

ポリエステル不織布とそのリサイクル材による楔形構造の吸音特性に関する研究

中野 達成

1. 序論

ポリエステル不織布 (PW) は、ポリエステル繊維を融点の低いポリエステルで結合して製造する多孔質材料である。これまでに、密度と厚さが同じグラスウール (GW) と同じ吸音性能を有する PW を開発¹⁾すると共に、PW の製造・加工過程で発生する端材をリサイクルする独自の方法を開発し、リサイクル材 (RPW) の吸音性能を明らかにした²⁾。

PW, RPW は繊維が自己結合しているため GW のような繊維の飛散がほとんどなく、表面仕上げなしでの使用が可能である。この利点により、施工の際、材料の表面に吸音の妨げになる綿布を張る必要がなくなるため、PW や RPW を用いて、材料そのものの吸音特性を損なわずに吸音構造を構成できると期待される。

多孔質材料の吸音率は、特性インピーダンス Z_c と伝搬定数 γ によって決まり、単位面積流れ抵抗 σ から推定できることが知られている。GW とロックウールについては Delany&Bazley (D&B) や Miki が関係式を提示している。PW, RPW も GW と同じように多孔質材料であるので、 Z_c , γ と σ の関係を明らかにすることで吸音性能を把握できると思われる。

また、一般に高性能吸音構造には楔形が良いとされ

表-1 Z_c, γ, σ の測定に用いた試料

| 密度 | 繊維太さ | バインダー | スパン | 繊維 | 流れ抵抗 | サンプル | |
|-------------------------|------|--------|-----|----|----------------------|--------|---|
| PW (kg/m ³) | (de) | 混合率(%) | ポンド | 長さ | (g/cm ²) | 数 | |
| 1 | 24 | 2 | 30 | なし | - | 9.149 | 3 |
| 2 | 32 | 2 | 30 | なし | - | 14.947 | 6 |
| 3 | 32 | 2 | 20 | なし | - | 13.980 | 5 |
| 4 | 40 | 2 | 30 | なし | - | 20.970 | 4 |
| 5 | 32 | 2 | 40 | なし | - | 16.593 | 5 |
| 6 | 64 | 2 | 30 | なし | - | 39.200 | 5 |
| 7 | 16 | 2 | 20 | なし | - | 6.140 | 5 |
| 8 | 16 | 2 | 30 | なし | - | 6.410 | 4 |
| 9 | 16 | 6 | 30 | なし | - | 1.160 | 4 |
| RPW | | | | | | | |
| 1 | 20 | 2 | 20 | あり | 小 | 5.140 | 8 |
| 2 | 20 | 2 | 20 | なし | 小 | 4.392 | 5 |
| 3 | 20 | 2 | 30 | あり | 小 | 5.627 | 6 |
| 4 | 20 | 2 | 30 | なし | 小 | 5.200 | 4 |
| 5 | 20 | 2 | 20 | あり | 中 | 4.567 | 6 |
| 6 | 20 | 2 | 30 | あり | 中 | 4.544 | 5 |
| 7 | 20 | 2 | 30 | なし | 中 | 4.090 | 4 |
| 8 | 20 | 2 | 20 | あり | 大 | 4.500 | 6 |
| 9 | 20 | 2 | 30 | あり | 大 | 4.235 | 8 |
| 10 | 20 | 2 | 30 | なし | 大 | 4.093 | 6 |
| 11 | 20 | 2 | 60 | なし | 大 | 3.952 | 5 |
| 12 | 20 | 4.4 | 26 | なし | 小 | 3.350 | 4 |
| 13 | 24 | 2 | 30 | なし | 小 | 7.768 | 9 |
| 14 | 32 | 2 | 30 | なし | 小 | 5.225 | 3 |
| 15 | 32 | 2 | 20 | なし | 大 | 13.173 | 3 |
| 16 | 32 | 2 | 20 | なし | 小 | 12.256 | 5 |
| 17 | 32 | 2 | 30 | なし | 小 | 10.760 | 3 |
| GW | | | | | | | |
| 1 | 16 | - | - | - | - | 6.093 | 3 |
| 2 | 32 | - | - | - | - | 15.686 | 7 |
| 3 | 48 | - | - | - | - | 20.867 | 3 |

るが、加工が困難である。楔形を、薄いマット状の材料を重ねた階段形で代用できれば加工・施工の簡略化が図れる。そこで本研究は、PW, RPW を用いた階段状楔の吸音特性について検討し、要求される吸音性能 (cut-off 周波数など) を満たす階段形状 (寸法や材料の組み合わせ) を提示することを目的とする。その際、楔の寸法や材料を系統的に変化させて吸音特性を検討することは実験的手法だけでは難しいため、吸音材料を含む音場を数値解析することにより階段状楔の吸音特性を把握する。解析手法としては有限要素法を用いる。

2. GW, PW, RPW の流れ抵抗と音響特性

PW と RPW の吸音特性把握のために、様々な繊維仕様の PW と RPW (表-1) について Z_c, γ, σ を測定 (Z_c, γ は ISO 10534-2 に、 σ は ISO 9053 に準拠) し、その関係について調べた。その結果、次式のような D&B 式と同じ形式で表せることがわかった。得られた係数を表-2 に、式から算出される値と実測値 (3~8 個のサンプルの平均値) との比較を図-1 に示す。

$$Z_c = 1 + a \frac{f}{\sigma} - c j \frac{f}{\sigma} + \mu \frac{f}{\sigma} \frac{1}{1 + r \frac{f}{\sigma}}$$

$$\gamma = \frac{\omega}{c_0} p \frac{f}{\sigma} + \frac{\omega}{c_0} j \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\omega} + \mu \frac{f}{\sigma} \frac{1}{1 + r \frac{f}{\sigma}}$$

ω :角周波数, c_0 :空気中の音速, σ :単位面積流れ抵抗値

表-2 音響特性予測式の係数

| GW (Miki model) | | PW | | RPW | |
|-----------------|-------|----|-------|-----|-------|
| a | 5.50 | p | 11.41 | a | 8.53 |
| b | -0.63 | q | -0.62 | b | -0.73 |
| c | -8.43 | r | 7.81 | c | -5.40 |
| d | -0.63 | s | -0.62 | d | -0.56 |
| | | | | p | 8.58 |
| | | | | q | -0.55 |
| | | | | r | 17.84 |
| | | | | s | -0.80 |

比較に用いた試料は、測定した全試料の最も平均的な吸音性能を持つ試料であり、 σ は、PW:13.980 g/cm³, RPW:4.567 g/cm³ である。実測値との比較には、この σ を代入した値 (Reg.) を用いている。

得られた式は、低音域では実測値の変化を必ずしも正確に捉えてはいないが、250Hz 以上では実測値とよく一致している。また、ここには示していないが、D&B 式や Miki 式とも有意な差が見られなかった。これより、PW, RPW は GW と非常に似た傾向を持つ吸音材であると言える。

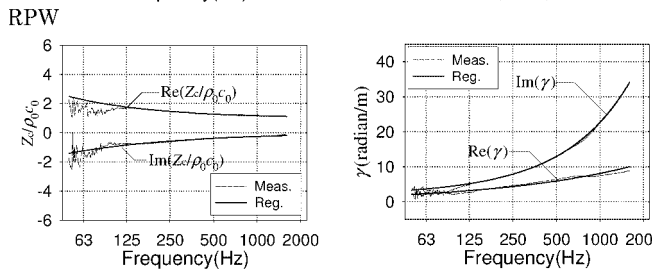
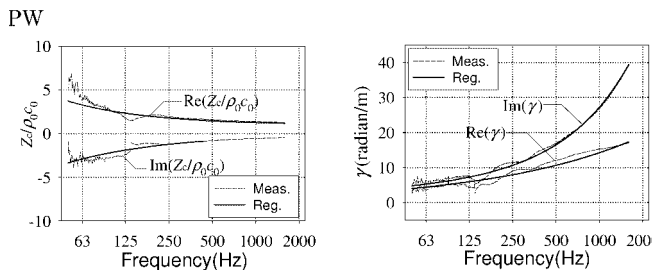


図-1 実測 Z_c, γ と予測式の比較

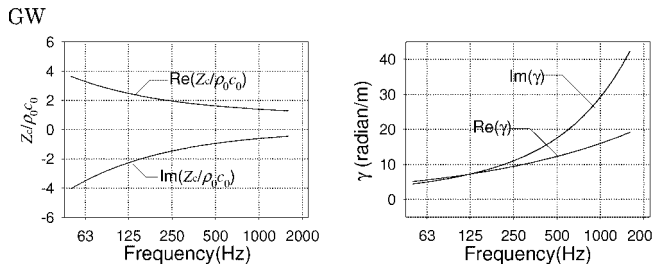


図-2 シミュレーションに用いる GW の Z_c と γ

さて、シミュレーションに用いる各材料の Z_c, γ としては、図-1 にみられるような低音域で値が安定していない実測値よりも、上記に得られた関係式から算出される安定した値（関係式の基になった試料の平均的な値）の方が望ましい。そこで、GW に関しては図-2 に示す Miki 式から導いた値（GW の σ の値: $15.686\text{g}/\text{cm}^3$ ）を、PW, RPW に関しては図-1 に示した推定値を用いることとした。

3. 吸音材料を含む音場の解析手法

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から平面波を入射した時の音場を数値解析し、加振面における音圧から算出される材料の音圧反射率を用いて楔形構造の吸音特性を検討する。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を、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 らの手法を援用する。

解析対象は、 $(200 \sim 400\text{mm}) \times (200 \sim 400\text{mm}) \times (610 \sim 1,400\text{mm})$ の直方体の音場である。音場の対称性を利用し、吸音構造の 1/4 のみを解析する。節点数は 2,325 ~ 8,925、解析範囲は $50 \sim 1,335\text{Hz}$ とし、節点間距離は大鶴らが推奨する $\lambda/d \geq 4.8$ 程度を参考にし、最大 50mm とする。粒子速度 $v = 1.0\text{m}^3/\text{s}$ 、空気中の音速

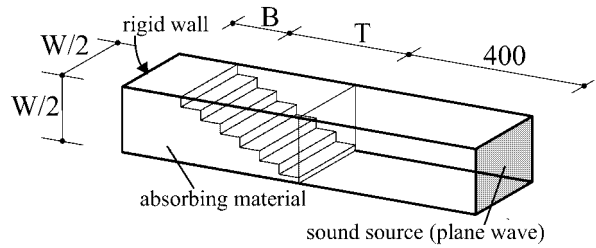


図-3 解析音場

表-3 height/width(検討 1)

| T(mm)/W(mm) | height (mm)/width (mm) | | | | |
|-------------|------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | 4段 | 6段 | 8段 | 10段 | 16段 |
| 200/200 | 50.0/20.0 | 33.3/13.3 | 25.0/10.0 | 20.0/8.0 | 12.5/5.0 |
| 400/200 | 100.0/20.0 | 66.7/13.3 | 50.0/10.0 | 40.0/8.0 | 25.0/5.0 |
| 600/200 | 150.0/20.0 | 100.0/13.3 | 75.0/10.0 | 60.0/8.0 | 37.5/5.0 |
| 200/300 | 50.0/32.5 | 33.3/21.7 | 25.0/16.3 | 20.0/13.0 | 12.5/8.1 |
| 400/300 | 100.0/32.5 | 66.7/21.7 | 50.0/16.3 | 40.0/13.0 | 25.0/8.1 |
| 600/300 | 150.0/32.5 | 100.0/21.7 | 75.0/16.3 | 60.0/13.0 | 37.5/8.1 |
| 200/400 | 50.0/45.0 | 33.3/30.0 | 25.0/22.5 | 20.0/18.0 | 12.5/11.3 |
| 400/400 | 100.0/45.0 | 66.7/30.0 | 50.0/22.5 | 40.0/18.0 | 25.0/11.3 |
| 600/400 | 150.0/45.0 | 100.0/30.0 | 75.0/22.5 | 60.0/18.0 | 37.5/11.3 |

$c_0 = 343.7\text{m}/\text{s}$ 、空気密度 $\rho_0 = 1.21\text{kg}/\text{m}^3$ とし、吸音構造は剛壁密着とする。計算は 1/12 Oct. Band 中心周波数で行う。なお、本解析手法の妥当性は既報³⁾にて検証済みであるため、ここでは割愛する。

4. 楔形吸音構造の吸音特性に関する数値解析

4.1 解析の内容

図-4 のような楔の吸音構造と吸音特性の関係を把握するために、以下の 4 つの検討を行う。

1. T をどの程度細かく段分けすれば滑らかな楔に近い吸音性能が得られるかを検討する（検討 1）。 $F=40$ に固定して $W=200 \cdot 300 \cdot 400$, $B=10 \cdot 100 \cdot 200 \cdot 400$, $T=200 \cdot 400 \cdot 600$ に系統的に変化させたもの合わせて 36 ケースについて、表-3 に従い、それぞれ T 部分の段数を 4 ~ 16 段に変化させた。この検討に用いる材料は PW のみとする。
2. B の長さとの吸音性能の関係について検討する（検討 2）。段数を 8 段、 $F=40$ に固定し、B の長さを $10 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 150 \cdot 200 \cdot 300 \cdot 400$ の 7 パターン、 $W=200 \cdot 300 \cdot 400$, $T=200 \cdot 400 \cdot 600$ に系統的に変化させた（63 ケース）。用いる材料は PW のみとする。

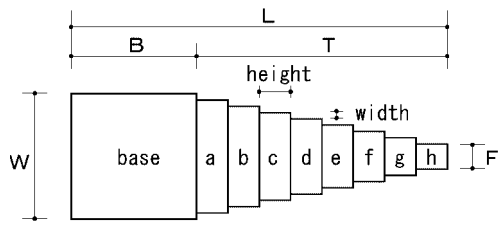


図-4 階段型楔のイメージ (8 段)

表-4 楔の寸法 (検討 3)

| T (mm) | W (mm) | | | | | | | | | |
|--|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 200 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| 400 | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| 600 | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| Tの頂角(°) | | | | | | | | | | |
| 5.7 11.4 17.1 22.6 28.1 33.4 38.6 43.6 48.5 53.1 | | | | | | | | | | |

表-5 PW, RPW の組み合わせ (検討 4)

| case | base | a | b | c | d | e | f | g | h |
|------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | G | G | G | G | G | G | G | G | G |
| 2 | p | p | p | p | p | p | p | p | p |
| 3 | r | r | r | r | r | r | r | r | r |
| 4 | p | r | r | r | r | r | r | r | r |
| 5 | r | r | r | r | r | r | r | r | p |
| 6 | r | r | r | r | r | r | r | p | p |
| 7 | r | p | r | r | r | r | r | r | r |
| 8 | r | p | r | p | r | p | r | p | r |
| 9 | r | p | p | r | r | r | r | r | r |
| 10 | r | r | r | p | p | r | r | r | r |
| 11 | r | r | r | r | r | p | p | r | r |

- T の頂角と吸音性能の関係について検討する (検討 3)。段数を 8 段, $F=1$, $B=200$ に固定し, T と W を表-4 に従って変化させた (30 ケース)。用いる材料は PW のみとする。
- 楔を構成する PW, RPW の組み合わせと吸音性能の関係について検討する (検討 4)。段数を 8 段, $W=200$, $B=200$, $T=400$, $F=40$ に固定して, 図-4 の base, a~h 各部位に GW, PW, RPW を組み込む。検討した組み合わせを表-5 に示す。G は GW, p は PW, r は RPW を表す。

4.2 結果と考察

4.2.1 段の細かさや吸音特性

T 部分の段数を 4~10 段に変化させ, どの程度まで細かくすれば滑らかな楔に近い吸音性能が得られるかについて検討を行った。ここでは, 最も段の細かい 16 段のものを滑らかな楔と考えて考察を行う。

結果を図-5 に示す。今回行った計算のうち, 滑らかな楔と比較して段数によって比較的その吸音性能に差が見られるケースを抜粋している。図-5 上図のように, B の長さが極端に短い, もしくは下図のように T の頂角が小さくなると, 滑らかな楔と比較して段数によって吸音性能に差が見られるようである。これ以外のケースでは, 段数による吸音性能の差はほとんど見られず, 4 段でも 16 段でも吸音性能はほとんど変わらないという結果であった。

このように, 段数によって差が見られるケースもあるものの, cut-off 周波数 (f_c) を見ると 8 段と 16 段の間にはほとんど差が見られない。今回の検討から, T を 8 段以上に段分けしておけば, 滑らかな楔と比較して, 全く同じ性能とまではいかなくとも, 概ね遜色のない吸音性能が再現できることがわかった。

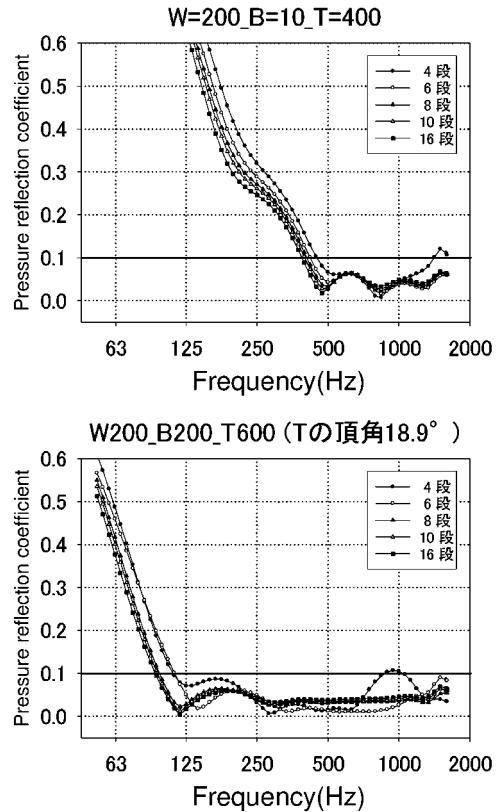


図-5 段の細かさや吸音性能の関係

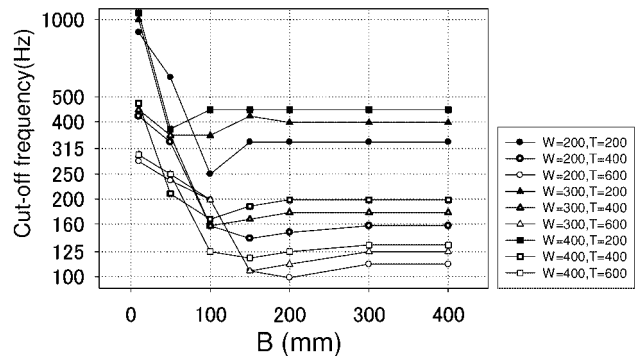


図-6 B の長さや Cut-off 周波数の関係

4.2.2 B の長さや吸音特性

B の厚さが吸音性能に与える影響を図-6 に示す。図より, $B=10\text{mm}$, 50mm のときはどの寸法パターンでも $f_c=200\text{Hz}$ に満たないこと, $B=200\text{mm}$ 以上長くしても f_c はほとんど変化していないことがわかる。

また, 楔の形によって B の最適長さは異なる値を示している。GW を用いた楔に関して, 全長 L と B の長さの間には最適比率が存在する ($B/L=0.2$) との研究報告があるが⁴⁾, PW を用いた楔に対しても同様のことが言えるのか検討したところ, 図-7 のように $W=300\text{mm}$, 400mm という条件下では GW と同じ $B/L=0.2$ を示したが, $W=200$ の時は $B/L=0.25 \sim 0.33$ となり, GW と異なる傾向が得られた。PW では, W の長さを短くした場合, 全長 L に対する B の最適長さの比率が高くなることわかった。

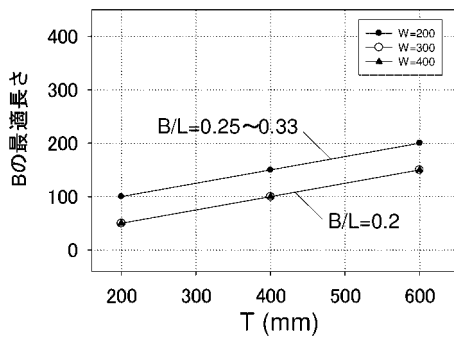


図-7 B と L の最適比率

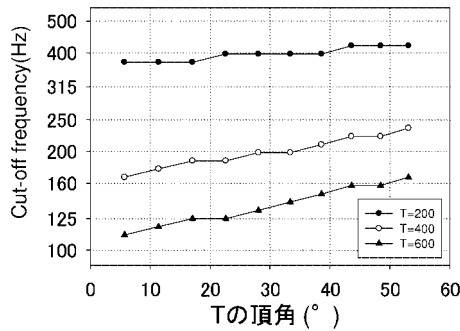


図-8 T の頂角と吸音性能の関係

4.2.3 T の頂角と吸音特性

T の頂角が吸音性能に与える影響を検討した。結果を図-8 に示す。GW について、 $\sigma = 10.000 \text{ g/cm}^3$ を超える GW で作った楔には最適角が存在し、それより σ の小さな GW で作った楔には最適角が存在しないという知見が得られているが⁴⁾、 $\sigma = 13.980 \text{ g/cm}^3$ の PW では T の頂角に最適角は存在せず、頂角が小さければ小さい程吸音性能が良くなることがわかった。

4.2.4 PW と RPW の組み合わせと吸音特性

どの部位をどの材料で構成したらより良い吸音性能が得られるかについて検討した。図-9 は全て GW、全て PW、全て RPW、PW と RPW の組み合わせにより良い吸音性能を示した楔の、計 4 つの結果を示している。これまでの研究から、同じ密度、同じ厚さの条件下で GW と PW は同等の吸音性能を有しており、また RPW は PW と比較し吸音性能が若干劣るという知見が得られているが、楔形にすると RPW が一番良い吸音性能を示す結果となった。今回シミュレーションに用いた RPW の物性値は、GW、PW に比べ中・高音域で明らかに吸音性能が劣っているものの、低音域においては僅かに良い吸音性能を示していることから、cut-off 周波数を低くするには、低音域において良い吸音性能を持つ材料 (RPW) で楔を構成することが重要であることがわかった。

PW と RPW の組み合わせについては、段数 8 段、各寸法 $W=200$, $B=200$, $T=400$, $F=40$ の条件下において、a 部分のみ PW、それ以外は RPW とすることで

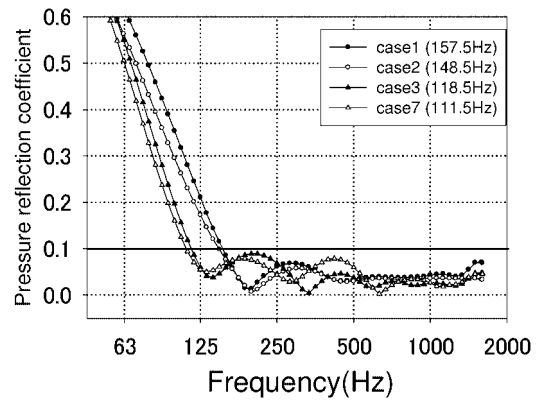


図-9 材料の組み合わせと吸音特性の関係

全て RPW で構成した楔よりわずかに良い吸音性能が得られた。また、紙面の都合で図は割愛するが、特に base 部分に RPW を用いることが大きく効いているということ、g, h 部分のような楔の先端部分の材の種類を変化させても吸音性能にほとんど影響がないということがわかった。

5. 結論

PW, RPW の平均的な音響特性を把握した後、有限要素法を用いて、PW と RPW による階段状楔の吸音構造の解析を行い、段の細かさ、楔の形状、PW と RPW の組み合わせと吸音特性の関係について検討した。

その結果、T を 8 段以上に段分けすれば滑らかな楔に近い吸音性能が得られるということ、B の長さには最適値が存在し、必ずしも厚くすれば吸音性能が向上するわけではないことがわかった。また、T の頂角には最適角が存在せず、角度が小さければ小さい程良いこと、PW と RPW の組み合わせにおいては GW や PW よりも RPW で構成した楔の方が f_c が低くなるということ、RPW をベースに組み合わせを工夫することで吸音性能向上の余地があるということがわかり、楔の設計に有用な知見を得た。

今後は、より大きな寸法の楔についての解析を重ね、楔の設計への適用範囲を拡張すると共に、解析結果の実験的検証を進めていきたい。

謝辞

PW, RPW の試料は (株) フコクにご提供いただいた。記して感謝します。

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) 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の研究 その 1 多層構造の吸音性能,” 日本建築学会大会 学術講演梗概集 D-1, 253-254, 2007.
- 4) 佐藤宗純, 藤森威, 三浦甫, “流れ抵抗を用いた吸音楔の設計,” 音響学会誌, 35 巻 11 号, pp.628-636, 1979.