3 個のマイクロフォンを用いた音響特性計測法の開発* (エンジン吸気配管系と吸音材料への適用)

木 村 康 正*¹, 田 中 俊 光*¹
中 島 一*², 渡 辺 弘 文*²

Development of Measuring Method for Acoustic Characteristics by Using 3-microphones (Application to Engine Intake Systems and Sound Absorbing Materials)

Yasumasa KIMURA*³, Toshimitsu TANAKA,
Hajime NAKASHIMA and Hirofumi WATANABE

*³ Kobe Steel Ltd., 1-5-5 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo, 651-2271 Japan

A measuring method for the transfer matrix parameters of acoustic systems by using 3-microphones is described in this report. The acoustic characteristics of engine intake systems are usually analyzed by the transfer matrix method. However, there are some intake subsystems for which there is still no adequate theoretical representation. By using the 3-microphones method, the matrix parameters of unknown systems can be determined experimentally. The matrix parameters of an air cleaner were measured and used to predict the acoustic characteristics of the intake systems. The comparisons were made between predicted results using the matrix parameters and directly measured results with mean flow. Agreement in fairly good and it suggests that this method can be used to evaluate the acoustic characteristics of intake systems with low speed mean flow. Furthermore, this 3-microphones method was applied for measurement of the acoustic characteristics of sound absorbing materials. The propagation constants and the characteristic impedance of some materials were measured and compared with measured values by using the 2-microphones method. The good agreement suggests that this method is also reliable to measure the acoustic characteristics of sound absorbing materials.

Key Words: Transfer Matrix, Matrix Parameters, 3-microphones Method, Intake System, Propagation Constants, Characteristic Impedance, Sound Absorbing Materials

1. 緒 言

エンジンや圧縮機における配管系や消音器の音響特性を検討する場合、伝達マトリックス法による解析が広く用いられる。しかし、実際の配管系における各伝達要素の形状は複雑であり、形状が単純で内面が剛体の直管や拡張室など一部の伝達要素を除いては、理論的に伝達マトリックスの四端子定数を決定する事が困難な場合が多い。このため、伝達マトリックスの四端子定数を実験的に計測する手法の研究が行われてきた。伝達マトリックスの四端子定数を実験的に求める方法としては、対象伝達部の片端を閉にして加振器で他端をピストンのように加振して求める方法⁽¹⁾や四点マイクロフォン法^{(2)~(7)}などがすでに報告されてる。To and Doige らは、より簡便に計測できる方法として、上流側では2個のマイクロフォンを用いるが、下流側の端面は閉としてマイクロフォン本数を1点とした合計3点のマイクロフォンにより四端子定数を算出する

方法についての理論を示し、剛壁直管や拡張室などの伝達要素単体の四端子定数の計測に適用した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ところで、吸音性を有する配管系の音響特性の解析を四点マイクロフォン法により実施した例については報告されているが^{(2)~(4)}、三点マイクロフォン法によりエアクリーナなど吸音性を有する伝達部の四端子定数を計測し、さらにその計測値を配管系全体の音響特性の解析に適用して、計測手法の有効性を評価した報告例は見当たらない。一方、三点マイクロフォン法では端面を閉とする必要があるため、特に気流を伴う場合の計測が不可能となる。しかし、音速に比べて気流速度が十分に小さい配管系の解析に、三点マイクロフォン法による気流速度の零の場合の計測値を適用した際の有効性について報告した例も見当たらない。そこで、本報では、三点マイクロフォン法の原理を応用し、マイクロフォンの固定部を共通にして任意直径の配管系に対しても簡便に計測できるよう断面適合要素を加えた改良型四端子定数の計測システムを開発し、気流を伴うエンジン吸気配管系他に適用して、その有効性と工業的有用性を確認したので報告する。

また、本法を用いれば、吸音材の伝搬定数および特性インピーダンスについても、従来の方法と比較してより簡便に計測できるようになる。すなわち、マイク

* 原稿受付 2001 年 4 月 2 日。

*¹ 正員、(株)神戸製鋼所機械研究所(☎ 651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)。

*² (株)コベルコ建機生産本部(☎ 731-0138 広島市安佐南区祇園 3-12-4)。

E-mail: ym-kimura@rd.kcril.kobelco.co.jp

ロフォン2個を用いて供試吸音材の背後空気層長さを2種類に変えることによる吸音材の上記音響特性の計測法について宇津野と著者の一人ほか1名が報告したが⁽¹¹⁾、本法では吸音材の背後空気層を変更することなく吸音材の固有音響特性の計測が可能となる。吸音材の伝搬定数や特性インピーダンスを3点の音圧の計測値から求める方法について、岩瀬らは、吸音材前後の近接2点と吸音材表面からマイクロフォンを移動させた位置の音圧とから、特性インピーダンスと伝搬定数を算出している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、この方法ではマイクロフォンを軸方向に移動させる際、吸音材の厚さに応じてマイクロフォンの位置を調整する作業が必要となる。一方、河西らは吸音材表面から離れた異なる2点および背後1点の計3点の固定位置での音圧から特性インピーダンスと伝搬定数を求める試みを行った。しかし、その計測方法については更なる検討の必要性があると述べ、有効性についての結論が示されていない⁽¹⁰⁾。本報では吸音材の厚さに応じたマイクロフォン位置の調整が不要な固定位置3点の音圧を計測する三点マイクロフォン法を吸音材の音響特性計測についても適用し、従来の二点マイクロフォン法と同等の精度の計測結果を得て、その有効性を確かめたので、これについても報告する。

2. 四端子定数の計測方法

2.1 実験装置 実験に用いた音響管の概略図を図1に示す。音響管は端部にスピーカを設置した配管 GH と供試体を含む配管 HK で構成される。また、配管 HK は前部接続管 HI、供試体 IJ、後部接続管 JK とで構成されている。供試体の前方に前側接続管 HI を接続することにより、配管 GH と供試体 IJ の直径が異なる場合でも計測ができるようにしている。マイクロフォンは配管 GH 部に2個、後部接続管 JK の端面中央に1個設置し、それぞれで計測される音圧を P_1, P_2, P_3 とする。

2.2 四端子定数の算出方法 前部接続管 HI と供試体 IJ を含めた配管 HJ の四端子定数を $A_0, B_0,$

C_0, D_0 とすると、断面 H と断面 K での音圧と体積速度の関係は、式(1)となる。

$$\begin{Bmatrix} P_H \\ U_H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos(kL_1) & i\frac{\rho c}{S_0} \sin(kL_1) \\ \frac{iS_0}{\rho c} \sin(kL_1) & \cos(kL_1) \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} P_K \\ U_K \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k は波長定数、 ρc は空気密度 ρ と音速 c の積で固有音響抵抗、 S_0 は後部接続管の断面積である。接続管 JK の端面は閉であることから、 $U_K=0$ 、 $P_K=P_3$ となり P_H と U_H は次式のように表現される。

$$P_H = A_0 \cdot P_3 \cos(kL_1) + B_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \cdot P_3 \sin(kL_1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$U_H = C_0 \cdot P_3 \cos(kL_1) + D_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \cdot P_3 \sin(kL_1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、配管 GH の断面積を S 、マイクロフォンの間隔を Dx 、 P_2 から前部接続管までの間隔を Lx とすると、音圧 P_1, P_2, K_H と体積速度 U_1, U_2, U_H の間には式(4)、(5)の関係が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kDx) & \frac{i\rho c}{S} \sin(kDx) \\ \frac{iS}{\rho c} \sin(kDx) & \cos(kDx) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{Bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kLx) & \frac{i\rho c}{S} \sin(kLx) \\ \frac{iS}{\rho c} \sin(kLx) & \cos(kLx) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_H \\ U_H \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらの関係から、 U_1, U_2 を消去すると、 P_H, U_H は P_1, P_2 を用いて式(6)、(7)のように表現できる。

$$P_H = P_1 \left[\frac{P_2 \sin\{k(Dx+Lx)\}}{P_1 \sin(kDx)} \cdot \frac{\sin(kLx)}{\sin(kDx)} \right] = P_1 (H_2 X_1 - Y_1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$U_H = P_1 \frac{iS}{\rho c} \left[\frac{P_2 \cos\{k(Dx+Lx)\}}{P_1 \sin(kDx)} \cdot \frac{\cos(kLx)}{\sin(kDx)} \right] = P_1 \frac{iS}{\rho c} (H_2 X_2 - Y_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

それぞれの太括弧内の第1項を $H_2 X_1, H_2 X_2$ 第2項を Y_1, Y_2 とする。式(6)を式(2)に、式(7)を式(3)に代入すると、式(8)および式(9)となる。ここで、 $H_2 = P_2/P_1, H_3 = P_3/P_1$ である。

$$(H_2 X_1 - Y_1) = H_3 \{ A_0 \cdot \cos(kL_1) + B_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \sin(kL_1) \} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{iS}{\rho c} (H_2 X_2 - Y_2) = H_3 \{ C_0 \cdot \cos(kL_1) \}$$

Fig. 1 Measuring system of matrix parameters

$$+ D_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \sin(kL_1) \} \dots\dots\dots (9)$$

さらに後部接続管 JK の長さを L_2 に変更した場合の音圧伝達関数を H'_2, H'_3 とすれば、同様に式(8)', (9)' の関係が成立する。

$$(H'_2 X_1 - Y_1) = H'_3 \left\{ A_0 \cdot \cos(kL_2) + B_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \sin(kL_2) \right\} \dots\dots\dots (8)'$$

$$\frac{iS}{\rho c} (H'_2 X_2 - Y_2) = H'_3 \left\{ C_0 \cdot \cos(kL_2) + D_0 \cdot \frac{iS_0}{\rho c} \sin(kL_2) \right\} \dots\dots\dots (9)'$$

式(8), (8)' および(9), (9)' の関係から得られた四端子定数を式(10)から式(13)に示す。

$$A_0 = \frac{\sin(kL_2) \frac{H_2 X_1 - Y_1}{H_3} - \frac{H'_2 X_1 - Y_1}{H'_3} \sin(kL_1)}{\sin\{k(L_2 - L_1)\}} \dots\dots\dots (10)$$

$$B_0 = \frac{\cos(kL_2) \frac{H_2 X_1 - Y_1}{H_3} - \frac{H'_2 X_1 - Y_1}{H'_3} \cos(kL_1)}{\frac{iS_0}{\rho c} \sin\{k(L_1 - L_2)\}} \dots\dots\dots (11)$$

$$C_0 = \frac{\frac{iS}{\rho c} \left\{ \sin(kL_2) \frac{H_2 X_2 - Y_2}{H_3} - \frac{H'_2 X_2 - Y_2}{H'_3} \sin(kL_1) \right\}}{\sin\{k(L_2 - L_1)\}} \dots\dots\dots (12)$$

$$D_0 = \frac{\cos(kL_2) \frac{H_2 X_2 - Y_2}{H_3} - \frac{H'_2 X_2 - Y_2}{H'_3} \cos(kL_1)}{\left(\frac{S_0}{S} \right) \cdot \sin\{k(L_1 - L_2)\}} \dots\dots\dots (13)$$

四端子定数 A_0, B_0, C_0, D_0 には前部接続管 HI の部分も含まれる。前部接続管 HI の四端子定数を A', B', C', D' とし、供試体の四端子定数を A, B, C, D とすると四端子定数 A_0, B_0, C_0, D_0 は式(14)のようになる。

$$\begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、前部接続管 HI の四端子定数については以下のように求める。音響管 GH と前部接続管 HI の断面積が異なる場合には、前部接続管 HI の長さ L_0 の開口端補正量を考慮する必要がある。そこで、本法では測定により前部接続管 HI の四端子定数を求めた。すなわち、図 1 に示す供試体を消除し、前部接続管 HI と後部接続管 JK を接続すると、式(1)において A_0 を A', B_0 を B', C_0 を C', D_0 を D' に置き換えた関係式が成立するので、前述と同様の方法により式(10)から式(13)において A_0 を A', B_0 を B', C_0 を C', D_0 を

D' に置き換えた関係式が得られ、 A', B', C', D' を求めることができる。前部接続管 HI の四端子定数が求まれば、供試体の四端子定数は式(15)から求まる。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

3. 実験結果

3.1 直管の四端子定数の計測

3.1.1 測定値と計算値との比較 本計測システムの妥当性を検証するために、直管の四端子定数の計測を行い理論値との比較を行った。長さ $d=500$ mm, 直径 $\phi=60$ mm, 厚さ 5 mm の塩化ビニール製直管に対して、後部接続管長さの変化量 ΔL を 300 mm とした場合 ($L_1=200$ mm, $L_2=500$ mm) の四端子定数の計測結果を図 2 の実線で示す。破線に示す理論計算値とほぼ一致しており、本手法の妥当性を確認できる。100 Hz 以下の周波数域で誤差が大きくなるが、これは、3.1.2 項に示すように低周波帯域において後部接続管長さを変更した場合の伝達関数の変化量が小さいことによる計測誤差である。

3.1.2 測定精度の検討 マイクロフォン P_1 と P_2 の間隔 Dx の精度に及ぼす影響について検討する。

Fig. 2 Measured parameters of transfer matrix (straight pipe, $\Delta L=300$ mm)

間隔 Dx が式(16)のように半波長の整数倍となる周波数 f においては、式(6)(7)の分母が零となり、断面 H での音圧および体積速度を算出する事ができない。

$$f = nc/2Dx \quad (n=1, 2, \dots, c: \text{音速}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

このため、 Dx は測定上限周波数 f_{max} の半波長以下の長さとした。本実験では $f_{max}=500$ Hz の場合には $Dx=300$ mm, $f_{max}=2$ kHz の場合には $Dx=70$ mm としている。

次に後部接続管長さの影響について検討する。2 種類の後部接続管長さの差 ΔL が半波長の整数倍となる式(17)の周波数においては、式(10)～(13)の分母が零となることから四端子定数の算出が不可能となる。このため、 ΔL についても上限周波数の半波長以下となるように選定する必要がある。

$$f = nc/2\Delta L \quad (n=1, 2, \dots, c: \text{音速}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

一方、 ΔL が小さい場合 ($L_1 \neq L_2$) は、音圧伝達関数 H_2 と H'_2 および H_3 と H'_3 との差が小さくなることから、式(10)～(13)において四端子定数の分子第 1 項と第 2 項の差が小さくなって零に近づき、分母も零に近づくことから、不定形となり測定誤差が増大する。 $\Delta L=300$ mm とした図 2 の場合には約 100 Hz 以下で

の測定精度が悪くなるが、 $\Delta L=100$ mm とした場合の四端子定数の計測結果である図 3 の場合には約 250 Hz 以下の周波数帯域で誤差が大きくなる。このため波長が長くなる低周波数帯域での計測精度を高めるには、後部接続管の長さの変化量をできるだけ大きく取ることが必要である。

以上の検討結果から、本測定では後部接続管長さの変化量 ΔL を上限周波数 f_{max} の半波長以下とし、 $L_{max}=500$ Hz の場合には $\Delta L=300$ mm とした。また、下限周波数の波長を λ_L 、後部接続管の長さの差を ΔL 、音速を 340 m/s とすると図 2 の場合 $\Delta L/\lambda_L=0.08$ 、図 3 の場合は $\Delta L/\lambda_L=0.073$ となる。このため、下限周波数については式(18)の関係を精度確保の目安とする事とした。

$$\frac{\Delta L}{\lambda_L} \geq 0.08 \quad \dots\dots\dots (18)$$

3.2 気流を伴わない場合の吸気系伝達部の計測

3.2.1 エアクリーナ部の四端子定数の計測結果

エンジン吸気系を構成するエアクリーナ部の四端子定数の計測を行った。測定に用いたエアクリーナ部の概略を図 4 に示す。エアクリーナ部は入口、出口開口部に配管が接続された円筒型の形状をしており、その内部に空気清浄用のエアフィルタが装着された構造と

Fig. 3 Measured parameters of transfer matrix (straight pipe, $\Delta L=100$ mm)

Fig. 4 Schematic design of air cleaner

Fig. 5 Measured parameters of transfer matrix (air cleaner, $\Delta L=300$ mm)

なっている。三点マイクロフォン法によるエアクリーナ部の四端子定数の測定結果を図5に示す。本エアクリーナ部では、400 Hz 付近に卓越ピークをもつ周波数特性を示していることがわかる。

3・2・2 計測精度の検証 測定されたエアクリーナ部の四端子定数の妥当性を確認するため、四端子定数から求めた理論挿入損失値と、実際の挿入損失の測定値との比較を行った。福田らは、図6に示すように消音器の有無時の音圧レベル差 ($P_1 - P_2$) を挿入損失 IL とし、音源を定体積速度音源と仮定した場合の近似式として式(19)を与えている⁽¹²⁾。

$$IL \cong 20 \log_{10} |D| \quad \dots\dots\dots (19)$$

エアクリーナ部の IL の測定値を図7の○印に、また式(19)により四端子定数 D の測定値から算出した IL を図7の実線で示す。なお、図6に示す測定では、音圧レベルをスピーカコーン紙の振動速度で正規化している。振動速度の測定は、スピーカコーン紙の動作に影響を与えないように重さ 0.65 g の小形軽量の振動ピックアップを、直径 120 mm の小形ウーハスピーカコーン紙の剛性の高い部分に設置して行った。両者はよく一致しており、エアクリーナ部のように事前に伝達マトリックスとしてモデル化が困難な伝達部分に対しても、本法により四端子定数が精度良く測定できる事が確認できた。

次に、配管系にエアクリーナ部が挿入された場合の音響特性について検討を行う。図8に実験装置の概略図を示す。スピーカ音源を用いエアクリーナ前部に長

さ 500 mm、後部に長さ 300 mm の直管をそれぞれ接続し、エアクリーナ部前後の音圧の伝達関数の実測値と計算値とを比較する。実測値は図8の X-Y 間の音圧伝達関数を 2 チャンネルの高速フーリエ変換器で直接計測した。一方、計算値は事前に計測したエアクリーナ部の四端子定数を用い、X-Y 間の音圧伝達関数を以下のように求める。

図8の①～④部の伝達マトリックスをそれぞれ $[T_1], [T_2], [T_3], [T_4]$ とし、これらを乗じた行列積の四端子定数を A, B, C, D とすると、X 点と開口端 E での音圧と体積速度の関係は

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} P_X \\ U_X \end{Bmatrix} &= [T_1][T_2][T_3][T_4] \begin{Bmatrix} P_E \\ U_E \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_E \\ U_E \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

である。式(20)より U_X は、 P_X と開口端の放射インピーダンス $Z_E (= P_E / U_E)$ を用いて式(21)のように表せる。

$$U_X = \frac{C \cdot Z_E + D}{A \cdot Z_E + B} P_X \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 Z_E は式(22)の円筒端面の理論式⁽¹²⁾を用いた。

$$Z_E = \frac{\rho c}{S} \left(\frac{(ka)^2}{4} + i0.6ka \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

なお、 a は開口端の半径を示す。同様に X 点と Y 点の音圧と体積速度には式(23)の関係が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} P_X \\ U_X \end{Bmatrix} = [T_1][T_2][T_3] \begin{Bmatrix} P_Y \\ U_Y \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (23)$$

上式において、伝達マトリックス $[T_1], [T_3]$ は理論式により求めることができ、また $[T_2]$ は本手法により事前に四端子定数を計測して定めることができる。ここで、X 点での音圧 P_X に実測値(複素音圧)を用いると、 U_X は式(21)より求まる。 P_X と U_X が定まると、式(23)における行列積の逆行列を両辺に乘ずれば Y 点での音圧と体積速度が定まる。したがって、X 点と Y 点の音圧伝達関数についても求めることができる。図10に X-Y 間の音圧伝達関数を直接測定した実測値を○印で示す。一方、 P_X の実測値と事前に計

Fig. 6 Measurement method for insertion loss of the air cleaner

Fig. 7 Insertion loss of the air cleaner

Fig. 8 Measurement method for transfer function of the air intake duct

測したエアクリーナ部の四端子定数から算出した音圧伝達関数の計算値を実線で示す。両者はよく一致しており、本手法により配管系にエアクリーナ部が挿入された場合の音響伝達特性が精度良く予測できることが確認できた。

3.3 気流を伴う実機配管系への適用

3.3.1 小形ルーツブローア配管系への適用 二葉式小形ルーツブローア(軸動力 5 kw)に図 8 に示す配管系を接続し、スピーカ音源の場合と同様に X-Y 間の音圧伝達関数を測定した。ブローア表面からの本体音を遮音して、測定は無響室内で行った。2 000 rpm 運転時の X および Y 点での音圧の周波数分析結果を図 10(a) に示す。管路内の平均流速は 12 m/s であった。

Fig. 9 Transfer function of sound pressure between point X and Y ($20 \log |P_Y/P_X|$)

(a) Sound pressure level at point X— and Y---

(b) Transfer function of sound pressure between point X and Y ($20 \log |P_Y/P_X|$)

Fig. 10 Measurement example of the roots-blower

た。実線が X 点、破線が Y 点での分析結果を示す。回転周波数 33 Hz の基本成分とともに高次成分の卓越ピークが観測される。また、図 10(b) に X-Y 間の音圧伝達関数を示す。実線はエアクリーナ部に本法で計測した四端子定数を用いて算出した計算値を示し、○印は 2 点の音圧を直接計測して求めた図 11(a) の各卓越ピーク周波数での伝達関数の値を示している。計算値と実測値はほぼよく一致しており、10 m/s 前後の流速下においては、気流速度を零とする本測定法が、実用上十分活用できることが確認できた。

3.3.2 エンジン吸気配管への適用 エンジンの吸気配管系での伝達関数の測定例を示す。実験ではエンジンの吸気マニホールドに図 8 に示す配管系を接続した。エンジンは 4 気筒 2 800 cc の自然給気形ディーゼルエンジンで、回転数を 1 800 rpm とした場合の管路内の平均流速は 11 m/s であった。X 点、Y 点での音圧の周波数分析結果を図 11(a) に示す。60 Hz およびその高次成分に相当する周波数において卓越ピークが観測される。図 11(b) は X-Y 間の音圧伝達関数を示しており、実線が本法による計算値、○印は 2 点の音圧を直接計測して求めた図 11(a) の各卓越ピーク周波数での伝達関数の値である。計算値と実測値の結果はほぼ一致しているといえる。

以上、気流を伴う配管系に対する二つの適用例を示した。気流を伴う場合、媒質が移流することにより静止媒質の場合との差異が基本的には存在するが、建設

(a) Sound pressure level at point X— and Y---

(b) Transfer function of sound pressure between point X and Y ($20 \log |P_Y/P_X|$)

Fig. 11 Measurement example of the diesel engine

機械に用られるエンジン吸気配管系のように平均流速が音速に比べて十分に小さく(本件の場合平均流速は0.03 マッハ)、また配管内で新たに発生する気流音についても脈動に起因する卓越ピークのほうが気流音よりも10 dB 以上大きいため、計算値と実測値とがほぼよく一致している。

3.4 吸音材の音響特性計測への適用 四端子定数が伝搬定数と特性インピーダンスで表現できる一様断面の配管の場合、未知数が二つとなるので供試体後部の条件を変更することなく、さらに簡便に四端子定数を決定することができる。この場合の適用例として吸音材の伝搬定数と特性インピーダンスの測定結果を示す。

図12において供試体の前後面である断面Hと断面Kにおける音圧と体積速度の関係は式(24)で表現される。

$$\begin{Bmatrix} P_H \\ U_H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma d) & i \frac{Z_c}{S} \sin(\gamma d) \\ i \frac{S}{Z_c} \sin(\gamma d) & \cos(\gamma d) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_K \\ U_K \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 γ は伝搬定数であり Z_c は特性インピーダンスを示す。また断面Kは閉であるため、 $P_K=P_3$ 、 $U_K=0$ であるから式(24)より

$$P_H = P_3 \cos(\gamma d) \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$U_H = P_3 \frac{iS}{Z_c} \sin(\gamma d) \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。 P_H 、 U_H は供試体前方2点のマイクロフォンにより計測できるので、 $\cos(\gamma d)$ および特性インピーダンスは式(6)、(7)を式(25)、(26)に代入すると式(27)および式(28)となる。式(28)の符号は Z_c の実部が正となるように選択する。

$$\cos(\gamma d) = \frac{P_H}{P_3} = \frac{1}{H_3} (H_2 X_1 - Y_1) \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$Z_c = \frac{P_3}{U_H} i S \sin(\gamma d) = \pm \frac{P_3}{P_1} \rho c \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\gamma d)}}{H_2 X_2 - Y_2}$$

Fig. 12 Measurement system of the acoustic characteristics

$$= \pm \rho c \frac{\sqrt{H_3^2 - (H_2 X_1 - Y_1)^2}}{H_2 X_2 - Y_2} \quad \dots\dots\dots (28)$$

よって伝達関数 H_2 、 H_3 を計測すれば伝搬定数と特性インピーダンスを算出することができる。この場合未知数は二つであるため、従来の二点マイクロフォン法のように後側接続管の長さを変更する必要がない。また、吸音材厚さ d とマイクロフォンまでの距離 L_x が既知であれば、吸音材厚さに応じてマイクロフォン位置を調整する必要がない。

厚さ50 mmのウレタンフォームについて本計測法で計測した結果を図13の実線で示す。ここで、図の特性インピーダンスは空気固有音響抵抗 ρc により無次元化した値を示す。○印は従来の二点マイクロフォン法で測定した結果である。また同様に、グラスウール32K厚さ50 mmの場合の測定結果を図14に示す。二つの測定例とも二点マイクロフォン法による結果と一致しており、本計測法が吸音材料の音響特性計測にも活用できることが確認できた。

4. 結 言

伝達マトリックスにおける四端子定数を3個のマイクロフォンを用いて算出する計測システムを開発し、その有効性と有用性を検討して、以下を明らかにした。

- (1) 本システムにおける精度を確保するための、

Fig. 13 Propagation constant and normalized impedance of sound absorbing material (urethane foam, $t=50$ mm)

Fig. 14 Propagation constant and normalized impedance of sound absorbing material
(Glass Wool 32 K, $t=50$ mm)

マイクロフォン間隔と後部接続管長さの適用範囲を明らかにした。

(2) エンジン吸気配管系伝達部の一つであるエアクリーナ部など事前に理論的な表現が困難な部分に対しても本システムにより伝達マトリックスの四端子定数を簡便で高精度に計測できる。

(3) 本システムを用いて計測した四端子定数をルーツプロアとディーゼルエンジンの吸気系に適用し、気流速度が遅い場合 ($M=0.03$) には配管系の音響特性を実用性を有する精度で予測できる。

(4) 本システムにより吸音材の特性インピーダンス

と伝搬定数を、背後空気層を変更することなく簡便に計測できる。

文 献

- (1) 倉田効市朗・三宅和幸・阿部淳平, 吸排気系の減音量の予測, 自動車技術会論文集, 24-1, (1993), 98-103.
- (2) 西村正治・深津智・泉山和雄・長谷川素由, 伝達マトリックス法に基づく実験的音響管路解析の研究(第1報), 機論, 54-504, C (1988), 1740-1746.
- (3) 小嶋英一・松原昇・須藤繁, 油圧ポンプに起因する油圧システム内の圧力発生と伝ば, 機論, 61-583, B (1995), 1005-1013.
- (4) Sacks, M. P. and Hackney, S., Performance of Acoustic Components for Engine Induction Systems, SAE 880081, (1988).
- (5) Lung, T. Y. and Doige, A. G., A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow, J. Acoust. Soc. Am., 73-3 (1983), 867-876.
- (6) To, C. W. S. and Doige, A. G., A Transient Testing Technique for the Determination of Matrix Parameters of Acoustic Systems, I : Theory and Principles, J. Sound Vib., 62-2 (1978), 207-222.
- (7) To, C. W. S. and Doige, A. G., A Transient Testing Technique for the Determination of Matrix Parameters of Acoustic Systems, II : Experimental Procedure and Results, J. Sound Vib., 62-2 (1978), 223-233.
- (8) 岩瀬昭雄・伊積康彦, 音響管を用いた新しい音響伝搬定数の計測法, 日本音響学会誌, 52-6 (1996), 411-419.
- (9) 岩瀬昭雄・斉藤元雄・金沢純一, 実用化をめざした伝搬定数計測装置の試作とその応用, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA 95-19, (1995), 1-8.
- (10) 河西康仁・山本貴靖・斎尾雅宏・中井孝芳・鈴木久喜, 3マイクロフォンを用いた吸音材の音響特性の測定, 音響学会講演論文集, (1996-3), 807-808.
- (11) Utsuno, H., Tanaka, T. and Fujikawa, T., Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, J. Acoust. Soc. Am., 86-2 (1989), 637-643.
- (12) 福田基一・奥田襄介, 騒音対策と消音設計, (1973), 153-155, 195-196, 共立出版.