

書面投票用

KHKS



圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器 に関する基準（案）

KHKS 0225（2024）

令和6年 月 日 改正

特別民間法人高圧ガス保安協会

2024

目次

1	適用範囲	1
2	引用規格	1
3	用語及び定義	2
4	材料	4
4.1	金属ライナー	4
4.2	樹脂含浸炭素繊維層	4
4.3	保護層及び防食層	4
4.4	その他の部分	5
4.5	材料仕様書の記載事項	5
4.5.1	一般事項	5
4.5.2	樹脂含浸炭素繊維層	5
4.5.3	保護層及び防食層	6
5	設計	6
5.1	一般	6
5.1.1	設計の基本事項	6
5.1.2	設計仕様書等の記載事項	6
5.2	応力解析	7
5.2.1	一般事項	7
5.2.2	公式による厚さの設定	7
5.2.3	応力解析の手順	7
5.2.4	判定基準	7
5.3	破裂前漏洩解析	8
5.4	疲労寿命解析及び亀裂進展解析	9
5.4.1	一般事項	9
5.4.2	疲労寿命解析	9
5.4.3	亀裂進展解析	10
5.5	複数の圧力サイクルがある場合	11
5.6	設計確認試験	11
5.6.1	設計確認試験の基本事項	11
5.6.2	破裂試験	11
5.6.3	圧力サイクル試験	12
5.7	材料の許容引張応力	13
5.7.1	金属ライナー材料の許容引張応力	13
5.7.2	樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維の許容引張応力	13
5.8	材料の縦弾性係数及び線膨張係数	13
5.8.1	金属ライナー材料の縦弾性係数及び線膨張係数	13

5.8.2	樹脂含浸炭素繊維層の縦弾性係数	13
6	加工	13
6.1	材料の切断	13
6.2	金属ライナーの成形	14
6.3	金属ライナーの成形後の熱処理	14
6.4	金属ライナーの機械試験	14
6.4.1	一般	14
6.4.2	常温における引張試験	14
6.4.3	設計温度における引張試験	15
6.5	金属ライナーの口金部のねじ加工	15
6.6	金属ライナーの電位差腐食防止措置	15
6.7	ワインディング	15
6.8	樹脂の熱硬化処理	15
6.9	自緊処理	16
7	構造	16
8	検査	16
8.1	設計の検査の方法	16
8.2	材料の検査	16
8.2.1	材料の外観	16
8.2.2	材料の検査の方法	16
8.3	加工の検査	16
8.3.1	金属ライナーの加工の検査	16
8.3.2	複合圧力容器の加工の検査	17
8.3.3	加工の検査の方法	17
8.4	構造の検査	18
8.4.1	胴の真円度	18
8.4.2	耐圧試験	18
8.4.3	気密試験	18
8.4.4	構造の検査の方法	19
附属書 A (規定)	複合圧力容器の胴部に対象を限定しない場合の圧力サイクル試験	20
附属書 B (規定)	複合圧力容器の金属ライナー口金のねじ部の解析	21
附属書 C (規定)	複合圧力容器の公式による厚さの設定方法	22
附属書 D (規定)	複合圧力容器の自緊処理の効果の評価方法	40
附属書 E (規定)	複合圧力容器の疲労損傷度の算出方法	46
附属書 F (規定)	アルミニウム合金 A6061-T6 の最適疲労曲線と最適亀裂進展速度曲線	49
解説		

圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準

1 適用範囲

この規格は、特定設備検査規則の適用を受ける複合構造を有する圧力容器（以下「複合圧力容器」という。）において、金属ライナーに樹脂含浸連続炭素繊維を巻き付けたフルラップ構造を有する圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器の材料、設計、加工、構造及び検査について規定する。

この規格は、次の a)～d) の適用範囲を満足する複合圧力容器に適用する。

- a) 内容積が 500L 以下である。
- b) 設計圧力及び常用の圧力が 105MPa 以下（負圧を除く。）である。
- c) 設計温度及び常用の温度が－40℃以上 85℃以下である。
- d) 最大使用期間は 20 年以下である。

2 引用規格

次に掲げる引用規格は、この基準に引用されることによって、その一部又は全部がこの基準の要求事項を構成している。これらの引用規格は、記載の年の版を適用し、その後の改正版（追補を含む。）は適用しない。

JIS B 0190: 2010 圧力容器の構造に関する共通用語

JIS B 8266: 2006 圧力容器の構造－特定規格

JIS H 0001: 1998 アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金－質別記号

JIS H 4000: 2022 アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条

JIS H 4040: 2023 アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線

JIS H 4080: 2023 アルミニウム及びアルミニウム合金継目無管

JIS H 4140: 1988 アルミニウム及びアルミニウム合金鍛造品

JIS K 7010: 1995 繊維強化プラスチック用語

JIS K 7095: 2012 炭素繊維強化プラスチックの熱分析によるガラス転移温度測定法

JIS K 7121: 2012 プラスチックの転移温度測定方法

JIS L 0204-2: 2020 繊維用語（原料部門）－第 2 部：化学繊維

JIS R 3410: 2022 ガラス繊維用語

JIS R 7608: 2007 炭素繊維－樹脂含浸ヤーン試料を用いた引張特性試験方法

JIS Z 2343-1: 2017 非破壊試験－浸透探傷試験－第 1 部：

一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の分類

ASTM D4018: 2023 Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows

ASTM E466: 1996 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials

ASTM E647: 2008 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates

HPIS E 103: 2018 Standard Test Method for Humid Gas Stress Corrosion Cracking of Aluminium Alloys for Compressed Hydrogen Containers

KHKS 0220: 2020 超高压ガス設備に関する基準

KHKS 1222: 2021 ねじ構造の強度設計指針

特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈

一般高压ガス保安規則の機能性基準の運用について 別添 一般高压ガス保安規則関係例示基準

3 用語及び定義

この規格で用いる主な用語及び定義は、次によるほか、**JIS B 0190** による。

3.1

耐圧部分

複合压力容器のうち、内面に圧力 0 Pa を超える圧力を保持する部分及び圧力によって生じる荷重を保持する部分。ただし、次の **a)** 及び **b)** を除く。

a) 圧力の保持の目的に直接供されない部分

b) 耐圧部分に施すライニング、メッキ等の強度部材以外の部分（保護層及び防食層を含む。）

3.2

設計温度

複合压力容器を使用することができる最高の温度及び最低の温度〔低温（0℃未満をいう。）で使用する場合に限る。〕として、設備の運転時、停止時、異常時、環境温度等を考慮して設定する温度

3.3

常用の温度

複合压力容器が通常使用される状態での最高の温度及び最低の温度

3.4

設計圧力

複合压力容器を使用することができる最高の圧力（最小破裂圧力の 1/2 以下の圧力）

3.5

常用の圧力

複合压力容器が通常使用される状態での最高の圧力

3.6

圧力サイクル数

複合压力容器の圧力の変動に対応する繰返し回数

3.7

フルラップ構造

金属ライナーにヘリカル巻（金属ライナー胴部及び鏡部に繊維をらせん状に巻き付ける方法）及びフープ巻（金属ライナー胴部に繊維を軸とほぼ直角に巻き付ける方法）により樹脂含浸連続炭素繊維を巻き付ける構造

3.8

金属ライナー

複合压力容器の最内層を構成する金属製の容器

3.9

樹脂含浸炭素繊維層

樹脂含浸連続炭素繊維に硬化処理を施した層

3.10

樹脂含浸ガラス繊維層

樹脂含浸連続ガラス繊維に硬化処理を施した層

3.11

保護層

複合圧力容器を外部衝撃等から保護するために複合圧力容器の外面に設ける樹脂含浸ガラス繊維層及び保護パッド

3.12

防食層

金属ライナーと樹脂含浸炭素繊維層の間の電位差腐食を防止するための塗膜，樹脂含浸ガラス繊維層等

3.13

全厚さ

金属ライナー，樹脂含浸炭素繊維層，保護層及び防食層それぞれの呼び厚さを合計した厚さ

3.14

計算厚さ

金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層それぞれの強度計算上必要とする厚さ

3.15

最小破裂圧力

設計温度において複合圧力容器が具備すべき最小の破裂圧力で，設計圧力の 2.0 倍以上の圧力

3.16

自緊処理

複合圧力容器に耐圧試験圧力以上の圧力を負荷することによって金属ライナーに圧縮残留応力を付与する処理。金属ライナーの疲労強度の改善を目的に行う。

3.17

エルハルト式

金属ライナーを金属塊の押出し等によって成形する方法

3.18

カップリング式

金属ライナーを金属板の絞り加工等によって成形する方法

3.19

マンネスマン式

金属ライナーの鏡部を継目なし管の両端部の熱間加工によって成形する方法

3.20

設計確認試験

複合圧力容器の製作に先行して，複合圧力容器の設計の妥当性を確認するために行う試験

3.21

疲労損傷度

実使用時の負荷に応じた累積疲労損傷を表すパラメータ

4 材料

4.1 金属ライナー

金属ライナーに使用する材料は、アルミニウム合金とし、次の **a)～c)**による。ただし、鉛及びビスマスの含有成分量は、それぞれ 0.01%以下とする。

a) 次の **1)～4)**に示す規格のアルミニウム合金

- 1) JIS H 4000** (A6061P)
- 2) JIS H 4040** (A6061BE 及び A6061BD)
- 3) JIS H 4080** (A6061TE, A6061TES, A6061TD 及び A6061TDS)
- 4) JIS H 4140** (A6061FD 及び A6061FH)

b) **a)** に示す規格と同等な規格のアルミニウム合金¹⁾

注¹⁾ 同等な規格のアルミニウム合金とは、特定設備検査規則の機能性基準の運用について

別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 4 条第 2 項及び第 3 項（特定設備の材料）の規定に従うものをいう。

c) **a)**及び **b)** に示すアルミニウム合金以外のアルミニウム合金で、次の **1)**及び **2)**のいずれも満足するもの。

- 1) KHKS 0220 附属書 E の E.3** 水素適合性の判定基準を満足する。
- 2) HPIS E 103** の湿潤ガス応力腐食割れ試験の HG-SCC 特性の判定基準を満足する。

4.2 樹脂含浸炭素繊維層

樹脂含浸炭素繊維層は、次の **a)～c)**による。

a) 炭素繊維は、次の **1)～3)**による。

- 1) JIS L 0204-2** に規定する炭素繊維とする。材料仕様書に規定する炭素繊維の最小引張強さは、 $3\,500\text{N/mm}^2$ 以上とする。
- 2)** 材料仕様書に規定する炭素繊維の最小破断ひずみは、1%以上とする。
- 3)** 炭素繊維の引張強さ、破断ひずみ及び縦弾性係数の試験方法は、**JIS R 7608** 又は **ASTM D4018** による。

b) 樹脂は、次の **1)～3)**による。

- 1)** 熱硬化性のエポキシ樹脂又は熱硬化性の変性エポキシ樹脂とする。
- 2)** ガラス転移温度は、設計温度の最高の温度に 20℃を加えた温度以上の温度とする。
- 3)** 樹脂のガラス転移温度の試験方法は、**JIS K 7095** 又は **JIS K 7121** による。

c) 樹脂の硬化及び硬化の促進に用いる助剤は、使用する樹脂に対して適切な材料とする。

4.3 保護層及び防食層

保護層及び防食層は、次の **a)～d)**による。

- a) 保護層に使用する樹脂含浸炭素繊維層は、**4.2**の規定を準用する。
- b) 保護層又は防食層に使用する樹脂含浸ガラス繊維層は、次の**1)**及び**2)**による。
 - 1) 樹脂含浸ガラス繊維層のガラス繊維は、次の**1.1)**及び**1.2)**のいずれかに適合する材料とする。
 - 1.1) JIS R 3410 に規定する E ガラス
 - 1.2) JIS K 7010 に規定する S ガラス繊維
 - 2) ガラス繊維に含浸する樹脂は、**4.2 b)**の規定を準用する。
- c) 保護層又は防食層に使用する樹脂は、**4.2 b)**の規定を準用する。
- d) 保護層に使用する保護パッド及び保護パッドを取り付けるための接着剤は、保護する材料の材料特性を損なわないものとする。

4.4 その他の部分

その他 (**4.1**～**4.3** 以外) の部分 (閉止プラグ等) に使用する材料は、ステンレス鋼又はアルミニウム合金とし、次の **a)** 又は **b)** による。

- a) ステンレス鋼は、一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について 別添 一般高圧ガス保安規則関係例示基準 9.2.1 表 (三) に規定する材料とする。
- b) アルミニウム合金は、**4.1** に示す材料とする。

4.5 材料仕様書の記載事項

4.5.1 一般事項

複合圧力容器の製作者が材料の強度を独自に定める場合は、複合圧力容器の製作者は、**4.1** の金属ライナー、**4.2** の樹脂含浸炭素繊維層並びに **4.3** の保護層及び防食層の材料について、材料仕様書を作成する。

材料仕様書は、必要に応じて **4.4** のその他の部分の材料についても作成する。

4.5.2 樹脂含浸炭素繊維層

樹脂含浸炭素繊維層の材料仕様書の記載事項は、次の **a)～e)** による。

- a) 次の **1)～3)** に示す炭素繊維の材料仕様
 - 1) 炭素繊維の種類、製造業者名及び品名、型番、区分等を示す記号
 - 2) 炭素繊維の縦弾性係数、引張強さ及び破断ひずみの規定値
 - 3) 樹脂との接着性を向上するために行う炭素繊維の表面処理の仕様
- b) 次の **1)～4)** に示す樹脂の材料仕様
 - 1) 樹脂の種類、製造業者名及び品名、型番、区分等を示す記号
 - 2) 樹脂の粘度、エポキシ当量、比重及びゲル化時間
 - 3) 樹脂のガラス転移温度
 - 4) 樹脂の硬化及び硬化の促進に用いる助剤の仕様 (樹脂との混合に係る要求事項を含む。)
- c) 炭素繊維の材料仕様に係る試験方法、検査方法等の基準
- d) 炭素繊維又は樹脂含浸炭素繊維層の材料の管理に係る仕様 (使用可能期限等)
- e) 上記 **a)～d)** の他、材料仕様として必要な事項

4.5.3 保護層及び防食層

保護層及び防食層の材料仕様書の記載事項は、次の **a)～e)**による。

- a)** 樹脂含浸ガラス繊維層を使用する場合は、次の **1)**及び**2)**に示すガラス繊維の材料仕様及び**4.5.2 b)**の樹脂の材料仕様
 - 1)** ガラス繊維の種類、製造業者名及び品名、型番、区分等を示す記号
 - 2)** ガラス繊維の材料特性
- b)** 保護パッドを使用する場合は、保護パッド及び保護パッドの接着剤の材料仕様として、次の **1)**及び**2)**に示す事項
 - 1)** 保護パッド及び保護パッドの接着剤の種類等
 - 2)** 接着に係る仕様（加圧力、保持時間等）
- c)** 樹脂を使用する場合は、**4.5.2 b)**の樹脂の材料仕様
- d)** 上記 **a)～c)**以外の材料を保護層及び防食層に使用する場合は、材料の種類に応じた材料仕様
- e)** 上記 **a)～d)**の他、材料仕様として必要な事項

5 設計

5.1 一般

5.1.1 設計の基本事項

複合圧力容器の設計の基本事項は、次の **a)～e)** による。

- a)** 金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層の応力解析は、**5.2** による。
- b)** 金属ライナーの破裂前漏洩解析は、**5.3** による。
- c)** 金属ライナーの疲労寿命解析及び亀裂進展解析は、**5.4** による。
- d)** 複数の圧力サイクルがある場合は、**5.5** による。
- e)** 複合圧力容器の設計確認試験は、**5.6** による。

5.1.2 設計仕様書等の記載事項

設計仕様書、構造図、その他の設計書類の記載事項は、次の **a)～k)** による。

- a)** 複合圧力容器の設計圧力、設計温度、常用の圧力、常用の温度
- b)** 複合圧力容器の形状・寸法、使用材料（材料の名称、数量等）等
- c)** 複合圧力容器の圧力変動及び使用繰返し回数
- d)** 複合圧力容器の最大使用期間
- e)** 金属ライナーの成形方法
- f)** 金属ライナーの熱処理条件（温度、保持時間等）及び熱処理の方法
- g)** 金属ライナーの材料の機械的性質の設定値及び機械試験の方法
- h)** ワインディングの施工条件（ワインディングパターン等）
- i)** 樹脂含浸繊維層の硬化処理条件
- j)** 自緊処理条件
- k)** 上記 **a)～j)**の他、設計上必要な事項

5.2 応力解析

5.2.1 一般事項

複合圧力容器の胴部を対象として設計する場合の応力解析は、次の **a)～d)**による。

- a) **5.2.2** により、複合圧力容器の胴部の金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層の構成を決定し、厚さを設定する。
- b) 応力解析は、弾塑性応力解析とし、有限要素法その他の適切な解析手法によって行う。
- c) 応力解析の手順は、**5.2.3** による。
- d) 金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層の厚さは、**5.2.4** の判定基準を満足する厚さとする。

なお、複合圧力容器の胴部を対象を限定しなくてもよい（**附属書 A** による。）。この場合は、試験による設計とする。金属ライナー口金のねじ部の解析は、**KHKS 1222** による（**附属書 B** による。）。

5.2.2 公式による厚さの設定

複合圧力容器の胴部の樹脂含浸炭素繊維層の構成を決定し、金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層の厚さを適切な公式によって設定する（**附属書 C** による。）。

5.2.3 応力解析の手順

複合圧力容器の胴部の応力解析の手順は、次の **a)～d)**による。

- a) 応力解析は、**5.2.2** で設定した厚さに基づいて行う。
- b) 設定した厚さに基づき、複合圧力容器の解析モデルを作成する。応力解析に用いる金属ライナーの弾塑性応力-ひずみ曲線（真応力-真ひずみ曲線）は、実測した結果をモデル化してもよい。保護層、防食層等の非耐圧部分は、荷重を分担しないようにする。
- c) 次の **1)**及び **2)**の状態において、金属ライナーに生じるミーゼスの相当応力及び樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維に生じる応力を解析する。
 - 1) 状態 1** 常温において圧力ゼロから自緊処理圧力を負荷した後、再び圧力ゼロまで除荷した状態
 - 2) 状態 2** 設計温度において**状態 1** から設計圧力を負荷した状態
- d) 応力解析の結果を、**5.2.4** の判定基準と照合する。判定基準を満足しない場合は、設定する厚さを変えて応力解析の手順を繰返す。

5.2.4 判定基準

判定基準は、次の **a)**及び **b)**による。

a) 金属ライナーの判定基準

金属ライナーの判定基準は、次の **1)**及び **2)**による。

- 1) 状態 1** において、金属ライナーに生じるミーゼスの相当応力が、金属ライナーの材料の常温における 0.2%耐力の値以下である。
- 2) 状態 2** において、金属ライナーに生じるミーゼスの相当応力が、**5.7.1** に示す許容引張応力の値以下である。

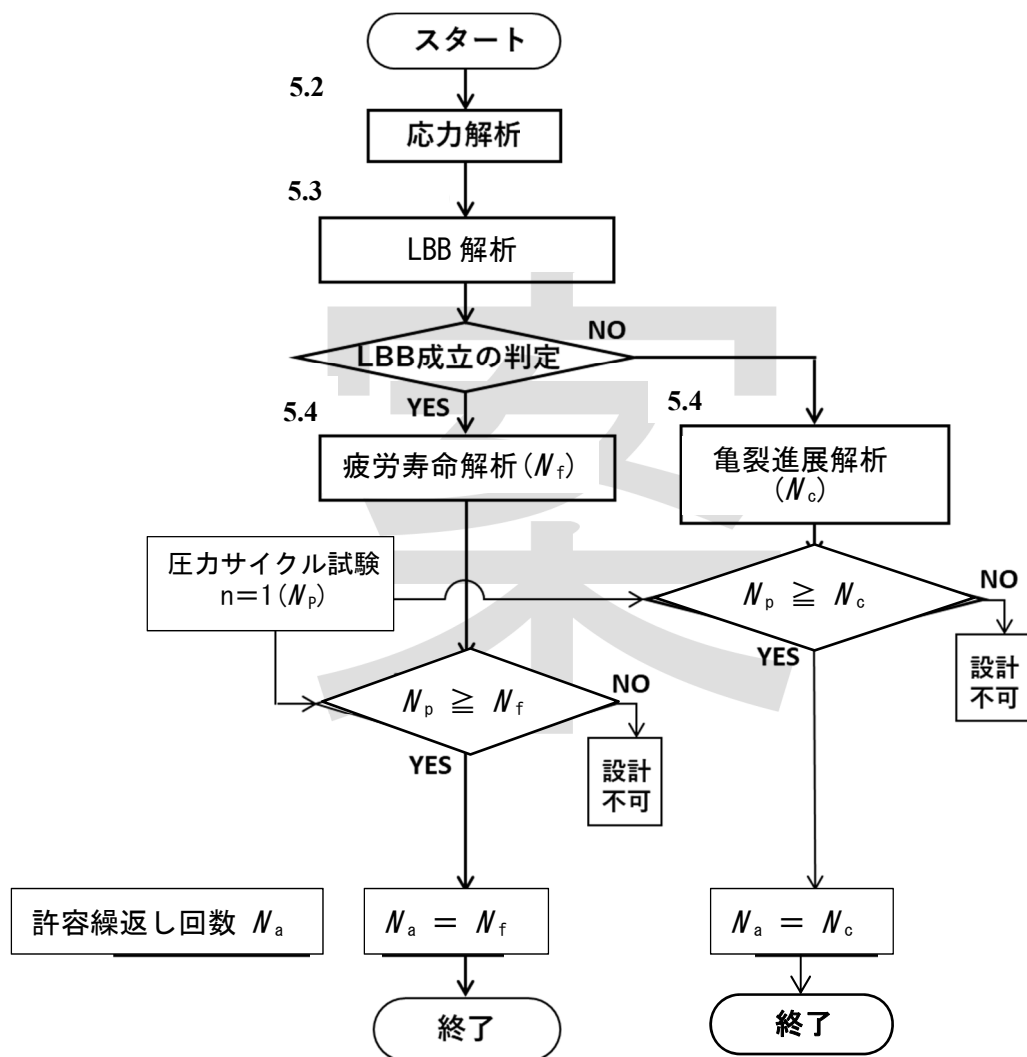
b) 樹脂含浸炭素繊維層の判定基準

樹脂含浸炭素繊維層の判定基準は、次の 2) による。

- 2) 状態 2 において、樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維に生じる応力が、炭素繊維の許容引張応力の値以下である。

5.3 破裂前漏洩解析

応力解析に続いて、破裂前漏洩解析、疲労寿命解析又は亀裂進展解析を行う。設計フローを図 1 に示す。



(注) LBB は破裂前漏洩を意味する。

図 1—応力解析に続く設計フロー

破裂前漏洩解析は、次の a)～f) による。

- a) 破裂前漏洩解析は、複合圧力容器の胴部を対象とする。
- b) 破裂前漏洩解析は、常用の圧力と常用の温度の組合せで行う。
- c) 破裂前漏洩解析の方法は、KHKS 0220 による。

- d) 応力拡大係数 K_I の計算に用いる亀裂は、金属ライナー内面の軸方向表面亀裂（構造不連続部は除く。）とする。亀裂の形状は、アスペクト比（亀裂深さ/亀裂長さ）が 1/3 の半楕円形亀裂とする。応力拡大係数 K_I の計算において、自緊処理の効果（圧縮残留応力）は、圧縮残留応力が正確に評価できる場合に限り、取り入れることができる（**附属書 D** による。）。
- e) 亀裂の最深点で、亀裂進展方向の部材の厚さ t の 0.8 倍の亀裂深さにおいて、式(1)及び式(2)を満足すれば、金属ライナーの破裂前漏洩が成立する。

$$K_I < K_{Ic} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$0.2t < \left(\frac{K_{Ic}}{S_y} \right)^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、
 K_I : 応力拡大係数 (MPa√m)
 K_{Ic} : 常用の温度における金属ライナーの材料の平面ひずみ破壊靱性の値 (MPa√m)
 S_y : 常用の温度における金属ライナーの材料の 0.2%耐力の値 (N/mm²)
 t : 亀裂進展方向の部材の厚さ (m)

- f) 金属ライナーの破裂前漏洩が成立する場合は、漏洩したガスは容易に樹脂含浸炭素繊維層を透過するため、複合圧力容器の破裂前漏洩が成立すると見なせる。

5.4 疲労寿命解析及び亀裂進展解析

5.4.1 一般事項

疲労寿命解析及び亀裂進展解析は、次の a)～c)による。

- a) 疲労寿命解析及び亀裂進展解析は、5.6.3 の圧力サイクル試験の試験条件を対象とする。
b) 破裂前漏洩が成立する場合は、5.4.2 の疲労寿命解析を行う。
c) 破裂前漏洩が成立しない場合は、5.4.3 の亀裂進展解析を行う。

5.4.2 疲労寿命解析

疲労寿命解析は、次の a)及び b)による（**附属書 F** による。）。

- a) 疲労寿命解析の手順は、KHKS 0220 の 6 疲労解析、JIS B 8266 附属書 8 の 3.2 及び次の 1)～4)による。自緊処理の効果（圧縮残留応力）は、圧縮残留応力が正確に評価できる場合に限り、取り入れてもよい（**附属書 D** による。）。

- 1) 金属ライナーの材料が 4.1a)及び b)に示すアルミニウム合金の場合は、疲労寿命解析には、式(3)の最適疲労曲線を適用する。

$$S_{alt} = 2.26 S_u N_f^{-0.110} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、
 S_{alt} : 応力振幅 (N/mm²)
 S_u : 材料の常温における引張強さの規定値 (N/mm²)
 N_f : 疲労寿命（繰返し回数）

- 2) 5.6.3 の圧力サイクル試験の圧力範囲から、疲労寿命解析の最大応力 S_{max} 及び応力振幅 S_{alt} を算定する。

- 3) 平均応力の補正には、式(4)を適用する。

$$S_{eq} = S_{max}^{0.2} S_{alt}^{0.8} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 S_{eq} ：等価応力振幅 (N/mm²)

S_{max} ：最大応力 (N/mm²)

- 4) 等価応力振幅 S_{eq} に対する設計係数 α を、最適疲労曲線の信頼性（標準偏差）に基づく 1.14 (2σ の値) 又は 1.23 (3σ の値) とし、式(5)により疲労寿命（繰返し回数） N_f を算定する。
設計係数 α は、設計者の選択となる。

$$N_f = (2.26 S_u / (\alpha S_{eq}))^{1/0.110} \quad \dots \dots \dots (5)$$

b) 判定基準

疲労寿命解析の判定基準は、次の 1) を満足した場合に、次の 2) とする。

- 1) N_f は、5.6.3 の圧力サイクル試験の試験圧力サイクル回数 N_p 以下である。
- 2) N_f を複合圧力容器の許容繰返し回数とする。

5.4.3 亀裂進展解析

亀裂進展解析は、次の a) 及び b) による（附属書 F による。）。

- a) 亀裂進展解析の手順は、KHKS 0220 の 8 亀裂進展解析に基づき、次の 1)～7) による。自緊処理の効果（圧縮残留応力）は、圧縮残留応力が正確に評価できる場合に限り、取り入れてもよい（附属書 D による。）。

- 1) 金属ライナー材料が 4.1 a) 及び b) に示すアルミニウム合金の場合は、亀裂進展解析には、式(6)及び式(7)の最適亀裂進展速度曲線を適用する。

$$da/dN = 2.64 \times 10^{-12} \Delta K^{4.34} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\Delta K = M \Delta S \sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 da/dN ：亀裂進展速度 (m/cycle)

ΔK ：応力拡大係数範囲 (MPa $\sqrt{m}$)

M ：補正係数

ΔS ：応力範囲 (N/mm² 又は MPa)

a ：亀裂深さ (m)

- 2) 5.6.3 の圧力サイクル試験の圧力範囲から、亀裂進展解析の最大応力 S_{max} 及び応力範囲 $\Delta S = 2S_{alt}$ を算定する。

- 3) 平均応力の補正には、式(8)を適用する。

$$\Delta S_{eq} = S_{max}^{0.2} \Delta S^{0.8} \quad \dots \dots \dots (8)$$

- 4) 初期亀裂寸法を設定する。

- 5) 式(6)～式(8)を適用して亀裂進展解析（亀裂深さ増分 Δa と繰返し回数増分 ΔN の分離積分）を行い、亀裂深さ a と繰返し回数 N の関係及びアスペクト比（亀裂深さ/亀裂長さ）を算定する。

- 6) 5.3 e) を参照して、亀裂深さ $a = 0.8t$ （部材の厚さ t ）に対応する繰返し回数 N を疲労寿命とする。

- 7) 繰返し回数に対する設計係数 β を、最適亀裂進展速度曲線の信頼性（標準偏差）に基づく

1.94 (2σ の値) 又は 2.69 (3σ の値) とし、 N/β により破裂前漏洩が成立する場合の疲労寿命 (繰返し回数) N_c を算定する。設計係数 β は、設計者の選択となる。

b) 判定基準

亀裂進展解析の判定基準は、次の **1)** 及び **2)** を満足した場合に、次の **3)** とする。

- 1) 亀裂進展解析において、破裂前漏洩が成立する。
- 2) N_c は、5.6.3 の圧力サイクル試験における漏洩までの試験圧力サイクル回数 N_p 以下である。
- 3) N_c を複合圧力容器の許容繰返し回数とする。

5.5 複数の圧力サイクルがある場合

実際の充填圧力サイクルを対象として、複数の圧力サイクルがある場合の疲労寿命解析は、次の **a)** ~ **d)** による。

- a) 5.6.3 の圧力サイクル試験の圧力範囲 (常用の圧力) から得られる許容繰返し回数 N_f を基準とする。
- b) 実際には、複合圧力容器は **a)** の圧力範囲より小さい複数の圧力範囲で使用する場合がある。その場合の複数の許容繰返し回数 N_i は、式(3)~式(5)で算定する。
- c) 複数の使用繰返し回数 n_i と許容繰返し回数 N_i の比の総和として、式(9)により累積使用係数 U を算定する。 U の値は、1.0 以下とする。

$$U = \sum \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (9)$$

- d) 部分充填サイクルを対象とする場合は、**附属書 E** が適用可能である。

5.6 設計確認試験

5.6.1 設計確認試験の基本事項

設計確認試験の基本事項は、次の **a)** ~ **c)** による。

- a) 複合圧力容器は、複合圧力容器の仕様ごとに設計確認試験を行い、判定基準を満足しなければならない。
- b) 設計確認試験の種類は、次の **1)** 及び **2)** による。
 - 1) 5.6.2 に規定する破裂試験
 - 2) 5.6.3 に規定する圧力サイクル試験
- c) 設計確認試験に用いる試験体は、設計確認試験の種類に応じて、次の **1)** フルスケール試験体又は **2)** サブスケール試験体とする。
 - 1) **フルスケール試験体** 製作する複合圧力容器と材料、形状・寸法、加工方法、構造、検査方法及び製作に使用する設備がすべて同一の試験体とする。
 - 2) **サブスケール試験体** フルスケール試験体の胴部の長さを短くした試験体とする。サブスケール試験体の胴部の長さは、胴部の応力分布に影響を与えない長さ以上とする。

5.6.2 破裂試験

破裂試験は、次の **a)** 及び **b)** による。

a) 試験の方法

試験の方法は、次の 1)～6)による。

- 1) 試験体はフルスケール試験体とし、試験体の個数は 1 個とする。
- 2) 試験は設計温度で行う。ただし、破裂圧力を温度補正する場合は、設計温度以外の温度で試験を行ってもよい。
- 3) 試験は非水槽式とし、試験体に気相部が残らないように腐食性及び危険性のない液体（イオン交換水等をいい、以下「試験液体」という。）を充填させた後、加圧装置を用いて均等な速度で徐々に圧力を加え、試験体が破壊するまで昇圧する。
- 4) 昇圧速度は、最小破裂圧力の 80%を超える圧力では毎秒 0.35MPa 以下とする。
- 5) 破裂圧力は、圧力計等で目視により確認するとともに、チャート等で記録する。
- 6) 試験で得られる破裂圧力は、式(10)により、計算厚さにおける破裂圧力に補正する。

$$P_1 = P_2 \frac{P_4}{P_3} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、
 P_1 ： 計算厚さにおける破裂圧力 (MPa)
 P_2 ： 破裂試験における破裂圧力（全厚さにおける破裂圧力）
 (MPa)
 P_3 ： 有限要素法等の適切な解析手法により算出した全厚さにおける破裂圧力 (MPa)
 P_4 ： 有限要素法等の適切な解析手法により算出した計算厚さにおける破裂圧力 (MPa)

b) 判定基準

計算厚さにおける破裂圧力の判定基準は、最小破裂圧力以上とする（3.15 参照）。

なお、過去に製造された複合圧力容器と同一仕様の金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層であり、かつ胴の長さ以外の形状・寸法、構造、検査方法及び製作に使用する設備がすべて同一の場合は、過去の試験結果を示すことで、破裂試験は不要とする。ここで、胴部は応力分布が変化しない長さ以上とする。ただし、樹脂含浸炭素繊維層のワインディングにおいて、炭素繊維の体積含有率が変化する場合は、改めて破裂試験を実施する。

5.6.3 圧力サイクル試験

試験はフルスケール試験体を用い、次の a)及び b)による。

a) 試験の方法

試験の方法は、次の 1)～4)による。

- 1) 試験体の個数は、1 個とする。
- 2) 試験は非水槽式とし、試験体に試験液体（試験中は、試験液体を適切に管理する。）を充填させた後、加圧装置を用いて試験圧力の 10%以下から試験圧力までの圧力範囲で、毎分 10 回以下で圧力サイクルを負荷する。
- 3) 試験圧力は常用の圧力とし、試験は常用の温度で行う。

- 4) 試験中は、圧力範囲、圧力サイクル数及び外表面温度を、測定器具等により連続的に測定し、チャート等で記録する。

b) 判定基準

圧力サイクル試験の判定基準は、次の 1)及び 2)とする。

- 1) 試験圧力サイクル回数 N_p が、5.4.2 の疲労寿命解析で得られる繰返し回数 N_f より大きい値である。
- 2) 試験は漏洩するまで行い、漏洩箇所が胴部であることを確認する。

5.7 材料の許容引張応力

5.7.1 金属ライナー材料の許容引張応力

設計温度における金属ライナー材料の許容引張応力は、複合圧力容器の製作者が保証する設計温度における 0.2%耐力の 1/1.5 以下の値とする。

5.7.2 樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維の許容引張応力

樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維の許容引張応力は、複合圧力容器の製造者が定める、常温における樹脂含浸炭素繊維中の炭素繊維の引張強さの保証値²⁾の 1/2.0 以下の値とする。

注²⁾ 炭素繊維の製造者が提示する炭素繊維の引張強度に比べて、複合圧力容器が破裂するときの炭素繊維の引張強度は大きく低下する。複合圧力容器の製造者は、破裂試験や応力解析により炭素繊維の引張強度の低下を適切に見積り、最小破裂圧力時の炭素繊維の引張強度の保証値を決める必要がある。

5.8 材料の縦弾性係数及び線膨張係数

5.8.1 金属ライナー材料の縦弾性係数及び線膨張係数

設計温度における金属ライナー材料の縦弾性係数及び線膨張係数の値は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 12 条による。

5.8.2 樹脂含浸炭素繊維層の縦弾性係数

設計温度における樹脂含浸炭素繊維層の縦弾性係数の値は、設計温度における炭素繊維の縦弾性係数、樹脂の弾性係数及び樹脂含浸炭素繊維層の炭素繊維の体積含有率を用い、複合則に基づき算定する等の適切な方法により得られた値とする。

解析に用いる樹脂含浸炭素繊維層の縦弾性係数は、炭素繊維の巻き付け方法も考慮した異方性の縦弾性係数を適切に設定する。

6 加工

6.1 材料の切断

金属ライナーの材料の切断は、機械的方法又は熱的方法による。熱的方法で切断した場合は、スラグ、有害な変質部、熱硬化部等を機械的方法により除去する。

6.2 金属ライナーの成形

金属ライナーの成形は、スピニング加工、エルハルト式、カッピング式、マンネスマン式等の適切な方法を用いて、冷間加工又は熱間加工によって一体（金属ライナーの胴部及び鏡部に接合がないことをいう。）で成形する。熱間加工により成形する場合には、固溶化熱処理温度以下の温度で行う。

6.3 金属ライナーの成形後の熱処理

金属ライナーの成形後の熱処理は、次の a)～c)による。

- a) 熱処理は、JIS H 0001 の記号 T6 に対応する溶体化処理後人工時効硬化処理に対応する熱処理とする。
- b) 熱処理温度及び保持時間は、金属ライナーの厚さ等の形状・寸法に応じて、材料規格等に従って定めた適切な条件とする。
- c) 熱処理の方法は、次の 1)～3)による。
 - 1) 熱処理は、金属ライナー全体を一度に熱処理炉に入れて行う。
 - 2) 熱処理温度は、金属ライナーに設置する熱電対を含め、熱処理炉に設置する複数の熱電対で管理する。
 - 3) 昇温速度、降温速度、任意の 2 点間の最大温度差、熱処理炉への出入れの温度条件等の熱処理の方法は、設計仕様書に定められた方法による。

6.4 金属ライナーの機械試験

6.4.1 一般

金属ライナーの機械試験は、次の a)～d)による。

- a) 試験板は、金属ライナーの成形前の同一ロットの材料から、同一形状の金属ライナーで、同一熱処理炉による金属ライナーの成形後の同時熱処理毎に、1 個の試験板を作成する。
- b) 試験板は、金属ライナーの成形後の熱処理と同時に、同一熱処理炉で熱処理を行う。ここで、熱処理の方法等は 6.3 の規定による。
- c) 試験板は、金属ライナーの胴部の長手方向に相当する位置より採取し、b)の熱処理後、金属ライナーの素材の材料規格に規定する試験の種類、試験片の種類、採取位置、試験片の採取方向及び試験片の数量に従って試験片を採取する。
- d) 機械試験は、6.4.2 の常温における引張試験、6.4.3 の設計温度における引張試験及びその他材料仕様書で定める試験とする。

6.4.2 常温における引張試験

常温における引張試験は、次の a)及び b)による。

- a) 試験は常温で行い、機械試験の方法は、金属ライナー素材の材料規格の規定による。
- b) 試験により得られた引張強さ、0.2%耐力及び伸びの値は、複合圧力容器の製作者が保証する常温における最小規定値以上とする。

6.4.3 設計温度における引張試験

設計温度における引張試験は、次の a) 及び b) による。

- a) 試験は設計温度で行い、試験の種類は高温引張試験とする。高温引張試験の方法は、設計仕様書等で定める方法とする。
- b) 試験により得られた 0.2%耐力の値は、複合圧力容器の製作者が設定する設計温度における最小規定値以上とする。

6.5 金属ライナーの口金部のねじ加工

金属ライナーの口金部のねじ加工は、次の a) 及び b) による。

- a) ねじは平行ねじとする。
- b) ねじ山はきれいに切削され、割れ、剥離、かえり等の有害な欠陥がないことを確認する。

6.6 金属ライナーの電位差腐食防止措置

複合圧力容器において、金属ライナーと樹脂含浸炭素繊維層との間に防食層を設ける等の適切な電位差腐食防止措置を施す。

6.7 ワインディング

ワインディングは、次の a)～c) による。この規定は、樹脂含浸炭素繊維層及び保護層又は防食層に使用する樹脂含浸ガラス繊維層に適用する。

- a) ワインディングの層数は、樹脂含浸炭素繊維層にあつては3層以上とする。
- b) ワインディングの継目部の重なり長さは、繊維の巻き付け、剥離の防止等に対して十分な長さとし、最外層に継目部を設けてはならない。
- c) ワインディングは、複合圧力容器の設計に対応して複合圧力容器の製造者が定めた施工条件に従って行う。ここで、施工条件は、次の 1)～3) による。
 - 1) ワインディングパターン（巻き付け角度、層数、フープ巻き又はヘリカル巻きの区別等）
 - 2) 巻き付け方法ごとの巻き付け作業時に繊維に作用させる張力
 - 3) 巻き付け方法ごとの巻き付け速度

6.8 樹脂の熱硬化処理

樹脂の熱硬化処理は、次の a)～c) による。

- a) 樹脂の熱硬化処理温度は、樹脂含浸炭素繊維層及び金属ライナーの材料特性（組織、結晶粒、機械的性質等）に影響を与えない温度とする。
- b) 熱硬化処理は、樹脂の全表面が均一に加熱されるように複合圧力容器の内部、外部又は内外部から行う。部分的な熱硬化処理は行わない。
- c) 熱硬化処理は、樹脂含浸炭素繊維層の厚さ等の寸法形状に対応して複合圧力容器の製造者が定めた加熱方法、加熱温度、保持時間等の熱硬化処理条件に従って行う。

6.9 自緊処理

自緊処理は、次の a)～c)による。

- a) 自緊処理は、耐圧試験圧力以上の圧力を水圧により負荷して行う。
- b) 自緊処理圧力は、除荷後に金属ライナーの再降伏を生じない圧力とする。
- c) 自緊処理は、金属ライナーの厚さ等の形状・寸法に対応して、複合圧力容器の製作者が定めた自緊処理圧力、保持時間等の自緊処理条件に従って行う。

7 構造

複合圧力容器の構造は、次の a)及び b)による。

- a) 複合圧力容器には、胴の内径にかかわらず、検査等を行うために必要な大きさの穴を設ける。穴の位置は、複合圧力容器の端部のみとし、穴の中心線は複合圧力容器の胴部の中心線に一致するものとし、胴部には穴を設けない。
- b) 複合圧力容器の金属ライナーの鏡部は、等張力測地線に基づく形状（鏡部の樹脂含浸炭素繊維層に生じる張力が等しくなり、繊維の直角方向に作用するせん断力がゼロとなる鏡部の形状をいう。）とする。また金属ライナーの鏡部と樹脂含浸炭素繊維層の間に剥離、すべり等が生じない形状とする。

8 検査

8.1 設計の検査の方法

複合圧力容器の設計の検査は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 49 条第 1 項に基づき、材料仕様書、設計仕様書、設計書及び構造図により、4～7 の規定に適合していることを検査する。

8.2 材料の検査

8.2.1 材料の外観

複合圧力容器の材料の外観は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 50 条による。

8.2.2 材料の検査の方法

材料の検査の方法は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 52 条による。材料の検査は、耐圧部分の材料及び材料仕様書に記載の材料（防食層、保護層等の非耐圧部分の材料を含む。）に対して行う。

8.3 加工の検査

8.3.1 金属ライナーの加工の検査

金属ライナーの検査は、次の a)～c)による。なお、a)及び b)は、金属ライナーの熱処理前に検査を行う。

- a) 金属ライナーの鏡部の内面について内視鏡を用いた目視等により外観検査を行う。金属ライナーの鏡部の内面には、有害なしわ等の欠陥があってはならない。

- b) 金属ライナーの鏡部の外面について浸透探傷試験を行う。浸透探傷試験の方法は、**JIS Z 2343-1**による。浸透探傷試験の判定基準は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 65 条第 2 項による。
- c) 金属ライナーの胴部の軸に垂直な断面における最大外径と最小外径との差は、当該断面における基準外径の 1/10 以下とする。

8.3.2 複合圧力容器の加工の検査

複合圧力容器の加工の検査は、次の a)～c)による。

- a) 材料の切断、成形その他の加工は、加工後の材料の表面に使用上有害な傷、打こん、腐食等の欠陥がないようにしなければならない。
- b) 加工は、**6.2～6.9**の規定に適合していなければならない。
- c) 金属ライナーの鏡部を成形した場合における鏡部の寸法の基準寸法に対する偏差は、胴部との接続部における内径の 1.25%以下とする。

8.3.3 加工の検査の方法

加工の検査の方法は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 54 条第 1 項に基づき、次の a)～i)による。

- a) 金属ライナーの加工後の材料が、**8.3.1 a)**の規定に適合しているか、目視により検査する。
- b) 主要寸法は寸法測定器等を用いて測定し、構造図どおりであるか検査する。
- c) 金属ライナーの成形後の外面の非破壊試験が、**8.3.1**の規定に適合しているか、非破壊試験機を用いて**8.3.1 b)**に規定する試験方法により行う。
- d) **8.3.1 a)**の金属ライナーの成形後における鏡部の内面しわの検査は、限度見本のしわ形状（明らかに割れ形状のしわを有する限度見本を除く。）と同等以下であるか、内視鏡を用いて目視検査等により検査する。この場合において、限度見本は設計確認試験に合格した試験体等より作成する。
- e) 金属ライナーの胴部の軸に垂直な断面における最大外径と最小外径との差及び金属ライナーの鏡部を成形した場合における鏡部の寸法の基準寸法に対する偏差が、**8.3.1 c)**及び**8.3.2 c)**の規定に適合しているか、寸法測定器等により検査する。
- f) 金属ライナーの成形後の材料の熱処理及び機械試験の試験板の熱処理が、設計書又は構造図に規定の熱処理条件並びに**6.3**及び**6.4.1 b)**の規定に適合しているか、熱処理温度及び熱処理時間を示す熱処理温度チャート等により検査する。
- g) 金属ライナーの成形後の材料の機械試験が、**6.4.2 b)**及び**6.4.3 b)**の規定に適合しているか、引張試験機、寸法測定器等を用いて**6.4.1 d)**に掲げる試験方法により検査する。
- h) **6.5 b)**の金属ライナーの口金部のねじ加工後の検査は、ねじ加工後の材料の表面に使用上有害な欠陥等がないことを目視検査等により検査する。
- i) **6.6**の電位差腐食防止措置の検査は、防食層として設けた塗膜又は樹脂含浸ガラス繊維層の厚さについて、寸法測定器等を用いて測定し、構造図どおりであるか検査する。また、膜外面について、ピンホール検出器等により異常がないことを確認する。

- j) 6.7 a)及び c)のワインディングの検査は、次の 1)～3)により設計書又は構造図に規定の施工条件どおりであるか検査する。
- 1) ワインディングパターンを寸法測定器、目視、層毎の巻き付け記録等により確認する。
 - 2) 巻き付け方法毎のワインディング時の繊維の張力及び巻き付け速度を、張力計等を用いて計測する。
 - 3) 樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の層ごとの厚さを、寸法測定器等によりワインディング時に測定する。ワインディング時に厚さを測定しない場合は、構造の検査において 8.4.4 c) により樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の厚さを測定する。
- k) 6.8 c)の樹脂の熱硬化処理の検査は、熱硬化処理の加熱方法、加熱温度及び保持時間を、熱硬化処理記録チャート等により確認し、設計仕様書又は構造図に規定の熱硬化処理条件に適合しているか検査する。
- l) 6.9 c)の自緊処理の検査は、加圧装置を用いて水圧により自緊処理圧力まで均等な速度で徐々に加圧し、設計書又は構造図に規定の自緊処理圧力で保持時間以上保持しているか、目視又は自緊処理圧力及び保持時間を示す自緊処理記録チャートにより検査する。

8.4 構造の検査

8.4.1 胴の真円度

複合圧力容器（試験体を含む。）の胴部及び樹脂含浸炭素繊維層の真円度は、胴部の軸に垂直な断面における最大外径と最小外径との差が、それぞれ当該断面における基準外径の 1/10 以下とする。なお、樹脂含浸炭素繊維層の外側に保護層を有する場合の最大外径、最小外径及び基準外径は、保護層の最大外径、最小外径及び基準外径とする。

8.4.2 耐圧試験

複合圧力容器の耐圧試験は、次の a)～c)による。

- a) 複合圧力容器は、設計圧力の 1.25 倍以上の圧力で常温の試験液体を使用して耐圧試験を行う。
- b) 耐圧試験は、耐圧試験装置を用いて試験圧力まで昇圧し、複合圧力容器の内部が試験圧力になったことを確認した後、大気圧まで降圧し、目視等による検査を行う。
- c) 耐圧試験は、局部的なふくらみ又は伸び、漏れ等の異状が生じない場合に合格とする。

8.4.3 気密試験

複合圧力容器の気密試験は、次の a)～c)による。

- a) 窒素又はヘリウム等の安全な常温の気体を使用して設計圧力以上の圧力で行う。なお、使用ガスの特性に基づき、適切な試験方法を選定して実施する。
- b) 気密試験は、気密試験装置を用いて試験圧力まで昇圧して複合圧力容器等の内部が試験圧力になったことを確認した後、検査条件を考慮して、目視、発泡検査及び発泡試験と同等以上の検知ができるガス検知器等のうち適切な方法により検査を行う。
- c) 気密試験は、漏れ等の異状が生じない場合に合格とする。

8.4.4 構造の検査の方法

構造の検査の方法は、特定設備検査規則の機能性基準の運用について 別添 1 特定設備の技術基準の解釈 第 52 条第 1 項に基づき、次の a)～e)による。

- a) 複合圧力容器等の各部の形状等は、6.2, 6.5, 6.6, 8.4.1 の規定並びに構造図に適合しているか、目視、寸法測定器等により検査する。
- b) 金属ライナーの厚さは、超音波厚み計、寸法測定器等により測定する。なお、鏡部の厚さが位置によって異なる厚さを有する形状の場合には、等間隔に分割した複数の点で厚さを測定する。
- c) 複合圧力容器等の樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の厚さは、構造図に適合しているか、次の 1)～3)により検査する。ただし、8.3.3 j) 3)により、ワインディング時に複合圧力容器等の樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の層ごとの厚さを測定した場合を除く。
 - 1) 試験体の胴部及び鏡部を切断器等により切り出し、当該断面での樹脂含浸炭素繊維層及び保護層の厚さを寸法測定器等により測定して、樹脂含浸炭素繊維層と保護層の厚さの比率を求める。ここで、試験容器からの切り出しによる断面部の厚さ測定は、胴部にあっては等間隔で 4 点、鏡部にあっては直角に交わる 2 断面で切断して円周方向の等位置で 4 点測定し、それぞれの平均値を測定厚さとする。
 - 2) 複合圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層と保護層の全厚さを寸法測定器等により測定する。
 - 3) 複合圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層と保護層の全厚さに、試験容器の樹脂含浸炭素繊維層と保護層の厚さの比率を乗じて、樹脂含浸炭素繊維層及び保護層のそれぞれの厚さを算出する。
- d) 耐圧試験は、耐圧試験装置を用いて昇圧し、複合圧力容器等の内部が試験圧力になったことを確認した後、大気圧まで降圧し、8.4.2 c)の規定に適合しているか、目視等により検査する。この場合において使用する試験液体の温度は、常温とする。
- e) 気密試験は、気密試験装置を用いて試験圧力まで昇圧して複合圧力容器等の内部が試験圧力になったことを確認した後、8.4.3 c)の規定に適合しているか、検査条件等を考慮して、目視、発泡検査及び発泡検査と同等以上の検知ができるガス漏れ検知器等のうち適切な方法により検査する。この場合において使用する気体は、窒素又はヘリウム等の安全な常温の気体とする。

附属書 A

(規定)

複合圧力容器の胴部に対象を限定しない場合の圧力サイクル試験

A.1 適用範囲

この附属書では、複合圧力容器の胴部に対象を限定しない場合の圧力サイクル試験（試験による設計）を規定する。基本事項は、次の a)～d)による。

- a) 金属ライナー及び樹脂含浸炭素繊維層の応力解析は、5.2.1～5.2.3 による。
- b) 複合圧力容器の破裂試験は、5.6.2 による。
- c) 圧力サイクル試験は、5.6.3 及び A.2 による。
- d) 金属ライナー口金のねじ部は、附属書 B による。

A.2 圧力サイクル試験

圧力サイクル試験は、フルスケール試験体又はサブスケール試験体を用い、次の a)～c)による。

a) 試験の方法

試験体の個数以外の試験の方法は、5.6.3 による。

b) 試験体の個数及び試験圧力サイクル数

試験体の個数は 1)、試験圧力サイクル数は 2)とする。

- 1) 試験に供する試験体の個数は、2 個～5 個を選択する。
- 2) 試験圧力サイクル数 N は、試験体の個数に対応して式(A.1)から得られる回数以上で、漏洩するまでの回数（ただし、最大 $2N$ 回）とする。

$$N = K_n N_D \cdots \cdots \cdots (A.1)$$

ここで、 K_n ：試験体の個数 n に対応する係数

$n=2$ の場合 $K_n = 4.0$

$n=3$ の場合 $K_n = 3.5$

$n=4$ の場合 $K_n = 3.0$

$n=5$ の場合 $K_n = 2.6$

N_D ：設計圧力サイクル数（回）

c) 判定基準

圧力サイクル試験の判定基準は、次の 1)及び 2)とする。

- 1) n 個の全ての試験体が、試験圧力サイクル数 N 回まで破裂又は漏洩が生じない。
- 2) 1 個の試験体が、試験圧力サイクル数 $2N$ 回で打ち切るまで、又は漏洩が生じるまで試験を継続し、試験体が破裂しないことを確認する。

附属書 B
(規定)
複合圧力容器の金属ライナー口金のねじ部の解析

B.1 適用範囲

この附属書では、複合圧力容器の金属ライナー口金のねじ部の解析を規定する。基本事項は、次の a)～d)による。

- a) ねじ部の静強度評価は、**B.2** による。
- b) ねじ部には、破裂前漏洩解析は適用しない。
- c) ねじ部の疲労寿命解析は、**B.3** による。
- d) ねじ部の亀裂進展解析は、**B.4** による。

B.2 ねじ部の静強度評価

ねじ部は、設計圧力及び設計温度において **KHKS 1222** 等の適切な方法によって静強度評価を行い、ねじ部に生じる応力が **KHKS 1222** 等の適切な方法で定める許容限界値以下となることを確認する。

B.3 ねじ部の疲労寿命解析

ねじ部は、**5.4.2** 及び **5.5** に基づき疲労寿命解析を行う。

B.4 ねじ部の亀裂進展解析

ねじ部は、**5.4.3** に基づき亀裂進展解析を行う。

附属書 C
(規定)
複合圧力容器の公式による厚さの設定方法

C.1 適用範囲

この附属書では、自緊処理する複合圧力容器の円筒胴を対象として、金属ライナー及び樹脂含浸繊維層の厚さを適切な公式によって設定する方法を規定する(参考文献[1]～[3])。定式化に際して複合圧力容器を薄肉と仮定し、応力とひずみが厚さ方向に等分布とする。

C.2 複合圧力容器の公式による厚さの設定方法

C.2.1 公式に用いるモデルと用語

公式に用いるモデルを図 C.1 に、樹脂含浸炭素繊維層の構成を図 C.2 に、用語の定義を次に示す。添字 L は金属ライナー、添字 F は樹脂含浸繊維層、応力 σ 、ひずみ ε 及び縦弾性係数 E の添字 θ は周方向、 z は軸方向、 r は径方向を意味する。

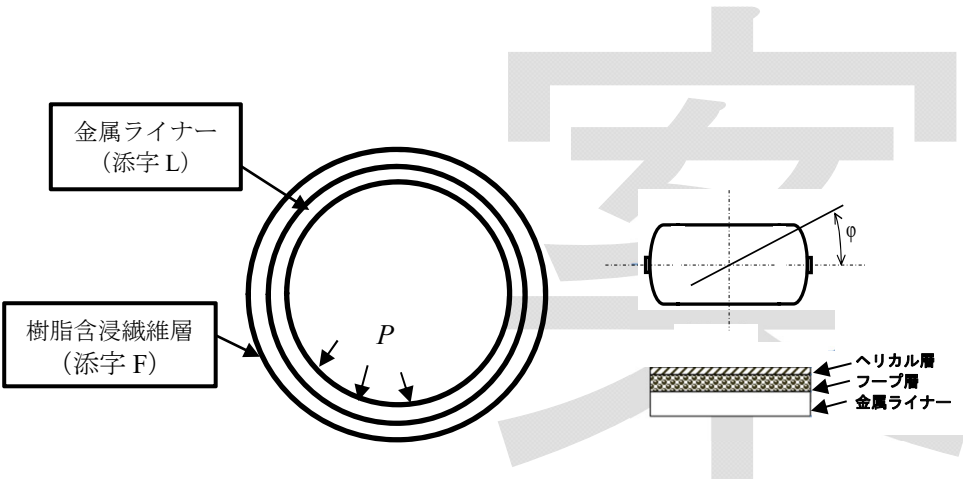


図 C.1—複合圧力容器のモデル
(円筒胴の横断面)

図 C.2—樹脂含浸繊維層の構成

	厚さ t	角度 φ
フープ層	t_f	$\varphi = 90^\circ$ (参考)
ヘリカル層	t_h	φ : 任意
樹脂含浸繊維層	$t_F = t_f + t_h$	

- P : 圧力 (MPa)
 P_D : 複合圧力容器の設計圧力 (MPa)
 P_B : 複合圧力容器の破裂圧力 (MPa)
 P_L : 金属ライナーが分担する圧力 (MPa)
 P_F : 樹脂含浸繊維層が分担する圧力 (MPa)
 R : 複合圧力容器の代表半径 (mm)
 R_i : 複合圧力容器 (金属ライナー) の内半径 (mm)
 R_o : 複合圧力容器の外半径 (mm)
 φ : 樹脂含浸繊維層のヘリカル巻きの繊維方向と軸方向がなす角度 ($^\circ$)
 t_L : 金属ライナーの厚さ (mm)
 t_f : フープ層の厚さ (mm)

t_h : ヘリカル層の厚さ (mm)
 t_F : 樹脂含浸繊維層の厚さ (mm) ($t_F = t_f + t_h$)
 E_L : 金属ライナーの縦弾性係数 (N/mm²)
 E_F : 樹脂含浸繊維層の繊維方向縦弾性係数 (N/mm²)
 E_f : 樹脂含浸繊維層の繊維の繊維方向縦弾性係数 (N/mm²)
 $E_{\theta F}$: 樹脂含浸繊維層の周方向等価縦弾性係数 (N/mm²)
 E_{zF} : 樹脂含浸繊維層の軸方向等価縦弾性係数 (N/mm²)
 V_f : 樹脂含浸繊維層の繊維の体積含有率 (%)
 ν_L : 金属ライナーのポアソン比 (弾性変形の場合は 1/3, 塑性変形の場合は 1/2)
 ν_F : 樹脂含浸繊維層のポアソン比 (適切な文献値を使用する。一例としては 0.25~0.304)
 $\sigma_{\theta L}$: 金属ライナーの周方向応力 (N/mm²)
 σ_{zL} : 金属ライナーの軸方向応力 (N/mm²)
 $\sigma_{\theta F}$: 樹脂含浸繊維層の周方向応力 (N/mm²)
 σ_{zF} : 樹脂含浸繊維層の軸方向応力 (N/mm²)
 σ_Y : 設計温度における金属ライナーの降伏強度 (降伏点又は 0.2%耐力) (N/mm²)
 σ_a : 設計温度における金属ライナーの許容引張応力 (N/mm²)
 σ_{eq} : 相当応力 (N/mm²)
 $\varepsilon_{\theta L}$: 金属ライナーの周方向ひずみ
 ε_{zL} : 金属ライナーの軸方向ひずみ
 $\varepsilon_{\theta F}$: 樹脂含浸繊維層の周方向ひずみ
 ε_{zF} : 樹脂含浸繊維層の軸方向ひずみ
 ε_{θ} : 複合圧力容器の周方向ひずみ
 ε_z : 複合圧力容器の軸方向ひずみ
 ε_r : 複合圧力容器の径方向ひずみ
 ε : 複合圧力容器のひずみ (圧力-ひずみ関係の表示)
 ε_Y : 設計温度における金属ライナーの降伏ひずみ
 α : 自緊処理において金属ライナーの変形を設定する定数

C.2.2 材料の構成方程式

C.2.2.1 金属ライナー

ライナーを構成する金属は、等方等質の弾完全塑性体を仮定する。構成方程式は、式(C.1)及び式(C.2)による。

$$\sigma_L < \sigma_Y \quad \text{の場合} \quad \sigma_L = E_L \varepsilon_L \quad \dots \dots \dots (C.1)$$

$$\sigma_L \geq \sigma_Y \quad \text{の場合} \quad \sigma_L = \sigma_Y \quad \dots \dots \dots (C.2)$$

C.2.2.2 樹脂含浸繊維層

a) 縦弾性係数

樹脂含浸繊維層は、繊維と樹脂で構成される。樹脂含浸繊維層の縦弾性係数の算出には、複合則を

適用するが、繊維の繊維方向縦弾性係数は樹脂の縦弾性係数よりも十分に大きいため、樹脂含浸繊維層の繊維方向縦弾性係数 E_F は、式(C.3)で近似できる。

$$E_F = E_f V_f \quad \dots \dots \dots (C.3)$$

式(C.3)では、樹脂含浸繊維層の繊維直角方向の縦弾性係数をゼロと見做している。

b) 縦弾性係数の異方性

樹脂含浸繊維層は、フープ層とヘリカル層で構成されるため、樹脂含浸繊維層の周方向等価縦弾性係数 $E_{\theta F}$ と軸方向等価縦弾性係数 E_{zF} には異方性がある。 $E_{\theta F}$ 及び E_{zF} は、式(C.4)及び式(C.5)による。

$$E_{\theta F} = \frac{E_F t_f + E_F \sin^2 \varphi t_h}{t_f + t_h} \quad \dots \dots \dots (C.4)$$

$$E_{zF} = E_F \cos^2 \varphi \quad \dots \dots \dots (C.5)$$

C.2.3 周方向の基礎式

以下、複合圧力容器の円筒胴は、両端閉じを仮定する。周方向の基礎式は、次の a)～e)による。

a) ひずみ

1) 金属ライナー ($\varepsilon_{\theta L}$)

$$\varepsilon_{\theta L} = \frac{2\pi(R + \Delta R) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\sigma_{\theta L}}{E_L} \quad \dots \dots \dots (C.6)$$

2) 樹脂含浸繊維層 ($\varepsilon_{\theta F}$)

$$\varepsilon_{\theta F} = \frac{2\pi(R + \Delta R) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\sigma_{\theta F}}{E_{\theta F}} \quad \dots \dots \dots (C.7)$$

3) 複合圧力容器 (ε_{θ})

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta L} = \varepsilon_{\theta F} = \frac{\sigma_{\theta L}}{E_L} = \frac{\sigma_{\theta F}}{E_{\theta F}} \quad \dots \dots \dots (C.8)$$

b) 力の釣り合い

$$PR = \sigma_{\theta L} t_L + \sigma_{\theta F} t_F \quad \dots \dots \dots (C.9)$$

c) 応力

1) 金属ライナー ($\sigma_{\theta L}$)

$$\sigma_{\theta L} = \frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} PR \quad \dots \dots \dots (C.10)$$

2) 樹脂含浸繊維層 ($\sigma_{\theta F}$)

$$\sigma_{\theta F} = \frac{E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} PR \quad \dots \dots \dots (C.11)$$

d) 圧力の分担

$$P = \frac{\sigma_{\theta L} t_L}{R} + \frac{\sigma_{\theta F} t_F}{R} = P_L + P_F \quad \dots \dots \dots (C.12)$$

e) 圧力－ひずみ関係 (P - ε_θ)

$$P = \frac{t_L E_L}{R} \varepsilon_{\theta L} + \frac{t_F E_F}{R} \varepsilon_{\theta F} = \frac{t_L E_L + t_F E_F}{R} \varepsilon_\theta \quad \dots \dots \dots (C.13)$$

C.2.4 軸方向の基礎式

軸方向の基礎式は、次の a)～e)による。

a) ひずみ

1) 金属ライナー (ε_{zL})

$$\varepsilon_{zL} = \frac{(z + \Delta z) - z}{z} = \frac{\Delta z}{z} = \frac{\sigma_{zL}}{E_L} \quad \dots \dots \dots (C.14)$$

2) 樹脂含浸繊維層 (ε_{zF})

$$\varepsilon_{zF} = \frac{(z + \Delta z) - z}{z} = \frac{\Delta z}{z} = \frac{\sigma_{zF}}{E_{zF}} \quad \dots \dots \dots (C.15)$$

3) 複合圧力容器 (ε_z)

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{zL} = \varepsilon_{zF} = \frac{\sigma_{zL}}{E_L} = \frac{\sigma_{zF}}{E_{zF}} \quad \dots \dots \dots (C.16)$$

b) 力の釣り合い

$$P \pi R^2 = 2 \pi R \sigma_{zL} t_L + 2 \pi R \sigma_{zF} t_F \quad \dots \dots \dots (C.17)$$

c) 応力

1) 金属ライナー (σ_{zL})

$$\sigma_{zL} = \frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{zF}} \frac{P R}{2} \quad \dots \dots \dots (C.18)$$

2) 樹脂含浸繊維層 (σ_{zF})

$$\sigma_{zF} = \frac{E_{zF}}{t_L E_L + t_F E_{zF}} \frac{P R}{2} \quad \dots \dots \dots (C.19)$$

d) 圧力の分担

$$P = \frac{2 \sigma_{zL} t_L}{R} + \frac{2 \sigma_{zF} t_F}{R} = P_L + P_F \quad \dots \dots \dots (C.20)$$

e) 圧力－ひずみ関係 (P - ε_z)

$$P = \frac{2t_L E_L}{R} \varepsilon_{zL} + \frac{2t_F E_{zF}}{R} \varepsilon_{zF} = \frac{2(t_L E_L + t_F E_{zF})}{R} \varepsilon_z \quad \dots \dots \dots (C.21)$$

C.2.5 平面応力の基礎式

平面応力の基礎式は、周方向の基礎式及び軸方向の基礎式から、次の **a)～e)** による。

a) 平面応力の一般的な基礎式 (σ_θ 及び σ_z , $\sigma_r=0$)

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu \frac{\sigma_z}{E_z} \quad \dots \dots \dots (C.22)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} - \nu \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} \quad \dots \dots \dots (C.23)$$

$$\varepsilon_r = -\nu \left(\frac{\sigma_\theta}{E_\theta} + \frac{\sigma_z}{E_z} \right) \quad \dots \dots \dots (C.24)$$

b) 金属ライナーの応力 (σ_θ 及び σ_z)

1) 樹脂含浸繊維層による応力の低減

金属ライナーの周方向応力 $\sigma_{\theta L}$ 及び軸方向応力 σ_{zL} は、式(C.10)及び式(C.18)に示した。式(C.10)及び式(C.18)より、樹脂含浸繊維層の等価縦弾性係数 $E_{\theta F}$ 及び E_{zF} が等しければ、金属ライナーの周方向応力 $\sigma_{\theta L}$ 及び軸方向応力 σ_{zL} の比 $\sigma_{zL}/\sigma_{\theta L}$ は、式(C.25)に示すように 1/2 である。

$$\frac{\sigma_{zL}}{\sigma_{\theta L}} = \left(\frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{zF}} \frac{PR}{2} \right) / \left(\frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} PR \right) = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{zF}} \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \quad \dots \dots \dots (C.25)$$

したがって、樹脂含浸繊維層の軸方向等価縦弾性係数 E_{zF} を周方向等価弾性係数 $E_{\theta F}$ より小さくすれば、次に示すように、 $\sigma_{zL}/\sigma_{\theta L}$ を 1/2 以上にすることができる。

$$\frac{E_{zF}}{E_{\theta F}} < 1 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_{zL}}{\sigma_{\theta L}} > \frac{1}{2}$$

2) 等二軸応力状態 ($\sigma_{\theta L} = \sigma_{zL}$)

金属ライナーが等二軸応力状態となる条件は、式(C.10)と式(C.18)を等置することにより得られ、式(C.26)となる。

$$t_L E_L + t_F E_{\theta F} = 2(t_L E_L + t_F E_{zF})$$

$$\frac{E_{zF}}{E_{\theta F}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t_L E_L}{t_F E_{\theta F}} \right) \quad \dots \dots \dots (C.26)$$

式(C.26)では、次の近似が成立する。

$$t_L E_L \ll t_F E_{\theta F} \quad \rightarrow \quad \frac{t_L E_L}{t_F E_{\theta F}} \div 0$$

したがって、金属ライナーの等二軸応力状態の条件式は、式(C.27)となる。

$$E_{zF} = \frac{E_{\theta F}}{2} \quad \dots \dots \dots (C.27)$$

以上をまとめると、金属ライナーの等二軸応力は、式(C.28)~式(C.30)となる。

$$\sigma_{\theta L} = \frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} PR \quad \dots \dots \dots (C.28)$$

$$\sigma_{zL} = \frac{E_L}{t_L E_L + (t_F E_{\theta F})/2} \frac{PR}{2} \quad \dots \dots \dots (C.29)$$

$$\sigma_{\theta L} \doteq \sigma_{zL} \quad \dots \dots \dots (C.30)$$

c) 樹脂含浸繊維層の応力 ($\sigma_{\theta F}$ 及び σ_{zF})

樹脂含浸繊維層の周方向応力 $\sigma_{\theta F}$ 及び軸方向応力 σ_{zF} は、式(C.11)及び式(C.19)に示した。ここで、式(C.8)及び式(C.16)が成立する。さらに、式(C.30)を考慮すれば、式(C.31)が成立する。

$$\sigma_{\theta F} \doteq 2\sigma_{zF} \quad \dots \dots \dots (C.31)$$

d) 金属ライナーの降伏条件

次の **1)**で等二軸応力状態を仮定し、**2)**でトレスカの降伏条件及び **3)**でミーゼスの降伏条件を検討し、この結果から **4)**に適用する降伏条件を示す。

1) 応力状態

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_{zL} \quad , \quad \sigma_{rL} = 0 \quad \dots \dots \dots (C.32)$$

2) トレスカの降伏条件

$$\sigma_{eq} = \sigma_{\theta L} - \sigma_{rL} = \sigma_{\theta L} = \sigma_Y \quad \dots \dots \dots (C.33)$$

3) ミーゼスの降伏条件

$$2\sigma_{eq}^2 = \{(\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL})^2 + (\sigma_{zL} - \sigma_{rL})^2 + (\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L})^2\} = \sigma_{zL}^2 + \sigma_{\theta L}^2 = 2\sigma_{\theta L}^2$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_{\theta L} = \sigma_Y \quad \dots \dots \dots (C.34)$$

4) 降伏条件

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_Y \quad \dots \dots \dots (C.35)$$

e) 等二軸応力の基礎式

等二軸応力の基礎式は、次の **1)~4)**による。

1) 金属ライナー ($\sigma_{\theta L} = \sigma_{zL}$)

弾性領域

$$\varepsilon_{\theta L} = \frac{\sigma_{\theta L}}{E_L} - \nu_L \frac{\sigma_{zL}}{E_L} = \frac{1 - \nu_L}{E_L} \sigma_{\theta L} \quad \dots \dots \dots (C.36)$$

塑性領域

$$\nu_L = \frac{1}{2} \dots \dots \dots (C.37)$$

2) 樹脂含浸繊維層 ($\sigma_{\theta F} = 2\sigma_{zF}$)

$$\varepsilon_{\theta F} = \frac{\sigma_{\theta F}}{E_{\theta F}} - \nu_F \frac{\sigma_{zF}}{E_{zF}} = \frac{\sigma_{\theta F}}{E_{\theta F}} - \nu_F \frac{\sigma_{zF}}{E_{\theta F}/2} = \frac{1-\nu_F}{E_{\theta F}} \sigma_{\theta F} \dots \dots \dots (C.38)$$

3) 複合圧力容器

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta L} = \varepsilon_{\theta F} \dots \dots \dots (C.39)$$

4) 圧力-ひずみ関係

C.2.3 の式(C.13)に示した圧力-ひずみ関係 (P - ε_{θ}) が, 複合圧力容器の圧力-ひずみ関係 (P - ε) の式(C.40)となる。

$$P = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon_{\theta} = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon \dots \dots \dots (C.40)$$

C.2.6 圧力-ひずみ線図

複合圧力容器の圧力-ひずみ線図を, 金属ライナーと樹脂含浸繊維層の圧力分担を併記して, 模式的に図 C.3 に示す。複合圧力容器の圧力-ひずみ線図を, 以下の 5 つの状態に分類する。

- 状態 1: 弾性負荷
- 状態 2: 金属ライナーの降伏
- 状態 3: 金属ライナーの自緊処理
- 状態 4: 弾性除荷
- 状態 5: 再負荷

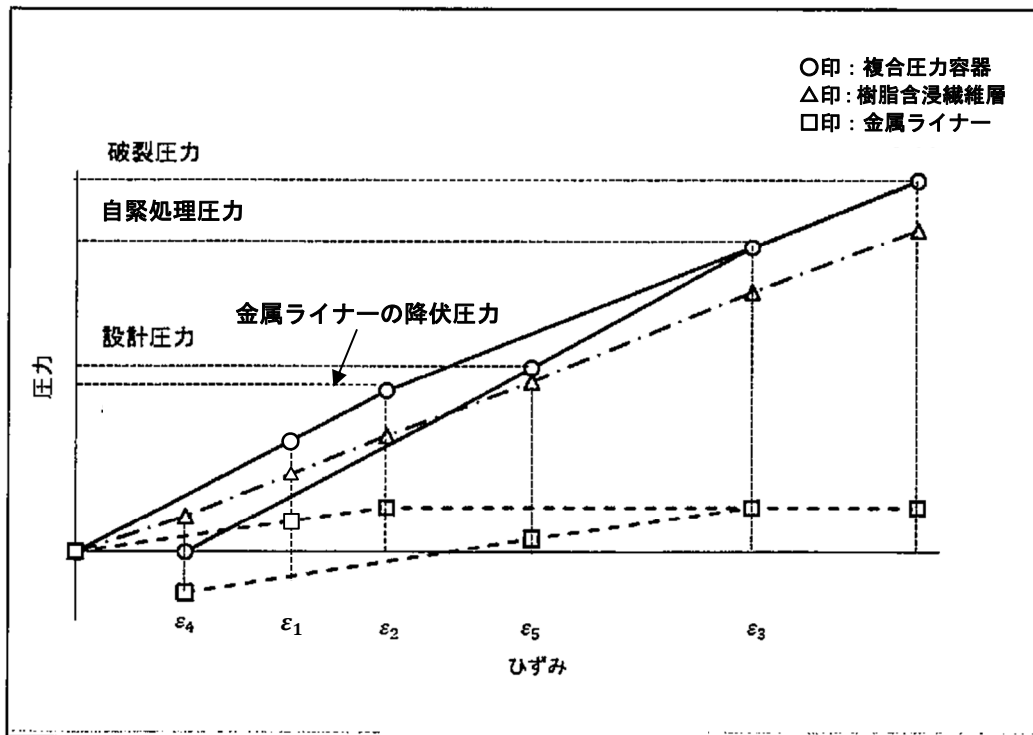


図 C.3—複合圧力容器の圧力-ひずみ線図

各状態の圧力-ひずみ関係は、次の a)～e)による。添字は各状態の記号を意味する。

a) 状態 1

状態 1 は、圧力を負荷した状態であり、金属ライナーは弾性状態に留まるため、圧力-ひずみ関係の式(C.41)は、式(C.40)と同じである。

$$P_1 = \frac{t_L E_L + t_F E_{0F}}{R} \varepsilon \quad \dots \dots \dots (C.41)$$

b) 状態 2

状態 2 は、金属ライナーが降伏を開始した状態であり、圧力-ひずみ関係は、式(C.42)による。

$$\sigma_{L2} = \sigma_{\theta L} = \sigma_{zL} = \sigma_Y$$

$$\varepsilon_{L2} = \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E_L}$$

$$P_2 = \frac{t_L E_L + t_F E_{0F}}{R} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.42)$$

c) 状態 3

状態 3 は、金属ライナーの自緊処理であり、自緊処理で設定する金属ライナーのひずみを、降伏ひずみの α 倍に式(C.43)で規定する。圧力-ひずみ関係は、式(C.44)による。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{L3} = \varepsilon_{F3} = \alpha \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.43)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{L3} &= E_L \varepsilon_Y \\ \sigma_{F3} &= \frac{E_{0F}}{1-\nu_F} \varepsilon_{0F} = \frac{E_{0F}}{1-\nu_F} \varepsilon_{F3} = \frac{\alpha E_{0F}}{1-\nu_F} \varepsilon_Y \\ P_3 &= \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{R} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.44)\end{aligned}$$

d) 状態 4

1) 状態 3 を始点とする圧縮弾性負荷

状態 3 の圧力を P_3 ，状態 3 からの圧力除荷分を ΔP ，ひずみの減少分を $\Delta \varepsilon$ とする。圧力－ひずみ関係は，式(C.45)による。

$$\begin{aligned}P_3 &= \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{R} \varepsilon_Y \\ -\Delta P &= -\frac{t_L E_L + t_F E_{0F}}{R} \Delta \varepsilon \\ P_3 - \Delta P &= \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{R} \varepsilon_Y - \frac{t_L E_L + t_F E_{0F}}{R} \Delta \varepsilon \quad \dots \dots \dots (C.45)\end{aligned}$$

2) 完全除荷

状態 3 の圧力が完全に除荷された場合は，式(C.45)がゼロになる。

$$\begin{aligned}P_3 - \Delta P &= 0 \\ \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{R} \varepsilon_Y &= \frac{t_L E_L + t_F E_{0F}}{R} \Delta \varepsilon \\ \text{ひずみの減少分 } \Delta \varepsilon &\text{は，式(C.46)による。} \\ \Delta \varepsilon &= \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{t_L E_L + t_F E_{0F}} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.46)\end{aligned}$$

3) 完全除荷後の残留ひずみ

状態 3 のひずみ ε_3 は式(C.43)，ひずみの減少分 $\Delta \varepsilon$ は式(C.46)である。したがって，完全除荷後の残留ひずみ ε_4 は，式(C.47)による。

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon = \alpha \varepsilon_Y - \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{t_L E_L + t_F E_{0F}} \varepsilon_Y = \frac{(\alpha-1) t_L E_L}{t_L E_L + t_F E_{0F}} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.47)$$

4) 完全除荷後の圧力分担

$$\begin{aligned}P_{L4} &= \frac{t_L E_L}{R} (\varepsilon_Y - \Delta \varepsilon) = \frac{t_L E_L}{R} \varepsilon_Y - \frac{t_L E_L}{R} \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{0F}}{t_L E_L + t_F E_{0F}} \varepsilon_Y \\ &= -\frac{(\alpha-1) t_L E_L t_F E_{0F}}{R(t_L E_L + t_F E_{0F})} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.48)\end{aligned}$$

$$P_{F4} = \frac{t_F E_{\theta F}}{R} (\alpha \varepsilon_Y - \Delta \varepsilon) = \frac{\alpha t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon_Y - \frac{t_F E_{\theta F}}{R} \frac{t_L E_L + \alpha t_F E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} \varepsilon_Y$$

$$= \frac{(\alpha - 1) t_L E_L t_F E_{\theta F}}{R(t_L E_L + t_F E_{\theta F})} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.49)$$

$$P_{L4} + P_{F4} = 0 \quad \dots \dots \dots (C.50)$$

5) 完全除荷後の残留応力

状態 4 における残留応力 (周方向) は, 式(C.48)及び式(C.49)から, 式(C.51)及び式(C.52)による。

$$\sigma_{\theta L} = \frac{P_{L4} R}{t_L} = \frac{R}{t_L} \left\{ - \frac{(\alpha - 1) t_F E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} \frac{t_L E_L}{R} \varepsilon_Y \right\} = - \frac{(\alpha - 1) t_F E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} E_L \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.51)$$

$$\sigma_{\theta F} = \frac{P_{F4} R}{t_F} = \frac{R}{t_F} \left\{ \frac{(\alpha - 1) t_L E_L}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} \frac{t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon_Y \right\} = \frac{(\alpha - 1) t_L E_L}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} E_{\theta F} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.52)$$

$$\sigma_{\theta L} t_L + \sigma_{\theta F} t_F = 0 \quad \dots \dots \dots (C.53)$$

6) 完全除荷後に金属ライナーが圧縮降伏しない条件

$$|\sigma_{L4}| < E_L \varepsilon_Y$$

$$\frac{(\alpha - 1) t_F E_{\theta F}}{t_L E_L + t_F E_{\theta F}} E_L \varepsilon_Y < E_L \varepsilon_Y$$

$$\alpha - 1 < \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{t_F E_{\theta F}}$$

$$\alpha < 2 + \frac{t_L E_L}{t_F E_{\theta F}} \quad \dots \dots \dots (C.54)$$

e) 状態 5

状態 5 は, 再負荷であり, 状態 4 の残留ひずみを考慮する場合の圧力-ひずみ関係は **1)**に, 考慮しない場合は **2)**による。

1) 完全除荷後の残留ひずみ ε_4 を考慮する場合

$$P_5 = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{R} (\varepsilon - \varepsilon_4) = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon - \frac{(\alpha - 1) t_L E_L}{R} \varepsilon_Y \quad \dots \dots \dots (C.55)$$

2) 完全除荷後の残留ひずみ ε_4 を考慮しない場合

$$P_5 = \frac{t_L E_L + t_F E_{\theta F}}{R} \varepsilon \quad \dots \dots \dots (C.56)$$

C.2.7 薄肉の修正式の適用

一般の圧力容器の規格では, 薄肉と厚肉の間に薄肉の修正式を適用 (参考文献[4]) して, 薄肉の式と厚肉の式の連続性を保っている。この場合, 複合圧力容器の代表半径 R は, 式(C.57)による。

$$R = R_i + 0.6(t_L + t_F) \quad \dots \dots \dots (C.57)$$

複合压力容器に対しても、式(C.57)を適用する。式(C.57)の適用範囲は $0 < (t_L + t_F)/R_i \leq 0.5$ であるため、薄肉の修正式が適用される複合压力容器の内外径比 R_o/R_i の範囲は、 $R_o = R_i + (t_L + t_F)$ より、式(C.58)となる。

$$\frac{R_o}{R_i} = 1 + \frac{t_L + t_F}{R_i} \leq 1.5 \quad \dots \dots \dots (C.58)$$

C.3 判定基準

C.3.1 一般

5.2.4 には、応力解析結果の判定基準が規定されている。C.3.2～C.3.4 の判定基準は、5.2.4 と整合している。

C.3.2 複合压力容器の判定基準

a) 複合压力容器の破裂圧力 P_B

5.6.2 a)に従い、複合压力容器の破裂圧力 P_B を破裂試験で測定する。

b) 複合压力容器の設計圧力 P_D

複合压力容器の設計圧力 P_D は、式(C.59)による。

$$P_D \leq \frac{P_B}{2} \quad \dots \dots \dots (C.59)$$

設計圧力 P_D をまず設定して、破裂試験において設計圧力 P_D の2倍を超える圧力を負荷し、破裂しないことを確認してもよい。

C.3.3 金属ライナーの判定基準

a) 金属ライナーが圧縮降伏しない条件

状態4で、完全除荷後に金属ライナーが圧縮降伏しない条件より、自緊処理時に金属ライナーの変形を設定する定数 α は、式(C.60)による。

$$\alpha < 2 + \frac{t_L E_L}{t_F E_{0F}} \quad \dots \dots \dots (C.60)$$

b) 金属ライナーの判定基準

複合压力容器の設計圧力を P_D とすると、金属ライナーの応力は、 $\sigma_{\theta L}$ は式(C.28)及び式(C.61)、 σ_{zL} は式(C.29)及び式(C.62)による。

$$\sigma_{\theta L} = \frac{E_L}{t_L E_L + t_F E_{0F}} P_D R \quad \dots \dots \dots (C.61)$$

$$\sigma_{zL} = \frac{E_L}{t_L E_L + (t_F E_{0F})/2} \frac{P_D R}{2} \quad \dots \dots \dots (C.62)$$

設計圧力及び設計温度における金属ライナーの許容引張応力 σ_a は、式(C.63)による。

$$\sigma_a = \sigma_Y \quad \dots \dots \dots (C.63)$$

したがって、金属ライナーの判定基準は、式(C.64)及び式(C.65)となる。

$$\sigma_{\theta L} < \sigma_a \quad \dots \dots \dots (C.64)$$

$$\sigma_{zL} < \sigma_a \quad \dots \dots \dots (C.65)$$

C.3.4 樹脂含浸繊維層の判定基準

樹脂含浸繊維層とそれを構成する繊維の判定基準は、特に設定しない。C.3.2 に示す複合圧力容器の判定基準に包括される。

C.4 計算例

C.4.1 薄肉の式の適用確認

附属書 C は薄肉の式を用いているため、内半径 R_i を一定値 77.581mm として、金属ライナー及び樹脂含浸繊維層の厚さを変化させ、内半径 R_i 又は代表半径 R (式(C.57)) を用いて、内圧 P を負荷した場合の薄肉の式の適用可能性を確認した(参考文献[4])。結果を表 C.1 に示す。表 C.1 の例題 1 は、金属ライナーの内半径及び厚さを、NEDO 報告書(参考文献[5]) の 7.5L タイプ 3 複合圧力容器と同じとしている。表 C.1 中の $\sigma_{\theta}/P(R_i)$ は内半径 R_i を用いた薄肉の周方向応力、 $\sigma_{\theta}/P(R)$ は代表半径 R を用いた薄肉の周方向応力、 $\sigma_{\theta}/P(\text{Lamé})$ は厚肉円筒の内径に発生する周方向応力である。複合圧力容器を厚肉円筒とした場合の周方向応力を正確に求めるためには、各層の境界条件を考慮した連立一次方程式を解く必要があるが(参考文献[6])、表 C.1 は相対比較が目的なので、薄肉及び厚肉ともに、等方性弾性の式を用いている。

表 C.1 より、 R_o/R_i が 1.3 程度までは、 $\sigma_{\theta}/P(R_i)$ と $\sigma_{\theta}/P(\text{Lamé})$ はまずまずの一致が得られているが、それ以上では両者の差は無視できない。一方、代表半径を用いた場合は、 R_o/R_i が 2.0 でも $\sigma_{\theta}/P(R)$ と、 $\sigma_{\theta}/P(\text{Lamé})$ の一致は良好である。

表 C.1—薄肉の式の適用可能性

t_L (mm)	2.032 ^[5]	2.032	6.096	8.128	19.202	25.542
t_f (mm)	3.0	6.0	9.0	14.2	18.0	24.0
t_h (mm)	3.5	7.0	10.5	16.5	21.0	28.0
t_F (mm)	6.5	13.0	19.5	30.7	39.0	52.0
R_i (mm)	77.581 ^[5]	77.581	77.581	77.581	77.581	77.581
R_o (mm)	86.113	92.613	103.177	116.389	135.783	155.123
R (mm)	82.7	86.6	92.9	100.9	112.5	124.1
R_o/R_i	1.110	1.194	1.330	1.500	1.750	2.000
R/R_i	1.066	1.116	1.194	1.300	1.450	1.600
$\sigma_{\theta}/P(R_i)$	9.09	5.16	3.03	2.00	1.33	1.00
$\sigma_{\theta}/P(R)$	9.69	5.76	3.63	2.60	1.93	1.60
$\sigma_{\theta}/P(\text{Lamé})$	9.62	5.71	3.60	2.60	1.97	1.67
備考	例題 1	—				

実際の複合蓄圧器の例として、NEDO 報告書（参考文献[5]）に示されている、金属ライナーの内半径及び厚さが表 C.1 のケース 1 より大きな 76L タイプ 3 複合圧力容器を取り上げ、内半径 R_i 又は代表半径 R を用いて、内圧 P を負荷した場合の薄肉の式の適用可能性を確認した。結果を表 C.2 に示す。表 C.2 中の $\sigma_\theta/P(R_i)$ 、 $\sigma_\theta/P(R)$ 及び $\sigma_\theta/P(\text{Lamé})$ は、表 C.1 と同じである。NEDO 報告書（参考文献[5]）には樹脂含浸繊維層（81 層）の厚さは示されていないが、仮に 29.5mm 程度とすると、 $R_o/R_i=1.323$ 、 $R/R_i = 1.194$ となり、内半径を用いた薄肉の式が使用できる限度近くの厚さとなっている。

表 C.2—内半径 R_i を変化した場合の薄肉の式の適用可能性

t_L (mm)	2.032 ^[5]	17.7 ^[5]
t_F (mm)	6.5	29.5 (推定)
R_i (mm)	77.581 ^[5]	146.0 ^[5]
R_o (mm)	86.113	193.2
R (mm)	82.7	174.3
R_o/R_i	1.110	1.323
R/R_i	1.066	1.194
$\sigma_\theta/P(R_i)$	9.09	3.093
$\sigma_\theta/P(R)$	9.69	3.693
$\sigma_\theta/P(\text{Lamé})$	9.62	3.663
備考	例題 1 (表 C.1 再録)	NEDO 報告書 76L タイプ (参考文献[5])

C.4.2 例題 1

複合圧力容器の圧力-ひずみ線図を図 C.3 に再録する。附属書 C の手順に従って、表 C.1 の例題 1 について、圧力-ひずみ線図の状態 1~状態 5 を計算した例を、表 C.4~表 C.9 に示す。計算例は、内半径 R_i （識別記号 1a）及び代表半径 R （識別記号 1b）の両方を用いた計算結果を比較するが、表 C.1 に示すように、設計では、内半径 R_i 又は代表半径 R のどちらを用いてもよい。以下の数値の説明は、内半径 R_i の結果である。

計算に用いた複合圧力容器の各材料の機械的性質を、表 C.3 に示す。設計圧力 P_D は 40MPa、ヘリカル角度は 15° である。

表 C.3—各材料の機械的性質

対象	項目	金属ライナー	樹脂含浸繊維層	注記
	材料	アルミニウム合金 (6061-T6)	炭素繊維	—
例題 1	縦弾性係数 ($1\,000 \times \text{N/mm}^2$)	69 (E_L)	255 (E_f) 165.8 (E_F) 82.5 ($E_{\theta F}$)	式(C.3) 式(C.4)
	ポアソン比 (—)	0.33 (ν_L)	0.28 (ν_F)	—
	繊維体積含有率 (V_f) (%)	—	65	—
	ヘリカル角度 ($^\circ$)	—	15	—
	降伏強度 (N/mm^2)	303 (σ_Y)	—	—
	降伏ひずみ ($\varepsilon_Y = \sigma_Y/E_L$) (%)	0.439	—	—
	許容引張応力 ($\sigma_a = \sigma_Y$) (N/mm^2)	303	—	式(C.61)

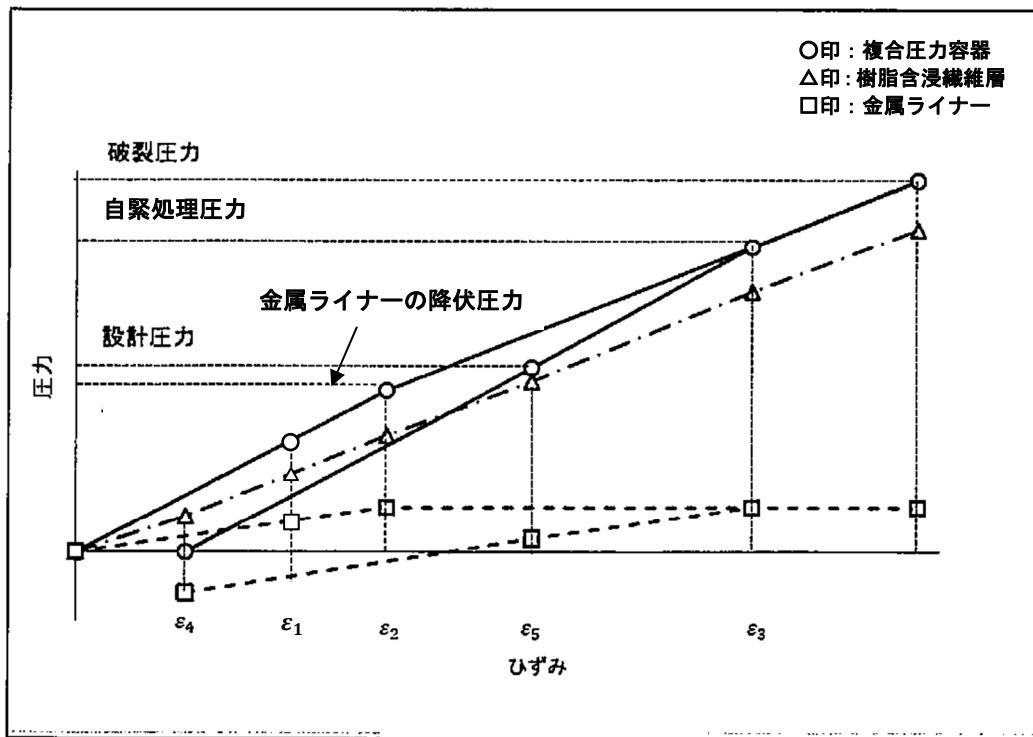


図 C.3—複合圧力容器の圧力-ひずみ線図（再録）

表 C.4 は、状態 1（弾性負荷）及び状態 2（金属ライナーの降伏）の計算結果である。降伏ひずみ ε_Y は 0.439% なので金属ライナーは圧力 38.3MPa で降伏を開始する。

表 C.4—状態 1（弾性負荷）及び状態 2（金属ライナーの降伏）

対象	ケース 1a		ケース 1b	
	P_1 (MPa)	ε_1 (%)	P_1 (MPa)	ε_1 (%)
状態 1	17.4	0.200	16.4	0.200
	34.9	0.400	32.7	0.400
状態 2	38.3	0.439 (ε_Y)	35.9	0.439 (ε_Y)

自緊処理において金属ライナーの変形を設定する α の値は、完全除荷後に金属ライナーが圧縮降伏しない条件（式(C.54)）で規定され、例題 1 は 2.26 未満となる。計算例で用いた α の値を、表 C.5 に示す。

表 C.5—金属ライナーの変形を設定する α

対象	$2 + (t_L E_L / t_F E_{0F})$	計算で使用した α	備考
例題 1a, 1b	2.26	2.25	式(C.54)

表 C.6 は、金属ライナーの自緊処理及び自緊処理で負荷された圧力が完全除荷された計算結果である。表 C.7 は、完全除荷後の残留応力の計算結果で、表 C.6 に対応して、残留応力は釣り合っている。

表 C.6ー状態 3（金属ライナーの自緊処理）及び状態 4（完全除荷後）

対象	α	ε_3 (%)	P_3 (MPa)	ΔP (MPa)	$\Delta\varepsilon$ (%)	ε_4 (%)	P_{L4} (MPa)	P_{F4} (MPa)	備考
例題 1a	2.25	0.988	76.2	76.2	0.874	0.114	-7.86	7.86	式(C.44)~
例題 1b			71.5	71.5			-7.38	7.38	式(C.50)

表 C.7ー状態 4（完全除荷後の残留応力）

対象	α	$\sigma_{\theta L}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\theta F}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\theta L}t_L + \sigma_{\theta F}t_F$	備考
例題 1a, 1b	2.25	-300.2	93.9	0.0	式(C.51)~式(C.53)

自緊処理時の係数 α は設計で設定する値で、表 C.5 に示すように上限が定められるが、アルミニウム合金の場合は、参考文献[3]では、実際の容器設計において 2.0~3.0 の範囲になることが予想されるとしている。 α を大きく設定し、金属ライナーの塑性変形量が大きくなると、除荷した際に金属ライナーの圧縮応力が高くなり、金属ライナーの座屈又は圧縮降伏が懸念される。 α が小さいと、完全除荷後に十分な圧縮残留応力が得られない。 α の設定値の下限は 2.0 である。

表 C.8 は、完全除荷後で残留応力がある状態に、再負荷で設計圧力 P_D (40MPa) を与えた計算結果である。例題 1 では、 $\sigma_{\theta L}$ は判定基準を満足しない。ただし、圧縮残留応力を考慮すれば（式(C.55)参照），判定基準を満足する。判定基準は保守的に設定されている。金属ライナーと樹脂含浸繊維層の厚さを変化させれば、適切な形状の複合圧力容器を設計できる。

表 C.8ー設計圧力における判定基準（金属ライナー）

対象	α	$\sigma_{\theta L}$ (N/mm ²)			σ_{zL} (N/mm ²)	σ_a (N/mm ²)	備考
		残留応力	設計応力	和			
例題 1a	2.25	-300.2	316.6	16.4	262.2	303	式(C.61)
例題 1b		-300.2	337.4	37.2	279.5		~式(C.65)

C.4.3 例題 2

複合圧力容器の圧力-ひずみ線図中の各状態について、参考文献[7]を基に、FEM 解析で求めた金属ライナーの周方向応力及び周方向ひずみを附属書 C の計算式と比較した結果を以下に示す。FEM 解析に用いた金属ライナーの形状を図 C.4、複合圧力容器の設計仕様を表 C.9 及び各材料の機械的性質を表 C.10 に示す。表 C.10 中の自緊処理時の係数 α は、FEM 解析と附属書 C の計算結果を整合させるために、2.1 とした。FEM 解析の詳細は、参考文献[7]を参照願いたい。

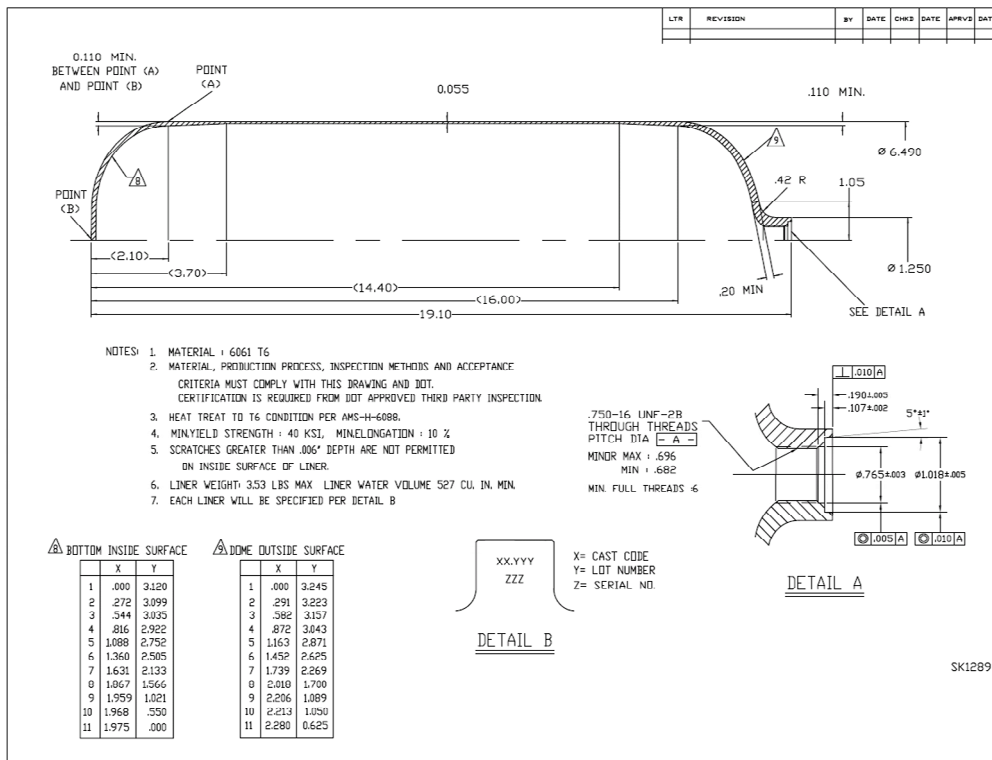


図 C.4—金属ライナーの形状

表 C.9—複合圧力容器の設計仕様

金属ライナー 内径 R_i (mm)	81.1
複合圧力容器 外径 R_o (mm)	85.23
金属ライナー 厚さ t_L (mm)	1.4
樹脂含浸繊維層 厚さ t_F (mm)	2.73 (1.59 (t_f)) + 1.14 (t_h))
代表半径 R (mm)	83.578
R_o / R_i	1.051
最高充填圧力 (MPa)	15
自緊処理圧力 (MPa)	27.5

表 C.10—各材料の機械的性質

対象	項目	金属ライナー	樹脂含浸繊維層	
			FEM 解析 ^[7]	附属書 C
	材料	アルミニウム合金 (6061-T6)	炭素繊維 (T700SC-24K-50C)	
例題 2	縦弾性係数 (1 000×N/mm ²)	68.647 (E_L)	230 (E_f)	230 (E_f) 149.5 (E_F) 91.8 (E_{0F})
	接線係数(E_p) (1 000×N/mm ²)	0.35	—	
	ポアソン比 (—)	0.33 (ν_L)	0.28 (ν_F)	
	繊維体積含有率 (V_f) (%)	—	65	
	ヘリカル角度 (°)	—	16	
	降伏強度 (σ_Y) (N/mm ²)	280	—	—
	降伏ひずみ ($\epsilon_Y = \sigma_Y/E_L$) (%)	0.408	—	—
	自緊処理時の係数 α	—	—	2.1

図 C.5 に、各状態における金属ライナーの周方向応力及び周方向ひずみを示す。図中の実線は、負荷開始から状態 2（金属ライナーの降伏）、状態 3（自緊処理）を経て状態 4（完全除荷）までの FEM 解析結果、赤破線は状態 4（完全除荷）後に圧縮残留応力がある状態から設計圧力が負荷された状態 5（再負荷）までの FEM 解析結果、図中の点線及び●印は、FEM 解析に対応する代表半径を用いた附属書 C の計算結果である。

図 C.5 より、FEM 解析と附属書 C の計算結果はよく一致しており、附属書 C の有用性が示されている。

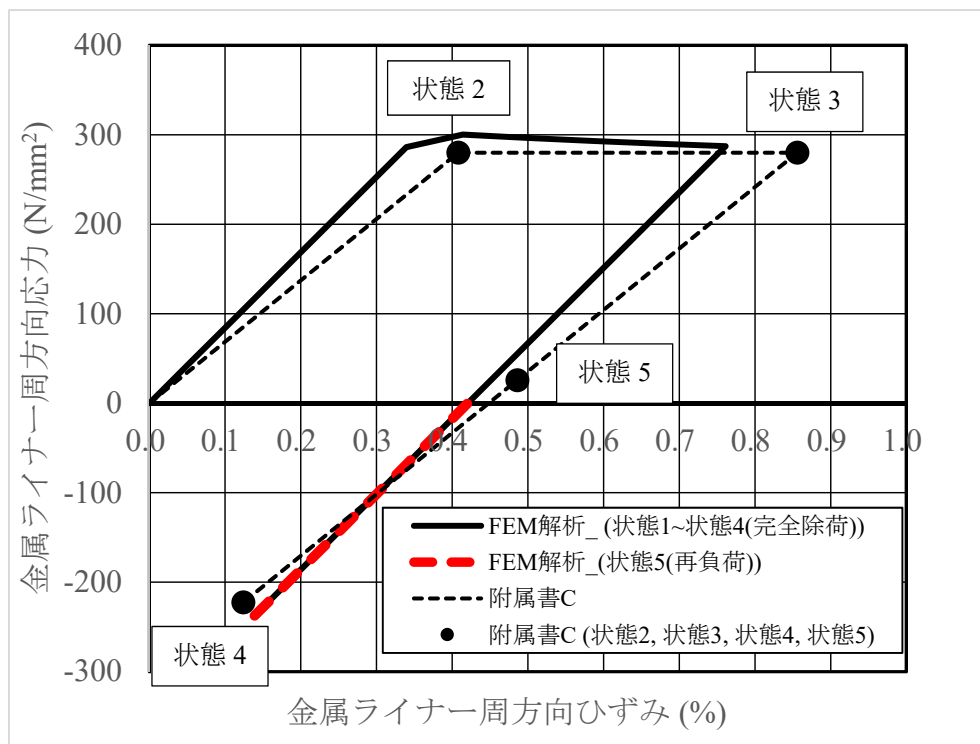


図 C.5—各状態における金属ライナーの周方向応力及び周方向ひずみ

参考文献

- [1] 小林英男, “複合容器の公式による設計における定式化”, 圧力技術, Vol.62, No.3, pp.106~114, 2004
- [2] 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構, 宇宙用高圧ガス機器技術基準 JERG-0-001F, (2021)
- [3] 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構, 宇宙用高圧ガス機器技術基準 解説書 JERG-0-003F, (2021)
- [4] 小林英男 (編著), JIS 使い方シリーズ 新版 圧力容器の構造と設計 JIS B 8265:2017 及び JIS B 8267:2015, 3.3.4 公式による設計の基礎, pp.85~90, 日本規格協会, 2018
- [5] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2018 年度~2022 年度成果報告書「複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」
- [6] 例えば, 岡本伸吾, 小村勇樹, 横川清志, 福山誠司, 直交異方性-弾塑性材料で造られた多層構造

タンクの三軸応力解析（第 1 報，等方性-弾塑性材料と直交異方性-弾性材料で造られた二層構造タンク），Transactions of JSCEs, Paper No.20040011, 2004

- [7] 石油ガス供給事業安全管理技術開発・指導普及事業（技術開発事業）に関する報告書，昭和 60 年～平成 2 年，「流通合理化のための軽量容器の開発」

案

附属書 D
(規定)
複合圧力容器の自緊処理の効果の評価方法

D.1 適用範囲

この附属書では、複合圧力容器の疲労寿命解析において、自緊処理の効果（圧縮残留応力）の評価方法の複数の例を示す。圧縮残留応力が正確に評価できる場合に限り、その効果を取り入れてもよい。

D.2 金属ライナーの破面観察による方法

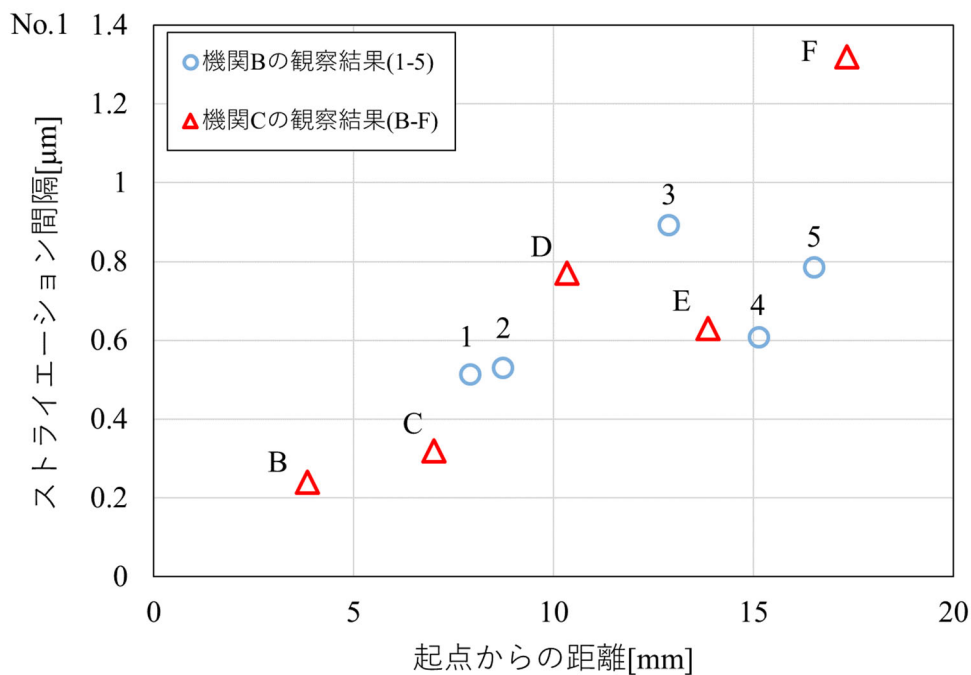
複合圧力容器の自緊処理の応力解析（5.2.3 c)1)参照）において、金属ライナーと樹脂含浸炭素繊維層は密着し、隙間がないと仮定されてきた。しかし、実際には隙間があり、隙間の大きさが自緊処理の効果に影響を及ぼす。応力解析において、隙間を設定し、隙間の大きさをパラメータとして、金属ライナーの残留応力分布を得る。この結果に基づき、圧力サイクルによる亀裂進展解析を行い、これと同じ試験条件の破面情報と照合し、応力解析で設定する隙間（結果としての残留応力分布）の妥当性を検証する。次の a)～k)に手順を示す。

- a) 自緊処理の弾塑性有限要素解析を、隙間の大きさをパラメータとして行い、金属ライナーの厚さ方向の残留応力分布を得る。
- b) 圧力サイクルによる応力分布の変動を、弾性解析する。
- c) 亀裂がない場合の a)の平均応力と b)の応力範囲を、亀裂進展解析の負荷条件とする。
- d) KHKS 0220 の 8 亀裂進展解析に従い、初期亀裂寸法を設定し、亀裂進展解析を行う。
- e) 金属ライナーの亀裂進展解析には、樹脂含浸炭素繊維層の拘束の影響（コンプライアンス変化）を考慮する。
- f) 亀裂進展解析の結果を、半楕円表面亀裂の亀裂進展速度と亀裂深さの関係として表示する。
- g) 解析対象の複合圧力容器の圧力サイクル試験を解析条件で行う。試験は漏洩するまで行い、漏洩箇所が胴部であることを確認する。
- h) 複合圧力容器の金属ライナーの破面を切り出し、破面観察を行う。
- i) 破面観察の結果を、ストライエーション間隔と亀裂深さ（厚さ方向の位置）の関係として表示する。破面観察結果の例を、表 D.1 及び図 D.1 に示す（参考文献[1]）。
- j) f)の結果と i)の結果を照合し、両者が一致する隙間の大きさを、弾塑性解析の設定値とする。
- k) 妥当性が検証された隙間の設定値は、同一仕様の複合圧力容器で同一自緊条件の場合に、個別に検証することなく適用可能である。また、個別の検証の場合に、図 D.1 の結果を利用可能である。

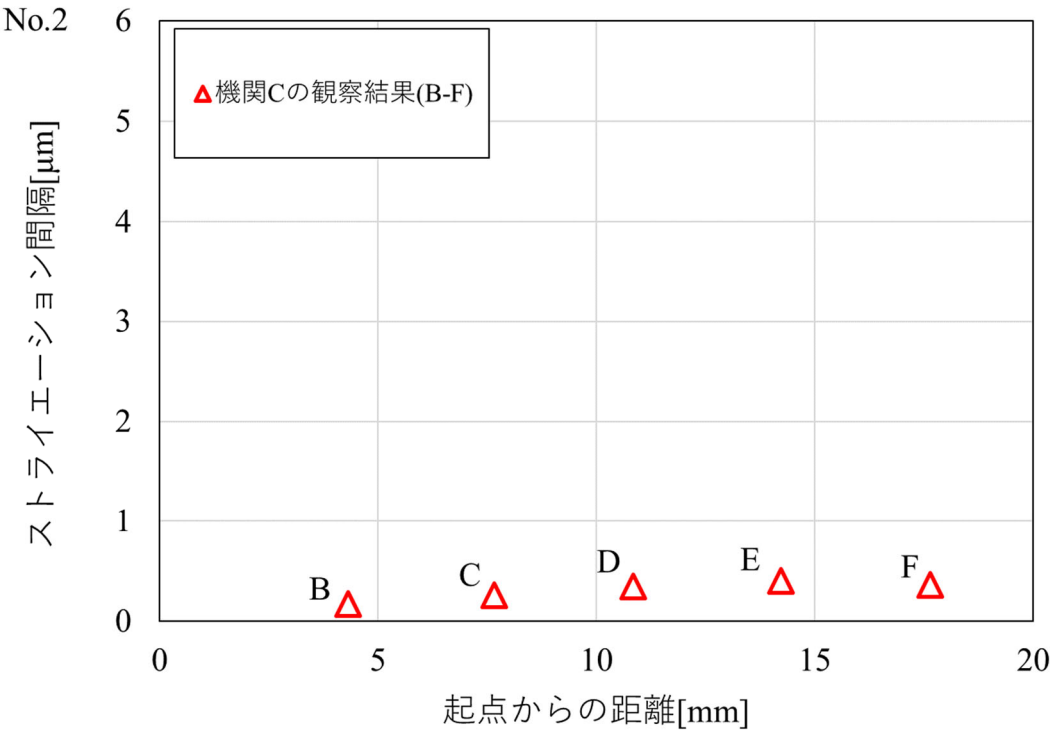
表 D.1－破面観察を行った試験体 ^{a)} の試験条件

試験体番号	自緊圧力 (MPa)	圧力範囲 (MPa)	破損サイクル回数
No.1	197 (100%)	0～89	111 177
No.2	197 (100%)	50～89	364 624
No.3	197 (100%)	50～89	390 746
No.3	197 (100%)	69～89	827 494
No.5	183 (93%)	0～89	137 549
No.6	167 (85%)	0～89	55 248
Mo.7	167 (85%)	20～89	94 367

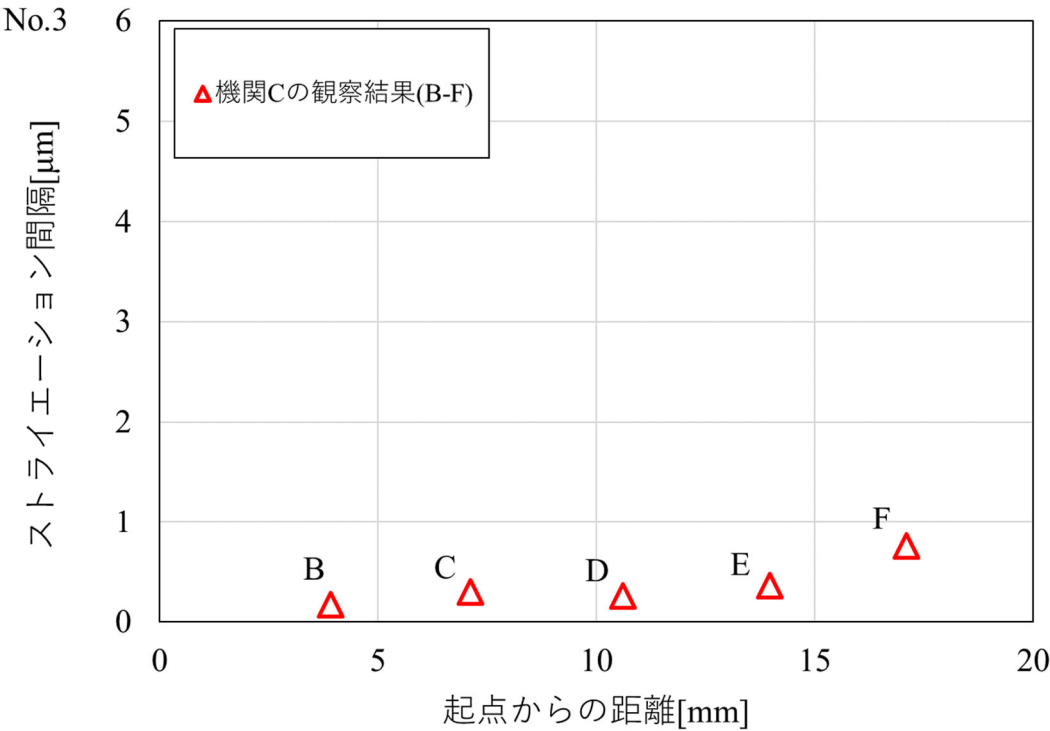
注 ^{a)} 試験体の仕様は以下の通りである。
 内容積：約 76L，設計圧力：99MPa，最小破裂圧力：223MPa 以上
 自緊圧力：197MPa (100%)，縛試験体寸法：外径 458.7mm，全長 1 520mm
 破損形態：胴部を起点とする破裂前漏洩



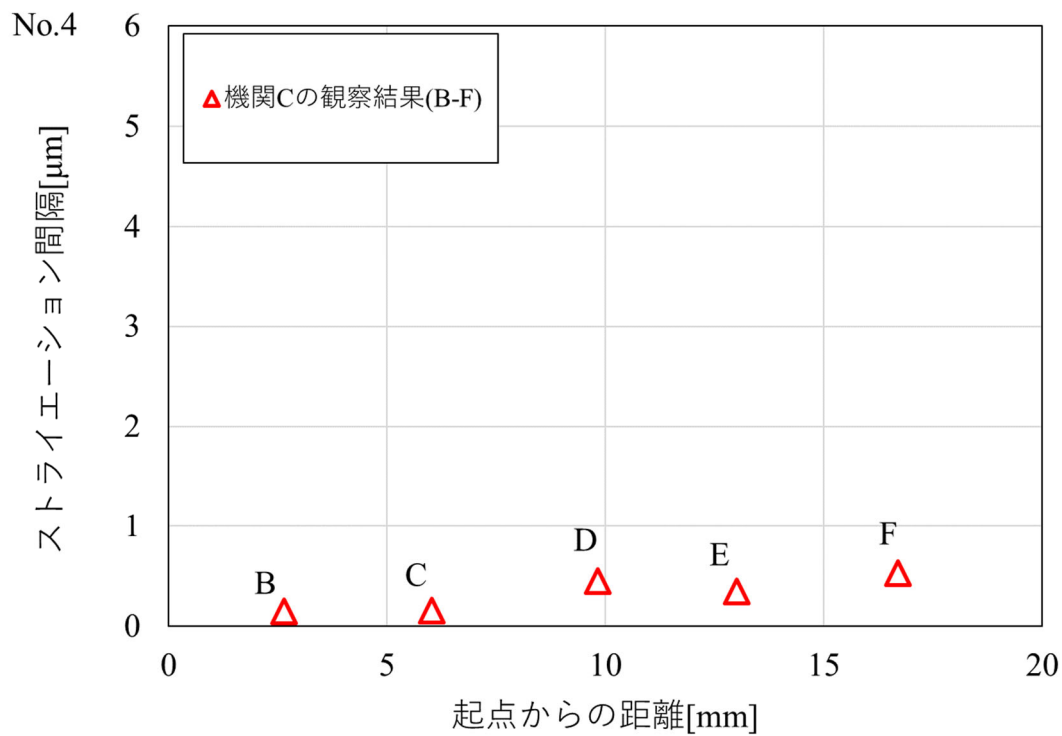
a) 試験体 No.1



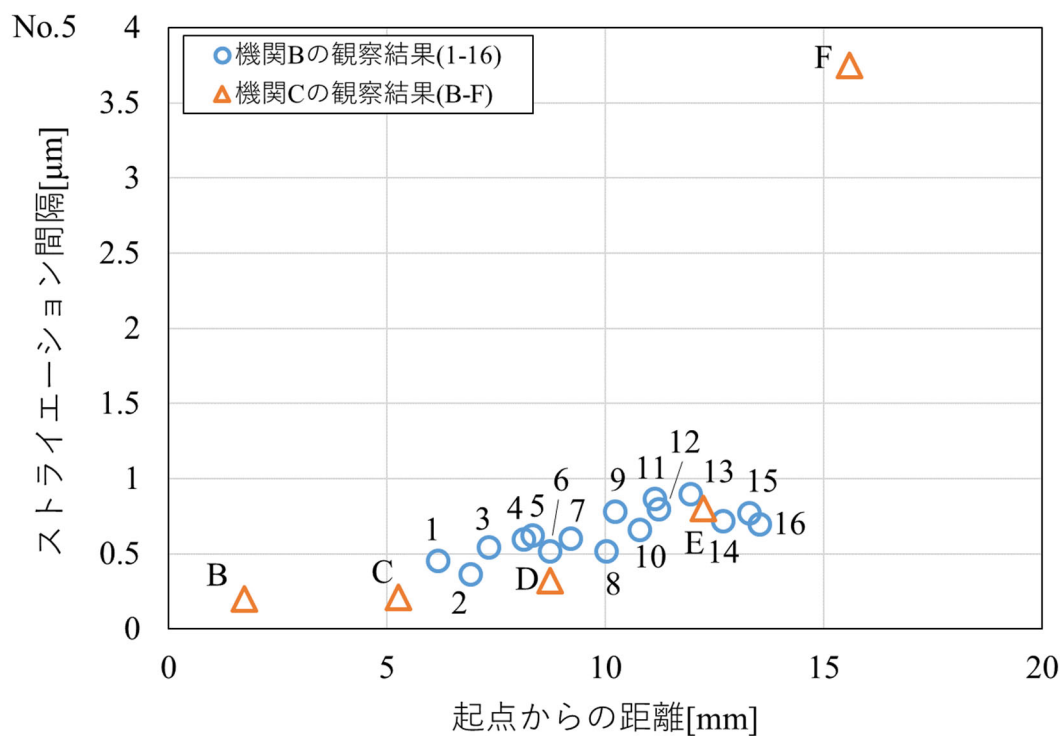
b) 試験体 No.2



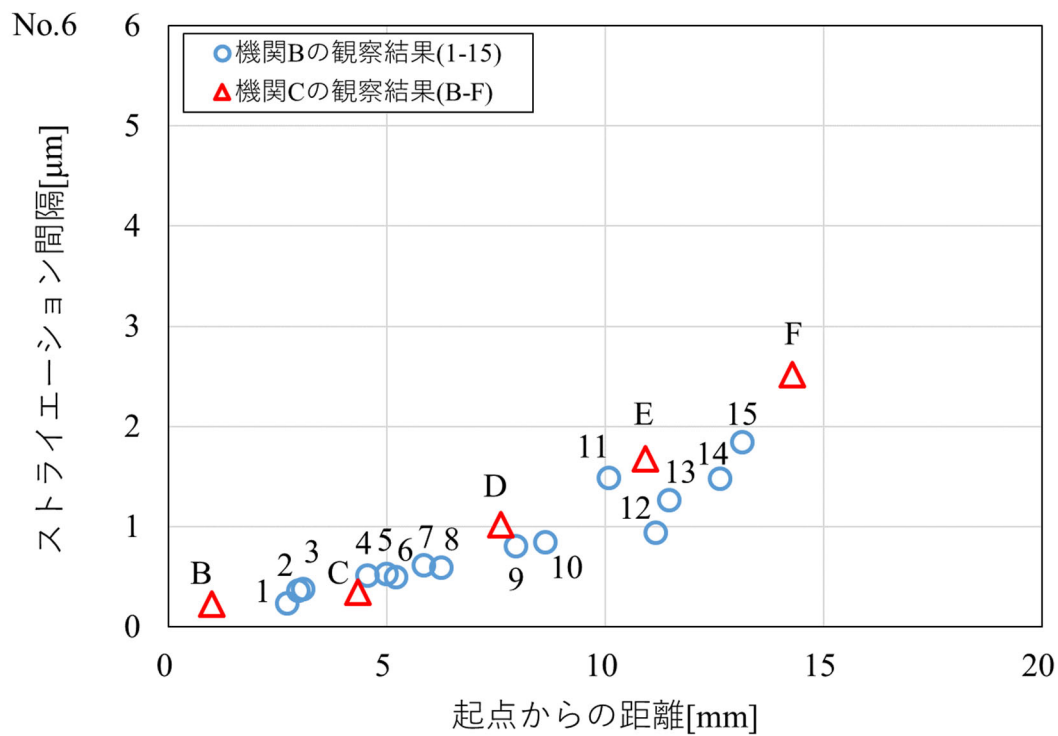
c) 試験体 No.3



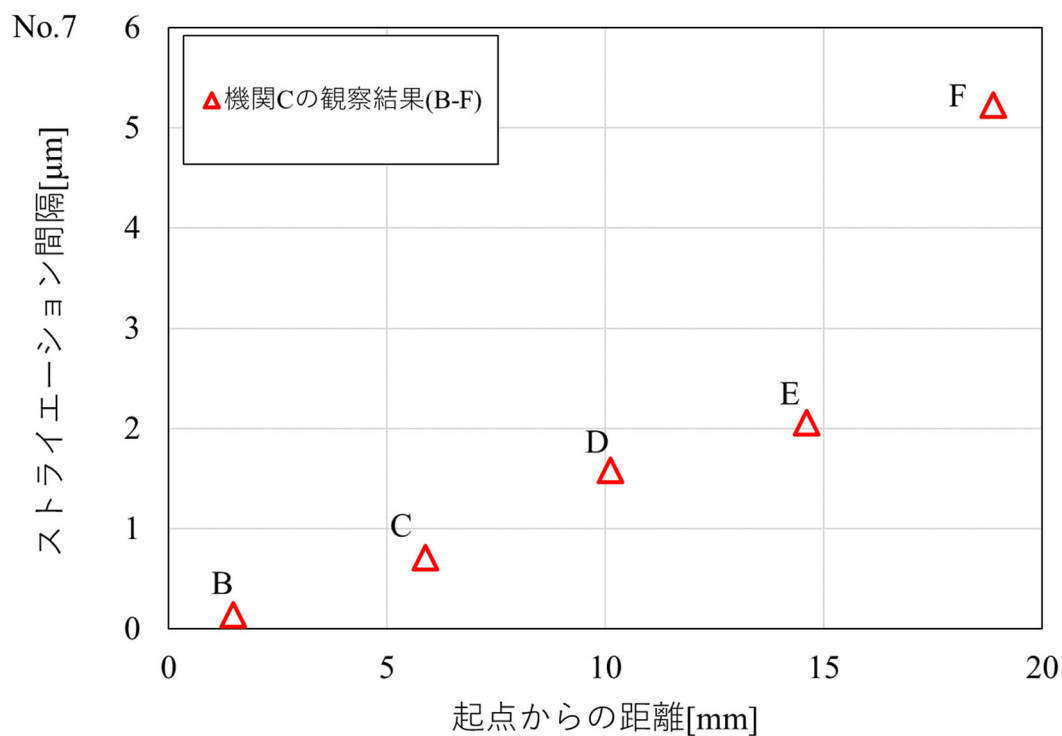
d) 試験体 No.4



e) 試験体 No.5



f) 試験体 No.6



g) 試験体 No.7

図 D.1—ストライエーション間隔と起点からの距離の関係（機関 B：KHK，機関 C：JPEC）

D.3 金属ライナー内面のひずみ計測による方法

複合圧力容器の自緊処理の応力解析（5.2.3 c)1)参照）の結果を、自緊処理後の複合圧力容器を切断し、解放される金属ライナー内面のひずみを計測した結果と照合し、応力解析の妥当性を検証する。次の a)～d)に手順を示す。

- 自緊処理の弾塑性有限要素解析を行い、金属ライナーの厚さ方向の残留応力分布を得る。
- 自緊処理後に、解析対象の複合圧力容器の金属ライナー内面において、軸方向の中央で、周方向に 90° 間隔の 4 箇所にひずみゲージを貼付する（図 D.2 参照）。
- 複合圧力容器の金属ライナーを切断し、解放ひずみを計測する。
- a)の結果と c)の結果を照合し、解析の妥当性を検証する。

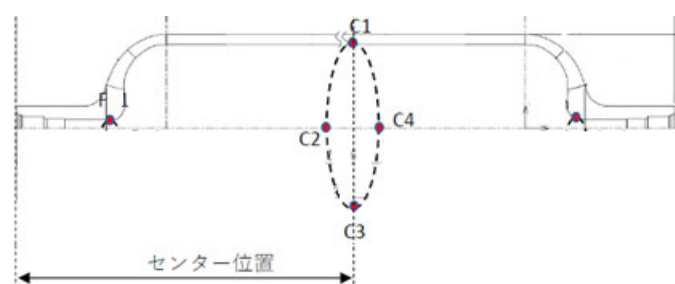


図 D.2—ひずみゲージの貼付位置

D.4 樹脂含浸炭素繊維層外面のひずみ計測による方法

複合圧力容器の自緊処理の応力解析（5.2.3 c)1)参照）の結果を、自緊処理時の樹脂含浸炭素繊維層外面のひずみを計測した結果と照合し、応力解析の妥当性を検証する。次の a)～d)に手順を示す。

- 自緊処理の弾塑性有限要素解析を行い、自緊処理圧力と、樹脂含浸炭素繊維層外面のひずみの関係を得る。
- 自緊処理前に、解析対象の複合圧力容器の樹脂含浸炭素繊維層外面において、軸方向の中央で、周方向に 90° 間隔の 4 箇所にひずみゲージを貼付する（図 D.2 参照。ただし外面）。
- 自緊処理時に、樹脂含浸炭素繊維層外面のひずみを計測する。
- a)の結果と c)の結果を照合し、解析の妥当性を検証する。

参考文献

- [1] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），“2018～2022 年度成果報告書 超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発”，pp.46（図 1-1-43），pp.114～115（表 1-4-5），pp.130（表 1-5-3 及び表 1-5-4）

附属書 E (規定) 複合圧力容器の疲労損傷度の算出方法

E.1 適用範囲

この附属書では、水素ステーションにおける複数の充填圧力サイクルを対象として、複合圧力容器の疲労損傷度を算出する方法を規定する。

E.2 圧力範囲

圧力範囲は、次の a) 及び b) による。

a) 圧力サイクル試験における圧力範囲

5.6.3 の圧力サイクル試験における圧力範囲（試験圧力の 10% 以下から試験圧力（常用の圧力） $P_{\max}$ まで）を、 $\Delta P_{\max}$ とする。 $\Delta P_{\max}$ の試験サイクル回数（疲労寿命）が、 $N_{\max}$ である。

b) 水素ステーションにおける充填圧力サイクルの圧力範囲

水素ステーションで使用する蓄圧器において、実際の充填圧力サイクルの圧力範囲は、圧力サイクル試験の圧力範囲と異なる。圧力サイクル試験の圧力サイクルをフル充填サイクルという。水素ステーションの充填圧力サイクルは、蓄圧器にフル充填した後に、車両に水素を充填（消費）し、蓄圧器に十分な残圧がある状態で、再充填することを繰り返す。これを部分充填サイクルという。

部分充填サイクルの圧力範囲は、下限が残圧 P_i 、上限が充填圧力（常用の圧力） $P_{\max}$ となる。この場合の圧力範囲を、 ΔP_i とする。 ΔP_i のサイクル回数（疲労寿命）が N_i である。 ΔP_i を、式 (E.1) に示す。

$$\Delta P_i = P_{\max} - P_i \quad \dots \dots \dots (E.1)$$

ここで、

ΔP_i : 部分充填サイクルの圧力範囲 (MPa)

$P_{\max}$: 部分充填サイクルの充填圧力（常用の圧力、一定値）(MPa)

P_i : 部分充填サイクルの再充填前の残圧 ($0 \leq P_i \leq P_{\max}$, 一定値) (MPa)

i : P_i が異なる複数の部分充填サイクルがある場合の表示 ($i=1, 2, \dots, n$)

E.3 疲労損傷の定式化

部分充填サイクルの場合は、フル充填サイクルの場合と比較して、圧力範囲の減少（残圧の増大）に伴い、サイクル回数（疲労寿命）は増大する。試験結果を、図 E.1 に示す（参考文献[1]）。図 E.1 の横軸は、フル充填サイクルの場合の $\Delta P_{\max}$ と部分充填サイクルの場合の ΔP_i の比 $\Delta P_{\max} / \Delta P_i$ である。試験条件として P_i を設定すれば、 P_i の増大に伴い ΔP_i は減少し、 $\Delta P_{\max} / \Delta P_i$ は増大する。縦軸は、部分充填サイクルの場合の ΔP_i のサイクル回数（疲労寿命） N_i とフル充填サイクルの場合の $\Delta P_{\max}$ のサイクル回数（疲労寿命） $N_{\max}$ の比 $N_i / N_{\max}$ である。

横軸と縦軸の基点は、 $\Delta P_i / \Delta P_{\max} = 1$ の場合で、 $N_i / N_{\max} = 1.10$ となる。

$N_i / N_{\max}$ は、 $\Delta P_{\max} / \Delta P_i$ の増加に伴い増大する。試験結果を定式化すれば、式 (E.2) が得られる（参考文献[1]）。

$$(N_i / N_{\max}) = 1.10 (\Delta P_{\max} / \Delta P_i)^{1.41} \quad \dots \dots \dots (E.2)$$

式(E.2)を適用すれば、 ΔP_i のサイクル回数（疲労寿命） N_i が予測可能である。

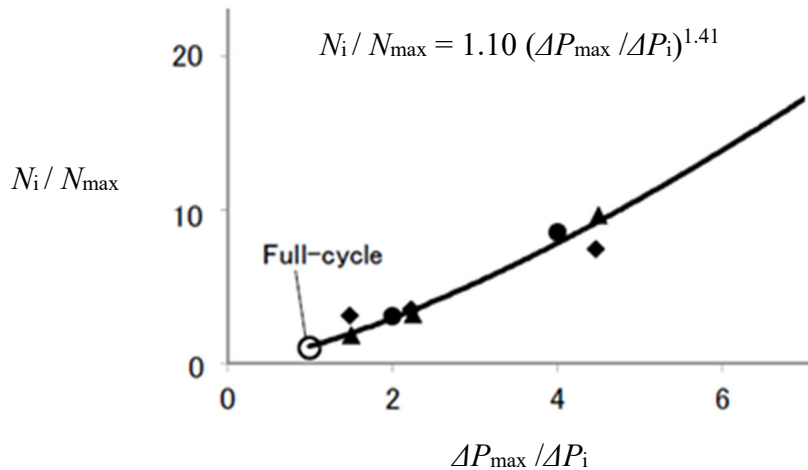


図 E.1—部分充填サイクルの場合の試験結果

E.4 疲労損傷度と許容基準

疲労損傷度と許容基準は、次の a)～d)による。

a) 基本

圧力サイクル試験における圧力範囲 $\Delta P_{\max}$ とサイクル回数（疲労寿命） $N_{\max}$ が、基本となる。

b) 式(E.2)への設計係数の適用

部分充填サイクルの場合の試験結果を定式化した式(E.2)は、統計データの中央値である。

データの分散を考慮し、 ΔP_i のサイクル回数（疲労寿命） N_i の予測には、設計係数 β を適用し、 N_i を減ずる (N_i/β)。

標準偏差 σ の 2σ 及び 3σ に対応する β の値を、表 E.1 に示す。これは、設計者の選択となる。

表 E.1—サイクル回数（疲労寿命） N_i に適用する設計係数 β (σ ：標準偏差)

	2σ	3σ
設計係数	1.40	1.65

c) 部分充填サイクルが単一の場合

部分充填サイクルが単一（ ΔP_i が単一の ΔP_1 ）の場合、式(E.2)に与えられた $(\Delta P_{\max} / \Delta P_i)$ 及び $N_{\max}$ を代入すれば、 ΔP_1 のサイクル回数（疲労寿命） N_1 が得られる。使用繰返し回数を n_1 とすれば、疲労損傷度と許容基準は、式(E.3)である。

$$\frac{n_1}{N_1/\beta} \leq 1 \quad \dots \dots \dots (E.3)$$

d) 部分充填サイクルが複数ある場合

部分充填サイクルが複数 (ΔP_i が複数) ある場合, 式(E.2)に与えられた ($\Delta P_{\max} / \Delta P_i$) 及び $N_{\max}$ を代入すれば, 複数のサイクル回数 (疲労寿命) N_i が得られる。対応する複数の使用繰返し回数を n_i とすれば, 疲労損傷度と許容基準は, 式(E.4)である。

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i/\beta} \leq 1 \quad \dots \dots \dots (E.4)$$

参考文献

- [1] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), “2018～2022 年度成果報告書 超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発”, pp131 (図 1-5-1), pp132 (図 1-5-2)

案

附属書 F (規定)

アルミニウム合金 A6061-T6 の最適疲労曲線と最適亀裂進展速度曲線

F.1 適用範囲

この附属書では、4.1a)及び 4.1b)に示すアルミニウム合金 A6061-T6 の最適疲労曲線と最適亀裂進展速度曲線を規定する。

F.2 最適疲労曲線

F.2.1 荷重制御疲労試験の方法

F.2.1.1 試験の種類

Case 1～Case 3 の 3 種類の試験片を用いて荷重制御の長寿命領域の疲労試験を実施した。

F.2.1.2 Case 1

a) 試験片

Case 1 の供試材及び試験片（参考文献[1]）は、次の 1)～3)による。

- 1) 製造ロットが異なる 6 種類のアルミニウム合金 6061 棒材（JIS H 4040）の軸方向から、試験片を採取した。試験片の軸方向が圧延方向であり、試験片を採取した供試材には T6 処理が施されている。
- 2) 疲労試験の試験片形状は ASTM E466 を参考とした砂時計型で、砂時計部分の表面を #1200 ペーパー仕上げとした。
- 3) 符号 A, C～E を高強度材, B を低強度材という。疲労試験に供試した試験片の機械的性質、疲労試験の応力振幅及び n 数を、表 F.1 に示す。引張試験は JIS Z 2241 に基づき、試験片は 4 号試験片を使用した。

表 F.1—試験片の機械的性質（Case 1）と疲労試験の n 数

符号	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力(N/mm ²)	降伏比	疲労試験	
				応力振幅 (N/mm ²)	n 数
A	354	341	0.963	≤ 290	25
B	299	260	0.869	≤ 230	15
C	389	372	0.956	≤ 297.8	11
D	342	321	0.938	≤ 224.8	6
E	425	412	0.969	≤ 329.6	13
F	318	283	0.889	—	12

b) 試験条件及び試験方法

Case 1 の試験条件及び試験方法は、次の 1)及び 2)による。

- 1) 試験条件は、室温大気中で、完全両振り（応力比 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$ ）の荷重制御である。符号 F の応力比は、 $R=0$, -1.5 , -2 及び -10 であるため、最適疲労試験の作成には使用しないが、参考文献[1]と符号を整合させるため、表 F.1 中に残している。
- 2) 試験の負荷波形は正弦波で、負荷速度は最大 30Hz とした。

F.2.1.3 Case 2

a) 試験片

Case 2 の供試材及び試験片（参考文献[1]）は、次の 1)～3)による。

- 1) 符号 G～I は、アルミニウム合金 6061 板材（JIS H 4000）の長手方向から試験片を切り出した。
符号 J 及び K は、アルミニウム合金 6061 棒材（JIS H 4040）の軸方向から試験片を切り出した。
試験片を採取した供試材には T6 処理が施されている。
- 2) 疲労試験の試験片形状は、符号 G は ASTM E466 を参考とした砂時計型で、砂時計部分の表面を #800 ペーパー仕上げとした。符号 H は直径 6mm、平行部長さ 20mm の平滑丸棒試験片である。符号 I～K も砂時計型で、砂時計部分の表面を #600 の SiC ペーパー仕上げとした。
- 3) 試験片の機械的性質、疲労試験の応力振幅及び n 数を、表 F.2 に示す。符号 G 及び符号 H の引張試験規格は不明だが、符号 I～K の引張試験は JIS Z 2241 に基づき、試験片は 14A 号試験片を使用した。

表 F.2—試験片の機械的性質（Case 2）と疲労試験の n 数

符号	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	降伏比	疲労試験	
				応力振幅 (N/mm ²)	n 数
G	317	279	0.880	≤ 200	4
H	317	279	0.880	≤ 240	9
I	306	293	0.957	≤ 240	17
J	308	295	0.957	≤ 240	16
K	295	260	0.881	≤ 220	16

b) 試験条件及び試験方法

Case2 の試験条件及び試験方法は、次の 1)及び 2)による。

- 1) 試験条件は、室温大気中で、完全両振り（応力比 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$ ）の荷重制御である。
- 2) 試験の負荷波形は正弦波で、負荷速度は符号 G は 15Hz、符号 H は 1Hz（ 2×10^6 回で非破断の場合は、負荷速度を 10Hz に切り替えた。）符号 I～K は 100Hz である。

F.2.1.4 Case 3

a) 試験片

Case 3 の供試材及び試験片（参考文献[2]）は、次の 1)～3)による。

- 1) 製造ロットが異なる 3 種類のアルミニウム合金 6061 継目無管（JIS H 4080）の軸方向及び周方向から試験片を採取した。試験片を採取した供試材には T6 処理が施されているが、符号 L、符号 M 及び符号 N は熱処理条件を変化させた。
- 2) 疲労試験の試験片形状は、軸方向及び周方向共に砂時計型である。
- 3) 試験片の機械的性質、疲労試験の応力振幅及び n 数を、表 F.3 に示す。

表 F.3—試験片の機械的性質（Case 3）と疲労試験の n 数

符号	試験片採取方向	引張強さ (N/mm ²)	疲労試験	
			応力振幅 (N/mm ²)	n 数
L	軸方向	382	≤ 270	30
	周方向	367	≤ 255	10
M	軸方向	350	≤ 255	10
	周方向	329	≤ 225	4
N	軸方向	344	≤ 270	10
	周方向	324	≤ 240	5

b) 試験条件及び試験方法

Case3 の試験条件及び試験方法は、次の 1) 及び 2) による。

- 1) 試験条件は、室温大気中で、完全両振り（応力比 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$ ）の荷重制御である。
- 2) 試験の負荷波形は正弦波で、負荷速度は 15Hz とした。

F.2.2 疲労試験結果

Case 1～Case 3 の荷重制御疲労試験結果を、図 F.1～図 F.4 に示す。図 F.1 及び図 F.2 は Case1 及び Case2 の試験結果である。図 F.3 及び図 F.4 は Case1, Case2 及び Case3 の試験結果である。図 F.1 及び図 F.3 は応力振幅 σ_a と疲労寿命 N_f の関係、図 F.2 及び図 F.4 は応力振幅 σ_a を各試験片の引張強さ σ_u で除した値 (σ_a/σ_u) と疲労寿命 N_f の関係である。疲労試験は、疲労寿命 N_f が $10^4 \sim 10^8$ 回の長寿命領域で行われている。図 F.1～図 F.4 より、T6 処理したアルミニウム合金 6061 は、疲労寿命 N_f が 10^8 回でも明確な疲労限度が見られないこと、引張強さが相対的に低い Case 2 の疲労強度は Case 1 及び Case 3 より低く、疲労強度に対する引張強さの影響が見られることがわかる。

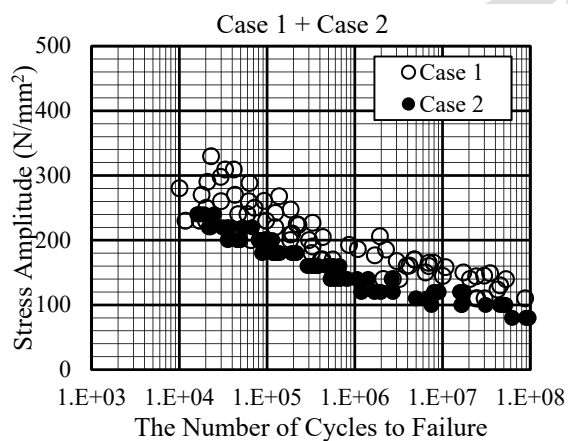


図 F.1—Case 1 及び Case 2 の荷重疲労試験結果
(σ_a と N_f , $R = -1$)

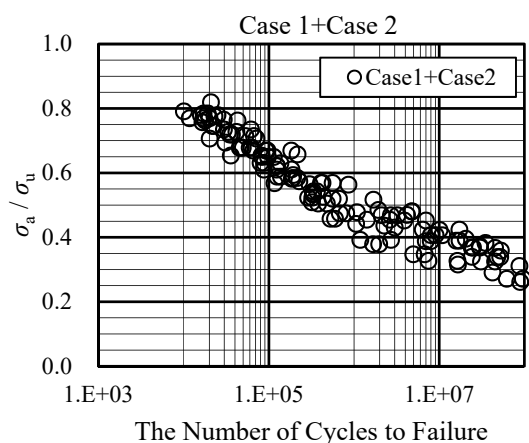


図 F.2—Case 1 及び Case 2 の荷重疲労試験結果
(σ_a/σ_u と N_f , $R = -1$)

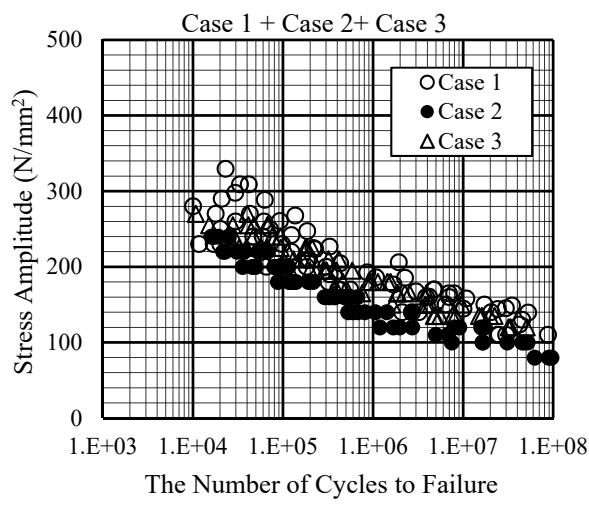


図 F.3—Case 1, Case 2 及び Case 3 の荷重疲労
試験結果 (σ_a と N_f , $R = -1$)

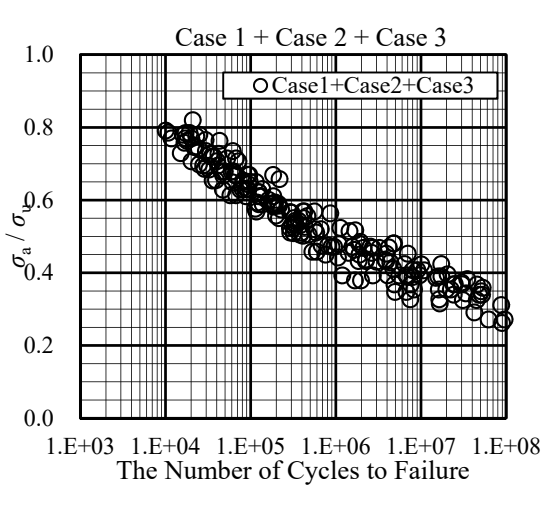


図 F.4—Case 1, Case 2 及び Case 3 の荷重疲労
試験結果 (σ_a / σ_u と N_f , $R = -1$)

F.2.3 最適疲労曲線

T6 処理したアルミニウム合金 6061 の疲労寿命 N_f には引張強さの影響が見られることより、以降は Case 1 + Case 2 + Case 3 の試験結果を用いて、応力振幅 σ_a と疲労寿命 N_f の分布形状を確認する。疲労寿命 N_f には 10^8 回でも明確な疲労限度が見られないことを考慮し、応力振幅 σ_a と疲労寿命 N_f の関係を対数正規分布として、式(F.1)又は式(F.2)と仮定する。

$$\sigma_a = K(N_f)^L \quad \dots \dots \dots (F.1)$$

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right) = \bar{K}(N_f)^L \quad \dots \dots \dots (F.2)$$

式(F.1)又は式(F.2)には係数 K , $\bar{K}$ 及び L が含まれているため、Case 1 + Case 2 + Case 3 の試験結果（全 16 ケース）について、Excel の「近似曲線」オプションを用いて各ケースの係数 K , $\bar{K}$ 及び L の値を求めた。得られた結果を表 F.4 に示す。

表 F.4—冪乗の係数 K , $\bar{K}$ 及び L

Case	符号	引張強さ σ_u (N/mm ²)	式(F.1)		式(F.2)		
			K	L	$\bar{K}$	$\bar{K} \cdot \sigma_u$	L
1	A	354	689.77	-0.095 4	1.948 5	689.77	-0.095 4
	B	299	623.54	-0.100 7	2.085 4	623.54	-0.100 7
	C	389	746.45	-0.095 8	1.916 9	746.45	-0.095 8
	D	342	754.02	-0.101 5	2.204 7	754.02	-0.101 5
	E	425	1 108.70	-0.121 4	2.608 8	1 108.7	-0.121 4
	平均		784.50	-0.103 0	2.152 9	784.50	-0.103 0
2	G	317	934.45	-0.136 6	2.947 8	934.45	-0.136 6
	H	317	899.88	-0.135 8	2.838 7	899.88	-0.135 8
	I	306	858.37	-0.133 0	2.805 1	858.37	-0.133 0
	J	308	722.40	-0.111 6	2.345 4	722.40	-0.111 6
	K	295	651.88	-0.110 1	2.209 8	651.88	-0.110 1
	平均		812.40	-0.125 4	2.629 4	812.40	-0.125 4

3	L 軸	382	818.48	-0.108 5	2.142 6	818.48	-0.108 5
	L 周	367	832.66	-0.115 6	2.268 8	832.66	-0.115 6
	M 軸	350	645.85	-0.094 6	1.845 3	645.85	-0.094 6
	M 周	329	648.67	-0.103 2	1.971 6	648.67	-0.103 2
	N 軸	344	639.55	-0.095 2	1.859 2	639.55	-0.095 2
	N 周	324	618.53	-0.096 0	1.909 0	618.53	-0.096 0
	平均		700.62	-0.102 2	1.999 4	700.62	-0.102 2
総平均		765.84	-0.110 2	2.260 5	765.84	-0.110 2	

表 F.4 より、次の a) 及び b) が得られる。

a) 冪乗の係数 L には大きな差はなく ($-0.136\ 6 \leq L \leq -0.095\ 2$)、全 16 ケースの平均値 (Case1～Case3 の平均値の和を 3 で除して総平均を算出した。) は $L=-0.110\ 2$ である。Case1 及び Case2 の L は $L=-0.12$ 、全 16 ケースが先験的に対数正規分布に従うとして統計処理した場合の係数 L は $L=-0.106\ 8$ で、これらはほぼ同じ値となる。 L は定数と見做することができる。

b) 定数項 $\bar{K}$ にはある程度の幅があり ($1.845\ 3 \leq \bar{K} \leq 2.947\ 8$)、全 16 ケースの平均値 (Case1～Case3 の平均値の和を 3 で除して総平均を算出した。) は 2.260 5 である。Case1 及び Case2 の $\bar{K}$ は $\bar{K}=2.58$ 、全 16 ケースが先験的に対数正規分布に従うとして統計処理した場合は $\bar{K}=2.143\ 3$ で、全 16 ケースの平均値 2.260 5 に近い値となる。定数項 $\bar{K}$ に見られるある程度の幅は、引張強さが相対的に低い Case 2 の疲労強度が影響していると思われるが、 σ_a/σ_u と N_f で整理した図 F.4 では大きなばらつきは見られない。

これらを考慮して、冪乗の係数 L 及び定数項 $\bar{K}$ として共に表 F.4 に示す総平均を使用 (有効数字は 3 桁とする。) して、最適疲労曲線を式(F.3)及び式(F.4)とする。

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right) = 2.26(N_f)^{-0.110} \quad \dots \dots \dots (F.3)$$

$$\log\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right) = -0.110 \log(N_f) + 0.354 \quad \dots \dots \dots (F.4)$$

F.2.4 分布形状の確認

F.2.4.1 応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)

応力振幅 σ_a について、最適疲労曲線の $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{BFC})$ と疲労試験の $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{DATA})$ の差が対数正規分布に適合しているか否かを検討した。

図 F.5 に確率質量関数、図 F.6 に累積部分分布関数及び図 F.7 に正規確率目盛を示す。 $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{BFC}) - \log((\sigma_a/\sigma_u)_{DATA})$ は正規確率目盛での直線性に優れているため、 (σ_a/σ_u) は対数正規分布に従う。

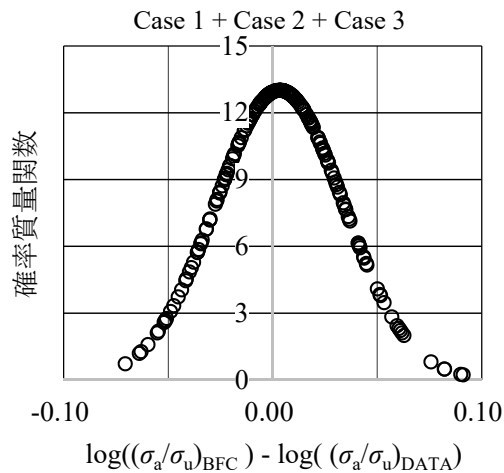


図 F.5— $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{BFC}}) - \log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{DATA}})$ の確率質量関数

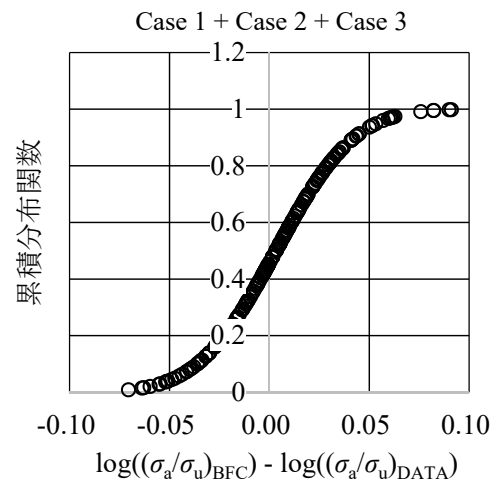


図 F.6— $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{BFC}}) - \log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{DATA}})$ の累積分布関数

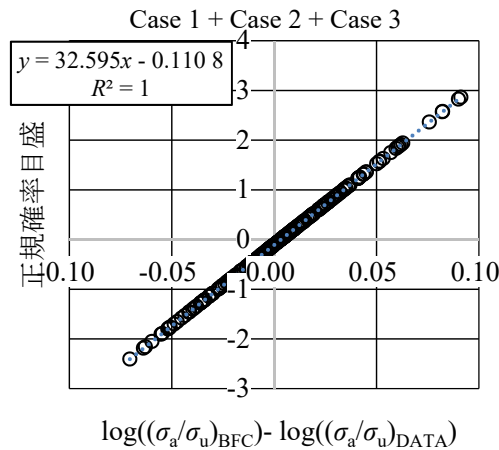


図 F.7— $\log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{BFC}}) - \log((\sigma_a/\sigma_u)_{\text{DATA}})$ の対数正規確率目盛

F.2.4.2 疲労寿命 N_f

疲労寿命 N_f について、最適疲労曲線の $\log((N_f)_{\text{BFC}})$ と疲労試験の $\log((N_f)_{\text{DATA}})$ の差が対数正規分布に適合しているか否かを検討した。図 F.8 に確率質量関数、図 F.9 に累積分布関数及び図 F.10 に対数正規確率目盛を示す。 $\log((N_f)_{\text{BFC}}) - \log((N_f)_{\text{DATA}})$ も正規確率目盛での直線性に優れているため、 N_f は対数正規分布に従う。

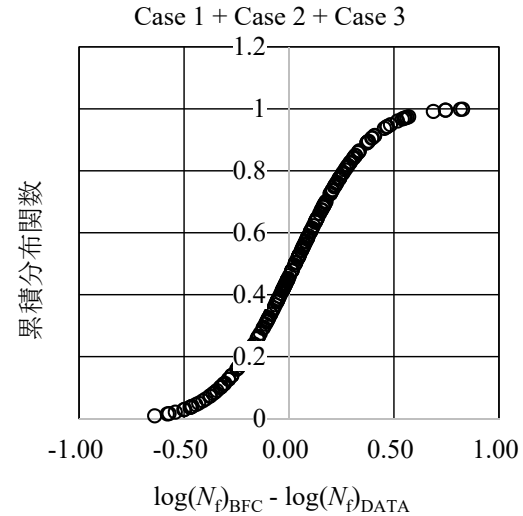
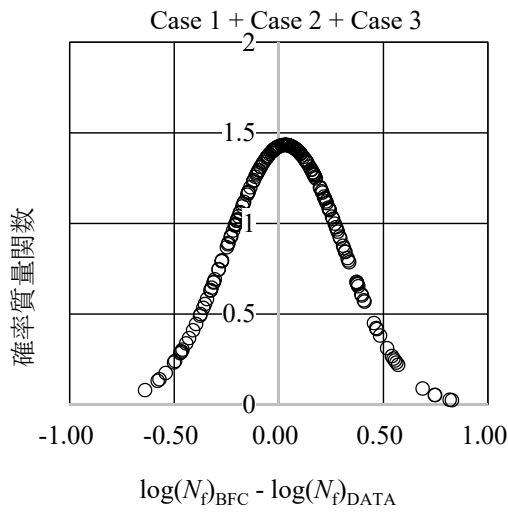


図 F.8— $\log((N_f)_{BFC}) - \log((N_f)_{DATA})$ の確率質量関数

図 F.9— $\log((N_f)_{BFC}) - \log((N_f)_{DATA})$ の累積分布関数

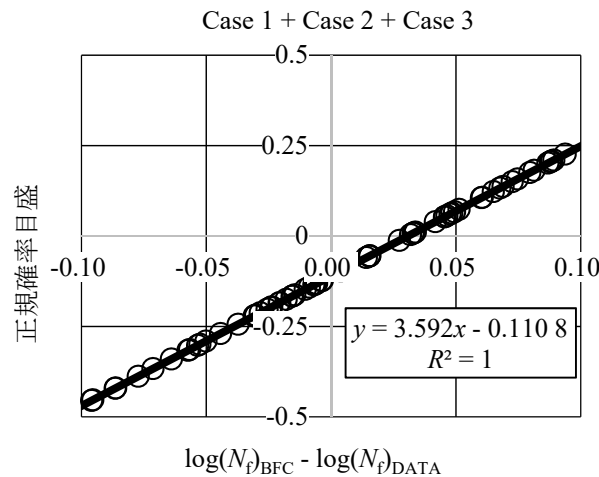


図 F.10— $\log((N_f)_{BFC}) - \log((N_f)_{DATA})$ の対数正規確率目盛

F.2.5 データ分散の評価

応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u) と疲労寿命 N_f が共に対数正規分布に従うため、標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を求める。標本平均 $\hat{\mu}$ 及び標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ は、式(F.5)～式(F.8)による。

ー 応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)

$$\hat{\mu} = \left\{ \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{BFC} - \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{DATA} \right\} = \left[\Sigma \left\{ \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{BFC} - \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{DATA_i} \right\} / n \right] \quad \dots \dots (F.5)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\Sigma \left[\left\{ \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{BFC} - \left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_{DATA_i} \right\} - \hat{\mu} \right]^2 / (n-1)} \quad \dots \dots \dots (F.6)$$

－ 疲労寿命 N_f

$$\hat{\mu} = \left\{ (\log(N_f))_{\text{BFC}} - (\log(N_f))_{\text{DATA}} \right\} = [\Sigma \{ \log(N_f)_{\text{BFC}} - \log(N_f)_{\text{DATA}} \}_i] / n \quad \dots \dots \dots (F.7)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\Sigma \{ [\log(N_f)_{\text{BFC}} - \log(N_f)_{\text{DATA}}]_i - \hat{\mu} \}^2 / (n-1)} \quad \dots \dots \dots (F.8)$$

疲労試験結果を基に、式(F.5)～式(F.8)を用いて標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を求めると、**表 F.5** となる。

表 F.5—T6 処理したアルミニウム合金 6061 の標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ （常用対数）

項目	応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)	疲労寿命 N_f
標本平均 $\hat{\mu}$	0.003 401	0.030 858
標本標準偏差 $\hat{\sigma}$	0.030 679	0.278 395

F.2.6 設計係数 F

表 F.5 で得られた標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を基に、対数正規分布の片側許容限界を定める。応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)及び疲労寿命 N_f について、片側許容限界は、式(F.9)～式(F.12)による。式(F.9)～式(F.12)中の標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ は、**表 F.5** の値である。

$$(\log(N_f))_l = \hat{\mu} - k\hat{\sigma} \quad \dots \dots \dots (F.9)$$

$$(N_f)_l = 10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}} \quad \dots \dots \dots (F.10)$$

$$\left(\log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right) \right)_l = \hat{\mu} - k\hat{\sigma} \quad \dots \dots \dots (F.11)$$

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u} \right)_l = 10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}} \quad \dots \dots \dots (F.12)$$

式(F.9)～式(F.12)の係数 k は信頼水準 $1-\gamma$ 、非破壊確率 $1-P$ 及びデータ数 n の関数であり、例えば、参考文献[3]の付録表 6 に示されている。

図 F.5、**図 F.8** 及び**表 F.5** に示すように、常用対数で表示した標本平均 $\hat{\mu}$ は厳密には 0 とはならないため（したがって、対数正規分布は左右対称ではない。）、設計係数 F は本来は式(F.13)で定義されるべき値だが、標本平均 $\hat{\mu}$ をほぼ 0 と見なしてよいため、設計係数 F の分子を 1 として式(F.14)が使用される。

$$F = \frac{10^{\hat{\mu}}}{10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}}} \quad \dots \dots \dots (F.13)$$

$$F = \frac{1}{10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}}} \quad \dots \dots \dots (F.14)$$

$1-\gamma=0.95$ 、 $1-P=0.90$ とするとき、データ数 $n=17$ 個の場合が $k=2$ 、データ数 $n=6$ 個の場合が $k=3$ となることを考慮して（設計者が、この程度の試験本数から得られた最適疲労曲線を選択することを意味する。）、設計係数 F を**表 F.6** に示す。**表 F.6** 中の 1.14 ($k=2$ の値) 及び 1.23 ($k=3$ の値) が、**5.4.2 a)4)** に示されている α 値である。

表 F.6—アルミニウム合金 6061-T6 の設計係数 ($\hat{\mu}$ 及び $\hat{\sigma}$ は常用対数)

項目	応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)	疲労寿命 N_f
標本平均 $\hat{\mu}$	0.003 401	0.030 858
標本標準偏差 $\hat{\sigma}$	0.030 679	0.278 395
$F(k=2)$	$\alpha = 1.14 (k=2)$	$\beta = 3.36 (k=2)$
$F(k=3)$	$\alpha = 1.23 (k=3)$	$\beta = 6.37 (k=3)$

応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)に係る設計係数 α を式(F.3)に適用すると、同じ疲労寿命 N_f を与える応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)を $1/\alpha$ とするため、式(F.15)となる。

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right) = \alpha \{2.26(N_f)^{-0.110}\} \quad \dots \dots \dots (F.15)$$

一方、疲労寿命 N_f に係る設計係数を β として式(F.3)に適用すると、同じ応力振幅の引張強さに対する比 (σ_a/σ_u)を与える疲労寿命 N_f/β とするため、式(F.16)となる。

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_u}\right) = 2.26 \left(\frac{N_f}{\beta}\right)^{-0.110} \quad \dots \dots \dots (F.16)$$

式(F.15)と式(F.16)より、式(F.17)が成立すると式(F.3)について設計係数 α と設計係数 β を区別する必要はない。

$$\alpha = \frac{1}{\beta^{0.110}} \quad \dots \dots \dots (F.17)$$

表 F.6 は式(F.17)が成立することを示しているが、これは、最適疲労曲線（式(F.3)）に疲労限度を示す定数項が含まれていないことが原因である。図 F.11 に、図 F.4 の疲労試験結果に設計係数 α を適用した最適疲労曲線を追記した図を示す。なお、図 F.11 は長寿命領域での疲労試験結果に基づいて作成されている。短寿命領域での最適疲労曲線の検討には、ひずみ制御疲労試験結果が必要である。

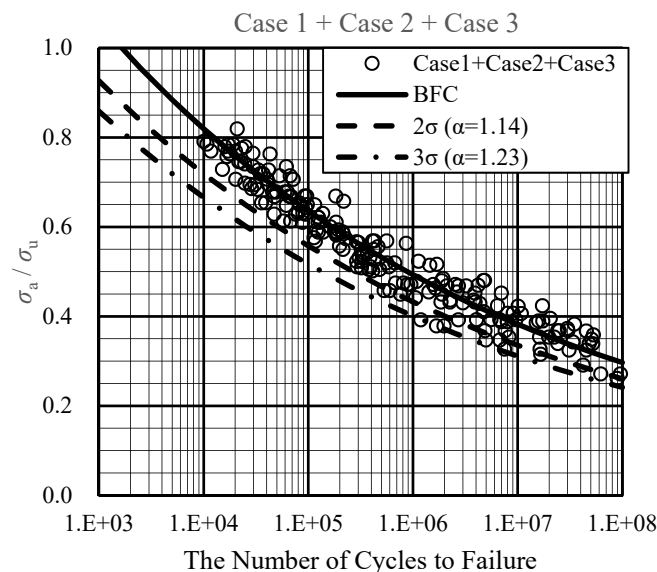


図 F.11—T6 処理したアルミニウム合金 6061 の最適疲労曲線

F.3 最適亀裂進展速度曲線

F.3.1 亀裂進展試験の方法

3つの異なる環境下で亀裂進展試験を実施した。試験に供試した試験片、試験条件及び試験方法（参考文献[4]）は次の a) 及び b) による。

a) 試験片

試験条件及び試験方法は、次の 1)～3) による。

- 1) 製造ロットが異なる 2 種類のアルミニウム合金 6061 (JIS H 4000) について、熱間圧延した板の L-T 面から試験片を採取し、圧延方向に直角に初期亀裂を導入した。試験片を採取した供試材には T6 処理又は T651 処理が施されている。T6 処理は「溶体化処理後人工時効硬化処理したもの」、T651 処理は「溶体化処理後残留応力を除去し (1.5%以上 3%以下の永久ひずみを与える引張加工を施す)、人工時効硬化処理したもの」であるため、厳密には異なる処理だが、試験片数が少ないため、同じ処理をした試験片として扱う。
- 2) 符号 A～C は高圧水素中、符号 D は窒素中、符号 E 及び F は大気中で亀裂進展試験を実施した。亀裂進展試験の試験片形状は、ASTM E647 に準拠した CT 試験片である。
- 3) 亀裂進展試験に供試した試験片の機械的性質を、表 F.7 に示す。

表 F.7—試験片の機械的性質（常温）

符号	質別	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ (HV)
A	T6	325	307	18	72	141
B	T6	325	307	18	72	141
C	T651	317	279	16	—	—
D	T651	317	279	16	—	—
E	T6	325	307	18	72	141
F	T651	317	279	16	—	—

b) 試験条件及び試験方法

試験条件及び試験方法は、次の 1) 及び 2) による。

- 1) 試験条件を、表 F.8 に示す。
- 2) 試験の負荷波形は正弦波で、負荷速度は 1Hz 及び 30Hz とした。

表 F.8—試験条件

符号	質別	試験環境	試験温度(°C)	ΔK	応力比 R	周波数 f (Hz)
A	T6	90 MPa H ₂	RT	ΔK decreasing	0.1	1
B	T6	90 MPa H ₂	RT	ΔK decreasing	0.1	1
C	T651	115 MPa H ₂	RT	ΔK increasing ^{a)}	0.1	1
D	T651	0.1 MPa N ₂	RT	ΔK increasing ^{a)}	0.1	1
E	T6	Air	RT	ΔK decreasing	0.1	30
F	T651	Air	RT	ΔK increasing ^{a)}	0.1	1

注 a) $\Delta P=4.5\text{kN}$ を一定とし、亀裂進展に伴い ΔK が漸増する。

F.3.2 亀裂進展試験結果

水素中、窒素中及び大気中での亀裂進展試験結果を、図 F.12～図 F.15 に示す。図 F.12 及び図 F.14 は、亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係、図 F.13 及び図 F.15 は、図 F.12 及び図 F.14 の縦軸と横軸を常用対数で表した結果である。図 F.12～図 F.15 より、90MPa 水素中の亀裂進展特性は、周波数に関係なくほぼ同じであること、窒素中と大気中では、周波数 1Hz の亀裂進展特性はほぼ同じであることが分かる。

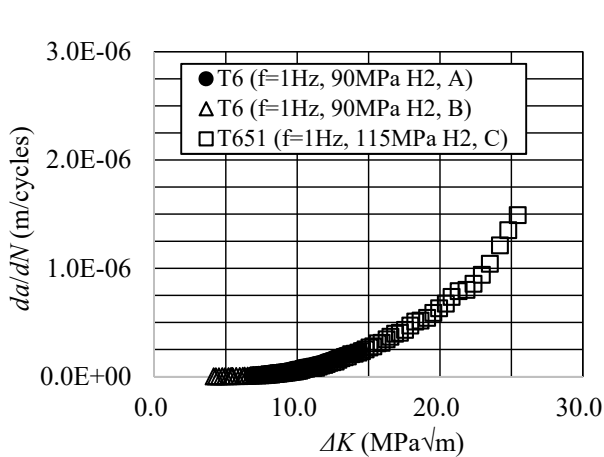


図 F.12—水素中の亀裂進展試験結果（符号 A～C）
(da/dN - ΔK)

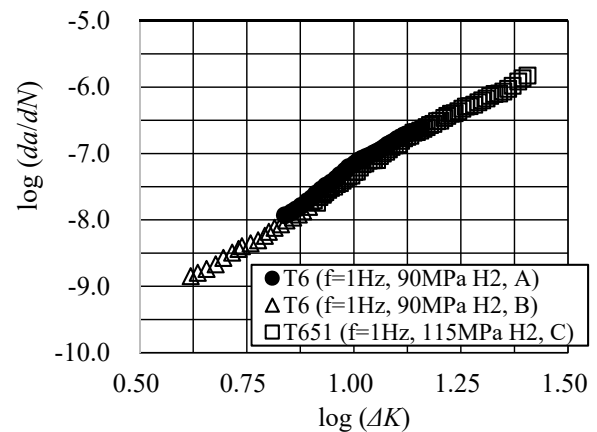


図 F.13—水素中の亀裂進展試験結果（符号 A～C）
($\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$)

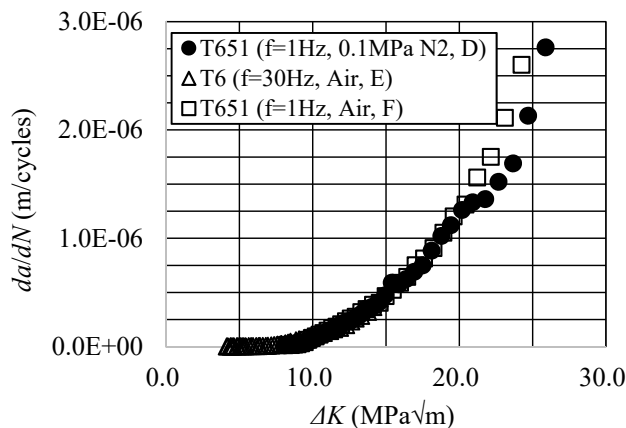


図 F.14—窒素中及び大気中の亀裂進展試験結果
(符号 D～F, da/dN - ΔK)

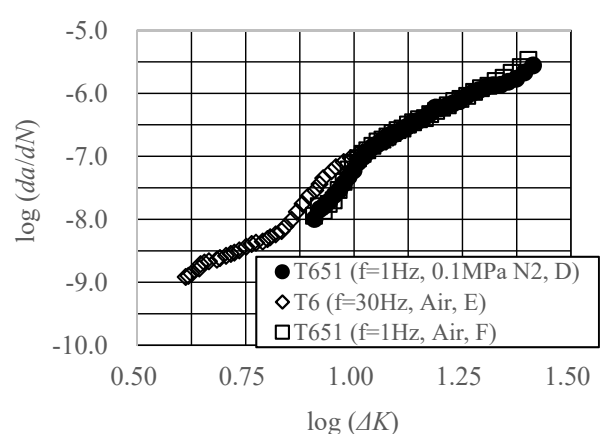


図 F.15—窒素中及び大気中の亀裂進展試験結果
(符号 D～F, $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$)

F.3.3 亀裂進展速度曲線

図 F.16 及び図 F.17 に、符号 A～F の全試験結果を示す。図 F.17 の $\log(da/dN)$ と $\log(\Delta K)$ の結果は、分散帯が狭い。以降は符号 A～F の全試験結果を用いて、 $\log(da/dN)$ と $\log(\Delta K)$ の分布形状を確認する。亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係として、式(F.18)を仮定し、式(F.18)中の

係数 m 及び C について、符号 A～F の試験結果（全 6 ケース）について、Excel の「近似曲線」オプションを用いて各ケースの係数 m 及び C の値を求めた。得られた結果を表 F.9 に示す。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots \dots \dots (F.18)$$

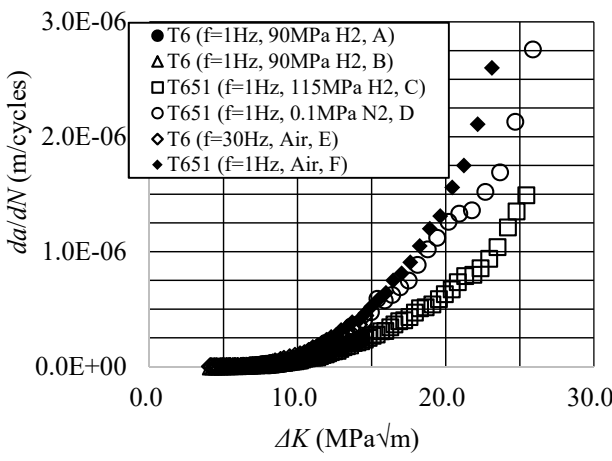


図 F.16—亀裂進展試験結果
(符号 A～F, da/dN - ΔK)

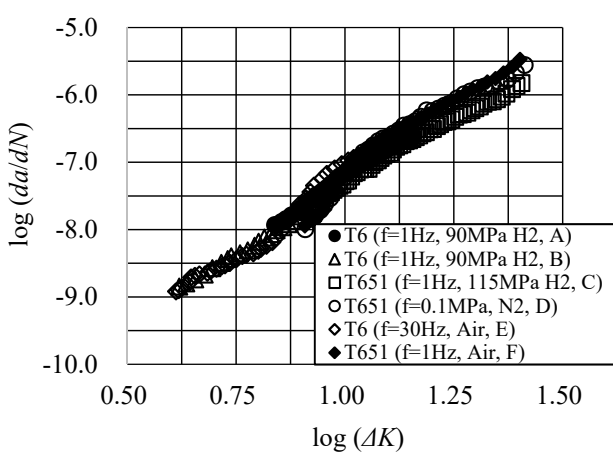


図 F.17—亀裂進展試験結果
(符号 A～F, $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$)

表 F.9—係数 m 及び C

符号	質別	試験環境	ΔK	m	$\log C$	C
A	T6	90 MPa H ₂	ΔK decreasing	4.240 3	-11.462 6	$3.446 7 \times 10^{-12}$
B	T6	90 MPa H ₂	ΔK decreasing	4.090 9	-11.435 1	$3.672 0 \times 10^{-12}$
C	T651	115 MPa H ₂	ΔK increasing	3.711 0	-10.997 7	$1.005 3 \times 10^{-11}$
平均 ^{a)} (A～C)				4.014 1	-11.298 5	$5.029 6 \times 10^{-12}$
D	T651	0.1 MPa N ₂	ΔK increasing	4.461 7	-11.687 9	$2.051 6 \times 10^{-12}$
E	T6	Air	ΔK decreasing	4.913 1	-12.045 5	$9.005 3 \times 10^{-13}$
F	T651	Air	ΔK increasing	4.623 0	-11.839 6	$1.446 8 \times 10^{-12}$
平均 ^{a)} (D～F)				4.665 9	-11.857 7	$1.387 8 \times 10^{-12}$
総平均 ^{a)} (A～F)				4.340 0	-11.578 1	$2.642 0 \times 10^{-12}$

注^{a)} C は、符号 A～F の算術平均ではなく $\log C$ の平均値より求めた。

表 F.9 より、次の a) 及び b) が得られる。

- a) 水素中と窒素中及び大気中の係数 m には差が見られ、水素中より窒素中及び大気中の値の方が大きい。全 6 ケース個々の m の総平均値は $m=4.340 0$ である。全 6 ケースが先験的に対数正規分布に従うとして統計処理した場合の m は $m=4.307 3$ である。両者は、ほぼ同じ値となる。
- b) 係数 $\log C$ には大きな差はないが ($-12.045 5 \leq \log C \leq -10.997 7$)、係数 C にはある程度の幅がある ($9.005 3 \times 10^{-13} \leq C \leq 1.005 3 \times 10^{-11}$)。全 6 ケース個々の C の平均値は $2.642 0 \times 10^{-12}$ である。全 6 ケースが先験的に対数正規分布に従うとして統計処理した場合の C は $C=2.971 7 \times 10^{-12}$ である。両者は、近い値となる。

水素中、窒素中及び大気中の係数 m 及び C には差が見られるが、試験片の本数が少ないため、工学的な判断として、係数 m 及び C として表 F.9 に示す総平均値を使用（有効数字は3桁とする。）して、最適亀裂進展速度曲線を式(F.19)及び式(F.20)とする。

$$\frac{da}{dN} = (2.64 \times 10^{-12}) (\Delta K)^{4.34} \quad \dots \dots \dots (F.19)$$

$$\log \left(\frac{da}{dN} \right) = -11.6 + 4.34 \log(\Delta K) \quad \dots \dots \dots (F.20)$$

F.3.4 分布形状の確認

F.3.4.1 亀裂進展速度 da/dN

亀裂進展速度曲線の $\log((da/dN)_{\text{approx.}})$ と亀裂進展試験の $\log((da/dN)_{\text{DATA}})$ の差が、対数正規分布に適合しているか否かを検討した。図 F.18 に確率質量関数、図 F.19 に累積分布関数及び図 F.20 に正規確率目盛を示す。 $\log((da/dN)_{\text{approx.}}) - \log((da/dN)_{\text{DATA}})$ の平均は 0 ではなくプラス側にすこしずれるが、正規確率目盛での直線性に優れているため、 da/dN は対数正規分布に従うとする。

F.3.4.2 応力拡大係数範囲 ΔK

亀裂進展速度曲線の $\log((\Delta K)_{\text{approx.}})$ と亀裂進展試験の $\log((\Delta K)_{\text{DATA}})$ の差が対数正規分布に適合しているか否かを検討した。図 F.21 に確率質量関数、図 F.22 に累積分布関数及び図 F.23 に正規確率目盛を示す。 $\log((\Delta K)_{\text{approx.}}) - \log((\Delta K)_{\text{DATA}})$ も正規確率目盛での直線性に優れているため、 ΔK は対数正規分布に従うとする。

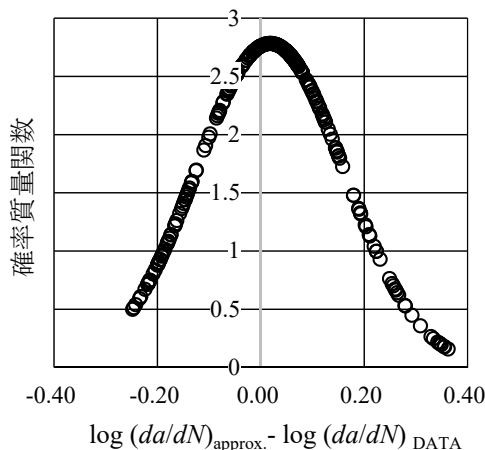


図 F.18— $\log((da/dN)_{\text{approx.}}) - \log((da/dN)_{\text{DATA}})$ の確率質量関数

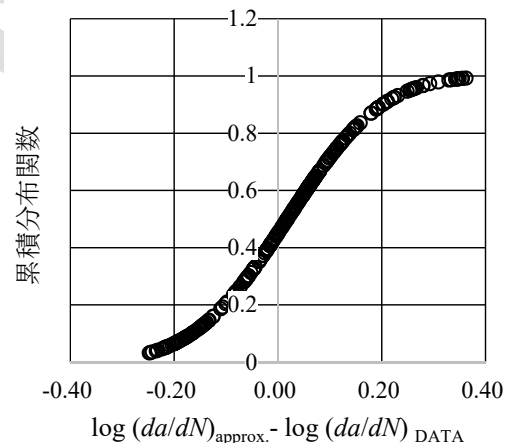


図 F.19— $\log((da/dN)_{\text{approx.}}) - \log((da/dN)_{\text{DATA}})$ の累積分布関数

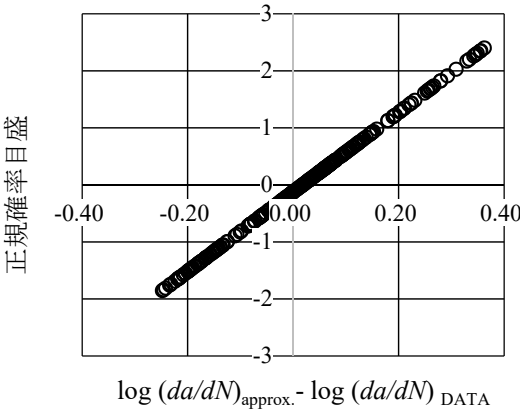


図 F.20— $\log((da/dN)_{\text{approx.}}) - \log((da/dN)_{\text{DATA}})$ の対数正規確率目盛

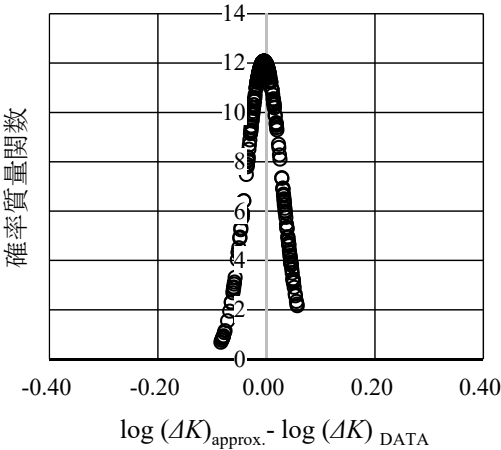


図 F.21— $\log((\Delta K)_{\text{approx.}}) - \log((\Delta K)_{\text{DATA}})$ の確率質量関数

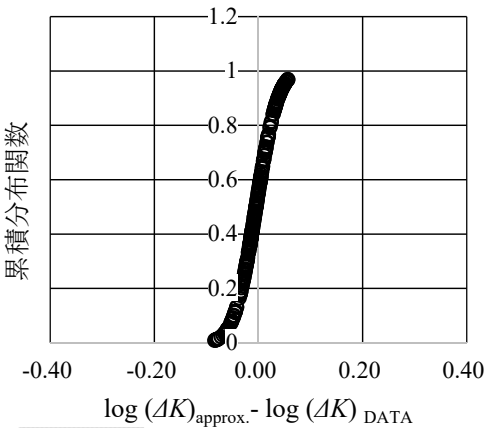


図 F.22— $\log((\Delta K)_{\text{approx.}}) - \log((\Delta K)_{\text{DATA}})$ の累積分布関数

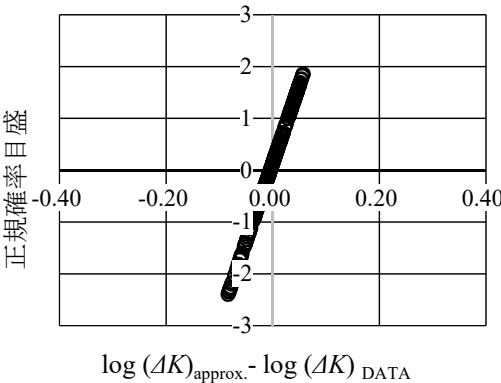


図 F.23— $\log((\Delta K)_{\text{approx.}}) - \log((\Delta K)_{\text{DATA}})$ の対数正規確率目盛

F.3.5 データ分散の評価

亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK が対数正規分布に従うため、標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を求める。標本平均 $\hat{\mu}$ 及び標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ は、式(F.21)～式(F.24)による。

－ 亀裂進展速度 da/dN

$$\hat{\mu} = \left\{ \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{BFC}} - \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{DATA}} \right\} = \left[\Sigma \left\{ \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{BFC}} - \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{DATA}_i} \right\} / n \right] \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.21)}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\Sigma \left[\left\{ \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{BFC}} - \left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_{\text{DATA}_i} \right\} - \hat{\mu} \right]^2 / (n-1)} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.22)}$$

－ 応力拡大係数範囲 ΔK

$$\hat{\mu} = \left\{ \left(\log(\Delta K) \right)_{\text{BFC}} - \left(\log(\Delta K) \right)_{\text{DATA}} \right\} = [\Sigma \{ \log(\Delta K)_{\text{BFC}} - \log(\Delta K)_{\text{DATA}_i} \} / n] \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.23)}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\Sigma [\{ \log(\Delta K)_{\text{BFC}} - \log(\Delta K)_{\text{DATA}_i} \} - \hat{\mu}]^2 / (n-1)} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.24)}$$

疲労試験結果を基に、式(F.21)～式(F.24)を用いて標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を求めると、**表 F.10** となる。

表 F.10—標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ （常用対数）

項目	亀裂進展速度 da/dN	応力拡大係数範囲 ΔK
標本平均 $\hat{\mu}$	0.018 496	-0.004 262
標本標準偏差 $\hat{\sigma}$	0.143 448	0.033 053

F.3.6 設計係数 F

F.3.6.1 最適亀裂進展速度曲線の設計係数

表 F.10 で得られた標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ を基に、対数正規分布の片側許容限界を定める。亀裂進展速度 da/dN 及び応力拡大係数範囲 ΔK について、片側許容限界は、式(F.25)～式(F.29)による。ここで、標本平均 $\hat{\mu}$ と標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ は、**表 F.10** の値である。

$$\left(\log \left(\frac{da}{dN} \right) \right)_l = \hat{\mu} - k\hat{\sigma} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.25)}$$

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_l = 10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.26)}$$

$$\left(\log(\Delta K) \right)_l = \hat{\mu} - k\hat{\sigma} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.27)}$$

$$(\Delta K)_l = 10^{\hat{\mu} - k\hat{\sigma}} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(F.28)}$$

式(F.25)～式(F.28)の係数 k は信頼水準 $1-\gamma$ 、非破壊確率 $1-P$ 及びデータ数 n の関数であり、例えば、参考文献[3]の付録表 6 に示されている。

最適疲労曲線と同様に、**図 F.18**、**図 F.21** 及び**表 F.10** に示すように、常用対数で表示した標本平均

$\hat{\mu}$ は厳密には 0 とはならないため（したがって、対数正規分布は左右対称ではない。）、設計係数 F は本来は式(F.29)で定義されるべき値であるが、簡略化する場合は、設計係数 F の分子を 1 として式(F.30)が使用される。

$$F = \frac{10^{\hat{\mu}}}{10^{\hat{\mu}-k\hat{\sigma}}} \quad \dots \dots \dots \text{(F.29)}$$

$$F = \frac{1}{10^{\hat{\mu}-k\hat{\sigma}}} \quad \dots \dots \dots \text{(F.30)}$$

1- γ =0.95, 1- P =0.90 とするとき、データ数 $n=17$ 個の場合が $k=2$, データ数 $n=6$ 個の場合が $k=3$ となることを考慮して（設計者が、この程度の試験本数から得られた亀裂進展速度曲線を選択することを意味する。）、設計係数 α 及び β を表 F.11 に示す。

表 F.11—設計係数 α 及び β ($\hat{\mu}$ 及び $\hat{\sigma}$ は常用対数)

項目		亀裂進展速度 da/dN	応力拡大係数範囲 ΔK
標本平均 $\hat{\mu}$		0.018 496	-0.004 262
標本標準偏差 $\hat{\sigma}$		0.143 448	0.033 053
(F.29)式	$F(k=2)$	$\alpha = 1.94 (k=2)$	$\beta = 1.16 (k=2)$
	$F(k=3)$	$\alpha = 2.69 (k=3)$	$\beta = 1.25 (k=3)$
(F.30)式	$F(k=2)$	$\alpha = 1.86 (k=2)$	$\beta = 1.18 (k=2)$
	$F(k=3)$	$\alpha = 2.58 (k=3)$	$\beta = 1.27 (k=3)$

亀裂進展速度に係る設計係数 α を式(F.19)に適用すると、式(F.31)となる。

$$\frac{da}{dN} = \alpha \{ (2.26 \times 10^{-12}) (\Delta K)^{4.34} \} \quad \dots \dots \dots \text{(F.31)}$$

一方、応力拡大係数範囲 ΔK に係る設計係数 β を式(F.19)に適用すると、式(F.32)となる。

$$\left(\frac{da}{dN} \right) = \{ (2.26 \times 10^{-12}) (\beta \Delta K)^{4.34} \} \quad \dots \dots \dots \text{(F.32)}$$

式(F.33)が成立すると、式(F.19)において設計係数 α と設計係数 β を区別する必要はない。

$$\alpha = \beta^{4.34} \quad \dots \dots \dots \text{(F.33)}$$

表 F.11 は、式(F.29)では式(F.33)が成立するが、式(F.30)では式(F.33)は成立しないことを示しており、標本平均 $\hat{\mu}$ が 0 ではないことが影響している。図 F.24～図 F.27 に、図 F.15 の疲労試験結果に設計係数 α 又は β を適用した近似曲線を追記した図を示す。いずれも図も大差ないが、式(F.29)式に基づく設計係数を用いることが望ましい。 β として 1.16 ($k=2$ の値) 及び 1.25 ($k=3$ の値) を用いる。

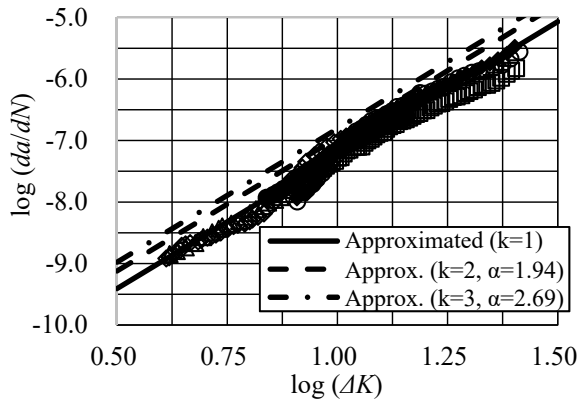


図 F.24—最適亀裂進展速度曲線と
設計係数 α (式(F.29)) の適用

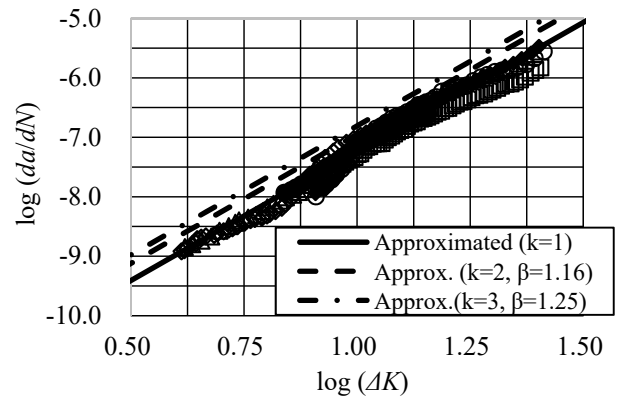


図 F.25—最適亀裂進展速度曲線と
設計係数 β (式(F.29)) の適用

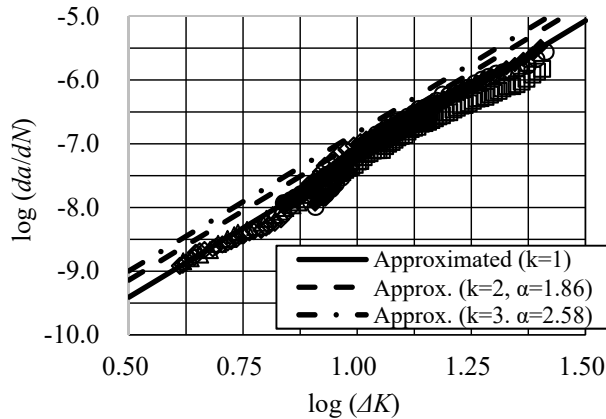


図 F.26—最適亀裂進展速度曲線と
設計係数 α (式(F.30)) の適用

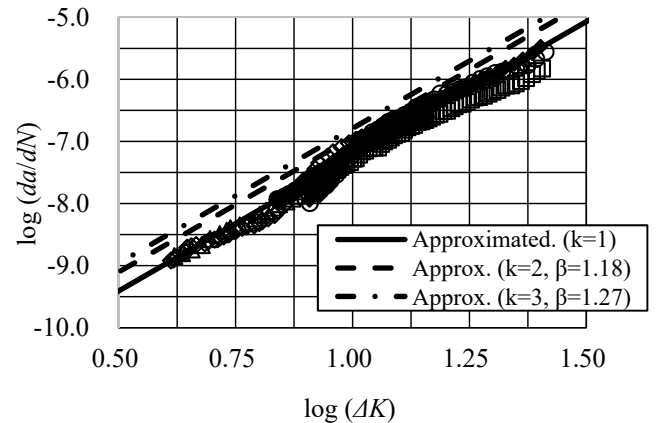


図 F.27—最適亀裂進展速度曲線と
設計係数 β (式(F.30)) の適用

F.3.6.2 疲労寿命の設計係数

5.4.3 の亀裂進展解析では、以下に示す式(F.18)を仮定して繰返し回数 N を求める。アルミニウム合金 A6061-T6 の場合は、亀裂進展速度曲線の係数 C 及び m は定数と見なせ、その値は表 F.9 に示されていることより、式(6)を積分して繰返し回数 N を求めることが可能である。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots \dots \dots (F.18)$$

5.4.3 に従い、亀裂深さを a 、部材厚さを t 、初期亀裂深さを a_i 、最終亀裂深さを a_f ($a_f = 0.8t$)、亀裂進展寿命を N_f とし、一般的な表記として ΔK を式(F.34)で表すと (Y は形状係数、 $\Delta\sigma$ は応力範囲)、 N_f は式(F.35)となる。

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots (F.34)$$

$$N_f = \frac{1}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \frac{1}{\left(\frac{m}{2} - 1\right)} \left\{ \frac{1}{(a_i)^{\frac{m}{2}-1}} - \frac{1}{(a_f)^{\frac{m}{2}-1}} \right\} \dots\dots\dots (F.35)$$

応力拡大係数 ΔK に係る設計係数 β を式(F.18)に適用すると、式(F.36)となり、この場合の亀裂進展寿命を $\bar{N}_f$ とすると、式(F.37)になる。

$$\frac{da}{dN} = C(\beta\Delta K)^m \dots\dots\dots (F.36)$$

$$\bar{N}_f = \frac{\beta^m}{C\beta^m(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \frac{1}{\left(\frac{m}{2} - 1\right)} \left\{ \frac{1}{(a_i)^{\frac{m}{2}-1}} - \frac{1}{(a_f)^{\frac{m}{2}-1}} \right\} \dots\dots\dots (F.37)$$

式(F.35)と式(F.37)を比較すると、 $\bar{N}_f = \beta^m N_f$ となる。 N_f は設計条件や材料特性等で定まる値であり、設計としてこの値が上限なので、亀裂進展解析で得られた繰返し回数 N を β^m で除した N/β^m を **5.4.3** の破裂漏洩が成立する場合の疲労寿命（繰返し回数） N_e とする。アルミニウム合金 A6061-T6 の場合は $m = 4.34$ なので、式(F.33)より $\beta^m = \beta^{4.34} = \alpha$ となり、 $\beta^{4.34}$ の値として表 F.11 の 1.94 ($k = 2$ の値) 及び 2.69 ($k = 3$) を用いる。この値が、**5.4.3 a)7)** に示されている β 値である。

参考文献

- [1] 志賀優多, 小林英男, 山田敏弘, 佐野尊, 澁谷忠弘, “アルミニウム合金 6061-T6 の最適疲労曲線の構築と平均応力の補正方法”, 圧力技術, 第 59 巻第 3 号, p.106～p.116, (2021)
- [2] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), “2018～2022 年度成果報告書 超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発”, PP.29～30 (表 1-1-5)
- [3] 日本機械学会, 統計的疲労試験方法 (改訂版) JSME S 002-1994, 日本機械学会基準, (1994)
- [4] Research Center for Hydrogen Industrial Use and Storage (HYDROGENIUS), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Kyushu University, Data Base on Long Fatigue Crack Growth Properties of JIS-A6061-T6 and JOS-A6061-T651 Aluminum Alloys in 90-115 MPa Hydrogen Gas, HYDROGENIUS DATA BASE (Tentative) — Fatigue Crack Growth Properties — No.B1, (2013)