

穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の音響特性解析

高山 峻^{*1} 森下 達哉^{*2}

Analysis of Acoustic Characteristics of an Expansion Silencer Using an Extended-Tube with Hole

by

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

(Received on Sep. 30, 2017 and accepted on Nov. 09, 2017)

Abstract

This paper describes the analysis of the acoustic characteristics of an expansion type silencer with extended-tube based on an equivalent circuit. The purpose of this study was to clarify the acoustic noise suppression mechanism of the combination of an expansion type silencer and extended-tube, and thus to design silencers based on the results. It is possible to model the acoustic characteristics of the expansion type silencer by a parallel network system. We investigated the transmission loss and the insertion loss of the expansion silencers with extended-tube. The results show that the calculated results based on the equivalent circuit and the experimental results have the same tendency. The results also show that the position of the hole in the extended-tube is an important factor affecting the transmission loss and insertion loss of the silencer.

Keywords: duct, silencer, equivalent circuit, transmission loss, insertion loss

1. はじめに

自動車の吸排気系や工場の排気系ダクトから発生する騒音の抑制には、従来からマフラーやサイレンサと呼ばれる、管路系消音器が用いられている。騒音抑制は法規上必須であるとともに、静粛性に対する社会的要請は年々高くなっていることから、消音器にはより高度な騒音抑制機能が求められている。

消音器に代表される管路系における騒音制御装置の音響特性評価に関しては、従来から等価回路に基づく解析が行われている^{1,2)}。近年では数値解析法を用いた音響特性解析が可能になっている³⁾。管路内を伝搬する騒音を平面波とみなせる場合には、等価回路に基づく解析は有用である。ただし、解析対象が等価回路で模擬できる構造や形状となっていることが必要となるため、騒音抑制装置の構造、形状が複雑な場合には適用が困難となる問題があった。

一方、消音器としては、管路に拡張室を設けた拡張室型消音器が広く使われている⁴⁾。拡張室型消音器の性能を改善するために、拡張室内への挿入管設置、隔壁設置による多段拡張室化、吸音材設置などが用いられている²⁾。本研究で対象とする挿入管つき拡張室内の音場に関する等価回路は、管路拡大部を表す線路に対して、挿入管周囲の空間を表す線路が並列接続されたものとして表

されることが知られている。挿入管つき拡張室型消音器の音響特性解析としては、挿入管周囲を分岐管として模擬したもの、BEM、FEMを使用し数値解析を行ったものがある^{3,5,6)}。

さらに、挿入管つき拡張室型消音器では、穴あき挿入管が用いられる場合がある。稼働中の産業用サイレンサ等で穴あき挿入管が用いられるなど、実用的にも広く使われている^{7,8)}。しかし、Fig.1に示す様な穴あき挿入管を用いた消音器内音場の等価回路に基づく解析例は行われていなかった。

以上を踏まえて本研究では、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器の消音メカニズムを明らかにして、消音器を設計可能とするために、穴あき挿入管を設置した拡張室型消音器の等価回路解析を行う。さらに、実験を行って解析結果の妥当性を検討する。

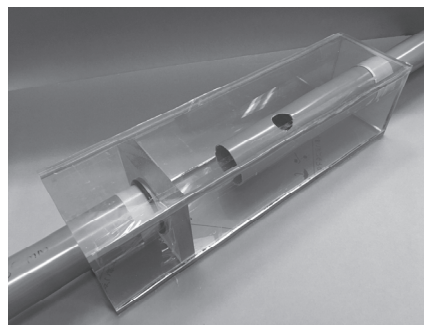


Fig.1 Expansion silencer using an extended-tube with hole.

*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

2. 管路内音場の等価回路解析

2.1 管路内音場の四端子定数

本論文では、等価回路モデルを用いて消音器の音響特性を調べる。本論文で扱う管路系の性質は、媒質は静止しており、音波の進行に際してエネルギーの損失を無視できるものとする。また、管路系の直径は、扱う音波の波長に比べ小さいものとし、管路内では平面波のみが伝搬するものとする。

管路内音場において、Fig.2(a)に示すように音源側の音圧、体積速度がそれぞれ P_i, U_i 、もう一方の終端側における音圧、体積速度がそれぞれ P_o, U_o で表されるものとする。管路両端の音圧と体積速度の関係は、 F パラメータという四端子定数 A, B, C, D を用いて、

$$\begin{pmatrix} P_i \\ U_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_o \\ U_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl & jZ_o \sin kl \\ j\frac{1}{Z_o} \sin kl & \cos kl \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_o \\ U_o \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される²⁾。この等価回路は Fig.1(b)に示す二端子対回路と呼ばれるものである。ここで、 $j(\sqrt{-1})$ であり、 $k(=2\pi f/c_o)$ は波長定数、 l は管路の長さ、 f は周波数、 c_o は音速、 $Z_o(=\rho c_o/S)$ は管路の特性インピーダンス、 ρ は媒質の密度、 S は管路断面積である。

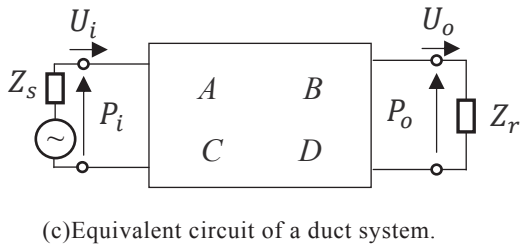
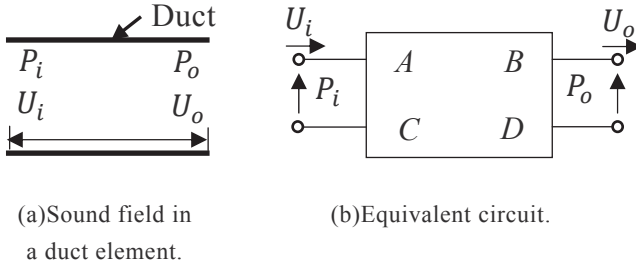


Fig.2 Equivalent circuit of sound field in a duct.

2.2 管路内に設置された要素の音響特性の評価

管路内に設置された騒音抑制装置の音響特性には、透過損失や挿入損失が用いられる。これらは等価回路に基づき求められる。騒音抑制装置を含む管路系の四端子定数 A, B, C, D とし、騒音抑制装置を含まない管路系の四端子定数を A', B', C', D' とおくと、挿入損失 IL は、Fig.2(c) に示す等価回路から、式(2)で表される。

$$IL = 10 \log_{10} \frac{W'}{W} = 10 \log_{10} \frac{|U'_o|^2}{|U_o|^2} = 10 \log_{10} \frac{|Z_r A + B + Z_s Z_r C + Z_s D|^2}{|Z_r A' + B' + Z_s Z_r C' + Z_s D'|^2} \text{ [dB]} \quad (2)$$

ここで、 Z_s, Z_r は音源のインピーダンス、管路出口の放射インピーダンスをそれぞれ表す。透過損失 TL は、式(2)において、 Z_s, Z_r が管路の特性インピーダンスと整合するものとし、 $A' = B' = 1, B' = C' = 0$ とおくことによって求められる。

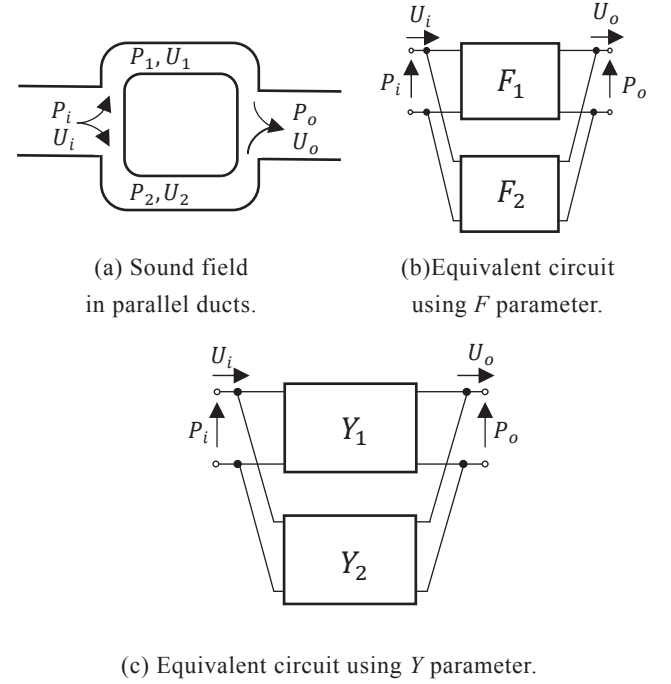


Fig.3 Equivalent circuit of a duct system with a plane to separate sound fields.

2.3 並列接続された管路内音場の四端子定数

Fig.1 に示す穴あき挿入管付き拡張室型消音器には干渉型消音器の要素が含まれている。拡張室の下流側の穴を設けたパイプ及び壁によって、サイドブランチ型消音器の要素と Fig.3(a) に示すような管路が分岐した後に再度合流するような並列ダクト系の要素があると考えられる。よって、はじめにこのダクト系の解析を行う必要がある。このダクト系における音場の等価回路は、Fig.3(b) に示すような線路の並列接続として表される。ただし、並列線路は F パラメータのままでは合成することができないため、Fig.3(c)に示す Y パラメータと呼ばれる四端子定数に変換をすることで合成が可能となる。四端子定数は、並列線路を構成する要素の Y パラメータの和として求められる⁹⁾。

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad (3)$$

Y_1, Y_2 は管路各要素の四端子定数 (F パラメータ) から変換して求められる。合成された Y パラメータを再度

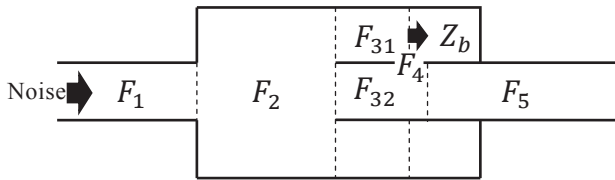
四端子定数 (F パラメータ) に変換することで、他の管路要素の四端子定数と同様に扱うことができる。

3. 穴あき挿入管つき拡張室型消音器の等価回路解析

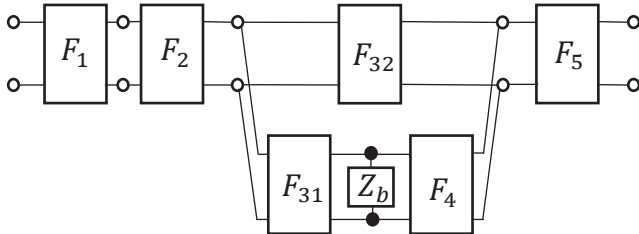
3.1 消音器のモデリング

本論文では、Fig.4(a) に示す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.4(b) のように置くこととする。ここで、図中の F_n ($n=1\sim5$) 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.4(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、穴なし挿入管つき拡張室型消音器の等価回路と同じものになる。



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



(b) Equivalent circuit of silencer.

Fig.4 Equivalent circuit of expansion type silencer with extended-tube.

3.2 減音特性の計算結果

並列接続を含む管路系音場の特性解析に等価回路解析を適用できることはこれまでに確認されている¹⁰⁾。その結果を利用して Fig.5 に示す構造を有する穴あき挿入管つき拡張室型消音器の等価回路解析を行う。

穴あき挿入管つき拡張室型消音器における穴あき挿入管の効果を調べるため、穴あけ位置および挿入管長さの音響特性に対する影響を検討する。ここで、Fig.5 に示す計算モデルにおいて、スピーカに接続される管路を入口管、他端の管路を出口管と呼ぶことにする。入口管、挿入管、出口管はいずれも直径 $d_o=56.4$ mm とする。拡張室については、直径 $d_e=135$ mm、長さ $L=400$ mm とする。

挿入管の穴径を $d=32$ mm とする。

挿入管長さ l を、 l/L が $3/4$, $1/2$, $1/3$ となるように $l=300$ mm, 200 mm, 133 mm とする。 l/L の値は分岐管の共振周波数および拡張室の共振周波数に基づき決定する。管端から穴までの距離 a を、 a/l が $1/2$, $1/3$, $1/4$ となるように決定する。 $l=300$ mm の場合には、 $a=150$ mm, 100 mm, 75 mm とする。 $l=200$ mm の場合には $a=100$ mm, 67 mm, 50 mm とし、 $l=133$ mm の場合には $a=67$ mm, 44 mm, 33 mm としている。

Fig.6(a)は $l=300$ mm の場合、(b)は $l=200$ mm の場合、(c)は $l=133$ mm の場合における透過損失 TL の計算結果をそれぞれ示す。Fig.6(a)~(c)より、挿入管つき拡張室では、挿入管周囲の空間の奥行き長さによって決まる周波数において、拡張室のみの場合に比べて TL が極めて小さくなった。また、Fig.6(a)~(c)において、穴あき挿入管つき拡張室では、穴あき部が挿入管周囲の空間への接続部となるため、 a の値が大きくなるにしたがって TL のピークが高周波数側に移動した。以上の特性を利用して適切な a の値とすることによって、拡張室のみの場合には TL が谷になる周波数域で TL を大幅に改善することが可能になる。

以上では、Fig.4(b)に示す等価回路から、 F_{31} や F_5 のパラメータを変更した場合の音響特性を検討した。同じく等価回路から、 F_4 のパラメータを変更することによっても穴あき挿入管つき拡張室型消音器の音響特性を調整できる可能性がある。

Fig.7 に $l=300$ mm, $a=150$ mm の穴あき挿入管の円孔部に $b=30$ mm の短い管を付加して F_4 を変化させた場合の TL の計算結果を示す。Fig.7 より、穴あき部に短管を設けることで、 $b=0$ mm の場合より TL のピークが低周波数側に移動した。

以上のことから、穴あき挿入管つき拡張室型消音器における挿入管の穴の位置や円孔部の形状変更によって TL のピーク周波数を変更可能である。このことは、騒音の性質に応じた減音特性の調整に有用な特徴であると著者らは考えている。

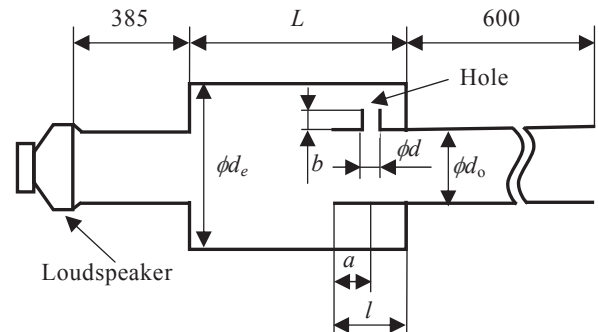
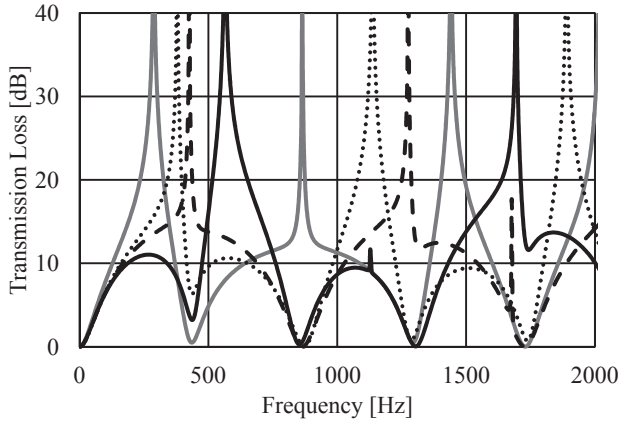
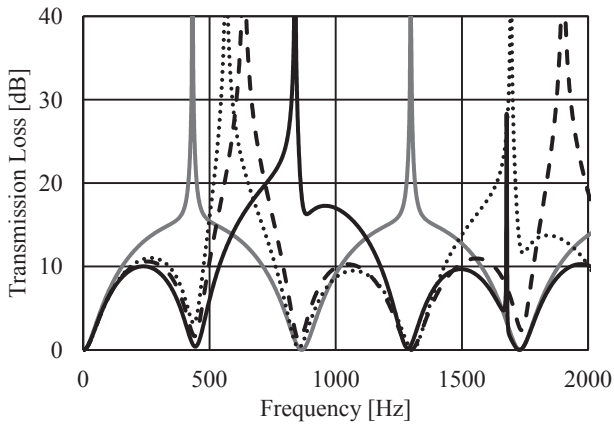


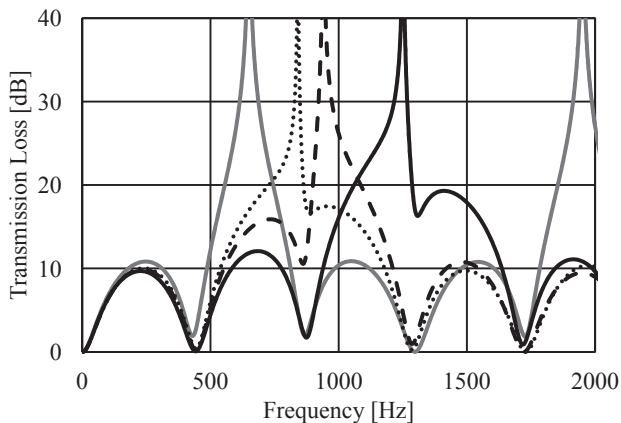
Fig.5 Calculated model of expansion silencer using extended-tube with a hole.



(a) $l=300$ mm : $a=150$ mm(solid line); $a=100$ mm(broken line); $a=75$ mm(dotted line); without hole (gray line).



(b) $l=200$ mm : $a=100$ mm(solid line); $a=67$ mm(broken line); $a=50$ mm(dotted line); without hole (gray line).



(c) $l=133$ mm : $a=67$ mm(solid line); $a=44$ mm(broken line); $a=33$ mm(dotted line); without hole (gray line).

Fig.6 Transmission loss of expansion type silencer with extended-tube.

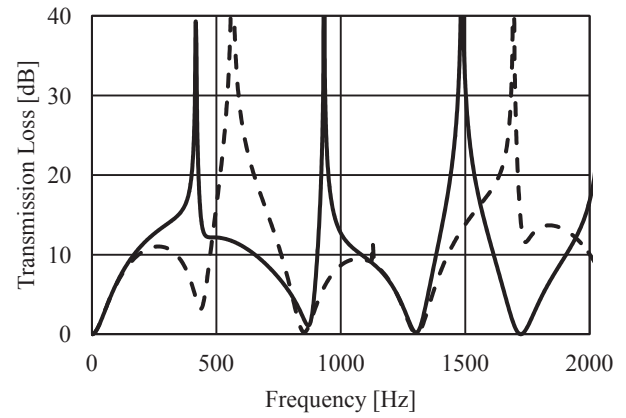


Fig.7 Transmission loss of expansion type silencer; extended-tube with flanged-hole (solid line); without flanged-hole (broken line).

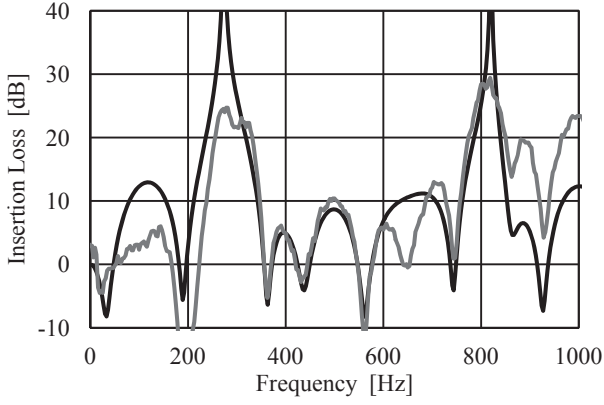
3.3 実験による検証

前節で明らかにした拡張室型消音器の減音特性について実験を行って比較検証を行う．計算においては，消音器単体の減音特性を明らかにするため透過損失 TL を用いた．挿入損失 IL では， TL の特性に加えて，入口側，出口側の管路の音響特性が含まれるため，見かけの周波数特性が複雑になるためである．また， TL の実測では，消音器入口側，出口側それぞれで管路内音圧の進行波成分を測定する必要がある．ただし，管路内音圧進行波成分の広帯域での検出には多点計測が必要となる．一方，管路終端からの放射音場の音圧を一点で測定することによって IL を求めることが可能である．以上より，実験においては， TL より比較的簡便に測定を行うことができる IL で減音特性を評価することとする．

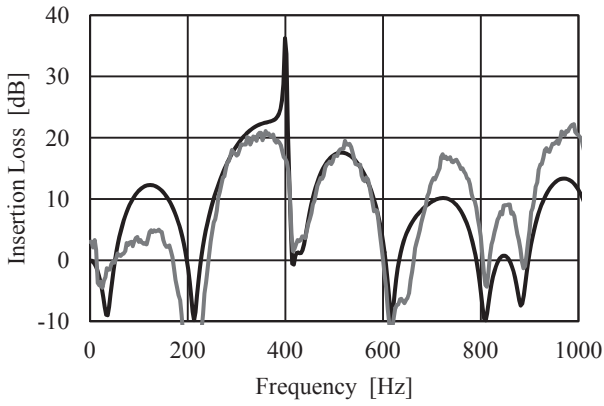
IL の評価実験では拡張室断面寸法を 120 mm $\times$ 120 mm とする．この断面寸法とすると計算における拡張室断面積とほぼ等しくなる．この断面寸法において平面波のみが伝搬する周波数の上限は約 1400 Hz であることを考慮して， 50 Hz $\sim$ 1000 Hz までの周波数範囲で IL を評価する．なお，消音器の周波数と減音特性との関係を検証することが目的のため，騒音源が平坦な周波数特性となるようにスピーカをランダム雑音で駆動する．

まず，Fig.5 に示す消音器を用いた IL の計算結果，実験結果を Fig.8(a) $\sim$ (c) に示す．なお，この場合の挿入管は穴なしである．Fig.8(a)では，挿入管長 $l=300$ mm，Fig.8(b)では $l=200$ mm，Fig.8(c)では $l=133$ mm としている．以上の結果から，計算結果と実験結果は同様の傾向を示した．

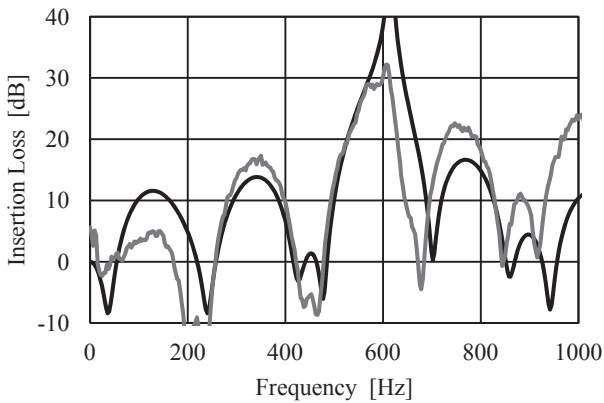
次に，穴あき挿入管つき拡張室型消音器の IL の計算結果および実験結果を Fig.9(a) $\sim$ (c) に示す．この場合も Fig.5 に示す消音器寸法を用いている．Fig.9(a)では $l=300$ mm，穴位置 $a=150$ mm， 100 mm，Fig.9(b)では $l=200$ mm， $a=67$ mm， 50 mm，Fig.9(c)では $l=133$ mm， $a=67$ mm， 44 mm としている．穴あき挿入管を用いた場合についても，計算結果と実験結果は同様の傾向を示した．以上から，穴あき挿入管つき拡張室型消音器の等価回路解析で得られた減音特性が妥当な結果であることが確認できた．



(a) $l=300$ mm: calculated (black line); measured (gray line).

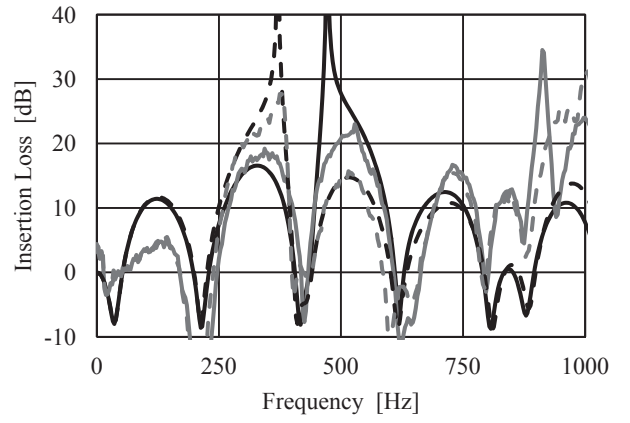


(b) $l=200$ mm: calculated (black line); measured (gray line).

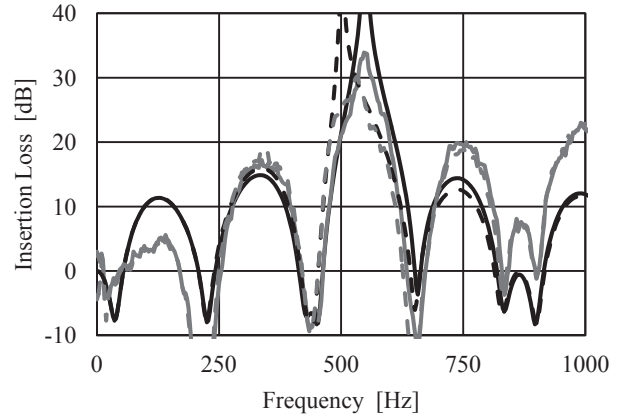


(c) $l=133$ mm: calculated (black line); measured (gray line).

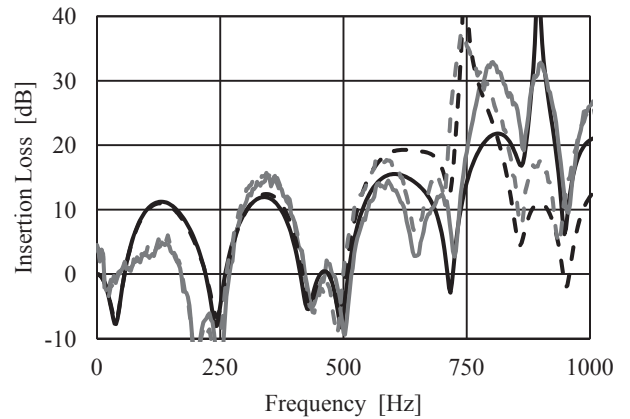
Fig.8 Insertion loss of expansion type silencer with extended-tube.



(a) $l=300$ mm: $a=150$ mm, calculated (black solid line); $a=150$ mm, measured (gray solid line); $a=100$ mm, calculated (black broken line); $a=100$ mm, measured (gray broken line).



(b) $l=200$ mm: $a=67$ mm, calculated (black solid line); $a=67$ mm, measured (gray solid line); $a=50$ mm, calculated (black broken line); $a=50$ mm, measured (gray broken line).



(c) $l=133$ mm: $a=67$ mm, calculated (black solid line); $a=67$ mm, measured (gray solid line); $a=44$ mm, calculated (black broken line); $a=44$ mm, measured (gray broken line).

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

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消音メカニズムを明らかにして、消音器を設計可能とするために、穴あき挿入管を設置した拡張室型消音器の等価回路解析を行い、本論文における解析結果の妥当性を実験にて検証を行った。その結果、穴あき挿入管を用いた拡張室型消音器では挿入管にあける穴の位置で消音効果が大きくなる周波数を比較的容易に変更できる特性を有することを明らかにした。計算モデルと同様の装置による結果は、計算結果と同様の傾向となることを示した。ただし、本論文では穴を1つのみ設けた場合のみ検証したため、より広い帯域での消音抑制は見込めていない。よって、今後は実験装置を見直し、透過損失を計測できる装置を用いて挿入管に穴を2つ以上設けた場合や、他の消音器構造についても検討を行い、解析結果の妥当性を検証することが課題である。

参考文献

- 1) M. L. Munjal : Acoustic of ducts and mufflers second edition , Jhon wiley and Sons (2014).
- 2) 福田基一, 奥田襄介: 騒音対策と消音設計, 共立出版, 8章, 9章 (1974).
- 3) Joseph W. Sullivan : A method for modeling perforated tube muffler components. I. Theory, Journal of the acoustical society of America Vol. 66, No.3, pp.772-778 (1979).
- 4) D. A. Bies and C. H. Hansen : Engineering noise control, CRC Press, Chap.9 (2009).
- 5) F. Piscaglia, A. Montorfano, A. Onorati : Development of a non-reflecting boundary condition for multidimensional nonlinear duct acoustic computation, Journal of Sound and Vibration Vol. 332, pp.922-935 (2013).
- 6) Xiang Yu, Li Cheng :Duct noise attenuation using reactive silencer with various internal configurations, Journal of Sound and Vibration Vol. 335, pp.922-935 (2015).
- 7) Rong Guo, Wen-bo Tang :Transfer matrix methods for sound attenuation in resonators with perforated intruding inlets, Applied Acoustics Vol. 116, pp.14-23 (2017).
- 8) 池田達裕, 西村強, 安藤忠, 宇佐川毅, 江端正直 : 孔あきパイプを有するだ円空洞マフラーの共振, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-A, No.11, pp.1483-1491 (1998).
- 9) 佐川雅彦, 辻井重雄 : 基礎回路解析, 共立出版, 5章 (1978).
- 10) 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).