

<一般研究課題> 人に優しい家電製品や自動車などの

音響デザインに関する研究

助成研究者 豊橋技術科学大学 章 忠



人に優しい家電製品や自動車などの
音響デザインに関する研究
章 忠
(豊橋技術科学大学)

Study on Sound Design for Home Appliances or Vehicles
Considering with Human-friendly

Zhong ZHANG
(Toyohashi University of Technology)

1. はじめに

音楽の聴取や人との会話など、日常生活に音の存在は不可欠である。また、音から得ている情報や、音によって与えられる楽しみは計り知れないものがある。このような音が美しく、また明瞭に聞こえるように、楽器音の音色や電話などの音質向上を目指し、多くの研究が行われてきた。

一方、日常生活の中で利用している自動車、掃除機、エアコン、OA 機器などの機械からも音が発生している。これらの機械の音は、本来の機能の副産物として発生したものであり、その音は騒音として受け止められることが多い。しかし、アクティブノイズコントロール等でこのような騒音を完全に消すことは不可能であり、また完全な無音状態が人間にとって快適であるともいえない。そのため、騒音レベルを下げるとともに、音質を不快でない音に変えようと改善する試みが行われるようになってきた。そこで本研究では、音質を心理音響評価量を用いて評価し、またそこから受けた音の印象をアンケートで調査し、快・不快音との相関を調査し、音の定量評価を試み、またその音響デザインへの応用を検討することを目的とする。

2. 聴覚機能と音質評価

人間の聴覚は、音響分析器として非常に優れた性能と汎用性をあわせ持っていて、現状でもそれを完全に模倣する機器を作ることはできていない。また、物理的な分析手法（周波数スペクトル、ケプストラム、音圧波形など）を駆使しても音響センサとしての聴覚機能を記述することもできて

いない。しかし、最近では心理音響学や両耳信号処理などを取り入れることによって、聴覚を特徴づけるパラメータを抽出できるようになっている。

音質評価とは心理音響技術を使用し、音を人による感じ方に合わせて定量的に解析する技術である。従来の物理量に基づく機械的評価に対し、人の感覚に基づくこの音質評価技術は、これからの生活環境に人間性を加味していくものと考えられる。例えば、現在のエアコンは以前よりもだいぶ静かになったが、その音はまだまだ機械的である。しかし、音質評価技術で音質を解析し、音の改良技術が進歩すれば、心地よく、やさしい自然の音にすることも可能であると考えられる。また、音質評価技術は自動車などの乗り物や事務機器などの静音化等、様々な分野へ今後の応用が期待されている。

2.1 心理音響評価量

心理音響評価量は、人間の耳の構造や聴覚神経の働きを調べたり、多くの人間に聴感実験を行った結果から導き出されたものである。聴感実験とは実際に人間が音を聞き、どのように感じたか、その反応を調べることである。しかしながら人間は、その人の年齢や今までの経験、その時の体調や、温度など周囲の環境によって少しずつ音に対する反応が異なってしまう。そこで多く被験者に対して試験を行い、それらを統計処理することで心理音響評価量が求められてきた。

これら音質評価の基盤となっている心理音響技術は、工学、医学、心理学などの広い分野を駆使した技術であり、また、これからさらに成長する技術といえる。例えば、心理音響評価のパラメータといっても数多くあり、対象とする音によって使い分けたり組合せたりして使いこなす技術が必要である。特に心理学については、人の嗜好や社会環境により感性に違いが出るなど、課題が残されている。

心理音響技術に基づく音質評価は、当初自動車の車室内音を評価するために用いられたものである。なかでも音の大きさの評価量であるラウドネスは、ドイツの E.Zwicker によってラウドネス指標として形成され、ISO（国際標準規格）で規格化されている。1998 年には家電機器業界で騒音の表示に関する基準が定められ、騒音の表示には騒音レベルの他にラウドネスを用いるように記されている。

3. 心理音響評価量の計算

本研究では、以下に示す 4 種類の心理音響評価量を用いるものとする。本章においては、これらの計算法について述べる。

- ・ 音の大きさ・・・ラウドネス
- ・ 音の高さ・・・シャープネス
- ・ 音の変動・・・変動強度
- ・ 音の粗さ・・・ラフネス

3.1 臨界帯域(Bark)

E.Zwicker は様々な方法で聴覚フィルタの中心周波数とバンド幅の関係を測定し、1961 年に聴覚フィルタの中心周波数とその周波数における臨界帯域の関数を発表した。臨界帯域(Bark)とは、可聴周波数帯域において臨界帯域幅に相当する周波数帯域が等間隔になるような周波数尺度のことである。この臨界帯域は、中心周波数の関数となっており、①中心周波数が低い場合には臨界帯域は

狭く、中心周波数が高い場合には広がっていること、②中心周波数が 500[Hz]以下では臨界帯域はほぼ一定の 100[Hz]であることが E.Zwicker によって示された。実際に聴覚フィルタを模擬するフィルタを設計する場合を考えると、中心周波数と臨界帯域の関係が定式化されている方が都合が良いといえる。現在の音質評価では、この臨界帯域が多用されており、これにより周波数軸は臨界帯域により規格化された周波数軸 (Bark 軸) に変換されて表示することが多い。式 (1) に周波数軸から Bark 軸への変換式を示す。ここで f は通常周波数軸における周波数である。

$$Bark = 13 \arctan\left(\frac{0.76f}{1000}\right) + 3.5 \arctan\left(\frac{f}{7500}\right)^2 \dots (1)$$

3.2 ラウドネス(Loudness)の計算

ラウドネスは音の大きさを表すパラメータであり、式(2)で定義される。ここで N' はラウドネス密度である。

$$L = \int_0^{24Bark} N' dz [sone] \dots (2)$$

ラウドネスの計算では、①対象音のフーリエ変換 ②臨界帯域に分離し帯域ごとのエネルギーの算出 ③スペクトルマスキングの計算 ④ラウドネス密度の計算 ⑤シャープネス・変動強度・ラフネスの計算 ⑥ラウドネス密度の合計 といった手順によって行う。ラウドネスの計算では⑤にあるように他の心理音響評価量とも関係していることから心理音響評価の重要項目のひとつといえる。

図 2 に、1000[Hz]純音のラウドネス密度の例を示す。横軸は臨界帯域、縦軸はラウドネス密度である。ラウドネスの値はこの軸で囲まれた面積となる。

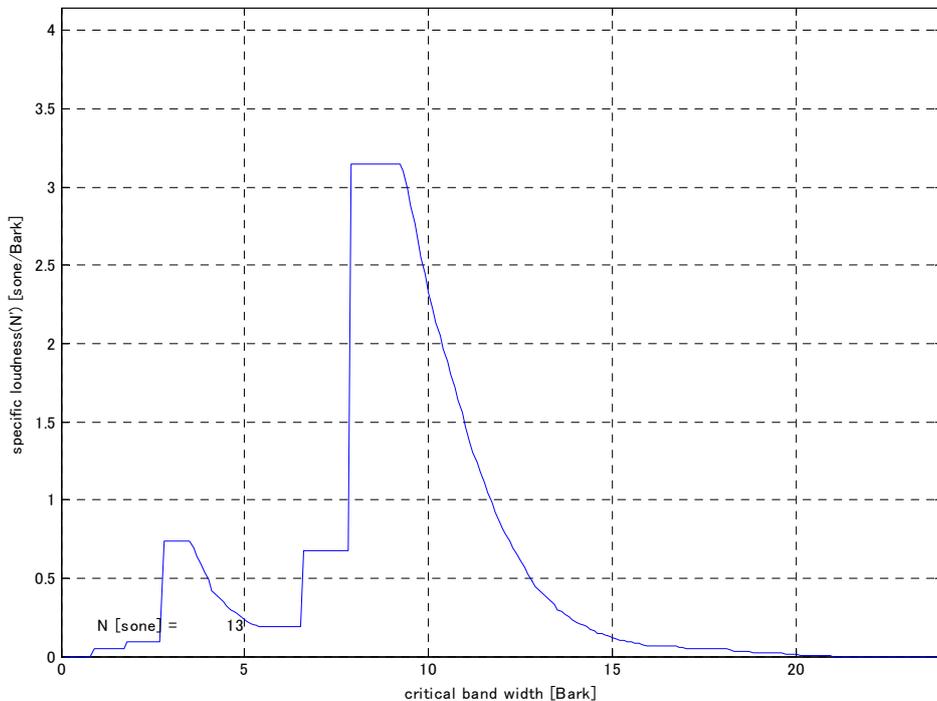


図 2 1000[Hz] 純音におけるラウドネス密度の例

3. 2. 1 等ラウドネス曲線

可聴範囲において、同じラウドネス間隔となる点を結んだものを等ラウドネス曲線と呼ぶ。図3に1000[Hz]純音における等ラウドネス曲線の例を示す。ラウドネスの計算に重要となる要素のひとつが、この聴覚の周波数特性である。この図より、灰色で示した2~4[kHz]の区間においては聴覚感度が良く、その反面、低音域では感度が悪くなる特性を持つことが分かる。

また、この特性は音圧によって異なり、音圧の高い上側データの場合には比較的平坦な特性となる一方、音圧が低い下側データの場合には低音における感度がより小さくなるという特性を持つ。人間の聴覚の周波数特性はとても複雑であるが、ラウドネスの計算では、このような複雑な特性が考慮されている。

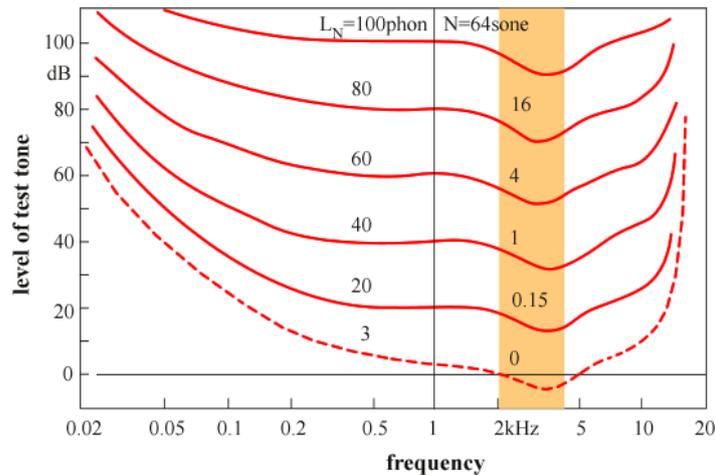


図3 1000[Hz]純音における等ラウドネス曲線¹⁾

3. 2. 2 スペクトルマスキング

スペクトルマスキングとは、ある音が聞こえているときにもう一つの音を聞かせると、2番目の音は1番目の音によってかき消され、聞こえなくなる現象である。

仮に、1000[Hz]の狭帯域雑音を聞いている場合、図4の1000[Hz]近傍にピークを持つ稜線範囲の音源は狭帯域雑音によってマスクされていることになる。そしてこの範囲に新たに音が加わったとしても聴覚的な音の大きさに変化はない。また、音によっては完全にかき消されて聞こえない場合もある。ラウドネスの計算においては、このスペクトルマスキング効果も考慮する必要がある。

スペクトルマスキングと、音の大きさの関係を理解するためにマスキングカーブを単純化したモデルを考える。図5上図は、AとBの2つの音が、周波数軸上で離れている場合を示している。四角い部分がそれぞれの音で、その両側の部分がマスキングされている部分である。音の大きさ(ラウドネス)はマスキングされた面積に比例するので、Aのみが存在する場合よりも、Bが追加された場合には約2倍の大きさに感じられる。一方、図5下図は2つの音の周波数が近い場合の例である。2つの音によってマスキングされた部分が重複し、その結果Bが加わってもマスキングされた面積はAのみが存在する場合とほぼ等しく、音の大きさは若干増加するだけとなる。これらの音全体のエネルギーは、上の図も下の図もどちらも2倍であるため、音圧レベル[dB]のみの比較では同じ値となる。

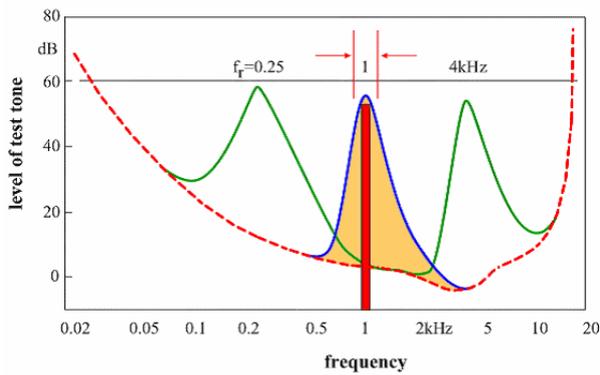


図4 スペクトルマスキングの例¹⁾

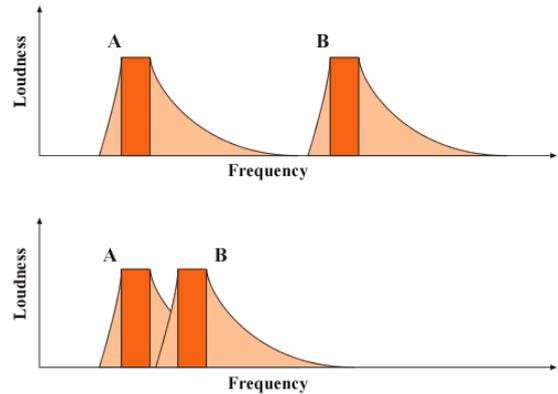


図5 2音のスペクトルマスキングのモデル¹⁾

3.2.3 ラウドネス計算チャートの導入

これまでに述べた現象を考慮して音の大きさを計算するために、ISO 532B では図6のようなチャートを、音圧や音場の状況に応じて用意し、ラウドネス算出に用いている。図6横軸は臨界帯域を基にした周波数であり、縦軸は臨界帯域ごとのラウドネスである。ラウドネスを求めるにはまず1/3 オクターブ分析を行い、その結果をチャートに書き込む。こうして描いたカーブの下方の面積を計算し、面積に対応するラウドネスを読み取ることでラウドネスが求められる。

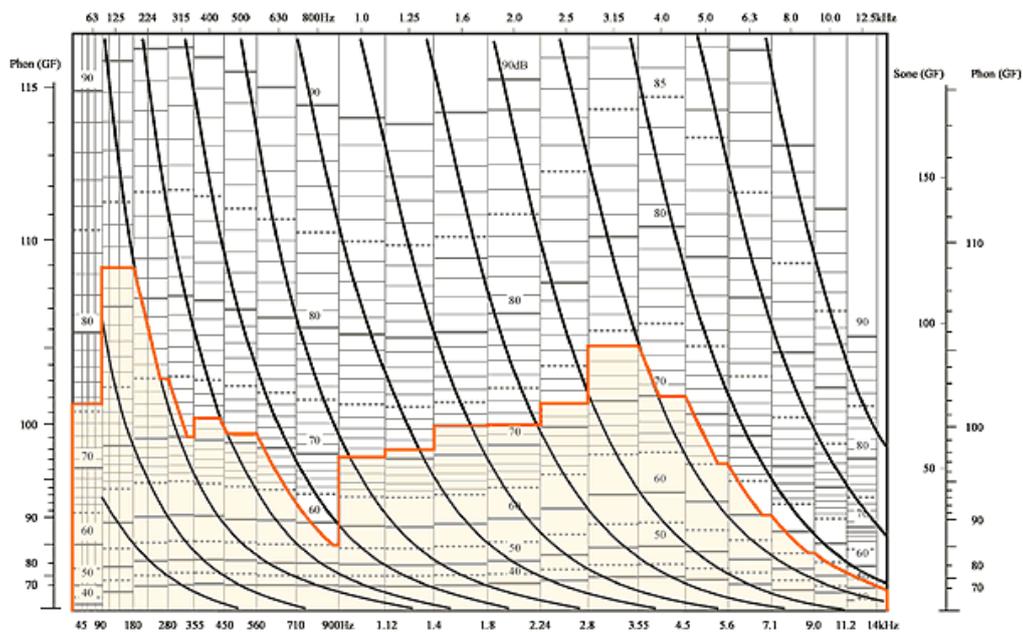


図6 ラウドネス計算チャートの例¹⁾

3.3 シャープネス(Sharpness)の計算

シャープネス S は音の高さを表すパラメータであり、式(3)で定義される。

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g'(z) dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} [\text{acum}] \dots (3)$$

ここで、 N' : ラウドネス密度, $g'(z)$: 重み係数, z : 臨界帯域数である。

シャープネスの計算においては、1[kHz]を中心とした狭帯域雑音での音圧レベル 60[dB]の基準音を用い、この時のシャープネスを 1[acum] とする。シャープネスは、臨界帯域ごとのラウドネスに重み付けし、それを全体のラウドネスで割った比率である。図7にラウドネスの重み係数 $g'(z)$ を示す。図示するように、高い臨界帯域になるにしたがい重みが増し、高い周波数の音ほどシャープネスが高くなるように算出される。このときのシャープネスの重み係数を式(4)に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} z < 14, \rightarrow g'(z) = 1, \\ z \geq 14, \rightarrow g'(z) = 0.00012z^4 - 0.0056z^3 + 0.1z^2 - 0.81z + 3.51 \end{array} \right\} \dots (4)$$

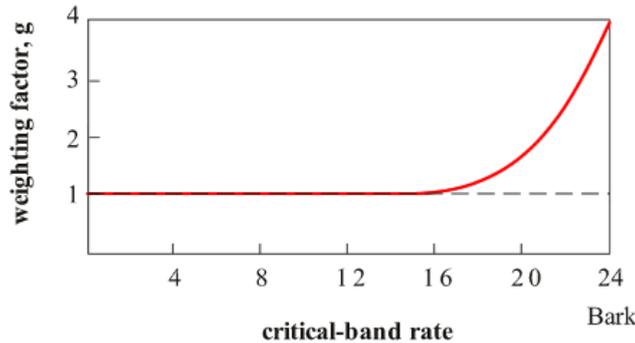


図7 シャープネスの重み係数 $g'(z)$ ¹⁾

3.4 変動強度(Fluctuation Strength)とラフネス(Roughness)の計算

変動強度 F は音の変動度合いを、ラフネス R は音の粗さを示し、以下の式で定義される。

$$\text{変動強度: } F = \frac{\int_0^{24\text{Bark}} \log_{10} \left(\frac{N'_{\max}}{N'_{\min}} \right)}{(f_{\text{mod}} / 4\text{Hz}) + (4\text{Hz} / f_{\text{mod}})} [\text{vacil}] \dots (5)$$

$$\text{ラフネス: } R = f_{\text{mod}} \cdot \int_0^{24\text{Bark}} \log_{10} (N'_{\max} \cdot N'_{\min}) [\text{asper}] \dots (6)$$

ここで、 N' : ラウドネス密度, f_{mod} : 変調周波数である。

変動強度とラフネス計算の基本となるのは、臨界帯域ごとのラウドネス密度であり、その最大・最小値の比をとると変動強度、積をとるとラフネスとなる。

変動強度の計算では、ラウドネスの時間履歴に含まれる変動成分を調べる。人間は、音の大きさや周波数が変動する場合に音の変動を感じる。そしてその変動周期が非常に遅い場合には変動感をあまり感じず、変動の周期がある程度速くなると変動感を強く感じる。1 番変動感を強く感じるのは、変調周波数が 4 [Hz] の場合といわれ、それ以上の周波数では、変動感は次第に小さくなる。つまり、ラウドネスの変調周波数 4 [Hz] 近傍で変動強度が大きくなる。

変動強度の基準音は、1 [kHz] の純音を変調周波数 4 [Hz] で AM 変調し、音圧レベルを 60 [dB] とした音であり、この時の変動強度を 1[vacil] とする。

一方、ラフネスも、音の大きさや周波数が変調により感じる間隔である。ただし、その変調周波数は変動強度より高く、変調周波数 70[Hz] 近傍での変調が最も粗いと感じる。音を粗いと感じる時、人間の聴覚では、その音の変調を聞き取っている。しかし、変動している音の 1 つ 1 つを分離

して聞き取ることができないため、変動感ではなく粗さとして感じる。

図8および図9に、変動強度およびラフネスの変調周波数に対する傾向を示す。

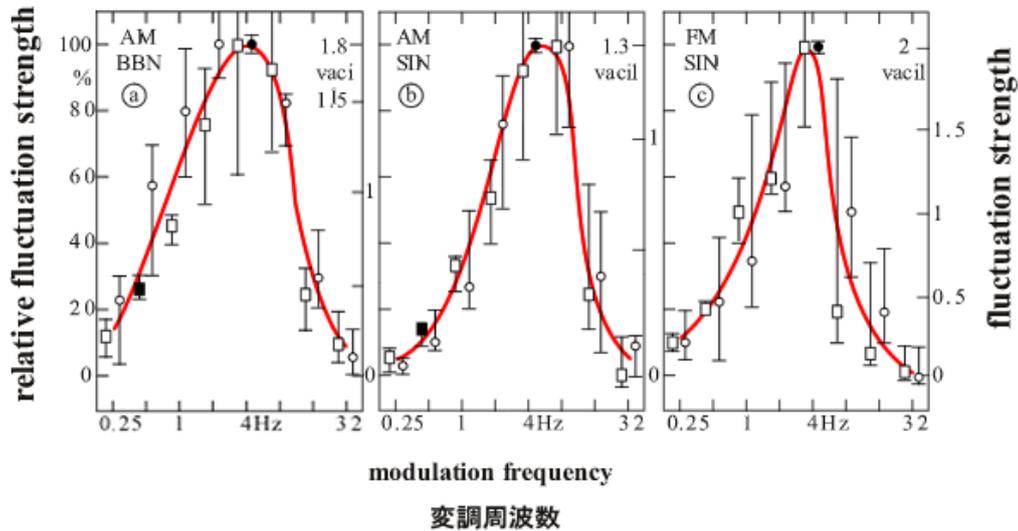


図8 変動強度と変調周波数¹⁾

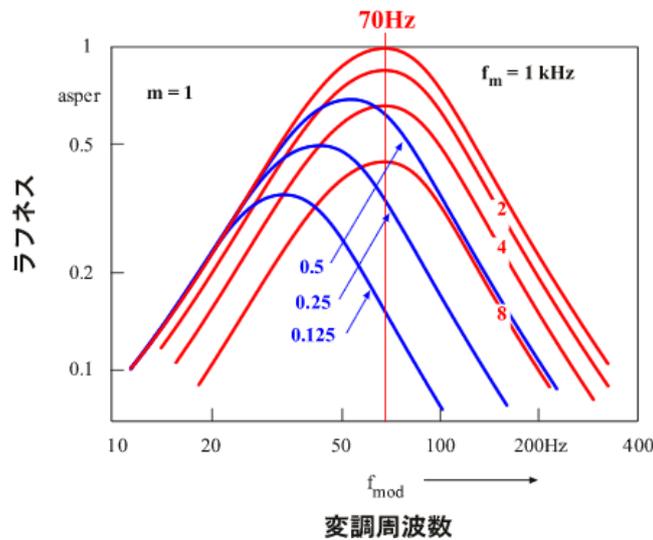


図9 ラフネスと変調周波数¹⁾

4. 心理音響評価実験

前章までに示した心理音響評価指標の有効性を確認するために、以下に示すような被験者実験を実施した。そして被験者アンケートによって得られた快・不快といった感性情報と心理音響評価量との相関性を確認することとした。なお、被験者は20代の成人25名とした。

4.1 試供音

本実験において用いた試供音について以下に示す。

一般に、図10のような、フーリエ解析したパワースペクトルが周波数 f に反比例して -1 の傾きをもつ $1/f$ ゆらぎを含む音は、人間を心地よく感じさせる効果があるといわれている。ここでは、このような一般性のある快適な音声（快音）と不快なノイズ音（不快音）、さらにその中間音をもちい、一般的な感性に対する定量化の可能性を確認する。まず快音については、様々な音についてパワースペクトルを調べ、その $1/f$ ゆらぎ特性を確認した結果、クラシック音楽を採用した。また、

不快音は不規則性のある音として、白色雑音を採用した。また、快・不快音の中間音は音質変化ソフト STRAIGHT を用いて、クラシック音楽の周波数およびピッチを 2 倍にしたものを作成し採用した。採用した試供音のそれぞれの周波数特性を図 1 1 に示す。

したがって、A) 快・不快音 (3 種類), B) うねり音 (6 種類), および C) 同様の音で音圧レベルのみを変化させた音 (3 種類) の合計 12 種類の試供音を用いることとした。

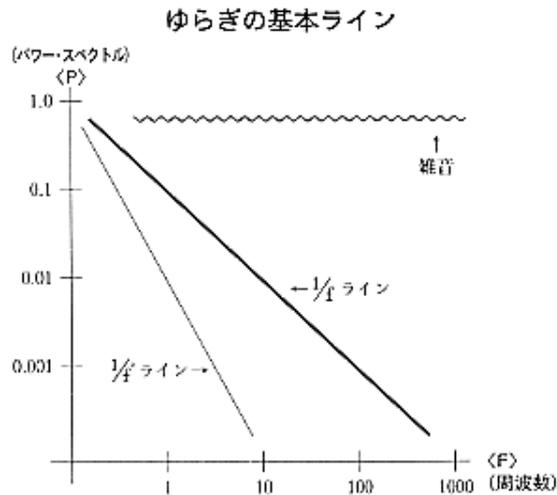


図 1 0 1/f ゆらぎの特性

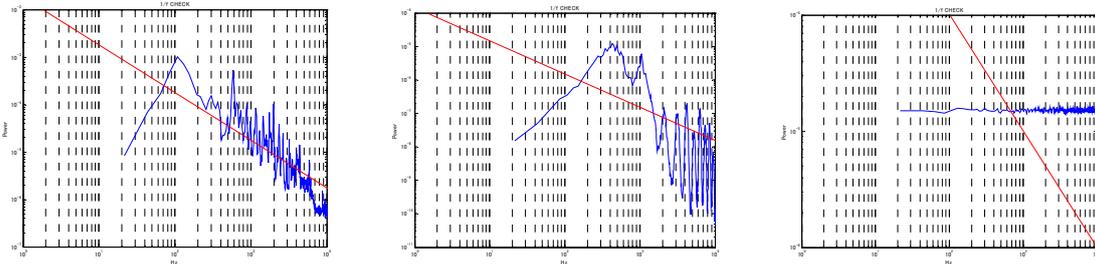


図 1 1 試供音の周波数特性 (左 : クラシック, 中 : 中間音, 右 : ノイズ)

4. 2 実験結果の抽出方法

本実験では、実験結果の抽出方法として、前節で示した試供音に関して、心理音響評価量でレーダーチャート化 (定量化) するとともに、被験者の持つ印象を表 1 のアンケートにより抽出することとした。アンケート項目としては、快・不快を含む全 11 項目の印象表現を用い、その印象度合いを中間値 0 を含む -3 ~ +3 の 7 段階評価とした。

表 1 評価アンケート項目

1	眠たくない・眠い	7	柔らかい・硬い
2	澄んでいる・こもっている	8	暖かい・冷たい
3	リラックス・緊張	9	自然・人工的
4	迫力がない・迫力がある	10	丸い・とがっている
5	うねりがある・うねりがない	11	快適・不快
6	静か・騒がしい		

4.3 実験結果と考察

まず、試供音A)を用い、快・不快に関する定量評価と感性評価を比較する。

図12に心理音響評価量により定量評価した結果をレーダーチャート化したものを示す。ここで用いた3音は、ラフネスと変動強度がほぼ同じであるが、ラウドネスとシャープネスが快音から不快音へ変化するにつれて増大する傾向にあることがわかる。

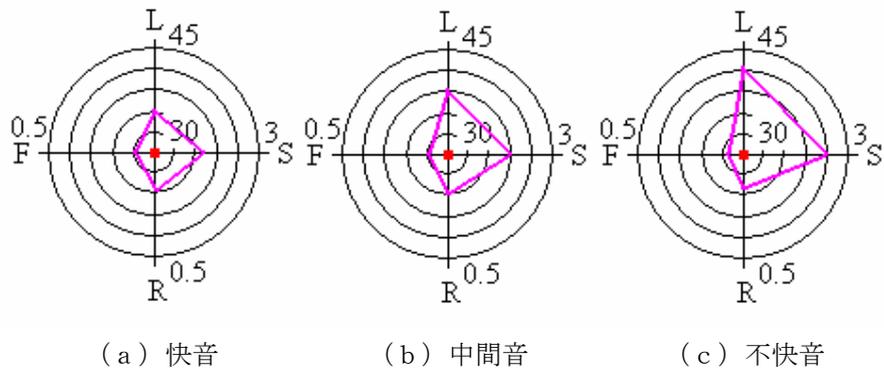


図12 心理音響評価量を用いた試供音の評価

同様に、前節で示したアンケート評価により、試供音に対する快・不快(第11項目)評価を図13に示す。x軸の数値は快・不快の評価数値(7段階)であり高いほど不快であることを示す。また、z軸は回答人数を示す。この結果より、快音から不快音へ移行するにつれ、アンケート評価からも不快感が増加していることがわかる。

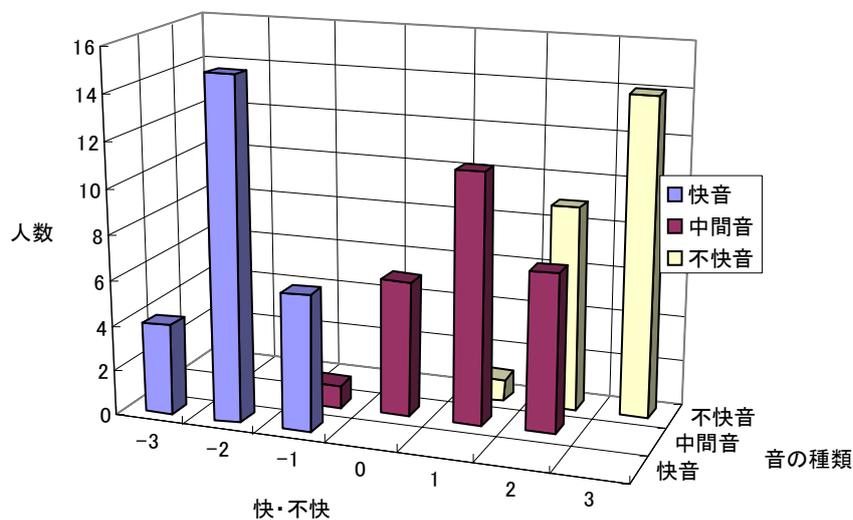
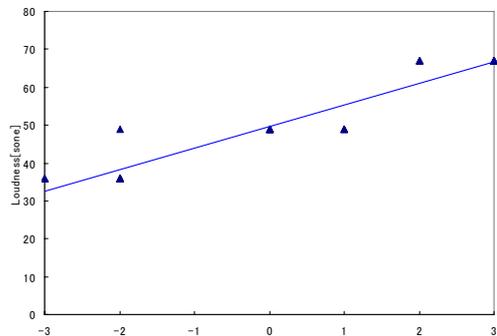
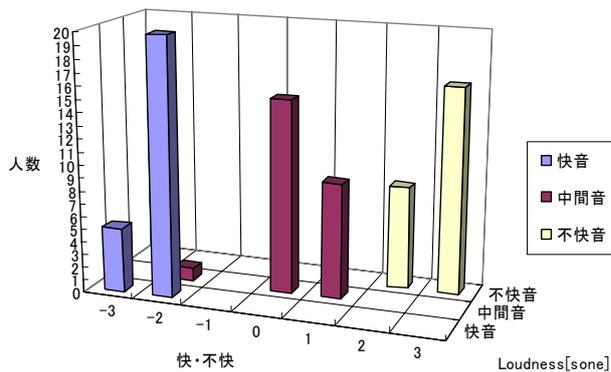


図13 アンケート調査による快・不快評価項目の集計結果

次に、全試供音を心理音響評価指標ごとにクラスタリングし、個々の評価量の増減とアンケート評価との相関性について考察する。

まず、図14に快・不快評価とラウドネスの増減に関する集計結果を示す。ここで抽出した試供音は、ラウドネス以外の心理音響評価量が同様のものである。この図から、ラウドネスが高いほど不快と感じる傾向にあることがわかり、また、この結果の相関係数は0.956であった。

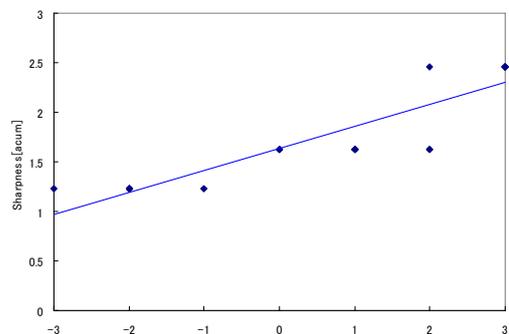
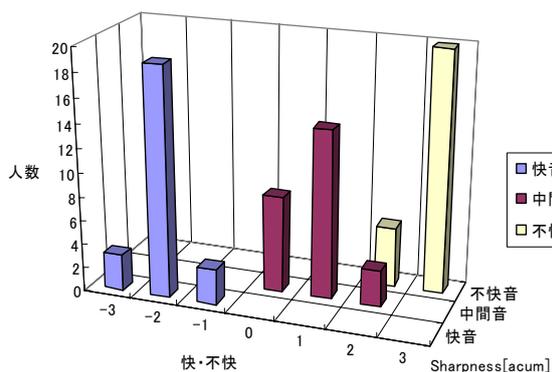


(a) アンケート評価の人数分布

(b) 快・不快評価との相関

図 1 4 ラウドネスの増減に対するアンケート評価の変化

同様に、図 1 5 に快・不快評価とシャープネスの増減に関する集計結果を示す。ここで抽出した試供音は、シャープネス以外の心理音響評価量が同様のものである。この図から、シャープネスが高いほど不快と感ずることが分かる。なお、相関係数は 0.913 となった。



a) アンケート評価の人数分布

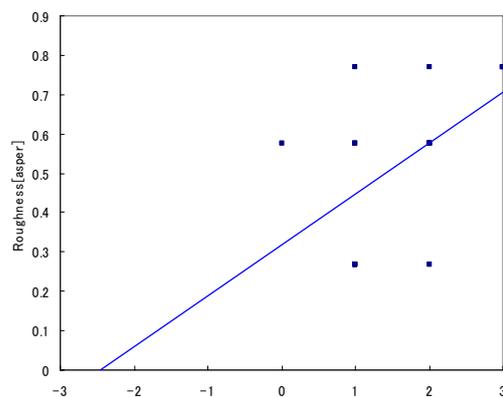
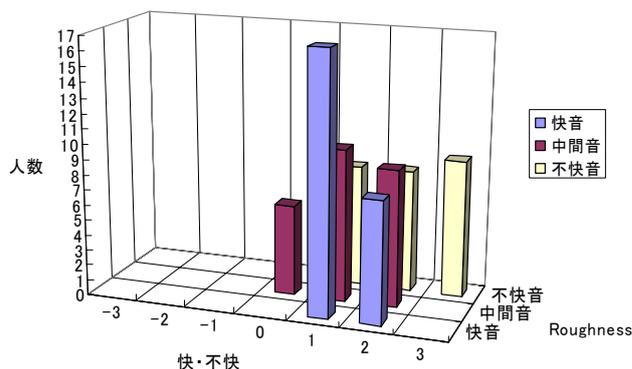
(b) 快・不快評価との相関

図 1 5 シャープネスの増減に対するアンケート評価の変化

同様に、図 1 6 に快・不快評価とラフネスの増減に関する集計結果を示す。ここで抽出した試供音は、ラフネス以外の心理音響評価量が同様のものである。この図から、ラフネスと不快の因子はあまり関係がないことが分かる。なお、相関係数は 0.537 となった。

また、図 1 7 には快・不快評価と変動強度の増減に関する集計結果を示す。ここで抽出した試供音は、変動強度以外の心理音響評価量が同様のものである。この図から、変動強度と不快の因子はあまり関係がないことが分かる。なお、相関係数は 0.493 となった。

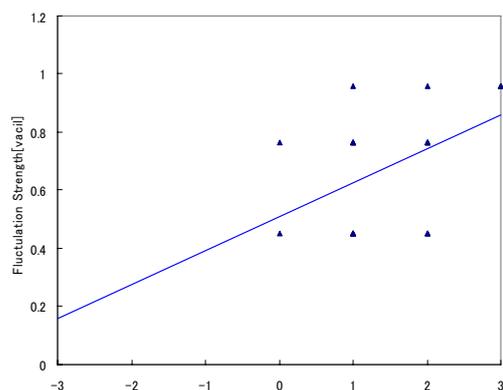
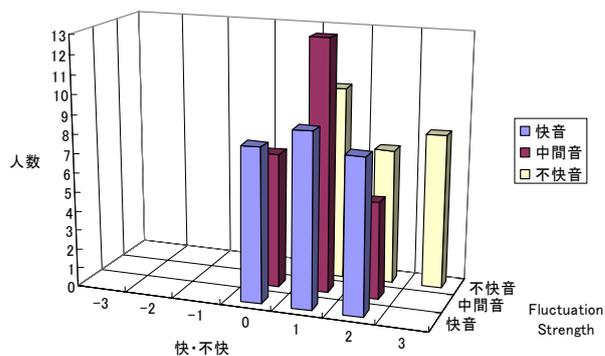
以上のことより、ある音を聞かせたときには、ラウドネスが高いほど不快と感ずる相関が見られ、シャープネスについても同様の傾向を見ることが出来る。しかし、ラフネスと変動強度は先ほどの 2 つのパラメータよりも高い相関が見られず、快・不快にそれほど影響を与えていないものと思われる。つまり不快と感ずる因子には、ラウドネスとシャープネスが大きく影響しているといえる。



a) アンケート評価の人数分布

(b) 快・不快評価との相関

図16 ラフネスの増減に対するアンケート評価の変化



a) アンケート評価の人数分布

(b) 快・不快評価との相関

図17 変動強度の増減に対するアンケート評価の変化

5. おわりに

本研究においては、音の定量評価手法である心理音響評価量を用い、人の感性における快・不快との関係について調査した。一般に快適な音といわれるクラシック音楽や機械騒音に近いノイズ音などを用いて、アンケート調査と心理音響評価を併用したところ、主に音圧の増減指標であるラウドネスと音の高さ・鋭さに関するシャープネスの2点について、その増加と人の不快感覚について強い相関が得られた。したがって、音響デザインパラメータとしてこれらが有効であると考えられる。今後は、脳波などの生体情報を用いた生理指標との比較を行い客観評価を用いた詳細な検証を行うとともに、実音源・実空間における検証が必要であるといえる。

6. 参考文献

1) 小野測器技術レポート，“音質評価とは”，小野測器Webページ

http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/soundquality/index.htm