

形状記憶合金補強による CFRP 製圧力容器の耐圧強度向上に関する研究

邊 吾一(機械工学科)

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, 多くの水素軽い容器で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径より小さな径を記憶させた形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, SMA) を周方向巻きし, 逆変態温度以上で加熱し, SMA の形状回復効果を利用したタガ締め効果による CFRP 圧力容器の破裂圧力の向上を目的とする。

2. 供試体

2.1 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 実験に用いた SMA ワイヤ (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 ワイヤに記憶させた。SMA ワイヤ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, 薄肉円弧曲りはりの次式から表 1 に示す結果を得た。

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

P: 荷重 (N), a: 円弧の半径 (m)

u: 変位 (m), d: SMA 直径 (m)

Table1 Young's Modulus of SMA

	Young's Modulus (GPa)
SMA (20℃; Martensite)	43.8
SMA (80℃; Austenite)	88.4

2.3 SMA ワイヤを巻いた圧力容器 SMA ワイヤ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, ワイヤ端部はかしめ接合した。供試体には 0.5%と 2%小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器をそれぞれ 1 本ずつ, SMA ワイヤを巻かないオリジナル容器を 1 本用意した。

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供試体にひずみゲージを 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 ワイヤを巻いた圧力容器を加熱し, SMA ワイヤが所定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た。

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1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 を巻いただけではそ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 のタガ締め効果が確認できた.

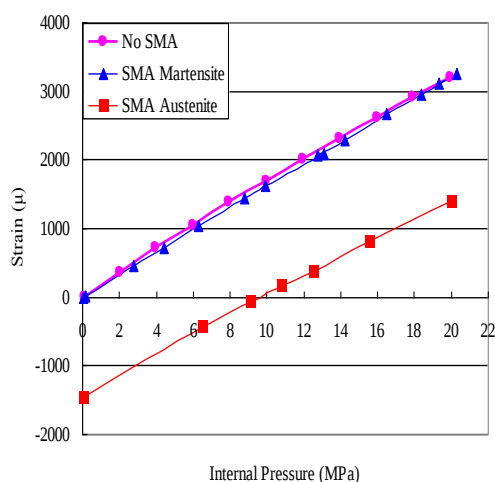


Fig. 1 Relation of Internal Pressure to Hoop Strain

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 で昇圧した. 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. 圧力容器単体の破壊圧力が 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)の破壊圧力をそれぞれ表 2⁽¹⁾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壊圧力が 25.5%向上し, 破壊位置は図 2 に示すように容器胴部中央で周方向応力より軸方向き裂が生じた.

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壊圧力は 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)付近で応力集

中により周方向応力により軸方向き裂が生じたため, 破壊圧力の増加は 0.5%場合よりも少なかった.

Table2 Burst Pressure of CFRP Pressure Vessels Reinforced with SMA

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



Fig.2 Specimen after Burst (Compressive Strain 0.5%)



Fig.3 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 を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, 点一面的接触とした. 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節点数 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 $\times 5/3 \times 1.1 = 35.9$ MPa)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

Table3 Material Properties

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

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。

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 ワイヤを巻いた容器(逆変態温度以上)の胴部中央で(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 4 に示す。実験結果と FEM 結果は良好な一致を示しており、FEM 解析の妥当性を確認することができた。

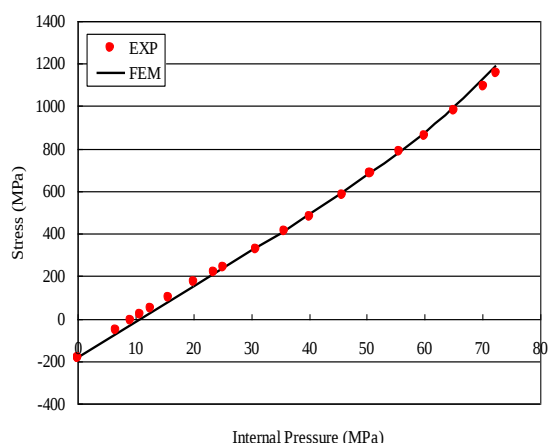


Fig.4 Comparison of FEM and Experimental Value

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、破断伸びが小さい CFRP 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。したがって、CFRP 製圧力容器の破損則には最大応力説を用い、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。

Table4 Comparison of FEM and Experiment

	Burst Pressure of Exp. (MPa)	Burst Pressure of FEM (MPa)
Virgin	81.54	80.5
SMA 0.5%	102.3	99.2
SMA 2%	98.94	102.8

6.2 破裂開始位置 0.5%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)と 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻いた圧力容器(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 5 及び図 6 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 σ_L を示している。

図 5 に示した 0.5%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻いた圧力容器(逆変態点温度以上)の場合において、最大応力は SMA を巻いていない容器単体の場合と同様に容器胴部中央付近で発生した。また、内圧 99.2MPa (△印)で繊維の破断応力 2500MPa に達し、容器の破裂となった。

図 6 に示した 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻いた圧力容器胴部(逆変態点温度以上)の場合は、図 5 の 0.5%の圧縮ひずみを記憶させた場合と比べて、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 5 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、応力集中により、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、容器の破裂となった。

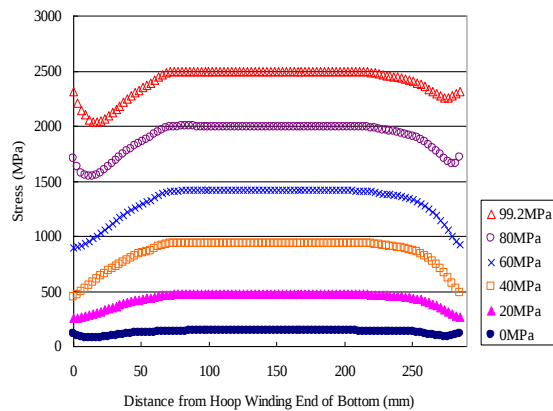


Fig.5 Stress Distribution by Internal Pressure Change (SMA0.5%)

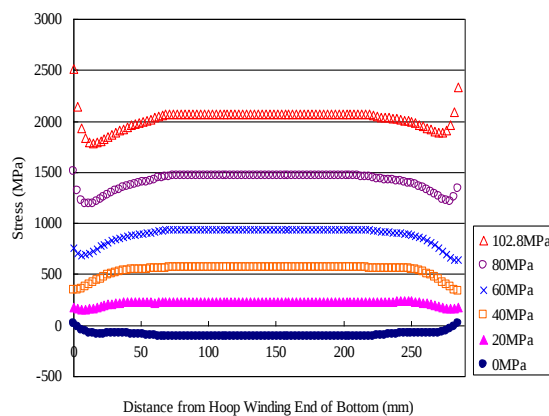


Fig.6 Stress Distribution by Internal Pressure Change (SMA2%)

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と巻き数を導くために図 7 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 8 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 7 の pitch1&pitch2(B) (図 8 の○印) であった。

8. 結 言

- 1) SMA のタガ締め効果により、CFRP 製の压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

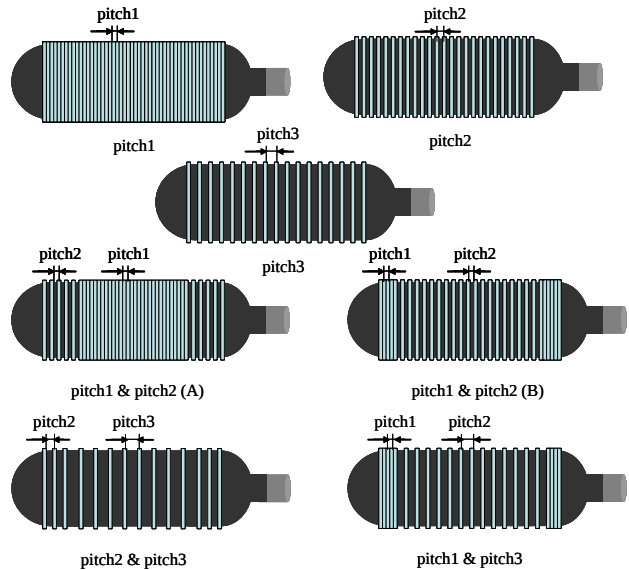


Fig.7 FEM Model

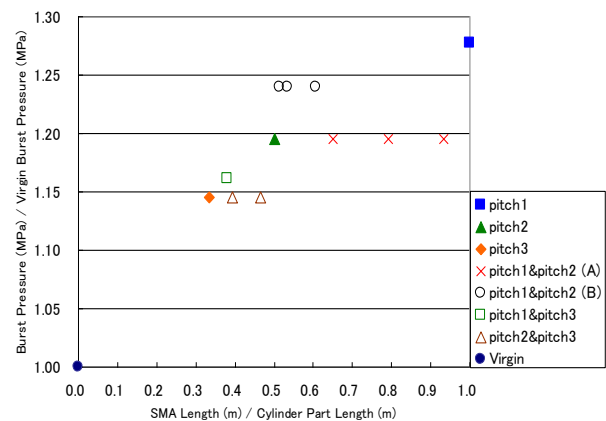


Fig.8 FEM Result

20%以上向上した。

- 2) 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 压力容器への巻き方の影響を受けることを明らかにした。
- 3) 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。
- 4) 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 で巻くことが最も効率の良い。

9. 参考文献

- 1) 坂田憲泰, 太田 浩, 邊 吾一, 燃料電池自動車用高圧CFRP製容器の開発, 強化プラスチック, 50巻3号, pp. 107-110, 2004年