

要 旨

近年、自動車の高品質化にともなって、音の質（音色）が注目されるようになり、車両イメージにあった積極的な音づくりが試みられるようになってきた。従来、音色の評価は官能評価により行われてきたため、客観性や定量性の点で問題があった。そこで本研究では、自動車の音色でしばしば問題となる、車室内エンジン音および排気音の客観的な音色評価法を作成した。

エンジン音の音色評価法は、加速時に発生する間欠的で濁った音を対象としたものである。人間の聴覚モデルに基づいたエンジン音の分析を行うことにより、色々な種類の振幅変動が評価に影響していることを明

らかにし、ついで、合成音を用いた官能評価実験を行い、評価法を作成した。本方法により、加速時エンジン音の客観的な評価が可能となった。

排気音の音色評価法は、加速中の音色一定と考えられる範囲の音を対象としたものである。まず、音色の表現語を分析することによって音色評価において重要な評価語を明らかにした。そして、実車排気音を加工した音を用いて官能評価実験を行い、評価法を作成した。本方法により、排気音の客観的な位置づけを得ることができる。

Abstract

Recently, much importance has been focused on the sound quality of vehicles. We developed two objective evaluation methods for vehicle sound quality.

First method is to evaluate the intermittent turbid engine noise during acceleration. Analysis of the noise by using the human hearing model has clarified that there are many types of amplitude modulation, each of which provides a unique sense of unpleasantness. This method enables objective rating of the engine noise.

Second method is to evaluate the exhaust sound quality during acceleration. Analyzing the terms used to express exhaust sound quality, we have clarified important factors for the rating of exhaust sound quality. Analysis of the subjective evaluation on precisely synthesized exhaust sounds has led to the new evaluation method. This method enables objective measurement of the properties of exhaust sound.

キーワード

エンジン音, 排気音, 音色, 感性, 客観評価, 音合成

1. はじめに

自動車の高品質化にともなって、自動車騒音はその「量」のみならず「質」（音色）が問題とされるようになってきた。それにつれ、各種騒音の音色改善や車のイメージにあった積極的な音作りが試みられるようになった。

自動車の開発において音色を扱う場合、音色改善の方針検討、試作車や競合車との音色比較、音色改善効果の評価、などを行うために音色を定量的に評価する尺度が必要となる。

従来、音色評価は官能評価により行われてきた。しかし官能評価には以下のような問題点がある。

- ・個人差が大きい。
- ・再現性がない。
- ・定量的でない。

そこで本研究では、自動車の音色を客観的かつ定量的に評価する方法を作成した。本報告では、2章で客観評価法の作成方法について、3章で加速時車室内エンジン音評価法について、4章で加速時排気音評価法について述べる。

2. 評価法作成のプロセス

音の客観評価法は以下のプロセスで作成する (Fig.1)。

2.1 音響分析

まず、音の物理的性質を定量化するために、音響分析を行う。分析は一般に行われている周波数分析、オ

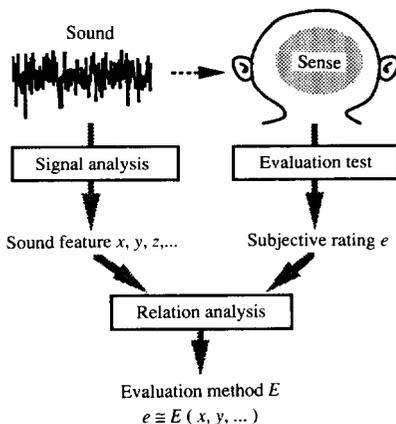


Fig.1 Process of making objective evaluation method.

クター分析などのほか、聴覚系モデルに基づいた分析などを行う。そして、音の物理的特徴量 x, y, \dots を求める。

2.2 官能評価

次に、人間の感覚を定量化するため、官能評価を行い音に対する主観評価値 e を求める。

官能評価に用いる評価語は、対象音の感覚を表現する言葉（音色表現語）の中から適切なものを選ぶ。音色表現語が多数ある場合は、SD法¹⁾などにより表現語間の関係を分析することにより評価語を決定する。

2.3 物理量と主観評価値との関係解析

上で求めた物理量と主観評価値との関係を解析する。

まず、音響分析結果と主観評価値との定性的関係や、物理量と主観評価値との相関係数などを調べ、関係の概要を把握する。

次に、詳細かつ定量的な関係把握を行う。そのために「特定の物理量のみが異なり、他の物理量が同一の音」を作成し、主観評価との関係を解析する (Fig.2)。このような音を作成するには以下の2つの方法がある。

- (1) 実車音を単純化した合成音を数値的に作成する。
- (2) 実車音に信号処理を施して加工音を作成する。

2.4 評価法作成

以上の結果をふまえて、客観評価法を作成する。作成した評価法を実車音に適用し、主観評価値との関係を調べることにより、その有効性を確認する。

以下、本報では上記のプロセスで作成した、車室内エンジン音および排気音の音色評価法について述べる。

3. 加速時車室内エンジン音の音色評価

自動車車室内において、加速時に間欠的で濁ったエンジン音が聞こえることがある。この音は「ゴロゴロ音」と呼ばれ、ゴロゴロ音が発生すると騒音レベルが

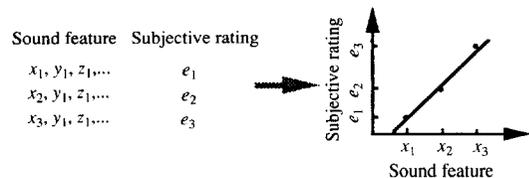


Fig.2 Relation analysis between sound feature and subjective rating.

低くても不快感を与える。

ゴロゴロ音に関しては以下のような基本的性質が知られている²⁾。

- ・ 加速時，エンジン回転数約2000 - 4000rpmで発生する。
- ・ 発生周波数帯域は約100 - 600Hzである。
- ・ 音圧振幅がエンジン2回転を周期として大きく変動している。

従来ゴロゴロ音評価法³⁾が提案されているが，これらの性質に基づいて，評価結果が人間の感ずる不快感と必ずしも一致しなかった。

3.1 評価対象

対象音は「加速時車室内エンジン音」である。対象とする感覚は「ゴロゴロ音によって引き起こされる不快感(以下「ゴロゴロ感」と呼ぶ)である。

3.2 音響分析

ゴロゴロ音には上に述べたように「エンジン2回転を周期とした音圧振幅の変動」という特徴がある。そこで音圧振幅の変動を詳細に調べるため，人間の振幅変動の認識過程⁴⁾を模擬した分析を行った。分析方法は，車室内音を臨界帯域⁵⁾に相当するバンドパスフィルタで帯域制限し，その振幅変動を調べるために波形の包絡線を求めた。また包絡線の周波数分析を行った (Fig.3)。

その結果，色々なタイプの振幅変動が存在し，それぞれゴロゴロ感が異なることがわかった⁶⁾。以下に各タイプの典型的な例を示す。

3.2.1 エンジン2回転周期の変動が顕著な例

Fig.4にエンジン2回転周期の変動が顕著なゴロゴロ音の例を示す。図中(a)が車室内音の周波数分析，(b)がある臨界帯域の音圧波形およびその振幅包絡線，(c)が(b)の振幅包絡線の周波数分布を表す。このタイプの音は，聴感上ゴロゴロ感が強い。これより，人間は基本的にはエンジン2回転周期の振幅変動によってゴロゴロ感を感じていることが確認された。以後，エンジン2回転周期を「ゴロゴロ基本周期」，包絡線のエ

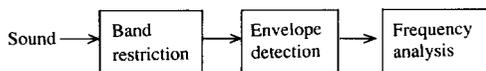
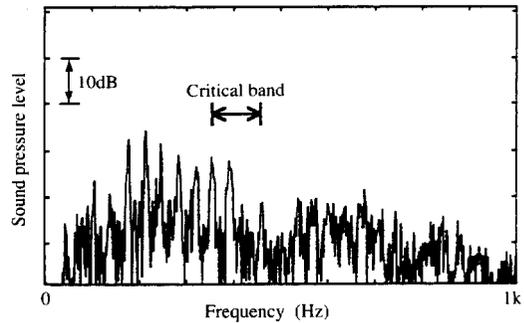


Fig.3 Analysis method of rumble noise.

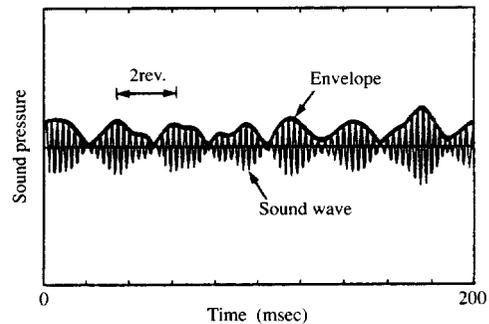
ンジン2回転周期成分の振幅を「ゴロゴロ基本成分」と呼ぶ。

3.2.2 変調度が低い例

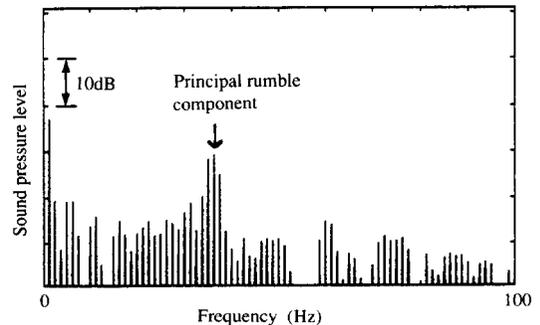
Fig.5に変調度が低いゴロゴロ音の例を示す。図(b)に見られるように振幅変動幅が振幅の平均値に比して小さい，つまり変調度の低い振幅変動音だということ



(a) Frequency components of noise in vehicle passenger compartment



(b) Waveform of noise restricted to critical band and its envelope



(c) Frequency components of the envelope

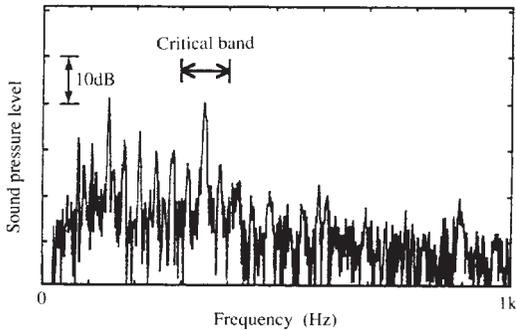
Fig.4 An example of large amplitude modulation having a period of two engine revolutions.

ができる。この例はFig.4の例と比べると、ゴロゴロ基本成分の振幅が同程度であるにもかかわらずゴロゴロ感が弱い。これより、変調度が低いとゴロゴロ感は弱くなると考えられる。

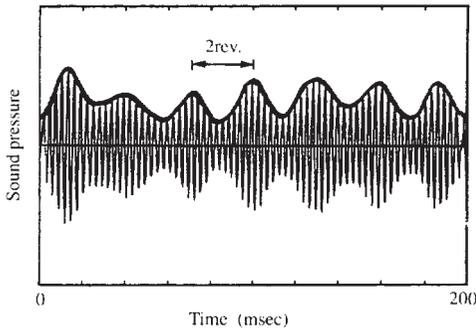
3.2.3 短周期の変動が顕著な例

Fig.6に短周期の変動が顕著なゴロゴロ音の例を示

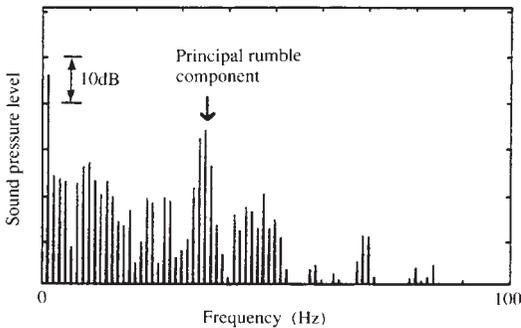
す。図(b)に見られるように、変動の周期がゴロゴロ基本周期の半分(エンジン1回転周期)になっている。この例もFig.4の例と比べると、ゴロゴロ基本成分の振幅が同程度であるにもかかわらず、ゴロゴロ感が弱い。つまり、短周期の変動が顕著であるとゴロゴロ感は弱くなると考えられる。



(a) Frequency components of noise in vehicle passenger compartment

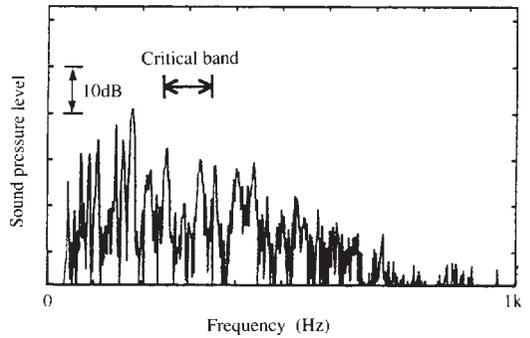


(b) Waveform of noise restricted to critical band and its envelope

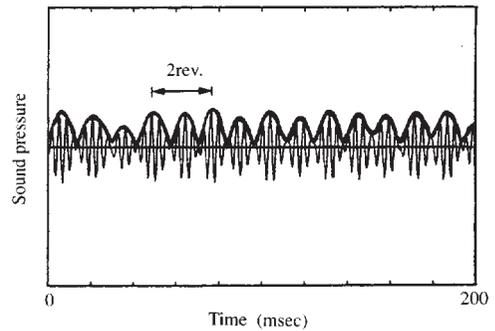


(c) Frequency components of the envelope

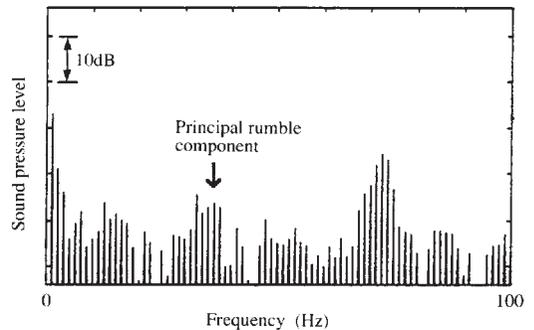
Fig.5 An example of low degree of modulation.



(a) Frequency components of noise in vehicle passenger compartment



(b) Waveform of noise restricted to critical band and its envelope



(c) Frequency components of the envelope

Fig.6 An example of large amplitude modulation having a period of one engine revolutions.

3.3 物理量と主観評価値との関係解析

音響分析によって明らかになった振幅変動とゴロゴロ感との関係を定量的に把握するため、実車ゴロゴロ音を単純化した合成音を用いて、官能評価実験を行った⁷⁾。合成音は、計算機で数値的に求めた波形をD/A変換器によって電気信号とすることにより作成した。パネリストは、それをヘッドホンで聴取する。

3.3.1 ゴロゴロ基本成分とゴロゴロ感

まず最初にエンジン2回転周期の振幅変動がゴロゴロ感の主要因であることから、ゴロゴロ基本成分の振幅とゴロゴロ感との関係を調べた。実験音は式(1)の n (合成音を構成する正弦波の数) および A_i (各正弦波の振幅) を様々に変化させた音を用いた (Fig.7)。

$$\sum_{i=0}^n A_i \sin(2\pi(f_0 + (i - (n+1)/2)f_a)) \dots\dots(1)$$

ただし、中心周波数 $f_0 = 250\text{Hz}$ 、変動周波数 $f_a = 25\text{Hz}$ である。12名のパネリストが、実験音に対するゴロゴロ感を5段階で評価した。

その結果、Fig.8に示すようにゴロゴロ感はゴロゴロ基本成分の振幅と強い相関があることがわかった。つまり、ゴロゴロ感はゴロゴロ基本成分の振幅を用いて定量化できることが明らかになった。

3.3.2 変調度とゴロゴロ感

振幅変動の変調度が低いとゴロゴロ感が弱くなることから、変調度とゴロゴロ感の関係を調べた。変調度は、波形の包絡線の平均値に対するゴロゴロ基本成分

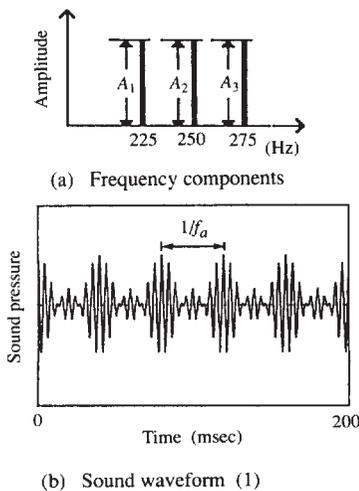


Fig.7 An example of test sound.

の振幅の比と定義する。実験音は式(2)の A_a (ゴロゴロ基本成分の振幅) を一定にして、 A_0 (包絡線の平均値) を変化させた音を用いた (Fig.9)。変調度は、 A_a / A_0 である。

$$(A_0 + A_a \sin 2\pi f_a) \sin 2\pi f_0 \dots\dots(2)$$

ただし、中心周波数 $f_0 = 250\text{Hz}$ 、変動周波数 $f_a = 25\text{Hz}$ である。

実験は調整法により行った (Fig.10)。パネリストは基準音と実験音を聞き、2つの音のゴロゴロ感が同じになるように基準音の音量を調整する。ここで、基

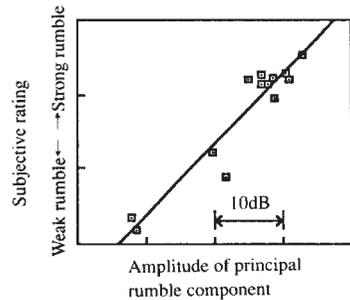


Fig.8 Relation between amplitude of principal rumble component and auditory rating.

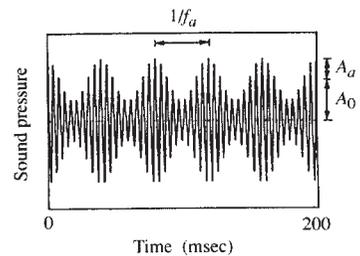


Fig.9 An example of test sound waveform (2).

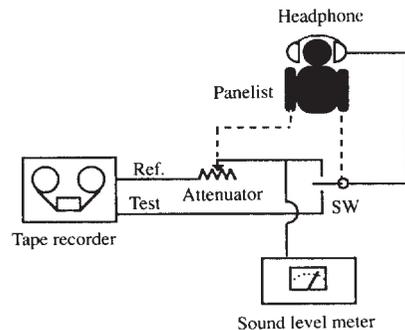


Fig.10 Apparatus for method of adjustment.

準音は変調度1の音（式(2)において $A_0 = A_a$ の音）であるため、調整後の基準音のゴロゴロ基本成分の振幅 A_x は、実験音の聴感上の振幅変動とみなすことができる。以下、聴感上の振幅変動 A_x と波形上の振幅変動 A_a との比（ A_x / A_a ）を「ゴロゴロ補正係数」と呼ぶ。ゴロゴロ補正係数によりゴロゴロ感に対する変調の影響を定量的に表現することができる。なおパネリストは8人で行った。

その結果、変調度が一定値より小さくなると、ゴロゴロ基本成分の振幅が同じでもゴロゴロ感は弱くなるという関係が定量的に求まった（Fig.11）。

エンジン1回転周期の振幅変動、および、ゴロゴロ基本周期とゴロゴロ感との関係も同様に求めた。

3.4 客観評価法の作成

合成音を用いた実験により、ゴロゴロ基本成分の振幅、変調度、エンジン1回転周期成分の振幅、ゴロゴロ基本周期とゴロゴロ感との関係が定量的に把握され

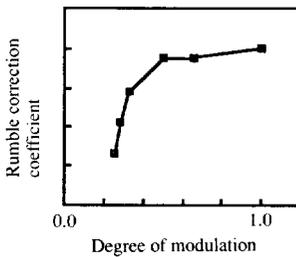


Fig.11 Relation between degree of modulation and rumble correction coefficient.

た。これに基づいてFig.12のような評価法を作成した。

まず、音を臨界帯域に相当するバンドパスフィルタによって帯域分割し、各帯域の振幅包絡線を求める。次に、包絡線のエンジン2回転周期成分の振幅（ゴロゴロ基本成分の振幅）、エンジン1回転周期成分の振幅、変調度を測定し、Fig. 11などからゴロゴロ補正係数を算出する。そして、ゴロゴロ基本成分の振幅にゴロゴロ補正係数を掛けて得た値をこの帯域のゴロゴロ感評価値とする。最後に各帯域ごとのゴロゴロ感評価値のうちで最も大きいものを、音全体のゴロゴロ感評価値とする。

3.5 評価法の実車音への適用

作成した評価法による評価値と官能評価との比較をするため実車音による官能評価実験を行った。使用した音は実車3000rpmの車室内音10種類で、パネリストは12名で行った。結果は、Fig.13に示すように評価法によるゴロゴロ音評価値とゴロゴロ音の官能評価値とは高い相関を示し、評価法の有効性が確認された。

4. 加速時排気音の音色評価

自動車の排気音は、車両イメージに合った積極的音づくりがなされるようになってきた。特に加速時の音色が重視され、従来から官能評価や物理指標による性質把握が行われてきた^{8,9)}。しかし、一般に加速時の排気音色は回転域によって必ずしも一定でないため、加速排気音色の性質を物理指標によって定量化するのは困難であった。

そこで本研究では、加速中の音色一定と考えられる

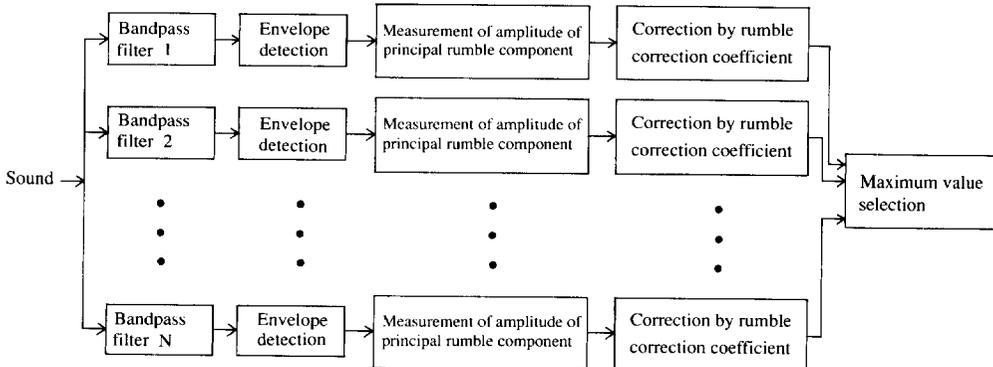


Fig.12 Objective rating method of rumble.

範囲の音を対象に評価法を作成した¹⁰⁾。その結果音色と評価との関係が明確になり、排気音色の性質を客観的かつ定量的に評価する指標を作成することができた。

4.1 評価対象

人間の加速排気音色に対する評価には、加速の一部分（各回転域）の音色に基づくものと加速音全体（全回転域）に基づくものがある。例えば「低回転での迫力が大きい」は加速の一部分、「加速につれて音が伸びていく」は加速全体に対する評価である。

これを、加速時排気音色とその変化という観点から以下のように考えた。排気音の各回転域の音色がN種類の特徴量で表わされると考えると、加速時の各回転域の排気音色はN次元空間中のひとつの点に対応し、加速にともなって点の位置も変化していく（Fig.14）。このような加速音に対する人間の音色評価のうち、各回転域での評価は各回転域でのN次元空間上での点の位置に基づくものであり、加速音全体に対する評価はN次元空間上の点の位置の変化パターンに基づくものである。

この考え方をもとに本研究では「加速中の音色一定と考えられ回転数範囲を対象とした、回転域毎の音色評価」を行った。

4.2 主観評価の解析

4.2.1 表現語相互の関係

最初に、排気音色のどのような性質が重要であるかを調べるため、排気音色の表現語を分析した。

まず、自動車騒音の専門家を対象に排気音色を表現する言葉を収集し、約100種類の表現語を得た。そのうちの「音色変化」に関するものや一般的でないものを除外して整理し、14種類（7対）の表現語を選んだ。

次に、それらの表現語相互の関係を調べるため、実車音に対する官能評価実験を行った。実験条件を以下に示す。

パネリスト：自動車騒音の専門家12名

試験音： 実車加速時排気音5車種、
エンジン回転数1500, 3000, 4000rpm
(計15種類)

音提示法： ヘッドホン

評価項目： 迫力のある - 迫力のない, 高い - 低い, 太い - 細い, 響く - 響かない, 騒がしい - 静か, 澄んだ - 濁った, 抜けの良い - こもった

評価法： 5段階評価

その結果、音色表現語は「太い」「低い」などの音の迫力に関係するもの（迫力因子）と、「澄み」「抜け」などの音の美しさに関するもの（美的因子）に分類できることが分かった（Fig.15）。

4.2.2 適合性評価との関係

前節で求めた「迫力」「美しさ」の2つの因子が排

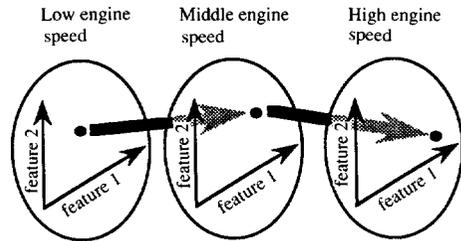


Fig.14 Sound quality of exhaust sound during acceleration.

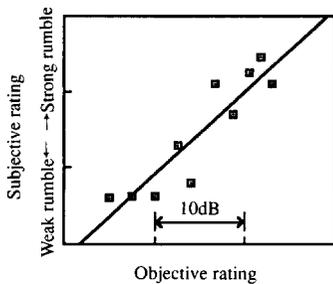


Fig.13 Relation between objective rating and auditory rating of noise in vehicle passenger compartment.

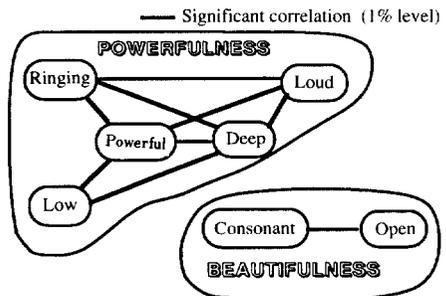


Fig.15 Relation of adjectives.

気音色の性質を表現できることを確認するため、適合性評価（音色が「クーペ」「セダン」等の排気音として適切かどうか）との関係を調べた。実験は、エンジン回転数3000rpmの実車排気音に対する「迫力」「美しさ」「GT・スポーティクーペとしての優劣」「スポーティセダンとしての優劣」の官能評価を行った。

その結果、「迫力」「美しさ」による「GT・スポーティクーペとしての優劣」「スポーティセダンとしての優劣」の重相関係数はそれぞれ0.92, 0.89であり、「迫力」「美しさ」の評価値で排気音色の性質がほぼ表現できることが確認できた。

4.3 物理量と主観評価値との関係解析

4.3.1 合成音の作成

次に、排気音色を評価する「迫力」「美しさ」に対応する物理量（音響指標）を定める。そのためには、いろいろな種類の排気音に対する官能評価と物理量との関係を詳細に検討する必要がある。ところがこのような検討において実車音は、以下の点で不十分

である。

- ・音の種類が限られ、望ましい物理量を持った音を使えるとは限らない。
- ・実車音は一般に加速にともなって音色が変化していくため、官能評価が音のどの部分に対する評価か明らかでない。

そこでFig.16のような排気音合成システムを作成し、このシステムで合成した音を用いて実験を行うこととした。合成は以下の手順で行う。

- (1) 実車加速排気音の一部をサンプリングする。
- (2) 音響分析を行うことにより、排気音を「爆発1次成分」「気流音」などの要素に分解する。
- (3) それぞれの要素に適当な重みづけをして加算し、出力する。重み付けは任意に設定できるため、望ましい特性を持った排気音が得られる。また、加速中要素の重みづけを一定とすることにより、音色の変化しない加速音を得られる。

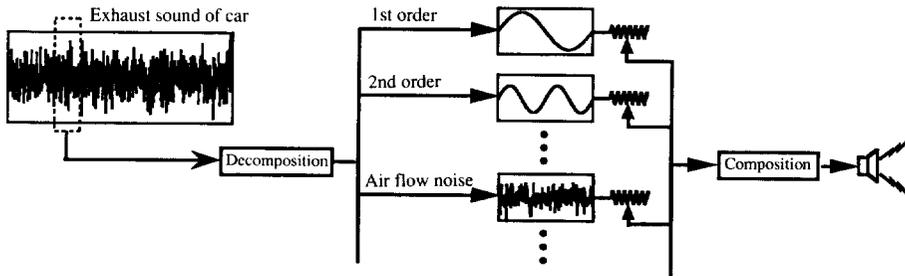


Fig.16 Synthesis of exhaust sound.

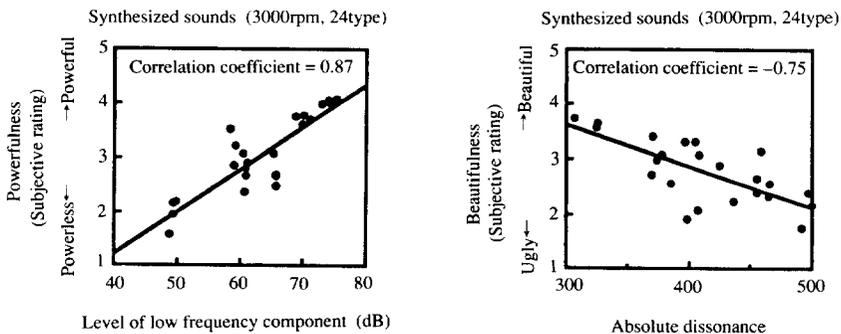


Fig.17 Relation between subjective rating and objective rating.

4.3.2 実験結果

前節の合成システムで合成した排気音を用いて「迫力」「美しさ」の官能評価実験を行った。実験条件を以下に示す。

- パネリスト：自動車騒音の専門家12名
- 試験音： 実車排気音を基に合成した排気音
24種、エンジン回転数3000rpm
- 音提示法： ヘッドホン
- 評価項目： 迫力のある - 迫力のない、きれい - 汚い
- 評価法： 5段階評価

その結果、「迫力」は「低域成分レベル」と、「美しさ」は「絶対不協和度」^{11,12)}との相関が高いことが明らかになった (Fig.17)。なお「絶対不協和度」は主に楽音の濁りの評価を対象とした指標で、音色を構成する純音成分の各対に対してそれぞれ不協和度を定め、それらを加算した値で音を評価する。自動車排気音に適用するにあたってFig.18のような方法を用いた。

4.4 客観評価法の作成

4.4.1 評価法

以上より、排気音色が「迫力」「美しさ」で表現でき、それぞれは「低域成分レベル」「絶対不協和度」で定量化できることが明らかになった。そこで排気音色評価法として、排気音の「低域成分レベル」(迫力音響指標)と「絶対不協和度」(美的音響指標)とを計測し、それぞれを横軸・縦軸とした2次元平面上での測定点の位置によって評価するという方法を作成した (Fig.19)。

4.4.2 適合性評価との関係

本方法によって排気音色の性質を評価できることを確認するため、20種の実車排気音に対し「クーペ、セ

ダンへの適合性評価」との関係性を調べた。その結果、2つの音響指標による「GT・スポーツクーペとしての優劣」「スポーティセダンとしての優劣」の官能評価値に対する重相関係数はそれぞれ0.89, 0.88であり、本方法によって排気音色の性質を評価できることが確認できた。

また、Fig.20は、本評価法による実験音の評価結果を表した例である。図中、各点の記号は適合性評価の官能評価値を表し、点線は2つの音響指標による適合性評価の重回帰分析結果 (適合性評価の等評価値線) を表す。GT/スポーツクーペとしての適合性評価はスポーティセダンとしての評価より迫力重視であることがわかる。

このように、迫力音響指標と美的音響指標で作られる2次元平面上の位置によって排気音色の性質、位置付けを明らかにできることがわかった。

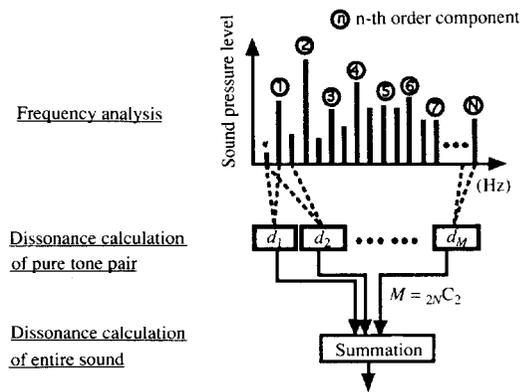


Fig.18 Measurement of absolute dissonance.

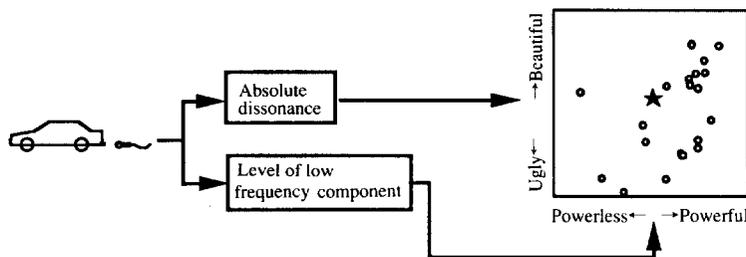


Fig.19 Method for evaluating exhaust sound quality.

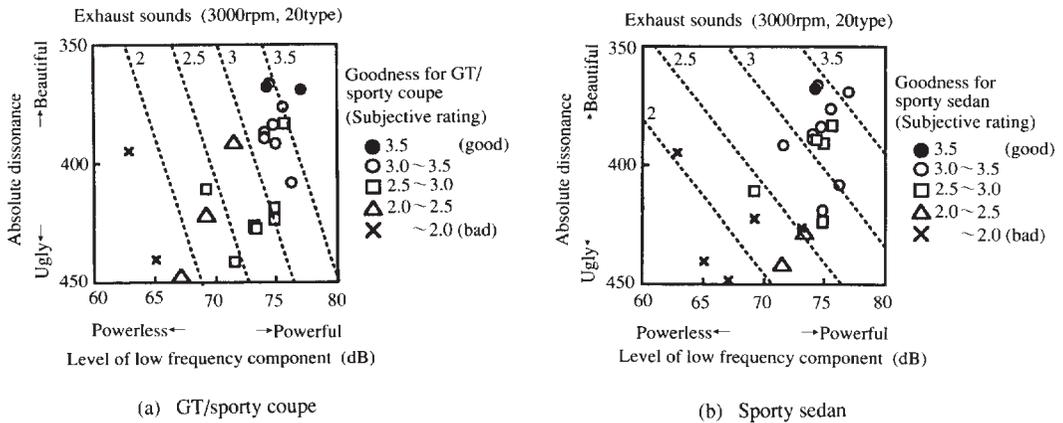


Fig.20 Example of evaluation and goodness for specific type of car.

5. むすび

本報告では、音色評価法の作成法およびエンジン音と排気音の音色評価法について述べた。

作成した音色評価法を用いることにより、従来曖昧であった音色の位置づけや評価を客観的かつ定量的に行うことができるようになった。評価値を用いて、音色改善の指針としたり、改善効果を確認したり、競合車との比較を行ったりすることが可能である。

おわりに、本研究を進めるにあたりご協力頂いたトヨタ自動車第3車両実験部藤井部長および第4パワートレーン部黒田スタッフリーダー、貴重な示唆を頂いた大阪芸術大学北村音一教授に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 小林茂雄：“SD法”，日科技連官能評価セミナー・テキスト，(1985)，14p.，日科技連
- 2) Andrews, S. A., et al.：“The Analysis and Mechanism of Engine Crank Rumble”，I Mech E Conf. Publication 1979-10, (1979), 99
- 3) Tsuge, K. et al.：“A Study of Noise in Vehicle Passenger Compartment during Acceleration”，SAE Tech. Pap. Ser., No. 850965, (1985), 8p.
- 4) Viemeister, N. F.：“Temporal Factors in Audition：A System Approach”，Psychophysics and Physiology of Hearing, Ed. by Evans, E. F. and Wilson, J. P., (1977), 419, Academic Press
- 5) Zwicker, E.：“Subdivision of the Audible Frequency Range

- into Critical Bands”，J. Acoust. Soc. Am., 33(1961), 248
- 6) Wakita, T. et al.：“Objective Rating of Rumble in Vehicle Passenger Compartment during Acceleration”，SAE Tech. Pap. Ser., No. 891155, (1989), 8p
- 7) 脇田敏裕，ほか4名：“自動車車室内加速時エンジン音の音色評価”，日本音響学会平成元年度秋季研究発表会講演論文集，(1989)，419
- 8) 赤間洋，ほか2名：“車外騒音の音色評価手法の開発”，自動車技術会学術講演会前刷集861, (1986), 235
- 9) 古郡了，ほか4名：“合成音による排気音の評価”，自動車技術会学術講演会前刷集902, (1990), 2.133
- 10) 脇田敏裕：“排気音色評価法(1) 定常音色の評価”，自動車技術会学術講演会前刷集912, (1991), 1.25
- 11) Kameoka, A. and Kuriyagawa, M.：“Consonance Theory Part I：Consonance of Dyads”，J. Acous. Soc. Am., 45-6 (1969), 1451
- 12) Kameoka, A. and Kuriyagawa, M.：“Consonance Theory Part II：Consonance of Complex Tones and its Calculation Method”，J. Acous. Soc. Am., 45-6(1969), 1460
- 13) 星野博之，脇田敏裕：“排気音色評価法(2) 音色変化の評価”，自動車技術会学術講演会前刷集912, (1991), 1.29

著 者 紹 介



脇田敏裕 Toshihiro Wakita

生年：1960年。

所属：機械認識研究室。

分野：自動車の音色評価，合成。

学会等：日本音響学会，自動車技術会会員。