

CFRP 製グリッド補強容器の成型方法の開発と最適構造設計

日本生産工 ○坂田憲泰 日本生産工 邊吾一

1 緒言

燃料電池自動車 (Fuel cell vehicle, FCV) は水素と酸素を燃料とし、二酸化炭素やその他の有害なガスを排出しないため、環境問題、エネルギー問題を解決する車両として注目されている。現在、2015年の一般ユーザーへの普及開始に向けて、各自動車メーカーで開発が進められている。

FCVの燃料である水素を車両に貯蔵する方法としては、高圧水素方式、液体水素方式、水素吸蔵合金方式があるが、主流は金属ライナーあるいは樹脂ライナーに炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber reinforced plastics, CFRP) をフルラップした CFRP 製压力容器に 35 MPa あるいは 70 MPa に圧縮した水素を貯蔵する方式となっている。今後は一充電での走行距離をガソリン車並みにするために、70 MPa での水素貯蔵が主流になっていくことが予想される。最高充電圧力が 70 MPa の高圧水素貯蔵容器では、CFRP 層の厚肉化に伴い压力容器の重量が増加し、压力容器のコストも増加するという欠点の問題となる。さらに、内圧を受ける円筒では、外径/内径比が大きくなっていくと厚肉による効果はそれほど小さくなり、材料を無駄に使用することになる。そのため著者らは、有限要素法解析を用いて CFRP 製グリッドで補強した压力容器の力学特性を評価し、CFRP グリッド補強容器が軽量化と低コスト化に適した構造であることを示した²⁾。さらに、生産性を考慮して、压力容器と円筒形 CFRP グリッドを別々に成形し、最後に円筒形 CFRP グリッドを压力容器本体にはめ込む挿入型グリッド補強压力容器 (以下、挿入型グリッド容器) の検討を行い、グリッドのヘリカル巻き角度、さらに压力容器本体最外層と円筒形 CFRP グリッドのクリアランスが破裂圧力に及ぼす影響を FEM 解析結果より明らかにした²⁾。

本報では、最も簡易な (成形が難しい) 3 軸制御型のフィラメント・ワインディング (Filament winding, FW) 装置と 2 種類の成形用マンドレルを用いて円筒形 CFRP グリッドを成形する方法を開発し、成形した円筒形 CFRP グリッドで補強した挿入型グリッド容器の破裂実験と FEM 解析を行い、CFRP 压力容器への補強効果を確認した結果について報告する。

2 挿入型グリッド容器の成形³⁾

2.1 ガイドピンマンドレルを用いた成形

円筒形 CFRP 製グリッドの成形には、3 軸 (マンドレル回転軸、トラバーサ軸、クロスフィード軸) 制御型の FW 装置を用いた。CFRP には一方向炭素繊維トウプリプレグを使用し、成形用マンドレルには、外径 176 mm の金属製の円筒形マンドレルの表面にガイドピンを設置した Fig.1 のガイドピンマンドレルを用いた。円筒形 CFRP グリッドは、破裂圧力を挿入型グリッド容器全体の重量で割った压力容器効率 η が最も高くなった仕様²⁾とし、軸方向に対して $\theta = \pm 50^\circ$ のヘリカル巻き層 (ヘリカルグリッド層) と、軸方向に対して $\theta = 90^\circ$ のフープ巻き層 (フープグリッド層) で構成されている。グリッドの頂点となる交差点は、2つのヘリカルグリッド層と 1つのフープグリッド層が交差するため、この部分の厚さは他の部位と比較して 3 倍となり、応力集中の原因となる^{4,5)}。そのため、フープグリッド層はヘリカルグリッド層の交差部から 3 mm ずらして成形した。

はじめに、ガイドピンを外したマンドレルの上から離型剤を塗布した。離型処理後、ガイドピンを取り付けたマンドレルを FW 装置に設置し、トウプリプレグをヘリカルグリッド層 19 ply、フープ巻きグリッド層 18 ply となるように交互に積層した。積層終了後、150°C で 1 時間の間、真空引きを行いながらトウプリプレグを硬化させた。硬化工程終了後は、マンドレルからガイドピンを取り外し、円筒形 CFRP グリッドの脱型を行い、最後に全長が 340 mm となるように両端部を切断した。成形した 2 本の円筒形 CFRP グリッドの寸法を Table 1 に示す。

2.2 樹脂型マンドレルを用いた成形

Fig.1 のガイドピンマンドレルは構造が簡単のため、短時間で安価にマンドレルを製作することができるが、ヘリカルグリッド層の成形時に、トウプリプレグがガイドピンに引っ掛かるため、人手による成形補助が必要となった。その結果、FW 装置のマンドレル回転軸とトラバーサ軸の移動が低速となり、1 本の円筒形 CFRP グリッド巻きつけ時間は約 10 時間となった。そこで、これらの問題を解決するために Fig.2 の樹脂型マンドレルを製作した。成形手順はガイドピンマンドレルを用いた場

Development of fabrication method of CFRP grid pressure vessel and its optimum design

Kazuhiro SAKATA and Goichi BEN

合と同じだが、樹脂型の上をトウプリプレグが引っ掛かりなく移動することができるため、マンドレル回転軸とトラバース軸の移動が速くなり、さらにプログラムによる自動成形も可能なため、ガイドピンマンドレルを用いた場合の半分以下の時間で円筒形 CFRP グリッド成形することができた。

2.3 挿入型グリッド容器

円筒形グリッドで補強する圧力容器には、外径 160 mm、全長 504 mm、内容積 7.5 L のアルミニウム合金ライナー (A6061-T6) を使用した。圧力容器胴部の厚さと CFRP の積層構成の設計値を Table 2 に示す。本実験で用いた圧力容器は試作品のため、精度良く外径寸法を成形するのは難しい。そのため、圧力容器胴部の最外層には、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) をフープ巻きし、この GFRP 層を切削加工することで圧力容器胴部最外層とグリッドのクリアランスを調整した。破裂圧力への寄与が最も少ない最外層に CFRP の弾性率 (144 GPa) の 10% 程度しかない GFRP (15.0 GPa) を巻くため、この GFRP 層が破裂圧力に及ぼす影響は少ないと考えられる。以下、グリッドで補強する前の圧力容器をオリジナル容器と呼ぶ。Fig.3 にオリジナル容器に円筒形 CFRP グリッドを挿入して成形した挿入型グリッド容器を示す。挿入型グリッド容器は 2 本成形し、オリジ

ナル容器と円筒形 CFRP グリッドのクリアランス (片側) の測定値は、#1 で 0.345 mm、#2 で 0.125 mm であった。

3 破裂実験

3.1 実験方法

破裂試験は、供試体に水圧により内圧を負荷して行った。高圧配管と容器を継ぎ手で接続し、供試体が破壊するまで水圧を負荷した。昇圧速度は、JARIS 001 (2004) ⁶⁾ に準拠し、1.4 MPa/s 以下とした。供試体はオリジナル容器 2 本、挿入型グリッド容器 2 本とした。鏡部には 1 軸ひずみゲージを繊維方向に 12 枚、胴部には 2 軸のひずみゲージを 15 枚貼り、周方向ひずみと軸方向ひずみの計測を行った。挿入型グリッド容器では、オリジナル容器の貼付け位置に加えて、オリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドが接触する内圧を確認するために、フープグリッドとヘリカルグリッド部の繊維方向に 1 軸のひずみゲージを 56 枚貼った。

3.2 実験結果

オリジナル容器と挿入型グリッド容器の破裂試験の結果を Table 3 に示す。オリジナル容器の破裂圧力は #1 で 102.5 MPa、#2 で 101.4 MPa となり、破裂は圧力容器胴部で周方向応力により発生した。



Fig.1 Fabrication of cylindrical CFRP grid by using a guide pin type mandrel.

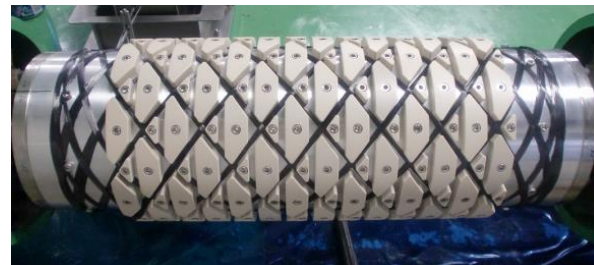


Fig.2 Fabrication of cylindrical CFRP grid by using a resin type mandrel.

Table 1 Dimensions of cylindrical CFRP grids.

		#1	#2
Helical angle (°)		±50	±50
Hoop angle (°)		90	90
Length (mm)		340	340
Inner diameter (mm)		176	176
Grids width (mm)		6.66	6.67
Grids height (mm)		4.71	4.60
Weight (N)		7.25	7.35



Fig.3 CFRP grid pressure vessel.

Table 2 Thickness and winding angles of original pressure vessels.

	AL liner	CFRP							GFRP
		1 layer	2 layer	3 layer	4 layer	5 layer	6 layer	7 layer	
Thickness (mm)	2.03	1.17	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	2.1 (#1) 1.5 (#2)
Winding angle (°)	-	88	17	88	17	88	17	88	88

4 FEM 解析

4.1 解析方法

実験結果の検証を行うために、汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver. 12.0 を用いて FEM 解析を行った。アルミニウム合金ライナーと CFRP 層の要素には 3 次元 8 節点の構造及び積層ソリッドを用い、解析モデルはフルモデルの 1/16 となる周期対称モデルとした。オリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドの接触には、オリジナル容器最外層に 3 次元ターゲット要素と円筒形 CFRP グリッド最内層に 3 次元コンタクト要素を用いた。その結果、オリジナル容器では節点数 14,868、要素数 12,257 となり、挿入型グリッド容器では節点数 24,706、要素数 21,160 となった。また、挿入型グリッド容器 #1、#2 のオリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドのクリアランスは、計測値と同じ 0.345 mm と 0.125 mm とした。解析条件は、アルミニウム合金ライナーを弾塑性解析、CFRP 層を弾性解析とし、境界条件は周期対称拘束とした。Table 4 に解析で用いた弾性率等の材料定数を示す。圧力容器の CFRP 層の破損則には最大ひずみ説を用い、CFRP の破断ひずみである 15,700 μ (1.57%) に達したときに圧力容器が破裂するとみなした。

一方、挿入型グリッド容器では #1 で 121.4 MPa、#2 で 124.5 MPa となり、オリジナル容器と比較して破裂圧力は約 20% 向上した。Fig.4 に挿入型グリッド容器の破壊様相を示すが、破裂はオリジナル容器と同様に圧力容器本体の胴部で周方向応力により発生した。

Fig.5 に挿入型グリッド容器 #1 のフープグリッド最外層と挿入型グリッド容器 #2 のヘリカルグリッド最外層における内圧とひずみの関係を示す。Fig.5 より、オリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドのクリアランスが 0.345 mm の挿入型グリッド容器 #1 では約 35 MPa、クリアランスが 0.125 mm の挿入型グリッド容器 #2 では #1 より接触圧力は低く、約 17 MPa で円筒形 CFRP グリッドとオリジナル容器が接触したことがわかる。

オリジナル容器 #1 と挿入型グリッド容器 #1 の容器本体胴部中央最外層の周方向ひずみの比較を Fig.6 に示す。プロットしたひずみゲージの出力値は圧力容器胴部最外層の値のため、圧力容器破裂時のひずみは、後述する CFRP の破断ひずみ (15,700 μ) より小さい値となっている。挿入型グリッド容器 #1 の周方向ひずみは、オリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドが接触した 35 MPa 位まではオリジナル容器 #1 と同じ増加率で推移している。しかし、オリジナル容器と円筒形 CFRP グリッドが接触した 35 MPa 以降は、挿入型グリッド容器 #1 のひずみ増加率はオリジナル容器 #1 より少なくなり、円筒形 CFRP グリッドによる補強効果が確認できた。

Table 3 Burst pressure of specimens.

Specimens		Burst pressure (MPa)
Original pressure vessel	#1	102.5
	#2	101.4
CFRP grid pressure vessel	#1	121.4
	#2	124.5



Fig.4 CFRP grids pressure vessel after burst test.

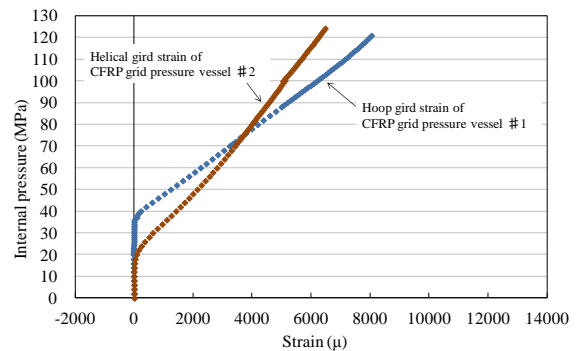


Fig.5 Internal pressure - strain curves of cylindrical CFRP grids #1 and #2.

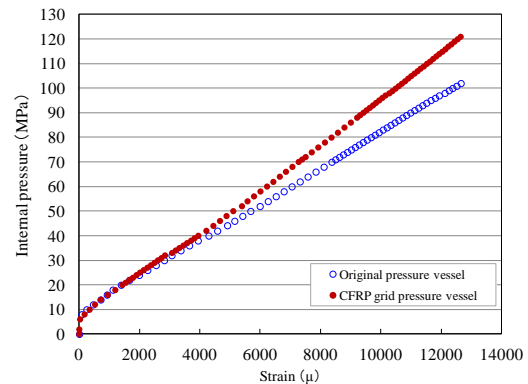


Fig.6 Comparison of hoop strain between original pressure vessel and CFRP grid pressure vessel.

Table 4 Material properties.

Aluminum liner	Young's modulus	72.9	GPa
	Yield strength	237	MPa
	Tensile strength	355	MPa
	Poisson's ratio	0.31	
CFRP	Modulus of elasticity		
	Longitudinal	144	GPa
	Transverse	7.40	GPa
	Shear	4.90	GPa
	Poisson's ratio		
	Longitudinal	0.276	
GFRP	Modulus of elasticity		
	Longitudinal	15.0	GPa
	Transverse	2.36	GPa
	Shear	4.71	GPa
	Poisson's ratio		
Longitudinal	0.288		
Transverse	0.045		

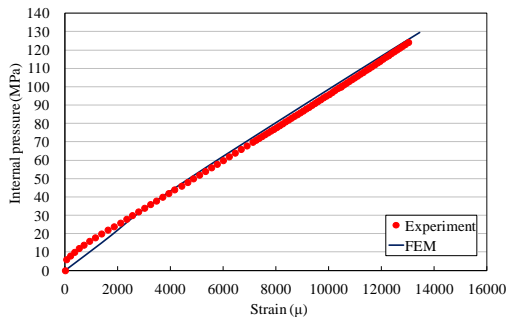


Fig.7 Comparison of hoop strain between FEM and experimental results.

4.2 実験結果と FEM 解析結果の比較

実験結果と FEM 解析結果のひずみデータの比較の一例として、挿入型グリッド容器#2の容器胴部中央部最外層の周方向ひずみの実験値と FEM 解析の比較を Fig.7 に示すが、両者は良好な一致を示した。

オリジナル容器と挿入型グリッド容器の破裂圧力の実験結果と FEM 解析による計算結果の比較を Table 5 に示す。オリジナル容器、挿入型グリッド容器ともに、破裂圧力の実験結果と計算結果の誤差は 4.26 %以内と良好な一致を示し、FEM 解析の妥当性を確認することができた。

4.3 CFRP 使用量の低減効果の検討

CFRP 使用量の低減効果を確認するために、Table 2 のオリジナル容器の 7 層目の上に、ヘリカル巻き層とフープ巻き層を一層ずつ追加し、破裂圧力が 125 MPa となった従来型圧力容器と、Table 2 のオリジナル容器の 7 層目の上に、破裂圧力が 125 MPa となるように CFRP 製グリッド（フープグリッド：14 層、ヘリカルグリッド：1 層）で補強した圧力容器の CFRP 使用量の比較を行った。なお、破裂は容器胴部中央近傍から周方向応力で破裂することとし、CFRP 製グリッドのヘリカルグリッド層の巻き角度とグリッド層の幅は一定値とし、オリジナル容器最外層と円筒形 CFRP グリッドのクリアラ

Table 5 Comparison of experimental and FEM results.

Specimens	Burst pressure (MPa)		Difference (%)	
	Experiment	FEM		
Original pressure vessel	#1	102.5	105.0	2.38
	#2	101.4	105.0	3.43
CFRP grid pressure vessel	#1	121.4	126.8	4.26
	#2	124.5	129.4	3.79

ンスは 0.1 mm とした。その結果、従来型圧力容器の CFRP 使用量が 2.58 kg となったのに対し、CFRP 製グリッドで補強した圧力容器では 2.40 kg となり、7.1%の CFRP 使用量の低減効果となった。本報告では、CFRP 製グリッドのヘリカルグリッド層の巻き角度、グリッド層の幅は一定値としたが、これらの設計変数を最適化すれば、CFRP の使用量をさらに少なくすることが可能となるが、これについては今後の課題としたい。

5 結言

- 1) 最も簡易な 3 軸制御型の FW 装置と開発したグリッド成形用マンドレルを用いて、円筒形 CFRP 製グリッドを成形する方法を開発した。
- 2) 円筒形 CFRP 製グリッドの成形に樹脂型マンドレルを用いることで、成形時間を大幅に短縮することが可能となった。
- 3) 挿入型グリッド容器を成形し、破裂実験を行った結果、挿入型グリッド容器の破裂圧力はオリジナル容器と比較して約 20 % 向上し、CFRP 製グリッドによる補強効果が確認できた。
- 4) 破裂実験と FEM 解析の結果は良好な一致を示し、今度の最適設計のためのツールとして利用できることを示した。
- 5) 従来型の圧力容器と比較して、CFRP 製グリッド容器の CFRP 使用量は 7.1% 少ない結果となった。

謝 辞

本研究は、平成 26 年度生産工学部若手研究者支援研究費の補助を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石油産業活性化センター，日本自動車研究所，エンジニアリング振興協会，日本ガス協会，平成 21 年度水素・燃料電池実証プロジェクト JHFC セミナー講演集，p.43(2010).
- 2) 坂田憲泰，邊吾一，鈴木崇司，望月裕太，黒岩夏樹，榊田明宏，日本設計工学会誌，46，11，pp.655-660(2011).
- 3) 国際特許 公開番号 WO 2010/114178 A1
- 4) Thomas D. Kim, Composite Structures 45, pp.1-6(1999).
- 5) Thomas D. Kim, Composite Structures 49, pp.21-25(2000).
- 6) 容器保安規則関係例示基準集新装版，高圧ガス保安協会，p.254(2007).