

パルス音源を用いたダクト開口端反射減衰の3次元音響解析

－断面形状のアスペクト比の違いによる比較検討－

日大生産工(院) ○矢作知也 日大生産工 塩川博義

日大生産工 豊谷純

1 はじめに

建物の空調ダクト内において、送風機からの発生源および送風によってダクト内で発生する風切音は、騒音となって室内へ放射される。この騒音の制御方法として、消音器による減音と音響現象による自然減音がある。自然減音はダクト内伝搬による距離減衰とダクト開口端反射減衰に分けられる。後者のダクト開口端反射減衰は、ダクト内を伝播してきた騒音の低周波成分が開口端においてダクト内部へ反射し、放射される音が減音する現象である。

空調ダクト系の音響設計で用いるダクト開口端反射減衰値は ASHRAE（米国暖房冷凍空調学会）¹⁾によれば、円形及び矩形断面ダクトにおいて $D = \sqrt{4A/\pi}$ よりダクト断面積 A から求めるダクトの有効直径 D と、フランジの有無によって決定される。よってダクトの断面積が等しければダクト開口端反射減衰値は等しくなる。ただしダクトのアスペクト比によるダクト開口端反射減衰値に対する影響があるか明らかにされていない。

このダクト開口端反射減衰の実験方法の検討を 2011 年から佐藤らが行っている。この実験では音源にパルス音を用いて、ダクト内部及び外部に設置したマイクロフォンから求めており、佐藤による実験²⁾では円形断面 200、400、600mmφのダクトと一辺 200、400、600mm の正方形断面ダクトにおいてダクト開口端反射減衰値が 1～2dB の誤差で ASHRAE の値と近似した結果が得られている。

またこのダクト開口端反射減衰値を理論計算したものが 1947 年に Levine, Schwinger³⁾らにより一次元の数値計算によって求められて

いる。また、ダクト開口端反射減衰の解析手法として、首里、塩川、豊谷ら⁴⁾による差分法を用いた二次元音響解析が行われている。しかし、アスペクト比の影響を明らかにする為には、矩形断面ダクトの解析を行える三次元空間のモデリングが必要となる。

本研究では、円形及び矩形断面のダクトに対して差分法を用いた三次元音響解析を行なう。これによって同断面積における断面形状のアスペクト比の違いによる開口端反射減衰値を三次元計算に基づいて明らかにしたので報告する。

2 解析手法

2.1 基本方程式

円形及び矩形断面ダクトは共に、三次元モデルを採用する。基礎方程式は、連続の式と運動量保存の法則から得られる波動方程式を適用し、また差分法を時空間領域に適用して離散化を行う。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ただし、

p : 音圧[N/m²]

c : 空気中の音速[m/s]

2.2 初期条件

円形及び矩形断面ダクトのバッフル有り、無しのそれぞれの解析領域を Figs. 1,2,3,4 に示す。矩形断面ダクトにおいては、メッシュ幅 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ を各 0.01[m]、時間間隔 Δt を 5.84×10^{-6} [s]とする。円形断面ダクトにおいては、ダクト断面が円形であることから、モデリングを円筒座標系で行い、メッシュ幅 $\Delta r, \Delta y$ を

Three Dimensional Acoustic Analysis of End Reflection Loss of Duct by Pulse Sound Source
－ Comparison by the Difference in Aspect Ratio of the Cross Section －

Kazuya YAHAGI, Hiroyoshi SHIOKAWA and Jun TOYOTANI

各 0.01[m]、角度のメッシュ幅 $\Delta\phi$ を約 $1.26 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ 、 Δt を $5.84 \times 10^{-6}[\text{s}]$ とする。

音源はダクト最奥において中心周波数 1000Hz のガウシヤンパルス面音源として配置する。音圧値の観測はダクト内の音源位置の点を観測面として行う。バッフルは、ダクト開口端と同じ位置に配置する。

解析を行う矩形断面ダクトの種類を Table 1 に示す。ダクトのサイズは、実験値と比較する為、またアスペクト比の異なる矩形断面ダクトを比較するにあたり、ダクト断面の短辺を 10 分割する為に、円形断面 400mm ϕ のダクトと正方形断面 400mm $\times$ 400mm のダクトを基準としてモデリングを行う。また円形断面ダクトと正方形断面ダクトの音響解析値を比較する為に円形断面ダクトの断面積約 $1.26 \times 10^{-1}\text{m}^2$ とほぼ等しい高さ及び幅の矩形断面ダクトをモデリングする。また、アスペクト比の異なる矩形断面ダクトを、断面積 $1.60 \times 10^{-1}\text{m}^2$ を基準にそれぞれモデリングを行う。

2.3 境界条件

ダクト壁、バッフルは全反射とする為、反射する点 W において音圧 p を

$$p^{n+1}(W) = p^n(W - 1) \quad (2)$$

とする。解析領域の境界は、領域内へ反射が生じないように Mur の一次吸収境界条件⁵⁾を適用する (式 (3))。

$$p^{n+1}(W) = p^n(W - 1) + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \{p^{n+1}(W - 1) - p^n(W)\} \quad (3)$$

Table 1 矩形断面ダクトの各寸法

	アスペクト比別 矩形断面ダクト					
アスペクト比		1.00	1.56	4.00	6.25	16.0
高さ $\Delta h[\text{m}]$	0.35	0.40	0.32	0.20	0.16	0.10
幅 $\Delta d[\text{m}]$	0.35	0.40	0.50	0.80	1.00	1.60
断面積 $A[\text{m}^2]$	1.23×10^{-1}	1.60×10^{-1}	1.60×10^{-1}	1.60×10^{-1}	1.60×10^{-1}	1.60×10^{-1}
長さ $L[\text{m}]$	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50

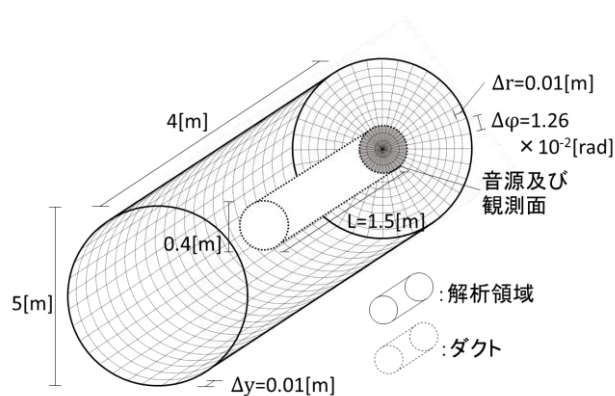


Fig. 1 円形ダクトの計算領域（バッフル無し）

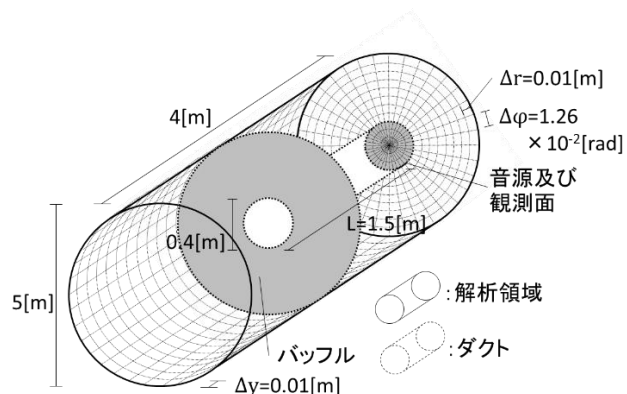


Fig. 2 円形ダクトの計算領域（バッフル有り）

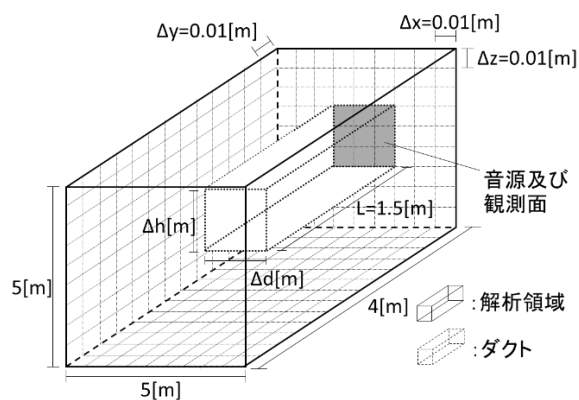


Fig. 3 矩形ダクトの計算領域（バッフル無し）

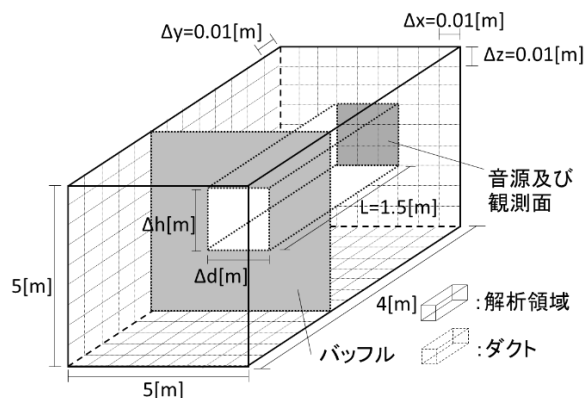


Fig. 4 矩形ダクトの計算領域（バッフル有り）

3 可視化アニメーション

Fig.5 にバッフル無しの場合、Fig.6 にバッフル有りの場合のダクト開口端反射現象を、音圧の可視化アニメーションにより再現した時の静止画を示す。これによるとパルス音が開口端において反射した後、ダクト内にてクロスモードが発生していることが確認できる。

4 時系列波形

Fig.7 にシミュレーションによる、観測面中央を通過したパルス音の時系列波形を示す。開口端へと向かう入射波と、逆位相の波形として開口端より反射した開口端反射波が確認できる。そこで、入射波と開口端反射波とを分離し、それぞれの両側を0としてフーリエ変換を行う。

5 開口端反射減衰の算出方法

Fig.8 に示すように開口端において、ダクトからの観測面を通過する全ての入射波のエネルギー I_i はダクト内部への開口端反射波のエネルギー I_r と外部への放射エネルギー I_t に分離されるものと仮定する。そこで、観測面で求めた I_i と I_r とを減算し(式(4))、 I_t を算出する。 I_i と I_t からそれぞれのレベル L_{ii} と L_{it} を求め、その差から開口端反射減衰値 ΔL を求める(式(5))。

$$I_t = I_i - I_r [W/m^2] \quad (4)$$

$$\Delta L = L_{ii} - L_{it} \quad [dB] \quad (5)$$

ただし、

I_i : 入射エネルギー $[W/m^2]$

I_r : 反射エネルギー $[W/m^2]$

I_t : 放射エネルギー $[W/m^2]$

L_{ii} : 入射エネルギーレベル $[dB]$

L_{it} : 放射エネルギーレベル $[dB]$

ΔL : 開口端反射減衰値 $[dB]$

6 結果及び考察

6.1 円形及び正方形断面ダクトの音響解析値と実験値の比較

Fig.9,10 に円形及び正方形断面ダクトのバッフル無し、有りにおけるそれぞれ周波数 50~1500Hz の音響解析値と実験値の結果を比較したものを示す。これによれば円形断面と正方形断面のバッフル無し、有り共に音響解析値と実験値の差が 1.0dB 以内で近似している。

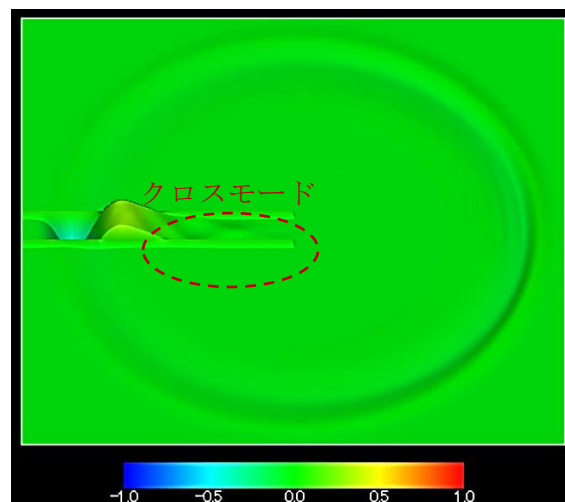


Fig. 5 バッフル無しの可視化アニメーション

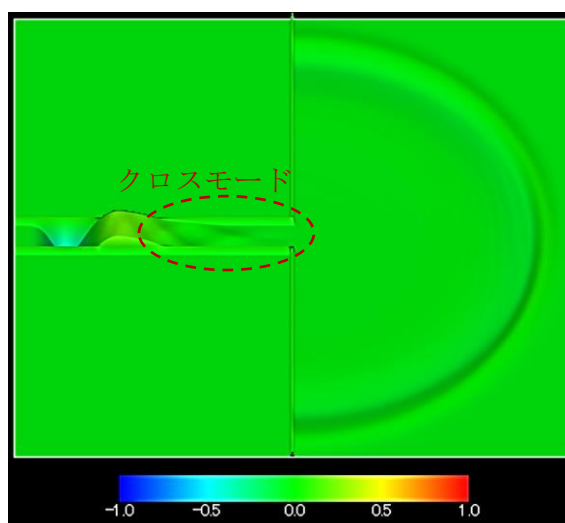


Fig. 6 バッフル有りの可視化アニメーション

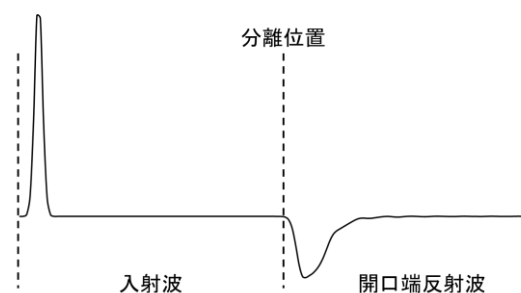


Fig. 7 観測波形

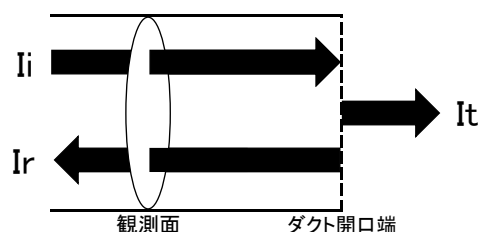


Fig. 8 ダクト内の音のエネルギー

6.2 円形及び正方形断面ダクトの音響解析値の比較

Fig.11 に断面積 $1.26 \times 10^{-1} \text{m}^2$ の円形断面ダクト及び断面積 $1.23 \times 10^{-1} \text{m}^2$ の正方形断面ダクトのバッフル無し、有りのそれぞれ周波数 50~1500Hz における音響解析の結果を比較したものを示す。これによればバッフル無し、有り共に円形断面ダクトと正方形断面ダクトの減衰量の差が 0.4dB 以内で近似している。この差は断面積の差の分だけ円形断面ダクトの音響解析値が増加したものと考えられる。

6.3 アスペクト比の異なる矩形断面ダクトの比較

Figs.12,13 に Table 2 に示した各アスペクト比の矩形断面ダクトのバッフル無し及び有りのそれぞれ周波数 50~1500Hz における音響解析の結果を比較したものを示す。これによればアスペクト比 16.0 の矩形断面ダクトにおいては周波数 100~1500Hz で、またアスペクト比 4.00 以降において周波数 250~1000Hz でバッフル無し及び有り共に音響解析値がアスペクト比 1.00 の値より増加することが確認される。上昇量の最大値としては、アスペクト比 16.0 においてバッフル有りで 250Hz の 1.6dB、バッフル無しでは 300Hz で 2.4dB となる。

7 まとめ

- [1] 差分法を用いた三次元音響解析により求めた円形及び正方形断面ダクトの音響解析値と実験結果が一致した。
- [2] 同断面積の円形及び正方形断面ダクトの開口端反射減衰量が一致する結果が得られた。
- [3] 矩形断面ダクトにおいてアスペクト比が増加することにより開口端反射減衰量が増加することを確認した。

参考文献

- 1) ASHRAE, ASHRAE Handbook – HVAC Applications, (2003) p.47.19.
- 2) 佐藤真耶, 平成 23 年度修士論文 パルス音源を用いたダクト開口端反射減衰に関する研究, 日本大学大学院生産工学研究科 (2012).
- 3) Levine. H and J. Schwinger, Physical review, American Physical Society73, (1948), p.383.
- 4) 首里, 塩川, 豊谷, 差分法を用いたダクト開口端反射減衰の 2 次元数値解析, 音響学会講演論文集 (秋), (2015) p.791-794.
- 5) 橋本修, 阿部琢美, FDTD 時間領域差分法入門, (1996) p.19-21.

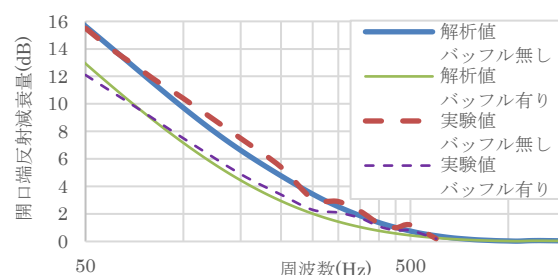


Fig. 9 円形断面ダクト 400mmφの音響解析値と実験値

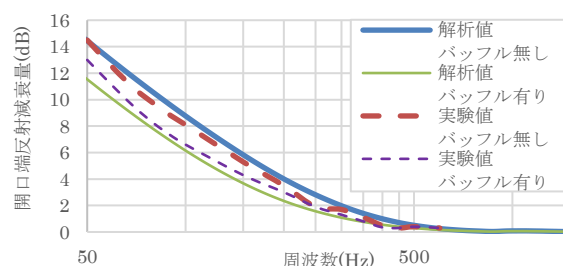


Fig. 10 正方形断面ダクト 400mm×400mm の音響解析値と実験値

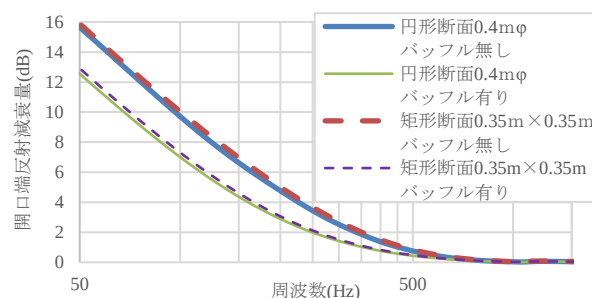


Fig. 11 円形及び正方形断面ダクトの音響解析値と ASHRAE の値

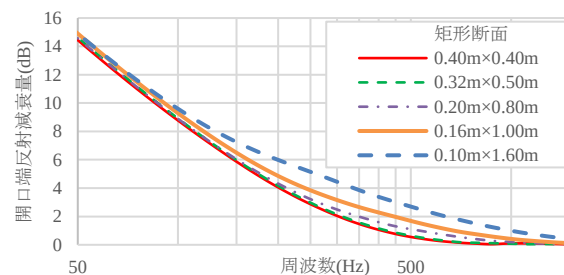


Fig. 12 アスペクト比の異なる矩形断面ダクトの音響解析値 (バッフル無しの場合)

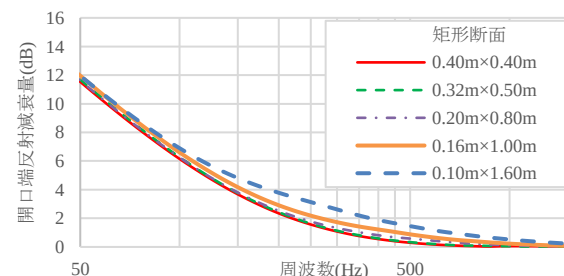


Fig. 13 アスペクト比の異なる矩形断面ダクトの音響解析値 (バッフル有りの場合)