

形状記憶合金で補強された CFRP 製圧力容器の最適設計

日大生産工(院) ○豊田 充洋
日大生産工 邊 吾一

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ている。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問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いため、車の性能として必要な走行距離を得るには、高圧な水素を貯蔵する軽い容器が必要となる。本研究では CFRP 製の圧力容器に圧縮応力を付与した形状記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)を用いてタガ締め効果による耐圧強度の向上と形状記憶合金の圧力容器への最適な巻き方について検討した結果を述べる。

2. 供試体

2.1 CFRP 製圧力容器 実験に用いた CFRP 製圧力容器(オリジナル容器)は最高充填圧力 19.6MPa、耐圧試験圧力 32.7MPa の医療用容器で、全長が 385mm、円筒平行部長さ 284.75mm、外径 98.8mm、平行部厚さ 4.15mm で厚さ方向内側から 6061-T6 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°C 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uffle 炉で 480°C、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°C(逆変態点以下; マルテンサイト状態)と 80°C(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式にあてはめて求めた(Table 1)。また、「圧縮天然ガス自動車燃料装置用複合容器の技術基準の解釈」の別添 8 の第 11 条で定める環境圧力サイクル試験を参考に、オーステナイト-マルテンサイト変態を伴うサイクル試験を 5000 回行なった結果、疲労による SMA の回復ひずみの低下は観察されなかった。

Table 1 Young's Modulus of SMA

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

2.3 SMA ワイヤを巻いた圧力容器 SMA ワイヤは圧力容器の周方向に FW 装置で巻きつけ、ワイヤ一端部はかしめ接合した。供試体としては 0.5% 小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器を 1 本、2% 小さい径の形状を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器を 2 本用いた。

3. 耐圧・破裂試験方法

耐圧・破裂試験は高圧ガス保安協会で行った。耐圧・破裂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¹⁾。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に容器に熱電対を取り付けて供試体の温度を測定した。耐圧試験は高温槽内で圧力 20MPa までの範囲で行った。破裂試験はバーストピット内に簡易高温槽を作り、その中で SMA ワイヤを巻いた供試体を加熱して SMA ワイヤが所定の温度であることを確認した後、水圧を負荷して破壊に至るまでのひずみを測定した。

4. 試験結果

4.1 耐圧試験 耐圧試験における内圧と周方向ひずみの関係を Fig.1 に示す。オリジナル容器、SMA ワイヤを巻いただけで圧縮ひずみを利用しない容器(Martensite)、SMA ワイヤを加熱して 2% の圧縮ひずみを記憶させた容器(Austenite)の 3 種類について行った。オリジナル容器(●印)と試験温度が逆変態温度以下の容器(Martensite)(▲印)の結果は良く一致しており、SMA ワイヤを巻いただけの容器では SMA ワイヤの効果は確認できなかった。一方、試験温度が逆変態温度以上(Austenite)(■印)の SMA ワイヤに 2% の圧縮ひずみを利用させた容器では 0MPa の状態で -1454 μ の圧縮ひずみを確認でき、SMA ワイヤの効果を確認できた。

4.2 破裂試験 オリジナル容器、試験温度が逆変態温度以上で SMA ワイヤに 0.5% の圧縮ひずみを記憶させた容器、試験温度が逆変態温度以上で SMA ワイヤに 2% の圧縮ひずみを記憶させた容器の 3 種類について行った。破裂試験は高圧ガス保安協会の規定に従って 2.0MPa/s で昇圧し、オリジナル容器の最小破裂圧力 72.54MPa で 60 秒保持した後、破裂するまで昇圧した。オリジナル容器の破裂圧力が 81.54MPa であったのに対し、0.5%と 2% の圧縮ひずみを記憶させた容器の結果は Table 2 に示す結果を得た。

0.5% の圧縮ひずみを記憶させた容器は破裂圧力がオリジナル容器と比較して 25.5% 向上し、容器の破壊位置は容器胴部中央で周方向応力により軸方向に亀裂が生じた²⁾。一方、2% の圧縮ひずみを記憶させた容器は破裂圧力がオリジナル容器に対し 21.3% 向上した。2% の圧縮ひずみを記憶させた容器の方が 0.5% の場合よりも破裂圧力が小さい理由は、破壊が容器の胴部と鏡部の境界(フープ巻き端部)付近での応力集中が原因で生じたためである³⁾。

5. 解析

5.1 解析方法 試験結果との比較、検討を行うために汎用有限要素プログラム ANSYSver9.0 を用いて FEM 解析を行った⁴⁾。解析モデルは PLANE183 を用いて、二次元軸対称問題として扱った。形状回復効果により SMA ワイヤ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を与えることによりモデル化を行った。容器のアルミニウム合金ライナーについては弾塑性解析を、FRP層については弾性解析を行った。アルミニウム合金ライナーの弾塑性解析を行うにあたっては、弾性係数を弾性域と塑性域の2直線で近似した。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。メッシュ分割は容器胴部を軸方向に100分割、厚さ方向に6分割した。SMAワイヤーを巻いた容器全体の接点数は7207、要素数は4010となっている。

5.2 解析結果と試験結果の比較 2%の回復ひずみを利用した容器の胴部中央最外層についての試験結果とFEM解析結果をFig.2に示す。両者の結果は良好な一致を示しており、FEM解析の妥当性を確認できた。

5.3 破裂圧力と破裂開始位置の予測 FEMでの計算は、複合材料の破壊則を用いてCFRP製圧力容器の破裂圧力の予測を行った。CFRP製圧力容器は、内圧の上昇に伴って破断ひずみの小さいCFRP層の方がライナーよりも先に破断し、FRP層の欠如した状態では内圧に耐えることができないので破裂すると考えられる。したがってCFRP製圧力容器の破壊はCFRP層の破断とほぼ同時に生じるとみなすことができる。

CFRP製の圧力容器の破損則には最大応力説を用いることで、容器の破壊は繊維方向応力 σ_L がCFRPの引張破断応力 F_L に達すると生じると考えた。FEM計算による破裂圧力と破裂試験結果の比較をTable 3に示す。両者の誤差は4%以内となっており良好な一致を示し、CFRP製圧力容器の破壊は容器胴部のCFRPフープ巻き層で発生した。試験に用いたCFRP製圧力容器は、自緊処理（自緊処理圧力35.9MPa）によりアルミライナーに圧縮応力、CFRP層には引張応力が作用しているため、FEMで破裂圧力を求める際にもこの初期自緊応力を考慮した。

Fig.3に0.5%の圧縮ひずみを記憶させた容器の胴部破壊層(CFRPフープ層)のFEM解析結果を、Fig.4に2%の圧縮ひずみを記憶させた容器の胴部のCFRPフープ層(破壊層)の解析結果を示す。図の横軸は、容器胴部の軸方向の位置を示しており、容器後方部の鏡部と胴部の境界(フープ巻き端部)が0mm、胴部中央部が142.4mm、容器前方部のフープ巻き端部が284.8mmとなっている。縦軸は、内圧による胴部CFRP層の繊維方向の応力を示している。SMAに0.5%の圧縮ひずみを記憶させた容器は胴部中央部付近で応力が繊維の引張破断応力に達して容器の破壊となっている。一方、SMAワイヤーに2%の圧縮ひずみを記憶させた容器は容器後方部のフープ巻き端部において応力が繊維の破断応力 F_L に達して容器の破壊となっている。以上のことから、この解析結果は実験結果を裏づけている。

Table 2 Burst Pressure of CFRP Vessels Reinforced with SMA

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

Table 3 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

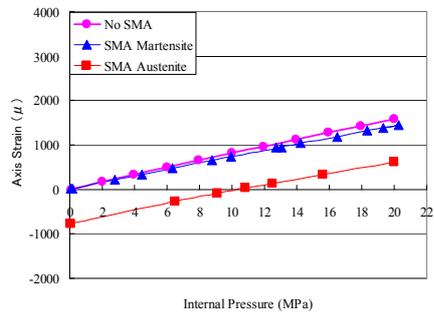


Fig.1 Relation of Internal Pressure to Hoop Strain

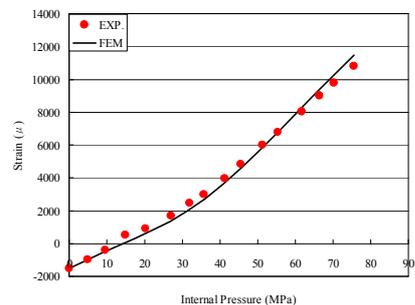


Fig.2 Comparison of FEM and Experimental Value

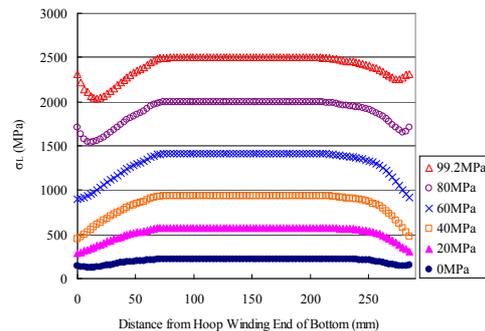


Fig.3 Stress Distribution by Internal Pressure Change (SMA0.5%)

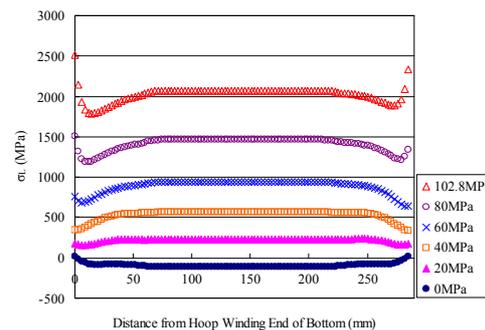


Fig.4 Stress Distribution by Internal Pressure Change(SMA2%)

6. 最適設計

6.1 容器胴部に一樣な圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを巻く場合 SMA ワイヤーに1%から6%の範囲の圧縮ひずみを記憶させた容器について、Fig.5に示すようなSMAワイヤーの巻き方が異なる7個のモデルを用意して解析を行った。ここで、6%の圧縮ひずみはSMAワイヤーが記憶できる限界のひずみである。FEM解析結果の一例としてTable 4に2%の圧縮ひずみをSMAワイヤーに記憶させた場合の結果を、

Table 5 に 6%の圧縮ひずみを SMA ワイヤーに記憶させた場合の結果を示す。Table 4 において、2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを巻く場合、Fig.5 の pitch1&pitch2(B)が、pitch1 の場合に比べて破裂圧力は 3%減少するがオリジナル容器と比較して 22.3%向上し、SMA ワイヤーの使用量は 51%となり最も効率が良い。一方、Table 5 において 6%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを巻く場合は pitch1&pitch2(B)の巻き方が pitch1 の場合に比べて破裂圧力が 1.2%増加し、オリジナル容器と比較して 38.1%向上した。SMA ワイヤーの使用量は 61%で最も効率が良い。以上より、容器胴部に一樣な圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを巻いた場合は pitch1&pitch2(B)の巻き方が最適といえる。

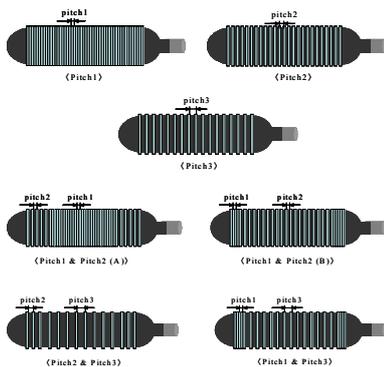


Fig.5 FEM Models

Table 4 Relation of Burst Pressure to SMA Length Rate(2%)

	Burst Pressure(MPa)	Failure Place	Rate of SMA Length	Increasing Rate of B.P	Increasing Rate for Pitch1 B.P
Pitch1	102.8	Hoop Winding End	1.00	1.28	1.00
Pitch1&Pitch2(B)	99.8	Cylinder Part	0.51	1.24	0.97

Table 5 Relation of Burst Pressure to SMA Length Rate(6%)

	Burst Pressure(MPa)	Failure Place	Rate of SMA Length	Increasing Rate of B.P	Increasing Rate for Pitch1 B.P
Pitch1	111.3	Hoop Winding End	1.00	1.38	1.00
Pitch1&Pitch2(B)	112.8	Cylinder Part	0.61	1.40	1.01

6.2 フープ巻き層を容器の鏡部側へ延長して、容器胴部に一樣な圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけた場合

2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で容器胴部に巻きつけた容器は、破壊が容器の胴部と鏡部の境界（フープ巻き端部）付近で生じて期待するほど耐圧強度が向上しなかった。この破壊は、容器胴部と鏡部の境界付近の FRP 層の断面形状が変化することで応力集中が生じたためである。また、SMA ワイヤーが隙間無く巻かれている容器胴部と SMA ワイヤーの巻かれていない容器鏡部の境界に位置するフープ巻き端部が、SMA ワイヤーが隙間無く巻かれている容器胴部中央部よりも容器の半径方向へ変形してしまうことも、フープ巻き端部での破壊の原因の一つだと考えられる。

そこで、これらの問題を解決して耐圧強度を向上させるために、CFRP フープ巻き層の肉厚をオリジナル容器と比較して 18%減少させ、CFRP フープ巻き層の長さを容器両鏡部に 3mm ずつ延長した容器の胴部に 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけた解析モデルを作成した。Fig.6 に FEM 解析結果を示す。Fig.6 の横軸は容器胴部の軸方向の位置

を示しており、縦軸は胴部破壊層（CFRP フープ層）と CFRP ヘリカル層の繊維方向応力を示す。CFRP ヘリカル層（◇印）の繊維方向応力 σ_{Lh} はフープ巻き端部付近で増加するが破壊するまでには至らず、容器胴部中央部において CFRP フープ層（△印）の繊維方向応力 σ_{Lc} が容器胴部中央部において CFRP の引張破断応力 F_L に達して破壊した。フープ巻き端部付近で CFRP ヘリカル層の繊維方向応力 σ_{Lh} が増加してくる原因は、容器内部が高圧になると鏡部の膨張が大きくなっていくために容器の胴部と鏡部の境界部分で、内圧による面外曲げ変形が起こるからだと考えられる。この解析モデルの破裂圧力は 109.5MPa となり、オリジナル容器と比較して 34.3%向上し、オリジナル容器に 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけた容器と比較しても 6.5%向上する結果を得た。

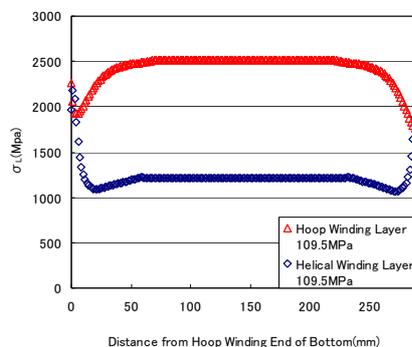


Fig.6 Fiber Stress Distribution of Cylinder part

6.3 FRP 層の積層構成を変化させて、圧縮ひずみが異なる SMA ワイヤーを組み合わせて容器胴部に Pitch1 で巻きつけた場合

フープ巻き層を鏡部側へ延長することで耐圧強度は向上したが、FRP 繊維の巻き角度が 90 度のフープ巻き層を鏡部側へ延長することは実際には容易でないと考えられる。

そこで、Fig.7 に示すような SMA ワイヤーを Pitch1 で容器胴部に巻きつけたときにフープ巻き端部を鏡部側に延長しないで耐圧強度を向上させることが可能な解析モデルを考えた。Fig.7 に示す解析モデルは、容器を構成している FRP 層の一部である GFRP 層のフープ層を完全に除去し、容器軸方向の強度を補うために、取り除いた GFRP フープ層と同じ厚さだけ CFRP ヘリカル層の肉厚を増加させた。容器周方向については SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけることで補強しているが、フープ巻き端部付近の膨張を容器胴部中央部よりも抑えるために、容器胴部の両端部に 6%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを 60 巻きずつ Pitch1 で巻きつけ、容器胴部中央部に 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけた。Fig.8 に Fig.7 の解析モデルの FEM 解析結果を示す。破壊は容器胴部中央部の CFRP フープ層（◇印）の繊維方向応力 σ_{Lc} が CFRP の引張破断応力 F_L に達して破壊した。CFRP ヘリカル層の繊維方向応力 σ_{Lh} はフープ巻き端部付近の位置で増加するが、破壊するまでには至らなかった。このときの破裂圧力は 114MPa となり、耐圧強度はオリジナル容器と比較して 39.8%向上し、オリジナル容器に 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤーを Pitch1 で巻きつけた容器と比較して

も 10.9%向上する結果を得た。

次に、容器胴部の両端部に 6%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを 60 巻きずつ Pitch1 で巻きつけ、容器胴部中央部に 3%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを Pitch1 で巻きつけた解析モデルについて FEM 解析を行った。Fig.9 に解析結果を示す。容器の胴部中央部において、CFRP フープ層 (◇印) の繊維方向応力 σ_{Lc} が CFRP の引張破断応力 F_L に達して破壊した。フープ巻き端部付近の位置で CFRP ヘリカル層の繊維方向応力 σ_{Lh} が増加するが、容器の軸方向を補強したことで破壊するまでには至っておらず、破壊圧力は 120MPa となり、耐圧強度はオリジナル容器と比較して 47.2%向上する結果を得た。

6.4 容器胴部におけるヘリカル巻き層とフープ巻き層の最適肉厚比の検討 圧力容器は容器の口金部と胴部の口径比 ρ_0 で決定される巻き角度 α_c で、容器胴部をヘリカル巻きで容器軸方向を補強し、周方向についてはフープ巻き層で補強してある。ヘリカル層とフープ層の最適肉厚比は、ヘリカル層の繊維方向応力を σ_{Lh} 、フープ巻き層の繊維方向応力を σ_{Lc} とし、ヘリカル層の繊維と垂直方向に作用する応力を σ_{Th} 、フープ層の繊維と垂直方向に作用する応力を σ_{Tc} とし、各層の応力を積層理論を用いて解析することで $\sigma_{Lh} = \sigma_{Lc}$ および $\sigma_{Th} = \sigma_{Tc}$ の両条件から次の肉厚比が決まる。このときには容器軸方向ひずみ ε_s と周方向ひずみ ε_θ が等しい。

$$\frac{t_h}{t_c} = \frac{Q_{11} - 2Q_{22} - Q_{12}}{(2l_c^2 - m_c^2)Q_{11} + (2m_c^2 - l_c^2)Q_{22} + Q_{12}}$$

ここで、 t_h はヘリカル巻き層厚、 t_c はフープ層厚

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{LT}E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}}, \quad Q_{22} = \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}}$$

$$l_c = \cos \alpha_c, \quad m_c = \sin \alpha_c$$

ここで、6.3 節で作成した解析モデルのヘリカル巻き層とフープ層の最適肉厚比を積層理論で求めると、

$$\frac{t_h}{t_c} = 0.503$$

となり、ヘリカル巻き層の肉厚はフープ巻き層の約半分が良いことになるが、この計算方法は面内応力のみを評価しているため、容器鏡部の内圧による面外曲げ変形の影響を受けやすいフープ巻き端部付近では繊維の応力が局所的に許容値を超えてしまう恐れがある。よって FEM 解析を行って、ヘリカル巻き層とフープ巻き層の肉厚比について厳密に考える必要があり、6.3 節の FEM 解析モデルはヘリカル層の肉厚がフープ巻き層の肉厚と比較して 45.5%厚くなっている。

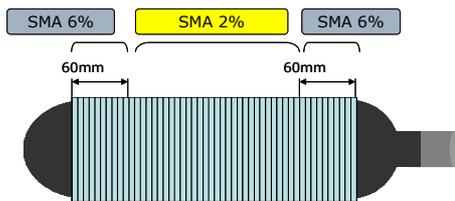


Fig.7 Distribution of Compressive Strain

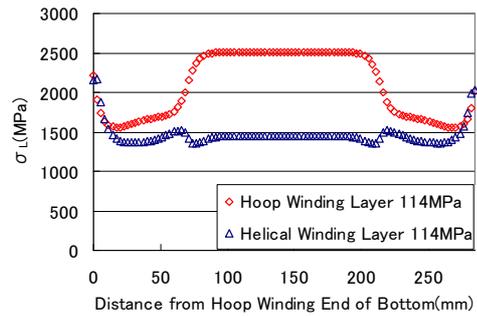


Fig.8 Fiber Stress Distribution of Cylinder part

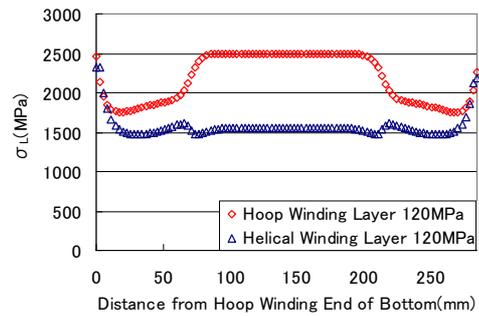


Fig.9 Fiber Stress Distribution of Cylinder part

7. 結言

- (1) SMA ワイヤのタガ締め効果により、CFRP 製圧力容器の破裂圧力はオリジナル容器に比べて 20% 以上向上した。
- (2) タガ締め効果は、SMA ワイヤに与えた形状回復ひずみと CFRP 製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。
- (3) FEM による解析結果は破裂試験の結果と良く一致し、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) FEM 解析の結果、容器胴部に一樣な圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻く場合、フープ巻き両端部を pitch1 で巻き、容器胴部中央部を pitch2 で巻くのが最も効率が良い巻き方であることを明らかにした。
- (5) Pitch1 で容器胴部に SMA ワイヤを Pitch1 で巻く場合、FRP 層の積層構成を変化させ、胴部両端部には 6%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを、胴部中央部には 2%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを Pitch1 で巻きつけることで、破裂圧力はオリジナル容器に比べて 39.8%向上させることが可能であり、胴部中央部に 3%の圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを Pitch1 で巻きつけることで、破裂圧力はオリジナル容器に比べて 47.2%向上させることが可能であることを示した。

8. 参考文献

- 1) 太田浩, 邊吾一, 青木義男, 坂田憲泰: 第 32 回 FRP シンポジウム講演論文集 (2003), pp149-150
- 2) 太田浩, 坂田憲泰, 邊吾一: 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集 (2003), pp271-272
- 3) 坂田憲泰, 太田浩, 邊吾一: 48th FRP CON-EX2003 講演会講演要旨集 (2003), pp74-76
- 4) 坂田憲泰, 太田浩, 邊吾一: 強化プラスチック会誌, Vol.50, No.3 (2004), pp107-110