

SMA ワイヤ補強による CFRP 製高圧力容器の開発と最適構造設計 に関する研究

邊 吾一(機械工学科) 南条尚志(日東紡績(株))

1. 緒言

近年, ZEV(Zero Emission Vehicle)を目標とする燃料電池自動車の開発が積極的に行われており, 燃料電池自動車の課題の一つである走行距離の問題から燃料の圧縮水素ガスを貯蔵する容器の高耐圧化が切望されている。

本研究に関連した過去の研究では, 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)製圧力容器の胴部に容器外径よりも小さな径の形状を記憶させた形状記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)を周巻きし, 逆変態温度(A_r 点)以上で SMA の形状回復機構を利用したタガ絞め効果による耐圧強度向上を破裂試験により検討し, 同時に FEM 解析を用いて試験と比較した¹⁾。

本研究では, SMA ワイヤの使用量を可能な限り少なく抑えて圧力容器の耐圧強度を最大限に向上させることを目的とし, 圧力容器の耐圧強度を最大にするための SMA の最適な巻き方を FEM 解析で求め, 実際に破裂試験を行って FEM 解析と比較した。

2. CFRP 製圧力容器

破裂試験および FEM 解析には, 容積が 2.0ℓと 8.4ℓの CFRP 製圧力容器(以後, オリジナル容器という)を用いた。オリジナル容器は容器胴部の厚さ方向内側から 6061-T6 アルミニウムライナ, CFRP 層, GFRP 層となっている。オリジナル容器の概要を Table 1 に示す。

Table 1 Outlines of Original Pressure Vessels

| Volume | 2.0 liter | 8.4 liter |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Total Length | 384.0 mm | 490.0 mm |
| Cylinder Part Length | 284.0 mm | 350.7 mm |
| Diameter | 98.8 mm | 172.5 mm |
| Cylinder Part Thickness | 4.2 mm | 5.2 mm |
| Test Pressure | 32.7 MPa | 24.5 MPa |
| Filling Pressure | 19.6 MPa | 14.7 MPa |
| Liner | Aluminum 6061-T6 | Aluminum 6061-T6 |
| Overwrap | Carbon/Epoxy, E-Grass/Epoxy | Carbon/Epoxy, E-Grass/Epoxy |

3. FEM 解析

3.1 解析方法 CFRP 製圧力容器の破壊予測と SMA ワイヤの最適な巻き方の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。要素は, 圧力容器には

二次元軸対称ソリッド(8 節点要素) PLANE183 を用いて 2.0ℓの圧力容器は軸方向を 100 分割, 8.4ℓの圧力容器は軸方向を 140 分割し, 厚さ方向はいずれの圧力容器の場合も 6 分割となっている。SMA ワイヤは, 二次元軸対称ソリッド(4 節点要素) PLANE182 を用いて円形断面を円周方向に 12 分割し, 圧力容器と同様に断面を一周回転させた形状の軸対称形状とした。軸方向は, SMA ワイヤが独立で動くのを防止するために SMA ワイヤの接点をばね要素 COMBIN14 で結び, 圧力容器最外層と SMA ワイヤの接触部は Target169 と Conta175 を用いて点-面接触とした。その結果, 2.0ℓの SMA ワイヤを巻いた圧力容器は節点数 5379, 要素数 2765 となり, 8.4ℓの SMA ワイヤを巻いた圧力容器は節点数 8113, 要素数 3953 となっている。

また, 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でモデル化した。解析条件は, 容器のアルミニウムライナは弾塑性解析, FRP 層は弾性解析となっており, アルミニウムライナの接線係数は弾性域と塑性域の 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。

境界条件は, 容器上部のボス部の半径方向と軸方向の変位を固定し, 容器の下部のおしりの部分では半径方向の変位を固定して軸方向の変位のみを自由とした。Table 2 に解析で用いたヤング率等の材料定数を示す。

さらに, オリジナル容器は自緊処理がなされており, CFRP 層に引張り応力, アルミライナには圧縮応力が残留応力として存在している。そのため, 圧力容器の破壊時の強度を実験値と解析値で比較する場合には, この自緊処理を考慮する必要がある。したがって, 加圧スケジュールは, 圧力 0MPa から容器の自緊処理圧力(充填圧力 $\times 5/3 \times 1.1$)まで増加させた後, 0MPa まで減圧させ, アルミニウムライナに圧縮応力, FRP 層に引張り応力を残留させたままで実際の容器と同様の条件で破裂圧力まで昇圧した。

3.2 破裂圧力の予測 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 6061-T6 アルミニウムライナよりも先に破断し, 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容器が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。よって CFRP 製の圧力容器の破損則には CFRP の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 繊維の引張破断応力 F_L に達すると生じると考えた。

3. 3 最適設計

圧力容器の軽量化を考えると SMA ワイヤの使用量は少ない方が好ましい。そのため、SMA ワイヤの使用量を可能な限り少なく済ませ、圧力容器の耐圧強度を最大限向上させることが可能な SMA ワイヤ（容器外径よりも 2%と 6%小さい径を記憶させた場合）の巻き方について検討するため、2.00の圧力容器の解析モデルを ANSYS 上で作成して破裂圧力を求めた²⁾。FEM 解析より、2%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器の破裂圧力は、容器胴部に SMA ワイヤを隙間なく蜜に巻きつける Fig.1 の Pitch1 で巻いた場合はオリジナル容器に比べて 26.1%向上するが、容器胴部両端部を Pitch1 で巻き、容器胴部中央部付近を 1mm の隙間を空けて SMA ワイヤを巻きつける Fig.1 の Pitch1&Pitch2(B)の巻き方 (Pitch1 と Pitch2 の長さ比 (P1:P2)は 10:274) の場合がオリジナル容器に対して破裂圧力が 22.4%向上する。この場合、SMA ワイヤの使用量も Pitch1 と比べて 51%で済み、最も効率が良い巻き方である。

また、6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻く場合は、Pitch1&Pitch2(B)の巻き方で Pitch1 と Pitch2 の長さ比 (P1:P2)は 60:224 の場合が 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べても 38.3%向上する。SMA ワイヤの使用量も Pitch1 と比べて 61%で済み、最も効率が良い巻き方である。したがって、容器胴部に一樣な圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを巻いた場合は Pitch1&Pitch2(B)の巻き

Table 2 Material Properties

| | | |
|----------------|--------------------------|-------|
| Aluminum Liner | Young's Modulus E (GPa) | 68.6 |
| | Poisson's Ratio ν | 0.3 |
| CFRP | Modulus of Elasticity | |
| | Longitudinal E_L (GPa) | 161 |
| | Transverse E_T (GPa) | 9.0 |
| | Shear G_{LT} (GPa) | 4.5 |
| | Poisson's Ratio | |
| | Longitudinal ν_{LT} | 0.3 |
| | Transverse ν_{TL} | 0.02 |
| GFRP | Modulus of Elasticity | |
| | Longitudinal E_L (GPa) | 48.7 |
| | Transverse E_T (GPa) | 12.8 |
| | Shear G_{LT} (GPa) | 5.05 |
| | Poisson's Ratio | |
| | Longitudinal ν_{LT} | 0.27 |
| | Transverse ν_{TL} | 0.07 |
| SMA Wire | Young's Modulus (GPa) | 88.35 |
| | Poisson's Ratio | 0.3 |

方が最適といえる。

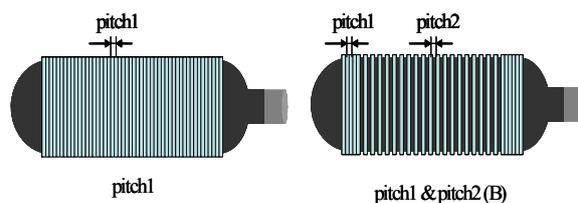


Fig.1 FEM Models

4. 破裂試験

4.1 SMA ワイヤを巻いた圧力容器 使用した SMA ワイヤ(住友金属工業(株)製)²⁾は直径 1mm の Ti-Ni 製となっており、圧力容器の周方向に FW 装置で巻きつけ、ワイヤ端部はかしめ接合した。

2.00の CFRP 製圧力容器の破裂試験では、容器外径よりも 2%および 6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを Pitch1&Pitch2(B)の巻き方で容器胴部に巻いた容器を用い、容積が 8.40の CFRP 製圧力容器の破裂試験には、6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを Pitch1&Pitch2(B)の巻き方で巻きつけた容器を用いた。

4.2 破裂試験方法

供試体には水圧により内圧を負荷する。高压配管と容器を継ぎ手で接続し、容器が破壊するまで水圧を負荷していった。圧力負荷時のひずみは Fig.2 に示す位置にひずみゲージを 5 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 (80°C) になることを確認するため、ひずみゲージ貼付部付近 5 箇所の SMA ワイヤに熱電対を取り付け、供試体温度を測定した。

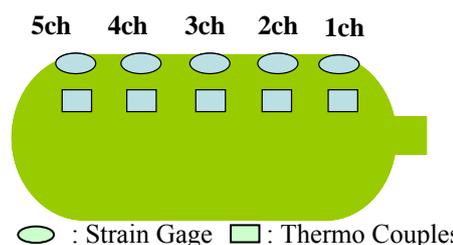


Fig.2 Positions of Strain Gages and Thermo Couples

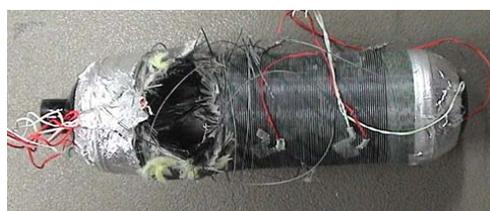
4.3 破裂試験結果

(1) 容積が 2.00の CFRP 製圧力容器 Fig.3 に 2%と 6%の小さい径を記憶させた SMA ワイヤを Pitch1&Pitch2(B)で巻いた容器の破壊様相を示す。いずれの場合も容器の破壊は容器胴部の周方向応力によって生じた。Fig.4 に容器胴部中央部 3ch の周方向ひずみの結果を示す。Fig.4 の横軸は内圧、縦軸は胴部中央部 3ch の周方向ひずみを表わしている。圧力 0MPa で 2%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器 (▲印) は胴

部周方向に -585μ の圧縮ひずみが、6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器 (●印) では -715μ の圧縮ひずみが生じており、その後も加圧によって生じる引張りひずみをオリジナル容器 (一印) よりも減少させることができ、SMA ワイヤのタガ絞め効果を確認することができた。

また、容器の破裂圧力を Table 3 に示す。オリジナル容器の破裂圧力が 81.54MPa であったのにして、2%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器では破裂圧力は 96.5MPa となり 18.3% 向上した。一方、6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器では破裂圧力は 95.5MPa となり 17.1% 向上したが、破裂試験前に FEM 解析で予測していた SMA ワイヤが容器胴部周方向へ与える圧縮ひずみの解析値が -2566μ であったのに対して、実験値が -715μ と解析値よりも小さかったために、2%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器とほぼ同等の破裂圧力となった。この SMA ワイヤが容器へ与える圧縮ひずみの実験値が解析値よりも小さかった理由は、SMA ワイヤの変形量が大きいくほど SMA ワイヤが元の形状に戻ろうとする力 (形状回復力) の最大値は大きくなるが、所定の形状回復力を得るためには SMA の A_f 点と試験温度 (A_f 点以上) の温度差をさらに大きくする必要があるためである³⁾。

(2) 容積が 8.4ℓ の CFRP 製圧力容器 Fig. 5 にオリジナル容器と 6%の小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器の破壊様相を示す。いずれの場合も容器の破壊は容器胴部の周方向応力によって生じた。Fig. 6 に胴部中央部 3ch と容器の破壊が発生した近傍である胴部 4ch の周方向ひずみの結果を示す。圧力 0MPa で 6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器の 3ch (▲印) では -780μ の圧縮ひずみが、4ch (■印) では -845μ の圧縮ひずみが生じている。その後の加圧から生じる引張りひずみは、容器胴部 3ch ではオリジナル容器 (一印) よりも



(a) 2% Pitch1&Pitch2 (B)



(b) 6% Pitch1&Pitch2 (B)

Fig.3 Failure Aspect after Burst(2.0ℓ)

Table 3 Bust Pressure of CFRP Pressure Vessels (2.0ℓ)

| Pressure Vessels | Burst Pressure (MPa) |
|---------------------|----------------------|
| Original | 80.5 |
| 2% Pitch1&Pitch2(B) | 96.5 |
| 6% Pitch1&Pitch2(B) | 95.5 |

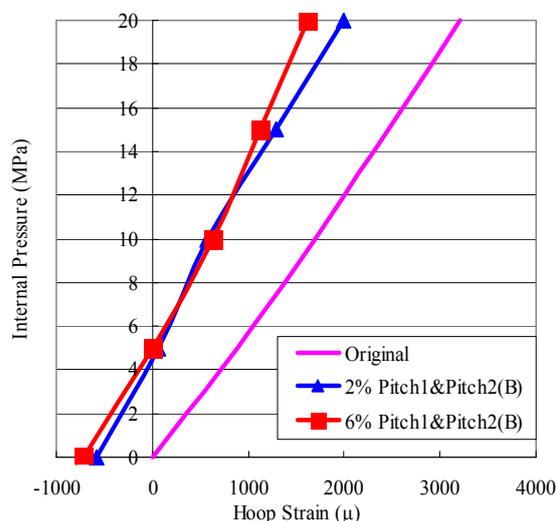


Fig.4 Relation of Internal Pressure to Hoop Strain (2.0ℓ)

押さえることができ、SMA ワイヤのタガ絞め効果を確認することができた。一方、SMA ワイヤを巻いた容器の胴部 4ch では、加圧から生じる引張りひずみが圧力 20MPa でオリジナル容器の胴部 4ch のひずみ (◆印) にほぼ達している。

この原因は、SMA ワイヤのタガ締め効果によって容器のアルミニウムライナが座屈変形してしまったことが考えられ、CFRP 製圧力容器の破裂は破裂圧力が 51MPa であった。



(a) Original



(b) 6% Pitch1&Pitch2 (B)

Fig.5 Failure Aspect after Burst(8.4ℓ)

圧力は Table 4 に示すように、オリジナル容器の破裂圧力が 52MPa⁴⁾であったのに対して、6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤ巻いた容器で

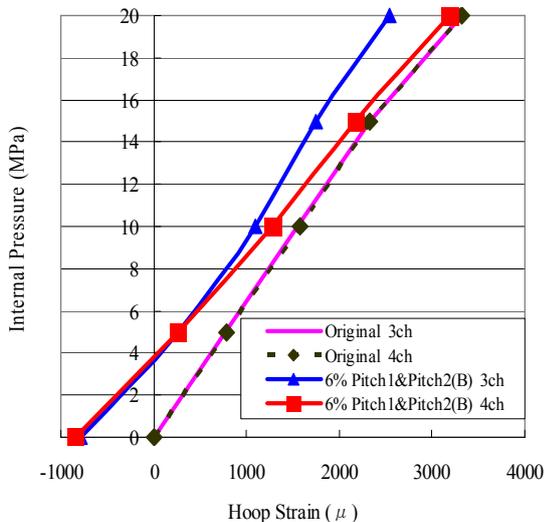


Fig.6 Relation of Internal Pressure to Hoop Strain (8.4ℓ)

Table 4 Burst Pressure of CFRP Pressure Vessels(8.4ℓ)

| Pressure Vessels | Burst Pressure (MPa) |
|------------------|----------------------|
| Original | 52 |
| Pitch1&Pitch2(B) | 51 |

5. FEM 解析と破裂試験の比較・考察

5. 1 容積が 2.0ℓ の CFRP 製圧力容器

Fig. 7 に 2%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器と 6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器の胴部中央最外層 3ch の周方向ひずみの実験値と解析値を比較した結果を示す。ここで、Fig. 7 に示す解析値は、実験値と自緊処理によって容器胴部最外層に残留しているひずみを考慮した値である。その結果、実験値と解析値は一致を得ることができた。

また、破裂試験で用いた容器の FEM による破裂圧力と実験で得た破裂圧力を比較して Table 5 に示す。FEM 計算では容器の破壊はいずれの場合も容器胴部内側の CFRP フープ巻き層で発生しており、破裂圧力の実験値と FEM 解析の誤差は 4.5% 以内となっている。したがって、実験値と解析値は良好な一致を得ることができ、FEM 解析の妥当性を確認することができた。

現在、SMA はスマート構造においてアクチュエータ機能を発現する材料として有力な地位を占める材料だが、形状変化や荷重（形状回復力）の設計を容易に行うことが難しい材料である⁵⁾。しかし、SMA の変形量が大きくなるほど、 A_f 点と SMA ワイヤに与える温度 (A_f 点以上の温度) の温

度差が必要となってくるが形状回復力の最大値が大きい³⁾ことは分かっているため、本研究で行った破裂試験では、 A_f 点（逆変態温度：破裂試験で使用した SMA ワイヤは 62℃）がより低い SMA ワイヤを用いる。破裂試験の試験温度をより高温にする。上記の 2 点のどちらかについて改善をすることで容器の破裂圧力をより一層向上させることが可能だと考えられる。

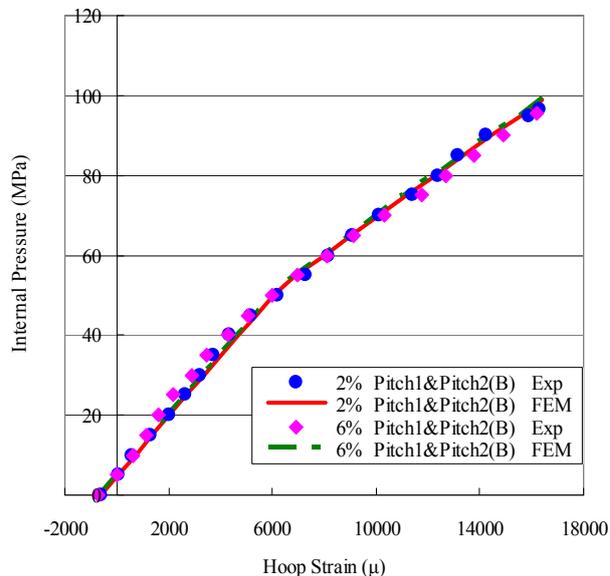


Fig.7 Comparison of FEM and Experimental Value (2.0ℓ)

Table 5 Comparison of FEM and Experiment (2.0ℓ)

| Pressure Vessels | Burst Pressure of Exp (MPa) | Burst Pressure of FEM (MPa) | Error (%) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| Original | 80.5 | 81.5 | -1.2 |
| 2% Pitch1&Pitch2(B) | 96.5 | 98.8 | -2.4 |
| 6% Pitch1&Pitch2(B) | 95.5 | 99.8 | -4.5 |

5. 2 容積が 8.4ℓ の CFRP 製圧力容器

6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器の胴部中央最外層 3ch の実験値と解析値のひずみを比較した結果を Fig. 8 に、容器の胴部最外層 4ch のひずみを比較した結果を Fig. 9 に示す。容器胴部 3ch の実験結果と FEM 結果は良好な一致を示しているが、容器胴部 4ch の周方向ひずみの実験値は解析値より約 20%大きくなっており、4ch 付近だけが周方向への変形が他の胴部の箇所比べて局所的に進行していることが分かる。

また、FEM 計算による破裂圧力と実験で得た破裂圧力を比較して Table 6 に示す。容器の破壊はすべての圧力容器で容器胴部内側の CFRP フープ巻き層で発生しており、実験値と解析値の誤

差はオリジナル容器で 2.5%, 6%小さい径を記憶させた SMA ワイヤを巻いた容器では 16.5%となっている。したがって、実験に用いた 8.40 の圧

Table 6 Comparison of FEM and Experiment (8.40)

| Pressure Vessels | Burst Pressure of Exp (MPa) | Burst Pressure of FEM (MPa) | Error (%) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| Original | 52.0 | 50.7 | 2.5 |
| 6% Pitch1&Pitch2(B) | 51.0 | 59.4 | -16.5 |

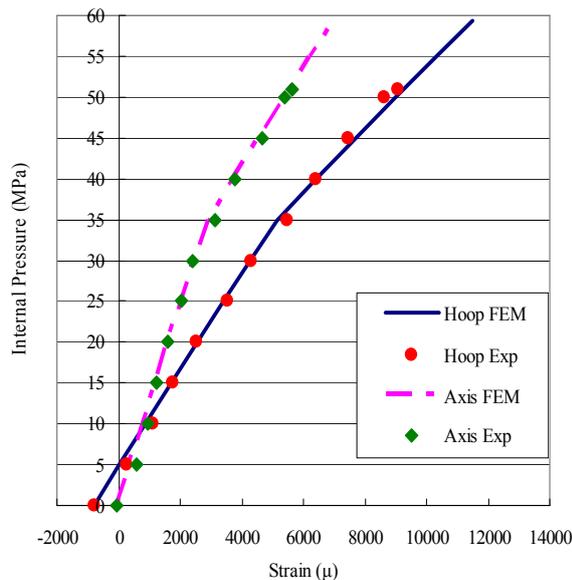


Fig.8 Comparison of FEM and Experimental Value at 3ch (8.40)

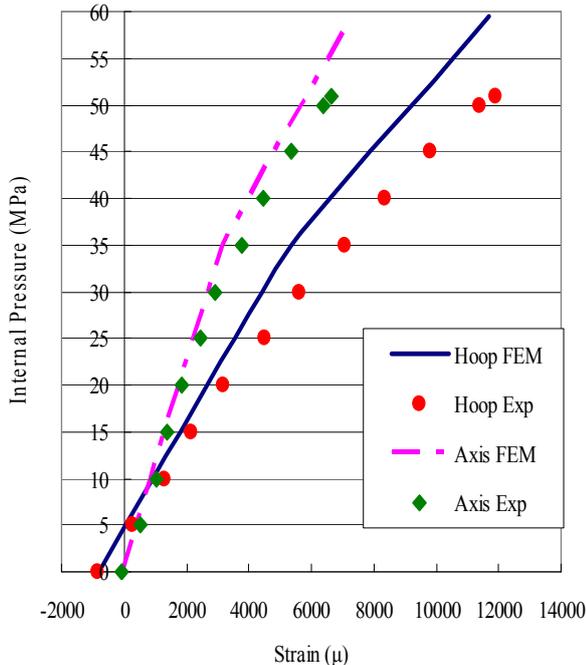


Fig.9 Comparison of FEM and Experimental Value at 4ch (8.40)

力容器は、オリジナル容器の場合が実験値と解析値の良好な一致を得ることができた。

5.3 CFRP 製圧力容器 (8.40) の固有値座屈解析

SMA ワイヤのタガ絞め効果で、容器に圧力を負荷する前に 8.40 容器のアルミニウムライナが座屈を起こすかを検討するため、ANSYSver9.0 を用いてアルミニウムライナの固有値座屈解析を行った。解析モデルは静的解析と同様に、二次元軸対称モデルとして扱った。Fig.10 に 8.40 の容器のアルミニウムライナを示す。アルミニウムライナは薄肉になっている部分（以後、薄肉部という）と厚肉で板厚が変化している部分（以後、テーパ部という）で構成されている。Fig.11 に固有値座屈解析から得られたアルミニウムライナの座屈モード（一次モード）を示す。ライナの座屈モードは、薄肉部とテーパ部の境界付近での局所的な座屈変形となっている。Table 7 にライナの座屈応力（相当応力）と圧力 0MPa で容器のアルミニウムライナに生じている最大応力（相当応力）を示す。座屈応力が 244.5MPa であるのに対して、圧力 0MPa で容器のアルミニウムライナに生じている最大応力は 237.4MPa となっている。したがって、アルミニウムライナに生じている最大応力と座屈応力の差は 3% となっており、座屈応力にアルミニウムライナに生じている最大応力がほぼ達していることが分かる。

構造物の座屈変形は、実際には初期不整等の影響で固有値座屈解析値よりも小さな値で座屈変形が起これと言われている⁶⁾。したがって、8.40 の SMA ワイヤを巻いた容器では、SMA ワイヤで容器胴部周方向に圧縮ひずみを作用させた時に、アルミニウムライナの薄肉部とテーパ部の境界付近での応力が座屈応力に達したために、薄肉部とテーパ部の境界付近で局所的な座屈変形が発生したと考えられる。その結果、前述の Fig.9 に示した 4ch 近傍でのひずみの実験値は解析値よりもかなり大きくなり、容器の破壊がアルミニウムライナの局所的な座屈変形が起点となったライナの破壊によって生じたために破裂圧力が向上しなかったと考えられる。座屈変形を起こさないためには、

- (a) 内圧を予め負荷させた状態で SMA ワイヤのタガ絞め効果を用いる。
 - (b) 固有値座屈解析を行い容器胴部へ与える圧縮ひずみの量について検討を行う。
- 上記の 3 点が考えられる。

Table 7 Comparison of Maximum Stress and Buckling Stress

| Maximum Stress (MPa) | Buckling Stress (MPa) |
|----------------------|-----------------------|
| 237.4 | 244.5 |

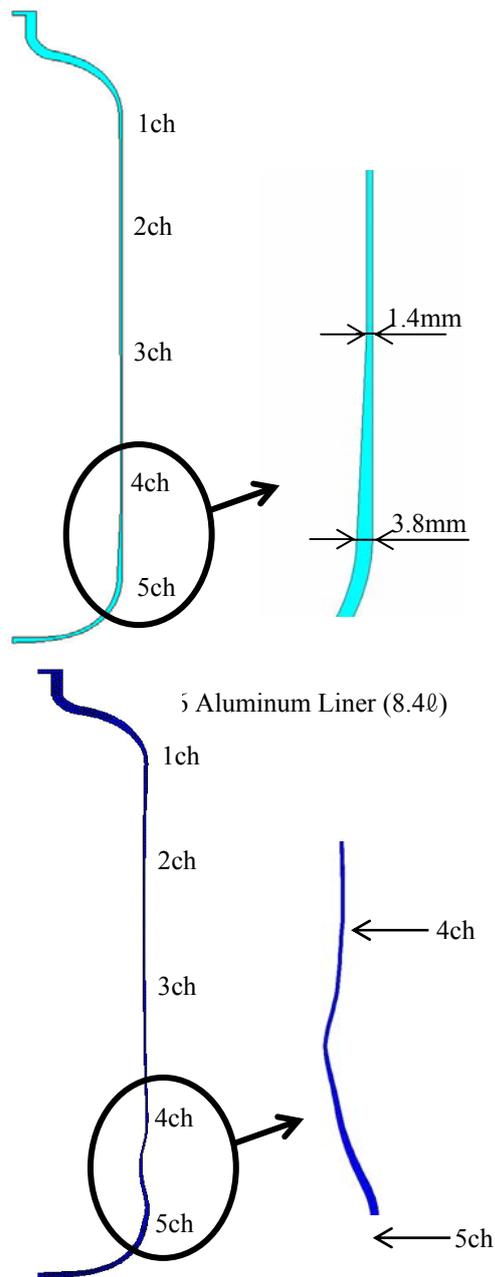


Fig.11 Buckling Mode of 6061-T6 Aluminum Liner (8.40)

6. 結言

圧縮ひずみを記憶させた SMA ワイヤを用いた場合は、容器の胴部両端部に SMA ワイヤを隙間なく蜜に巻きつけ、胴部中央部付近には 1mm の隙間を空けて SMA ワイヤを巻きつける Pitch1&Pitch2(B) の巻き方が最も効率の良いことを明らかにした。

本研究に関する過去の研究では、2.00 の CFRP 製圧力容器の破裂圧力はタガ絞め効果を与えない場合よりも SMA ワイヤを Pitch1 の巻き方では 21.3% 向上したが、SMA ワイヤの使用量が約半分 で済む Pitch1&Pitch2 (B) では 17% 以上向上し

た。

CFRP 製圧力容器の 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。

アルミニウムライナが座屈を起こさないようにライナの肉厚及び形状を十分に考慮することと SMA ワイヤに記憶させる圧縮ひずみを決定することを示した。

本研究では、圧力を負荷する前に SMA ワイヤの効果によって容器胴部に圧縮応力を作用させて実験を行った。しかし、アルミニウムライナの座屈が生じなければ CFRP 製圧力容器の耐圧強度はより一層向上するので、予め内圧を負荷させた状態で破裂試験を行う必要があるが、これは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 邊吾一, 坂田憲泰, 太田浩: 日本機会学会論文論文集 (A 編) 72 巻 716 号 (2006-4), pp. 459-464
- 2) 邊吾一, 豊田充洋: 第 15 回設計工学・システム部門講演会論文集 (2005), pp. 515-517
- 3) 根岸明: 形状記憶合金のおはなし, 日本規格協会 (1997), pp50
- 4) 豊田充洋, 邊吾一: 第 48 回構造強度に関する講演会講演集 (2006), pp177-179
- 5) 永井英幹, 大石竜太郎, 許亜, 吉田均, 阿見則男: 形状記憶合金を用いた可逆的形状変化スマート構造の応用, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集 (2004), pp. 81.
- 6) 植村益次: FRP 構造設計便覧, 社団法人強化プラスチック協会 (1994), pp. 143-144.