アイソグリッドで補強されたCFRP円筒殻の開発

日大生産工(院) ○岸谷 直美, 日大生産工(院) 竿尾 周太郎 日大生産工 邉 吾一

1. 緒言

アイソグリッド構造とは,正三角形の格子状 の補強材とごく薄い表面層からなる,軽量かつ 高剛性な軽量薄肉構造で,主に軽量化と強度が 要求される航空宇宙分野で用いられている.ア イソグリッド構造を用いた金属製の円筒殻を形 成するには,まず厚板から補強材となる部分を 残し,薄板になるまで削り出しを行う.その際, 材料の大部分を削りださなければならない.さ らにそのアイソグリッドを有した薄板を円弧 状に曲げ加工を施し,それらを溶接して円筒殻 を形成する.このように金属材料でアイソグリ ッド構造を形成すると,材料の使用効率が悪く, 製造工程が多い.加えて接合工程を要するため に,接合部で強度的に不安定になることが懸念 される.

著者らは比強度・比剛性に優れた炭素繊維強 化プラスチック(CFRP)を用いて、CFRPアイ ソグリッド円筒殻の一体成形技術の開発を行な った¹⁾.本報告では、CFRPアイソグリッド円筒 殻の静的軸圧縮試験を行い、補強効果を確認し、 その圧縮特性の評価を行うと共に、FEM解析の 結果と実験との比較・検討を行なった.

2. 成形

2-1 型の製作

アイソグリッドの格子状に溝が彫られている 金型を用意した.正三角形の頂点となる交差点 は、2つの斜め方向(円筒殻ではヘリカル方向) と水平方向(円筒殻ではマープ方向)の3方向か らの交差となり、繊維を積層すると、その部分 だけ他の補強材と比べて厚みが3倍となり、応力 集中の原因となる.そのため、水平方向の溝を 交差部から微少量ずらしてオフセット部を設け、 補強材の厚みが極端に増すことを防いだ²⁾. この金型の溝と同じ幅のプラスチック棒を溝に はめ込み、金型をオス型にした.このオス型 にシリコーンゴムを流し、幅2mm、深さ3mm でアイソグリッドの溝を持つシリコーンゴムの メス型を製作した.シリコーンゴム型は,アイ ソグリッド円筒殻を金型全体の大きさよりも大 きく成形するために,4つの菱型をつなぎ合わせ て1枚とした(Fig.1).

2-2 成形

Filament Winding 装置を用いて成形した.マ ンドレルに先ほどのシリコーンゴム型を巻きつ け,斜めの溝に沿ってシリコーンゴムを突き合わ せた後ネジで固定した.シリコーンゴム型の両側 には,成形時に繊維をガイドするためのガイドピ ンを設けた.材料は,あらかじめ樹脂の含浸され ている一方向炭素繊維トウプレグを用いた.

まずアイソグリッド円筒殻の補強材となる部分 から成形した. 繊維は溝に沿ってヘリカル方向と フープ方向を交互に積層し6plyした. 続けて表面 層を成形した. 表面層は,型の上から補強材と一 緒に巻いて,厚さは2plyとした(Fig.2). 表面層の フィラメントの巻き角は90°(周巻き)と60°の2通 りとした.

補強材と表面層を巻き終えたら,130℃,1時間 で硬化させた.今回この硬化過程において真空 引きを行ないながら加熱させた真空熱成形を施 した試験体も成形し,後の静的軸圧縮試験の試 験体とした.マンドレルから硬化した円筒殻を シリコーン型ごと脱型し,円筒殻の内側からシ リコーン型を取り外した.

成形品は、シリコーン型の合わせ継ぎ目をヘリ カル方向の溝に沿わせたことで、継ぎ目の無い CFRPアイソグリッド円筒殻を成形することが できた(Fig.3(a)(b)).



Fig.1 Silicone Robber Fig.2 Filament Winding Mold Process

Development of CFRP Cylindrical Shell Reinforced with Isogrid Naomi KISHITANI, Syutaro SAO, and Goichi BEN





Fig.3 (a) CFRP Isogrid Cylindrical shell

(b) Inside of Isogrid Cylindrical shell

2-3 成形品

以下に示す6タイプを成形した.

①アイソグリッドで補強された表面層の巻き 角が90°のCFRPアイソグリッド円筒殻(以下' Iso-90'), ②アイソグリッドで補強された表面 層の巻き角が60°のCFRPアイソグリッド円筒殻 (以下'Iso-60'), ③補強材のない表面層の巻 き角が90°のCFRP円筒殻(以下'Non-90'),
④補強材のない表面層の巻き角が60°のCFRP円筒殻(以下'Non-60'), ⑤アイソグリッド単体(以下'Isogrid'), ⑥真空熱成形を施した, 表面層の巻き角が90°のCFRPアイソグリッド円 筒殻(以下'Iso-90vt'). それぞれの寸法平均 値をTable1に示す.

Table1 Average Size for Test Specimens

	Stiffened		Non-stiffened		Stiffener
	Iso-90	Iso-60	Non-90	Non-60	Isogrid
Winding Angle of Skin	90°	60°	90°	60°	
Shell Length/mm	137.5	135.1	139.0	138.4	137.8
Diameter/mm	108.5	110.8	110.0	110.4	106.3
Plate Thickness/mm	0.8	0.6	0.9	0.7	
Stiffener Width/mm	2.0	2.2			2.3
Stiffener Hight/mm	2.5	3.2		-	2.0

3. 成形品の評価

3-1 超音波探傷試験

真空熱成形を施した試験体と,そうでない試 験体について,内部欠陥を比較するために超音 波探傷試験を行なった.試験対象は 2-3 におけ る①,⑥として比較した.試験はJIS K 7090 に 準拠して試験体内部に円筒形の反射板を設置し, 表面エコー監視を行う反射板法とした.水平距 離は18mm,感度は36dB,データ採取ピッチは 0.5°×15mmとした.

探傷結果をFig.4(a)(b)に、その色面積率をTable 2に示す.表面エコーレベルが低い箇所では円筒 殻内部における接着不良、または剥離が存在す ると考えられ、Iso-90はIso-90vtよりもエコーレ ベルの低い割合が高いことが示されている.80 %以下のエコーレベルの割合についてIso-90は 94.6%, Iso-90vtは26.4%となり, Iso-90vtはIso-90 の70%以上低い値になった. このことから真空 熱成形が,内部欠陥を減少させるために有用で あるということが示された.



(a) Iso-90 (b) Iso-90vt Fig.4 Comparison of echo level

Table2	Comparison	of	Color	Ratio
	of Iso-90 and	l Isc	90vt	

ratio of color	Iso-90 (%)	Iso-90vt (%)
100%	5.4	73.6
80%	11.6	10.3
60%	29.8	6.1
50%	21.5	2.3
0%	31.7	7.8

3-2 真円度測定

真円度測定を行なった.真円度は,円形部分 の円からの狂いの大きさをいい,円形部分を二 つの同心円ではさんだときの,両円の間の領域 が最小となる場合の半径の差で表す.測定箇所 は周方向を12点/360°で,またFig.6に示すように 試験体の標点間を軸方向に5箇所測定した.測定 結果をTable 3に示す.真空熱成形を行なった Iso-90vtの値は,真空引きをせずに熱硬化させた Iso-90の値の約3倍となっている.これは成形時 にマンドレルに巻きつけているシリコーン型の 剛性が低く,真空引きにより変形しためである と考えられる.



Fig.6 Locations of Measuring Roundness

Table3 Average of Roundness for Iso-90and Iso-90vt

	Roundness / mm
Iso-90	1.10
Iso-90vt	3.33

3-3 成形品の圧縮特性

真空引きの強度に与える影響を確認するため, 使用材料であるトウプレグで4plyの[904]積層板 を成形し,静的圧縮試験を行なった.試験片寸 法をFig.5に示す.硬化の際に真空引きを行なっ た試験片(以下"V-T試験片")と真空引きを行 なわなかった試験片(以下"Non-V試験片") を用意した.試験はタブの部分を完全に拘束で きるチャックではさみ,静的圧縮冶具内に設置 し,オートグラフを用いて,試験速度1mm/min で行なった.

試験結果をFig.6に示す. Non-V試験片の弾性 率は、V-T試験片とほぼ同じであることがわかる. しかしその極限応力は、半分以下という値を示 した.このことから真空熱成形を行なうことで、 試験体の強度向上に寄与できると考えられる.



Fig.5 Specimen Size for Compression Test

Table 4	Comparison	for V-T	and Non-V
I duic T	Combanson	$101 \ y = 1$	and 1 von v

V-T		Non-V		
E (GPa)	σ max (MPa)	E (GPa)	σ max (MPa)	
94	125	98	64	
95	123	88	66	

4. 静的軸圧縮試験

試験機はオートグラフを使用し、球座式圧盤 を用いて試験体に荷重が均等にかかるようにした. 試験体端部はGFRPで補強し、端部割れを防いだ. CFRP円筒殻には、ひずみゲージを表面層の180°対称な位置に直交ゲージを2つ、CFRPア イソグリッド円筒殻には、さらに内部の補強材 に単軸のゲージを5つ貼付した(Fig.6). Isogridに は内表面に単軸のゲージを9つ貼付した. 付加速 度は0.5mm/minとした.

4-1 CFRPアイソグリッド円筒殻

Iso-90とNon-90, Iso-60とNon-60の, それぞれ3 体ずつ試験結果をFig.7, Fig.8に示す. Iso-90と Non-90の荷重は, どちらも線形的に上がってい き最大荷重に達した後, 著しく低下した. Iso-60 とNon-60も90°巻きと同様に、初めは線形的に荷 重が上がっていった.しかし最大荷重に達した 後、急激に下がることはなく、徐々に下がって いくという挙動を示した.また補強材のある CFRPアイソグリッド円筒殻は荷重低下後、補強 材のないCFRP円筒殻の最大荷重付近の値を維 持し続けている.以上のことから、CFRPアイソ グリッド円筒殻は初期破壊後、荷重は低下する が、その値はCFRP円筒殻だけの荷重レベルで、 その後最終破壊に至ったと考えられる.



Fig.6 Location of strain gages







of Iso-60° and Non-60°

4-2 アイソグリッド

アイソグリッド単体での試験結果とIso-60・ Non-60を比較すると, Iso-60及びNon-60と同様に, 初めは線形的に荷重が上がり,最大荷重に達し た後,徐々に下がっていくという挙動を示した (Fig.9). Iso-90とNon-90, Iso-60とNon-60との最 大荷重の比較をTable5に示す.いずれも,グラ フに挙げた3体ずつの試験結果の平均値である. 90°巻きと60°巻きのいずれも、補強材のない 円筒殻(Non-90とNon-60)の最大荷重と補強材だ けのIsogridの最大荷重との和は、補強材を有す る円筒殻(Iso-90とIso-60)の最大荷重よりも小さ い値を示し、IsogridによるCFRP円筒殻の補強効 果を示した.



Fig.9 Load-Displacement Curves for Isogrid

Table5 Comparative Table for Maximum

	Non (kN)	Isogrid (kN)	Stiffened (kN)
90	14.5	0.6	37.8
60	13.9	9.0	30.7

4-3 破壊様相

Iso-90の破壊は、まずオフセット部で起こり、 その荷重が著しく低下し、しかし表面層は破壊 に至っていないため、その後もある程度の荷重 を維持し続けたと考えられる.最終的には、周 方向に亀裂が入り全体の形状が変形した.

Iso-60についても同様のことが言えるが、これ は荷重を加え続けると、円筒殻内側に向かって 凹変形を起こした.しかし除荷後は元の形状に 戻ったことから、弾性座屈を起こしたと考えら れる.この弾性変形は、Non-60及びIsogridも同 様に起こった(Fig.10(a)(b)).Isogridは、周方向の 補強材に挟まれたヘリカル方向の補強材が外側 に向かって凸変形し、最終的にオフセット部で 剥離を起こし破断した.





(a) Non-60 (b) Isogrid Fig.10 Buckling Deformation

Iso-90とIso-60及びIsogridにおいて、オフセッ ト部での剥離及び破断が観察された(Fig.11). そ のため、更なる接着強度の向上を図る必要があ る.



Fig.11 Delamination at the Offset Point

5. 結言

FW装置を用いることによってCFRPアイソグ リッド円筒殻を一体成形することができた.成形 品は、型の継ぎ目を溝に沿わせたことで、型の 継ぎ目部の影響の少ないCFRPアイソグリッド 円筒殻を成形することができた.

また、アイソグリッドで補強されたCFRP円筒 殻の静的軸圧縮試験を行い、補強効果を確認した. 併せてアイソグリッド単体の軸圧縮試験を行っ たことで、CFRPアイソグリッド円筒殻の強度が、 アイソグリッド単体の強度とCFRP円筒殻の強度 を併せた値よりも高いことを示した.

超音波探傷試験を行ない、内部欠陥を確認した. また、真空熱成形を行なったCFRPアイソグリッ ド円筒殻と比較したことで真空熱成形が内部欠 陥の減少に有効であることがわかった.

真円度測定を行なった.真空熱成形を行なった CFRPアイソグリッド円筒殻と比較したところ, 真空熱成形を行なった試験体には,成形時のシリ コーン型の剛性の影響が顕著に現れてしまうこ とが明らかとなった.

今後は、真空熱成形を行なったCFRPアイソグ リッド円筒殻を用いた静的軸圧縮試験を行ない、 真空引きが強度に及ぼす影響を確認する必要が ある.

[謝辞]

真円度測定にご助言とご指導をいただいた千 葉産業技術支援研究所の方々に、そして超音波 探傷にご助言とご指導いただいた株式会社ジー ネスの方々に感謝の意を表します.また,カー ボントウプレグを提供して頂いた三菱レイヨン 株式会社西本様に感謝の意を表します.

「参考文献」

- 岸谷, 竿尾, 邉:第49回構造強度に関する講演会講演集, 2007年, pp157-159
- Thomas D. Kim : Composite Structure 49, (2000), 21-25