128 自動車の音質評価データベースの作成

Creation of Automotive Sound Quality Evaluation Database

○非 星野 博之 (豊田中央研究所) 正 戸井 武司 (中央大学)

Hiroyuki Hoshino, Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute, Aichi 480-1192

Takeshi Toi, Chuo University, 1-13-27, Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

This paper describes a large-scale automotive sound quality evaluation database created by the JSAE Sound Quality Evaluation Research Technical Committee. This database was created by conducting subjective evaluation tests under controlled conditions and using common procedures. It involves the subjective evaluation data for the interior sounds of accelerating gasoline passenger cars by 101 Japanese test subjects, and for the exterior sounds of diesel trucks at idle by 143 Japanese test subjects. Moreover, the subjects' profiles data (gender, age, sound quality specialists, and so on) are included. We can carry out various analyses on automotive sound quality and some effective results for improvements of sound quality can be obtained by using this database.

Key Words : Sound, Noise, Audition, Sound Quality, Subjective Rating

1. はじめに

自動車の音質は、レベル低減だけでなく質的な不快感の低減、より快適な車内・車外音環境の実現、他車との差別化などの要求に伴い、近年ますます重要になってきている。

自動車の音質改善を効率的に行うには、人による評価（主観量）だけでなく、計算機や計測器を用いた客観評価（物理量）に基づいた改善指針の明確化が必要である。

人による評価では、個人差があり、特に一般の被験者が行う場合、再現性、定量性が不十分である。これに対し、一定の経験とトレーニングを積んだ専門被験者は、評価語の共通認識があり、評価の信頼性、再現性が高い⁽¹⁾⁽²⁾。主観評価を行う場合には主観評価法が重要となるが、自動車の音質評価に関しては、SD法がこれまでよく用いられており、いくつかの形容詞対を用いた評価事例がある^{(3)~(6)}。ただし、評価に個人差があるため、できるだけ多くの被験者による評価が必要である。

一方、計算機や計測器を用いた解析・客観評価（物理量）に関しては、物理的なレベルを表す物理量はほぼ共通化してきており、騒音レベル、音圧レベル、周波数スペクトル、オクターブバンドレベル等が用いられているが、音質評価のための心理物理量はまだ固まっていない。しかしながら、最近しばしば有効性が示される心理物理量として、ラウドネス、シャープネス、ラフネス等を挙げることができる^{(7)~(9)}。自動車の音質評価において、このような各種物理量がどのような主観量と対応するのかを明確にしていくことが重要と考えられる。

そこでまず、主観評価実験の実験手続きを標準化し、各機関が独自に行うよりも大規模（被験者 100 名以上）で詳細解析が可能な音質評価データベースを作成することにより、目的に応じたいろいろな解析を行えるようにすることが必要と考えられる。さらに、このデータベースを用いて、ラウドネス等の標準的になりつつある心理物理量に関して、主観量との関係を調べることでその有効性を明らかにすることは、今後の音質改善において、共通的な知見として大いに役立たせることができると考えられる。

このような立場に基づき、2002 年度より自動車技術会音質

評価技術研究会（現音質評価技術部門委員会）においては、以下の二点を目的として活動を行ってきた。

1. 代表的な手続きにより条件の統制された実験を行い、主観量と物理量との関係解析等の詳細な解析に耐えうる大規模音質評価データベースを作成する。
2. 各種心理物理量の自動車の音質評価における有効性を調査する。

本報告では、音質評価データベースの中味である音質評価実験の詳細、主観評価結果、主観量と物理量との相関解析等のいくつかの解析結果について述べる。

2. 音質評価実験

2.1. 評価対象音の決定

音質評価技術研究会がまとめた自動車音源 CD のサンプル音から適切な音源を選択・加工して、実験に用いることとした⁽¹⁰⁾。今回、評価対象としたカテゴリは、「ガソリン乗用車加速時車内音」と「ディーゼルトラックアイドル車外音」である。音質評価のためには、提示音にウインカ音等の異音の混入していないことや、各種条件の統一が必要である。今回は、以下の基準を用いた。

ガソリン乗用車加速時車内音

- ・回転数範囲：2000rpm から 4000rpm に上昇
- ・加速時間：4~8 秒で加速（平均 6 秒）
- ・騒音レベル：3000rpm 時 68dBA（サンプル音のほぼ平均値）に統一

ディーゼルトラックアイドル車外音

- ・時間：4 秒
- ・騒音レベル：4 秒間の平均 68dBA（サンプル音のほぼ平均値）に統一

ガソリン乗用車加速音については 21 個、ディーゼルアイドル車外音については 13 個のサンプル音を選択し、上記条件となるように音データを加工した。加速音は、理想的には

加速時間も統一できるのが望ましいが、その場合には分析合成等の技術が必要となる⁽¹¹⁾。今回は収録時のままの加速時間とした。

2.2. 主観評価実験

SD法による主観評価実験を行った。これまでの研究事例に基づき、自動車の音質評価に適すると考えられる形容詞対を下記の通り選択した^{(1)(3)~(6)}。点線の下線は他方のカテゴリにはない形容詞対である。選択の考え方としては、総合的な印象を表す形容詞対（不快なー快い、安っぽいー高級な）と、美的・迫力・金属の音色三因子に対応する形容詞対が含まれるようにした⁽¹⁾。

ガソリン乗用車加速時車内音

不快なー快い、安っぽいー高級な、粗いー滑らか、
濁ったー澄んだ、こもらないーこもった、
歯切れの悪いー歯切れの良い、落ち着いたーかん高い、
弱々しいー力強い、重々しいー軽快な、
静かなー騒々しい、軟らかいー硬い

ディーゼルトラックアイドル車外音

不快なー快い、粗いー滑らか、
濁ったー澄んだ、衝撃的なー衝撃的でない、
歯切れの悪いー歯切れの良い、落ち着いたーかん高い、
弱々しいー力強い、重々しいー軽快な、
静かなー騒々しい、軟らかいー硬い

評価方法としては、基準音を設定し、基準音に対して相対的にどう感じるかを7段階（-3～+3）で評価させた（図1）。

繰り返し評価に関しては、実際には全ての評価音について行うのが理想であるが、今回は評価音の数と評価語（形容詞対）の数が多かったため、評価音のうちの2音のみ繰り返し評価を行った。

音の提示方法は、一つの評価語に対して、基準音→評価音の順に提示し、被験者は何度でも聞きなおせるようにした。

音の提示機材としては、パソコン、および、音質評価技術研究会において推奨された（または同等の性能の）オーディオインターフェイスとヘッドホンを用いた⁽¹²⁾。

被験者に関しては、性別、年代、音質関連従事者かどうか、等の属性調査を行った。

2.3. 主観評価結果

図2に日本人による主観評価結果（加速時車内音 101名、

Fig.1. Seven-rank evaluation sample (for Japanese)

(a) Accelerating gasoline passenger cars (n=101)

(b) Diesel trucks at idle (n=143)

Fig.2. Gender and age distribution of the test subjects

アイドル車外音 143名)の男女別年代分布を示す。結果として、30歳代以下の男性が多く、女性がかかなり少ないデータとなった。男女比や年代比はもう少し均等化できると理想的である。また、音質関連従事者は、加速時車内音では、男性86名中67名、女性15名中7名、アイドル車外音では、男性121名中94名、女性22名中5名であった。

表1(a)にガソリン乗用車加速時車内音、表1(b)にディーゼルトラックアイドル車外音の主観評価結果（全被験者の平均値）を示す。表中のIDは、自動車音源CD中の音源IDである。表中の評価値は、値が+側に大きいほど1行目に示した形容詞で示される感覚が基準音に対して大きいことを意味する。

ここで、アイドル車外音の主観評価結果を見ると、「不快なー快い」「粗いー滑らか」「落ち着いたーかん高い」などで、音による評価値の差が大きく、音質がかかなり異なっていることがわかる。それに対して、加速時車内音では音による評価値の差はそれほど大きくない。

Table 1(a). Subjective evaluation results of the interior sounds for accelerating gasoline passenger cars (mean values for 101 test subjects)

ID	快い Pleasant	高級な Expensive	滑らか Smooth	澄んだ Clear	こもった Booming	歯切れの良い Distinct	かん高い Shrill	力強い Strong	軽快な Light	騒々しい Clamorous	硬い Hard
Wagon_2M (base)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUV_1M	0.03	-0.45	-0.35	0.17	-0.67	0.31	0.53	-0.22	0.61	0.43	0.36
Sport_1M	0.39	0.62	1.19	0.46	0.37	0.26	-0.83	-0.20	0.12	-0.52	-0.76
Sport_2M	0.32	-0.18	-0.39	0.36	-0.57	0.93	1.44	1.33	0.99	1.21	0.57
Sedan_5M	-0.46	-0.22	-0.21	-0.57	0.91	-0.24	-0.25	0.99	-1.04	0.87	0.28
Sedan_6M	-0.02	-0.19	0.20	0.32	-0.35	0.32	0.20	0.04	0.40	-0.03	0.05
Sedan_8M	0.29	-0.08	0.34	0.26	-0.35	0.22	0.18	-0.01	0.59	-0.14	0.11
Sedan_11M	-0.51	-0.53	-0.58	-0.22	-0.50	0.10	0.94	0.42	0.27	1.05	0.50
Sedan_13M	-0.35	-0.01	-0.14	0.04	-0.14	-0.07	0.44	0.26	-0.01	0.57	0.21
Sedan_14M	-0.48	-0.16	-0.56	-0.31	0.06	-0.26	0.24	0.35	-0.31	0.79	0.22
Sedan_15M	0.84	0.60	0.73	0.69	-0.76	0.08	-0.40	-0.87	0.81	-0.90	-0.86
Sedan_17M	-0.67	-0.59	-0.74	-0.38	-0.48	-0.25	0.82	0.46	0.24	0.88	0.52
Sedan_18M	-0.13	-0.14	-0.22	0.12	-0.76	0.04	0.77	-0.26	0.82	0.17	0.32
Wagon_1M	-0.34	-0.24	-0.26	-0.23	0.52	0.27	0.29	0.73	-0.17	0.76	0.19
Wagon_5M	-0.66	-0.13	-0.15	-0.44	0.92	-0.30	-0.15	0.61	-0.64	0.75	0.25
Wagon_6M	-1.14	-0.65	-1.21	-1.08	0.51	-0.71	0.54	0.98	-1.35	1.62	0.52
Hatchback_1M	-1.95	-1.45	-1.67	-1.46	1.03	-0.79	1.29	1.58	-1.32	2.50	1.32
Hatchback_2M	-0.40	-0.26	-0.22	0.02	-0.30	0.18	0.58	0.27	0.16	0.75	0.34
Hatchback_8M	0.62	-0.18	0.51	0.41	-0.47	0.18	-0.27	-0.33	0.65	-0.44	-0.33
Hatchback_9M	-0.51	-0.61	-0.17	-0.02	-0.91	-0.16	0.75	-0.63	0.64	0.48	0.19
Hatchback_12M	-0.32	-0.13	-0.51	-0.43	-0.04	0.22	0.28	0.81	-0.14	0.80	0.36

Table 1(b). Subjective evaluation results of the exterior sounds of diesel trucks at idle (mean values for 143 test subjects)

ID	快い Pleasant	滑らか Smooth	澄んだ Clear	衝撃的な Impulsive	歯切れの良い Distinct	かん高い Shrill	力強い Strong	軽快な Light	騒々しい Clamorous	硬い Hard
M_truck_11M (base)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L_truck_9M	-1.07	-1.10	-0.41	-0.96	0.28	0.20	1.26	-0.83	1.04	0.89
L_truck_10M	-0.88	-1.13	-0.14	-0.92	0.49	0.38	0.76	-0.14	0.97	1.06
L_truck_11M	-0.65	-0.54	0.15	-0.40	0.57	1.01	-0.04	0.68	0.98	0.73
L_truck_12M	-1.51	-1.77	-0.28	-1.27	0.33	0.81	0.81	-0.26	1.44	1.49
M_truck_9M	0.17	0.45	-0.11	0.58	-0.13	-0.25	0.21	-0.12	-0.08	-0.20
M_truck_10M	0.86	0.78	0.82	1.01	0.37	-0.21	-1.02	0.94	-0.93	-0.53
H_truck_13M	-1.86	-1.83	-1.26	-1.35	-0.46	0.20	1.43	-1.30	1.49	1.33
H_truck_14M	-1.81	-0.62	-0.17	-0.63	-0.33	1.78	0.12	0.17	1.70	0.60
H_truck_15M	0.03	-0.33	0.49	-0.08	0.56	0.68	-0.12	0.77	0.47	0.59
H_truck_16M	-0.75	-0.88	-0.67	-0.38	-0.59	-0.11	0.58	-0.84	0.61	0.43
H_truck_17M	-0.91	-0.62	0.26	-0.31	0.04	0.93	0.17	0.36	0.99	0.53
H_truck_18M	-0.58	-0.57	-1.01	-0.12	-0.92	-0.46	0.68	-1.07	0.49	-0.07

3. 加速時車内音の各種解析結果

この章では、ガソリン乗用車加速時車内音の主観評価結果について解析を行った結果を示す。

3.1. 解析に用いた物理量

今回、物理量として、騒音レベルと、主観的印象と対応が良いと報告されている下記の心理物理量を用いた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。分析値としては、音全体の平均値と時間ごとの分析値を算出した。

- ・ラウドネス(Loudness)：音の大きさ（臨界帯域ごと）
- ・シャープネス(Sharpness)：音の鋭さ
- ・ラフネス(Roughness)：音の粗さ
- ・変動強度(Fluctuation strength)：20Hz 以下の変動
- ・調音性(Tonality)：純音成分の相対的大きさ

なお、今回用いたサンプル音はバイノーラルヘッド(HATS: Head and Torso Simulator) による収録であるので、左右音で騒音レベルが大きい方を分析値とした。

3.2. 主観評価値と物理量との相関解析

表2に、主観評価値（101 名の平均値）と物理量（各評価音の平均値）との相関解析結果を示す。「静かなー騒々しい」は、ラウドネスと高い相関（相関係数 0.93）を示した（図3）。

また、「不快なー快い」「安っぽいー高級な」「粗いー滑らか」「濁ったー澄んだ」「軟らかいー硬い」についてもラウドネスとの相関係数 0.85 以上となった。「弱々しいー力強い」については、ラウドネスよりも騒音レベルと高い相関（相関係数 0.82）を示した。

全体的な傾向として、3000rpm 時の騒音レベルを統一したにもかかわらず、音全体のラウドネスがかなり異なったため、評価がラウドネスに引っ張られる結果になったと考えられる。

3.3. 解析対象音の限定

全体的にラウドネス依存の評価結果になっていることを考慮し、ラウドネス 18~22sone の音（10 個）に限定して相関解析を行った。結果を表3に示す。表2で相関係数が 0.8 以下であった評価語を斜体文字で示した。「こもらないーこもった」「落ち着いたーかん高い」についてはシャープネスと相関係数 0.8 以上となった。シャープネスと「落ち着いたーかん高い」の評価との関係を図4に示す。

さらに、シャープネスが「安っぽいー高級な」「重々しいー軽快な」の評価に影響していることも示唆された。

3.4. 被験者属性ごとの因子分析

被験者の属性で興味深い点の一つは、音質関連従事者かどうかで評価傾向がどのように異なるかという点である。そこで、音質関連従事者グループと音質関連従事者でないグループについて因子分析を行った。結果を表4に示す。

Table 2. Correlation coefficients between subjective ratings and objective ratings

	SPL (dBA)	ISO532B Loudness (sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Tonality (tu)
Pleasant	-0.71	-0.89	-0.19	-0.39	-0.38	-0.09
Expansive	-0.74	-0.87	-0.44	-0.56	-0.33	-0.02
Smooth	-0.79	-0.89	-0.37	-0.50	-0.15	0.20
Clear	-0.71	-0.87	-0.04	-0.36	-0.26	-0.09
Booming	0.50	0.48	-0.56	-0.15	0.32	0.51
Distinct	-0.28	-0.57	-0.04	-0.24	-0.29	-0.08
Shrill	0.61	0.66	0.68	0.46	0.10	-0.26
Strong	0.82	0.75	-0.12	0.20	0.18	0.16
Light	-0.53	-0.65	0.29	-0.04	-0.23	-0.27
Clamorous	0.88	0.93	0.28	0.36	0.20	0.04
Hard	0.82	0.86	0.35	0.46	0.31	-0.07

Fig.3. Relation between loudness and "Quiet/Clamorous"

Table 3. Correlation coefficients between subjective ratings and objective ratings (Evaluation sounds with loudness of between 18 and 22 sone)

	SPL (dBA)	ISO532B Loudness (sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation Strength (vacil)	Tonality (tu)
Pleasant	-0.47	-0.75	-0.07	0.24	0.14	0.24
Expansive	0.00	-0.23	-0.71	-0.35	0.40	0.22
Smooth	-0.51	-0.75	-0.23	0.11	0.36	0.56
Clear	-0.68	-0.73	0.30	0.28	0.48	0.16
Booming	0.64	0.11	-0.83	-0.62	-0.02	0.41
Distinct	-0.38	-0.59	0.03	0.39	-0.05	-0.39
Shrill	-0.25	0.46	0.82	0.36	0.09	-0.65
Strong	0.54	0.27	-0.68	-0.29	-0.15	-0.09
Light	-0.73	-0.41	0.71	0.61	0.17	-0.25
Clamorous	0.68	0.84	0.05	-0.20	-0.28	-0.31
Hard	0.36	0.64	0.23	-0.05	-0.08	-0.59

結果から、二つのグループで評価傾向はかなり異なることがわかる。音質関連従事者グループでは、第1因子は「かん高さ・美的」因子、第2因子は「歯切れ・軽快」因子、第3因子は「迫力」因子、また、音質関連従事者でないグループでは、それぞれ「美的・快適性」因子、「かん高さ」因子、「歯切れ」因子のように解釈することができる。

3.5. 属性別の主観量と物理量の相関

被験者の属性別に主観量と物理量の相関を調べた。その結果、例えば、「こもらないーこもった」と200Hz以下ラウドネスとの相関係数は、音質関連従事者グループで0.79、音質関連従事者でないグループで0.18と大きく異なった。この結果は、音質関連従事者でない被験者では、「こもった」という形容詞と音の物理的な特徴との対応付け（意味の理解、聴感）が難しいことを示唆している。

4. おわりに

今回作成した音質評価データベースの中味である音質評価実験の詳細と、本データベースを用いたガソリン乗用車加速時車内音に関する主観量物理量相関解析結果、および、いくつかの解析結果について述べた。結果を以下にまとめる。

1. 実験手続きを下記のように標準化し、主観評価結果をデータベース化した。
 - ・ 音の選択基準を設定し、各種条件を統一
 - ・ 基準音に対する相対評価
 - ・ 被験者属性を調査
 - ・ 推奨オーディオインターフェイスとヘッドホンによる音の提示
2. 主観量物理量相関解析により、ガソリン乗用車加速時車内音に対するラウドネス・シャープネスの有効性が示された。
3. 本データベースにより、被験者属性ごとの因子分析のような解析が可能であり、より詳細な結果が得られることが確認できた。

本報告では、日本人による評価データに関して述べたが、海外での主観評価データも100名規模でのデータベース化を進めている⁽¹³⁾。今後、各機関が共通に使える、汎用的で大規模な音質評価データベースとしてまとめていく予定である。

参考文献

- (1) 難波精一郎：音色の測定・評価法とその適用例，東京，応用技術出版，(1992)
- (2) 星野博之，小沢義彦：自動車の音質評価実験法，自動車技術，Vol. 57, No. 7, p. 94-98 (2003)
- (3) 岸篤秀，畑秀二：自動車車室内音音質評価手法について，自動車技術，Vol. 40, No. 4, p. 464-470 (1986)
- (4) 石山武，荒井紀博：車内騒音フィーリングの評価に関する一考察，自動車研究，Vol. 8, No. 5, p. 164-167 (1986)
- (5) 高尾秀男，橋本竹夫：乗用車走行時の車内音の主観評価ーその1 SD法による音質評価形容詞対の選択ー，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 882, p. 467-470 (1988)
- (6) 山下剛，石井康夫，中村光男，北村音一：自動車車室内音の音色評価について，日本ゴム協会誌，Vol. 63, No. 3, p. 42-50 (1990)
- (7) 大橋正尚ほか：音質評価を評価するためのパラメータと計測システム，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 981, p. 101-104 (1998)

Fig.4. Relation between sharpness and "Calm/Shrill" (Evaluation sounds with loudness of between 18 and 22 sone)

Table 4. Factor analysis results (sound quality specialists and non-specialists)

(a) Specialists of sound quality (N=74)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Pleasant	-0.546	0.733	-0.301
Expensive	-0.81	0.46	-0.113
Smooth	-0.839	0.409	-0.255
Clear	-0.508	0.721	-0.445
Booming	0.033	-0.584	0.739
Distinct	-0.179	0.935	-0.121
Shrill	0.983	0.133	-0.006
Strong	0.469	-0.181	0.846
Light	-0.051	0.813	-0.569
Clamorous	0.772	-0.403	0.47
Hard	0.882	-0.227	0.322
Contribution ratio (%)	41.0	32.5	20.8

(b) Non-specialists of sound quality (N=27)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Pleasant	0.687	-0.381	0.587
Expensive	0.387	-0.648	0.381
Smooth	0.717	-0.44	0.515
Clear	0.727	-0.008	0.611
Booming	-0.165	-0.879	-0.046
Distinct	-0.001	0.008	0.909
Shrill	-0.441	0.837	0.012
Strong	-0.919	0.138	0.19
Light	0.814	0.351	0.322
Clamorous	-0.908	0.353	-0.155
Hard	-0.741	0.527	-0.244
Contribution ratio (%)	43.3	25.2	19.8

- (8) E. Zwicker & H. Fastl : Psychoacoustics Facts and Models, Springer-Verlag, New York, (1999)
- (9) 星野博之，加藤裕康：官能評価構造に基づいた風切り音の総合評価法，自動車技術会学術講演会，No. 112-00, p. 9-12, (2000)
- (10) 戸井武司：自動車音サンプルの収集とCD化，自動車技術会音質フォーラムテキスト，p. 3-6, (2002)
- (11) 前田修：エンジン音のリアルタイム合成法，自動車技術会振動騒音フォーラムテキスト，p. 29-34, (2001)
- (12) 前田修ほか：音質評価のための音再生装置と簡易校正装置，自動車技術会振動騒音フォーラムテキスト，p. 23-27, (2004)
- (13) 戸井武司ほか：音質評価の国際比較に対する考察，自動車技術会振動騒音フォーラムテキスト，p. 33-39, (2004)