

聴覚特性を考慮した自動車音質評価手法

Sound Quality Evaluation Technique of Vehicle in Consideration of Auditory Characteristic

能 村 幸 介* 岡 田 義 裕*
Kosuke NOUMURA Yoshihiro OKADA

要 旨

自動車の商品性を向上させるためには騒音の低減と音質の改善が重要である。これを達成するためには音質を正確に評価できる音質評価手法が必要である。しかし、従来より行われてきた評価手法では、聴感上、真に問題となる周波数帯域とその度合いを定量的に表現できないことが多かった。

本研究では、人間の聴覚特性を考慮した音質評価システムの開発およびこれをピストン打音負荷時騒音の評価に適用した結果について述べる。

本システムの特徴は、音の収録にダミーヘッドマイククロホンを用いることにより原音の忠実再生が行えると同時に、人間の主要な聴覚特性をモデル化した演算処理により、聴感に一致した尺度で客観評価値の算出が可能なこと等である。

ABSTRACT

Improving sound quality is essential for a vehicle to intense the competitiveness in the market. A sound quality evaluation method to be able to exactly evaluate the sound is required to attain the improvement mentioned above. The conventional evaluation methods almost do not show quantitatively the frequency area and the level which become real problem on the feel of auditory.

The purpose of this paper is to consider a sound quality evaluation method taking account of the human auditory characteristics and to embody the results as a sound quality evaluation system.

This system allows to faithfully reproduce the original sound since a dummy head microphone is used for recording the sound. With computing process using modeled human auditory characteristics, it is also capable of calculating objective evaluation values which is the same measure as the human auditory sense.

This system has been evaluated effective resulting from the experiments of applying to the evaluation of piston slap noise and interior noise during acceleration.

1. まえがき

従来より、自動車の車室内外における騒音の低減と音質改善を目的として、開発のプロセスの中で様々な音の評価手法が試みられてきた。

一般に評価は商品性を保証することができる客観的な指標に対して現在の水準を明確にし、的確な対策指針を検討するために必要不可欠である。最終的には人間が実際の音を直接聴いて評価することになるが、開発段階においては、限られたコストや時間の中で最適な対策技術を選択していかなければならないため、聴感上、真に

問題となる周波数帯域およびその度合いを具体的な数値で特定できることが望ましい。

これに対し、従来一般的に行われてきたFFT（Fast Fourier Transform）分析や、1/3オクターブ分析等は、音を物理的に扱う段階では有効であるが、人間の聴覚特性を反映していないため、聴感上、真に問題となる音の周波数成分およびその度合いを特定する目的に対しては不十分であった。

筆者らは、このような問題を改善するべく、自動車の音で問題となる周波数帯域の特定が可能で、聴覚刺激に

* 栃木研究所

対して比例した数値で表現することができる独自の音質評価手法を考案し、これを具現化した音質評価システムを開発した。本システムはダミーヘッドマイクロホンにより収録された左右耳の音圧信号に対し、人間の主要な聴覚特性をモデル化したアルゴリズムにより信号処理を行い、音の大きさ、変動音の不快感、変動音の不快感と名付けた三種類の客観評価値を算出することとした。また、システムに取り込んだ音を、客観評価値を参照しながら繰り返し何度でも再生受聴することができるため、問題となる成分音の特定が定量的かつ確実にできるようになった。さらに、フィルタ処理機能を持たせているため対象とする成分音のレベル増減に伴う音の変化を確認することができ、おおよその対策必要量を音圧レベルで求めることができるようにした。

本稿では、最初にダミーヘッドマイクロホンの必要性について説明し、本手法で考慮した人間の主要な聴覚特性とそれに基づく客観評価値算出アルゴリズムについて説明する。更に、音質評価システムの概要と実際の適用例について述べる。

2. ダミーヘッドマイクロホンの必要性

実走行において車室内音の評価を行う場合、視覚情報や運転操作に伴う緊張等から聴覚に集中できず、評価のバラツキや曖昧さが増したり、異なる車種の音を比較したい場面等では乗り換え時の時間経過に伴い確実な判定は困難となる。しかし、原音を忠実に再生する手段があれば、繰り返し再生受聴を行うことにより実走行では気付かなかった音が詳細に知覚でき、主観評価の精度をより向上させることができるものと考えられる。さらに、客観評価値を算出する目的に対しても、実際に人間が聴いている音に対して行うべきという二点の理由から、本手法ではダミーヘッドマイクロホンを用いることとした。用いたダミーヘッドマイクロホンは頭部伝達関数が人間の平均的な特性になるように設計されており、実際の人間の外耳道入り口に到達する音と同様の音圧信号を収録することができる。この信号には、左右耳間の振幅差や位相差の情報が含まれているため、再生時に立体的な音場を忠実に再現することができる。そして、客観評価値を算出する上でも音源の位置や種類に依存した補正等は必要なくなり、周波数特性がフラットな無指向性マイクロホンと比較すれば現実的かつ合理的である。

3. 本手法で考慮した主要な聴覚特性

定量的な客観評価値を算出するにあたって考慮した主な聴覚の特性とその取り扱いについて概要を述べる。

3. 1. 臨界帯域幅

本システムでは左右2チャンネルの音圧信号のそれぞれに対して Table 1 に示す24帯域の臨界帯域フィルタ処理を行い、帯域毎に客観評価値を算出するものとした。

3. 2. 等ラウドネスレベル

音の大きさを算出する過程で、音圧レベルから音の大きさのレベル（以降ラウドネスレベル）へと変換している。その際用いている変換関数は等ラウドネスレベル曲線¹⁾に基づいている。

等ラウドネスレベルとは、正常な聴力を持つ人が1kHz

Table 1 Zwicker's critical band

critical band rate □	center frequency □ [Hz]	cut off frequency □ [Hz]	critical band width [Hz]
		20□	
1□	50	100	80
2□	150	200	100
3□	250	300	100
4□	350	400	100
5□	450	510	110
6□	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22□	8500	9500	1800
23	10500	12000	2500
24	13500	15500	3500

の基準音と等しい大きさであると判断するような純音の音圧レベルの周波数特性であり、一般にはISO/R226で規定されている等ラウドネスレベル曲線が用いられる。しかしながら、ISO/R226は被検者の頭部中心位置での音圧レベルに対して求められた結果であり、音源として前方からの平面進行波を前提としているため、自動車室内のように多方向に未知の音源があると考えられる音場での変換関数として用いるには不十分であると考えられる。

本手法では、Fig.1に示すような人間の外耳道入り口の音圧レベルに対する等ラウドネスレベル曲線を小規模な実験により求め、これを用いることで音源の方向に依存することのない変換関数を用いることとした。

3. 3. 音の大きさ

音の大きさは、音の持つエネルギーに対する人間の主観的印象のことであり、どのような音であれ大きさは知覚できることから最も基本的な尺度であると考えられる。そして、大きさの算出式はStevensやRobinsonの研究を踏まえてISO/R131により概略式(1)に勧告されている¹⁾。ここで、音の大きさを[N (sone)]、ラウドネスレベルを[Ln (phone)]とする。

$$N = 2 \times \left(\frac{Ln - 40}{10} \right) \dots\dots\dots (1)$$

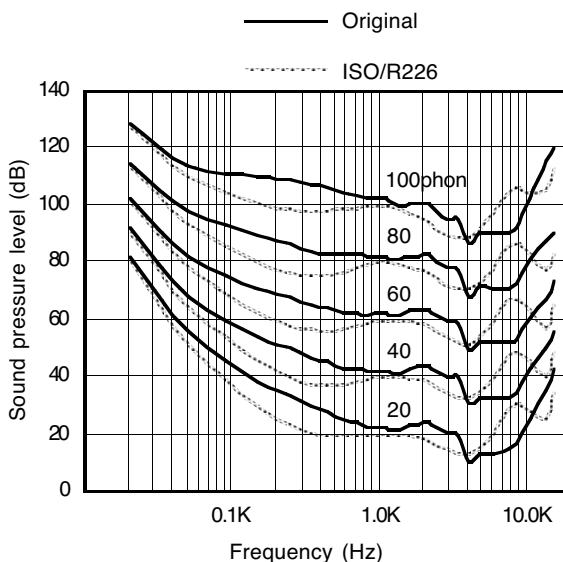


Fig.1 Equal loudness contour

一方、アメリカ、イギリスで行われた研究結果の中には、べき数の規格化定数は10よりも9が妥当であるという報告²⁾もあり、筆者らも小規模な実験によって確認した上でこちらの値を採用することとした。また、小さな音に対しては等ラウドネス曲線は異なるものとなることにも配慮して、本システムでは音の大きさの算出式を式(2)、(3)の二つの式により定義し、Fig.2に示すようにレベルに応じて使い分けることとした。

31Phon以上のとき・・・

$$N = 2 \times \left(\frac{Ln - 40}{9} \right) \dots\dots\dots (2)$$

31Phon未満のとき・・・

$$N = 5 \times \left(\frac{Ln - 35.737}{11} \right) \dots\dots\dots (3)$$

3. 4. 変動音の不快感、不快度

本稿での変動音とは擬声語でゴロゴロ、ガラガラ、コトコト、ジャラジャラ、カチカチなどの間欠性をイメー

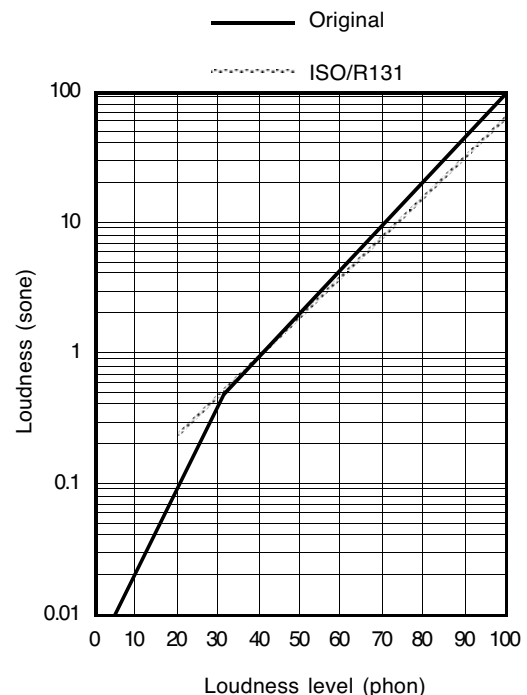


Fig.2 Loudness function

ジさせる類の音を指し、変動周期がやや速い場合にはガー、ギヤー、ジャーなどのように濁りとしての表現に及ぶものも含んでいる。一般にこれらの音は不快な音として感じられることから、変動による不快の程度を表す音の尺度を求めることに有用である。

これらの音は、自動車の様々な運転条件下においてエンジンの回転周期に伴う多次数の成分音が臨界帯域幅内で重なることにより発生し、静粛性を阻害する要因として問題になることが多い。筆者らはこの尺度を“変動音の不快量”と名付けた。また、変動音の不快量を同時刻の大きさに基準化したものを“変動音の不快度”と名付けた。変動音の不快量を定量化するにあたり、音の強さの変動（厳密には音の強さの変動に比例する波形）に着目した。音の強さを音圧信号から求める方法について以下に説明する。

例えば、Fig.3(a) のような二つの周波数成分から成る音圧信号 $P(t)$ を考えたとき、Fig.3(d) に示すような信号 $I_f(t) \cdot \rho c$ となる。ここで ρ は空気密度、 c は音速である。これは、ヒルベルト変換対⁴⁾を用いて式(4)により求めることが出来る。右辺分母の2は、便宜上加算されて2倍になったエネルギーを補正するためである。

$$I_f(t) \cdot \rho c = \frac{\{P(t)^2 + H(P(t))^2\}}{2} \dots (4)$$

Fig.3(b) が $P(t)$ のヒルベルト変換対であり、それらを2乗したものがFig.3(c)である。

これはFig.4に示す包絡線 $P_f(t)$ とは式(5)のような関係にある。

$$\begin{aligned} P_f(t) &= \sqrt{P(t)^2 + H(P(t))^2} \\ &= \sqrt{2 \cdot I_f(t) \cdot \rho c} \dots (5) \end{aligned}$$

そして、それぞれ $I_f(t) \cdot \rho c$ 、 $P_f(t)$ についてパワースペクトラムを比較したものがFig.5である。

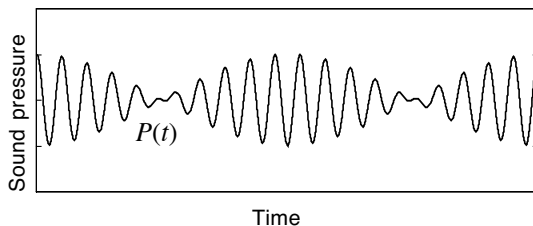


Fig.3(a) Wave shape made of two components

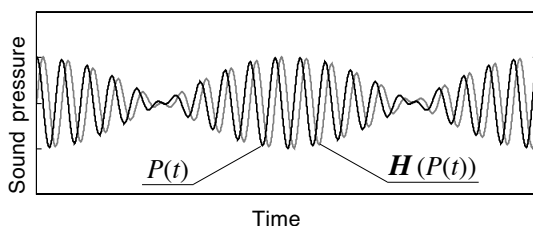


Fig.3(b) $P(t)$ and hilbert transform of $P(t)$

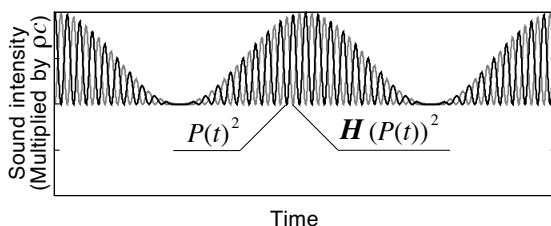


Fig.3(c) Squared wave shapes of $P(t)$ and $H(P(t))$

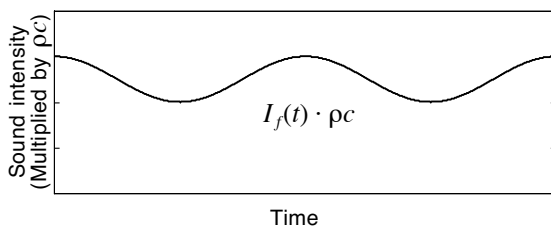


Fig.3(d) Fluctuation of sound intensity

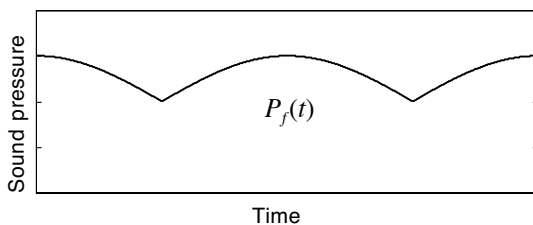


Fig.4 Envelope of sound pressure

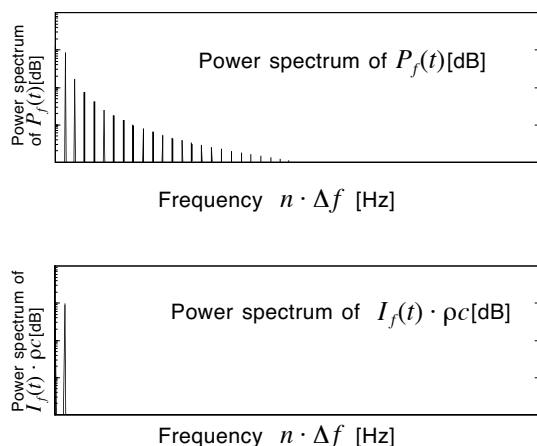


Fig.5 Envelope and intensity fluctuation in frequency domain

同様の客観評価値を定量化する手法として音圧信号の包絡線のスペクトラムを用いるという考え方が提案されているが、音圧包絡線の周波数成分には臨界帯域幅を超える多数のハーモニック成分が含まれ、本来臨界帯域幅以上の変動音が知覚されない事実に対して矛盾が生じてしまう。また、音圧包絡線のスペクトラムの値に物理的な意味は無いが、音の強さの変動スペクトラムは0Hz成分の平方根が実効値そのものであるという明確な意味がある。これらのことから筆者らは音の強さの変動を扱うこととした。

実際の計算手順としては、この音の強さの変動スペクトラム $A(m,n)$ を、臨界帯域毎に式(6)により変動成分比 $R(m)$ を算出し、大きさに掛け合わせて変動音の不快感を求めている。

ここで $W(m,n)$ は実験により求めた重み係数であり、

$$R(m) = \frac{\sum_{n=2}^{N/2-1} A(m,n) \cdot W(m,n)}{2 \cdot A(m,0)} \dots\dots\dots (6)$$

$$m : m = 1, 2, 3 \dots, 24$$

臨界帯域毎にそれぞれ異なる値を持つものである。そして、ハンニングウィンドウを掛けていることから右辺分母の $A(m,0)$ を2倍にして振幅を補正している。

3. 5. マスキング効果

精度良く客観評価値を算出するために、マスキング効果^{1), 2)}を考慮した。演算処理の中では臨界帯域毎に算出された音圧レベルと中心周波数の関数でマスキング量を算出し、大きさの尺度にて減算している。

3. 6. 両耳加算則について

文献¹⁾では左右の耳で同じ純音を同時に受聴した場合の音の大きさは片耳で6dB大きい音を聞いたときに等しいと報告されている。筆者らも簡単な実験を行って確認したところ、妥当な結果が得られたので両耳加算則としてこの関係を用いている。

4. 客観評価値算出アルゴリズム

3.1.～3.6.項の処理を用いて、三種類の客観評価値を算出する手順の全体イメージはFig.6のようになる。最初は、左右それぞれの音圧信号に対して臨界帯域幅を模倣したFIR (Finite Impulse Response) フィルタ処理と3.4.項で述べた音の強さの変動波形算出のためのヒルベルト変換を重畳保留法⁴⁾を用いることで一度に行っている。重畳保留法とは時系列信号をFFTにて周波数領域に変換し、フィルタ特性を掛けた後再びIFFT (Inverse Fast Fourier Transform) により時系列信号に戻しフィルタ処理を完了させる方法であるが、一般に畳み込み演算によるFIRフィルタ処理に比べて、演算負荷が小さくて済むというメリットがある。次に、そのヒルベルト変換対を2乗し、それぞれを加算し2で割る事で音の強さの変動波形を生成する。そして、FFTを行い音の強さの変動のスペクトラムを求め、3.4.項で記した変動成分比 $R(m)$ と、0Hz成分からその帯域オーバーオールレベルを求める。これを、臨界帯域毎に行い、更に0.1sec間隔で音圧信号の終わりまで繰り返す。

上記処理の後、帯域オーバーオールレベルからラウドネスレベルそして音の大きさへと尺度を変換し、別に求めたマスキング量を減算し最終的な音の大きさを算出する。変動音の不快感はこの大きさに変動成分比 $R(m)$ を掛けて求めている。また、変動音の不快感は帯域毎に算出された変動音の不快感をその時の全体の大きさと割ったものである。全体の大きさとは24帯域の大きさを算術加算したものである。

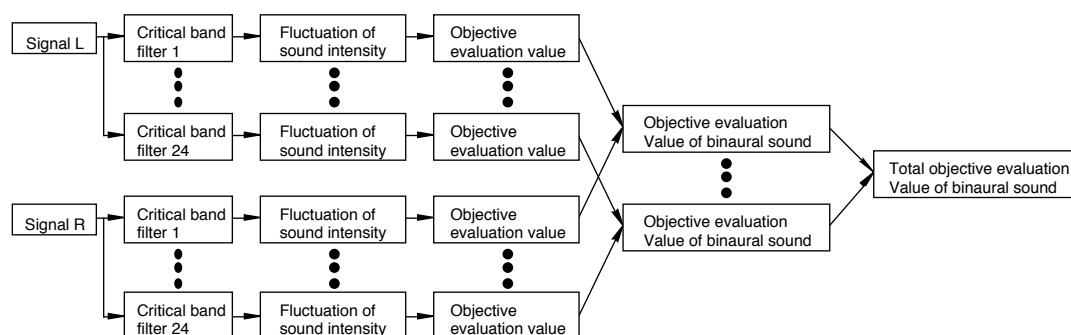


Fig.6 Outline of calculation algorithm

片耳における三種の客観評価値が算出された後は両耳加算則により両耳受聴時の値を算出する。

5. 音質評価システムの構成

ダミーヘッドマイクロホン収録及び再生システムはヘッドアコースティック社製のものを用了。

客観評価値算出のためのハードウェアとしてはUNIXワークステーションとTI (Texas Instruments) 社のDSP320C40を16個用い、システムの高速化を図った。システム構成の概要を Fig.7 に示す。

負荷の高い演算処理はDSP側で実行し、客観評価値の

計算はホストコンピュータ側で行っている。一例として16bit、40.96KHz サンプルによる5秒間の時系列データから、音の大きさ、変動音の不快感、不快度の三種類の評価値を算出するのに要する時間は30秒程度である。

本システムは、客観評価値の算出機能と、ヘッドホン受聴による主観評価のための原音再生機能を有するため、自動車の開発業務中に遭遇する音質問題の解決方法を効率よく検討することができる。また、再生受聴は8人で同時に行うことが出来るので、被験者を集めての官能評価実験に使用できることはもとより、判断を要求される会議などで音の問題認識を共有化する等の用途にも活用できると考えられる。

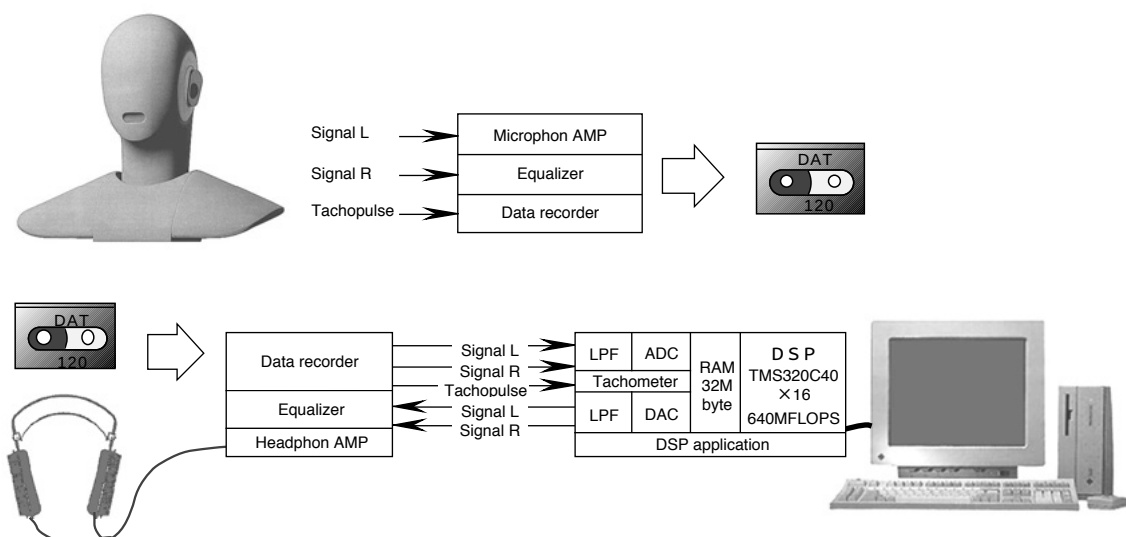


Fig.7 Sound quality evaluation system

6. 車室内音評価への適用事例

実際の自動車の音に適用した事例として、ピストンがエンジンブロックのシリンダ側壁を打撃することによって生じる騒音（以降ピストン打音）及び負荷時走行中に生じるランプリングノイズ等の評価結果について紹介する。

6. 1. ピストン打音への適用

ピストン打音を音圧レベルのみで評価することは困難であり、時系列波形そのものや主観評価等で判定することが多いが、客観性に欠け判定基準が曖昧になりがちであった。更に、ピストンはエンジンの諸性能に与える影響が大きい部品であるため設計には十分な根拠が必要であることから、音の良否をより明確に判断できることが求められている。

ここでは暖気運転をせず低速で走り出した場合を想定して、異なる二種類のピストンフォームに対するピストン打音の違いを検討した例を紹介する。テスト車両は2.2リッターの乗用車で、シャーシダイナモ上走行中のバンパー前方にダミーヘッドマイクロホンを設置し測定を行った。運転条件としては水温油温とも約40℃に調整し、2速にて1500rpmを保持した。

Fig.8はそれぞれ、音の大きさ、変動音の不快感、変動音の不快感について5秒間の平均値を求めたものである。変動音の不快感の16Bark（2900Hz付近）で特に差が大きく現れていることが分かる。聴感上はピストンフォーム改善前にギョロギョロと聞こえていたものがかなり小さくなった。ギョロギョロと言う音が16Barkであることを確認するために、ピストンフォーム改善前の収録音に対してフィルタ処理を行い16Barkのレベルを下げて聴いて見たところやはりギョロギョロ音は聞こえなくなった。即ちギョロギョロ音の主成分は16Barkであり、その時の低減量が対策指針量となる。

6. 2. 負荷時騒音への適用

負荷時走行中に問題となるランプリングノイズ等の騒音も、騒音レベルのみでは評価することが困難である。ここでは1.5リッターエンジン、マニュアルトランスミッション仕様の乗用車の助手席にダミーヘッドマイクロホンを搭載し、急加速中を想定した2速ギヤでスロットル全開走行での測定を行い、音質評価を行っ

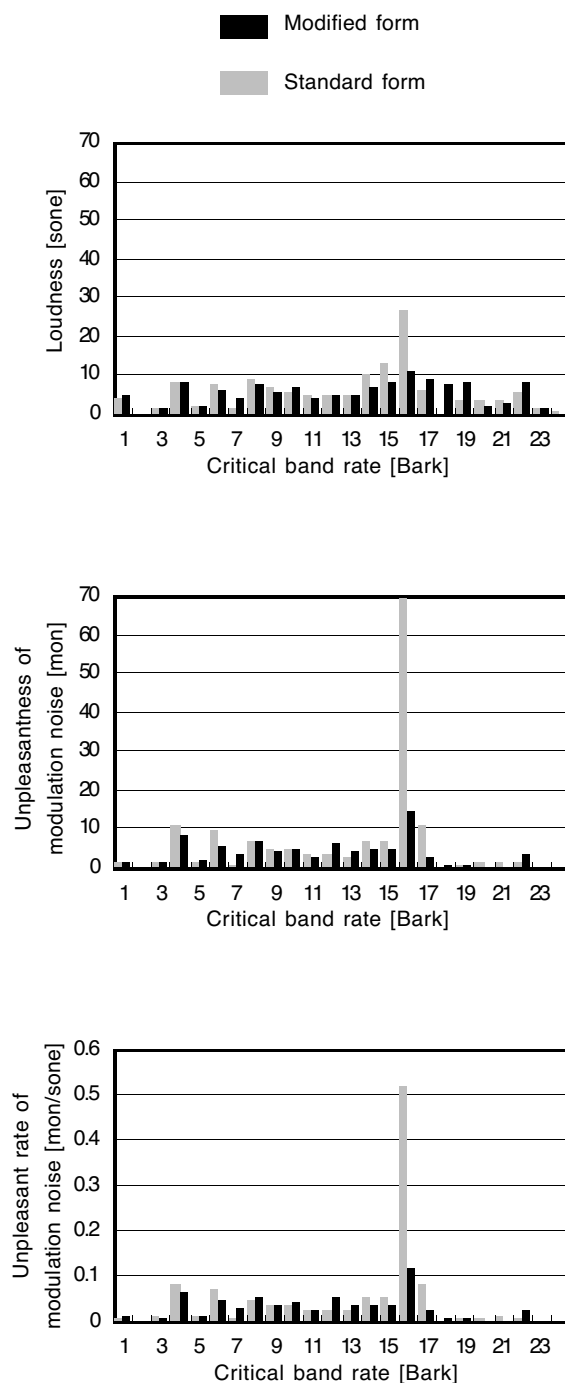


Fig.8 The effect of piston form modification

た。聴感上ゴロゴロ、コロコロ、ガーと聞こえる音がフィルタ機能を用いて3Barkから12Barkの範囲であることが確認された。

Fig.9はエンジン回転速度の上昇に伴う音の大きさ、変動音の不快感、変動音の不快感の変化について全帯域加算値と3Barkから12Barkまでの加算値を表示したものである。これを見ると、1800rpm付近で大きさは小さいが変動音として不快であるということが表現されている。この結果は運転者の聴感で指摘されていた結果に一致していた。一方、Fig.10は同信号の騒音レベルであるが、聴感に一致しておらず前記のような結論にはならない。

このように、本システムを用いると音の特徴を聴感に対応する尺度で詳細に知ることができ、音の良否や対策の必要性を定量的に把握することができる。

7. まとめ

人間の主要な聴覚特性を考慮し、聴感に合致した客観評価値として、音の大きさおよび変動音の不快感、変動音の不快感を算出し、定量的に表現することができる音質評価システムを作成した。また、既存のダミーヘッドマイクロホンで構成される収録・再生システムを組み合わせることにより、原音の忠実な再生が可能で、音に集中できる環境下において精度の良い主観評価を実施することができるようになった。

本音質評価システムをピストン打音と負荷時騒音に対して適用したところ、聴覚的に問題となる周波数領域が特定でき、改良効果量を含め定量的な表現が可能であることから有効性が確認できた。

今後は、様々な音の事象に対して適用し、主観評価に基づく良い音を客観評価値により指標化することで、自動車室内外の静粛性の向上や音質の改善に向けて活用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 難波精一郎、「聴覚ハンドブック」、ナカニシヤ出版
- 2) 三浦種敏、「聴覚と音声」、電子情報通信学会
- 3) E. Zwicker、「心理音響学」、西村書店
- 4) A.V.Oppenheim R.W.Schafer原著、伊達玄 訳、「ディジタル信号処理 (上) (下)」、コロナ社

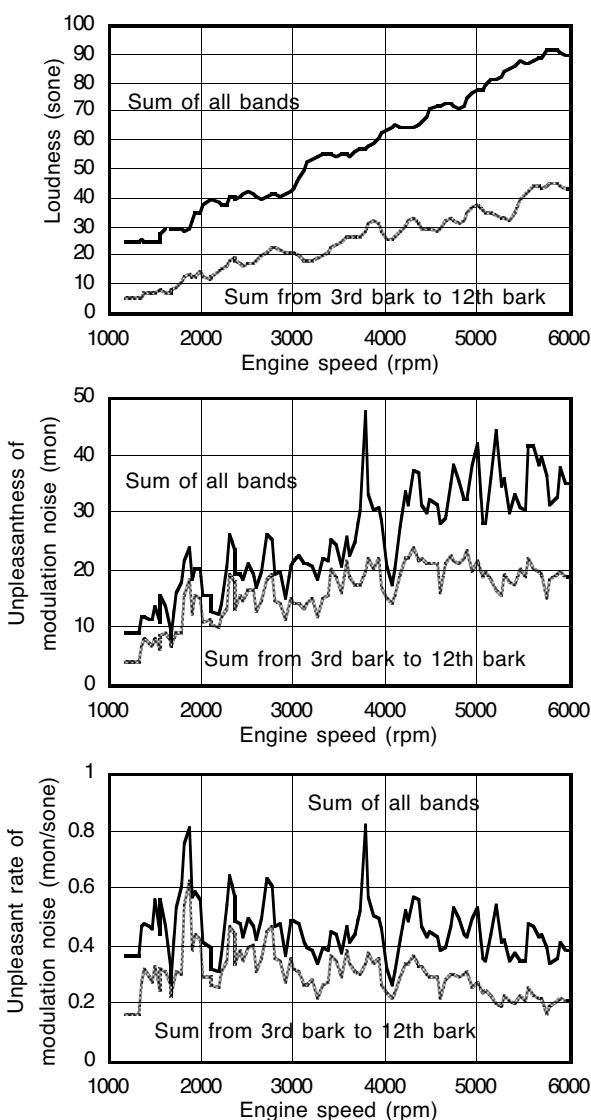


Fig.9 Objective evaluation value of vehicle cabin noise during acceleration

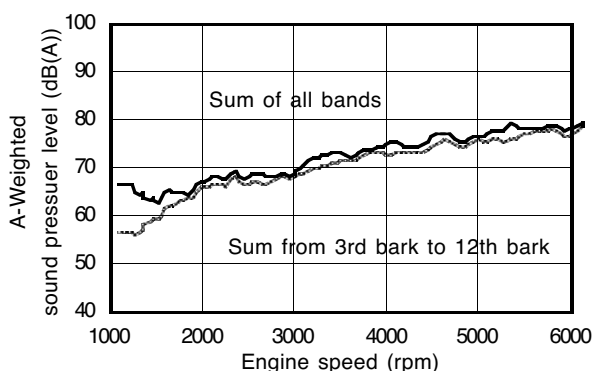


Fig.10 Results by the general method

■著 者■



能 村 幸 介



岡 田 義 裕