

音質評価とは



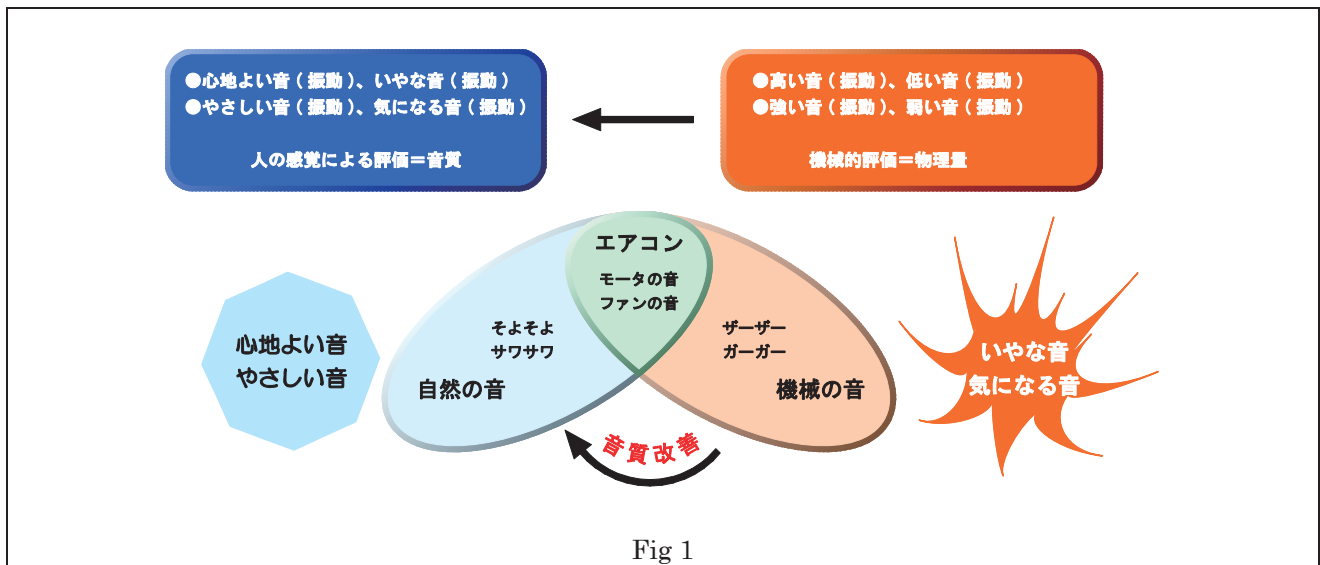
改訂：2011/01/24

株式会社 小野測器

1. はじめに

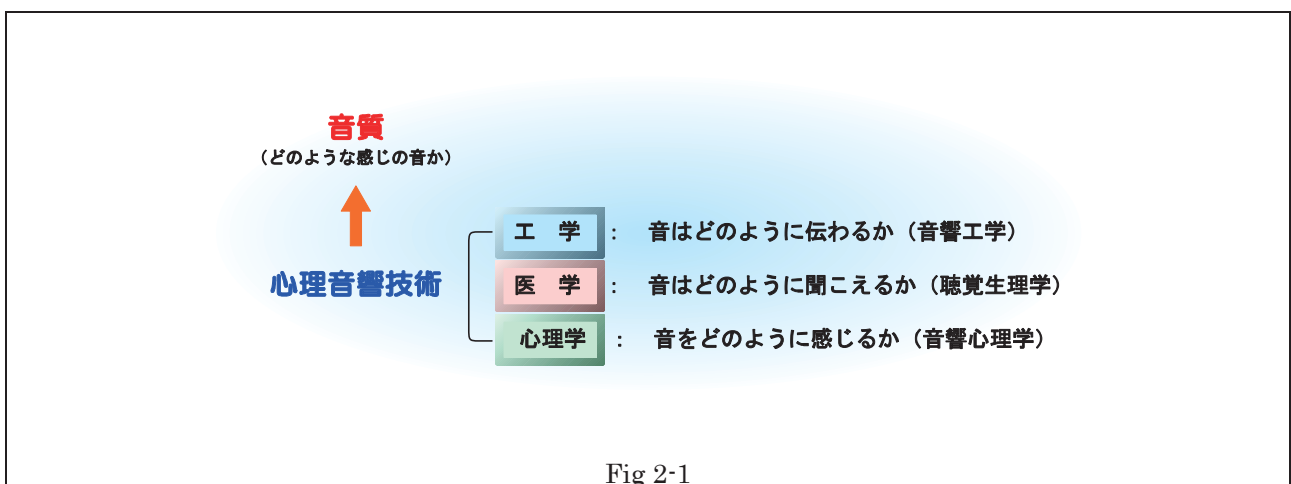
音質評価とは、心理音響技術を使用して、音を人による感じ方に合わせて定量的に解析する技術です。

従来の物理量に基づく機械的評価に対して、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プラスしてゆくと考えられます。例えば、現在のエアコンは以前よりもだいぶ静かになりましたが、その音はまだ機械的です。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造りかえることも可能です。音質評価技術は、この他にも、自動車などの乗り物や事務機器など、様々な分野へ今後の応用が期待できます。



2. 心理音響技術とは

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ます。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す。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、今後の研究課題が残されています。しかし、これらは将来解決され、さらに実用化されていくと考えられます。



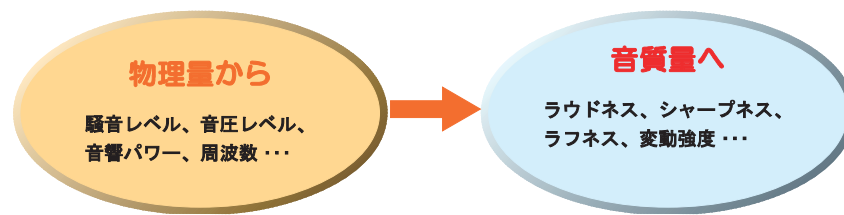


Fig 2-2

3. 音質評価の普及

心理音響技術に基づく音質評価は、はじめ自動車の車室内音を評価するために用いられました。

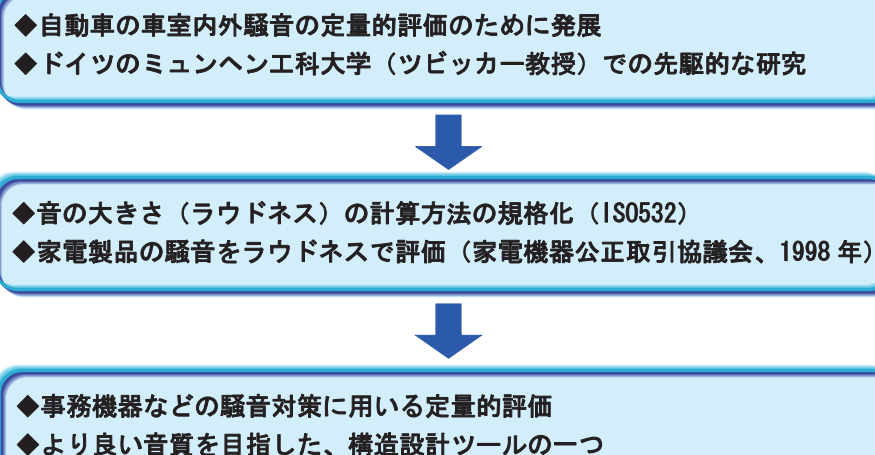


Fig 3

音の大きさの評価量であるラウドネスは ISO で規格化されています。また、自動車業界の他にも心理音響評価量が注目されています。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ます。その他、事務機器業界などでも騒音対策に用いる定量的な評価量として注目されています。

学問としての心理音響技術は、次ページ表のように 1930 年代から研究されています。心理音響評価量の 1 つであるラウドネスは、先に述べたように ISO で規格化され（定常音のみ）、広く使われ始めています。

このラウドネスは様々な人達の研究が蓄積され、ドイツのツヴィッカーによって今のラウドネスにまで玉成されました。その他の心理音響評価量の多くは比較的近年に考案されています。その多くがツヴィッカーの研究室と関係がある研究者によって提案されたものです。現在もいくつかのパラメータが研究されており、今後ますます発展して行く技術です。

1930 年代	純音ラウドネスの測定 / H. Fletcher, W.A. Munson
1940 年代	ラウドネスへの時間効果の測定 / W.R.Garner
1950 年代	聴覚の生理学的研究の開始 / G. Bekesy 純音ラウドネスの再測定 / D.W. Robinson, R.S. Dadson ラウドネスの計算方法 / L.L. Beranek
1960 年代	ラウドネスの計算方法 / S.S.Stevens ラウドネスとマスキング / E. Zwicker ラウドネスに及ぼす時間構造の影響 / E. Zwicker
1970 年代	ラウドネスの計算方法 / E. Zwicker シャープネスの提案 / G. Bismarck ラフネスの提案 / E. Terhardt
1980 年代	変動強度の提案 / H. Fastle 好ましさの提案 / W. Aures

表 1

4. 音の知覚（聴感）と音質評価システム

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、たくさん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す。聴感実験とは実際に人間に音を聞かせ、どのように感じたかをたずねて、その反応を調べることです。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います。そこで、たくさんの人間に何回も試験を行ってそれを統計処理することで心理音響評価量が求められてきました。

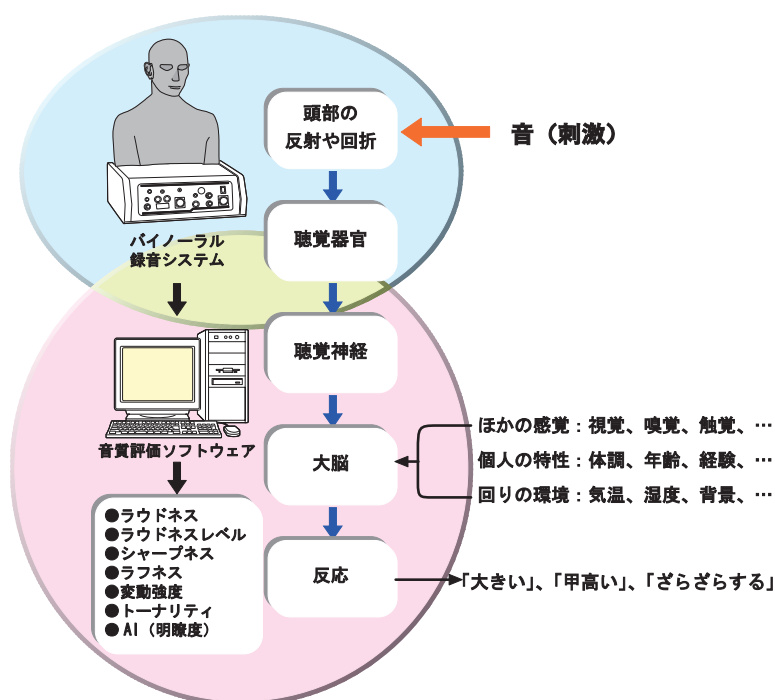


Fig 4

それでは、心理音響技術はなぜ必要なのでしょうか。

機器から発生する音は、従来、物理量（音圧レベル、騒音レベル、パワーレベル、1/3 オクターブスペクトル、FFT スペクトルなど）に基づいた評価・対策が中心でした。しかし、実際に音を聞くのは人間です。また、物理的な音の対策、一般的には物理量を下げる方向で行われますが、そこには限界があります。もちろん、非常に高価で大きく、重い材料で覆うなどしてもよければ全く音を消すことも不可能ではありませんが、現実的ではありません。それに音を無くすことが必ずしも心地よい環境を創り出すとは限りません。そこで、音圧などの物理量を単純に下げるのではなく、人間が聞いた時にどう感じるかを定量化したものが、心理音響評価量と呼ばれるものです。

心理音響評価量は物理量と関係付けられていますので、音質評価量からどのようにしたらその音質を改善できるかを知る手がかりが得やすくなっています。このようにして、機器の設計へとフィードバックしていく手法が、音響設計と呼ばれる方法です。

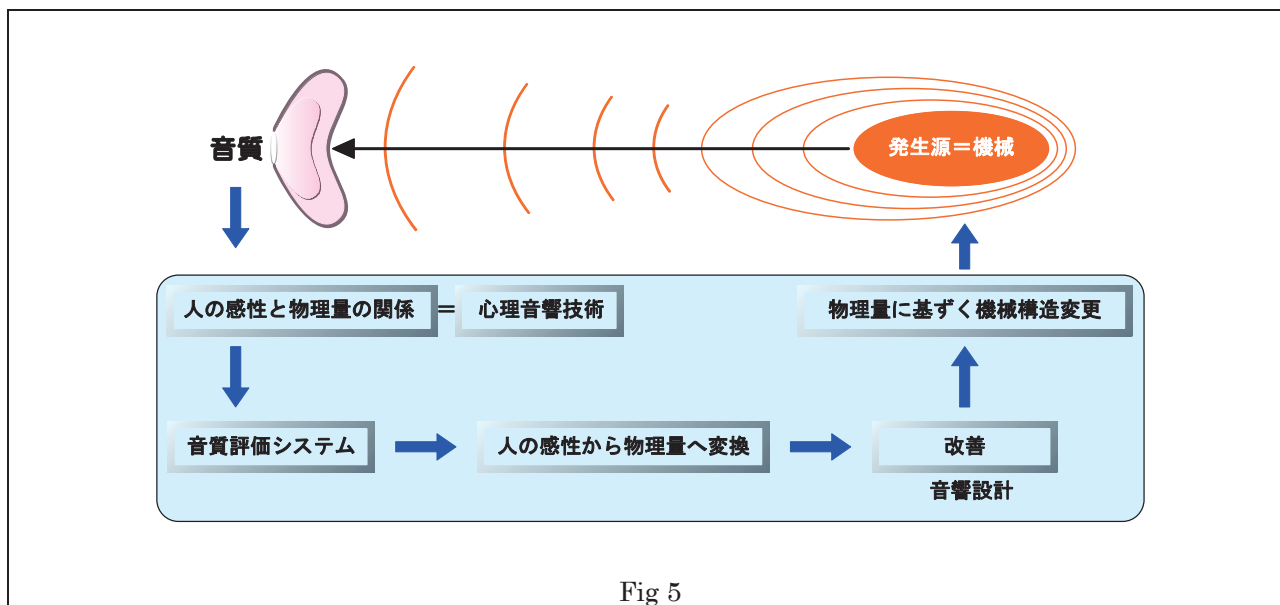


Fig 5

小野測器の SQ シリーズで算出する心理音響評価量には主にラウドネス、シャープネス、ラフネス、変動強度の4つがあります。さらにトーンリティと呼ばれる純音感をあらわす評価量や、AI と呼ばれる語音明瞭度をあらわす評価量も算出できます。

心理音響評価量	単位	解説
ラウドネス	sone	音の大きさ 定常音については ISO 532B で規格化
ラウドネスレベル	phon	ラウドネスを対数表示 $L = 10 \cdot \log_2 (N) + 40$
シャープネス	acum	甲高さ 低域と高域の音のバランスが高域側に偏ったときに感じる
ラフネス	asper	粗さ感 ららら、ぶるぶる ラウドネスが短い周期で変動する時に感じる
変動強度	vacil	変動感 滑らかさ感の逆 ラウドネスがゆっくりとした周期で変動する時に感じる

トーンリティ	tu	純音感 音の中にどれだけ純音成分が多く含まれているかを表す
AI	%	語音明瞭度 語音の明瞭性を評価するための評価量

表 2

音質評価をご理解いただくために、実際の解析例を紹介します。

下図に示しているのは音の大きさが異なる 6 つの機械音に対する分析例です。

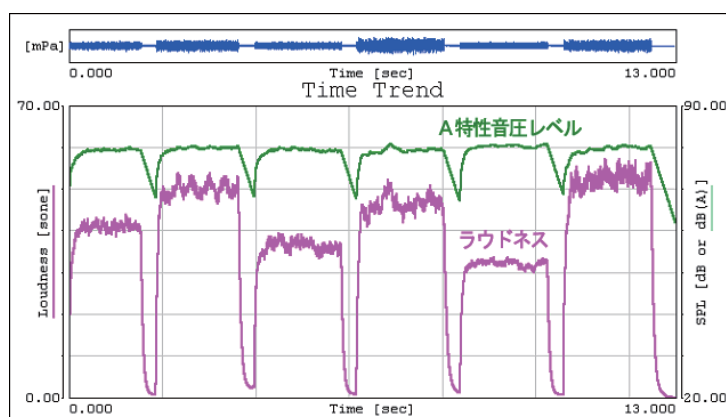


Fig 6

上側の線（緑色）はA特性音圧レベル（騒音レベル）で分析したもので、6つの音は全て同じ値を示しています。それに対し、下側の線（ピンク色）は音の大きさを示す評価量の「ラウドネス」で分析した結果で、6つの音の違いが現れています。実際にこれらの音を私達が聞いてみると、下側のラウドネスの結果と同様に音の大きさがそれぞれ異なって聞こえます。この例からも、人間が聞いたときの音の大きさはA特性音圧レベルのような、音圧のみに基づいた評価量だけでは評価することができないということが分かります。

次は、バイク 2 台が順に通過する音です。

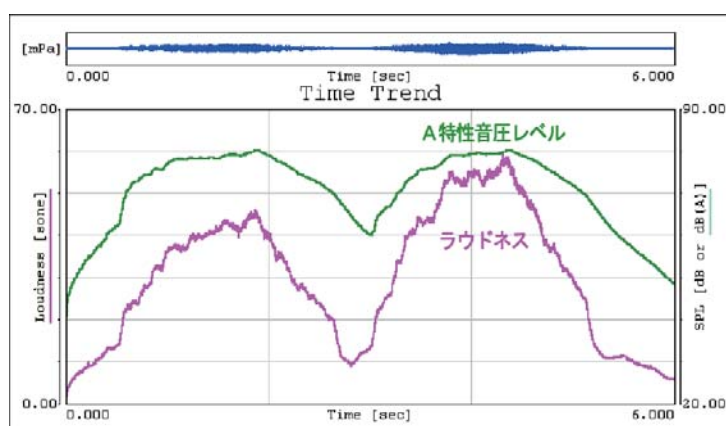


Fig 7

この音についても先ほどの例のように A 特性音圧レベルおよびラウドネス分析を行いました。

A 特性音圧レベル（騒音レベル）で分析した上側の線（緑色）では 2 台のバイクの値が同じです。それに対し、「ラウドネス」で分析した下側の線（ピンク色）では 2 台目に通過するバイクの音の方が大きい値となっています。実際にこれらの音を聞いてみるとラウドネスの結果と同様に 2 台目の音の方が大きく聞こえます。

今度は、2 つの機械音です。

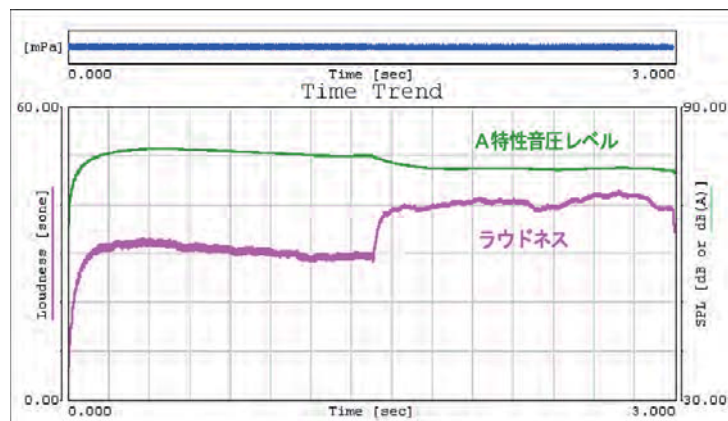


Fig 8

1 つ目の音よりも 2 つ目の音のほうが大きく聞こえます。しかし、A 特性音圧レベルを調べてみると後の音のほうで値が小さくなっています。A 特性音圧レベルで評価した場合の大小関係と、実際に聞いた場合の大小関係が逆になることもある、という例です。

では、なぜ音圧の値と実際に聞こえる音の大きさが対応しないのでしょうか。

5. ラウドネス計算の基となる考え方

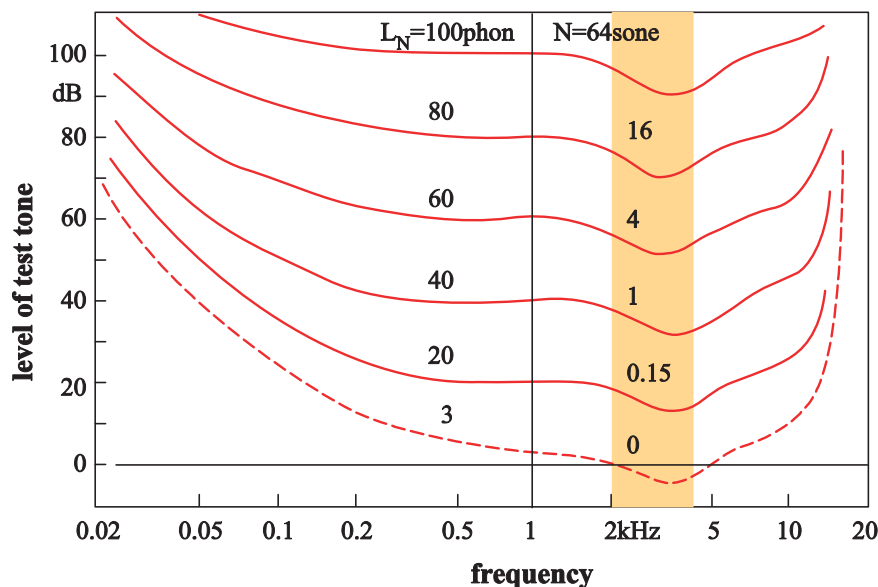
人間が音の大きさを感じかたに影響するものとして、次の 3 つの現象があります。

- | | |
|---------------|-------------|
| 1. 耳の周波数特性 | |
| 2. スペクトルマスキング | 周波数軸上で起こる現象 |
| 3. テンポラルマスキング | 時間軸上で起こる現象 |

ラウドネスの計算をする場合、この 3 つの現象を考慮する必要があります。

5.1 等ラウドネス曲線（純音）

ラウドネスの計算に重要となる要素のひとつが聴覚の周波数特性です。純音に対する等ラウドネス曲線を下に図示しましたが、それを見ていただくと、橙色で示した 2kHz から 4kHz で感度が良く、低音で感度が悪くなる特性を持つことが分かります。



等ラウドネス曲線

Fig 9

また、この特性は音圧によって異なります。上側データの高い音圧の場合には比較的平坦な特性となり、下側データの音圧が低い場合には低音における感度がより小さくなります。

人間の聴覚の周波数特性はとても複雑です。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ます。

ちなみに、A 特性カーブは、聴覚の周波数特性と似た特性のフィルタを使用しています。ただし、中くらいの音圧の場合の等ラウドネス曲線（図中、40phon の曲線）に相当するフィルタを使用しているため、人間が聞いたときの音の大きさとは異なる場合があります。

5.2 スペクトルマスキング（Spectrum Masking）

スペクトルマスキングの影響もラウドネスの重要な要素です。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（マスクされ）聞こえなくなってしまう現象です。

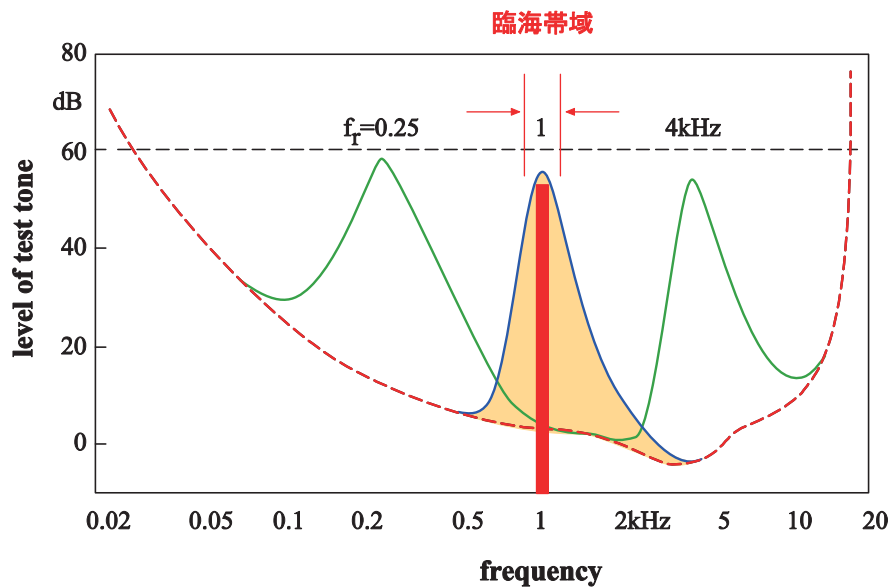


Fig 10

今、1kHz の狭帯域雑音を聞いているとします。この時、上のグラフ中の影をつけた範囲は、1kHz の狭帯域雑音によってマスクされています。この範囲に新たに音を加わったとしても音の大きさは増えません。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ります。スペクトルマスキングのカーブの形は周波数によって異なります。また、音圧が異なるとカーブの形が異なります。スペクトルマスキングは非線型で複雑な現象です。また、マスキングによって生じるカーブはバンドパスフィルタのような形をしています。このフィルタの通過帯域幅に相当する範囲を、臨界帯域（単位：Bark）と呼びます。

スペクトルマスキングが起こる理由は、耳の構造にあります。次図は耳の構造を示したものです。耳がいから入った音は外耳道を通り、鼓膜、耳小骨を振動させて蝸牛に至ります。蝸牛は音の周波数分解を簡単に行っている器官で、管状をしており、それがカタツムリの殻のようなぐると巻いた形をしています。

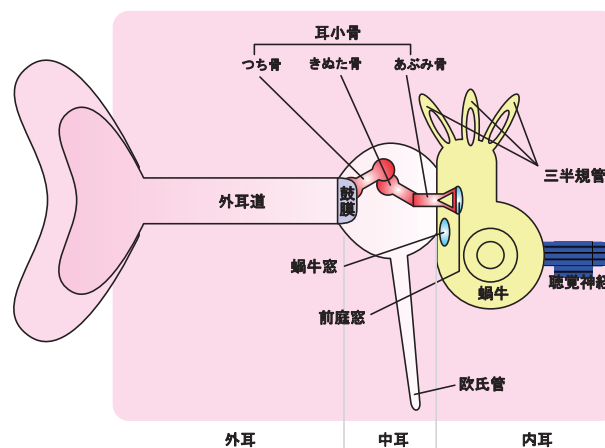
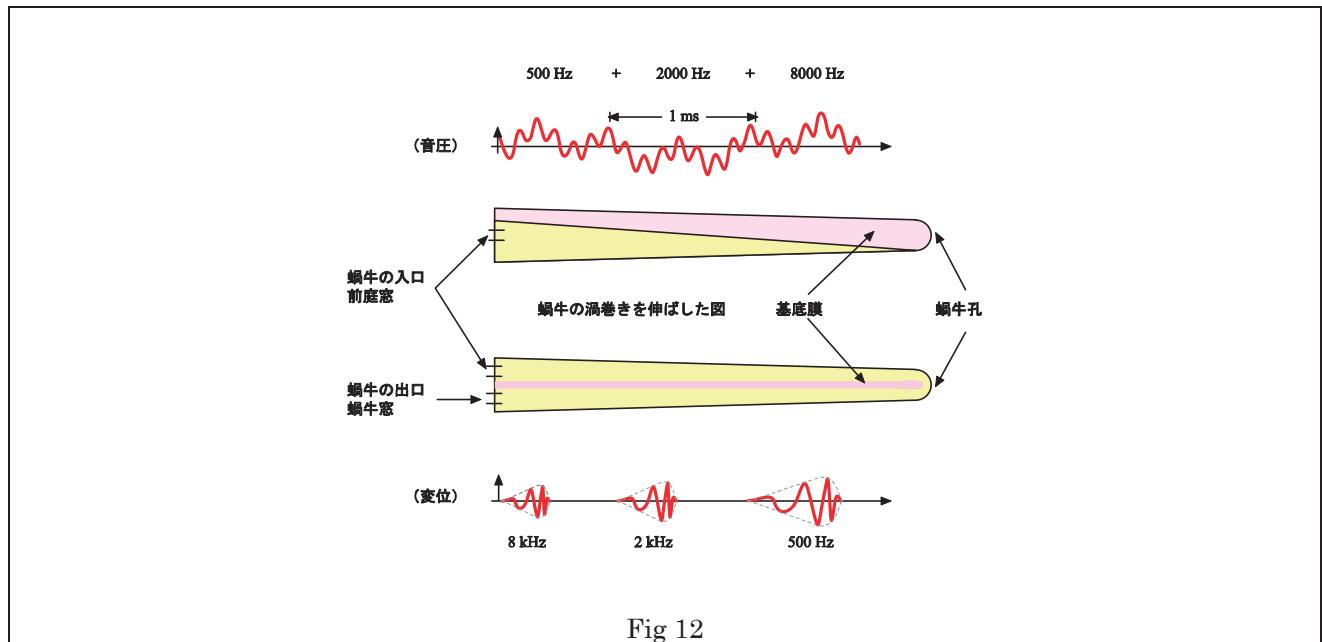


Fig 11

この渦巻き管をひきのばし、その断面を示したのが次の図（影部分）です。



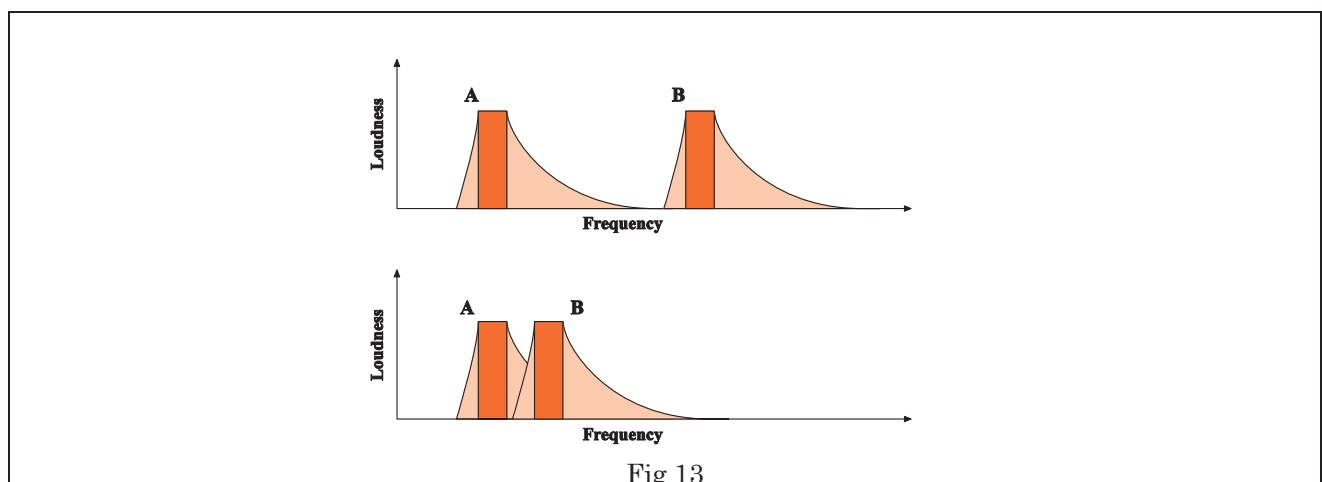
蝸牛内部は基底膜という膜で上下 2 つに分けられています。蝸牛に到達した振動はこの膜を振動させながら蝸牛入口（左側）から奥（右側）へ進み、基底膜上にある神経細胞を興奮させます。

このときある特定部分の基底膜が特に大きく振動をします。大きく振動する部分は入ってくる音の周波数によって異なり、高い周波数の音の場合には入口付近で、低い場合には奥のほうで大きな振幅となります。したがって音の周波数が異なれば興奮する神経も異なり、このために高い音が低い音かを感じることができるのです。

基底膜は膜上の、ある 1 点のみが振動するわけではなく、幅を持って振動します。そのため、例えば 1kHz の音を聞いたとしてもそのまわりの周波数に対応する神経も興奮します。この時にさらに 1kHz よりも少しだけ高い周波数の音を聞いたとしても、すでに興奮している神経細胞はさらに興奮することはできず、音の大きさはさほど変わったようには聞こえません。これがスペクトルマスキングの現象です。

5.3 スペクトルマスキングと音の大きさ

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で説明します。



前のページの上の図は、A と B の 2 つの音が周波数軸上で、離れている場合です。四角い部分がそれぞれの音で薄く影をつけた部分がマスキングされている部分です。音の大きさ（ラウドネス）は、これらの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 倍の大きさに感じます。一方、下の図は 2 つの音の周波数が近い場合です。2 つの音によってマスキングされた部分は重なっています。その結果、B が加わっても面積は A のみが存在する場合とさほど変わらず、音の大きさは少し増えるのみです。

これらの音のエネルギーは、上の図も下の図もどちらも 2 倍ですから音圧レベルで比較すると、同じ値となります。

5.4 ラウドネス計算用チャート

これらの現象を考慮して音の大きさを計算するために、ISO 532B ではラウドネスをチャートを使って求めています。

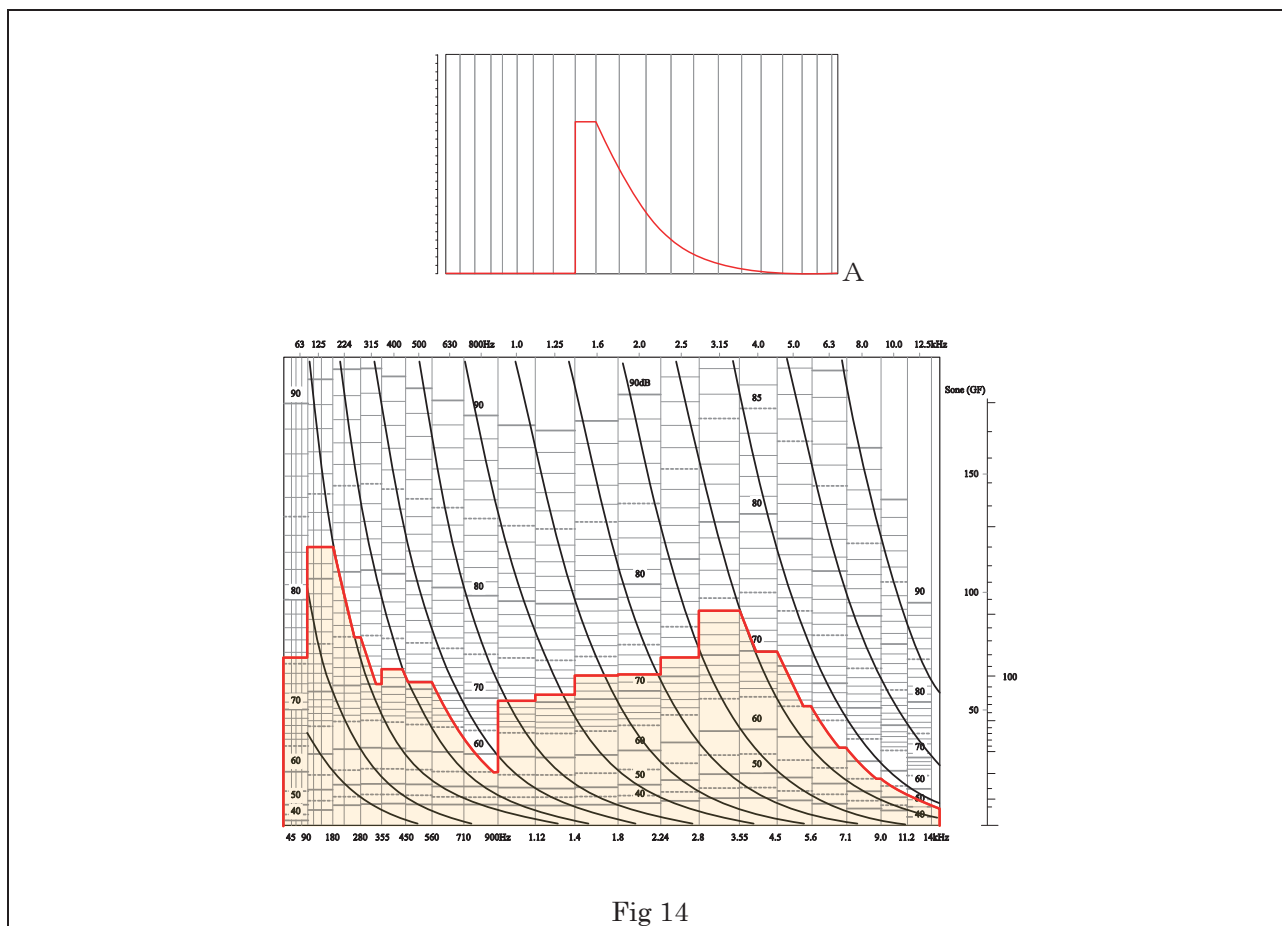


Fig 14

周波数マスキングを模擬するためには、上図 A のようなモデルを用います。周波数マスキングカーブはその音よりも高い周波数に向かうカーブのほうが低い周波数に向かうカーブよりも傾きが緩やかで周囲に及ぼす影響が大きいため、上側のカーブのみを考慮しています。

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、図のようなチャートに書き込みます。描かれ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ります。

音圧や音場の状況に応じて ISO 532B では 10 種類のチャートを用意しています。適したチャートを使用してラウドネスを求めます。

5.5 臨界帯域幅

5.4 のチャートでは、これまでに述べた、聴覚の周波数特性、スペクトルマスキングが考慮されています。ここで、もうひとつ考慮すべきなのは、聴覚の周波数分解能です。

聴覚の周波数分解能はほぼ 1/3 オクターブバンド幅に一致しています（音の大きさを議論する場合です。音の高さの分解能はもっと細かくなります）。ところが、500Hz よりも低い音域では、1/3 オクターブよりも幅が大きく、分解能は粗くなります。

そこで、ISO 532B の方法では、低域のバンドは聴覚の分解能に応じてバンド幅をひろげるために足し合わせを行っています。ISO のチャートで、低域の縦線の間隔が狭くなり、4 バンドや 3 バンドまとまって描かれているのはそのためです。

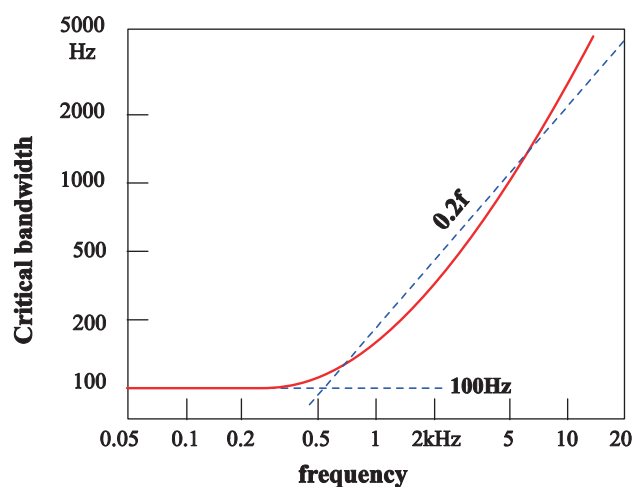


Fig 15

5.6 時間マスキング

ラウドネスのもう一つの重要な要素となるのはテンポラルマスキングです（時間マスキング、経時マスキングとも言います）。これは時間軸上で起こるマスキングのことです。

例えば、ある音が鳴り止んだ直後に別の音を短く鳴らした場合、後の音が前の音に掻き消されて聞こえなくなってしまう現象です。これははじめの音を聞いているときの耳の中の膜の振動がすぐに止まらずに、徐々に減衰する為です。また膜に接している神経の興奮も徐々に小さくなっていきます。興奮が十分に減衰する前に次の音が鳴ったとしてもその音は聞こえません。

ところで ISO で規格化されているラウドネスの計算方法には、このテンポラルマスキングの影響が考慮されていません。したがって ISO の方法によるラウドネスでは定常音の評価しか行うことができません。

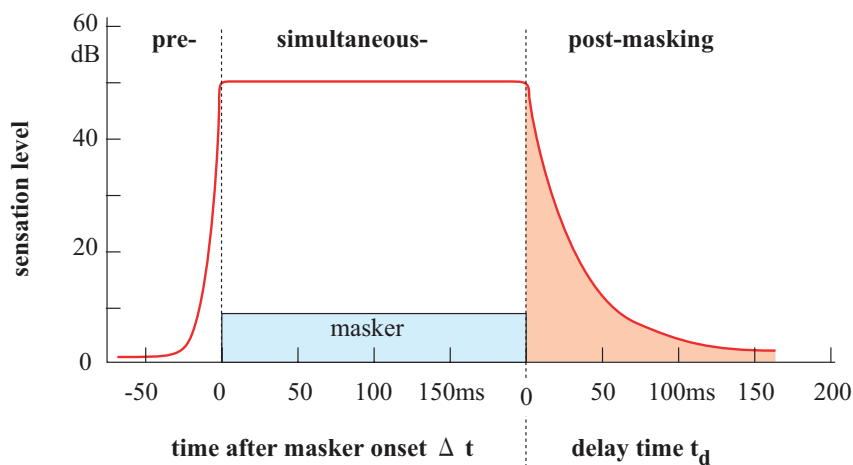


Fig 16

5.7 小野測器の音質評価システム

小野測器の音質評価システムは、ISO 532B に基づいた方法でラウドネスを計算しています。ただし、ISO では時間的に変動する音に付いては評価できないため、ISO の方法に加えてテンポラルマスクング（ポストマスクング）の影響も計算に組み入れています。なお、計算結果は 2ms ごとに算出されます。

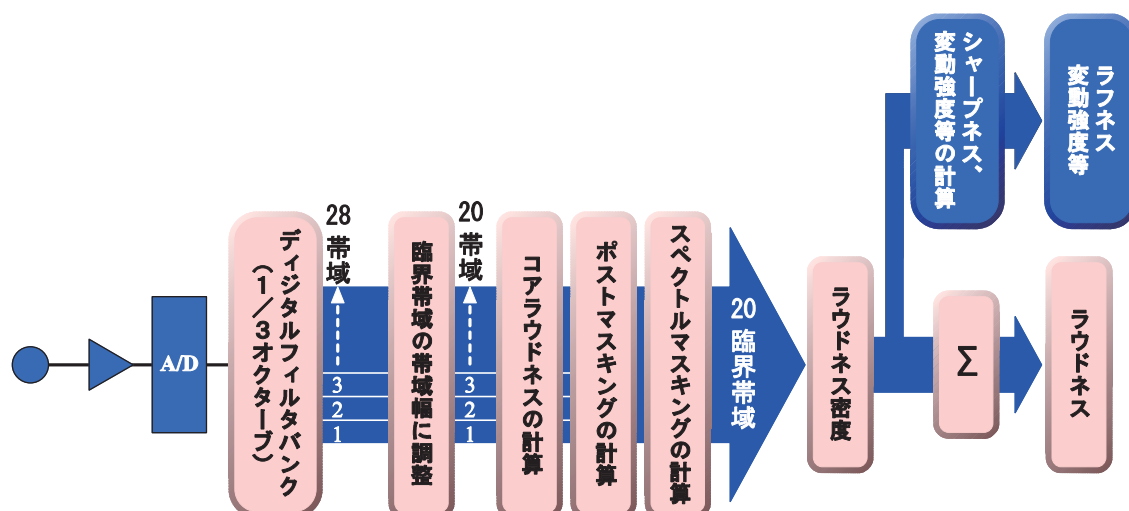


Fig 17

5.8 ラウドネスの基準

ラウドネスの基準となる音は、音圧レベル 40 dB で周波数 1kHz の純音です。この時、1 sone となります（ラウドネスレベルは 40 phon）。この音と同じ大きさに聞こえる音は 1 sone、2 倍の大きさに聞こえる音は 2 sone となります。

6. シャープネス計算の考え方

シャープネスは、高い音と低い音のバランスによって決まります。シャープネスの計算は、ラウドネスのデータをもとに行われます。

1. ラウドネスのスペクトルを描く
2. スペクトルの面積の重心を求める
3. 周波数軸上の右側（高音側）にいくほど Sharpness が高くなる

まずはラウドネスを計算します。計算したラウドネスのスペクトルを描きます。

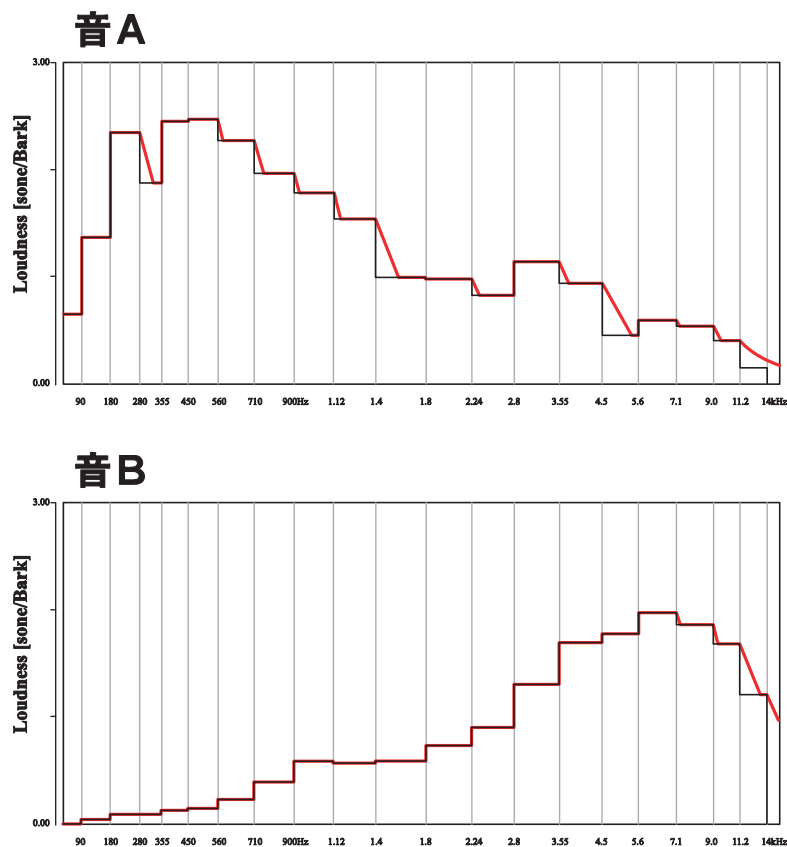
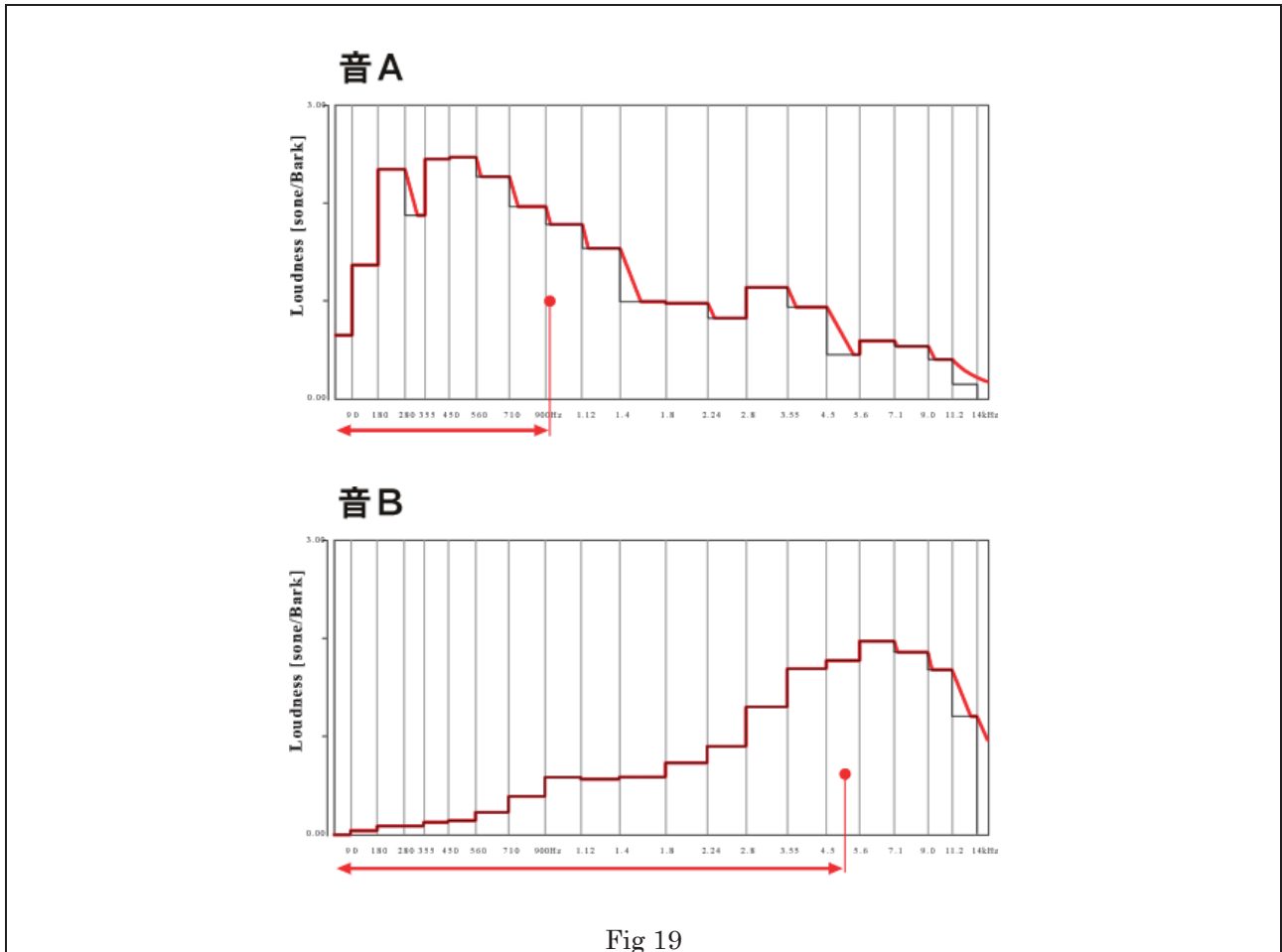


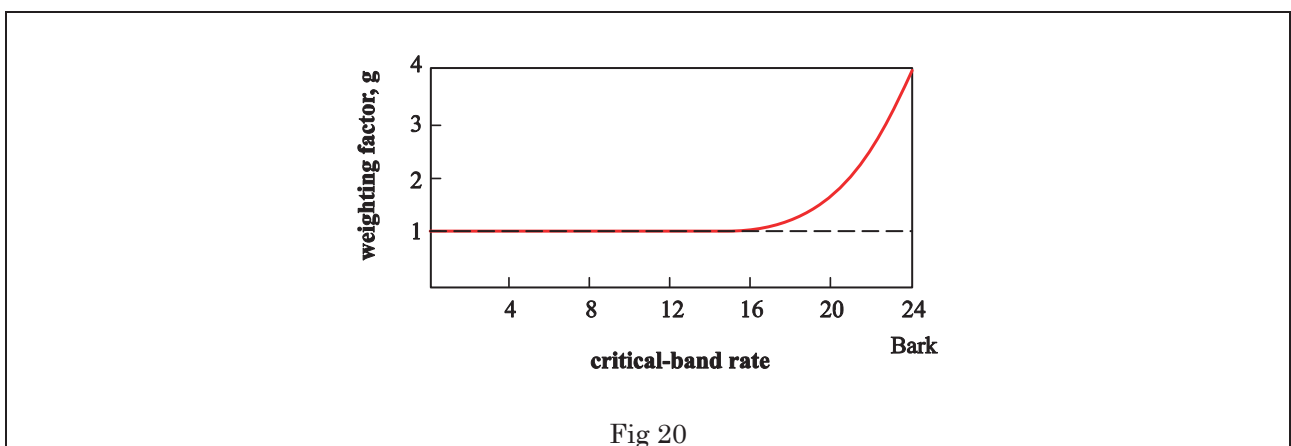
Fig 18

音 A は低い音、音 B は甲高い音です。純音であれば、周波数を比較することでどちらがどの程度高いかを数値で比較できますが、広い範囲に周波数成分が存在するため、簡単には比較できません。そこで、シャープネスを計算してどちらが甲高いかを表します。

はじめに、ラウドネススペクトルの面積（図の赤色の曲線の下側の面積です）の重心を求めます。次に、重心から下側に向かって垂線を下ろし、周波数の原点（0Hz、0Bark）から垂線を下ろした点までの距離を求めます。この距離が長いほどシャープネスは大きくなります。



シャープネス計算では、基本的には、各データ下側の赤い矢印 (⇔) の長さを求めています。しかし、これだけでは、聴感と多少合わない場合があります。これを補正するために、重み係数を使用します。ラウドネスに対し、周波数ごと（臨界帯域ごと：critical-band rate）に重み係数をかけ、その後にラウドネススペクトルの重心を求めます。



6.1 シャープネスの基準

シャープネスの基準となる音は、1kHz を中心とした狭帯域雑音で、帯域幅が 1 Bark の音圧レベル 60dB です。この時、シャープネスは 1 acum となります。

7. 変動強度計算の考え方

人間は、音の大きさが変動する場合（大きい小さいを繰り返す）と、周波数が変動する場合（高い低いを繰り返す）に変動感を感じます。この変動の周期が非常にゆっくりの場合には変動感（ふらつき感）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ます。一番変動感を強く感じるのは、一秒間に 4 回の速さで変動をする場合（変調周波数が 4 Hz）と言われます。さらに変動の周期が速くなると、変動感は次第に小さくなっていきます。

変動強度の計算では、ラウドネスの時間履歴にどれだけ変動成分が含まれているかを調べています。ラウドネスが変調周波数 4 Hz に近い場合に、変動強度が大きくなります。

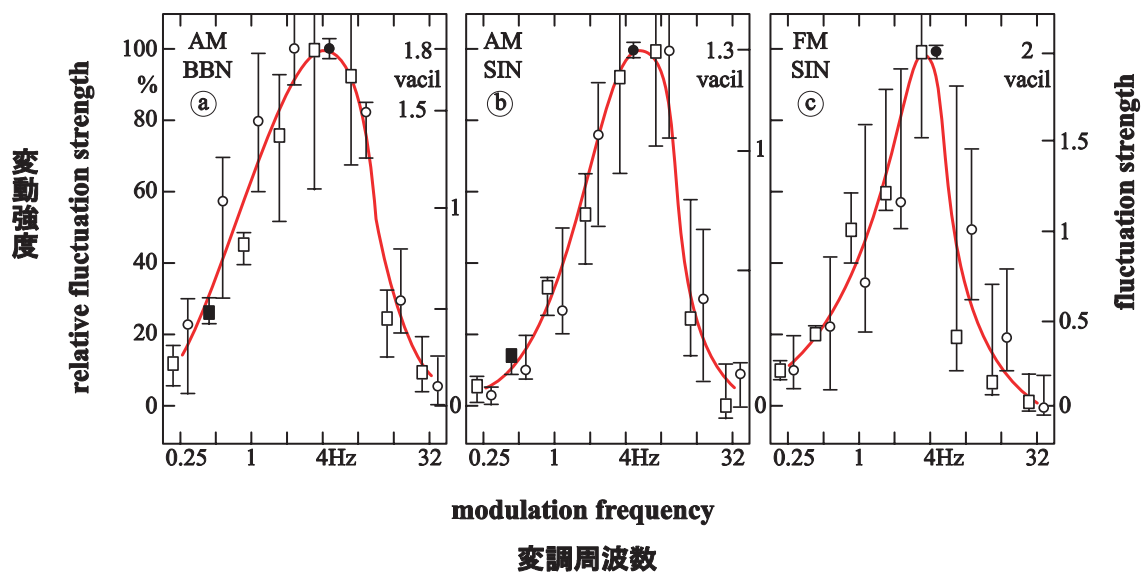


Fig 21

7.1 変動強度の基準

変動強度の基準となる音は、1 kHz の純音を変調周波数 4 Hz で 100% AM 変調し、音圧レベルを 60 dB とした音です。この時、変動強度は 1 vacil となります。

8. ラフネス計算の考え方

ラフネスの場合も、音の大きさや周波数が変調している場合に感じます。ただし、その変調周波数はもっと高く、一秒間に 70 回ほど（変調周波数が 70Hz）の速さで変調をする場合に最も「粗い」と感じます。音を「粗い」と感じるとき、人間の聴覚では、その音の変調を聞き取っています。しかし、変動している音の一つ一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感として感じます。

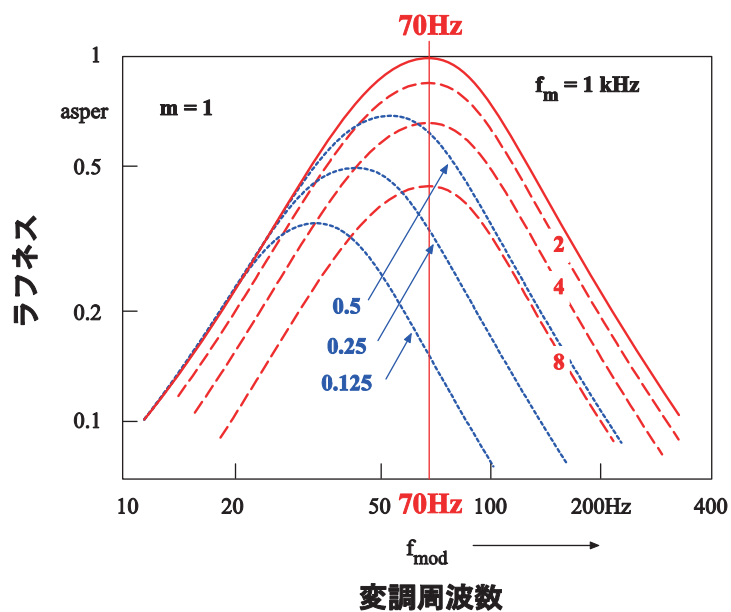


Fig 22

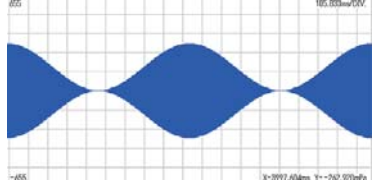
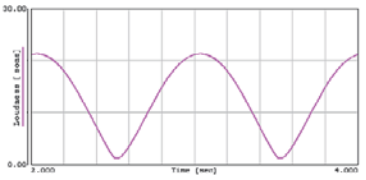
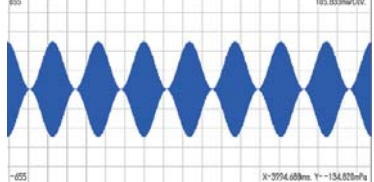
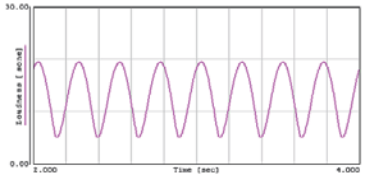
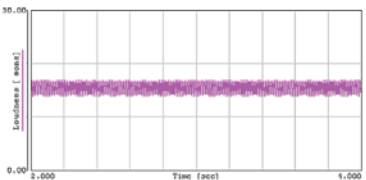
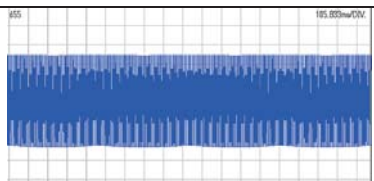
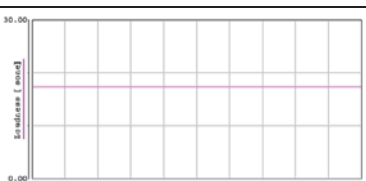
ラフネスの計算では、ラウドネスの時間履歴にどれだけ変動成分が含まれているかを調べています。ラウドネスが変調周波数 70Hz に近い場合に、ラフネスが最も大きくなります。

8.1 ラフネスの基準

ラフネスの基準となる音は、1 kHz の純音を変調周波数 70 Hz で 100% AM 変調し、音圧レベルを 60 dB とした音です。この時、ラフネスは 1 asper となります。

9. 変動感とざらざら感

同じ変調音でも、変調の周波数が異なると、聞いた印象も異なり、変動感を感じたり、ざらざらと聞こえたりします。

変調周波数 1Hz			山と谷を聞き分けられる ⇒変動感を感じる
変調周波数 4Hz			山谷を聞き分けられるが 谷がだいぶ埋まった ⇒変動感を感じる (変動強度最大)
変調周波数 70Hz			変動があることはわかる が山谷を聞き分けられない ⇒ざらざら感(ラフネス最大)
変調周波数 200Hz			変動があることも分らない 平坦になる ⇒滑らかに聞こえる

上図は、1kHzの純音を100%振幅変調した音の音圧波形とラウドネスの時間軸波形です。

変調の周期がゆっくりの場合（変調周波数1Hz）、音の大きさの山谷を聞き分けることができます。

変調周波数4Hzになると、山谷を聞き分けることは出来ませんが、テンポラルマスキングの影響で、谷が埋まってきます。変調周波数70Hzになると、谷部分はかなり埋まり、山谷は聞き分けられませんが、音のなかに変動の成分があることが分かります。この状態が、「粗い」と感じている状態です。さらに変調周波数が高くなり200Hzとなると、谷部分は完全に埋まり、ラウドネスの時間波形は平らになります。聴感的にも滑らかに聞こえ、ざらざら感はなくなります。

10. 解析例

ここでは興味有る例として、「掘削機音とシンフォニー」と「自動車エンジンの暖機運転前後音」を取り上げます。

10.1 掘削機音とシンフォニー音

次の分析例では、掘削機音と、シンフォニー（ベートーベン、交響曲第5番第4楽章より）を比較します。この2つの音は全く異なる音ですが、現在一般的に、音の評価に使われている1/3オクターブ分析を行った場合、下のデータの様にほぼ同様のスペクトルになってしまいます。

物理量 (1/3 オクターブスペクトル) ほぼ同じ

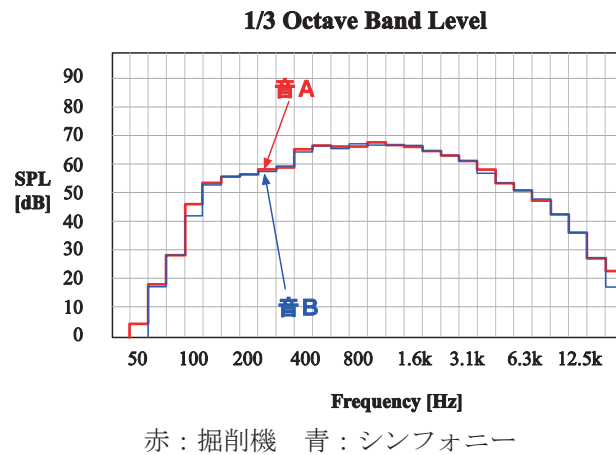
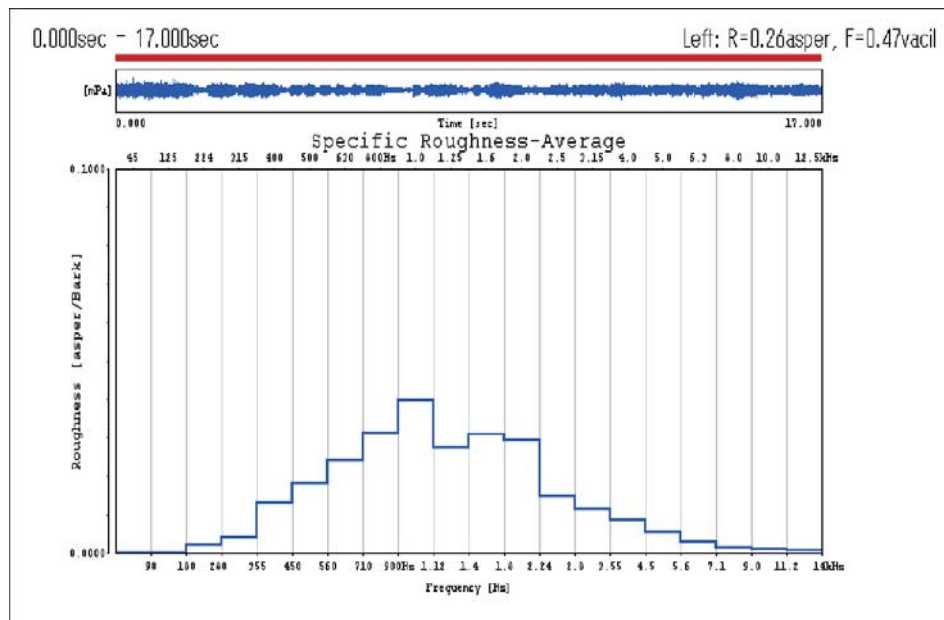
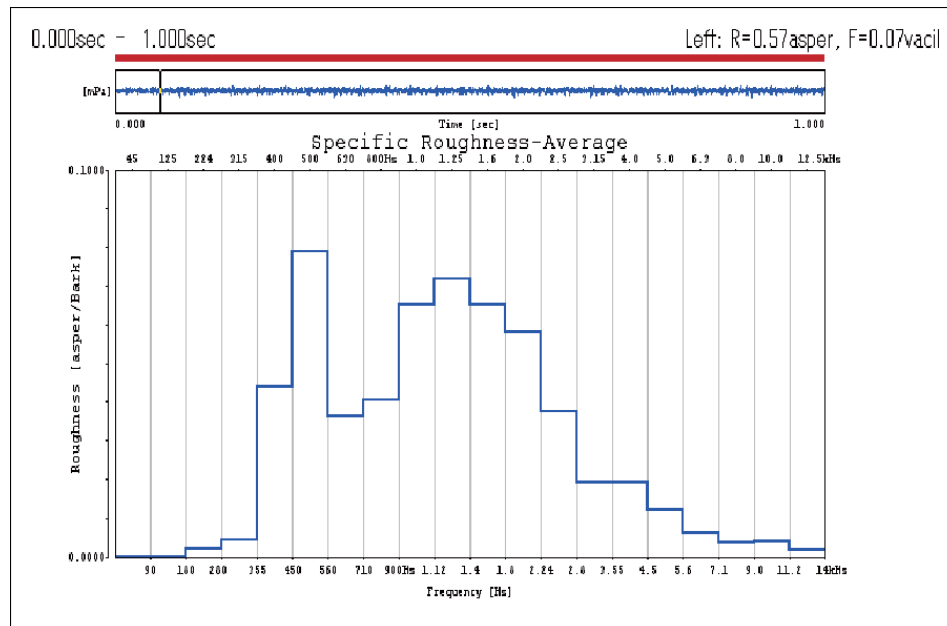


Fig 24

音質の評価パラメータには様々なものがありますが、ここでは音の粗さを表すパラメータであるラフネスを使ってこの2つの音を比較評価してみます。次のグラフはラフネスのスペクトルを表したものです。値が高いほど音の「粗さ」が大きいことを表しており、シンフォニーの音と掘削機の音の差を「粗さ」の差で明確にとらえることができます。



シンフォニー音

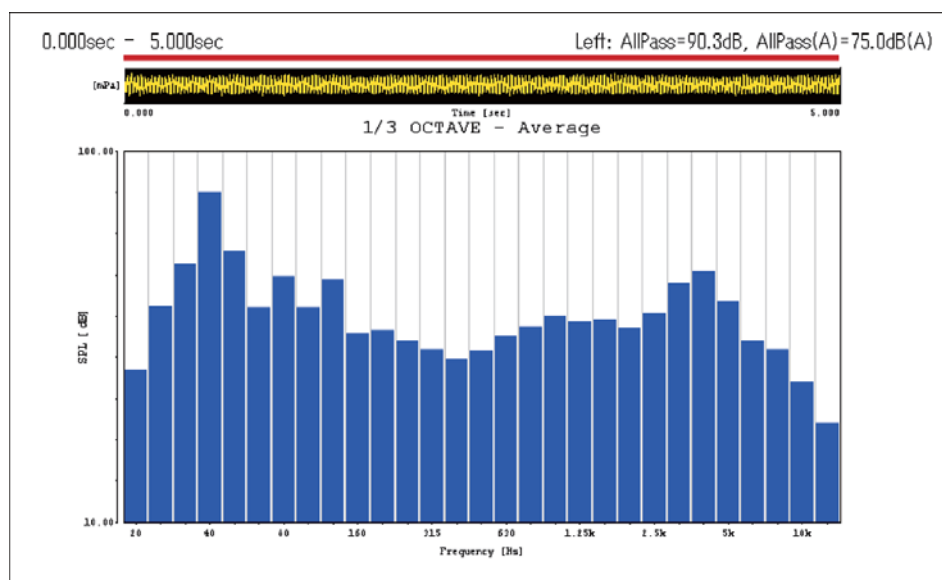


掘削機音

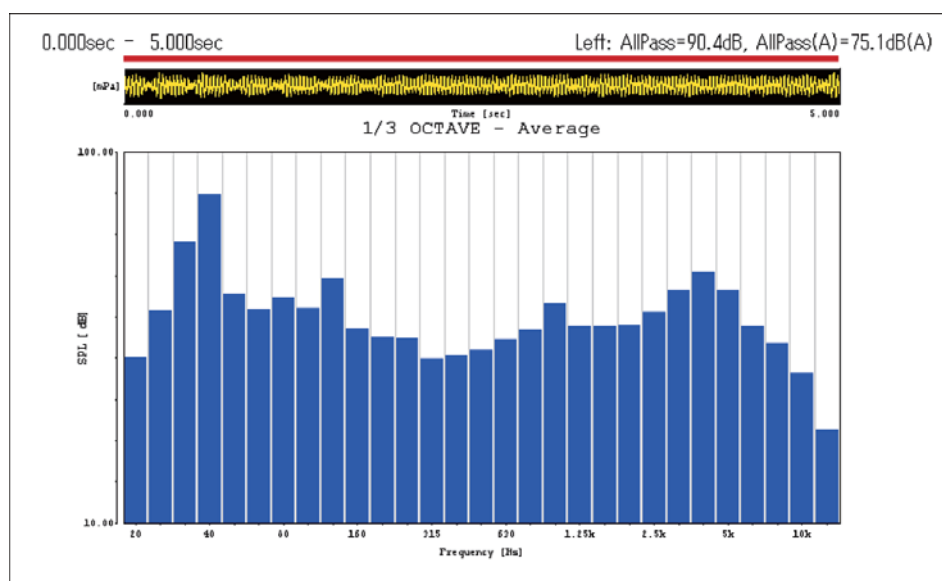
Fig 25

10.2 自動車エンジン暖機運転前後の音

次に、自動車のエンジン音について、音質評価を行った例を紹介します。自動車のエンジン音はエンジンの温度が低い場合と高い場合で音質が異なります。暖機運転前では甲高い音が耳について聞こえ、暖機運転後は小さくなってきます。これらの音を従来から用いられている1/3オクターブスペクトルで分析してみると、次に示すように、暖機運転前も後もほぼ同じスペクトルとなります。つまり、従来の方法では暖機運転前後の音質の違いを分析・評価することはできないことになります。



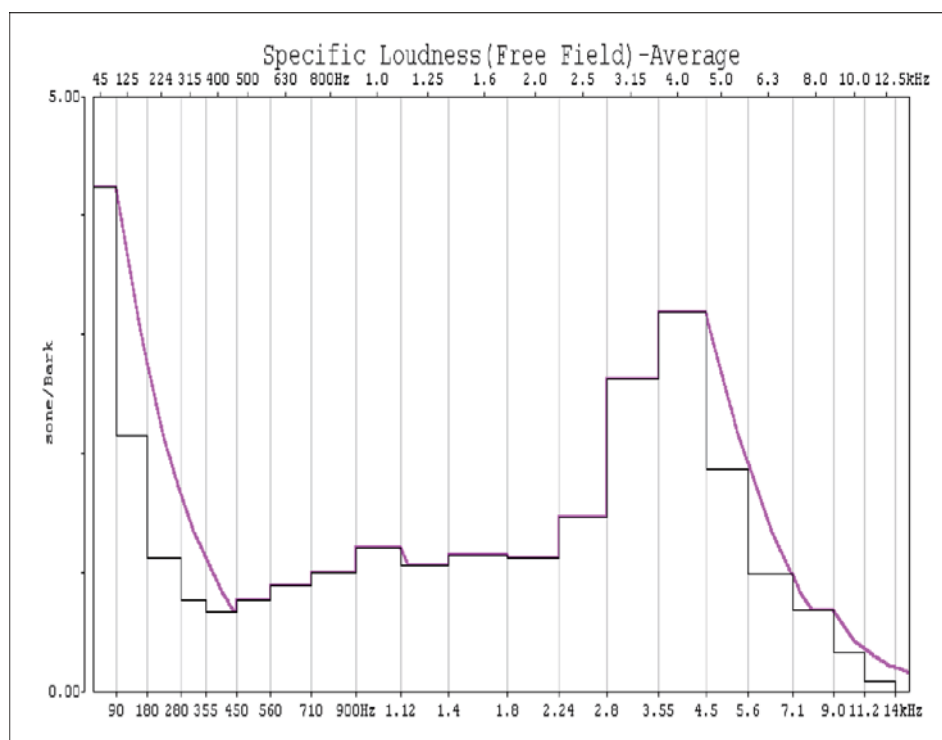
暖機運転前



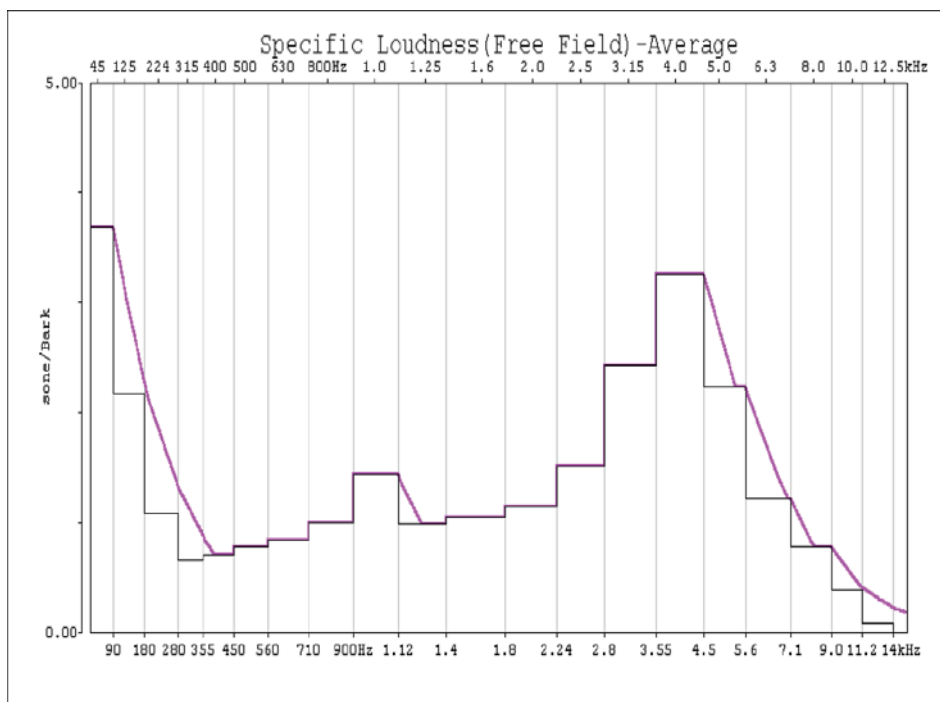
暖機運転後

Fig 26

まず、最も基本的な音質評価量であり、人が聞いた音の大きさに比例する値を表すことができるラウドネスを使って分析を行ってみます。横軸は周波数、縦軸がラウドネスです。暖機運転の前後でラウドネスに大きな差はなく、音の大きさはほぼ同じであるといえます。



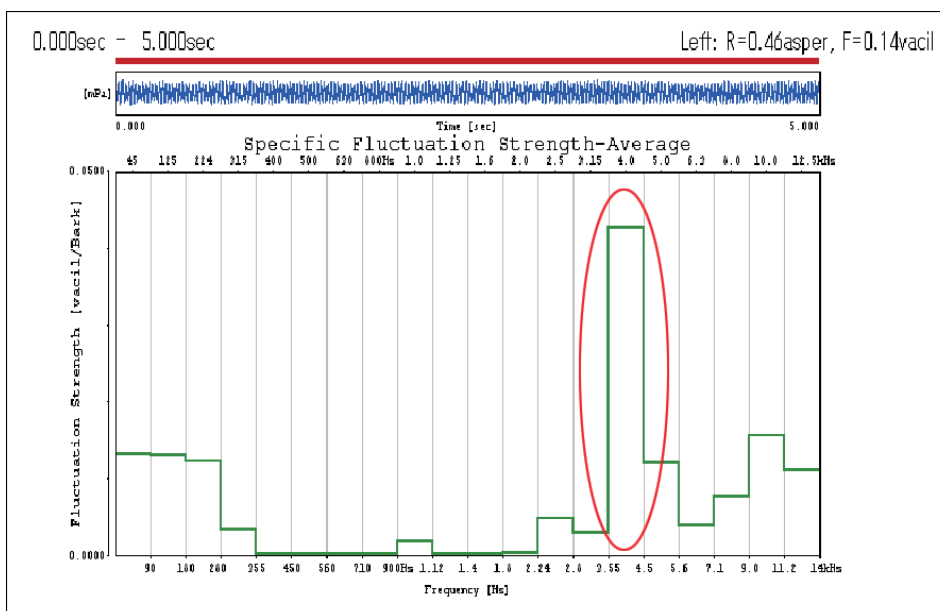
暖機運転前



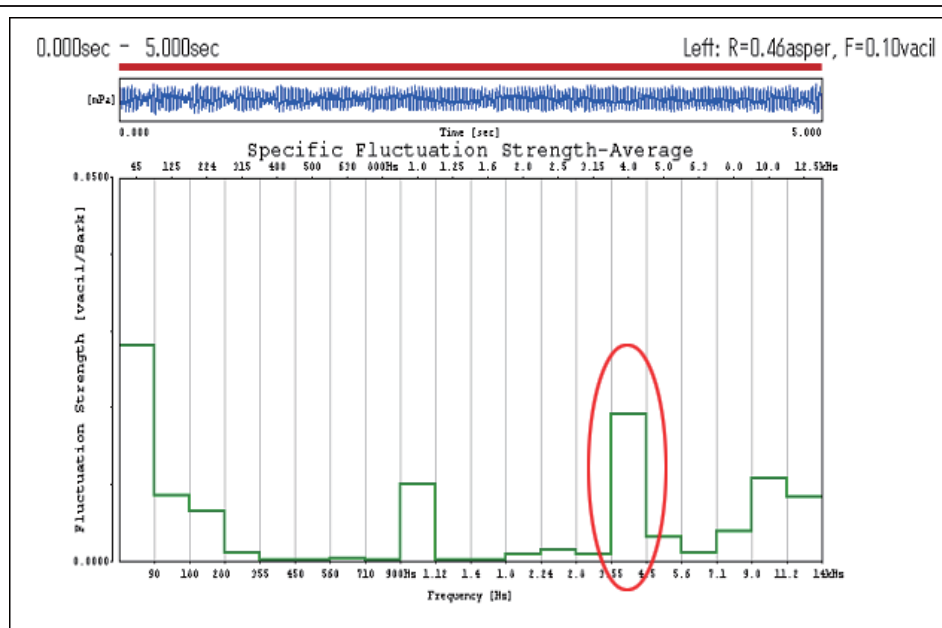
暖機運転後

Fig 27

次のデータは、音質評価量の1つである変動強度で分析した結果です。横軸が周波数で、縦軸は変動強度の強さになります。



暖機運転前



暖機運転後

Fig 28

変動強度とは、音の大きさの変動を人が感じるのと同じように表す評価量です。グラフの赤丸印で囲んだ部分で、大きな違いが見られます。この周波数は4 kHz 前後です。これらの結果から、暖機運転前のエンジン音の甲高い、嫌な変動感 は4 kHz の成分が変動しているためであることが、分かります。このように、音質評価量を使うことにより、異音等の効果的な分析が行えます。

最後に

より快適な音環境をつくるためには、より人間に近い音の評価が効果的です。小野測器は快適な音環境作りのためのお手伝いをいたします。

参考ページ

- OS-2740 音質評価パック :
<http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/software/others/os2740.htm>
- Oscope 2 時系列データ解析ツール :
<http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/software/others/oscope2.htm>
- WS-5190 聴感実験ソフトウェアホームページ :
<http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/software/ws/ws5190.htm>