

スギバークを活用した吸音材料の開発

Development of Sound Absorbing Materials by Using the Bark of Cedar

中岡正典*, 岩田深也**
Masanori Nakaoka and Shinya Iwata

抄 録

有効活用が課題となっているスギバークを吸音材料として活用する目的で、粉碎されたスギバークを一定の嵩密度に圧縮した際の吸音特性を検証し、さらに同材料の圧縮条件から垂直入射吸音率を推定する方法を検討した。その結果、樹皮繊維に最適化された推定式を用いて算出された計算値と実測値がほぼ一致し、実用的な推定が可能であることを確認した。また同推定式によって、嵩密度を変化させた際の垂直入射吸音率をシミュレートすることにより、粉碎されたスギバークの吸音性能が最も発揮される圧縮条件を特定することができた。

1 はじめに

製材所からは、毎年多量の木質系廃材が排出されている。特に樹皮（バーク）については、以前からその有効活用が課題となっている。しかし、樹皮は適切に粉碎すると繊維性状を有する抵抗材として機能するため、グラスウール等の既存の多孔質吸音材料と同様の吸音性能を得られる可能性が高い。粉碎されたバーク（以後、樹皮繊維と称す）を吸音材料として扱う際には、不定形な樹皮繊維のまま一定の空間に充填して使用方法と、結合材を介して成型した製品として扱う方法が考えられる。本報では、両者の場合について、その吸音特性を検証すると共に、樹皮繊維の圧縮条件（嵩密度と材厚）から垂直入射吸音率を推定する方法を検討した。また、不定形な樹皮繊維については、建具内部に充填した際の効果について検証した。さらに、高温多湿条件で用いられることを想定し、カビ発生試験を行った。

2 実験方法

2・1 原料と成型方法について

本報では、樹皮繊維をそのまま不定形な状態で使用する条件と、結合材を介して成型する条件に分けて、それぞれ吸音特性を検証した。

まず不定形な樹皮繊維については、製材所から排出されたスギの樹皮を蓬萊精工（株）製の粉碎機で粉碎し、含水率が約14%になるまで天日乾燥したも

のをを用いた。ただし、乾燥直後は繊維が絡まった塊が多く見られたため、さらに容器内で攪拌羽根によって塊が無くなるまでほぐした。こうして得られた不定形な樹皮繊維の様子を図1に示す。

次に、成型された樹皮繊維（以後、樹皮繊維成型

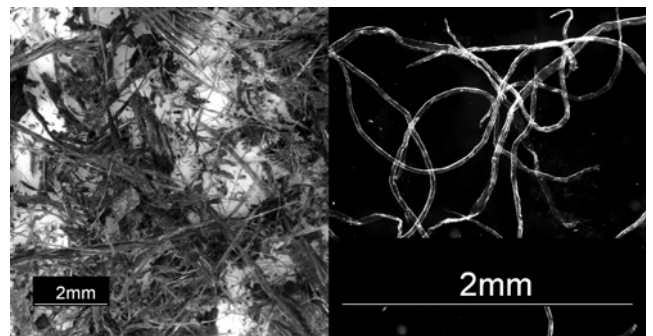


図1 樹皮繊維（左）とマーセル化パルプ（右）

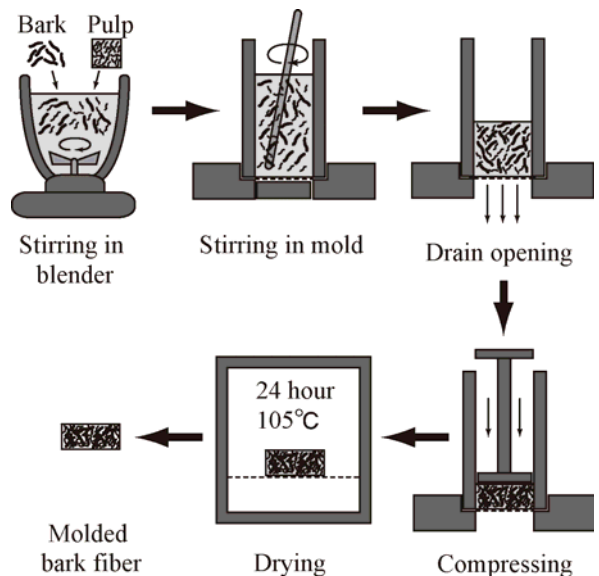


図2 ウエットフォーミング法による成型

*生活科学課, **応用生物課

体と称す) については, 上記の天日乾燥された樹皮繊維に加え, 結合材としてマーセル化パルプ(繊維径約 15~40 μm , 平均繊維径 30 μm , 平均繊維長約 2.81mm) を用いた(図 1). これは, 樹皮繊維より細かいパルプ繊維を加えることで流れ抵抗を増加させ, また両繊維間の水素結合によって, 一定の形状保持力が得られるよう配慮したためである. 成型方法は, ウェットフォーミング法を採用した(図 2). 型の形状は円筒形で, 直径は垂直入射吸音率の測定用に $\phi 99\text{mm}$ (低周波用) と $\phi 29\text{mm}$ (高周波用), そして流れ抵抗測定用に $\phi 89.5\text{mm}$ とし, いずれも材厚は 50mm で成型した. 試作した樹皮繊維成型体の圧縮条件を表 1 に示す.

2・2 各音響特性の測定方法

試料の吸音性能の評価に際しては, 音響管と 2 本のマイクロホンを使用した伝達関数法 (JIS A 1405-2) による測定システムを用い, 垂直入射吸音率を測定した.

また, 3・2 節で後述するように, 樹皮繊維に最適化された推定を行うにあたり, 複数の特性インピーダンスと伝搬定数の実測値を用いた. これらの値の測定方法については, 垂直入射吸音率の測定と同じシステムを用いた. この時, 不定形な樹皮繊維については, 材厚が 25mm と 50mm および 50mm と 100mm の 2 セットについて, 異なる材厚間における各試料前面の比音響インピーダンスの実測値から Two-thickness method¹⁾により算出し, 樹皮繊維成型体については異なる背面空気層厚 25mm と 50mm における各試料前面の比音響インピーダンスの実測値から New two-cavity method²⁾によって算出した.

なお, 垂直入射吸音率の推定を行う際に必要となる単位厚さあたりの空気流れ抵抗の測定には, カトーテック(株)製の通気性試験機 (KES-F8-AP1) を用いた. 試作した各サンプルの流れ抵抗の測定結果を表 1 に示す.

2・3 樹皮繊維を充填した建具の遮音性能の測定

樹皮繊維を音響材料として活用する実施例として, フラッシュ構造の木製建具(表裏の表面材: 合板 2.5mm, 中空層: 25mm)の内部に, 樹皮繊維を充填し音響透過損失を測定した.(開口面積: 1.52 m^2)

2・4 カビ発生試験

樹皮繊維を高温多湿条件で使用することを想定し,

表 1 樹皮繊維成型体の圧縮条件と流れ抵抗

	Bulk density [kg/m^3]			Flow resistivity [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]	Porosity [%]
	Bark	Pulp	Bark +Pulp		
Sample 1	114.6	12.7	127.3	24,487	92.6
Sample 2	114.6	19.1	133.7	29,680	92.2
Sample 3	114.6	25.5	140.1	35,077	91.8
Sample 4	127.3	12.7	140.1	29,787	91.8
Sample 5	127.3	19.1	146.4	38,847	91.4
Sample 6	127.3	25.5	152.8	43,630	91.1
Sample 7	140.1	12.7	152.8	40,173	91.1
Sample 8	140.1	19.1	159.2	50,323	90.7
Sample 9	140.1	25.5	165.5	54,933	90.3
Sample 10	114.6	0.0	—	11,947	93.3
Sample 11	127.3	0.0	—	16,677	92.6
Sample 12	140.1	0.0	—	24,380	91.8

表 2 不定形な樹皮繊維の圧縮条件と流れ抵抗

	Bulk density [kg/m^3]	Flow resistivity [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]	Porosity [%]
Sample 1	102	2220	94.0
Sample 2	127	4367	92.6
Sample 3	153	7367	91.1
Sample 4	178	11927	89.6

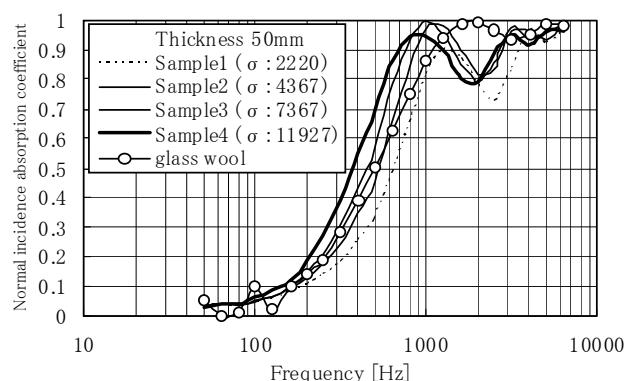


図 3 嵩密度を変化させた際の垂直入射吸音率の比較

防カビ試験を行った. カビ発生試験には NBRC No.4875 *Hortaea werneckii* を用いた. 5ml の孢子懸濁剤に懸濁した孢子を試料 3 種(マーセル化パルプを結合材とした樹皮繊維成型体 A, 古新聞を結合材とした樹皮繊維成型体 B, 及びグラスウール C)に各 1 ml 摂取し, ESPEC(株)製 Humidity Cabinet LHL-113 を用いて, 湿度 80% 温度 30 $^{\circ}\text{C}$ の雰囲気下に 3 週間静置した.

3 結果と考察

3・1 嵩密度の影響及び既存の吸音材料との比較

表 2 に示すように嵩密度(流れ抵抗)を変えた 4 条件の不定形な樹皮繊維について(材厚はいずれも 50mm), それぞれ垂直入射吸音率を測定し比較した

結果を図3に示す。(図中の凡例 σ は流れ抵抗)なお、既存の吸音材料との比較を行うため、グラスウール(嵩密度 24kg/m^3)について実測した結果も併記した。

結果は、一定の周波数以上で吸音率が增大しており、一般的な繊維系多孔質材料と同様の傾向を示していることがわかる。また、嵩密度の増加に伴い周波数特性が低周波側にシフトする傾向も生じている。さらに、低周波側のピークに着目し、その吸音率が最大となる嵩密度(または流れ抵抗)を最適値と仮定すると、Sample 3(嵩密度 153kg/m^3 , 流れ抵抗 $7367\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$)が最も大きく、その嵩密度の周辺に最適値が存在することが示唆される。

なお、グラスウールとの比較では、 2000Hz の帯域で吸音率の低下が見られるものの、それ以外は概ね同等の性能を示しており、樹皮繊維が十分に耐える吸音性能を有していることがわかる。

3・2 Delany-Bazley モデルの適用

均質な繊維で構成される多孔質材料の吸音モデルとしては、流れ抵抗から特性インピーダンスと伝搬定数を推定できる Delany-Bazley モデル³⁾や、それを改良した Miki モデルが知られている。本報で扱う樹皮繊維についても、繊維系材料に分類されることから、同試料について実測した特性インピーダンスと伝搬定数に Delany-Bazley モデルを適用することで、樹皮繊維に最適化された推定式を求めることにした。

まず不定形な樹皮繊維については、表2の4種類の嵩密度の条件について、材厚 50mm と 100mm , そして 50mm と 100mm の2セットについて、実測した試料前面の比音響インピーダンスから Two-thickness method により特性インピーダンスと伝搬定数を算出した。そして、これらの値に Delany-Bazley モデルを適用した結果について、特性インピーダンスの実数部を図4に、虚数部を図5に、そして伝搬定数の実数部を図6に、虚数部を図7にそれぞれ示す。結果は、いずれの図でもデータのばらつきが若干生じているが、データの密集している部分に着目するとほぼ一定の直線上に載っていることが確認できるため、累乗近似を行った。その結果、特性インピーダンス Z_c と伝搬定数 γ を流れ抵抗 σ の関数として表す以下の推定式 (1), (2) を得た。ここで、 f は周波数、 j は虚数単位、 ρ は空気密度、 c

は空気中の音速、そして ω は角周波数である。

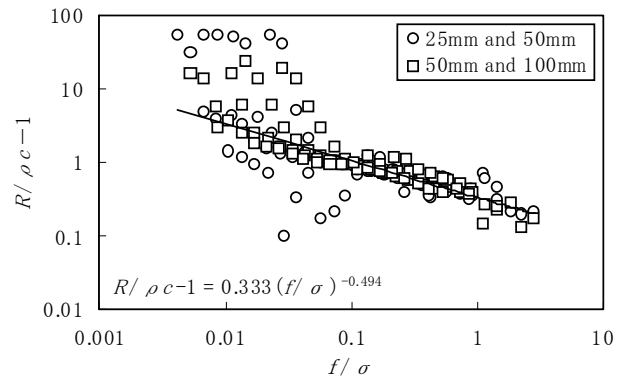


図4 特性インピーダンスの実数部

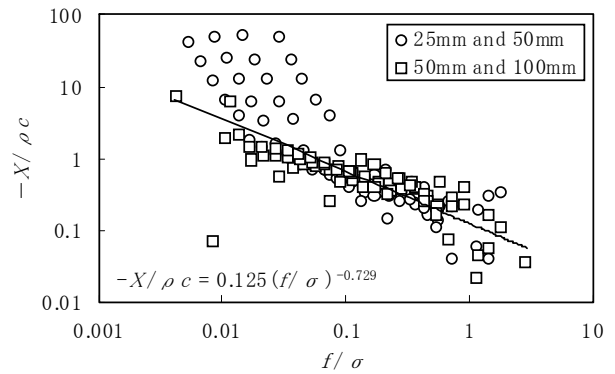


図5 特性インピーダンスの虚数部

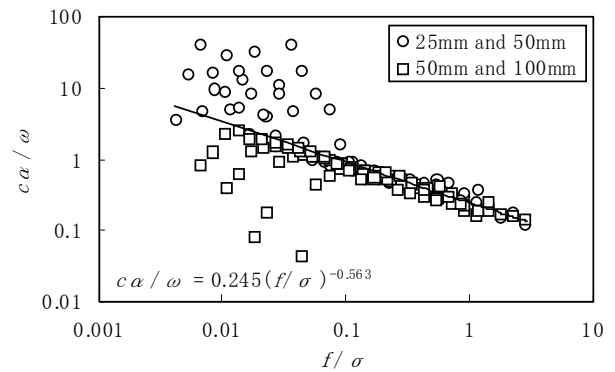


図6 伝搬定数の実数部

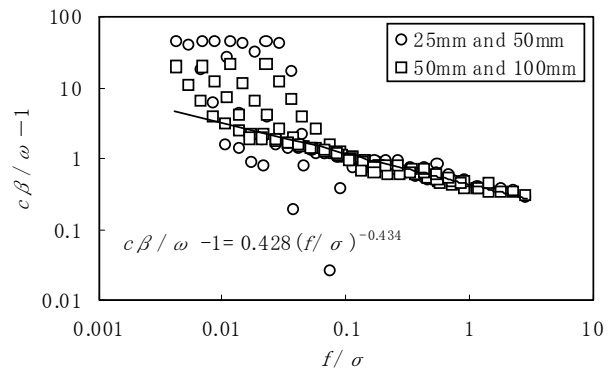


図7 伝搬定数の虚数部

$$\frac{Z_c}{\rho c} = R(f) + jX(f) \quad (1)$$

$$R(f) = 1 + 0.333 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.494}$$

$$X(f) = -0.125 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.729}$$

$$\gamma = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (2)$$

$$\alpha(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 0.245 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.563} \right\}$$

$$\beta(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 1 + 0.428 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.434} \right\}$$

次に、樹皮繊維成型体について、表1の Sample 1～9 の9種類の条件で試作した成型体のサンプルについて、背面空気層厚25mmと50mmで測定した試料前面の比音響インピーダンスから、New two-cavity methodにより特性インピーダンスと伝搬定数を算出した。そして、不定形な樹皮繊維の場合と同様にこれらの実測値に Delany-Bazley モデルを適用し、累乗近似を行った結果、以下の推定式(3)、(4)を得た。

$$\frac{Z_c}{\rho c} = R(f) + jX(f) \quad (3)$$

$$R(f) = 1 + 0.515 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.315}$$

$$X(f) = -0.689 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.154}$$

$$\gamma = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (4)$$

$$\alpha(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 0.285 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.381} \right\}$$

$$\beta(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 1 + 0.301 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.449} \right\}$$

3・3 嵩密度と流れ抵抗の関係

前節で得られた推定式により、試料の流れ抵抗から特性インピーダンスと伝搬定数が算出できるようになった。さらに、試料の流れ抵抗を、その分量から求めることができれば、成型する際の圧縮条件(嵩密度と材厚)のみから垂直入射吸音率の推定が可能になる。そのためには、材料の嵩密度と流れ抵抗の

表3 不定形な樹皮繊維の嵩密度と流れ抵抗

Bulk density [kg/m ³]	Flow resistivity [Pa·s/m ²]	Porosity [%]
76	1300	95.5
89	1567	94.8
102	2220	94.0
115	3160	93.3
127	4367	92.6
140	5647	91.8
153	7367	91.1
166	9200	90.3
178	11927	89.6

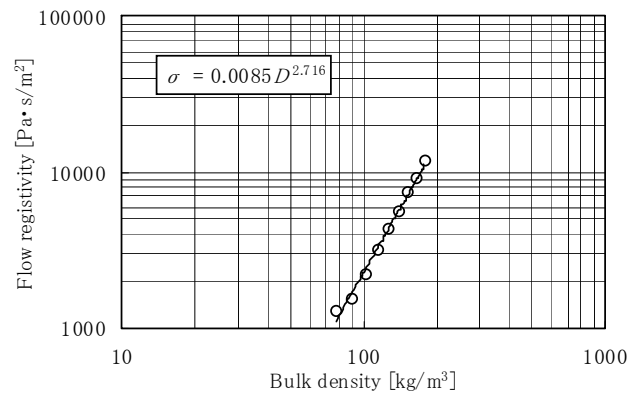


図8 不定形な樹皮繊維の嵩密度と流れ抵抗の関係

関係を明らかにする必要がある。多孔質材料の嵩密度と流れ抵抗の関係については、かねてより指数関数の関係があることが知られている⁴⁾。

そこでまず、不定形な樹皮繊維について、表3の異なる嵩密度の樹皮繊維(いずれも材厚50mm)と流れ抵抗との関係を検証した(図8)。その結果、強い相関が認められたので累乗近似を行い、不定形な樹皮繊維の嵩密度 D_b [kg/m³] からその単位厚あたりの流れ抵抗 σ_b を算出する以下の推定式(5)を得た。

$$\sigma_b = 0.0085 \times D_b^{2.716} \quad (5)$$

次に、樹皮繊維成型体およびその構成要素である樹皮繊維とパルプについて、それぞれの嵩密度と流れ抵抗の関係を図9にプロットした。ここで、樹皮繊維成型体については表1に示す条件のうち Sample 1～9の条件のサンプルを用い、樹皮繊維単体については Sample 10～12の条件のサンプルで実測した値を用いた。また、パルプについては、樹皮繊維成型体の流れ抵抗から樹皮繊維単体のそれを差し引きして求めた値をプロットした。そして、累乗近似を行うことで樹皮繊維およびパルプについて、それぞれの嵩密度 D_B および D_P から、その単位厚あたりの

流れ抵抗 σ_B および σ_P を算出する以下の推定式 (6),

(7) を得た.

$$\sigma_B = 0.0006 \times D_B^{3.5491} \quad (6)$$

$$\sigma_P = 1031.9 \times D_P^{1.01} \quad (7)$$

3・4 推定値と実測値の比較

前節までの結果で得られた不定形な樹皮繊維に関する各推定式 (1), (2), (5) に加え, 以下の良く知られた式 (8), (9) ⁵⁾

$$Z_0 = Z_c \coth(\gamma d) \quad (8)$$

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z_0 - \rho c}{Z_0 + \rho c} \right|^2 \quad (9)$$

(ここで, Z_0 は試料表面の比音響インピーダンス, d は材厚を示す) を用い, 表 2 の低密度な Sample 1 と高密度な Sample 4 の条件について, 剛壁密着条件 (材厚 50mm) における垂直入射吸音率 α_0 の推定値と実測値の比較を行った結果を図 10 に示す. また, 樹皮繊維成型体については, 式 (3), (4), (6), (7) 及び (8), (9) を用い, 表 1 の中から高密度が最も低い Sample 1 と最も高い Sample 9 の条件で, 垂直入射吸音率の推定値と実測値を比較した (図 11).

その結果, いずれの図でも全体として推定値と実測値はよく一致しており, 不定形な樹皮繊維および樹皮繊維成型体に最適化された実用的な推定が可能であることがわった.

3・5 圧縮条件の最適値の特定

これまでに得られた不定形な樹皮繊維に最適化された各推定式 (1), (2), (5) を用いて垂直入射吸音率をシミュレートすることにより, 吸音性能が最も発揮される圧縮条件の特定を試みた. 方法は, 試料の嵩密度を 100 kg/m^3 から 150 kg/m^3 の範囲で 10 kg/m^3 刻みで変化させた際の各垂直入射吸音率の推定値の比較による. 材厚 50mm による比較を図 12 に, 100mm による比較を図 13 にそれぞれ示す.

その結果, 低周波側のピークに着目すると, いずれの材厚においても特定の嵩密度を境にピークが増減しており, その特定の嵩密度は材厚によって異なることがわかる. つまり, 材厚によって嵩密度 (または流れ抵抗) の最適値が異なることを示している. なお, その最適値は 50mm 厚で 140 kg/m^3 (流れ抵抗 $5721 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$), そして 100mm 厚で 110 kg/m^3 (流れ抵抗 $2972 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$) であった.

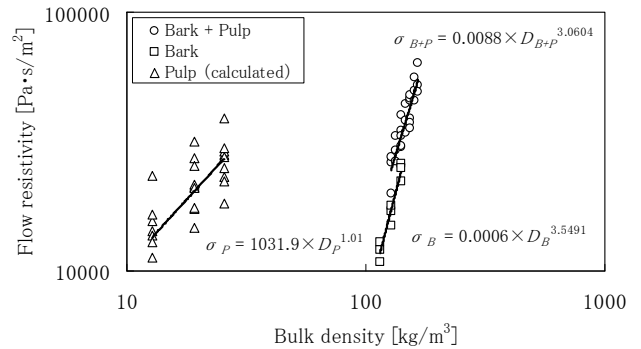


図 9 樹皮繊維成型体の嵩密度と流れ抵抗の関係

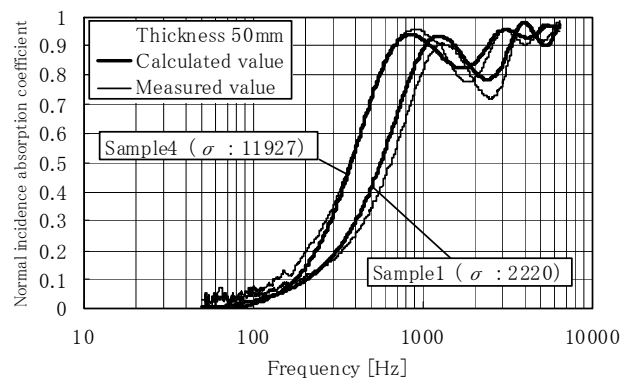


図 10 推定値と実測値の比較 (不定形な樹皮繊維)

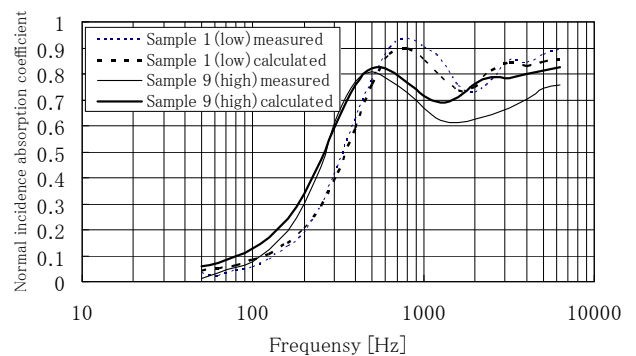


図 11 推定値と実測値の比較 (樹皮繊維成型体)

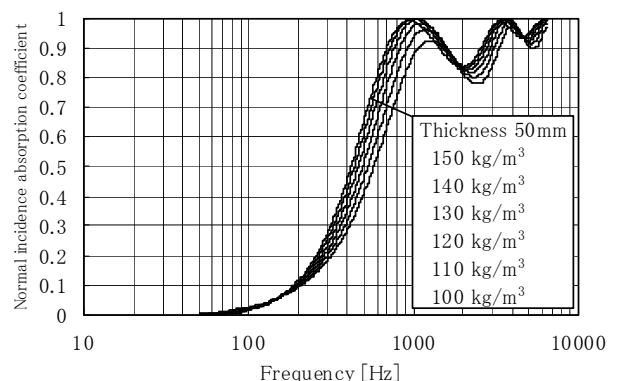


図 12 嵩密度による吸音率の変化 (材厚 50mm)

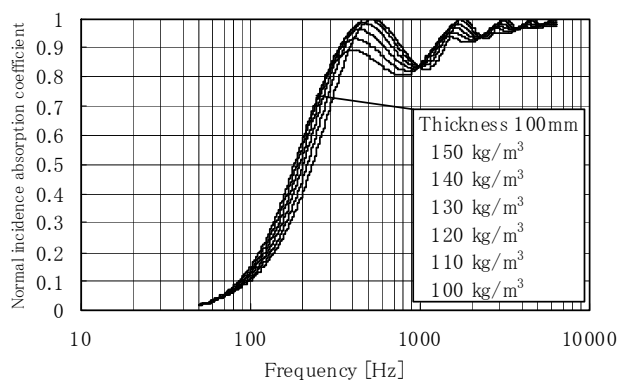


図 13 嵩密度による吸音率の変化 (材厚 100mm)

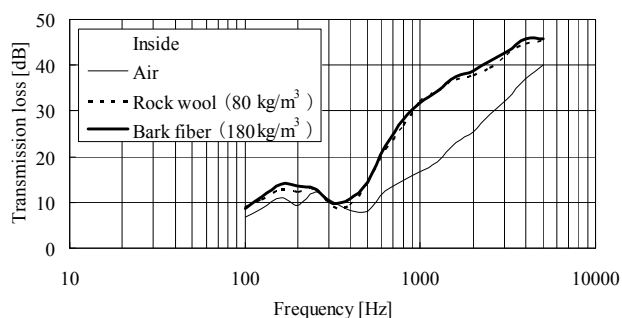


図 14 樹皮繊維を充填した建具の音響透過損失

3・6 樹皮繊維を充填した建具の遮音性能の評価

樹皮繊維を音響材料として活用する実施例として、フラッシュ構造の木製建具の内部に樹皮繊維を充填し、遮音性能を測定した結果を図 14 に示す。なお、比較対象としてロックウール (80kg/m^3) を充填した場合についての実測値も併記した。ここで、樹皮繊維の嵩密度 (180kg/m^3) は、前節までで得られた推定式によるシミュレーションから、あらかじめ中空層の厚み (25mm) に最適な嵩密度を特定した値である。結果は、建具内部が中空の条件に対し、樹皮繊維が充填された条件は、ロックウールを充填した条件と同等の音響透過損失の向上が認められた。

3・7 カビ発生試験の結果

2・4 節で記述した方法によって防カビ試験を行った結果、最終的にグラスウール C にはカビの発生は見られなかった。これに対し A, B には表面全体にカビの発生が確認された。樹皮繊維及び結合材とし

も用意すべきであった。今後結合材に抗菌性物質を用いたバージンパルプや古紙が炭素原として利用されたと考えられる。同じ環境下で樹皮のみの試料混入したもので再試験を行いたい。

4 まとめ

粉碎されたスギバーク (樹皮繊維) について、その圧縮条件から音響特性を推定する実用的な推定式を求めることができた。さらに同推定式によるシミュレーションにより、樹皮繊維の吸音性能が最も発揮される圧縮条件を特定することができた。また、既存の多孔質吸音材料と比較し、樹皮繊維が十分実用に耐える吸音性能を示すことが確認できた。なお、防カビ性能についてはさらに追加実験等により検討する余地が残された。

謝辞

本研究に際し、原料の樹皮を提供していただいた TS ウッドハウス協同組合に、厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) C.D. Smith, T.L. Parrott: "Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials", J.Acoust.Soc.Am., Vol.74, No.5, pp.1577~1582(1983)
- 2) H.Utsuno, T.Tanaka, T.Fujikawa, A.F.Seybert: "Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials", J.Acoust.Soc.Am., Vol.86, No.2, pp637~643(1989)
- 3) M.E. Delany, E.N. Bazley: "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", Appl.Acoust., Vol.3, pp.105~116 (1970)
- 4) L.L.Beraneck: 「Noise Reduction」 (McGraw-Hill, New York, 1960), p.253
- 5) 前川純一・森本政之・阪上公博: 「建築・環境音響学」 (共立出版 第 2 版, 東京都, 2004), p.207