

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

－その3. 正方形断面ダクト 200×200mmの場合－

日大生産工(院) ○佐藤 真耶 日大生産工 塩川 博義

1. はじめに

既報¹⁾²⁾では、200mmφの円形断面ダクトの場合について、パルス音源を用いた実験とスペクトル解析により開口端反射減衰値を求め、ASHRAEの図³⁾の値とほぼ一致した結果を得た。ASHRAEでは、ダクト開口端について、円形断面ダクト、正方形断面ダクトおよび長方形断面ダクトのようにダクト形状が異なる場合であっても、有効直径が等しければ同じ開口端反射減衰値になる。しかし、ASHRAEには理論計算の併載がなく、実験的検討も行われていないため、このことが正確かは明らかでない。

そこで、本報では、既報¹⁾²⁾の200mmφの円形断面ダクトと有効直径が等しい200×200mmの正方形断面ダクトについて、既報¹⁾²⁾と同様の方法を用いて開口端反射減衰値を求め、それらをASHRAEの値と比較し、本実験の有効性について検討したので、その結果を報告する。

2. 有効直径

ASHRAEでは、ダクト開口端の有効直径 l は、式・1のように定義している。したがって、200mmφの円形断面ダクトの場合と200×200mmの正方形断面ダクトの場合とは、 l が200mmと同じなので、同じ開口端反射減衰値となる。

$$l = \sqrt{l_x \cdot l_y} \quad (\text{m}) \quad \text{式・1}$$

ただし、

l は、円形断面では直径 D (m)

l_x, l_y : 長方形断面の辺長(m)

3. 実験装置

実験装置を図2に示す。実験には正方形断面の鉄板ダクト、1/2インチマイクロフォン、サーフェイスマイクロフォン、スピーカー、アンプ、パルス音源発生器、B & K社製マルチ分析器PULSE および解析用パソコンを用いる。ダクトサイズは断面辺長200×200mm、長さ2800mm、厚さ1.0mmである。バップルは1800×1800mmで厚さ24mmの合板を使用する。

4. 実験方法

測定はすべて無響室で行う。無響室内に設置されたダクトの内部にサーフェイスマイクロフォンを開口端より内側1.0m（以下マイクA）の位置に設置

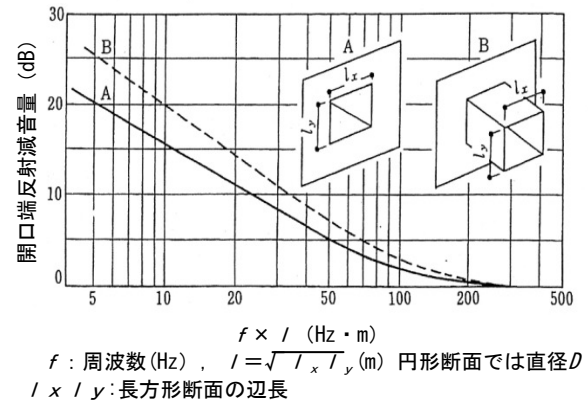
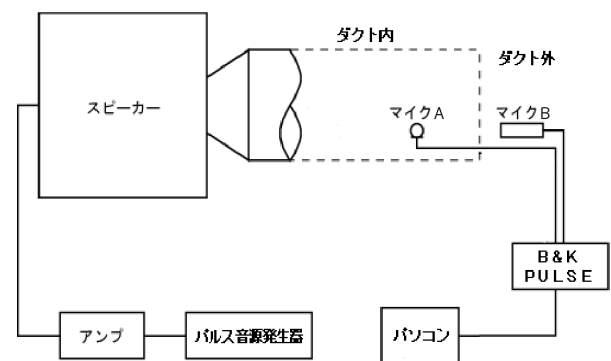
図1 ASHRAEの図³⁾

図2 実験装置

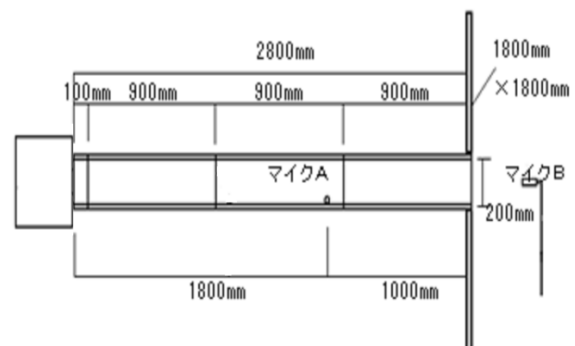


図3 ダクト内外のマイクロフォンの位置

Study On End Reflection Loss of Duct
－ Prat3. 200×200mm square section duct －

Maya SATOH, Hiroyoshi SHIOKAWA

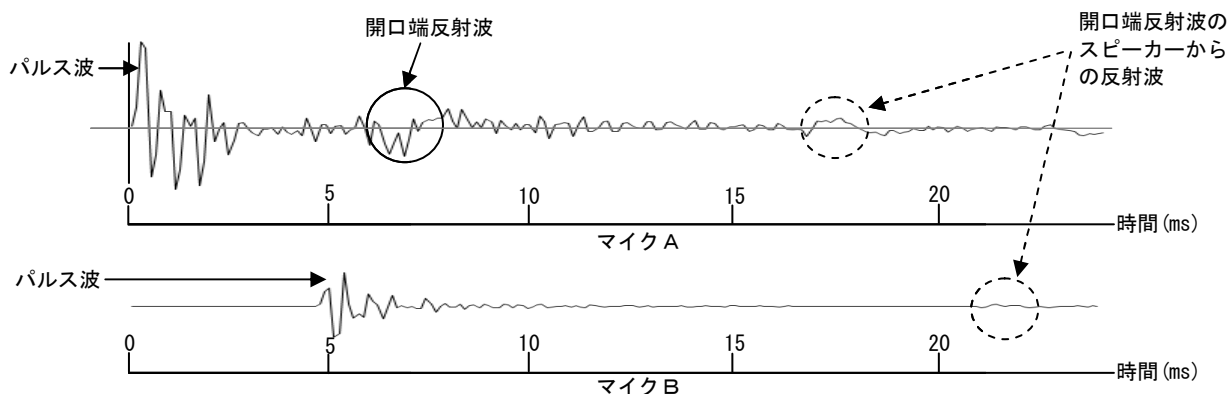


図4 各マイクの時系列波形

する。また、ダクト断面中央外部で開口端から 0.5m の位置に1/2インチマイクロフォン（以下マイク B）を設置し、スピーカーからパルス音を出して測定する。この測定をバッフル無しおよびバッフル有りの場合で行う。

また、測定データは、サンプリング周波数 8192Hz でA/D変換を行う。

5. 時系列波形

バッフル無しにおける各マイクで測定した音響データの時系列波形を図4に示す。スピーカーから出たパルス波がマイク A に到達したときの時間を基準として 0s とすると、6.0ms 後にパルス波と逆位相の開口端反射波が確認できる。さらに、16.6ms 後に開口端反射波と逆位相で開口端反射波のスピーカーからの反射波が確認でき、ダクト内を音波が行き来していることがわかる。ダクト開口端外部に設置してあるマイク B では、4.6ms 後にパルス波が、21.2ms 後に開口端反射波のスピーカーからの反射波が確認できる。

ここで、マイク A の時系列波形について、図5に示すように入射波と開口端反射波に分離し、フーリエ変換をするために両側を 0 にする。また、ダクト開口端から外部への放射音のデータはマイク B の測定値を用いる。

6. 開口端反射減衰値の算出

以下2種類の方法により開口端反射減衰値を求める。算出方法はバッフル無しおよびバッフル有りの場合ともに同じである。

まず、5章において開口端反射波が確認できたことから、図6に示すように開口端において、ダクトからの入射エネルギー I_i は内部への開口端反射エネルギー 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、マイク A で求めた入射エネルギー I_{ai} と開口端反射エネルギー I_{ar} とを減算し（式・2）、放射エネルギー I_{at} を求め、そのレベルを L_{lat} とする。入射エネルギーのレベルを L_{lai} として、 L_{lat} と L_{lai} との差から開口端反射減衰値 ΔL を求める（式・3）。これを実験値 I とする。

$$I_{at} = I_{ai} - I_{ar} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{式・2}$$

$$\Delta L = L_{lai} - L_{lat} \quad [\text{dB}] \quad \text{式・3}$$

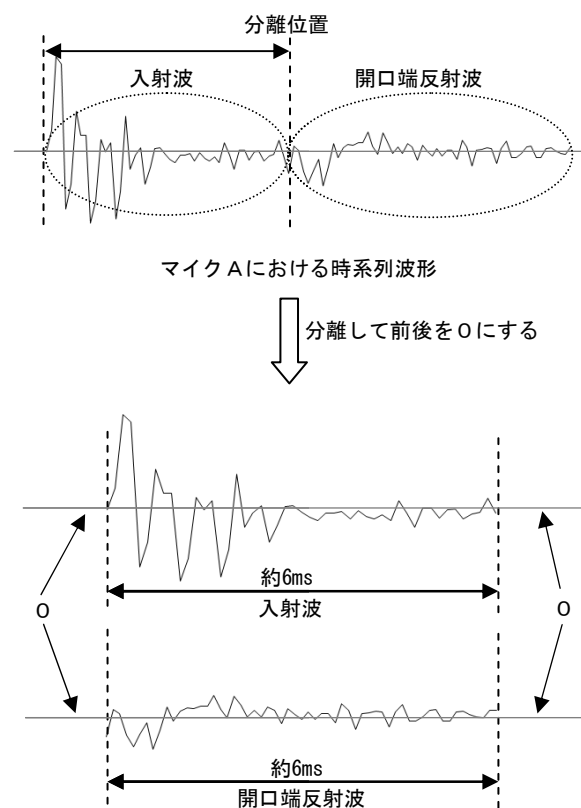


図5 入射波と開口端反射波の分離

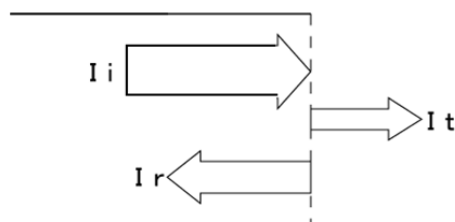


図6 開口端における音の流れ

ただし、

I_{ai} : マイクAの測定値から求めた入射エネルギー- $[\text{W/m}^2]$

I_{ar} : マイクAの測定値から求めた開口端からの反射エネルギー- $[\text{W/m}^2]$

L_{lai} : マイクAの測定値から求めた入射エネルギーのレベル [dB]

L_{lat} : マイクAの測定値から求めた開口端からの放射エネルギーのレベル [dB]

次に、ダクト内の音波は平面進行波と仮定し、マイクAで求めた入射エネルギーのレベル L_{lai} にダクト断面の面積効果 (式・4) を考慮して、入射パワーレベル L_{wai} を求める。さらに、マイクBの測定値から求めた放射エネルギー L_{ibt} のレベルを L_{lbt} とする。マイクBの測定位置はダクト開口から 0.5m 離れているので、ダクト外部の空間を自由音場と仮定し、開口端からの放射はダクト断面中央点からの無指向性点音源と仮定し、距離減衰値 (式・5) を考慮して、放射パワーレベル L_{wbt} を求める。この L_{wbt} と L_{wai} との差から開口端反射減衰値 $\angle L$ を求める (式・6)。これを実験値 II とする。

$$L_{wai} = L_{lai} + 10\log_{10}S \quad [\text{dB}] \quad \text{式・4}$$

$$L_{wbt} = L_{lbt} + 20\log_{10}r + 11 \quad [\text{dB}] \quad \text{式・5}$$

$$\angle L = L_{wai} - L_{wbt} \quad [\text{dB}] \quad \text{式・6}$$

ただし、

L_{wai} : マイクAの測定値から求めた入射パワーレベル [dB]

L_{lai} : マイクAの測定値から求めた入射エネルギーのレベル [dB]

L_{wbt} : マイクBの測定値から求めた開口端からの放射パワーレベル [dB]

L_{lbt} : マイクBの測定値から求めた開口端からの放射エネルギーのレベル [dB]

S : ダクト断面積 [m^2]

r : 開口端からの距離 [m]

7. 結果および考察

7.1 バッフル無しの場合の開口端反射減衰の実験値

図7にバッフル無しの場合の周波数 50~1500Hz における開口端反射減衰の実験値 I とダクト断面辺長 200×200mm におけるASHRAEの値を比較したものを示す。ASHRAEの値に対し、周波数 50~300Hz までは大きな開きがあるが、周波数 300~600Hz では差が 2.7dB 以下となり、周波数 600Hz 以上では差が 1.1dB 以下とほぼ一致する。周波数が低くなるに従って、ASHRAEの値との差が大きくなるのは、5章において約 6ms で入射波と反射波を分離したが、この約 6ms の時間では、周期が長い低い周波数は入射エネルギーが完全に減衰せず、残存している状態に開口端反射エネルギーが重なり、干渉していることが原因と考えられる。

図8にバッフル無しの場合の周波数 50~1500Hz における開口端反射減衰の実験値 II とダクト断面辺長 200×200mm におけるASHRAEの値を比較したものを示す。ASHRAEの値に対し、周波数 200~300 Hz では差が 1.4dB 以下であるが、周波数 50~200Hz および周波数 300~450 Hz では 2.4dB 以上の差が生じ、周波数 450Hz 以上は測定不可能であった。周波数 450Hz 以上が測定不可能であったことは、高い周波数ほどダクト開口からの放射音は指向性が強くなるので、単純に無指向性点音源の距離減衰として計算できないことが原因と考えられる。

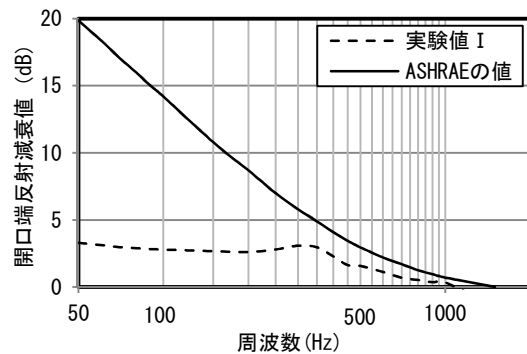


図7 開口端反射減衰の実験値 I とASHRAEの値 (バッフル無しの場合)

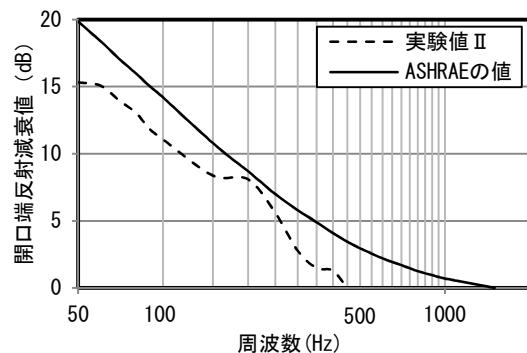


図8 開口端反射減衰の実験値 II とASHRAEの値 (バッフル無しの場合)

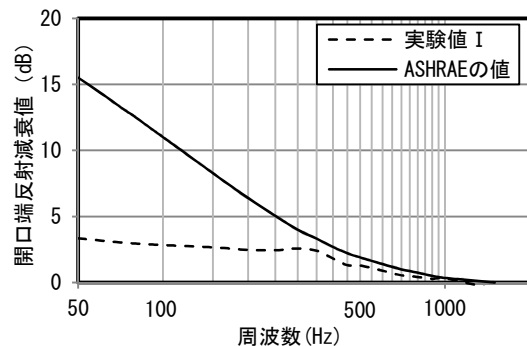


図9 開口端反射減衰の実験値 I とASHRAEの値 (バッフル有りの場合)

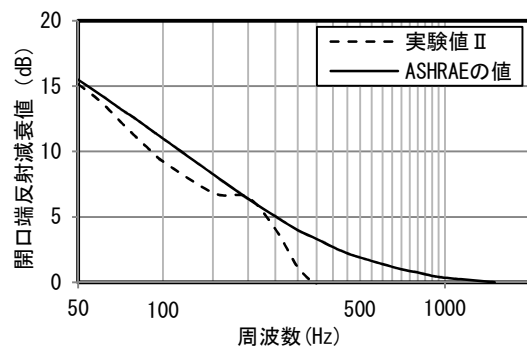


図10 開口端反射減衰の実験値 II とASHRAEの値 (バッフル有りの場合)

7.2 バッフル有りの場合の開口端反射減衰の実験値

図9にバッフル有りの場合の周波数 50～1500Hz における開口端反射減衰の実験値Ⅰとダクト断面辺長 200×200mm におけるASHRAEの値を比較したものを示す。ASHRAEの値に対し、周波数 50～250Hz までは大きな開きがあるが、周波数 250～350Hz では差が 2.5dB 以下となり、周波数 350Hz 以上ではその差が 1.0dB 未満とほぼ一致する。バッフル無しの場合と同様、周波数が低くなるに従って、ASHRAEの値との差が大きくなるのは、5章において約 6ms で入射波と反射波を分離したが、この約 6ms の時間では、周期が長い低い周波数は入射エネルギーが完全に減衰せず、残存している状態に開口端反射エネルギーが重なり、干渉していることが原因と考えられる。

図10にバッフル有りの場合の周波数 50～1500Hz における開口端反射減衰の実験値Ⅱとダクト断面辺長 200×200mm におけるASHRAEの値を比較したものを示す。ASHRAEの値に対し、周波数 50～250Hz ではその差が 1.8dB 以下であるが、それ以降は周波数が高くなるにつれて差が大きくなり、周波数 350Hz 以上は測定不可能であった。これはバッフル無しの場合と同様、高い周波数ほどダクト開口からの放射音は指向性が強くなるので、単純に無指向性点音源の距離減衰として計算できないことが原因と考えられる。

7.3 実験値Ⅰと実験値Ⅱを合わせた開口端反射減衰の実験値

図11にバッフル無しおよびバッフル有りの場合について、250Hz より高い周波数を実験値Ⅰ、周波数 250Hz 以下を実験値Ⅱとして合わせた開口端反射減衰の実験値とダクト断面辺長 200×200mm におけるASHRAEの値を比較したものを示す。バッフル無しの場合は、ASHRAEの値に対し、周波数 50～200Hz および周波数 300Hz では 2.4dB 以上の差が生じるが、周波数 200～250Hz および周波数 350Hz 以上では差が 1.9dB 以下となる。バッフル有りの場合は、ASHRAEの値に対し、周波数 50～300Hz では最大 1.8dB の差が生じ、周波数 300Hz 以上では差が 1.0dB 未満とほぼ一致する。

8. おわりに

今回の実験で得た結果を以下にまとめる。

- 1) ダクト内部で測定した入射波と開口端反射波から求めた開口端反射減衰の実験値は、バッフル無しの場合、周波数 50～300Hz までは大きな開きがあるが、300～600Hz では差が 2.7dB 以下となり、600Hz 以上では差が 1.1dB 以下とほぼ一致する。バッフル有りの場合は周波数 50～250Hz までは大きな開きがあるが、周波数 250～350Hz では差が 2.5dB 以下となり、周波数 350Hz 以上ではその差が 1.0dB 未満とほぼ一致する。
- 2) ダクト開口端外部測定点 0.5m で測定した放射パワーレベルとダクト内部で測定した入射パワーレベルを用いて計算した開口端反射減衰の実験値は、バッフル無しの場合は、周波数 200～300 Hz では差が 1.4dB 以下であるが、周波数 50～200Hz および周波数 300～450 Hz では 2.4dB 以上の差が生じる。バッフル有りの場合

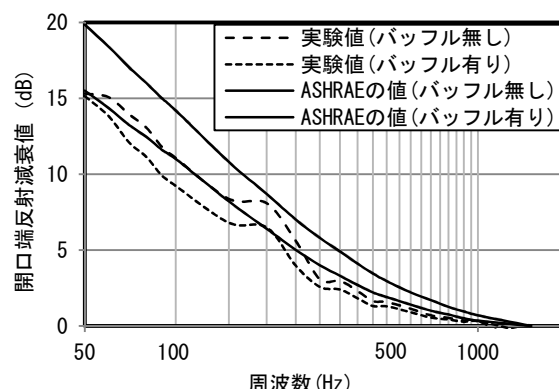


図1-1 バッフル無しおよびバッフル有りの場合の開口端反射減衰の実験値とASHRAEの値

は、周波数 50～250Hz ではその差が 1.8dB 以下であるが、それ以降は周波数が高くなるにつれて差が大きくなる。

- 3) 200×200mm の正方形断面ダクトでは、バッフル無しおよびバッフル有りの場合ともに、250Hz より高い周波数を実験値Ⅰ、250Hz 以下を実験値Ⅱを用いると、周波数 50～1500Hz ではASHRAEの値に対し、バッフル無しの場合は、周波数 50～200Hz および周波数 300Hz では 2.4dB 以上の差が生じるが、それ以外の周波数では差が 1.9dB 以下となる。バッフル有りの場合はその差が 1.8dB 以下となる。

以上のことから、ASHRAEの値に対し、今回の200×200mm の正方形断面ダクトではバッフル有りの場合はその差が 1.8dB 以下と近似したが、バッフル無しの場合は、周波数 50～200Hz および周波数 300Hz で 2.4dB 以上の差が生じた。

ASHRAEが正確であるか明らかではないが、ASHRAEの値が正しいとすると、本実験は、既報¹⁾²⁾の200mmφの円形断面ダクトの場合と比べて、200×200mm の正方形断面ダクトの場合については有効性が低いという結果となった。

今後は、ダクト外部の測定ポイントおよびダクト内部の測定ポイントの測定位置を変えるなどして、正方形断面ダクトの場合の実験方法について検討を行うと同時に、それらの実験値とASHRAEの値とを比較し、ASHRAEの正当性について考察していく予定である。

参考文献

- 1) 佐藤、塩川：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、日本大学生産工学部学術講演会、p119-120, 2009.12
- 2) 佐藤、塩川：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—その2.開口端反射エネルギー値を用いた場合—、日本大学生産工学部学術講演会、p63-66, 2010.12
- 3) 日本建築学会：建築の音環境設計、彰国社、pp.40, 2007.3