

# 航空機エンジンファンケース用アルミハニカム

- 高温多湿下での優れた耐久性を発揮 -

板 本 貴 志\* 盛 田 孝 雄\*\* 半 田 誠\*\*\*

## Aluminum Honeycomb for Aircraft Engine Fan Case

- The Excellent in Durability under High Temperature and Humidity Environment -

Takashi ITAMOTO, Takao MORITA, Makoto HANDA

For the aircraft engine fan case, honeycomb sandwich panel with sound absorption characteristic, is applied for its inner side in order to reduce the weight and engine noise.

As the inner side of the fan case is required to be three-dimensional shape, heat formed hexagonal honeycombs has been applied, but recently, unique cell shape "double flexible" honeycomb core that does not require heat forming, is getting to be used. For the area where strength is required, a high density aluminum honeycomb of a thick foil thickness is applied.

Until now, only one manufacturer in the United States was able to supply both of these aluminum honeycombs in the market.

This manufacturer is using chromic acid for corrosion resistant treatment of aluminum honeycombs, but engine manufacturers are demanding further improvement in corrosion resistance property.

Showa Aircraft Industry Co., Ltd. has developed and started mass production for aluminum double flexible honeycomb and high density aluminum honeycomb by using aluminum foil treated with phosphoric acid anodizing which has more beneficial effect in adhesion durability and corrosion resistance under high temperature and humidity environment than the chromic acid treatment.

航空機エンジンファンケースは、軽量化及び騒音対策が求められるため、内面側に吸音特性を有したハニカムサンドイッチパネルが適用されている。ファンケース内面は3次曲面のため、一般的に六角形状のハニカムを使用し加熱成形による3次曲面成形を行っていた。この加熱成形を不要とするハニカムとして、特殊なセル形状を持つアルミダブルフレキシブルハニカムが採用され始めている。また、パネル強度を必要とする部分には、箔厚の厚い高密度アルミハニカムが適用されている。従来、この2種類のアルミハニカムを同時に提供できるメーカーはアメリカの1社に限られており、このアルミハニカムは、耐食処理としてクロム酸処理が用いられている。昭和飛行機工業株式会社では、クロム酸処理よりも高温多湿の環境下における接着耐久性と耐食性に優れたリン酸陽極処理を施したアルミ箔を原材料とするアルミダブルフレキシブルハニカム及び高密度アルミハニカムを開発し、量産化した。

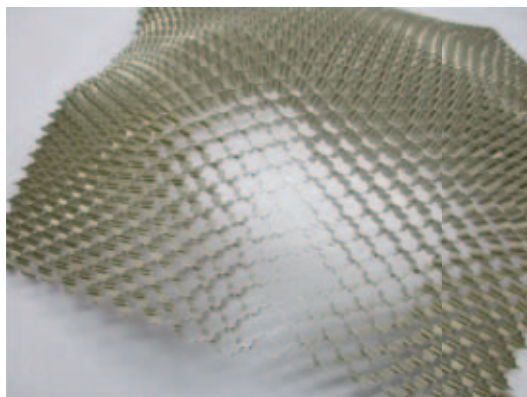


写真1 アルミダブルフレキシブルハニカム  
Aluminum Double Flexible Honeycomb

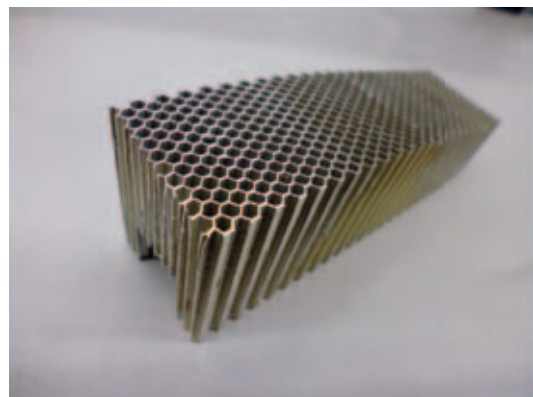


写真2 高密度アルミハニカム  
High Density Aluminum Honeycomb

\* 昭和飛行機工業 輸送・機器事業部 設計技術部  
\*\*\* 昭和飛行機工業 輸送・機器事業部 生産企画部

\*\* 昭和飛行機工業 輸送・機器事業部 製造部

## 1. はじめに

昭和飛行機工業株式会社は、1960 年より米国ヘキセル社と技術提携を行い、現在まで構造用途のサンドイッチパネル芯材であるハニカムコアの開発・製造を行っている。航空機分野においては、各航空機機体メーカー及び航空機エンジンメーカーに各種ハニカムコア及びハニカムサンドイッチパネル部品を供給してきた長年の実績があるハニカムコア材料のリーディングメーカーである。

蜂の巣を意味するハニカムは、図 1 に示す構造である。材料にアルミニウム合金を用いるアルミハニカムは、アルミニウム合金の箔を表面処理した後、接着剤で接合して製造する。今回、製品の耐環境性を向上させるため、表面処理にリン酸陽極処理を適用し、様々な試験を行ないその性能を評価した。その結果、従来の製造方法より優れた性能が発揮できることが確認できたため、航空機エンジンファンケース用材料として、製品化した。

航空機エンジンファンケースには、軽量化及び騒音対策のため、ハニカムコアを芯材とした、吸音特性を有したハニカムサンドイッチパネルが適用されている。ジェット旅客機や大型輸送機に使用されているターボファン・エンジンは、ターボジェット・エンジンの入口にファンを取り付けたもので、ファンケースはこの部分を覆う外筒の前方部分に当たる。

ファンケース内面は 3 次曲面のため、従来のアルミハニカムでは加熱成形を行い、曲面に合わせた形状でサンドイッチパネルを製作する。近年この加熱成形を不要とするアメリカ製のアルミダブルフレキシブルハニカムが採用され始めている。また、ファンケースと他の部品を結合する部位には、部分的に六角形状の高密度アルミハニカムを適用することで、他の部位よりも剛性を高めている。

これまで、アルミダブルフレキシブルハニカム及び高密度アルミハニカムの 2 種類を製造できるメーカーはアメリカに 1 社しかなく、このメーカーでは、クロム酸処理によって耐食性も高めている。これに対して当社は、クロム酸処理より接着耐久性と耐食性が優れているとされるリン酸陽極処理を用いることとした。

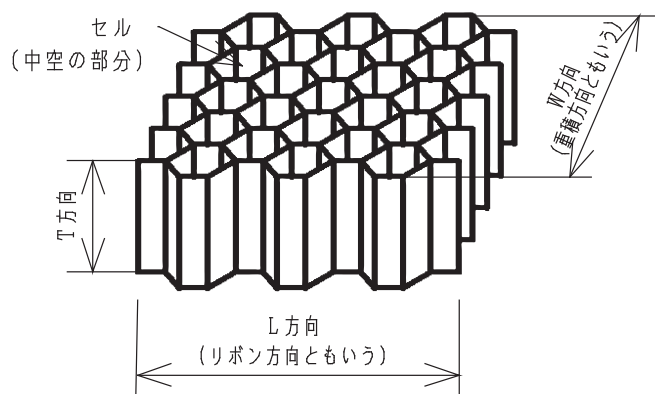


図 1 ハニカム各部の名称  
Name of Each Part of Honeycomb

製造したハニカムを試験した結果、リン酸陽極処理を用いたアルミハニカムは、クロム酸陽極処理を用いたアルミハニカムに比べ、接着耐久性及び腐食耐久性に優れ、機械的強度も良好な結果を示したので、当社は、航空機エンジンファンケース用としてアルミダブルフレキシブルハニカム(写真 1)及び高密度アルミハニカム(写真 2)の 2 種類を製品化した。

## 2. リン酸陽極処理(PAA)

### 2.1 施工方法

PAA とは、リン酸浴中で被処理物となるアルミ箔を陽極にして通電することにより、アルミ箔表面に強制的に酸化被膜を形成させる表面処理である。

アルミ箔は冷間圧延にて製造され、鉱物油が潤滑剤として適用されているため、アルカリ脱脂剤を用いて鉱物油の除去及び表面のエッチングを行う。次にエッチングによりアルミニウム中に含まれる、銅、鉄、ケイ素などの不純物(スマット)が箔表面に残るため、中和処理として酸性の液体に浸漬してスマットの除去(デスマット)を行う。その後、リン酸浴中で規定された条件(電流・電圧・リン酸温度・リン酸濃度・処理時間等)にて電界処理を行い、アルミ箔表面に多孔質の酸化皮膜が形成される。これらの処理後には、水洗を実施してから次工程であるプライマー処理を施す。

アルカリ脱脂からリン酸陽極処理までを行う表面処理の模式図を図 2 に示す。

PAA を施したハニカムの断面構造を図 3 に示す。アルミ合金の母材は薄膜の酸化膜で被覆され、この面に垂直方向に伸びた厚さ約 0.3  $\mu\text{m}$  の多孔質の酸化膜が形成されており、PAA が適切に施工されていることが分かる。

さらに、多孔質の酸化皮膜の封孔処理及び接着性の向上のため、リン酸陽極処理が施されたアルミ箔の表面に、接着プライマーを塗布する。

### 2.2 接着後の耐久性評価

高温多湿の環境下における接着耐久性については、いくつかの評価方法があるが、一例としてフォイルウェッジクラック試験(亀裂進行試験)について紹介する。

フォイルウェッジクラック試験は、耐食処理を施したアルミ箔と 3.2 mm のアルミ板をフィルム接着剤にてサンドイッチにし、端部よりクサビを打ち込む。

図 4 に、フォイルウェッジクラック試験片を示す。

これにより、アルミ板がわたり、接着部にストレスが加わることで亀裂が発生する。その際の亀裂の長さを測定し、更

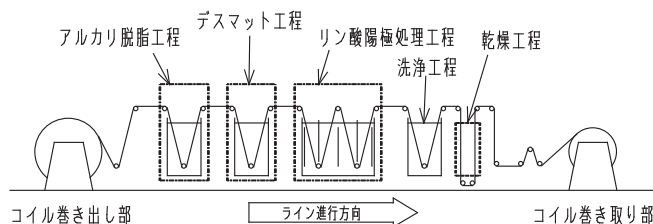


図 2 リン酸陽極処理ラインの模式図  
Pattern Diagram of Phosphoric Acid Anodize Line

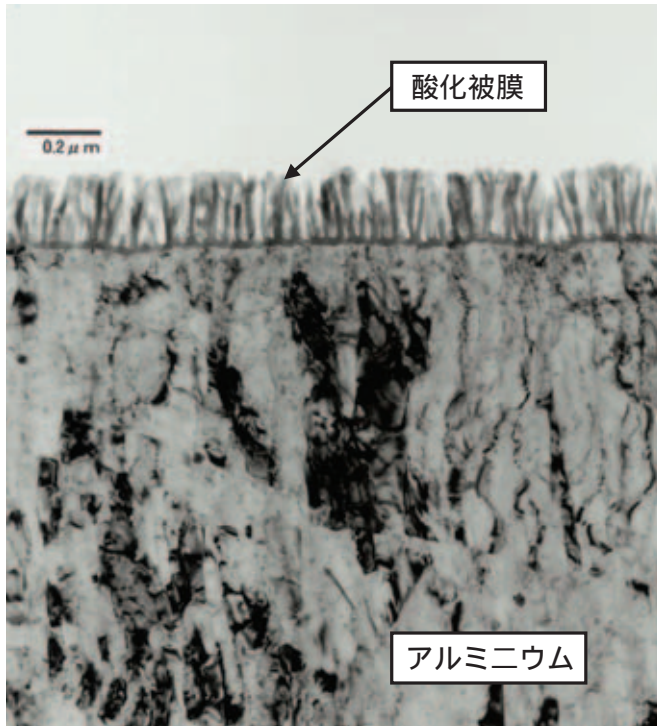


図3 リン酸陽極処理箔の断面構造  
Cross Section Structure of Phosphoric Acid Anodize Foil

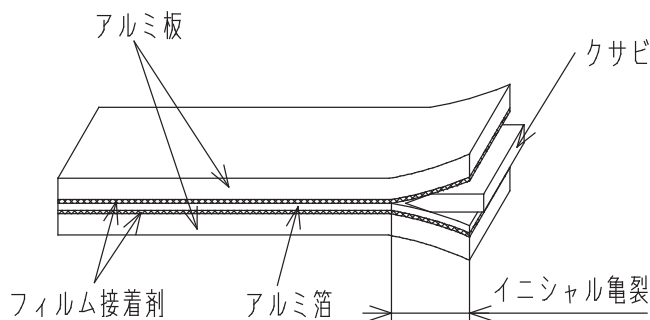


図4 フォイルウェッジクラック試験片  
Foil Wedge Crack Specimen

にストレスを加えた状態で高温多湿の環境下にて暴露し、亀裂の進行した長さを測定することで、接着耐久性を評価する。

図5に、フォイルウェッジクラック試験の結果を示す。イニシャルでは、未処理箔、クロム酸処理箔、リン酸陽極処理箔において、亀裂に大きな差異はなく、ほぼ同等な性能を示す。

未処理箔は、高温多湿の環境下で暴露することにより、亀裂が大きく進行する。その際の接着部の破壊モードは、未処理箔とフィルム接着剤の界面にて破壊する。

クロム酸処理箔は、高温多湿の環境下で暴露によって、未処理箔に比べて亀裂の進行度合いは少ないものの、フィルム接着剤の凝集破壊と耐食処理箔での界面破壊の混合破壊により、亀裂が進行する。

リン酸陽極処理箔は、高温多湿の環境下で暴露しても、亀裂はほとんど進行せず、進行した亀裂もフィルム接着剤の凝集破壊であり、接着耐久性に優れていることが分かる。

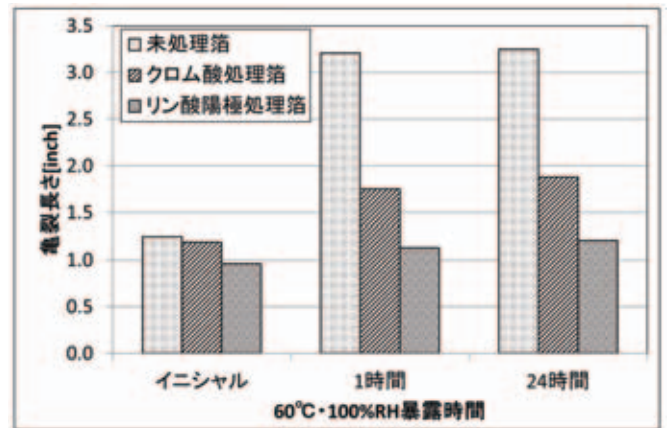


図5 フォイルウェッジクラック試験結果  
Foil Wedge Crack Test Result

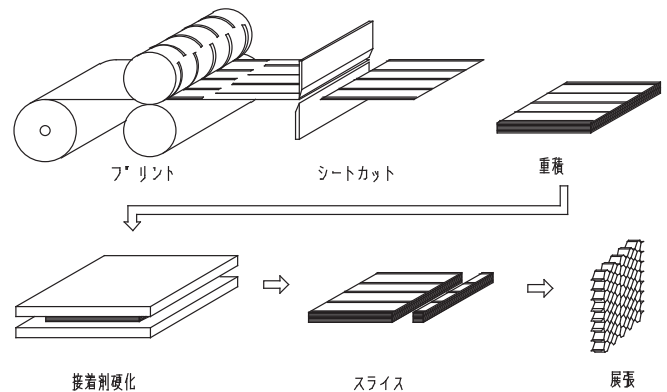


図6 ハニカムの製造方法(展開方式)  
Manufacturing Method of Honeycomb (Expanding)

### 3. アルミハニカムの製造方法

#### 3.1 一般的な製造方法

アルミハニカムの製造方法は、大別すると、展開方式とコルゲート方式の二つがある。

展開方式は箔厚が薄いアルミ箔を用いたハニカムを製造する場合に用いられる。

コルゲート方式は、特殊形状のハニカム及びアルミ箔の箔厚が厚く、条線接着後に展開することによりハニカム化することが困難なハニカムコアを製造する場合に用いられる。

##### 3.1.1 展開方式

シート状の素材に接着剤を等間隔で条線状に塗布した後、シートを所定の寸法に切断し、条線状接着剤の位置を半ピッチずらして積み重ねて接着してブロックにする。その後、ブロックを必要な厚さに切断し、W方向(展開方向)に展開すると六角形のセル形状を持つハニカムとなる。

図6に展開方式によるハニカム製造概要を示す。

##### 3.1.2 コルゲート方式

コルゲートギヤを用いて、シート状の素材をコルゲート(波型)シートにする。コルゲートシートに接着剤を塗布し、コルゲートシートが六角形のセル形状となるように積み重ねて

接着してセル形状を有するブロックにする。

コルゲート方式では、完成したセル形状を持つブロックを必要な厚さに切断する。

図 7 にコルゲート方式によるハニカム製造概要を示す。

### 3.2 アルミダブルフレキシブルハニカムの製造方法

アルミダブルフレキシブルハニカムは、その特徴的なセル形状を形成するために、コルゲート方式が最適と思われるが、使用するアルミ箔の箔厚が薄いため、コルゲート方式では、接合部に接着に必要な圧力を十分に加えることができない。そこで、コルゲート方式と展張方式を組み合わせた工法を用いて製造する。

アルミ箔を波板形状にコルゲート成形し、条線ピッチを 4 山間隔として接着剤を塗布する。次に、条線ピッチを半ピッチずらして積み重ねて接着してブロックにする。その後、ブロックを必要な厚さに切断し、W 方向に展張すると、アルミダブルフレキシブルハニカムのセル形状となる。

図 8 にアルミダブルフレキシブルハニカムの展張工程概略図を示す。

アルミダブルフレキシブルハニカムの接着工程では、波板形状を維持し、接着剤と塗布されている山の頂点に均一に圧力をかけることが重要で、積み重ねられたシートの上に波板形状に合わせた型材を入れて加圧する。

### 3.3 高密度アルミハニカム

高密度アルミハニカムは、使用するアルミ箔の箔厚が厚いため、コルゲート方式にて製造される。

コルゲートシート同士が適切な接着力を得るには、接着剤を硬化させる際にセル形状を維持しながら接合部に適切な圧力を加える必要がある。この圧力が弱いと接着不良が発生し、強すぎるとコルゲートシートが潰れてしまう。このため、適切な圧力を設定するために、常温と接着温度にて、ハニカムを模擬した試験片の圧縮試験を行い、1 セル当たりの潰れ量と圧力の関係を取得した。取得したデータを図 9 に示す。

図 9 において、常温と接着温度のどちらも、1 セル当たりの潰れ量がおおよそ同じ値を境にして、グラフの傾きが変化した。このことから、1 セル当たりの潰れ量がこの値を超え

ると、セルが潰れ易くなり、L 方向に伸びながら潰れていくことが分かった。そこで、接着温度での 1 セル当たりの潰れ量がこの値となる圧力を上限値として、接着圧力を設定した。

加圧方法は、治具に組み込んだ耐熱バネの力で加圧し、加圧治具ごとオープンに投入して加熱することにした。

バネによる加圧の場合、昇温とともにハニカムを構成する素材が柔らかくなり、製品が W 方向に潰れるため、バネが伸びて荷重が減少していく。この荷重変化を考慮して初期の圧力を決定する必要がある。

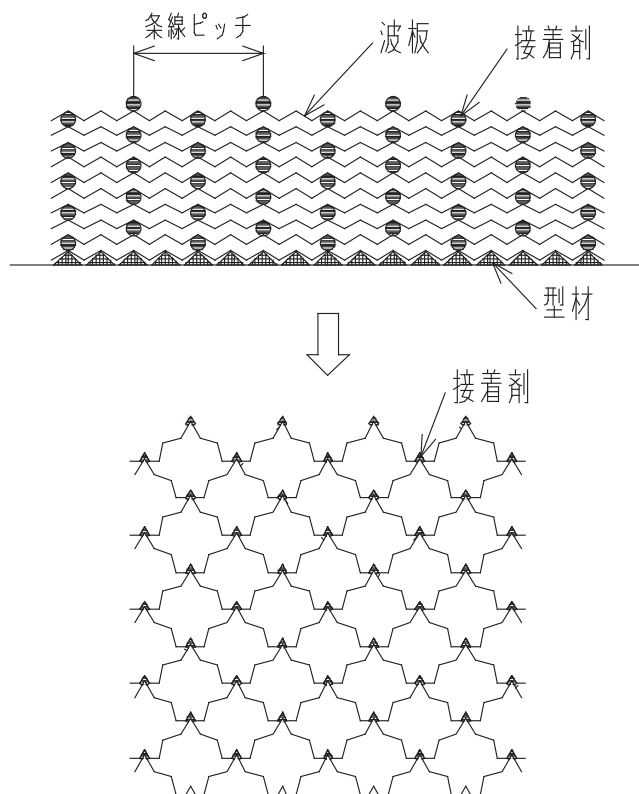


図 8 アルミダブルフレキシブルハニカムの展張模式図  
Pattern Diagram of Expanding for Aluminum Double Flexible Honeycomb

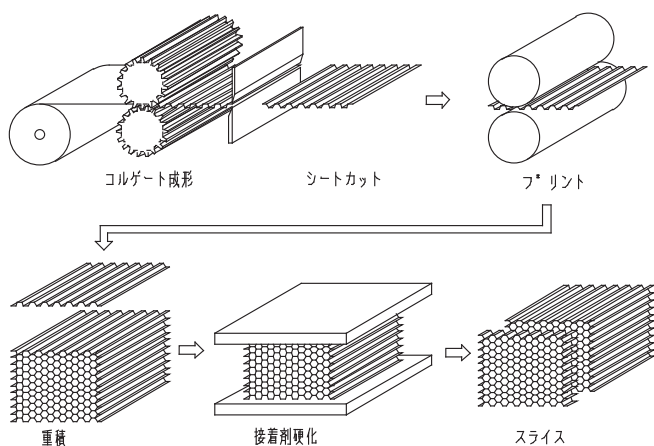


図 7 ハニカムの製造方法(コルゲート方式)  
Manufacturing Method of Honeycomb (Corrugating)

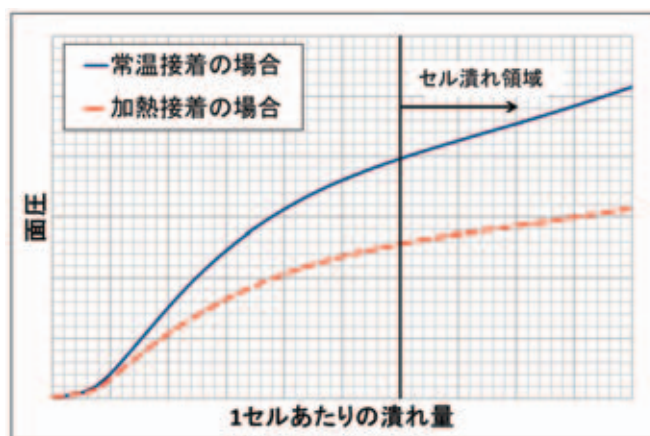


図 9 1 セルあたりの潰れ量と面圧の関係  
Relationship between Deformation per a Cell and Pressure

図 9 に、荷重変化の測定結果を示す。この荷重変化を当てはめることで、常温時の初期圧力を決定した。

荷重変化を当てはめた接着圧力のデータを図 10 に示す。

#### 4. 海外製品との比較

アルミダブルフレキシブルハニカム及び高密度アルミハニカムは、アルミハニカムの一般的な公共規格である AMS-C-7438<sup>1)</sup> に規定されていないため、性能の基準値が存在しなかった。

そこで、試験方法は AMS-C-7438 に準拠し、性能については海外製品と同等であることを目標として開発を行った。

##### 4.1 耐食性試験

アメリカ製及び当社製アルミダブルフレキシブルハニカムについて、ASTM B-117<sup>2)</sup> に準拠した 30 日間の塩水噴霧を行った後の重量減少を確認した。

試験結果は表 1 のとおりである。

当社製ハニカムはアメリカ製と比べて、おおよそ 1/3 の重量減少であり、耐食性に優れていることが確認できた。

##### 4.2 強度試験

アメリカ製ハニカムと当社製ハニカムについて、AMS-STD-401<sup>3)</sup> に準拠した強度試験を実施した。

##### 4.2.1 圧縮試験

圧縮試験の荷重速度は 0.5 mm/min とした。

圧縮試験の様子を図 11 に示す。

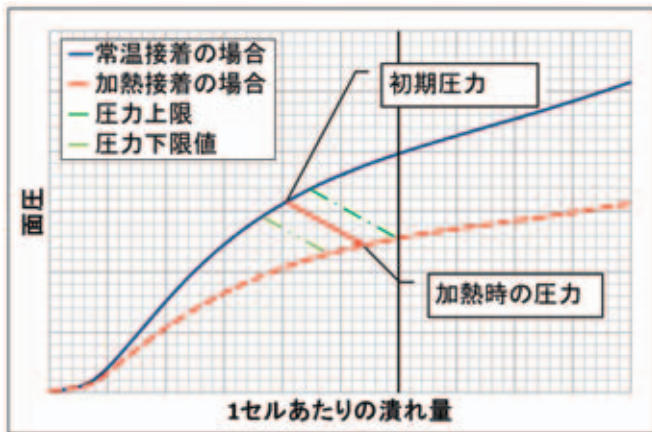


図 10 バネ加圧による圧力低下  
Pressure Drop due to Spring Pressurization

表 1 塩水噴霧試験結果  
Results of the Salt Spray Tests

| 供試体         | No. | 塩水噴霧<br>前重量[ g ] | 塩水噴霧<br>後重量[ g ] | 減少量[ mg/ft <sup>2</sup> ] |       |
|-------------|-----|------------------|------------------|---------------------------|-------|
|             |     |                  |                  | 個別                        | 平均値   |
| 米国製<br>ハニカム | 1   | 22.735           | 22.711           | 18.5                      | 18.48 |
|             | 2   | 23.576           | 23.552           | 20.8                      |       |
|             | 3   | 22.235           | 22.241           | 16.2                      |       |
| 当社製<br>ハニカム | 1   | 22.284           | 22.283           | 0.8                       | 5.13  |
|             | 2   | 22.010           | 21.999           | 8.5                       |       |
|             | 3   | 22.426           | 22.418           | 6.2                       |       |

##### 4.2.2 プレートせん断試験

せん断試験は、ハニカムの密度によって、プレートせん断試験と曲げせん断試験の 2 つが規定されている。密度が 10 lb/ft<sup>3</sup> 未満のハニカムにはプレートせん断試験が適用され、10 lb/ft<sup>3</sup> 以上のハニカムには曲げせん断試験が適用される。

アルミダブルフレキシブルハニカムは密度が 10 lb/ft<sup>3</sup> 未満のため、プレートせん断試験を行った。

プレートせん断試験の荷重速度は 0.5 mm/min とした。

プレートせん断試験の様子を図 12 に示す。

##### 4.2.3 曲げせん断試験

高密度アルミハニカムは密度が 10 lb/ft<sup>3</sup> 以上のため、曲げせん断試験を行った。

曲げせん断試験の荷重速度は 1.0 mm/min とした。

曲げせん断試験の様子を図 13 に示す。

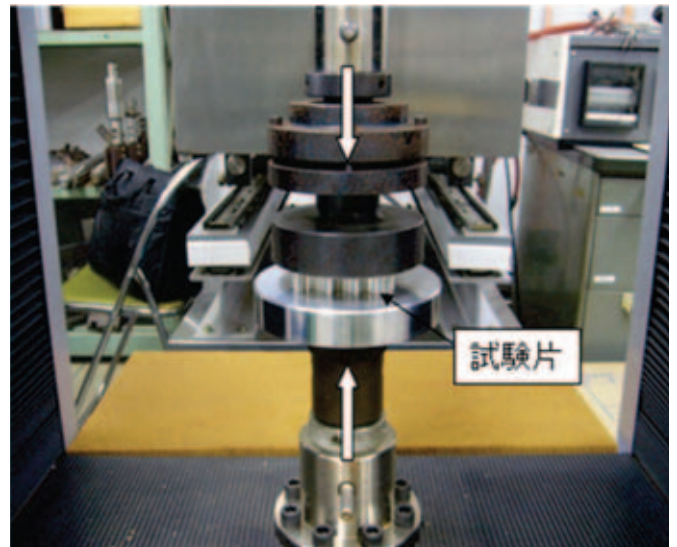


図 11 圧縮試験の様子  
Compression Test



図 12 プレートせん断試験の様子  
Plate Shear Test

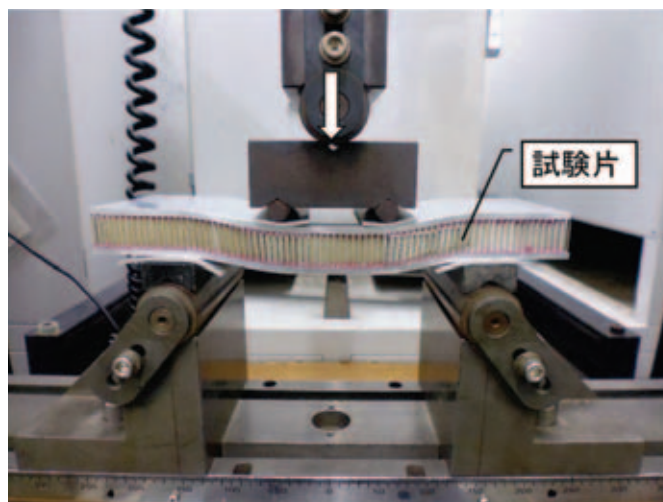


図 13 曲げせん断試験の様子  
Flexural Shear Test

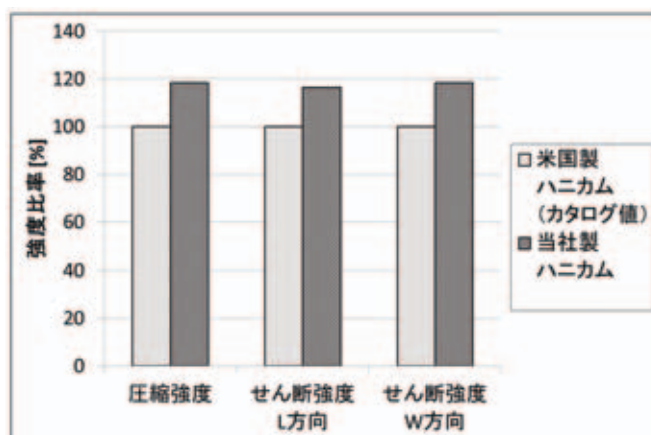


図 15 高密度アルミハニカム強度比較  
(セルサイズ: 1/8"、密度: 22.1 lb/ft<sup>3</sup>)  
Strength Comparison of High Density Aluminum Honeycomb

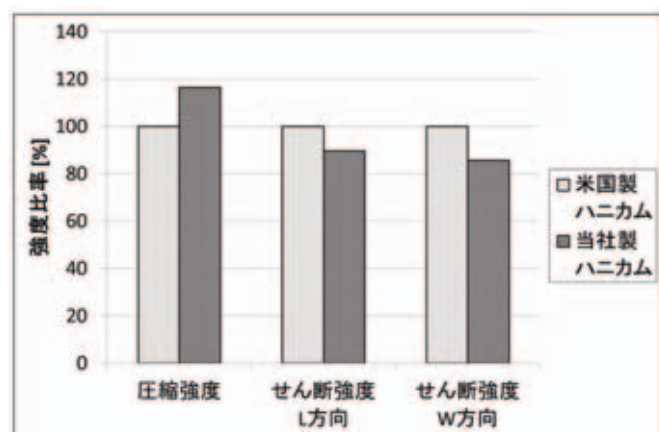


図 14 アルミダブルフレキシブルハニカム強度比較  
(密度: 4.8 lb/ft<sup>3</sup>、箔厚: 0.0047")  
Strength Comparison of Aluminum Double Flexible Honeycomb

#### 4.2.4 試験結果

アルミダブルフレキシブルハニカムの試験結果を図 14 に、高密度アルミハニカムの試験結果を図 15 に示す。

データはアメリカ製ハニカムの強度を 100 とした時の当社製ハニカムの強度比率を示している。

当社製ハニカムは、アメリカ製ハニカムと同等の強度を示した。

#### 5. おわりに

昭和飛行機工業は、60 年余りの経験で培ったハニカムの製造技術をもとにして、リン酸陽極処理(PAA)を新たに適用したアルミダブルフレキシブルハニカムと高密度ハニカムを開発した。これらのハニカムは、従来のクロム酸処理で製造したハニカムに比べ、接合強度と耐食性が優れており、耐

久性が向上することを示すことができた。

当社は、2014 年にアルミダブルフレキシブルハニカムの量産を開始し、2018 年に量産設備の増強を行った。高密度アルミハニカムについては、2018 年に量産を開始した。

航空機エンジンファンケースのコア材として使用されるアルミダブルフレキシブルハニカムと高密度アルミハニカムの 2 種類をラインアップしたことにより、今後の売り上げへの寄与が期待される。

また、当社製のハニカムを使用することで、ファンケースのライフサイクルが伸び、環境負荷の低減が期待される。

#### 参 考 文 献

- 1) SAE AMS-C-7438A (2014). Core Material, Aluminum, for Sandwich Construction
- 2) SAE ASTM B-117-18 (2018). Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- 3) SAE AMS-STD-401 (1999). Sandwich Constructions and Core Materials; General Test Methods

〔問い合わせ先〕

昭和飛行機工業株式会社 輸送・機器事業部 設計技術部  
TEL 042 - 541 - 2143 板本 貴志



板本 貴志



盛田 孝雄



半田 誠