

# ポリエステル不織布による高性能吸音構造に関する基礎的研究

大塚 健太

## 1. はじめに

ポリエステル不織布 (PW) は、ポリエステルでできた繊維を融点の低いポリエステルで結合して製造するポリエステルだけでできた多孔質型材料である。特長は、繊維が自己結合しているためグラスウールのような繊維の飛散がほとんどなく表面仕上げなしで使用できること、原料のポリエステルは完全リサイクル可能で VOC も放散されないことなどである。

多孔質型材料は高い吸音性能が期待できるため、筆者らは PW の吸音材料としての可能性に着目して研究を続けており、これまでに、密度と厚さが同じグラスウールと同等の吸音性能を有する PW を開発<sup>1)</sup>するとともに、PW の製造・加工過程で発生する端材のリサイクル方法を独自に開発し、リサイクル材 (RPW) についても吸音性能を明らかにした<sup>2)</sup>。

しかし、PW を吸音材料として活用するには、実験的手法によって材料の単純な吸音性能を把握するだけでなく、吸音に関わる物理現象や材料の形状など多くの側面から PW を用いた吸音構造に関する知見をさらに蓄積していく必要がある。

そこで本研究では、PW と RPW による高性能な吸音構造を実現することを目的として、吸音性能を規定する主要な物理量を把握するとともに、吸音材料を含んだ音場を有限要素法を用いて解析し、中小規模の吸音構造の吸音特性に関して、材料の組み合わせと形状の変化、配置などに着目した基礎的検討を行う。

## 2. PW と RPW の音響物理特性

PW と RPW の特性把握のために、多孔質型吸音材料の吸音特性を大きく規定する特性インピーダンス、伝搬定数、単位面積流れ抵抗の 3 つの物理量の測定を行った。単位面積流れ抵抗は ISO 9053 に、特性インピーダンス、伝搬定数は ISO 10534-2 に準拠して測定した。測定した試料の組成は、PW は密度  $32\text{kg/m}^3$ 、バインダー混合率 30%、スパンボンド無し、繊維太さ 2de、繊維形状クリンプ、繊維断面形状は密のもの、RPW は繊維太さのみ PW と異なる 6de のものである。単位面積流れ抵抗は、PW が  $13,759\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ 、RPW が  $2,201\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$  であった。正規化特性インピーダンス  $Z_c$  を図-1 に、伝搬定数  $\gamma$  を図-2 に示す。Miki の回帰式<sup>3)</sup>と比較すると、PW は  $R=15,000$  程度、RPW は  $R=5$

～6,000 程度に相当し、PW は典型的な多孔質型材料に近いが、RPW はやや独特な材料であることが示唆される。PW に顕著な 125Hz 付近に見られる値の変動は、PW の弾性体としての性質が現れたものと思われる。

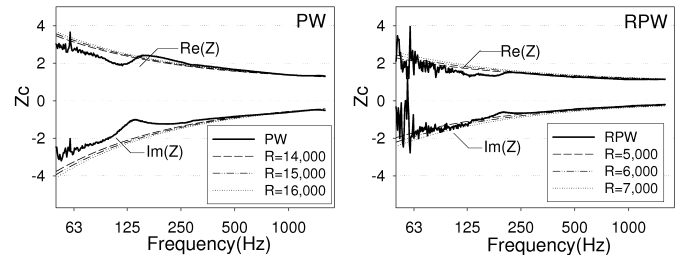


図-1 PW と RPW の正規化特性インピーダンス

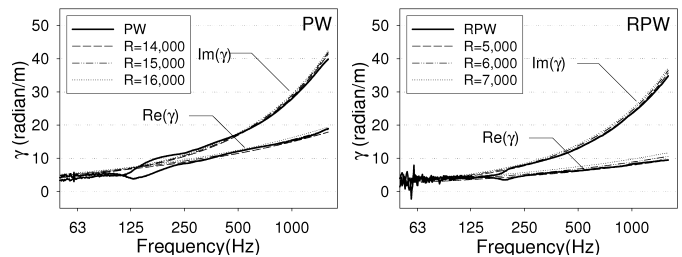


図-2 PW と RPW の伝搬定数

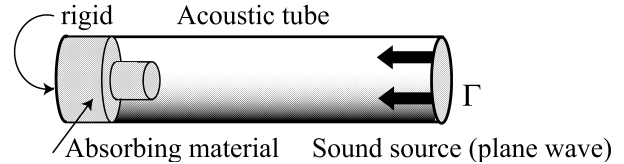


図-3 解析イメージ

## 3. 吸音材料を含む音場の解析手法

本研究では有限要素法を用い、図-3 のような吸音材料と媒質と剛壁からなる空間に加振面  $\Gamma$  から平面波を入射した際の音圧分布から材料の垂直入射吸音率を算出し、吸音構造の評価を行う。音響要素には、大鶴らによって提案され性能がよいとされている、自然スプライン関数を補間関数とする 3 次元 27 節点アイソパラメトリック要素<sup>4)</sup>を用い、吸音要素には、吸音材料の特性インピーダンスと伝搬定数を用いる Sakuma らの手法<sup>5)</sup>を採用する。解析の対象となる離散化運動方程式を式 (1) に示す。式 (1) を構成する要素の剛性マトリクス  $[K]_e$ 、質量マトリクス  $[M]_e$ 、外力マトリクス  $[W]_e$  はそれぞれ以下のように表される。

$$([K] - \omega^2[M])\{p\} = j\omega\rho_0v[W] \quad (1)$$

表-1 実験パターン

case	構成	case	部材 I	部材 II	部材 III
1	PW50	1	P	P	P
2	PW40+RPW10	2	P	P	R
3	PW30+RPW20	3	P	R	P
4	PW20+RPW30	4	P	R	R
5	PW10+RPW40	5	R	P	P
6	RPW40+PW10	6	R	P	R
7	RPW30+PW20	7	R	R	P
8	RPW20+PW30	8	R	R	R
9	RPW10+PW40	9	P	P	
10	RPW50	10	P	R	
		11	R	P	
		12	R	R	

左：実験 1, 右：実験 3

$$[K]_e = \iiint_e \left( \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial z} \frac{\partial N^T}{\partial z} \right) dV$$

$$[M]_e = \frac{1}{c_0^2} \iiint_e \{N\} \{N\}^T dV$$

$$[W]_e = \iint_{\Gamma_e} \{N\} dS$$

$j$  は虚数単位,  $\omega$  は角速度,  $p$  は複素音圧,  $\rho_0$  は空気  
の密度,  $v$  は粒子速度,  $c_0$  は空気中の音速である。

吸音要素  $[K]_{ab}$  と  $[M]_{ab}$  は, 次のように表現する。

$$[K]_{ab} = \epsilon [K]_e$$

$$[M]_{ab} = \epsilon \left( \frac{c_0}{c_e} \right)^2 [M]_e \quad \left( c_e = \frac{j\omega}{\gamma}, \quad \epsilon = \frac{c_e \rho_0}{Z} \right)$$

$c_e$  は吸音材内部の音速,  $\gamma$  は伝搬定数,  $Z$  は特性イン  
ピーダンスである。吸音率は次式により求める。

$$\alpha_0 = \frac{4.0 \cdot \{\text{real}(p)/(\rho_0 c_0 v)\}}{(1.0 + \{\text{real}(p)/(\rho_0 c_0 v)\})^2 + \{\text{img}(p)/(\rho_0 c_0 v)\}^2}$$

#### 4. 小さな吸音構造の解析 (数値実験 A)

まず, 小規模な吸音構造を対象に解析手法の妥当性  
の確認と基礎的な検討を行う。

##### 4.1 解析モデル

$\phi = 100\text{mm}$ , 長さ  $550\text{mm}$  の円柱形の空間に様々な  
円柱で構成した試料を設置した音場を解析する。形状の  
対称性から  $1/4$  円をモデル化する。粒子速度は  $\Gamma$  におい  
て  $v = 1.0\text{m}^3/\text{s}$  とし,  $c_0 = 343.7\text{m/s}$ ,  $\rho_0 = 1.21\text{kg/m}^3$   
試料は剛壁密着とする。2章で求めた物性値を用いる。

##### 4.2 解析手法の検証

PW でできた図-4 に示す楔 B と厚さ  $40\text{mm}$  の RPW,  
PW20mm(表)+RPW30mm(裏) による 2 層構造を対象  
に, 解析手法の妥当性を検証した。実測と計算結果の  
比較を図-5 に示す。実測値を曲線で, 計算結果をシン  
ボルで表す。中音域以降では両者の対応は良好である。  
2 層構造については計算値が実測値よりもやや大きく  
なる傾向があるものの, 吸音特性を捉えるには妥当な  
手法であると考えられる。

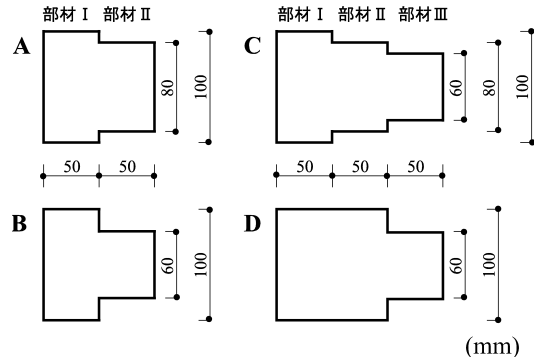
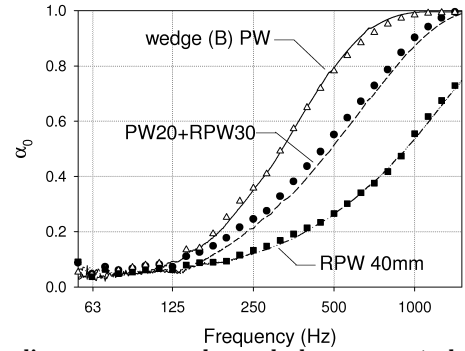


図-4 実験に用いる楔の形状



lines : measured, symbols : computed  
図-5 実測とシミュレーションの比較

#### 4.3 解析の内容

全長を  $50\text{mm}$  とした PW と RPW による 2 層吸音構  
造, 図-4 に示す 4 種類の楔形吸音構造と, 厚さ  $100\text{mm}$ ,  
 $150\text{mm}$  の単層吸音構造を対象に, 3つの数値実験を行  
う。計算は  $1/6$  Oct. Band 中心周波数で行う。

- 表-1 左に示す組み合わせの PW と RPW による 2  
層構造を対象に 2つの材料の位置, 割合と吸音特  
性の関係について検討する。
- 楔 A-D と厚さ  $100\text{mm}$ ,  $150\text{mm}$  の単層構造に実測  
した PW の物性値を与えて吸音特性の比較を行い,  
形状と吸音特性の関係について検討する。
- 楔 C, D, A に, 表-1 右に示す組み合わせにより  
PW と RPW の物性値を与え, 形状および材質の  
組み合わせと吸音特性の関係について検討する。  
なお, 以降では 2 層構造の構成は, “(音波入射側の材  
料)+(背後の材料)” と表し, 楔状構造の部位は, 剛壁に  
近い側から I, II, III と表す。

#### 4.4 数値実験 A の結果と考察

##### 4.4.1 2 層構造の組み合わせに関する実験

PW が音波入射側の場合の結果を図-6 に, RPW が音  
波入射側の場合の結果を図-7 に示す。図-6 からは, 全  
て PW でできた試料がもっとも性能がよく, 全て RPW  
でできた試料がもっとも性能が悪い, 材料表面に薄く  
PW 層を設けることで性能が大きく改善されるが, あ  
る程度以上は厚みを増しても性能の改善は緩やかにな  
るといった結果が得られた。図-7 と比較すると, 表面は

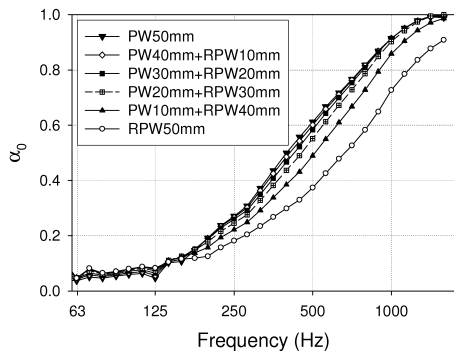


図-6 計算結果 (表面 : PW)

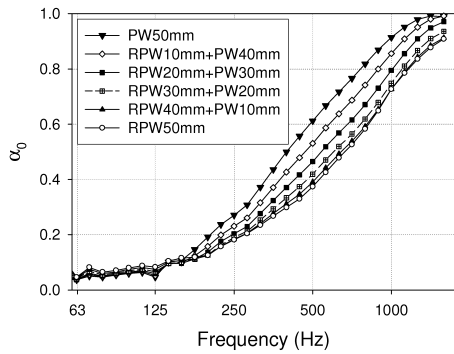


図-7 計算結果 (表面 : RPW)

RPW よりも PW の方が良く、表面に存在する材料が全体の特性をある程度決定することが分かる。2層構造において、リサイクル材を有効に活用しつつ性能の良い吸音構造を構成できる可能性が示唆される。

#### 4.4.2 形状変化に着目した実験

結果を図-8 に示す。B-D の比較から、部材 I の違いが低音域の吸音特性に大きく影響すること、C-D の比較から、部材 II の違いが中音域の吸音特性に大きく影響することが示唆される。小さな楔状構造では部位により吸音特性に与える影響が異なるようである。

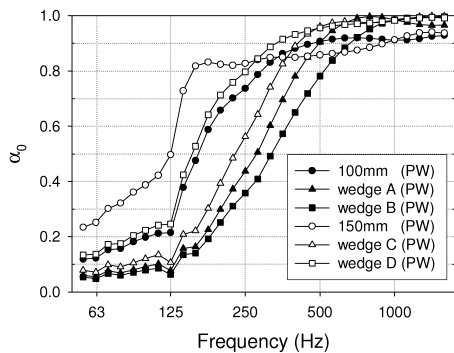


図-8 形状の変化と吸音特性の関係

#### 4.4.3 PW と RPW を組み合わせた楔に関する実験

ここでは、たとえば部材 I を PW で、部材 II を RPW で、部材 III を PW とした場合を PRP と表記する。まず、楔 C の解析結果を図-9 に、楔 D の解析結果を図-10 に示す。共通点としては、PPP-PPR 等の比較から、部材 III の材質の変化が 500Hz 以下の周波数に影響しないこと、PRR-PPR 等の比較から、部材 II が RPW で

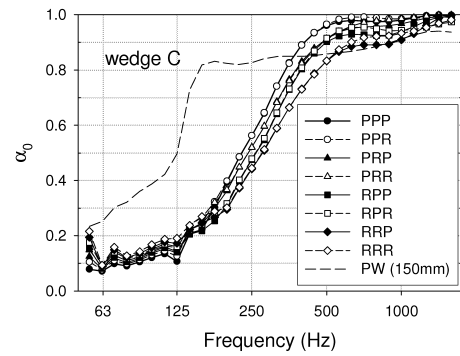


図-9 材料の組み合わせと吸音特性の関係 (楔 C)

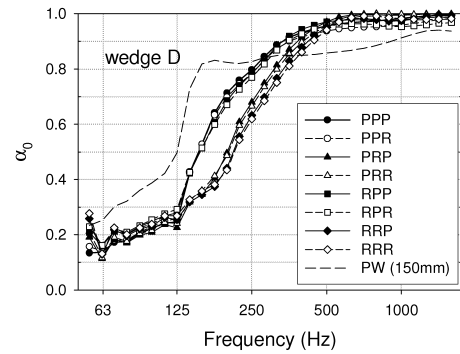


図-10 材料の組み合わせと吸音特性の関係 (楔 D)

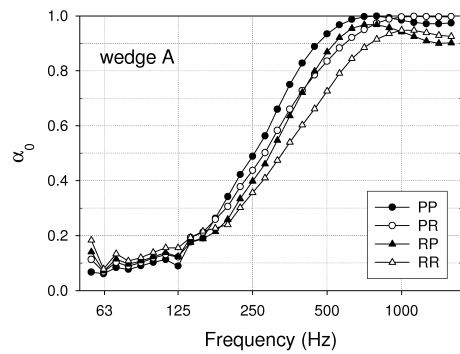


図-11 材料の組み合わせと吸音特性の関係 (楔 A)

ある方が、500Hz 以降の音域における吸音率の上昇が滑らかであることが挙げられる。一方相違点としては、楔 D の方が低音域の吸音性能がよいこと、PPP-RPP 等の比較から、楔 C では部材 I の影響力が大きく、PW の方が低音域で性能が明らかに良いのに対し、楔 D ではその影響力が大きく低下していることが挙げられる。両者の差が生じる原因は、各部材が直接音波と干渉するか否かが大きいようである。最も cut-off 周波数が低い組み合わせは楔 C では PPP、楔 D では PRP であり、形状によって必ずしも PPP とはならない。次に、楔 A の解析結果を図-11 に示す。楔 C と比較すると、4 例とも性能は劣るが、傾向は同じであることが分かる。部材 III は吸音力の底上げに寄与すると推測できる。

以上より、部材 I の材質は低音域の吸音性能に大きく影響すること、部材 II の材質は特性の素直さに影響を与えること、部材 III の材質は高音域の吸音特性に対する影響が大きく、その存在が吸音力の底上げにつな

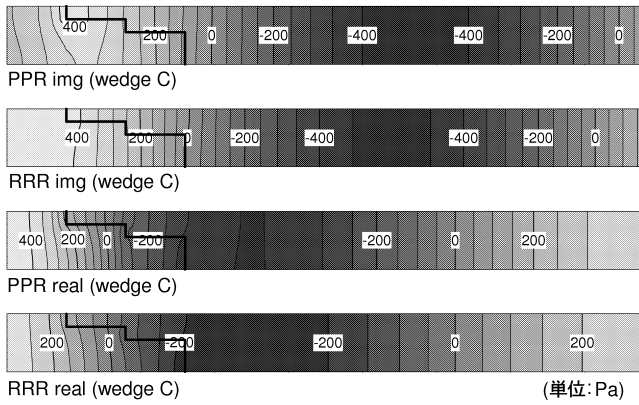


図-12 複素音圧分布の例

ることが分かり、形状の工夫と共に材料の組み合わせの重要性が示唆された。

500Hz において吸音性能の差が大きかった楔 C の PPR と RRR の複素音圧分布を図-12 に示す。複素音圧は、虚部が一般的な音圧を、実部が音波への抵抗力を表すが、PPR の方が音波とより干渉していること、RRR の方が音波への抵抗が小さいことなど、吸音特性の違いを確認することができる。

## 5. やや大きな吸音構造に関する実験 (数値実験 B)

前章までの結果を受け、より現実に近い大きさの階段状の吸音構造 (図-13) を対象に、2 つの実験を行う。

### 5.1 解析モデル

実験 a では 100mm × 100mm × 1000mm の空間、実験 b では 200mm × 200mm × 700mm の空間に吸音構造を配置した音場を解析する。音場の対称性を考慮し、一部分のみをモデル化する。要素寸法は最大 100mm とし、物性値と境界条件は数値実験 A 同様とする。

### 5.2 実験内容

- $B=200\text{mm}$ ,  $L=200\text{mm}$ ,  $T=400\text{mm}$  とし、階段の滑らかなさを height:width=5mm:25mm ~ 30mm:150mm まで 4 段階変化させ、吸音性能の変化を検討する。
- $B=200\text{mm}$ ,  $L=100\text{mm}$ ,  $T=200\text{mm}$  の楔を図-14 に示す一様さの異なる 3 通りに配置し、吸音性能の変化を検討する。

### 5.3 結果と考察

実験 a の結果を図-15 左に、実験 b の結果を図-15 右に音圧反射率により示す。楔の傾斜は滑らかなほどよい、楔の配置はランダムなほどよいという結果になった。双方とも、吸音構造の音波拡散の重要性を示すと考えられる。

## 6. まとめ

PW と RPW を用いた高性能な吸音構造の実現を目的として、PW と RPW の吸音に関わる代表的な物理

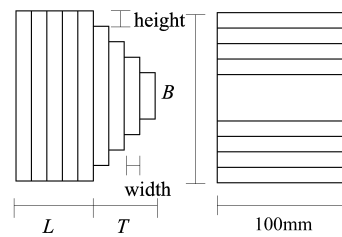


図-13 階段状吸音構造の形状

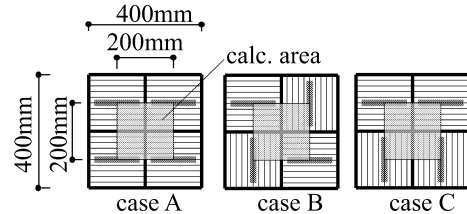
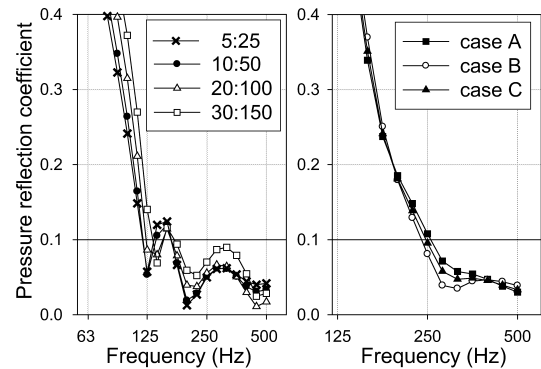


図-14 吸音構造の配置 (3 パターン)



左: 実験 a, 右: 実験 b

図-15 音圧反射率

量を整理した。有限要素法を用いてポリエステル不織布による中小規模の吸音構造の解析を行い、吸音構造の性能と材料の性能は必ずしも 1 対 1 に対応しないこと、音波の拡散の吸音性能への影響など、吸音構造の構成に関する基礎的な知見を得、形状、配置、材料の組み合わせを考慮する重要性、PW と RPW を効果的に用いて性能のよい吸音構造を実現できる可能性を示した。今後は、PW の吸音特性をよりよく表現するモデル、形状と材料の選択手法などを検討していきたい。

謝辞

PW 及び RPW 試料をご提供いただいた (株) フコクの古賀新一氏に感謝します。

参考文献

- 藤本一寿, 穴井謙, 古賀慎一, “ポリエステル不織布の吸音率に関する実験的検討,” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2004-33, pp.1-8, 2004.
- 中野達成, 穴井謙, 藤本一寿, “ポリエステル不織布端材のリサイクル材の吸音率に関する実験的検討,” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.43-44, 2005.
- Y.Miki, “Acoustical properties of porous materials - modifications of Delany-Bazley models,” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) Vol.11, pp.19-24, 1990.
- 富来礼次, 大鶴徹, “有限要素法による不整形残響室内音場解析,” 日本建築学会環境系論文集, 第 551 号, pp.9-15, 2002.
- T. Sakuma et al., “Prediction of sound fields in rooms with membrane materials - Development of a limp membrane element in acoustical FEM analysis and its application -,” J. Archit. Plann. Environ. Eng. No.500, pp.1-8, 1998.