

自動車騒音シミュレーションシステムの開発と その応用について

Development of Automobile Noise Simulation System and Its Applications

宮内 邦夫* 小峰 徳雄*
Kunio Miyauchi Tokuo Komine

要 旨

近年、車室内における快適な音響空間の実現を目的とした、騒音の音質定量評価手法の研究開発が進められている。これらを効率的に進める技術として、デジタル信号処理を応用した音のシミュレーションシステムを開発した。

本システムは、新たに考案したデジタルフィルタリング手法を用いることにより、収録した自動車騒音の周波数帯域成分、次数成分を短時間に高い精度で任意に加工、合成でき、その加工信号をノイズの無い音で試聴できることを特長としている。

本システムを用いて加工した評価音の信号加工精度検証と聴感試験の結果から、自動車騒音の評価システムとして有効であることがわかった。

ABSTRACT

In order to create a comfortable sound space in the passenger compartment of an automobile, much automobile noise research of late has been devoted to the analysis of sound quality. To carry out this research effectively, an automobile noise simulation system was developed which enables one to perform a quantitative evaluation of sound quality. This system comprises a digital signal processor and engineering workstation, and uses a unique digital filtering technique. The features of the system: 1) Processing in a short time of any frequency component and any harmonic order component of automobile noise; 2) Processing the noise with high accuracy; and 3) Reproducing the purified processed noise

The report contains results which verify the processing accuracy and examples of the system's applications to automobile noise processing. It is shown that this system is a valuable tool to be used in automobile noise simulation and sensory evaluation tests.

1. はじめに

近年、自動車における快適性研究の一つとして、車室内外騒音に対し、従来の「静粛性向上」に加えて、人の感性に適合した「快適な音響空間」はどうあるべきかを明らかにする必要性が高まっている。それにともない、「人は騒音をどのように感じるか」といった、音に対する感性を定量的に評価する、いわゆる「音質定量評価手法」の研究、開発が活発に行われている。

これは、音のもつ「物理量」とその音に対する人の「主観的評価」との対応づけを図ろうとするもので、このうち、主観的評価の方法として「官

能検査」を用いるのが一般的である。この官能検査の実施にあたっては、正確に物理量が設定された評価音を提示することが、主観的評価と物理量との関連性をより明確に求めるうえで、重要な役割を果たす。したがって、収録してきた騒音を任意に加工、合成でき、検査目的に応じた評価音として、忠実に再生できる音のシミュレーションシステムの開発が必要となっている。

その一方で、騒音関係の業務に携わる技術者に対しては、音を的確に識別でき、快適な音響空間を創造できる能力も求められてきている。

このような観点から、図1に示すように、音質

* 栃木研究所

定量評価方法を開発するための有効なツールとして、また、技術者の音に対する感性を磨く、トレーニングシステムとして活用することができる音のシミュレーションシステムを開発した。

本稿では、本システムのハード構成と信号の加工、合成手法およびその加工精度について述べ、実際の自動車騒音から作成した音を用いた試聴試験への応用例について報告する。

2. システムの概要

2.1. 従来のシステム開発における問題点

自動車騒音の成分は、次の二つに大別することができる。

- (1) ロードノイズや空力騒音のように、「周波数帯域成分」のレベルが、時々刻々と変化するもの。
- (2) エンジン回転などに起因して発生し周波数成分および音圧レベルが変化する「回転次数成分」

特に、後者の次数成分の信号を加工するにあたっては、以下に示す信号処理上の問題があり、自動車騒音シミュレーションシステムの開発におけ

る技術的課題となっていた。すなわち、

- (1) アナログフィルタやFIRデジタルフィルタを用いた場合、エンジン回転数の変化に追従するように、フィルタ特性を変化させるのは困難である。
- (2) FFT、逆FFT処理を用いた手法では、信号を無限に繰り返される周期信号として扱っている。そのため有限長のインパルス応答関数と時間信号との畳み込み演算を行なうと、信号は自分で自分自身の影を畳み込む循環畳み込みとなり、各ブロック間で信号の連続性が失われ、再生時のノイズ発生あるいは加工精度の低下の原因となる。
- (3) 次数成分を数式へ変換して加工、再合成する手法では、数式変換および再合成計算に、非常に多くの演算時間を必要とする。そのため、実用に耐えうる処理時間で加工を終了するためには、高速演算処理が可能な大型コンピュータが必要である。

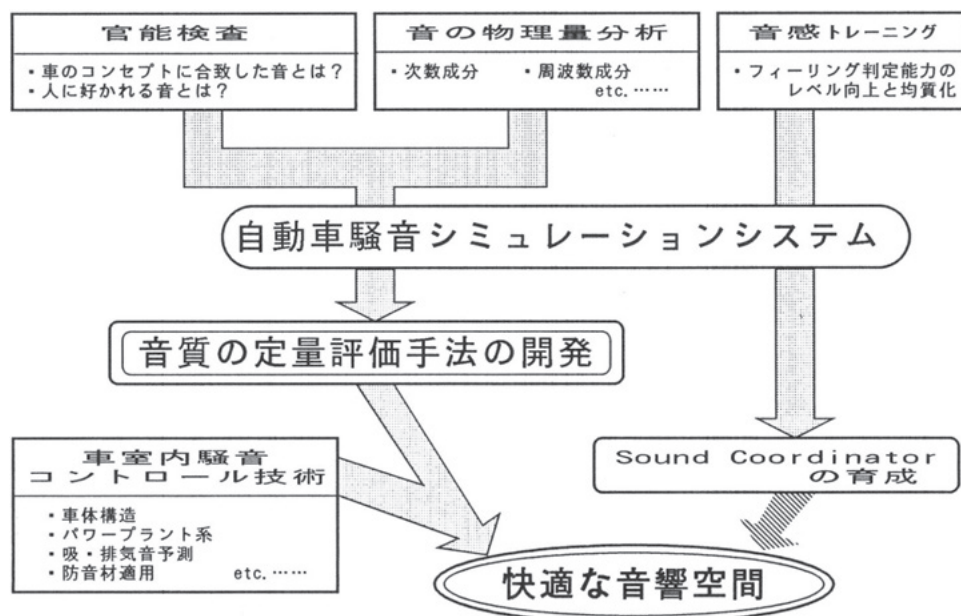


図1 自動車騒音の音質改善技術における本システムの位置づけ

2.2. システム構成および特長

今回、2.1. に述べた技術的課題を解決する手法として、インパルス応答の畳み込み演算に工夫を凝らすと同時に、デジタル方式で信号の変調、復調を行うデジタルフィルタリング手法（以下、デジタルヘテロダイン手法と呼ぶ）を新たに考案し、この手法を用いることにより、自動車騒音の任意の周波数帯域成分、次数成分の加工が可能なシミュレーションシステムを開発した。

以下に、本システムの概要を述べる。

本システムは、図2に示すように、多チャンネル A/D-D/A コンバータと EWS から構成されるデジタルフィルタリングシステムであり、システムの諸元は、以下に示すとおりである。

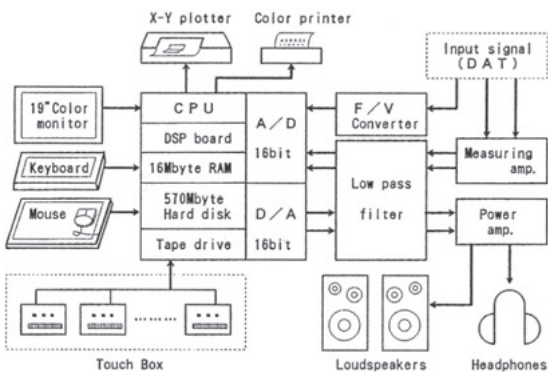


図2 システム構成

- ・サンプルレート : 40 kHz/2ch. (MAX)
- ・A/D, D/A コンバータ : 16bit
- ・FFT演算のブロック長 : 2048
- ・FFT演算の処理速度 : 0.02 秒 / ブロック
- ・収録できる時間信号の長さ : 52 秒 (MAX)
(サンプルレート 20kHz/2ch. の場合)
- ・オペレーティングシステム : UNIX 準拠
- ・プログラム言語 : C + アセンブラ

図3に示すように本システムは、従来の騒音分析器の機能に加え、騒音信号を時間軸上や周波数軸上で任意に加工できる種々の処理機能と、以下に示す特長を有している。

- (1) 任意の周波数帯域成分、次数成分の音圧レベルの変化状態を、任意に加工可能であること
- (2) 任意に設定された目標音圧レベルに対する信号の加工精度が極めて高いこと
- (3) 加工後の信号を、ノイズのない音で再生、試聴できること
- (4) これらの信号加工処理を、実用上問題のない程度の短時間に終了し、かつ小規模なシステムで行えること

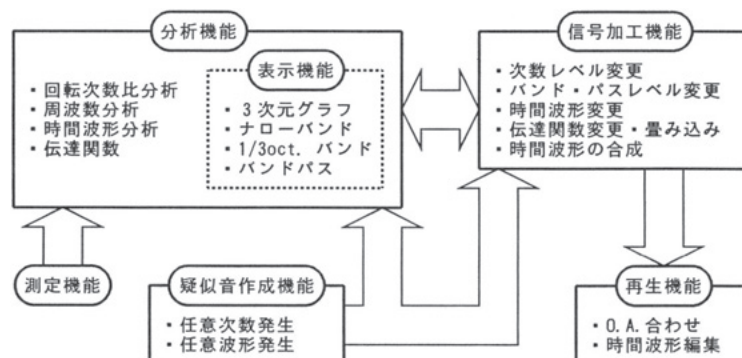


図3 騒音信号処理機能一覧

本システムの音の加工処理は、図4に示す手順を経て行われる。すなわち、

- (1) 騒音信号は計測用アンプを、回転信号はF/Vコンバータを経て、A/D変換される。
- (2) デジタル量に変換された時間領域の騒音信号は、あるブロックサイズに切り取られ、FFT演算ボードで複数の周波数スペクトルデータに変換される。
- (3) 変換された周波数スペクトルデータを、任意の周波数帯域成分(次数成分)のレベル対エンジン回転数(時間)の2次元グラフとしてディスプレイ上に表示する。
- (4) マウス、またはキーボードを用いて任意の成分に対し、音圧のレベル変化(加工目標ライン)を設定する。
- (5) この目標ラインに基づいて原信号は加工され、データとして記録される。
- (6) 加工された信号は、D/A変換によりスピーカ、またはヘッドホンを用いて音として再生される。

3. 信号加工のアルゴリズム と信号の加工精度

3.1. 固定周波数帯域成分の加工

任意のオクターブバンドおよび任意のバンド幅の周波数帯域成分の加工は、下記に示すアルゴリズムに基づき行われる。

$$h(t) = F^{-1}[H(f)]$$

$$S_b(t) = S_0(t) * h(t)$$

$$S_m(t) = S_0(t) - (1 - e) \cdot S_b(t)$$

$h(t)$: バンドパスフィルタのインパルス応答

F^{-1} : 逆フーリエ変換

$H(f)$: バンドパスフィルタの伝達関数

$*$: 畳み込み

$S_0(t)$: 原信号

$S_b(t)$: 帯域制限信号

$S_m(t)$: 加工後の時間信号

e : 原信号の帯域制限成分と、

加工目標の帯域制限成分の比

すなわち、図5に示すような、信号加工処理に従って次のように加工される。

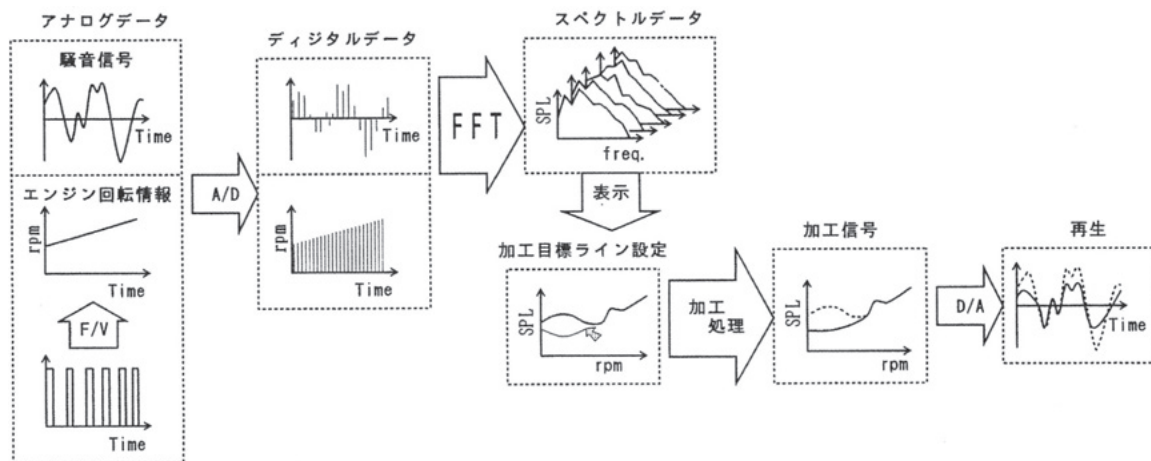


図4 信号加工処理の流れ

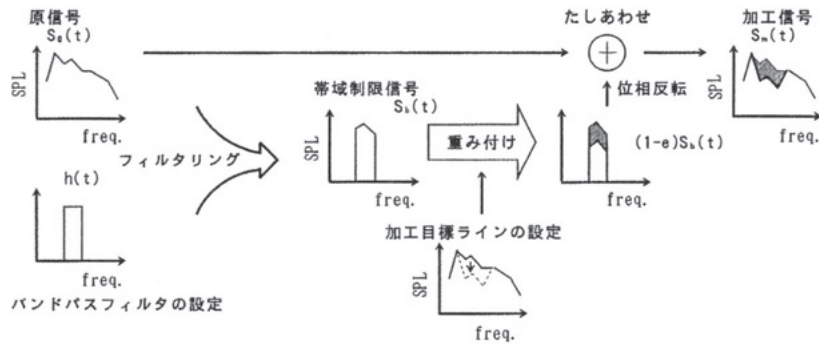


図5 特定周波数成分加工アルゴリズム

- (1) 最初に加工する周波数帯域成分に対応したバンドパスフィルタが設定される。
- (2) このバンドパスフィルタを用いて、FFTを利用し複数の周波数スペクトルデータに分解された原信号に対し、フィルタリングを行い、バンドパス信号が作成される。
- (3) 作成されたバンドパス信号と加工目標ラインの比から、レベル変化の重みづけを行い、位相を反転したのち原信号にたし合わせ、加工信号が作成される。

時間信号へのフィルタリングにFFT、逆FFT処理を用いた場合、ブロック長NのFFT処理をもちいて畳み込み演算を行うと2.1.で述べたように循環畳み込みとなり、ノイズが発生する問題がある。

そこで、本システムでは、図6に示す手法を用いることにより、循環畳み込みを防止した。

すなわち

- (1) ブロック長がそれぞれNの時間信号とインパルス応答関数の後ろに長さNのゼロを追加し、ブロック長を2Nとする。(図中①)
- (2) このデータに対して、ブロック長が2NのFFT処理を行い周波数領域に変換し、二つの信号の掛け算を行う。その結果を逆FFT処理し時間信号に戻す。(図中②)
- (3) 同様に次のブロック長Nの時間信号に対して(1)～(2)の処理を実行する。(図中③)
- (4) このような畳み込み演算により得られた2Nの時間信号の後半Nと、次のブロックの前

半Nを足し合わせる。(重畳加算法)(図中④)
以上の(1)～(4)の処理を全てのブロックに対し繰り返し行うことによって、演算後の信号に不連続点を生ずることのないフィルタリング処理が実行できる。

以上の手法を用いることによって、任意の時間、または回転数における任意の周波数帯域成分の音

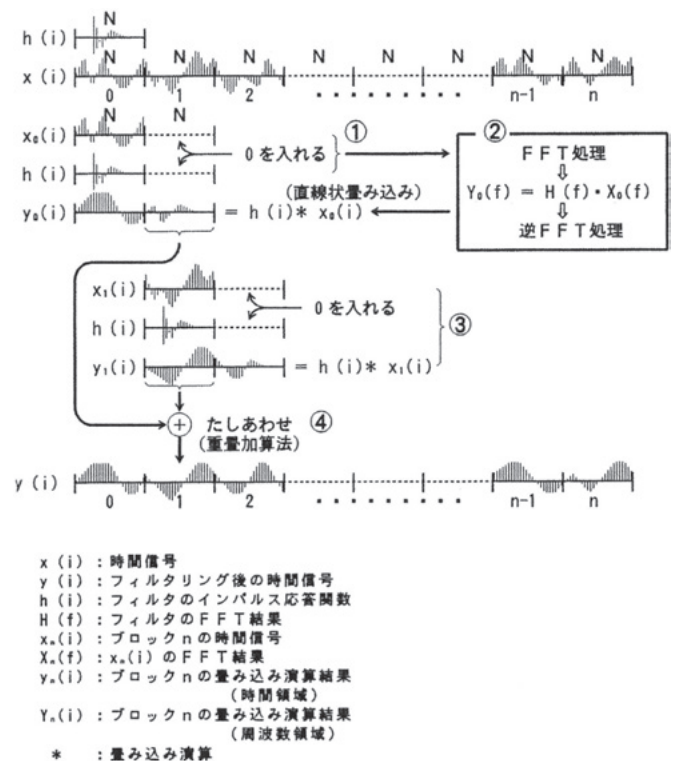


図6 本システムのフィルタリング手法

圧レベル変化を、加工目標に対し高い精度で短時間に加工することを可能としている。また、その加工された信号は、ノイズのない音で再生、試聴することが可能となった。加えて、その音質は、自動車騒音のみならず音楽ソースの加工、試聴にも十分に使用可能なレベルとなっている。

本手法に基づき加工した信号の加工精度を検証した一例を次に示す。

基本周波数 133Hz 三角波信号を用いて、その 3 次成分である中心周波数 400Hz の 1/3oct. バンドパスレベルを増減させる加工を行った結果、図 7 (a) に示すように、加工目標ラインと加工後の信号ラインは ± 0.5 dB 以内の差で良く一致し、実用上問題のない精度が得られている。また、図 7 (b)

に示す 3 次元スペクトラムから 400Hz の 1/3oct. バンドパスレベルの加工が、他の周波数成分に影響していないことが確認できる。

3.2. 次数成分の加工

次数成分の加工は、周波数帯域成分の加工アルゴリズムに加えて、図 8 に示すデジタルヘテロダイン手法を用いることにより、従来の周波数固定フィルタでは困難であった次数成分の加工を可能とした。このデジタルヘテロダイン手法の信号加工手順は以下のとおりである。

- (1) エンジン回転信号に基づく変調周波数で、原信号の周波数をシフトし、変調信号が作成される。

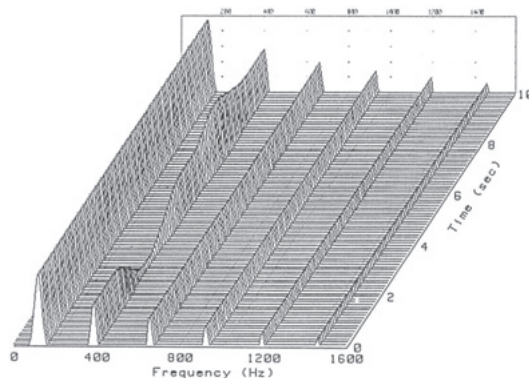
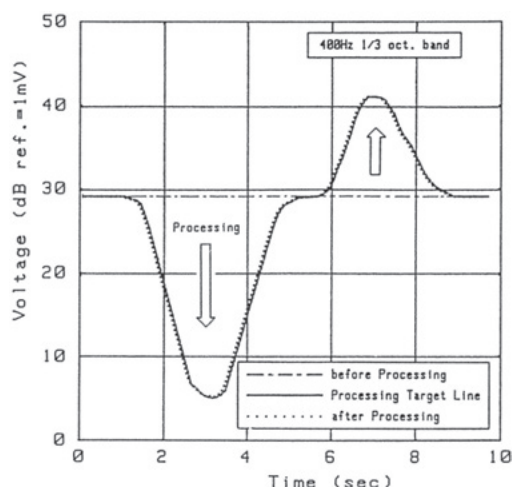
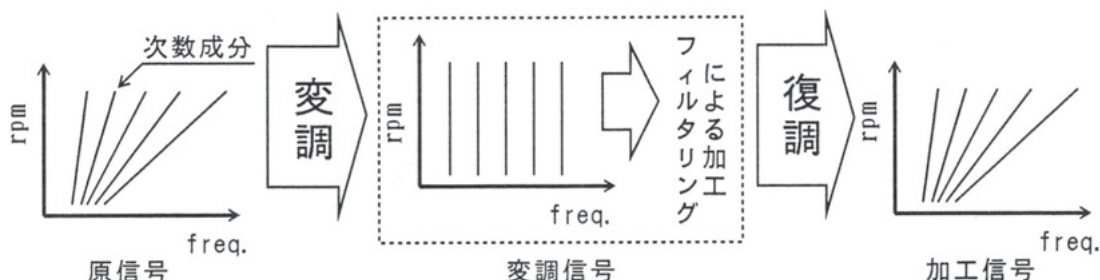


図 7 (a) 三角波信号 400Hz 1/3oct. バンドパスレベル

図 7 (b) 三角波信号 3次元スペクトル

図 7 周波数帯域成分の信号加工精度



デジタルヘテロダイン手法の概念

図 8 次数成分の加工アルゴリズム

(2) その変調信号に対して、固定周波数帯域成分の加工と同様のフィルタリングを行い、加工目標ラインに基づいた重み付けが行なわれる。

(3) 加工された変調信号は、元の変調周波数で復調され、目的とした加工信号が作成される。

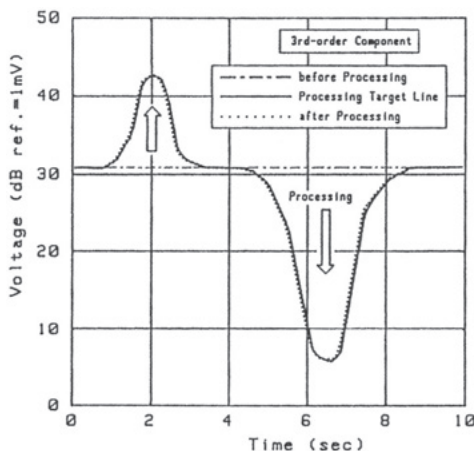
この手法の特徴は、一つの次数成分に対し周波数固定型のバンドパスフィルタを一つ設定するだけで、全回転数に対する次数成分の加工が可能な点である。これに要する演算時間は、数秒から最大15分程度であり、実用に耐えうる高速の加工処理を実現した。

この手法による加工の精度検証として、スイープ三角波信号の3次成分を、増減する加工を行った結果、図9(a)に示すように、加工目標ラインと加工後のラインは、 ± 0.5 dB 以内の差で良く一致し、実用上十分な精度が得られている。また、図9(b)に示す3次元スペクトラムから、3次成分の加工が他の次数成分に対して影響を及ぼしていないことが確認できる。

3.3. インパルス応答の畳み込みによる信号の加工

本システムでは、さらに原信号に任意形状のインパルス応答を畳み込み、全周波数帯域にわたって任意の重みづけを行う信号の加工が可能である。その手法は、下記のとおりである。

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad \cdots \cdots (1)$$



(a) 掃引三角波信号 3次成分

(1)式の畳み込み演算は、計算時間短縮のために、複素型FFTを用いて周波数領域で行われる。

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f)$$

$h(t)$: インパルス応答

$*$: 畳み込み演算

$x(t)$: 原信号

$x(f)$: $x(t)$ のFFT結果

$y(t)$: 畳み込み演算後の信号

$H(f)$: $h(t)$ の周波数関数

この手法の加工精度の検証として、ホワイトノイズに、ある伝達系のインパルス応答を畳み込み、伝達系の周波数応答関数と比較することで、本機能の精度検証を行った。図10に示すように、加工後のスペクトルが、伝達系の周波数応答関数と良く一致し、本機能の精度が十分であることを確認した。

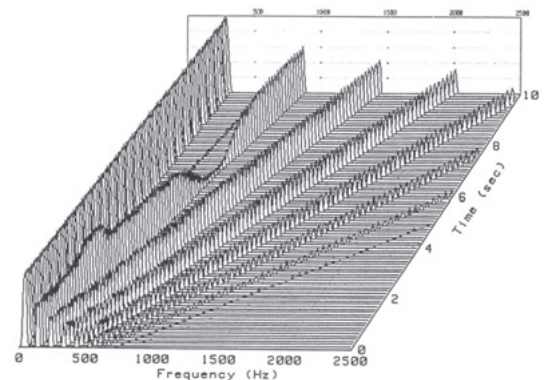
4. 応用例

実際の自動車騒音を用いて、このシステムの加工精度を検証し、本システムの主目的である試聴試験への応用性について検討した。

その検討内容の一例として、

(1) 加速時の排気騒音を加工した、次数成分の加工精度検証。

(2) インパルス応答関数畳み込み機能を用いた



(b) 掃引三角波信号 3次元スペクトル

図9 次数成分の信号加工精度

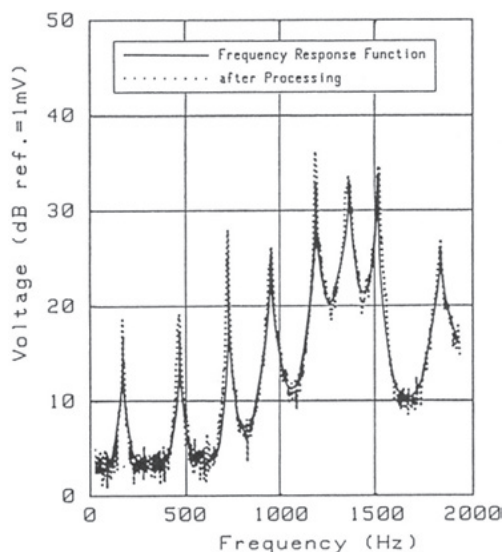


図10 インパルス応答の畳み込みによる
信号加工精度

排気騒音の机上検討への応用性。

- (3) 技術者の音に対する識別能力向上を目的とした訓練への応用性
3項目を検討した結果について報告する。

4.1. 加速時排気騒音

スポーツカーNSXの加速時における排気騒音を用い、次数成分の加工精度について検討した。

その一例として、聴感上、最も影響があると思われる3次成分、6次成分の回転数に対するレベルの変化を、小さくする加工を行った。その結果、

図11に示すように、加工後の信号は目標ラインと ± 1 dB以内で良く一致し、収録した自動車騒音に対しても、実用上十分な加工精度が得られた。また、試聴上でも次数成分の変動感が減少したことを確認でき、排気音の音作りシミュレーションへの応用も可能であることがわかった。

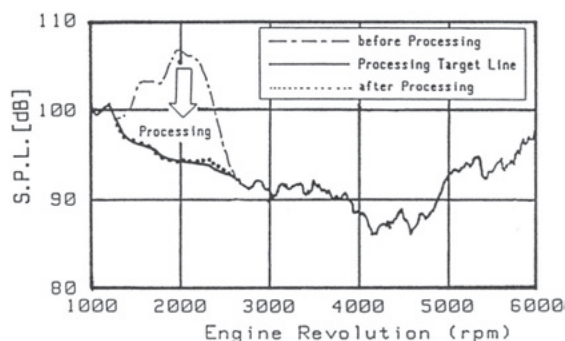
4.2. 排気騒音の机上検討

排気騒音の机上検討の一手法として、エンジン音源と伝達系(排気系)のインパルス応答関数との畳み込み演算を行った結果を、音として比較試聴する方法が考えられる。

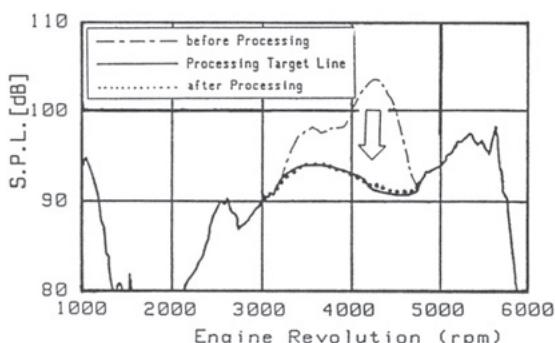
その一例として、図12に示すように圧力センサを用いて測定した6気筒車のエンジン排気源音に、実機で測定したマフラを含む排気系のインパルス応答関数を畳み込んだ結果と、実測した排気音との比較検討を行った。

この結果、図13に示すように、エンジン回転数3000rpm以下の3次成分については、比較的良く一致している。しかし、それ以上のエンジン回転数および6次成分については、エンジンの回転数変化に対する音圧レベル変化の傾向はある程度一致しているものの、絶対音圧レベルは必ずしも一致していない。この誤差が発生した要因として、排気系のインパルス応答関数測定時に、排気温度変化や気流の影響などの要因を、十分に考慮していなかったことが考えられる。

このように、一部今後の適用への課題を残して



(a) 3次成分



(b) 6次成分

図11 加速時排気騒音の加工精度

いるが、実測で求めたエンジン源音に排気系のインパルス応答関数を畳み込むことによって、机上での排気音検討の可能性をうかがえる結果を得ることができた。

4.3. 音の識別能力向上訓練への応用性

人の音に対する感性を定量的に評価する「音質評価手法」の研究が進められる一方で、音を評価、判断する技術者の音に対する識別能力向上も同時に求められている。すなわち、音圧レベル低減や音質改善の対策を行った効果を的確に識別できる聴取能力と、音の全体像を捕らえ「その車の開発コンセプトに合致した音」であると判断できる判定能力を持った、いわゆる「サウンドコーディネータ」が、求められており、このため、技術者の音に関する感性の訓練、教育も必要となっている。

その一つの試みとして、収録した自動車騒音を本システムにて加工し作成した評価音を用い、技術者に対して、音の識別能力向上に関する実験を行った。

その実験は、

- (1) 最初に基準音を提示し、1秒の休止時間後に比較音を提示する。
 - (2) 被験者は、基準音と比較音を一対として聞き、識別した結果を予め割り当てられた解答番号に対応したタッチスイッチより入力する。
- という方法で行った。この時の全問題数に対する正解数の比率を正答率とし、正答率と音の識別能力は比例するものと仮定した。

その実験結果の一例として、比較音に4気筒車の加速時車室内騒音の2次成分を、 ± 3 dB 変化した音とさせない音の3種類を用い実験を行い、業務経験年数と正答率との関係を求めた結果を図14に示す。この結果より、業務経験年数の増加とともに、正答率は向上していることがわかる。これは、技術者が、業務の中で騒音の成分に対する識別を学習し、業務経験を積むに連れて識別能力が向上していくことを示している。

また、この実験結果を基に、業務経験年数3年未満の技術者に対して、音の識別能力向上を目的とした訓練、いわゆる「音感トレーニング」を実施

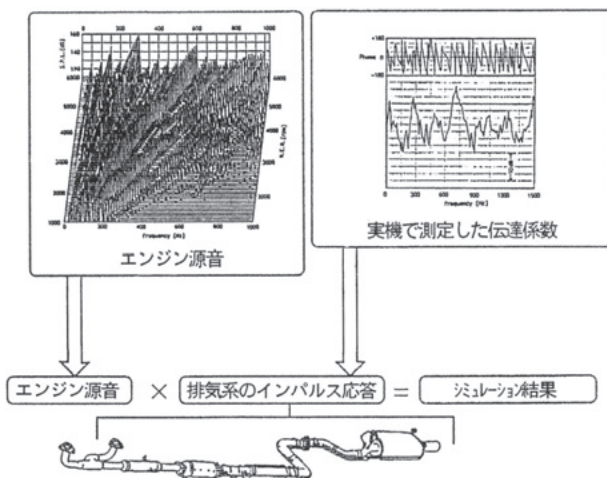


図12 排気騒音の机上検討例

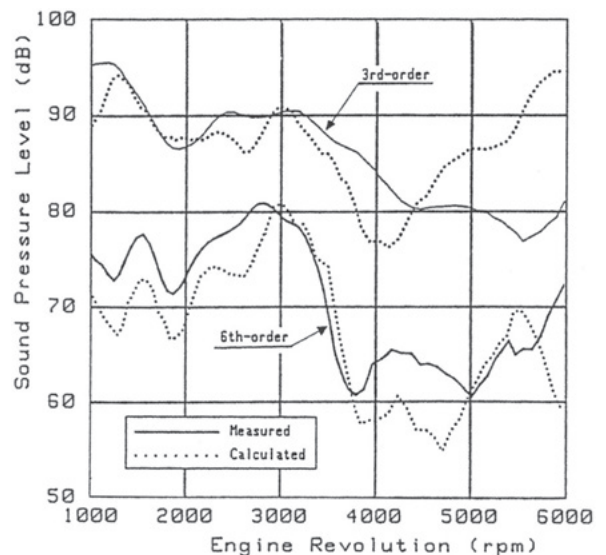


図13 計算結果と実測値の比較

した結果を図 15 に示す。この結果より、トレーニング回数に応じて正答率が向上していることがわかる。

以上の実験結果から、業務経験年数に応じて、自動車騒音に対する識別能力が形成されることから、技術者に対し、教育、訓練を目的とした「音感トレーニング」を行なうことは、音に対する識別能力向上につながり、その結果として得られる業務経験年数の短縮化に対しても有効であると考えられる。

これらの結果のように、本システムで作成したサンプル音は、こうしたトレーニングにも十分に使用できる音質であることが確認でき、今後人材育成の観点からも本システムの活用が期待できる。

5. あとがき

今回開発した自動車騒音シミュレーションシステムの精度検証と自動車騒音への適用結果から、次のことが明らかになった。

- (1) 新たに考案したデジタルヘテロダイン手法を用いることにより、任意の次数成分、周

波数帯域成分の音圧レベル変化に対し、評価目的に合った精度の高い音の加工、合成が可能である。

- (2) その加工処理によって得られた評価音は、試聴試験や音感トレーニングなどに十分使用可能である。

今後、音質の定量評価手法の開発に加え、騒音の発生源と伝達系を含めた机上での騒音シミュレーションへの応用検討をさらに進め、ハードとして具体的に図面に反映するツールとして、本システムを活用していきたい。また、本システムで作成したサンプル音を用いて、技術者の感性に対する教育、訓練を行い、快適な音響空間を創造できる人材の育成を図っていきたい。

6. 謝 辞

本システムの開発に当たり、多大なご支援を頂いた東京大学生産技術研究所橋研究室、松賀機器(株)BK事業部東京システム部に謹んで感謝する。

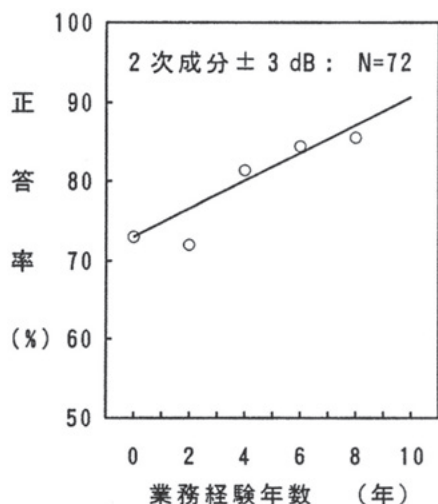


図 14 業務経験年数と正答率の関係

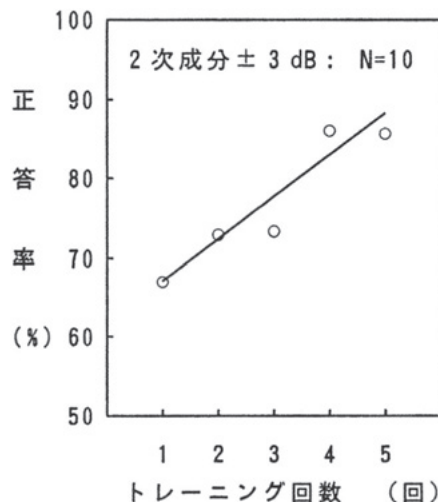


図 15 音感トレーニング回数と識別能力の関係

参考文献

- 1) 久田見、岡本、畑:「回転次数比分析情報を用いた評価用自動車排気音の合成」
日本音響学会講演論文集 1989 年 3 月
- 2) 金丸:「自動車車室内音の音質定量評価システム」
自動車技術会シンポジウム 1989 年 12 月
- 3) 中村ら:「車の騒音評価システムについて」
日本音響学会講演論文集 1990 年 3 月
- 4) E. Eoran Brigham:「高速フーリエ変換」
科学技術出版
- 5) A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer:「デジタル信号処理」コロナ社
- 6) 北村:「聴能形成について」
日本音響学会講演論文集 1976 年 5 月
- 7) 北村ら:「録音技術者を対象としたシーショアテストの結果について」
日本音響学会講演論文集 1985 年 9 月
- 8) 中村ら:「自動車の快適性と車室内音」
日本音響学会誌 46 巻 9 号 1990 年
- 9) 山下ら:「自動車車室内音の音色評価について」
HONDA R&D Technical Review vol. 3 1991 年 5 月

■著 者■



宮内 邦夫



小峰 徳雄