

スポーツカー室内音の 客観的評価ソフトウェアツールの開発

Development of a New Software for Objective Evaluation of Interior Sound of Sports Cars

石井 康夫*
Yasuo ISHII
F.K. ブランドル**
Franz K. BRANDL

山下 剛*
Tsuyoshi YAMASHITA
S. トーマン** W. ビアメイヤー**
Siegmund THOMANN Werner BIERMAYER

要 旨

12種類のスポーツカーを用いた主観評価と客観的なパラメータの相関解析から、スポーツカー室内音の評価手法を開発した。更に、オーストリア人と日本人のスポーティサウンドに対する感じ方の差異について調査し、両者間にはほとんど差異がないことが明らかになった。これらの研究成果をもとにして、最適なスポーティサウンドを持つスポーツカーの開発に役立つ、音質開発のためのソフトウェアを得ることができた。

ABSTRACT

An optimum description of interior sound of sports cars is developed. This description for sporty sound character is derived from precise subjective evaluations of 12 sports cars and consists of objective parameters. Further, it is found that there is only a slight difference in perception for sporty sound between Austrian and Japanese. As a result of this research, software for sporty sound character is developed for new sports cars that have the optimum interior sound.

1. まえがき

スポーツカーの商品性魅力を向上する上で室内音の音色は重要な要素である。スポーツカーは優れたエクステリアや高出力エンジン、応答性にすぐれたサスペンションを有している。そして、走行時の車室内において、エンジン音は加速時やシフトダウンの際にはドライバーに対し車両の反応を伝える情報である。従って、加速時などのエンジンサウンドはスポーツカー自身の高性能と品質の良さを裏打ちするような音が要求される。その中でスポーティサウンドの実現に対し、具体的な数値目標なしに開発することは効率的ではなく、試行錯誤の開発によって多数の試作品と室内音音色主観評価のための多大な工数が費やされてきた。合理的なスポーティサウンドの開発に際しては、客観的なパラメータを用いて室内音の音色を表現することが不可欠である。これが可能となれば、新車開発にあたり、競合車との相対的な位置付けや新車のコンセプトを考慮して、目標音の候補をスポーティサウンドマップ上にて決めることが可

能になる。その結果としてマップ上の位置に従って作成した加工音を用いて、目標音の候補から試聴による主観評価により目標音を決定することができる。このような室内音音色指標を導入することによって目標室内音決定のみならず、新車開発全体の工数を大幅に低減することも可能になる。しかしながら、スポーツカーの室内音音色について言及した研究^{(1)~(3)}は少ない。

この論文では、スポーツカーの室内音音色を客観的なパラメータで表現する指標作成方法とその適用例を報告する。更にスポーツカー室内音音色に対するオーストリア人と日本人の感じ方の差異について述べる。そしてこれらの研究成果をより有用にするためのソフトウェアを開発したので、その適用例も示す。

2. スポーツカー室内音音色の主観評価方法

室内音の音色指標作成に当たっては Fig.1 に示すようなアプローチフローを用いた。このフローにおいて左側の流

* 栃木研究所

** AVL LIST GMBH

これは主観評価で、右側は客観的解析を表わす⁽⁴⁾⁽⁵⁾。各車の主観評価の評点と、客観的なパラメータを重回帰分析手法などを用いて比較分析することにより、スポーティサウンド指標を作成する方法である。この方法は感覚的な量を、計測器で測定可能なパラメータで表わすための標準的な方法である。

主観評価を実施するにあたり第一に考慮しなくてはならないことは正しく評価項目に適合した被験者を選出することである。客観量との対比に用いることができるまでに高い精度を持った主観評価の評点を得るために、統計学的手

法を用いて被験者の選択を実行した。オーストリア人被験者の選択に当たっては、被験者の候補は内外装・諸元・経済性・動的性能などの車両に関した23項目の重要度に対する質問から、それぞれが重要であると考えられる項目を選択させ、その結果よりスポーツカーのサウンドを評価可能と考えられる被験者を選出した。その結果 Fig.2 に示すように、属性により5つのメインクラスター⁽⁶⁾⁽⁷⁾に分けられた。クラスター2とクラスター3に分類された被験者は、スポーツカーや高級車(エクスクルシブカー)の室内音が重要と考えていることから、これらのクラスターの中から最終被験者として31名を選抜した。

主観評価は路上での実機を用いた路上評価と音響実験室において路上で録音した音の再生による試聴評価の2つの実験を実施した。これらの実験で用いた音は Table 1 に示

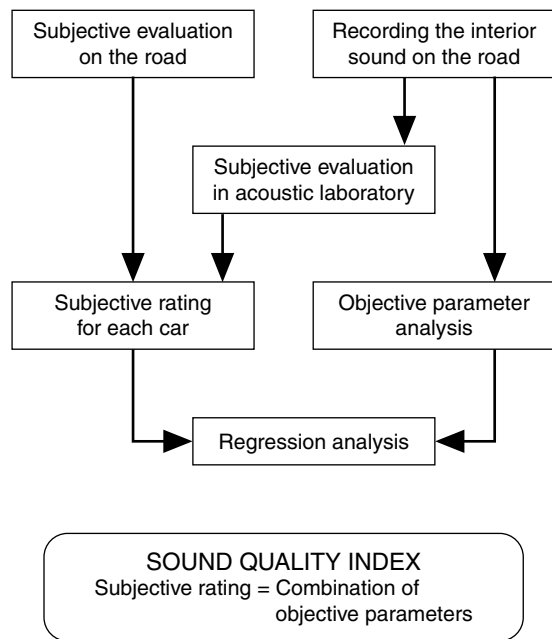


Fig.1 Approach overview to make a sound index

Table1 List of testing sports cars

No.	Engine type	Displacement [liter]
1	L4	2.0
2	L4	2.0
3	L4 + SC	2.3
4	L6	2.8
5	L4	2.0
6	L4	1.9
7	F6	3.4
8	V6	2.0
9	F6	2.5
10	V8	3.5
11	L4	2.0
12	V8	3.6

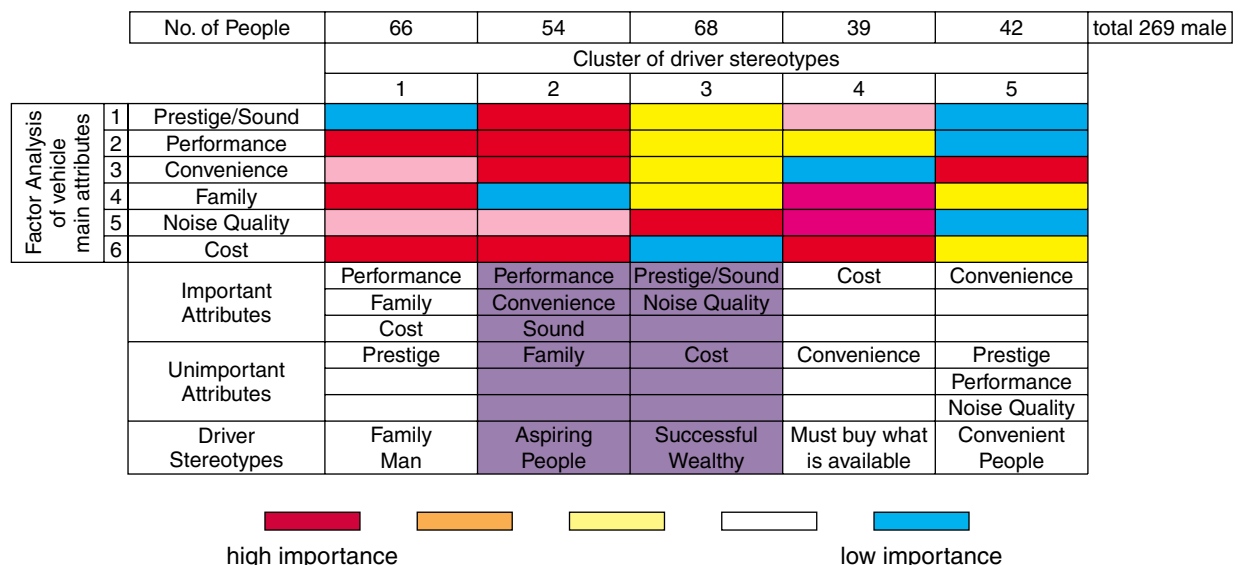


Fig.2 Stereotype of driver

するようなエンジン形式や排気量が異なる良く知られた12種類のスポーツカーの音である。

3. 路上での主観評価

3.1. 方法

路上評価では一人のエキスパートドライバーが車両を運転し、被験者はパッセンジャーシートに座り、室内音評価に集中した。路面は平坦で乾燥したアスファルト舗装であり、走行条件は次の通りである。

2速ギヤ 全開加速

3速ギヤ 全開加速

トップギヤ 150km/h 一定速

路上テストでの設問は「このクラスのスポーツカーとして室内音はどのくらいスポーティと判定しますか。」である。判定は1点の「全然そうとは言えない。」から20点の「全くその通りである。」という評点を付けることにより実施された。

3.2. 結果

22人の被験者の平均得点を3種類の走行条件に対してFig.3に示した。WOT(全開加速)においては、各車の評点の間隔が広く、各車の位置付けが明確になされており、被験者が各車を他から区別できていることが分かる。それに比較して、150km/h 一定速では評点の値が小さく、評点の間隔も狭い。これは、被験者にとってWOTに比べスポーティネス(スポーティの度合い)の評価が難しいことを示している。

また、複数の種類の感覚尺度即ち「どの位音量は大きいですか。」と「どの位スポーティですか。」を同時に評価させる実験を実施した。それぞれの評点を軸に持つ二次元マップ

にその結果をプロットしたものをFig.4に示す。主観評価は22人の被験者により前述の3通りの走行状態に対して実施された。代表として3速WOTでの結果が示されている。Fig.4では、各テスト車に対する全被験者評点の平均とばらつきを示す。平均評点の並び方を見ると、音量とスポーティネス(スポーティの度合い)は正の相関性があるように見える。しかし、各車評点のばらつきは非常に大きく互いの平均評点の差を超過しており精度が不足している。そこでスポーティネスと音量の関係については後述する音響実験室での試聴試験にて音量を等しく編集したサンプル音とオリジナル音を用いて更に検討を加える。

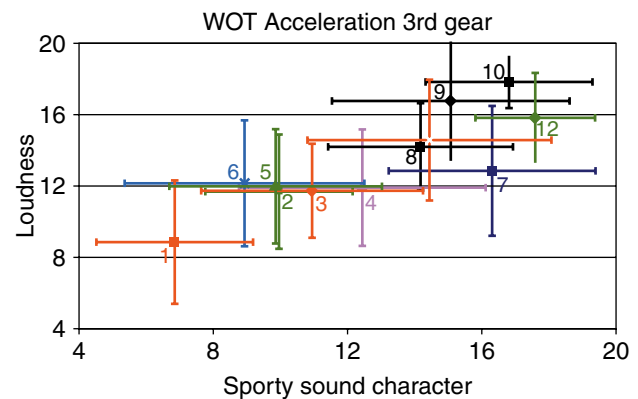


Fig.4 Results of a subjective interior road evaluation of sports cars at WOT 3rd gear (average judgement of 22 test persons, plus spread scatter of judgements for each car)

4. 試聴による主観評価

4.1. 方法

路上での主観評価の時と同様な条件で室内音の録音を実施した。ダミーヘッドマイクロホンはパッセンジャーシートに置かれ、路上評価と同一のエキスパートドライバーがテスト車両を運転する際の室内音を録音した。使用したダミーヘッド録音システムはデジタル録音が可能なヘッドアコースティックス社の HMS IIIである。

この録音した音を用いて、Fig.5に示す音響実験室での音の評価を行った。再生される信号は100Hz以下の低周波と100Hz以上の高周波成分へと2つに分けられる。高周波音はヘッドホンを通して再生される。また、低周波音はサブウーファーを用いて再生され被験者が耳で聞くのと同様に、体で低周波音を感じることができるようになっている。主観評価はAVL社製の主観評価ソフトウェアを用いて実施し、路上テストよりも詳細な評点(1から50点)を使用した。

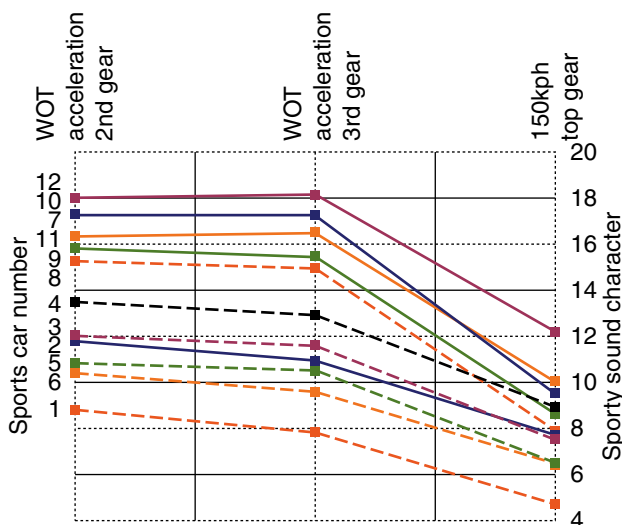


Fig.3 Results of subjective interior road evaluations of sports cars

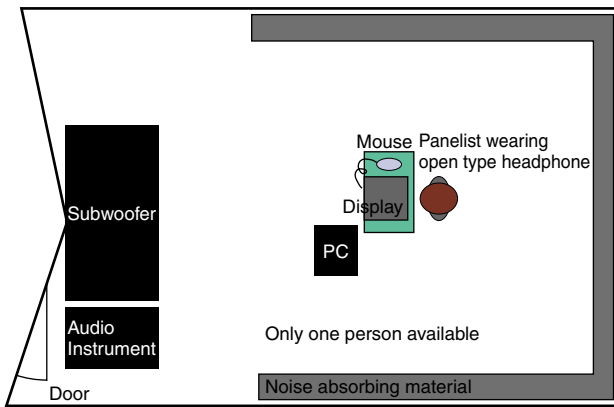


Fig.5 Layout of psychoacoustic laboratory

4.2. 結果

3.2で述べた音量とスポーティネスの相関について実験を行った結果を Fig.6 に示す。これは、オリジナルのサンプル音とラウドネスが等しくなるように調整された音の試聴による「スポーティ」の評点の比較である。各車のデータは左から右へとエンジン回転数が上昇するように記されている。スポーツカー2においてはオリジナルサウンドと等ラウドネスサンプル音に対する評点の傾向が全く異なることが主観評価から得られた。これは、スポーティとラウドネスとは正の相関を示さない場合があることを示している。従って、ラウドネス等の音量についてのパラメータのみでは、スポーティサウンドを表現しきれないことが明確になった。

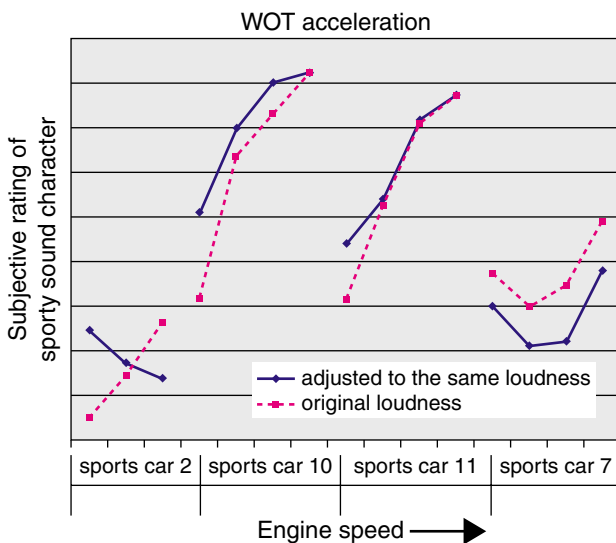


Fig.6 Comparison of subjective rating between original sounds and sounds adjusted to be the same loudness

5. 路上と音響実験室での主観評価の対比

音響実験室での再生音に対する評点が路上での室内音に対するスポーティサウンドの印象と等しいことを証明するためには、試聴による評点と路上での評点を比較検証することが必要である。

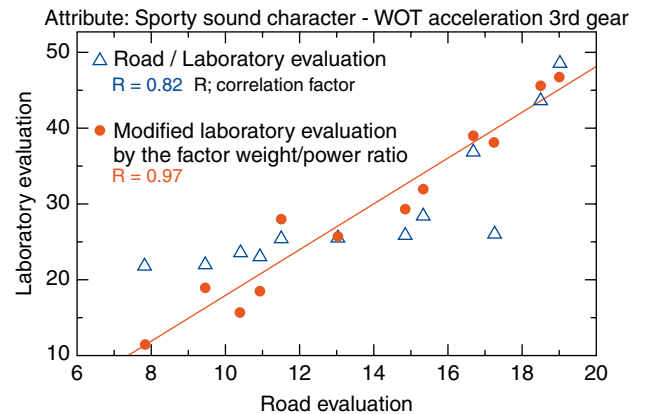


Fig.7 Comparison of subjective laboratory and road evaluation results for 12 sports cars

Fig.7は試聴と路上との評点の比較結果を示している。△は一切の補正が無い状態での評点の比較であり、相関係数は0.82とさほど高い数値ではない。路上で被験者は、音以外にブランドイメージ、視覚、振動や加速度の刺激等を経験しながら判定を下すことになる。そこで、音以外の刺激として加速性能を加味することによる試聴と路上での結果の比較検証を行った。

試聴の評点に各車のウェイトパワーレシオを加えて回帰分析をすると、●のように相関係数は0.97に増加し、非常に良い相関を示した。Fig.8に示すように加速時間と密接に結びついた量としてウェイトパワーレシオがある。従って、

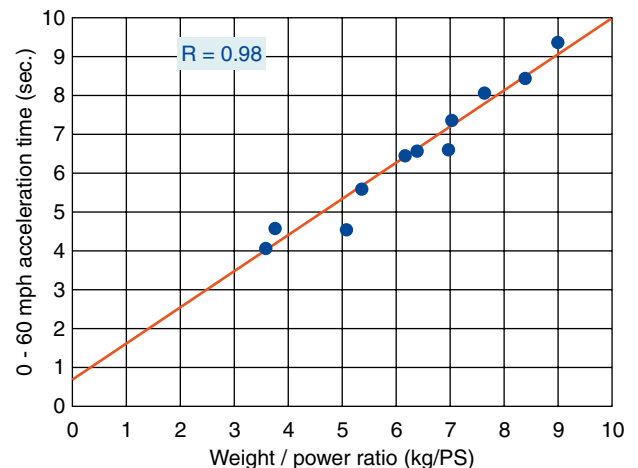


Fig.8 Comparison between weight/power ratio and 0-60 mile per hour acceleration time

路上でのスポーティサウンドの評点は、純粹に室内音だけを評価した評点と加速度を評価した評点から成ることが判る。換言すると、試聴での評点は路上の室内音のみを評価した結果を表わしていると言える。

6. 室内音音色の客観的な表現

「室内のスポーティサウンド」の度合であるスポーティネスを決定するために主観評価評点と音響心理尺度を含む客観的パラメータとの回帰分析を実施したところ⁽⁴⁾⁽⁷⁾、いわゆる中周波帯が関係していることが明らかになった。しかしながら、既存の客観的パラメータでは指標として使えるまでの相関を得るのは困難であった。

そこで、Fig.9に示すようにスポーティネスにポジティブに作用する音色成分として、エンジン回転次数成分を、また、ネガティブに作用する音色成分として次数成分以外のバックグラウンドノイズを導入した。これらの成分を用いて主観的に知覚されたスポーティネスを客観的な手順により表現する新しいパラメータ Order to Noise Ratio(略してONR)を定義した。このONRはバックグラウンドノイズに対してサウンドがどの程度超過しているのかを表現する量となっている。研究は最適な次数の変域と重み付けを探し出すことに集中した。

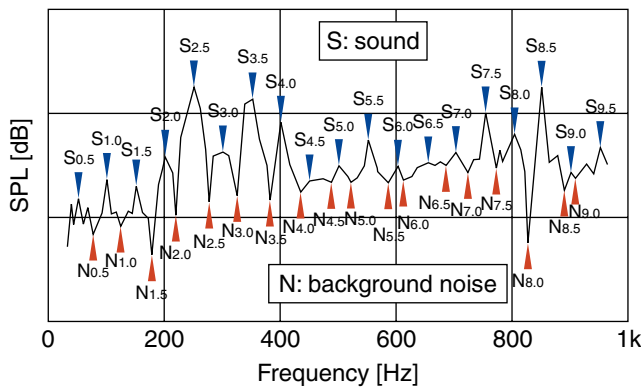


Fig.9 Definition of sound and noise

そして、スポーティネスの客観的表現として以下の式で表わされる Sportiness を最終結果として得た。

$$\text{Sportiness} = A \cdot (\text{ONR}) + B \cdot (\text{TP}) + C \cdot (\text{ESP}) - D$$

A, B, C, D: 定数 TP: トナリティ

ESP: エンジンスピードの上昇率

客観的なパラメータをベースとするスポーティネスと、音響実験室での各車に対する主観評点との相関を Fig.10 に示す。相関係数は0.97であり、非常に良い相関があることがわかる。

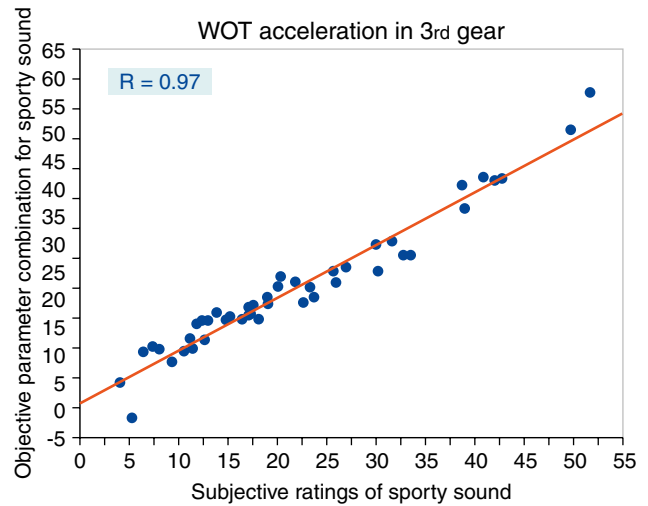


Fig.10 Subjective rating of sporty sound character against objective evaluation results

7. オーストリア人と日本人のスポーツカー室内音に対する感性の差異

以上ここまではオーストリア人の室内音に対する感性について述べてきた。オーストリア人と日本人とのスポーティサウンドに対する感じ方の違いが存在するかどうか調査する目的から、日本人についてもオーストリア人と同じ手順で試験を行った。但し、日本人の被験者としては既にスポーツカーを所有している 32 人が選択された。

日本人とオーストリア人の各車両の室内スポーティサウンド評点については Fig.11 に見られるように相関係数 0.98 と非常に高い相関が得られた。これは両者ともに同様の感

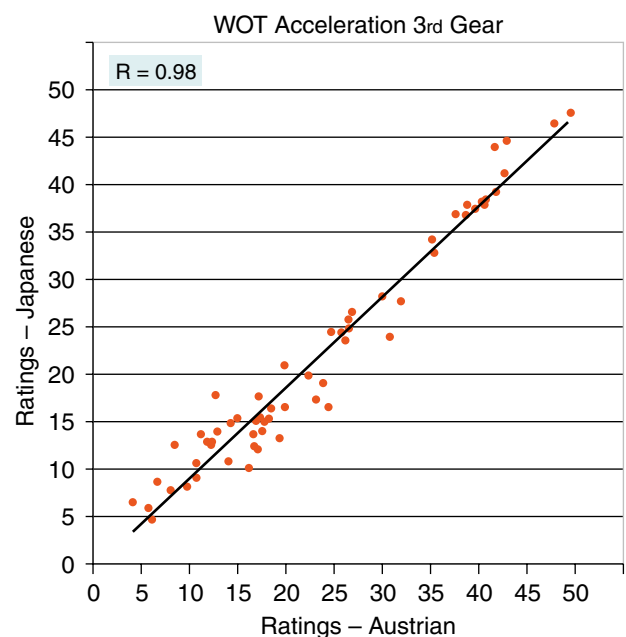


Fig.11 Comparison of subjective ratings between Austrian and Japanese

じ方でスポーティサウンドを評価していることを示している。欧米人は日本人に比べて低周波に寛容で高周波に敏感であるとの過去の調査結果からすると一見矛盾した結果に思えるが⁽⁴⁾、6章で述べたオーストリア人の結果より、スポーティサウンドに相関の高い周波数帯は中周波帯であることを考慮すると、スポーティサウンドに対しては低周波よりも中周波領域の印象が支配的であり、両者の評点に大きな差が生じなかったものと考えられる。

8. スポーティサウンドクウォリティソフトウェアと適用例

6章で述べたように、スポーツカー室内音音色に対する感性の一つである「スポーティな」度合いであるスポーティネスは客観的なパラメータ、即ち計測器で計測できる量の一次結合によって表現が可能になった。そこで実際のスポーツカーの開発に適用可能なツールとしてスポーティネスの算出のみならず、室内音物理量によるスポーティネス

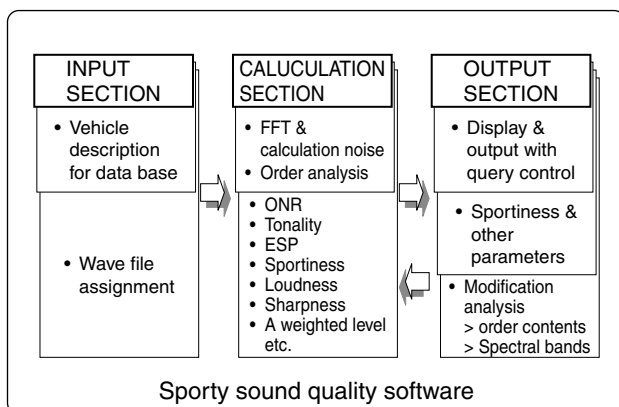


Fig.12 Schematic flowchart of SSQS

のシミュレーション機能・データベース機能を併せ持つ Sporty Sound Quality Software(SSQS)を開発した。この基本的な構成を Fig.12 に示す。

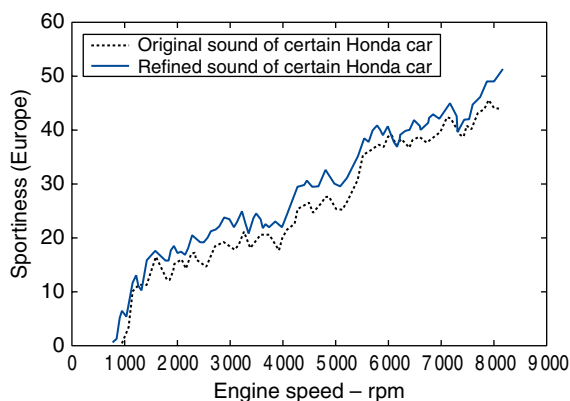
このソフトウェアを用いてある4気筒2リッターエンジンを搭載したスポーツカーの室内音を改良した例を Fig.13 に示す。室内音の中周波帯においてバックグラウンドノイズに比してサウンドであるエンジン回転次数成分が大きくなるほどスポーティネスは向上する。しかし、次数成分を大きくするだけでは音量そのものも大きくなってしまいますので、スポーティネスに関連の薄い低周波成分を低減した。この結果、ラウドネスが低減した上に、スポーティネスを向上させることができた。

9. まとめ

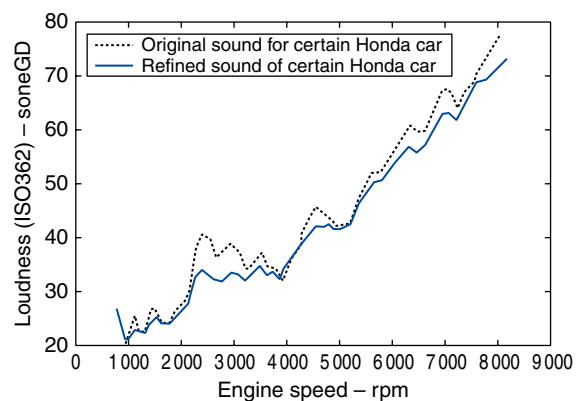
この研究により、スポーツカーの室内音音色について以下の成果を挙げることができた。

- (1) 純粹に室内音のみを高精度で主観評価する手法を開発した。また路上での主観評価結果は加速度の影響を受けていることが定量化できた。
- (2) 室内の主観評価結果である「スポーティ」な度合いに対する、客観的なパラメータを用いた表現であるスポーティネスを確立した。
- (3) オーストリア人と日本人のスポーティネスに対する差異は殆どないことが判明した。
- (4) 自動車開発のために上記スポーティネスの評価・シミュレーションが可能なソフトウェア SSQS を開発した。

今後本手法を、スポーツカーユーザーがよりスポーツ感を楽しむことができるような商品作りに役立てたいと考えている。



(a) Sportiness



(b) Loudness

Fig.13 Refinement of sportiness

参考文献

- (1) 山下剛, 石井康夫, 中村光勇, 北村音一: 車内騒音
フィーリングの評価に関する一考察, 日本ゴム協会誌
63, p.122-130 (1990)
- (2) Yamashita, T., Ishii, Y. et al: A Method for Evaluating
Interior Sound Quality of Automobiles, 119th Meeting of
the Acoust.Soc.America (1990)
- (3) 寺澤位好ほか: 加速時エンジン音色評価法,
Transaction. JSAE, 9840162, vol.29, No.4, Oct. (1998)
- (4) Brandl, F., Biermayer, W.: A New Tool for the Onboard
Objective Assessment of Vehicle Interior Noise Quality.
SAE 1999-01-1695, Traverse City, May 17-20 (1999)
- (5) Pflüger, M., Höldrich, R., Brandl, F.K., Biermayer, W.:
Subjective Assessment of Roughness as a Basis for
Objective Vehicle Interior Noise Quality Evaluation. SAE
1999-01-1850. Noise & Vibration Conference & Exposition
(1999)
- (6) Brandl, F.K., Biermayer, W., Pflüger, M.: A Software Tool
for the Objective Analysis and Optimisation of Passenger
Car Interior Noise Quality. ATZ 7/8 p.518-526 (1999)
- (7) Brandl, F., Biermayer, W., Thomann, S., Pflüger, M.:
Objective description of the required interior sound
character for exclusive passenger cars. : IMechE 2000,
London, May (2000)

■ 著 者 ■



石井 康夫



山下 剛



Franz K. BRANDL



Siegmund THOMANN



Werner BIERMAYER