

# 吸音特性と形状保持性に優れた多孔質成形体に適した新規スタンパブルシート\*

川崎製鉄技報  
29 (1997) 4, 196-201

## Sound Absorption and Mechanical Properties of Porous Stampable Sheet



藤巻 雅美  
Masami Fujimaki  
技術研究所 化学研究  
部門



長山 勝博  
Katsuhiko Nagayama  
技術研究所 化学研究  
部門 主任研究員(課  
長)



佐藤 義廣  
Yoshihiro Sato  
ケーブラシート(株)  
営業部長

### 要旨

抄紙法スタンパブルシートを原料として得られる多孔質成形体の吸音特性は、ガラス繊維含有率、密度および厚みで制御できることが分かった。ガラス繊維含有率が低いほど、機械特性は高くなるが、ポリプロピレンが増え空隙の閉塞が起こった場合には、吸音特性は低下する。多孔質成形体の吸音特性と通気抵抗は良い相関を示し、通気抵抗が  $350 \sim 500 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$  の範囲にある場合に吸音特性は最大になる。ガラス繊維含有率、密度および厚みの組み合わせを、通気抵抗が上記範囲となるように設定した場合、グラスウールボードと同等の高い吸音特性を持ち、しかも非常に高い強度特性を持つ材料が得られた。

### Synopsis:

It was found that the sound absorption and mechanical characteristics of porous mold could be controlled by the selection of moderate glass fiber (GF) content, sheet density and sheet thickness. With an increase in polypropylene (PP) content, the compressive strength was enhanced, however, at a high PP content, voids were filled with PP and the sound absorption characteristics deteriorated. The sound absorption characteristics of the porous mold were correlated well with the specific flow resistance and were maximized when the specific flow resistance was set at the range of 350 to 500 Pa·s/m. If the GF content, the density and the thickness are suitably selected, the porous mold shows good sound absorption characteristics, comparable to those of glass wool boards, as well as good mechanical properties, exceeding those of glass wool boards.

## 1 緒 言

従来、グラスウールやロックウールなどの繊維系の材料が土木建築、自動車分野で吸音材料として用いられてきた。近年、住環境、労働環境に対する関心が高まるにともない、建築分野での吸音材料の使用も拡大している。また、自動車分野においても、車外への騒音の抑制や車室内の質感向上のために、主にエンジン周り、車室内装基材として吸音材料が多く用いられるようになってきた。いずれの場合にも、従来の繊維系吸音材料より強度特性や成形性の優れた材料が求められている。

強度特性、成形性に優れた吸音材料を得る方法としてガラス繊維と樹脂から抄紙法により製造されるスタンパブルシートを多孔質に成形する方法がある。スタンパブルシートとはスタンプ成形用の成形基材であり、通常は緻密な成形体を得る目的で使用される材料である。しかしながら抄紙法により製造されるスタンパブルシートは樹脂の融点以上に加熱すると厚み方向に膨張し、多孔質になる性質を持つ。この性質は抄紙法により製造されるスタンパブルシートに

特有のものであり、この性質を利用して多孔質成形体を得ることができる。得られた多孔質成形体は、軽量でありながら成形性、強度特性に優れた材料であることから車両の内装材に多く採用され、車両の軽量化に寄与してきた<sup>1,2)</sup>。

さらに多孔質成形体中では、ガラス繊維は単繊維まで開繊されており、グラスウールに似た細かな空隙構造をとっている。その結果、多孔質成形体は優れた吸音特性を有する。従来の乾式法で製造されるスタンパブルシートではこのような細かな空隙構造を持つ多孔質材料を得ることが難しく、抄紙法スタンパブルシートは成形された高い強度特性を持つ吸音部品を得るために特に適した材料である。

本報では、多孔質成形体の吸音特性と強度特性の測定結果を示し、両者をさらに高いレベルで両立させるための材料設計の指針について述べる。また、多孔質成形体の吸音材料として必要な耐水性や耐凍結性などの性質、使用例について紹介する。

## 2 通気抵抗と吸音特性の関係

多孔質材料の吸音特性は、材料の通気抵抗と良好な相関があると報告されており<sup>3)</sup>、特に木下<sup>4)</sup>、立道<sup>5)</sup>らはグラスウール、メタルウールなどについて、吸音特性と通気抵抗の関係を解析している。

\*平成9年8月26日原稿受付

木下は、グラスウールなどについて通気抵抗が 400~500 Pa・s/m の範囲にあるときに、吸音率の極大値が最も高くなることを報告している<sup>9)</sup>。幹は Dekany-Bazley が提出した通気抵抗と吸音特性の関係式を報告している<sup>10)</sup>。

多孔質成形体のガラス繊維含有率、密度および厚みは微細構造を変化させるため、吸音特性に大きく影響を与えられとされる。多孔質成形体の吸音特性とガラス繊維含有率、密度および厚みの関係を定量的に整理するために、前述の通気抵抗を用いた。ここでガラス繊維含有率とは、シート重量に占めるガラス繊維の質量百分率である。

### 3 実験

#### 3.1 多孔質成形体の製造方法

多孔質成形体は、ケーブラシート(株)で製造された抄紙法スタンパブルシート「KPシート<sup>®</sup>」を実験室において多孔質に成形して得た。

スタンパブルシート中の GF は圧縮された状態で PP に固定されているため、シートを再び加熱して PP を溶融させると GF に蓄えられていた応力は解放され、もとのウェブの厚みまで膨張する。PP が溶融した状態で、厚み方向に膨張したシートを所定のクリアランスを持って圧縮、冷却すると、緻密なスタンパブルシートよりも密度の小さい多孔質成形体を得られる。

本実験では、一辺が 230 mm の正方形に切り出したスタンパブルシートを加熱プレスで 210°C に加熱し、厚み方向に膨張させた後に、2~22 mm のクリアランスに設定した冷却プレス中で冷却し、板状の多孔質成形体を得た。多孔質成形体の密度、厚みはウェブの重量と膨張成形の際のクリアランスで制御できる。

#### 3.2 吸音率の測定方法

##### (1) 垂直入射吸音率の測定方法

試料の吸音特性を JISA 1405 に記載された管内法による垂直入射吸音率により評価した<sup>11)</sup>。測定には RION 製垂直入射吸音率測定装置「SG-3E」を用いた。一端を封じた音響管の管底から所定の空気層を設けて 91 mm の円盤状に加工した試料を取り付けた。音響管内に 100~3150 Hz の純音を発生させ、内部の音圧レベルの最大値  $L_{p,max}$  と最小値  $L_{p,min}$  を測定した。得られた音圧レベルから式 (1) を用いて垂直入射吸音率  $\alpha$  を算出した。

$$\alpha = 1 / (n + n^{-1} + 2) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $n = \log^{-1}[(L_{p,max} - L_{p,min})/20]$

##### (2) 残響室法吸音率の測定方法

試料の吸音特性を JISA 1409 に記載された残響室法吸音率により評価した<sup>12)</sup>。残響室内に試料の無い場合の残響時間  $T_1$  と試料がある場合の残響時間  $T_0$  を測定し、式 (2) を用いて残響室法吸音率  $\alpha_{rev}$  を算出した。

$$\alpha_{rev} = 0.163 \times V / \{(1/T_1 - 1/T_0) \times S\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $V$ : 残響室容積 450 m<sup>3</sup>

$S$ : 試料面積 10 m<sup>2</sup>

#### 3.3 通気抵抗の測定方法

内径 50 mm の管の中央に管の内径と同径の円盤状の試料を設置

した。このとき試料と管壁の間からの空気の漏れがないように注意した。その後、所定の流速に調整した N<sub>2</sub> を流通し、流速が一定になった後に流速と圧力損失を測定した。流速、圧力損失をそれぞれ  $u$  および  $\Delta P$  で表す。得られた  $u$  と  $\Delta P$  を式 (3) に代入し、通気率  $R$  を求めた。

$$R = \Delta P / u (\text{Pa} \cdot \text{s/m}) \dots \dots \dots (3)$$

$R$  と  $u$  の関係から、流速がゼロの時の通気抵抗  $R_0$  を外挿した。また、 $R_0$  を多孔質材料の厚みで割った値を単位厚み当たりの通気抵抗  $R_s$  とした。

#### 3.4 圧縮特性の評価

強度特性の一例として、多孔質成形体とグラスウールボードの圧縮特性を JIS A 7220 に記載される硬質発泡プラスチックの圧縮試験方法に従って評価した。グラスウールには JIS A 6306 記載のグラスウールボードのうち、吸音材料として通常用いられる密度が 0.048 g/cm<sup>3</sup> および 0.024 g/cm<sup>3</sup> のものを用いた。試験片とするためそれぞれ直径 50 mm、厚さ 50 mm の円筒状に加工した。試験片を平板状に設置した後、直径 100 mm の円盤状の圧縮治具で圧縮した。圧縮歪み  $\epsilon$ 、圧縮応力  $\sigma$  を式 (4)、(5) から求めた。

$$\epsilon = \delta / h \dots \dots \dots (4)$$

$$\sigma = F / S \quad (\text{Pa}) \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $\delta$ : 変位量 (cm)

$h$ : 試験前の厚み (cm)

$F$ : 荷重 (Pa・cm<sup>2</sup>)

$S$ : 試験片面積 (cm<sup>2</sup>)

また、初期弾性領域における圧縮弾性率  $E$  を、式 (6) から算出した。

$$E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon \quad (\text{Pa/cm}^2) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ : 弾性領域中 2 点間の応力変化 (Pa/cm<sup>2</sup>)

$\Delta \epsilon$ : 弾性領域中 2 点間の歪み変化

#### 3.5 吸水特性および排水特性の評価

多孔質成形体とグラスウールボードの吸水および排水特性を以下の方法にしたがい評価した。一辺が 100 mm の正方形の試料を用意した。試料の厚みは、多孔質成形体の場合、22 mm および 5 mm、グラスウールボードでは 25 mm であった。試料を断面が上となるように深さ 500 mm の水中に浸漬した。一定時間間隔で試料を水中から引き上げ、質量を測定した。質量の増加が無くなった後、温度 23°C、相対湿度 50% に調節された恒温恒湿室中に移し、金網でつくられた台上に断面が上になるように放置し、一定時間間隔で試験片の質量を測定した。

### 4 結果と考察

#### 4.1 多孔質成形体の空隙構造

GF 含有率、空隙率の異なる多孔質成形体の走査型電子顕微鏡写真を Photo 1 に示す。GF 含有率が 45 mass% で空隙率が 0.78 のとき、GF により造られている空隙は PP により部分的に閉塞されている。また空隙率が 0.72 の時は空隙のさらに多くの部分が PP により閉塞されている。これに対して GF 含有率が 60 mass% のときは、GF が造る空隙は含有率が 45 mass% のときと比較して細かく、空

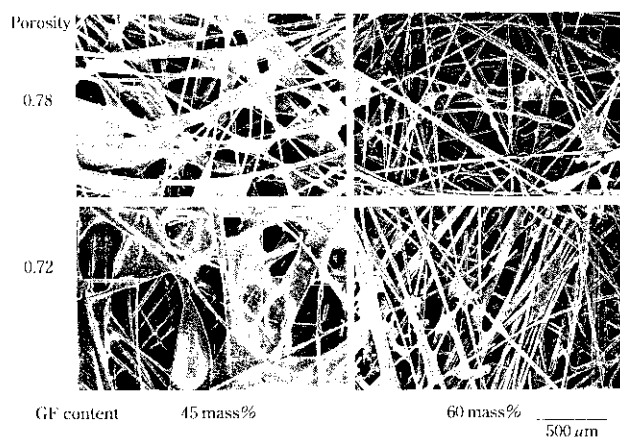


Photo 1 SEM micrographs of porous KP-sheet molded boards

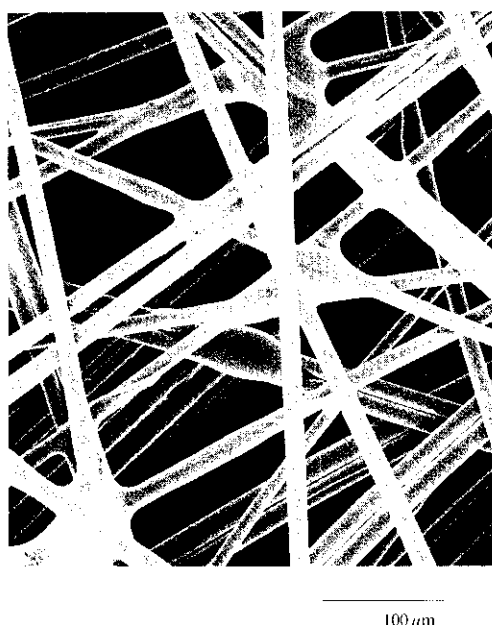


Photo 2 SEM micrograph of porous KP-sheet molded boards

隙率が 0.78, 0.72 いずれの場合にも PP による空隙の閉塞は少ない。つまり、GF 含有率が高いほど空隙構造が細くなり、また PP による空隙の閉塞が少なくなる。

また、GF 含有率が 60mass%、空隙率が 0.78 の多孔質成形体のさらに拡大した走査電子顕微鏡写真を Photo 2 に示す。多孔質成形体中の PP は、GF の接触点付近に集中しており、GF 同士を結合している。多孔質成形体中の PP は、緻密なスタンパブルシートが厚み方向に膨張する際に、溶融した PP 自身の表面張力などにより GF の接触点付近に集まると考えられる。

## 4.2 多孔質成形体の垂直入射吸音率

多孔質成形体の垂直入射吸音率の測定例を Fig. 1 に示す。Fig. 1 中では GF 含有率の異なる 2 種類の多孔質成形体のデータを比較した。いずれの場合も周波数が高くなるにしたがい吸音率は大きくなり、ある周波数で最大値をとる。また、多孔質成形体の GF 含有率により吸音率の最大値は大きく異なった。GF 含有率以外にも多孔質成形体の厚みや密度も吸音率の最大値に大きく影響することが確

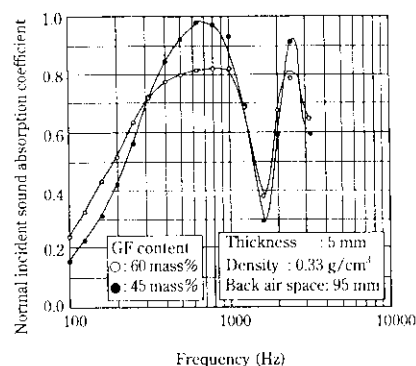


Fig. 1 Sound absorption characteristic of porous mold molded boards

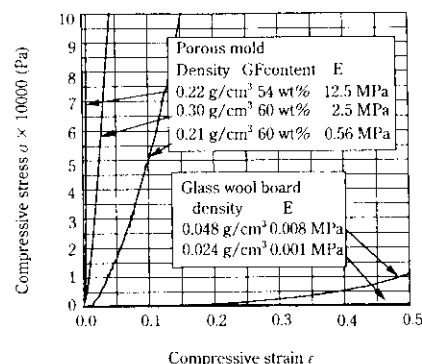


Fig. 2 Compressive strength of porous molds and of glass wool boards

認されている。後述の吸音特性の検討では木下らの手法に習い<sup>4)</sup>、吸音特性の代表値として垂直入射吸音率の最大値を用いる。

## 4.3 多孔質成形体の圧縮特性

多孔質成形体とグラスウールボードの圧縮応力-歪み線図および圧縮弾性率  $E$  を Fig. 2 中に示す。同じ GF 含有率で比較すると密度が高いほど  $\sigma$  は高く、同じ密度で比較すると GF 含有率が低いほど  $\sigma$  は高い。多孔質成形体とグラスウールボードの圧縮弾性率を比較すると、多孔質成形体の方がいずれの場合にも  $\sigma$  は高い。

多孔質成形体中の GF 含有率は通常 45~70 mass% の範囲である。この範囲内では、GF 含有率が高いほど強度特性は低下する。これは、GF のバインダーとなる PP が少なくなり、GF の接触点における PP による結合効果が低下するためである。また、多孔質成形体の密度が低いほど内部の空隙が多くなるために強度特性は低下する。

## 4.4 多孔質成形体の通気抵抗

GF 含有率が異なる多孔質成形体の  $R_s$  と空隙率の関係を図 3 に示す。また、Fig. 3 中には比較のためにグラスウールボードについての文献値をプロットした。多孔質成形体、グラスウールボードともに、空隙率が高くなるにしたがい  $R_s$  が減少する。また、多孔質成形体においては、GF 含有率が高くなるほど、勾配は小さくなる。空隙率が 0.7 以上では空隙率が同じ場合にも GF 含有率が高いほど  $R_s$  は大きい。

前述のように、多孔質成形体の空隙構造は GF 含有率が高いほど

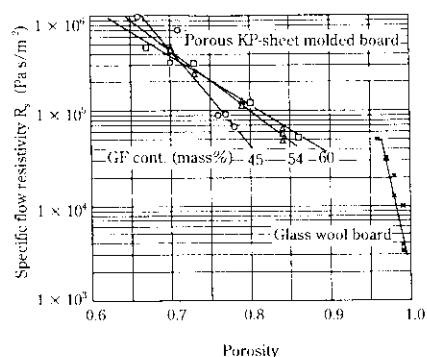


Fig. 3 Relationship between specific flow resistivity and porosity for porous molds and for glass wool boards

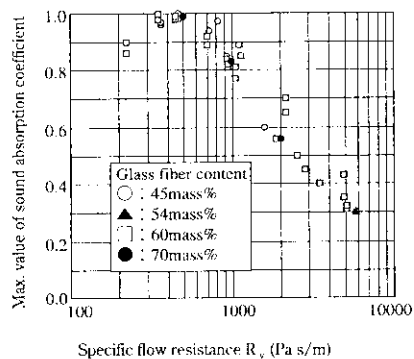


Fig. 4 Relationship between the maximum value of sound absorption coefficient and specific flow resistance for porous molds

細くなり、また GF 含有率が低いほど、PP による空隙の閉塞が多く発生する。そのため、空隙率が高い場合には GF 含有率が高いほど  $R_f$  は大きくなるが、空隙率が低くなるほど PP による空隙の閉塞の影響が大きくなり、空隙率が 0.7 以下では GF 含有率が低いほどつまり PP の含有率が高いほど大きい  $R_f$  を示すと考えられる。これらの結果、GF 含有率により  $R_f$  と空隙率の関係の勾配が変化すること考えられる。

同じ通気抵抗を与えるグラスウールボードが多孔質成形体と比較して高い空隙率を持つことは、両者に含まれる GF の径に基づくと考えられる。すなわち、グラスウールボードは直径  $6\mu\text{m}$  前後の GF から成り立っているのに対し、多孔質成形体は主として直径  $10\sim 20\mu\text{m}$  の GF から構成されている。空隙率が一定の場合には繊維径の大きい材料の方が表面積は小さいため、 $R_f$  は小さい。多孔質成形体にグラスウールボードより大きい繊維径の GF を使うことで強度特性などを向上させた結果、同じ空隙率における  $R_f$  が小さくなったものと考えられる。

#### 4.5 多孔質成形体における通気抵抗と垂直入射吸音率との関係

垂直入射吸音率の最大値とある厚みのときの通気抵抗  $R_f$  の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 中には、GF 含有率、密度、厚みが異なる多孔質成形体の結果が含まれている。吸音率の最大値と  $R_f$  の関係は、GF 含有率、密度、厚みによらず、1つの曲線で表されている。吸音率の最大値は  $R_f$  が  $350\sim 500\text{ Pa}\cdot\text{s/m}$  で最大となり、 $R_f$  がそれより高い場合および低い場合は、いずれも吸音率の最大値が著し

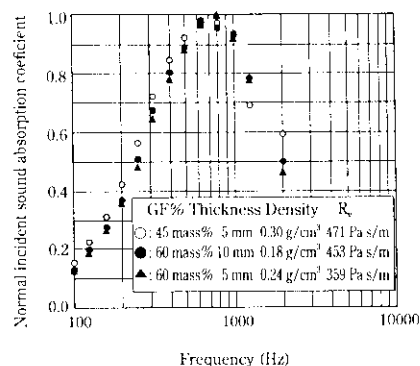


Fig. 5 Sound absorption characteristic of porous molds with 100 mm back-air space

く低下した。

多孔質成形体の垂直入射吸音率の最大値が  $R_f$  が  $350\sim 500\text{ Pa}\cdot\text{s/m}$  で最大になったことは、木下らが報告した結果とほぼ一致している。この領域よりも  $R_f$  が大きい多孔質成形体では、材料表面および内部において音が反射されるために材料による十分な吸音が行われず、 $R_f$  が小さすぎる場合には、音が材料を通過する際に空隙内での空気の摩擦が十分に起こらず、その結果、音はそのエネルギーを十分に吸収されずに材料を通過すると考えられる。したがって、多孔質成形体を吸音材料として用いるためには、強度特性などを考慮して GF 含有率、密度および厚みの組み合わせを決定する場合においても、 $R_f$  が  $350\sim 500\text{ Pa}\cdot\text{s/m}$  の範囲となるように、各条件を決定する必要がある。

このようにして各条件を決定した多孔質成形体の垂直入射吸音率の一例を Fig. 5 に示す。何れも高い吸音率を示す。以上のように、通気抵抗による材料の選択は、強度特性などの必要特性を考慮しながら、吸音特性を最適に設計するための材料設計指針となりうるものである。

## 5 多孔質成形体のその他の特性

### 5.1 グラスウールボードの残響室法吸音率との比較

多孔質成形体およびグラスウールボードの吸音特性を残響室法吸音率で比較した。多孔質成形体およびグラスウールボードの厚みはそれぞれ 22 および 25 mm であり、いずれも背後に 100 mm の空気層を設けた。測定結果を Fig. 6 に示す。厚みがほぼ等しい多孔質

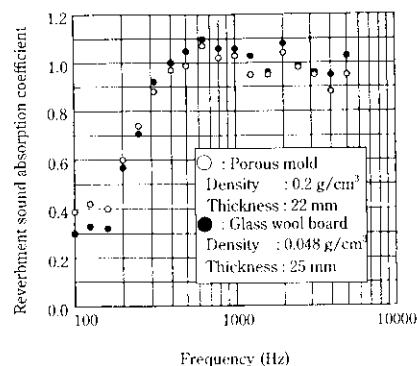


Fig. 6 Comparison of sound absorption characteristic between porous mold and glass wool board with 100 mm back-air space

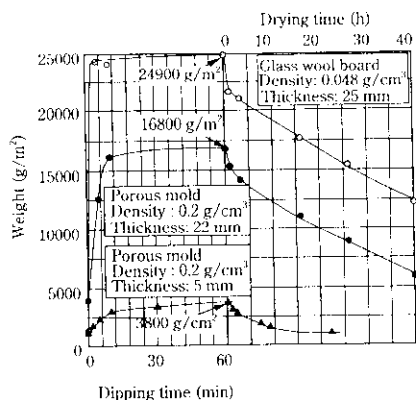


Fig. 7 Water absorbing and drying time of porous molds and glass wool board

成形体とグラスウールボードは密度が異なるにも係わらず同等の吸音特性を有する。

## 5.2 吸水／排水特性、耐凍結性、耐アルカリ性

多孔質成形体およびグラスウールボードの吸水／排水試験における質量変化を Fig. 7 に示す。多孔質成形体、グラスウールボードともに水中に浸漬すると水を吸収して重量が増加した。グラスウールボードの重量変化は水に浸漬して 5 min 以内にほぼ飽和するのに対し、多孔質成形体の場合は 10～20 min の時間を要した。また、十分に水が吸収された後の試料の重量は多孔質成形体の方が小さく、シートが浸漬前の重量に戻るまでに要する時間は多孔質成形体の方が短かった。これは多孔質成形体とグラスウールボードの GF 径や、GF 層構造および表面処理に基づくものと考えられる。

次に多孔質成形体の耐アルカリ性を評価した。多孔質成形体を水酸化ナトリウム 10 mass% 水溶液中に 7d 浸漬した。乾燥後に寸法を測定したところ、縦横の寸法変化率は 0.3% 以下、厚みの変化は 0.7% 以下であった。

最後に多孔質成形体の耐凍結性を JIS A 1435 に記載される試験方法に従って評価した。水を含んだ状態で  $-20^{\circ}\text{C}$  と  $+5^{\circ}\text{C}$  の凍結／融解サイクルを 20 回繰り返す、その後の外観、吸音特性の変化を調べた。その結果、外観、寸法および吸音特性の変化はなかった。

多孔質成形体のバインダーである PP は、グラスウールボードに用いられるフェノール樹脂に対し、1/10 程度しか吸水せず、アルカリに対しても比較的安定である。

## 6 多孔質成形体の吸音材料としての使用例

多孔質成形体の使用例について紹介する。多孔質成形体が自動車のエンジンカバーの内部の成形吸音材料として用いられた例を Photo 3 に示す。抄紙法スタンパブルシートは複雑な凸凹形状を持った多孔質体に成形され、それ自身で空気層を保った状態でエンジンカバーの内側に取り付けられる。エンジンカバー以外にも、自動車内装材のなかでも大面積を占める天井材の吸音特性が注目されている。多孔質成形体は吸音特性と強度特性に優れさらに軽量で高い成形性を持つために吸音性の自動車天井材として、乗用車やトラック用途実用化の検討が進められている。

シート状に成形された多孔質成形体を機械室の壁面に防音処理として設置した例を Photo 4 に示す。多孔質成形体は吸音特性とともに高い強度特性を有するため、表面に補強材や処理材を必要とせず、このような施工の容易さも特徴として挙げられる。

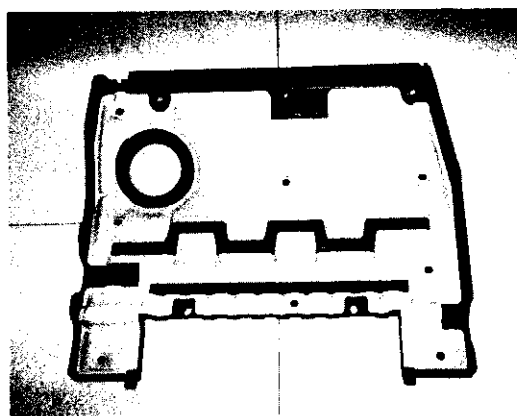


Photo 3 A porous sound insulator in engine room molded of porous KP-sheet

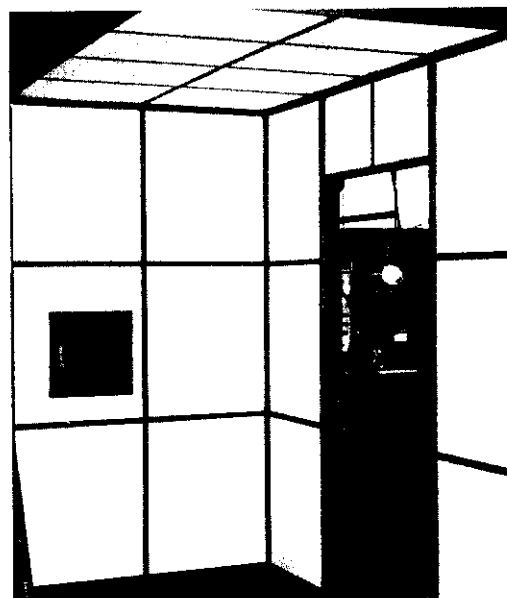


Photo 4 Appearance of porous KP-sheet used for a sound insulator in factory

## 7 結 言

- (1) 抄紙法スタンパブルシートを多孔質に成形して得られる多孔質成形体は、軽量でありながら、強度特性、形状保持性および吸音特性に優れた材料である。
- (2) 多孔質成形体の吸音特性および強度特性は GF 含有率、密度、厚みに依存する。吸音特性は通気抵抗を用いて良好に相関される。通気抵抗が  $350\sim 500\text{ Pa}\cdot\text{s/m}$  の範囲内になるように GF 含有率、密度、厚みの組み合わせを決定した場合に優れた吸音特性を示す。
- (3) 吸音特性の点で最適に設計された多孔質成形体は、グラスウールボードと同等の吸音特性を有しさらに高い強度特性、耐水性、耐アルカリ性および耐凍結性を有する。
- (4) 多孔質成形体は自動車分野、および建材、土木など、多くの分野での展開が期待される。

本研究を行うにあたりご指導を賜りました、千葉工業大学 宇安勝博士に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 竹原亜生, 杉辺英孝: 川崎製鉄技報, **24**(1992)2, 102
- 2) 吉武裕幸, 西村 治, 瀬 宏一, 荒木 豊, 久保秀穂: プラスチックエージ, **9**(1996), 124
- 3) 子安 勝: 「吸音材料」, (1976), 14, [技報堂]
- 4) 木下陸肥路: 日本音響学会誌, **23**(1967)6, 415
- 5) 立道有年, 岡崎明彦: 日本機械学会論文集 (C 編), **49**(1973)443, 1190
- 6) Y. Miki: J. Acoust. Soc. Jpn. (E), **11**(1990)1, 19
- 7) M. E. Delany and E. N. Bazley: Appl. Acoust., **3**(1970)105
- 8) 内田祐一, 古川文明, 花谷誠二: 川崎製鉄技報, **29**(1997)4, 189
- 9) (社)日本音響材料協会編: 「騒音・振動対策ハンドブック」, (1982), 723~731 [技報堂]