

アイソグリッドCFRP円筒殻の圧縮特性

日大生産工(院) ○荻野 智彦

日大生産工 邊 吾一

1. 緒言

アイソグリッド構造とは、三角形の格子状の補強材と表板から構成されており、軽量化と強度が要求されるロケット胴体など、主に航空宇宙分野に用いられている軽量薄肉構造である。ロケット燃料タンクなどアイソグリッド構造を用いた円筒殻を形成するには、まず厚板のAL合金から正三角形の格子状補強材を残して、薄板になるまで削り出しを行なう。その後、平板を円弧形状に曲げ、それらを溶接して円筒殻を形成している。

このアイソグリッド構造を金属材料で作る場合、材料の大部分を削り出さなければならず、また溶接などによる接合が必要となり、接合部で強度的に不安定になることが考えられる。そこで本研究では、比強度・比剛性に優れた炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)を用いて、アイソグリッドCFRP円筒殻の一体成形技術の開発を目的とする。また、静的軸圧縮試験を行ない、補強効果を確認し、その圧縮特性の評価を行なう。

2. 成形方法

2.1 型の製作

アイソグリッド円筒殻を成形するための金型をFig.1に示す。金型の寸法は、縦193mm、横314mmである。金型にはアイソグリッドの格子状に溝が彫っており、その寸法は幅2mm、深さ3mmである。

また、金型の水平方向(円筒殻ではフープ方向)の溝を少しずらして、オフセット部を設けた。補強材となるフープ方向と2本の斜め方向(円筒殻ではヘリカル方向)の繊維が交差する部分は、他より多く繊維が積層されるため、厚みが増してしまい応力集中の原因となる。そこで補強材が交差する点をオフセットさせることによって、補強材の厚みが増すことを防ぐ¹⁾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オス型を製作した。このオス型にシリコン(信越化学工業(株)製KE-1414)を流し、アイソグリッドの溝を持つシリコンのメス型を製作した(Fig.2)。シリコン型の溝の寸法は幅2mm、深さ3mmである。

シリコン型の両端は、ヘリカル方向の溝部分に継ぎ目がくるようにし、また型を固定するための穴をあらかじめ開けて成形した。

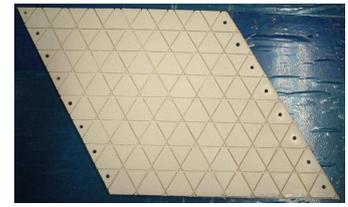
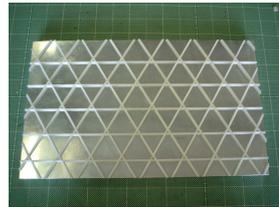


Fig.1 Aluminum Isogrid Mold

Fig.2 Silicon Rubber Mold

2.2 成形

シリコン型を固定させたマンドレルをFig.3に示す。マンドレルは直径90mmのアルミパイプで、両側にはガイドピンを設けた。ガイドピンは、マンドレルの外側からネジを入れ、周方向に等間隔に並べたもので成形時に繊維をガイドするために使用した。

アイソグリッド円筒殻はFW(Filament Winding)装置を用いて成形した。材料には、一方向炭素繊維トウプレグを使用した。



Fig.3 Mandrel Covered with Silicon Rubber Mold

まず始めにアイソグリッド円筒殻の補強材となる部分を成形する。補強材はフープ方向とヘリカル方向から構成されており、シリコン型の溝にヘリカル方向、フープ方向の順に交互に繊維を積層していき、補強材を成形する。型の溝は、ヘリカル方向を6プライ、フープ方向を6プライし終えたとき、繊維で満たされた。

補強材が成形されたら、次に表板を成形する。表板は、固定していたネジを外し、型の上から補強材と一緒に巻いていき、2プライした(Fig.4)。表板の積層は、巻き角を90°と60°の2通りで行なった。

Compressive Property of Isogrid CFRP Cylindrical Shell

Tomohiro OGINO and Goichi BEN

補強材と表板が巻き終わったら、硬化炉で 130℃、1 時間で硬化させて、脱型する。脱型は、まずマンドレルに設けたガイドピンを取り外し、マンドレルから硬化した円筒殻を脱型する。次に、円筒殻の内側からシリコン型を取り外す。成形品を Fig.5 に示すが、右側の図は軸方向に 2 分割した一方の断面である。また成形品の寸法を Table.1 に示す。

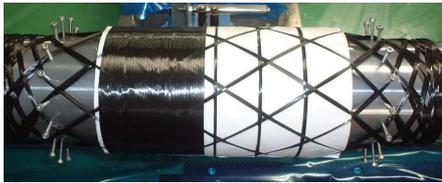


Fig.4 Filament Winding of Isogrid Cylindrical Shell



Fig.5 Whole and Half Section of Cured Isogrid Cylindrical Shell

Table.1 Dimension of Isogrid Cylindrical Shell

Winding Angle of Skin (°)	90	60
Shell Length (mm)	137.5	135.1
Inner Diameter (mm)	108.5	110.8
Plate Thickness (mm)	0.8	0.6
Stiffener Width (mm)	2.0	2.2
Stiffener Height (mm)	2.5	2.2

3. 圧縮試験

アイソグリッド CFRP 円筒殻を用いて、静的軸圧縮試験を行なった。試験は、アイソグリッドで補強された円筒殻(表板の巻き角が 90° のものを Isogrid90°、60° のものを Isogrid60° とする)と補強されていない円筒殻(巻き角が 90° のものを Non-isogrid90°、60° のものを Non-isogrid60° とする)を比較し、補強効果を確認する。試験機にはオートグラフを使用し、圧縮試験用の球座式圧盤を用いて、試験片に均一に負荷をかけられるようにした。また、端部割れ防止のために試験片端部を外側から GFRP で補強した。ひずみは、試験片外面の胴部に 2 軸ゲージを 180° 対称に 2 箇所、またアイソグリッド円筒殻の補強材には Fig.6 に示した位置に 1 軸ゲージを 5 ヶ所貼り測定した。負荷速度は 0.5mm/min とした。なお試験片の Vf は 72% である。

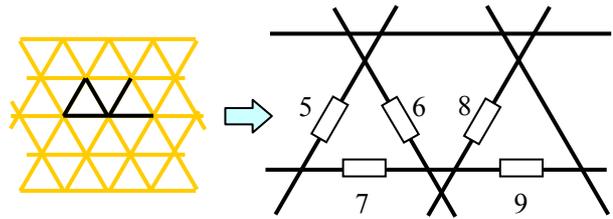


Fig.6 Location of strain gages

4. 試験結果

Isogrid90° および Non-isogrid90° 円筒殻の圧縮試験結果を Table.2 に示す。荷重はどちらも線形的に上がっていき、最大荷重に達すると著しく低下した。Non-isogrid90° 円筒殻の場合、荷重はほぼゼロまで低下したが、Isogrid90° 円筒殻はある程度の荷重を維持し続けた(Fig.7)。Table.2 に示すように最大荷重を比較すると、Isogrid90° 円筒殻は Non-isogrid90° 円筒殻の約 2.6 倍高い値を示した。

次に Isogrid60° および Non-isogrid60° 円筒殻の試験結果を Table.3 に示す。荷重は 90° 巻き同様、線形的に上がっていったが、最大荷重に達した後徐々に低下していく挙動を示し、ある程度の荷重を維持し続けた(Fig.8)。Table.3 に示すように最大荷重を比較すると、Isogrid60° 円筒殻は Non-isogrid60° 円筒殻の約 2.2 倍高い値を示した。

試験片胴部における荷重 - ひずみ線図を Fig.9, Fig.10 に示す。試験片外面に貼付したひずみゲージは格子に囲まれた表板の中央に位置している。軸方向のひずみを比較すると、90° 巻き、60° 巻きのどちらの場合も、最大ひずみは Isogrid 円筒殻と Non-isogrid 円筒殻では、ほぼ等しい値を示していた。Isogrid 円筒殻は、内側に補強材があることによって、荷重の多くを補強材が受け持っていると言えるが、表板が破壊に至るひずみ、つまり Non-isogrid 円筒殻の最大ひずみに達すると Isogrid 円筒殻も荷重が大きく低下し始めている。このことから Isogrid 円筒殻の最大ひずみは表板に依存していることが考えられる。

次に補強材における荷重 - ひずみ線図を Fig.11, Fig.12 に示す。ヘリカル方向の補強材のひずみ(5ch, 6ch, 8ch)は圧縮荷重によって圧縮ひずみを示し、いずれも同様な傾向を示した。逆に、フープ方向の補強材のひずみ(7ch, 9ch)は引張ひずみを示した。

また Table.4 に示すように、アイソグリッドで補強された円筒殻は、表板を 90° 巻きした場合、60° 巻きした場合共に、補強されていない円筒殻に比べ、最大応力、ヤング率とも高い値を示し、補強効果を確認することができた。なお、Isogrid CFRP 円筒殻の断面積は軸方向に対して不連続であるため、ここで

は破壊箇所の表板と補強材の断面積(※1)で求めた場合と、表板のみの断面積(※2)で求めた場合の2通りで評価した。

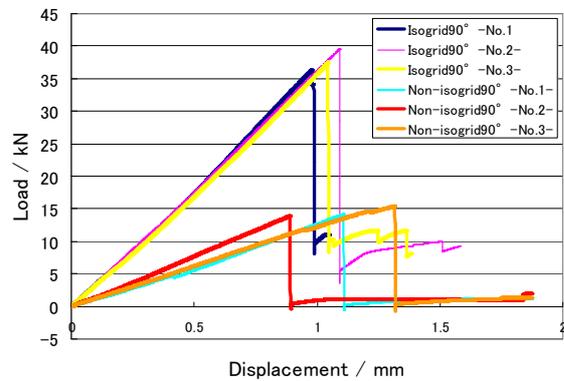


Fig.7 Load-Displacement Curve
(Isogrid90° and Non-isogrid90°)

Table.2 Comparisons of Maximum Load
(Isogrid90° and Non-isogrid90°)

	Maximum load (kN)	
	Isogrid90°	Non-isogrid90°
No.1	36.3	14.2
No.2	39.6	13.9
No.3	37.5	15.4
Ave.	37.8	14.5

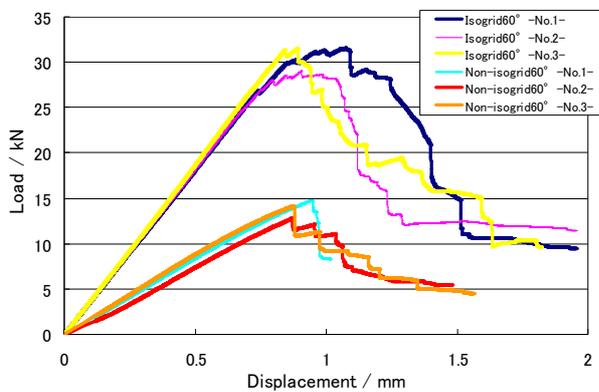


Fig.8 Load-Displacement Curve
(Isogrid60° and Non-isogrid60°)

Table.3 Comparisons of Maximum Load
(Isogrid60° and Non-isogrid60°)

	Maximum Load (kN)	
	Isogrid60°	Non-isogrid60°
No.1	31.5	14.8
No.2	29.0	12.8
No.3	31.5	14.2
Ave.	30.7	13.9

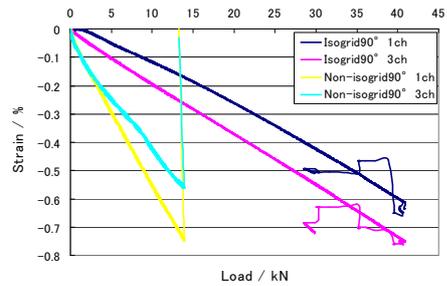


Fig.9 Load-Strain Curve in Axial Direction
(Isogrid90° and Non-isogrid90°)

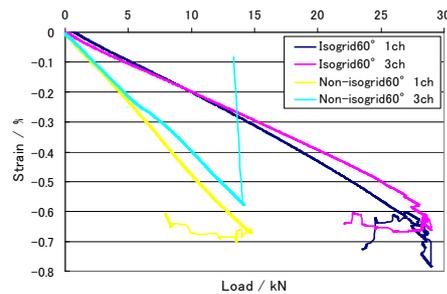


Fig.10 Load-Strain Curve in Axial Direction
(Isogrid60° and Non-isogrid60°)

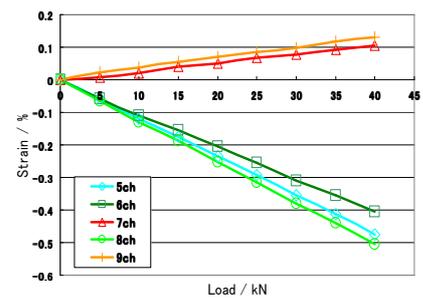


Fig.11 Load-Strain Curve (Stiffeners of Isogrid90° Shell)

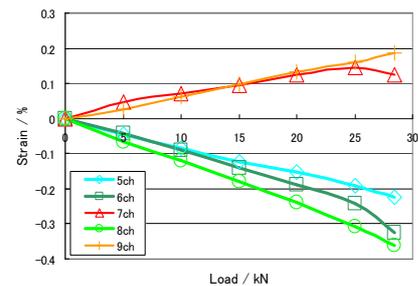


Fig.12 Load-Strain Curve (Stiffeners of Isogrid60° Shell)

Table.4 Results of Compression Test

	Cross Section (mm ²)	Maximum Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Non-isogrid90°	295.9	49.0	8.6
Isogrid90°	355.2※1	99.1	16.4
	275.8※2	127.6	21.2
Non-isogrid60°	247.6	56.2	11.3
Isogrid60°	330.7※1	93.3	15
	232.3※2	133.5	21.2

(※1 Thin plate + Stiffeners ※2 Thin plate)

5. 破壊様相

Isogrid90° 円筒殻の場合、まずヘリカル方向の補強材が交差するオフセット部で破壊が起きたと考えられ、これにより荷重が大きく低下したと考えられる (Fig.13)。しかし、損傷していない補強材もあるため、その後もある程度の荷重を維持し続けたと言える。最終的に表板に周方向にき裂が入り、形状が大きく変形した。以上のことから、本体を 90° 巻きした Isogrid CFRP 円筒殻の場合、荷重の多くは補強材が受け持っていると言え、特に補強材が交差するオフセット部には応力集中が起きていることが考えられる。

また、破壊後の試験片を観察すると、Fig.13 のように、繊維が積層されていた補強材が剥離を起し繊維の層が浮き上がっていた。これは補強材の繊維の接着が十分でないためだと考えられる。そのため、補強材の繊維の接着強度を向上させることによって、より高い補強効果が期待できると考えられる。

次に Isogrid60° 円筒殻の破壊様相を Fig.14 に示す。Isogrid60° 円筒殻の場合、最大荷重を超えたあたりから、表板が内側にくぼむように座屈し始めた。その後も荷重を与え続けると、Fig.14 のように座屈箇所が増えていった。Isogrid60° 円筒殻は 90° 巻きと違い、表板の繊維が軸方向にある程度角度を持っているため、試験後除荷すると表板に現れたくぼみはなくなり、元の円筒形状に戻った。Non-isogrid60° 円筒殻でも表板が内側にくぼむ様な座屈形状を示した。試験後の試験片を観察すると Isogrid90° 円筒殻同様、ヘリカル方向補強材のオフセット部に破壊箇所が見られた。



Fig.13 Failure at Offset Point (Isogrid90° Cylindrical Shell)



Fig.14 Buckling Deformation of Isogrid60° Cylindrical Shell

6. 解析

まず始めに Non-isogrid CFRP 円筒殻について実験と比較、検討するために汎用有限要素プログラム ANSYS9.0 を用いて固有値座屈解析を行なった。解析モデルは SHELL181 を用いた 1/2 対称モデルで、モデルの節点数は 2091 である。解析は線形座屈解析を行なった後、初期不整を与えず非線形解析を行なった。

実験値と FEM 値を比較した結果を Fig.15 に示す。座屈荷重の値を比較すると、FEM 値より実験値のほうが 1/2 から 1/3 近く低い値となり、通常の円筒殻の軸圧縮座屈の知見通りの結果となった。原因として、一つは試験片が持つ初期不整が考えられる。また圧縮試験において、試験片に均等に荷重を加えることは難しく、さらに座屈荷重は試験時の境界条件に大きく影響する。軸方向のひずみの値から試験片には若干片当たりしていることが確認できるため、実験値が FEM 値より低い値になったと考えられる。

また Isogrid CFRP 円筒殻についてのモデリング及び座屈解析も現在行なっている。詳細については講演で発表する予定である。

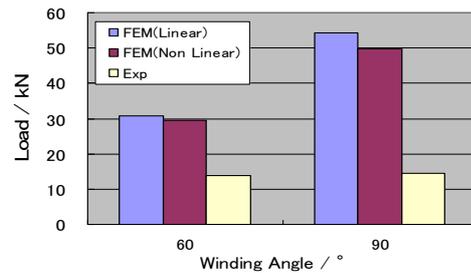


Fig.15 Comparisons of Experimental and FEM Results (Non-isogrid60° and Non-isogrid90°)

7. 結言

アイソグリッド CFRP 円筒殻の軸圧縮試験を行なうことによって、補強効果を確認することが出来た。また円筒殻の内側をアイソグリッドで補強したことによって、補強材が荷重の多くを受け持つため、補強効果に大きく寄与しているということを明らかにした。また、Isogrid CFRP 円筒殻の最大圧縮ひずみが表板に依存していることがわかった。さらに、成形時において補強材、及び表板の接着性を向上させることによって更なる補強効果が期待できると言える。

今後は FEM による解析を行ない、実験と比較、検証していく。

参考文献

- 1) Thomas D. Kim, Composite Structure 45, (1999), 1-6
- 2) Thomas D. Kim, Composite Structure 49, (2000), 21-25
- 3) 邊, 荻野 第34回 FRP シンポジウム講演論文集, 2005年, P28-29
- 4) 邊, 荻野 第47回構造強度に関する講演会論文集, 2005年, P84-86