

3E07 AMを用いたハニカム構造の吸音パネル試作と CFRP製吸音パネルの音響特性評価(その2)

○深川 仁、川島 里美、齋藤 沙織 (岐阜大学)

Trial manufacture of sound absorbing panel with honeycomb structure using AM and acoustic evaluation of CFRP sound absorbing panel (part 2)

Hitoshi Fukagawa, Satomi Kawashima, Saori Saitou (Gifu University)

Key Words: CFRP, AM, blast, Sound-absorbing panels, perforated panel, Sound absorption coefficient

Abstract

For the aircraft engine, sound absorbing structures (acoustic panels) for reducing engine noise are used, and structures in which a honeycomb core is bonded to an aluminum plate in many cases, with small diameter holes are densely processed in the aluminum plate are used. This time, as elemental research for prototyping sound absorbing panels for aircraft engines, we evaluated the extent to which resin and metal honeycomb structures and perforated plates can be made using AM (Additive Manufacturing), and the prototype test piece. And the sound absorbing performance using the impedance tube was evaluated. In addition, a perforated plate made of CFRP was produced by blasting, and a large sound absorbing panel of 1 m square adhered to the honeycomb core was prototyped, and the sound absorbing performance was measured in an anechoic room.

1. はじめに

航空機エンジンには騒音を減らす吸音構造として、片面に1~2mmの小径孔を密集加工したアルミ板あるいはGFRP板に、ハニカムコアを接着したサンドイッチパネル構造が使われている。これは、ヘルムホルツ型共鳴器という原理に基づく吸音構造であり、ナセルやエンジンカウルの内壁に採用されている(図1)。軽量化や防食性能向上のため、CFRPが航空機構造部品に多く採用される中、吸音構造には未適用である。理由の一つは、アルミ等に比べCFRPが高価で孔加工にコストがかかる点である。しかし筆者らが開発したブラストによる小径孔加工技術を用いると、CFRP薄板に低コストで高効率に大量密集した小径孔を加工でき、剥離不具合も起きない¹⁾。この技術を利用しCFRP多孔板を加工し、ハニカムコアと接着した吸音パネルを試作し、その性能を評価してきた²⁾³⁾。

今回は、航空機エンジン用の吸音パネルを簡便に試作する要素研究として、AM (Additive Manufacturing、3D造形とも言う)を用いて、樹脂ならびに金属製のハニカム構造や多孔板がどこまで作れるかの評価を行い、試作した試験片でインピーダンスチューブを用いた吸音性能の評価を行なった。さらに、CFRP製の多孔板をブラスト加工で製作し、ハニカムコアと接着した1m角の大型吸音パネルを試作し、無響室にて吸音性能の測定までを行なったので、それらの結果を報告する。

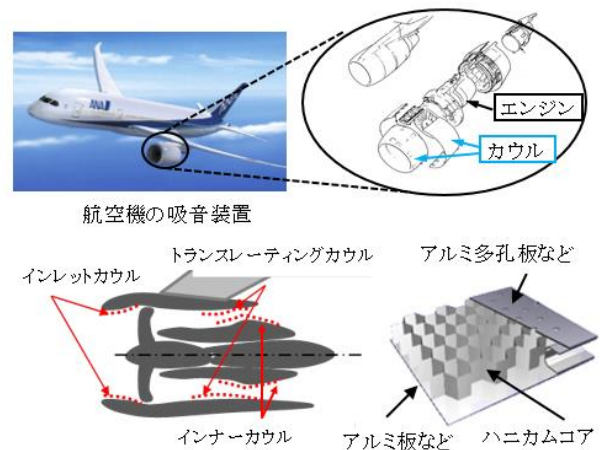


図1 航空機エンジンカウルと吸音パネル

2. 実験方法

2.1 吸音パネルの試作

吸音パネルに用いるCFRP製多孔板は、砥粒噴射量をコントロールし定量吐出できる直圧式サンドブラスト装置(ELP-ITR、(株)エルフォテック)を用いて加工した。ノズルおよび被削材は一定速度で送る機構で、加工するCFRP板を治具上に固定し、装置内のコンベアに載せ、板全体を噴射でスキャンする。なお、CFRP板には事前に孔加工したフィルム状のマスク材を貼付けた。マスクは、任意の小径孔(直径2.0mm)の孔パターン(図2)を透明フィルムに印刷したネガからフォトエッチング技術で孔加工した。ブラスト加工条件と使用した砥粒、及びマス

ク材料と加工条件を表 1 に示す。この方法で CFRP 板に孔径 2mm の場合、目標加工寸法を 2.0 ± 0.2 mm 以内に加工し、多孔板を試作した (図 3)。次に、孔加工した CFRP 板、孔加工していない CFRP 板、ハニカムコア、およびフィルム接着剤を用意し、ハニカムサンドイッチ構造の吸音パネルを接着組立した。使用した材料を表 2 に示す。接着には、CFRP 多孔板、フィルム接着剤、ハニカムコア、フィルム接着剤、CFRP 板を積層して、オートクレーブを用いて接着した (図 4)。なお、成形硬化条件は、真空バッグ後に 0.2MPa に加圧し、130°C で 2 時間加熱した。完成した吸音パネルを図 5 に示す。

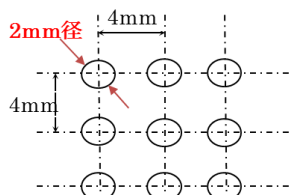


図 2 ホールパターン (2.0mm 径)



図 3 ブラスト加工した CFRP 多孔板(2.0mm 径)

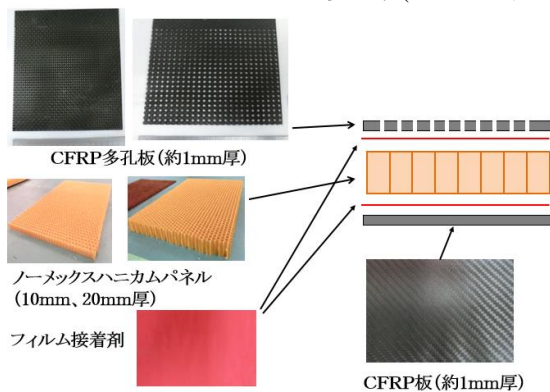


図 4 吸音パネルの接着組立構造と構成品



図 5 接着組立した吸音パネル(孔径 2mm)

表 1 ブラスト加工条件

項目	詳細
マスク材料	ドライフィルムレジスト : アクリルポリマーレジンフィルム、0.1mm 厚、2 枚重
砥粒	ホワイトアランダム WA #320、粒径 40 μ m
空気圧	ノズル部 : 0.15MPa
送り	X 軸 : ノズル移動速度 8m/min Y 軸 : コンベア速度 20mm/min
ノズル	直径 : ϕ 5mm、ノズル間距離 : 120mm (ノズルと被削材間の距離)

表 2 接着組立にした供試体材料

材料	仕様およびメーカー
CFRP 板	0.7mm 厚(東邦テナックス製 3K 織物プリプレグを GH クラフト社で積層硬化)
ハニカムパネル	ノーメックスハニカムコア (昭和アルミ製 20mm 厚、コアサイズ 6mm)
フィルム接着剤	AXIOM 社製 (AX2114-N-0.060)、およびエポキシ接着剤 (Epo Fix)

2. 2 インピーダンスチューブによる吸音率の測定

吸音パネルの周波数に応じた吸音性能を測定評価する方法として、インピーダンスチューブを用い、入射音と反射音との差から減衰率を測定するインピーダンス法と、大型パネルを作り無響室で、スピーカ音の反射による室内音の減衰を測定する減衰法がある。

前報告では³⁾、インピーダンス法を採用し、試作した吸音パネルから、直径 29mm の円筒形に NC 加工で試験片を切り出した試験片 (図 6) を用いて、吸音率を測定した。音響測定装置 (図 7) はブリュエル・ケアー社製 Type4206 (名古屋市工業技術研究所) を用い、サンプリング周期 10Hz にてピーク周波数と垂直入射吸音率 (ASTM E1050-12、ASTM E2611-09 準拠) を用いた⁴⁾。



図 6 NC 加工で切出したインピーダンス試験片

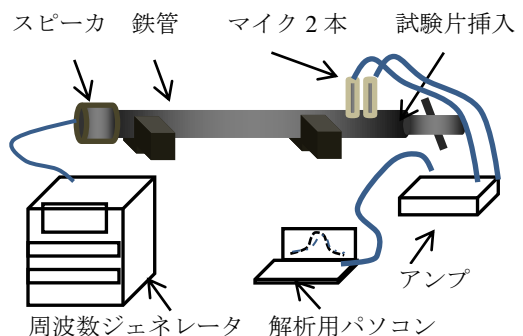


図 7 インピーダンスチューブ試験装置の模式図

2. 3 大型パネルの試作

前項で述べた方法により B4 サイズ (257×364mm) の CFRP 多孔板をブラストにより製作し、ハニカムコア材を接着した接着組立品を 12 枚用意した。

ハニカムコアと平板は一般的にフィルム接着剤を用いて接着するが、多孔板とハニカムコアの接着に用いると、孔が塞がってしまうため、事前にフィルム接着剤にピアシング処理を行なう。しかし、この作業には時間が掛かるため、今回は多孔板とハニカムコアの接着側にはエポキシ樹脂を用いて、孔周りに接着剤が入りにくい工夫をして接着した。

一方、反対側の面は B3 サイズ (364×515mm) の CFRP 板(孔無し)を用意し、これに上記の接着組立品 2 枚を同時にフィルム接着剤を用いて 6 セット接着した。次に製作した B3 サイズ吸音パネル 6 セットを並べ、1m 角の吸音パネルを組立てた(図 8)。

なお、製作した吸音パネルの孔開孔率を調べた結果、多孔板面積約 999,921 mm²、孔総面積 178,419mm² であり、平均開口率は 17.84% となった。

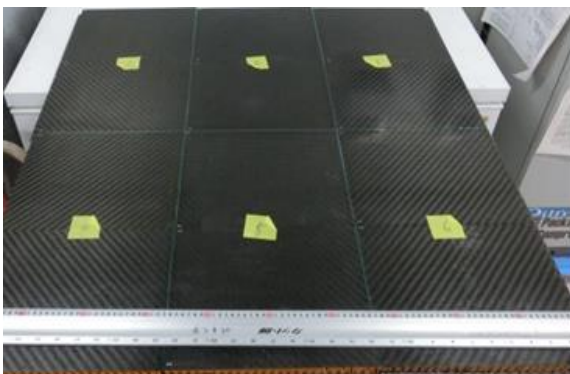


図 8 1m 角に接着組立した CFRP 製吸音パネル

2. 4 残響室 (無響室) における吸音率の測定

次に、製作した吸音パネル(1m 角)を用いて、残響室による吸音率測定を行った。測定は、岐阜県生活技術研究所の設備にて実施した。このとき、サンドイッチパネルの端部は、粘土等で埋めて側面からの影響がないよう処理した。なお、岐阜県生活技術研究所所有の「音響特性評価装置：(株)小野測器製」には、音源室と受音室にそれぞれマイクロホンが 5 本設置されており、DS-2000 システムにより、リアルタイム 1/3 オクターブ解析を行った。計測時間は 1 回約 5 分で、音源室のみ利用した(図 9)。

試験片 (多孔板) は B4 サイズの小型パネルを繋ぎ合せて一体化した (1m 角×21mm 厚) 大型試験片とした。また、比較用に類似構造の CFRP 板+ノーマックスハニカムのサンドイッチパネル (1m 角

×22mm 厚) をそれぞれ測定評価した。なお、パネル評価時には外周に油粘土の壁をつくり、隙間を防ぐ場合と、油粘土無しの場合のデータも参考に取得した。パネルの設置状況を図 10 に示す。

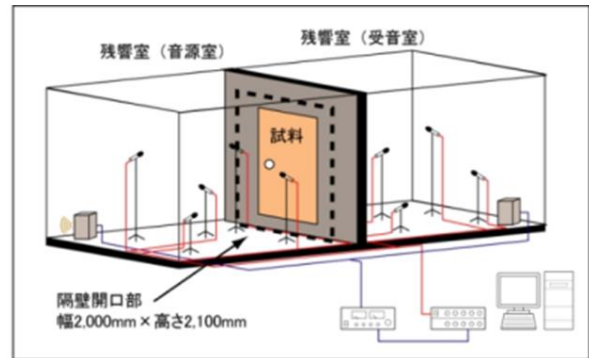


図 9 残響室(無響室)の模式図



図 10 無響室内部と吸音パネルの設置状況

2. 5 AM造形の部分活用

最新の AM 技術を使って、吸音パネル構造がどこまで作れるか、将来を見据えて、試作を試みた。この中で、2 層構造 (セプタム) など複雑構部分の試作も行った。最初に CAD モデル作成は、Solid Works を用いて、複数のパターンを作成した。

吸音パネルの多孔板の孔径は 1mm と 2mm の 2 パターンのそれぞれ 1 層構造と 2 層構造(セプタム)で 1mm 孔と 2mm 孔の両者を持った構造を設計した(図 11)。また、ハニカムコア構造のセルピッチは約 6mm、フランジ厚は 0.3mm を目標に、複数の企業に製作依頼した。また全体形状は、音響試験片と同じ、直径 29mm の円筒とした。

企業1では、(株)キーエンス社製の樹脂造形装置はAGILISTA-3200 使用し(図12)、低硬度シリコンゴムを用いて製作した。AM(3D造形機)の仕様上可能な最小フランジ厚は0.3mmで最小孔径0.4mmであった。なお、サポート材は水溶性で除去されたが、フランジの蓋まで一体で作ると精度が落ちるので、多孔板のみ、後から接着を行なった。

企業2では、(株)J3D社の金属専用造型機でEOSINT M280を用いた。材料はマルエージング鋼で、サポート剤との切り離しは放電加工が使われた(図13)。金属ではフランジ厚が0.3mmは困難との事で、蓋(多孔板)まで一体で成形すると、サポート材除去が出来ないので、蓋のみ後から接着を行った。

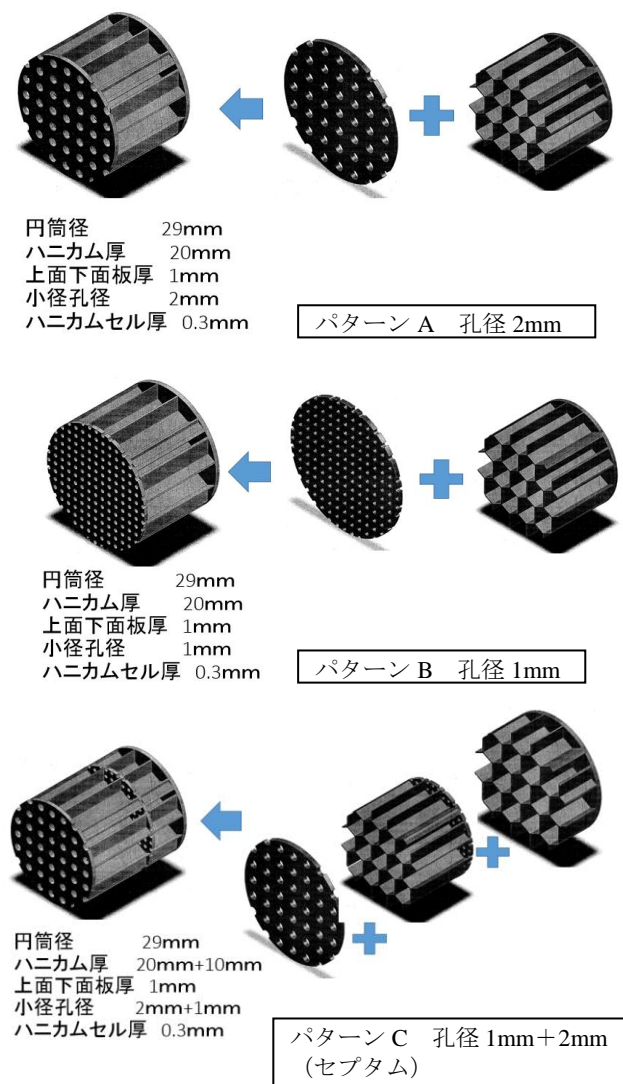


図11 AMで試作するための吸音パネル試験片のCADモデル (Solid Works 使用)

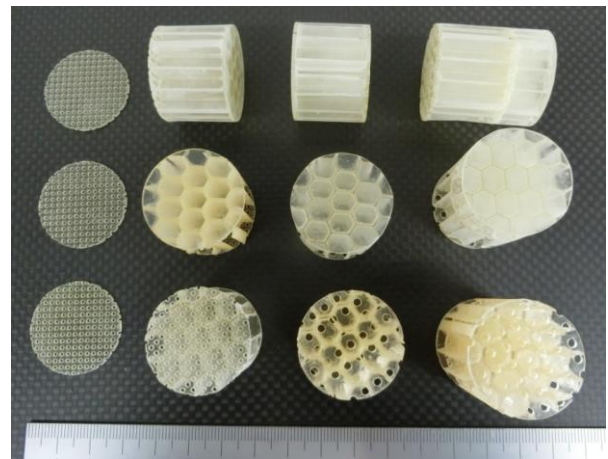


図12 樹脂用AMで造形した吸音パネル試験片 (低硬度シリコンゴム製)

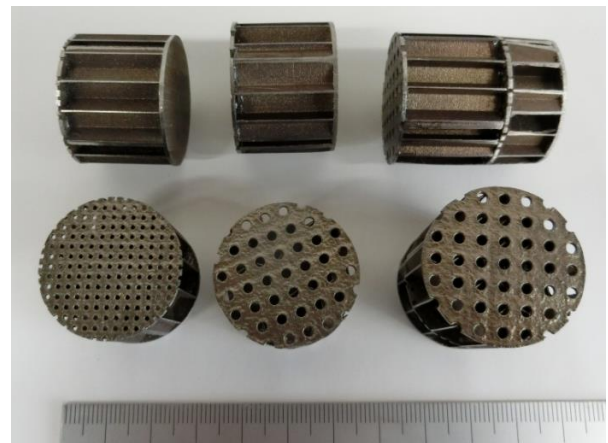


図13 金属用AMで造形した吸音パネル試験片 (マルエージング鋼製)

3. 試験結果

3.1 大型パネルの残響室による音響試験の結果

ブラスト加工で製作したCFRP多孔板を接着し1m角の吸音パネルを接着組立して、残響室にて、吸音率等を測定した結果、以下の結果が得られた。

試作した1m角の吸音パネルに床との間の外周に粘土を敷設したものは、吸音性能を発揮し、吸音のピーク周波数は1600Hz、最大吸音率 0.51という結果が得られた(図14)。

次に、比較のために同じ吸音パネルで粘土を敷設しない場合では、吸音ピーク周波数1600-2000Hzとなり、最大吸音率0.54であった(図15)。ピーク周波数帯がやや広くなり、吸音性能が粘土敷設に比べて僅かに高い結果であった。これは、材料端部や床との隙間に音が入りこみ、そこで吸音する影響が出たためと考えられる。さらに、孔無しCFRPサンドイッチパネル22mm tは、吸音パネルではないが、非常

に僅かながら吸音性能が認められたが、明確な吸音のピークはなく、最大吸音率は0.15程度であった(図16)。なお、通常は2㎡くらいの試験体面積で測定するところ、今回は半分の1㎡で測定したため、面積効果の影響により、絶対値から少し吸音率の値がずれている可能性がある。

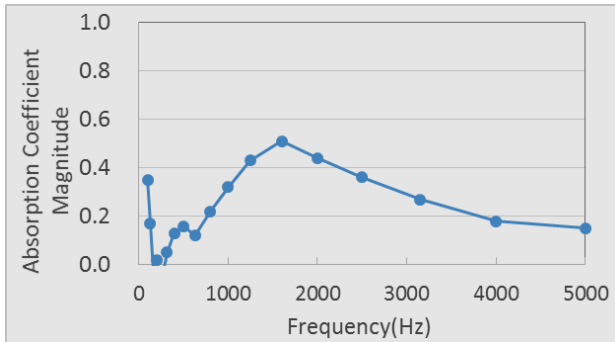


図14 音響解析結果(吸音パネル21mm t粘土有り) 吸音ピーク周波数1600Hz、最大吸音率0.51

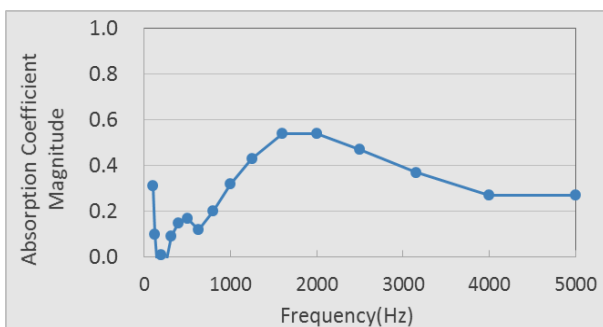


図15 音響解析結果(吸音パネル21mm t粘土無) 吸音ピーク周波数1600-2000Hz 最大吸音率0.54

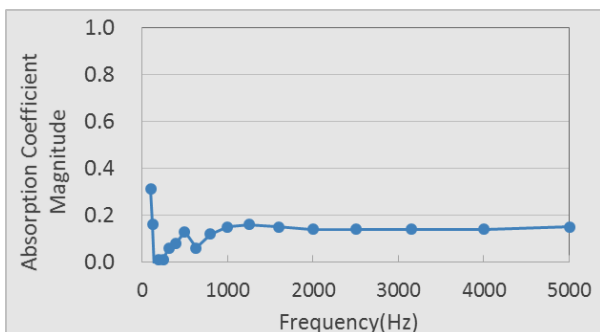


図16 音響解析結果(CFRP サンドイッチパネル孔無、22mm t粘土無)、最大吸音率0.15

3. 2 AMによる寸法形状の評価結果

AMによる造形品の寸法測定を行った結果を図17、18に示す。樹脂・金属双方とも、ほぼ要求値に近い外形寸法が得られたが、ハニカムコアのフランジ厚は目標0.3mmに対し、樹脂では0.35-0.4mmに、金属では0.32~0.35mmと目標より厚めにできてお

り、これ以上薄くすることは難しいとのメーカーからの回答で、現状のAM造型機の限界と考えられる。平板の板厚は樹脂では目標の1.0mmに対して近い値1.00~1.03mmにできたのに対して、金属では0.75~0.87mmとやや薄い結果となった。また孔径2mmと1mm径に対しては、双方とも±0.2mm以内ではらつきが生じた。なお、金属造形では、多孔板に僅かな反りが見られたが、これはサポート材と造形品を放電加工により剥がす際に生じた。

	平均寸法	板厚	最大径	最小径	ハニカムセル	ハニカム長	直径			
①	孔板(2mm径)	1.03	2.18	2.04	なし	なし	28.78			
②	孔板(1mm径)	1.03	1.12	0.96	なし	なし	28.81			
③	長ハニカム付孔無板	1.00	なし	なし	0.34	19.99	29.05			
④	短ハニカム付孔無板	1.01	なし	なし	0.33	10.06	29.13			
⑤	長ハニカム付小孔板	1.00	なし	なし	0.35	20.01	29.13			

	平均寸法	孔板厚	孔板直径	長ハニカムセル厚	短ハニカムセル厚	孔無し板厚	孔無し板径	板中央径	板中央厚	ハニカム長
⑥	パターンA完成品	0.99	28.85	0.36	なし	0.99	28.85	なし	なし	19.93
⑦	パターンB完成品	0.98	28.87	0.46	なし	1.01	28.91	なし	なし	19.96
⑧	パターンC完成品	1.03		0.41	0.41	1.02	28.92	0.97	28.87	29.80

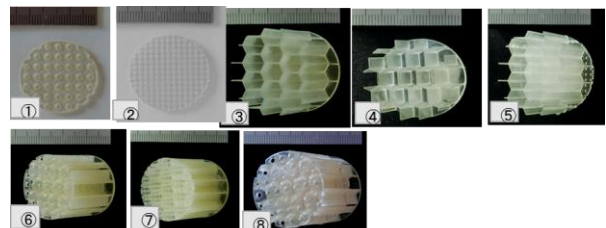


図17 AM造形後の寸法測定結果(樹脂)

		板厚	孔径	最大	最小	ハニカムコアフランジ厚	ハニカムコア高さ	ハニカムコア高さ	全体径
①	金属・多孔板(2mm径)	0.87	表裏	1.93 2.05	1.88 1.89	なし	なし	なし	28.94
②	金属・多孔板(1mm径)	0.85	表裏	0.96 1.16	0.89 1.09	なし	なし	なし	29.01
③	金属・長ハニカム付板	0.75		なし	なし	0.32	20.95	20.20	29.02
④	金属・短ハニカム付板	0.75		なし	なし	0.35	10.94	10.20	28.98
⑤	金属・ハニカム単体	なし		なし	なし	0.33	なし	19.99	なし

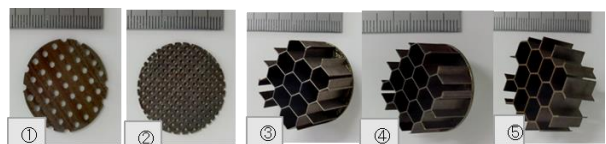


図18 AM造形後の寸法測定結果(金属)

3. 3 AM造形品の吸音率測定結果

AMにより造形した試験片は、すべてインピーダンスチューブによる吸音率測定試験を行ない、吸音率とピーク周波数を測定した。この結果から、吸音

率のピーク周波数と吸音率の関係をグラフ化したものの一部を示す。図19、20は樹脂造形品、図21、22は金属造形品で、孔径がそれぞれ1mmと2mmの場合では、最大吸音率およびピーク周波数において、大きな差は見られなかった。一方、2段構造であるセプタムでは、吸音率とピーク周波数が高くなり、特に樹脂成形品のセプタムでは最大級音率0.9でピーク周波数5000Hzという結果が得られた(図23、24)。一方、これらAM造形品と比べて、ブラスト加工と接着で作ったCFRP製吸音パネルで、1m角の大型パネルと同じ方法で製作した板から切出したものの測定を行った結果を図25に示す。AM造形品と比較すると吸音のピーク周波数が2500Hzとやや低い傾向となったが、吸音率に大きな差はなかった。

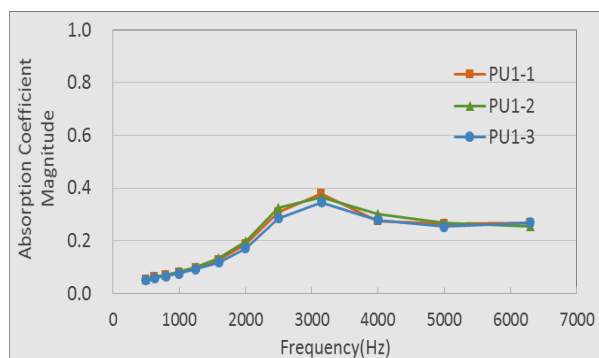


図 1 9 AM造形品(樹脂:孔径 1mm、コア長 20mm)

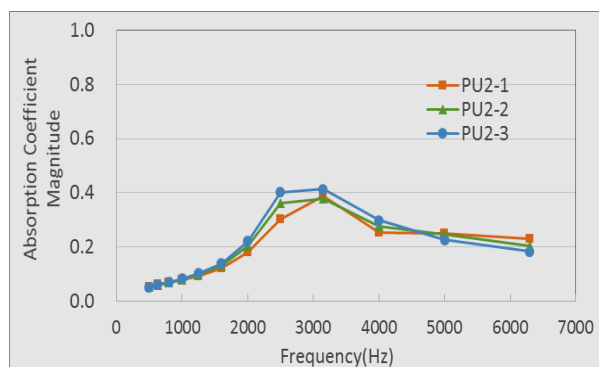


図 2 0 AM造形品(樹脂:孔径 2mm、コア長 20mm)

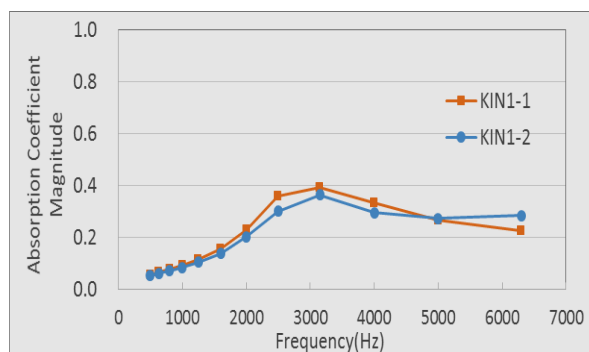


図 2 1 AM造形品(金属:孔径 1mm、コア長 20mm)

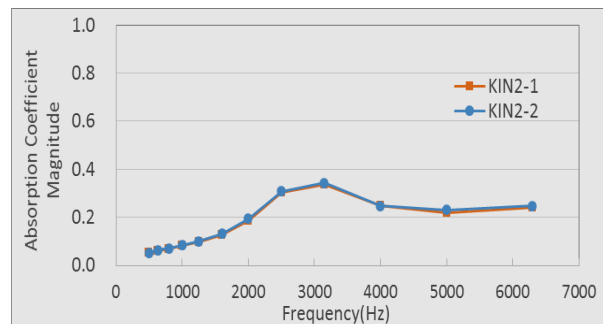


図 2 2 AM造形品(金属:孔径 2mm、コア長 20mm)

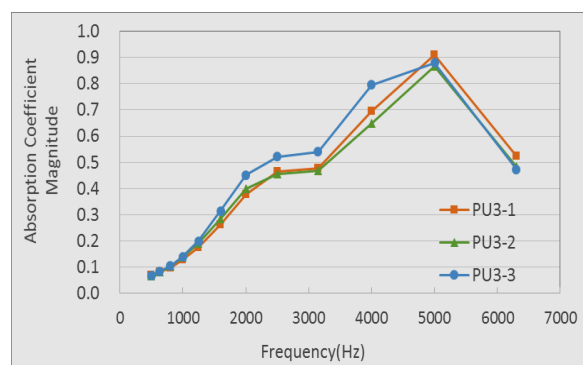


図 2 3 AM造形品(樹脂:孔径 2mm、コア長 20mm+孔径 1mm、コア長 10mm、セプタム)

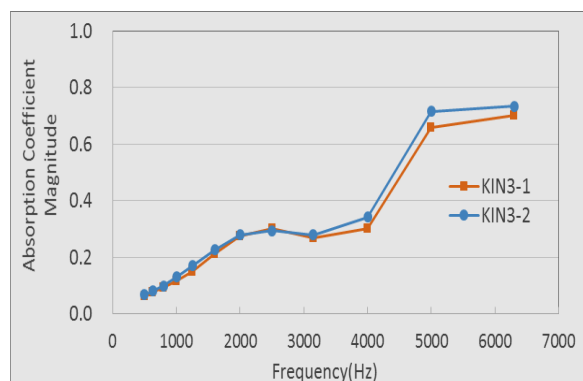


図 2 4 AM造形品(金属:孔径 2mm、コア長 20mm+孔径 1mm、コア長 10mm、セプタム)

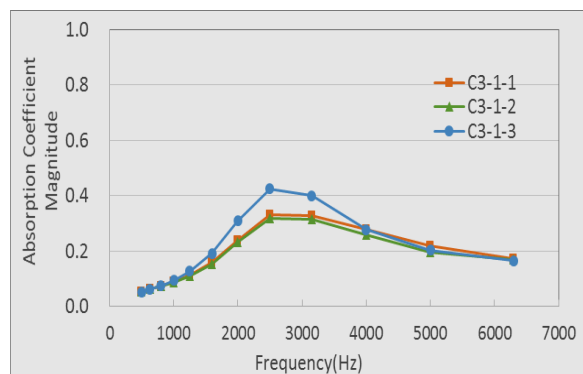


図 2 5 CFRP製吸音パネル、大型パネルからの切出し品(孔径 2mm、コア長 20mm)

4. 考察

ヘルムホルツ型共鳴器は、細い孔のあいた板の背後に空洞部が配置された器官である。孔部分の空気が質量、空洞部の空気がバネの役割をした振動系を構成し、この固有振動数と同じ周波数の音が入射したとき共鳴して、孔部分の粘性摩擦で音が摩擦熱に換することで減衰する。多孔板とハニカム構造の組合せは、ヘルムホルツ共鳴器を複数組込んだ共鳴器型吸音パネルで、吸音パネルの吸音率は、共鳴器のサイズや孔部分の粘性抵抗値などの要因で決まる。

しかし、孔部分の粘性抵抗値を正確に算出するのは困難であり、音響インピーダンス測定で実験的に求め、吸音率を予測計算して、周波数と垂直入射吸音率の関係は解析ソフトを使って計算される。

ここで、多孔板の半径を r 、孔面積を $s(=\pi r^2)$ 、孔ピッチを b 、多孔板の厚みを h 、空洞部すなわちハニカムコア部の厚さを d 、音速を C とすると、開口率 β は(1)式で、共鳴周波数 f は(2)式のように簡易的に表される⁹⁾。

$$\beta = \pi r^2 / b^2 \quad (1)$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta}{\{h + (\pi/2)r\}d}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

(1)(2)式に、今回試作した吸音パネルの寸法を入力すると、開口率 $\beta = 3.14 \times 1/16 = 0.19625$ 、周波数 $f = 340 \times 103 / (2 \times 3.14) \sqrt{0.19625 / (\{1 + (3.14/2)1\}20)} = 3345 \text{Hz}$ となり、インピーダンスチューブ試験で得られた結果である 2500~3000Hz の周波数帯と近い結果であった。実際には、僅かな孔径誤差や計算上の開口率と実際の試験片の工作上的誤差、および測定時にできる鉄管と試験片との僅かな隙間の程度などによる誤差が生じた可能性が考えられる。

一方で、別手法である残響室で測定した結果である共鳴周波数が 1600Hz~2000Hz 前後と比べると、大きな差が生じた。しかし、吸音率は 0.51 と比較的良好な値が得られており、吸音性能は充分発揮している。通常は 2 m² の吸音構造を設置して測定することが推奨されているが、今回用意できた CFRP 製吸音パネルは 1 m² であったため、ピーク周波数帯が低い方向にシフトした可能性などが考えられる。

次に、インピーダンス試験片を製作する上で、通常方法では孔加工やハニカムコアとの 2 回の接着工程、さらに NC 機械加工による試験片の切出し、仕上げなどの手間隙を考えると、最低でも数週間の日程を要する。これに対して、AM 造形法を用いる場合は、3D モデルと造形機さえあれば、2-3 日で充

分造形ができ、仕上げも殆ど必要ない。成形品の寸法誤差は多少生じるが、吸音性能の結果に大きな差は生じなかった。このことから考えると、今後さらに AM 技術が発達すれば、各種の音響性能試験片、とりわけ複雑構造のものを作る上で、形状的比較評価をするため、充分この手法が適用できると考える。

ただし、CFRP 製のような高強度で軽量な材質をそのまま造形するまでには至ってはいないため、あくまで形状的な比較評価シミュレーションレベルとして利用できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究により以下の事項が明らかとなった。

- 1) CFRP 板にブラスト加工した多孔板を用いた 1m 角の大型吸音パネルを作り、無響室にて吸音率を測定した結果、吸音ピーク周波数 1600Hz、最大吸音率 0.51 である吸音性能を得ることができた。
- 2) 直入射吸音率測定用の円筒形状の試験片切出し、垂直入射吸音率(インピーダンスチューブ)測定用装置で測定した結果、吸音ピーク周波数 2500Hz、最大吸音率約 0.4 の結果であった。
- 3) 樹脂ならびに金属の AM 造形機を用いて多孔板とハニカム造形で吸音試験片を模した造形品を製作し、寸法精度を評価した結果、縦フランジを「薄くつくる限界が約 0.35mm で、孔径や平面板厚の精度は、 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であった。
- 4) AM 造形で試作した、吸音構造でも、音響インピーダンスを測定でき、実際のハニカム接着構造と比べた結果、ピーク周波数のずれは僅かに起きたものの、吸音率に大きな差は見られなかった。

6. 参考文献

- 1) H.FUKAGAWA, T.HIROGAKI, T.KATO: Development of Hole Generation Technologies for Aircraft CFRP Parts, Key Engineering Materials, vols.523-524 (2012) pp.226-231.
- 2) 深川,西川,市川,廣垣;航空機エンジン用 CFRP 製吸音パネルのブラスト加工による試作,飛行機シンポジウム(2015)3C06
- 3) 深川,市川,川島;ブラストを用いた CFRP 製吸音パネルの試作と吸音性能の評価,飛行機シンポジウム(2017)3F07
- 4) JISA1405-2 2007 (ISO 10534-2: 1998) 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定-第 2 部: 伝達関数法
- 5) 一宮亮一;わかりやすい静音化技術,森北出版(2011) pp188-189