦あるいは抑制が好まれるという結果が得られた。ただし、評定者の好みは楽曲の種類によって変化した。評定者は、この変化が比較的少ない絶対形、楽曲の種類によって2-3種類変わる選択形、楽曲毎に好みの特性の異なる分散形に分類された。

4. 2. 2 位相特性

音響機器の入出力の位相関係を示す周波数特性であるが、位相特性そのものは音質にほとんど影響を与えないことが知られている。ただし、位相特性を周波数で微分した値である群遅延特性は音質に影響を与える。群遅延時間が大きくなると、エコーとして知覚されるようになる。

4. 2. 3 非直線歪

伝送・再生系の入出力特性が直線的でなく、なんらかの非直線性を含んでいれば入力と出力の信号波形は相似形にならず、再生音は歪を含み、原音とは異なった音となる。非直線特性をもつ伝送・再生系に正弦波（純音）を加えると、高調波（倍音）が発生する。高調波の含有率、すなわち高調波の振幅の自乗和の平方根を基本波で割り、それに100を掛けた値を（高調波）歪率と呼ぶ。高調波歪の検知限については、黒木・松尾⁽¹⁶⁾により、第2高調波歪と第3高調波歪に分けて詳細に調べられた。その結果を表4. 1に示す。この結果によれば、音声増幅器によって生じる高調波歪の検知限としては音声や音楽を対象とした場合、通常は2%程度と考えられる。

	音 声	音 楽
第2高調波歪	9.8%	5.2%
第3高調波歪	2.1%	4.4%

表4. 1 高調波歪の検知限
(黒木・松尾)

歪は系の静的な非直線性によるものの他、フィードバックループ内の遅れ要素やリミッターなどの動的要素を含む伝送・再生系において、入力信号の時間的变化に対する系の応答時間がかかりすぎるために生じることがある。これらの歪を動的歪という。動的歪を含めた非直線歪の測定法としては二階堂の方法⁽¹⁷⁾がある。この方法は、特定の番組音（音楽や音声など）に対し、どの周波数帯域にどの程度の歪が生じるかを調べるもので、

原理は図4. 6に示すとおりである。

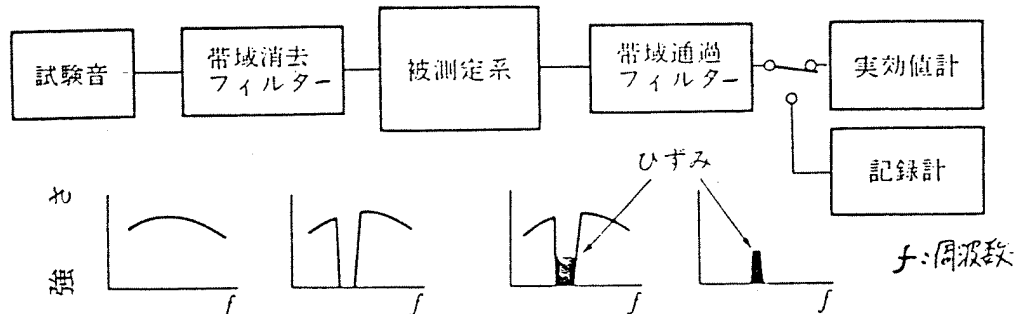


図4. 6 伝送・再生系の歪の総合測定法 (二階堂)

まず、試験音(番組音)の1部を1/4オクターブバンドの帯域除去フィルターで除去し、被測定系(伝送・再生系)に加える。ここで生じた歪成分を帯域通過フィルターで取り出し、この量を測定することにより、この帯域内に生じた歪の量を知ることができる。中心周波数の異なるフィルター群を切り換えて測定することにより、発生する歪の量の周波数特性を知ることができる。この方法を用いたスピーカーやFM放送伝送系における各種機器の歪の詳しい測定例も二階堂ら⁽¹⁸⁾によって、報告されている。また管弦楽、男性スピーチ、ピアノなどを用いて行った実験結果⁽¹⁸⁾によれば、歪の検知限は、信号音の全帯域レベルを0dBとすると、帯域の中心周波数が2kHz以下であれば、管弦楽の場合-15dB~-20dB、ピアノおよび男性の場合は-20dB~-30dB、2kHzを越えると、周波数の増加にともなって低下する。

文献

- (1) Plomp, R.: Timbre as a multidimensional attribute of complex tones, Frequency analysis and periodicity detection in hearing (eds. Plomp and Smoorenburg). A. W. SIJTHOFF, LEIDEN, 1970, 397-414.
- (2) 北村音一、難波精一郎、三戸左内、: 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専門委員会資料, 1962.
- (3) von Bismarck, G.: Timbre of steady sound: A factorial investigation of its verbal attributes, Acustica, 1974, 30, 146-159.
- (4) von Bismarck, G.: Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds, Acustica, 1974, 30, 159-172.
- (5) Stevens, S.S. and Volkman, J.: The relation of pitch to frequency; A revised scale, Amer. J. Psychol., 1940, 53, 329-353.
- (6) Guirao, M. and Stevens, S.S.: Measurement of auditory density, J. Acoust. Soc. Am., 1964, 36, 1176-1182.

- (7) Plomp, R. and Levelt, W.J.M. : Tonal consonance and critical bandwidth, J. Acoust. Soc. Am., 1965, 38, 548-560.
- (8) Kameoka, A. and Kuriyagawa, M. : Consonance theory part I and part II, J. Acoust. Soc. Am., 1969, 45, 1451-1469.
- (9) 岩宮真一郎、塚本浩二、北村音一 : ビブラート音の音色の多変量解析的研究、日本音響学会聴覚研究会資料、1980, H-76-6.
- (10) 橋本竹夫、難波精一郎、C.G. Rice : 減衰部分を持った衝撃音の大きさと L_{AE} の関係について、日本音響学会聴覚研究会資料、1983, H-83-28.
- (11) Eisenberg, P. and Chinn, H.A. : Tonal range and volume level preferences of broadcast listeners, J. exp. psychology, 35, 1945, 374-392.
- (12) 我妻幾久寿、鈴木清明、樗木秀一 : 周波数特性の山谷と評価語の関係、日本音響学会講演論文集、1972-5, 199-200.
- (13) 中山 剛、三浦種敏、端山文忠 : 因子分析による音質の解析、日本音響学会電気音響研究会資料、1975, EA75-13.
- (14) Gabrielsson, A. and Sjogren, H. : Perceived sound quality of sound reproduction systems, J. Acoust. Soc. Am., 1979, 65, 1019-1033.
- (15) 小谷津孝明、外山純子、三浦 彰、佐藤利喜夫 : 音質嗜好の一解析的研究 - 再生周波数特性との関係 -, 哲学、1968, 52, 227-251.
- (16) 黒木総一郎、松尾竹郎、(1957) : 非直線ひずみの検知限について、NHK技術研究、1957, 31, 11-25.
- (17) 二階堂誠也 : 非直線ひずみの検知限ならびに測定法に関する考察、日本音響学会誌、1972, 28, 485-495.
- (18) 二階堂誠也、市川 満、中村秀夫 : 音声伝送系における非直線ひずみの検知ならびに測定法、NHK技術研究、1975, 27, 43-76.