

穴あき挿入管付き拡張室型消音器の音響特性の実験的検証

高山 峻^{*1} 森下 達哉^{*2}

Experimental Verification of the Acoustic Characteristics of an Expansion Silencer Using an Extended-Tube with Hole

by

Shun TAKAYAMA^{*1} and Tatsuya MORISHITA^{*2}

(Received on Oct. 06, 2018 and accepted on Nov. 08, 2018)

Abstract

This paper describes the experimental verification of the acoustic characteristics of an expansion silencer with extended-tube using the transfer function method. The purpose of this research was to clarify the validity of the calculated results of the expansion silencer using an extended-tube with a hole. We measured the transmission loss of the expansion silencer based on the transfer function method. It was possible to model the acoustic characteristics of the expansion silencer using a parallel network system. We investigated the transmission loss of the expansion silencer with extended-tube. The calculated results based on the equivalent circuit and the experimental results showed the same tendency. We conclude that the calculated results of the characteristics of the expansion silencer using an extended-tube with a hole based on the equivalent circuit are valid.

Keywords: Duct, Silencer, Equivalent circuit, Transmission loss, Transfer function method

1. はじめに

機械が発生させる吸排気音の対策方法の一つとして、マフラーやサイレンサーといった管路系消音器が用いられている。管路系消音器の音響特性評価の手法のひとつとして、等価回路に基づく解析が行われている^{1,2)}。この手法は、管路内を伝搬する音が平面波とみなせる周波数範囲では有用な手法である。この解析の特徴から、より簡便に消音器の音響特性を明らかにしたい場合に適した解析手法である。ただし、消音器の構造が複雑な場合には解析が困難となる課題があり、未だに解析例がない構造もある。

本研究では様々な分野で広く使われている拡張室型消音器を研究対象としている。拡張室型消音器の性能改善手法として、拡張室内に挿入管を設ける場合がある³⁾。挿入管を用いた場合に性能調整を行う上で、挿入管に穴を設ける場合がある。拡張室型消音器に穴あき挿入管を組合せた構造においては、これまでに等価回路に基づく解析例は示されていなかった。

そこで本研究では、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の音響特性を等価回路解析によって明らかにすることを目標とし、検討を行っている。これまでの研究では、解析の有用性を示唆する結果が得られている^{4,5)}。ただし、この結果においては、消音器以外の管路要素を含む結果であり、消音器単体の特性が明らかになっておらず、消

音器単体での音響特性評価を行うことが望ましい状態であった。

以上を踏まえて本論文では、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の等価回路に基づく解析結果の妥当性の検証を目的とする。検証に際して、従来使用していた挿入損失ではなく、消音器単体の特性を明らかにすることが可能な透過損失を評価指標とし、解析との比較検証を行う。この検証によって等価回路に基づく解析の妥当性を明らかにする。

2. 管路内音場の等価回路解析

2.1 管路内音場の透過損失

管路内に設置された騒音抑制装置単体の音響特性の評価には、透過損失(Transmission Loss, TL)が用いられる。 TL は等価回路に基づき求めることができる。騒音抑制装置における管路系の四端子定数を A , B , C , D 、管路の特性インピーダンスを Z_0 とおくと、無損失の音響管における TL は、Fig. 1 に示す等価回路から、式(1)で表される。

$$TL = 20 \log_{10} \frac{1}{2} \left| A + \frac{B}{Z_0} + Z_0 C + D \right| \text{ [dB]} \quad (1)$$

2.2 消音器のモデリング

本論文では、穴あき挿入管付き拡張室型消音器の等価回路モデルを Fig. 2 のようにおく。ここで、図中の F_n (n

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 工学部動力機械工学科教授

$=1\sim5$)は各管路要素の四端子定数を表す．また， Z_b は管路拡張室部から挿入管周囲の空間を見込んだ入力インピーダンスを表す．

Fig. 2(a) において，本論文では，四端子定数 F_{31} と F_{32} で表される部位を並列に接続されている管路要素と考えている． F_{31} からは入力インピーダンス Z_b が線路に並列に接続され，挿入管の開口部から挿入管内音場に合流する．なお，挿入管の開口部がない場合には，挿入管に合流する線路は未接続となり，穴なし挿入管を用いた拡張室型消音器の等価回路と同じものになる．

3. 透過損失測定による検証実験

3.1 消音器の透過損失

穴あき挿入管を用いた消音器の等価回路解析の妥当性を検討するため，Fig. 3に示す装置を用いて実験を行う．検証実験では，伝達関数法に分類される方法に基づき，透過損失を測定する．以下その方法について述べる．

Fig. 3 において音源側を上流とし，上流側と下流側にそれぞれ2本マイクロホンを設置する．スピーカから管路内に伝搬した音をマイクロホン m_i ($i=1\sim4$)で測定する．

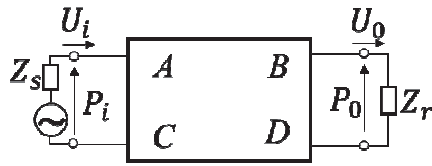
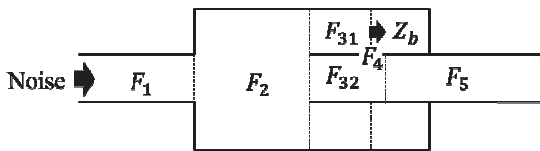
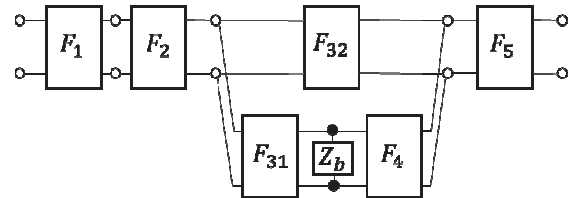


Fig. 1 Equivalent circuit of a duct system.



(a) Schematic of an expansion silencer extended-tube with a hole.



(b) Equivalent circuit of silencer.

Fig. 2 Equivalent circuit of expansion type silencer with extended-tube.

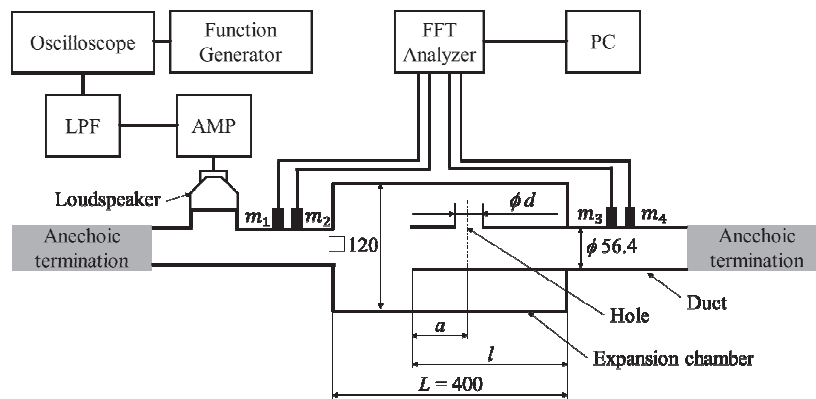


Fig. 3 Experimental equipment of expansion silencer using extended-tube with a hole.

マイクロホンで計測した音圧 p_i ($i=1\sim4$)を使用し，伝達関数 $H_{ij}(=p_j/p_i)$ を求める．求めた伝達関数 H_{ij} を用いて TL が以下の式で求められる⁶⁾．

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{H_r - H_{12}}{H_r - H_{34}} \right| - 20 \log_{10} |H_{13}| \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

ここで，

$$H_r = \exp(jk\Delta x), \quad (3)$$

である．ただし， k ($=2\pi f/c_0$)は波数， Δx はマイクロホン間隔を示している．

実験装置では，管路系に長さ $L=400$ mm，断面寸法 120×120 mm の拡張室を設置する．拡張室上流側，下流側管路および拡張室の挿入管には内径 56.4 mm の塩化ビニル VU 管を使用する．これによる拡張室の拡張比 M は $M=5.76$ である．マイクロホンとして 1/4 インチタイプを使用する．測定における管路終端での反射波の影響を小さくするために，管路の両端に吸音材を充填した長さ 1000 mm の無反射端を設ける．Fig.3 に示すスピーカをランダムノイズで駆動する．

式(2)を用いて TL を求めるには，まず，マイクロホン間隔 Δx を決定する必要がある．拡張室の寸法から非平面波成分が伝搬し始める周波数を算出すると，約 2800 Hz である．例えば， Δx を 50 mm とすると，測定可能周波数の上限は約 3400 Hz となる． $\Delta x=50$ mm とすることによって，平面波成分のみが伝搬する周波数全域で測定可能となる．

3.2 透過損失測定実験装置の特性検証

まず、本論文における実験装置の有効性を検討するために、特性が既知となっている、拡張室のみの場合と穴なし挿入管付き拡張室を用いる場合の測定実験を行う。穴なし挿入管付き拡張室では、Fig. 3 に示す消音器の挿入管長さ $l=200$ mm, 300 mm とする場合 2 種類について透過損失を式(2)から求める。透過損失の実験結果については、等価回路を用いた解析結果との相違を式(4)に示す、Loss Difference (以下 LD とする) で評価する⁷⁾。

$$LD = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N \left(10^{\frac{TL_c}{20}} - 10^{\frac{TL_m}{20}} \right)^2}{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{TL_c}{10}}} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

ここで、 TL_c は、式(1)で求められる等価回路解析による透過損失である。 TL_m は、実験で測定した音圧を用いて式(2)によって求めた透過損失である。

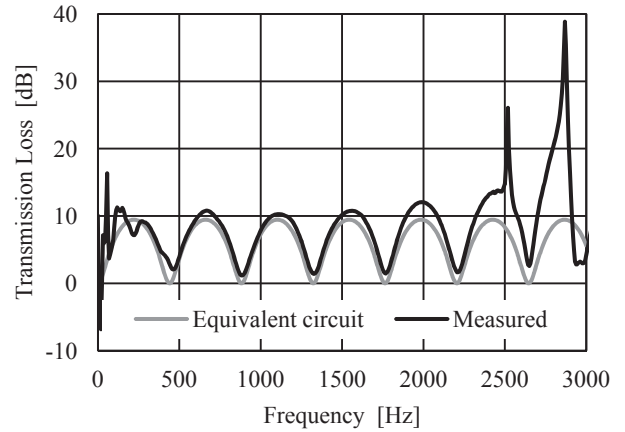
Fig. 4(a)に、拡張室のみの場合の TL を示す。拡張室のみの場合、等価回路解析の結果と実験結果とは同様の傾向を示していることが確認できた。Fig. 4 (b), (c)に示される挿入管付き拡張室の場合においては、等価回路解析と実験結果ともに、拡張室特有の透過損失特性に加えて、挿入管を加えることによって生じる共鳴型消音器特有のピークが発生する特性が認められた。

Fig. 4 の結果から、 $0 \sim 50$ Hz では実験結果が他の周波数帯と比較して多くの乱れが生じた。これは、音源用スピーカの低周波数域での出力不足によって十分な S/N 比を確保できなかったためと考えている。また、 2000 Hz 以上の周波数域では、等価回路解析との差異が拡大した。これは、比較的波長の短い周波数域では差異が顕著になる傾向があることに加えて、拡張室内での非平面波成分の影響があるのではないかと著者と考えている。

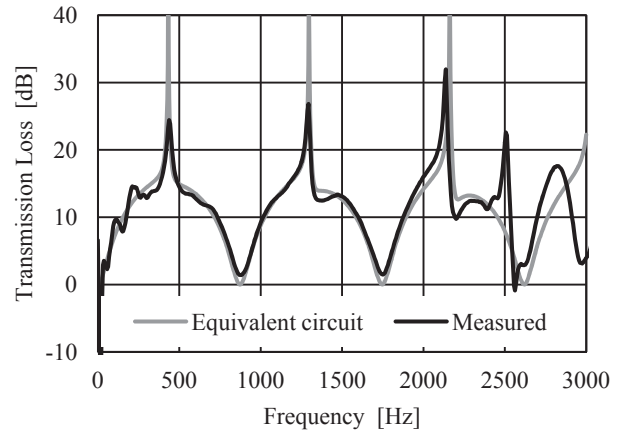
さらに、Fig. 4 の結果をもとに式(4)から LD を求める。実験結果から、まず $50 \sim 2000$ Hz の周波数域で LD を求めることとする。等価回路解析によって生じるピークは、実験に比べ大きくなることがこれまでに確認されているため、ピーク近傍の値を除外した LD を求める。実験結果と解析結果の相違を求める際に使用する LD は以後、同様に求めることとする。Fig. 4(a)より、拡張室のみの場合において、 $LD = -14.3$ dB であった。Fig.(b), (c)より、 $l = 200$ mm の場合で $LD = -16.1$ dB, $l = 300$ mm の場合で $LD = -12.4$ dB であった。 $LD = -6$ dB 程度 (式(4)における分母分子の比が $1/5$ 程度) を解析結果と実験結果との差異が大き過ぎず許容できる値と考えることにすると、Fig.4 の結果は十分に許容できる結果である。一方、 $50 \sim 3000$ Hz で Fig.4 から LD を求めると全て $LD > 0$ dB となった。以上の LD の値と前述の S/N 比や平面波成分の伝搬する周波数を考慮して、次節以降では $50 \sim 2000$ Hz で評価を行うことにする。

以上の結果から、適切な周波数範囲を設定すれば、Fig.3 の実験装置による妥当な結果が得られる測定が可

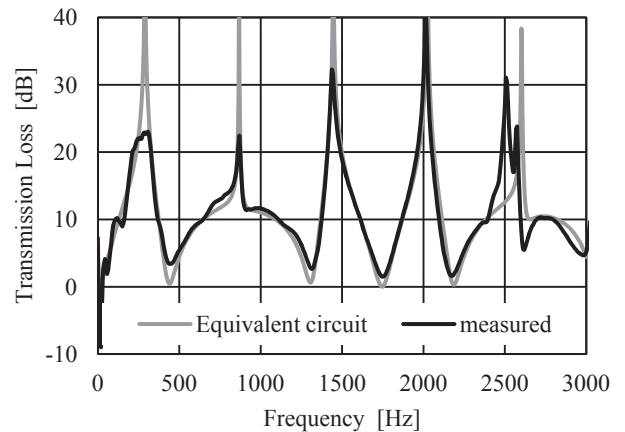
能であることを確認できた。次節では、穴あき挿入管を用いた場合に関する解析と検証実験を行う。



(a) Expansion type silencer ($L = 400$ mm, $M = 5.76$).



(b) $L = 400$ mm, $M = 5.76$, $l = 200$ mm.



(c) $L = 400$ mm, $M = 5.76$, $l = 300$ mm.

Fig. 4 Transmission loss of expansion type silencer with extended-tube.

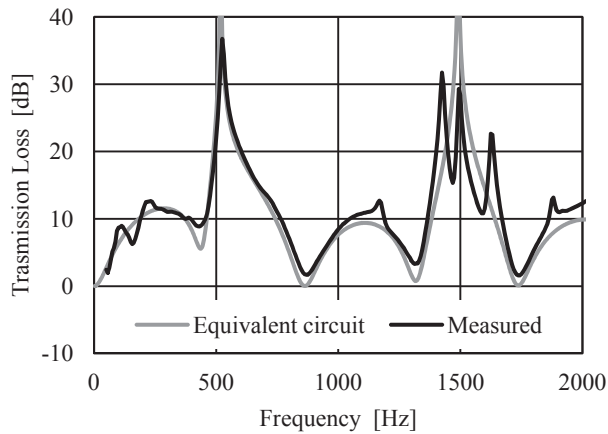
3.3 穴あき挿入管を用いた場合の検証実験

穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器について実験を行い等価回路解析結果の検証を行う。挿入管長さ（挿入量） l 、穴径 d 、挿入管端部から穴部の中心までの距離 a を変化させ、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の特性を調べる。Fig. 3 に示す消音器における挿入管の穴径 d を 32 mm、挿入管長さ l を 200 mm, 300 mm、挿入管端部から穴の中心までの距離 a を 50 mm, 100 mm とし、実験を行う。Fig. 5(a), (b) に $l = 200$ mm の結果、(c), (d) に $l = 300$ mm の結果をそれぞれ示す。

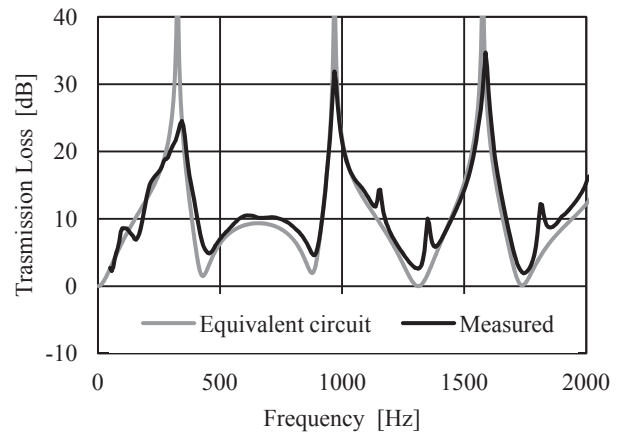
まず、挿入管端部から穴の中心までの距離 a による特性の変化を調べる。Fig. 5(a), (b) において $l = 200$ mm の場合では、等価回路解析と同様に a の値を大きくすることで 1 つ目のピーク周波数は高周波側に、2 つ目のピーク低周波側にそれぞれ移動する傾向が認められた。Fig. 5(c), (d) において $l = 300$ mm の場合では、1 つ目と 2 つ目のピーク周波数は高周波側に、3 つ目のピーク周波数は低周波側にそれぞれ移動した。これらの結果から等

価回路解析の結果と同様に穴を設ける位置によって、消音器の周波数特性を変更することができるということがわかった。

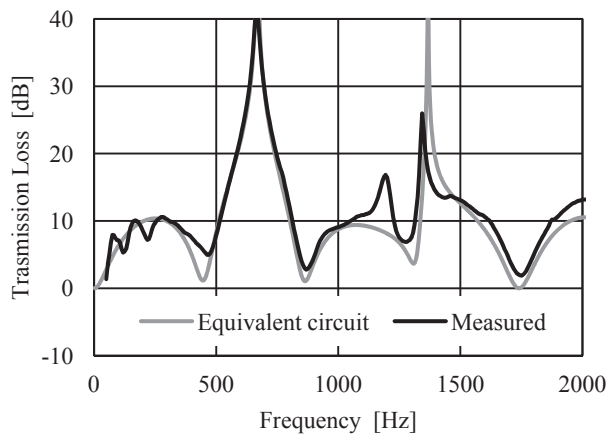
式(4)を用いて穴あき挿入管を用いた場合の LD を求める。Fig. 5 の結果をもとに LD を求めると、Fig. 5(a) の場合 -6.04 dB, (b) の場合 -13.9 dB, (c) の場合 -13.3 dB, (d) の場合 -7.37 dB となった。穴あき管を用いた場合の LD の値は、前節の拡張室のみの場合や穴なし挿入管を用いた場合と同等の値となっていることがわかった。以上の結果から、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の解析結果の妥当性を確認することができた。ただし、実験結果において、等価回路解析の結果には表れない TL における小さなピークが 1000 Hz 以上の周波数帯に幾つか認められた。これらのピークが生じた原因として、挿入管に穴を設けることによって、解析では模擬していない音響的伝搬経路が増えたため、これらのピークが現実が生じた可能性があると考えた。次節では、伝搬経路を変化させた場合の透過損失特性の変化を調べる。



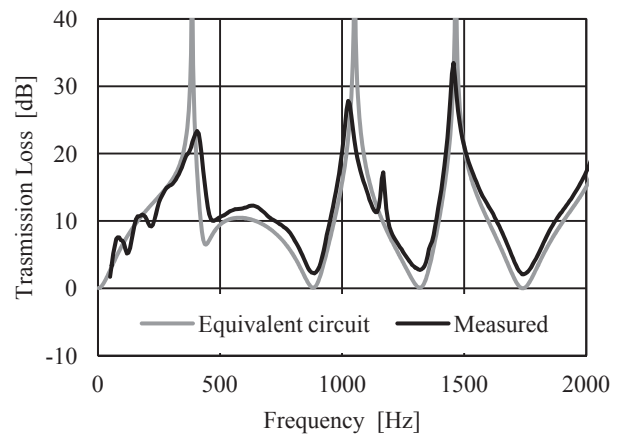
(a) $l = 200$ mm, $a = 50$ mm.



(c) $l = 300$ mm, $a = 50$ mm.



(b) $l = 200$ mm, $a = 100$ mm.



(d) $l = 300$ mm, $a = 100$ mm.

Fig. 5 Transmission loss of expansion silencer using extended-tube with a hole.

3.4 穴径を縮小した場合の検証実験

まず、挿入管にあける穴径を変更することによって、伝搬経路特性を変化させた場合の透過損失を調べる。具体的には、Fig.3における穴径を $d = 32$ mm, 12 mm, 6 mm, と変更する場合の透過損失特性の変化を調べる。挿入管の挿入量 l と挿入管端部から穴までの距離 a はそれぞれ $l = 300$ mm, $a = 100$ mm とする。Fig. 6(a)に $d = 6$ mm, (b)に $d = 12$ mm の TL を示す。

$d = 6$ mm, 12 mm とした検証実験における LD を式(4)で求めると、 $d = 6$ mm の場合は $LD = -3.98$ dB, $d = 12$ mm の場合は $LD = -9.98$ dB となった。これらの値は 3.2 や 3.3 において算出した値に比べ、LD 値が大きいことを示すものとなった。 $d = 32$ mm とした場合では TL に小さなピークが幾つかあるものの、 $d = 6$ mm, $d = 12$ mm とした場合には、解析結果と同様の結果となった。Fig. 6 より、穴径 d を大きくすることで、ピーク周波数が高周波側に移動しており、穴径 d を変えることで消音器の透過損失特性が変化することがわかった。

$d = 32$ mm のときに生じていた等価回路解析で模擬できていないピークに関しては、Fig. 6 の結果を見る限り見受けられなかった。この原因としては穴を小さくしたことで、拡張室内における穴部の音響インピーダンスが $d = 32$ mm 時に比べ大きくなったため、穴部を通過する音響的エネルギーが減少した可能性が考えられる。

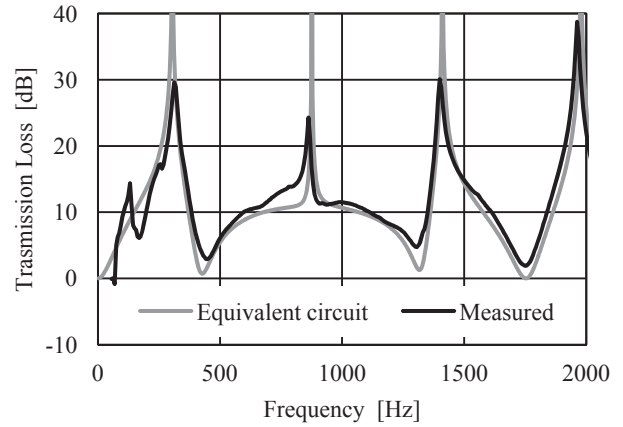
我々は Fig. 7 に示すような経路で共振、干渉が発生するものと想定している。 $d = 32$ mm とした挿入管を用いた場合において干渉型消音器の透過損失特性²⁾から Fig. 7 に示す経路①～③で共振する可能性があると考えた。経路①では、拡張室内挿入管周囲に生成される空間による共振が生じる。経路②では、挿入管の穴部からの音波と挿入管内を伝搬する音波とが干渉する。経路③では、挿入管の穴部から挿入管内部を伝わり挿入管入り口に戻る音波と拡張室内から挿入管入り口に伝わる音波とが干渉する。

穴径 d を小さくしたことで、穴部の音響インピーダンスが大きくなり、音響エネルギーが穴部よりも下流側の①部に多く流れ、②、③の経路で生じる干渉が $d = 32$ mm に比べ少なくなったため、TL のピークが発生しなかったのではないかと考えた。

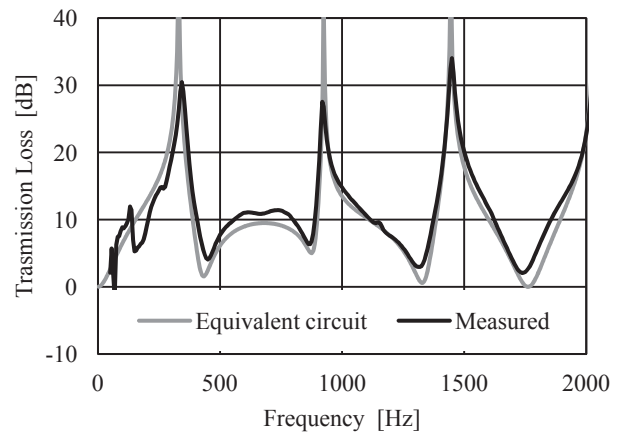
続けて、穴を 2 つ設けた場合の透過損失特性を検討する。これは共振、干渉が比較的少ない穴径としつつ、穴を複数にすることによって、穴径が大きい場合と同等の透過損失特性となるかを調べるためである。

実験では、穴を 2 つ設ける際に、 $d = 12$ mm の穴が 1 つの場合と同じ面積となるように $d = 8.5$ mm の穴を 2 つ設けることとする。挿入管長さ $l = 300$ mm, $a = 100$ mm とする。Fig. 8 のように $d = 8.5$ mm の貫通穴を設けた挿入管を使用し実験を行うこととする。

Fig. 9 に Fig. 8 に示す挿入管を用いた場合の TL を表す。この結果より、穴が 1 つの場合の実験と、穴が 2 つの場合とでは同様の結果を示していることがわかった。穴を



(a) $d = 6$ mm, $l = 300$ mm, $a = 100$ mm.



(b) $d = 12$ mm, $l = 300$ mm, $a = 100$ mm.

Fig. 6 Transmission loss of expansion silencer using extended-tube with a hole.

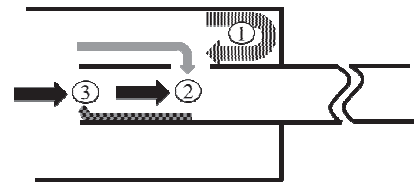


Fig. 7 Sound propagation model of expansion silencer using extended-tube with a hole.

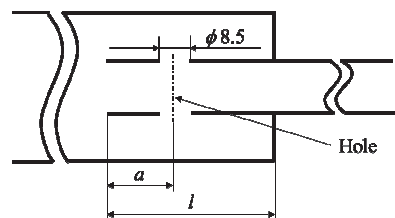


Fig. 8 Experimental model of expansion silencer using extended-tube with a though hole.

2 つ以上設けた場合でも、穴が 1 つの場合と穴の総面積が同じであれば、解析結果と TL の測定結果は同様の傾向を示すのではないかと推測できる。

以上の結果から、 TL で生じる比較的小さなピークについては、音響伝搬経路で共振、干渉を無視できない場合に生じる可能性が高くなった。ただし、どのような条件で共振が生じるのかについてはまだ説明できておらず今後明らかにすべき課題である。

4. まとめ

本論文では、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の等価回路に基づく解析結果の妥当性の検証を目的とし、透過損失測定実験を行った。その結果、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の等価回路に基づく解析結果と透過損失の測定結果が一致したことで、等価回路に基づく解析は概ね妥当であることを示した。

ただし、透過損失の測定実験において、等価回路解析で再現できていないピークが表れることがあった。挿入管に穴を設けることによって、等価回路解析では考慮していない音響伝搬経路ができたため、実験では透過損失にピークが生じた可能性がある。等価回路解析では想定外の共振、干渉が生じる条件は明確にはなっていないため、等価回路モデルの見直し等を行い、等価回路に基づく解析の有用性をさらに高めることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 福田基一, 奥田襄介: 騒音対策と消音設計, 共立出版 (1974).
- 2) M. L. Munjal : Acoustic of ducts and mufflers second edition , Jhon wiley and Sons (2014).

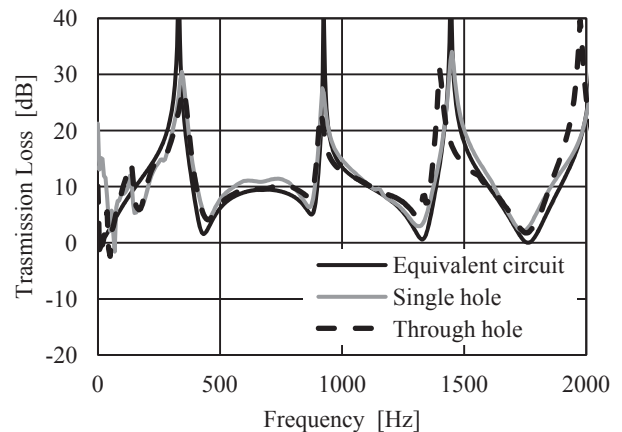


Fig. 9 Transmission loss of expansion silencer using extended-tube with a through hole.

- 3) D. A. Bies and C. H. Hansen : Engineering noise control, CRC Press, Chap.9 (2009).
- 4) 森下達哉, 高山峻: 並列接続線路で模擬される管路要素の音響特性解析, 第 27 回環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集, pp.65-68 (2017).
- 5) 高山峻, 森下達哉: 穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の音響特性解析, 東海大学紀要工学部, Vol.57, No.2, pp.23-28 (2017).
- 6) J. Y. Chung, and D. A. Blaser : Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory, The Journal of the Acoustical Society of America Vol.68, pp.907-913 (1980).
- 7) 雉本信哉, 下嶋浩: 能動的音響制御のための周波数領域適応アルゴリズム : 第 1 報,アルゴリズムの提案およびシミュレーション, 日本機械学会論文集(C編) Vol.61, No.589, pp.3581-3586 (1995).