



## 背後に多孔質吸音層を有する微細穿孔板(MPP)吸音体の吸音特性

阪上, 公博  
加納, 賢一  
森本, 政之  
矢入, 幹記

---

**(Citation)**

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 2:14-19

**(Issue Date)**

2010

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81002725>



## 背後に多孔質吸音層を有する微細穿孔板(MPP)吸音体の吸音特性

阪上 公博<sup>1\*</sup>・加納 賢一<sup>1</sup>・森本 政之<sup>1</sup>・矢入 幹記<sup>2</sup>

<sup>1</sup>工学研究科建築学専攻

<sup>2</sup>鹿島建設技術研究所

(受付:August 27, 2010 受理:October 5, 2010 公開:October 12, 2010)

キーワード： 微細穿孔板 (MPP), 多孔質吸音層, 吸音, 広帯域吸音体

薄板、膜などに直径 1mm 以下、開孔率 1%以下の微細孔をあけた微細穿孔板(MPP)は、近年新しい吸音材料として注目されているが、その吸音特性はさらに改善の余地がある。MPP は通常、背後に空気層を設けて Helmholtz 型共鳴機構を構成することにより吸音を生ずる。一方、通常の普通有孔板の場合は、音響抵抗の不足を補うため、背後に多孔質吸音材を付加することが一般的である。MPP の場合は、背後空間に多孔質材料を付加すると抵抗過剰となって吸音効果が低下する場合もあるが、抵抗過剰にならない範囲であれば、適度の抵抗が付加されることによって吸音帯域の拡幅や、吸音率の向上などの効果が期待できる。本研究では、背後に多孔質吸音層を有する MPP 吸音体について等価回路理論による解析により、その吸音特性について基礎的検討を行った。

### はじめに

微細穿孔板(MPP)は、多孔質吸音材料のもつ衛生面、環境面およびデザイン面での問題点を解決する次世代吸音材として、Maa<sup>1-4)</sup>によって提案されて以来、多数の研究が行われており<sup>5-8)</sup>、広く注目を集めるようになってきている。MPP の基本的な用法としては、背後に空気層を介して剛壁と平行に設置することにより、MPP の細孔と空気層によって Helmholtz 型共鳴機構を形成するものである。一般的な Helmholtz 共鳴器などにくらべると、薄板に微細孔を設けることで適度な音響抵抗とリアクタンスを実現することにより、比較的広い吸音周波数範囲 (2オクターブ程度) を得ることが出来るのがMPP の特徴と言える<sup>9-11)</sup>。しかしながら、やはり吸音特性は選択的となるため、共鳴周波数帯域以外では吸音がほとんど得られない。

そこで、吸音帯域の広帯域化を課題として、これまでに筆者らはさまざまな吸音構造を提案してきた<sup>12-16)</sup>。これらの方法は、多重構造化によるコスト面での問題や、構造が複雑化するなどの難点もある。したがって、より簡単な方法で広帯域化を図ることができれば、コスト面でも実用面でもより有利と言える。

その一つの方法として、ここでは多孔質吸音材を背後空間に挿入する方法について検討する。現在一般的に用いられている、開孔率の高い普通有孔板の場合には、孔による音響抵抗が低いため、それを補い高い吸音を得るために、一般によく行われる方法である<sup>17)</sup>。MPP の場合は、一般に孔による音響抵抗やリアクタンスがすでに最適化されていることが多く、背後の多孔質材料の付加は抵抗過剰を招く可能性もある。また、多孔質材料のパラメータによっては、共振系が過剰にダンピングされることによって、共鳴

吸音が抑制される可能性もあり注意を要する。しかし、MPP のピーク吸音率に対する音響抵抗の影響については比較的变化がプロードであり、最適値については一般にあまりクリティカルではない<sup>18)</sup>。むしろ、適当なパラメータを選定すれば、ある程度音響抵抗が増加することで、ピーク値をあまり低下させずに、吸音周波数範囲をある程度プロードにする効果が得られる可能性も考えられる。

なお、MPP は本来、多孔質吸音材の問題点を解消するために提案された代替材料であり、多孔質吸音材を併用することは矛盾のように思われるが、近年は衛生面、環境面で優れた特性を持つ多孔質吸音材が多数開発されている<sup>19)</sup>。また、MPP の背後に多孔質吸音材を使用する場合、MPP の持つデザイン面での長所を損なわずに使用することが出来る場合も多く、MPP 吸音体の吸音特性改善の手法として、多孔質吸音材の利用も考慮に入れてよいと考えられる。

そこで、本研究では、まずMPP 吸音体の最も基本的な形態である、剛壁を有する単一MPP 吸音体の背後空間に多孔質吸音材を挿入した場合について、等価電気回路理論による解析を行い、多孔質吸音材が吸音特性に及ぼす影響について考察するとともに、それによる吸音周波数帯域の広帯域化の可能性について検討する。また、剛壁を有する 2 重 MPP 吸音体についても、同様の検討を試みる。

### 1. 等価電気回路理論による解析

#### 1.1 背後に多孔質吸音層を有する単一 MPP 吸音体の場合

Figure 1 に、背後に多孔質吸音層を有する単一 MPP 吸音体の解析モデル、およびその等価電気回路モデルを示す。MPP は、板厚  $t$ 、孔径  $d$ 、開孔率  $p$  であり、背後の剛壁との間には多孔質吸音層 (厚さを  $D$ ) を有する。入射条件は、平面波垂直入射 (単位音圧振幅) とする。

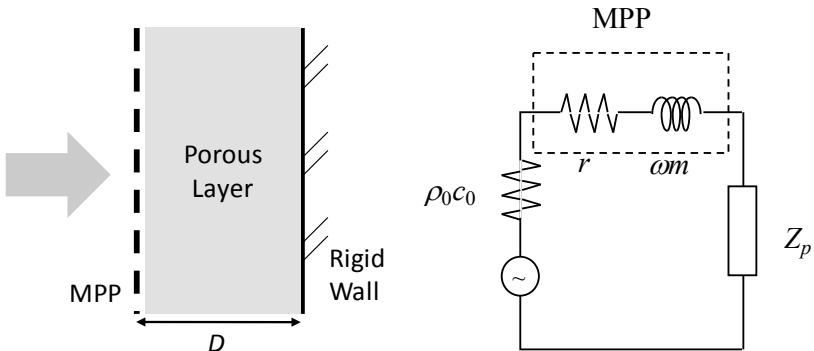


Fig. 1. Geometry of a porous layer-backed single MPP absorber (left) and its electro-acoustical equivalent circuit model (right)

MPP のインピーダンス  $Z_{mpp} = r - i\omega m$  は、Maa の理論<sup>2)</sup>により次式で表わされる。(以下、すべてのインピーダンス  $\rho_0 c_0$  で正規化している。)

$$r = \frac{32\eta t}{p \rho_0 c_0 d^2} \left( \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{32} k \frac{d}{t} \right) \quad (1)$$

$$\omega m = \frac{\omega t}{p c_0} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (2)$$

ここで、

$$k = d \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{4\eta}} \quad (3)$$

であり、 $\rho_0$  は空気の密度、 $c_0$  は音速、 $\omega$  は角周波数、 $\eta$  は粘性係数  $1.789 \times 10^{-5}$  [Pa s] である。

背後の多孔質吸音材については、その特性インピーダンス  $Z_c$  および伝搬定数  $\gamma$  を、以下に示す Miki の式<sup>20)</sup>によって与える。(R は流れ抵抗、f は周波数である。)

$$Z_c = 1 + 0.070 \left( \frac{f}{R} \right)^{-0.632} + i0.107 \left( \frac{f}{R} \right)^{-0.632} \quad (4)$$

$$\gamma = k \left\{ 0.160 \left( \frac{f}{R} \right)^{-0.618} \right\} - ik \left\{ 1 + 0.109 \left( \frac{f}{R} \right)^{-0.618} \right\} \quad (5)$$

これを用いて、次式により背後多孔質吸音層 (厚さ  $D$ ) のインピーダンスを与える。

$$Z_p = Z_c \coth \gamma D \quad (6)$$

以上、(1)~(6)式を用いて、Figure 1 の等価電気回路の合成インピーダンス  $Z_{total}$  を求め、次式により吸音率を求める。

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re}(Z_{total})}{\{1 + \operatorname{Re}(Z_{total})\}^2 + \{\operatorname{Im}(Z_{total})\}^2} \quad (7)$$

### 1.2 背後に多孔質吸音層を有する2重MPP吸音体の場合

剛壁を有する2重MPP吸音体の場合の解析モデル、および等価電気回路を Figure 2 に示す。MPPのインピーダンス、および吸音層の取り扱いは、前節に述べた単一MPP吸音体の場合と同様である。この場合、2つの背後空間のいずれか一方、または両方に多孔質吸音材を挿入した場合が考えられる。

本研究では、多孔質吸音材を、(a)入射側の背後空間に挿入した場合、(b)剛壁側の背後空間に挿入した場合、(c)両方の背後空間に挿入した場合について検討する。その場合、多孔質吸音材を挿入した背後空間については、インピーダンスを、(4)~(6)式で与える。空気層については(厚さ  $D$  とすると)、

$$Z_a = i \cot kD \quad (8)$$

によって与える。このとき、背後が剛壁となる吸音層および空気層については、(6)(8)式は厳密であるが、背後がMPPである層については、これらの式は近似的な取り扱いとなることを指摘しておく<sup>21)</sup>。

その他については、単一MPP吸音構造の場合と同様に取り扱い、回路全体のインピーダンスを得ることで、最終的に(7)式により吸音率を求めることができる。

## 2. 結果と考察

### 2.1 単一MPP吸音体の場合

Figure 3 に、単一MPP吸音体について、背後空間が空気層の場合と多孔質吸音材の場合の吸音特性の計算結果を示す。

この結果から、多孔質吸音材を挿入した場合、空気層の場合に比べて最大吸音率が若干低下するものの、ピークがプロードになり広帯域化していることが分かる。また、空気層の場合<sup>1~4)</sup>に見られた 4kHz, 8kHz 付近の高次共振のピークが見られなくなっている。これらは、共振系が多孔質吸音材によってダンピングされた結果であると考えられる。このように、多孔質吸音材を背後に挿入

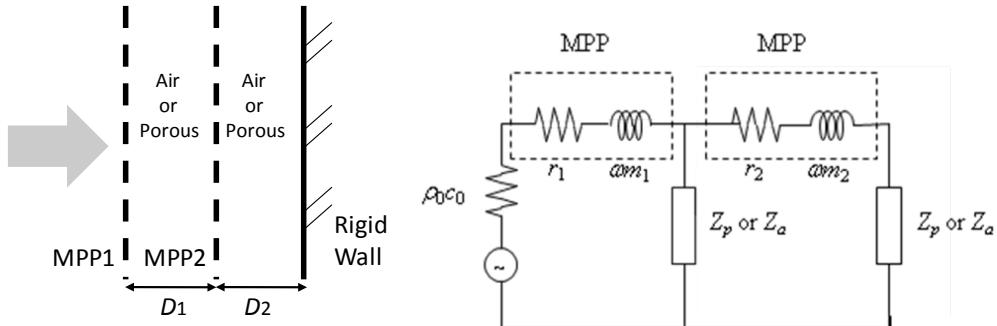


Fig. 2. Geometry of wall-backed double-leaf microperforated panel absorber (left) and its electro-acoustical equivalent circuit model (right).

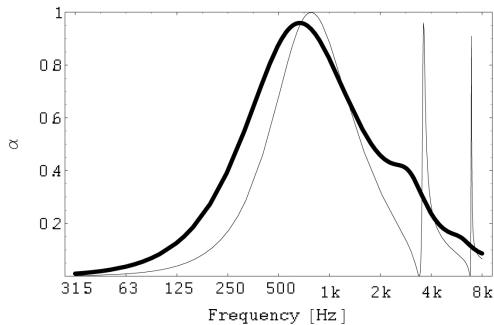


Fig. 3. Comparison of the absorption characteristics of an MPP absorber backed by an air cavity (thin line) and that backed by a porous absorbent layer (thick line). The hole diameter  $d=0.3$  mm, thickness  $t=0.3$  mm, perforation ratio  $p=0.8$  %, flow resistance of the absorbent  $R=10000 \text{ Pa s m}^{-1}$ , and cavity depth  $D=50$  mm.

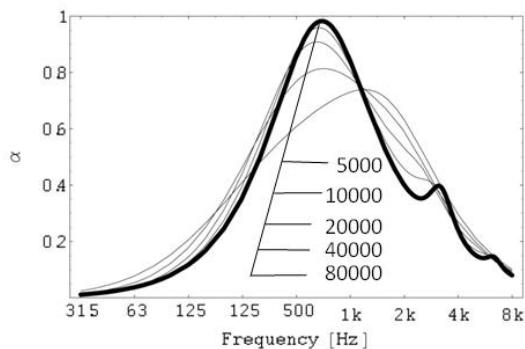


Fig. 4. Effect of the flow resistance of the porous absorbent layer in the back cavity. Flow resistance of the absorbent  $R=5000 \dots 80000 \text{ Pa s m}^{-1}$ . The hole diameter  $d=0.3$  mm, thickness  $t=0.3$  mm, perforation ratio  $p=0.8$  %, and cavity depth  $D=50$  mm

入することで、MPP 吸音体の吸音帯域を広帯域化できる可能性が示唆された。

挿入する多孔質吸音材のパラメータによって、上述の効果が変化することが予想される。ここでは、多孔質吸

音材の固有インピーダンスおよび伝搬定数について Miki の式によって与えているため、多孔質吸音材のパラメータとしては流れ抵抗のみが関係している。そこで、多孔質吸音材の流れ抵抗を変化させた場合の影響を検討した計算結果を、Figure 4 に示す。多孔質吸音材の流れ抵抗が大きくなるほど、ピークはプロードになり吸音帯域は広くなるが、 $5000 \sim 20000 \text{ Pa s m}^{-1}$  程度ではピーク値がほぼ 0.9~1.0 を示していたのに対し、徐々に低くなり、 $80000 \text{ Pa s m}^{-1}$  では 0.7 程度まで低下している。したがって、高い吸音率を保ちながら広帯域化するためには、流れ抵抗が過大とならないようにする必要がある。この例では、 $20000 \text{ Pa s m}^{-1}$  以下であることが望ましいと考えられる。ただし、この流れ抵抗の範囲については、MPP 自体の音響抵抗も関与していることと思われるため、MPP の孔のパラメータに応じて検討する必要があろう。

そこで、次に MPP の各パラメータを変化させた場合に、多孔質吸音材を挿入する効果がどのように変化するか検討する。多孔質吸音材の流れ抵抗が  $10000 \text{ Pa s m}^{-1}$  の場合に、MPP の孔径を変化させた結果を、Figure 5 に示す。

孔径が 0.1 mm の例では、MPP 自体が抵抗過剰となつていて空気層の場合でも吸音率が低く、多孔質吸音材を挿入しても大きな変化がない。また、0.2 mm の場合は多孔質吸音材を挿入することで吸音率が低下しているが、これは多孔質吸音材によって吸音体全体が抵抗過剰となつたためであろう。一方、孔径が比較的大きい 0.5, 1.0 mm の場合は、空気層の場合に比べピークが高くなり、広帯域化されている。このように、もともと MPP の抵抗がやや不足している場合に、多孔質吸音材を挿入する効果が顕著に表れ、吸音特性が改善されることが分かる。

同様の傾向は、板厚を変化させた場合にも見られる。すなわち、抵抗不足の薄い板の場合に顕著な改善効果が表れるが、厚い板の場合は抵抗過剰によって吸音率が低下することが分かる (Figure 6)。

一方、開孔率の変化に対しては、若干異なるふるまいを示す。開孔率が低い場合は、典型的な MPP の共鳴型吸音特性を示すが、1.0 %を超えて大きくなつた場合は、背後層内の多孔質吸音材の特性が顕在的に表れるようになり、共鳴型とは若干様相の異なる吸音特性を示すようになる。極端な一例として、MPP としては開孔率が大きすぎるが、5.0 %の場合の計算結果を Figure 7 に挙げておく。

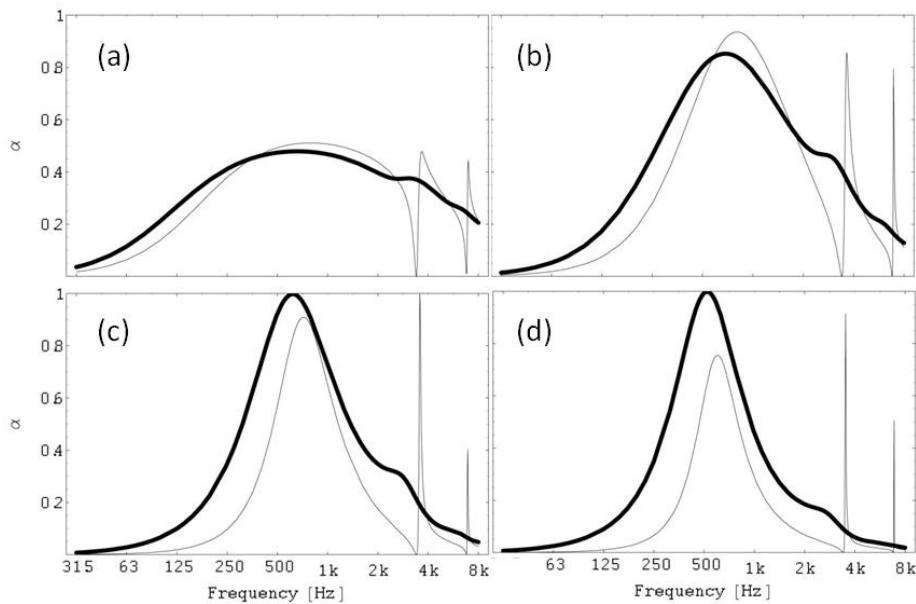


Fig. 5. Effect of the hole diameter of the MPP of a porous layer-backed single MPP absorber. Thick line: porous layer-backed MPP; Thin line: air layer-backed MPP. The hole diameter  $d=0.1$  mm (a),  $0.2$  mm (b),  $0.5$  mm (c) and  $1.0$  mm (d). The thickness

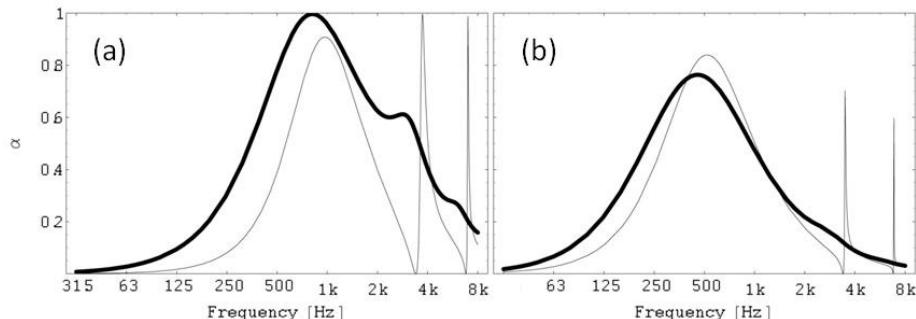


Fig. 6. Effect of the thickness of the MPP of a porous layer backed single MPP absorber. Thick line: porous layer backed MPP; Thin line: air layer backed MPP. The thickness  $t=0.1$  mm (a), and  $1.0$  mm (b). The hole diameter  $d=0.3$  mm, perforation ratio  $p=0.8\%$ , flow resistance of the absorbent  $R=10000\text{Pa sm}^{-1}$ , and cavity depth  $D=50$  mm.

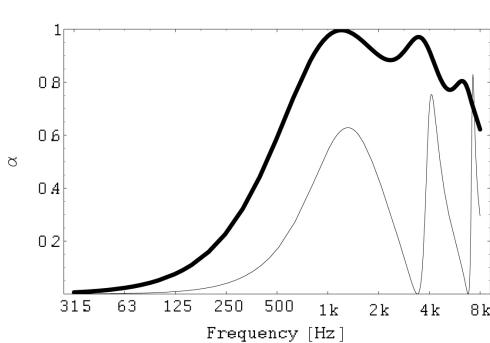


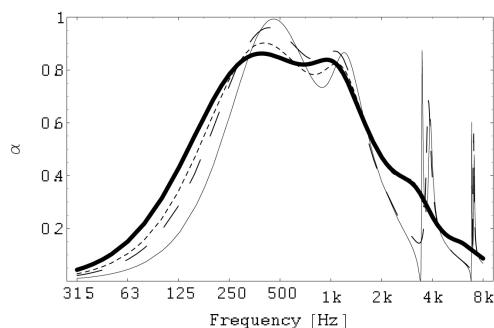
Fig. 7. An example of the absorption characteristics of a porous layer backed single MPP absorber with a large perforation ratio. Thick line: porous layer backed MPP; Thin line: air layer backed MPP. The hole diameter  $d=0.3$  mm, thickness  $t=0.3$  mm, perforation ratio  $p=5.0\%$ , flow resistance of the absorbent  $R=10000\text{Pa sm}^{-1}$ , and cavity depth  $D=50$  mm.

## 2.2 2重 MPP 吸音体の場合

Figure 8 に計算結果を示す。多孔質吸音材を、入射側 (MPP 側) の背後空間のみに挿入した場合、剛壁側の背後空間のみに挿入した場合、両方の背後空間に挿入した場合を、それぞれ比較して示す。結果に見られるように、いずれの場合も若干ピーク値が低下するが、ピークがブロードになり、広帯域化の効果がある程度見られる。広帯域化は、両方の背後空間に挿入した場合が最も著しいが、この場合がピークの低下も大きい。また、剛壁側よりも、MPP の直後に挿入した方が、吸音周波数範囲の広帯域化に効果が大きいことが分かる。

## おわりに

本研究では、MPP 吸音体の背後空間に多孔質吸音材を挿入した場合の影響について、等価電気回路モデルに基づく理論解析により基礎的な検討を行った。単一 MPP 吸音体の場合、背後空間に多孔質吸音材を挿入することに



**Fig. 8.** Comparison of the absorption characteristics of wall-backed double-leaf MPP absorbers with: Thick line: porous layer in two cavities; Dashed line: porous layer in the wall side cavity only; Dotted line: porous layer in the MPP side cavity only; Thin line: air-back cavities. The parameters of the two MPPs are: hole diameter  $d=0.3$  mm, thickness  $t=0.3$  mm, perforation ratio  $p=5.0\%$ . The flow resistance of the absorbent  $R=10000\text{Pa sm}^{-1}$ , and cavity depths are both  $D=50$  mm.

よって、若干ピーク値が低下するものの、吸音帯域の広帯域化が可能であることが示された。ただし、その効果は挿入する多孔質吸音材の流れ抵抗に依存するので、適当な値を選ぶ必要がある。また、MPPの孔径、厚さ、開孔率によっても、多孔質吸音材の効果に変化が表われることが分かった。

2重MPP吸音体の場合も、同様に多孔質吸音材の効果が表われるが、2つの背後空間のうち、剛壁側よりも、MPPの直ぐ背後に挿入した方が、吸音周波数範囲の広帯域化に対する効果が著しいことが分かった。

[謝辞]本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(C, 20560550)によって行った。

#### Literature Cited

- 1) Maa D-Y; "Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions," *Scientia Sinica*, 17, 55-71 (1975)
- 2) Maa D-Y; "Microperforated-panel wideband absorber," *Noise Control Eng. J.*, 29, 77-84 (1987)
- 3) Maa D-Y; "Potential of microperforated panel absorber," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, 2861-2866 (1998)
- 4) Maa D-Y. Practical single MPP absorber. *Int. J. of Acoust. and Vib.*, 12, pp. 3-6 (2007)
- 5) Fuchs H.V. and Zha X.; "Einsatz mikro-perforierter Platten als Schallabsorber mit inharrener Dämpfung," *Acustica*, 81, 107-116 (1995)
- 6) Wu M. Q.; "Micro-perforated panels for duct silencing," *Noise Control Eng. J.*, 45, 69-77 (1997)
- 7) Kang J. and Brocklesby M. W.; "Feasibility of applying microperforated absorbers in acoustic window systems," *Appl. Acoust.*, 66, 669-689 (2005)
- 8) Asdrubali F. and Pispola G; "Properties of transparent sound absorbing panels for use in noise barriers," *J. Acoust. Soc. Am.*, 121, 214-221 (2007)
- 9) 矢入幹記, 阪上公博; "微細穿孔板の吸音特性," 日本音響学会誌, 63巻2号, 76-82 (2007)
- 10) 阪上公博, 藤本一寿; "音声情報伝達性能向上のた  
めのデバイス一次世代の吸音材: MPP とポリエス  
テル不織布ー," 騒音制御, 33巻4号, 307-316 (2009)
- 11) 矢入幹記, 阪上公博; "微細穿孔板吸音構造の吸音  
特性とその広帯域化," 日本音響学会春季研究発表  
会講演論文集, 1139-1142 (2010)
- 12) Sakagami K., Morimoto M. and Koike W; "A numerical  
study of double-leaf microperforated panel absorbers,"  
*Applied Acoustics*, 67, 609-619 (2006)
- 13) Sakagami K., Nakamori T., Morimoto M. and Yairi M.;  
"Double-leaf microperforated panel space absorbers: A  
revised theory and detailed analysis," *Applied Acoustics*,  
70, 703-709 (2009)
- 14) Sakagami K., Nagayama Y., Morimoto M. and Yairi M.;  
"Pilot study on wideband sound absorber obtained by  
combination of two different microperforated panel  
(MPP) absorbers," *Acoust. Sci. & Tech.*, 30, 154-156.  
(2009)
- 15) 岡本奈緒子, 近藤真衣子, 阪上公博, 森本政之, 矢  
入幹記; "微細穿孔板(MPP)と異種吸音材の組み  
合わせによる広帯域吸音構造の試み," 日本音響学  
会建築音響研究会資料, AA2008-48 (2008)
- 16) Sakagami K., Yamashita I., Yairi M. and Morimoto M. ;  
"Sound absorption characteristics of a  
honeycomb-backed microperforated panel absorber:  
Revised theory and experimental validation," *Noise  
Contr. Eng. J.*, 58(2), 157-162 (2010)
- 17) 木村翔; "音響材料の吸音特性に関する実験的研究,"  
東京大学生産技術研究所報告, 10(5) (1961)
- 18) Sakagami K., Nakamori T., Morimoto M. and Yairi M.;  
"Double-leaf microperforated panel space absorbers: A  
revised theory and detailed analysis," *Applied Acoustics*,  
70, 703-709 (2009)
- 19) 阪上公博; "次世代の吸音・遮音技術—最近の研究  
動向—," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集,  
1137-1138 (2010)
- 20) Miki Y.; "Acoustical properties of porous materials  
-Modifications of Delany-Bazley methods-," *J. Acoust.  
Soc. Jpn. (E)*, 11, 19- 24 (1990)
- 21) Sakagami K., Matsutani K. and Morimoto M.; "Sound  
absorption of a double-leaf micro-perforated panel with  
an air-back cavity and a rigid-back wall: Detailed  
analysis with a Helmholtz-Kirchhoff integral  
formulation," *Applied Acoustics*, 71, 411-417 (2010)

## Sound absorption characteristics of a microperforated panel absorber backed by an absorbent layer

Kimihiro SAKAGAMI<sup>1</sup>, Ken'ichi KANO<sup>1</sup>, Masayuki MORIMOTO<sup>1</sup> and  
Motoki YAIRI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Graduate School of Engineering, Department of Architecture*

<sup>2</sup>*Kajima Technical Research Institute*

**Key words:** Microperforated panel, Porous sound absorber, Sound absorption, Wideband sound absorber

A micriperforated panel (MPP) is usually placed with a back air-cavity behind it to produce a Helmholtz-type resonance sound absorption. On the other hand, in the case of an ordinary perforated panel (with larger perforation than MPPs), its acoustic resistance is often lower than optimal value, and it is common practice to place a porous sound absorbing layer behind it to adjust the total acoustic resistance. In the case of an MPP, as its acoustic resistance is usually already adjusted to be optimal, it can deteriorate the sound absorption performance to add a porous layer behind it, because the total acoustic resistance can become too large. However, unless the total acoustic resistance is in the optimal range, adding porous layer behind MPPs can cause some favourable effect, such as broadening the absorption frequency range, etc. In this paper, as a basic study, the sound absorption characteristics of MPP absorbers with a porous layer are analysed by electro-acoustical equivalent circuit theory, and the possibility of improving its sound absorption performance is discussed through the numerical examples.