

## 論文

## 再生紙を活用した低周波用吸音体の吸音特性

平間麻子\*<sup>1)</sup> 神田浩一\*<sup>1)</sup> 横田裕史\*<sup>2)</sup> 長谷川徳慶\*<sup>1)</sup>  
高田省一\*<sup>1)</sup> 加藤光吉\*<sup>1)</sup>

Sound absorption characteristics of the low frequency resonators that utilized recycled paper

Asako HIRAMA, Koichi KANDA, Hiroshi YOKOTA, Norichika HASEGAWA  
Shoichi TAKADA and Kokichi KATO

**Abstract** It is difficult to find the proper measures to take if low frequency forms of resonance occur in a small area such as those found below a floor, a ceiling or so on. So we considered using Helmholtz resonators which can absorb specific types of frequency resonance. The Helmholtz resonators have a long and slender neck and a cave. It is considered that it consists of a mass of air in a neck, air spring of a cave and viscosity resistance of a neck area.

Usually, resonators consist of stiff materials. But we made resonators using recycled papers and plywood which were inexpensive, light and not stiff, and we confirmed their sound absorption characteristics. Then we confirmed their usefulness of said performances through experiments, and we explained that we would be able to make resonators which have resonance frequencies around 100Hz.

**Keywords** Helmholtz resonator, Recycled paper, Surface impedance, Impedance tube, Sound absorbing coefficient

## 1. はじめに

平成12年7月、床衝撃音対策や室内低騒音化等、住宅の品質確保の促進に関する法律に係わる告示が出された。しかし、二重天井・二重床の住宅構造では、その寸法から100Hz前後の低周波領域の定在波が生じ、低騒音化の実現を難しくしている。こうした背景から、低周波音に対応した騒音対策が求められている。

低周波用吸音体は、一般にオーディオルーム用などとして市販されている。しかし、それらは高価なので、一般の住宅の騒音対策用としては用いられない。そこで、安価な材料、再生資源などを利用した室内騒音制御用の実用的な低周波用吸音体の開発を目指し、ヘルムホルツ型吸音体の利用を検討してきた。

吸音体は、一般的に、剛性の大きい材料で構成される。しかし、ここでは安価で軽量ということから、再生紙を利用した吸音体を試作した。そして、その吸音特性を測定及び解析したので報告する。

## 2. 低周波用吸音体の試作と吸音特性の測定

### 2.1 ヘルムホルツ型吸音体

図1のように、空洞に小さな開口があって外に通じていると、その開口または首の空気は一つの塊として運動するため、機械的には、単一共振系と同様の運動をすることになる。この構造体は、RLC直列回路で等価することができ、ある特定の周波数（共振周波数）で吸音率が大きくなる。このような吸音体をヘルムホルツ型吸音体という。

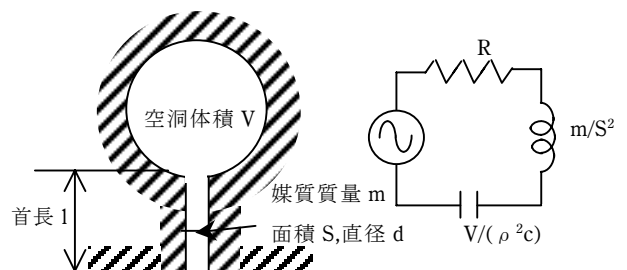


図1 ヘルムホルツ型吸音体

図1の回路の共振周波数は、次のように与えられる。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(l + 0.85d)V}} \quad (1)$$

ここで、c：音速

\*<sup>1)</sup> 計測応用技術グループ

\*<sup>2)</sup> 計測応用技術グループ(現情報システム技術グループ)

式(1)から、共振周波数が低めになるように図1の要素を設定すれば、低周波音を吸音するヘルムホルツ吸音体を作れると考えられる。

### 2.2 吸音率とノーマル音響インピーダンス

吸音体の開口面で見た音圧と法線方向の粒子速度の比率をノーマル音響インピーダンスという。吸音体のノーマル音響インピーダンスを  $Z_N = R_N + jX_N$  とすると、比音響インピーダンス  $z$  は、次式で定義される。

$$z = \frac{Z_N}{\rho c} = \frac{R_N}{\rho c} + j \frac{X_N}{\rho c} = r + jx \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  : 空気の密度、 $c$  : 音速

音が開口部へ、法線方向より局所作用を満足した(音波が開口面と垂直方向に進む)角度  $\theta$  で入射した時、吸音率  $\alpha_\theta$  は、比音響インピーダンスを用いて表すと次式となる。

$$\alpha_\theta = \frac{4r \cdot \cos \theta}{(r \cos \theta + 1)^2 + (x \cos \theta)^2} \quad (3)$$

共振時、 $z$  の虚数部  $x$  は 0 となる。また、式(3)から、共振周波数で垂直入射時に  $z$  の実数部  $r$  が 1 になると、理論上吸音率が最大になる。

### 2.3 低周波用吸音体の試作

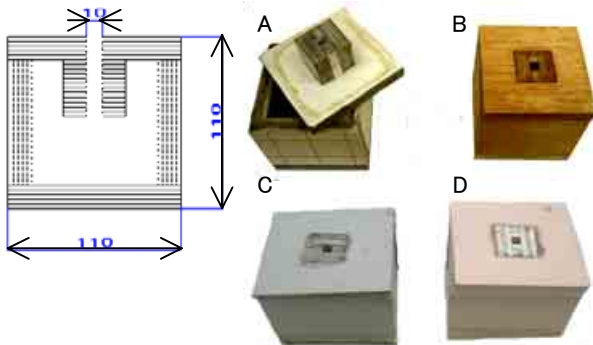


図2 試作吸音体

表1 試作吸音体の材料

	A	B	C	D
構成	再生紙 +樹脂層 (2層)	普通合板	再生紙 +樹脂層 (3層)	石こうボード +再生紙
表面状態	密	粗	粗	粗
厚さ	3mm×5枚	15mm	4mm×3枚	13mm
面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	11.99	7.38	9.48	10.46

図2のA~Dに示した吸音体を試作した。それぞれの材料の詳細を、表1に示す。吸音体Aは、制振材として使用される樹脂層で挟まれた再生紙を5枚重ねて製作し

た。吸音体Bは普通合板、吸音体Cは3層構造の再生紙を3枚重ねたもの、吸音体Dは再生紙を石こうボードで挟んだもので、それぞれ製作した。寸法は、材料によって厚さが異なるため、全ての吸音体内寸が80×80×80mm、開口部が10×10×50mmとなるように設計した(図2の寸法は、吸音体Aのもの)。この内寸の場合、計算上、103~105Hzの共振周波数となる。

### 2.4 吸音特性の測定

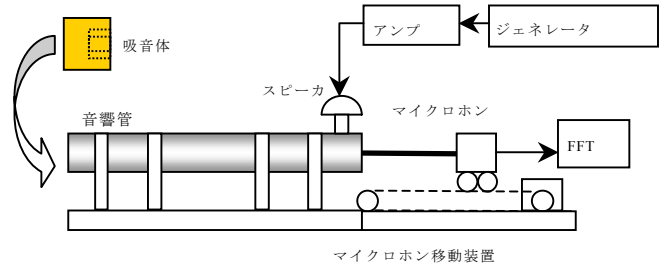


図3 吸音率測定システム

試作した吸音体の吸音率を、残響室法に比べ、少量の試料点数で評価可能な、垂直入射吸音率測定システムを用いて測定した。その方法を図3に示す。

音響管の先端に、試作したそれぞれの吸音体を取り付け、音響管内部に音を出すと、入射波と反射波の干渉によって、定在波が発生する。この定在波から、計算により正面からの音に対する吸音率及びノーマル音響インピーダンスを求める。

測定は、1/3オクターブバンド中心周波数ごとに行った。また、試作吸音体に用いた各材料の吸音特性を把握するため、材料の背後に内寸と同じ寸法80mmの空気層を設け、吸音率を測定した。

### 2.5 測定結果

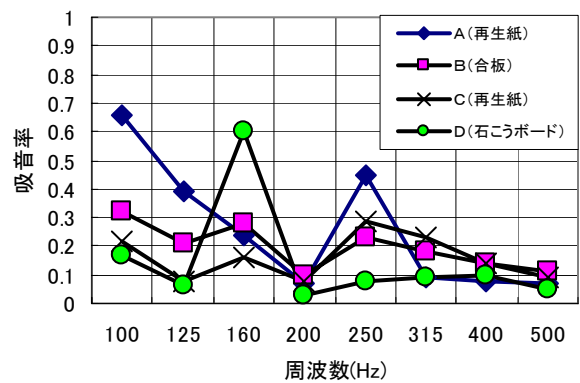


図4 吸音体の吸音率

試作吸音体A~Dの吸音率測定結果を図4に示す。吸音体A及びBは、100Hzの吸音率が最も高い値を示

している。特に、吸音体 A では約 0.7 となっている。さらに、吸音体 A は、250Hz でも吸音率が高くなっている。B では、160Hz、250Hz に 0.3 弱のピークがある。

一方、吸音体 C は、その周波数特性は、全体的になだらかである。250Hz にピークが見られるが、その値は 0.3 程度と極めて低い。

また、吸音体 D は、全体的には 0.2 以下の吸音率であるが、160Hz で、約 0.6 と著しいピークが見られる。これは、材料自体の吸音特性が影響しているものと思われる。

吸音体 A~D を製作するのに用いた、各材料の吸音特性を図 5 に示す。

吸音体 A 及び C の材料では、100Hz、160Hz、250Hz で若干のピークがあるが、全体的に低い吸音率となる。

一方、吸音体 B 及び D の材料では、100Hz から吸音率が高くなり、160Hz で約 0.7 のピークがある。

しかし、今回の材料の評価方法が適切だったのかという問題があるため、今後引き続き検討していく。

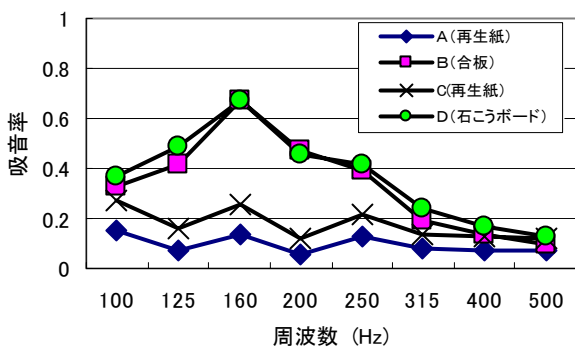


図 5 各材料の吸音特性

試作吸音体 A~D のノーマル音響インピーダンスの位相角を図 6 に示す。図 1 の等価回路から、共振周波数において、インピーダンスの位相角が反転する点で、吸音率が最大となる。

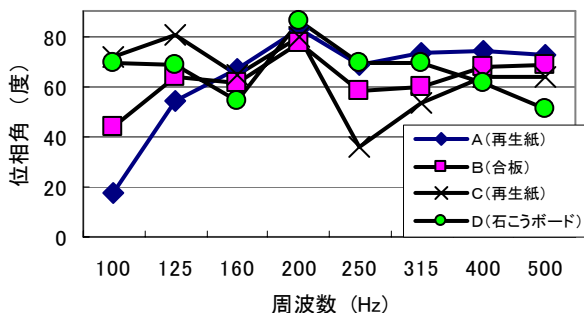


図 6 吸音体のノーマル音響インピーダンス

吸音体 A 及び B は、100Hz において、位相角が一番小さくなっている。今回は、測定装置の関係から、100Hz 未満の周波数域の測定を行っていないが、100Hz よりやや低い周波数で 0 になるものと推察された。

吸音体 C は、250Hz で、吸音体 D は、160Hz と 500Hz で位相角の値が小さくなっているのが分かる。しかし、位相角の反転は起こっていない。このことから、100Hz より低い周波数範囲で共振が起こっているものと思われる。

以上の結果から、吸音体 A 及び B は、吸音体のヘルムホルツの形状による影響、吸音体 C 及び D は、材料自体による影響が大きい傾向にあることがわかる。

### 3. 密閉箱による音圧レベル低下量測定

#### 3.1 測定方法

共振周波数をさらに特定するため、密閉箱による測定を行った。その様子を、図 7 に示す。

密閉した箱の中に、試作した吸音体を入れ、スピーカを取り付けたふたをする。そして、スピーカからホワイトノイズ音を出力し、1/12 オクターブバンド中心周波数ごとに音圧レベルを測定した。

さらに、吸音体としてどのように作用しているかを確認するため、吸音体の首開口部をふさいで密閉箱の中に入れ、同様の測定を行い、音圧の低減量を求めた。

以上の測定を、吸音体 A~D について、それぞれ行った。

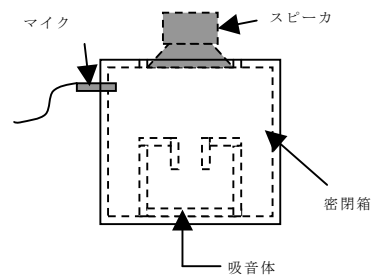


図 7 密閉箱による音圧レベル測定

#### 3.2 音圧レベル低下量

吸音体 A 及び B をそれぞれ設置したときの、密閉箱内の音圧レベル低下量を図 8 に示す。

吸音体 A, B いずれも、97Hz で音圧レベルの低下量が最大となっている。このことから、97Hz 付近が、吸音体 A, B の共振周波数と考えられる。

一方、吸音体 C 及び D をそれぞれ設置したときの、密閉箱内の音圧レベル低下量を図 9 に示す。

吸音体 C は、154Hz 付近で音圧レベル低下量が最大となっている。吸音体 D は、122Hz 付近にピークが見られる。吸音体 A, B と同様に、共振による吸音が見られる

が、材料の吸音特性の影響を受けたため、このような結果になったと考えられる。

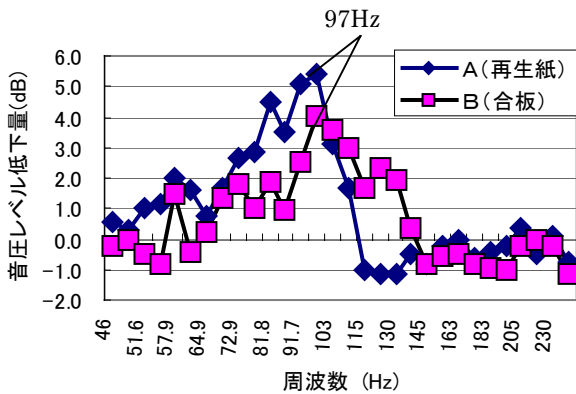


図8 密閉箱内音圧レベル低下量(1)

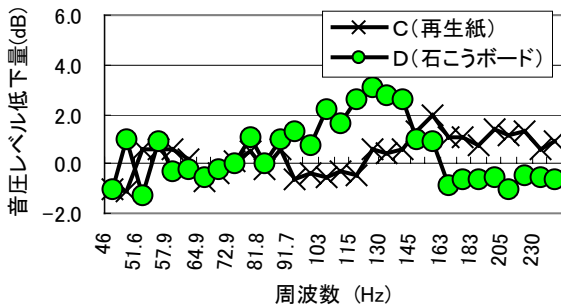


図9 密閉箱内音圧レベル低下量(2)

以上の一連の測定から、今回試作した吸音体の中で、吸音体Aが100Hz付近における吸音効果が最も高く得られることが確認された。この結果から、吸音体Aを用いて、乾式二重床内の床衝撃音低減特性を測定した。

#### 4. 乾式二重床内の床衝撃音低減特性

##### 4.1 測定

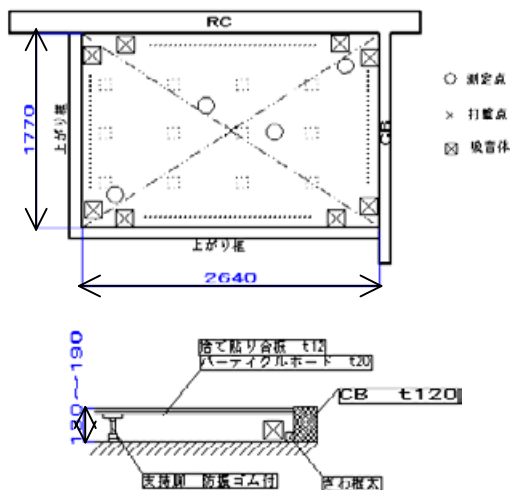


図10 測定用乾式二重床

図10に示す3畳大の乾式二重床の床下に、マイクロホンを設置した(図中○で表示)。さらに、図のように、床下の四周に吸音体Aを設置した。そして、床中央部を軽量床衝撃源で打撃し、軽量床衝撃音を測定した。

また、吸音体Aを設置しない場合についても測定を行い、設置した場合と比較した。

#### 4.2 結果

軽量床衝撃源による乾式二重床内の音圧の測定結果を、表2に示す。

表2 軽量床衝撃源による乾式二重床内の音圧の変化

周波数 [Hz]	平均音圧レベル[dB]		
	吸音体なし	吸音体あり	改善量
80	98.8	99.8	-1
100	98.4	96.8	1.6
125	106.1	103.4	2.7
160	102.5	103.4	-0.9
200	106.4	104.3	2.1

吸音体がない場合と、吸音体を設置した場合とを比較すると、100Hz、125Hz及び200Hzにおいて、音圧レベルの低減が見られる。密閉箱を用いた測定では、97Hzで音圧レベルの低下量が最大となった。このことから、100Hzでの改善は、吸音体のヘルムホルツの形状によるものと考えられる。一方、125Hz及び200Hzについては、吸音体単体での特性では吸音効果がなかったことから、床下構造との関連によるものと考えられる。今後さらに検討を加える。

#### 5. まとめ

今回、再生紙や合板を利用して、ヘルムホルツ型低周波吸音体を試作した。そして、一連の測定から、実用的な性能を確認した。また、測定から、吸音体の材料によって特性が変化することも把握できた。

引き続き、住宅等で利用できる寸法と材質の吸音体の開発を進めていき、室内の騒音制御への適用方法を検討していく。

#### 参考文献

- 1) 日本音響学会:建築音響,コロナ社(1988).
- 2) 平間麻子他:東京都立産業技術研究所研究報告,第5号,139(2002).
- 3) 神田浩一他:東京都立産業技術研究所研究発表会要旨集,27(2003).

(原稿受付 平成15年7月31日)