

乱流域内音響測定における間接的クロススペクトル観測
による気流雑音除去法

マイクロホン, 気流雑音除去, クロススペクトル

○ 正会員 寺尾道仁*

同 関根秀久**

1. はじめに 送風機その他気流を伴う音源の音響出力のダクト内測定その他の気流中のマイクロホンによる遠距離伝搬音計測においては, そのダイヤフラムに作用する乱流圧力 (Evanescent Pressure) またはセルフノイズ (以下ではこれをローカル変動圧と呼ぶ) を除去する必要がある. その除去方法として, 気流方向の平均音圧検出法としてチュービュラマイクロホンアダプタ[1], また, 2点クロススペクトル測定による音響インテンシティ検出法としてこれに類似するアダプタ[2]が提案されている. ここではそれらにたいし, 乱流領域内の遠距離伝搬音圧およびインテンシティのみならず近接2点の遠距離伝搬音圧間の伝達関数の検出についても, このような特殊なアダプタを不要とする手法を示し, その原理的妥当性を調べる.

2. ローカル変動圧の除去手法

2点*i*と*j*の圧力のクロススペクトル S_{ij} は,

$$S_{ij} = \langle P_i \cdot P_j \rangle / 2 \quad (1)$$

ただし, 上添え字(*)は共役複素数, 記号<>はアンサンブル平均を意味する. 第*k*観測点圧力を P_k , 遠距離伝搬音圧を A_k , ローカル変動圧を T_k とすれば,

$$P_k = A_k + T_k \quad (2)$$

したがって,

$$S_{ij} = \langle A_i \cdot A_j + T_i \cdot A_j + A_i \cdot T_j + T_i \cdot T_j \rangle / 2 \\ = A_{ij} + T_{ij} \quad (3)$$

ただし, $A_{ij} = \langle A_i \cdot A_j \rangle / 2$: 遠距離伝搬音圧のクロススペクトル, $T_{ij} = \langle T_i \cdot T_j \rangle / 2$: ローカル変動圧のクロススペクトルである.

式(3)で, 2点*i*と*j*との距離がある程度離れば, $T_{ij} \ll A_{ij}$ となり T_{ij} が除去された A_{ij} が観測される. しかし, クロススペクトルによるインテンシティ測定などでは, 2点(これを点1および点2とする)を近接して設定する必要がある, 直接この性質を使うことはできない. そこでこれらから十分遠方で, かつそれぞれも互いに十分距離が離れた第3, 第4の観測

点を設け, 式(4)のような間接的手法をとる. すなわち,

$$A_{12} = S_{12}' = S_{13} S_{42} / S_{43} \quad (4)$$

式(4)の右辺は互いに十分離れローカル変動圧が除去されたクロススペクトル観測値からなり, S_{12}' は近接2点の遠距離伝搬音のクロススペクトル A_{12} に近似するものと期待される. 式(4)の代わりにその添え字3, 4を入れ替えたもの, また, 式(4)とこれの調和平均を用いてもよい. なお, ローカル変動圧が遠距離伝搬音圧に比べて十分小さい場所が存在するならば, 第3および第4観測点に代えてその1点のみを用いれば済む.

一方, 第1(または第2)観測点の遠距離伝搬音のパワースペクトルを求める場合には, 単に添え字2(または1)を1(または2)に置き換えればよい. また, 近接2点の遠距離伝搬音圧間の伝達関数 A_{12}^H の検出は, 第3または第4の観測点のうちいずれか1つ, 例えば第3観測点にたいするそれぞれの伝達関数 H_{31} と H_{32} を測定すれば, 式(5)のようにしてローカル変動圧の影響が除去される.

$$A_{12}^H = H_{12}' = H_{32} / H_{31} \quad (5)$$

3. 検証実験

本手法の妥当性をみるためにFig. 1に示すような比較的低騒音の気流発生装置による通気ダクトを用い, 第1, 第2観測点位置のダクト断面において平均流速10 m/sの場合に限定して実験を行った. したがって, ローカル変動圧 T_{11} (ラウドスピーカoff状態での S_{11})は一定である. 各観測点圧力間のクロススペクトルは, 1/2" コンデンサマイクロホン2系統を順次用いて測定し, それぞれの系特性は後処理時に補正した. マイクロホンはいずれもそのダイヤフラム面をダクト壁面に一致するように設定し, アンサンブル平均回数は512回で行った.

Fig. 2は, ラウドスピーカon状態で有風時の S_{12}' および直接測定値 S_{12} と無風時の A_{12} との比 $|S_{11}' / A_{11}|$ および $|S_{11} / A_{11}|$ について, 第1観測点に

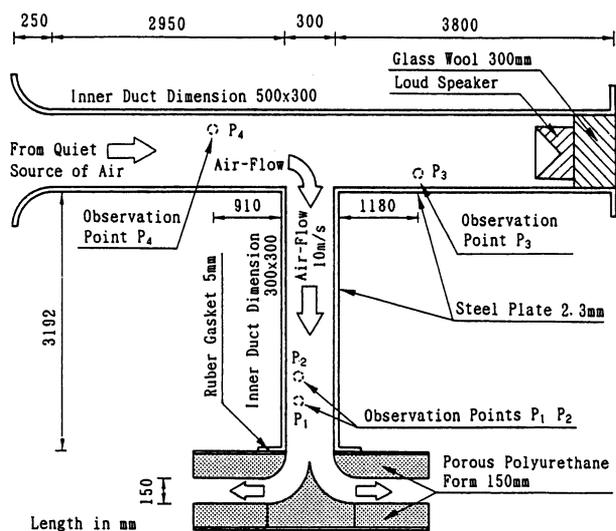


Fig. 1 Experimental Arrangement

おけるローカル変動圧 T_{11} にたいするラウドスピーカによる遠距離伝搬音圧 A_{11} （気流off状態での S_{11} ）のレベル $10 \log |A_{11}/T_{11}|$ がそれぞれ300Hz付近でおよそ(a)-10dB, (b)-20dB, および(c)-30dBの場合を測定結果例として示す。いずれも50Hz定帯域幅の移動平均によりで平滑化したもので、その位相（図省略）はいずれもほぼ零（ $\pm 0.5 \text{deg}$ 程度以下）である。

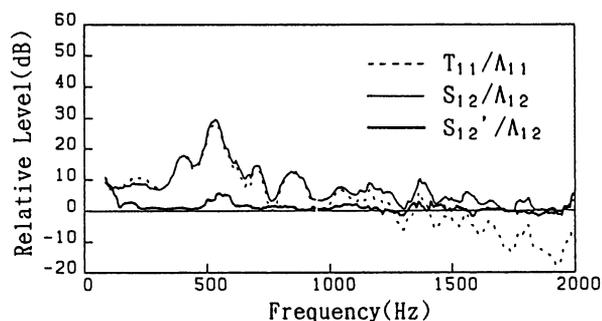
有風時と無風時とではラウドスピーカによる遠距離伝搬音 A_{12} 自体多少変化するが、これを無視すれば、 $S_{12}'/A_{12} = 1$ のとき、ローカル変動圧が除去された遠距離伝搬音のクロススペクトル検出が達成される。Fig. 2において、 $A_{11}/T_{11} > -10 \text{dB}$ の範囲、すなわちローカル変動圧に比べて遠距離伝搬音圧の方が10dBほど小さい場合までは、 $S_{12}'/A_{12} \sim 1$ 、すなわち、ローカル変動圧の影響が除去されたラウドスピーカによる遠距離伝搬音のみのクロススペクトル A_{12} の検出が可能であること、すなわち、本手法の原理面についてはその有効性を確認できたものと考えられる。

今回の観測点1付近は、比較的 T_{11} が小さい一方、相対的に乱流強度の大きい分岐付近で発生し、ダクト板の振動を伴ってbuild upした気流発生音（遠距離伝搬音）に支配され、そのクロススペクトルがラウドスピーカによる遠距離伝搬音 A_{12} の他に S_{12}' に重畳されたとみられる $|S_{12}'/A_{12}| \neq 1$ の要因があり、今後、より高度の低騒音気流発生装置や無反射端末装置を準備したうえで、乱流強度の大きい観測点において、本

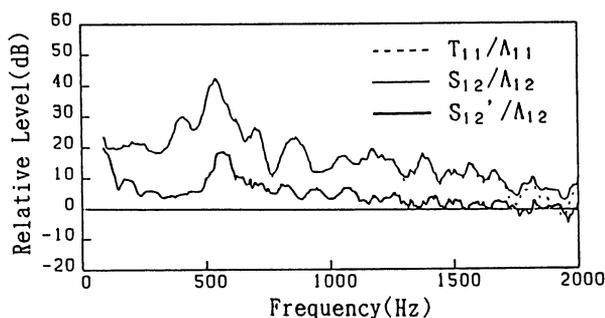
手法で可能な A_{11}/T_{11} の最小限界やアンサンブル平均回数との関係等について検討を加えたい。

4. まとめ

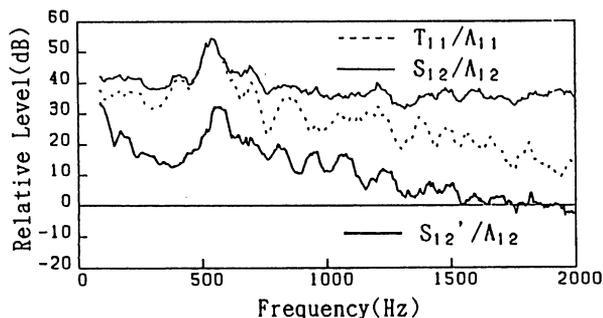
気流中近接2点の遠距離伝搬音のクロススペクトル測定について、遠距離音場点を介在させた間接的クロススペクトル観測による乱流圧力変動の除去手法を示し、その原理面の妥当性を確認した。



a) $A_{11}/T_{11} = -10 \text{dB}$ around 300Hz



b) $A_{11}/T_{11} = -20 \text{dB}$ around 300Hz



c) $A_{11}/T_{11} = -30 \text{dB}$ around 300Hz

Fig. 2 Experimental Test Results for S_{12}'/A_{12}

文献

- [1] ASHRAE STANDARD 68-78; In-Duct Sound Power Measurement Procedure for Fans.
- [2] F. J. Fahy; Measurement of Sound Intensity in Low Speed Turbulent Airflow, Proc. 2nd Symposium on Acoustic Intensity.