

境界構造による音波伝搬制御の基礎検討

本多 友紀^{*1} 森下 達哉^{*2}

A Basic Study of Sound Wave Propagation Control by Boundary Structure

by

Yuki HONDA^{*1} and Tatsuya MORISHITA^{*2}

(Received on Apr. 14, 2021 and accepted on Jul. 8, 2021)

Abstract

The purpose of this paper is to reduce the area exposed to noise by controlling the propagation direction of noise, in addition to suppressing noise energy by optimizing the boundary structure. Numerical simulations of the sound field characteristics radiated from the waveguide were performed for each of the cases where the waveguide was provided with a tapered termination, a termination with sound-absorbing materials, and a termination with an acoustic metamaterial. The simulation clarified the radiated acoustic energy characteristics and directivity characteristics when each termination was used. A future task is to integrate the characteristics of various boundary structures.

Keywords: Acoustic radiation, Directivity, Absorbing material, Acoustic metamaterial, Waveguide

1. はじめに

内燃機関や空調・換気システムにおける吸排気ダクト系では、受動的な騒音抑制法が主流となっている¹⁻³⁾。受動的騒音抑制には、断面積変化部によって音響インピーダンスの不連続部を作ることによって生じる、音波の反射や干渉、共鳴を利用する方法がある⁴⁾。また、繊維系材料⁵⁾や微細多孔板⁶⁾などによる吸音効果を利用する方法がある。

ダクト系騒音は、多くの場合有限長ダクト内を騒音が伝搬し大気中に放射される問題となっている。ダクト系騒音の対策においては、騒音抑制デバイスの音響的特性のみならず、騒音抑制デバイス前後の通常のダクト部の音響的特性を考慮に入れて計画立案することが重要であると指摘されている⁷⁾。

騒音対策では、騒音の低周波成分の抑制が検討対象とされるため、ダクト直径に対して波長が十分に長いことを仮定して、ダクト内を平面波のみが伝搬するとして検討がなされている。ダクト系全体の音響特性を考慮する際には、ダクト終端部の音響インピーダンスを明らかにすることで、ダクト内部の音響特性を明らかにできる。さらに、ダクト終端部から大気中に放射される騒音のエネルギー量も求めることができる。以上のように、ダクト系騒音の抑制について、ダクト系全体の音響的特性を考慮した騒音抑制デバイスの検討がなされている⁷⁾。

しかしながら、現実の騒音対策では、騒音のエネルギーを十分に抑制できないこともある。騒音のエネルギーを

抑制するだけでなく、騒音を特定方向に限定して放射するように制御することができれば、騒音に暴露される領域を減少させ、騒音による被害を軽減可能と考えられるが、そのような検討はこれまでなかった。

以上をふまえて本研究では、ダクト系騒音の抑制効果のさらなる改善のため、騒音抑制デバイスの性能を維持しつつ、大気中への騒音放射方向を適切に制御することができるダクト終端部の構造を見出すことを目標としている。検討する終端部構造としては、均一な断面だけでなく、テーパ状やホーン形状、ダクト終端部に吸音材を設置した場合の音響伝搬特性について検討する。また、扱う音の波長に比べて短い周期構造を有する音響メタマテリアルと呼ばれる音響材料が近年着目されている^{8,9)}。音響メタマテリアルは、騒音エネルギーの抑制や音波進行方向の変更に用いられた例がある。本研究においては、ダクト終端部に音響メタマテリアルを設置する場合の音響伝搬特性についても検討する。

2. 境界構造による伝搬特性の変化

2.1 音響特性の計算

本研究では、ダクト状空間の終端部境界構造を変更する場合の、放射音響エネルギー特性及び大気中での音波伝搬特性について計算コストを過度に増大させることなく基礎的検討を行うため、音場を2次元空間として扱う。

音場を記述する連続の式と運動方程式に基づいて、差分法を用いて音圧と粒子速度を計算する。なお、本論文においては、吸音材を含む空間内の音場を対象とする。音圧 p 、粒子速度ベクトルを $\mathbf{q}=[q_x, q_y]$ と表すことにする。このとき吸音材を含む2次元空間内の音場について

^{*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専攻教授

の連続の式及び運動方程式が以下の式で表される．

$$\frac{\sigma}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\sigma} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + R_f \mathbf{q} + \nabla p = 0. \quad (2)$$

ここで c は音速を表す． σ ($0 < \sigma \leq 1$) は媒質の多孔度を表す係数であり， σ が 1 に近いほど媒質中での空気の割合が高く，多孔質材料の充填率が小さいことを表す．

R_f は，多孔質材料の単位厚さあたりの流れ抵抗を表す．多孔質材料は一般には不均質であるものの簡単のため， σ ， R_f は空間的に均一であり，時間的には変化しないものとする．なお，媒質が空気の場合には $\sigma=1$ ， $R_f=0$ である．式(1)，(2)を中心差分近似することで空間内の音圧，粒子速度を逐次的に求めるための更新式が導かれる¹⁰⁾．以上により，空間内音場の音圧及び粒子速度を計算して，ダクト状空間からの放射音響エネルギーと空間内での音波伝搬特性を調べる．

2.2 計算モデル

本論文における数値シミュレーションで用いる計算モデルを Fig. 1 に示す．計算対象の空間は，一辺が 18 m の正方形としている．計算モデル下部に高さ 4 m の剛体部を設け，幅 $d=0.1$ m の空間を設ける．以下，本論文ではこの空間部分を導波路と称する．幅 d の導波路に面する剛体壁上それぞれに音源を配置する．どちらの音源も，壁面上 $y=1$ m の位置を中心として 40 mm の範囲に壁面に垂直な y 軸方向の粒子速度成分のみを発生させる．対抗する音源で発生する粒子速度が，互いに同振幅， y 軸方向について互いに逆方向に伝搬するように，2 つの音源を駆動し導波路内に音波伝搬を生じさせる．音源駆動には，1 ショットパルス信号を用いて，周波数特性を求めることができるようにしている．

計算においては，空間格子刻みを 0.2 m，時間刻み 20 μ s として計算の安定性を確保している．計算モデルの周囲

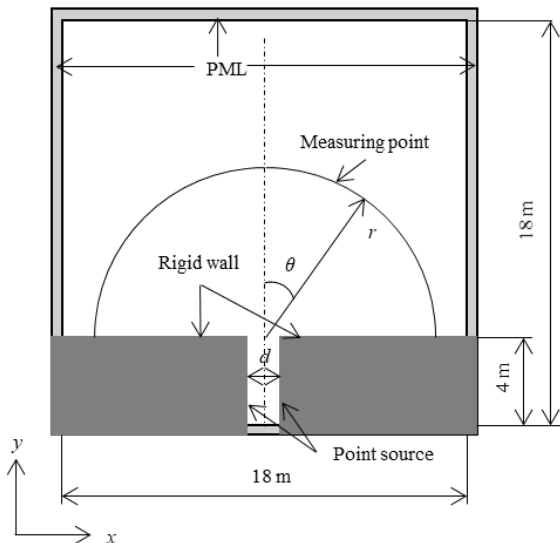


Fig. 1 Sound field model for numerical simulation.

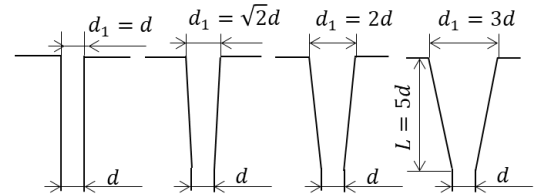
には，計算打ち切り部における数値的な音波の散乱を防ぐため，Perfectly Matched Layer と呼ばれる吸収境界¹¹⁾を設ける．

2.3 境界構造の変更

2.3.1 テーパー状終端

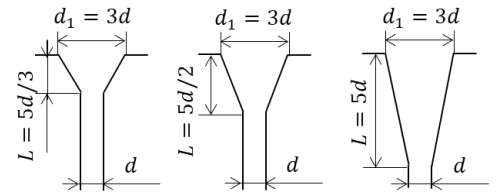
平面波とみなせる音波がダクト内を伝搬するとき，ダクト終端に近づくにつれて徐々にダクト面積が拡大するテーパ管とすることによってダクト終端部での音響インピーダンスとダクトの特性インピーダンスとが整合し，音波の放射効率が向上することが知られている．その他にも，導波路終端をホーンと呼ばれる形状にすることによって，ダクト終端からの音響エネルギーの放射効率が向上することが知られている¹²⁾．

本論文では，まず，音波の伝搬経路をテーパ形状とする場合の音響特性を検討する．Fig. 2, Fig. 3 に示す計算モデルは，2 次元空間内でテーパ管を模擬した導波路形状としている．まず，音響放射特性に対する導波路終端部寸法の拡大率の影響を調べるため，Fig. 2 に示すように，断面積変化区間長 L を同一として，導波路終端幅 d_1 を変化させる場合の，放射音響パワー及び放射音の指向特性を計算する (Model 0, 1, 2, 3)．



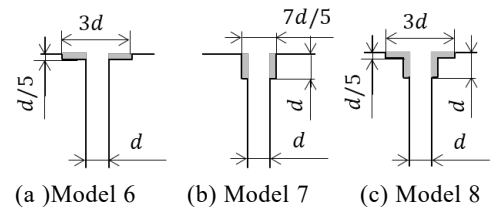
(a) Model 0 (b) Model 1 (c) Model 2 (d) Model 3

Fig. 2 Tapered waveguide model (1)



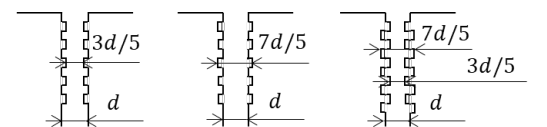
(a) Model 4 (b) Model 5 (c) Model 3

Fig. 3 Tapered waveguide model (2)



(a) Model 6 (b) Model 7 (c) Model 8

Fig. 4 Waveguide model terminated with absorbing materials



(a) Model 9 (b) Model 10 (c) Model 11

Fig. 5 Waveguide model terminated with acoustic metamaterials

次に、音響放射特性に対する導波路終端部の寸法変化率の影響を調べるため、Fig. 3 に示すように、導波路終端幅 d_1 を固定し、断面積変化区間長 L を変化させる場合の、放射音響パワーレベル及び放射音の指向特性を計算する (Model 3, 4, 5)。

2.3.2 吸音材付加

ダクト終端部の反射特性の決定要因となるのは、ダクト終端部での音波の回折現象であると考えられる。回折現象は、ダクト終端のエッジ部で生じる。ダクト終端形状を変化させるのは、ダクト終端部における回折現象に変化をもたらす効果もあると考えられる。ダクト終端部に吸音材を設置することによってもダクト終端部の回折現象を変化させることが可能と考えられ、音波の放射特性を制御できる可能性がある。

本論文では、Fig. 4 に示すように導波路終端に吸音材を設置する場合の、放射音響パワーレベル及び放射音の指向特性を計算する (Model 6, 7, 8)。

2.3.3 音響メタマテリアル付加

扱う音の波長に比べて短い周期の構造体を有する音響メタマテリアルと呼ばれる音響材料が近年着目されている。薄板による遮音特性を改善する効果や音波の伝搬方向を変更する効果が示されている。

本論文では、消音器が設置されたダクト系に音響メタマテリアルを付加する効果を調べるため、Fig. 5 に示すような音響メタマテリアルを導波路に設置する場合の放射音響パワーレベル及び放射音の指向特性を計算する。

Fig. 5 (a) に示す Model 9 は、導波路内に高さ $d/5$ の突起が間隔 $d/5$ で周期的に設置されているモデルである。Fig. 5 (b) に示す Model 10 は、導波路壁面から深さ $d/5$ の溝が間隔 $d/5$ で周期的に設けられているモデルである。Fig. 5 (c) に示す Model 11 は、Model 9 と Model 10 とを合わせた形状となっており、突起先端部と溝底部との間の長さが $2d/5$ となっている構造物が、間隔 $d/5$ で設けられるモデルである。

3. 計算結果

3.1 放射音圧分布

導波路幅を変化させる場合の空間内での音波の伝搬特性を調べるため、音波発生後の音圧分布の伝搬状況を可視化する。可視化結果については、均一な d の導波路からの放射音場特性との比較を行うことによって、その特徴を調べる。まず、Fig. 6 (a) は、Fig. 2 (a) に示す均一な d の導波路モデル Model 0 を用いた場合の放射音圧分布の時間経過である。音源による音波生成開始を $t=0$ ms として、 $t=18$ ms, 27 ms, 36 ms における音圧分布を表示している。導波路から、同心円状に空間内に伝搬する様子が認められる。

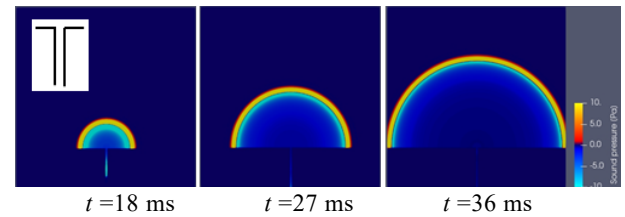
Fig. 6 (b) は、Fig. 2 (d) に示すテーパ状の導波路モデル Model 3 を用いた場合の放射音圧分布の時間経過である。Model 0 の結果と比べて音圧振幅が広範囲に渡って

大きくなっており、放射音響エネルギーが増大していることが示唆される結果となっている。放射音響エネルギー量については次節で数値的に検討する。

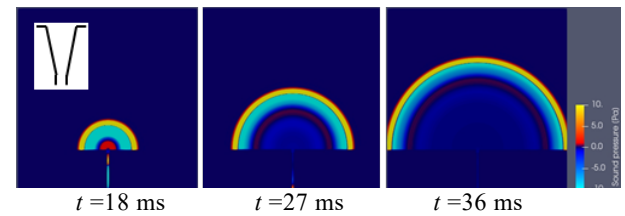
Fig. 6 (c) は、Fig. 4 (c) に示す、導波路終端に吸音材を設置した Model 8 を用いた場合の放射音圧分布の時間経過である。導波路に吸音材を設置した場合には、Fig. 6 の他の結果と比べて、音圧振幅が小さくなった。

Fig. 6 (d) は、Fig. 5 (c) に示す導波路終端部に音響メタマテリアルを設置した Model 11 を用いた場合の放射音圧分布の時間経過である。音響メタマテリアル部では、凹凸のある構造によって反射波が生じ、放射音圧は、入射パルス波形に反射波が重畳された時間領域波形となる。Fig. 6 (d) の結果では、進行波先頭部の後で音圧が振動している様子が認められる。さらに時間が経過すると反射波は減衰し、音圧の振動が減少することを確認している。

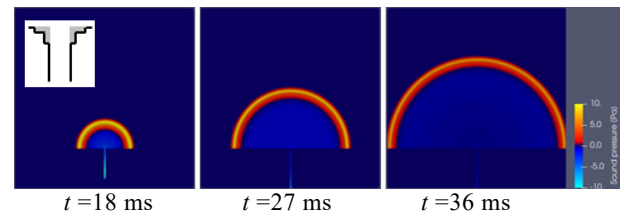
Fig. 6 の結果から、導波路終端構造の違いによって、放射音響特性が異なることが明らかとなったため、次節では、放射音響エネルギー及び放射音の指向特性について定量的検討を行うことにする。



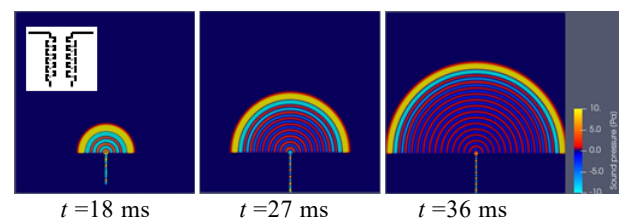
(a) Straight waveguide (Fig. 2 (a) Model 0)



(b) Slanting waveguide (Fig. 2 (d) Model 3)



(c) Waveguide with absorbing material (Fig. 4 (c) Model 8)



(d) Waveguide with acoustic metamaterial (Fig. 5 (c) Model 11)

Fig. 6 Time history of sound pressure radiation from the waveguide outlet.

3.2 放射音響エネルギーと放射音の指向特性

音圧分布の可視化結果から明らかになった、導波路の終端形状の変更や音響的材料の付加といった構造変更による放射音特性の変化を定量的に調べるため、放射音響エネルギー量を表す放射音響パワーレベル及び放射音の指向特性を調べる。本論文では、求める放射音響パワーレベルの基準値を Model 0 の導波路から放射される音響パワー W_0 とする。導波路から放射される音響パワーが W のときの放射音響パワーレベル ΔL は、

$$\Delta L = 10 \times \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

で求められる。

まず、導波路終端をテーパ状とし、導波路終端幅 d_1 を変化した場合 (Model 1, 2, 3) の放射音響パワーレベル周波数特性を Fig. 7 に示す。導波路終端幅 d_1 拡大とともに放射音響エネルギーが増加する。導波路終端幅 d_1 の増加とともに導波路終端部での反射が減少した結果、放射音響エネルギーが増加したものと考えられる。Fig. 8 に放射音の指向特性を示す。Fig. 8 (a) が 500 Hz 成分, Fig. 8 (b) が 800 Hz 成分, Fig. 8 (c) が 1250 Hz 成分の結果である。比較的低い周波数では、導波路出口から全方向に均一な音圧分布となった。周波数が高くなるに従い、導波路終端幅 d_1 が大きい場合に、 0° 方向の音圧レベルが大きくなる傾向が顕著になった。

次に、テーパ形状の変化区間長 L を変化した場合 (Model 3, 4, 5) の放射音響パワーレベル周波数特性を Fig. 9 に示す。周波数振幅特性については、400 Hz 以下で最大で 2 dB 程度異なる周波数帯があるものの、導波路終端部の幅が同一のため、放射音響パワーレベルについてはほぼ同様な値となった。Fig. 10 に示す、放射音の指向特性についても、導波路終端幅 d_1 が同じ値のため、異なるレベルとなる方向があるものの、その差は 3 dB 未満である。以上のことから、導波路終端幅の変化による放射音の指向特性への影響が認められるものの、導波路テーパ形状の変化区間長の変化による、放射音響エネルギー及び放射音の指向特性への影響は僅かであることがわかった。

続いて、Fig. 11 に導波路終端部に吸音材を設置した場合 (Model 6, 7, 8) の放射音響パワーレベル周波数特性を示す。Model 6 の吸音材配置では、放射音響パワーレベルの減少量は 4 dB 未満であった。一方の Model 7 の吸音材配置では、300 Hz~1100 Hz で 10 dB 以上の減少量となった。この結果から明らかなように、導波路内部に吸音材を設置すると、放射音響エネルギーが大幅に減少する。吸音材の吸音効果は、音場の粒子速度振幅に比例するためである。Model 8 の吸音材配置では、Model 7 の場合と同様の結果となった。これも導波路内部の吸音材による放射音響エネルギーの減少が支配的であることを裏付ける結果となっていると考える。

Fig. 12 に放射音の指向特性を示す。比較的高い周波数では、Model 6, 8 を用いた場合に、Model 0, 7 における放射音の指向特性とは異なる傾向を示した。Model 6, 8 の

ような吸音材配置では、放射音響エネルギーを減少させる働きは認められないものの、導波路終端と外側において、回折波を減衰させる働きによって、放射音の指向特性に差異が生じたものと著者らは考えた。

Fig. 13 に、音響メタマテリアルを導波路終端に設置した場合 (Model 9, 10, 11) の放射音響パワーレベルの周波

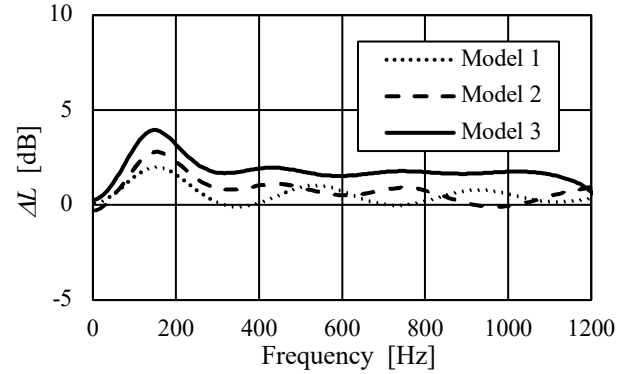
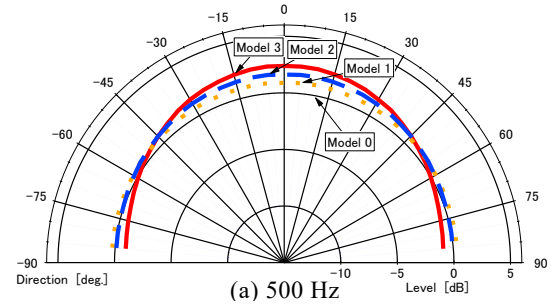
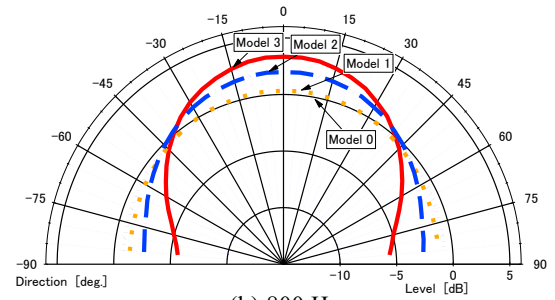


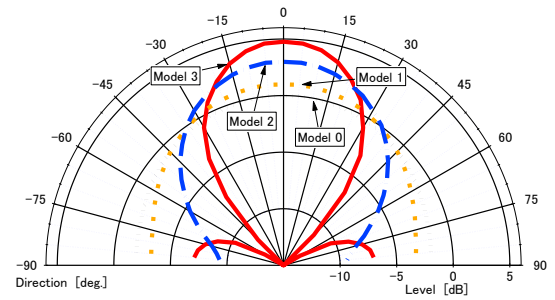
Fig. 7 Frequency characteristics of acoustic power levels of radiated sound from the Model 1, 2, 3



(a) 500 Hz



(b) 800 Hz



(c) 1250 Hz

Fig. 8 Directivity characteristics of sound pressure levels of radiated sound from the Model 1, 2, 3.

数特性を示す。Model 11 の構成では、放射音響パワーレベルが 620 Hz～970 Hz で 10 dB 以上、最大で約 50 dB 減少した。これは、構造物部分が共鳴器として作用し、さらに共鳴器が多数設置されているために減少量及び減少帯域幅ともに大きくなったと考えられる。構造物先端部と溝底部との間の長さがおおよそ 1/4 波長に相当する周波数において、放射音響パワーレベルが大幅に減少した。他の Model 9, 10 では、解析対象周波数において放射

音響パワーレベルの著しい増減は観測されなかった。Model 11 での結果や構造物寸法から類推すると、解析対象周波数域より高周波数側で共鳴が生じるものと予測される。最後に、Fig. 14 に放射音の指向特性を示す。導波路終端幅 d_1 の値が指向特性を決定するパラメータとなっていることがこれまでの検討で明らかになっている。音響メタ材料を導波路終端部に設置しても、導波路終端幅 d_1 を変更することにはなっていないため、音圧レ

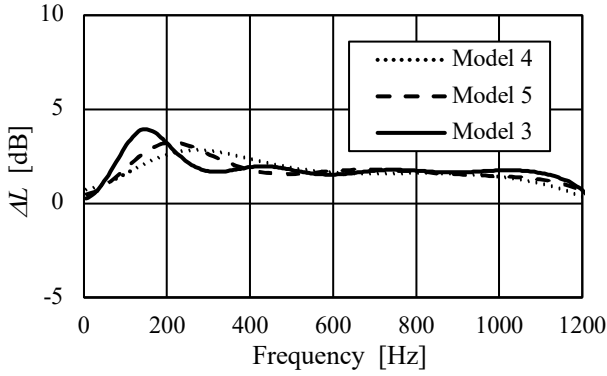


Fig. 9 Frequency characteristics of acoustic power levels of radiated sound from the Model 3, 4, 5.

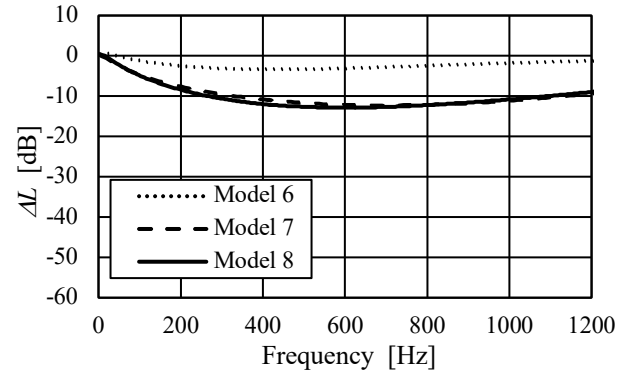


Fig. 11 Frequency characteristics of acoustic power levels of radiated sound from the Model 6, 7, 8.

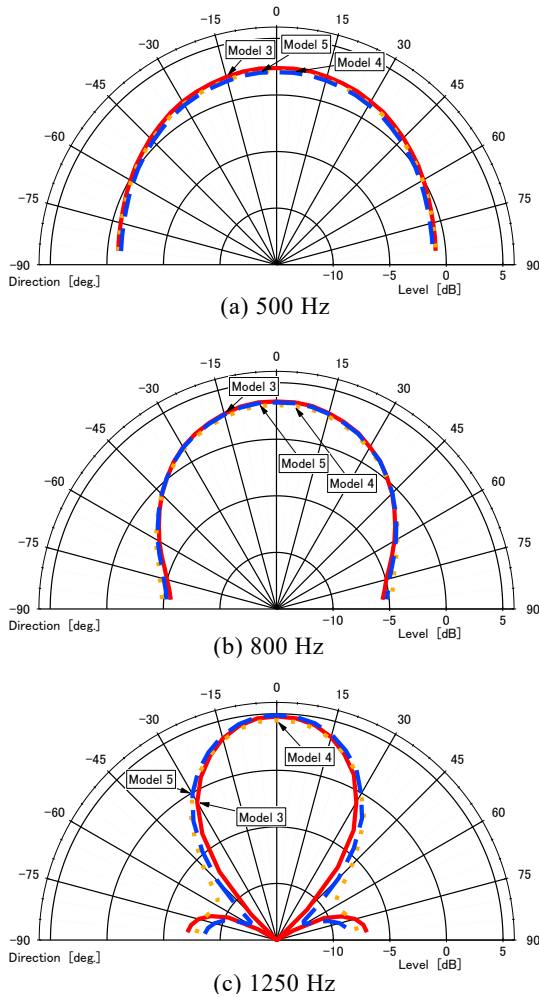


Fig. 10 Directivity characteristics of sound pressure levels of radiated sound from the Model 3, 4, 5.

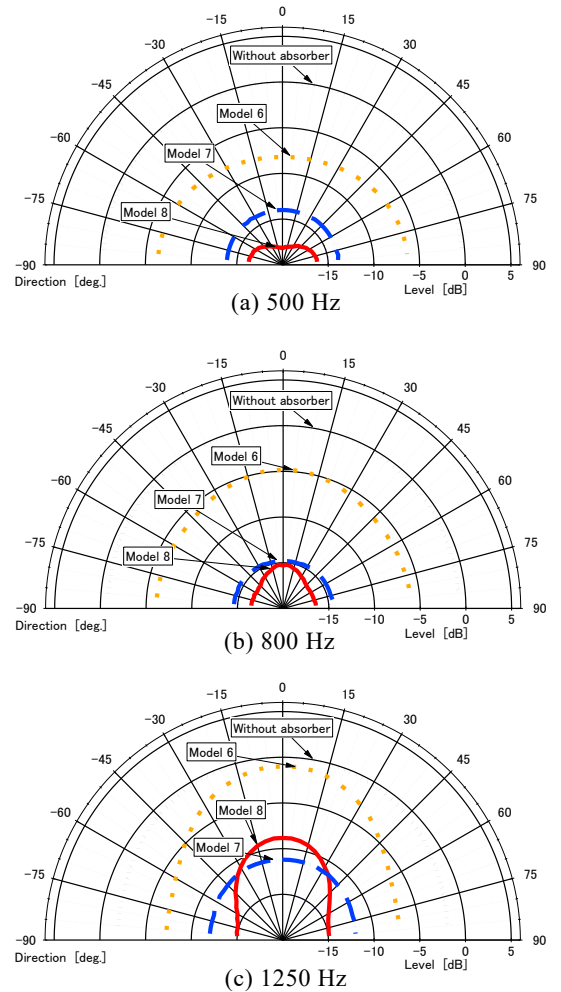


Fig. 12 Directivity characteristics of sound pressure levels of radiated sound from the Model 6, 7, 8.

ベルの増減はあるものの、放射音の指向特性については、Model 0 の場合と同様に全方向に均一な音圧レベル分布となった。以上の結果から、導波路終端部に音響メタマテリアルを設置すると、構造体の寸法を適切に選べば、所望する周波数で放射音響エネルギーを抑制可能ということがわかった。空間内に流れがあるような場合には、構造体が音源になることもあるため、構造体の寸法を無制限に決定できることは多くないと考えられるものの、

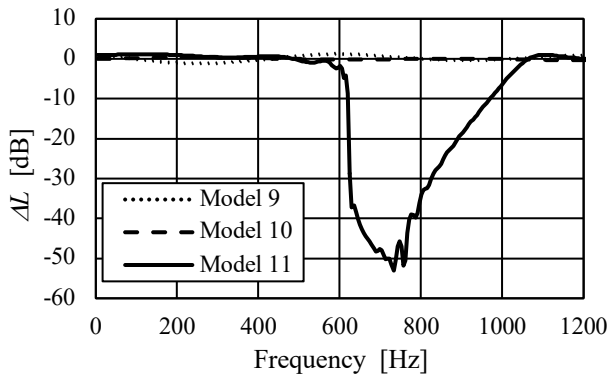


Fig. 13 Frequency characteristics of acoustic power levels of radiated sound from the Model 9, 10, 11.

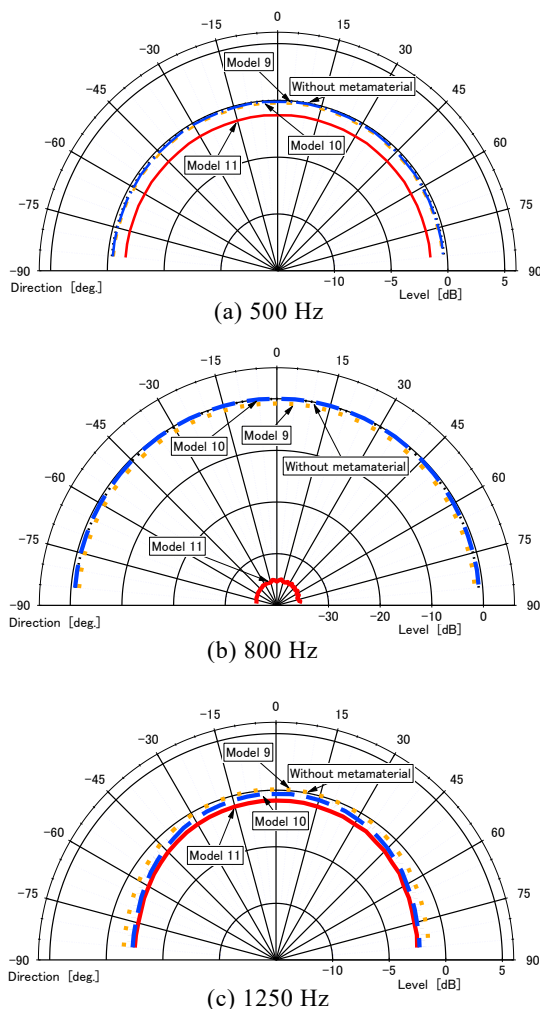


Fig. 14 Directivity characteristics of sound pressure levels of radiated sound from the Model 9, 10, 11.

構造体寸法を大きくすれば低周波数域で放射音響エネルギーの抑制が可能である。また、寸法の異なる構造体を複数用いると、広い周波数域で音響放射エネルギーの抑制の可能性もある。

4. まとめ

本研究では、ダクト系における騒音抑制効果のさらなる改善のため、騒音抑制デバイスの性能を維持しつつ、大気中への騒音放射方向を適切に制御することができるダクト終端の構造を見出すことが目標である。本論文では、その基礎検討として、導波路終端部構造を変化させた場合の放射音響エネルギー及び放射音の指向特性を検討した。

その結果、テーパ状導波路終端によって、主流部より終端部導波路境界壁間距離を拡大すると、放射音響エネルギーは増加する。境界壁間距離拡大寸法と音波の波長が同程度になると、放射音圧レベルは全指向特性ではなくなる。音響メタマテリアルを設けた場合には、音響メタマテリアル部寸法で決まる周波数において共鳴現象が生じることによって、放射音響エネルギーが減少する。導波路終端部に吸音材を設置する場合には、その吸音効果によって放射音響エネルギーが減少することに加えて、終端での回折を抑制することによって放射音の指向特性を変更し得ることが示唆された。

最後に今後の課題を述べる。本研究では、直交格子を用いた導波路形状を模擬し数値シミュレーションを行った。導波路終端としては、テーパ形状に加えて、ホーン形状も用いられる。さらに終端部を曲面で構成することもある。以上のような形状を直交格子で扱うことは困難なため、埋め込み境界法¹³⁾と呼ばれる手法などを用いて、扱う構造物形状の自由度を増すとともに、本論文で扱ったものとは異なる形状の音響メタマテリアルについても検討を行う。また、計算モデルと同様の形状を有する装置による実験を行って、計算結果の検証を進める。

参考文献

- 1) 奥田襄介, 福田基一: 騒音対策と消音設計, 共立出版 (1973).
- 2) I. L. Ver and L. L. Beranek: Noise and vibration control engineering second edition, John Wiley & Sons (2006).
- 3) D. A. Bies and C. H. Hansen: Engineering noise control fourth edition, CRC Press (2009).
- 4) 安田仁彦: 機械音響学, コロナ社 (2004).
- 5) 山口誉夫, 津川純一, 榎本秀喜, 黒沢良夫: 固有ベクトルを重み係数とした減衰寄与度を用いた三次元空間内への吸音材の配置, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.74, No.747, pp.30-36 (2008).
- 6) 山極伊知郎: 微細多孔板防音壁, 可視型山形防音壁, 騒音制御, Vol.36, No. 6, pp.410-414 (2012).
- 7) M. L. Munjal: Acoustics of ducts and mufflers second edition, John Wiley & Sons (2014).

- 8) John P. Holikamp and Fabio Semperlotti: Application of fractional order operators to the simulation of ducts with acoustic black hole terminations, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 476, 115316 (2020).
- 9) A. Pelat, F. Gautier, S. C. Conlon and F. Semperlotti: The acoustic black hole: A review of theory and applications, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 465, 115035 (2020).
- 10) 森下達哉, 青木琢哉, 多氣昌生: 時間領域差分法を用いた多孔質材料の音響特性解析. *日本音響学会誌*, Vol.59, No.2, pp.63-69 (2003).
- 11) Q. H. Liu and J. Tao: The perfectly matched layer for acoustic waves in absorptive media, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 102, pp. 2072-2082 (1997).
- 12) 岸憲史, 久保田秀美, 吉川茂: 楽器の物理学, 丸善出版, 8 章 (2014).
- 13) 原田基至, 玉置義治, 高橋悠一, 今村太郎: 直交格子法における埋め込み境界法と Cut-Cell 法の比較-壁関数を用いた乱流解析-, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 講演番号 B07-1 (2015).