

微細穿孔板 (MPP) と通気性膜からなる 2 重吸音構造の吸音特性 -多孔質吸音材を挿入することによる影響-

阪上 公博^{1*}・小島 星司¹・森本 政之¹

¹工学研究科建築学専攻

(受付:November 2, 2011 受理:November 28, 2011 公開:November 30, 2011)

キーワード: 微細穿孔板, MPP, 通気性膜, 多孔質吸音材, 吸音特性

微細穿孔板 (MPP) は次世代の吸音材として近年注目を集めているが、共鳴型の吸音機構のため、吸音特性が周波数選択的である。その吸音特性をさらに広帯域にする試みがこれまでも多数行われてきた。一つの方法として、背後に多孔質吸音層を挿入する方法が提案され、その効果が示されているが、本研究では、さらに MPP, 多孔質吸音材, および通気性膜材料を組み合わせた吸音体について検討を行った。検討には波動理論に基づく理論解析を用いて行った。入射側に MPP と多孔質吸音層を配した場合は、MPP の特性が支配的となり、共鳴型の吸音特性を示す。通気性膜のみでも相当な広帯域化が見られ、多孔質吸音層を加えることでそれが若干さらに広がる。しかし吸音特性の広帯域化に対しては、通気性膜の寄与が大きく、多孔質を新たに加えることによる効果はそれほど大きくない。一方、通気性膜を入射側に配した場合は、通気性膜による多孔質型吸音特性が支配的となり、MPP の寄与はほとんどないことが分かった。したがって、入射側に通気性膜、多孔質吸音層、中間に MPP を配置する吸音体はメリットが少ないことが示された。

はじめに

従来、吸音材として多孔質吸音材が最も広く利用されているが、衛生面、耐久性、耐候性、リサイクル効率の面で問題がある。代替吸音材として、微細穿孔板(MPP)、膜材料などがある。MPPとは、金属、アクリルなどの薄板に微細な孔を開けた材料である。背後に剛壁を有する単一MPP吸音体は、Helmholtz型の吸音特性を示し、共鳴周波数帯域において高い吸音が得られる。また、MPPを2重にすることで、単一MPP吸音体よりもさらに広帯域での吸音が可能であることが示されている^{1,2)}。

一方で、MPPは現状ではコストが高く、また吸音帯域が選択的である。そこで、これらの問題点を解決するため、背後に剛壁を有する2重MPP吸音構造をなす2枚のMPPのうち、1枚を通気性膜で代用した吸音体の吸音特性については、著者らによって検討されている³⁾。その結果、2重MPP吸音体と比べ、高い吸音性能を示すことが明らかにされている。また、背後に多孔質吸音層を有するMPP吸音体の吸音特性についての検討がされており^{4,6)}、空気層に比べ、吸音帯域が広帯域化することが明らかにされている。

そこで、本研究では、MPPと通気性膜からなる背後に剛壁を有する2重吸音構造に、多孔質吸音材を挿入した吸音構造を、波動理論に基づき解析し、その吸音特性について考察を行う。

1. 解析

1. 1 解析モデル

MPPと通気性膜(以下PM)からなる背後に剛壁を有する2重吸音構造に、多孔質吸音材を挿入した吸音構造の解析モデルをFigure 1に示す。Figure 1(a)は、入射側にPMと多孔質吸音層を配置した場合の解析モデル、Figure 1(b)は、入射側にMPP、剛壁側にPMと多孔質吸音層を配置した場合の解析モデルである。x-y平面内にある背後に剛壁を有する無限大の2重吸音構造に、入射角 θ で単位音圧振幅の平面波が入射する場合を考える。なお、周期定常問題とし時間因子 $\exp(-i\omega t)$ は省略する。

1. 2 MPP, 通気性膜, 多孔質吸音材のインピーダンス

MPPのインピーダンス Z_{MPP} 、PMのインピーダンス Z_{PM} 、多孔質吸音材のインピーダンス Z_p は以下の式で表される(いずれも正規化していない)。MPPのインピーダンスは、Maaの理論²⁾、多孔質吸音材のインピーダンスは、Mikiの式により与える⁷⁾。

$$Z_{MPP} = (r - i\omega m)\rho_0 c_0 \quad (1)$$

$$r = \frac{32\eta t}{p\rho_0 c_0 d^2} \left(\sqrt{\frac{K^2}{32} + 1} + \frac{\sqrt{2}}{8} K \frac{d}{t} \right) \quad (2)$$

$$\omega m = \frac{\omega t}{pc} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + K^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } K = d \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{4\eta}} \quad (4)$$

$$Z_{PM} = R_1 \quad (5)$$

$$Z_a = \left(1 + 0.07 \left(\frac{f}{R_2} \right)^{-0.632} + i 0.107 \left(\frac{f}{R_2} \right)^{-0.632} \right) \rho_0 c_0 \quad (6)$$

$$\gamma = k_0 \left\{ 0.160 \left(\frac{f}{R_2} \right)^{-0.618} \right\} - i k_0 \left\{ 1 + 0.109 \left(\frac{f}{R_2} \right)^{-0.618} \right\} \quad (7)$$

t , d , p はそれぞれ MPP の板厚, 孔径, 開孔率で, R_1 , R_2 はそれぞれ PM, 多孔質吸音材の流れ抵抗である. ρ_0 は空気密度 ($1.2[\text{kg/m}^3]$), c_0 は空気中の音速 ($340[\text{m/s}]$), ω は角周波数, η は粘性係数 ($1.789 \times 10^{-5}[\text{Pa s}]$), γ は伝搬定数, k_0 は波長定数, f は周波数である. また Z_{PM} については振動しない場合の PM のインピーダンス, すなわち流れ抵抗である. 音波入射振動については, 振動方程式と連成することで考慮する.

なお, Eq. (2)~(4) の Maa の式では, 細孔一つ一つに対

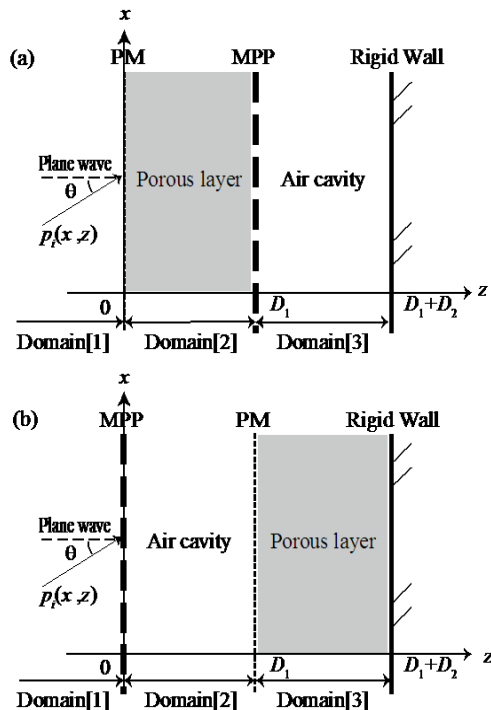


Figure 1. (a) Model for analysis for the case with a PM and porous layer on the illuminated side, and (b) that for the case with an MPP on the illuminated side and PM and porous on the wall side.,

する開口端補正が加えられている^{1,2)}. しかし, これらは周囲の媒質が空気であることを前提として求められたものであるため, 厳密には背後が多孔質層の場合に対する補正が必要である. しかし, これまで別途検討した結果によれば^{5,6)}, 背後が多孔質層の場合も Maa の式によって, 実用上問題ない程度の精度で計算が可能であることが示されているため, 本研究では一貫して Maa の Eq.(2)~(4) を用いることとする.

1. 3 波動理論に基づく解析

本節では, Figure 2 のように一般化した解析モデルについて述べ, Figure 1(a),(b) それぞれの場合との対応を示す. Leaf 1, 2 の面密度, インピーダンス, 振動変位はそれぞれ, $M_{1,2}$, $Z_{1,2}$, $w_{1,2}(x)$ である. また Layer 1, 2 の厚さ, インピーダンスはそれぞれ, $D_{1,2}$, $Z_{b,c}$ である.

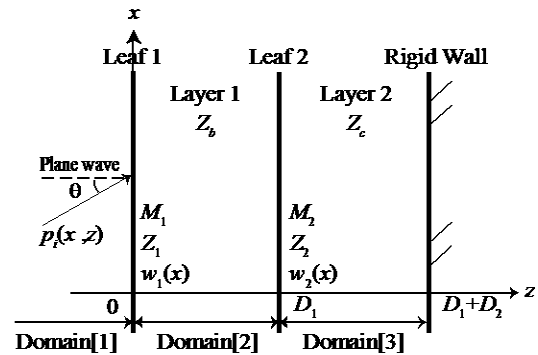


Figure 2. A generalized model for the cases presented in Figure 1 (a) and (b).

Leaf 1 の入射側表面の音圧は, Helmholtz-Kirchhoff の積分公式を用いて以下のように表される.

$$p_1(x, 0) = 2p_i(x, 0) + \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial p_1(r_0)}{\partial n} H_0^{(1)}(k_0|x-x_0|) dx_0 \quad (8)$$

ここで, p_i は入射波の音圧, n は領域に対して外向きの法線ベクトル, $H_0^{(1)}(x)$ は 0 次の第 1 種ハンケル関数である. 表面での境界条件は,

$$\frac{\partial p_1(r_0)}{\partial n} = \rho_0 \omega^2 w_1(x_0) + i A_{m1} k_0 \Delta P_1(x_0) \quad (9)$$

である. ここで, $A_{m1} = \rho_0 c_0 Z_1$, ΔP_1 は Leaf 1 の両面の圧力差である. Eq.(8),(9) より, Leaf 1 の入射側表面の音圧は以下のように表される.

$$p_1(x, 0) = 2p_i(x, 0) + \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [\rho_0 \omega^2 w_1(x_0) + i A_{m1} k_0 \Delta P_1(x_0)] H_0^{(1)}(k_0|x-x_0|) dx_0 \quad (10)$$

Domain[2] および Domain[3] の音圧と粒子速度は, 平面波の波動方程式の一般解から, 以下のように表される.

$$P_{2,3}(x, z) = (X_{2,3} e^{-\gamma z \cos \theta} + Y_{2,3} e^{\gamma z \cos \theta}) e^{-\gamma x \sin \theta} \quad (11)$$

$$v_{2,3}(x, z) = \frac{\cos \theta}{Z_{b,c}} (X_{2,3} e^{-\gamma z \cos \theta} - Y_{2,3} e^{\gamma z \cos \theta}) e^{-\gamma x \sin \theta} \quad (12)$$

また、境界条件は以下のように表される。

$$v_2(x, 0) = -i\omega w_1(x) + \frac{\Delta P_1(x)}{Z_1} \quad (13)$$

$$v_2(x, D_1) = -i\omega w_2(x) + \frac{\Delta P_2(x)}{Z_2} \quad (14)$$

$$v_3(x, D_1) = -i\omega w_2(x) + \frac{\Delta P_2(x)}{Z_2} \quad (15)$$

$$v_3(x, D_1 + D_2) = 0 \quad (16)$$

ただし、 ΔP_2 はLeaf2の両面の圧力差である。(11)～(16)より複素音圧振幅 $X_{2,3}$ 、 $Y_{2,3}$ を得る。 X_2 、 Y_2 よりLeaf1の透過側表面の音圧およびLeaf2の入射側表面の音圧が、 X_3 、 Y_3 よりLeaf2の透過側表面の音圧が表される。

また、Leaf 1,2の振動変位 $w_{1,2}(x)$ は、Leaf 1,2各々の振動に対する単位応答を $u_{1,2}$ とすると、以下の式で表される。

$$w_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [p_1(\xi, 0) - p_2(\xi, 0)] u_1(x - \xi) d\xi \quad (17)$$

$$w_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [p_2(\xi, D_1) - p_3(\xi, D_1)] u_2(x - \xi) d\xi \quad (18)$$

以上より得られたすべての式を解くと、反射音圧は、

$$p_r(x, z) = \left[1 + \frac{i\rho_0\omega^2\Gamma_1(k_0\sin\theta) - k_0A_{mi}\Theta_1\{A_1\Gamma_1(k_0\sin\theta) + A_2\Gamma_2(k_0\sin\theta) + A_3\}}{k_0\cos\theta} \right] \times e^{ik_0x\sin\theta - k_0z\cos\theta} \quad (19)$$

と表される。なお、 $\Gamma_{1,2}$ 、 Θ_1 、 $A_{1,2,3}$ はLeaf 1,2のインピーダンスやLayer 1,2の厚さ、インピーダンスなどを含んだ関数で、詳細は省略する。斜入射音率は反射音圧を用いて、

$$\alpha_\theta = 1 - |p_r|^2 \quad (20)$$

で表される。 α_θ を入射角 $0^\circ \sim 78^\circ$ で平均し、次式により音場入射音率 α を求める。

$$\alpha = \frac{\int_{0^\circ}^{78^\circ} \alpha_\theta \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_{0^\circ}^{78^\circ} \sin\theta \cos\theta d\theta} \quad (21)$$

以上より、入射側にPMと多孔質吸音層を配置した場合、Figure 1(a)の解析モデルとの対応を考えて、各インピーダンスを次式のように与える。

$$Z_1 = Z_{PM}, Z_2 = Z_{MPP}, Z_b = Z_a, Z_c = \rho_0 c_0$$

同様に、入射側にMPP、剛壁側にPMと多孔質吸音層を配置した場合(Figure 1(b))には、各インピーダンスを次式のように与える。

$$Z_1 = Z_{MPP}, Z_2 = Z_{PM}, Z_b = \rho_0 c_0, Z_c = Z_a$$

2. 計算結果と考察

2.1 入射側に通気性膜と多孔質吸音層を配置した場合の吸音特性

Figure 1(a)に示す入射側にPMと多孔質吸音層を配置した場合の、吸音特性の一般的特徴と吸音メカニズムについて考察する。比較として、検討する吸音体(Figure 3(a))において、多孔質吸音層を空気層に変えた吸音体(Figure 3(b))と、検討する吸音体からMPPを抜いた吸音体(Figure 3(c))の吸音特性の計算も行う。計算結果の一例をFigure 4に示す。計算例のパラメータはMPP、PM、多孔質吸音材ともに下記に示す値とする。

- MPP:

板厚 $t=0.3$ (mm), 孔径 $d=0.3$ (mm),
開孔率 $p=1.0$ (%), 面密度 $M_{MPP}=1.0$ (kg/m²)

- PM:

流れ抵抗 $R_1=816$ (Pa s/m), 面密度 $M_{PM}=1.0$ (kg/m²)

- 多孔質吸音材:

流れ抵抗 $R_2=10000$ (Pa s/m)

- 各層の厚さ:

PM-MPP間 $D_1=50$ (mm), MPP-剛壁間 $D_2=50$ (mm)

まず、検討する吸音体の吸音特性の一般的特徴をまとめる。Figure 4より吸音特性の概形は、典型的な多孔質型に似た特性を示す。31.5～63 Hzでは0.1以下で α は低く、63～500 Hzで急激に α は増加する。500 Hz以上では、 α は若干増加しているが、ほぼ一定である。

次に、吸音メカニズムについて考察する。Figure 4より、検討する吸音体(Figure 3(a))と比較する吸音体(Figure 3(b))および(c)の吸音特性は、基本的に大きな差がない。Figure 3に示す3つの吸音体の共通点として、入射側にPMがある点が挙げられる。一般にPMは多孔質型の吸音特性を示すが、この吸音体の吸音特性に対しては、PMの示す多孔質型の特性が支配的であることが分かる。

ここで、検討する吸音体における多孔質吸音材の寄与を

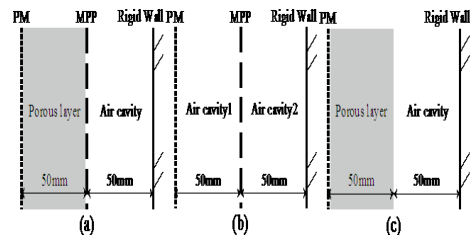


Figure 3. (a) The model of the absorber studied here. For comparison, (b) that without the porous layer, and (c) without the MPP are also studied

調べるため、Figure 3(a)と(b)を比較する。両者の差は多孔質吸音材の有無である。Figure 4より、(a)の吸音体の吸音特性は、(b)の吸音体のそれと比べ、500～3 kHz付近では α は低下しているが、31.5～500 Hzと3 kHz以上の周波数では、 α は増加している。これより、多孔質吸音材の挿入で、全体的に若干 α が増加すると考えられる。

次に、検討する吸音体における MPP の寄与を調べるため、Figure 3(a)と(c)を比較する。両者の差は MPP の有無である。Figure 4より、(a)の吸音体の吸音特性は、(c)の吸音体のそれと比べ、500～3 kHz付近で若干の違いが見られるが、ほぼ一致している。これより、検討する吸音体において、MPP の効果はほとんどないと考えられる。

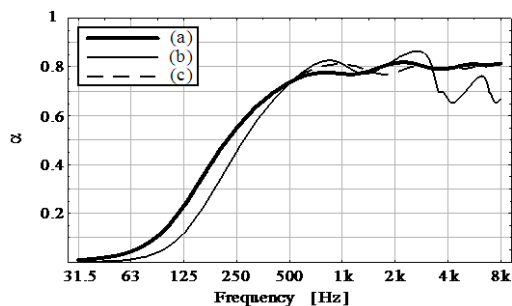


Figure 4. (a) The result of the absorption coefficient of the model in Figure 3 (a). For comparison, those for the models in Figure 3 (b) and (c) are also shown.

2.2 入射側に MPP, 剛壁側に通気性膜と多孔質吸音層を配置した場合の吸音特性

Figure 1(b)に示す入射側に MPP, 剛壁側に PM と多孔質吸音層を配置した場合の、吸音特性の一般的特徴と吸音メカニズムについて考察する。比較として、単一 MPP の背後層に、PM を挿入した吸音体(Figure 5(b))と、単一 MPP 吸音体(Figure 5(c))の吸音特性の計算も行う。計算結果の一例を Figure 6 に示す。計算例のパラメータは 3.1 と同じである。

まず、検討する吸音体の吸音特性の一般的特徴をまとめる。Figure 6より吸音特性の概形は、単一 MPP に似た特性を示す。31.5～125 Hz では 0.1 程度で α は低く、125～1 kHz で急激に α は増加する。本計算例の場合、1 kHz 付近でピークとなり 0.9 程度の α を示す。共鳴吸音のピーク周波数以上では、 α は急激に低下し、4 kHz, 8 kHz 付近の周波数でピークが生じるが非常に小さいものである。このピークは、高次の共振ピークによるものと考えられる。

次に、吸音メカニズムについて考察する。Figure 5 に示す 3 つの吸音体の共通点として、入射側に MPP がある点が挙げられる。つまり吸音特性に対しては、MPP の特性が支配的であることが分かる。

まず、Figure 5(b)と(c)を比較する。Figure 6 の吸音特性の比較より、PM の挿入で、単一 MPP 吸音体の吸音帯域と吸音性能が、大幅に改善されていることが分かる。

次に、Figure 5(a)と(b)を比較する。両者の差は、多孔質吸音材の有無である。Figure 6より、(a)の吸音体の吸音特性は、(b)の吸音体のそれと比べ、若干の吸音帯域の広帯域化とピーク吸音率の向上が見られる。これより、MPP と PM からなる 2 重吸音構造に、多孔質吸音材を挿入することで、若干ではあるが吸音帯域の広帯域化とピーク吸音率の向上が可能だと考えられる。

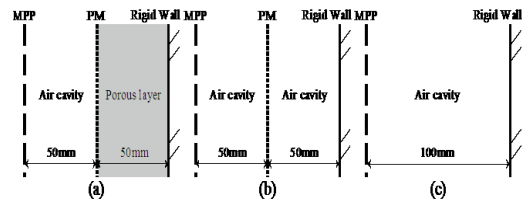


Figure 5. (a) The model of the absorber studied here. For comparison, (b) that without the porous layer, and (c) without the permeable membrane and porous layer are also studied

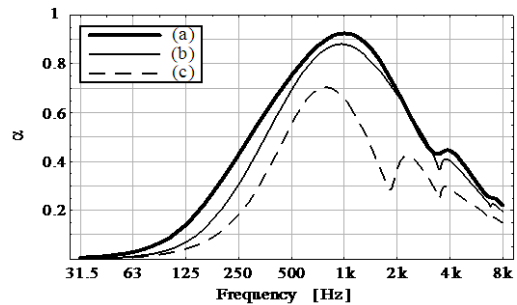


Figure 6. (a) The result of the absorption coefficient of the model in Figure 5 (a). For comparison, those for the models in Figure 5 (b) and (c) are also shown.

3. まとめ

本研究では、MPP と PM からなる背後に剛壁を有する 2 重吸音構造に、多孔質吸音材を挿入した吸音構造の音響特性を解析し、考察を行った。以下、得られた知見を示す。

入射側に PM と多孔質吸音層を配置した場合、吸音特性は、PM の特性が支配的である多孔質型に似た特性を示し、PM でほぼ決まっている。多孔質吸音材を挿入することで、吸音性能が若干向上するが、低・高音域で吸音率が少し増加する程度である。また MPP は、検討している吸音体において、ほとんど効果が見られないため、必要性がないことが分かる。

入射側に MPP, 剛壁側に PM と多孔質吸音層を配置した場合, MPP の特性が支配的である Helmholtz 型の吸音特性を示す. 吸音帯域の広帯域化とピーク吸音率の向上については, PM の寄与が大きく, PM だけで十分な広帯域化が実現できている. 多孔質吸音材の挿入は, 若干の広帯域化とピーク吸音率の向上が見られる程度である.

[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. また, (株) ササクラの岡内博俊氏はじめ, 音環境事業部の方々にご協力いただいた. 記して謝意を表す次第である.

Literature Cited

- 1) D-Y. Maa. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Scientia Sinica*, 17, 55-71 (1975)
- 2) D-Y. Maa. Microperforated-panel wideband absorber. *Noise Control Eng. J.*, 29, 77-84 (1987)
- 3) K. Sakagami, M. Yairi, M. Morimoto. Multiple-leaf sound absorbers with microperforated panels: an overview. *Acoustics Australia* vol.38 64-69 (2010)
- 4) 阪上公博, 加納賢一, 森本政之, 矢入幹記. 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. 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 第2号 (2010)
- 5) 小嶋星司, 阪上公博, 森本政之, 矢入幹記. 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—開口端補正の取り扱いによる影響—. 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2011-31 (2011)
- 6) K. Sakagami, S. Kobatake, K. Kano, M. Morimoto, M. Yairi. Sound absorption characteristics of a single microperforated panel absorber backed by a porous layer. *Acoustics Australia* (submitted)
- 7) Y. Miki. Acoustical properties of porous materials -Modifications of Delany-Bazley method-. *J.Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 11, 19-24 (1990)

Sound absorption characteristics of a double-leaf structure composed of a microperforated panel (MPP) and a permeable membrane with a porous layer

Kimihiko SAKAGAMI, Seiji KOBATAKE, Masayuki MORIMOTO

Graduate School of Engineering, Department of Architecture

Key words: Microperforated panel (MPP), Permeable membrane, Porous absorbent, Sound absorption characteristics

A microperforated panel (MPP) is recently widely known as a promising alternative for next-generation sound absorption materials, however its sound absorption effect is limited to its resonance frequency range. In order to make a more wideband sound absorber with an MPP, there have been many studies. The simplest method is to put a porous layer behind the MPP: its effectiveness has been presented in our previous studies. In the present study, as an attempt to obtain a sound absorber with a wider absorption frequency range, a combination of an MPP, porous layer and permeable membrane is studied. In the case that the MPP and porous layer are on the illuminated side, the sound absorbing system shows a resonance absorption characteristics and its absorption peak is broaden by the effect of the permeable membrane. The porous layer has a small effect to enhance the effect of the permeable membrane. On the contrary, in the case that the permeable membrane is on the illuminated side, the sound absorption characteristics are dominated by the permeable membrane: porous-like absorption characteristics. In this case, the MPP has very small effect, which can be negligible.