

B08 高精度構造用 CFRP ハニカムコアサンドイッチパネルの特性評価

池谷 俊 (東京理科大) 小山昌志 (明星大) 後藤健 (ISAS) 向後保雄 (東京理科大)
須藤 栄一, 吉成 圭午 (昭和飛行機工業)

Shun Ikeya (Tokyo University of Science), Masashi Koyama (Meisei University), Ken Goto (ISAS),
Yasuo Kogo (Tokyo University of Science), Eiichi Sudo, Keigo Yoshinari (Showa Aircraft Industry Co., Ltd.)

1. 緒言

近年天文衛星は観測精度の向上の点から主鏡部の高精度化, 大型化の需要が高まっており, 面積密度が低く面精度の良い主鏡の開発が求められている^[1]. 現在比剛性の観点から, 主鏡部の構造材として CFRP/AI ハニカムサンドイッチパネルの適用が一部で行われている. しかしながら, 精度が求められるアンテナ構造等において CFRP/AI ハニカムサンドイッチパネルではスキン材とコア材の熱膨張係数差により生じる熱変形が問題となっている. この問題の解決のためにはアルミに代わるコア材として, 高比剛性かつスキン材との熱膨張係数差の少ない CFRP が挙げられる^[2]. 現在 JAXA などでは, 耐熱特性や耐環境性の観点から, シアネートエステルをはじめとする耐熱樹脂を母材とする CFRP ハニカムコアを用いたサンドイッチ構造の適用検討を進めている.

国外では既に CFRP ハニカムの製造, 運用がなされている. しかし, 国産の材料をベースとした CFRP ハニカムは未だ開発段階にあり, 国内のプロジェクトなどで CFRP ハニカムの適用検討を行う上ではサイズ, 形状に対して供給可能な制限が多く, 構造体の自由度が低いという問題を抱えている.

本研究は国産材料を用いた, 国内での CFRP ハニカム製造のための技術確立に向けて, シアネートエステル樹脂を用いた CFRP/CFRP ハニカムコアサンドイッチパネルの試作を行い, その特性評価を行うことを目的とした.

本稿では常温でのせん断試験とフラットワイズ引張試験について示す.

2. 試験片材料

CFRP ハニカムコアの強化繊維には $\pm 45^\circ$ 平織クロス系の炭素繊維 YSH-60, 樹脂にはシアネートエステル NM31 を用いた. CFRP ハニカムコアの製造方法の概念図を Fig.2-1 に示す. 六角柱の複数の突起が並ぶ治具にプリプレグを重ね, その上に六角柱を重ねる. その上に再びプリプレグを重ね, 六角柱を重ねるといった作業を繰り返す. 最後に対となる定盤を重ね加熱加圧し成型し, 硬化後に六角柱を引き抜いた後, 定盤を脱型し CFRP ハニカムコアを製造している. 本研究では, 本製造方法により昭和飛行機機でハニカムコアを成形した. (以降 S CORE とする)

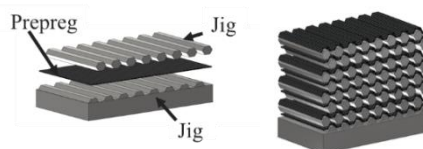


Fig.2-1 Production method of CFRP honeycomb.

作製プロセスの関係上, Fig.2-2 に示すようにハニカムコア壁は厚さが異なる部分が存在する. 一般的に厚さが 2 重になる壁に対して平行な方向を L 方向, 垂直な方向を W 方向とされている. すなわち, ハニカムコアの強度, 剛性は L 方向, W 方向で値の違う直交異方性であり区分して考える必要がある[3]. 本研究でも, せん断試験においては L 方向, W 方向について物性を取得した.

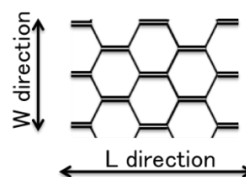


Fig.2-2 Honeycomb core structure.

3. せん断試験

3-1. 試験方法

せん断試験は ASTM C273^[4] に準じて Fig.3-1 に示す治具にコアをエポキシ接着フィルム(AF163-2K)で接着させ行った.前述したようにハニカムコアの異方性を考慮し,試験片形状として $(L \times W \times T) = (145\text{mm} \times 50\text{mm} \times 12.7\text{mm})$, $(W \times L \times T) = (145\text{mm} \times 50\text{mm} \times 12.7\text{mm})$ のものを作成した.荷重負荷速度は 0.2mm/min とし,試験温度は室温で行った.

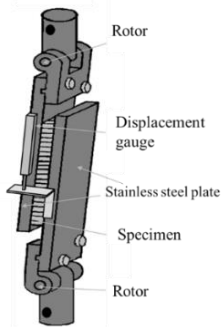


Fig.3-1 Test configuration of shear test.

なおせん断剛性は式(3-1),せん断強度は式(3-2)から求めた.

$$\tau = \frac{P_{max}}{lb} \quad (3-1)$$

$$G = \frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta u}\right)t}{lb} \quad (3-2)$$

式(3-1),式(3-2)において, b はコアの幅, l はコアの長さ, t はコアの高さ, P_{max} は最大負荷荷重, u は変位, $\frac{\Delta P}{\Delta u}$ は荷重変位曲線の初期勾配を示している.

3-2. 結果

CFRP ハニカムコアの L 方向に対しての荷重変位曲線を Fig. 3-2,W 方向に対しての荷重-変位曲線を Fig. 3-3 に示す.

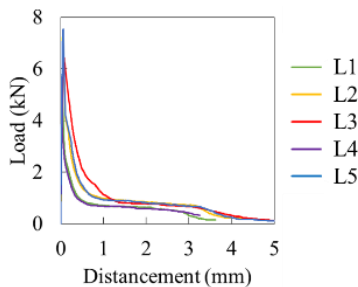


Fig.3-2 Load-displacement curve (L direction).

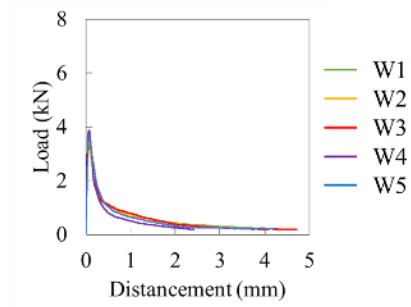


Fig. 3-3 Load-displacement curve (W direction).

Fig. 3-2, Fig. 3-3 から初期勾配 (変位 0.001mm から 0.03mm の領域) を読み取り, 式(3-1),式(3-2)を用いて算出したせん断剛性,せん断強度を Table3-1 に示す.

Table 3-1 Shear property.

L direction		W direction	
Shear modulus (MPa)	Shear strength (MPa)	Shear modulus (MPa)	Shear strength (MPa)
316	0.916	166	0.493

各試験片で L 方向,W 方向ともに同じ破壊形態を示したため破壊形態の評価として例として Fig.3-4 に示す L-1 の結果を用いた.

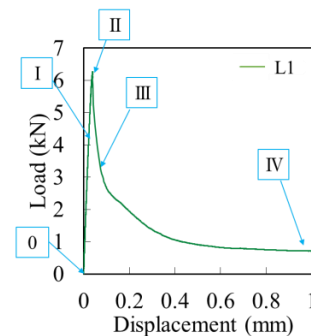


Fig.3-4 Load-displacement curve (L-1).

図中に示した 0 は荷重負荷開始時, I は弾性域を示している. II は最大荷重負荷時であり,最大負荷荷重に達すると同時に,破断が開始した.また III の領域では破断が進行していき,IVでは完全に破断した.

今回測定した S CORE と C CORE®,アルミハニカムコアのせん断比剛性を Table.3-2 に示す.

Table 3-2 Shear modulus / density.

L direction (MPa/(kg/m ³))			W direction (MPa/(kg/m ³))		
S CORE	C CORE [®]	AL	S CORE	C CORE [®]	AL
9.23	7.48	5.71	4.85	3.23	3.37

Table3-2 の結果を見るとせん断比剛性は S CORE は C COER[®]より L 方向では 1.2 倍,W 方向では 1.5 倍の値を示した.またアルミハニカムコアのせん断比剛性と比較すると L 方向では 1.6 倍,W 方向は 1.4 倍の値となった.これはせん断比剛性が S CORE は C COER[®]や従来使用されていたアルミハニカムより優れていることを示している.これらのことから S CORE を用いることによって,より軽量で剛性の高いサンドイッチパネルが作成可能であることが示唆された.

4.フラットワイズ引張試験

4-1.試験片作製

S CORE をコアとしてサンドイッチパネルの成形を行った.スキン材にはコアと同材料である平織クロスプリプレグ(YSH-60/ NM31)を用いた.スキン材とコア材の接着のためには CFRP の母材と同材料であるシアネートエステル樹脂(NM31)の接着フィルムを使用した.

成形手順として,まず,プリプレグを 70 mm×70 mm に切り出し,ホットプレスを用いて 180 °C,0.1 MPa で 2 時間加熱,加圧しスキン材を成形した.1 層のプリプレグ単体により成形したスキン材は,硬化時に生じた母材樹脂の流出による樹脂の不足が見られた.その改善のため,プリプレグに接着フィルムを重ね成形し,母材の樹脂の充填を施したスキン材も用意した.次にこれらの 2 種類のスキン材と,70 mm×70 mm に切り出した CFRP ハニカムコアを用いてサンドイッチパネルを成形した.コア材の上下面に接着フィルムを設置し,それをスキン材で挟み込み,180 °C,0.1 MPa で 2 時間加熱加圧し成形した.プリプレグ単体のスキン材を用いたパネルを A,接着フィルムにより樹脂の充填を行ったスキン材を用いたパネルを B とした.パネルの総重量は A,B ともに 3.98g となり大きな

重量に変化は確認されなかった.

4-2. 試験方法

フラットワイズ引張試験は ASTM C297^[5] に準拠し,荷重負荷速度は 0.1mm/min で行った. 治具に試験片を設置する際のパネル上下面は,パネル成型時におけるプレス時のパネル上下面と一致させた.

フラットワイズ引張強度は式(4-1)から算出した.

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{lb} \quad (4-1)$$

P_{max} は最大負荷荷重, lb はパネルの面積を表している.

4-3. 結果,考察

A に対する試験から得られた荷重変位曲線を Fig. 4-1, B に対する試験から得られた荷重変位曲線を Fig. 4-2 に示す.どちらの試験片でも線形的に負荷が上昇した後,脆性的な破壊挙動を示した.

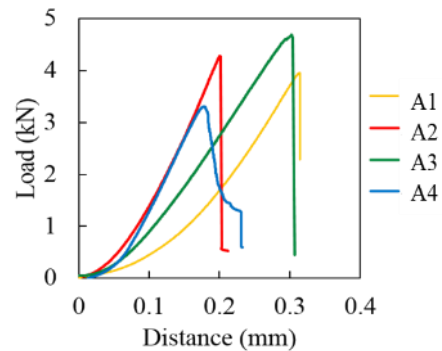


Fig.4-1 Load-displacement curve (A).

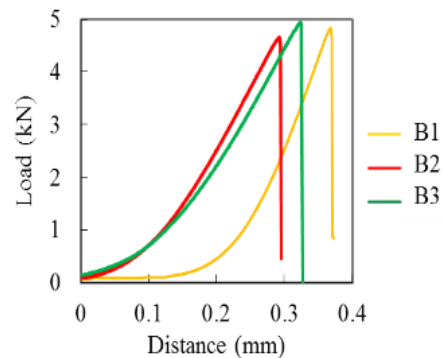


Fig.4-2 Load-displacement curve (B).

荷重変位曲線で得られた最大負荷荷重を用いて式(4-1)により算出したフラットワイズ引張強度を Fig.4-3 に示す.この結果から,B のフラットワイ

ズ引張強度は A に比べ 1.2 倍高く、ばらつきが小さいことが確認された。

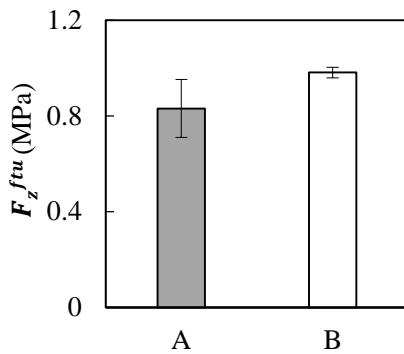


Fig.4-3 Result of flatwise tensile strength.

この結果で示された強度の相違、ばらつきの要因について検討を行った。荷重負荷時および破断後の試験片観察の結果、ばらつきの大きい A の試験結果において、強度と破壊挙動に相関性が確認された。フラットワイズ引張強度の低い A1,A4 とフラットワイズ引張強度の高い A2,A3,B1-3 では異なる破壊形態が確認された。A1,A4 では最大負荷時、下面端部から剥離が開始、進展し下面に一部のコア材が残る状態で破壊した。一方、A2,A3,B1-3 は最大負荷到達時、下面の接着界面で剥離し上面にコア材が全て接着された状態で剥離した。破壊形態の違いが生じた原因を考察するためフィレットの観察を行った。フィレット高さを観察した結果を Fig.4-4 に、フィレット高さの平均値を Table 4-1 に示す。

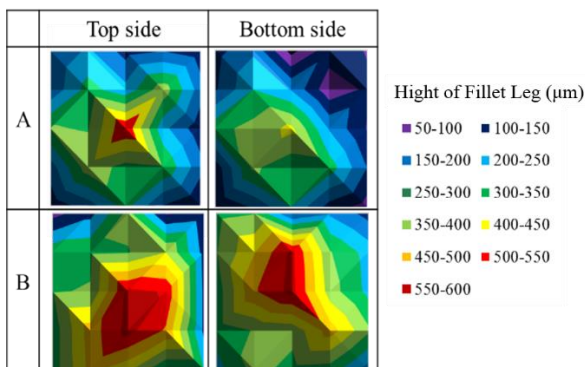


Fig.4-4 Distribution of the fillet height.

Table 4-1 Average of Fillet height.

A(μm)		B(μm)	
Top side	Bottom side	Top side	Bottom side
277	227	351	297

Table.4-1 から A,B とともにフィレット高さは中心部で高く、端部では低い結果が得られた。その中でも A の下面では極端にフィレット高さが低い部分が存在することが確認された。このフィレット高さが低い部分と A1,A4 の剥離が開始した下面端部の位置は一致している。また、フィレット高さが低い下面で剥離している。以上のことからフィレットの高さと破壊形態の相関性が示唆された。加えて B のフィレット高さは上面下面ともに A よりも高く、フラットワイズ引張強度でも高い値を示していることから、フィレット高さとフラットワイズ引張強度の相関性が示唆された。

5. 結言

SCORE はアルミハニカムコア、CCORE® に比べ、高いせん断比剛性を示した。また、スキン材の成形条件が、サンドイッチパネルにおけるフラットワイズ引張強度に影響することが確認された。また、スキン材の母材を十分に充填することで、強度のばらつきを抑え、比較的高い強度を示すことが確認された。

6. 参考文献

- [1] JAXA 研究開発本部. 空と宙. 宇宙航空研究開発機構. 2010 年 9 月/10 月号, 2010.
- [2] Kazuya Saito et al., “Manufacture of Arbitrary Cross-Section Composite Honeycomb Cores Based on Origami Techniques”, Journal of Mechanical Design, Vol. 136, 2014.
- [3] Peters. S. T., *Handbook of Composites*, 2nd ed., Chapman & Hall, New York, 1998, Chap. 12.
- [4] ASTM C273/C273M standard test method for shear properties of sandwich core materials
- [5] ASTM C297-61, Standard test method for tensile strength of flat sandwich constructions in flatwise plane; 1961.