

自動車用ハニカム防音材の開発

Development of Honeycomb Noise Control Materials for Automobiles

前 田 孝 司* 山 下 剛* 中 村 光 勇*
Takashi Maeda Tsuyoshi Yamashita Mitsuo Nakamura

要 旨

従来、自動車用防音材料は、その防音性能向上を第一の目的として開発されてきた為、重量やコストの増加を伴うことが多かった。

そこで今回、防音機能に加え内装や補強部材としても考慮した多機能一体化構造の検討を行った。その結果、ペーパーコアを用いたハニカム構造を採用し、フロアの高剛性化とルーフの吸音、制振性能の向上が得られ、車室内騒音の大幅な低減と同時に軽量化をはかることができた。

ABSTRACT

Until now, the development of noise control materials has been carried out with the sole objective of increasing either absorption, insulation or damping properties of the material.

In contrast, this approach aims not only at enhancing noise control properties but also at including interior furnishing and reinforcement functions in the materials. Development for multi-function and integrated-structure components which reduce noise and weight resulted in honeycomb core paper used in a sandwich layer in the floor and the roof.

This design has proved effective in increasing the rigidity of the floor while increasing both noise absorption and damping properties of the roof. A remarkable reduction in cabin noise as well as weight savings is the final result.

1. ま え が き

車室内騒音は、一般的にエンジンノイズ、ロードノイズ、空力ノイズに大別することができる。これらの現象に対する騒音低減手法としては、騒音・振動源、及びその伝達系を対象とした一次的対策と、骨格構造や防音材などによるボディ側での二次的対策に分類することができる。

このうち防音材料は、機能面から使用目的が分けられ、制振材は振動伝達による固体伝播音の対策に、遮音材、吸音材は、空気伝播音の対策に用いられるのが一般的である。しかし、防音材によ

る対策は、その使用重量と得られる騒音低減効果とが大きく関係している事は良く知られており、重量効率の良い防音材の開発が求められている。

今回は防音材を軽量化の観点から見直し、その主要機能である防音性能の向上に加えて、内装材あるいは補強部材としての機能などを併せもったペーパーハニカムコアをベースとする多機能防音材料の開発を行い量産車への適用を実現した。

本稿では、上記の多機能防音材料に対して性能面から従来の防音材との比較を行い、その諸特性について報告する。

* 栃木研究所

2. 多機能化防音システムの開発

防音材の設計開発に際しては、まず車室内騒音の構成成分を解析し、その車のもつ音響的性状を把握する必要がある。図1は平坦なアスファルト路を一定速度で走行した時の車室内騒音成分の解析結果の一例である。この結果から、エンジンノイズに比べ、ロードノイズが車室内騒音に占める割合の大きいことが判る。これは近年、エンジンの低騒音化、及びエンジンマウントなど、伝達系の振動遮断性能が向上した結果、車室内騒音に於けるエンジンノイズの占める割合が減少したものと考えられる。一方、ロードノイズの対策手法としては、振動伝達系であるサスペンション・ラバー・ブッシュなどの改良があげられる。しかし、これらの部品は乗り心地、操縦安定性等の関連性も強く、機能を満足しつつ優れた振動遮断特性を得ることに困難性を伴うことから、サスペンション系での対策以外にボディ系での対策も重要な位置付けにある。図2に比較的粗い路面上を走行した時に発生する車室内の音響エネルギー流の測定結果を示す。ロードノイズの主成分である中周波の音響放射エネルギーは、フロアから放射されルーフライニングに向かって流れていることが判る。

以上の結果をもとに、今回ロードノイズの低減を主たる目的とし、

- (1) フロアパネルから放射される音響パワーの低減
- (2) ルーフライニングの吸音による車室内に放射された音響エネルギーの低減

という観点から、フロア、ルーフライニングを対

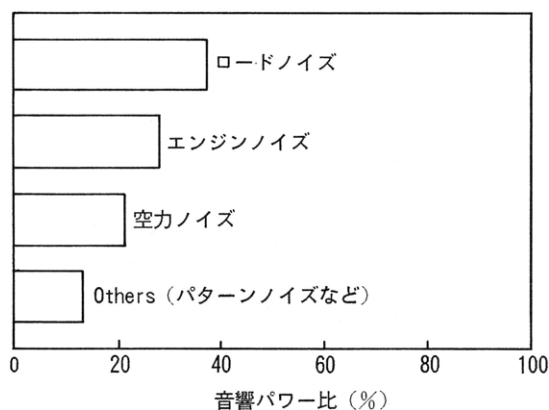


図1 車室内騒音成分解析

象とした多機能防音材料の開発を行うこととした。

2.1. ハニカムフロア

(1) パネル面からの音響放射パワー

フロアから放射される音響エネルギーは、振動源からさまざまな経路を経て、フロアパネルに伝達した振動の拡散波が音として車室内に放射されることに起因したものである。これら拡散波による音響放射パワーは、一般的に次式より算出される。

$$W = \rho c K_{\text{rad}} S^2 V^2 \quad (1)$$

$$= \frac{\lambda_b C_b \rho c}{\pi^2 Z_b^2} \cdot \frac{1}{\eta \cdot f} \cdot K_{\text{rad}} F^2 \quad (2)$$

ここで W : 音響放射パワー (W)

ρc : 空気固有音響抵抗 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

K_{rad} : 放射効率

S : 放射面積 (m^2)

V : パネルの振動速度 (m/s)

λ_b : 波長 (m)

C_b : 曲げ波速度 (m/s)

Z_b : ポイントインピーダンス (kg/s)

η : 損失係数

f : 加振周波数 (Hz)

F : 加振力 (N)

上式より音響放射パワーは、パネル特性としての損失係数 η とポイントインピーダンス Z_b の向上により低減できる。このうち、前者は制振材などを適用することによって固体音を低減させる一般的な対策手法であるが、この損失係数は制振材の厚み比に比例して向上することから重量が増えるという欠点がある。一方、後者のポイントインピーダンス Z_b は、一般に次式で与えられる。

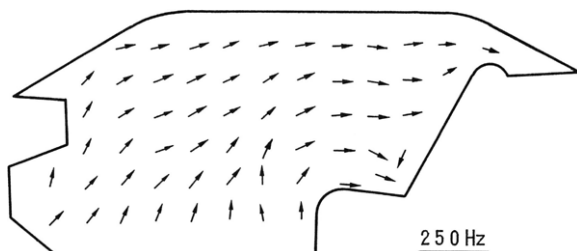


図2 ロードノイズに起因した車室内音響インテンシティベクトル

$$Z_b = 8 \sqrt{m B} \quad (3)$$

m : 均質板の面密度 (kg/m^2)

B : 均質板単位幅当たりの曲げ剛性 (Nm)

曲げ剛性 B は次式より求めることができる。

$$B = EI \quad (4)$$

E : ヤング率 (N/m^2)

I : 単位幅の断面 2 次モーメント (m^3)

(3) (4) 式から、インピーダンス Z_b を向上させるためには、均質板の面密度 m 、あるいは曲げ剛性 B 、すなわち断面 2 次モーメント I を上げれば良いことがわかる。しかし、面密度 m を上げることは、制振材の厚み増加と同様に軽量化の観点から好ましくない。一方、均質板の断面 2 次モーメント I は、基本的に板厚 t との関係が強く、例えば図 3-a、b に示すような単板または中空構造の均質板の場合、各々次式で表される。

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (5)$$

$$I = \frac{(t_1 + t_2 + t_c)^3 - t_c^3}{12} \quad (6)$$

(5) (6) 式から同一重量、同一材料 (すなわち $t = t_1 + t_2$) における、断面 2 次モーメント I を比較すると、単板構造に比べ中空構造の方がはるかに高いことが判る。すなわち、中空構造パネルは単板に比べ、インピーダンス Z_b が高く、結果として音響放射パワー低減に有効な構造であると考えられる。そこで、重量増加を極力おさえ、曲げ剛性 B 、すなわちインピーダンス Z_b を大幅に向上させる手法として、中空構造素材のひとつであり航空機等で既に使用されている軽量、高剛性材料としてのハニカム構造に着目し、自動車のフロアへの適用検討を行った。

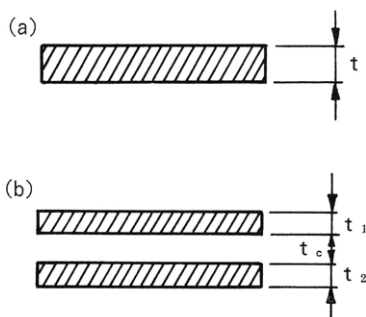


図 3 単板及び中空構造断面

(2) 防音性能

ハニカム構造は、図 4 に示すように、一般的に面材厚に対しコア厚が大きく、その曲げ剛性 B は次式を用いて算出できる。

$$B = \frac{E \cdot t_1 (t + t_c)^2}{8} \quad (7)$$

(7) 式から判るように、曲げ剛性 B の性能を左右する因子としては、

1) 面材の厚み ; (t_1)

2) 面材のヤング率 ; (E)

3) コアの厚み ; (t_c)

があげられ、基本的にはコアの材質の影響は受けない。そこで面材に鋼板を用い、その面材の厚さ t_1 とコアの厚さ t_c を変化させた場合の動的曲げ剛性比 B/B_0 (B_0 : 厚み 0.8mm 鋼板の動的曲げ剛性を基準) を測定した結果を図 5 に示す。この結果から判るように、面材の厚さ t_1 、 t_2 とコアの厚さ t_c の増加に伴い動的曲げ剛性比 B/B_0 は増加する。また、面材厚の増加に比べコア厚の増加による剛性の向上度合の方が大きいことが判る。従って、面材厚を増加させるより、コア厚を

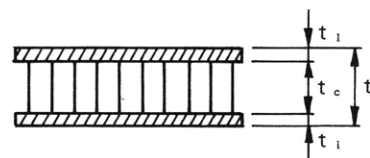


図 4 ハニカムパネル断面

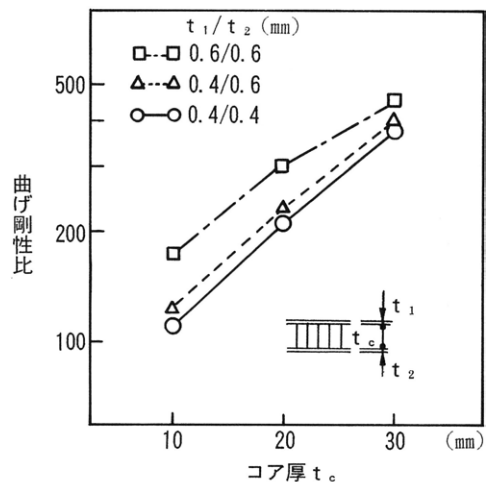


図 5 ハニカムのコア厚及び面材厚と曲げ剛性比の関係 (200Hz)

上げた方がより軽く、高剛性な特性を得ることが可能である。

次に、ハニカムパネルの剛性向上が音響放射パワーの低減につながるのかを調べるために、面材厚を一定にしてコア厚を変化させた場合のハニカムパネルから放射される音響パワー低減量と動的曲げ剛性比 B/B_0 の関係を測定した。(図 6) この結果より、コア厚すなわちパネル剛性の増加に伴い音響放射パワーは減少しパネル剛性の向上は、放射音を低減するのに有効であることが判る。

以上の結果から、今回は量産車のフロアにこのハニカム構造を適用するにあたり上記の結果をもとにコア材質としてはペーパーコアを採用し、コア厚はフロアから放射される音響パワーの車室内騒音への寄与を十分おさえられる厚みとして 20mm を選定した。

さて、このハニカムフロア構造とビード形状の鋼板上に非拘束制振材が適用されている従来フロア構造の音響特性を比較した結果を図 7 および図 8 に示す。

図 7 は、従来構造とハニカム構造のフロア単体パネルを加振した時に、各パネル面から発生する音響放射パワーの比較例として、音響インテンシティを計測した結果である。この結果より、ハニカムフロア単体パネルから放射される音響インテンシティは、従来フロア単体パネルに比べ、パネル全面にわたり大幅に低減していることがわかる。

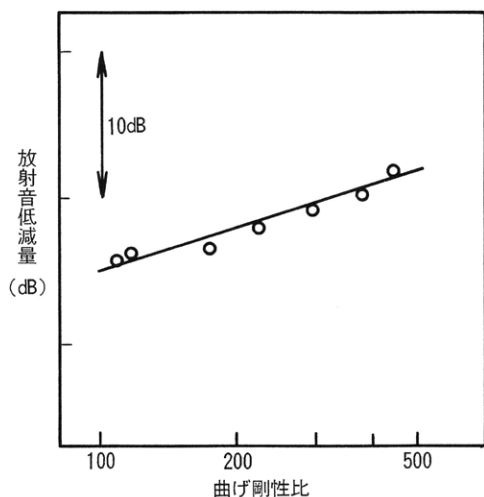
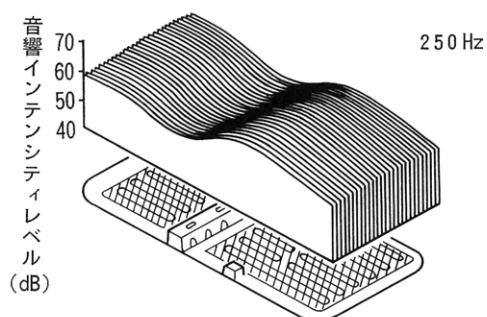


図 6 曲げ剛性比とハニカムパネル放射音低減量の関係

また、実車適用におけるハニカム構造と従来フロア構造の比較例として、フロアの中央を加振した時の振動特性の結果を図 8 に示す。この結果より判るように、従来フロア構造に対しハニカムフロア構造は、ロードノイズの主成分である 200～500 Hz の中周波領域において 10dB のインピーダンス向上が得られていることが判る。

次に図 9、10 に粗い路面上を実際に走行した時

(a) 従来フロア



(b) ハニカムフロア

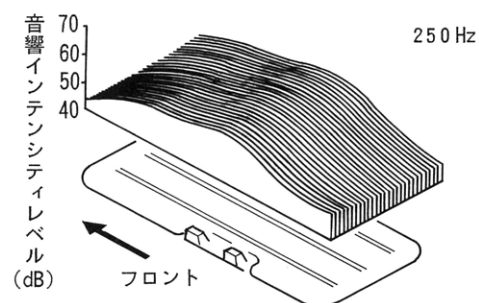


図 7 フロアパネルからの音響放射パワーの比較例

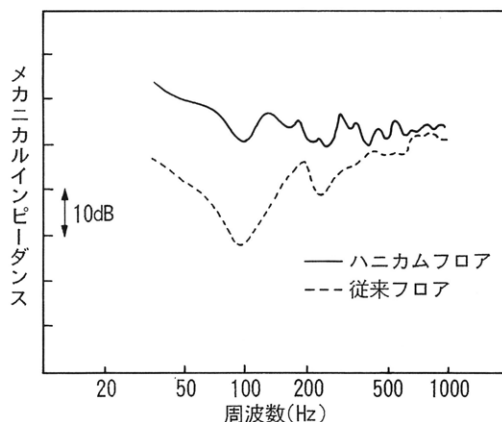


図 8 フロア振動特性 (加振テスト)

の車室内騒音およびフロア振動の測定結果を示す。従来フロア構造車に対しハニカムフロア構造車は、中周波領域で車室内騒音を3 dB、フロア振動を5 dB 低減できた。

(3) 生産技術性

図 11 に従来フロアとハニカムフロアの構成図を示す。従来のフロアは、ビード断面形状にプレス成形され加えてフロアフレームなどの補強部材をフロア下部に設けることにより剛性確保を行っていた。さらに、フロアからの音響放射低減を目的とした制振材を適用している。一方、ハニカムフ

ロアは、ハニカムパネル、保持材、フロアパネルから構成されている。ハニカムパネルは、上下2枚の防錆処理鋼板とペーパーハニカムコアをエポキシ接着剤にて完全に結合し、防錆及び座屈、圧縮、せん断強度などに対し十分考慮された仕様となっている。以下にボディへの装着方法に関し述べる。

予めアッセンブリされたハニカムパネルは、塗装ライン工程においてフロアパネル上に極めて融着性の高いアスファルト系保持材と共にフロアパネル上に置かれる。その後、保持材は塗装炉の熱により軟化し、ハニカムパネルとフロアパネルとのクリアランスに対し隙間なく流動する。この結果、両部材は完全に融着接合され完全なハニカムフロア構造が形成される。

このハニカムフロア構造により高いフロア剛性が得られ、その結果として従来必要とされていたフロアフレームなどの補強部材と、さらに制振材を廃止することが可能となり、従来のフロア構造に対し、重量増加を伴うことなく性能向上がはかられ、性能面のみならずウエイトを含め重量効率の優れた防音構造を得ることができた。

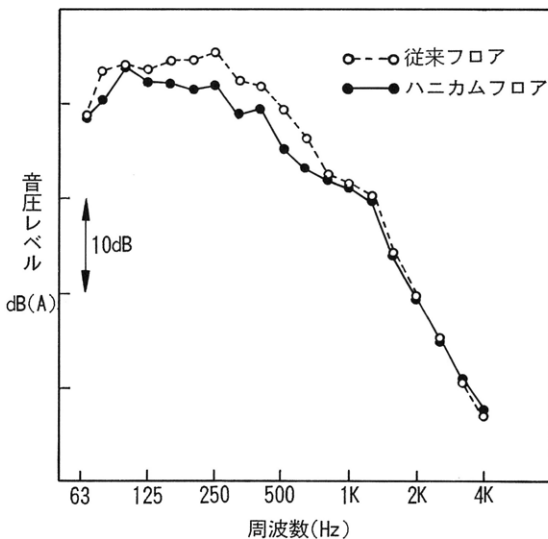


図 9 走行時車室内騒音

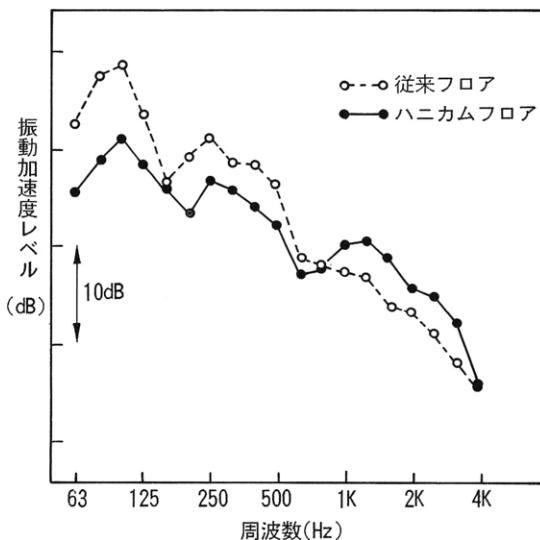
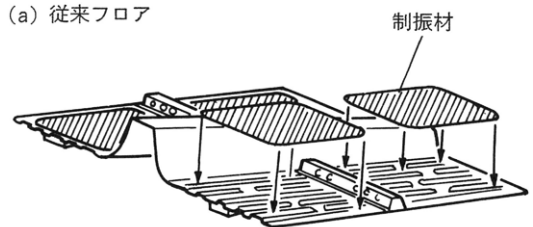


図 10 走行時フロア振動特性

(a) 従来フロア



(b) ハニカムフロア

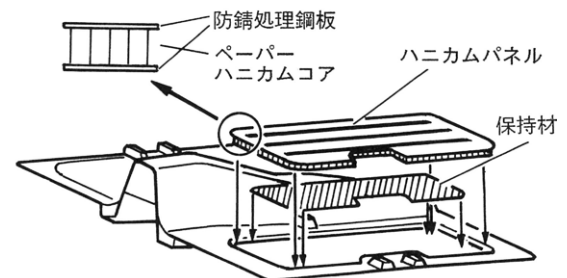


図 11 フロア構成図

2.2. ハニカムルーファイニング

(1) 吸音処理の効果

一般に乗員耳位置での騒音は、騒音源から媒質としての空気を介して直接伝播してくる直接波とガラス、ルーファイニングなどに反射し耳位置に到達する反射波から構成される。

この入射波と反射波から、吸音性能を表わす特性として、最も一般的に使われている吸音率が算出できる。吸音率 α は、次式により定義される。

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad (8)$$

I_i : 入射音の強さ (W/m^2)

I_r : 反射音の強さ (W/m^2)

(8) 式より完全反射面では、 $I_i = I_r$ であるため吸音率 $\alpha = 0$ となり、完全吸音面では、 $I_r = 0$ であるため、吸音率 $\alpha = 1$ となる。車室内面を吸音処理することは、反射音 I_r を減少させる効果がある。

そこで、車室内を吸音処理した場合にどの程度車室内騒音を低減できるか予測してみた。車室内騒音低減量 ΔL は、車室内平均吸音率が $\overline{\alpha}_1$ のときの車室内の音圧レベルを L_1 、 $\overline{\alpha}_2$ のときの音圧レベルを L_2 とすれば、次式より算出される。

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_1 - L_2 \\ &= 10 \log_{10} \frac{\overline{\alpha}_2}{\overline{\alpha}_1} \cdot \frac{(1 - \overline{\alpha}_1)}{(1 - \overline{\alpha}_2)} \quad (9) \end{aligned}$$

(9) 式を用いて算出された結果を図 12 に示す。

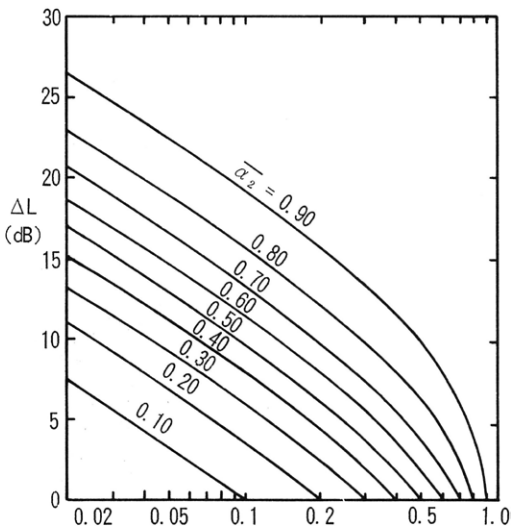


図 12 平均吸音率 $\overline{\alpha}_1$ 、 $\overline{\alpha}_2$ と ΔL の関係⁽¹⁾

この結果から、車室内の平均吸音率を上げることは、車室内騒音の低減につながる事が判る。従って前述の図 2 の結果より、フロアから二次放射された音響放射エネルギーはルーファイニングに向かって流れていることからルーファイニングに吸音処理することは、ルーフからの反射音の低減をもたらし、その結果として車室内騒音の低減を可能にする。これは、ロードノイズを含め全ての車室内騒音低減に対し、効果的手法であるといえる。

さて、吸音材は、グラスウールやフェルトといった繊維の集合体を主とした多孔質材が古くから使用されている。これら多孔質材の吸音特性を表わす基本的な因子としては、

- 1) 単位面積流れ抵抗
- 2) 多孔度
- 3) 空気の体積弾性率
- 4) 構造因子

があげられる。そこで、図 13 は多孔質材の単位面積流れ抵抗 r と吸音特性の関係を示した図である。この結果から判るように各周波数に対する単位面積流れ抵抗と垂直入射吸音率は相関が高く、吸音率 α は周波数により異なり、多孔質材の場合には基本的に高周波領域で大きくなる傾向を示す。また、この単位面積流れ抵抗、いいかえると吸音率は、吸音材の厚さ、密度などに影響され、また背後空気層によっても、その吸音特性は変化する。従って、ルーファイニング仕様を決定する際には、これらの要因を十分吟味した設計を行うことが必要である。

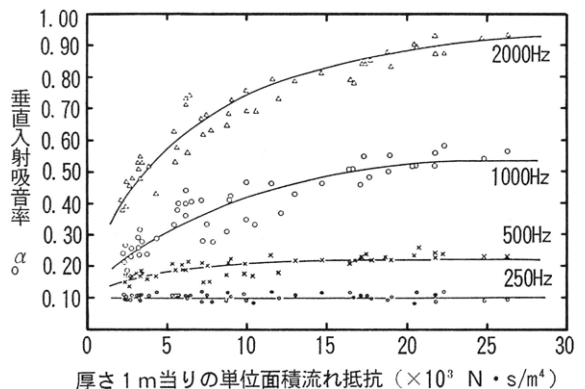


図 13 多孔質材の流れ抵抗と垂直入射吸音率の関係 (厚さ 25mm)

(2) 防音性能

図14に、従来ルーフライニングとハニカムルーフライニングの構造図の一例を示す。従来品は内装部材としての機能面を主眼とし、軽量のダンボールなどの基材と、質感のある表皮材から構成されているのが一般的であり、十分な防音機能を持ったものは少なかった。今回、新しく開発されたハニカムルーフライニングは、多機能化の観点から内装材としての機能に加え、吸音、制振及び剛性といった防音機能を併せもつ構造をとっている。制振層は、ダンピングの高いウレタンフォームを使用し、吸音層は、ハニカムペーパーコアを上下2層の多孔質材で挟みプレス成型された基材と通気性の高い表皮材から形成されている。

① 吸音性能

前述したように、吸音性能は、多孔質材の厚さ密度、吸音材の背後空気層に影響される。一例として、ハニカムペーパーコアの厚み d を変化させた場合の吸音性能の測定結果を図15に示す。コアの厚みを増した場合、吸音性能のピークは徐々に低い周波数へ移動し、吸音率は増大する傾向を示している。これは、ハニカムペーパーコアが吸音層の背後空気層として作用し、その厚みが増すことにより吸音性能が改善されたためと考えられる。今回、ハニカムルーフライニングの仕様を決めるにあたって、コアの厚さ、セルのサイズ、多孔質材の面積当たり重量の調整を行い、その結果、従来品に比べ非常に高い吸音性能を得る事ができた。図16にハニカムルーフライニングと従来品との吸

音性能を比較した結果を示す。吸音性能は、中高周波領域で約2倍以上向上した。

② 剛性、制振性能

一般的ルーフパネルの剛性は、ルーフパネルの室内側に設けられた補強部材により確保されており、さらに必要に応じて制振材などによりルーフパネルの制振を行うのが通例である。

これらルーフパネルの剛性、制振処理はエンジ

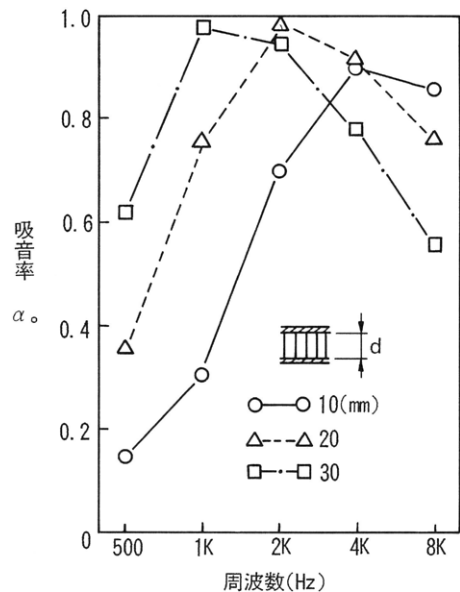


図15 ハニカムコア厚 d と吸音特性の関係

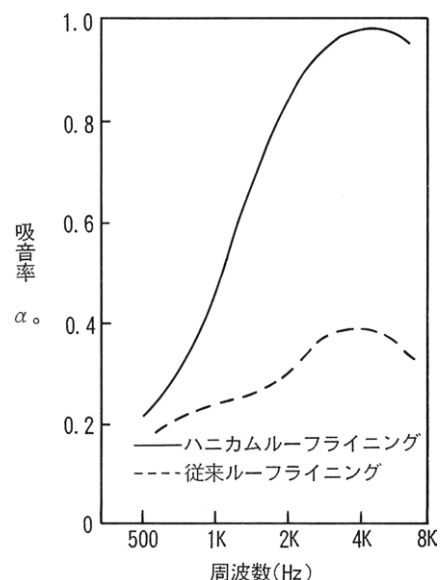


図16 ルーフライニング吸音特性

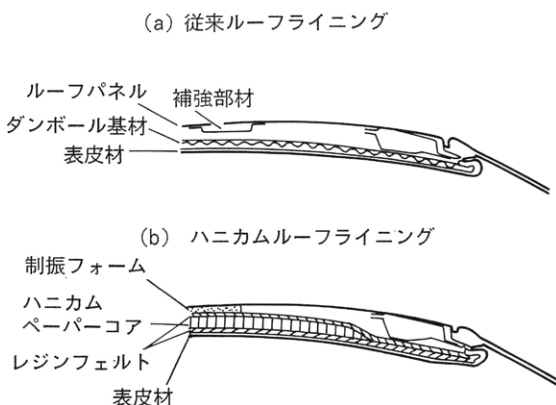


図14 ルーフライニング構成例

ンノイズ、ロードノイズなどに起因した固体伝播音の低減をもたらす重要な処理である。

ルーフパネルの外板剛性評価の一例として、パネルの一点に上下方向の荷重を加えた時の変位置測定の結果を図 17 に示す。従来構造は補強部材としてのルーフアーチにより剛性を維持しており、補強部材の無い面では剛性が低下している。これに対しハニカムルーフ構造では、ルーフパネル全面にわたり均一な剛性を得る事ができ、従来の補強部材の有する面とほぼ同等の剛性を確保できた。

この結果、ルーフアーチを廃止することが可能となり、ルーフシステムトータルとして軽量化をはかれた。

一方、制振性能を表わす特性として、一般的には損失係数が用いられる。図 18 に、ハニカムルーフライニングに用いられた制振層の温度変化に対する従来品との制振性能を比較した結果を示す。制振性能は、従来品に対して特に高温領域で優れており、約 2 倍以上向上している。また、制振、吸音一体化構造によりルーフパネル全面に制振適用が可能となった結果、ハニカムルーフライニングの制振性能は、従来の部分適用に対して更に向上した。

③防音効果

ハニカムルーフライニングによるロードノイズ高周波成分の低減効果を把握するために、車室内の音響エネルギー流の測定を行った。(図 19)

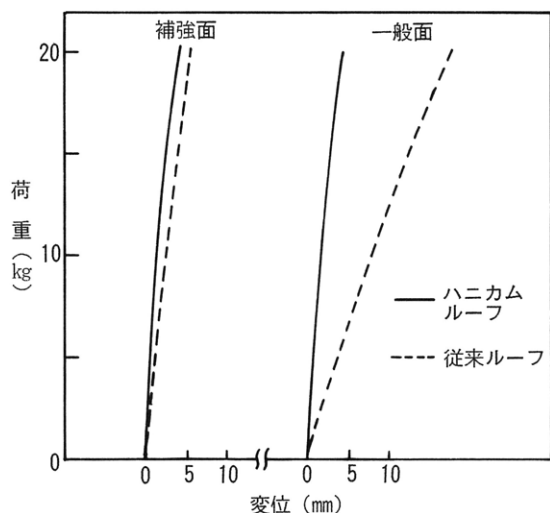


図 17 ルーフパネル外板強度特性

ルーフライニング近傍の音響エネルギー流は反射することなくルーフライニングに向かって入射しており、ハニカムルーフライニングの吸音性の高いことが明確にわかる。また、制振性能の効果の一例として、車室内における雨音の評価結果を図 20 に示す。ルーフパネルの制振により、雨音による車室内騒音は従来品に比べ 500Hz 以上の中高周波領域で 6 dB 以上低減した。

図 21 に、比較的粗い路面上の走行時における車室内騒音レベルの測定結果を示す。

ハニカムルーフライニングは従来品に比べ、ロードノイズを 3 dB 低減できた。

(3) 生産技術性

ハニカムルーフライニングのもう一つの特徴として、ルーフライニング基材の高剛性化によりルームランプなどの内装部品を予めルーフライニン

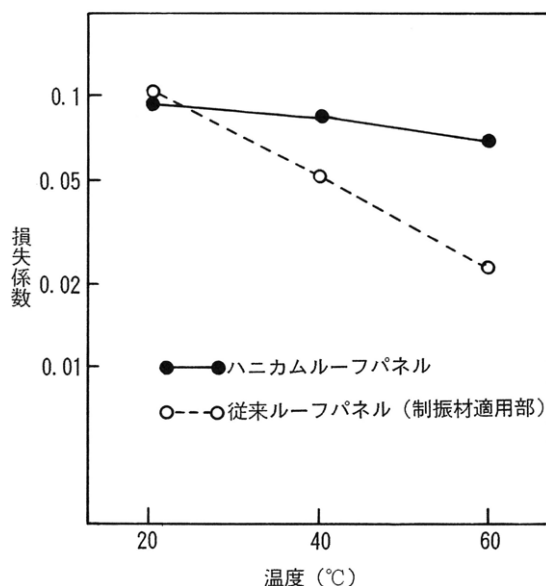


図 18 ルーフパネルの制振特性

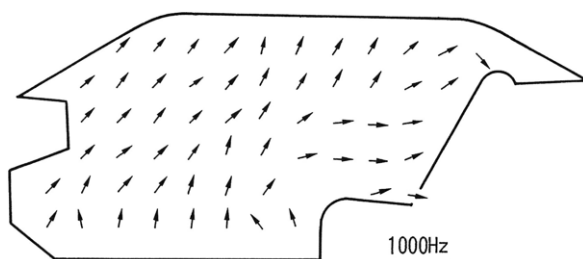


図 19 ロードノイズに起因した車室内音響インテンシティベクトル

グに組みつける事が可能となり、ライン工数の短縮化と、加えて組付け性の向上を得る事ができた。こうした他の内装部品との一体化によるコスト低減、あるいはライン組付け工数削減なども、他機能防音材のもつ重要な効果である。

3. 実車への適用結果

今回開発したハニカム防音材をアコードインスパイアー／ビガーに適用した例について述べる。

図 22 に、比較的粗い路面上の走行時における車室内騒音レベルを示す。ロードノイズはこれら多機能防音材の適用により、従来車に対して車室内騒音を 4 dB 低減できた。

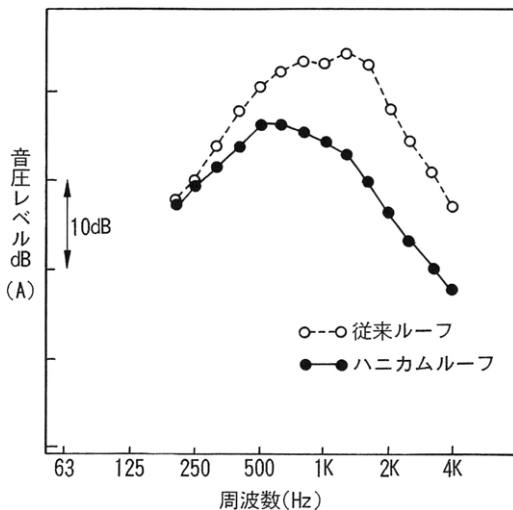


図 20 降雨時の車室内騒音

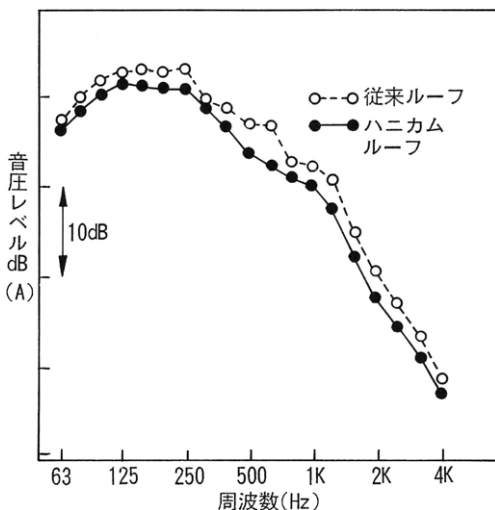


図 21 走行時車室内騒音

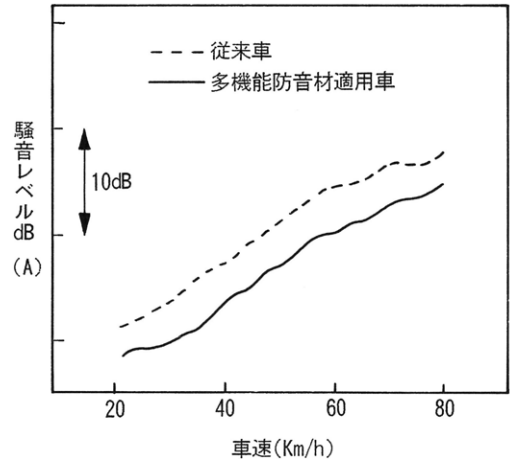


図 22 走行時車室内騒音

4. まとめ

防音材の多機能一体化、複合化といった観点から車室内騒音低減に対し、ハニカム構造をルーフライニング、フロア等の主要音響放射部位に適用した結果、軽量で、従来より優れた防音システムを開発することができた。

今後、環境保全につながる燃費向上を目的とした車体の軽量化は重要な技術課題であることから防音材料の素材面からの検討に加えて、防音材を適用するにあたっての最適化技術の構築等も必要となろう。

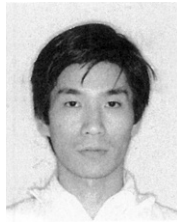
参考文献

- (1) 日本音響材料協会編、“騒音・振動対策ハンドブック”；技報堂出版
- (2) 子安 勝、“吸音材料”；技報堂出版
- (3) LEOL. BERANEK, “NOISE AND VIBRATION CONTROL”；McGraw-Hill Book Co.
- (4) “Structural Sandwich Composites,” MIL-HDBK-23A (1968)

■著 者■



前 田 孝 司



山 下 剛



中 村 光 勇