

ポリエステル不織布吸音材の繊維構造の変化による性能向上に関する研究

江崎 翔大

1. はじめに

藤本研究室では、グラスウール (GW) と同じ多孔質繊維からできているポリエステル不織布 (PW) の吸音性能について研究を行い、厚さと密度が同じ GW と同等の吸音性能を有する PW を開発した¹⁾。また、PW の製造・加工過程で発生する端材を有効に利用するために独自のリサイクル技術を考案した。しかし、製造されるリサイクル材 (RPW) の吸音性能は PW よりやや劣る²⁾。これは、RPW の繊維の状態が PW とは異なるためと思われる。RPW を吸音材として活用するためには、素材としての吸音性能の向上が望まれる。

そこで、本研究では PW と RPW の繊維構造を変化させることで素材としての PW, RPW の吸音性能向上を図ることを目的とする。また、PW, RPW の繊維内部に水分が含まれたときの吸音性能についても調べる。

2. 水分を含んだ PW, RPW の吸音率の測定

建築物の 2 重壁内部に施工した GW に、望ましくないことではあるが、内部結露が発生する場合がある。内部結露が発生して水分が含まれた状態の GW は、乾燥時の吸音性能を発揮できていないと思われる。このようなケースを想定して、水分を含んだ PW, RPW の吸音率を測定してみた。

2.1 測定方法と測定試料

PW, RPW の垂直入射吸音率測定用試料 (太管用は直径 100mm, 細管用は直径 29mm の円筒状) に十分な水分を含ませ、自然乾燥させながら試料の重量を監視し、所定の含水率となったときに垂直入射吸音率 α_0 を測定した。

重量は電子天秤 (A&D GX-200) を使用し、 α_0 は B&K4206 (垂直入射吸音管) を使用して ISO 10534-2³⁾ に準拠した方法で測定した。試料の仕様を表-1 に、測定に用いた試料の詳細を表-2 に示す。試料は厚さを統一しているが、含水率が異なるために α_0 自体を他の試料と比較することはできない。なお重量はサンプルの平均値 (ただし、GW の細管は 1 サンプルの値) である。

2.2 測定結果

測定結果を図-1 に示す。図中の “Standard” は乾燥時の値である。図より、含水量が多いほど吸音率のピークが低周波数域へ移行する (含水率が大きくなるほど、吸音率は低音域で大きくなり高音域で小さくなる) こと

表-1 PW, RPW, GW の仕様

試料	厚さ (mm)	密度 (kg/m ³)	バインダー混合率 (%)	平均繊維太さ (de) ベース/バインダー	断面形状	繊維形状
PW	50	32	30	2/2	密	クリンプ
RPW	50	24	30	2/2	密	クリンプ
GW	50	32	-	-	-	-

表-2 水分を含んだ PW, RPW 試料

試料		含水率 (水(g)/試料(g))	太管		細管		サンプル数 太管/細管
			重量(g)	含水量(g)	重量(g)	含水量(g)	
PW	1	2.34	12.80	30.00	1.10	2.58	5/5
	2	1.56	12.80	20.00	1.10	1.56	5/5
	3	0.78	12.80	10.00	1.10	0.78	5/5
RPW	1	3.16	9.51	30.00	0.89	3.16	5/5
	2	2.10	9.51	20.00	0.89	2.10	5/5
	3	1.05	9.51	10.00	0.89	1.05	5/5
GW	1	1.75	11.44	20.00	0.92	1.75	5/1
	2	1.31	11.44	15.00	0.92	1.31	5/1
	3	0.87	11.44	10.00	0.92	0.87	5/1
	4	0.44	11.44	5.00	0.92	0.44	5/1

がわかる。

本測定に際して、GW は水分を含むと試料の形状に変化が現れ、自重により割れる試料も見られ、PW では厚さが 6 割程度に縮む試料が見られた。一方、RPW は水分を含んでも形状の変化はほとんどなく、また乾燥に至るまでに要する時間が最も短かった。ただ、気温 30 度、相対湿度 100% の空気の含水量は本測定条件の最小含水率 0.44 の 2.2% 程度であり、すなわち、本測定で設定した含水率は実環境ではほとんど起こりえない点に留意しなければならない (建築に使用されたときの実環境下では、PW の材料形状の変化は起きないと考えてよい)。また、PW, RPW, GW とともに乾燥状態に達すると形状は含水前の状態に戻り、吸音率も含水前と同じ値となった。

以上より、PW, RPW は水分を含むと吸音率は変化するが乾燥すれば元に戻ることがわかった。ただ、水分を含ませることによる吸音性能向上は期待できないと考えられる。

3. 多層型構造の吸音率 (測定による検討)

繊維を切断することで繊維が振動しやすくなり、音響エネルギーを振動エネルギーに変換しやすくなるという見込みから、試料を切り刻むことによって吸音性能の向上が図れないだろうか考えた。ただし実環境を想定した場合、切り刻んだ材料を単体で用いることは困難であるので、切り刻まない試料と同時に用いることが必須となる。

さて、多層型構造に関しては、既往の研究から 2 層

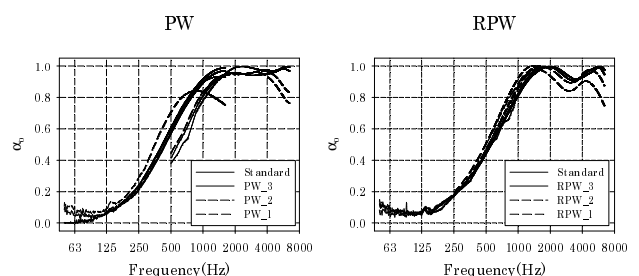


図-1 水分を含んだ PW, RPW の吸音率の測定結果

表-3 3層型構造の試料パターン

		A層	B層	C層	A層	B層	C層
厚さ (mm)	50	10	20	20	15	20	15
		10	30	10			
		20	10	20			
		20	20	10			
100	10	80	10	15	75	15	
	20	60	20	25	50	25	
試料の 組み合わせ		PW	PW(C)	PW	PW	PW(C)	PW
		PW	PW(C)	RPW			
		RPW	PW(C)	PW			
		RPW	PW(C)	RPW			
		PW	RPW(C)	PW	PW	RPW(C)	PW
		PW	RPW(C)	RPW			
		RPW	RPW(C)	PW			
		RPW	RPW(C)	RPW			
		PW	R(C)	PW	PW	R(C)	PW
		PW	R(C)	RPW			
		RPW	R(C)	PW			
		RPW	R(C)	RPW			
		PW	R	PW	PW	R	PW
		PW	R	RPW			
		RPW	R	PW			
		RPW	R	RPW			

構造にした場合、音の入射側に吸音性能の高い材料を用いると高い吸音率が得られることが示されている⁴⁾。これより、試料の組み合わせや各層の厚さを変えると吸音率も変化すると予想される。そこで、厚さ50mmと100mmの場合の3層構造という条件で、試料と厚さの組み合わせを変化させて吸音性能が高い組み合わせを探し出すことを目的として多層構造の吸音率を測定した。

3.1 測定試料

測定に用いる試料の材料は、PW、RPW、R、および各試料を切り刻んだものを使用する。密度32kg/m³となることを基準としているが、一部満たさない試料も含む。RはPWを粉碎・攪拌したものであり、RPWとなる前段階の材料である。紙面の都合により割愛するが、Rを単層で測定した場合、吸音性能はPW、RPWに劣ることが実測よりわかっている。切り刻んだ試料は試料名の後に(C)を付加することで表す。

以上の6種類の材料を組み合わせた3層構造の試料の垂直入射吸音率を測定した。切り刻んだ材料は、それ自体では吸音率測定用の円筒形にはならないため、ポリプロピレン板(厚さ0.2mm)で作成した円筒フレームを用いた。

3.2 測定における設定条件

3層構造の各層を、音波入射側から順にA層、B層、C層とする。材料の配置条件は、PWとRPWをA、C層に、Rと(C)がついた試料をB層とした。この試料の組み合わせに厚さの組み合わせを加えた試料パターンを表-3に示す。表中の空欄の箇所は条件を満たすRPWを有しないため測定していない。

3.3 厚さ50mmの測定結果

単層のPWの吸音率と同等以上の吸音性能を持つ組み合わせを図-2に示す。全実験結果の中で最も吸音性能が高いと思われる組み合わせは、A層:PW(20mm)-B層:R(20mm)-C層:PW(10mm)であり、250Hzより高い周波数では僅かながら単層PWの吸音性能よりも高い値となる。

試料の組み合わせを固定した場合、各層の厚さの配

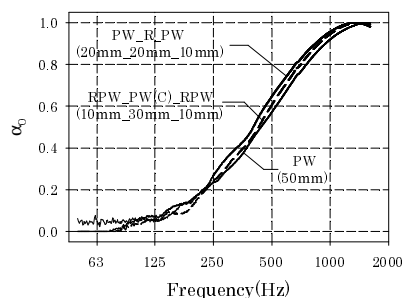


図-2 3層構造の高性能吸音パターン(厚さ50mm)

分をA層>B層、A層>C層、B層>C層とすることで吸音率が高くなる傾向が得られた。この傾向をまとめるとA層>B層>C層となるが、この厚さの配分は検討しておらず、この結果が得られるかは断定できない。RとR(C)をB層に用いた場合を比較すると吸音性能はほぼ等しく、試料を切り刻むことによる大幅な吸音性能の向上は困難である。

以上の結果から、試料を切り刻み多層構造にすることで、単層のPWの吸音率を大幅に上回することは難しい。しかし、構成によっては吸音性能が低いRを用いても、単層のPWと同等の吸音率を発揮することは可能と考えられる。

3.4 厚さ100mmの測定結果

比較対象のPWは厚さ50mmのPWを2層構造にして測定している。吸音性能が高いパターンを図-3に示す。厚さが100mmになると吸音率の周波数特性が変化するため、吸音性能の良し悪しの判断が難しい。周波数別に見ると、500Hzでは多層構造は吸音率のピークが位置し、PWよりも吸音性能が0.05近く上回る。しかし、1,000Hzより高い周波数では多層構造は吸音率のディップが位置するためPWの吸音性能が優る。それでも、図-3に記した組み合わせにすることで、500Hz、1,000HzにおいてPWに劣らない吸音性能にすることは可能である。

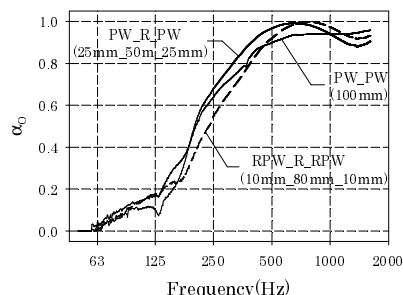


図-3 3層構造の高性能吸音パターン(厚さ100mm)

4. 多層型構造の吸音率(シミュレーションによる検討)

多層型構造の測定結果から、Rを用いることで、大幅な吸音性能の向上が期待できないもののPW、RPWの代替となり得る可能性が示唆された。そこで本節では、PW、RPW、R、それに空気層(A)を用いた多層型構造に焦点を絞り、吸音性能のよい多層構造を探し出すことを目的とした。各層の材料の吸音特性が得られている場合は多層構造の吸音率は伝達マトリックス法によって算出できるので、ここでは伝達マトリックス

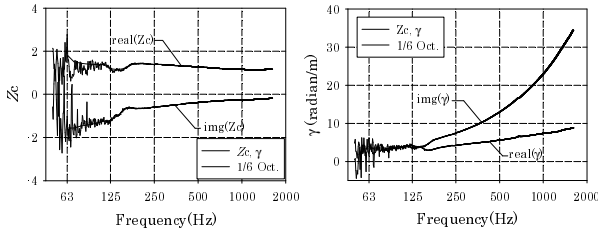


図-4 シミュレーションに使用する物性値

手法を用いたシミュレーション解析 (TMM) を行うことにする。

4.1 伝達マトリックス法

TMM は、界面の音圧と体積速度の関係を伝達マトリックスを用いて計算し、音響インピーダンスを算出するものである。計算結果から音圧反射係数が求まり、さらに垂直入射吸音率が求められるというものである⁵⁾。

4.1.1 シミュレーションに用いる Z_c, γ の算出

シミュレーションに必要な物性値は特性インピーダンス (Z_c) と伝搬定数 (γ) である。図-4 にその値を示す。ここでは R の Z_c, γ は 1/6 オクターブバンド中心周波数の値を用いる。ただし、各中心周波数の 1/12 オクターブバンドの値を平均処理したものを、代表値として中心周波数の値として用いる。PW, RPW の Z_c, γ は参考文献⁶⁾の値を使用する。

4.1.2 シミュレーションの妥当性の確認

- (1) 実測した単層の Z_c, γ を TMM を用いて 2 層構造の各層の Z_c, γ として計算比較
- (2) 異なる Z_c, γ を用いた 2 層構造の TMM 計算結果と有限要素法 (FEM)⁷⁾ の値を比較
- (3) 多層構造での実測結果と TMM との比較

以上の 3 点によってシミュレーションの妥当性を確認する。

(1) については Z_c, γ から算出した吸音率は計算結果と一致した。同様の結果が (2) に関しても確認された。しかし、(3) については厚さ 100mm の実測結果とはある程度一致するものの、厚さ 50mm の実測結果との比較では値に差が生じていた。現段階で、シミュレーション方法が適切でないか、実験方法に不備があるかは判断できないが、ある程度傾向を掴む手段としては有効と思われる。また、このシミュレーションは (1) の結果より、隣り合った層が同一の試料で構成される場合、単層として計算した値と同じになる。

4.2 多層構造の設定条件

シミュレーション計算を行う多層構造の設定条件を次に示す。

1. 層数を 3, 4 にする。
2. 多層型構造全体の厚さを 50mm, 100mm, 150mm, 200mm の 4 パターンにする。さらに各層の最低の厚さを 10mm とし、各層の厚さを 5mm 刻みで増減させ、この条件を満たす全ての組み合わせについて行う。
3. PW, RPW は全ての層に、R, A は 3 層構造の場合は B 層に、4 層構造の場合は B, C 層に用いる。
4. 基準とする吸音率を全ての中心周波数で上回ることを条件とする。

この条件のもと、以下の項目について検討する。

- (1) R を最も厚く用いて、単層 PW の吸音率を 100% とした場合、95% 以上となる組み合わせを求める。
- (2) R を空気層に置き換えて (1) と同様の検討を行う。
- (3) PW を最小の厚さにし (最低 10mm)、かつ単層 PW の吸音率を 100% とした場合、95% 以上となる組み合わせを求める。
- (4) R を含めた構成で、吸音率を単層 PW に限りなく近づける。

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 R を最大に用いる組み合わせ

各全体の厚さごとに R の厚さが最大となるパターンを表-4 に、また一部のパターンを図-5 に示す。厚さが大きくなるにつれて、R の全体に対する厚さの割合が増加していることが見て取れる。試料の組み合わせに大きな変化はないが、C 層は全体の厚さによって最適な材料が変化する。しかし、C 層の厚さは常に最低の厚さである 10mm である。これは、C 層が吸音率に影響を大きく与えていないことを示すものと考えられる。また、4 層構造にして吸音性能が高い組み合わせを探すと、3 層構造の試料と厚さの組み合わせを 4 層にして再現しているだけであった。

総合すると、R を最大に用いる場合は 3 層構造にし、A 層には PW を配置し、C 層を薄くする必要がある。

表-4 R の厚さが最大となる 3 層構造パターン

厚さ (mm)	PWの吸音率に対する割合 (%)	Rの厚さ (mm)	試料の組み合わせ			厚さの組み合わせ		
			A層	B層	C層	A層	B層	C層
50	95	15	PW	R	PW	25	15	10
	90	20	PW	R	PW	20	20	10
100	95	50	PW	R	RPW	40	50	10
	90	60	PW	R	RPW	30	60	10
150	95	90	PW	R	RPW	50	90	10
	90	100	PW	R	RPW	40	100	10
200	95	150	PW	R	RPW	40	150	10
	90	160	PW	R	RPW	30	160	10

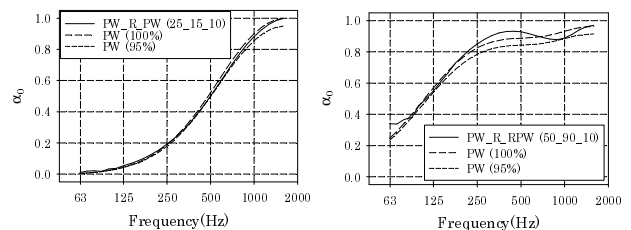


図-5 厚さ 50mm, 150mm の吸音率の比較

4.3.2 空気層を最大に用いる組み合わせ

各全体の厚さにおける R の厚さが最大となるパターンを表-5 に、その一部のパターンを図-6 に示す。この結果から、空気層を用いる場合、A 層には PW を用い、厚さを 50mm 以下としないことが条件となると言える。3 層構造のとき、C 層には RPW を用いた場合の方が吸音性能が向上する。また 4 層構造にした場合、3 層構造の PW と A の間に RPW を用いる構造を形成し、吸音率も向上する。

4.3.3 PW を最小の厚さで使用する組み合わせ

各全体の厚さにおける PW の厚さが最小となるパターンを表-6 に、その一部のパターンを図-7 に示す。この結果から、PW を最小の厚さにするには A 層に配

表-5 空気層の厚さが最大となるパターン

厚さ (mm)	PWの吸音率に 対する割合(%)	Aの厚さ (mm)	試料の組み合わせ			厚さの組み合わせ		
			A層	B層	C層	A層	B層	C層
50	95	0	-	-	-	-	-	-
	90	0	-	-	-	-	-	-
100	95	10	PW	A	RPW	75	10	15
	90	15	PW	A	RPW	70	15	15
150	95	20	PW	A	RPW	90	20	40
	90	30	PW	A	RPW	85	30	35
200	95	35	PW	A	RPW	95	35	70
	90	55	PW	A	RPW	105	55	40

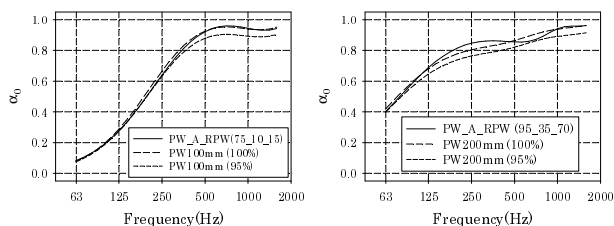


図-6 厚さ 100mm, 200mm の吸音率の比較

置し、2層構造にすればよいと言える。材料の組み合わせは音波入射側から順にPW+RPWという構成にし、表-6の適切な厚さにすれば、各層の厚さは柔軟に変更することができるということである。

全体の厚さが大きくなってもPWの厚さは大きくなり、僅かずつ厚さが小さくなっているように思われる。しかし、全体の厚さが大きいほうが、低周波数で単層のPWよりも吸音性能が優る。

4.3.4 Rを含めた構成で単層PWと同等の吸音性能を持つ組み合わせ

RがPWの代替となるには吸音性能にも着目する必要がある。そこで、Rを含めた構成で吸音率が最も高くなる組み合わせを求める。つまり、4.3.1とは異なり、Rを必ずしも厚くする必要はない。

結果を表-7に、4層構造を含めた一部のパターンを図-8に示す。この図に示したものの以外にもPWと吸音率がほぼ等しくなる組み合わせは存在する。ただ、PWの厚さを全体の半分以上割り当て、音波入射側に配置することが必要と考えられる。

表-6 PWの厚さが最小となるパターン

厚さ (mm)	PWの吸音率に 対する割合(%)	PWの厚さ (mm)	試料の組み合わせ			厚さの組み合わせ		
			A層	B層	C層	A層	B層	C層
50	95	30	PW	RPW	-	30	20	-
	90	20	PW	RPW	-	20	30	-
100	95	35	PW	RPW	RPW	35	35	30
	90	20	PW	RPW	RPW	20	40	40
150	95	25	PW	RPW	RPW	25	65	60
	90	20	PW	RPW	RPW	20	65	65
200	95	20	PW	RPW	RPW	20	90	90
	90	15	PW	RPW	RPW	15	95	90

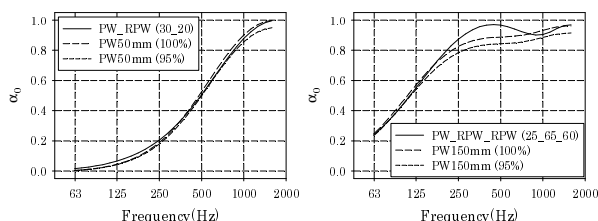


図-7 厚さ 50mm, 150mm の吸音率の比較

表-7 Rを用いて吸音率が最大となるパターン

厚さ (mm)	PWの吸音率に 対する割合(%)	試料の組み合わせ			厚さの組み合わせ		
		A層	B層	C層	A層	B層	C層
50	97	PW	R	PW	30	10	10
100	99	PW	R	PW	70	10	20
150	99	PW	R	PW	115	10	25
200	99	PW	R	PW	170	10	20

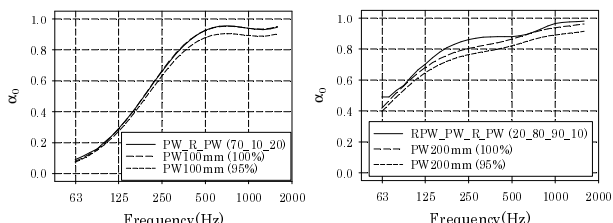


図-8 厚さ 100mm, 200mm の吸音率の比較

また、仮にRを用いなければ、厚さが200mmの場合には101%の吸音率を4層構造で出すことができる。

5. 総括

本研究は、素材の繊維構造に着目し、繊維への含水、切り刻んだ試料を用いた多層型構造の形成という繊維構造を変化させることで吸音性能を向上できるかについて、実験とシミュレーションを用いて検討した。その結果、繊維に水分を含ませることは周波数特性の形に変化を与えるのみで吸音性能が向上するとは捉えることができないこと、多層型構造の形成ではRというPWに吸音性能が劣る試料を用いても構成によってはPWと同程度の吸音性能を發揮でき、使用する一部のPWをRで代替できることがわかった。

本研究ではシミュレーションを用いた解析と実測結果の間に差が生じている。この原因を明らかにすることが多層構造で吸音性能を予測するためには必須である。さらに、多層構造において、試料の特性を決定するZc, γをどのように配置することが吸音性能向上に繋がるのかを系統的に捉える必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) ISO 10534-2 “Acoustics-Determination of sound absorption coefficients and impedance tubes Part2:Transfer-functionmethod,” 1st edition 1998-11-15.
- 4) 中野達成, 大塚健太, 穴井謙, 藤本一寿, “ポリエステル不織布とそのリサイクル材を用いた吸音構造に関する基礎的検討 その1 多層構造の吸音性能,” 日本建築学会九州支部研究報告 第 46-2号, pp.89-92, 2007
- 5) 笹尾博行, “Excelによる吸音構造の解析,” 空気調和・衛生工学 第80巻第10号, pp.99-100, 2006
- 6) 中野達成, 勝原聡寛, 穴井謙, 藤本一寿, “ポリエステル不織布とそのリサイクル材による楔形吸音構造の吸音特性,” 日本建築学会九州支部研究報告 第 47-2号, (印刷中), 2008
- 7) 大塚健太, 中野達成, 穴井謙, 藤本一寿, “ポリエステル不織布とそのリサイクル材を用いた吸音構造に関する基礎的検討 その2 楔状構造の吸音性能,” 日本建築学会九州支部研究報告 第 46-2号, pp.93-96, 2007