

プラスチック製ライナーを用いた CFRP 圧力容器の
構造設計に関する研究

日本大学大学院
生産工学研究科 機械工学専攻

黒 澤 彬 元

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 従来の研究	4
1.3 本研究の目的	8
1.4 本論文の構成	10
第 2 章 Type-4 容器の基本仕様	15
2.1 緒言	15
2.2 Type-3 容器の仕様	15
2.3 空気呼吸器用 Type-4 容器の構造設計	16
2.3.1 プラスチックライナーの設計	16
2.3.2 口金の設計	17
2.3.3 プラスチックライナーの構成	18
2.3.4 基本仕様容器 (Basic model) の設計	18
2.3.5 Basic model の構造	19
2.3.6 Type-4 容器の質量	20
2.4 結言	20
第 3 章 有限要素法解析	45
3.1 緒言	45
3.2 Type-4 容器の FEM 解析の方法	45
3.2.1 解析を行う容器の種類	45
3.2.2 材料物性値	48
3.2.3 解析条件	51
3.2.4 評価基準	51
3.3 FEM 解析結果	52
3.3.1 容器 A (Type-3 容器)	52
3.3.2 容器 B (Basic model)	52
3.3.3 容器 C (Modified model_1)	53
3.3.4 容器 D (Modified model_2)	53
3.3.5 容器 E (Modified model_3)	53
3.4 結言	54

第 4 章 空気呼吸器用 Type-4 容器の FW 成形	72
4.1 緒言	72
4.2 Type-4 容器の FW 成形方法	72
4.2.1 FW 成形	72
4.2.2 エポキシ樹脂のゲル化	74
4.2.3 エポキシ樹脂の完全硬化	74
4.3 性能評価試験用容器の成形	75
4.4 結言	76
第 5 章 Type-4 容器の性能評価試験	94
5.1 緒言	94
5.2 容器の評価基準	95
5.3 破裂試験	95
5.3.1 破裂試験の方法	95
5.3.2 破裂試験の結果	96
5.3.3 FEM 解析結果と実験結果の比較	97
5.4 落下後の破裂試験	98
5.4.1 落下後の破裂試験の方法	98
5.4.2 落下後の破裂試験の結果	99
5.5 圧力サイクル試験	100
5.5.1 圧力サイクル試験の方法	100
5.5.2 圧力サイクル試験の結果	101
5.6 落下後のサイクル試験	101
5.6.1 落下後のサイクル試験の方法	101
5.6.2 落下後のサイクル試験の結果	102
5.7 欠陥試験	102
5.7.1 欠陥試験の方法	102
5.7.2 欠陥破裂試験の方法	103
5.7.3 欠陥破裂試験の結果	103
5.7.4 欠陥サイクル試験の方法	104
5.7.5 欠陥サイクル試験の結果	104
5.8 ボス部の強度確認試験	104
5.8.1 ボス部の強度確認試験の方法	104
5.8.2 トルク試験の方法	105
5.8.3 トルク試験の結果	105
5.8.4 ボス強度試験の方法	106

5.8.5 ボス強度試験の結果	106
5.9 結言	107
第 6 章 結論	151
6.1 本研究で得た成果	151
6.2 今後の課題	153
参考文献	154
謝辞	159

Study on structural design of CFRP pressure vessel using plastic liner

Akimoto Kurosawa

Graduate doctoral Program of Mechanical Engineering

Abstract

CFRP pressure vessels are lightweight and achieve high filling pressures. Hence, they are used in high-pressure vessels such as self-contained breathing apparatus (SCBA), compressed natural gas (CNG) vessels, and fuel cell vehicles (FCV) hydrogen vessels. There are two types of CFRP pressure vessels depending on the material of the liner: type-3 pressure vessel using a metal liner and type-4 pressure vessel using a plastic liner. Recently, research and development of type-4 pressure vessels, which are lighter than type-3 pressure vessels, has been actively conducted, and consequently, hydrogen storage containers for FCV have been put to practical use.

However, the production scale and operating conditions differ greatly between high-pressure vessels, such as FCV hydrogen vessels, and pressure vessels used in SCBA. Thus, it is not appropriate to apply the same manufacturing method and design standards for pressure vessels used in SCBA as in FCV hydrogen vessels.

Therefore, in this study, we set the design target of the type-4 pressure vessel used for small SCBA and carried out the structural design of the type-4 pressure vessel, then we manufactured a prototype of the pressure vessel. Specifically, the thermoplastic polymer liner was molded using blow molding method, which is suitable for high-mix low-volume production. After the structural design was performed by a finite element method (FEM), the type-4 pressure vessel was prototyped using filament winding process. Furthermore, we conducted performance evaluation tests such as a burst test, fatigue life test, and impact resistance test on the prototype of the type-4 pressure vessel.

As a result, it became clear that the weight of the developed type-4 pressure vessel was 20% lighter than that of the conventional type-3 pressure vessel.

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年，軽量化による燃費向上や，性能向上の観点から，鉄鋼材料やアルミニウム合金などの金属材料と比較し，比強度，比剛性に優れた，繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics : FRP)が注目されている¹⁾。FRP とはプラスチックを繊維で補強した材料であり，炭素繊維やガラス繊維などの繊維材料を強化材，プラスチックを母材と呼び，一般的に炭素繊維を強化材に用いた FRP を炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)，ガラス繊維を用いたものをガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastics : GFRP)と呼ぶ。

表 1.1 に金属材料と FRP に使用されている代表的な繊維と，それらを用いた複合材料の引張強さ，ヤング率，比重量を示す²⁾。表 1.1 から FRP は金属材料に比べて比強度，比剛性に優れていることが確認できる。これらの特徴から，FRP は強度を確保しつつ軽量化が要求される分野で活用されている。

近年，FRP の性能向上や研究が進められていく中で，適用製品範囲の拡大が進んでおり，多種様々な分野への FRP の活用が期待されている。特に，繊維が持つ繊維方向の引張に対する比強度・比剛性の高さを最大限に生かすことができ，耐腐食性も高いことから，FRP 複合容器への適用が期待されている。

FRP 複合容器とは，ライナー(金属製またはプラスチック製の薄肉容器)の外表面に，CFRP または GFRP をフィラメント・ワインディング法(以下，FW 法³⁾)により巻きつけ強化した圧力容器のことである。FW 法とは樹脂含浸連続繊維を回転するライナーに繊維

張力を作用させながら任意の角度で、連続的に巻き付ける成形方法である。このFW法には、ライナー全面の子午線方向及び鏡部の補強を目的とし、ライナー円筒胴部及び鏡部に繊維を螺旋状に巻くヘリカル巻きと、ライナー円筒胴部の周方向の補強を目的とし、ライナー胴部に繊維を軸方向とほぼ直角に巻くフープ巻がある。

一般的に高圧ガス容器は、その構造・材質により図 1.2 に示すような Type-1～Type-4 の容器に分類される⁴⁾。

①Type-1 容器

金属製の継目なし容器である。安全性が高く長い歴史を有している。なお、強度や製造コストの面から、一般的には鉄鋼材料が用いられており 4 種類の容器の中では破裂圧力が小さい容器である。

②Type-2 容器

金属ライナーの胴部にFRPを周方向にFW成形（フープ巻）した複合容器である。

③Type-3 容器

金属ライナーにフープ巻きと、ヘリカル巻きにてライナー全体にFRPをFW成形（フルラップ）した複合容器である。

④Type-4 容器

Type-3 容器のライナーを金属からプラスチックに代え、FRPをフルラップした複合容器である⁵⁾。

高圧ガス容器は Type-1 の金属製の容器から実用化が始まり、航空宇宙分野や民生品自動車への用途の拡大、技術の発展に伴い、Type-2、Type-3 そして Type-4 容器のような複合容器が開発され、軽量化されてきた。

なお、FRP 複合容器の歴史は、1950 年代のロケットモーターケースの開発等の航空宇宙分野が起源とされている⁶⁾。世界初の民生用 FRP 複合容器は、1976 年に SCI 社と Luxfar 社が特別認可⁷⁾を取得した GFRP 容器である。一方で日本における最初の民生用の一般複合容器は、1982 年に川重防災株式会社と株式会社旭製作所が特別認可を取得した、アルミニウム合金製ライナーに GFRP をフルラップした GFRP 複合容器である⁸⁾。初期に製造・販売された FRP 複合容器の多くは、金属製のライナーに GFRP をフルラップした GFRP 複合容器だった⁹⁾。

アルミニウム合金ライナーに、GFRP をフルラップした GFRP 容器の場合は、同一圧力、同一容積の Cr-Mo (クロム・モリブデン鋼) 製の容器と比較し、約 1/2 程度の質量に軽量化することが可能である。さらに CFRP をフルラップした CFRP 複合容器の場合は、1/3 程度まで軽量化が可能である⁹⁾。現在、民生用に普及している FRP 複合容器の多くは、アルミニウム(AL)合金製のライナーにエポキシ樹脂を含浸した炭素繊維をフルラップした Type-3 の CFRP 複合容器が主流となっている。

アルミニウム合金ライナーに CFRP をフルラップした Type-3 の CFRP 複合容器は、軽量で高い充てん圧力を実現できるため、医療用酸素容器(Home Oxygen Therapy:HOT)や、消防士が使用する陸上空気呼吸器用容器(Self-Containing Breathing Apparatus:SCBA)などの一般複合容器や、圧縮天然ガス自動車や燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle:FCV)の燃料タンク等の自動車分野、航空宇宙機器等の軽量化が要求される多様な分野で、幅広く使用されている。

しかしながら、この Type-3 容器はライナーに金属材料を採用しているため、容器自体の軽量化には限界がある。そのため近年で

は、燃料タンクの更なる軽量化による、燃費向上や性能向上の観点から、ライナー材料を従来のアルミニウム合金から、より比重の軽いプラスチックをライナー素材に採用した Type-4 容器の研究・開発が自動車分野で進められている^{10, 11)}。特にわが国では、平成 22 年 7 月に使用圧力 70MPa 用の圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準¹²⁾が制定され、国内における Type-4 容器の実用化が始まっている^{13, 14)}。図 1.3 に国内で実際に使用されている Type-4 容器であるトヨタの燃料電池自動車 MIRAI の水素燃料用 CFRP 製圧力容器を示す。

1.2 従来の研究

FRP 複合容器は、軽量で高い充てん圧力を実現できるため、1950 年代に誕生して以降、軽量化が要求される分野で広く使用されている。ここでは、過去に実施された FRP 容器に関する研究について述べる。

(1) FRP 容器の設計に関する研究

はじめに、FRP 複合容器の成形に用いられる FW 法は複合材料の成形法の中でも、高圧ガス容器やシャフト、パイプ等の円筒部材を高強度かつ、最も容易に成形することが可能な成形方法である^{15, 16)}。この FW 法は、1947 年にアメリカで航空機用圧力容器用が開発され、その後民生用 FRP 容器の需要の高まりとともに、1960 年代に民生用 FRP 容器に応用されるようになった。

この FW 法は、樹脂含浸連続繊維に繊維張力を作用させながらライナーに巻きつけ、FRP 容器を成形する。しかし、成形時に作用させる繊維張力により、直前に巻かれた層の繊維張力に緩みが生じることにより、FRP 複合容器の FRP 層の破断ひずみは試験

片の破断ひずみよりも小さくなることが確認されている¹⁷⁾。そのため、FW 成形では、繊維や樹脂などの使用材料の他にも、繊維を巻く順番（積層構成）や、繊維張力の値、成形時間等の成形条件も破裂圧力に影響を与える要因となる。また、Cohen ら^{18,19)}は FW 成形時に作用する繊維張力の他に、繊維の切断の有無や、成形時間等の成形条件及び、FRP 層の積層構成が破裂圧力に及ぼす影響を検証した。

FRP 複合容器の巻き方には、円筒部に繊維を巻き付けるフープ巻と、容器の円筒胴部と鏡部を巻くヘリカル巻があり、フープ巻は円筒胴部の強度、ヘリカル巻は鏡部を含めた容器全体の強度に寄与している。

山脇ら²⁰⁾は、ヘリカル巻きの円筒殻の内圧強度について解析と実験を行い、従来の FW 円筒殻の内圧強度の設計の指標となっていた、網目理論が巻き角度 55° 近傍にしか適用できないことを検証した。さらに、これまで、FRP 複合容器の鏡部の設計には繊維方向応力（繊維の引張り強さ）のみで強度を分担する網目理論が設計の主流だったが、網目理論では内圧を作用させた初期段階で F_T （繊維直角方向の引張り強さ）、 F_{LT} （繊維と樹脂のせん断強さ）破損を起こしやすい。そのため、Fukunaga ら²¹⁾は σ_T （繊維直角方向の応力）または、 ε_T （繊維直角方向のひずみ）がゼロとなる条件を、Liang ら²²⁾はライナーの形状係数に基づく鏡部の設計方法を提案している。なお、竹花^{23,24)}は、フープ巻きが破裂圧力に及ぼす影響について検証し、フープ層の端部位置（フープ層の巻き始めの位置と、巻終わり位置）と破裂圧力の関係性を破裂試験と有限要素法（Finite Element Method, FEM）解析で明らかにしている。さらに、近年では、FRP 複合容器の設計から開発終了（認可取得）に至るまで、FEM 解析による解析結果が要求されている。そこで、Xu ら²⁵⁾は、FEM 解析において、破

裂圧力を予測する際に用いる複合材の破損則について検証し、最大応力説、Hoffman 則、Tsai-Hill 則、Tsai-Wu 則²⁶⁾の4つの破損則で算出した破裂圧力と破裂実験の結果を比較している。

FRP 複合容器の最適化に関する研究では、アルミニウム合金ライナーの板厚や CFRP 層の成形条件等を設計変数とした、検証結果が報告されている。

Kim ら^{27,28)}は遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) により、FRP 層 (ヘリカル層とフープ層) の ply 数や、ヘリカル層の巻き角度、ライナーの板厚を変数として、CFRP 複合容器の質量が最小となる最適設計の検証をしている。また、Liu ら²⁹⁾は人工免疫システム (Artificial Immune System: AIS) により、破裂圧力を一定条件とし、CFRP 層円筒胴部の板厚と、半径を設計変数とした場合に、容器質量が最小となる最適設計の検証を行っている。さらに、Xu ら³⁰⁾は適応型遺伝的アルゴリズム (Adaptive Genetic Algorithm: AGA) により、破裂圧力を一定条件とし、CFRP 層円筒胴部の板厚と、半径を設計変数とした場合の最適設計について検証を行っている。

なお、近年では、応力解析の予測値と破裂試験結果の比較のみならず、破裂試験における破裂起点の予測や、高温曝露が破裂圧力に及ぼす影響等の検証もされている。

倉田³¹⁾らは、Type-3 CFRP 合圧力容器の破裂試験と高速度ひずみの測定を行い、各所の弾性波の到達時刻の差から破壊起点の予測を行った。さらに、マクロフラクトグラフィにより、破裂後の各フィラメントの破断長さや積層構成から、破断位置の特定方法について検証を行った。

本田³²⁾らは、高温曝露した後に冷却した Type-3 容器を用いて室温における破裂試験を行い、高温曝露の温度と保持時間が破裂圧力の低下や、破裂起点に及ぼす影響を検証した。

(2) Type-4 容器に関する研究

一般的に Type-4 容器に用いるプラスチック製のライナーは、ブロー成形や射出成形、回転成形等、一般的なプラスチック容器を製造する方法^{33, 34)}で製造されている。さらに、これらの製造方法でライナーの鏡部と胴部を別々に成形した後に、胴部と鏡部を熱溶着させた溶接ライナーも報告されている³⁵⁾。しかしながら、これらの射出成形や、回転成形等の製造方法は一般的には大量生産を前提とした製造方法であるため設備費用が高価である。さらに、空気呼吸器用容器は、自動車用の燃料タンクと比較し、生産量や付加価値が異なるため、同様の製造方法やライナー素材では金型等の設備費など、コストの点で課題が残る。

富岡らは^{36, 37)}、自動車用燃料タンク用の Type-4 容器の圧力サイクル試験(疲労寿命試験)を実施し、圧力サイクルの作用圧力が残存破裂強度に及ぼす影響について評価している。また、容器の生産時点から、車両に搭載され使用期限を迎えるまでの圧力を想定し、落下試験や常温圧力サイクル試験等の各試験を連続して1個の容器に作用させる、End-of-Life にて、落下試験や常温圧力サイクル試験等を実施した容器を破裂させ、その後の残存破裂強度について検証している³⁸⁾。

以上、FRP 複合容器 (Type-3, Type-4 容器) に関する従来の研究を概説したが、それらのほとんどが、自動車の燃料タンク (CNG や FCV) の性能評価に関する検証である。また、現在国内では、トヨタより燃料電池自動車の燃料タンクの Type-4 容器が開発され、それに関する特許³⁹⁾も無償公開されていることから、国内における燃料電池自動車用の Type-4 容器の製造方法や設計技術は概ね確立されていると考えられる。

この一方で、一般複合容器用の Type-4 容器に関する研究成果は発表されていない。そのため、空気呼吸器用容器のような小型で多品種少量生産に適した Type-4 容器の製造方法の確立や、一般複合容器の性能を満足する積層構成の検証などが課題として残っている。

1.3 本研究の目的

一般複合容器に代表される空気呼吸器用容器は、消防士の火災現場における活動や、安全確保の上で必須となる。さらに、消防活動は、消火・救命などの緊急な対応が要求されるため、空気呼吸器用容器には、容易な装着性および、装着後の機敏な作業、装着者の体力消耗を最小限にすることが要求されている。そして、空気ガスを充てんする容器の質量は、装着者の負担に大きく関わってくるため、軽量化は大きな課題である。現在、国内で使用されている空気呼吸器用容器の多くは、鋼製容器と同等の基本性能を有しながら、鋼製容器と比較し 1/3 という大幅な軽量化が可能である Type-3 の CFRP 複合容器となっている⁴⁰⁾。

このため更なる軽量化のためには、プラスチックライナーに FRP をフルラップした Type-4 容器の適用が考えられるが、現在国内では、Type-4 一般複合容器の技術基準は制定されていない。

国内で空気呼吸器用 Type-4 容器を設計・製造するためには、欧州にて制定されている BS EN12245⁴¹⁾または、ISO-11119⁴²⁾を用いる必要があるが、いずれの規格でも、日本国内で製造する場合は、経済産業大臣の特別認可取得が必要となる。

そこで本研究では、空気呼吸器用 Type-4 容器の実用化を最終目標とし、多品種少量生産に適したブロー成形で成形した高密度ポリエチレン(HDPE)をライナー素材に採用した空気呼吸器

用 Type-4 容器の構造設計と性能評価試験を実施した。具体的には、有限要素法を用いた応力解析，FW 試作成形，破裂試験（評価）や、圧力サイクル試験（疲労寿命の評価），落下試験（耐衝撃性の評価）等の評価試験を実施し、空気呼吸器用 Type-4 容器の常温における強度試験の結果と、従来の Type-3 容器に対しての軽量化率について検証した。

特に、空気呼吸器用容器は自動車用の燃料タンクと異なり高い安全率と耐衝撃性が要求される。自動車用の燃料タンクでは、充てん圧に対する安全率は 2.25 倍であり、落下試験（耐衝撃性）で要求される性能は疲労寿命のみとされているが、空気呼吸器用容器の場合は、充てん圧力に対し 3.4 倍と高い安全率が要求されている。さらに、落下試験においては、疲労寿命の他に、通常の破裂圧力と同等な高い残存破裂圧力を満足する必要がある。しかし空気呼吸器用 Type-4 容器の耐衝撃性の向上に関する研究は行われていない。

本研究では、空気呼吸器用 Type-4 容器の破裂圧力や落下後の破裂圧力を向上させることができる積層構成を FEM による応力解析と破裂試験で検証した。この点が本研究の最大の特徴といえる。

1.4 本論文の構成

本論文は「プラスチック製ライナーを用いた CFRP 圧力容器の構造設計に関する研究」と題し、全 6 章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第 1 章の「序論」では、容器の種類と、FRP 複合容器の特色と実用例について説明し、空気呼吸器用 Type-4 容器の実用化と残された課題、本研究を行った目的について述べる。

第 2 章の「Type-4 容器の基本仕様」では、本研究で使用する Type-4 容器の基本設計を行い、仕様の決定や Type-4 容器の軽量化率について検証した結果について述べる。

第 3 章の「有限要素法解析」では、Type-4 容器の応力解析を行い、破裂圧力を満足可能な積層構成の検証を行った結果について述べる。

第 4 章の「空気呼吸器用 Type-4 容器の FW 成形」では、性能評価試験に用いる Type-4 容器の製作方法について述べる。

第 5 章の「Type-4 容器の性能評価試験」では、Type-4 容器を用いて実施した、各種性能試験の結果と考察について述べる。

第 6 章の「結論」では、本研究で得られた成果について述べる。

表 1.1 金属および強化用繊維の力学的性質

		Modulus of elasticity [GPa]	Tensile strength [GPa]	Specific weight [kN/m ³]
Metal	High tensile steel	210	1400	76
	Aluminum alloy	69	240	26
Fiber	Glass fiber	75	2500	25
	Carbon fiber	230	3000	17
FRP	GFRP	42	1400	20
	CFRP	140	1600	16

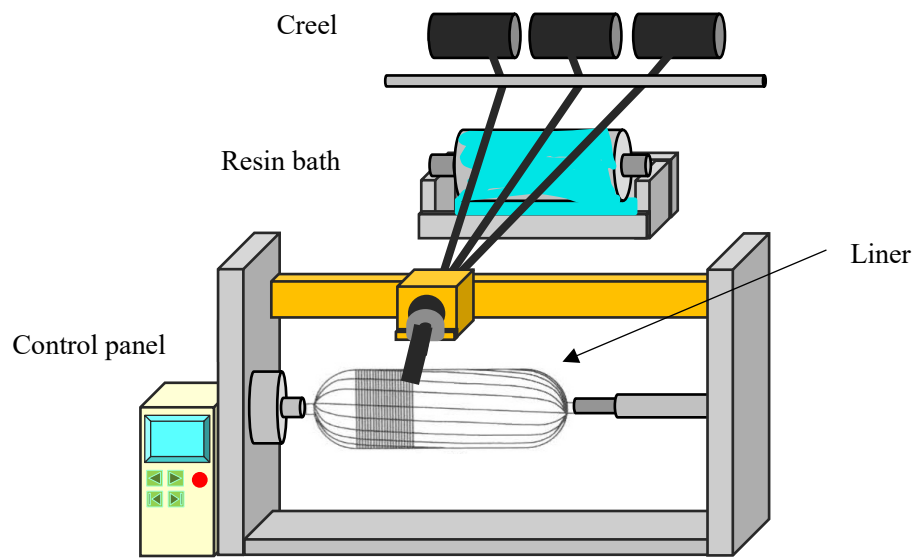
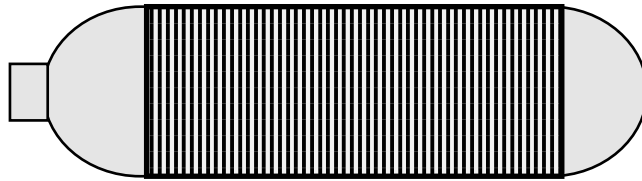


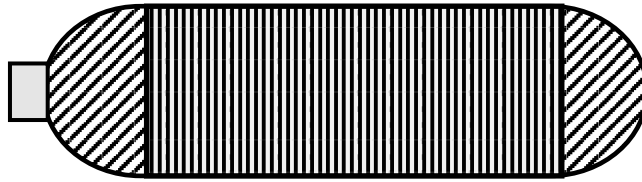
図 1.1 フィラメントワインディングの概要図



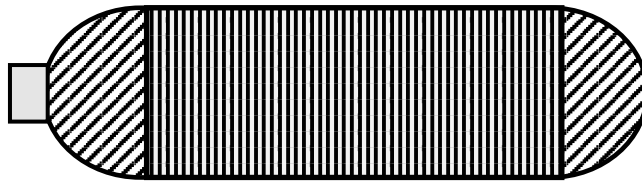
a) Type-1 vessel: Metal



b) Type-2 vessel: Metal liner + Hoopwrap



c) Type-3 vessel: Metal liner + CFRP, GFRP(Hoopwrap, Helicalwrap)



d) Type-4 vessel: Plastic liner + CFRP, GFRP(Hoopwrap, Helicalwrap)

図 1.2 圧力容器の種類



図 1.3 MIRAI に搭載された水素燃料タンク用 Type-4 容器

第 2 章 Type-4 容器の基本仕様

2.1 緒言

第 2 章では、本研究で用いる空気呼吸器用 Type-4 容器の基本設計を行った。2.2 節では、本研究で用いる Type-4 容器を設計するにあたり、形状、寸法のベースとした 4.7L の Type-3 容器の仕様を述べる。2.3 節では Type-4 容器の基本仕様を、そして 2.4 節では結言として第 2 章で得られた成果をまとめる。

2.2 Type-3 容器の仕様

本研究で用いる Type-4 容器を設計するにあたり寸法、形状や内容積等の基本仕様のベースとした、Type-3 容器の仕様を表 2.1 に示す。この Type-3 容器は、現在市販されている 4.7L の Type-3 空気呼吸器用容器であり、アルミニウム合金ライナーに強度分担層である CFRP をフルラップし、その上に保護層の GFRP をフルラップした構成となっている。表 2.2 に 4.7L Type-3 容器の積層構成を示す。

なお、Type-3 容器は、国内の製造規格 KHKS0121⁴³⁾が制定されているため、この KHKS0121 に準拠し設計および製造を行った。

最高充てん圧力(使用圧力)は 29.4MPa とし、耐圧試験圧力は 49.0MPa、最小破裂圧力は 100.0MPa(使用圧力 29.4MPa × 3.4 倍)とした。

2.3 空気呼吸器用 Type-4 容器の構造設計

2.3.1 プラスチックライナーの設計

燃料電池自動車用の Type-4 容器用に使用されているプラスチック製ライナーは、量産性の観点から射出成形で製造されている。しかしながら空気呼吸器用容器の生産数量は月産数百本程度である。そのため射出成形による空気呼吸器用容器のライナー製造は金型や成形機等の設備償却を考えると適切な選択ではない。そのため、空気呼吸器用容器に用いるプラスチックライナーの製造方法には、多品種少量生産に適した成形方法を採用する必要がある。そこで、本研究で使用するプラスチックライナーの製造方法には、樹脂材料の製造方法の一種であり、多品種少量生産に適しているブロー成形法⁴⁴⁾を採用した。さらに、このブロー成形は、射出成形⁴⁵⁾や回転成形⁴⁶⁾等の製造方法と比較し、初期設備費用が抑えられるため、空気呼吸器用ライナーの製造方法に最も適しているといえる。さらにライナーの材質には、ブロー成形で、良好な成形性を有する高密度ポリエチレン(HDPE)を採用した。

図 2.1 に本研究にて設計した、プラスチックライナーの寸法、形状を示す。なお本ライナーの形状は、2.2 節で述べた、内容積 4.7L の Type-3 容器のアルミニウム合金製ライナーと同じとした。プラスチックライナーの設計板厚は 2mm とする。

図 2.2 に本研究に用いたブロー成形の金型を、図 2.3 にブロー成形したプラスチックライナーを示す。

2.3.2 口金の設計

プラスチックライナーは、Type-3 容器に用いられている金属製ライナーと比較すると材料強度が低いため、プラスチックライナー単体へのバルブ装着が不可能である。そのため、プラスチック製ライナーの充てん口部にはバルブ装着用の金属製の口金を装着する必要がある。さらに、FW 成形後に繊維が積層されないライナーの底端部を補強するための口金も装着しなければならない。

そこで、本研究では、Type-4 容器のバルブ装着用の頭部ボス口金と、底端部を補強する底部ボス口金と、気密性を確保するためのシール用口金を設計・製作した。なお、これらの口金はアルミニウム合金 (A6061-T6) で作製した。A6061-T6 は、一般複合容器に代表される空気呼吸器用容器や医療用酸素容器のライナー材料に採用されていることから、Type-4 空気呼吸器用容器の口金の材質として適正と言える。図 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 に本研究で設計した口金の図面を示す。

本研究では、図 2.4, 図 2.5 に示すように、2 種類の頭部ボス口金を設計した。図 2.4 の口金は、頭部ボス口金 a とし、製造コストなどを鑑み単純な構造の頭部ボス口金とした。図 2.8 に頭部ボス口金 a の外観形状を示す。一方で、図 2.5 の口金は、頭部口金 a にて確認された、R 部の強度不足と、FW 成形後の頭部口金の密着性不足を解決した、頭部ボス口金 b とした。この口金は、強度向上のため R 部の増肉と、ライナー接触面を拡大させた。また口金の緩みを抑制するために、くびれを追加した形状とした。図 2.9 に頭部ボス口金 b の外観形状を示す。

図 2.6 は、Type-4 容器の気密性を確保するため、頭部ボス口金とプラスチックライナー内に装着されるシール用口金である。図 2.10 にシール用口金の外観形状を示す。なお、容器に装着する際は同図に示すように Oリング溝に Oリングを取り付けて使用する。

そして、図 2.7 は底部の強度向上と、FW 成形の際に底部を固定する底部ボス口金である。図 2.11 に底部ボス口金の外観形状を示す。本研究では、Type-4 容器の FW 成形の際に底部を心押し軸で固定しながら繊維を巻き付けたため、心押し用の穴を設けた。

2.3.3 プラスチックライナーの構成

図 2.12 に頭部ボス口金 a を装着したライナーの全体図を、図 2.13 には頭部ボス口金 b をライナーの全体図を示す。組立図に示すように、ブロー成形したプラスチック製ライナーの充てん口に頭部ボス口金を、底部には底部ボス口金を装着する。図 2.14 に頭部ボス口金 a を装着したライナーの外観を、図 2.15 には頭部ボス口金 b をライナーの外観を示す。このように、Type-4 ライナーは、金属単体の Type-3 のライナーとは異なり、ライナーが複数の部品で構成されている。そのため、気体充てん時と充てん後にプラスチック製ライナーとバルブ取付け用口金との接合部から気体が漏れないようにする必要がある。そこで、本研究では Oリングを装着したシール口金を頭部口金のねじ部から内部に挿入した。シール口金を装着することで、図 2.16 に示すように、プラスチック製ライナーの充てん口部内面を、Oリングにてシールし、気体が内部から漏れるのを防ぐ構造とした。

2.3.4 基本仕様容器（Basic model）の設計

本研究で設計する Type-4 容器の基本的な寸法・形状は、2.2 節にて述べた 4.7 L の Type-3 容器と同等とする。そして、Type-3 容器のアルミニウム合金ライナーをプラスチック製ライナーに置き換えた構造の Type-4 容器を Basic model とする。

Basic model の最高充てん圧力（使用圧力）は、Type-3 同じ 29.4MPa とした。なお、1 章で述べたように現在、国内では、Type-4

一般複合容器の技術基準は制定されていない。そのため本研究では、欧州で使用されている製造規格 EN12245 と、EN 規格のベースとなった ISO11119 に準拠し耐圧試験圧力(試験圧力)や、最小破裂圧力を設定した。しかしながら、EN12245 では、破裂圧力が低下しやすい落下試験(耐衝撃試験)においても同様の最小破裂圧力が要求される。そのため、本研究では、最小破裂圧力よりも高い破裂圧力(設計破裂圧力)を独自に設定した。

本研究で用いる Type-4 容器の耐圧試験圧力は 44.1MPa(使用圧力×1.5 倍)、最小破裂圧力は 88.2MPa(耐圧試験圧力 44.1MPa×2)とした。なお設計破裂圧は、Type-3 容器の最小破裂圧力とおなじ 100.0MPa(使用圧力×3.4 倍)とした。表 2.3 に Basic model の Type-4 容器の仕様を示す。

2.3.5 Basic model の構造

Basic model の Type-4 容器は、図 2.17 に示すようにプラスチックライナーに FW 法にて強度分担層である CFRP をフルラップし、さらに容器最外層には保護層の GFRP をフルラップした構成となっている。図 2.17 に示す α は容器中心軸からの繊維配向角度であり、 $\alpha = 90^\circ$ の場合をフープ層、 $\alpha \neq 90^\circ$ の場合をヘリカル層と呼ぶ。ドーム部のヘリカル層の繊維角度 α は、式(2.1)を満足するように決定した⁴⁷⁾。

$$r_x \sin \alpha = r \quad (2.1)$$

ここでは、 r_x は繊維が巻き付けられる容器部の半径、 r は口金半径とした(図 2.18)。この条件により成形した Basic model の詳細な板厚構成と繊維角度を表 2.4 に示す。

2.3.6 Type-4 容器の質量

表 2.5 に Type-3 容器と, Type-4 容器の質量の比較を示す. 同表に示すように, 本研究で設計した Type-4 容器の質量は 2.2kg であり, 市販品の 4.7L Type-3 容器の 2.7kg と比較すると約 20% 程度の軽量化が可能である. これは, それぞれのライナーの質量差に起因していることが確認できる. Type-3 容器のアルミニウム合金ライナーの質量が 1.10kg であるのに対し, Type-4 容器のプラスチック製ライナーは 0.55kg と約半分の質量となっている. 本設計では, アルミニウム合金ライナーとプラスチックライナーの内容積や外観寸法は同じであるが, HDPE の比重が 0.95 と, アルミニウム合金の比重 2.7 と比較し小さいため, 軽量化が実現できた.

2.4 結言

2 章では, 空気呼吸器用 Type-4 容器の基本設計を行い, 本研究に使用する Type-4 容器の仕様を決定した.

(1) ライナーの寸法形状と質量

本研究で用いる Type-4 容器用のプラスチックライナーは, 4.7L の高密度ポリエチレンのプラスチックライナーにアルミニウム合金の口金を装着した構成とした. なお組立後のプラスチックライナーの総質量は, ベースとした Type-3 容器のアルミニウム合金ライナー質量と比較し, 半分の質量を目標とする.

(2) Type-4 容器の仕様

本章で設計した空気呼吸器用 Type-4 容器は, 内容積や寸法, 形状, 使用圧力は, 市販品の Type-3 と同じとしたが, 耐圧試験圧力や, 最小破裂圧力は, EN 12245 に準拠した.

(3) Type-4 容器の軽量化

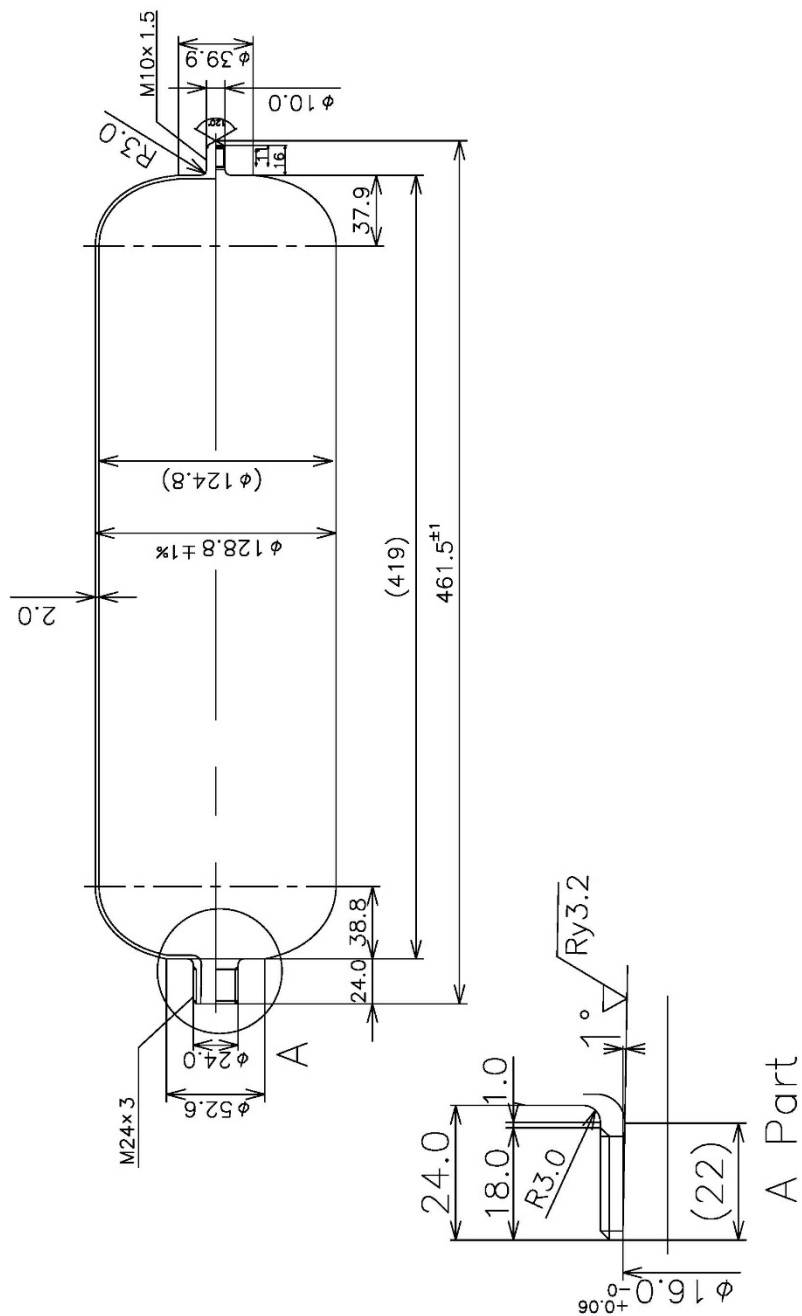
本研究で用いる Type-4 容器は, 同内容積の Type-3 容器と比較し 20%の軽量化を実現可能である.

表 2.1 4.7L Type-3 空気呼吸器用容器の仕様

Internal volume	4.70 L
Filling pressure	29.4 MPa
Test pressure	49.0 MPa
Minimum burst pressure	100.0 MPa
Outer diameter	140 mm
Overall length	450 mm

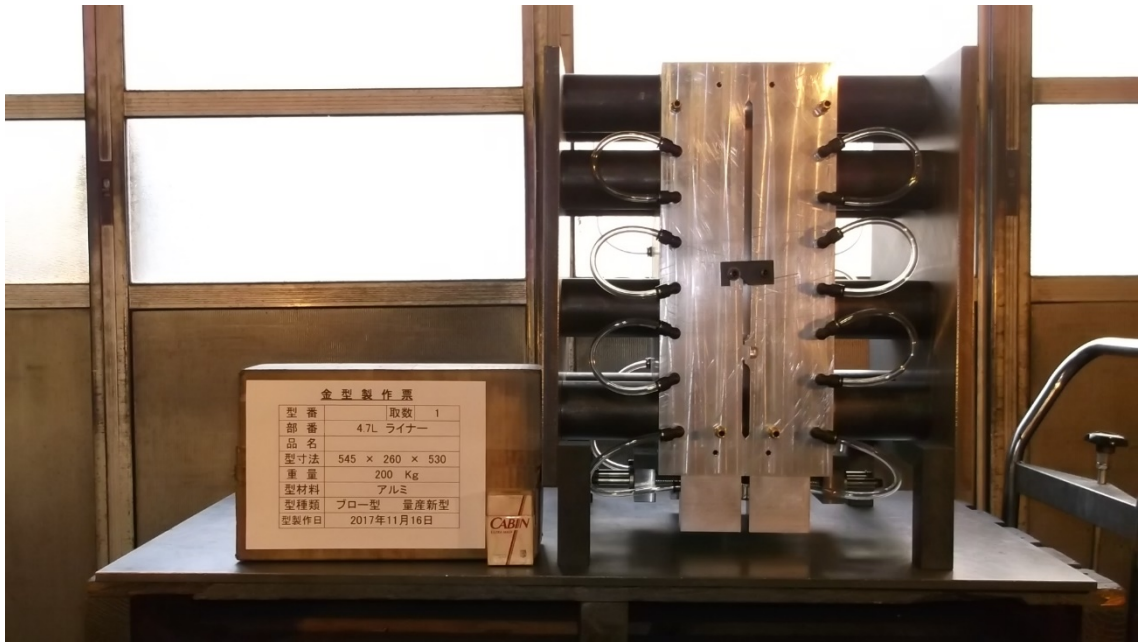
表 2.2 4.7L Type-3 容器の板厚と繊維角度

	Liner (AL)	Reinforcement layer (CFRP)			Reinforcement layer (GFRP)	
		1 layer	2 layer	3 layer	4 layer	5 layer
Thickness	1.5 mm	1.85 mm	1.85 mm	0.3 mm	0.56 mm	0.22 mm
Fiber angle		90°	±18.8°	90°	±14.2°	90°

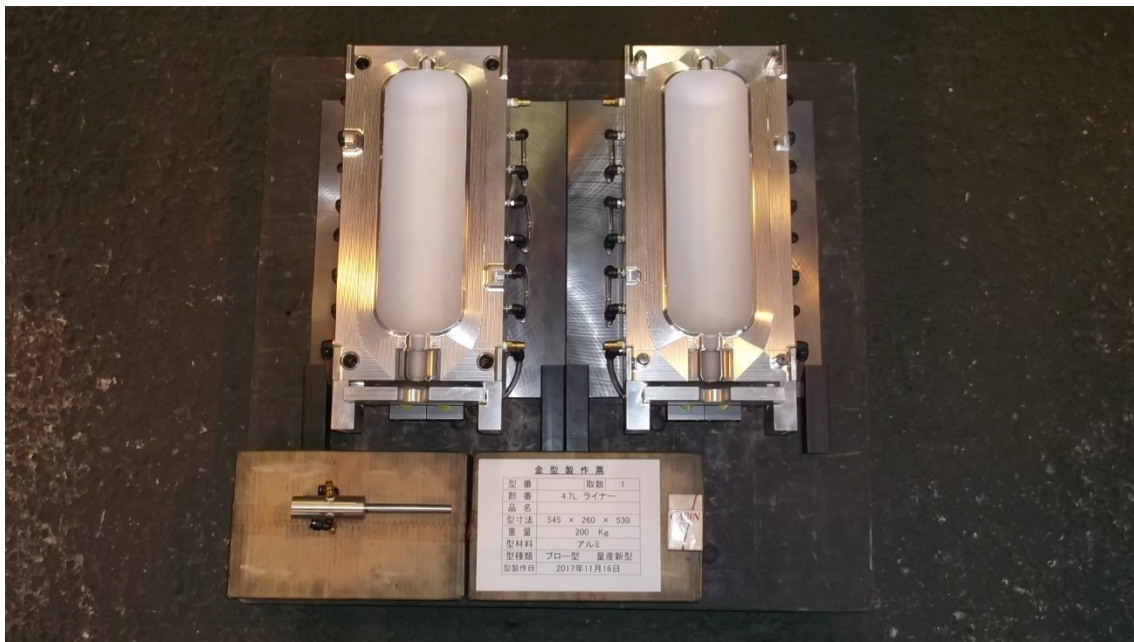


Unit : mm

図 2.1 プラスチックライナーの形状寸法



(a) 金型外観



(b) 金型内面

図 2.2 ブロー成形の金型



図 2.3 高密度ポリエチレン製ライナーの外観

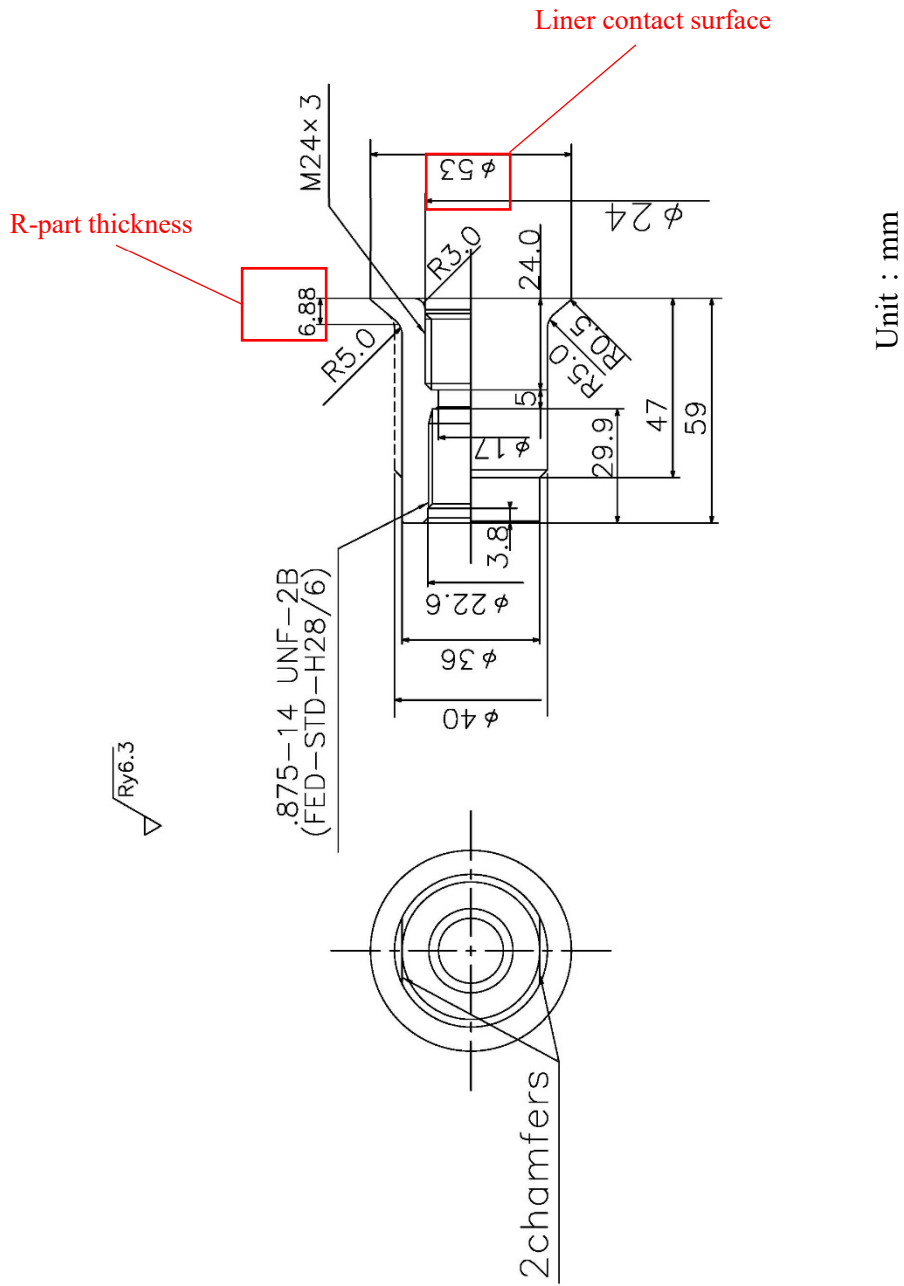


図 2.4 頭部ボス口金 a の形状寸法

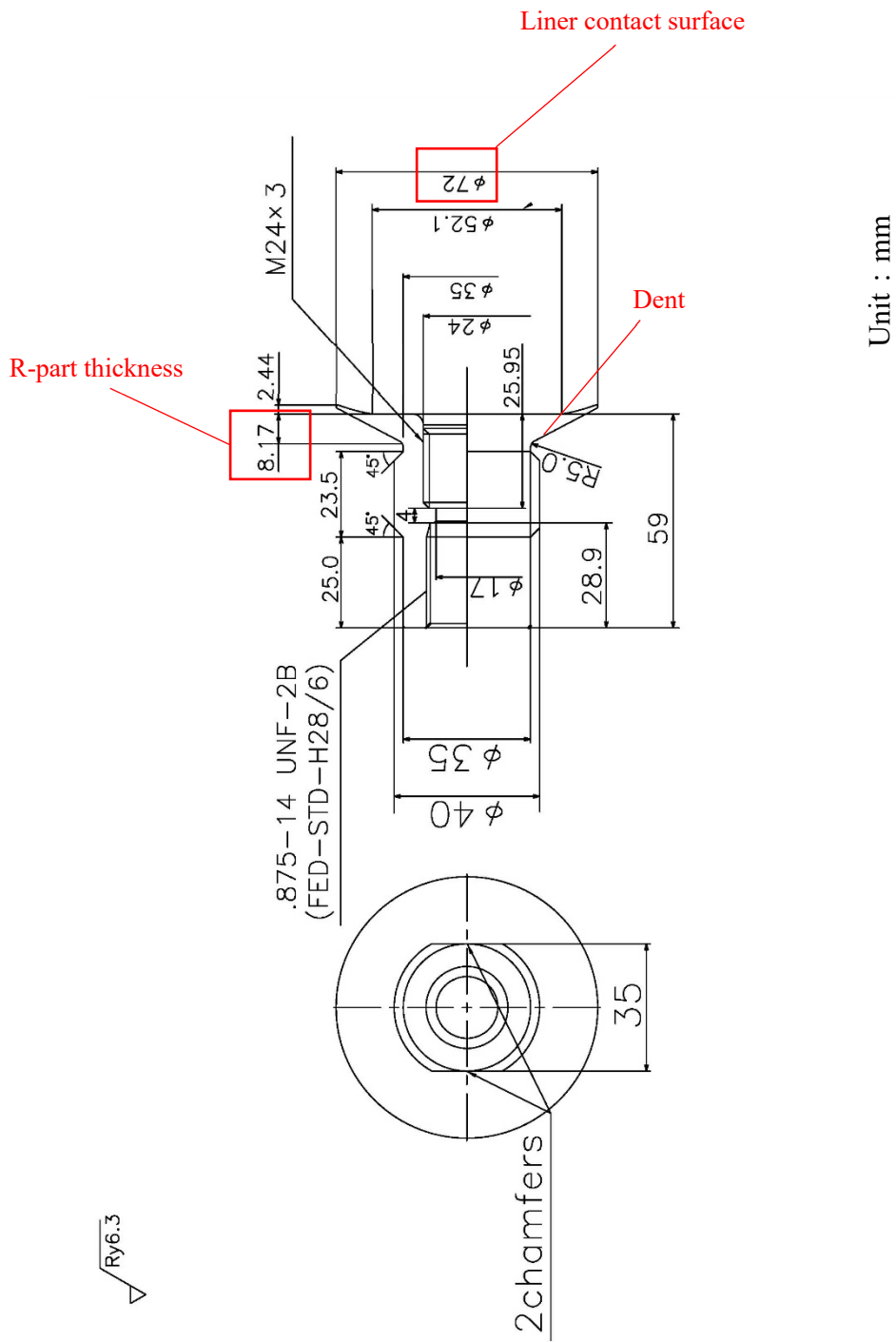
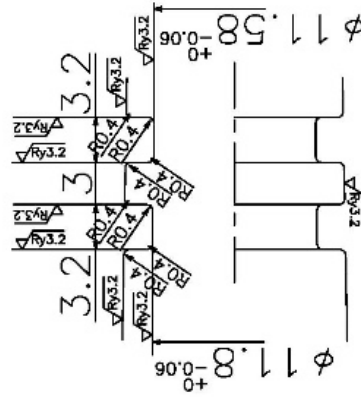
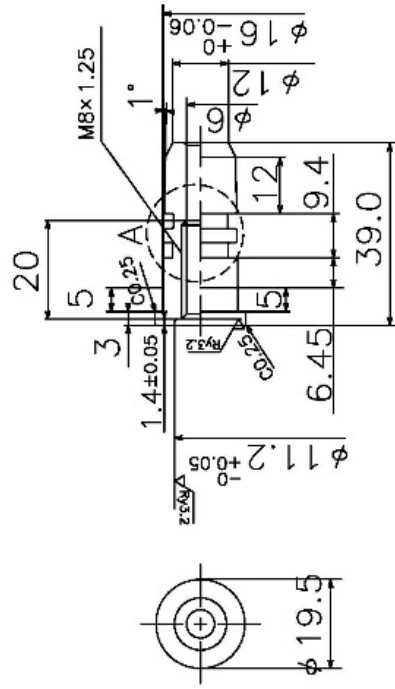


図 2.5 頭部ボス口金 b の形状寸法

$\sqrt{Ry6.3}(\sqrt{Ry3.2})$

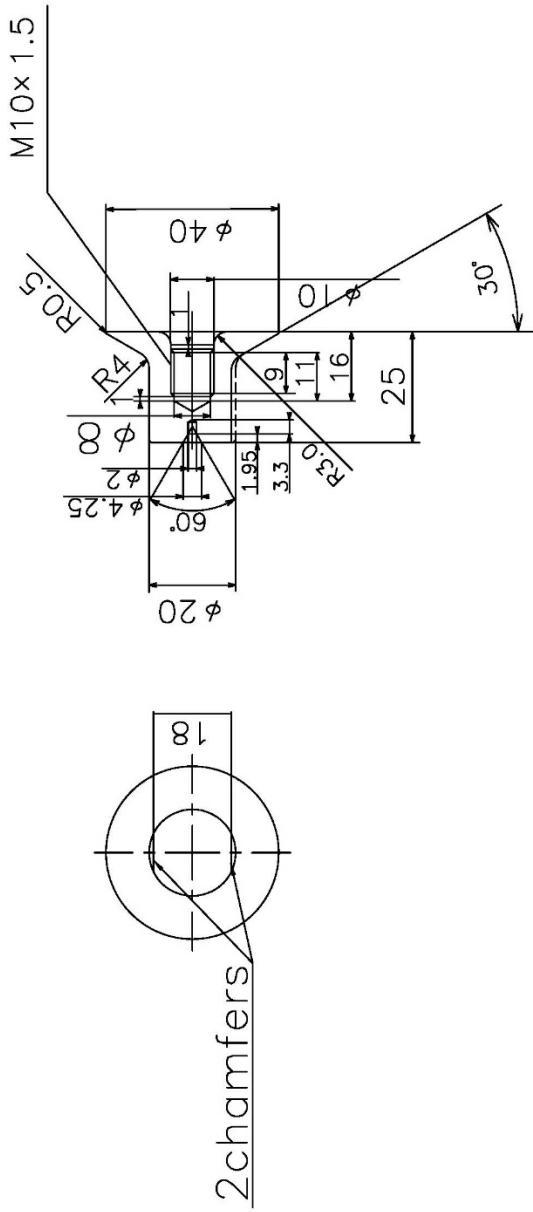


A Part

Unit : mm

図 2.6 シール口金の形状寸法

$\sqrt{Ry6.3}$



Unit : mm

図 2.7 底部ボス口金の形状寸法



図 2.8 頭部ボス口金 a の外観形状

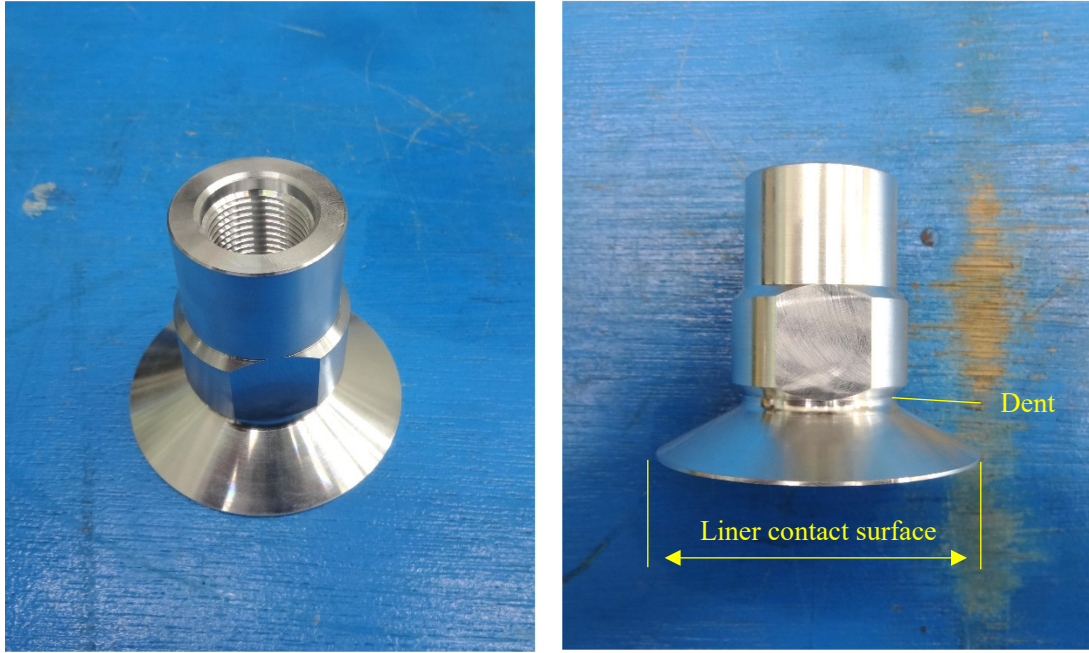


図 2.9 頭部ボス口金 b の外観形状



図 2.10 シール口金の外観形状

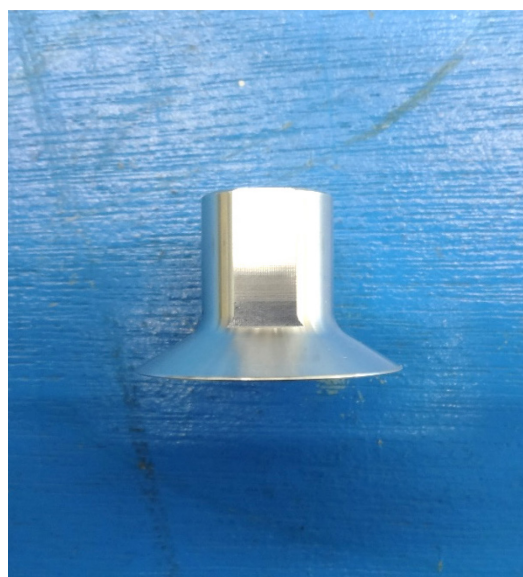
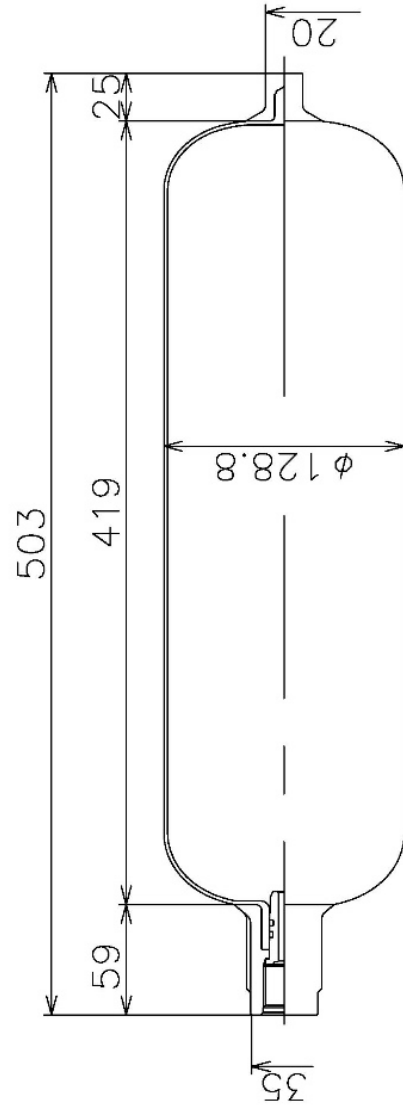
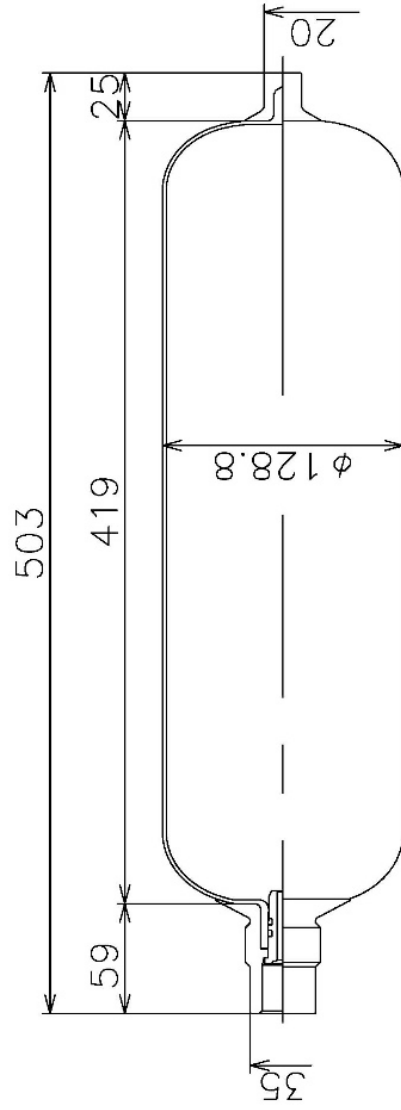


図 2.11 底部ボスロ金の外観形状



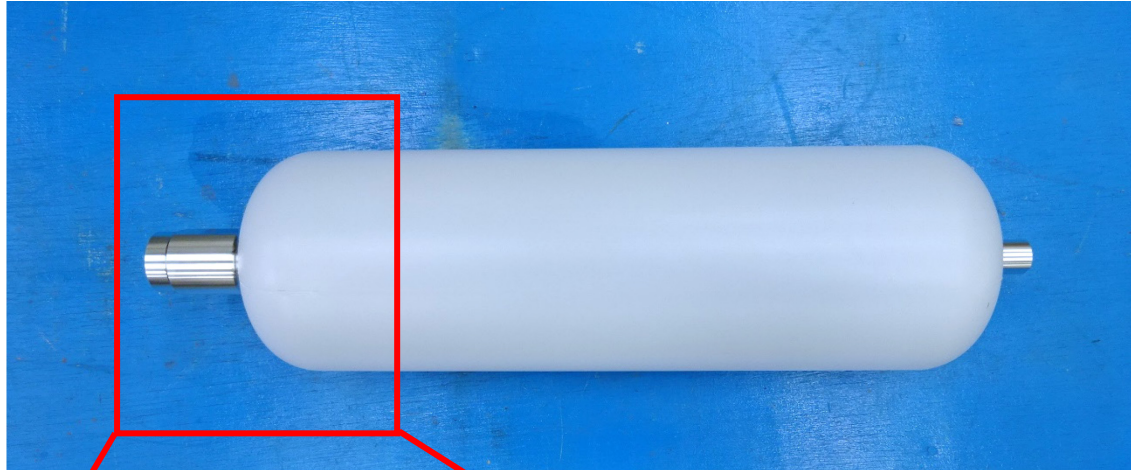
Unit : mm

図 2.12 頭部ボス口金 a を装着したライナーの形状寸法



Unit : mm

図 2.13 頭部ボス口金 **b** を装着したライナーの形状寸法

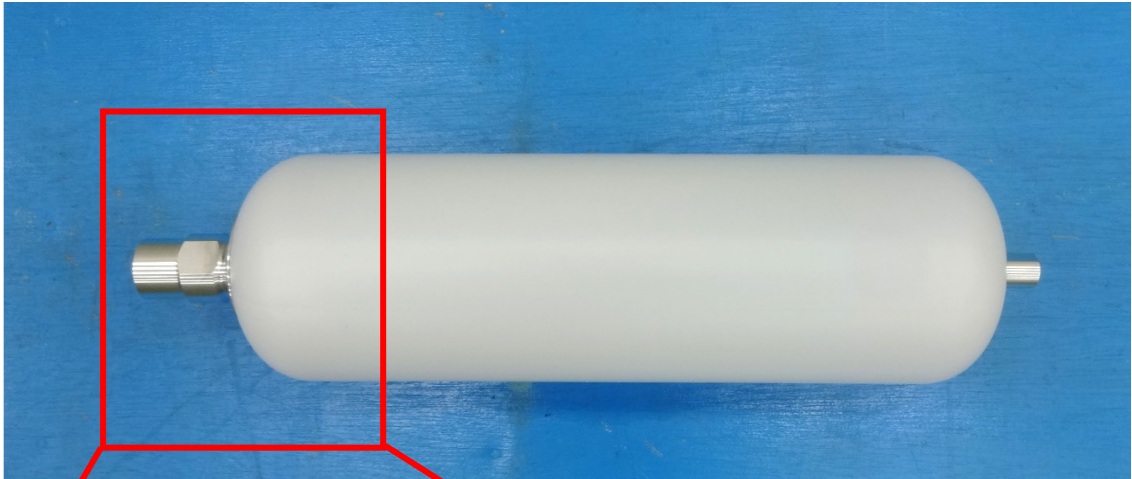


(a) ライナー全景



(b) 頭部拡大

図 2.14 頭部ボス口金 a を装着したライナーの外観



(a) ライナー全景



(b) 頭部拡大

図 2.15 頭部ボスロ金 **b** を装着したライナーの外観

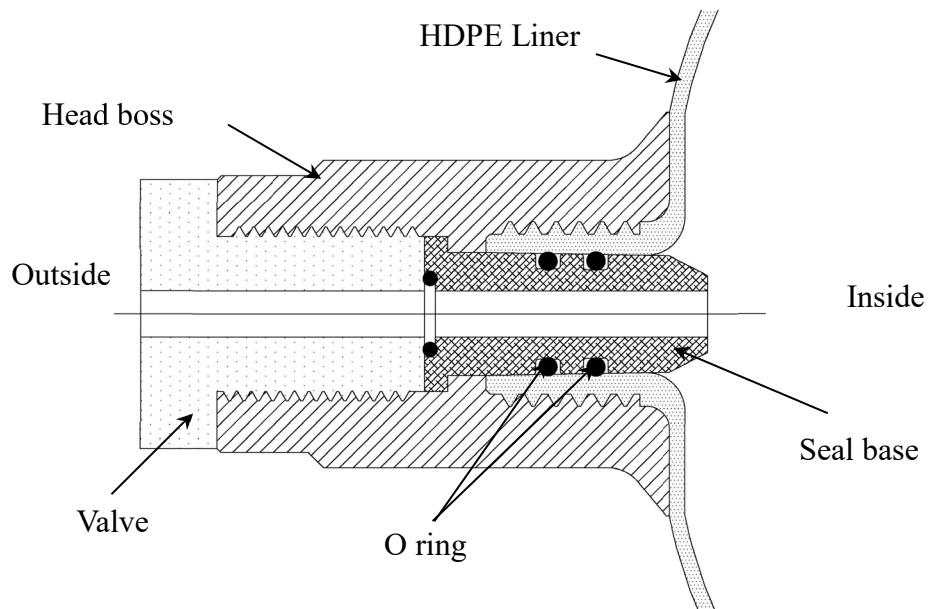


図 2.16 Type-4 容器のシール機構の概要図

表 2.3 Type-4 容器 (Basic model) の仕様

Internal volume	4.70 L
Filling pressure	29.4 MPa
Test pressure	44.1 MPa
Minimum burst pressure	88.2 MPa
Design burst pressure	100.0 MPa
Outer diameter	140 mm
Overall length	503 mm

表 2.4 Type-4 容器 (Basic model) の設計板厚と繊維角度

	HDPE Liner	CFRP			GFRP	
		1 layer	2 layer	3 layer	4 layer	5 layer
Thickness	2.0 mm	1.85 mm	1.85 mm	0.3 mm	0.56 mm	0.22 mm
Fiber angle		90°	±18.8°	90°	±14.2°	90°

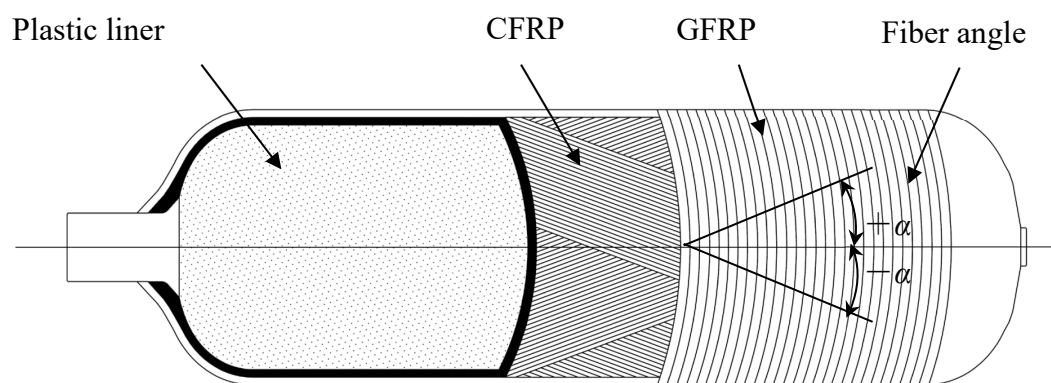


図 2.17 Type-4 空気呼吸器用容器の構造

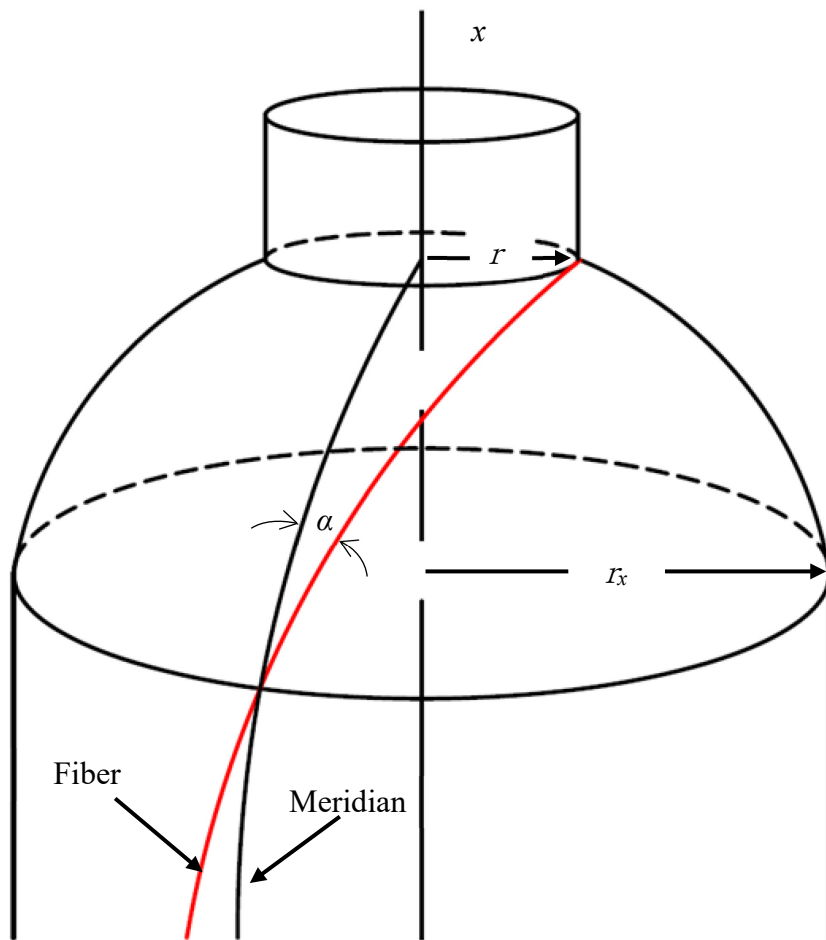


図 2.18 容器ドーム部の座標と繊維角度の概要

表 2.5 Type-3 容器と Type-4 容器の質量差

	Type-3	Type-4	Difference
Liner	1.10 kg	0.53 kg	-0.57 kg
CFRP layer	1.17 kg	1.24 kg	+0.7 kg
GFRP layer	0.43 kg	0.43 kg	0 kg
Vessel weight	2.70 kg	2.20 kg	-0.5 kg (-20 %)

第 3 章 有限要素法解析

3.1 緒言

第 3 章では、本研究で用いる空気呼吸器用 Type-4 容器の破裂圧力の推定を目的とし、有限要素解析(FEM 解析)を行った。

3.2 節では、Type-4 容器の FEM 解析方法を、3.3 節では FEM 解析結果について述べる。そして、3.4 節では結言として第 3 章で得られた成果をまとめる。

3.2 Type-4 容器の FEM 解析の方法

3.2.1 解析を行う容器の種類^{48,49)}

FEM 解析には汎用有限要素法プログラム ANSYS ver.19.2 を用いた。FEM 解析を行う容器の種類は、表 3.1 に示す容器 A から容器 E の 5 種類とする。図 3.1 に解析に用いる Type-4 容器のメッシュ図を示す。

はじめに、容器 A は、本研究で用いる Type-4 容器の寸法、形状や、内容積のベースとなった、市販品の 4.7 L Type-3 容器である。

容器 A のモデルの構成要素は、ライナー(アルミニウム合金)、CFRP のフープ層とヘリカル層、GFRP のフープ層とヘリカル層、蓋(真鍮)とする。表 3.2 に容器 A の積層構成を、図 3.2 に容器モデルの概要を示す。この容器は、アルミニウム合金ライナーの 1 層目に CFRP のフープ層、2 層目に CFRP のヘリカル層、3 層目に CFRP のフープ層を積層し、その上に、GFRP のヘリカル層、GFRP のフープ層を積層した容器である。

次に、容器 B (Basic model) は、容器 A のライナーをアルミニウム合金からプラスチック (HDPE) に置き換えた基本仕様の Type-4 容器である。モデルの構成要素は、ライナー (HDPE: 高密度ポリエチレン)、頭部ボス口金 a (アルミニウム合金)、シール用口金 (アルミニウム合金)、底部ボス口金 (アルミニウム合金)、CFRP のフープ層とヘリカル層、GFRP のフープ層とヘリカル層、蓋 (真鍮) とする。表 3.3 に容器 B の積層構成を、図 3.3 に容器 B の概要を示す。

容器 C (Modified model_1) は、プラスチックライナーに Type-3 容器とは逆に、1 層目に CFRP のヘリカル層、2 層目に CFRP のフープ層、3 層目に CFRP のヘリカル層を積層し、さらに強度向上のため、CFRP のフープ層とヘリカル層をそれぞれ 0.2 mm 程度増厚した Type-4 容器である。なおモデルの構成要素は容器 B と同じとする。表 3.4 に容器 C の積層構成を、図 3.4 に容器 C の概要を示す。なお CFRP フープ層の積層範囲は 355mm とした。

そして、容器 D (Modified model_2) は、モデルの構成要素や FRP 層の積層構成と板厚は容器 C と同じであるが、境界部の強度向上のために CFRP フープ層の積層範囲を容器 C の 355mm から、延長し 372mm とした。これにより、境界部付近の FRP 層板厚を 1.0mm 増厚した Type-4 容器である。表 3.5 に容器 D の積層構成を、図 3.5 に容器 D の概要を示す。

最後に容器 E (Modified model_3) は、CFRP 層に高角度ヘリカル層を積層し、円筒胴部とドーム部の境界部付近を局部的に補強した容器である。モデルの構成要素は、ライナー (HDPE: 高密度ポリエチレン)、頭部ボス口金 b (アルミニウム合金)、シール用口金 (アルミニウム合金)、底部ボス口金 (アルミニウム合金)、CFRP のフープ層とヘリカル層と高角度ヘリカル層、GFRP のフープ層とヘリカル層、蓋 (真鍮) とする。

表 3.6 に容器 E の積層構成を, 図 3.6 に容器 E の概要を示す.
本容器は, 頭部ボス部の強度向上のため, 頭部ボス口金 a を改良した, 頭部ボス口金 b を装着したプラスチックライナーの 1 層目に CFRP のフープ層, 2 層目に CFRP の高角度ヘリカル層, 3 層目に CFRP のヘリカル層, 4 層目に CFRP のフープ層, 5 層目に CFRP のヘリカル層を積層した. さらに CFRP の上には, これまでのモデルと同様に GFRP のヘリカル層, GFRP のフープ層を積層した.
なお, 高角度ヘリカル層の積層範囲は, 400mm とする.

3.2.2 材料物性値

(1) プラスチックライナーの材料物性値

プラスチックライナーの物性値は引張り試験で取得した。試験はライナーと同等材からダイヤモンドカッターで引張り試験片（全長 90mm，つかみ部間 40mm，板幅 20.0mm，板厚 3.75mm）を切出し，それを用いた。図 3.7 に引張り試験結果から取得した応力－ひずみ線図を示す。同図に示すように，HDPE は，ひずみが 0.5%を超えたあたりから顕著な非線形挙動が確認された。この樹脂の非線形挙動を塑性現象と仮定して弾塑性解析を実施した。降伏条件には金属材料の塑性モデルに一般的に使用される Von Mises の降伏条件を用い，等方硬化則には，式 (3.1)に示す Voce 硬化則⁵⁰⁾を適用した。

ここでは， σ_Y ：降伏応力， σ_0 ：初期降伏応力， R_0 ：飽和応力の勾配， $\hat{\varepsilon}^{pl}$ ：累積相当塑性ひずみ， R_∞ ：飽和応力と初期降伏応力との差分， b ：指数項の飽和率を制御する硬化パラメータとする。表 3.7 に図 3.7 から同定した HDPE の材料物性値を示す。

$$\sigma_Y = \sigma_0 + R_0 \hat{\varepsilon}^{pl} + R_\infty \{1 - \exp(-b \hat{\varepsilon}^{pl})\} \quad (3.1)$$

(2) 金属材料の材料物性値

Type-4 容器の口金および，Type-3 容器のライナー材料であるアルミニウム合金の物性値を表 3.8 に，解析の際に頭部に装着する蓋（真鍮）の物性値を表 3.9 に示す。なお，アルミニウム合金の接線係数と塑性係数は，図 3.8 に示す応力－ひずみ線図の弾性域と塑性域を 2 直線で近似する二直線等方硬化則を適用した。

(3) FRP の材料物性値

FRP の材料物性値は繊維と樹脂の物性値をもとに、Hashin⁵¹⁾の式を用いて定義した。ここでは、繊維方向を L, 繊維直交方向を T, 板厚方向を Z とする。表 3.10 に繊維と樹脂の材料物性値を、表 3.11 に FRP の材料物性値を示す。(3.2)～(3.9)式に Hashin の式を示す。

$$E_L^C = E_L^f V_f + E^m (1 - V_f) + V_f (1 - V_f) \frac{4(v_{LT}^f - v^m)^2}{\frac{(1 - V_f)}{K_T^f} + \frac{V_f}{K^m} + \frac{1}{G^m}} \quad (3.2)$$

$$E_T^C = \frac{4K_T^C G_{TZ}^C E_L^C}{(G_{TZ}^C + K_T^C) E_L^C + 4K_T^C G_{TZ}^C (v_{TZ}^C)^2} \quad (3.3)$$

$$K_T^C = \frac{K^m (1 - V_f)(K_T^f + G^m) + V_f K_T^f (K^m + G^m)}{(1 - V_f)(K_T^f + G^m) + V_f (K^m + G^m)} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{K_T^f} = \frac{4}{E_T^f} - \frac{4(v_{LT}^f)^2}{E_L^f} - \frac{1}{G_{TZ}^f} \quad (3.5)$$

$$G_{TZ}^C = G^m + \frac{V_f}{\frac{1}{G_{TZ}^f - G^m} + (1 - V_f) \frac{K^m + 2G^m}{2G^m (K^m + G^m)}} \quad (3.6)$$

$$G_{LT}^C = G^m \frac{(1 - V_f)G^m + (1 + V_f)G_{LT}^f}{(1 + V_f)G^m + (1 - V_f)G_{LT}^f} \quad (3.7)$$

$$v_{LT}^c = v_{LT}^f V_f + v^m (1 - V_f) + V_f (1 - V_f) \frac{(v_{LT}^f - v^m) \left(\frac{1}{K^m} - \frac{1}{K_T^f} \right)}{\frac{(1 - V_f)}{K_T^f} + \frac{V_f}{K^m} + \frac{1}{G^m}} \quad (3.8)$$

$$v_{TZ}^c = \frac{E_T^c}{2G_{TZ}^c} - 1 \quad (3.9)$$

ここで、 E_L^c : 繊維方向の縦弾数係数、 E_T^c : 繊維直交方向の縦弾数係数、 G_{LT}^c, G_{TZ}^c : せん断弾性係数、 v_{LT}^c, v_{TZ}^c : ポアソン比、 c : コンポジット、 m : マトリックス、 f : 繊維、 K : 体積弾性係数、 V_f : 繊維含有率とする。

なお板厚方向の物性値は、板厚方向と繊維直交方向は同様と考え $E_z^c = E_T^c$ 、 $G_{LT}^c = G_{zL}^c$ 、 $v_{LT}^c = v_{zL}^c$ とした。

(4) 繊維角度の定義方法

解析に使用した要素は、厚さ方向の曲げに対してシェル要素と同等の特性を有する 3 次元 8 節点ソリッドシェル要素⁵²⁾を用いた。なお、容器の円筒胴部の繊維角度と繊維方向は円筒座標系で定義した。1 要素ごとに、円筒座標系で軸方向を X 軸、周方向を Y 軸、板厚方向を Z 軸とし、その後、Z 軸を中心に繊維角度 α 分 X 軸と Y 軸を回転させた。回転後の X 軸を繊維方向、回転後の Y 軸を繊維直行方向とした。フープ層は円周方向に繊維を巻きつけているので、繊維角度 α は 90° 、繊維方向は周方向として定義する。一方でヘリカル層と高角度ヘリカル層の繊維角度 α は、CFRP のヘリカル層を 18.8° 、 18.4° 、高角度ヘリカル層を 65° とし、GFRP のヘリカル層を 14.3° とした。

ヘリカル層と高角度ヘリカル層のドーム部の繊維角度は、2.2 節で述べたように繊維が巻き付けられる部位の半径距離を r_x 、とボス部の半径を r とし、式(2.1)で算出する。高角度ヘリカル層はボス部に繊維を巻き付けないので $r = 50$ (高角度ヘリカル層の端部半径)とした。

3.2.3 解析条件

本解析における解析モデルの拘束条件は、図 3.9 に示すように容器に装着した蓋の端面を拘束し、X, Y, Z 方向に完全固定した。さらに、負荷荷重の条件は、ライナーの内面に本研究における、設計破裂圧力である 100MPa を作用させた。

3.2.4 評価基準

解析の破損則には最大応力説⁵³⁾を用いた。本解析では CFRP フープ層に生じる繊維方向応力 σ_L を応力の座標変換の式を用いて算出し、最大繊維方向応力 σ_L^{max} が CFRP フープ層の破断応力である 2.65 GPa に達した際に容器が破裂するとみなした。

繊維方向応力 σ_L は、図 3.10 に示すように要素座標系を繊維角度 α 分だけ回転させた座標系（繊維座標系）における応力の直交変換の式 (3.10) より算出した。直交座標系 $O-xyz$ における応力テンソル σ を直交座標系 $O-x'y'z'$ における応力テンソル σ' に次式で変換後にした σ'_{ii} 成分として計算した。

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{11} & \sigma'_{12} & \sigma'_{13} \\ \sigma'_{12} & \sigma'_{22} & \sigma'_{23} \\ \sigma'_{13} & \sigma'_{23} & \sigma'_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & l_{31} \\ l_{12} & l_{22} & l_{32} \\ l_{13} & l_{23} & l_{33} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ここで、座標変換するテンソル l は、回転後と回転前の座標軸 x'_i と x_j がなす角 α の方向余弦を l_{ij} とすると、式 (3.11) で定義される。

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos x'_1 x_1 & \cos x'_1 x_2 & \cos x'_1 x_3 \\ \cos x'_2 x_1 & \cos x'_2 x_2 & \cos x'_2 x_3 \\ \cos x'_3 x_1 & \cos x'_3 x_2 & \cos x'_3 x_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3 FEM 解析結果

3.3.1 容器 A (Type-3 容器)

比較のため、現在市販されている、4.7L Type-3 CFRP 容器(容器 A)の FEM 解析結果を行った。容器 A の解析結果を図 3.11 に示す。同図に示すように、容器 A の最大繊維方向応力 σ_L^{max} の発生部は、1 層目の CFRP フープ層の中央部、つまり容器胴部であることが確認できる。なお、最大繊維方向応力 σ_L^{max} は 2.63 GPa であり、規定圧力である 100MPa を作用した場合でも容器が破裂に達しないと予想できる。

3.3.2 容器 B (Basic model)

容器 B は容器 A のライナーをアルミニウム合金からプラスチック(HDPE)に変更した Type-4 容器である。解析の結果、図 3.12 に示すように頭側と底側ドーム部と、円筒胴部の境界部にて繊維軸方向応力の大幅な上昇が確認された。さらに、最大繊維軸方向応力 σ_L^{max} は 3.25GPa であり、CFRP の破断応力値である 2.65GPa を超過していた。

境界部の応力が大幅に上昇した要因として容器の形状が考えられる。容器は、円筒胴部は直線的な形状であり、ドーム部は不連続な形状となっている。そのため、内面に圧力が作用した際に円筒胴部とドーム部の境界部は応力が極端に上昇する。従来の Type-3 容器では、アルミニウム合金ライナーの材料強度により、境界部の応力上昇を抑制できていたが、プラスチックライナーの場合は、材料強度による強度分担が作用しないため同様の積層条件では、境界部の応力を抑制できなかつたと考えられる。

Type-4 容器の場合、Type-3 容器と同等の積層構成と板厚では設計破裂圧力 100MPa を満足できないことが確認された。

3.3.3 容器 C (Modified model_1)

1 層目にヘリカル層, 2 層目にフープ層, 3 層目にヘリカル層を積層した容器 C (Modified model_1) は, 図 3.13 に示すように, 100MPa 作用時の最大繊維方向応力は $\sigma_L^{max}=3.02$ GPa であった. この容器 C は, 容器 B と比較すると円筒胴部の応力を抑えることができたものの, 最大繊維方向応力の発生部が境界部であり, さらに CFRP の破断応力である 2.65 GPa を超過していたことから, 容器 B と容器 C では, 100MPa の設計破裂圧力を満足できないことが確認された.

3.3.4 容器 D (Modified model_2)

容器 D (Modified model_2) の解析結果を図 3.14 に示す. 図 3.14 からわかるように, 容器 D の最大繊維方向応力の発生部は, 容器胴部フープ層の中央部であった. また, 最大繊維方向応力 σ_L^{max} は 2.55 GPa であり, CFRP の破断応力 2.65 GPa に達していないことが確認できる. これは, CFRP フープ層を延長することで, 境界部付近の強度が上昇したためである. 解析の結果から容器 D は 100 MPa の設計破裂圧力を満足できると予測される.

3.3.5 容器 E (Modified model_3)

容器 E のモデルは, CFRP 層に高角度ヘリカル層を取り入れ, 胴部と境界部を強化したモデルである. 容器 E の解析結果を図 3.15 に示す. 図 3.15 からわかるように, 容器 E の最大繊維方向応力の発生部は, 容器 D と同様に, 容器胴部フープ層の中央である. さらに, 最大繊維方向応力 σ_L^{max} は 2.23 GPa と, 容器 D と比較しさらに強度が向上していた. また, フープ層端部の応力上昇が完全に抑

制できていることが確認された。つまり、この容器 E は、解析を実施した Type-4 容器 4 種類の中で、最も高い破裂圧力を有していることが予想できる。

3.4 結言

3 章では、汎用有限要素法プログラム ANSYS を用いて Type-3 容器と、Type-4 容器の応力解析を行い、100MPa 作用時の繊維応力と応力分布を明らかにすることで、以下の結論が得られた。

- (1) Type-4 容器は、ライナーの強度が低く破裂圧力を分担できないため、Type-3 容器と比較し CFRP 層を増厚する必要がある。しかしながら、CFRP 層の積層構成を変更することで、破裂圧力 100MPa を満足できる見通しを得た。
- (2) Type-4 容器で最大繊維応力発生部を容器円筒胴部とするためには、フープ層や高角度ヘリカル層にて、容器境界部の強度を向上させる必要があることが確認された。
- (3) 高角度ヘリカル層を積層することで、設計破裂圧力 100MPa を作用させた際の CFRP のフープ層の繊維応力が最も小さくなることが確認できた。
- (4) 容器 D 及び容器 E は、破裂試験における破裂圧力と起点の基準の両方を満足できる見通しを得た。

表 3.1 FEM 解析を行うモデルの種類

Model No	Liner (Thickness)	CFRP (Thickness)	GFRP (Thickness)	Total number of elements	Total number of nodal points
Vessel-A (Type-3)	AL 1.5 mm	Hoop + Helical 4.00 mm	Hoop + Helical 0.78 mm	144106	71628
Vessel-B (Basic model)	HDPE 2.0 mm	Hoop + Helical 4.00 mm	Hoop + Helical 0.78 mm	109982	112643
Vessel-C (Modified model 1)	HDPE 2.0 mm	Hoop + Helical 4.41 mm	Hoop + Helical 0.78 mm	87667	100768
Vessel-D (Modified model 2)	HDPE 2.0 mm	Hoop + Helical 4.41 mm	Hoop + Helical 0.78 mm	113207	115373
Vessel-E (Modified model 3)	HDPE 2.0 mm	Hoop + Helical + High angle helical 4.36 mm	Hoop + Helical 0.90 mm	86014	130804

55

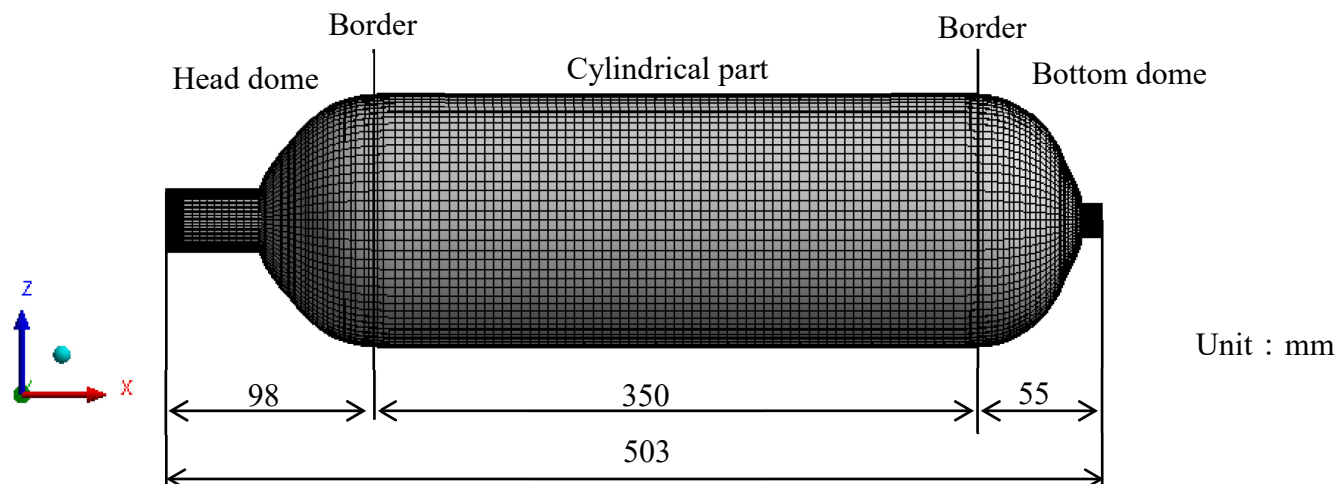


図 3.1 Type-4 容器のメッシュ図

表 3.2 容器 A (Type-3 容器) の積層構成

	Liner		CFRP			GFRP	
	AL	1 layer	2 layer	3 layer	1 layer	2 layer	
Thickness	2.0 mm	1.85 mm	1.85 mm	0.3 mm	0.56 mm	0.22 mm	
Fiber angle	-	90°	± 18.8°	90°	± 14.2°	90°	

Unit : mm

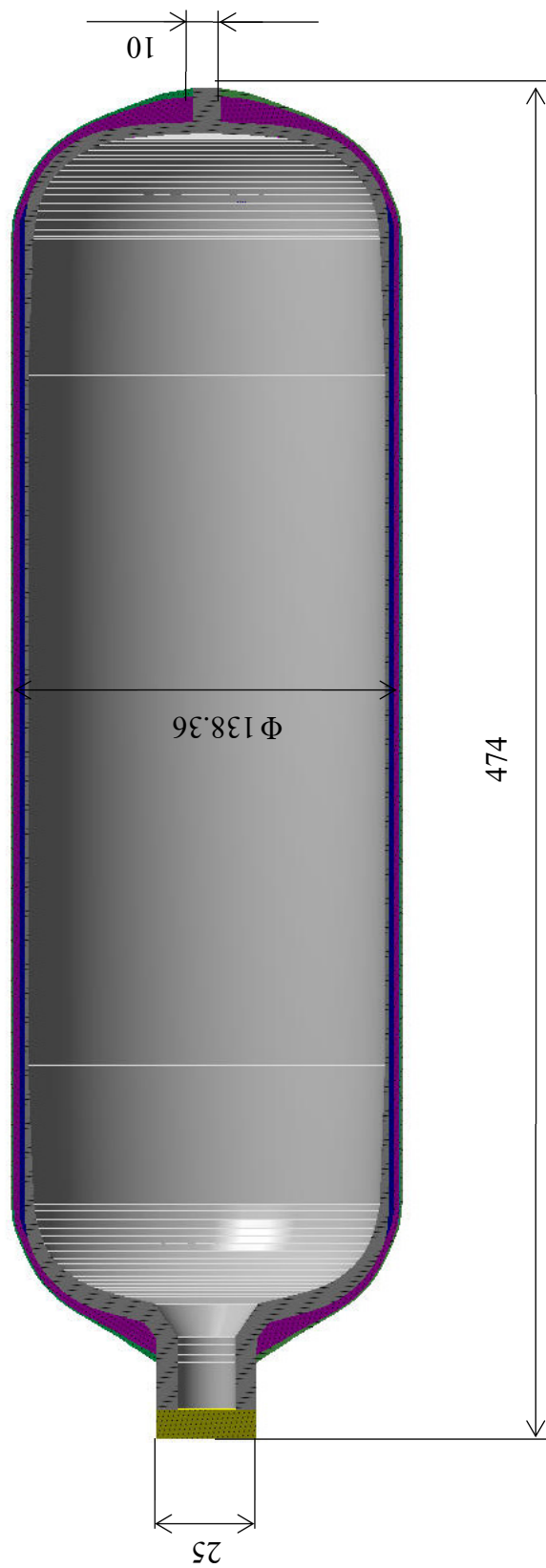


図 3.2 容器 A (Type-3 容器) の解析モデル

表 3.3 容器 B (Type-4 容器 Basic model) の積層構成

	Liner		CFRP		GFRP	
	Material	Thickness	Layer	Thickness	Layer	Thickness
Thickness	1.5 mm	1.85 mm	1 layer	1.85 mm	2 layer	0.56 mm
Fiber angle	-	90°	1 layer	± 18.8°	3 layer	± 14.2°
						90°

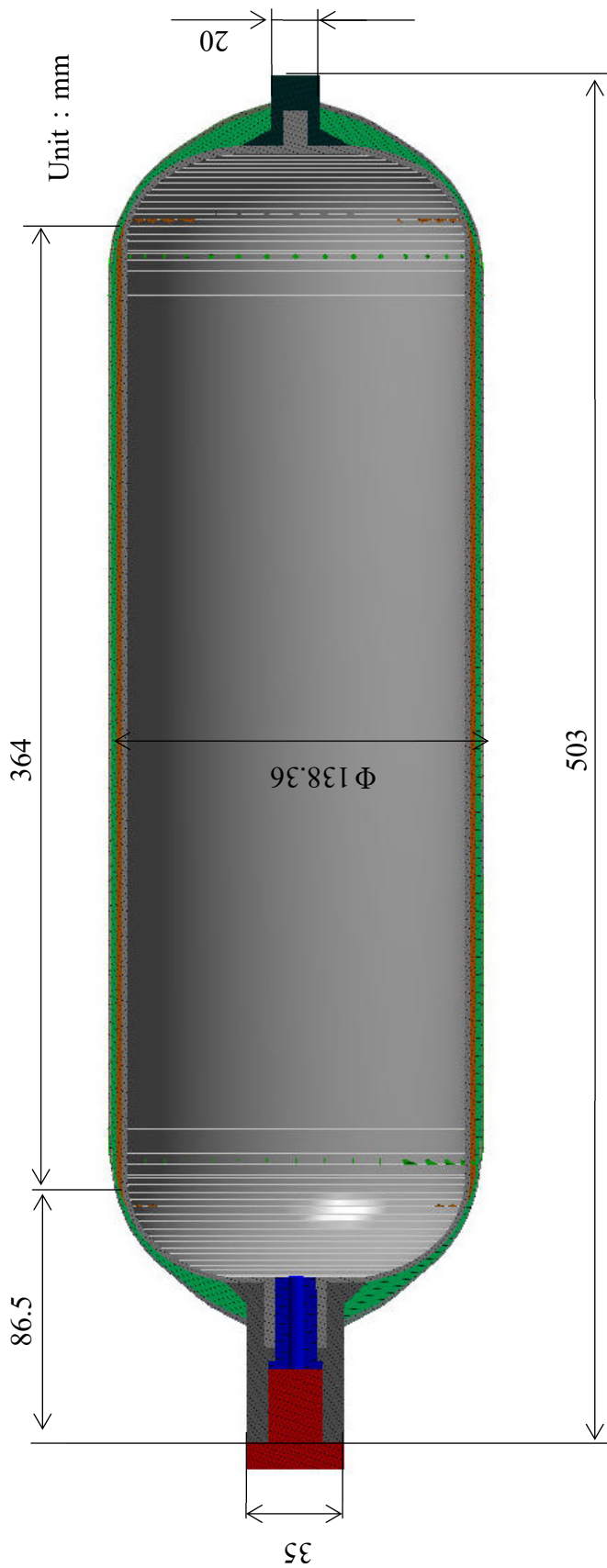


図 3.3 容器 B (Type-4 容器 Basic model) の解析モデル

表 3.4 容器 C (Type-4 容器 Modified model_1) の積層構成

	Liner		CFRP			GFRP	
	HDPE	1 layer	2 layer	3 layer	1 layer	2 layer	
Thickness	1.5	1.37 mm	2.36 mm	0.68 mm	0.56 mm	0.22 mm	
Fiber angle	-	± 18.4°	90°	± 18.4°	± 14.2°	90°	

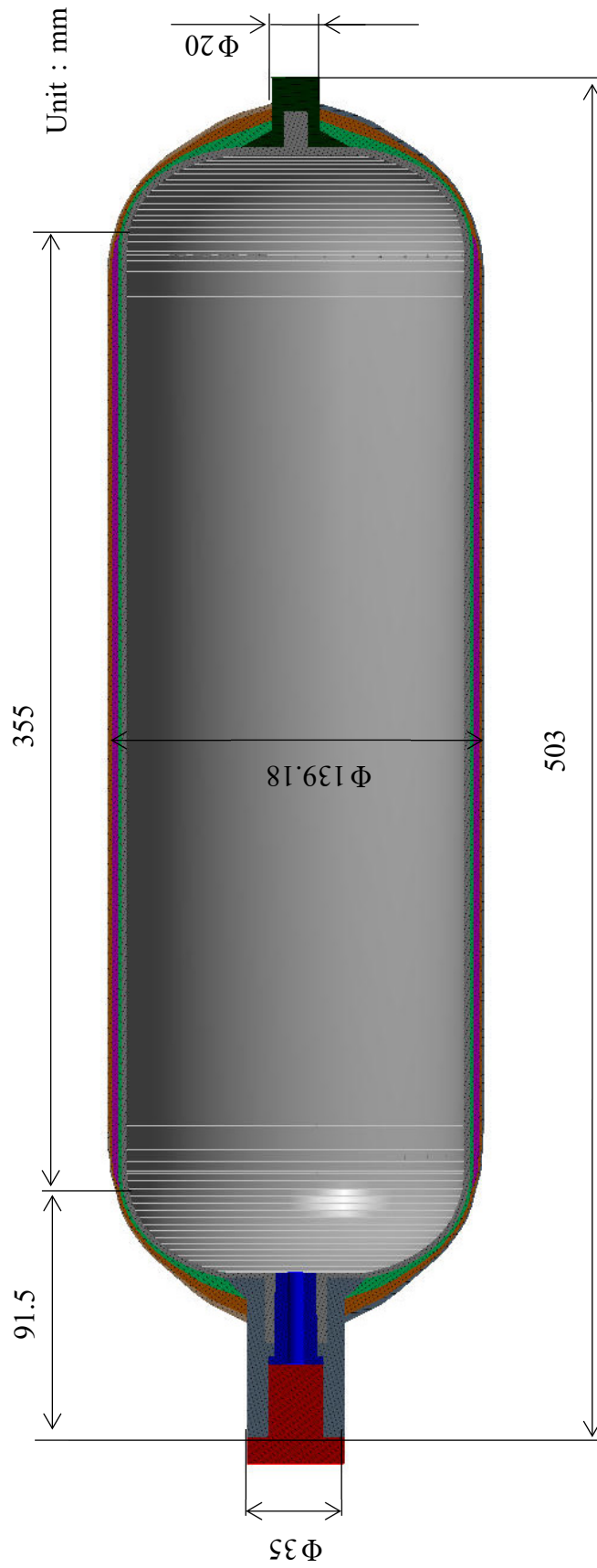


図 3.4 容器 C (Type-4 容器 Modified model_1) の解析モデル

表 3.5 容器 D (Type-4 容器 Modified model_2) の積層構成

	Liner		CFRP		GFRP	
	HDPE	1 layer	2 layer	3 layer	1 layer	2 layer
Thickness	1.5	1.37 mm	2.36 mm	0.68 mm	0.56 mm	0.22 mm
Fiber angle	-	± 18.4°	90°	± 18.4°	± 14.2°	90°

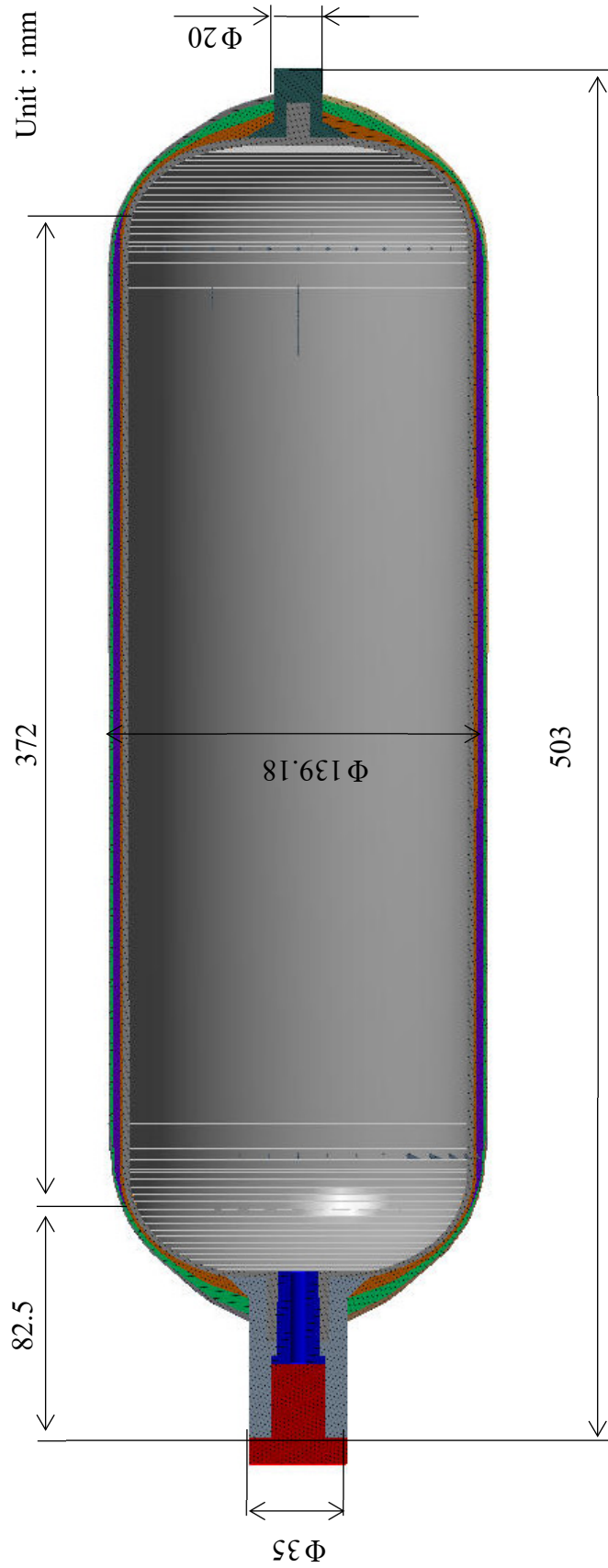


図 3.5 容器 D (Type-4 容器 Modified model_2) の解析モデル

表 3.6 容器 E (Type-4 容器 Modified model 3) の積層構成

	Liner		CFRP					GFRP	
	HDPE		1 layer	2 layer	3 layer	4 layer	5 layer	1 layer	2 layer
Thickness	1.5	0.30 mm	1.20 mm	1.20 mm	0.33 mm	1.55 mm	0.98 mm	0.65 mm	0.25 mm
Fiber angle	-	90°	±65°	±18.4°	±18.4°	90°	±18.4°	±14.2°	90°

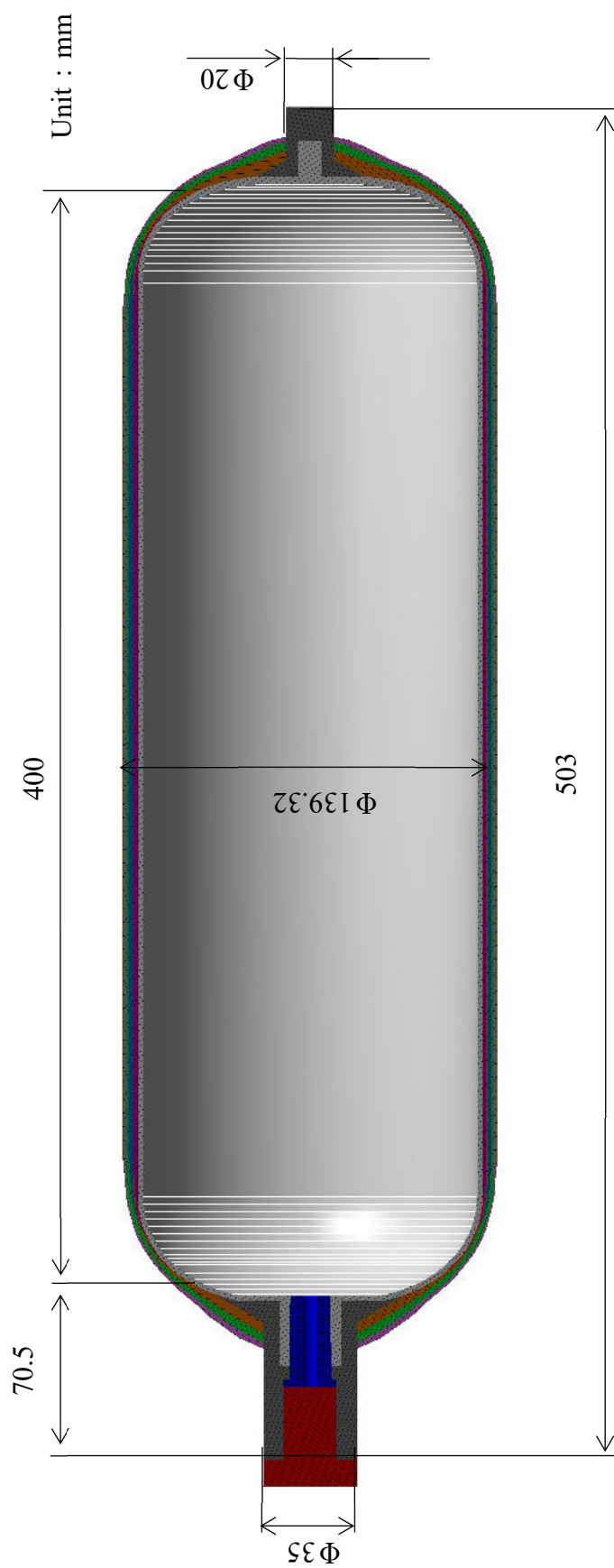


図 3.6 容器 E (Type-4 容器 Modified model 3) の解析モデル

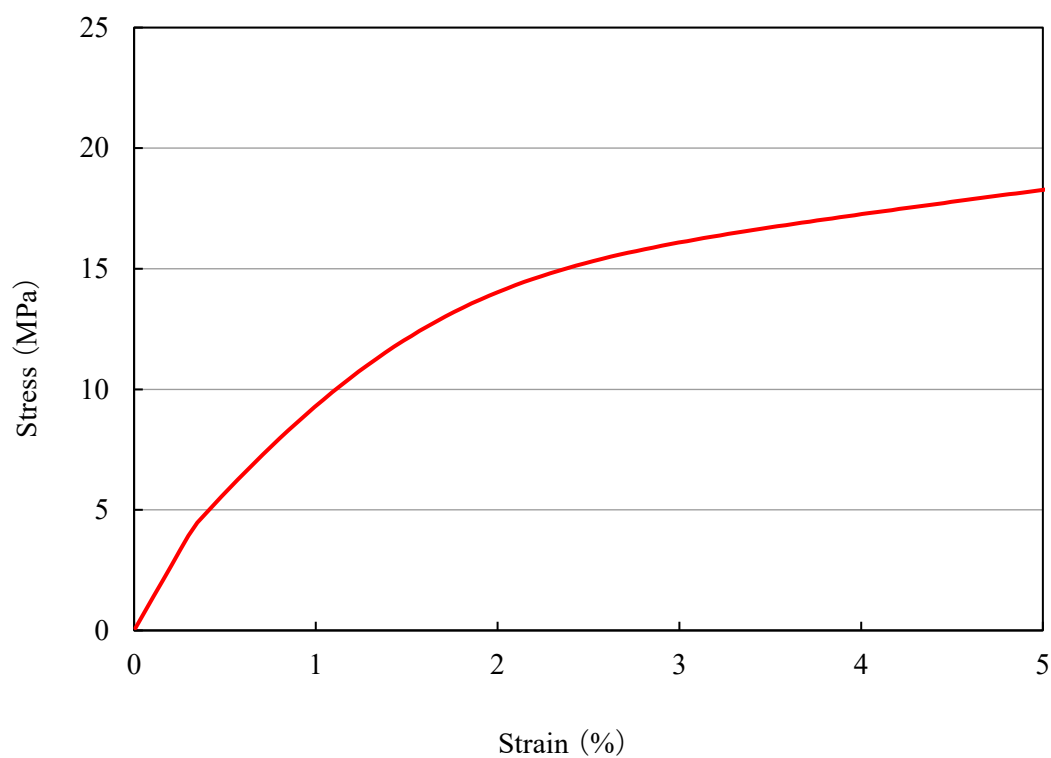


図 3.7 高密度ポリエチレン(HDPE)の応力-ひずみ線図

表 3.7 HDPE の材料物性値

Longitudinal elastic modulus E	0.59 GPa
Poisson's Ratio ν	0.46
σ_0	7.30 MPa
R_0	22.8 MPa
R_∞	9.5 MPa
b	50.0

表 3.8 AL 合金の物性値

Longitudinal elastic modulus E	68.9	GPa
Shear elastic modulus G	25.9	GPa
Poisson's ratio ν	0.33	
Yield strength	290	GPa
Plasticity coefficient	520	GPa

表 3.9 真鍮の物性値

Longitudinal elastic modulus E	103.0	GPa
Shear elastic modulus G	38.1	GPa

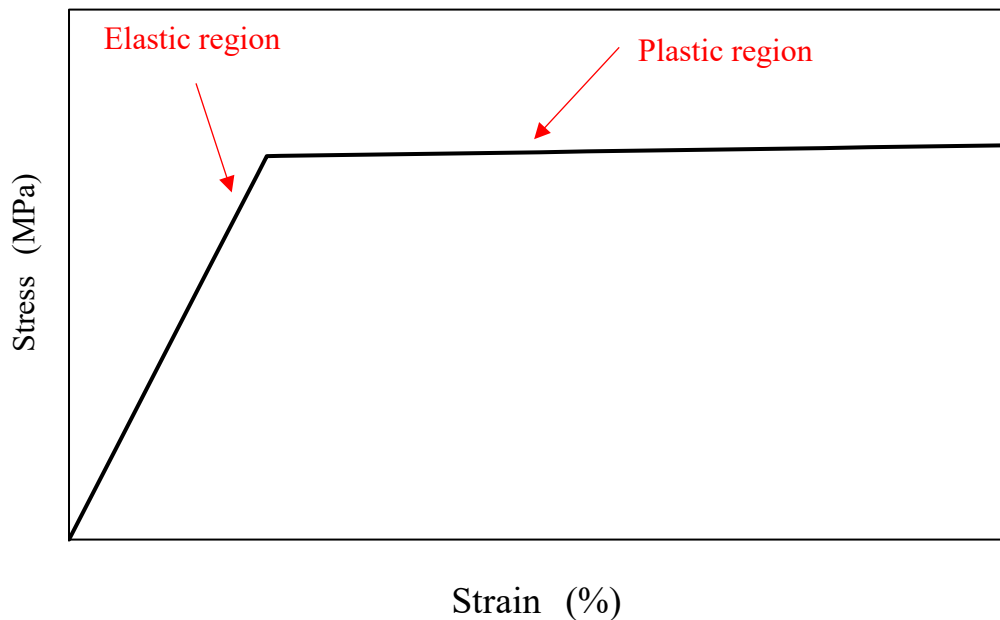


図 3.8 アルミニウム合金の応力-ひずみ線図

表 3.10 炭素繊維, ガラス繊維, エポキシ樹脂の材料物性値

Carbon Fiber	Longitudinal elastic modulus	E_L^f	240	GPa
	Transverse elastic modulus	E_T^f	13.8	GPa
	Shear elastic modulus	G_{LT}^f	8.96	GPa
	Shear elastic modulus	G_{TZ}^f	4.82	GPa
	Poisson's ratio	ν_{LT}^f	0.20	
	Poisson's ratio	ν_{TZ}^f	0.43	
Glass Fiber	Longitudinal elastic modulus	E_L^f	86.0	GPa
	Transverse elastic modulus	E_T^f	86.0	GPa
	Shear elastic modulus	G_{LT}^f	35.0	GPa
	Shear elastic modulus	G_{TZ}^f	35.0	GPa
	Poisson's ratio	ν_{LT}^f	0.23	
	Poisson's ratio	ν_{TZ}^f	0.23	
Epoxy Resin	Longitudinal elastic modulus	E^m	3.55	GPa
	Poisson's ratio	ν^m	0.34	
	Shear modulus	G^m	1.32	GPa

表 3.11 CFRP と GFRP の物性値

	CFRP 層 (Helical)	CFRP 層 (Hoop, High angle Helical)	GFRP 層
Longitudinal E_L^C	162 GPa	179 GPa	48.9 GPa
Transverse E_T^C	8.16 GPa	9.00 GPa	10.0 GPa
Transverse E_Z^C	8.16 GPa	9.00 GPa	10.0 GPa
Shear G_{LT}^C	3.95 GPa	4.55 GPa	4.08 GPa
Shear G_{TZ}^C	2.84 GPa	3.13 GPa	3.57 GPa
Shear G_{ZL}^C	3.95 GPa	4.55 GPa	4.08 GPa
Poisson's ratio ν_{LT}^C	0.24	0.23	0.27
Poisson's ratio ν_{TZ}^C	0.44	0.44	0.40
Poisson's ratio ν_{ZL}^C	0.24	0.23	0.27
Volume fraction V_f	0.67	0.74	0.55

X, Y, Z 方向に完全固定

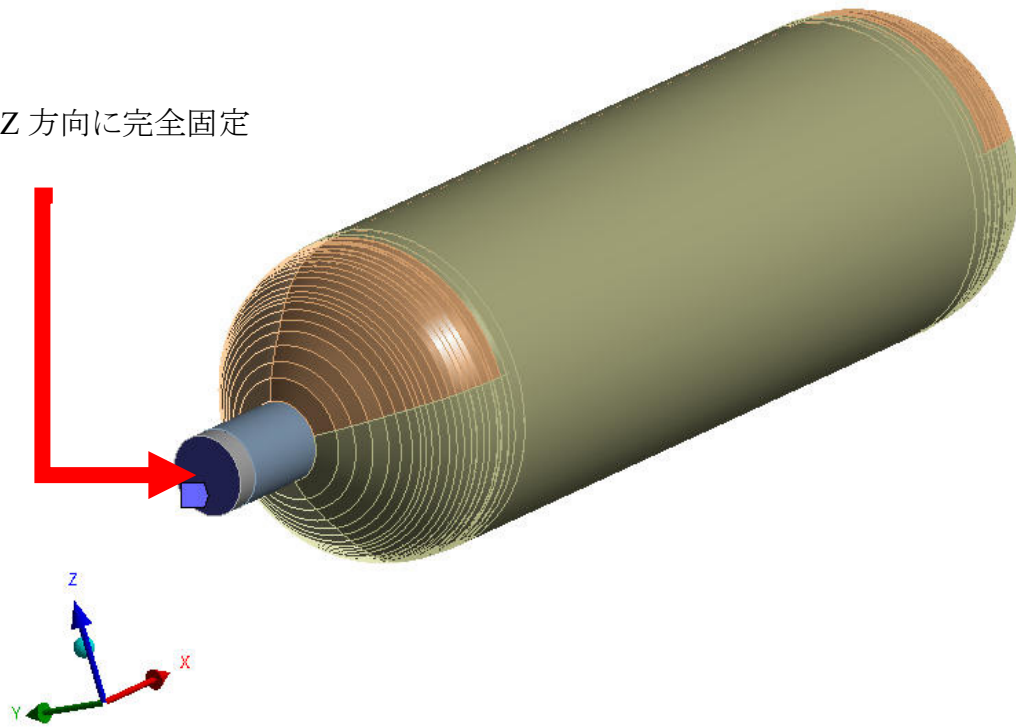


図 3.9 容器の拘束条件

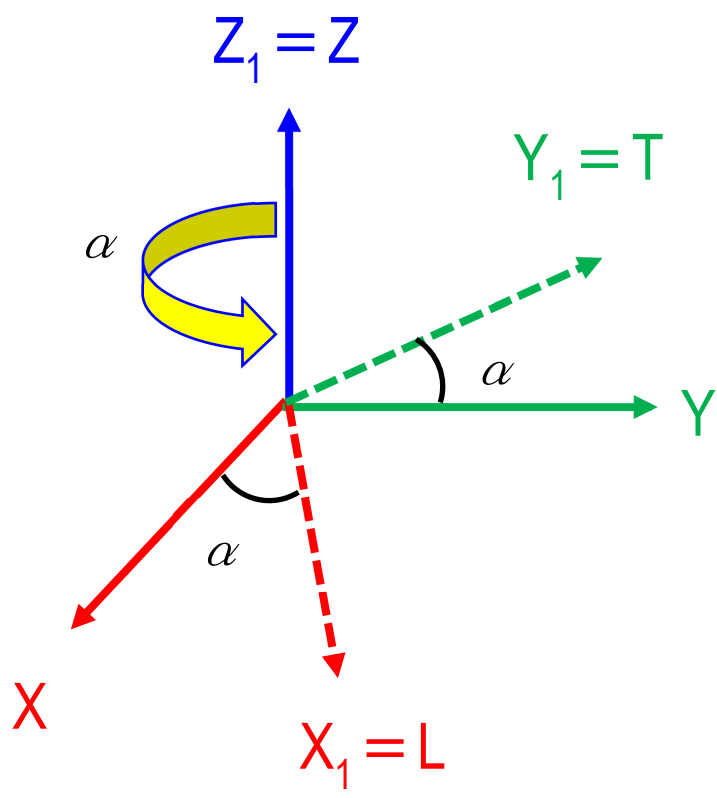


図 3.10 Z 軸回りに任意の角度 α で回転させた座標系

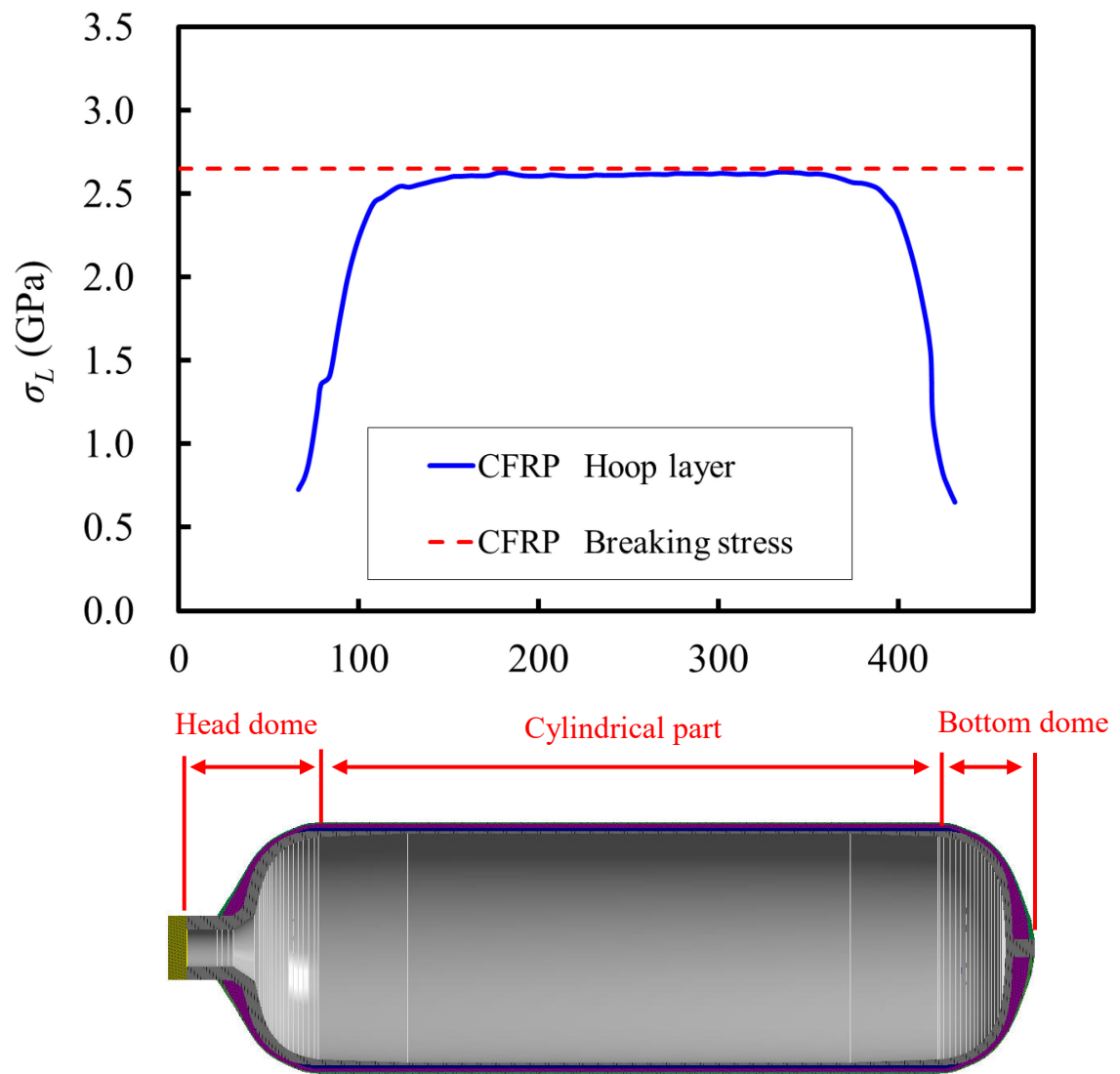


図 3.11 容器 A (Type-3) の CFRP 層の応力分布

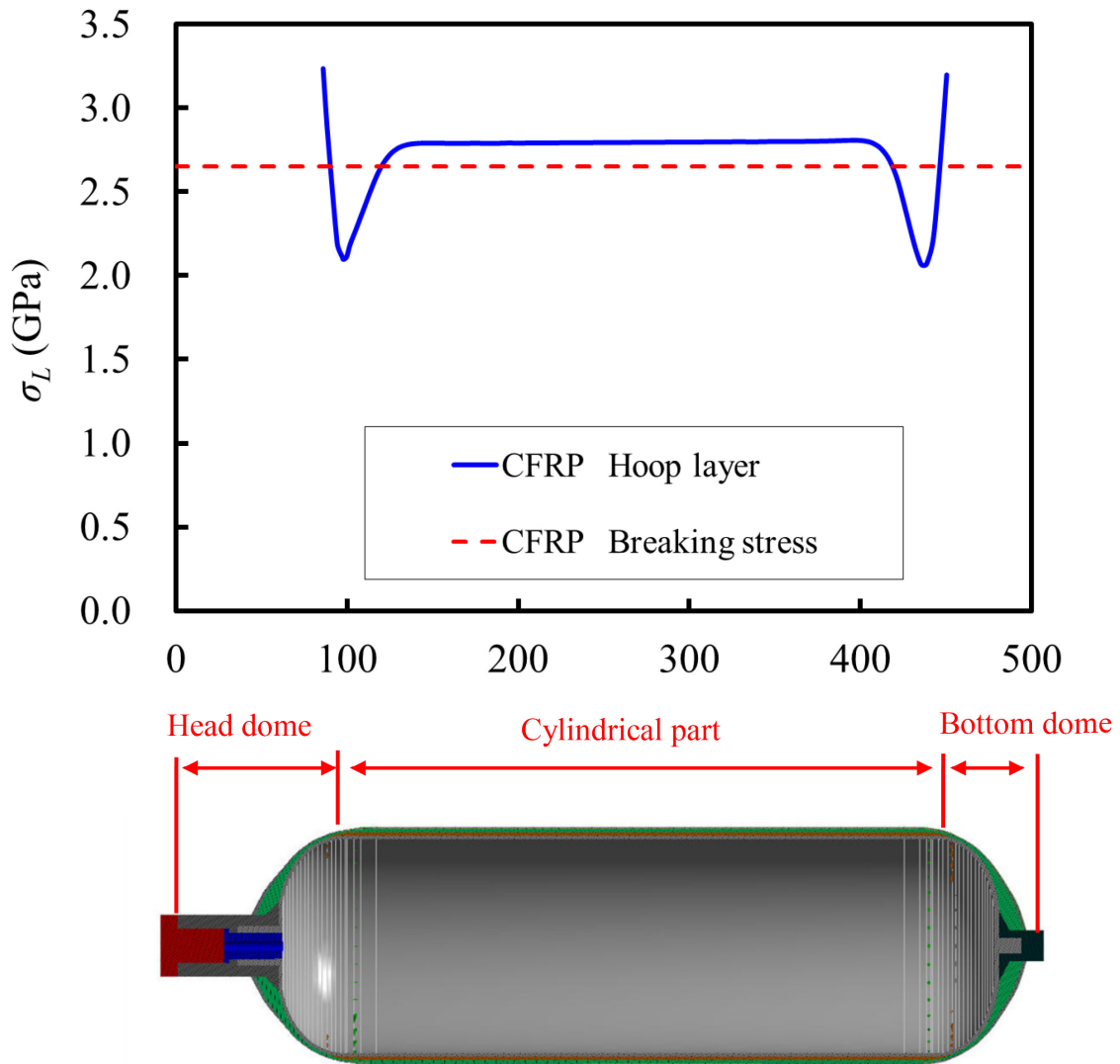


図 3.12 容器 B (Basic model) の CFRP 層の応力分布

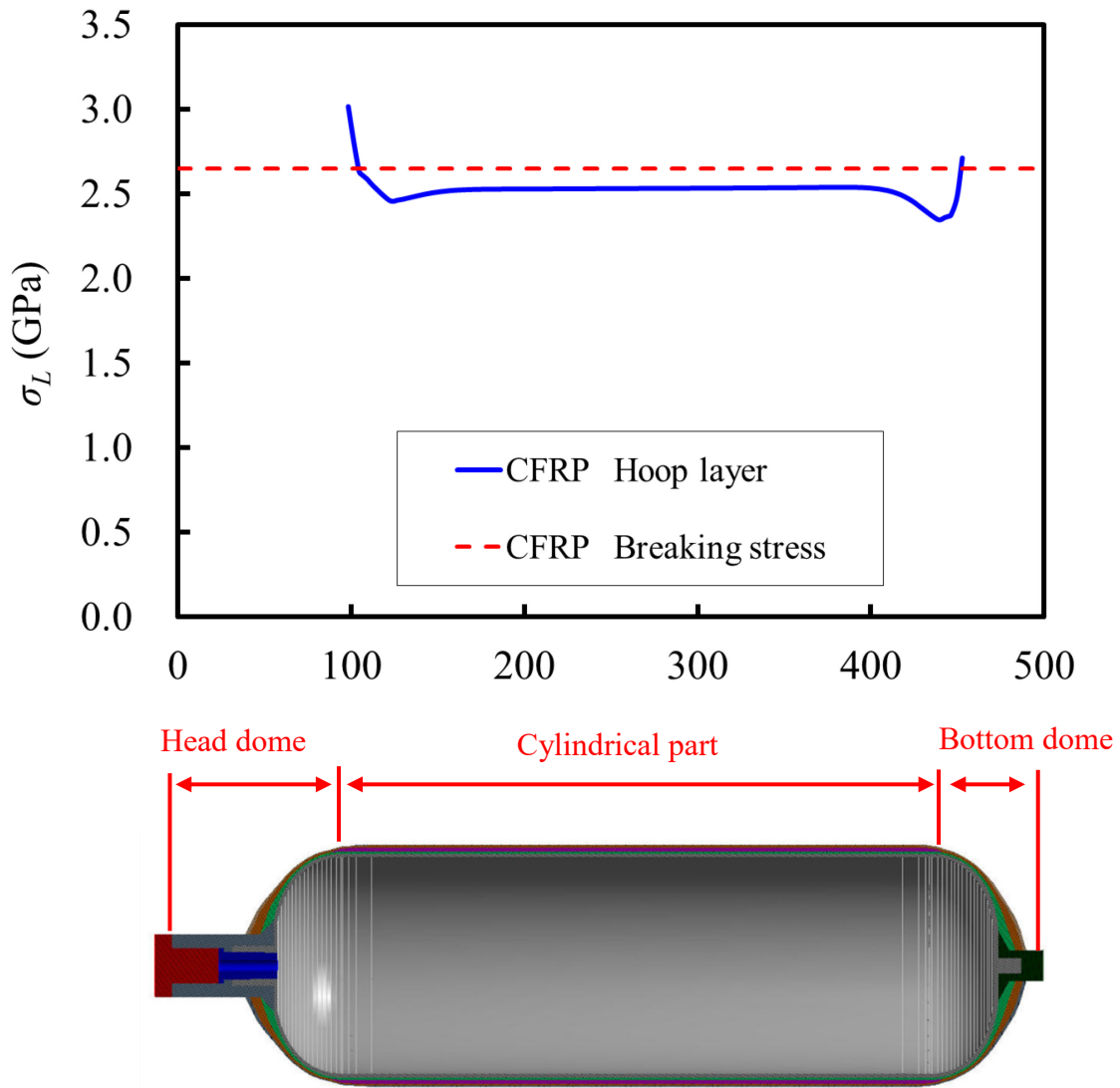


図 3.13 容器 C (Modified model_1) の CFRP 層の応力分布

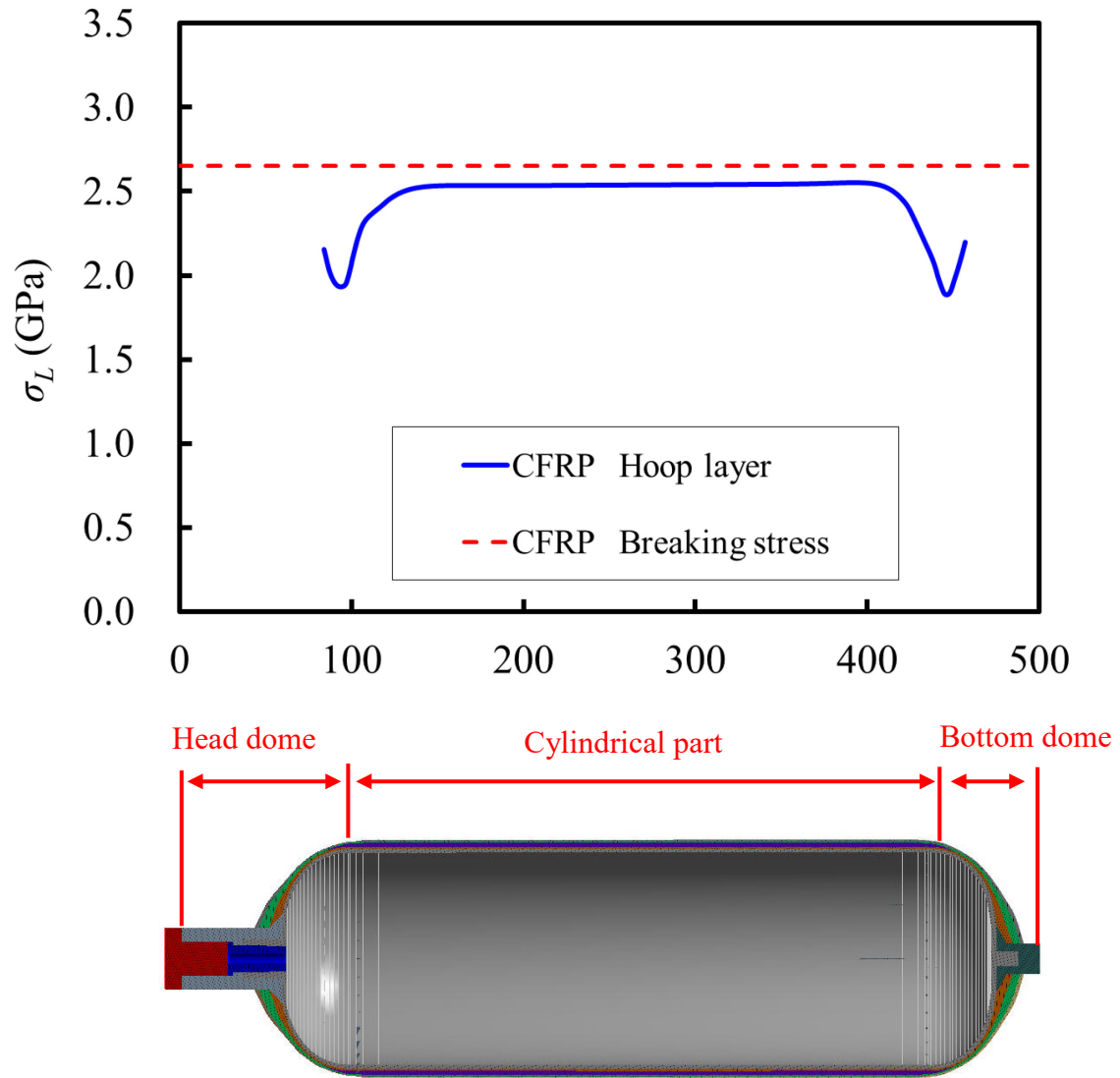


図 3.14 容器 D (Modified model_2) の CFRP 層の応力分布

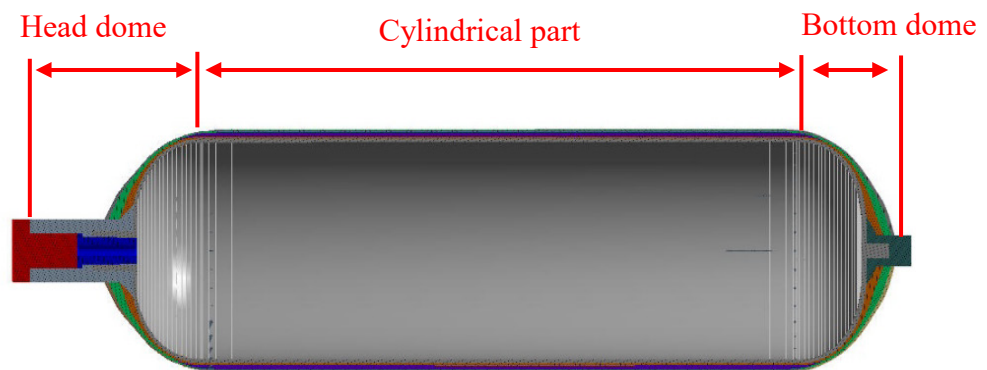
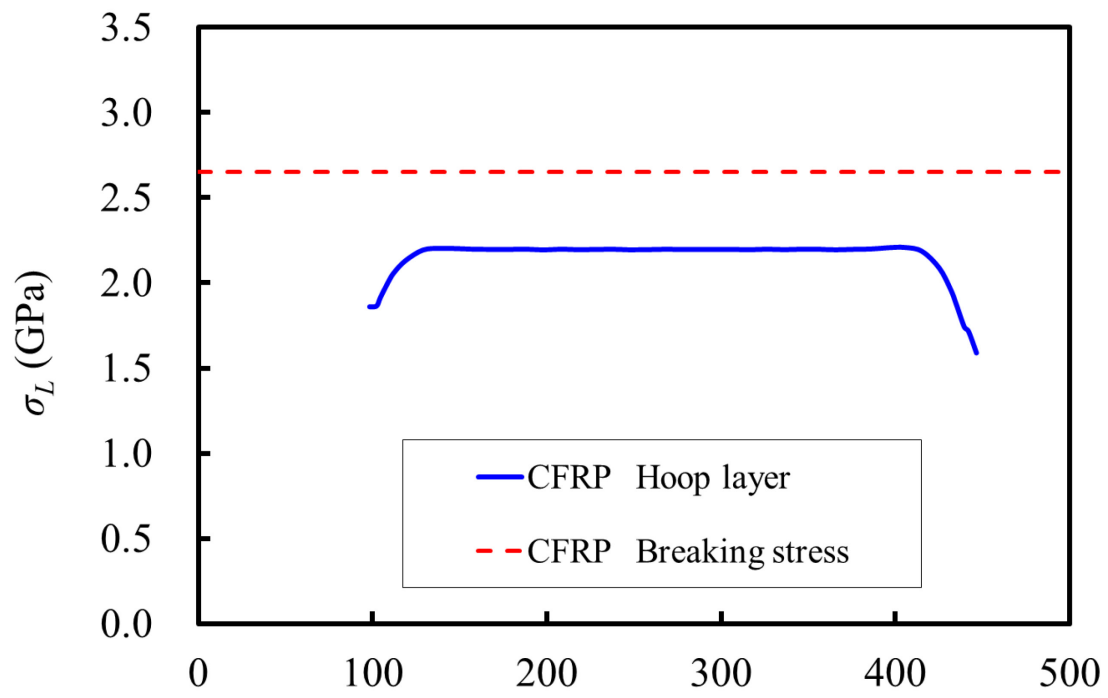


図 3.15 容器 E (Modified model_3) の CFRP 層の応力分布

第 4 章 空気呼吸器用 Type-4 容器の FW 成形

4.1 緒言

第 4 章では、本研究で用いる空気呼吸器用 Type-4 容器の成形方法について述べる。4.2 節では、Type-4 容器の FW 成形方法について述べ、4.3 節では、性能評価試験に使用する容器の成形条件について述べた。そして、4.4 節の結言では、第 4 章で得られた成果をまとめる。

4.2 Type-4 容器の FW 成形方法

4.2.1 FW 成形

Type-4 容器の成形には図 4.1 に示す FW 装置を用いた。FW を行う際は、図 4.2 に示すようにプラスチックライナーの頭部口金部に、FW 用の治具を装着する。そして、図 4.3 のように、FW 用の治具と、FW 装置の主軸を接続し、ライナー底部口金を心押し軸で固定する。さらに、ライナーを接続している FW 治具にガスポンペを接続し、ライナー内部に空気圧を加圧した状態で FW 成形する。

HDPE 製のプラスチックライナーは、Type-3 のアルミニウム合金ライナーと比較し、剛性が低いため、Type-3 の空気呼吸器と同様の方法で成形した場合、成形時に作用する繊維張力が原因でライナーが変形し、設計通りの巻き角度に成形することが難しい。そのため、Type-4 容器の FW 成形では、ライナー内部に空気圧を加圧し、さらに、容器底部に心押し軸を当てライナーを固定した

状態で FW 成形を行った。なお、試作を繰り返した結果、内圧が 0.6MPa 以上になるとライナーが部分的に膨張し形状が変形することが確認された。しかしながら 0.2MPa で成形した場合は、繊維張力による変形や加圧による膨張が確認されず、設計値どおりの Type-4 容器を成形できることが確認できた。そのため、本成形で作用させる内圧は 0.2MPa とした。

FW 成形法は、一方向に引揃えた炭素繊維とガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させて、ライナーに巻き付けるウェットワインディング法にて行った。本研究では、図 4.4 に示すように FW 装置内のクリールに繊維を取付け、図 4.5 に示すエポキシ樹脂を貯蓄したレジンバスに繊維を通過させることで樹脂を含浸させた。

プラスチックライナーは、アルミニウム合金ライナーと異なり、耐熱温度が低いため本研究では、100℃以下で硬化が可能なエポキシ樹脂を選定した。表 4.1 にエポキシ樹脂の仕様と配合比を示す。なお本研究では、FW 成形後に UV を照射しゲル化させるので、UV 硬化剤を配合した。

図 4.6～4.8 に本研究で用いる繊維の巻き方を示す。図 4.6 に示すフープ巻きは、容器円筒部に周方向に繊維を巻き付ける方法であり、容器胴部の強度を向上させる巻き方である。次に図 4.7 に示すヘリカル巻は、頭部のドーム部から底部のドーム部までの容器全体に繊維を巻き付ける成形方法であり、容器全体の強度を分担している。そして、図 4.8 の高角度ヘリカル巻きは、円筒胴部と境界部付近に繊維を巻く方法であり、フープ巻きでは、繊維を巻き付けることのできない境界部近傍のドーム部まで繊維を巻くことができるため、局所的な強度向上が期待できる巻き方である。

本研究では、ライナーの上に強度分担層であるCFRP層をフープ巻き、ヘリカル巻き、高角度ヘリカル巻きの3種類の巻き方を用いて積層した(図 4.9)。その後、保護層であるGFRPをヘリカル層、フープ層の順に積層した(図 4.10)。図 4.11 に FW 成形後のType-4 容器を示す。

4.2.2 エポキシ樹脂のゲル化

本研究で用いた、エポキシ樹脂は粘度が低いため、FW 成形中や、工程間の待機時間等で樹脂垂れや、樹脂の偏り、硬化中に樹脂が抜け落ちる等で質量が減少する。さらに、Type-4 容器のプラスチックライナーは、材料強度が低いため FW 成形時に繊維張力を高くすることができないため FW した繊維層が緩みやすく、設計値通りの FW 成形ができない等の問題が発生した。そのため本研究では、CFRPとGFRPのFW完了後にUV照射することで、エポキシ樹脂をゲル化させ、樹脂垂れや、FW中により生じる繊維層の滑りや崩れなどを抑制した。図 4.12 に UV 硬化の方法を示す。

4.2.3 エポキシ樹脂の完全硬化

FW 成形終了後、FW マシン主軸から、容器を外し、容器内部に内圧 0.2MPa を作用させたまま、図 4.13 に示す密閉型の熱硬化炉内の主軸に取付け密閉した。その後、硬化温度 85 °C で 4 時間の間、加熱しCFRP層とGFRP層を硬化させた。なお硬化の際は、樹脂の偏りや、樹脂垂れを防止するため、容器を回転させながら硬化を行った。硬化後は、容器を炉から取り出し、図 4.13

に示すように常温で 6 時間空冷させた後に、ライナー形状の変形の抑制のために充てんした空気を抜いて成形を終了した。

4.3 性能評価試験用容器の成形

4.2 節で述べた手順で、性能評価試験に使用する Type-4 容器(容器 B~E)の FW 成形を行った。表 4.2 に容器 B~E の FW 成形条件を示す。繊維含有率 (V_f) は、CFRP のフープ層と高角度ヘリカル層は $V_f= 0.72$ とし、CFRP のヘリカル層は $V_f= 0.64$ 、GFRP はフープ層、ヘリカル層ともに $V_f= 0.55$ とした。

はじめに、容器 B(Basic model)は、頭部口金 a を装着したプラスチックライナーに Type-3 容器と同様の積層構成で、FW 成形を行った。

次に容器 C(Modified model_1)は、頭部口金 a を装着したライナーに、1 層目に CFRP のヘリカル層、2 層目に CFRP のフープ層、3 層目に CFRP のヘリカル層を積層した。その後 GFRP を積層した。

容器 D(Modified model_2)は、容器 C と同様の条件としたが、境界部を増肉するために、境界部付近の繊維が滑りやすい場所では、フープ巻きの加工速度を落とし、さらに境界部のみ繊維張力の設定値を 0N とし繊維の滑りを抑制した状態で積層した。

最後に頭部口金 b を装着したライナーに高角度ヘリカル巻きを取り入れた容器 E(Modified model_3)は、1 層目に CFRP のフープ巻きを 0.3mm 積層した。2 層目に CFRP の高角度ヘリカル巻きを積層し、その後 3 層目に CFRP のヘリカル層、4 層目に CFRP のフープ層、5 層目に CFRP のヘリカル層を積層した。なお、高角度ヘリカル層はボス部等の繊維の滑りを抑制する部分を織

維が通過しないため、FW 中に繊維の滑り等が発生する。そのため、高角度ヘリカル巻きは、境界部付近などの繊維が滑りやすい場所は、ライナーに直接繊維を巻き付け、さらに、繊維張力を高めに作用させることで、繊維の滑りを抑えることが確認された。

4.4 結言

第4章では、空気呼吸器用 Type-4 容器の設計とFW成形を行った。その結果、以下の結論が得られた。

下記に本研究で得られた、4.7L 空気呼吸器用 Type-4 容器の成形条件を示す。

- (1)FW の際はライナー内面に 0.2MPa の空気圧を作用させ、容器底部を心押し軸で固定することで、繊維張力によるライナーの変形を抑制することができる。
- (2)フープ層で容器の境界部を増肉する場合は、繊維張力の設定値を 0 N とし、高角度ヘリカル巻きを巻く際は、逆に繊維張力を作用させるなど、繊維が滑りやすい場所や、巻き方に合わせて繊維張力を調整することで、設計値通りにFW することができる。
- (3)CFRP 及び GFRP の FW 終了後にゲル化させることで、樹脂垂れによる樹脂の偏りや、質量の変化を抑制できるだけでなく、FW 成形や熱硬化の際の発生する積層の崩れを抑制することができる。

(4)プラスチックライナーは、耐熱性が低いため 100℃以下で硬化可能な樹脂を選定する必要がある。本研究では硬化温度 85℃で 4 時間硬化させた。



図 4.1 フィラメントワインディング装置

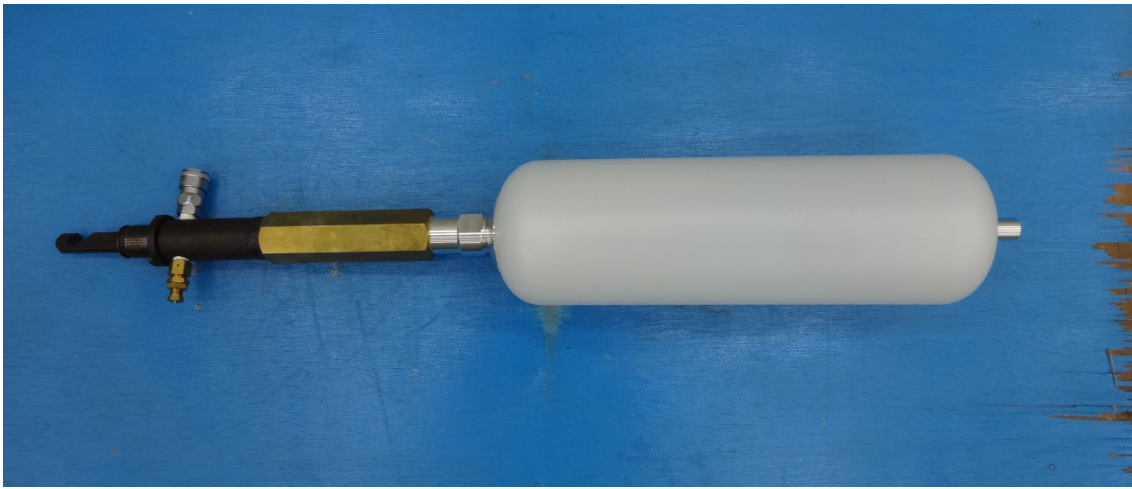


図 4.2 FW 用治具を装着したライナー



図 4.3 ライナーの接続および空気ガスの充てん状況



(a) 炭素繊維



(b) ガラス繊維

図 4.4 FW 装置内の繊維供給部



図 4.5 レジンバスによる樹脂含浸の様子

表 4.1 エポキシ樹脂の配合比

	Epoxy Resin	Hardener	Accerelator	UV Concentrate
Viscosity @25°C	700 (mPa · s)	60 (mPa · s)	0.90 (mPa · s)	120 (mPa · s)
Mixing ratio (Weight ratio)	100	100	2	20
Viscosity of the mixture @25°C	250 (mPa · s)			

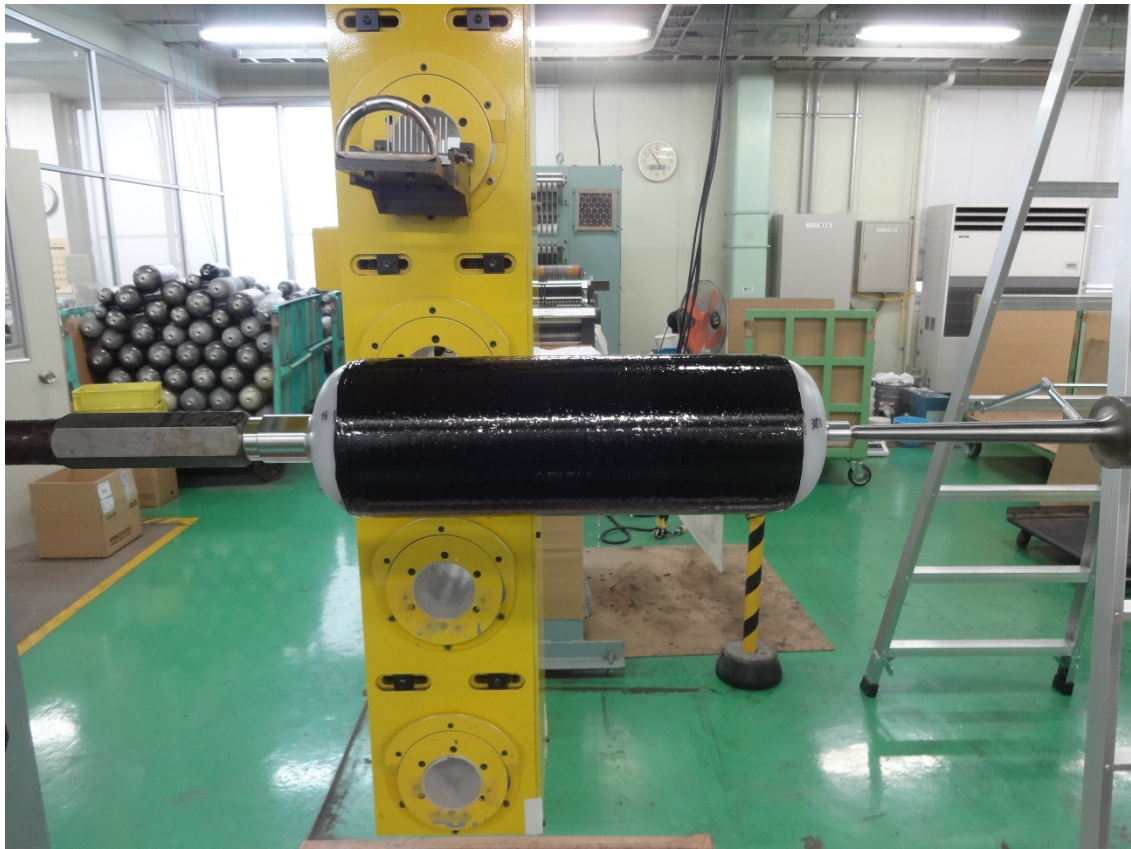


図 4.6 炭素繊維のフープ巻き



(a) 円筒胴部



(b) 頭部側



(c) 底部側

図 4.7 炭素繊維のヘリカル巻き



(a) 円筒胴部



(b) 頭部側



(c) 底部側

図 4.8 炭素繊維の高角度ヘリカル巻き



図 4.9 CFRP 層の FW 成形後の状態



図 4.10 GFRP 層の FW 成形



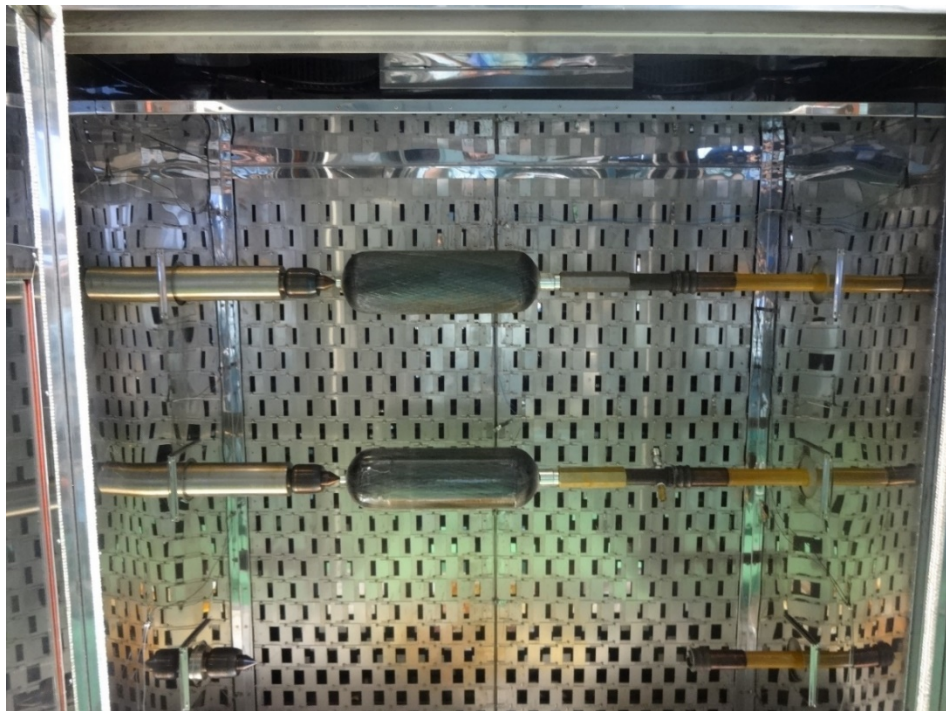
図 4.11 GFRP 層の FW 成形後の状態



図 4.12 UV 照射による樹脂のゲル化



(a) 硬化炉の外観



(b) 硬化炉の内面

図 4.13 硬化炉にて樹脂を完全硬化



図 4.14 容器の空冷状況

表 4.2 Type-4 容器の FW の成形条件

Vessel		CFRP					GFRP	
		1 layer	2 layer	3 layer	4 layer	5 layer	1 layer	2 layer
Vessel-B (Basic model)	Fiber angle	90°	±18.8°	90°			±14.2°	90°
	Tension	4 N	4 N	4 N			4 N	4 N
Vessel-C (Modified model_1)	Fiber angle	±18.4°	90°	±18.4°			±14.2°	90°
	Tension	4 N	4 N	4 N			4 N	4 N
Vessel-D (Modified model_2)	Fiber angle	±18.4°	90°	±18.4°			±14.2°	90°
	Tension	4 N	4 N	4 N			4 N	4 N
Vessel-E (Modified model_3)	Fiber angle	90°	±65°	±18.4°	90°	±18.4°	±14.2°	90°
	Tension	18 N	18 N	18 N	6 N	6 N	4 N	4 N

5 章 Type-4 容器の性能評価試験

5.1 緒言

第 5 章では、4 章で作製した Type-4 容器を用いて、EN12245 に規定されている構造設計に関する試験を実施した結果について述べる。

5.2 節では、本研究で実施する Type-4 容器の性能評価試験の評価基準について述べる。

5.3 節では、破裂試験を行い、CFRP 層の積層構成が Type-4 容器の破裂圧力と破裂起点に及ぼす影響について検証した結果を述べる。

次に 5.4 節では、Type-4 容器の耐衝撃性と衝撃負荷後の残存破裂圧力を評価するため、落下させた容器を用いて破裂試験を実施した結果について述べる。

そして、5.5 節では、圧力サイクル試験を行い、Type-4 容器の疲労寿命について検証した結果について述べる。

5.6 節では、Type-4 容器の衝撃負荷後の残存疲労寿命を評価するため、落下させた容器を用いて、サイクル試験を実施した結果について述べる。

5.7 節では、強度分担層である FRP 層に欠陥や、深さのある傷が生じた際の強度を確認するため FRP 層に欠陥を与えた容器を用いて、破裂試験とサイクル試験を実施した結果を述べる。

5.8 節では、バルブの取付け(実用時に作用する力)を想定し、Type-4 容器のネック部(以下ボス部)の強度確認のためにボス部に締付けトルクを作用させるボストルク試験を実施した。

最後に 5.9 節に結言として第 5 章で得られた成果をまとめる。

5.2 容器の評価基準

本章にて実施する Type-4 容器の性能評価試験の方法は、欧州規格 EN12245 に準拠した。具体的には、EN12245 における開発試験項目で、常温における破裂圧力や疲労寿命、耐衝撃性等の強度設計に関する性能試験を行った。表 5.1 に本研究にて実施する試験内容と、その合格基準を示す。なお本試験では、最初に破裂試験を行い、破裂圧力の基準を満足する Type-4 容器の検証を行った。その後破裂試験に合格した Type-4 容器を用いて、落下後の破裂試験や疲労寿命試験等を実施した。

5.3 破裂試験^{49,54,55)}

5.3.1 破裂試験の方法

4 章で作製した 4 種類の Type-4 容器 (容器 B, C, D, E) を用いて、破裂試験を実施した。なお、比較のため現在市販されている Type-3 容器 (容器 A) の破裂試験も併せて行った。図 5.1 に 4 章で作製した Type-4 容器の外観を示す。

試験方法と条件は、EN12245 に準拠し、破裂試験装置と水を満水まで充てんした容器を高圧配管と継手で接続し、容器が破裂に達するまで水圧を負荷した。一方で、破裂圧力の合格基準は、EN12245 の 88.2MPa ではなく、設計破裂圧力の 100MPa 以上で、容器円筒胴部で破裂することとした。

試験の際は、バーストピット内に容器を収納して実施した。図 5.2 に破裂試験装置を図 5.3 にバーストピットを示す。

なお、3.3 節の FEM 解析にて破裂圧力 100MPa を満足した容器 D と、容器 E の Type-4 容器には、図 5.4 に示すように胴部最外層の GFRP フープ層に 1 軸のひずみゲージを 3 箇所（頭部側；CH1，中央部；CH2，底部側；CH3）に貼付し、周方向のひずみを測定した。

5.3.2 破裂試験の結果

破裂試験の結果を表 5.2 に示す。はじめに Type-3 容器である容器 A は図 5.5 に示すように胴部中央部で破裂した。さらに、破裂圧力は 125.0MPa であり、Type-3 容器の破裂圧力の合格基準である 100MPa を満足するとともに、十分な破裂圧力を有していることが確認できた。

次に、FEM 解析において破裂圧力 100MPa を満足できなかった容器 B (Basic model) と、容器 C (Modified model_1) の Type-4 容器で破裂試験を行った。その結果、容器 B は、80.0 MPa で破裂に達した。また、容器 C も 81.8MPa で破裂に達し、合格基準である設計破裂圧力の 100MPa を満足できなかった。また、図 5.6 に示すように容器 B は底部から円筒部にかけて破裂し、容器 C は図 5.7 に示すように頭部ドーム部で破裂した。

一方で、容器境界部付近の CFRP フープ層の板厚を増肉した容器 D (Modified model_2) は、破裂圧力 104.6MPa で破裂に達し、最小破裂圧力 88.2MPa と、設計破裂圧力 100 MPa の両方を満足した。さらに図 5.8 に示すように、破裂起点は底部側の胴部となり、破裂圧力および破裂起点ともに合格基準を満足する結果が得られた。

最後に、CFRPの2層目に高角度ヘリカル層を積層し、胴部と境界部付近を局部的に補強した容器E(Modified model_3)を用いて破裂試験を実施した。その結果、破裂圧力109.0MPaで破裂となり破裂試験を実施したType-4容器の中では、最も高い破裂圧力を有していた。また、破裂起点も図5.9に示すように、容器頭部から胴部にかけて破裂しており、合格基準を満足する結果だった。

5.3.3 FEM解析結果と実験結果の比較

破裂試験の結果、容器Dと容器Eは、FEMにより得られた破裂圧力の予測値と実験結果はよく一致していると言える。そこで、容器Dと容器Eに発生したひずみの実測値と、FEM解析により算出したひずみの値を比較することで、FEMによる解析精度の検証を行った。図5.10には容器Dを、図5.11には容器Eの円筒部における周方向ひずみの実験値とFEM解析結果の比較をそれぞれ示す。なお、ひずみの実測値は、容器D、容器Eともに、破裂に達するまで、良好にデータを取得できた中央部の(2CH)の結果とする。これらの図の縦軸は内圧、横軸は最外層の周方向ひずみを示している。図5.10、図5.11からわかるように、容器D、容器Eともに、容器円筒胴部のひずみの実験値とFEM解析の結果は、良好な一致を示しており、FEM解析の妥当性を確認することができた。

5.4 落下後の破裂試験⁵⁵⁾

5.4.1 落下後の破裂試験の方法

基準に従い容器を落下させた後に破裂試験を行い、Type-4 容器の耐衝撃性と残存強度の評価を行った。なお、本試験には、5.3 節にて、破裂試験に合格した容器 D と容器 E の Type-4 容器を用いた。

落下方法や試験方法は、EN12245 に準拠した。容器の内部に内容積の半分(2.35L)の水を充てんした後に、地上 1.2m の高さから、鉄板を敷いた地面上に図 5.12 に示す、5 条件(①頭部側の垂直方向、②頭側 45° 方向、③底部側の垂直方向、④底側 45° 方向、⑤水平方向落下)で 2 回ずつ落下させた。

図 5.13 に容器 D の落下後の形状を示す。同図に示すように、底側の容器肩ドーム部の表面上に亀裂の発生が確認された。なお、頭部側には、亀裂の発生は確認されなかった。しかしながら、容器 D は落下の衝撃でボス部が約 5° 程度傾いた。その原因として、頭部側 45° 方向の落下において、頭部口金の密着強度が不足していたため、落下の衝撃に耐えられなかったと考えられる。

次に容器 E の落下後の形状を図 5.14 に示す。同図に示すように、底側の容器肩ドーム部の表面上に亀裂の発生が確認された。しかしながら、この容器 E はボス部の傾きは確認されなかった。これは頭部口金 b のライナー接触面が広く、さらに口金の溝部に FRP 層が入り込み、ボス部が強固に固定されていたためだと考えられる。

5.4.2 落下後の破裂試験の結果

落下後の容器 D と、容器 E を用いて落下後の破裂試験を実施した。落下後の破裂試験の結果を表 5.3 に示す。

表 5.3 に示すように、容器 D は、破裂圧力 63.0MPa で破裂した。破裂後の容器形状を図 5.15 に示す。同図からわかるように本容器は、容器底側の落下衝撃作用部にて破裂に達した。5.3 節で実施した破裂試験では、104.6MPa の強度を有していたが、落下により破裂圧力が 41.6MPa も低下し、基準である最小破裂圧力 88.2MPa を満足できないことが確認された。

一方で、容器 E の破裂圧力は、99.3MPa だった。破裂後の容器形状を図 5.16 に示す。同図に示すように容器底側の落下衝撃作用部で破裂に達していることが確認された。5.3 節で実施した、破裂試験では容器 E の破裂圧力は 109.0MPa であり、落下前後の圧力差は 9.7MPa と、落下による強度低下が殆ど発生ないことが確認された。さらに、合格基準である最小破裂圧力 88.2MPa を満足していることが確認できた。

一般的に用いられるフープ層とヘリカル層のみで積層した容器 D では、落下後の破裂圧力を満足できなかったが、高角度ヘリカル巻を取り入れた容器 E は、落下後も十分な破裂圧力(残存強度)が得られることが確認された。その要因として高角度ヘリカル層を積層したことが考えられる。高角度ヘリカル層により、容器の境界部付近や落下衝撃部を補強できたため、落下衝撃による強度低下を抑制できたと考えられる。

5.3 節の破裂試験と、本節の落下試験後の破裂試験の結果から、空気呼吸器用容器に要求される破裂圧力と落下後の破裂圧力を満足可能な Type4 容器は、口金 b と高角度ヘリカル巻

を取り入れた容器 E であることが確認された。これ以降の評価試験は、容器 E で実施する。

5.5 圧力サイクル試験

5.5.1 圧力サイクル試験の方法

基準に従い圧力サイクル試験を行い Type-4 容器の疲労寿命の評価を行った。試験は、図 5.17 に示す圧力サイクル試験装置に、水を充てんした Type-4 容器を高圧配管と継手で接続し、容器内部に大気圧と上限圧力間の繰返し圧力サイクルを水圧にて負荷した。

試験条件や試験方法は EN12245 に準拠し、図 5.18 に示すように、大気圧 0MPa から試験圧力(上限圧力)である 44.1MPa まで昇圧後、大気圧 0MPa まで降圧させる圧力変動を 1 サイクルとし、それを規定回数である 7,500 回繰返し実施した。なお、サイクル試験回数は、容器の耐用年数(使用年数)をもとに算出した。基準により 1 年あたりの使用回数を 500 回し、それを一般複合容器の使用年数 15 年分繰返すと想定し、7,500 回(500×15)とした。合格基準は、EN12245 に準拠し、基準サイクル数 7,500 回の圧力サイクル完了後において、容器に漏れ及び破裂しないこととした。図 5.19 に試験の状況を、図 5.20 に試験中の圧力計示す。

5.5.2 圧力サイクル試験の結果

容器 E に大気圧 0MPa と試験圧力 44.1MPa の圧力サイクルを 7,500 回実施した。図 5.21 に試験前の容器を、図 5.22 に試験後の容器を示す。本試験の結果、図 5.22 に示すように試験回数 7,500 回達成後も水漏れや破裂の発生は確認されず基準を満足していることが確認できた。

さらに、EN12245 には規定されていないが、圧力サイクル試験実施後の残存強度を検証するために、サイクル試験後の容器を用いて破裂試験を実施した。その結果、図 5.23 に示すように、胴部頭部側から、90.0MPa で破裂に達した。圧力サイクルを作用させていない場合の破裂圧力 109MPa と比較すると、20%程強度が低下していた。なお、頭部ドーム部から破裂した理由としては、繰返し圧力サイクルが作用したことで頭部口金付近の CFRP 層の強度が低下したためだと考えられる。しかしながら、最小破裂圧力である 88.2MPa を満足していることから、残存破裂圧力は十分に有していると考えられる。

5.6 落下後のサイクル試験

5.6.1 落下後のサイクル試験の方法

基準に従い容器を落下させた後にサイクル試験を行い、Type-4 容器の残存疲労寿命の評価を行った。

容器の落下方法は、5.4 節の落下後の破裂試験と同じ方法で実施した。図 5.24 に容器 E の落下後の形状を示す。試験装置と試験方法は、5.5 節のサイクル試験と同じとし、容器に大気圧

0MPaと試験圧力 44.1MPa の圧力サイクルを 7,500 回実施した。落下後のサイクル試験の試験状況を図 5.25 に示す。

5.6.2 落下後のサイクル試験の結果

容器 E に 0MPa と 44.1MPa の圧力サイクルを 7,500 回実施した。図 5.26 にサイクル試験前の容器形状を、図 5.27 にサイクル試験後の容器形状を示す。本試験の結果、試験回数 7,500 回実施後も水漏れや破裂の発生は確認されなかった。つまり、容器 E の落下後の残存疲労寿命は十分に基準を満足していることが確認できた。

5.7 欠陥試験

5.7.1 欠陥試験の方法

EN12245 に準拠し、図 5.28 に示すように、容器 E の FRP 層に軸方向の欠陥(欠陥 A)と、周方向の欠陥(欠陥 B)を付けた。

本研究における、欠陥の深さは、FRP 層(GFRP+CFRP)の設計板厚 5.2mm の 40%にあたる 2.08mm に、FW 後の FRP 層肉厚のバラつき 0.5mm を加算した 2.58mm 以上の 2.60mm とした。また欠陥の長さの範囲は、設計最小板厚 5.2mm の 5 倍の 26mm 以上、42mm 以下とする。

欠陥は、容器をフライス盤に取付け、FRP 層表層に切削加工にて欠陥を付けた。はじめに欠陥 A は、歯厚 1mm、外径 30mm のフライスカッターで、軸方向に切り込みを入れた。次に欠陥 B は、φ1.5mm のエンドミルを用いて切削した。図 5.29 に欠陥 A を、図

5.30 に欠陥 B の形状を示す。本試験では、欠陥を付けた容器 E を用いて、破裂試験とサイクル試験を実施した。

5.7.2 欠陥破裂試験の方法

試験は、欠陥を付加した容器 E を用いて実施した。破裂装置と試験の方法は、5.3 節の破裂試験と同じとする。なお本試験の合格基準値は、EN12245 に準拠し、66.2MPa(44.1MPa×1.5 倍)とする。

5.7.3 欠陥破裂試験の結果

試験の結果、欠陥を付加した容器 E は、107.0MPa の圧力で、欠陥 A 部から胴部頭部側にかけて破裂に達した。5.3 節にて検証した、欠陥を加えていない容器の破裂圧力が 109MPa であったことから、欠陥を付加した場合でも、容器の破裂圧力が低下しないことが確認できた。破裂後の容器形状を図 5.31 に示す。本試験の結果から、板厚の 40%にあたる深さの欠陥を付加した場合でも、破裂圧力を十分に確保できることが確認できた。その要因として、空気呼吸器用容器の構造が考えられる。呼吸器は強度分担層の CFRP の外側に保護層である GFRP を積層している。そのため FRP 全層(CFRP+GFRP)の 40%の欠陥が発生した場合でも、GFRP 層の厚さ分 CFRP 層の減肉を防ぐことができる。さらに、容器 E の積層構成では、強度分担層である CFRP の最外層が円筒部の強度を殆ど分担しないヘリカル層であり、フープ層の減肉は僅かであったため、強度低下を抑制できたと予測される。

5.7.4 欠陥サイクル試験の方法

試験は、欠陥を付加した容器 E を用いて実施した。サイクルの方法は、5.3 節のサイクル試験と同じとした。なお、試験圧力と試験回数は、EN122245 に準拠し、試験圧力は 29.4MPa、試験回数は 1,000 回とする。図 5.32 に欠陥サイクル試験の試験状況を、図 5.33 に試験時の圧力計示す。

5.7.5 欠陥サイクル試験の結果

欠陥を付加した容器 E を用いて、大気圧 0MPa と 29.4MPa の圧力サイクルを 1,000 回実施した。図 5.34 に試験前の容器形状を、図 5.35 に試験後の容器形状を示す。本試験の結果、試験回数 1,000 回においても水漏れや破裂の発生は確認されず基準を満足していることが確認できた。

5.8 ボス部の強度確認試験

5.8.1 ボス部の強度確認試験の方法

Type-4 容器は、Type-3 容器のような単一材料のライナーと異なり、プラスチックライナーとボス部が別々のパーツで構成されている。そのため、ボス口金、ライナー、繊維層の密着強度が低い場合、バルブの装着等で、高いトルクが作用した際に、ボス部が変形する可能性がある。そのため、Type-4 容器では、ボス部の強度評価試験が求められている。そこで本試験では、Type-4 容器のボス部に規定されたトルクを作用させ、ボス部の強度を評価した。

なお現在 Type-4 容器のバルブは開発されていないため、トルクの規定値が決まっていない。そのため、本試験のトルクの規定値は、Type-3 空気呼吸用容器用バルブの締付けトルク 120Nm と想定した。

5.8.2 トルク試験の方法

試験は EN12245 に準拠して実施した。本試験には、容器 E を用いた。本試験を実施するにあたり、図 5.36 に示すように、容器の頭部ボス口金部に赤線でマーキングした。さらに、図 5.37 のねじゲージをバルブの取付け部位である頭部ボス口金の内ねじ部に挿入し、ねじ形状が正常であることを確認した(図 5.38)。その後、図 5.39 に示すようにバルブを想定したプラグを取付けた容器をエアチャックに固定し、トルクレンチにてトルクを負荷した(図 5.40)。

本試験で負荷させるトルクは、EN 規格のトルク試験の基準である、規定トルクの 110%に相当する 132Nm (120Nm×1.1)とした。

5.8.3 トルク試験の結果

基準に従い、プラグをトルクレンチで掴み、132Nm 試験のトルクを負荷した。その後、ボス部のプラグを取り外し、ねじ部にねじゲージを再度挿入し、ねじ部の形状確認を行った。その結果、ねじ部の変形や破損は確認されなかった。さらに図 5.41 に示すように、ネック部のマーキングに変化が確認されなかったことから、ボス部に変形や回転等が発生しなかったと考えられる。つまり容器 E のボス部とねじ部はバルブ装着に必要な強度を十分に有していることが確認された。

5.8.4 ボス強度試験の方法

試験は EN12245 に準拠して実施した。本試験には、容器 E を用いた。5.8.3 のトルク試験と同様に、本試験を実施するにあたり、容器のボス部に赤線でマーキングした後に容器をエアチャックに固定し、トルクレンチにてトルクを負荷した。本試験で負荷させるトルクは、EN 規格のボス強度試験の基準である、規定トルクの 150% に相当する、180Nm ($120\text{Nm} \times 1.5$) とした。

5.8.5 ボス強度試験の結果

基準に従い、Type-4 容器に取り付けたバルブ想定治具に、トルクレンチを用いて、規定トルクの 1.5 倍のトルクである 180Nm の試験トルクを負荷した。その後、マーキングを確認したところ図 5.42 に示すように、マーキングに変形が確認されなかった。このことから、容器 E のボス部は、基準を満足する強度を有していることが確認できた。

5.9 結言

本章で、Type-4 容器の各種試験を実施した結果、以下のことが確認できた。

- (1) プラスチックライナーを用いた、Type-4 容器で空気呼吸器用容器に要求される破裂圧力を満足するためには、Type-3 容器と比較し CFRP 層を増肉させる必要がある。一方で積層構成を適切に設計することで、軽量化を実現しつつ、空気呼吸用容器の基準を満足できることが確認できた。
- (2) 落下試験後の破裂試験の結果から、Type-4 容器で安定した残存強度を得るためには、高角度ヘリカル層を組み込んだ積層構成にする必要がある。高角度ヘリカル層で落下衝撃作用部を局部的に補強することで、破裂圧力の向上と耐衝撃の向上の双方を満足することが可能である。
- (3) 落下試験後の破裂試験の結果から、Type-4 容器は落下試験後に、破裂圧力が低下するので、設計の際は、合格基準値である最小破裂圧力に、落下によって生じる強度低下を想定した、設計破裂圧力の設定が必要である。本研究で設計した Type-4 容器の場合は、最小破裂圧力 88.2MPa に強度低下分の 10MPa を加算した 98.2MPa 以上の 100MPa であれば十分に仕様を満足できると考えられる。

- (4) サイクル試験及び、落下後のサイクル試験の結果、Type-4 容器の疲労寿命は、十分に基準を満足できることが確認できた。さらに EN12245 では規定されていないものの規定回数実施後の残存破裂圧力は、90MPa と最小破裂圧力 88.2MPa を満足していることが確認された。
- (5) 欠陥試験の結果から、Type-4 容器は、深さ 40%の欠陥が 2 か所生じた場合でも、破裂圧力や疲労寿命が低下することなく、仕様を満足できることが確認できた。
- (6) ポストトルク試験の結果、110%の試験トルクでは、ねじ部の破損や変形は確認されなかった。また、150%のトルクを付加した場合でもボス部に変形が生じなかったので本 Type-4 容器はバルブの取り付け等の実用的な強度は十分に有していることが確認できた。

表 5.1 性能評価試験の内容と合格基準

Test item	Criteria
Burst test	Actual burst pressure > 88.2MPa Burst part, Cylindrical
Ambient cycle test	Test pressure, 44.1MPa Number of cycles, 7,500cycle No leakage or burst
Drop test (Bust test)	Actual burst Pressure > 88.2MPa
Drop test (cycle test)	Test pressure, 44.1MPa Number of cycles, 7,500cycle No leakage or burst
Flaw test (Bust test)	Actual burst Pressure > 66.2MPa
Flaw test (cycle test)	Test pressure, 29.4MPa Number of cycles, 1,000cycle No leakage or burst
Torque test	No screw deformation
Neck strength test	No deformation



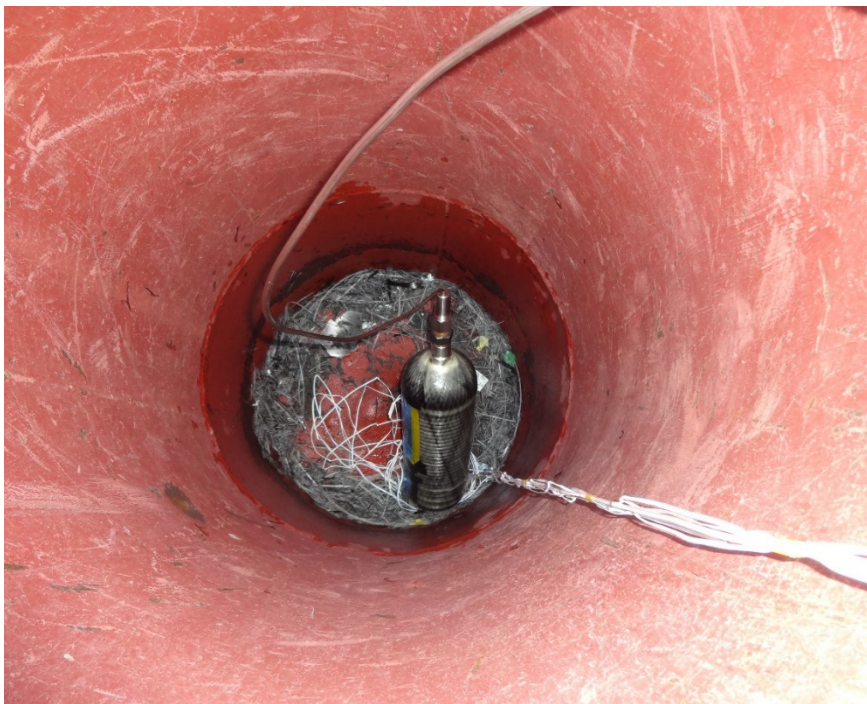
図 5.1 Type-4 容器の外観



図 5.2 破裂試験装置



(a)ピットの外観



(b)ピットの内部

図 5.3 破裂試験のピット

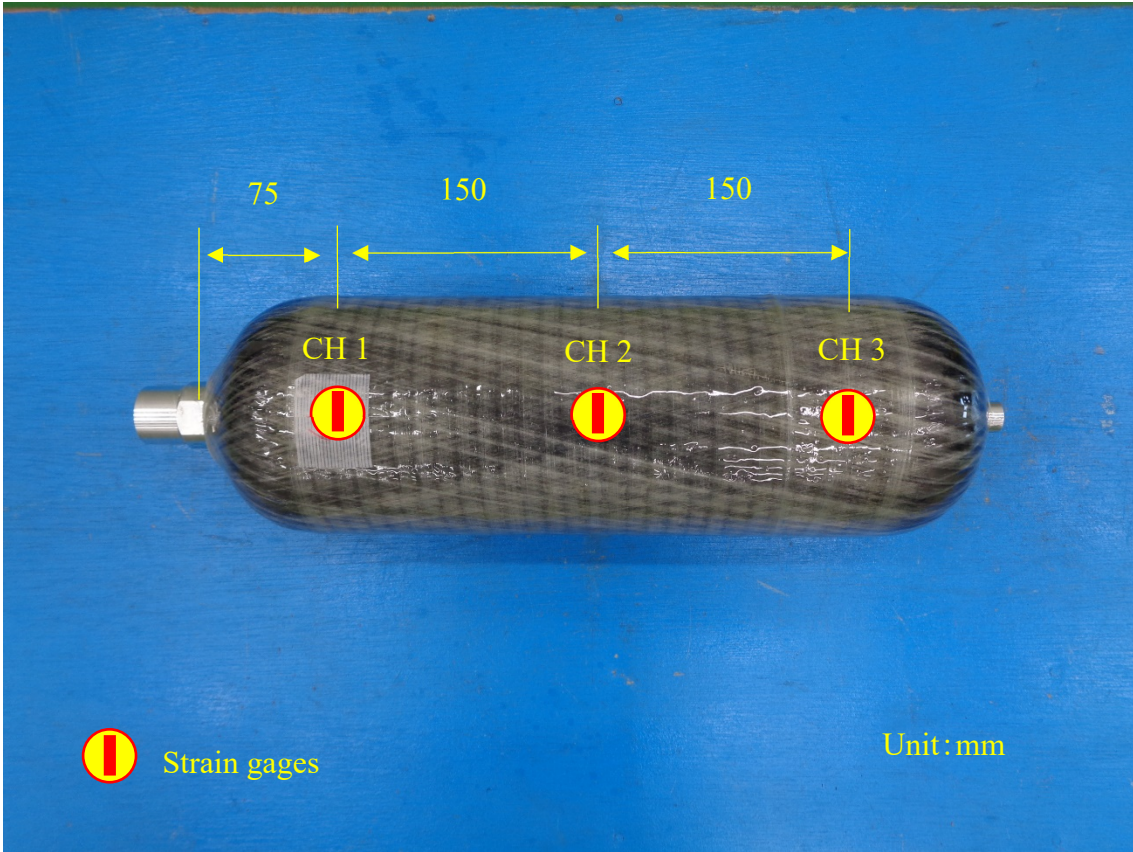


図 5.4 ひずみゲージ貼付位置

表 5.2 破裂試験の結果

Vessel Type	Weight [kg]	Burst pressure [MPa]	Burst part
Vessel-A (Type-3)	2.74	125.0	Cylindrical part
Vessel-B (Basic model)	2.16	80.0	Cylindrical part
Vessel-C (Modified model_1)	2.22	81.8	Head dome
Vessel-D (Modified model_2)	2.23	104.6	Cylindrical part
Vessel-E (Modified model_3)	2.20	109.0	Cylindrical part



図 5.5 容器 A (Type-3) の破裂後の形状



図 5.6 容器 B(Basic model)の破裂後の形状



図 5.7 容器 C (Modified model_1) の破裂後の形状



図 5.8 容器 D(Modified model_2)の破裂後の形状



図 5.9 容器 E(Modified model_3)の破裂後の形状

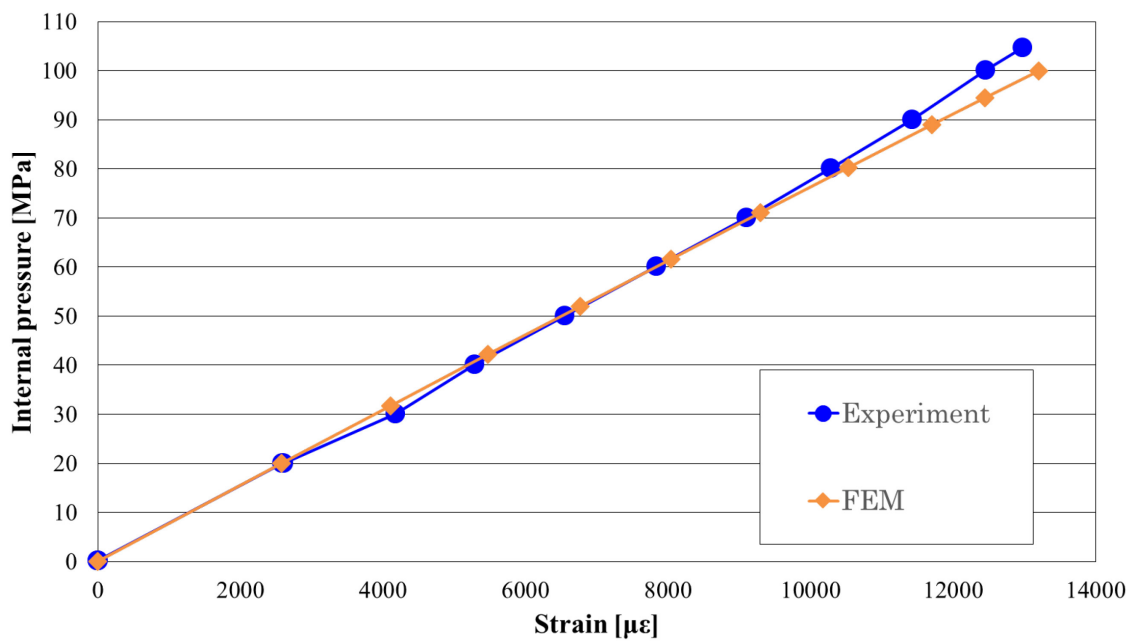


図 5.10 容器 D の周方向ひずみの実験値と FEM 解析値の比較

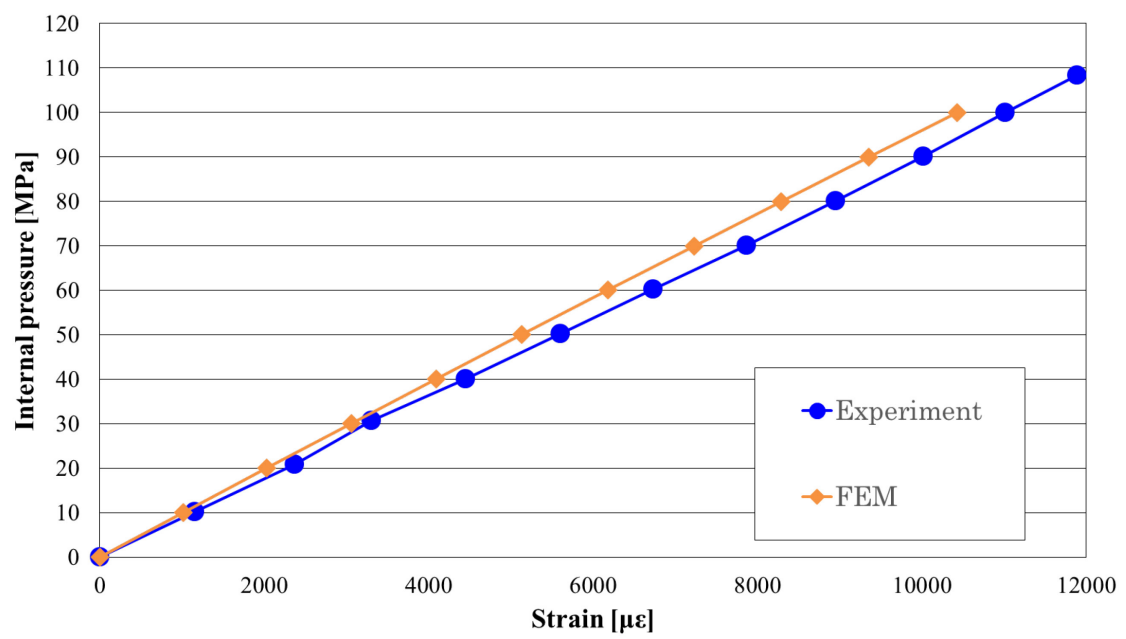


図 5.11 容器 E の周方向ひずみの実験値と FEM 解析値の比較



(a) 頭部側垂直落下



(b) 頭部側 45° 落下



(c) 底部側垂直落下

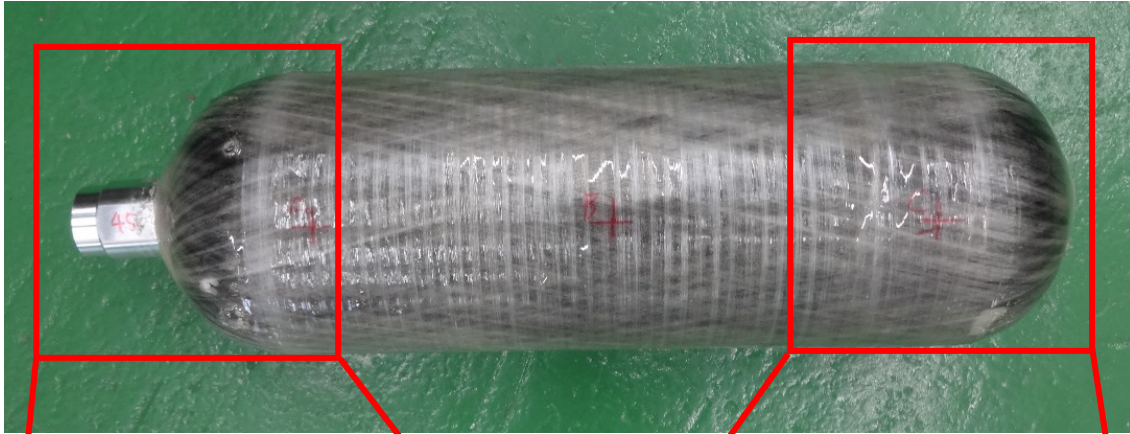


(d) 底部側 45° 落下

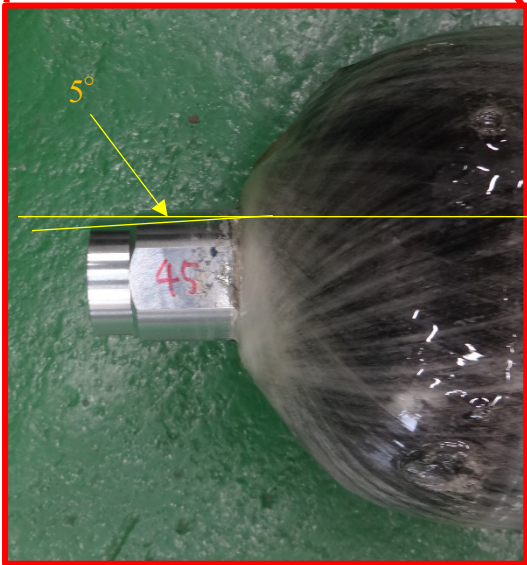


(e) 垂平方向の落下

図 5.12 容器の落下方法



(a) 容器全景

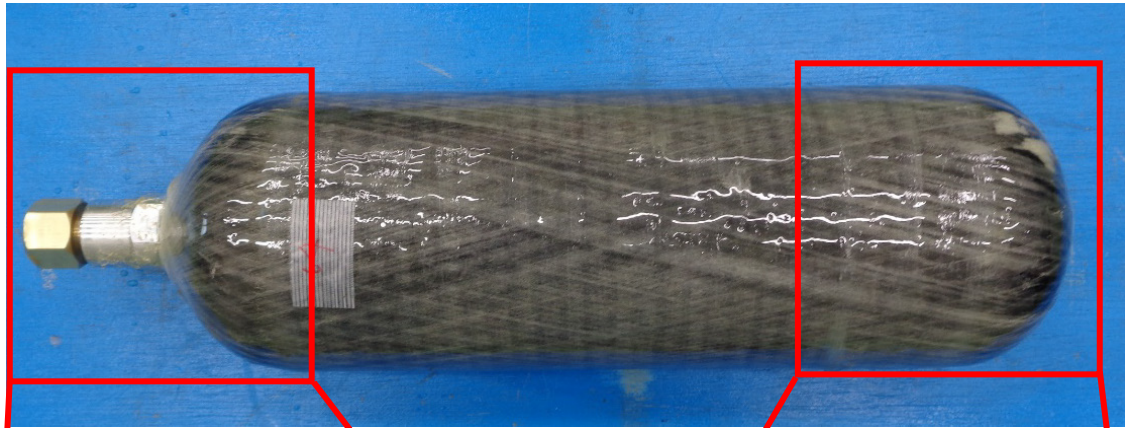


(b) 頭部側拡大



(c) 底部側拡大

図 5.13 落下後の容器 D の形状



(a) 容器全景



(b) 頭部側拡大



(c) 底部側拡大

図 5.14 落下後の容器 E の形状

表 5.3 落下後の破裂試験の結果

Vessel Type	Burst pressure [MPa] (With drop)	Burst pressure [MPa] (No drop)	Pressure difference [MPa]
D	63.0	104.6	-41.6
E	99.3	109.0	-9.7

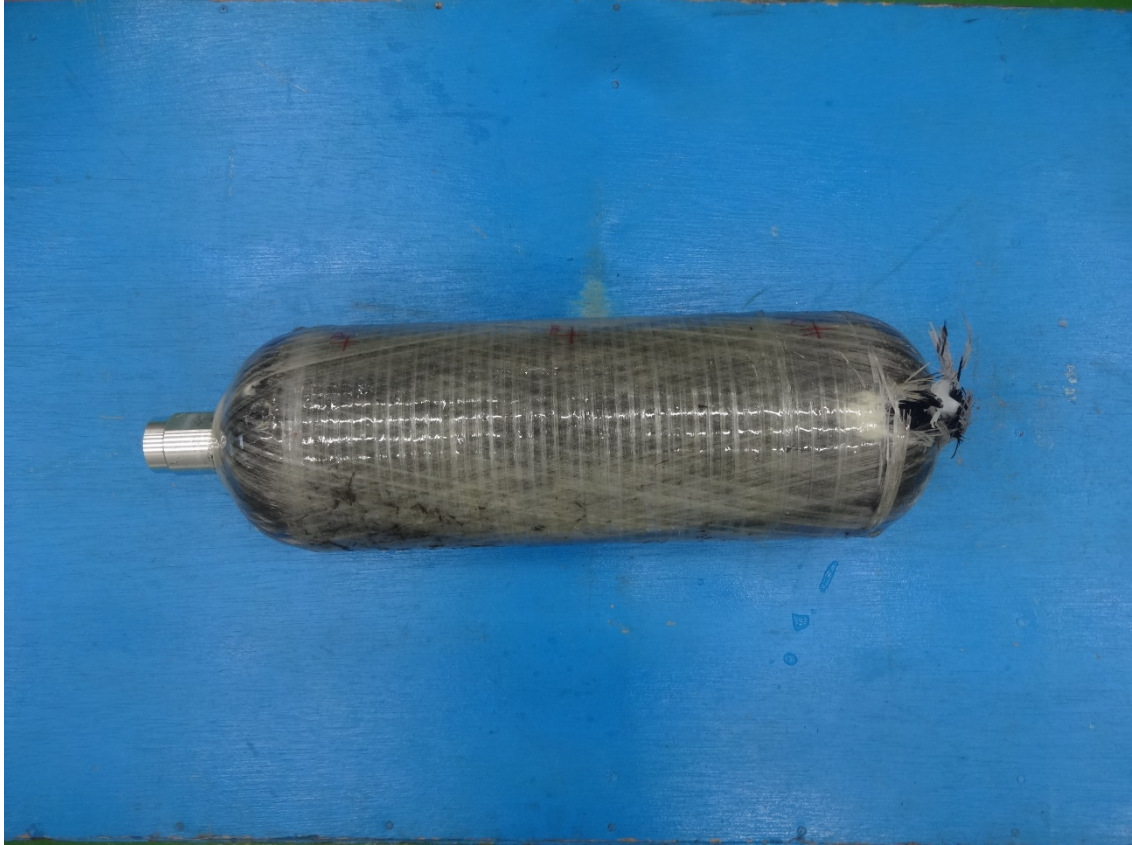


図 5.15 落下後の破裂試験実施後の容器 D の形状



図 5.16 落下後の破裂試験実施後の容器 E の形状



(a) 制御盤



(b) 増圧機

図 5.17 サイクル試験装置

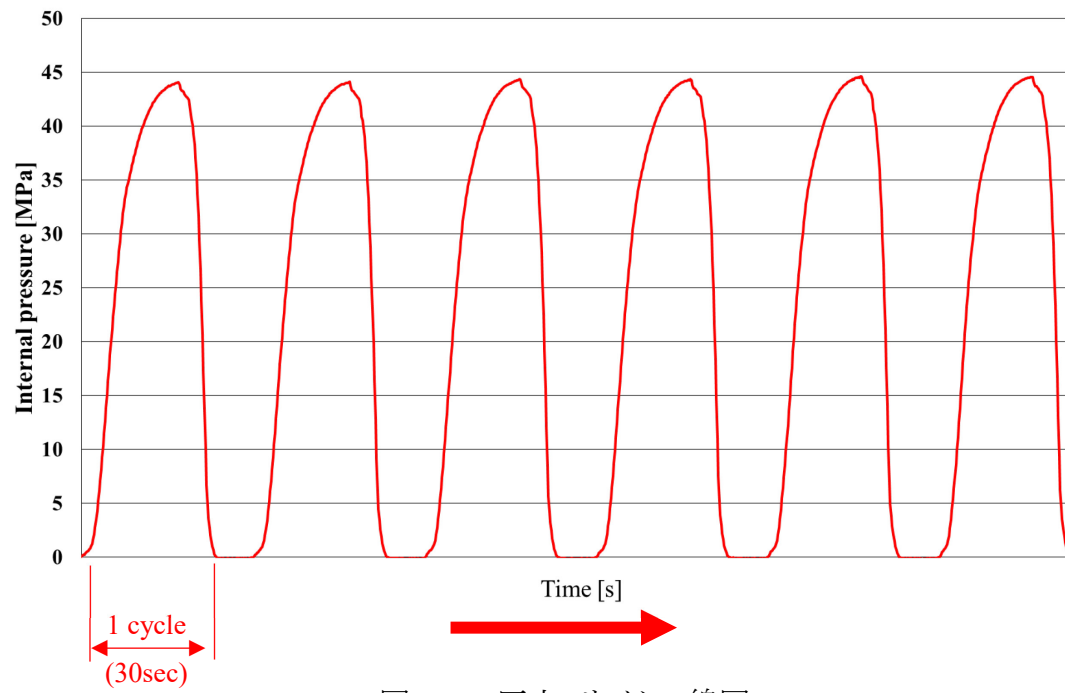


図 5.18 圧力-サイクル線図



図 5.19 サイクル試験実施中の容器



図 5.20 サイクル試験装置の圧力計(試験圧力 44.1MPa 作用時)

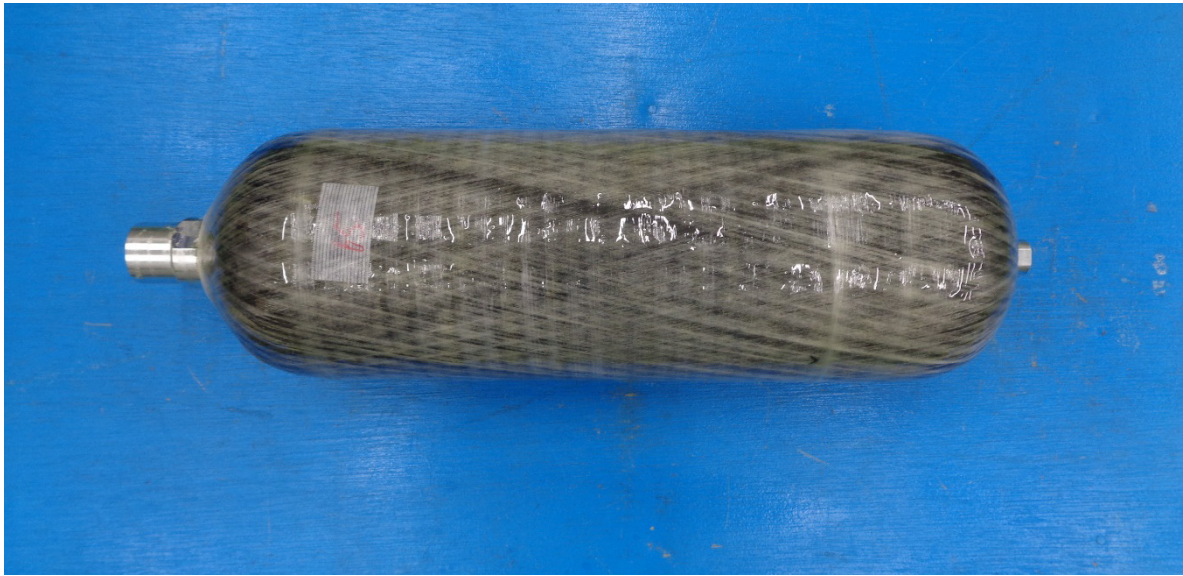


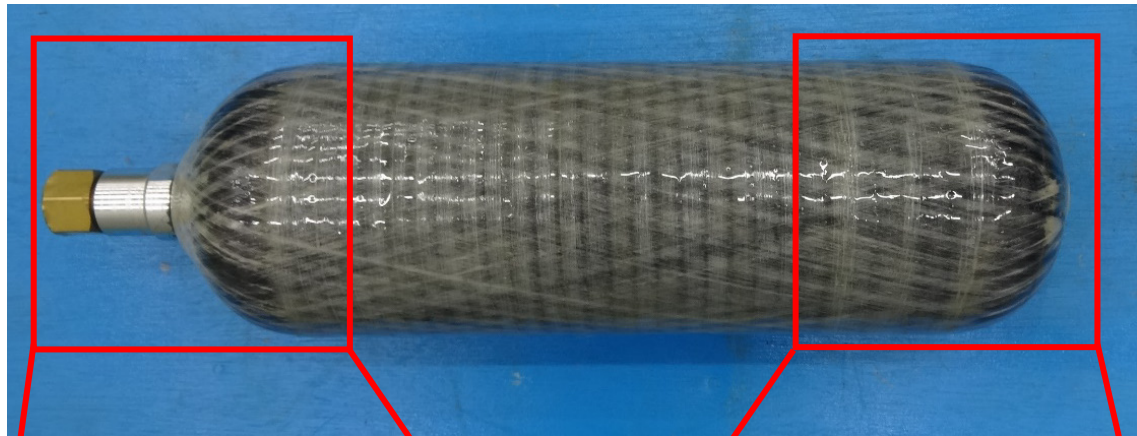
図 5.21 サイクル試験実施前の容器形状



図 5.22 サイクル試験後の容器形状



図 5.23 破裂試験後実施の容器形状



(a) 容器全景



(b) 頭部側拡大



(c) 底部側拡大

図 5.24 落下後の容器形状

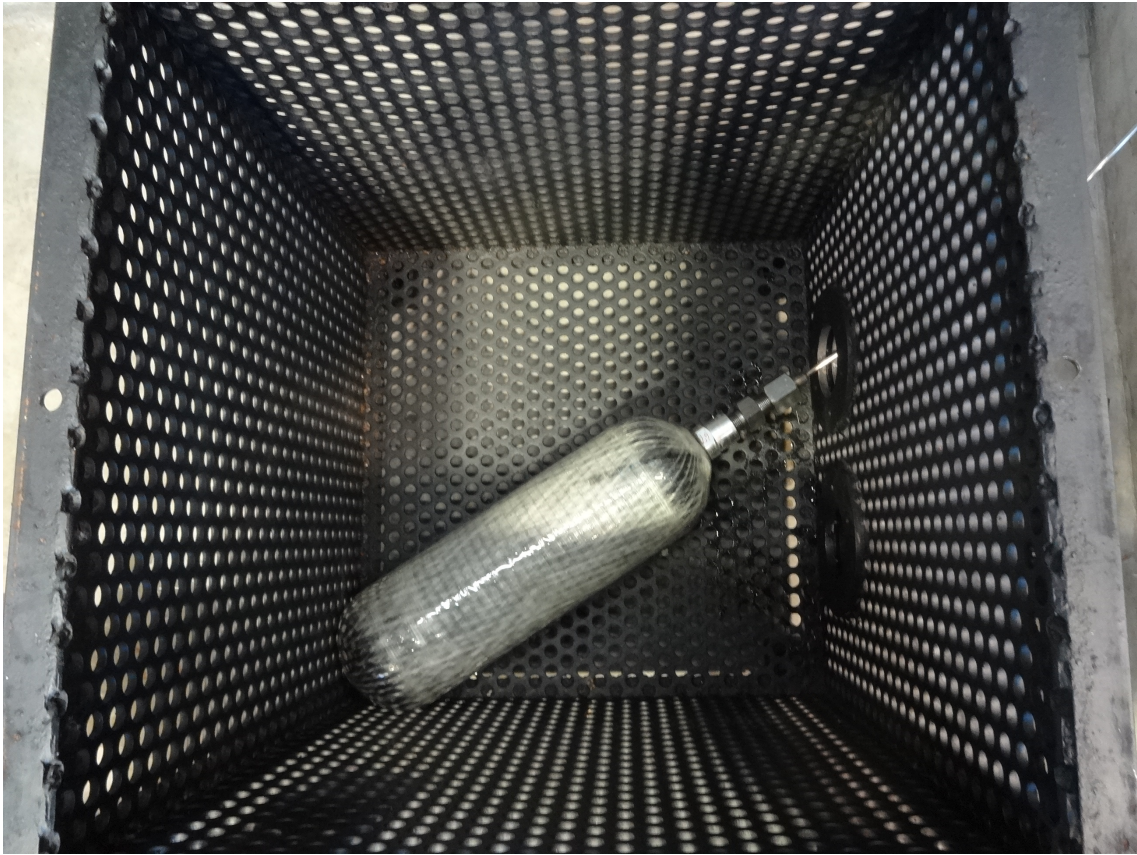


図 5.25 落下後のサイクル試験実施時の容器

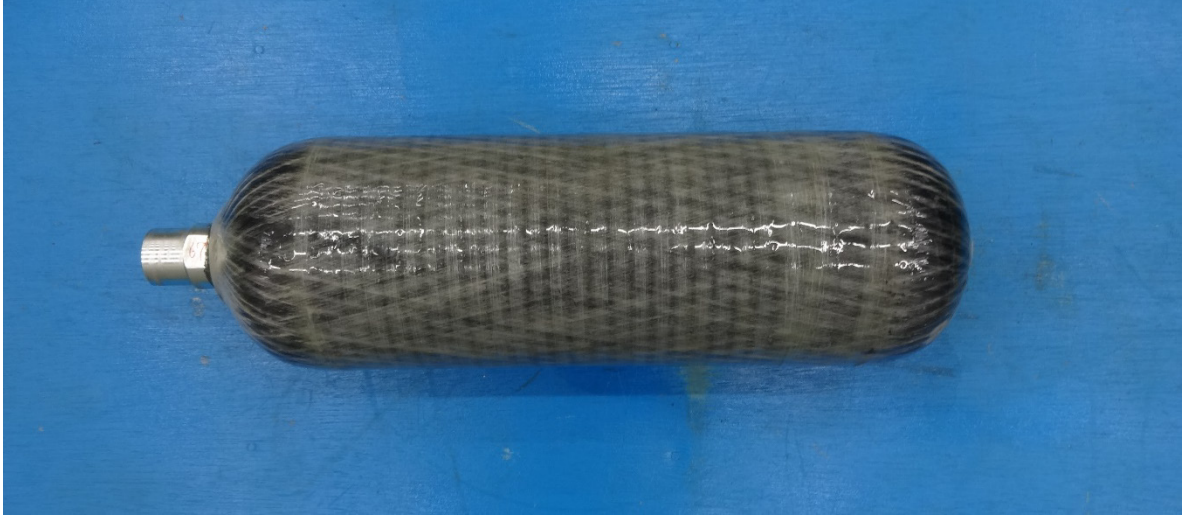


図 5.26 落下後のサイクル試験実施前の容器形状

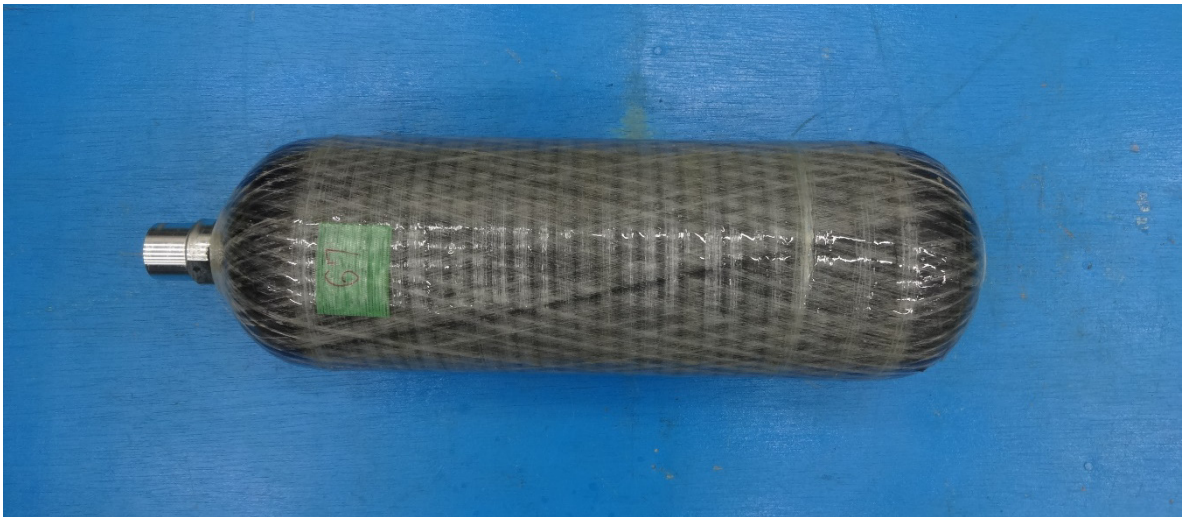


図 5.27 落下後のサイクル試験後の容器形状

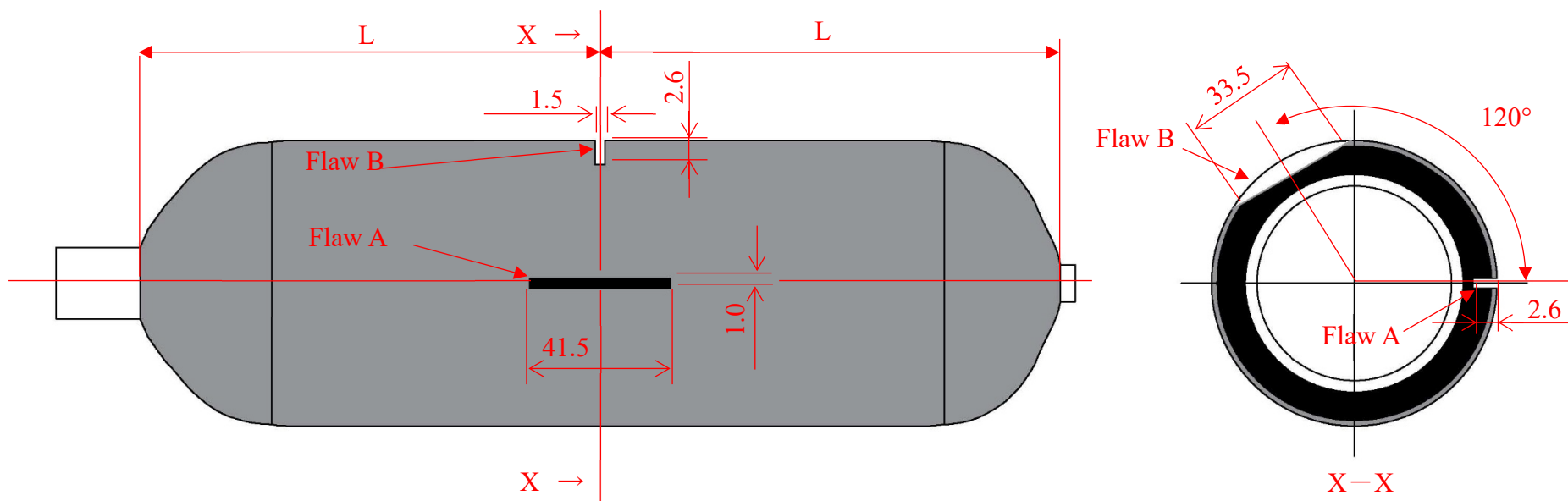
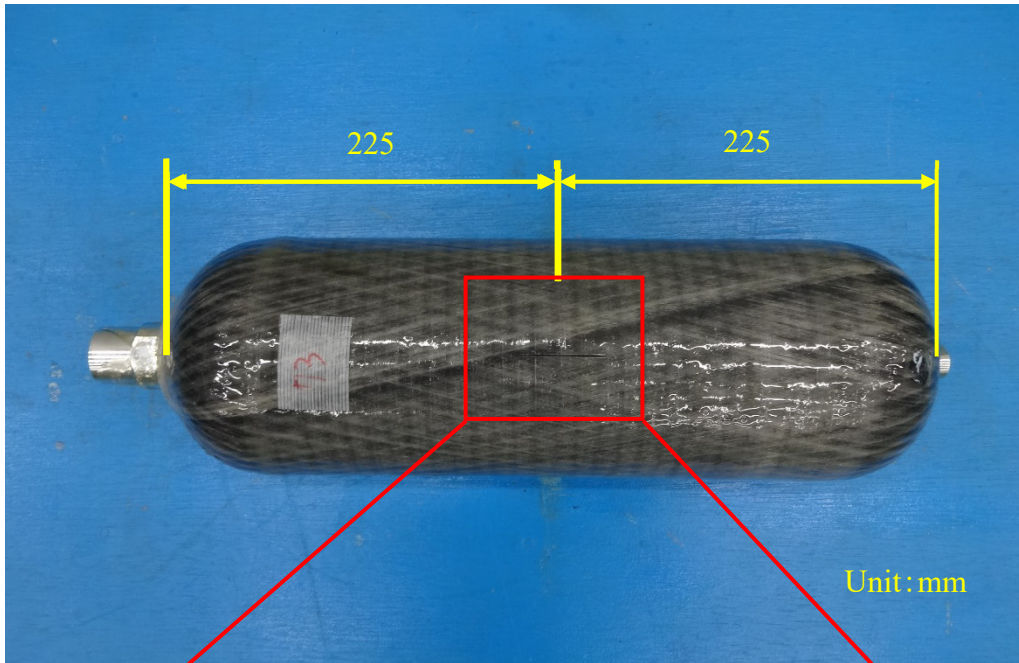
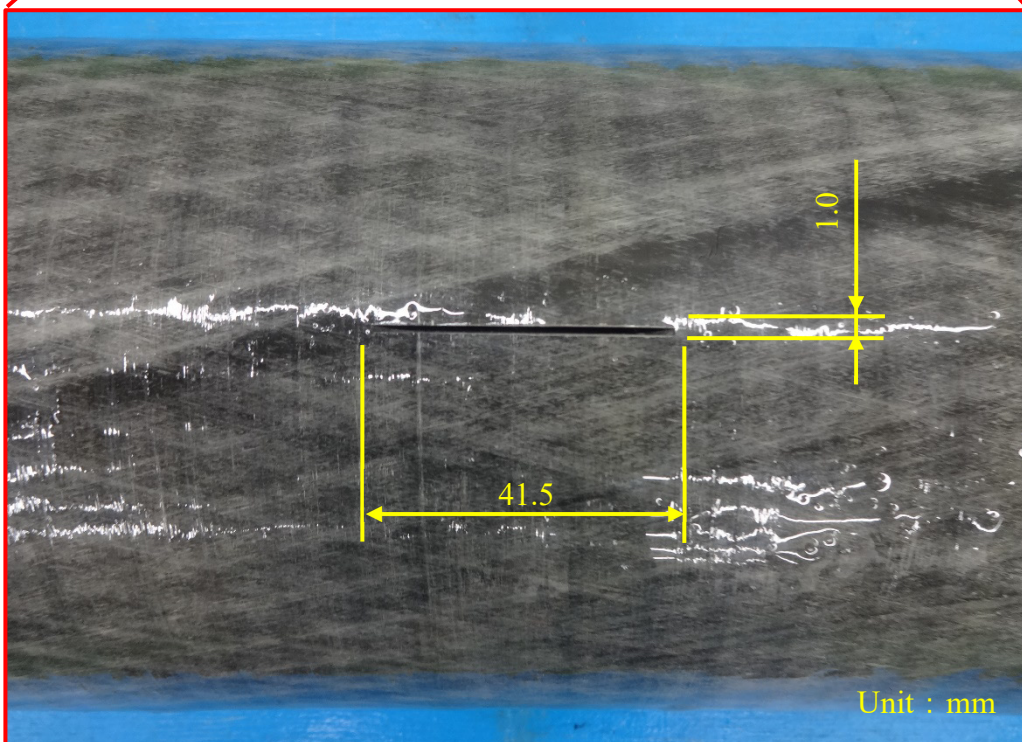


図 5.28 欠陥付加位置の概要図

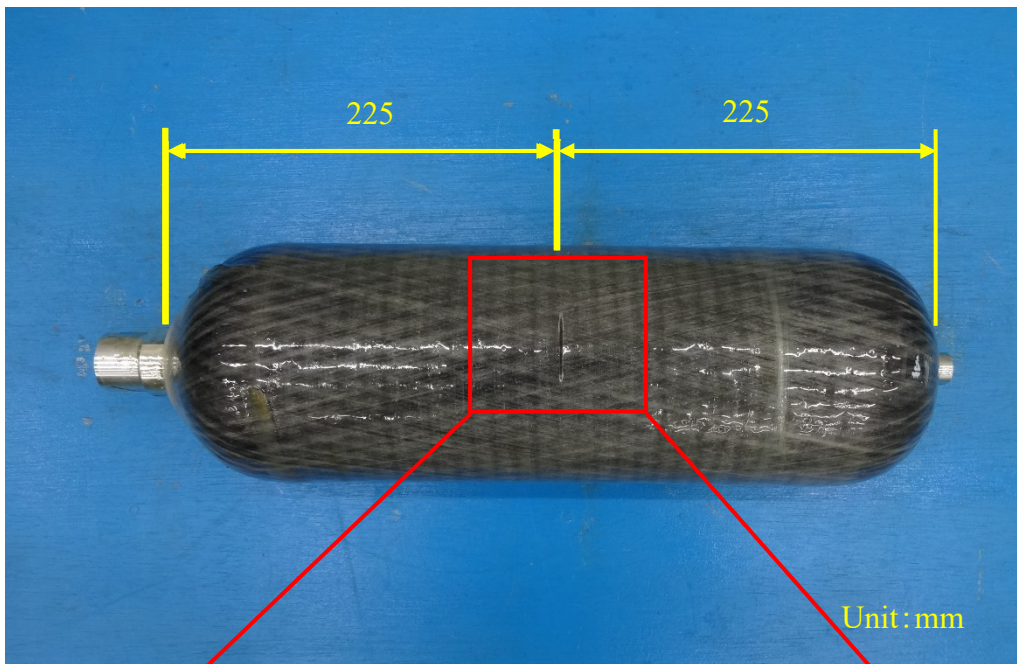


(a) 欠陥 A 付加位置

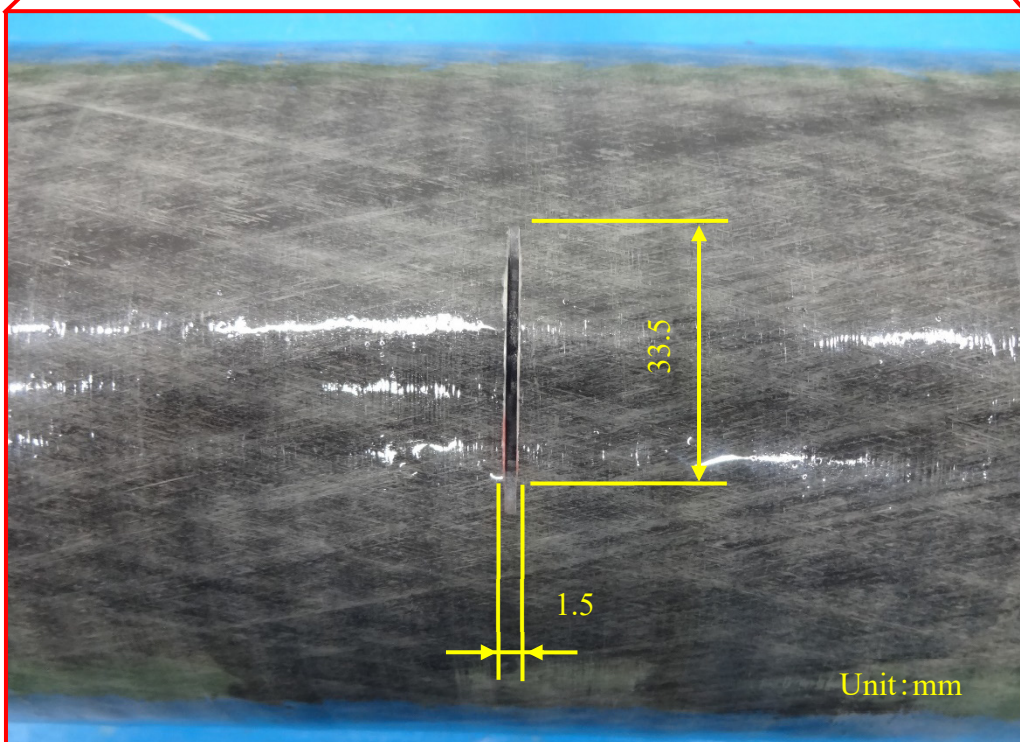


(b) 欠陥 A 部拡大

図 5.29 欠陥 A (軸方向の欠陥) の形状寸法



(a) 欠陥 B 付加位置



(b) 欠陥 B 部拡大

図 5.30 欠陥 B(周方向の欠陥)の形状寸法



図 5.31 欠陥破裂試験実施後の容器形状



図 5.32 欠陥サイクル試験実施中の容器



図 5.33 サイクル試験装置の圧力計(試験圧力 29.4MPa 作用時)

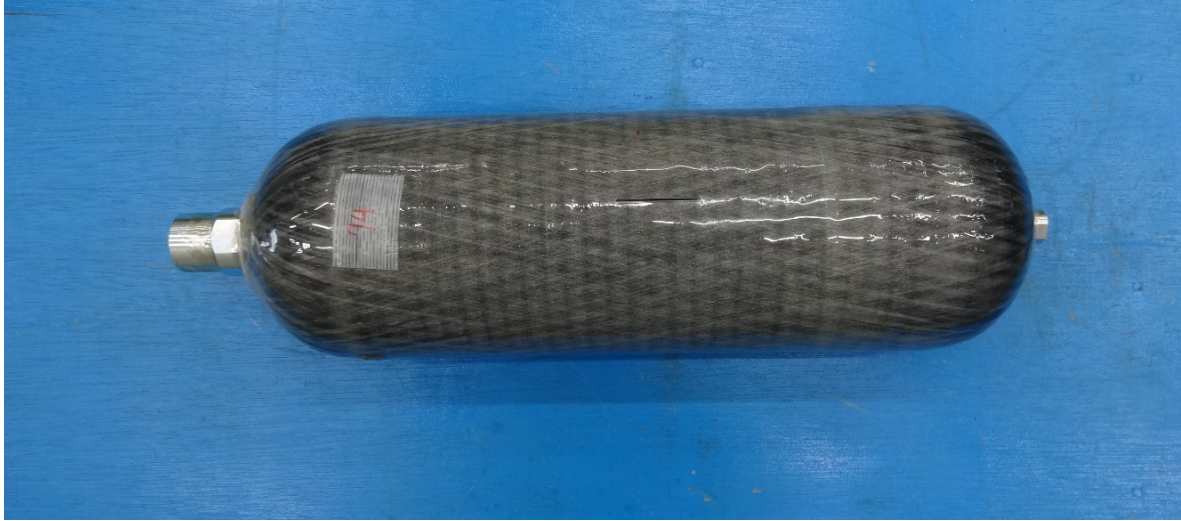


図 5.34 欠陥サイクル試験実施前の容器形状

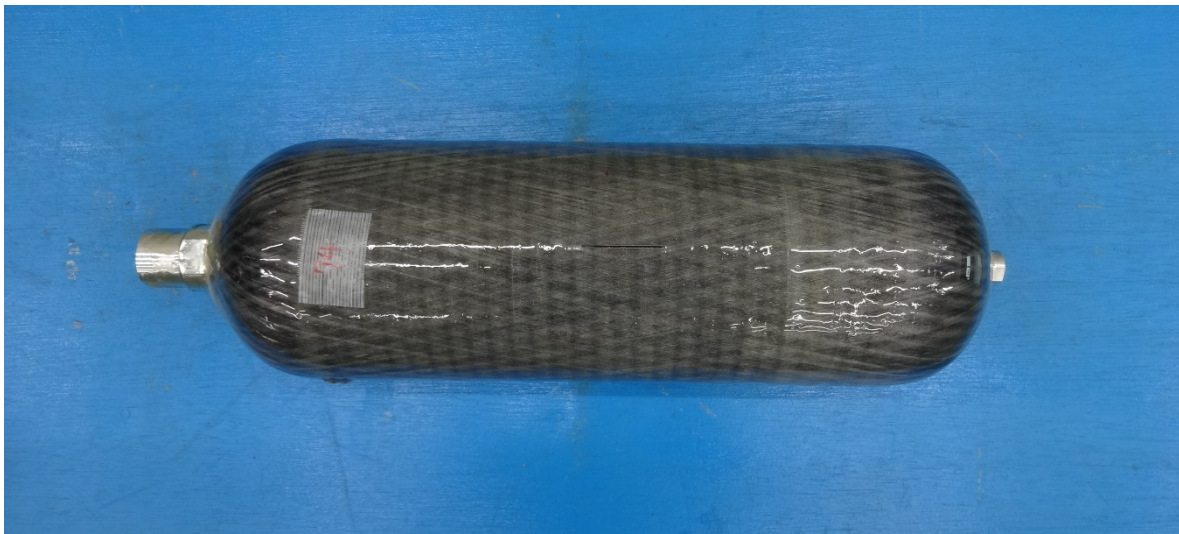


図 5.35 欠陥サイクル試験(1,000回)実施後の容器形状

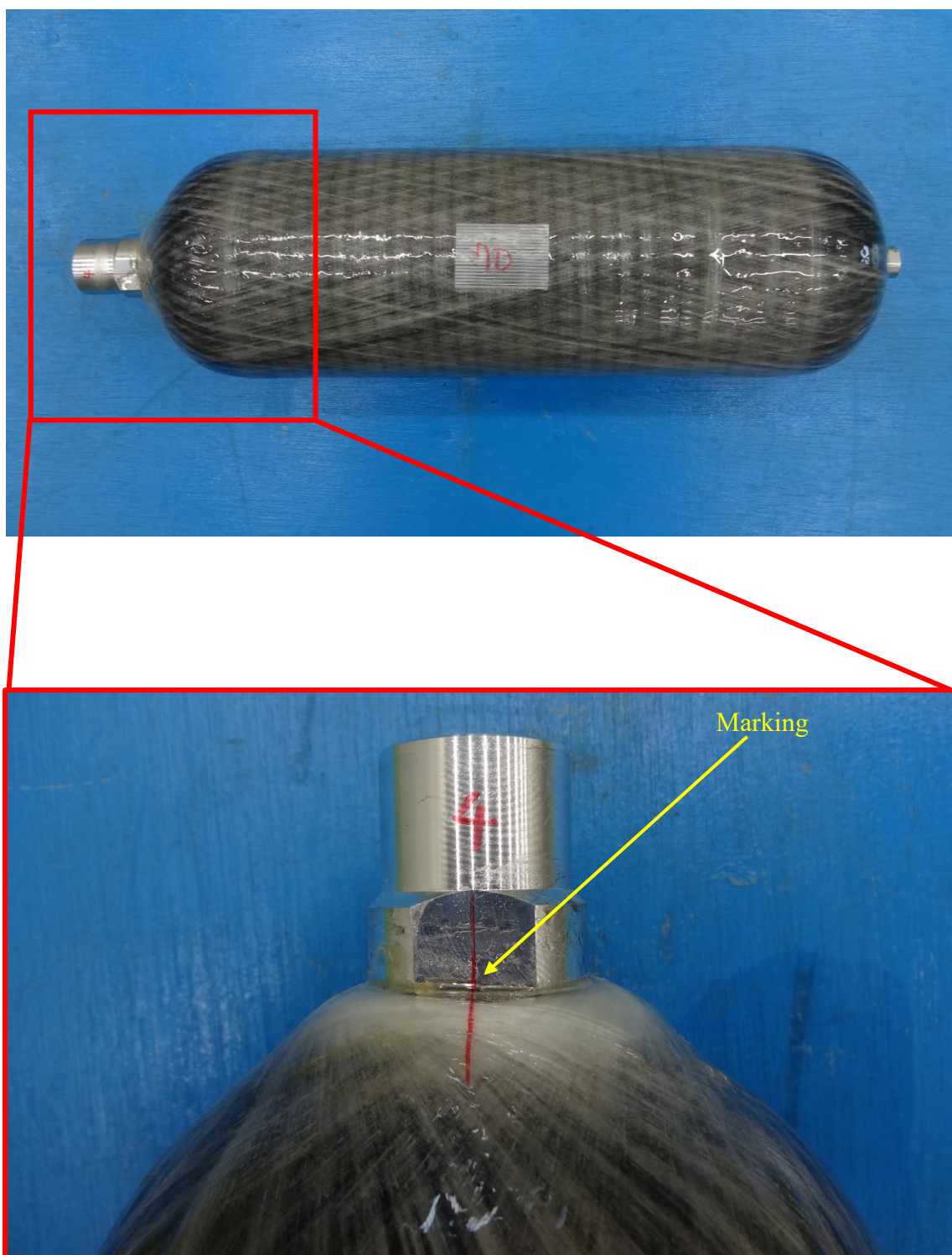


図 5.36 頭部ボス口金と GFRP 層のマーキング位置



図 5.37 ねじゲージ



図 5.38 ねじゲージによるねじ形状確認の様子



図 5.39 エアチャックによる容器の固定状況



図 5.40 トルクの負荷状況



図 5.41 トルク試験後の頭部ボス口金部

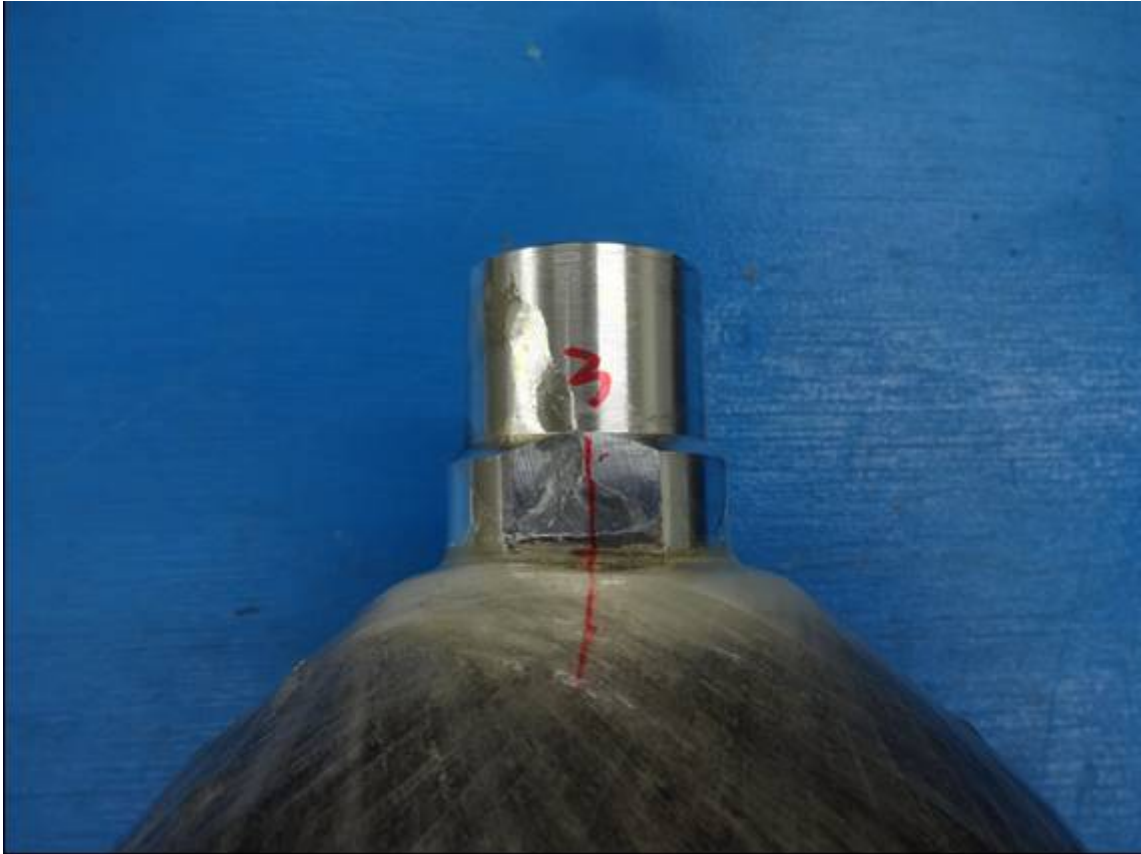


図 5.42 ボス強度試験後の頭部ボス口金部

第 6 章 結論

6.1 本研究で得た成果

本研究では、プラスチック製ライナーを用いた CFRP 圧力容器の構造設計と、強度評価に関する性能評価試験を実施した。

本論文の成果について、各章ごとに以下に述べる。

第 1 章の「序論」では、容器の種類と、FRP 圧力容器の特色と実用例について説明し、空気呼吸器用 Type-4 容器の実用化と残された課題、本研究を行った目的について述べた。

第 2 章の「Type-4 容器の基本仕様」では、内容積 4.7L 空気呼吸器用 Type-4 容器の基本設計を行った。国内には、Type-4 容器の設計規格が制定されていないので、欧州の設計規格 EN12245 を基準とし設計を行った。本研究で用いる Type-4 容器は、現在市販されている 4.7L の Type-3 空気呼吸器用容器と同等の寸法、形状、使用圧力とした。一方で、容器質量は市販品の Type-3 容器の 2.7 kg と比較し 20% 軽量な、2.2 kg を基本仕様とした。

第 3 章の「有限要素解析」では、第 2 章で設計した基本仕様をもとに、同内容積の Type-3 容器と比較し 20% の軽量化を実現しつつ、EN12245 で規定された破裂圧力を満足可能な積層条件の検討を行った。その結果、Type-4 容器は、Type-3 容器と比較し強度分担層である CRPP 層を増肉させ、さらに積層構成を変更することで基準を満足可能な強度を得られる見通しを得た。

Type-4 容器は、Type-3 容器とは逆に、1 層目に CFRP のヘリカル層、2 層目に CFRP のフープ層、3 層目に CFRP のヘリカル層を積層し、2 増目のフープ層は境界部を増肉するように積層することで、破裂圧力を満足できる見通しを得た。一方で、CFRP 層に高角度ヘリカル層を組み込み、フープ層とヘリカル層の板厚を調整することで、更なる強度向上が期待できることが確認できた。

第 4 章の「空気呼吸器用 Type-4 容器の FW 成形」では、プラスチックライナーを用いた FW 成形を行い、Type-4 容器の適切な成形条件の検討を行った。

プラスチックライナーは材料強度が低いため、FW 成形の際は、頭部と、底部の両方をマシンの軸で固定する。さらにライナー内面に 0.2MPa の空気圧を加圧し、繊維張力によるライナーの変形を抑止することで寸法通りの容器が成形可能となる。さらに、プラスチックライナーは、金属製のライナーと異なり、耐熱温度が低いため、100℃以下で硬化可能な樹脂を選定し、100℃以下の温度で硬化させることで、成形することが可能である。本研究では、85℃で 4 時間硬化させた。

第 5 章の「Type-4 容器の性能評価試験」では、Type-4 容器の性能評価試験を実施した。

破裂試験の結果、CFRP 層を増肉し、適切な積層構成で FW 成形することで、軽量化を実現しつつ、空気呼吸用容器の基準を満足できる破裂圧力を実現できることが確認できた。

落下後の破裂試験の結果、Type-4 容器は衝撃が作用すると境界部付近の破裂圧力が低下するので、高角度ヘリカル層を積層し、境界部や落下衝撃作用部を補強することが必要である。

さらに、これら 2 つの破裂試験の結果から、Type-4 容器の設計破裂圧力は、合格基準値である最小破裂圧力と併せて、衝撃が

作用することで低下する圧力を想定した，設計破裂圧力を設定する必要がある。

サイクル試験及び，落下後のサイクル試験の結果，本研究で設計した Type-4 容器は基準を満足する疲労寿命を有していることが確認できた。

欠陥試験の結果から，FRP 層に欠陥が生じた場合でも破裂圧力や疲労寿命が低下しないことが確認できた。なお，落下試験の結果から，Type-4 容器は，FRP 層に生じる欠陥よりも，強い衝撃が作用することで，性能の低下が生じると考えられる。

頭部ボス口金部の強度試験の結果，ねじ部の破損やボス部の変形は確認されず，本研究で設計した Type-4 容器の頭部ボス部は十分な強度を有していることが確認できた。

本研究で，Type-4 空気呼吸器用容器の性能評価試験を実施した結果，強度設計に関する仕様は満足していることが確認できた。

6.2 今後の課題

EN12245 には，本研究で実施した強度設計に関する試験と併せて，火炎暴露試験や，高温試験等の環境に関する試験や，ライナーの透過性の試験等が規定されている。なお，それらの試験に関連し，Type-4 容器の難燃性や耐熱性が今後の技術課題になると考えられるが，空気呼吸用 Type-4 容器の実用化のためには，全ての試験基準を満たす必要があるため，今後試験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会, 基礎からわかる FRP:繊維強化プラスチックの基礎から実用まで, (2016).
- 2) 福田博, 邊 吾一, 複合材料の力学序説, 1988, 古今書院, pp.2.
- 3) 高久明, 多田尚, 複合材料を作る, 1995, 共立出版, pp.112.
- 4) 東條千太, 軽金属, 67 巻, 7 号, (2017), pp.301-306.
- 5) 竹花立美, 強化プラスチック, 51 巻, 6 号, (2005), pp.262-268
- 6) Darms.F.J., COMPUTER PROGRAM FOR THE ANALYSIS OF FILAMENT-REINFORCED METAL-SHELL PRESSURE VESSELS, NASA CR-72124, 1966, pp1.
- 7) Code of Federal Regulation 49 178.37 Specification 3AA.
- 8) 川原正言, FRP 容器製作のためのフィラメントワインディング技術, 圧力技術, 35 巻, 1 号 (1997), pp.21.
- 9) 竹花立美, FRP 複合容器の設計と安全性評価に関する研究, 東京都立大学, (2000), 博士論文.
- 10) NEDO 燃料電池・水素技術開発部, 平成 21 年度成果報告書 水素技術分野の技術開発ロードマップ改訂に関する調査, (2009).
- 11) NEDO 次世代電池・水素部, 平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書 水素利用技術研究開発事業 燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化、国際基準調和・国際標準化に関する研究開発 複合圧力容器蓄圧器の基準整備等に関する研究開発, (2018).
- 12) 高压ガス保安法容器保安規則例示基準, 70MPa 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 KHKS0128(2010).
- 13) Toshihiko Yoshida, Koichi Kojima, Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society, INTERFACE, 24, 2, Summer 2015, pp45-49.
- 14) トヨタ自動車株式会社 H.P. <https://toyota.jp/mirai/performance/>

- 15) 植村益次, FW 圧力容器の最適設計, 材料システム, 3 巻, (1984), pp.107.
- 16) 後藤卒土民, わかりやすい実践 FRP 成形, 工業調査会 (1998), pp.67-68.
- 17) 竹花立美, FRP 複合容器についての設計解析—第 3 報: FRP 複合容器の積層構成が破裂強度に与える影響—, 圧力技術, 38 巻, 1 号 (2000), pp.33-43.
- 18) D.Cohen, Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength, Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, Volume 28, Issue 12 (1997), pp.1035-1047.
- 19) David Cohen, Susan C. Mantell, Liyang Zhao, The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength, Composites Part B : Engineering, Volume 32, Issue 5 (2001), pp.413-429.
- 20) 山脇弘一, 植村益次, ヘリカル巻き FW 円筒の破壊強度 (Ⅲ内圧強度), 材料, 21 巻, 223 号 (1972), pp.337-342.
- 21) Hisao Fukunaga and Masuji Uemura, Optimum design of helically wound composite pressure vessels, Composite Structure, Volume 1 (1983), pp.31-49.
- 22) Cho-Chung Liang, Hung-Wen Chen, Cheng-Huan Wang, Optimum design of dome contour for filament-wound composite pressure vessels based on a shape factor, Composite Structure, Volume 58 (2002), pp.469-482.
- 23) 竹花立美, FRP 複合容器についての設計解析—容器肩部の周巻き端位置とバースト圧力, 圧力技術, 35 巻, 2 号, (1997), pp.51-57.
- 24) 竹花立美, FRP 複合容器についての設計解析—第 2 報: 容器のひずみ分布と安全性に及ぼすフープ巻き端部位置の影響—, 圧力技術, 37 巻, 5 号, (1999), pp. 299-306.

- 25) P.Xu, J.Y. Zheng, P.F. Liu, Finite element analysis of burst pressure composite hydrogen storage vessels, *Materials and Design*, Volume 30 (2009), pp.2295-2301.
- 26) 福田博, 邊 吾一, 複合材料の力学序説, (1988), 古今書院, pp.199-201.
- 27) Cheol-Ung Kim, Ji-Ho Kang, Chang-Sun Hong, Chun-Gon Kim, Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm, *Composite Structures*, Volume 67, Issue 4, (2005), pp.443-452.
- 28) Cheol-Ung Kim, Chang-Sun Hong, Chun-Gon Kim, Jung-Yub Kim, Optimal design of filament wound type 3 tanks under internal pressure using a modified genetic algorithm, *Composite Structures*, Volume 71, Issue 1, (2005), pp.16-25.
- 29) Pengfei Liu, Ping Xu, Jiyang Zheng, Artificial immune system for optimal design of composite hydrogen storage vessel, *Computational Materials Science*, Volume 47, Issue 1, (2009), pp.261-267.
- 30) Ping Xu, Jinyang Zheng, Honggang Chen, Pengfei Liu, Optimal design of high pressure hydrogen storage vessel using an adaptive genetic algorithm, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 7, (2010), pp.2840-2846.
- 31) 倉田大樹, 荒居善雄, 荒木稚子, 飯島孝文, 黒澤彬元, 大淵智之, 佐々木教行, 日本機械学会 ,日本機械学会 M&M2015 講演論文集, (2015), PS0026-392.
- 32) 本田 健祐, 荒居 善雄, 荒木 稚子, 飯島 孝文, 大淵 智之, 佐々木教行, 黒澤 彬元. FW-CFRP/Al 複合圧力容器の破裂圧力に及ぼす大気中高温曝露の影響, 日本機械学会 2017 年度年次大会, (2017), G0300803.
- 33) 不破勝, 植松武文, 香川和彦, 圧力技術, 35 卷, 3 号, (1997), pp.19-27.

- 34) Norman L. Newhouse, 綱島隆之, 圧力技術, 39 巻, 1 号, (2001), pp.31-41.
- 35) 高野俊夫, 日本 AEM 学会誌, 14, 3, (2006), pp292-297 .
- 36) 富岡純一, 山崎義男, 渡辺正五, 自動車研究, 29 巻, 7 号, (2007), pp. 283-290.
- 37) 富岡純一, 山崎義男, 木口和博, 田村陽介, 三石洋之, 渡辺正五, 自動車研究, 30 巻, 6 号, (2008), pp.217-274.
- 38) 富岡純一, 増田竣亮, 田村浩明, 田村陽介, 自動車技術会論文集, 49, 2, (2018), pp. 296-300.
- 39) トヨタ自動車株式会社, 圧力容器のライナーの製造方法, 特許番号 6475077, 公開日 2016 年 12 月 22 日.
- 40) 堂前洋夫, 圧力技術, 35 巻, 1 号, (1997), pp. 25-32.
- 41) BS EN 12245 : 2009+A1 : 2011_Transportable gas cylinders Fully wrapped composite cylinders.
- 42) International Standardization Organization Standard, SO11119-4.
- 43) 高圧ガス保安法容器保安規則例示基準, 一般複合容器の技術基準 KHKS0121(2016).
- 44) 金澤 聡, 保科 孝治, 大曾根 一行, 成型加工, 6巻, 11号 (1994), pp.730-734.
- 45) 白石 雅夫, 日本ゴム協会誌, 59巻, 4号, (1986), pp. 216-222.
- 46) 五十嵐敏郎, 日本ゴム協会誌, 87巻, 8号, (2014), pp. 337-343.
- 47) 植村益次, FRP圧力容器の力学と最近の開発動向, 日本複合材料学会誌, 13巻, 1号 (1987), pp.10-20.
- 48) 黒澤彬元, 平山紀夫, プラスチックライナーを用いた CFRP 複合容器の応力解析, 第 9 回日本複合材料会議(JCCM-9), (2018), 3D-03.
- 49) 黒澤彬元, 平山紀夫, 坂田憲泰, 伊藤滉平, 飯島孝文, 鈴木弘, プラスチック製ライナーを用いた CFRP 複合容器の構造設計と破裂試験, 強化プラスチック, VOL.65, No.8, (2019), pp. 339-346.

- 50) ANSYS, Inc. ANSYS® ver. 18.2. Help System Mechanical APDL 材料リファレンス.
- 51) Z.Hashin, Analysis of “Composite Materials”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, (1983), pp.481-505.
- 52) ANSYS, Inc. ANSYS® ver. 18.2. Help System Mechanical APDL エレメントリファレンス.
- 53) 邊吾一, 石川隆司, 先進複合材料工学, 培風館 (2006) , pp.35-36.
- 54) 黒澤彬元, 平山紀夫, 坂田憲泰, 飯島孝文, 鈴木 弘, プラスチックライナーを用いた CFRP 複合容器の開発と破裂試験, 2019 年度春季大会研究発表講演会講演論文集, (2019), pp.143-144.
- 55) 黒澤彬元, 平山紀夫, 坂田憲泰, 飯島孝文, 鈴木 弘, 高角度ヘリカル層による Type4 CFRP 容器の高強度化に関する研究, プラスチック成形加工学会第 27 回秋季大会(成形加工シンポジア'19)論文集, (2019), pp.101-102.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始熱心なご指導を頂いた日本大学教授の平山紀夫先生に深くお礼申し上げます。先生には本研究に取り組むにあたっての心構えや、姿勢をご教示頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

また、本論文を審査して頂き、数々のご助言、ご指導を賜りました日本大学教授 高橋進先生、安藤努先生に深く感謝致します。

そして、研究を進める上で数々のご助言を賜りました坂田憲泰先生に心からお礼を申し上げます。

本実験にご協力頂いた、鈴木弘部長、飯島孝文部長をはじめ、株式会社旭製作所の皆様に感謝致します。

元日本大学生産工学部機械工学科の伊藤 滉平氏にはFEM解析のモデルの構築に際し、有益な議論をさせて頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

日本大学生産工学部機械工学科平山研究室の皆さんに心から感謝致します。