

2-2-03 気流発生音源データとしての表面変動圧測定について*

—流量調整ダンパの気流発生音—

◎服部 康章, ☆寺尾 道仁, 関根 秀久 (神奈川大・工)

1. はじめに

ダクト系等における送風機, 流量調整ダンパ, 吹出口など気流発生音源の音響特性表現は, 従来, 音響パワーレベルによりなされてきた。しかし, 音響パワーは音源の励振強度 (表面変動圧や表面変動速度など) が一定であっても音源からみた放射インピーダンス, すなわち, 音源に接続される音場に依存する。また, 音響パワーによる予測手法はモード密度が小さい平面波上限周波数からその数倍の周波数範囲 (ダクト系では数百 Hz から数 kHz の範囲) において, その適用にたいする理論的根拠がない。この周波数領域は通常可聴域として重要な領域であり, 音響パワー予測手法に代わる抜本的合理的な予測手法が必要である。そこで, 近年の計測・演算技術を適用して直接, 音源領域の変動量 (変動速度, 変動圧など) を観測し, それを境界条件として音場解析により受音点音圧を求める本格的な予測法の実現を目指す。本研究は, 通気ダクト系音源として送風機に次いで重要でありながら音響面のデータが全く欠落している流量調整ダンパを取り上げてその表面変動圧の測定を試み, 表面変動圧による音源データ表現 (音源特性ホログラフィ) の音場予測における基本的な有効性を調べる。

2. 実験概要

2.1 実験装置 写真1に遠距離場音圧とダンパ翼表面変動圧の多点同時測定状況を示す。試料は上流側の圧力室と下流側の無響室の間仕切り壁にあけた開口部に幅 500mm, 高さ 300mm, 奥行き 400mm のダクトを設け, 圧力室側からの低騒音吹出気流中にて行う。圧力室側吸込口はベルマウス, 無響室側のダクト壁終端はナイフエッジ 30° の

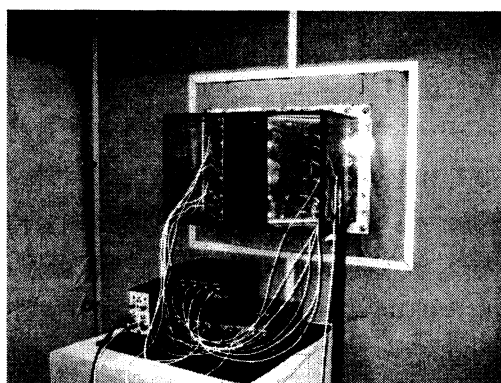


写真1 ダンパ翼表面圧及び遠距離場音圧の同時測定

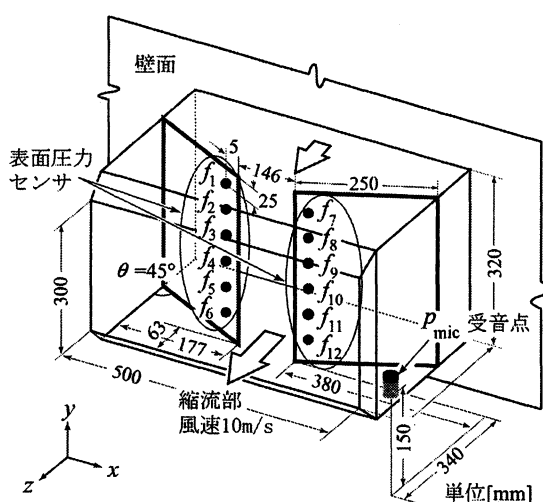


図1 流量調節ダンパ, 翼表面圧測定点及び遠距離場受音点

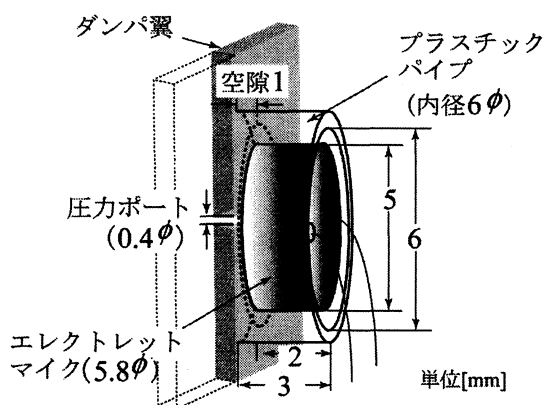


図2 表面圧力センサ

* Sound field prediction by measurement of governing surface pressure fluctuation of flow induced sound sources.
By Yasufumi HATTORI, Michihito TERAOKA, Takanori Hidehisa SEKINE (Kanagawa Univ.)

面取りを施している。

2.2 ダンパと表面圧力センサ 図1にダクト、流量調節ダンパとその表面圧センサ及び遠距離場受音点の配置を示す。上記ダクト内に流量調節ダンパ対向翼の1セクションを想定し、幅 250mm、高さ 300mm、板厚 2mm のアルミ平板を左右対称に配置した。この場合、支配的音源域は流速が卓越するダンパ翼後縁の縮流部近傍と考えられる。そこでそれを代表する変動圧測定点としてダンパ翼後縁から 5mm に縦方向 50mm 間隔左右各 6 点を選んだ。表面圧力センサの圧力電圧変換器としては 5.8mm エレクトレットマイクロホンを用いた。これをダンパ翼背面に取り付け、高速側表面から検出ポート 0.4mm ϕ を介して膜面に導いている(図2)。遠距離場受音点音圧測定は 1/2"コンデンサマイクロホンを用いた。0.4mm ϕ 検出ポートを含む表面圧力センサは、1/2"マイクロホンを基準として感度補正を行っている。

3. 実験結果

ダンパの開度 θ は 45° 、 60° 、 70° 、また、縮流部風速は、10m/s、15m/s、20m/s の組み合わせで実験を行った。ここではダンパの開度 45° の場合を示す。

図3に翼表面気流変動圧 f_2 とその上下方向の隣接点のそれ f_1 及び対向翼側隣接点のそれ f_8 を示す。隣接対向翼間での逆位相関係は見られない。

図4にダンパ表面気流変動圧について隣接点のコヒーレンスを示す。変動圧のコヒーレンスは 50mm の距離で既に大きく低下している。この測定点間隔は、次項で述べる境界面の数値モデル化において面素寸法 50mm の一定要素で扱うことを前提としてを設定したが、一定要素が成立するためには今回の面素寸法 50mm は過度に粗いことになる。

図5にダンパ翼表面変動圧のスペクトルを例示する。ダンパ翼後縁付近の表面変動圧の絶対値の観測点による違いは約 10dB 程度以下であるが、 y 方向について上下ダクト壁面付近とそれから離れたスリット中央部とは必ずしも同一扱いできない。

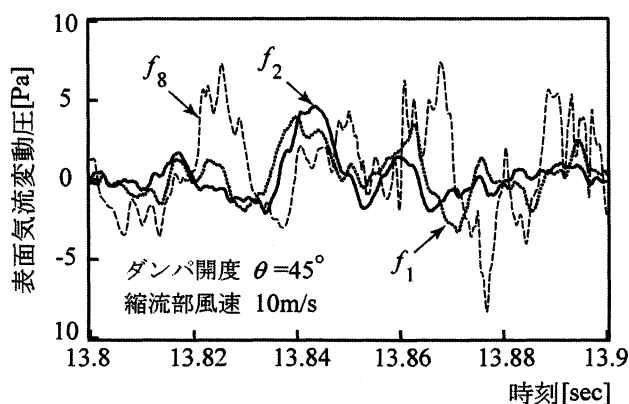


図3 ダンパ翼表面気流変動圧の比較

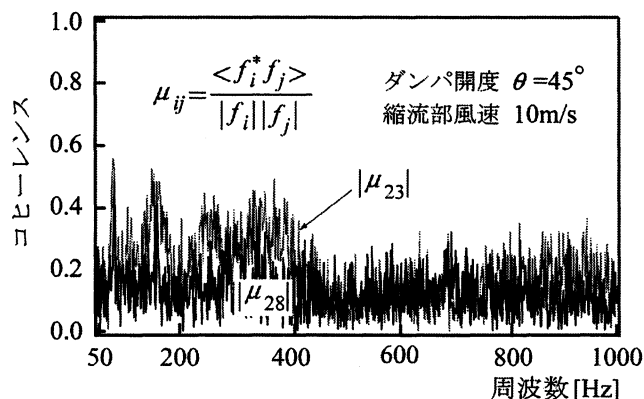
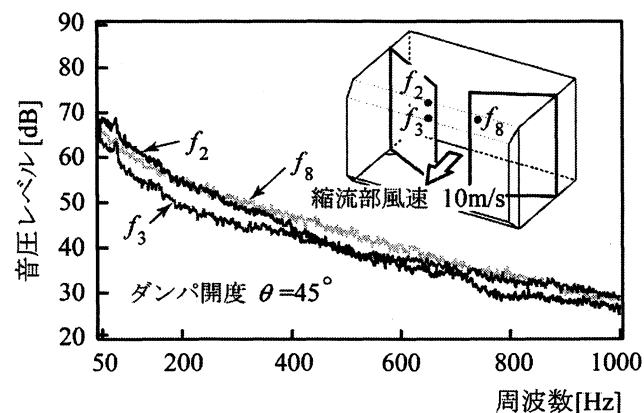
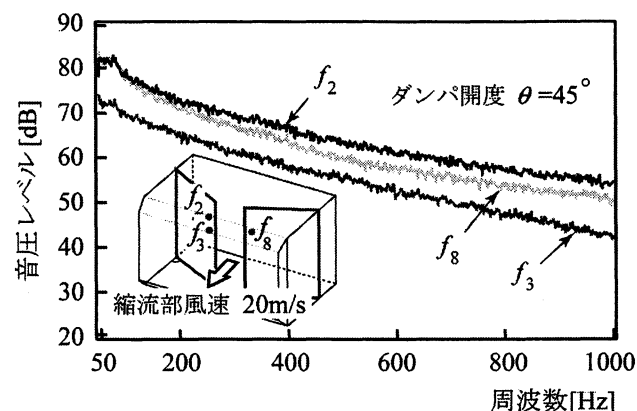


図4 翼表面圧の空間的コヒーレンス



(a) 縮流部風速 10m/s



(b) 縮流部風速 20m/s

図5 翼表面圧の測定値

4. ダンパ翼表面変動圧による受音点音圧の予測

4.1 表面変動圧と受音点音圧実効値

音源の支配的表面を m 個の音源面素に分割し、その第 i 音源面素の複素音圧振幅を f_i とすれば、受音点音圧 p_{rev} は、

$$p_{rev} = \sum_{i=1}^m \phi_i f_i \quad (1)$$

のように表わされる。アンサンブル平均値を $\langle * \rangle$ により、また、絶対値のアンサンブル平均値を $|*|$ により表わすものとすれば、受音点音圧のパワースペクトル（音圧スペクトル実効値 $|p_{rev}|/\sqrt{2}$ の二乗値）は

$$\begin{aligned} |p_{rev}|^2/2 &= \left\langle \sum_{i=1}^m \phi_i^* f_i^* \sum_{j=1}^m \phi_j f_j \right\rangle / 2 \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \langle \phi_i^* \phi_j f_i^* f_j \rangle / 2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i^* \phi_j S_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i^* \phi_j \mu_{ij} (|f_i|/\sqrt{2}) (|f_j|/\sqrt{2}) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、

$$S_{ij} = \langle f_i^* f_j \rangle / 2 \quad (3)$$

は音源 i と j の複素音圧振幅のクロススペクトル、また、

$$S_{ii} = |f_i|^2/2 = (|f_i|/\sqrt{2})^2 \quad (4)$$

は音源 i の複素音圧振幅のパワースペクトル（音圧実効値 $|f_i|/\sqrt{2}$ の二乗値）である。また、 μ_{ij} は音源音圧間のコヒーレンスで

$$\mu_{ij} = \frac{\langle f_i^* f_j \rangle}{|f_i| |f_j|} = \frac{\langle f_i^* f_j / 2 \rangle}{|f_i| |f_j| / 2} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii}} \sqrt{S_{jj}}} \quad (5)$$

により定義している。本実験におけるアンサンブル平均は 64 回である。

4.2 面素変動圧と受音点音圧の伝達関数

受音点音圧の予測は、各気流変動圧測定点別に単位の変動圧を与えてこれと受音点音圧との伝達関数 ϕ_i , $i=1,2,\dots,12$ を 3 次元境界要素法 (3D-BEM) 解析により求め、それとダンパ翼表面気流変動圧測定値、すなわち、気流変動圧の各測定点間クロススペクトルとから式 (2) により受音点音圧絶対値を得る[1]。

図 6 にここでの BEM 解析モデルを示す。要素寸法は 50mm とした。ダクト上流部、圧力室側の吸込み口はベルマウスとしている。ダクトが貫通する壁面は完全反射条件として解析した。図 7 に各気流変動圧測定点別に単位の変動圧を与えた時の受音点音圧を求め、その比すなわち音源・受音点間伝達関数 ϕ_i を求めた結果を示す。参考のため吸込み側ベルマウス（ベルマウス有）を直管に置き換えた場合（ベルマウス無）を比較した。ベルマウス無とすると約 250Hz 以上の周波数領域で凹凸が激しくなる。

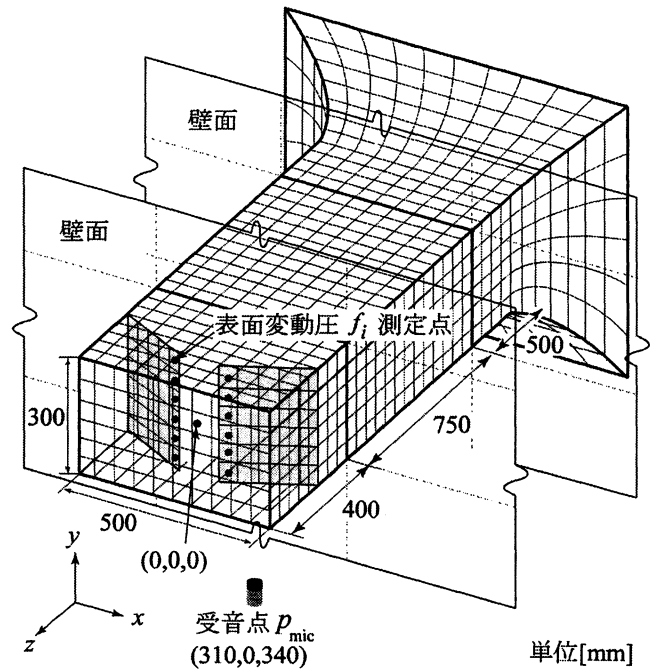


図 6 BEM 解析モデル

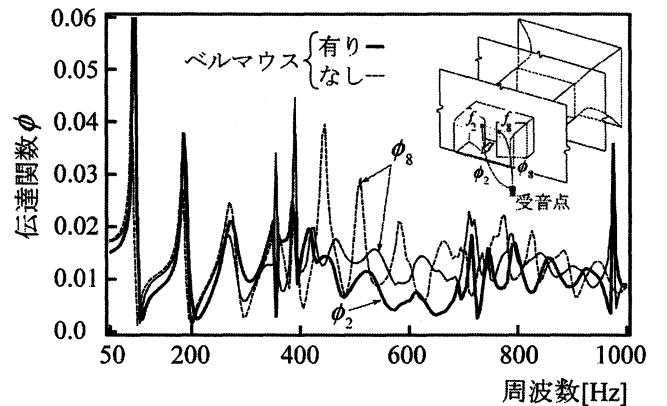


図 7 音源・受音点間の伝達関数 ϕ

図 8 に風速 10m/s 及び 20m/s における観測点音圧の測定値と予測値を比較して示す。音源部表面変動圧としてダンパ翼表面高風速領域の僅かな離散点で代表させているにもかかわらず、低周波数域の凹凸部分及び風速 10m/s 時の約 800Hz (暗騒音) を除けば数値予測値は測定値によく対応している。低周波数域で音源・受音点間伝達関数の凹凸特性の特徴の現れ方が予測値と測定値で異なる理由についてはさらに検討する必要がある。表面圧力測定点の領域と密度を増加し微細な音源表面要素を用いれば受音点音圧の予測精度は向上するものと期待される。

図 9 にダンパ周辺の音圧分布を示す。吹出し側の壁面は、実際には吸音面であるが数値解析では簡単のため完全反射条件とした。ここで選んだ受音点の場合、音圧はダクトからの直接音が支配的であり、吹出し側の壁面の反射条件の影響は小さいことが確認できる。また、ダクト内音場より、図 8 における音源・受音点間伝達関数の凹凸性状には、平面波上限周波数の 340Hz 以下ではダクト軸方向の定在波モード、それ以上ではそれに加えてダクト断面方向モードが深く関係することがわかる。

5. まとめ

従来の音響パワーレベルに代わる気流発生音源の音響特性データとして音源領域表面変動圧を採用する手法の有効性について、流量調整ダンパの場合を取上げ実験的に検討した。まず、表面変動圧測定に必要なセンサを開発し主要音源部とみられるダンパ翼高流速域の表面変動圧を測定した。次に、これを境界条件とする音場解析を行い、それによる遠距離音場受音点音圧の予測値が測定値と基本的によく対応することを確認した。今後の課題として、より広域かつ高密度のダンパ翼表面変動圧について多点同時測定の実施が挙げられる。

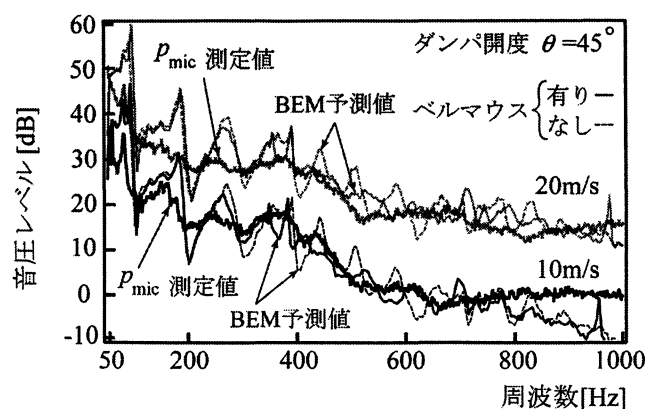
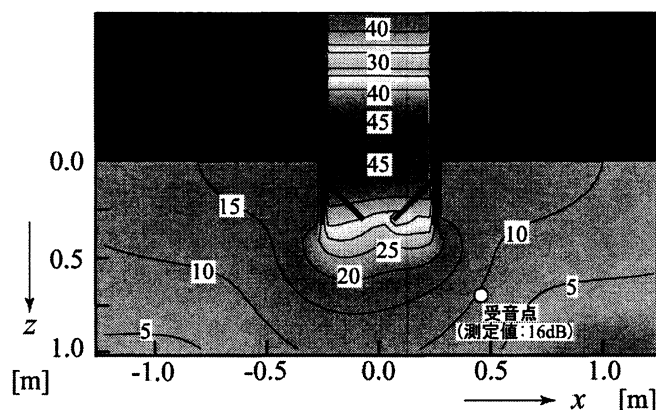
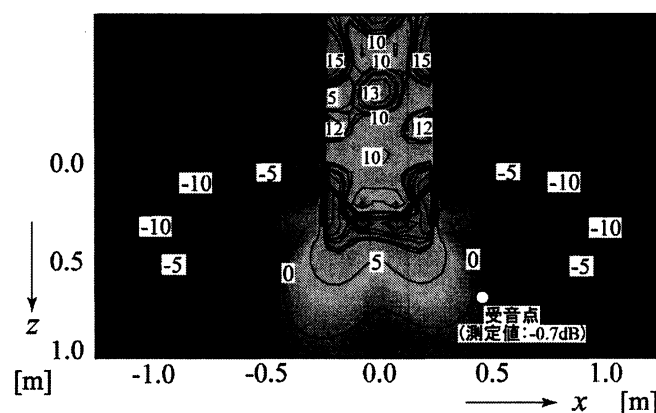


図 8 受音点音圧の測定値と予測値



(a) 200Hz



(b) 700Hz

図 9 ダンパ周辺の音圧分布[dB]

参考文献

- [1] 寺尾ほか, 日本音響学会講論集, p579, 平成 4 年 3 月.