

途切れたダクト系で発生する流力自励音の散乱行列法による実験的同定

Experimental Identification of the Aerodynamic Self-Excited Sound Generating in the Unconnected Duct System Using the Scattering Matrix Method

○学 稲毛 将隆 (鳥取大), 正 中井 唱, 正 西村 正治, 正 後藤 知伸

Masataka INAGE, Tonau NAKAI, Masaharu NISHIMURA, Tomonobu GOTO

Tottori University, 4-101 Koyama-minami, Tottori, Tottori 680-8552 Japan

Key Words: Duct system, Scattering matrix, Aerodynamic Self-excited sound, Experimental identification

1. 緒言

高速移動体の走行時の空力騒音を評価し低減対策を行う目的に使用される音響風洞では測定部を開放型としたものを用いることが多い。しかし、測定部を開放型にすることにより、噴流の不安定性やコレクタ前縁部への衝突に伴うエッジトーンとダクト系の共鳴音が連成した流力自励音など、本来計測すべき空力騒音以外の音が発生する場合がある。これらの事象は風洞風路の特性に起因することから、風洞の音響特性を予測し、適切な対策を施すことができれば設計段階にて抑制を図ることが可能となる。

風洞の音響特性を予測するための解析手法として散乱行列法が有用である。一次元要素の繋ぎ合わせで管路の音響特性が解析可能であり、種々の管路要素に対応する行列が知られている⁽¹⁾⁽²⁾。散乱行列法では、管内に既知の音源がある場合の解析は可能⁽³⁾であるが、流力自励音のように管路の幾何学形状や流速などに依存して発生する音の解析手法は確立されていない。

本研究では、途切れたダクト系で発生する流力自励音の解析手法の確立を目指す。自励音の解析手法を確立するには、音源項を同定する必要がある。ここでは、ダクト内で伝播する左右進行からダクト開口部の散乱行列を実験的に導出し、音源に相当する左右進行波の同定を行った。

2. 散乱行列法

散乱行列法の要素の概略図を図1に示す。管路要素の断面における右向き進行波を f 、左向き進行波を g と定義する。要素と両断面における左右進行波の関係式は、管路要素ごとの番号 i を添えた 2×2 の構成要素を持つ散乱行列 S^i を用いて

$$\begin{bmatrix} f_{i+1} \\ g_i \end{bmatrix} = S^i \begin{bmatrix} f_i \\ g_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_s \\ g_s \end{bmatrix}, \quad S^i = \begin{bmatrix} S_{11}^i & S_{12}^i \\ S_{21}^i & S_{22}^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表すことができる。構成要素の中に音源がある場合は、音源を表す項 f_s, g_s を付加する。本研究では、音源項は流力自励音に相当する。

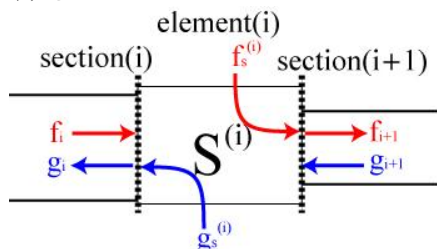


Fig. 1 Schematic of scattering matrix method.

2-1. 左右進行波 f, g の計測理論

本研究では、2本のマイク a, b 間で計測した伝達関数 H から次式を用いて任意の断面における管路内の左右進行波を測定する。

$$\begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho c (\exp(iks) - \exp(-iks))} \begin{bmatrix} \exp(iks) & -1 \\ -\exp(-iks) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ H \end{bmatrix} P_a \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 s はマイク間距離、 $H = p_b/p_a$ 、 p_a, p_b は音圧である。

2-2. 開口部の散乱行列

開口部要素は開口端での反射率 r 、粒子速度の減衰量 Q で表せる三つの要素⁽⁴⁾で構成されており、次式で定義する。

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q(1+r) & r \\ r & Q(1+r) \end{pmatrix} \quad (3)$$

3. 実験装置と実験方法

図2は実験装置の全体図と対応する散乱行列の要素を示している。距離だけ離れたノズルとコレクタの前縁にはテーパ加工をしてあり、それぞれマイクが2つ取り付けられている。ノズルとコレクタには同寸法の塩ビ管を使用した。内径、外径、長さはそれぞれ40mm, 50mm, 400mmとする。実験は実験1と実験2の二種類行なった。実験1は開口部の散乱行列を求めるために、実験2では音源に相当する成分を同定するために行う。

3-1. 実験1

実験1では実験2で使用する送風機と90°ベンドを取り外し、ノズル側とコレクタ側に新たにスピーカーA, Bを付ける。入力電圧を一定としてスピーカーからホワイトノイズを流す。この時、スピーカー入力 e と各マイクで計測した音圧 p_1, p_2, p_3, p_4 との伝達関数 $H = p/e$ を、FFT分析器を用いて求める。

3-2. 実験2

送風機から送り込まれた気流は、90°ベンドを通してノズルから噴出する。ノズル出口端での流速 U は $21\text{m/s} \sim 23\text{m/s}$ である。噴流の自励振動音とコレクタの共鳴音による強力な音場が形成される。この時、マイク1で計測した音圧 p_1 を入力とし、残りのマイクで計測した音圧 p_2, p_3, p_4 との伝達関数 H を、FFT分析器を用いて求める。ここで、実験2ではスピーカーA, Bは取り付けない。

4. 実験結果及び考察

4-1. 開口部の散乱行列

開口部の散乱行列を3通りの方法で導出した。各導出方法を以下に示す。

- (I) 式(3)より $S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$ を満足しなくてはならない。そこで、式(1)を $S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$ の形に書き換えた式(4)で開口部の散乱行列を導出する。

$$\begin{bmatrix} f_{i+1}^A \\ g_i^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{21} & S_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i^A \\ g_{i+1}^A \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、添え字 A はスピーカーAを入力とした時の各マイクとの伝達関数から測定した左右進行波を表す。

- (II) スピーカーBを入力とした時の各マイクとの伝達関数から測定した左右進行波を使って、開口部散乱行列を導出。

$$\begin{bmatrix} f_{i+1}^B \\ g_i^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{21} & S_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i^B \\ g_{i+1}^B \end{bmatrix} \quad (5)$$

- (III) 式(4), 式(5)をまとめ、 $S^{(i)}$ を $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ で表した次式

$$\begin{bmatrix} f_{i+1}^A & f_{i+1}^B \\ g_i^A & g_i^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i^A & f_i^B \\ g_{i+1}^A & g_{i+1}^B \end{bmatrix} \quad (6)$$

を使って導出する。

式(4)~(6)中の f と g は、実験1より得た伝達関数を用いて式(2)から求める。

$L=11\text{mm}$ での3通りの方法で求めた開口部の散乱行列の要素 S_{11} の gain の大きさを図4に示す。Gainの大きさはほとんど重なっている。これは(III)で導出した開口部の散乱行列が $S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$ の条件を満足していることを示している。位相も重なる結果となった。 $L=12\text{mm}, 15\text{mm}, 22\text{mm}$ でも同様の結果になった。

4-2. 音源項 (f_s, g_s) の同定結果

図2の $S^{(1)}, S^{(5)}$ は直管の要素であり、理論値を使う。 $S^{(2)}, S^{(4)}$ は開口部の散乱行列要素であり、4-1(III)で求めたものを使う。 $S^{(3)}$ は長さ0であり、音源に相当する成分を付加する。要素 $S^{(3)}$ と両断面の左右進行波の関係は、式(1)より次式で示される。

$$\begin{bmatrix} f_4 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ g_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_s \\ g_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $(f_3, g_3), (f_4, g_4)$ は実験2より求めた伝達関数を用いて式(2)から求めた。式(7)から求めた (f_s, g_s) について以下に示す。図4は $L=11\text{mm}$ および 12mm での f_s の振幅の大きさを示している。791Hz 付近で卓越したピークが発生しているのがわかる。これは自励音によるものである。 $L=15\text{mm}, 22\text{mm}$ の時は、それぞれ720Hz, 801Hz 付近で同様のピークが見られた。以下、 f_s, g_s は $L=11\text{mm}$ および 12mm では $f=791\text{Hz}$, $L=15\text{mm}$ の時は720Hz, $L=22\text{mm}$ の時は802Hzの結果を示す。図5は f_s と g_s の振幅の比と位相を示している。開口部間長さ L に関係なく、振幅比は2.0, 位相差は0.1rad 以下となる結果となった。

5. 結 言

ダクト内で伝播する左右進行からダクト開口部の散乱行列を実験的に導出し、音源に相当する左右進行波を同定した。

(1) $S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$ の条件を満足する開口部の散乱行列を実験的に導出できた。

(2) 音源項を同定した結果、 f_s と g_s の振幅比は2.0, 位相差0.1rad 以下となる(音源は右向きに指向性の強いモノポールの特長を持つ)。

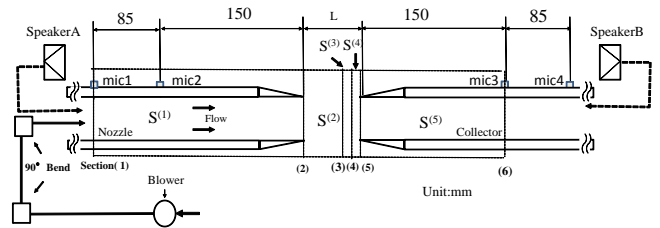


Fig. 2 Experimental setup Elements($S^{(1)} \sim S^{(5)}$) and section((1)~(6)).

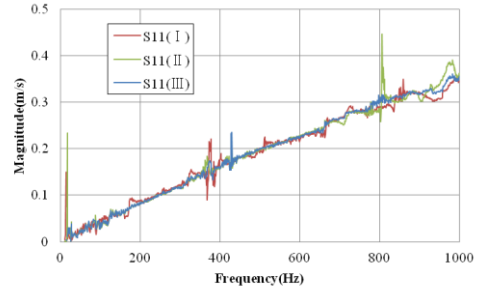


Fig. 3 Magnitude of S_{11} ($L=11\text{mm}$).

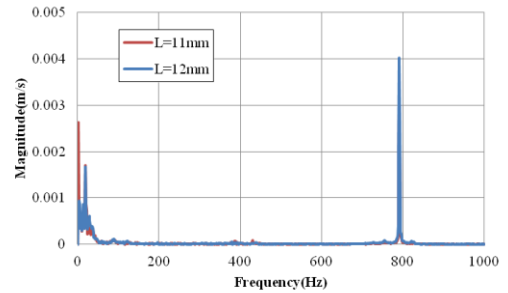


Fig. 4 Magnitude of f_s ($L=11\text{mm}, 12\text{mm}$).

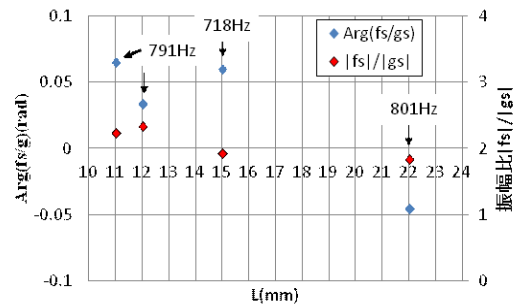


Fig. 5 Spectral ratios and Phase difference of f_s and g_s ($L=11\text{mm}, 12\text{mm}, 15\text{mm}, 22\text{mm}$).

文献

- (1) 日本騒音制御工学編, “騒音制御工学ハンドブック基礎編・応用編”, 技報堂出版, 基礎編 pp. 118-126(2001).
- (2) 寒川英知ら, “スキヤタリングマトリックス法を用いた管路の音響解析に関する基礎研究”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, p.6 (2007).
- (3) 中村新ら, “管路内を伝播する流力自励音のスキヤタリングマトリックス法を用いた音響解析”, 日本機械学会中四国支部総会・講演会講演論文集(2011)
- (4) 松下悠平ら, “向かい合う開口部の間を伝播する音波のスキヤタリングマトリックス”, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集 [2012.9.9-12, 金沢]