

# エンジン排気音の能動消音の コンピュータシミュレーションとその応用

信州大学工学部  
教授 工学博士

田中正隆

## 1. まえがき

近年、さまざまな分野においてエンジンが高性能、高出力化してきており、それに伴いその排気音による騒音も大きくなってきている。エンジン排気音による騒音を効率的に低減させることは、工学上の重要な関心事の一つとなっている。吸音装置により騒音を吸収する方法は古くから用いられているが、最近では、別の音源から逆位相の音を与えて騒音を能動的に消音する、いわゆるアクティブ・ノイズ・コントロールに関して多くの研究が行われている<sup>(1)-(8)</sup>。

著者はこれまで、音場制御を音響逆問題として定式化して、境界要素法と最適化手法を用いて解決する方法を提案し、3次元ダクト騒音の能動消音のシミュレーション<sup>(6)</sup>や新形式の防音壁による音場制御のメカニズム解明<sup>(7)(8)</sup>などに応用してきた。これらの場合と同様に、エンジン排気音の能動消音問題もまた、音響逆問題としての定式化が可能である。本研究では排気管の簡単な2次元モデルについて、能動消音を上記の方法によりシミュレーションした結果について報告する。すなわち、排気管側面に2次音源を発生させる管を垂直に取り付け、この2次音源からの音と排気管の1次音とを干渉させて排気管出口で排気音を低減または消音させる問題を考える。ここでは、排気管出口の評価点での音の皮相パワーを最小にするように排気管の形状を決める例題を取り上げる。いくつかの設計変数の初期値についてこの最適化を行ない、得られた結果を比較する。さらに、実際の騒音の最

も簡単なモデルとして周波数の異なる2つの純音が混ざっている場合を取り上げ、最適消音のシミュレーションを行い、その特性を純音の場合と比較する。

## 2. 境界要素法を用いたシミュレーション

媒質の振動が微小振幅の定常振動であると仮定すると、音場は Helmholtz 方程式により支配される。このとき、境界積分方程式は次式で与えられる<sup>(8)(9)</sup>。

$$\begin{aligned} & \left[ \int_S \{ \dot{q}^*(x, y) - Q^*(x, y) \} dS(x) \right] p(y) + \\ & \int_S \dot{q}^*(x, y) \{ p(x) - p(y) \} dS(x) \\ & = -j\rho\omega \int_S p^*(x, y) v(x) dS(x) + Ap^*(x_s, y) \quad (1) \end{aligned}$$

ただし、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $\omega$  と  $\rho$  は角振動数及び媒質の密度である。また、 $p(x)$  は音圧、 $v(x)$  は粒子速度、 $x_s$  は集中音源の座標、 $A$  は集中音源の強さ、 $p^*(x, y)$  と  $q^*(x, y)$  は Helmholtz 方程式の基本解、また  $Q^*(x, y)$  は Laplace 方程式の基本解である。

音場内部の点  $x$  での音圧は、境界上の音圧及び粒子速度を境界要素法により計算した後、次式より求めることができる。

$$\begin{aligned} p(y) = & - \int_S \{ \dot{q}^*(x, y) - Q^*(x, y) \} dS(x) p(x_0) \\ & - \int_S \dot{q}^*(x, y) \{ p(x) - p(x_0) \} dS(x) \\ & - j\rho\omega \int_S p^*(x, y) v(x) dS(x) \\ & + p(x_0) + Ap^*(x_s, y) \quad y \in V \quad (2) \end{aligned}$$

ただし、 $p(x_0)$  はソース点から最も近い境界点  $x_0$  での境界値である。式(1)、(2)をそれぞれ境界要素法により離散化し、マトリックス表示すると

次式のようになる。

$$[H]\{p\}_S = [G]\{v\}_S + \{f\}_V \quad (3)$$

$$p_V = -[A]\{p\}_S + [B]\{v\}_S + \{f\}_V \quad (4)$$

ここで、マトリックス  $[H]$ 、 $[G]$ 、 $[A]$ 、 $[B]$  は基本解より計算できる既知の係数マトリックスである。 $\{f\}$  は集中音源項であり、集中音源のない場合は 0 となる。また、添字  $S$  は境界上の値、添字  $V$  は境界内部の値であることを示す。境界条件を適用して、これらの代数方程式系を解くことにより、境界上の未知節点量と音場内部の点での音圧を求めることができる。

本研究では、音響逆問題を最適化問題として解析する。このとき、最適化の目的関数  $R$  を次式で定義する。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \left\{ \frac{p_i^1}{p_i^0} \frac{v_i^1}{v_i^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{p_i^2}{p_i^0} \frac{v_i^2}{v_i^0} \right\}^2 + \dots \right] \quad (5)$$

ただし、 $N$  は評価点の個数、 $p_i^1, p_i^2, \dots$  ( $i=1, N$ )、 $v_i^1, v_i^2, \dots$  ( $i=1, N$ ) は、それぞれ評価点での音圧および粒子速度、 $p_{0i}$  ( $i=1, N$ )、 $v_{0i}$  ( $i=1, N$ ) は最初に仮定した形状で 2 次音源から音を出さない場合の評価点における音圧と粒子速度である。 $R$  を最小化するための最適化手法として、本研究では最急降下法を用いている。

### 3. シミュレーション結果と考察

排気音の能動消音の概念図を Fig. 1 に、また排気管の 2 次元モデルの寸法を Fig. 2 に示す。Fig.

2 の AB から排気音 (1 次音源) が出るものとし、FG は付加音源 (2 次音源) の位置とする。1 次音源は、ある周波数に対して AB 全体で一定の音

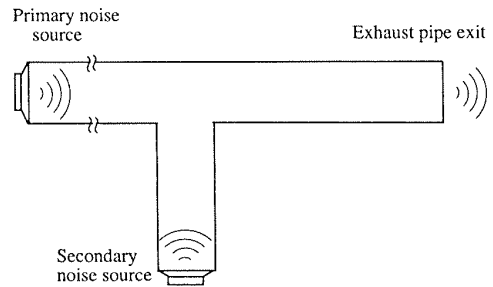


Fig.1 Schematic illustration for exhaust-pipe noise

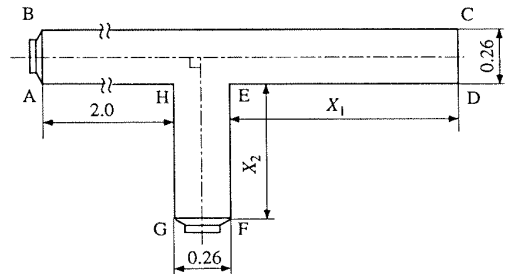


Fig.2 Dimension of exhaust pipe

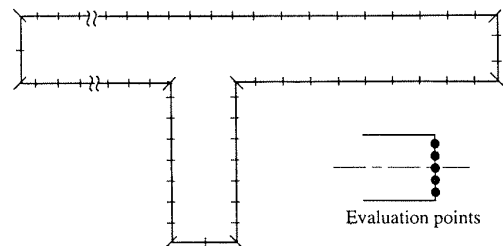


Fig.3 Boundary element discretization

圧で定常振動しているものとし、2次音源の音圧もやはりFG間で一定とする。またDE、EFのそれぞれの長さ $X_1$ 、 $X_2$ を設計パラメータとする。

排気管モデルの表面を2次アイソパラメトリック要素を用いてFig. 3に示すように境界要素分割する(79要素、159節点)。このモデルは無限の広がりをもつ音場に置かれておりと仮定するので、境界の内面と外面をともに要素分割している。排気管内部と排気管外部の2領域に分けて考え、領域分割法により音場の解析を行った。境界条件は、排気管内部では音源と排気管出口以外は粒子速度を0(剛体壁)とし、排気管外部では排気管出口以外の部分はすべて剛体壁と仮定した。また、排気管出口の境界では音圧と粒子速度の連続条件を用いた。なお、最適化反復計算過程においてパラメータが変化する度に要素数一定のままで要素の再分割を行った。音場の物性値は、音速:340[m/s]、空気密度:1.2[kg/m<sup>3</sup>]と仮定した。

### 3. 1 純音への適用

まず、1次音源からある周波数の純音が放射されている場合についての消音シミュレーションを行った。ただし、最適化のパラメータの初期値は、 $X_1$ 、 $X_2$ それぞれについて異なる3種類を仮定した。1次音源からは音圧レベルにして100dB(音圧:実部2.0Pa、虚部0.0Pa)に相当する大きさを持つ190Hzの純音が放射されており、2次音源から音圧レベルにして80dB(音圧:実部-0.2Pa、虚部0.0Pa)に相当する大きさを持

Table1 Optimal set of parrameters

	$X_1$ [m]	$X_2$ [m]	SPL [dB]
Initial	1.0000	0.5000	98.308
Optimal	1.2001	0.8418	42.012
Initial	2.0000	1.5000	105.12
Optimal	2.4795	1.7851	32.933
Initial	3.2000	2.5000	89.820
Optimal	3.1784	2.6311	24.036

つ音が放射されている場合の消音シミュレーションを行った時の結果を、Table 1にまとめて示す。この表より、初期値が異なると、パラメータ $X_1$ と $X_2$ の最適値もそれぞれ異なる値に収束していることがわかる。

Fig. 4には、パラメータのそれぞれの最適値に対する排気管内の音圧レベルコンターを示す。これらの図からわかるように、排気管出口側の管では干渉波の半波長が約0.96mになっていることがわかる。また、2次音源側の管でもその半波長が約0.85mの波になっていることがわかる。従って、これらの波の節の部分で音圧レベルが下がっていると考えると、排気管出口側の管を0.96m毎伸縮させても2次音源側の管を0.85m毎伸縮させても排気管出口で同様な消音効果が得られるであろうことが確かめられた。

### 3. 2 騒音モデルへの適用

実際の騒音は広い周波数帯域におよび、さまざまな周波数成分を含んでいる。そこで、騒音を多数の周波数の純音が集まったものと考え、

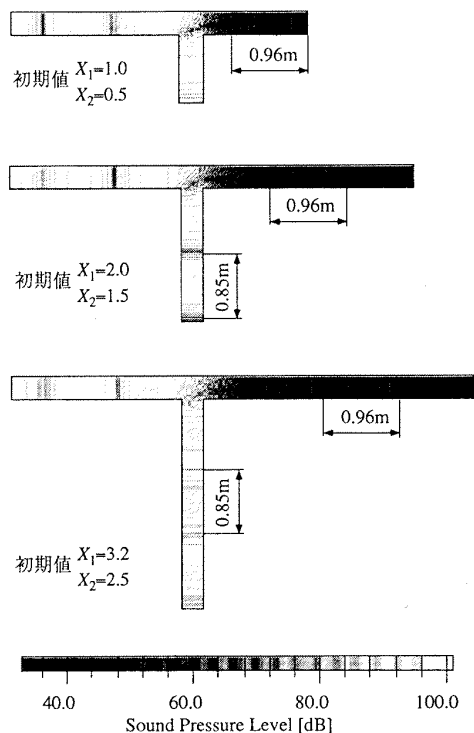


Fig.4 Contours of sound pressure level inside exhaust pipe at optimally cancelled state

それぞれの周波数に対して境界要素解析を行い、それを重ね合わせて能動制御のシミュレーションを行う。

ここでは、Fig. 2 の寸法形状の排気管において、1次音源から音圧レベルにして80dB（音圧：実部0.2Pa、虚部0.0Pa）に相当する大きさを持つ95Hzの純音と、100dB（音圧：実部2.0Pa、虚部0.0Pa）に相当する大きさを持つ190Hzの純音と

Table 2 Optimal set of parameters

	$X_1$ [m]	$X_2$ [m]	SPL [dB]
Initial	2.0000	1.5000	103.99
Optimal	2.1900	1.7633	43.434
Initial	4.0000	2.5000	91.386
Optimal	4.0016	2.6641	54.490

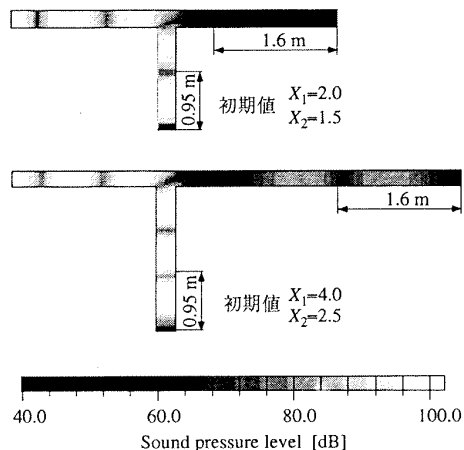


Fig.5 Contours of sound pressure level inside exhaust pipe at optimally cancelled state

が放射されていると仮定した。また2次音源からは1次音源のそれぞれの音の周波数に対して60dB（音圧：実部-0.02Pa、虚部0.0Pa）に相当する大きさを持つ音が放射されていると仮定し、シミュレーションを行った。初期値は  $X_1$ 、 $X_2$  それぞれについて2種類の値を仮定した。それらの初期値と最適化シミュレーション後の最適値を Table 2 に示す。この表より、実際の騒音の場

合においても、初期値が異なると、パラメータ  $X_1$ 、 $X_2$  の最適値もそれぞれ異なる値に収束していることがわかる。

Fig. 5 には、パラメータのそれぞれの最適値に対する排気管内の音圧レベルコンターを示す。これらの図より、排気管出口側の管では干渉波の半波長が約1.6mになっていることがわかる。また、2次音源側の管でもその半波長が約0.95mの波になっている。このことにより、1次音源から2つの周波数の純音が同時に放射されている場合でも、同様に、排気管長さと同様の波長との関係の特徴が1つの純音だけが放射されている場合と類似していることがわかる。しかし、1次音源から2つの周波数の純音が放射されている場合の方が干渉波の波長がかなり長くなっている。このことにより、1次音源から放射される周波数成分が多くなると、このような現象は見られなくなると思われる。

#### 4. あとがき

境界要素法と最適化手法を用いた音場制御の解析システムにより、排気管の能動消音のシミュレーションを行った。効果的な消音が可能で設計パラメータの値が干渉波の半波長毎に存在することを、まず純音について確かめた。また、より実際的な騒音のモデルとして、1次音源から2つの周波数の音が放射される場合について検討し、実際的な騒音の場合でも純音の場合と同様の特徴があることを確かめた。

本研究で取り上げたのは排気音による騒音の簡単な2次元モデルに過ぎないが、能動制御に

より騒音の劇的な低減が可能であることが、コンピュータ・シミュレーションにより確かめられた。このシミュレーション技法と実験手法とを併用すれば、騒音制御のための効果的な方法がきわめて効率よく開発できることになる。具体的な騒音の新しい制御法の開発に、この種のシミュレーション技法が活用されることを期待したい。

#### 参考文献

- (1) Salikuddin, M., et. al. : Application of active noise control to model propeller noise, *J. Sound and Vibration*, 137 (1990), pp.9-41.
- (2) Stevens, J.C. and Ahuja, K.K. : Recent advances in active noise control, *AIAA J.*, 29 (1991), pp. 1058-1067.
- (3) Cuneface, K.A., and Koopmann, G.H. : A boundary element approach to optimization of active noise control source on three-dimensional structures, *ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 113 (1991), pp. 387-394.
- (4) 城戸 : 騒音のアクティブ制御, 日本音響学会誌, 47-9 (1991), pp. 661-667.
- (5) 浜田・今井 : 音と振動に関するアクティブ制御技術の最近の動向, 日本音響学会誌, 47-9 (1991), pp. 685-693.
- (6) 田中・山田・白鳥 : ダクト騒音の能動制御に関する境界要素法シミュレーション, 日本機械学会論文集, 57C-540 (1991), pp. 2646-2651.
- (7) 田中・松本・白鳥 : 防音壁による音場制御の境

- 界要素法シミュレーション、境界要素法論文集、  
8 (1991)、pp. 211-216。
- (8) 田中・松本・白鳥：境界要素法による防音壁の  
音場制御シミュレーション、第13回計算電気・  
電子工学シンポジウム論文集、日本シミュレー  
ション学会、(1991)、pp. 283-288。
- (9) 田中・松本・中村：境界要素法、培風館、(1991)、  
pp. 115-118。

