九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ヘルムホルツ共鳴器の頸部延長による低音域用薄型吸音構造

金子, 芳人
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 | 大和ハウス工業株式会社

川上, 徹晃
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

川口, 卓郎
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

藤本, 一壽
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

https://doi.org/10.15017/1462165

出版情報：都市・建築学研究. 24, pp.73-77, 2013-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第24号，2013年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.24, pp. 73～77, July. 2013

ヘルムホルツ共鳴器の頸部延長による低音域用薄型吸音構造

Thin absorptive structure in low frequency by extending the neck of Helmholtz resonator

金子芳人*，川上徹晃**，川口卓郎**，藤本一壽***
Yoshito KANEKO, Tetsuaki KAWAKAMI, Takuro KAWAGUCHI and Kazutoshi FUJIMOTO

It is well known that a large air space is needed when we absorb sound in low frequencies by using porous material and many types of resonator are needed when we apply resonator absorber to absorb sound in low frequencies. Therefore, both porous material and resonator absorber are neither realistic nor practical for use of absorbing walls or ceilings in small room such as a living room in a house. On the above aspect, sound absorption characteristics of resonator absorber by extending the neck of resonator inside the cavity of it to thin the structure and by combining several types of resonators to expand the absorbing frequencies are examined by numerical simulation based on FDTDM and the experiment of tube method. As a result, it is found that extending the neck of resonator inside the cavity is effective to decrease absorbing frequency of resonator and combining several types of resonators provides multiple absorbing frequencies. This suggests that extending the neck of resonator and combining several types of resonators are effective for a thin absorptive structure in low frequencies.

Keywords : *Helmholtz resonator, Sound absorption, FDTDM*
ヘルムホルツ共鳴器，吸音，時間領域差分法

1. はじめに

近年，一般家庭にもシアタールームやリスニングルームが普及しつつある．リスニングルームのような小空間では低音域におけるブーミングなどの音響障害が発生しやすいため，それを防止するために低音域の吸音が必要となる．多孔質型吸音材で低音域を吸音するには大きな背後空気層が必要となるため，小さな部屋では空間を圧迫してしまう．またヘルムホルツ型共鳴器を用いる場合は，単一共鳴器は狭帯域の周波数でしか吸音効果がないため多種類の共鳴器を多数設置しなければならず，小さな部屋では実用的ではない．

そこで本研究では，共鳴器の構成要素である頸部を共鳴器内部へ延長することで共鳴器を薄型化し，さらに複数の共鳴器を組み合わせることで吸音域の広帯域化を図ることができるのではないかという考えから，共鳴器の頸部延長と複合化が共鳴器の吸音特性へ及ぼす影響について検討した．また，共鳴器内部に配置した多孔質材による吸音特性への影響を把握して多孔質材を適切な位置に配置することにより共鳴器の性能向上が図れるのではないかという考えから，多孔質材の配置が吸音特性へ及ぼす影響についても検討した．

本研究で扱う吸音構造の大きさは，リスニングルームなどの比較的小さな部屋に適用することを想定して，頸部延長の検討では，縦横200 mm×200 mm，厚さ22 mmとし，多孔質材の配置の検討では，直径100 mm，厚さ124 mmと144 mmの2ケースとした．また検討する吸音性能の周波数は50～1,600 Hzとした．

本論文では，上に述べたヘルムホルツ型共鳴器について，共鳴器の頸部の長さを系統的に変化させて，形状と吸音特性の関係について検討し，吸音周波数の広帯域化が可能であるかを考察した．また，共鳴器内部に配置する吸音材の位置を変化させ，吸音域の広帯域化が可能であるかを

*　空間システム専攻 (現 大和ハウス工業株式会社)
**　空間システム専攻 修士課程
***　都市・建築学部門

考察した．このような多数の吸音構造の吸音特性を実験的に検討することは困難であるため，時間領域差分法 (以下 FDTDM) [1] を用いた波動数値解析によって吸音構造の吸音特性を解析した．

2. ヘルムホルツ型吸音構造の吸音特性の解析

2.1 解析方法

空気と多孔質材で構成された音場の波動伝搬は，式 (1) から式 (4) のような，波動方程式に毛細管理論 [2] を適用した連続の式と運動方程式で表される．

$$\partial p/\partial t + \kappa\left(\partial u_x/\partial x + \partial u_y/\partial y + \partial u_z/\partial z\right) = 0 \qquad (1)$$

$$\partial p/\partial x + \rho\partial u_x/\partial t + \sigma u_x = 0 \qquad (2)$$

$$\partial p/\partial y + \rho\partial u_y/\partial t + \sigma u_y = 0 \qquad (3)$$

$$\partial p/\partial z + \rho\partial u_z/\partial t + \sigma u_z = 0 \qquad (4)$$

ただし，p は音圧 [Pa]，u は粒子速度 [m/s]，κ は体積弾性率，ρ は密度 [kg/m^3]，σ は単位面積流れ抵抗 [N·s/m^4](空気中では $\sigma = 0$) である．これらを有限差分近似することで差分スキームが得られ [3]，それを数値解析することによって音場の音圧と粒子速度を求めることができる．

2.2 解析手法の有効性の検討

2.1 に示した方法によってヘルムホルツ型吸音構造の吸音特性が解析できるかどうかを調べるために，**Fig. 1** に示す 4 つの吸音構造について，計算値を測定値と比較した．材料は，単位面積流れ抵抗を 56,960 N・s/m^4(密度 94 kg/m^3 のグラスウールに相当，以下 GW94K と表記) とした．

実測では，音響管 (B&K Type4206 の太管) を用いて垂直入射吸音率を測定し，解析では，**Fig. 2** に示すような音響管を模した音場を想定し，端部に **Fig. 1** に示す吸音構造を設置した場合について，“Sound Source” の位置で平面波を初期音圧として与えて “Recieve Point”(16 点) で得られる音圧から吸音率を算出した．計算条件は，解析周波数を考慮して，空間離散幅 2.00 mm，時間離散幅 0.001 ms とし，無反射端には Adaptive PML [4] を設定した．

計算値と実測値の比較を **Fig. 3** に示す．吸音率は，絶対値は必ずしも一致していないが，変化の傾向は概ね対応しており，また全般的に計算値は実測値より値が小さめの傾向にあることがわかる．すなわち，**2.1** で示した解析方法によって得られる吸音率は実際の値より小さめになるが，形状や多孔質材を変化させたときの相対的な比較に用いるには問題はないと思われる．そこで，**2.1** で示した解析手法を以下の検討に用いることとした．

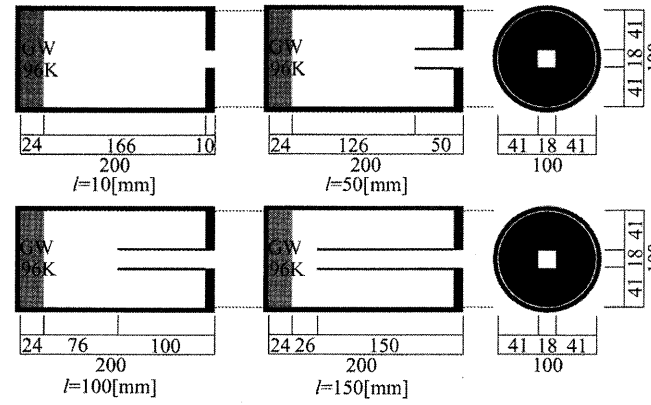


Fig. 1 FDTDM の有効性検証に用いる吸音構造

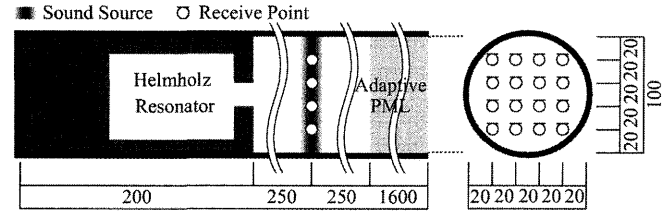


Fig. 2 解析音場

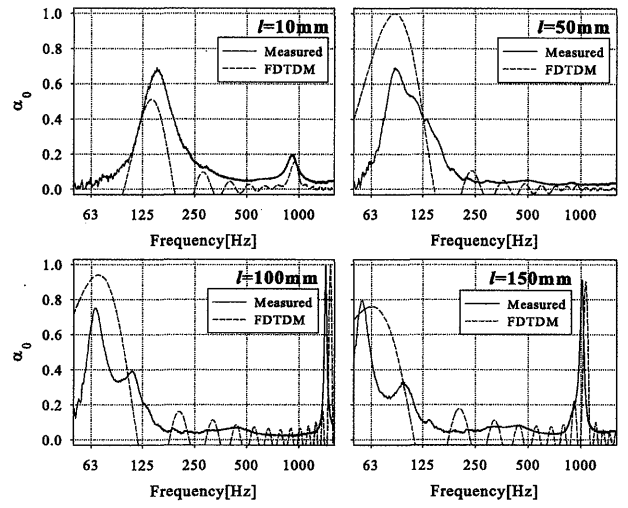


Fig. 3 解析値と実測値の比較

3. 頸部延長と複合化によるヘルムホルツ共鳴器の吸音特性の解明

3.1 胴部内への頸部延長と曲げ方が吸音特性に与える影響

大きさ 100 mm × 100 mm × 70 mm，開孔面積 400 mm^2 の共鳴器 (**Fig. 4**) を基本形状として，胴部内へ頸部を延長した場合に共鳴周波数を低域に移すことが可能か検討した．頸部長さ l を，90 mm(Case 1)，150 mm(Case 2)，210 mm(Case 3) と伸ばしたときの吸音特性の変化を見た．また，胴部内に頸部を伸ばすとき，直線的な延長には限界があり必ず曲げる必要性があることから，曲げ方の違いによる吸音特性への影響を検討するため，上記の基本形

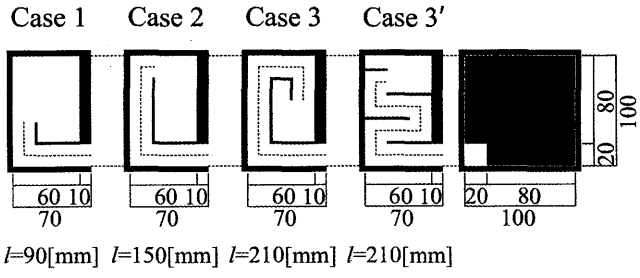
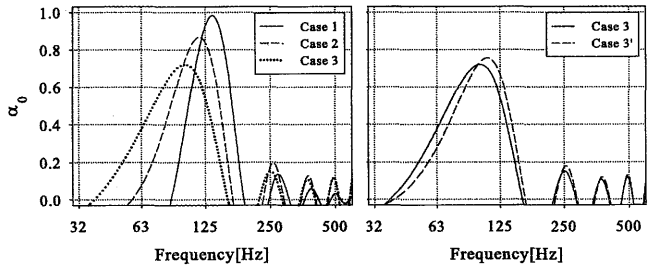


Fig. 4 頸部延長と曲げ方の検討に用いる吸音構造



(a) 頸部長さによる比較　　(b) 曲げ方による比較

Fig. 5 頸部延長と曲げ方による吸音特性の変化

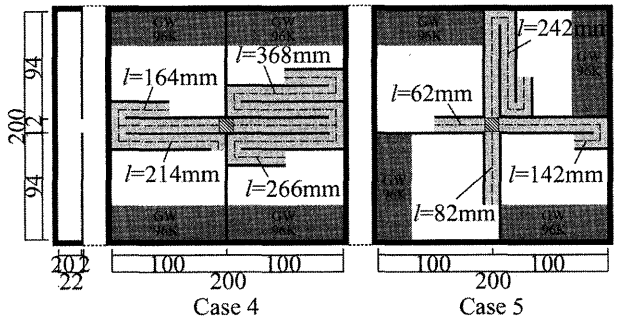


Fig. 6 4 種類の頸部長さの複合共鳴器

状で，頸部長さ 210 mm のとき，頸部を直角に曲げた場合 (Case 3) と蛇行して曲げた場合 (Case 3′) の比較を行った．

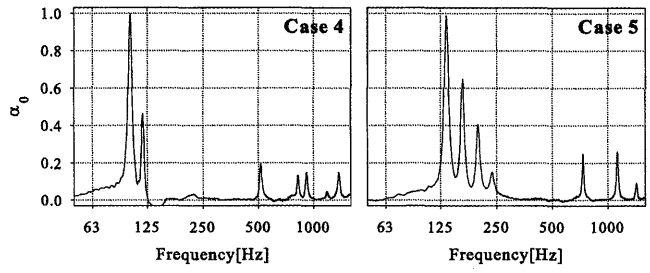
結果を **Fig. 5** に示す．頸部の延長による吸音特性の変化 (a) を見ると，頸部を伸ばしていくにつれ共鳴周波数は低域に移っていることがわかる．また，Case 3 と Case 3′ の比較 (b) を見ると，頸部の曲げ方による吸音特性の違いはほとんどないことがわかる．

以上より，胴部内へ頸部を延長することで共鳴周波数を低域に移すことができること，頸部の曲げ方は吸音特性にほとんど影響しないことが確認できた．

3.2 4 種類の頸部長さの複合共鳴器

3.1 より頸部を胴部内に伸ばすことで共鳴周波数を低域に移せることが確認された．そこで，頸部長さが異なる共鳴器を組み合わせることによって共鳴周波数の山を複数立たせることができないか検討した．

まず，頸部長さの異なる 4 種類の共鳴器を複合した．大きさ 200 mm × 200 mm × 22 mm，開孔面積 144 mm^2，頸部の断面積 144 mm^2 の共鳴器 (**Fig. 6**) について，中央部に設けた開孔部 (図の斜線部分) から，頸部を 2 方向に分けた後にさらに 2 方向に分けたもの (Case 4) と開孔部からそのまま 4 方向に分けたもの (Case 5) の 2 ケースを比較した．なお，頸部長さは，両ケースとも各共鳴器の周波数が重ならないように設定した．



(c) Case 4　　(d) Case 5

Fig. 7 4 種類の頸部長さの複合共鳴器の吸音特性

結果を **Fig. 7** に示す．共鳴周波数の山は，Case 4 では 2 つであるが，Case 5 では 4 つであった．このことから，4 つの共鳴器を複合する場合は，頸部を中心の開孔部からそのまま 4 方向に分けた方がよいことがわかった．

3.3 8 種類の頸部長さの複合共鳴器

次に，頸部長さの異なる 8 種類の共鳴器を複合した．大きさ 400 mm × 200 mm × 22 mm，開孔面積 144 mm^2，頸部の断面積 144 mm^2 (**Fig. 8**) とし，**3.2** の結果を考慮して，中央部に設けた開孔部 (図の斜線部分) からそのまま頸部を 8 方向に分けた．なお，頸部長さは各共鳴器の共鳴周波数が重ならないように設定した．

結果を **Fig. 9** に示す．点線で囲った箇所が共鳴周波数と考えられる山である．8 つの共鳴器のうち 7 つの山が認められた．吸音特性を，4 種類の頸部長さの複合共鳴器の結果と比較すると，それぞれの共鳴周波数における吸音率の差が縮まって，吸音率の周波数特性はよりフラットになっている．山が 1 つ少なかったのは，頸部長さの短い共鳴器が十分に機能していないためと考えられる．

以上から，共鳴器の頸部長さの調整により，低音域を広範囲で吸音する吸音構造を作ることができると示唆された．

4. 多孔質材の位置と吸音特性の関係

4.1 解析の基本条件

Fig. 10 に示す 2 種類 (Type A，Type B) の共鳴器について，多孔質材を設置する位置と吸音特性の関係について検討した．いずれの共鳴器も，胴部容積は 549,500 mm^3，

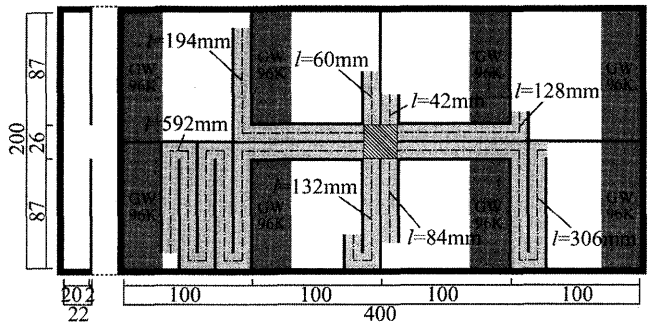


Fig. 8 8種類の頸部長さの複合共鳴器

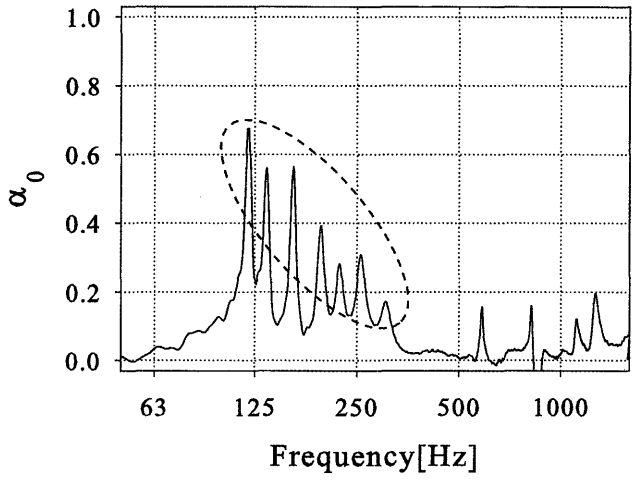


Fig. 9 8種類の頸部長さの複合共鳴器の吸音特性

開孔面積は 144 mm^2 であり，頸部の長さは 54 mm(Type A) と 74 mm(Type B) である．

共鳴器内部に設置する多孔質材は，単位面積流れ抵抗を 7,680 N・s/m^4(密度 24 kg/m^3 のグラスウールに相当，以下 GW24K と表記) とした．また，多孔質材 (GW24K) の容積は 423,900 mm^3 とした．

4.2 胴部奥部と頸部背後の違い

2 種類の共鳴器 (Type A，Type B) について，**Fig. 11** に示すよう多孔質材を共鳴器胴部の奥部に設置した場合 (Case 6) と頸部背後に設置した場合 (Case 7) を比較した．結果を **Fig. 12** に示す．

Type A，B いずれの共鳴器においても，解析結果も実測結果も，多孔質材を胴体奥部に設置した場合 (Case 6) の方が頸部背後に設置した場合 (Case 7) より高い吸音率を示し，吸音の範囲は多孔質材を頸部背後に設置した場合 (Case 7) の方が広がっている．この傾向は，実測よりも数値解析で顕著である．

以上から，吸音域の広帯域化を図るには多孔質材を頸部背後に設置する方が，逆に特定の周波数で大きな吸音を得るには多孔質材を胴部奥部に設置する方がよいこと，

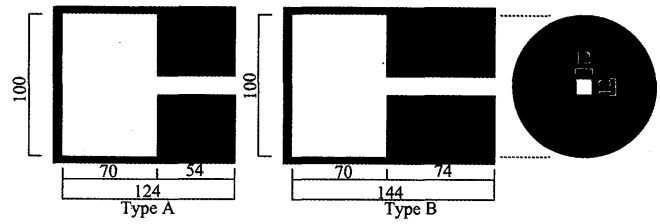


Fig. 10 共鳴器の基本形状

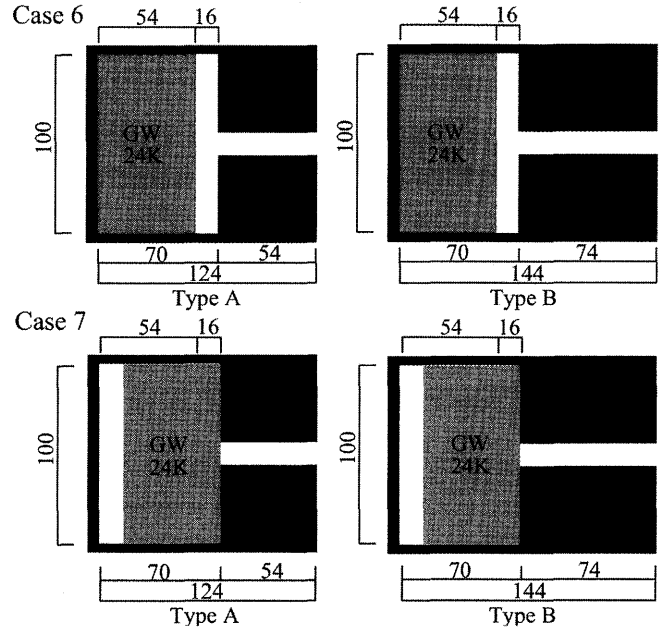


Fig. 11 多孔質材の設置位置

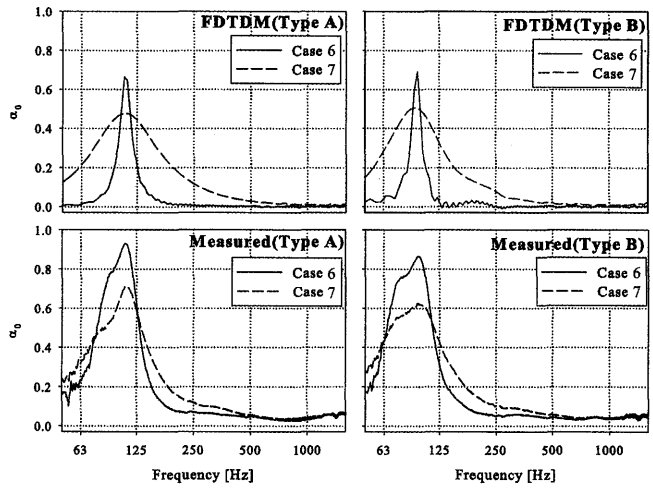


Fig. 12 胴部奥部 (Case 6) と頸部背後 (Case 7) の違い

FDTDM による数値解析は，共鳴周波数における吸音率の山がより顕著に現れることが示唆される．

4.3 共鳴器胴部内の多孔質材設置位置による違い

2 種類の共鳴器 (Type A，Type B) について，共鳴器胴部に設置する多孔質材の設置の仕方を，**Fig. 13** に示すように，胴部奥部とした場合 (Case 8)，胴部奥部及び円周

部とした場合 (Case 9)，胴部全体とした場合 (Case 10) を比較した．

実験結果 (**Fig. 14** の下段) をみると，Type A，B いずれの共鳴器においても，Case 8 と Case 9 では違いはほとんど見られないが，Case 10 だけが共鳴周波数がわずかに低音側に移動し，吸音域も少し広がっている．すなわち，多孔質材が共鳴器の頸部を構成するような配置にならない限りは，多孔質材の設置位置は共鳴器の吸音特性にはほとんど影響しないと思われる．

一方，解析結果の方は，胴部奥部及び円周部とした配置 (Case 9) の場合にも，共鳴周波数における吸音率は小さくなるものの，全体的な吸音特性に顕著な影響は認められない．このように，解析結果が実測結果を的確に捉えることができていない原因は，FDTDM による数値解析において多孔質材の吸音を単純な Laylegh モデルとしていることが考えられるが，詳細は今後の課題である．

とはいえ，本検討から，共鳴器胴部内に設置する多孔質材は，共鳴器頸部を塞がないように設置すれば吸音特性には影響しないこと，頸部を延長させるように設置すると，共鳴周波数は少し変化し，また吸音域もわずかに広がることが示唆された．ただ，多孔質材の吸音を単純な Rayleigh モデルとした FDTDM では，このような傾向を必ずしも的確に捉えることができないようである．

5. まとめ

本研究では，共鳴器の薄型化を目的に，共鳴器の頸部を共鳴器内部へ延長することと複数の共鳴器を組み合わせることによる吸音周波数の低域化と広域化，および多孔質材設置位置の吸音特性への影響について検討した．その結果，頸部を伸ばすことにより薄い共鳴器でも吸音特性の低域化が図れること，複数の共鳴器を組み合わせることで共鳴周波数に複数のピークが見られることが示され，小空間に適した低音域用の薄型吸音構造の開発に向けての基礎的知見が得られた．また，共鳴器内部に設置する多孔質材は共鳴器頸部をふさがないよう設置すれば吸音特性にほとんど影響しないこと，逆にふさぐように設置すれば共鳴周波数における吸音率は小さくなるとともに吸音域が広がることがわかった．以上の結果をもとに，今後はより平坦で広帯域な吸音特性を目指して更なる検討を行っていきたい．

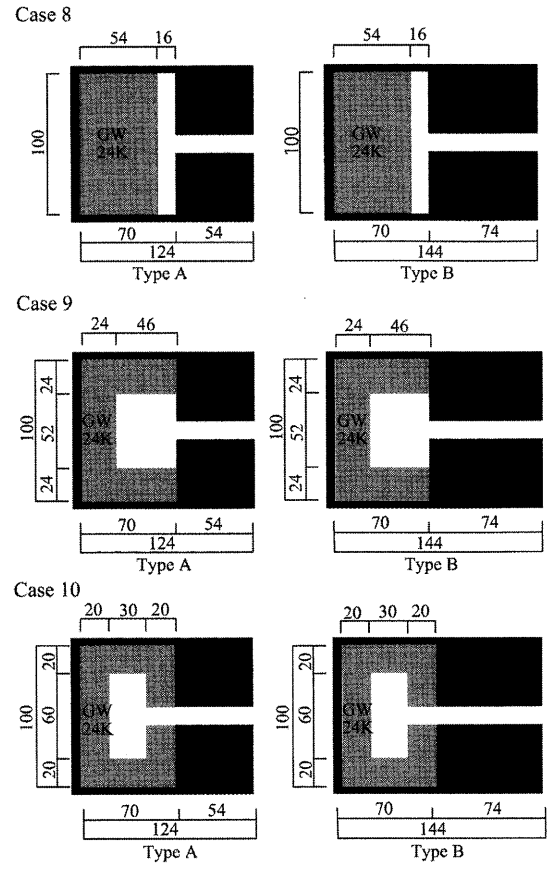


Fig. 13 共鳴器胴部内の多孔質材設置位置

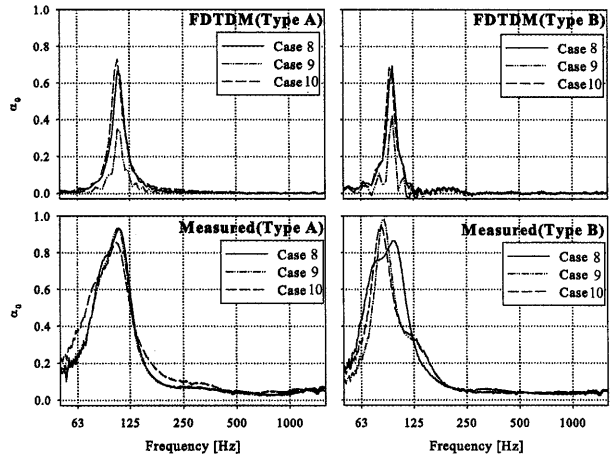


Fig. 14 多孔質材設置位置による吸音特性の違い

参考文献

1) 坂本慎一, 橘秀樹: 差分法による 2 次元音場の過渡応答の数値計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp.1757-1758, 1994.

2) C.Zwikker, C.Kosten: Sound Absorbing Materials, Elsevier Publishing Company, Amsteldam, 1949.

3) H.Suzuki, A.Omotoy, K.Fujiwara: Treatment of boundary conditions by finite difference time domain method, *Acoust. Si. & Tec.*, 28, pp.16-26, 2007.

4) 坂本慎一: 音波の進行方向に適応した PML 無反射境界, 日本音響学会 秋季研究発表会講演論文集, pp.909-910, 2005.

(受理：平成25年5月23日)