

## 直列4気筒小型車の車室内エンジン音色

寺澤位好，小沢義彦

## Quality of Engine Sound in Interior of Compact Sedan with 4-cylinder Engine

Noriyoshi Terazawa, Yoshihiko Kozawa

## 要 旨

近年，加速時の車室内におけるエンジン音色は感性品質面での重要ポイントとして捉えられ，その改善に向けた開発が進められている。開発を効率的に進める上で，心理音響指標による定量評価が改善方向の検討のために有効かつ必要である。本研究は，加速中の車室内におけるエンジンの音色を定量的に評価するエンジン音色評価法の作成を目的とする。対象とした車両は，直列4気筒ガソリンエンジン搭載の小型車である。

官能評価実験により，4気筒エンジン音は静粛性因子と金属性因子で表現できることを明らかに

した。静粛性因子は，こもり音およびゴロゴロ音の大きさを表わす心理音響指標を用いて指標化できた。金属性因子は，「歯切れ」の心理音響指標としてMetallic sound Index(MI)を官能評価実験を基に導出し，指標化できた。さらに，小型車としてのエンジン音色の良否を表わす総合評価を，静粛性因子と金属性因子の心理音響指標を用いて定量化し，エンジン音色評価法を作成した。本評価法を4気筒乗用車へ適用し，開発車両の音色の位置付けの把握，および音色目標の設定に有効であることを示した。

## Abstract

Recently, the quality of engine sound in a passenger car compartment during acceleration has been considered more important for sensory quality, and its improvement method has been under development. An objective evaluation method by psycho-acoustic indexes is effective and necessary for improving the sound quality. In this study, we developed an objective method of evaluating the sound quality during acceleration of a compact sedan with a 4-cylinder gasoline engine.

The result of a subjective evaluation test revealed that the sound quality of a 4-cylinder gasoline engine was expressed by two factors, 'annoying' and 'metallic'. The 'annoying' factor was expressed by psycho-

acoustic indexes of booming noise and rumbling noise. The 'metallic' factor was expressed by the metallic sound index (a new psycho-acoustic index) based on another subjective evaluation test. Furthermore, the total engine sound quality for a compact sedan was expressed by these objective factors. As a result, an objective method of evaluating the engine sound quality has been developed. Applying this objective evaluation method to interior sounds of passenger cars with 4-cylinder engine, we found that we could obtain the characteristics of sound quality, which were effective for determining the target of the engine sound quality for a developing car.

## キーワード

エンジン音，車内音，音色，客観評価，感性，静粛性因子，金属性因子，こもり音，ゴロゴロ音

## 1. はじめに

近年、自動車の室内騒音は年々競って騒音レベルの低減がはかられ、それが限界に近づくとともに音質面での改善に重点が移ってきた。これまでに、車室内の音質改善に関して心理的側面あるいは物理的側面から様々なテーマが研究されてきたが<sup>1-9)</sup>、これらはゴロゴロ音や音の粗さなど、個別に対応したものが多く、エンジン音色をトータルに論じた報告は少ない。

本研究では、直列4気筒ガソリンエンジン搭載の小型車に対して、車室内のエンジン音色を決定する因子を明確にするとともに、その音色因子を定量化したエンジン音色評価法について報告する。

なお、本報告中におけるエンジン音とは、車が加速中に顕著に聞こえる音と考え、ときにはエンジン音と区別されるこもり音、吸気音、排気音等も含めることとし、また燃焼音や機械音等の空気伝播音も、エンジン懸架系からの振動伝達音も全てエンジン音と定義した。

## 2. エンジン音を表現する因子

### 2.1 官能評価実験

エンジン音を表現する因子を抽出するために、官能評価実験（実験1）を行った。提示音には、Table 1に示す1500～2000ccの4気筒エンジン搭載

の代表的国産車および欧州車7車種の加速時車室内音を基に加工・合成した音（10種類：A～J）を用いた。加速時間は10秒に統一、エンジン回転数範囲は2500～5000rpmとした。今回使用した車室内音の分析・合成手法<sup>10)</sup>は、車室内音中のエンジン音に同期する次数成分とそれ以外の非次数成分（路面音、風切り音等）に分離することにより、各々の成分を独立に加工・合成できる。

評価方法は、実験中の評価尺度を一定にするために、基準音（音F）を設定したSD (Semantic Differential) 法（5段階評価）とした。その他の実験条件を以下に示す。

評価項目：澄み、滑らかさ、歯切れ、軽快感、  
静かさ、こもり感、リニア感

提示方法：ヘッドフォン (STAX SR- $\Lambda$ )

被験者：自動車騒音の専門家14名、  
一般7名 計21名

被験者は、聴力正常な20代から50代の成人男女（うち女性2名）である。

### 2.2 因子の抽出

官能評価実験結果の主成分分析法による因子分析結果をTable 2に示す。この結果から、エンジン音は二つの因子でほぼ表現可能（累積寄与度：約82%）であることがわかる。

次に各々の因子の意味を考察すると、Table 2より第一因子に関しては、「静かさ」、「こもり感」、「滑らかさ」と関連が強く、「静粛性(Annoying)」に関する因子であると言える。また、第二因子に

Table 1 Sound of subjective evaluation test (Experiment 1).

Sound	Based car of synthesis (displacement [cc], car)	Contents of edit for order components
A	2000, Car 1	none
B	2000, Car 2	none
C	2000, Car 3	emphasize 4,8th order [+12dB]
D	2000, Car 3	none
E	1500, Car 4	emphasize half of order [+6dB]
F	1500, Car 4	none
G	1500, Car 4	emphasize 4,6,8th order [+6dB]
H	2000, Car 5	none
I	1900, Car 6	none
J	1500, Car 7	emphasize 2nd order [+6dB]

Table 2 Result of factor analysis (Factor loading - Experiment 1).

Adjectives	Factor I	Factor II
Clean	0.482	0.575
Smooth	0.946	-0.070
Crisp	-0.277	0.919
Alive	0.049	0.941
Quiet	0.942	0.021
Booming	-0.886	-0.048
Linear	0.530	0.707
Contribution rate(%)	48.5	33.3
Sum of contribution rate(%)	48.5	81.8

関しては、「歯切れ」、「軽快感」と関連が強く、「金属性(Metallic)」に関する因子であると言える。

以上より、4気筒エンジン音は静粛性因子と金属性因子で表現できることが明らかとなった。

### 3. 因子の心理音響指標解明と指標化

#### 3.1 静粛性因子

静粛性因子には「静かさ」、「こもり感」、「滑らかさ」の評価語が含まれるが、静粛性因子の心理音響指標（以下単に指標と略）化に対しては、これらの各評価語に対応する指標解明が必要である。その前に各評価語間の相関を調べたところ、「こもり感」と「静かさ」の間の相関は高く（相関係数：-0.81）、この二つの評価語は「こもり感」で代表できると考えられる。そこで静粛性因子の要因として「こもり感」と「滑らかさ」を考慮し、これらの評価語に対応する指標によって静粛性因子の指標化を検討することとする。

「こもり感」に関しては、こもり感評価法<sup>9)</sup>より算出されるこもり音指数BN (Booming-noise Number) と良い対応があることがわかっている。BNは、4気筒エンジン車の車室内における「こもり感」の指標であり、回転2次および回転4次成分レベルに対して、こもり感に基づくしきい値を設定し、時間領域でしきい値以上の成分を積分することにより算出される。BNの値が大きい程、人は「こもり感」を強く感じる。

また、「滑らかさ」は、エンジン音のゴロゴロ感 (Rumbling Noise) につながる感覚量であり、これまでの研究からゴロゴロ音評価法<sup>5)</sup>より算出されるゴロゴロ音レベルRL (Rumbling-noise Level) と良い対応があることがわかっている。RLは、車室内のゴロゴロ音の大きさを表現する指標であり、臨界帯域<sup>11)</sup>毎に算出されるエンジン2回転および1回転周期の振幅変動成分に対して、変調度および変調周波数などの聴感補正の重みを加えて算出される。RLの値が大きい程、ゴロゴロ音は大きく感じられる。

以上のことより、実験1で得られた静粛性因子得点と、こもり音指数BN、ゴロゴロ音レベルRLとの重回帰分析によって、静粛性因子に関する評価式(1)を導いた（重相関係数：0.87）。

$$f1 = 10.61 - 0.30 \cdot BN + -0.16 \cdot RL \quad (1)$$

f1：静粛性心理音響指標

BN：こもり音指数 [dB]

RL：ゴロゴロ音レベル [dB]

静粛性心理音響指標f1は正規化（平均0，分散1）した値であり、静粛性が高いほど大きな値をとる。式(1)は、従来からエンジン音の悪い音とされてきたゴロゴロ音とともに、こもり音もエンジン音色に対して大きな寄与を持つことを示している。

Fig. 1に、静粛性因子得点と式(1)から算出される静粛性心理音響指標との関係を示す。図中の記号A～Jは提示音 (Table 1) を表わす。

#### 3.2 金属性因子

##### 3.2.1 官能評価実験

金属性因子には「歯切れ」、「軽快感」の評価語が含まれるが、前節と同様に評価語間の相関を調べると、「歯切れ」と「軽快感」の間には高い相関（相関係数：0.82）があった。そこで、この二つの評価語を「歯切れ」で代表することとし、今後は「歯切れ」に対応する指標によって金属性因子の指標化を検討することとする。

「歯切れ」に対応する指標解明のために、官能

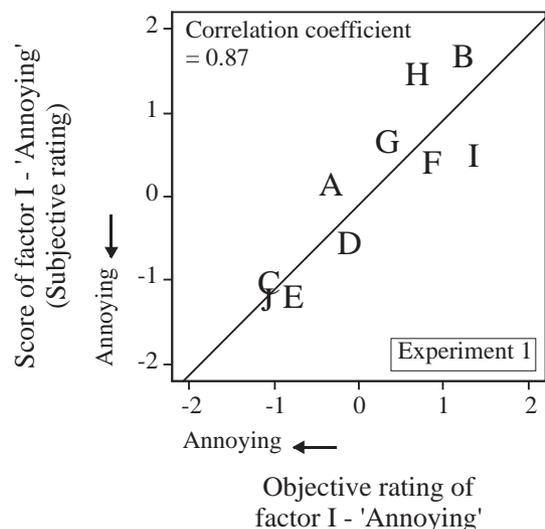


Fig. 1 Relation between subjective rating and objective rating for score of factor I - 'Annoying'.

評価実験(実験2)を行った。提示音には、実験1と同様に4気筒車の実車加速音ベースの加工・合成音を用いた(38種類)。ベース車両は2000ccの国産乗用車1車種である。加速時間は10秒、エンジン回転数範囲は2500~5000rpmとした。この実験に先立って行った少人数の予備実験では、「歯切れ」に関連する周波数帯域は250~1kHzであった。この結果をもとに提示音の加工は、250~1kHz帯域内の次数成分の増減5水準(-6, -3, 0, +3, +6dB)、250~1kHz帯域レベルの増減5水準(-6, -3, 0, +3, +6dB)、全域レベル(Overall)の増減5水準(-6, -3, 0, +3, +6dB)等を施した。これらの提示音をヘッドフォンを通して被験者に提示し、5段階評価で実験を行った。被験者は、自動車騒音を専門とする聴力正常な20代から50代の成人男女(うち女性1名)6名である。

### 3.2.2 実験結果と心理音響指標MIの導出

種々の指標を試行算出し、官能評価との相関を求めた結果、「歯切れ」の官能評価値と相関が高く、独立した変数である二つの指標を明らかにした。一つは、250~1kHzの周波数帯域での「中周波数域の聞こえやすさ」を表現する指標MAであり、もう一つは、従来の知見<sup>4,8)</sup>を参考にした250~1kHzの周波数帯域での「エンジン音の聞こえやすさ」を表現する指標ONである。

「中周波数域の聞こえやすさMA」は、中周波数域(250~1kHz)レベルと全域レベルの比である。また、「エンジン音の聞こえやすさON」は、250~1kHzの周波数帯域での次数成分と非次数成分とのレベル差である。すなわちFig. 2に示すように、スペクトル包絡から次数成分スペクトルが突出した部分の総和である。このONは、Zwickerらが示した雑音に対する純音成分の目立つ程度の尺度である調音性(tonality)<sup>12,13)</sup>と類似ではあるが、それよりはむしろ信号対雑音比(S/N比)に注目しており、純音性が低い成分も信号として捉えている。

上記の二つの指標と、実験2の官能評価結果との重回帰分析により、「歯切れ」を表現する新たな指標として以下の式(2)で表現できるMI(Metallic sound Index, 単位dB)を導出した(重相関係数:0.95)。

$$MI = 2 \cdot MA + 3 \cdot ON \quad (2)$$

$$MA : (250\text{-}1\text{kHzのレベル}) / \text{Overall [dB]}$$

$$ON : 250\text{-}1\text{kHzの次数} / \text{非次数成分 [dB]}$$

次に、実験1で得られた金属性因子得点を、式(2)のMIを用いて表現することにより、金属性因子の評価式(3)を導いた(単相関係数:0.87)。

$$f2 = -0.83 + 0.10 \cdot MI \quad (3)$$

f2: 金属性心理音響指標

MI: Metallic sound Index [dB]

金属性心理音響指標f2は正規化した値であり、金属性(歯切れ)が強いほど大きな値をとる。

Fig. 3に、金属性因子得点と式(3)から算出され

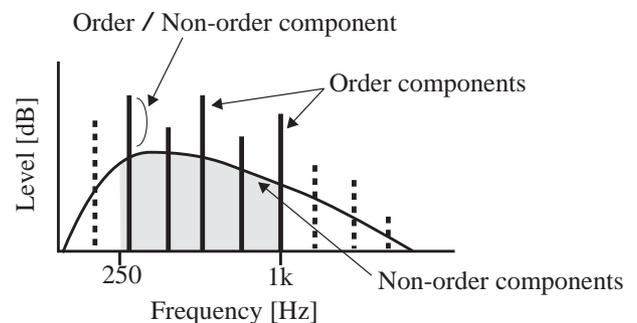


Fig. 2 Order components projecting from non-order components.

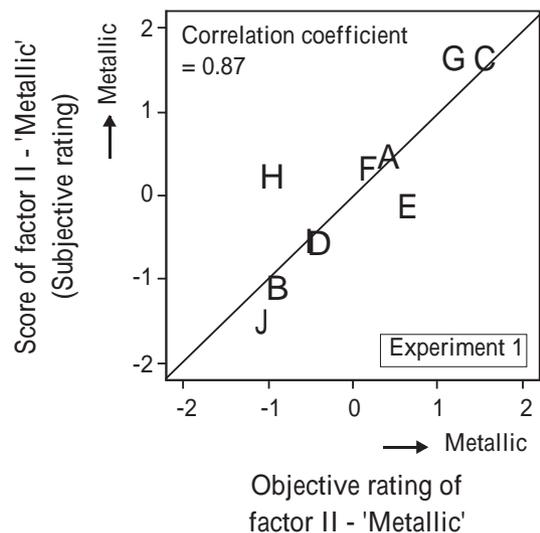


Fig. 3 Relation between subjective rating and objective rating for score of factor II - 'Metallic'.

る金属性心理音響指標との関係を示す。図中の記号A～Jは提示音を表わす。

#### 4. エンジン音色の総合評価

##### 4.1 官能評価実験

ここでは、エンジン音色の良否を判定する総合評価値の指標化のために、エンジン音の良否を評価項目とした官能評価実験（実験3）を行った。提示音は、できるだけ車室内に近い状態で被験者に音を聞いてもらうことを考慮して、4気筒ガソリンエンジン車の実車加速走行音（エンジン回転数範囲：2500～5000rpm）を運転席両耳位置にて収録した音（12車種）をヘッドフォンにて提示した。なお、被験者には評価イメージとして小型セダンのエンジン音色の良否を評価してもらうように教示した。被験者は、自動車騒音を専門とする聴力正常な20代から50代の成人男女12名（うち女性1名）である。評価方法は、5段階評価とした。

##### 4.2 実験結果と総合評価式の導出

実験3の官能評価結果と、式(1)、式(3)から算出される各提示音の静粛性心理音響指標と金属性心理音響指標との重回帰分析によって、4気筒ガソリンエンジンの小型セダンに対するエンジン音色の総合評価式(4)を導いた（重相関係数：0.88）。

$$ESQ = 0.70 \cdot f1 + 0.30 \cdot f2 \quad (4)$$

ESQ：エンジン音色総合評価指標

f1：静粛性心理音響指標

f2：金属性心理音響指標

式(4)から算出されるエンジン音色総合評価指標ESQ (Engine Sound Quality) と実験3の官能評価値との関係をFig. 4に示す。なお、官能評価値、計算値ともに正規化した値で示す。

式(4)の検証のために、異なった提示音群（12車種）を用いて実験3と同様の手法による官能評価実験（実験4）を行った。提示音は実験3と同様に4気筒ガソリンエンジン車の実車加速走行音（エンジン回転数範囲：2500～5000rpm）を運転席両耳位置にて収録した音である。被験者は、聴力正常な20代から50代の成人男女18名（うち女性1名）である。Fig. 5に官能評価値と式(4)から算出されるエンジン音色総合評価指標との関係を示す。Fig. 5においても官能評価値と計算値との相関は高く（相

関係数：0.80）、式(4)は小型セダンのエンジン音色の良否を判定する評価式として使用できるものであることが確認された。

なお、式(4)から静粛性が高く、金属性が強いほど総合評価値は良い値となることがわかる。すなわち、エンジン音色の向上のためには、悪い音をなくすことに対応する静粛性の改善とともに、良

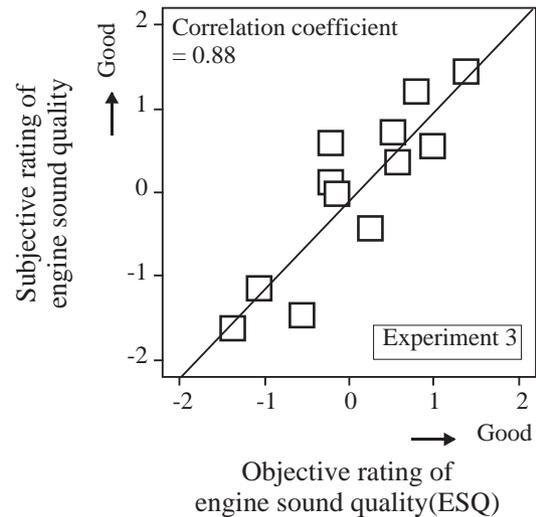


Fig. 4 Relation between subjective rating and objective rating of engine sound quality for compact sedan.

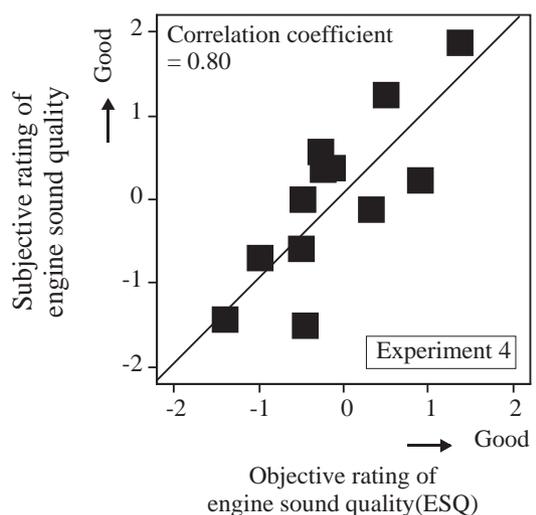


Fig. 5 Relation between subjective rating and objective rating of engine sound quality for compact sedan (Verification of ESQ).

い音を積極的に出すことに対応する金属性の改善のどちらも有効であると言える。

## 5. 評価法の適用事例

4気筒エンジン音色評価法の適用事例として、4気筒ガソリンエンジンの小型乗用車13車種の静粛性心理音響指標と金属性心理音響指標による音色分布をFig. 6に示す。図中の斜線は、エンジン音色総合評価指標ESQの等評価線である。同図中に、2000ccのFF小型ファミリーセダンの新旧モデル(新: , 旧: )の布置の変化を示した。新モデルは旧モデルに対して、ピストン、コンロッドなどの往復質量の低減、エンジンマウント動バネ定数の低減、マウントブラケットの剛性向上、などの音色改善のための対策を施しているが、Fig. 6ではその音色改善効果が主に静粛性心理音響指標の向上として確認できた。また、その結果、エンジン音色総合評価指標は1.5の改善となり、同クラス車種と比較して、音色の位置付けはトップレベルにあることも確認できた。

## 6. まとめ

小型セダンクラスを対象に、直列4気筒エンジン音は、静粛性因子と金属性因子で表現できることを明らかにし、それらの因子を心理音響指標に

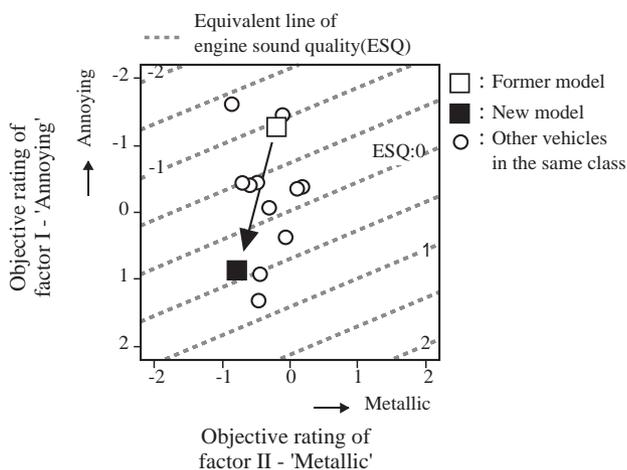


Fig. 6 Disposition of engine sound quality by objective rating of 'annoying' and 'metallic' for compact sedan with 4-cylinder engine.

より指標化した。さらに、エンジン音色の良否を表わす総合評価式を導き、4気筒エンジンの音色評価法を作成した。

現在の車両(エンジン)開発では、静粛性の改善はもとより、より積極的に音を出して音色の改善を行う「エンジンの音創り」が試みられている<sup>14)</sup>。本評価法は、開発車両の音色目標の設定など、音色をデザインするために有効なツールの一つとして考えることができる。

最後に、本研究を進めるにあたりデータ提供、討議頂いたトヨタ自動車第1エンジン技術部第2機能設計室の珠玖達良主査、山本憲一SSE、小菅浩氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 八木橋渉, 今井ひろし: "信号処理装置を用いた車室内加速時騒音評価に関する一考察", 自動車技術会講演前刷集892, (1989), 157
- 2) 橋本竹夫, 高尾秀男: "乗用車走行時の車内音の主観評価 - 第2報 主観評価と騒音評価量の関係 - ", 自動車技術会論文集, No.43, (1990), 129
- 3) 脇田敏裕: "自動車音色の可視化", 自動車技術会講演前刷集933, (1993), 93
- 4) 佐藤清臣, ほか2名: "自動車の音質評価について", 自動車技術会講演前刷集892, (1989), 1
- 5) Wakita, T., et al.: "Objective Rating of Rumble in Vehicle Passenger Compartment During Acceleration", SAE Pap. Ser., No.891155
- 6) 山下剛, ほか3名: "自動車車室内音の音色評価について", 日本ゴム協会誌, 63-3(1990), 42
- 7) Bisping, R.: "Emotional Effect of Car Interior Sounds: Pleasantness and Power and Their Relation to Acoustic Key Features", SAE Tech. Paper Ser., No.951284
- 8) 星野博之, ほか3名: "車内音のバランス評価", 自動車技術会講演前刷集953, (1995), 181
- 9) 星野博之, 小沢義彦: "加速時の自動車車室内におけるこもり感評価法", 日本音響学会講演論文集, (1996), 671
- 10) 寺澤位好: "車室内音色のシミュレーション", 豊田中央研究所 R&Dレビュー, 31-2(1996), 86
- 11) 難波精一郎: 聴覚ハンドブック, (1984), 111, ナカニシヤ出版
- 12) Zwicker, E., et al.: Psychoacoustics Facts and Models, (1990), Springer-Verlag
- 13) Terhardt, E., et al.: "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals", J. Acoust. Soc. Am., 71(1982), 679
- 14) 岩崎洋一, ほか2名: "6気筒エンジン乗用車の音色創り", 自動車技術会講演前刷集976, (1997), 339

## 著者紹介



寺澤位好 Noriyoshi Terazawa

生年：1967年。

所属：機械認識研究室。

分野：自動車の音色評価，解析に従事。

学会等：自動車技術会会員。



小澤義彦 Yoshihiko Kozawa

生年：1947年。

所属：システム2部。

分野：自動車の音色，環境騒音，ヒューマンインタフェースに従事。

学会等：日本音響学会，自動車技術会，日本色彩学会会員。