形状記憶合金補強による CFRP 製圧力容器の耐圧強度と積層構成の関係

1. 緒言

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)製圧力容器は現在, 圧縮天然ガス自動車の貯蔵容器に採用され使用されてい る.更に,近年ではZEV(Zero Emission Vehicle)を目標とし た燃料電池自動車が各種開発され,燃料の圧縮水素を貯蔵 する方法が実用化課題のひとつになっている。気体であ る水素は体積当たりのエネルギー密度が小さく,車の性能 として必要な走行距離を得るには,軽く,小さく水素を貯 蔵する必要がある.

本研究では、既存の CFRP 製圧力容器の胴部に容器外形 より小さな径に記憶させた形状記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)を周方向巻きし、逆変態温度以上での形状回 復効果を利用したタガ締め効果による破裂圧力の向上を 目的とする.

2. 供試体

CFRP 製圧力容器 実験に用いた CFRP 製圧力容器は最高充填圧力 19.6MPa,耐圧試験圧力 32.7MPa の医療用酸素容器で,全長が 385mm,円筒平行部の長さ 280mm,外径 98.8mm,厚さ 4.15mm で厚さ方向内側から 6061-T アルミライナー,CFRP 層,GFRP 層で構成されている.

2.2 SMA ワイヤー 実験に用いた SMA ワイヤー(住 友金属工業(株)製) は素線径が 1.0mm, 逆変態温度は 60℃ 以上の Ti-Ni である. このワイヤーを圧力容器の外径より も小さい径の治具に巻きつけ, 緩まないように固定した. 次に, マッフル炉で 480℃, 1 時間熱処理を行い, 水で急 冷し, 容器の外径より 0.5%と 2%小さい径の形状を SMA ワイヤーに記憶させた.

SMA ワイヤーの弾性率は試験温度 20℃(逆変態温度以下;マルテンサイト状態)と80℃(逆変態温度以上;オーステナイト状態)でリング引張り試験を行い,薄肉円弧曲りは

日大生産工(院)○坂田 憲泰日大生産工 邉 吾一

りの理論式

$$E = \frac{P\pi a^3}{ud^4}$$

P:荷重 (N), a: 円弧の半径 (m) u:変位 (m), d: SMA 直径 (m)

から求めた(表 1).

Table1 Young's Modulus of SMA		
	Young's Modulus (GPa)	
SMA (20°C; Martensite)	43.8	
SMA (80°C; Austenite)	88.4	

2.3 SMA ワイヤーを巻いた圧力容器 SMA ワイヤ ーは圧力容器の周方向に当研究室保有のFW装置で巻きつ け、ワイヤー端部はかしめ接合した.供試体は0.5%小さい 径の形状を記憶させた SMA ワイヤーを巻いた容器を1本, 2%小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤーを巻いた容器を1本, 器が2本となっている.SMA ワイヤーを巻いた容器を図1 に示す.



Fig.1 CFRP Pressure Vessel Wound with SMA Wire

3. 内圧試験方法

内圧試験は高圧ガス保安協会で行った.内圧試験では供 試体に水圧により内圧を負荷する.圧力負荷時のひずみは 図2に示す位置にひずみゲージを7箇所貼付して,周方向 および軸方向の値を測定した.また,SMA ワイヤーの温 度が所定の温度になることを確認するため熱電対を取り 付け,供試体温度を測定した.圧力容器を高圧ホースでポ ンプと接続し,恒温槽内で圧力 20MPa までの範囲で耐圧 試験を行った.破裂試験ではバーストピット内に簡易な恒 温炉を作り,その中で SMA ワイヤーを巻いた圧力容器を

Relationship between Pressure Strength and Laminate Configuration of the CFRP Pressure Vessel Reinforced with SMA

Kazuhiro SAKATA, Goichi BEN

加熱し, SMA ワイヤーが所期の温度であることを確認し た後,水圧を負荷し,破裂にいたるまでのひずみを測定し



4. 実験結果

4.1 耐圧試験 20MPa までの耐圧試験は圧力容器単体, SMA ワイヤーを圧力容器に巻いただけで記憶させた 圧縮ひずみを利用しない場合(逆変態温度以下), SMA ワ イヤーに記憶させた圧縮ひずみを利用した場合(逆変態温 度以上)の3種類について行った.図3は容器単体(●印) と2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを巻いた容 器(▲,■印)の容器胴部中央4ch での内圧と周方向ひず みの関係である.試験温度が逆変態温度以下(マルテンサ イト状態)(▲印)では容器単体のひずみ(●印)とほぼ 一致しており, SMA の効果は確認出来ない.一方,試験 温度が逆変態温度以上(オーステナイト状態)(■印)で は内圧 0MPa の状態で-1454µの圧縮ひずみが負荷されてお り, SMA の効果が確認できた.





4.2 破裂試験 破裂試験は高圧ガス保安協会の指示 のもと 2.0MPa/s で昇圧し,この容器の最小破壊圧力 72.54MPa で 60 秒間保持して,その後破裂するまで昇圧す る(図 4). 圧力容器単体の破裂圧力が 81.54MPa であるの に対して,0.5%と 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワ イヤーを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)の破裂圧力 をそれぞれ表 2 に示す.

0.5%小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤーを巻い た容器では破裂圧力が 25.5%向上し,破壊位置は容器胴部 中央で周方向応力より軸方向き裂が生じた(図 5)⁽¹⁾

2%小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤーを巻いた 容器では破裂圧力は 21.3%向上し,破壊位置は容器の胴部 と鏡部の境界(フープ巻き端部)付近で周方向応力により 軸方向き裂が生じた(図 6)(2).



Fig.4 Relation of Burst Pressure to Time

Table2 B.P. of CFRP Pressure Vessels Reinforced with SMA

Compressive Strain (%)	Burst Pressure (MPa)
0.5	102.3
2	98.94 💥

※ 2本のうちのもう1本は最小破壊圧力72.54MPaで保持途 中に O リングが破壊し,破裂圧力を測定することが出来 なかった.



Fig.5 Specimen after Burst (Compressive Strain 0.5%)



Fig.6 Specimen after Burst (Compressive Strain 2%)

5.解析

5.1 解析方法 実験と比較,検討するために汎用有限 要素プログラム ANSYS7.1 用いて解析を行った⁽³⁾⁽⁴⁾. 解析 モデルは PLANE182 を用い,2次元軸対称問題として,弾 塑性解析を行った. 圧力容器最外層と SMA ワイヤーは target169 と contact175 を用い,点-面接触とした.また, 形状回復によって SMA ワイヤーが容器に与える圧縮ひず みは熱膨張係数とマイナスの温度によって調整した.表3 に解析で用いた材料定数の一覧を示す.アルミニウム合金 ライナーは弾塑性解析を行うため接線係数を弾性域と塑 性域の2 直線で近似し,塑性域の接線係数は2%ひずみに おける応力 338MPa と 0.2%耐力 321.1MPa とを結んだ直線 の傾きから求めた. メッシュ分割は SMA ワイヤーを巻い た容器全体を接点数 7207,要素数 4010 で分割し,容器胴 部は軸方向に 100 分割,厚さ方向に 6 分割した.

加圧スケジュールは圧力 0MPa からこの容器の自緊処理 圧力(充填圧力×5/3×1.1=35.9MPa)まで増加させた後、0MPa まで減圧させ、アルミニウムライナーに圧縮応力、FRP 層 に引張り応力を残留させる。その後、バース・デス機能を 用い形状回復効果を持った SMA ワイヤーの生成を行い、 実際の複合容器と同様の条件で破裂圧力まで昇圧した.

Aluminum Liner	Young's Modulus (GPa)	68.6
	Poisson's Ratio	0.3
CFRP	Modulus of Elasticity	
	Longitudinal (GPa)	125
	Transverse (GPa)	7.8
	Shear (GPa)	4.4
	Poisson's Ratio	
	Longitudinal	0.345
	Transverse	0.0196
GFRP	Modulus of Elasticity	
	Longitudinal (GPa)	45.1
	Transverse (GPa)	12.7
	Shear (GPa)	4.71
	Poisson's Ratio	
	Longitudinal	0.26
	Transverse	0.0732
SMA Wire	Young's Modulus (GPa)	88.35
	Poisson's Ratio	0.3

Table3 Material Properties

5.2 解析結果及び実験値との比較 2%小さい径の形 状を記憶させた SMA ワイヤーを巻いた容器(逆変態温度 以上)の胴部中央 4ch(CFRP フープ巻き層)の周方向応力の 実験値と解析値との比較を図7に示す.本実験で用いた容 器は,破裂試験時にすでに自緊処理を行っているため,自 緊処理による FRP 層の引張り応力の影響を考慮せず,加圧 だけの実験結果と FEM の結果を比較した.実験結果と FEM 結果は良好な一致を示しており, FEM 解析の妥当性



6. 破裂開始位置と破裂圧力

6.1 破損則 FEM の計算結果から,複合材料の破損 則を用いて, CFRP 製圧力容器の破裂圧力の予測を行った. FRP 複合容器の破裂の形態は、内圧の上昇に伴い、破断 伸びが短い繊維材料がライナーより先に破断し、その後 FRP 層が欠落したライナーのみでは内圧に耐えることが できなくなり、容器全体の破裂に至ると考えられる⁽⁵⁾.し たがって、CFRP 製圧力容器の破損則には最大応力説⁽⁶⁾を 用い、容器の繊維方向応力 σ_L が繊維の破断応力 F_L に達し た時に容器全体が破裂するとみなした.FEM 計算による破 裂圧力と破裂試験による破裂圧力を表4に示す.両者の誤 差は 4%以内となっており、良好な一致を得ることができ た.また、破壊はいずれの場合も、容器胴部の CFRP フー プ巻き層で発生している.

6.2 破裂開始位置 圧力容器単体と 0.5%の圧縮ひず みを記憶させた SMA ワイヤーを巻いた圧力容器(逆変態 点温度以上), 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤ ーを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)の容器胴部破壊 層(CFRP フープ巻き層)の解析結果を図 8 及び図 9, 図 10 に示す. 図の横軸は,容器胴部軸方向の位置であり,容器 後方部のドーム部と胴部の遷移点(フープ巻き端部)が 0mm,胴部中央部が 142.375mm,容器前方部のフープ巻 き端部が 284.75mm である.縦軸は,内圧による繊維方向 の応力を示している.

図8に示した容器単体の場合は、内圧の上昇に伴い、容器胴部中央付近で最大応力が発生し、内圧 81.54MPa (〇印) で繊維の破断応力 2500MPa に達し、容器の破裂となっている.

図9に示した0.5%の圧縮ひずみを記憶させたSMAワイ ヤーを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)の場合は、容器 単体の場合と比べて、内圧から生じる容器胴部の応力が低 減している事がわかる.最大応力は容器単体の場合と同様 に容器胴部中央付近で発生し、内圧99.2MPa(△印)で繊 維の破断応力2500MPaに達し、容器の破裂となっている.

図 10 に示した 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイ ヤーを巻いた圧力容器胴部(逆変態点温度以上)の場合は, 容器単体の場合,0.5%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワ イヤーを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)の場合と比 べて,0MPa で既に CFRP フープ巻き層に圧縮が発生して いる.また,内圧から生じる容器胴部の応力も図 8,図 9 に比べて抑えられている.その一方で,内圧が 80MPa(○ 印)越えたところからフープ巻き端部の応力が容器胴部の 応力を超え,内圧 102.3MPa(△印)で容器後方部のフー プ巻き端部の応力が繊維の破断応力 2500MPa に達し,容 器の破裂となっている.



Fig.8 Stress Distribution by Internal Pressure Change (Virgin)



Fig.9 Stress Distribution by Internal Pressure Change (SMA0.5%)



Fig.10 Stress Distribution by Internal Pressure Change (SMA2%)

7. SMA の巻き方を変えた場合の破裂圧力

SMA(形状回復ひずみ 2%)の効率の良い巻き方,巻き 数を導くために図 11 のようなモデルを作成し,FEM 解析 を行い,破裂圧力を求めた(図 12).

図 12 の横軸は容器胴部を占める SMA の割合, 縦軸は容 器単体の破裂圧力値を1とし,破裂圧力の向上率を表して いる. FEM 解析結果より, SMA の効率の良い巻き方は図 11 の pitch1&pitch2(B)(〇印)だと言うことがわかる.





- SMA のタガ締め効果により、CFRP 製の圧力容器の破 裂圧力はタガ締め効果を与えない場合よりも20%以 上向上した。
- このタガ締め効果は、SMA に与えた形状回復の圧縮 ひずみとCFRP 圧力容器への巻き方の影響を受けるこ とを明らかにした。
- FEMによる解析結果は破裂試験の結果と良く一致し、 今後一層の破裂圧力向上のための最適設計のツール として使用できることを示した。
- 形状回復ひずみ 2%の SMA を用いた場合は、フープ 巻き両端部を pitch1,容器胴部を pitch2 で巻くのが効 率の良い巻き方だと言う事がわかった.

 参考文献 省略