

プラスチックライナーを用いた CFRP 複合容器の応力解析

日大生産工(院) ○黒澤 彬元
日大生産工 平山 紀夫

1. 諸言

現在 CFRP 複合容器は軽量化の観点から空気呼吸器用容器等の移動容器や自動車用の燃料タンクなど多様な分野で使用されている。これらの多くはアルミニウム (AL) 合金製のライナーに炭素繊維強化プラスチック (CFRP) をフィラメントワインディング (FW) した複合容器が主流である。しかしながら、これらの複合容器は、ライナーが AL 合金のため、容器自体の軽量化には限界がある。そのため、近年では更なる軽量化のため、AL 合金よりも比重の軽いプラスチックライナーを採用した複合容器が研究・開発されている。国内では水素燃料電池自動車用の燃料タンクの技術基準・製造規格が制定され¹⁾自動車分野においてこのプラスチックライナーを採用した FW 複合容器が実用化されている²⁾。

しかしながら、このプラスチックライナーを用いた容器の技術基準は自動車分野以外では制定されていないため、医療用酸素呼吸器や空気呼吸器用容器などの一般複合容器分野では実用化されていない。そこで本研究では、プラスチックライナーを用いた新規な空気呼吸器用 CFRP 複合容器を開発するために、CFRP 複合容器の応力解析を FEM により実施した。

2. プラスチックライナー

2.1 プラスチックライナーの成形

プラスチックライナーは高密度ポリエチレン (HDPE) をブロー成形法にて成形した。ブロー成形は回転成形や射出成形と比較し、薄肉化が容易なため軽量化に適しており、シームレス容器を低コストかつ大量に生産可能な成形方法である。

2.2 プラスチックライナーの構造

プラスチックライナーは従来の AL 合金ラ

イナーと異なり、材料強度の観点から単体ではバルブ装着が不可能である。そのため、AL 合金製の口金を装着することでこの問題を解決した。その際に、ライナーと口金を隙間なく密着させることが重要であるため、ライナー側におねじ、口金側にめねじを切り、ライナーをねじ込こんで密着させた。また、ねじ構造にすることで FW 成形時の繊維張力による容器の空転を防止する。さらに、ライナーと口金間のシール性確保のために、プラスチックライナー口部内側に O リングを装着したニードルを差し込み、加圧時に内圧の漏れを防ぐ構造とした。

3. FEM解析

3.1 解析に使用した材料物性値

解析に使用した CFRP の材料物性値を Table 1 に示す。また、HDPE の応力-ひずみ線図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示すように、HDPE はひずみが 0.5%を超えたあたりから顕著な非線形挙動を示すことがわかる。

Table 1 Mechanical properties of CFRP

Hoop-layer	
Longitudinal Modulus E_L	178.4 GPa
Transverse Modulus E_T	11.6 GPa
Shear Modulus G_{LT}	5.5 GPa
Poisson's Ratio ν_{LT}	0.3
Helical-layer	
Longitudinal Modulus E_L	161.8 GPa
Transverse Modulus E_T	9.2 GPa
Shear Modulus G_{LT}	4.6 GPa
Poisson's Ratio ν_{LT}	0.31

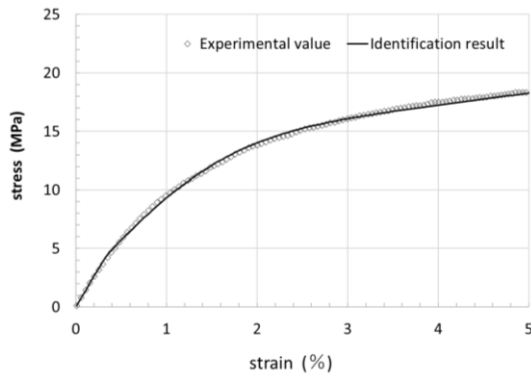


Fig.1 Stress-strain curve of HDPE

3.2 解析モデル

Fig. 2 に本解析で使用した容器の 2 次元軸対象モデルを示す. 寸法形状は 4.7L 容器(充てん圧: 29.4MPa)の等倍寸法とし, HDPE ライナーに強度分担層の CFRP 層を巻き付け, その上に GFRP(ガラス繊維)層を FW 成形した.

なお, 円筒胴部の繊維角度は, フープ層を回転軸に対し 90° 方向と定義した. また, ヘリカル層の角度については, 実績のある 4.7L AL 合金ライナー複合容器と同角度とした. 円筒胴部の各肉厚と FRP 繊維層の構成を Table 2 に示す. 頭部と底部のドーム部の繊維と子午線との角度 α は, 次式により算出した.

$$r \sin \alpha = r_0 \quad (1)$$

ここで, r は繊維が巻き付けられる部位の半径距離, r_0 は口金半径とする. 本解析ではドームヘリカル巻部の各要素に式(1)で算出した α を定義した.

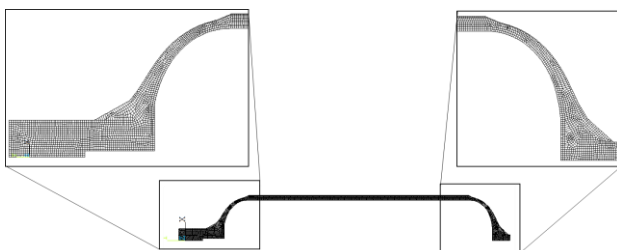


Fig.2 FEM Model

Table 2 Wall thicknesses and Fiber angles

	Angle	Thickness
HDPE-Liner	-	2.00mm
CFRP・Hoop-layer	90°	2.36mm
CFRP・Helical-layer	18.80°	2.05mm
GFRP・Helical-layer	14.20°	0.44mm
GFRP・Hoop-layer	90°	0.35mm

3.3 FEM 解析の条件

解析ソフトには汎用有限要素法ソフト ANSYS ver.17.0 を使用した. 要素タイプは PLANE183 とし, 2 次元軸対象解析とした.

評価方法として容器内部に一般複合容器の規格値である破裂圧力 100.0MPa(充てん圧力 29.4MPa $\times$ 3.4 倍以上の圧力)を作用させ, その時の CFRP 層の繊維方向応力を評価した. また, 比較のためライナー物性を AL 合金にした場合の解析も実施した.

4. 解析結果

Fig. 3 に HDPE ライナー複合容器と AL 合金ライナー複合容器の CFRP 繊維応力の解析結果を示す. 同図からわかるように HDPE ライナーの場合はフープ層頭部側端部で最大繊維応力 3.6(GPa)となった. また底部端部でも応力上昇が確認された. 一方で AL ライナーのフープ層の場合は HDPE のような端部での大きな応力上昇は確認されず, 円筒胴部全体で最大応力値 3.0(GPa)を示した.

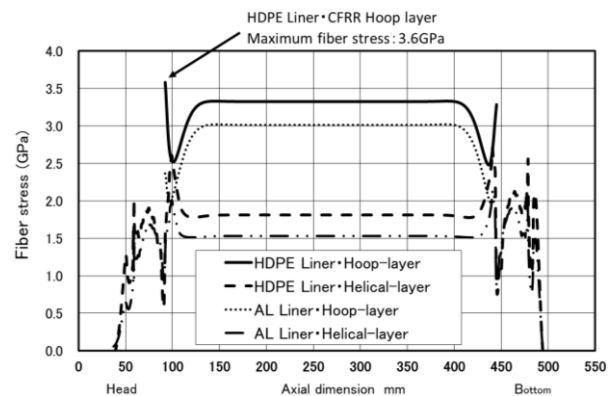


Fig.3 Result of CFRP Fiber stress

5. 結言

HDPE ライナー複合容器と AL 合金ライナー複合容器の応力解析結果を比較すると, 繊維応力状態や集中部位が異なることが確認できた. 課題として, HDPE ライナー複合容器のフープ層両端部の繊維応力の低減が挙げられる. 今後, AL 合金ライナー複合容器と同様に, 繊維軸方向応力の最大値が円筒胴部中央部で発生するように, CFRP 繊維層の再設計を行う予定である.

「参考文献」

- 1) 高圧ガス保安協会: 容器保安規則関係例示基準集第 2 次改訂版, p395(2015)
- 2) (株) 三栄書房: モーターファン別冊ニューモデル速報第 502 弾トヨタ・MIRAI のすべて, p38(2014)