

## 音波の入射角度制御による遮音性能向上手法に関する基礎研究

阿部 将幸 原澤 悠  
江川 隼太

### 概 要

遮音部材の選定にあたっては、ランダム入射条件での質量則による遮音性能の検討に加え、コインシデンス効果による性能低下を考慮する必要がある、高い遮音性能を得るためには壁の重量化、複層構造化を検討するのが一般的であるが、コストやスペースの確保を考えると採用が難しい場合もある。

筆者らは、従来手法に比べて低コスト且つ軽量で簡易に施工可能な遮音改善工法の開発を目的とし、部材表面にハニカム構造を設け、音波の入射角度を垂直方向に制御することによる遮音性能向上効果について基礎的な検討を行った。その結果、ハニカム材を取り付けることにより、コインシデンス周波数帯域を中心に遮音性能が改善するなど一定の効果が得られることを確認した。

### Basic study on methods for improving sound insulation performance by controlling the incident angle of sound waves

#### Abstract

When selecting sound insulation materials, in addition to considering sound insulation performance based on the mass law under random incidence conditions, it is necessary to consider performance degradation due to coincidence effects. To obtain high sound insulation performance, it is common to consider using heavier walls or multi-layered construction, but this may be difficult to adopt considering cost and space requirements.

To develop a sound insulation improvement method that can be easily constructed at a lower cost and lighter weight than the conventional method, the authors conducted a basic study on the effect of improving sound insulation performance by installing a honeycomb structure on the surface of the member and controlling the incident angle of sound waves in the vertical direction. As a result, it was confirmed that installing honeycomb material can achieve certain positive effects, such as improving sound insulation performance mainly in the coincidence frequency band.

キーワード：ハニカム、質量則、コインシデンス効果、  
遮音性能

## §1. はじめに

合板、石膏ボード、板ガラスなどの比較的薄い板材料や、RC壁やPC板など均質な材料でできた単層壁に音波が垂直に入射した時の透過損失は式(1)のように表され、透過損失が壁体の面密度と周波数の積に依存する関係を質量則といい、単板材料の遮音性能を示す最も基本的な理論<sup>1)</sup>である。

ここで、 $TL_0$ は垂直入射透過損失 (dB)、 $f$ は周波数 (Hz)、 $m$ は壁体の面密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) を示す。

$$TL_0 = 20 \log_{10} f \cdot m - 43 \cdots (1)$$

一方、一般の室のように音が様々な方向から壁面に入射するランダム入射の条件における質量則は式(2)で得られ、垂直入射に比べランダム入射では 10 dB 程度遮音性能が低下する。ここで、 $TL_m$ はランダム入射透過損失 (dB) を示す。

$$TL_m = TL_0 - 10 \log_{10} (0.23 TL_0) \cdots (2)$$

更に、壁面に音が斜めに入射する場合、音波の波長と部材を伝わる曲げ波の波長が一致することで質量則よりも透過損失が著しく低下するコインシデンス効果が生じる。この周波数はコインシデンス周波数と呼ばれ式(3)で与えられる。 $\theta = 0^\circ$ の垂直入射条件を除き、任意の入射角 $\theta$ に対して必ず存在し、水平入射時に最も下限の周波数で遮音性能の低下現象が生じる。

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h \cdot \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\gamma^2)}{E}} \cdots (3)$$

ここで、 $f_c$ はコインシデンス周波数 (Hz)、 $c$ は音速 (m/s)、 $h$ は材料の板厚 (m)、 $\theta$ は音波の入射角 (度)、 $\rho$ は材料の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\gamma$ は材料のポアソン比、 $E$ は材料のヤング率 (Pa) を示す。

以上のことから、遮音部材の選定にあたってはランダム入射条件での質量則による遮音性能の検討に加え、コインシデンス効果による性能低下を考慮する必要がある。高い遮音性能を得るためには壁の重量化、複層構造化を検討するのが一般的であるが、コストや省スペース化を考えると採用が難しい場合もある。

そこで筆者らは、従来手法に比べて低コスト且つ軽量で簡易に施工可能な遮音改善工法の開発を目的とし、部材表面にハニカム構造を設け、音波の入射角度を垂直方向に制御することによる遮音性能向上効果について基礎的な検討を行った。

## §2. ハニカム構造と音波の入射角度の検証

### 2.1 波動音響解析による検証

ハニカム構造と音波の放射角度の制御効果を確認するため、セルの直径 $d$ 、長さ $L$ と、音波の波長 $\lambda$ 、入射角度 $\theta$ の関係について、波動音響解析による検証を行った。

#### 2.1.1 解析モデル

解析モデルを図1に示す。正六角形ハニカムの入射端の中心点 $i(0,0,0)$ に対し、音波の入射角度 $\theta_1$ を $0^\circ$  (垂直方向)~ $90^\circ$  (水平方向)に変化させ、放射端の中央点 $o(0,0,-L)$ における $x$ 方向、 $z$ 方向のアクティブインテンシティから放射角度 $\theta_2$ を算出した。なお $x-y$ 面 ( $z=0$ )はハニカム開口部以外を完全吸音面とし、ハニカムの内壁は厚さ0、透過損失0の完全反射面とした。

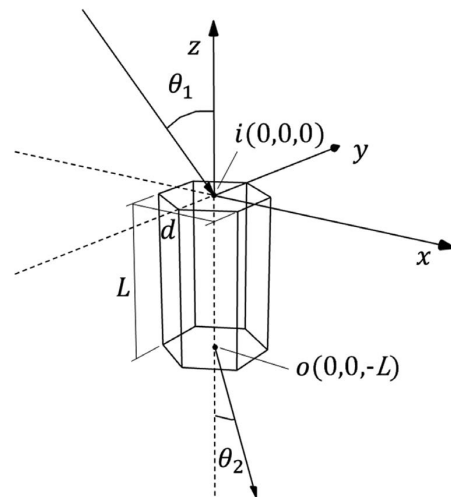


図1 音波の入射角度の解析モデル

#### 2.1.2 解析結果

直径 20 mm、長さ 10 mm のハニカム通過後の音波の放射角度 $\theta_2$ を入射角度 $\theta_1$ 毎に比較して図2に示す。波長の長い低周波数帯域は音波の入射角度によらず放射角度が垂直方向に制御されているのに対し、高周波数帯域では入射角度が浅くなるほど、放射角度も浅くなっており、 $90^\circ$ 入射 (水平方向) の場合、 $0^\circ$  (垂直方向) 入射と比較して最大で $20^\circ$ 程度放射角度が浅くなっている。

次に、直径を 20 mm、入射角度を $90^\circ$ とし、長さを 2.5~50 mm に変化させた場合の放射角度 $\theta_2$ を図3に示す。直径 $d$ が同じ場合、長さ $L$ が長くなるほど放射角度が垂直方向に制御されていることがわかる。

更に、長さを 10 mm、入射角度を $90^\circ$ とし、直径を 5~40 mm に変化させた場合の放射角度 $\theta_2$ を図 4 に示す。長さ $L$ が同じ場合、直径 $d$ が小さくなるほど放射角度が垂直方向に制御されていることがわかる。

放射角度 $\theta_2$ は直径 $d$ が小さいほど、長さ $L$ が長いほど波長 $\lambda$ の短い高周波数帯域まで垂直方向に制御でき、ハニカム内壁の透過損失を無視すれば、直径 10 mm 以下、長さ 10 mm 以上であれば入射角度 $\theta_1$ に寄らず広帯域で制御できることを確認した。

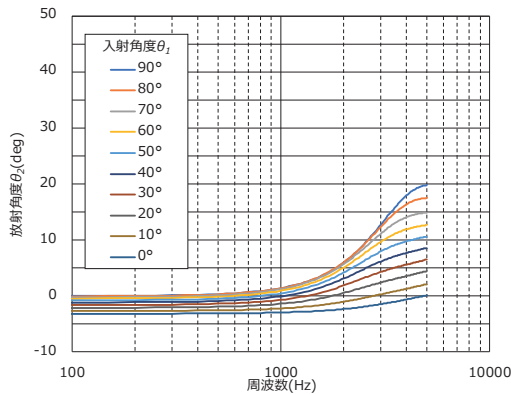


図 2 入射角度の比較  
(直径  $d = 20$  mm、長さ  $L = 10$  mm)

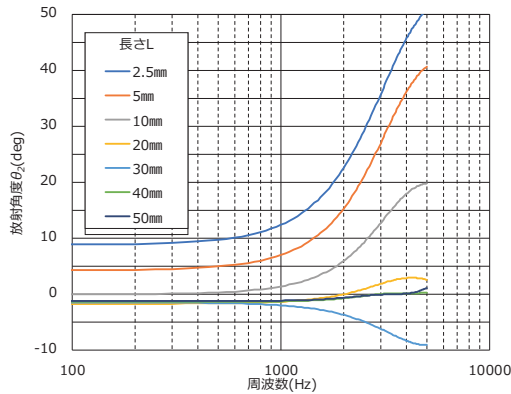


図 3 長さの比較 (直径  $d = 20$  mm、入射角度  $\theta_1 = 90^\circ$ )

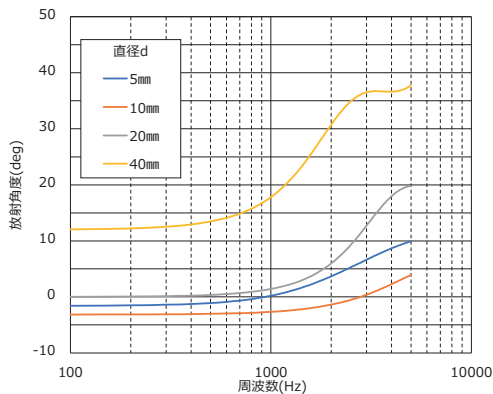


図 4 直径の比較 (長さ  $L = 10$  mm、入射角度  $\theta_1 = 90^\circ$ )

## 2.2 斜め入射挿入損失による検証

ハニカム設置による音波の入射角度制御効果を実験的に確認するため、入射角度ごとの遮音性能を測定した。

### 2.2.1 実験概要

無響室-残響室間に設けられた開口部 (910 mm × 1,820 mm) に試験体 (石膏ボード t 12.5 mm) を設置し、無響室内の試験体中央から 4.0 m の位置に設置したスピーカからピンクノイズを再生し、入射角度 $\theta$ を $0^\circ$  (垂直入射)、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  と変化させた。遮音性能の評価には試験体なし (開口部のみ) と試験体設置後の残響室内平均音圧レベルとの差分から算出する挿入損失を用いた。実験概要を図 5 に示す。

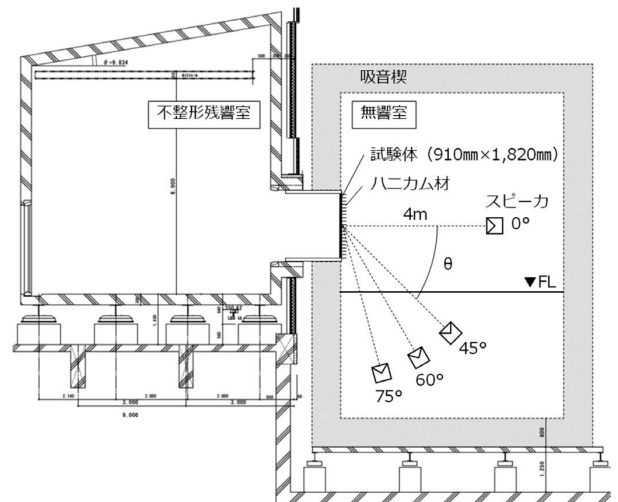


図 5 斜め入射挿入損失 実験概要図

### 2.2.2 実験結果

石膏ボード単体の斜め入射挿入損失を図 6 に示す。挿入損失は垂直入射時の $0^\circ$ が最も大きく、コインシデンス周波数付近の落ち込みも僅かとなっているが、入射角度の増大に伴いコインシデンス周波数が低域にシフトするとともに、全周波数帯域で遮音性能が低下している。

次に、石膏ボードの表面に直径 3 mm、厚さ 100 mm、フィルム厚  $70 \mu\text{m}$  の硬質塩化ビニル製ハニカムを両面テープで直貼りした場合の挿入損失を図 7 に、 $0^\circ$  入射と  $75^\circ$  入射の挿入損失をハニカムの有無で比較したものを図 8 に示す。石膏ボード単体では $0^\circ$  入射に比べ  $75^\circ$  入射で著しく低下していた挿入損失が、ハニカム設置によりコインシデンス周波数付近の落ち込みの軽減や、中音域での遮音性能が改善し、一部で垂直入射に近い性能が得られている一方、400 Hz 以下で

はハニカムの共振による低下もみられた。また、0°入射時は1 kHz以上の帯域で僅かに遮音性能が向上する程度であることから、斜め入射時の遮音改善は音波の角度制御による効果であると考えられる。

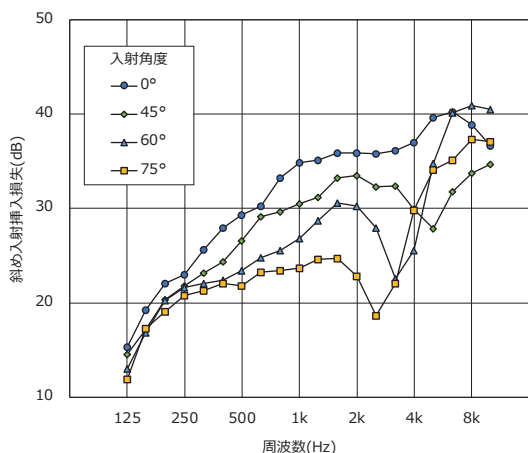


図6 入射角度の比較 (石膏ボード t 12.5 mm)

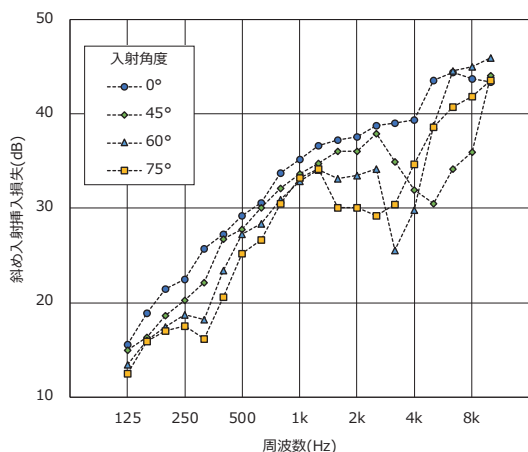


図7 入射角度の比較  
(石膏ボード t 12.5 mm + ハニカム)

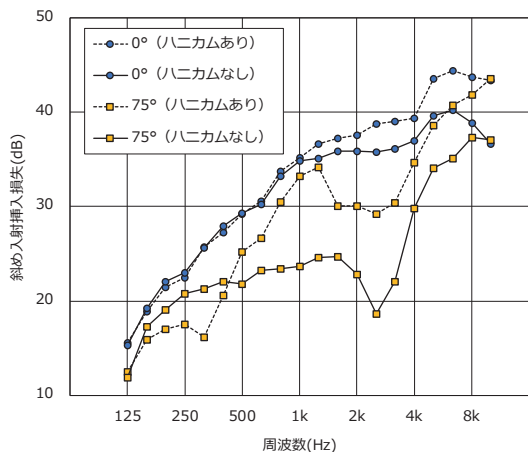


図8 ハニカムの設置効果

### §3. 基本特性の検証

ハニカム構造や設置条件が部材の遮音性能に与える影響を検証した。試験体はガラス厚 t 3 mm のアルミサッシとし、JIS A 1416に準拠して音響透過損失を測定した。

#### 3.1 ハニカム径、長さ、材質の影響

##### 3.1.1 実験概要

残響室間の開口部 (2,000 mm × 2,000 mm) に設置した乾式二重壁 (両面石膏ボード t 12.5 mm × 3枚張り、空気層 100 mm、中空部に密度 32 kg/m<sup>3</sup> t 100 mm のグラスウールを充填) にガラス厚 t 3 mm のアルミサッシ (W 713 mm、H 1,300 mm) を取り付けた。ハニカム材をガラス面に両面テープで直貼りし、ハニカム材の直径や長さ、材質を変化させることで遮音性能に与える影響を検証した。なお、試験体に対してランダム入射となるよう不整形残響室を音源室とし、音源室側にハニカムを設置した。図9に実験概要図、表1に検証に使用したハニカムサンプル一覧を示す。

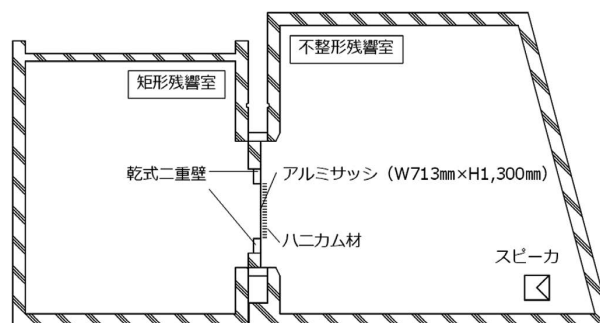


図9 音響透過損失 実験概要図

表1 ハニカムサンプル一覧

材質	直径 $d$ (mm)	厚さ $L$ (mm)	フィルム・箔厚 ( $\mu\text{m}$ )	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
硬質塩化ビニル	3	10, 50, 100	60	75
	8	10	70	31
	20	10	140	25
アルミ箔	3.2	10	25	54

##### 3.1.2 実験結果

ハニカムの長さを10 mmとし、直径を3 mm、8 mm、20 mmと変化した結果を図10に示す。ガラス単体で見られた5 kHz帯域でのコインシデンス効果による落ち込みがハニカムの設置により抑制され、直径が小さくなるほど抑制効果が大いことがわかる。

次に、長さを 10 mm とし、ハニカム素材を硬質塩化ビニル製（直径 3 mm）、アルミ製（直径 3.2 mm）で比較して図11に示すが、コインシデンス周波数帯域の改善効果に違いは見られなかった。

更に、ハニカムの直径を 3 mm とし、長さを 10 mm、50 mm、100 mm と変化させた結果を図12に示す。長さ 10 mm ではコインシデンス周波数帯域付近に限定されている改善効果が、長さを増すことで低音側にも拡大することを確認した。

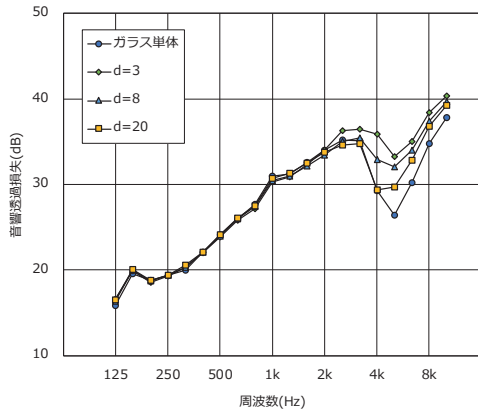


図10 直径  $d$  の比較（長さ  $L=10$  mm）

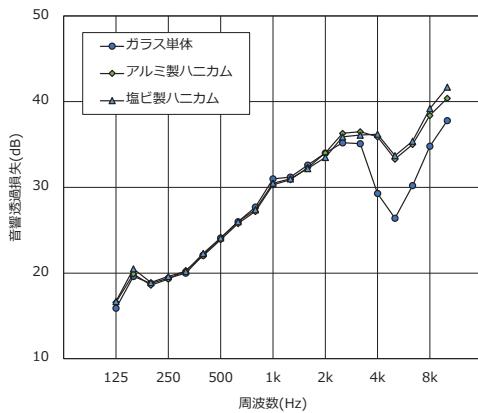


図11 素材の比較（直径  $d=3$  mm、長さ  $L=10$  mm）

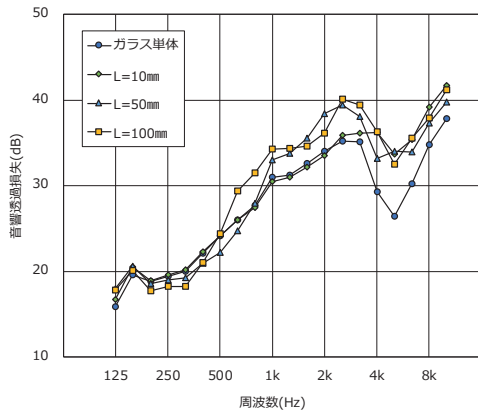


図12 長さ  $L$  の比較（直径  $d=3$  mm）

### 3.2 設置面との隙間の影響

#### 3.2.1 実験概要

3.1と同試験体を用い、ガラス面とハニカムのクリアランスを変化させることで、設置面との隙間が遮音性能に与える影響を検証した。ハニカムは直径 3 mm、長さ 50 mm の硬質塩化ビニル製とした。図13に実験概要図を示す。

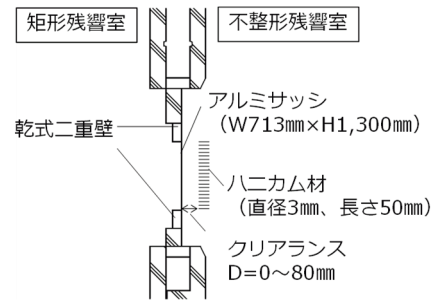


図13 実験概要図（クリアランスの影響）

#### 3.2.2 実験結果

ハニカムとガラス面とのクリアランス  $D$  を 0 mm（密着）から 80 mm まで変化させた結果を図14に示す。密着状態の遮音性能が最も良いのに対し、クリアランスが増大するにつれて遮音性能が低下することがわかる。一方で、クリアランス 10 mm 程度であれば遮音性能の低下は少なく、おおよそ密着状態と同程度の性能が得られていることから、実施工においてもある程度のクリアランスは許容できるものと思われる。

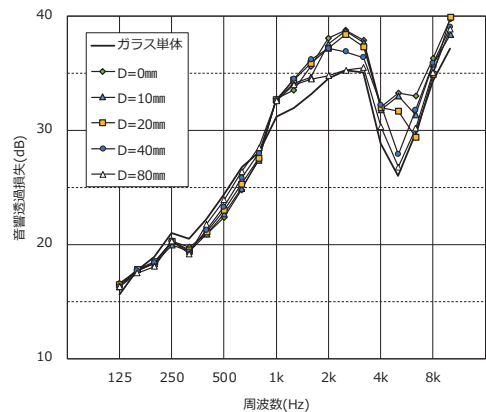


図14 クリアランスの影響  
（直径  $d=3$  mm、長さ  $L=50$  mm）

### 3.3 音波の入射面の影響

#### 3.3.1 実験概要

入射音波の角度を垂直方向に制御するためにはハニカムを入射側に設置する必要がある。ここでは、ハニ



カムを片面に設置した状態で音波の入射面の違いが遮音性能に与える影響を検証するため、3.1と同試験体を用い、音源室を入れ替えて音響透過損失を測定した。ハニカム材は直径 3 mm、長さ 100 mm の硬質塩化ビニル製とし、ガラス面に接触しないよう 10 mm 程度のクリアランスを設けた。

### 3.3.2 実験結果・考察

不整形残響室を音源室としてハニカム側から音波を入射した場合と、矩形残響室を音源室としてガラス側から入射した場合の透過損失を比較して図15に示すが、音波の入射面に寄らずハニカムの設置効果は同じであった。これは、豊田ら<sup>2)</sup>が提案する区画化処理の効果であると考えられ、放射側にハニカムを設置した場合でもガラス表面を沿う空気粒子の運動を規制することによって、空気共振が抑制された結果であると思われる。

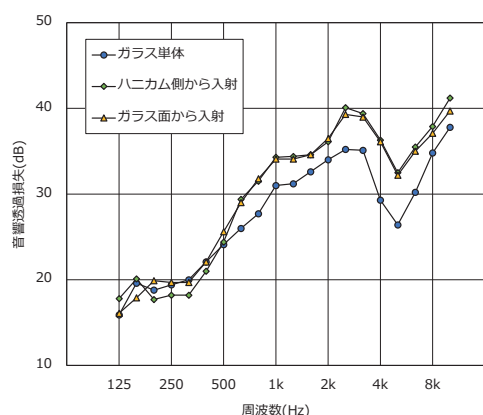


図15 音波の入射面の比較  
(直径  $d=3$  mm、長さ  $L=50$  mm)

## §4. 遮音改善量の向上、広帯域化の検討

ハニカム材の設置により、コインシデンス周波数帯を中心として遮音性能が向上し、直径が小さいほど、長さが長いほど改善効果が低音域まで拡大することがわかった。ここでは、更なる遮音改善量の向上、広帯域化にむけて、表面仕上げの影響やハニカムの積層効果について検証した。試験体は乾式壁とし、JIS A 1416 に準拠して音響透過損失を測定した。

### 4.1 表面仕上げ、積層の効果

#### 4.1.1 実験概要

残響室間の開口部 (3,500 mm×3,000 mm) に設置した乾式遮音壁 (吉野石膏タイガードリーミー・75相当) に 910 mm×1,820 mm の開口部を設け、試験体を

設置した。ハニカム材は比較的安価で加工性に優れたペーパーハニカムを使用し、表面材として粘着剤付きの塩化ビニル製壁紙シートを貼り付けた。図16に実験概要図を、表2に試験体一覧を示す。

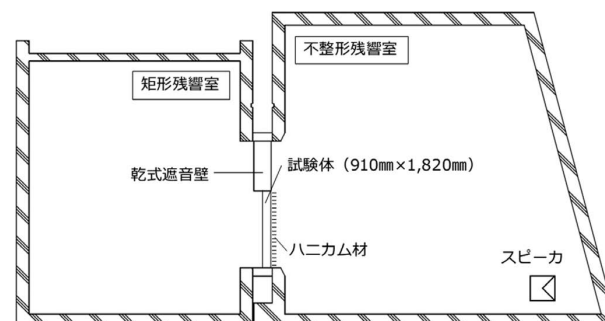


図16 実験概要図

表2 試験体一覧

	壁構成
単層壁	PB12.5
複層壁	PB12.5 + 空気層65 + PB12.5
GW 充填壁	PB12.5 + 空気層65 (32 kWt50挿入) + PB12.5

#### 4.1.2 実験結果

石膏ボード t 12.5 mm に対する、直径 3 mm、長さ 50 mm のハニカムの設置効果を表面材有無で比較し、更に石膏ボード、ハニカム、壁紙単体の透過損失も併せて図17に示す。ハニカム設置による遮音改善効果は 800 Hz 以上の周波数帯域で最大 7.1 dB (2 kHz) 程度であるのに対し、ハニカム表面に壁紙を付加することで、改善効果は 250 Hz 以上の周波数帯域に拡大し、最大 14.9 dB (2.5 kHz) と改善量が大幅に向上していることがわかる。ハニカムや壁紙自体の遮音性能が低いにもかかわらず、それらを組合せて設置することで遮音性能が大きく改善していることから、音波の角度制御による効果に加え、壁紙と石膏ボードの複層構造化による効果が現れていると考えられる。

次に、直径 9 mm、長さ 50 mm ハニカムの表面に壁紙を貼り付けたものを1つのハニカムユニットとし、ユニットの積層による遮音性能の改善効果を検証した。石膏ボード t 12.5 mm に対し、ユニットを3層積層させた場合と、長さ 150 mm のハニカム表面のみに壁紙を設置した場合を比較して図18に示す。壁紙を表面のみに設置する場合に比べ、ユニットを積層する場合の方が遮音性能の改善量が大きく、総厚が同程度であれば、ハニカム内部に壁紙層を複数有するユニット積層型とする方が効果的であることがわかった。

最後に、単層壁（石膏ボード t 12.5 mm）、複層壁（両面石膏ボード t 12.5 mm 張り、空気層 65 mm）、GW 充填壁（複層壁の中空部に密度 32 kg/m<sup>3</sup>t 50 mm のグラスウールを挿入）に対するハニカムユニットの設置効果を図19～図21に示す。単層壁など、ベースとなる壁材の遮音性能が小さいほどユニットの設置効果が大きいものの、複層壁やある程度の遮音性能を有する GW 充填壁においても遮音性能が改善することを確認した。

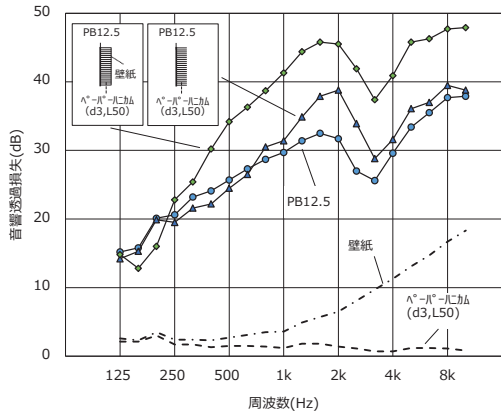


図17 表面仕上げの効果

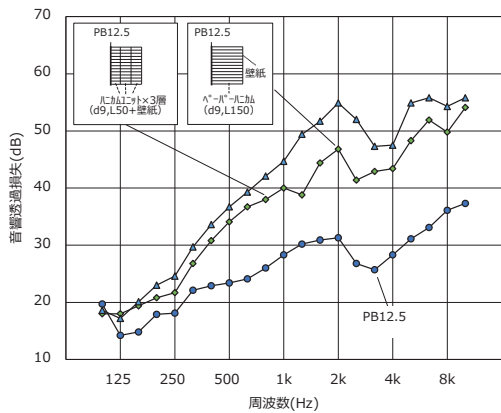


図18 ハニカムユニットの積層効果

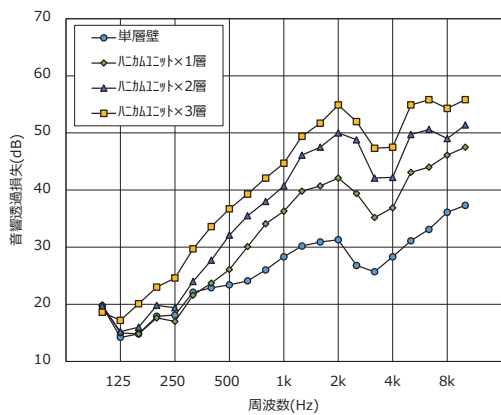


図19 単層壁への設置効果

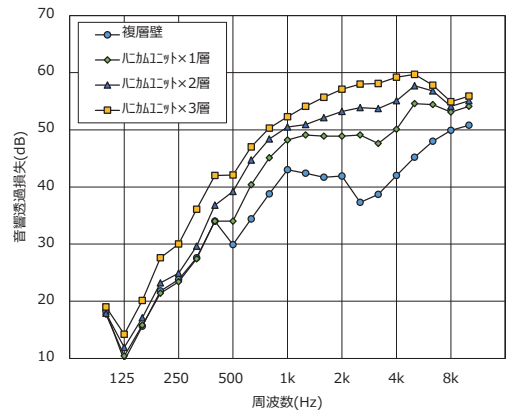


図20 複層壁への設置効果

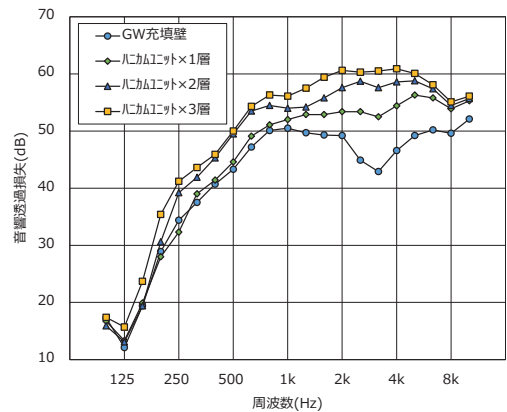


図21 GW 充填壁への設置効果

## §5. まとめ

音波の入射角度制御による遮音性能向上手法について、ハニカムの形状や表面材、取付方法が遮音性能に与える影響を検証し、以下の知見を得た。

- ・部材表面にハニカム材を取り付けることにより、コインシデンス周波数帯域を中心に遮音性能が改善し、直径が小さいほど、長さが長いほど改善効果は増大する。
- ・ハニカム材は部材に密着させて設置する方が効果的であり、10 mm 以上のクリアランスが生じると遮音性能が低下する。
- ・ハニカム材は音波の入射側、放射側どちらに設置しても効果が得られる。
- ・ハニカム材に表面材を取り付けることで遮音性能の改善量が大きく向上し、壁構成によらず一定の効果が得られる。

## 参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会編、騒音制御工学ハンドブック

[基礎編]、技報堂出版、2001

- 2) 豊田政弘、田中幹人、高橋大弐、有孔板とハニカム構造を用いた遮音構造、日本音響学会建築音響研究会資料 AA2006-17

### ひとこと

ハニカムは軽量で加工性も良く、表面仕上げも可能です。適用先を拡大するために、更なる高性能化、薄型化に向けた検証を続けていきます。



阿部 将幸