

FEMによる異方性複合材料構造体の構造解析（第2報）

－積層理論の検証とライナー付きFRP圧力容器の構造設計－

鈴木 耕裕, 中西 洋介, 吉田 光則, 山岸 暢
成田 吉弘, 山下 信博, 横山 光紀*

Structural Analysis of Anisotropic Composite Structures by FEM (Part II)

－ Examination of Lamination Theory and Structural Design of FRP Pressure Vessels with Metallic Liners －

Takahiro SUZUKI, Yohsuke NAKANISHI, Mitunori YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI
Yoshihiro NARITA*, Nobuhiro YAMASHITA**, Mitunori YOKOYAMA**

抄録

FRPの特長をより効果的に引き出せる異方性複合材料を積極的に活用するため、汎用FEM（有限要素法）プログラムを用いた構造解析を行うとともに実験的評価を行い、効率的な材料設計技術を確立する事を試みた。

またこの検討結果をもとに、天然ガス自動車用のライナー付きFRP圧力容器を設計例として、構造設計の検討を行った。

1. はじめに

異方性複合材料は異方性を有する材料が積層されているため非常に複雑であり、FEM（有限要素法）等のコンピュータシミュレーションによる構造解析手法を用いた強度評価が重要である。

そこで異方性複合材料の各種成形技術の中でも、強度的に最も信頼性の高い製品が得られるフィラメントワインディング法（以下FW法）によって成形した円筒形状の圧力容器について、「積層理論の検証」を行った。対象とした円筒容器の鏡部は物性値が連続的に変化しているため、鏡部に不連続な物性値を適用して解析する手法を適用し、実験結果と比較することで積層理論の検証を行った。

構造解析を行うために必要な物性値は第1報で確認した内容を受け、一方向に並んだ強化繊維方向の引張弾性率 E_L 、ポアソン比 ν_{LT} は材料力学モデルを、また強化繊維と直角方向の引張弾性率 E_T 、およびせん断弾性率 G_{LT} は植村の式を用いて算出した。

* 北海道工業大学

** サッポロ産機（株）

またこの検討結果をもとに、近年、低公害車の一つとして注目されている圧縮天然ガス自動車用燃料容器を設計例として、構造設計を行った。

2. アルミライナーの解析精度の検証

FW成形法はアルミニウム製などのライナーの上に、樹脂を含浸させた繊維基材を所定の方向に巻き付けて成形する方法である。

FW法により成形したアルミライナー付きFRP円筒容器における積層理論の検証を行う前に、異方性複合材料であるFRP部分と等方性材料であるアルミライナー部分の解析精度を区別して把握するため、まずアルミライナー部分のみの解析精度を実験と解析により把握した。

2.1 実験

(1) 実験方法

アルミライナー（米国製）の実験として、内圧試験を行った。供試したアルミライナー断面の1/4領域における形状を図1、その写真を図2に示す。アルミライナー鏡部の肉厚は連続的に変化しており、胴部境界で3.9mm、頂点部（ノズル高さを除く）で10.4mmとなっている。内圧試験は水圧ポ

ンプにより 0.196MPa から 0.98MPa まで負荷し、1 ～ 3 分間保持し安定した後、ひずみを測定した。

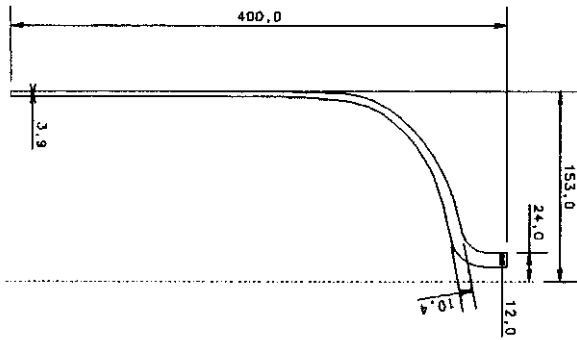


図1 アルミライナー形状 (1/4領域)

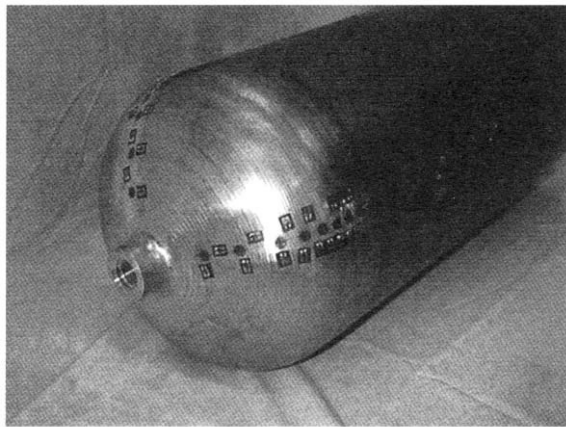


図2 供試したアルミライナー

(2) 実験結果

図 3、図 4 にアルミライナー内圧試験結果を軸及び周方向に分けて示す。

図 3 より、内圧とひずみの関係は、どの点でも比例関係を示しているのがわかる。ひずみゲージの張り付け位置を図中に示す。

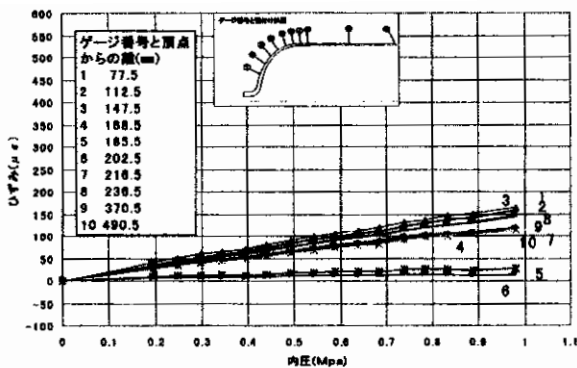


図3 アルミライナー内圧試験結果 (軸方向)

図 4 より胴部 (鏡部頂点から 250mm 以上) では、軸方向に比べ周方向の方がひずみの値が大きいことがわかる。これは理論的に明らかになっているように、内圧をうける円筒容器胴部の周方向には軸方向の 2 倍の応力が発生していることを示している。

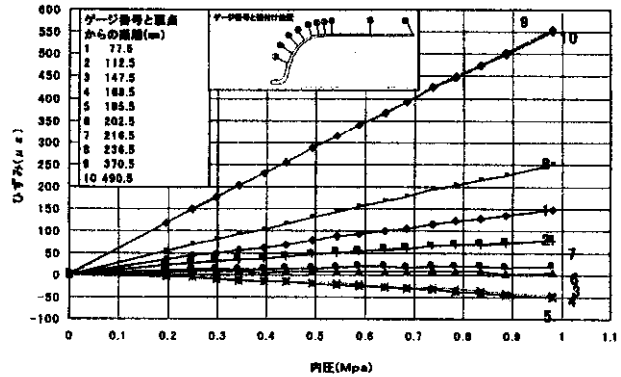


図4 アルミライナー内圧試験結果 (周方向)

2.2 構造解析

(i) 有限要素法によるモデル化

解析には汎用有限要素法プログラム I-DEAS (米, SDRC 社製) を使用した。解析に用いるアルミライナーの形状は、実験に使用したアルミライナーを切断し、3次元座標測定器 (ミットヨ (株) : H503 - 3391M - 1) によって測定した値を用いて作成した。

表 1 にアルミライナーの物性値を示す。解析に用いるアルミライナーの物性値は、実測値を用いた。

表1 アルミライナーの物性値

弾性係数	58GPa	横弾性係数	21GPa	ポアソン比	0.33
------	-------	-------	-------	-------	------

解析モデルは実際の 1/16 とし、解析時間を軽減させた。拘束条件として軸方向切断面上の節点に対しては、円周及び軸方向の並進を固定し、その他の節点に対しては、円周方向のみを固定した。荷重条件としては、0.98MPa の内圧を負荷した。メッシュは要素数 2280、節点数 4752、一次の六面体ソリッド要素で行った。

2.3 実験と解析の比較

図 5、図 6 にアルミライナーの軸及び周方向の実験結果と解析結果をまとめる。

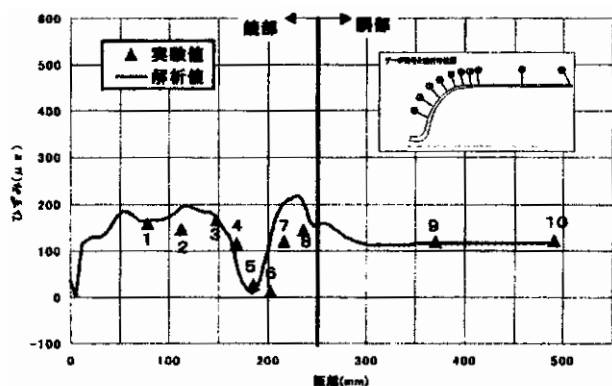


図5 アルミライナーの実験と解析の比較（軸方向）

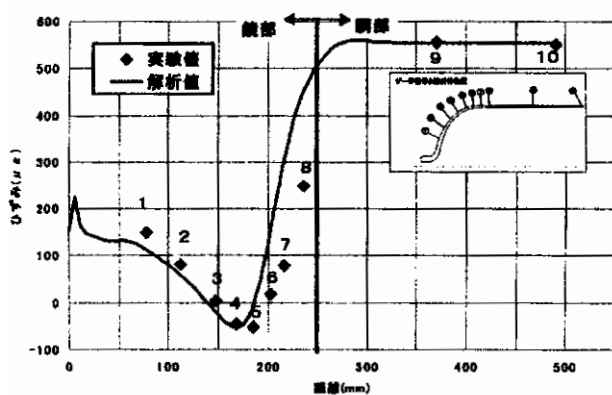


図6 アルミライナーの実験と解析の比較（周方向）

まず全体の傾向として軸方向では、鏡部の胴部に近い部分で面外変形を生じ、ひずみが小さくなっている。胴部では、周方向に比べて非常に小さなひずみとなっていることがわかる。(図5参照)

また周方向では、軸方向と同様に鏡部（距離250mm以下）の胴部に近い部分で面外変形を生じ、ひずみが小さくなっている。また胴部（距離250mm以上）では、鏡部との境界部近辺で急にひずみが大きくなり、その後一定となっていることがわかる。(図6参照)

これらの図より実験値と解析値を比較すると、鏡部の頂点に比較的近い部分（距離170mm以下）で、両者は軸方向・周方向共にほとんど一致していることがわかる。また胴部でも軸方向・周方向共にほとんど一致している。一方、鏡部と胴部の境界部分（距離170～250mm）では、軸方向・周方向共に実験値と解析値との間に誤差が見られる。

以上の傾向から、鏡部の頂点に比較的近い部分および胴部では、軸方向・周方向とも面内変形が支配的であり、ひずみが緩やかに変化しているため、解析値は実験値と良く一致したと考えられる。一方、鏡部と胴部の境界部分では、軸方向・周方向共に面外変形が比較的大きいため、最外面のひずみ値は圧縮側に急激に変化している。そのため若干のひずみ

ゲージ張り付け位置のずれなどにより、比較的大きな誤差が現れたと考えられる。

また円筒容器胴部の軸方向ひずみ ϵ_z 及び周方向ひずみ ϵ_θ は、一般的なフックの法則と力の釣り合い式を用いて、以下のように算出できる。

$$\epsilon_z = \frac{pr}{Et} \left(\frac{1}{2} - \nu \right) \quad \epsilon_\theta = \frac{pr}{Et} \left(1 - \frac{1}{2} \right)$$

ここで p は内圧、 r は胴部半径、 E はヤング率、 ν はポアソン比を表す。

この式によって求めた軸方向ひずみ ϵ_z は $114 \mu \epsilon$ 、周方向ひずみ ϵ_θ は $562 \mu \epsilon$ であり、解析値及び実験値と合致している。

以上のように等方性材料であるアルミライナー部分の解析結果は、実験結果と良く一致している。

3. アルミライナー付き FRP 円筒容器における積層理論の検証

次に前節の検討結果をふまえ、アルミライナー付き FRP 円筒容器の線形領域における解析を行い、内圧試験結果と比較することで積層理論の検証を行った。

3.1 実験

(1) 実験用タンクの作製

実験には、前述したものと同様のアルミライナー（米国製）を FW 法により強化した円筒容器を用いた。成形時の巻きパターンは、ヘルカル巻きとした。そのパターンを図7に示す。

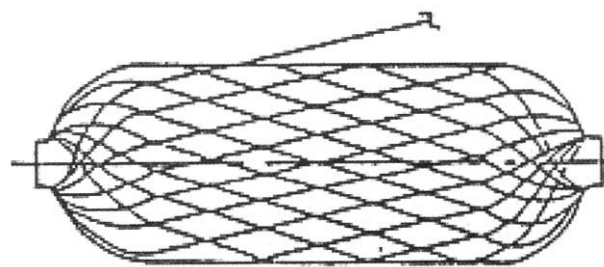


図7 ヘルカル巻きパターン

強化材及び樹脂には、E-ガラスとビニルエステルを用いた。使用する繊維の番手、本数によっておよその繊維の幅が決定する。今回は繊維の幅を約10mmとして巻きパターンを作製した。内圧試験では表面にひずみゲージを張り付けるため、成形直後に貼り付け部分をポリエステルフィルムで覆い、表面を平滑にした。硬化はマンドレルを回転させながら常温硬化させ、その後80℃3時間で後硬化を行った。

(2)実験方法

アルミライナー付きFRP円筒容器の実験として、内圧試験を行った。内圧試験は、0.196MPaから1.47MPaまでの内圧を、安定するまで1～5分間保持した後、ひずみを測定した。供試したアルミライナー付きFRP円筒容器を図8に示す。

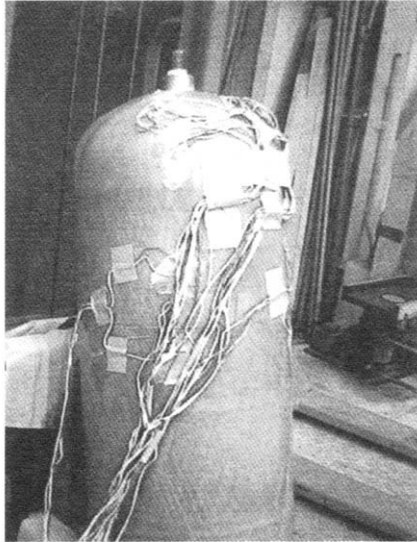


図8 アルミライナー付きFRP円筒容器

(3)実験結果

図9、図10にアルミライナー付きFRP円筒容器内圧試験の結果を軸及び周方向にわけて示す。

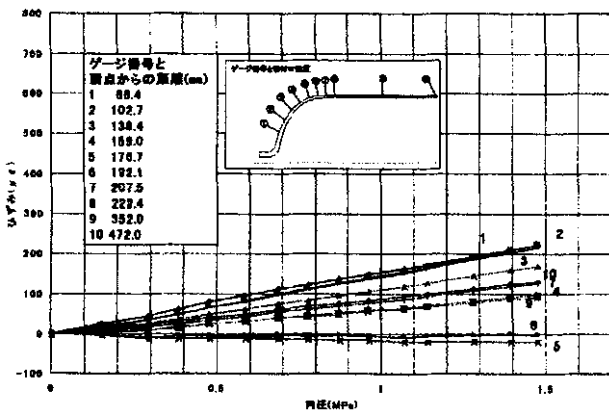


図9 アルミライナー付きFRP円筒容器内圧試験結果 (軸方向)

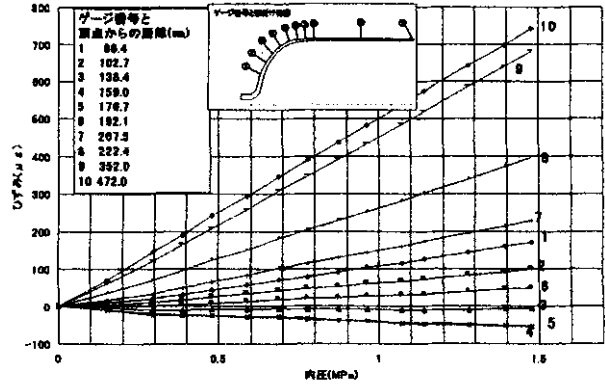


図10 アルミライナー付きFRP円筒容器内圧試験結果 (周方向)

3.2 有限要素法によるモデル化

(1)解析手法の検討

FW成形法によって作製した円筒容器鏡部は、頂点に向かって繊維配向角と板厚が大きくなっているため、積層材としての物性値が連続的に変化している。

そこで本研究では、鏡部を5つのセクションに分割し、セクションごとに不連続な物性値を割り当てて、解析を行うことを試みた。

(2)材料物性値の算出

各セクションごとの材料物性値を算出するために必要なFRPの繊維配向角、ガラス含有率及び板厚は実測値を用いた。鏡部を5分割する場所は、前述した実測値を基準とし、最も応力の変動が大きいと思われる鏡部と胴部の境界部付近は細かく、応力の変動が小さい鏡部頂点付近は粗く分割した。

各セクションの繊維配向角、ガラス含有率及び板厚と一方向材の物性値を表2に示す。表2の一方向材物性値のうち、繊維方向の引張弾性係数 E_L 、繊維方向のポアソン比 ν_{LT} は以下に示す材料力学モデルの並列バネモデルの式により算出した。

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$$

ここで E_f , ν_f はそれぞれガラス繊維の弾性係数とポアソン比, E_m , ν_m は樹脂の弾性係数とポアソン比, V_f はガラス繊維含有率を表す。

また繊維と直角方向の引張弾性係数 E_T 、せん断弾性係数 G_{LT} を以下の植村らの理論式により算出した。

$$E_T = (1 - C) \times \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)} + C \{ E_f V_f + E_m (1 - V_f) \}$$

ここで、 $C = 0.4 V_f - 0.025$

$$G_{LT} = (1 - C) \times \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f (1 - V_f)} + C \{ G_f + G_m (1 - V_f) \}$$

ここで、 $C = 0.4 V_f - 0.025$

$$G_f = E_f / \{ 2(1 + \nu_f) \}$$

$$G_m = E_m / \{ 2(1 + \nu_m) \}$$

解析に用いる積層材の物性値は表2の各セクションの値から算出した。また解析に用いるアルミニウムの物性値は、前述した表1の値を使用した。

表2 各セクションへ定義した値と一方向材物性値

分割数	鏡部頂点からの距離(mm)	配向角(θ) (degrees)	ガラス含有率 (VF)(%)	厚さ(t) (mm)	EL (GPa)	ET (GPa)	ν	GLT (GPa)	
1	0~80	40	48.1	3.5	38.31	14.68	0.29	4.039	
2	80~130	33.5	48.1	2.5	38.31	14.68	0.29	4.039	
鏡部	3	130~180	24	48.1	1.6	38.31	14.68	0.29	4.039
4	180~215	20	46.1	1.55	36.72	13.78	0.30	4.031	
5	215~250	18.25	41.5	1.7	33.07	11.71	0.31	4.012	
胴部	250~	17.9	37.7	1.82	30.06	10.00	0.32	3.997	

(3)有限要素法によるモデル化

以上の材料物性値を用いてI-DEASによる有限要素解析を行った。今回の解析で使用した有限要素モデルを図11に示す。拘束条件として軸方向切断面上の節点に対しては円周及び軸方向の並進と半径及び軸方向の回転を固定した。その他の節点に対しては、円周方向の並進と半径及び軸方向の回転を固定した。荷重条件として0.98MPaの内圧を負荷した。

メッシングは、ソリッドメッシュの上にシェルメッシュをのせ、ソリッドメッシュをアルミニウム、シェルメッシュを前述したFRPの積層材として定義した。ここで両者の節点は、全て共有されている。有限要素モデルは、総要素数8832、総節点数9018であり、1次の6面体ソリッド要素と1次の4角形シェル要素を用いた。

(4)解析結果

解析結果を、図12、図13、図14に示す。図中の線は変形前の形状を表す。また色分けはひずみ解析結果を、変形のしかたは変形量の傾向を表す。

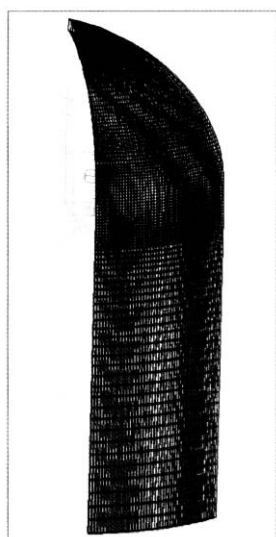


図11 有限要素解析モデル

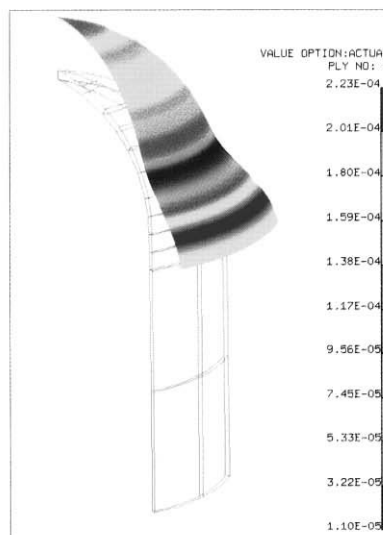


図12 ひずみ解析結果（鏡部軸方向）

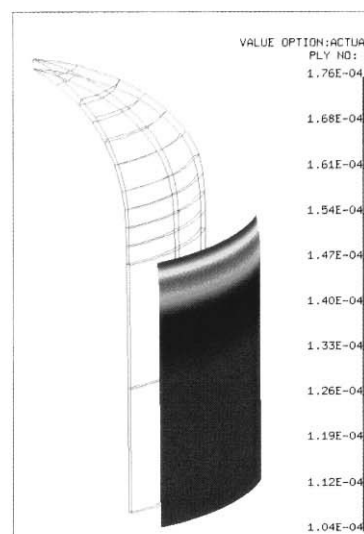


図13 ひずみ解析結果（胴部軸方向）

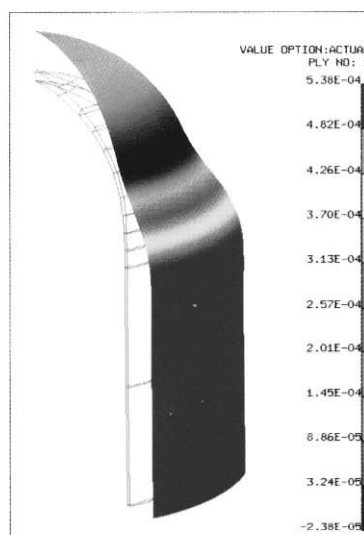


図14 ひずみ解析結果（周方向）

3.3 実験と解析の比較

図 15, 図 16 にアルミライナー付き FRP 円筒容器の軸及び周方向の実験結果と解析結果をまとめる。

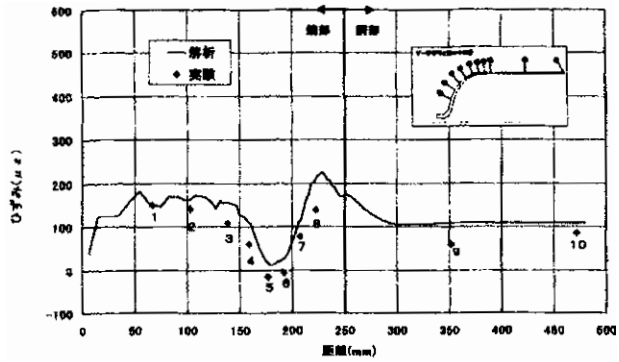


図15 アルミライナー付きFRP円筒容器の実験と解析の比較 (軸方向)

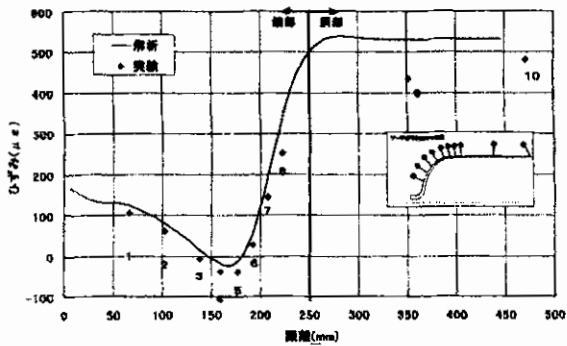


図16 アルミライナー付きFRP円筒容器の実験と解析の比較 (周方向)

図より、アルミライナー付き FRP 円筒容器の実験値と解析値は、定性的に非常に良く一致していることがわかった。また周方向胴部の一部などで $90 \mu \epsilon$ 程度の誤差が見受けられるが、その他の部分では軸方向・周方向共に、概ね $20 \sim 40 \mu \epsilon$ 程度の誤差であり、定量的にも比較的良く一致することがわかった。

以上のことから異方性複合材料円筒容器の弾性評価において、鏡部に不連続な物性値を適用し、汎用有限要素法プログラムと積層理論を用いた本手法の有効性が検証された。

4. ライナー付き FRP 压力容器の構造設計

4.1 設計思想と基準

本節では以上の検討結果をもとに、異方性複合材料を有効に活用している実施例として、近年、低公害車として注目されている圧縮天然ガス自動車用燃料容器について、構造設計を試みた。ただし設備の関係上、実験的検証は行わず、線形領

域において有限要素法を用いた構造設計を行い、その可能性を検証した。

圧縮天然ガス自動車はガスを高压で充填するために燃料容器も強度および耐久性に優れ、かつ軽量なものが必要となる。圧縮天然ガス自動車の燃料容器に関する評価方法は「高压ガス保安法」および「同施行令」、また具体的な内容は表 3 に示す「圧縮天然ガス自動車燃料装置用複合容器告示」において規定されている。

表3 圧縮天然ガス自動車燃料装置用複合容器告示 (第2章製造方法の基準より抜粋)

容器の肉厚	容器の内厚は、弾塑性有限要素法により求め、以下に適合すること ・破裂圧力が耐圧試験圧力の 1.8 倍以上(一般には 58.8MPa) (耐圧試験圧力は最高充填圧力の 5/3 倍、一般には 32.7MPa) (最高充填圧力は容器に充填できる最高圧力、一般には 19.6MPa) ・最高充填圧力時の繊維応力は、破裂圧力時の 10 分の 3 以下となる肉厚 ・容器に圧力を加えないときのライナーの圧縮応力は胴力の 95% 以下 ・容器の胴部以外の応力は、胴部の応力の 50% 未満であること
-------	--

本研究ではこの規格から、線形領域において FRP 部分に関する以下の設計基準を抜粋し、構造解析による容器設計を行った。

- (1) 容器の破裂圧力は、ガラス繊維破断時の圧力とする。
- (2) 最高充填圧力時の繊維最大応力は、破裂圧力時における繊維最大応力の 30% 以下とする。
- (3) 鏡部の強度は胴部の強度に対して 50% 以上強くし、強度上余裕のある設計とする。

なおアルミライナー部分については、非線形領域の解析を行う必要があるため、今回の検討は見送った。

E-ガラスの繊維強度は 2.1 GPa であることが、第 1 報の実験で確認されている。よって上記の設計基準により、線形領域内における強度判定基準は、最高充填圧力時の繊維最大応力が 630 MPa 以下であることとなる。

表4 強度判定基準

設定圧力	繊維最大応力
破裂圧力 : 58.8MPa	2.1GPa (=繊維強度)
最高充填圧力 : 19.6MPa (=58.8MPa × 1/3)	630MPa 以下 (=2.1GPa × 30%)

4.2 有限要素法によるモデル化

燃料容器に用いたアルミライナー断面の 1/4 領域における形状を図 17 に示す。アルミライナーの鏡部の肉厚は連続的に変化しており、胴部境界で 3.9 mm 、頂点部(ノズル高さを除く)で 10.4 mm となっている。また使用した材料はアルミニウム合金 (6061-T6) である、その物性値を表 5 に示す。

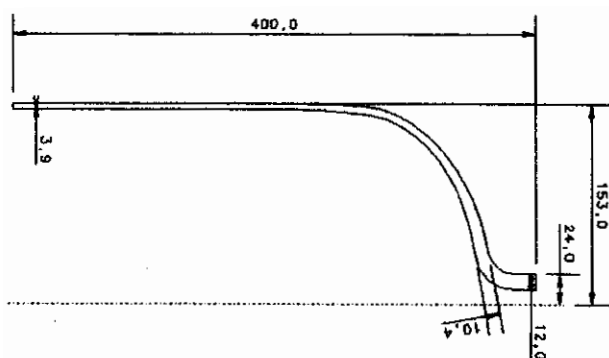


図17 アルミライナー形状 (1/4領域)

表5 アルミライナー(6061-T6)の物性値

縦弾性係数	69.0GPa	横弾性係数	25.8GPa	ポアソン比	0.33
-------	---------	-------	---------	-------	------

このようなアルミライナーの表面にFRPの異方性複合材料を定義し強度を上げた。FRP材にはE-ガラス/ビニルエステルを用いた、それぞれの物性値を表6に示す。

表6 FRP材の物性値

ガラス繊維(E-ガラス)		樹脂(ビニルエステル)	
弾性係数	73.8GPa	弾性係数	4.14GPa
ポアソン比	0.23	ポアソン比	0.38

定義したFRPのガラス繊維巻きパターンを図18に示す。高い内圧に対応できるように、強度的に弱い胴部とその近傍にはヘリカル巻きの上にフープ巻きを行い、フルラップ容器構造とした。

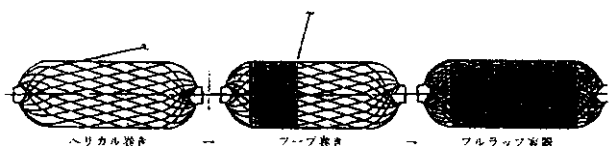


図18 フルラップ容器構造

鏡部は連続的に物性値が変化しているため、5つのセクションに分割して、それぞれに異なる物性値を定義した。各セクションへ定義した値と理論式より求めた一方向材物性値を表7に示す。

表7 各セクションへ定義した値と一方向材物性値

分割数	鏡部頂点からの距離(mm)	配向角(θ) (degree)	ガラス含有率 (Vol%)	厚さ(t) (mm)	EL (GPa)	ET (GPa)	ν	GLT (GPa)
鏡部:1(ヘリカル巻き)	0~80	40.0	45.0	3.5	35.39	11.56	0.29	7.006
鏡部:2(ヘリカル巻き)	80~130	33.5	45.0	2.5	35.39	11.56	0.29	7.006
鏡部:3(ヘリカル巻き)	130~180	24.0	45.0	1.6	35.39	11.56	0.29	7.006
鏡部:4(ヘリカル巻き)	180~215	20.0	45.0	1.6	35.39	11.56	0.29	7.006
鏡部:5(ヘリカル巻き)	215~250	18.3	45.0	1.6	35.39	11.56	0.29	7.006
鏡部:6(フープ巻き)	215~250	88.0	45.0	3.0	35.39	11.56	0.29	7.006
胴部:ヘリカル巻き	250~	17.9	45.0	1.6	35.39	11.56	0.29	7.006
フープ巻き	250~	88.0	45.0	3.0	35.39	11.56	0.29	7.006

前述したように、表7の一方向材物性値のうち、強化繊維方向の引張弾性係数 E_L 、ポアソン比 ν_L は材料力学モデルを、また強化繊維と直角方向の引張弾性係数 E_T 、およびせん断弾性係数 G_{LT} は植村らの式から求めた。

以上の材料物性値により、汎用有限要素法プログラムI-D EASを用いて、線形領域における有限要素解析を行った。モデルは実際の1/16とし、解析時間を軽減させた。

拘束条件として軸方向切断面上の節点に対しては円周及び軸方向の並進と半径及び軸方向の回転を固定した。その他の節点に対しては、円周方向の並進と半径及び軸方向の回転を固定した。荷重条件には最高充填圧力として19.6MPaの内圧を負荷した。

メッシュは、ソリッドメッシュの上にシェルメッシュをのせ、それぞれ1次の6面体ソリッド要素、1次の4角形シェル要素を用い、ソリッドメッシュをアルミニウム、シェルメッシュをFRPの積層材として定義した。ここで両者の節点は、全て共有されている。モデルの要素数は8832、節点数は9018である。

4.3 解析結果

図19に繊維応力の解析結果を示す。図よりフープ巻き部の繊維最大応力は472MPa、ヘリカル部の繊維最大応力は221MPaであり、両者とも最高充填圧力時の繊維許容応力である630MPa以下になっていることがわかる。さらに鏡部の繊維最大応力は胴部の46.8%である。

ここで第1報の実験的に求めた応力とひずみの関係より、繊維配向角 0° 方向では2.5%のひずみまで線形域とみなすことが可能である。

解析結果より、算出された繊維最大応力は472MPaであり、これは0.6%のひずみに相当する。よって本解析は十分に線形領域内のものであり、その妥当性が確認された。

以上より本設計は前述した設計基準を満たしており、線形領域内でのFRP部分に関して、圧縮天然ガス自動車用燃料容器の国内法規に基づいた容器設計が可能であることが明らかになった。

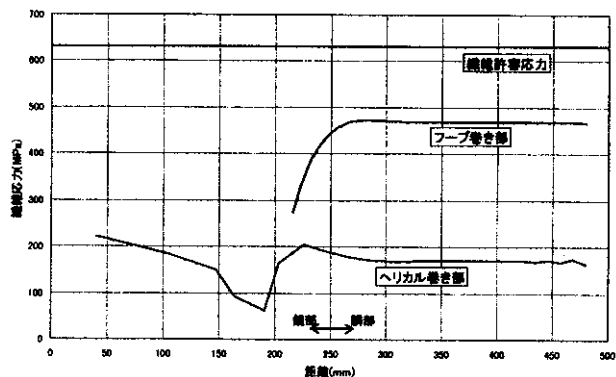


図19 圧縮天然ガス自動車用燃料容器の解析結果

4. 結論

本研究では汎用有限要素法プログラムを用いた「円筒容器における積層理論の検証」と一連の検討結果をもとにした「ライナー付きFRP圧力容器の構造設計」を試み、以下の知見を得た。

- (1) 等方性材料であるアルミライナー部分の解析結果は、実験結果と良く一致している。
- (2) アルミライナー付きFRP円筒容器全体の解析結果は、実験結果と良く一致している。
- (3) 以上のことから異方性複合材料円筒容器の弾性評価において、汎用有限要素法プログラムと積層理論を用いた本手法の有効性が検証された。
- (4) 一連の検討結果を用いた設計例として、圧縮天然ガス自動車用燃料容器の国内法規に基づき、線形領域内のFRP部分に関して、基準を満たした燃料容器設計が可能であることを明らかにした。