

# 音響振動連成数値解析による 積層型音響材料の部材性能予測に関する研究

Study on prediction of the performances of multi-layered acoustic elements  
based on the vibro-acoustic numerical analysis

学籍番号 47-127628  
氏名 井上 尚久 (Inoue, Naohisa)  
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

## 1. 序論

**研究背景** 騒音振動伝搬の制御、室内の残響音の制御などの従来の音響設計に加え、スピーチプライバシー確保や拡声放送などの情報伝達の明瞭化、知的生産性の向上など様々な観点から音環境に対する社会的要求が高まっている。個人レベルにおいても、より高い QOL を支える要因の一つとして、居室や自動車内などのプライベートな空間においても音環境が重要視されている。このような幅広い音環境設計の実現においては音響材料の軽量化、薄型化、高性能化、低コスト化が必要不可欠である。

新規材料の開発サイクルは Fig.1 に示すように性能予測、試料製作、性能試験の三段階に大別され、効率的な開発を行うためには各段階での精度を向上させることが重要である。

現在、積層型音響材料の性能予測については理論解析を用いることでその部材性能予測が行われているが、解析における前提として無限大面積試料、各層内で一様な物性値、平面状の積層などの仮定を行うため、実際の条件との乖離が生じ、設計への適用については大まかな傾向の把握に留まらざるを得ないと言える。一方、近年では数値解析による音響材料の部材性能予測に関する研究が見られるようになってきたが、その多くが単層材料を対象としていたり、形状や振動特性に制限を設けたりするものがほとんどであり、複雑な構成、形状の音響材料を対象とした予測手法は未整備の段階である。

一方、音響材料開発における音響管計測、

及び実験室計測に関して計測値の変動要因に関する知見が不足していることは材料開発の性能評価の精度、信頼性の劣化の一因と考えられ、有用な知見の取得が望まれる。

**研究目的** 以上の背景から本論文では積層材料の開発サイクルの合理化を念頭に大きく二つの目的を設定する。

第一の目的はより高い条件設定の任意性、適用範囲をもった部材性能予測手法を構築することで、性能予測における材料のモデル化の過程で生じる現実との乖離を小さくし、性能予測精度の向上を図ることである。

第二の目的は構築した手法の妥当性検証のケーススタディを通して積層材料の振動メカニズム・音響指標の挙動を把握するものであり、材料の性能測定における誤差要因に関する知見の取得を行い、性能測定精度の向上を図ることである。

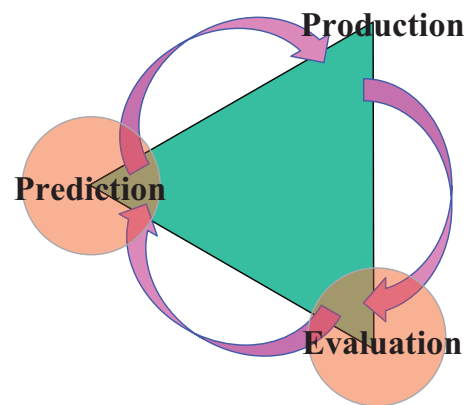


Fig. 1 A cycle of material development.

## 2. 数値解析の基礎理論

本章では音響材料の吸遮音特性の数値予測プログラムの基礎となる境界要素法 (BEM), 有限要素法 (FEM) の理論を詳述し, それぞれの物理場の連成方法を具体的に示している。

積層材料の性能を精度よく予測するためには, 各種の材料の振動性状に応じて適切な物理モデルを用いた解析を行う必要がある。本研究では空気中の音場に加え, 材料を構成する振動場を以下の 4 つに大別し解析を行う。

**弾性体材料 (E)** 塊状の固体の振動伝搬に対しては弾性動力学方程式に基づき, ヤング率  $E$ , ポアソン比  $\nu$ , 損失係数  $\eta$ , 物質密度  $\rho_s$  を用いて解析を行う。

**板材料 (PI)** 固体の内, 面的な広がりに対して厚みが薄いものは板材料として取扱い, Kirchhoff の薄板理論に基づき解析を行う。弾性体材料における物性値に加え, 板厚  $t$  を用いて解析を行う。

**膜材料 (M)** 面的な広がりに対して厚みが薄く, 剛性が小さいしなやかな材料はその面密度  $\rho_m$  のみを考慮した解析を行う。また, 上記 3 つの材料については材料の通気性は考慮しない。

**多孔質弾性体材料 (P)** 多孔質材は Fig.2 に示すように骨格を形成する固体とその隙間の空気による固気二相で構成される材料である。多孔質材が非通気な材料と積層される場合, 固体伝搬音, 空気伝搬音, 及びそれらの連成伝搬を考慮する Biot 理論に基づき解析を行う。解析において, 固体物性値として上記  $E$ ,  $\nu$ ,  $\eta$  及び嵩密度  $\rho_b$  を用いる。内部空気については複素体積弾性率  $K_f$ ,

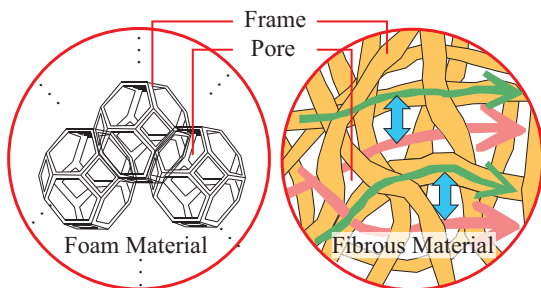


Fig.2 Microstructures of porous materials.

複素実効密度  $\rho_f$ , 空隙率  $\phi$  を用いる。本研究では JCA-model, Kato-model<sup>[5]</sup> と呼ばれる経験式により  $K_f$ ,  $\rho_f$  を推定する。JCA-model では流れ抵抗  $\sigma$ , 粘性特性長  $\Lambda$ , 熱的特性長  $\Lambda'$ , 迷路度  $\alpha_\infty$  を用いる。Kato-model では多孔質材を構成する繊維の物質密度  $\rho_s$ , 直径  $D$  と多孔質材の嵩密度  $\rho_b$  を用いる。

以下, 本論文で構築した解析理論について手法論的に新規性の高い項目について概略を示す。

### 2.1. Galerkin BEM - FEM の連成

本研究で構築する部材性能予測手法では境界要素法による半自由音場の音響系と, 有限要素法による凹み・開口内部の閉空間音場の音響系の結合を行う。

本論文では Kirchhoff-Huygens 積分方程式の離散化に Galerkin 法を用いることで, 一般に非対称となる境界要素領域, 及び最終的な連成系の係数行列を対称化することで, メモリ使用量を半減し, 求解速度を効率化する手法を構築した。またこの時, 高次要素を用いることでより解析効率が向上することが示された。

### 2.2. 非接着積層条件の導入

多孔質弾性体材料とその他の材料間の接着・非接着条件は積層材料の振動性状及び吸遮音性能に重大な影響を及ぼす。

非接着条件は Fig.3 に示すように微小空気層を介して振動が伝達する条件である。従来非接着条件は扁平な音響要素を材料間に設けることでモデル化されてきたが, 極端なアスペクト比の解析メッシュは解析精度を損なう恐れがある。そこで本論文では, 微小空気層を考慮した材料間の連続条件を導出し, 数値解析への導入法を示した。

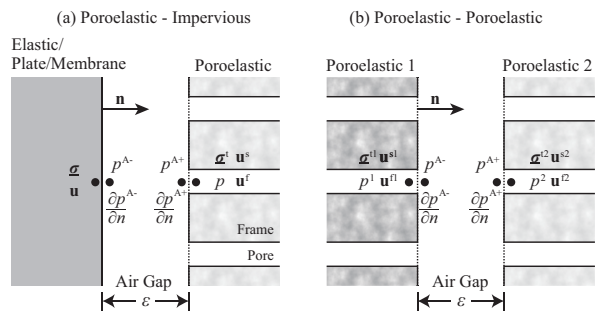


Fig.3 Out-of-contact condition between poroelastic material and other material.

### 3. 音響管問題による吸遮音特性解析

音響管計測を取り上げ試料と管側壁との物理的条件(スリップ支持, 固定支持, 空隙条件)が計測される音響指標に及ぼす影響に関する検討を行った。

#### 3.1. 解析プログラムの妥当性検証

スリップ支持条件の単層・積層材料の透過損失解析を行い, 開発したプログラムによる数値解析値及び無限大面積試料に対する理論値が一致することを確認した。

#### 3.2. 音響管計測における材料支持条件に関する検討

材料開発の初期段階に用いられる音響管計測は一般に試料支持条件により計測値が大きく変化することが知られている。単層多孔質材, 膜付多孔質材について, 固定支持条件・空隙条件の解析を行い, 管内での現象, 及び測定値の挙動に関する知見を得た。特に単層多孔質材については, 理論解析による実測値の予測を試み, 支持条件の諸元を明らかにした実測の必要性を示した。

### 4. 剛平面上の凹み内部に設置した音響材料の吸音率解析

#### 4.1. 解析モデルの提案

本論文の中核となる部材性能予測手法について数値解析論的な考察を行った。これらの考察は次章で扱う, 透過損失の解析モデルでも同様であるため, 以下本論文において採用する吸音率, 透過損失解析モデル(Fig. 4)の要点を列挙する。

- 1) 剛バフル中の凹み・開口に材料を設置
- 2) 凹み・開口内部では任意の材料構成, 形状を取る事が可能
- 3) バフル外部の音場に BEM, 内部の音場・振動場に FEM を適用
- 4) 入射角 ( $\theta, \varphi$ ) での平面波入射
- 5) 斜入射吸音率・透過損失は幾何学的入射パワー, ネット吸音パワー・ネット透過パワーより算出
- 6) Paris の式により統計平均値を算出

#### 4.2. 単層多孔質材料の吸音率

構築した手法の妥当性に関し理論的・実験的検証を行うと同時に, ケーススタディとして, 残響室法吸音率計測における測定誤差要因である面積効果(試料面積の影響),

及びその一抑制方法である Deep-well 法(凹み深さの影響)を取り上げ, それらが吸音率の計測値に及ぼす影響に関する考察を行った。Fig. 5 に解析結果を示す。

**試料面積の影響** 中音域から高音域にかけ, 面積効果により吸音率の解析値は理論値より上昇し, その傾向は試料面積が小さいほど顕著である。**凹み深さの影響** 凹みが深くなるにつれ高音域から, 理論値に近似する傾向が見られる。凹みが深くなるにつれ擦過入射時の解析値が理論値に接近する傾向を別途確認しており, Deep-well 法の影響範囲に関する知見を得た。

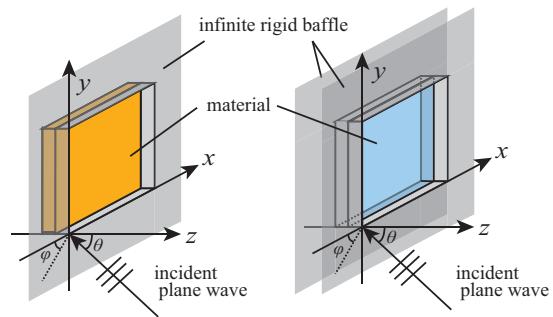


Fig. 4 Schematic of proposal models for (a)absorption and (b)transmission analyses.

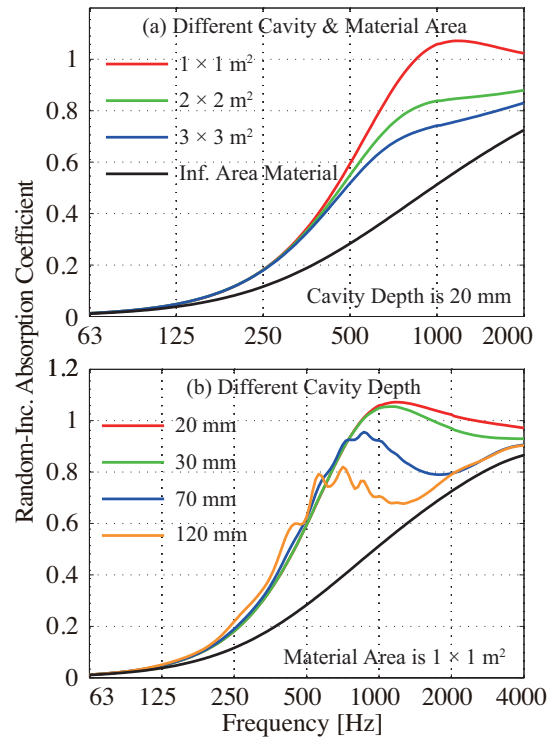


Fig. 5 Random incidence absorption coefficient calculated for hair felt with following properties:  $\rho_s = 1189 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 21 \mu\text{m}$ ,  $\rho_b = 50 \text{ kg/m}^3$  and thickness 20 mm.

### 4. 3. 積層材料の吸音率

多孔質材, 膜, 多孔質材の 3 層材料について積層条件を変化させた解析を行い, 理論値, 実測値との比較を通して本論文で構築した解析手法の妥当性の検証を行った。解析条件は Fig.6 及び Table 1 に示す通りである。

**解析値の傾向** Fig.7 に解析結果を示す。膜が接着されることにより主に 500 Hz 以下の中・低音域に顕著な吸音率のピークが見られる。これらのピーク (a), (b), (c) のいずれも材料が構成するバネマス系による単純な一自由度共振運動により説明されるが, 材料間の接着条件により構成する共振系が異なり, 同一構成であっても様々な周波数特性の吸音率を呈することがわかる。また, 膜が入射側の多孔質材に接着する場合には比較的密度, 剛性の高い非通気層が形成され, 高音域で吸音率の低下が見られる。

単層多孔質材の場合と同様に面積効果により理論値に対し, 吸音率の上昇が見られるが概ね理論値と対応する挙動を示しており, 理論的妥当性が示された。

**実測値との対応** Type PAMP, PMAP いずれにおいても, 解析値と実測値は全体的な上昇傾向は対応が見られるものの, 絶対値としては乖離が見られる。この原因として, 実測における残響室の拡散性の不足, 材料の接着条件の相違, 材料端部における隙間の影響などが考えられる。隙間の影響については別途解析を行った結果, 一自由度共振による吸音率のピークの低下, 高音域で音響漏れによる吸音率の上昇などが生じることが示され, 実測・施工時においても重要な検討項目であることが示唆された。

Table 1 Physical properties and dimensions of layered materials for the calculation.

PEM 1&2	Material Density	$\rho_s = 1186[\text{kg}/\text{m}^3]$
	Fiber Diameter	$D = 21[\mu\text{m}]$
	Poisson's Ratio	$\nu = 0$
PEM 1	Bulk Density	$\rho = 200[\text{kg}/\text{m}^3]$
	Young's Modulus	$E = 1.5 \times 10^9[\text{N}/\text{m}^2]$
	Loss Factor	$\eta = 0.45$
	Thickness	$t = 5[\text{mm}]$
PEM 2	Bulk Density	$\rho = 50[\text{kg}/\text{m}^3]$
	Young's Modulus	$E = 2.2 \times 10^4[\text{N}/\text{m}^2]$
	Loss Factor	$\eta = 0.24$
	Thickness	$t = 20[\text{mm}]$
Membrane	Area Density	$\rho_m = 0.04[\text{kg}/\text{m}^2]$

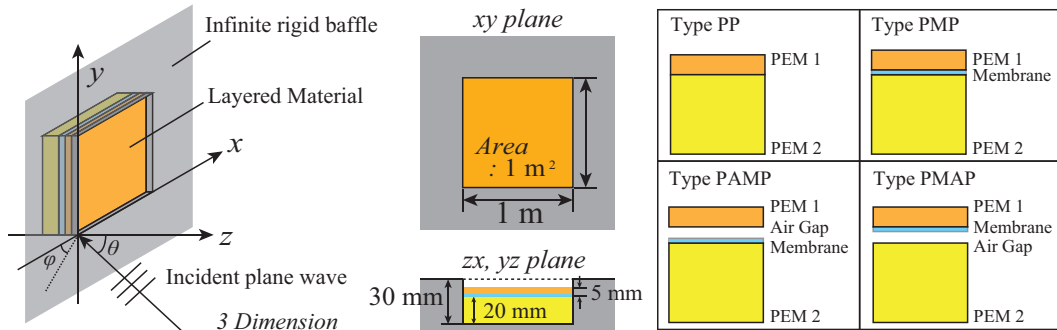


Fig. 6 Geometries and the layer conditions for the calculation of absorption coefficients for the layered materials.

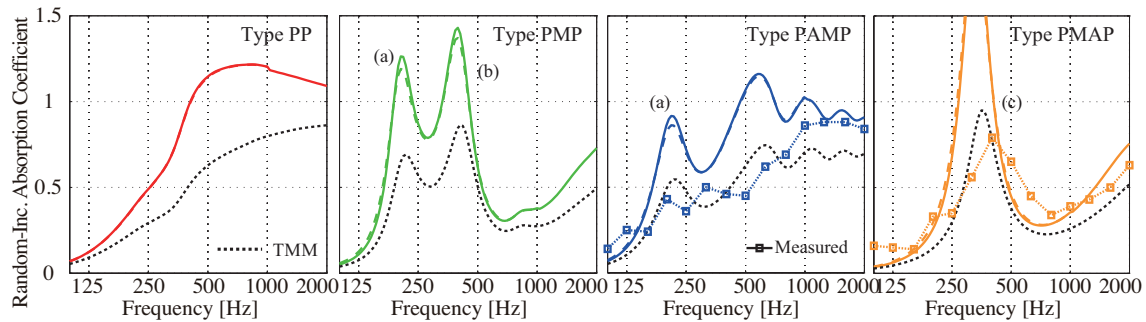


Fig. 7 Random incidence absorption coefficients calculated for the four types of layered materials. Solid and dotted lines are the results for the materials supported loosely and rigidly, respectively.

## 5. 剛バフル上の開口内部に設置した音響材料の音響透過損失解析

### 5.1. 板状部材の支持条件のモデル化

板状部材の支持条件について簡易モデルによる局所作用条件、三次元弾性体モデルによる拡張作用条件の2つの支持モデルの比較を行った結果、支持幅が大きい場合や高音域において一般に両モデル間で振動エネルギー吸収率の差が大きいことが明らかとなった。

### 5.2. 単層板材料の音響透過損失

構築した手法の妥当性検証のケーススタディの中で音響透過損失計測において誤差要因となる試料設置及び試料支持条件を取り上げ、単層板材料の解析を行った。

**試料設置条件の影響** 試料を開口中央に設置し、ニッシュ深さを变化させた場合の結果を Fig. 8 (a) に示す。ニッシュが深くなるにつれ、コインシデンス限界周波数以下の非共振周波数において透過損失の低下量は大きくなり、有限板の理論値(Sewell の式)から乖離する傾向を示す。ニッシュ深さを450mmに固定し、試料設置位置を变化さ

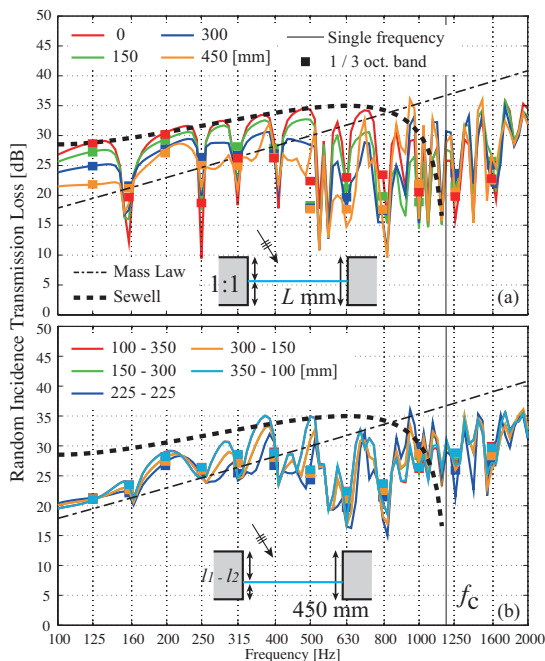


Fig. 8 Random incidence transmission losses calculated for simply supported panes mounted (a) on the center of apertures with different thicknesses and (b) on the different positions of an aperture with constant depth, 450 mm.

せた場合の結果を Fig. 8 (b) に示す。入射側、透過側のニッシュ深さについて相反性が確認でき、試料が開口中央に設置される時に最も透過損失が低下することが確認された。

**試料支持条件の影響** 上述の局所、拡張作用支持モデルを適用し、支持材接合幅を变化させた場合の透過損失の解析を行った結果を Fig. 9 に示す。尚、両モデルでは試料内法を一致させている。接合幅が小さい場合には両者の差は小さく、局所作用モデルによる解析の妥当性が確認された。一方、支持幅が大きい場合には条件間で板寸法が乖離し、板共振周波数に影響を及ぼす。特に1/3オクターブバンド値では透過損失が低下する帯域を誤評価する危険性があるため、このような条件では三次元弾性体モデルによる解析が必要である。

### 5.3. 積層材料の音響透過損失

板、多孔質材、膜の3層材料について積層条件を变化させた解析を行い、理論値、実測値との比較を通して本論文で構築した解析手法の妥当性の検証を行った。解析条件は Fig.10 に示す通りである。

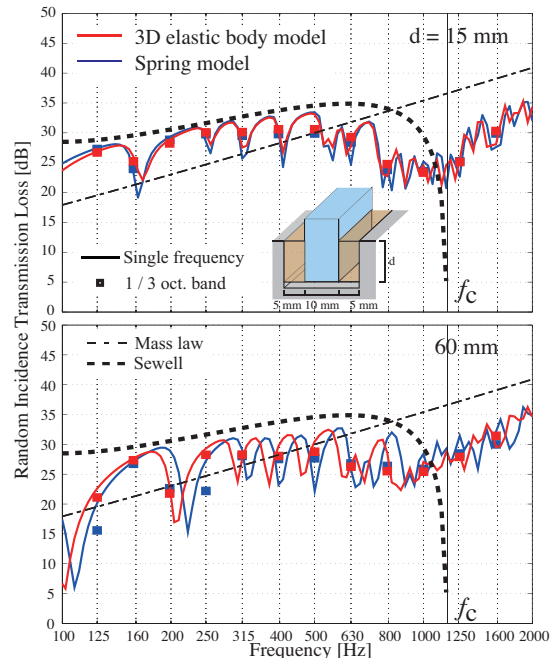


Fig. 9 Comparison of the random incidence transmission losses calculated for panes with local and extended reactive support conditions. The support material is putty with  $E = 1.0 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>,  $\nu = 0.25$ ,  $\eta = 0.5$  and  $\rho_s = 1000$  kg/m<sup>3</sup>.

**解析値の傾向** Fig. 11 に解析結果を示す。いずれの積層タイプにおいても低音域では試料の有限性により放射効率が低下し、透過損失は理論値に対し上昇する。一方、高音域では理論値と概ね対応することが確認された。

多孔質材が板材に接着する場合 (Type PIPM, PIPAM), 多孔質材による制振効果が期待されるが、非接着条件 (Type PIAPM, PIAPAM) と比較し寧ろ板共振モードのピーク・ディップが顕著に見られることが明らかとなった。これは接着しない場合、板を透過した波は主に空気伝搬音として多孔質材内部で減衰するのに対し、接着する場合は固体伝搬音として、透過側まで伝達し、放射されるためであると推察される。

Type PIAPM, PIAPAM は鉄板の質量則に対し、それぞれ膜付き多孔質材、単層多孔質材の透過損失が上乘せされた特性となっている。Type PIPAM は、250Hz 付近で多孔質材の固体相、気体相が逆位相で振動する事で材料全体の平均的な振動速度が低下し透過損失が大きくなる。Type PIPM は、多孔質材両面が非通気層に拘束される事で多孔質材固体相の縦共振によるピーク、ディ

ップが顕著に見られる。

**実測値との対応** Type PIAPM について解析値と実測値は概ね良く対応している。透過損失の実測では試料を室間の開口に懸垂状態で設置しているため、板材-多孔質材間で自重による接触がなく、非接着条件は現実に即した条件となっていると推察される。低音域では実測値が無限大面積相当の値に近づいている。この原因としては、残響室の拡散性の不足や、ニッシュ効果の影響などが考えられる。

## 6. 総括

積層型音響材料の部材性能予測について汎用的な解析手法を構築し、性能予測精度の向上を図ると共に、実測を想定した解析により性能評価精度向上に関する知見の取得を行った。今後の課題として、材料モデル化精度の向上、及び音響指標値の算出法に関する検討の必要性があげられる。また、構築した解析プログラムについてユーザーインターフェースの拡充を通し、材料開発の現場利用への敷居を下げる事が重要である。

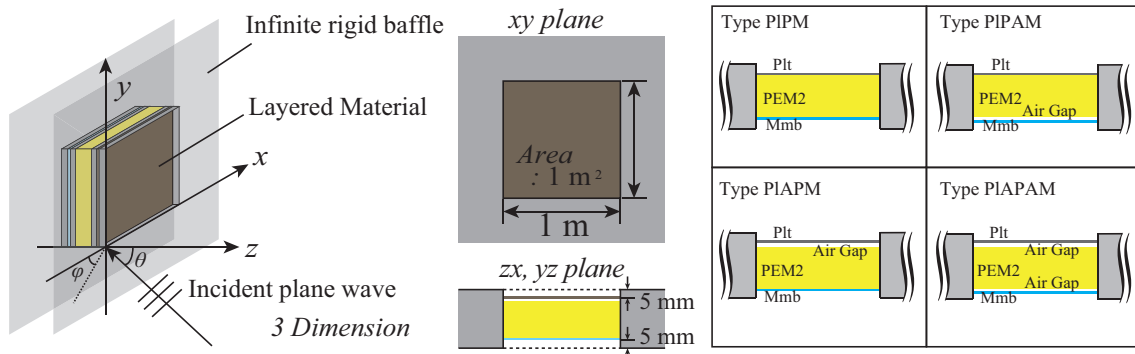


Fig. 10 Geometries and the layer conditions for the calculation of transmission losses for the layered materials. The plate is iron. Properties of porous material and membrane are shown in Table 1.

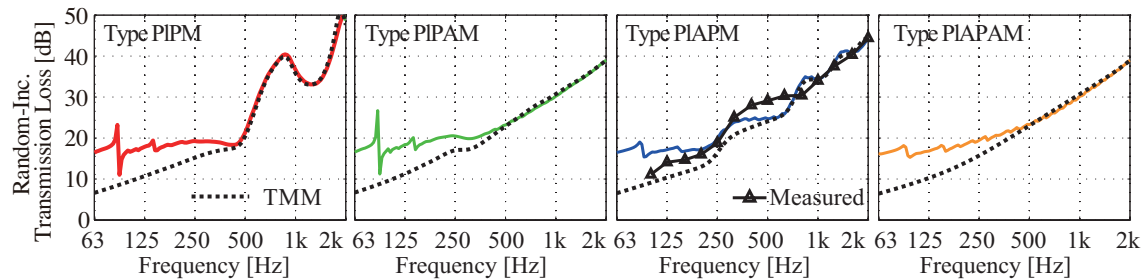


Fig. 11 Random incidence absorption coefficients calculated for the four types of layered materials