

吸気系音響減衰量計算のモデル化手法とその適用

Modeling Method for Simulating Acoustic Attenuation of Intake Systems

岩 井 正 志* 伊 藤 秀 昭* 松 本 壮 敏**
Masashi IWAI Hideaki ITOH Taketoshi MATSUMOTO
高 林 徹* 三 澤 吉 次*
Toru TAKABAYASHI Kichiji MISAWA

要 旨

吸気系音響減衰量を精度良く予測するためには、実際の吸気系をどのようにモデル化するかが重要なポイントとなる。今回、自動車に使用されているさまざまな吸気系の形状に対して減衰量の実測と計算との適合化により、実寸法から四端子法計算で計算モデル化する際の手法を等価寸法補正を導入して定量的に導きだした。その結果、実際の吸気系においても中高周波までの周波数領域で実用上十分な精度を得ることができた。

ABSTRACT

It is important in the development of intake systems how to build simulation models of actual intake systems to estimate acoustic attenuation accurately. Calculation methods of equivalent length compensation of intake components with respect to acoustic attenuation estimation by 4-Pole Parameters Method have been investigated, which are applicable to various shapes of automotive intake systems. This paper reports that these methods enable to predict acoustic attenuation of the actual intake systems with better accuracies especially on higher range of frequencies.

1. まえがき

近年自動車の静粛性に対する要求は、車室内騒音、車外騒音の両面から高まっている。その中で騒音源の一つである吸気系についても、騒音の低減は重要な課題であり、レゾネータやサイドブランチなどの消音器の設定が必要となっている。またこのような吸気系の騒音対策は、エンジンルームのパッケージングやエンジンの出力性能の影響が大きく、騒音対策によってはエンジン出力の低下を招いてしまうために、開発初期段階で吸気系の音響特性を予測する技術が必要である。

吸気系音響減衰量シミュレーションは、上記の解決のために有効なツールであり、FEM、BEM^{1) 2)} や音響理論の四端子法³⁾ など、さまざまな手法が用いられている。FEM、BEMは、複雑な形状の検討が可能であるが、

大容量のメモリ、演算能力の高い計算機が必要であり、モデル作成時間と計算時間を含めると数時間を要する。

一方四端子法は、簡易的な手法として一般的であり入力パラメータも少なく、小型の計算機で計算可能で計算時間も数秒程度である。ただし複雑な形状に対してはモデル化が難しく、計算可能な周波数も低周波の範囲にとどまっている。

以上より開発初期段階の吸気系音響減衰量予測ツールとしては四端子法を採り、従来モデル化が難しいとされていた複雑な形状に対してその手法を検討し、1 KHz程度の中高周波まで精度の良い予測技術を開発した。

まず複雑な形状に対しては、形状パターン別に音響モデルを用意し、従来計算できなかった形状に対しても計

* 栃木研究所

** 東洋濾機製造（株）

算可能とした。モデル化については、各音響モデルごとに実際の寸法や端末条件によって適切な等価寸法補正を行った。これは、各音響モデルごとにテストピースの実測の減衰量に計算の減衰量を適合化することで、その等価な計算寸法を求め実寸法との関係の導き出したものである。同時にこのモデル化ノウハウを取り込んだシミュレーションソフトを開発し、入力環境の整備を図った。また、このモデル化手法を実際の吸気系にも適用し、単体だけでなくその複合系である実際の吸気系においても有効なことを確かめた。

本稿では、吸気系減衰量シミュレーションの計算精度向上のために四端子法計算のモデル化手法について検討した結果について報告する。

2. 基本音響モデル

本シミュレーションは、音響理論として一般的な一次元平面波の線形波動方程式による四端子法を用いている。^{3) 4)} 音響理論によればパイプの入口側と出口側の音圧および体積速度の関係は、音響の伝達特性である四端子定数を用いて定義できる。Fig. 1 に示すようなパイプモデルにおいて四端子定数は、以下のように表せる。

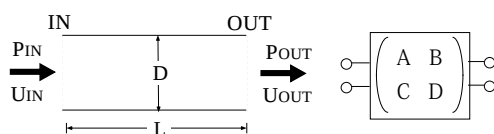


Fig. 1 4-Pole Parameters of Straight Pipe

$$\begin{pmatrix} P_{IN} \\ U_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{OUT} \\ U_{OUT} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2} [e^{jkL} \cdot e^{\delta L} + e^{-jkL} \cdot e^{-\delta L}] \\ B = \frac{\rho c}{2S} [e^{jkL} \cdot e^{\delta L} - e^{-jkL} \cdot e^{-\delta L}] \\ C = \frac{S}{2\rho c} [e^{jkL} \cdot e^{\delta L} - e^{-jkL} \cdot e^{-\delta L}] \\ D = A \end{cases}$$

ここで

D : パイプ径

S : パイプ断面積 ($S = \pi D^2/4$)

L : パイプ長

P_{IN} : パイプ入口音圧

P_{OUT} : パイプ出口音圧

U_{IN} : パイプ入口体積速度

U_{OUT} : パイプ出口体積速度

ρ : 空気密度

c : 音速

δ : 減衰定数

k : $k = \omega / c$

また、レゾネータやサイドブランチといった消音デバイスについては、パイプモデルが連成した集中定数系として置き換えることが可能である。例えば、レゾネータモデルの場合、Fig. 2 のようになりこの四端子定数は、次のようにして求められる。

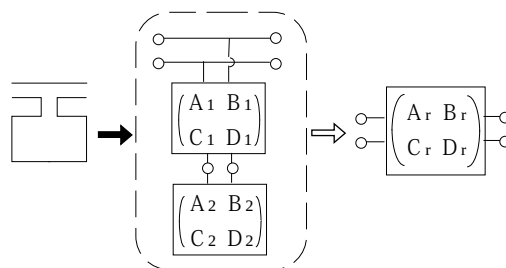


Fig. 2 4-Pole Parameters of Resonator

$$\begin{pmatrix} P_{IN} \\ U_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{OUT} \\ U_{OUT} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} A_r = 1 \\ B_r = 0 \\ C_r = \frac{A_2 \cdot C_1 + C_2 \cdot D_1}{A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot C_2} \\ D_r = 1 \end{cases}$$

このように吸気系は、基本音響モデルの組み合わせとしてとらえることができ、各要素の径、長さ、減衰定数が決まることによりそれぞれの四端子定数が求められる。また境界条件の設定により、吸気系の合成マトリクスから音響減衰量 (Attenuation、以下 Att) が算出できる。音響減衰量は、吸気系システムの入口の音圧レベルと出口の音圧レベルの差で定義され消音器の効果の評価方法として一般的な手法である。^{3) 4)}

$$\begin{pmatrix} P_{IN} \\ U_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{OUT} \\ U_{OUT} \end{pmatrix}$$

$$Att = 20 \cdot \text{LOG} \left(\frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \right)$$

Table 1 Fundamental Acoustic Model

Type	Model	
Pipe	(a) Straight-Pipe	(b) Sharped-Pipe
	(c) Flat-Pipe	(d) Straight-Pipe with a Hole
	(e) Bypass-Pipe	(f) Dual-Pipe
Chamber	(a) Normal-Chamber	(b) Oblique-Chamber
	(c) Offset-Chamber (Type1)	(d) Offset-Chamber (Type2)
	(e) Insert-Chamber (Type1)	(f) Insert-Chamber (Type2)
	(g) Insert-Chamber (Type3)	
Side-Branch	(a) Side-Branch	(b) Bypass-2-Side-Branch
Resonator	(a) Resonator	(b) Twin-Tube-Resonator
	(c) Tubeless-Resonator	(d) 2-Resonator
	(e) 3-Resonator	(f) Bypass-2-Resonator

基本音響モデルは、従来から用意されていたストレートパイプ、ノーマルチャンバー、サイドブランチ、レゾネータの四つのモデルに加えて、Table 1に示すような複雑な形状についても集中定数系の四端子定数を算出し、減衰量計算を可能とした。

3. モデル化手法の構築

3. 1. 等価寸法補正の算出方法

Table 1で用意した基本音響モデルのそれぞれについて以下の手順で等価寸法補正の算出を行った。

(1) 音響加振テスト

基本音響モデルのテストピースを作成し、Fig. 3に示す音響加振テストを行い減衰量を測定する。

(2) 等価寸法の算出

その減衰量の実測値の結果に対して Fig. 4に示すように径と長さの初期概略値として最大値、最小値を与えてその範囲内ではさみこみ、減衰量の実測値と計算結果の差がある一定値以下になるまで収束計算を行う。

(3) 等価寸法と実寸法のマップ

径、長さを変えて(1)、(2)を繰り返して行い、実寸法と計算寸法との関係を定量的に算出する。

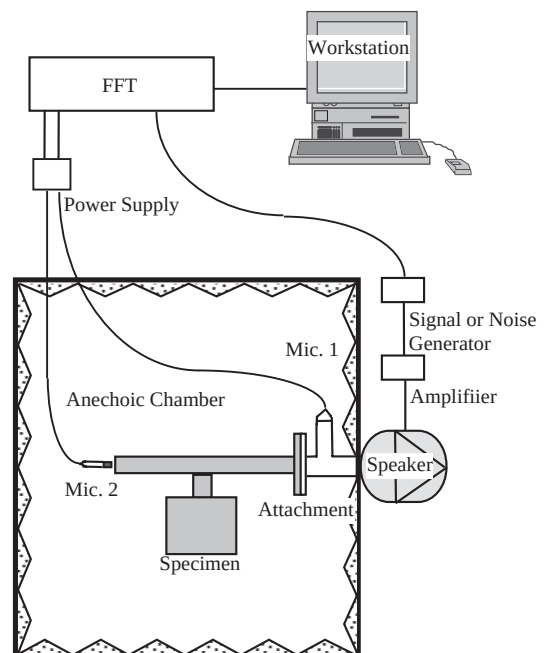


Fig. 3 Block Diagram of Measuring System

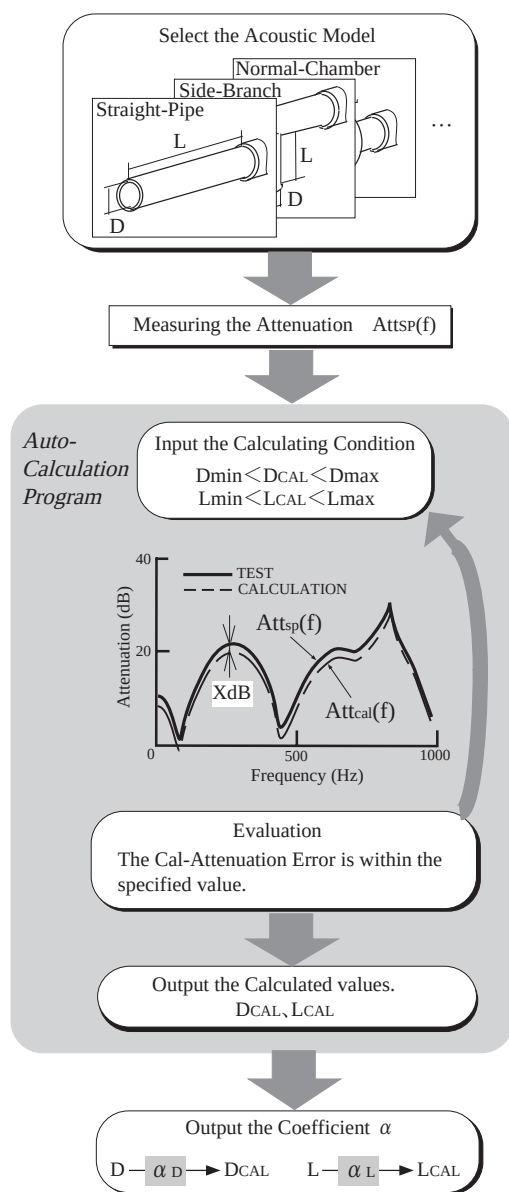


Fig. 4 Auto-Calculation Program for Fitting Optimum Coefficient Values

3. 2. 基本音響モデルのモデル化手法検討

前述の等価寸法補正算出方法により、さまざまな吸気系の形状要素に対してどのようにモデル化するかを求めた結果を以下に示す。ここでは、パイプモデル、チャンバーモデル、レゾネータモデルのそれぞれについて代表的なモデルを選び説明する。

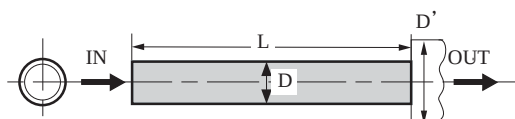


Fig. 5 Model Diagram of Straight Pipe

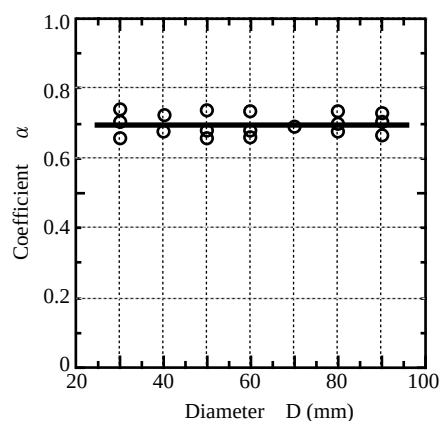


Fig. 6 Coefficient α of Straight Pipe ($D' = \infty$)

3. 2. 1. パイプモデル

パイプモデルでは、ストレートパイプを例にとり説明する。Fig. 5に示すように対象となるパイプの径、長さの実寸法を D 、 L とし、適合化による計算モデル寸法を D_{CAL} 、 L_{CAL} とする。また、次に接続されるモデルの径を D' とする。

まず減衰量の実測値に対して計算適合化を行い実寸法と計算モデル寸法との関係を求める。この時のパイプ長さの補正係数 α を次の式で定義する。

$$\alpha = (L_{CAL} - L) / D$$

$D' = \infty$ すなわち大気解放の条件におけるパイプ径 D と補正係数 α の関係を Fig. 6 に示す。この図から α は、一定値 ($= \alpha_0$) をとることがわかる。

次に D' を変化させた場合を考える。パイプ径比を $d = D' / D$ と定義し、Fig. 7 にパイプ径比 d と補正係数 α との関係を示す。この図から α は、パイプ径比 d に依存し、次に接続されるパイプ径によって変化することがわかる。

以上をまとめると、パイプ実寸法 D 、 L と計算モデル寸法 D_{CAL} 、 L_{CAL} の関係は、次に接続される音響モデルの径 D' の条件により変化し次の式で与えられる。

$$D_{CAL} = D$$

$$L_{CAL} = L + \alpha \times D$$

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{1}{D' / D} \right)$$

また、この補正式を用いて計算した減衰量結果を Fig. 8 に示す。

パイプは、ストレートパイプ以外に Table 1 に示したような扁平形状、エッジ形状、バイパスパイプなどについて同様の手法で補正式を算出した。

3. 2. 2. チャンバーモデル

チャンバーモデルは、インレットパイプ、アウトレットパイプの配置によって選択する音響モデルや補正係数が違ってくる。ここでは、オフセットチャンバーを例にとり説明する。

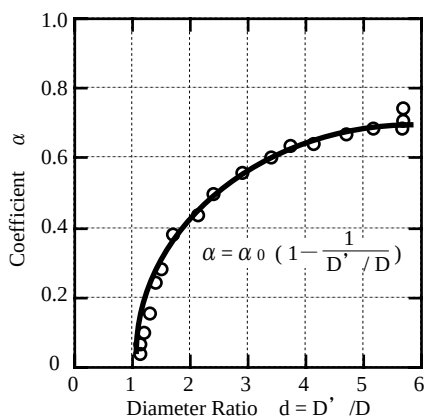


Fig. 7 Coefficient α of Straight Pipe ($D' = \text{variable}$)

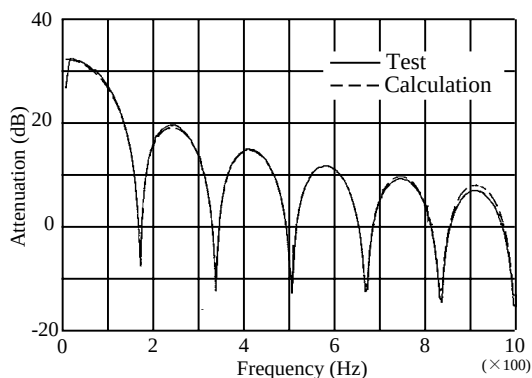


Fig. 8 Comparison between Test and Calculation of Straight Pipe ($D' = \infty$)

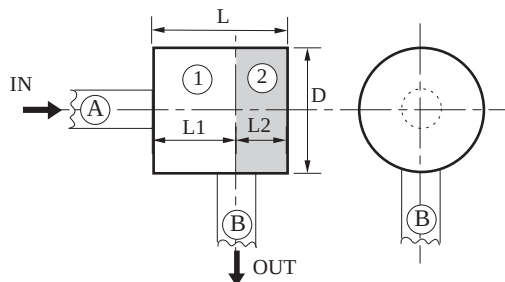


Fig. 9 Model Diagram of Offset Chamber

Fig. 9 のインレットパイプとアウトレットパイプが直交するオフセットチャンバーの場合は、共鳴型デバイスであるサイドブランチが付いたような減衰量特性を示す。音響加振テストの結果からこの共鳴周波数はアウトレットパイプ (B) の取付位置によって変化し、計算での基本音響モデルを①の部分はストレートパイプとし、②の部分はサイドブランチとして扱う。Fig. 9 のように径、長さの実寸法が D 、 $L1$ 、 $L2$ のとき、①、②の部分の計算モデル寸法はそれぞれ $D1_{CAL}$ 、 $L1_{CAL}$ 、 $D2_{CAL}$ 、 $L2_{CAL}$ とする。

Fig. 10、11 は、減衰量の実測値に対して計算適化を行い、実寸法と計算モデル寸法との関係を求めたものである。これより 1 および 2 の部分の計算モデル寸法は、実寸法に等しいことがわかる。

以上をまとめるとオフセットチャンバーのインレットアウトレットパイプの配置が直交する場合は、Fig. 9 のようにチャンバー全体をパイプ音響モデル部分とサイドブランチ音響モデル部分の二要素に分割することによりモデリングが可能である。

また実寸法 D 、 L と計算モデル長 D_{CAL} 、 L_{CAL} の関係は補正が必要なく、次の式で与えられる。

$$D_{CAL} = D$$

$$L1_{CAL} = L1, L2_{CAL} = L2$$

また、この補正式を用いて計算した減衰量結果を Fig. 12 に示す。

チャンバーは、オフセットチャンバー以外に Table 1 に示すような同軸チャンバー、挿入チャンバーなどについても同様の手法で補正式を算出した。

3. 2. 3. レゾネータモデル

レゾネータモデルでは、けい部を一つもつ一般的なレゾネータを例にとり説明する。

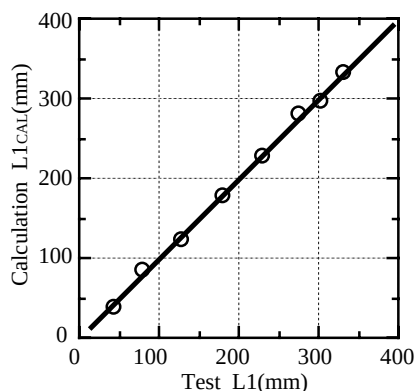


Fig. 10 Comparison between Test and Calculation of Pipe Area No.1 in Offset Chamber

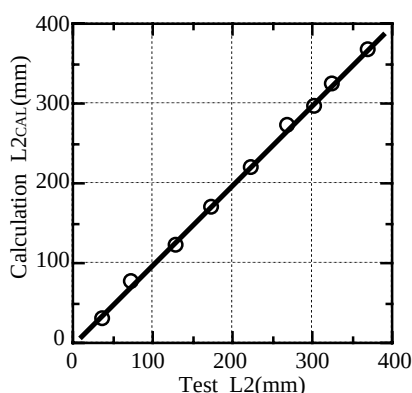


Fig. 11 Comparison between Test and Calculation of Side-Branch Area No.2 in Offset Chamber

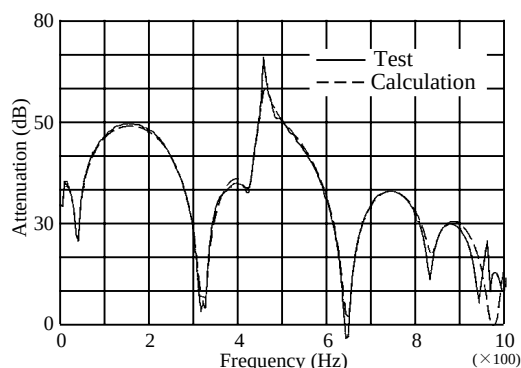


Fig. 12 Comparison between Test and Calculation of Offset Chamber

Fig. 13のように対象となるレゾネータのけい部および容量部の径、長さの実寸法が D 、 L 、 D_v 、 L_v のとき計算モデル上では径、長さを D_{CAL} 、 L_{CAL} 、 D_{VCAL} 、 L_{VCAL} と

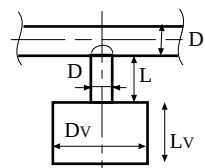


Fig. 13 Model Diagram of Resonator

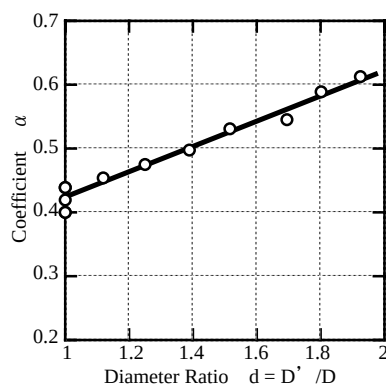


Fig. 14 Coefficient α of Resonator

する。またけい部が接続しているパイプの径を D' とする。

この時、減衰量の実測値に対して計算適合化を行い実寸法と計算モデル寸法との関係を求める。Fig. 14は、パイプ径比 $d = D' / D$ と定義したときのパイプ径比 d と補正係数 α との関係を示している。この図から α は、次の式で表すことができる。

$$\alpha = \alpha_0 \times (D' / D) + \beta_0$$

ここで α_0 、 β_0 は定数

以上をまとめると、レゾネータの計算モデル化に対しては、けい部長についてのみ補正が必要となる。またこれは、けい部が接続されるパイプのパイプ径比により変化した次の式で与えられる。

$$D_{CAL} = D$$

$$L_{CAL} = L + \alpha \times D$$

$$\alpha = \alpha_0 \times (D' / D) + \beta_0$$

$$D_{VCAL} = D_v$$

$$L_{VCAL} = L_v$$

また、この補正式を用いて計算した減衰量結果をFig. 15に示す。

レゾネータは、これ以外にTable 1に示すような2-レ

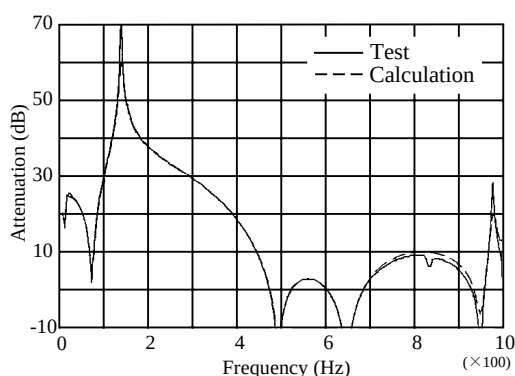


Fig. 15 Comparison between Test and Calculation of Resonator

ゾネータ、3-レゾネータ、バイパス2-レゾネータなどについても同様に補正式を算出した。

4. 新吸気シミュレーションソフトの開発

計算精度については、実際の吸気系に対してどのように計算モデルを作成するかが重要となる。そこで、3.2.で述べた計算モデル化手法を用いて、さらに機能を加え、Fig. 16に示すような新しいシミュレーションソフトを開発した。その特徴を以下に述べる。

- (1) 減衰量計算では、従来計算できなかった複雑な形状の四端子定数を基本音響モデルとして用意しさまざま

な形状に対して計算可能とした。

- (2) 減衰量計算の入力環境は、自動的に補正処理を行い計算寸法に置き換える機能を持たせ、ユーザーは基本音響モデルの形状パターンの選択と実寸法を入力するだけとした。
- (3) 減衰量計算結果と入力条件設定(吸気系入口の体積速度、音圧)により吸気系出口での吸気音レベルを算出可能とした。
- (4) 減衰量適合理化機能を追加し減衰量の実測結果から逆に計算寸法を算出可能とした。

5. 実際の吸気系での精度検証

Fig. 17に示すような実際の吸気系に対して減衰量の計算を行った。

従来のモデルでの計算結果をFig. 18に示す。基本音響モデルは、ストレートパイプ、レゾネータ、ノーマルチャンバーの構成であり計算モデル寸法は、すべて実寸法を用いている。従来モデルの計算結果では、低周波領域は実測値に対して周波数のずれはあるものの同傾向の共鳴パターンを示し、定性的な予測は可能である。しかし高周波に移行するにしたがって、実測と計算の差は大きくなり、500Hz以上での計算による予測は難しいと言える。

次に、Fig. 19に今回のモデル化手法を考慮した計算モデルでの計算結果を示す。基本音響モデルについては、ストレートパイプ、レゾネータは、従来モデルと同じで

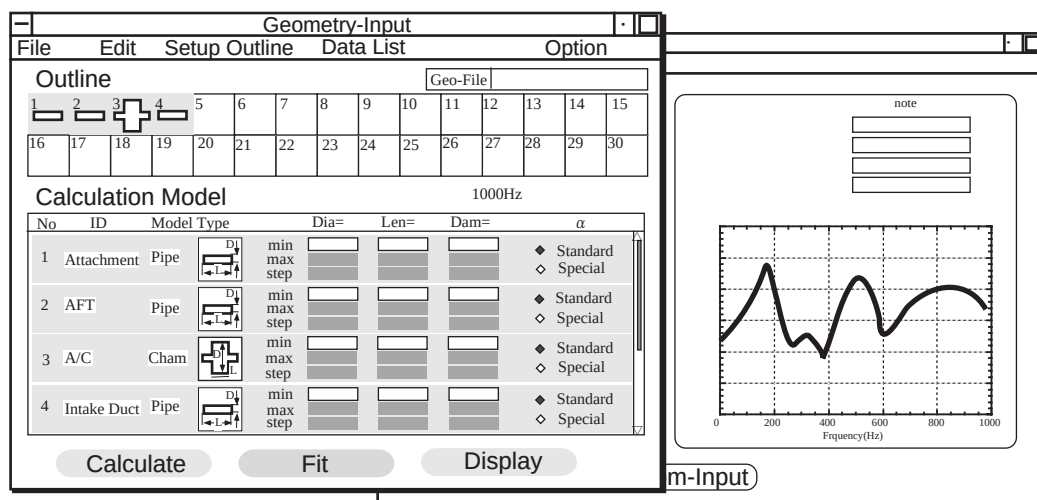


Fig. 16 Simulation Software for Calculating Acoustic Attenuation of Intake Systems

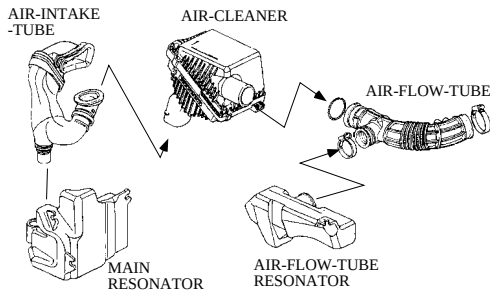


Fig. 17 Block Diagram of Intake System

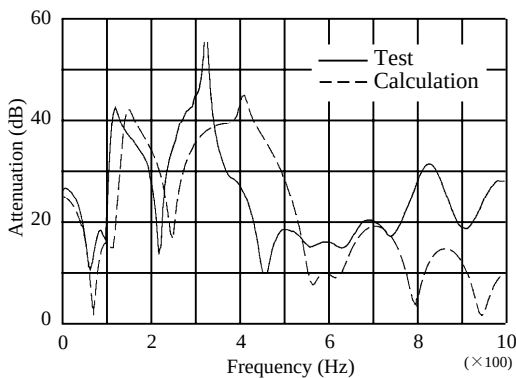


Fig. 18 Comparison between Test and Calculation using Conventional Model of Intake System

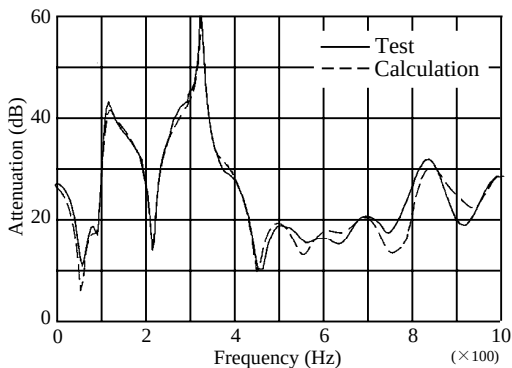


Fig. 19 Comparison between Test and Calculation using Developed Model of Intake System

あるがエアクリーナ部のチャンバーは、オフセットタイプであり今回新規に用意したオフセットチャンバーを選択している。また計算モデル寸法は、実寸法に対して算出した等価寸法補正を行い入力している。この計算結果は、実測値と良く一致し、本モデル化手法を用いて計算することにより複雑な形状をもつ実際の吸気系においても0～1 KHzの周波数範囲で実用上十分な精度が得られることがわかる。

6. まとめ

自動車で使用されているさまざまな吸気系の音響特性を開発初期に精度良く予測するために四端子法を用いた吸気系音響減衰量計算シミュレーションのモデル化手法を検討し、次のような成果が得られた。

- (1) 複雑な形状も含めたさまざまな吸気系モデルに対して、減衰量の実測と計算の適合化から、パイプ、チャンバー、レゾネータなど各基本音響モデルごとに実寸法と等価な計算寸法の関係を導き出した。
- (2) 実際の吸気系に対してこのモデル化手法を用いて減衰量計算することにより1 KHzまでの中高周波領域で実用上十分な精度を得ることができた。
- (3) (1)でのモデル化手法を用いた入力環境の整備とユーザーインターフェースの向上を図った新シミュレーションソフトを開発し、開発初期段階において、容易に、高い精度で、吸気系音響減衰量特性を予測することができる開発支援ツールを完成できた。

参考文献

- 1) 小林義明 他：BEMによる排気消音器の音響解析、自動車技術会学術講演会前刷集 912 (1991)
- 2) 佐藤直人：吸排気系のFEM音響シミュレーション、自動車技術会学術講演会前刷集 924 (1992)
- 3) 須山栄蔵、平田賢：減衰伝搬を伴う管路系の伝達マトリックス、日本機械学会誌、35巻4号 (1979)
- 4) 村岡良三：自動車用消音器、(社)日本自動車部品工業会 (1990)

■著 者■



岩井正志



伊藤秀昭



松本壮敏



高林徹



三澤吉次