

# ETFE フィルムを用いた対角アーチ型四角形パネルの延伸後の耐力に関する研究

古谷 宗一郎\*  
河端 昌也\*\*

## 梗概

ETFE フィルムを用いた構造形式のうち、テンション方式は内圧維持装置が不要であることや様々な曲面を形成できるため、近年、施工例が増えているが、応力緩和のような粘性挙動に対して未だ課題を有している。

テンション方式を用いた方法として、アーチを押し付けることで曲面を形成する延伸立体成形張力膜構造が提案されており、この方法による ETFE フィルムへの張力導入の有効性が確認されている。

本報では、延伸立体成形張力膜構造の実現可能性向上を目的とし、延伸成形後の粘性挙動と負荷荷重時の挙動を実験と解析の両面から把握する。また、様々なスケールでの解析を行い、延伸後の耐力評価法を提案する。

## 1. はじめに

フッ素樹脂フィルムは耐候性等の面で優れていることから、膜構造建築物への使用例が多い。その中でも ETFE フィルム(以下、フィルム)は、高い透光性や耐久性から海外では利用事例が多く見られる[図 1]。国内においても、2014 年 10 月に国土交通省告示第 1446 号の改正により指定建築材料として認められており、今後、国内建築物における使用が期待されるが、フィルムは織布膜材料とは異なり、大きなクリープひずみや応力緩和などの粘性挙動を示すため、この点について考慮した上で設計する必要がある。

実際にフィルムを建築物に使用する場合、クッション方式とテンション方式が効率的な構造形式として挙げられる。前者は、内圧の調整により、立体形状の形成や外力作用時の変形追従、雨水や積雪によるボンディング現象への対応が比較的容易である。一方で、空気圧で形成できる形状はガウス曲率が世の曲面に限られ、また常時空気の送風を必要とするため、意匠面や維持管理面等で制約となる。テンション方式は変形追従の点で前者に劣るが、内圧制御機構が不要であることや、デザイン的なバリエーションが豊富なことから、最近では施工例が増えている。ただし、クッション方式は「弾塑性評価」及び「粘弾性評価」の二つの評価方法を用いて、挙動を一通り把握できている<sup>1)2)</sup>のに対し、テンション方式は粘性挙動に関する問題について解明しなければならない点を未だ含んでいる。

このテンション方式については、フィルムの顕著な伸び能力を活かして、立体裁断や外周引き込みによる張力導入を省略できる方法として、ばねストラット式<sup>3)</sup>や延伸立体成形方式<sup>4)</sup>が提案されている。しかし、両者の設計方法は異なり、前者はフィルムに生じる応力を一次降伏点未満に抑える弾性設計、後者は二次降伏点まで許容する弾塑性設計が採用されている。

フィルムの一次降伏応力はひずみ速度 1%/min で約 13MPa、100%/min で約 16MPa と非常に低く、設計案或いは荷重条件によっては発生応力を弾性範囲内に収めることが難しい状況が考えられる。塑性域まで延伸することによる耐力上昇が実証実験<sup>5)</sup>[図 2]より明らかにされているため、弾性設計に加え弾塑性設計に関する研究を進める必要がある。

そこで本報では、既往の研究<sup>6)</sup>を更に進めることを目的として、対角アーチを用いた延伸立体成形張力膜構造を取り上げる。この方式の基礎研究として、延伸後の応力緩和の影響とその後の繰返荷重による膜面の挙動を実験と解析から検証し、解析の妥当性を確認した上で延伸後の耐力評価法を提案する。



(a) Allianz Arena (2005) (b) Training Center for Mt. Rescue (2008)

図 1 ETFE フィルムを用いた海外事例



図 2 延伸成形による張力膜構造の実証実験

\* 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府 建築都市文化専攻

\*\* 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院

大学院生

准教授 博士(工学)

## 2. 応力緩和及び負荷荷重実験・解析

### 2.1 実験概要

フィルムを用いた張力膜構造の場合、長時間経過によって応力緩和が発生し、張力が低下する<sup>5)</sup>ことから、対角アーチモデルのようなパネルユニットの場合、実際には図3のような流れを辿ることが考えられる。

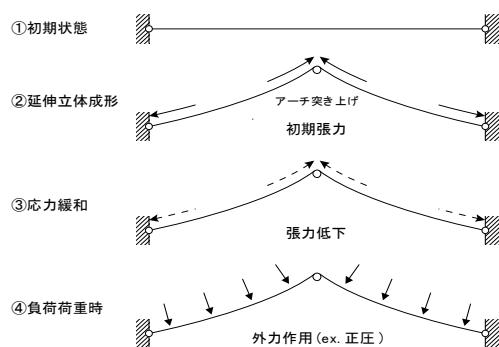


図3 施工の概略

既報<sup>6)</sup>では、フィルムをアーチに押し付けて曲面を成形する過程について、実験と解析の両面から確認を行った。本報では、延伸立体成形後の応力緩和と静的負荷荷重時の挙動の把握を目的に実験を行う。ここでの負荷荷重は等分布荷重(正圧)として、膜張力が増加する条件下で検討する。

試験体概要を図4に示す。試験体はフィルムを定着用フラットバーに取り付けた1.5m角の型枠フレームと対角に渡したアーチからなるパネル型試験体、実験時に型枠フレームを降下させるための全ネジ棒、及び支持部材の鉄骨土台から構成される。フィルムの厚さは100 $\mu$ mと200 $\mu$ m、アーチのライズ比は10%と15%として、これらを組み合わせた4種類について実験を行う。

計測の概要を図5に示す。アーチには頂点部と中間部の側面と下面の各3箇所にひずみゲージを貼付し、この結果からアーチにかかる軸力の推移を考察する。その際、雰囲気温度も計測する。フィルムには、頂点部及び中央部にひずみゲージを貼付し、中央部付近でレーザー変位計を用いて鉛直変位の測定を行った。加えて、予め描いておいた100mm角の格子を用いて、変形及び残留変形を計測した。

フィルム中央部ひずみを横軸、アーチ頂点部軸力を縦軸にとり、以下の①～④の各段階における挙動予想図を図6(a)、またそれに付随する実験の様子を図6(b)に示す。①初期状態では、試験体フィルムの上に加圧用フィルムも予め取り付けしておく。このとき、加圧用フィルムは延伸後のアーチに影響が無いよう十分伸ばしたものを使用する[図6(c)]。②型枠の四隅に空けた孔に各柱に設置した全ネジ棒を通し、ナット締めにより徐々に降下させて、フィルムをアーチに押し付けて曲面を形成する。③延伸完了後、2時間放置して応力緩和させる。④荷重の負荷では、試験体フィルムと加圧用フィルムの間に空気を送り込んで圧力をかけ、除荷では圧力をゼロに戻す。以下、負荷と除荷を繰り返し、最大3.5kPaまで段階的に圧力を加える。

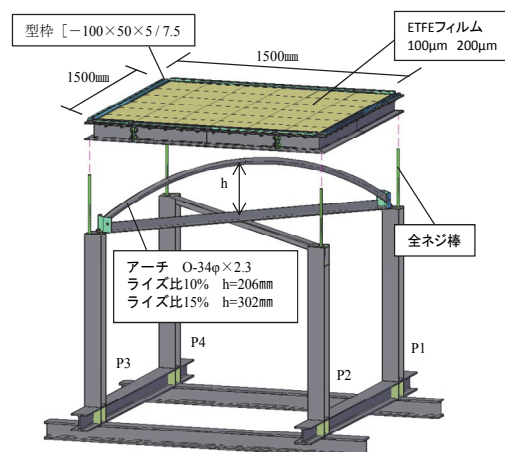
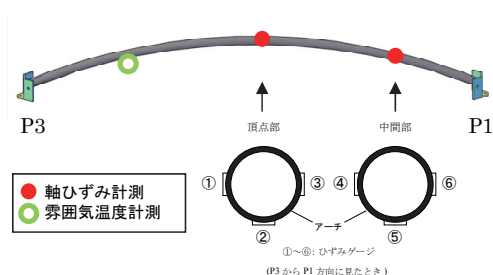
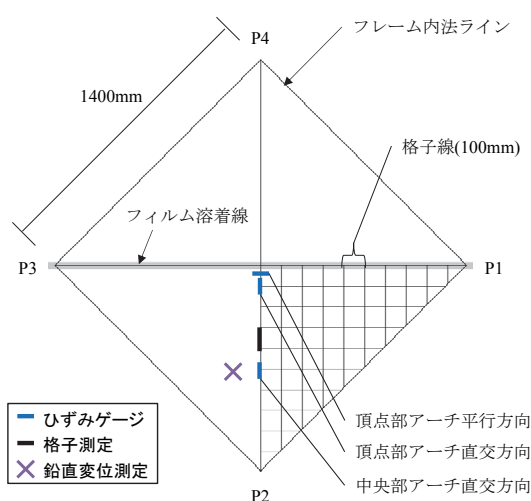


図4 試験体概要



(a) アーチ計測箇所



(b) フィルム計測箇所

図5 計測箇所

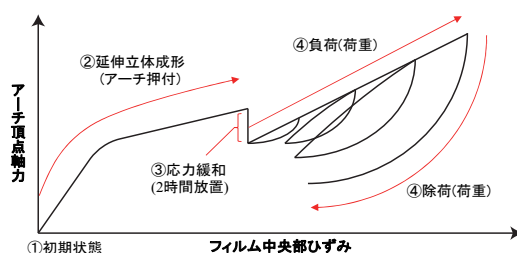
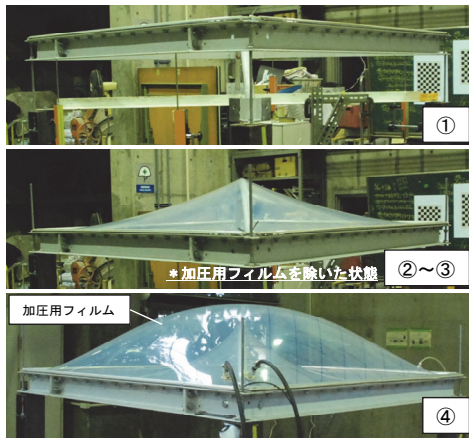
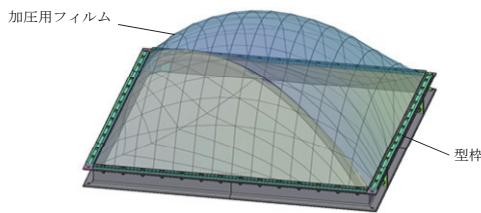


図6(a) 挙動予想図



(b) 試験体写真



(c) 試験体イメージ

図6 実験概要

## 2.2 解析概要

実験時の応力状態等を把握するために解析を行う。フィルムの応力変形解析は汎用構造解析ソフトウェア ANSYS を用いて弾塑性解析を行う。解析では、多軸応力・変形状態を単軸状態へと換算するために、(1)～(5)式に示される相当応力 ( $\sigma_{eq}$ ) 及び相当ひずみ ( $\varepsilon_{eq}^{total}$ ) の関係を用いており、また、実験におけるフィルムの応力緩和を模擬するために、(6)式で得られる熱ひずみ ( $\varepsilon^t$ ) を使用している。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq}^{total} = \varepsilon^e + \varepsilon_{eq}^p + \varepsilon^t \quad (2)$$

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma_{eq}}{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{eq}^p = \int d\varepsilon_{eq}^p \quad (4)$$

$$d\varepsilon_{eq}^p = \frac{\sqrt{(d\varepsilon_x^p - d\varepsilon_y^p)^2 + (d\varepsilon_y^p - d\varepsilon_z^p)^2 + (d\varepsilon_z^p - d\varepsilon_x^p)^2 + \frac{3}{2}(d\gamma_{xy}^p^2 + d\gamma_{yz}^p^2 + d\gamma_{zx}^p^2)}}{\sqrt{2(1+\nu)}} \quad (5)$$

$$\sigma^t = E\varepsilon^t = E\alpha\Delta T \quad (6)$$

$\varepsilon^e$ : 弾性ひずみ       $\sigma^t$ : 熱応力       $\varepsilon_{eq}^p$ : 相当塑性ひずみ

$d\varepsilon_{eq}^p$ : 相当塑性ひずみ増分       $E$ : 弾性       $\nu$ : ポアソン比

$\alpha$ : 線膨張係数       $\Delta T$ : 温度変化量

フィルムの降伏点は、ひずみ速度や引張試験の方法によって値が変化する。このため、一軸引張試験 (1%/min) と二軸引張試験 (応力比 1:1, 0.67%/min) の結果を基に、Von-Mises の降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性材料モデルを作成し、本報では表 1 に示すパラメータを使用する。このモデルから二軸引張試験の再現を行い、その結果を実験結果と比較する。図 7 より近い結果を示していることから、作成したモデルは妥当と言える。

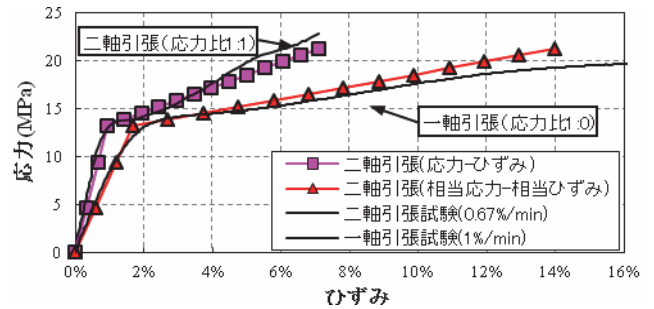


図7 解析モデルによる再現性

表1 フィルムの解析パラメータ

| ポアソン比 | 一次剛性   | 二次剛性  | 三次剛性 | 一次降伏点    | 二次降伏点    | 線膨張係数              |
|-------|--------|-------|------|----------|----------|--------------------|
| 0.45  | 800MPa | 73MPa | 3MPa | 1.66%    | 15%      | $6 \times 10^{-5}$ |
|       |        |       |      | 13.28MPa | 23.04MPa |                    |

アーチの応力解析には汎用解析プログラム MIDAS Gen を用いた。モデルは試験体と同断面とし、鋼材のヤング係数 205,000N/mm<sup>2</sup>を使用する。

図 8 に延伸立体成形実験の解析手順を示す。ここでの仮想温度は応力緩和を模擬するために用いるもので、適用ステップの応力とひずみ以外には影響を及ぼさない。

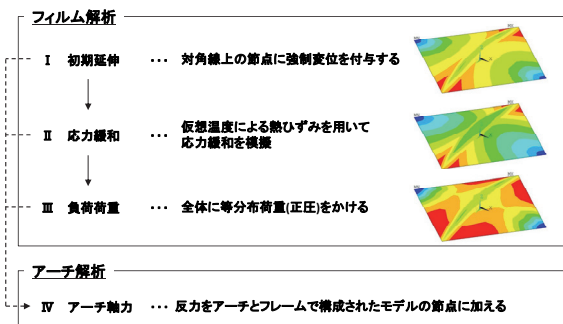


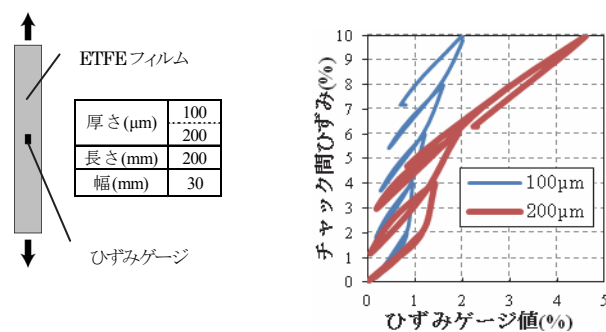
図8 解析フローチャート

## 2.3 フィルム用ひずみゲージの補正

実験でフィルムの計測に用いたひずみゲージは、ゲージベースのポリイミドがフィルムに比べて剛性が非常に高いため、計測値は実際のひずみ量よりも小さな値となる。従って、これを補正する変換係数を決定するため、全体ひずみ制御で繰返一軸引張試験を行い、両値を比較する。

図 9(b)のように負荷側と除荷側で異なる経路の荷重履歴依存性が確認できたため、それぞれに関して実験結果から近似式 図 9(c)を設定した。ただし、計測値 1.2～1.7%区間(200μm)、

0.6～1.0%区間(100 $\mu$ m)では、チャック間ひずみに対するひずみゲージの感度が鈍く、変換が難しい。



(a) 試験体概要

(b) 対応曲線

(c) 変換近似式(上:100 $\mu$ m 下:200 $\mu$ m)

|     | ひずみゲージ値                  | 変換近似方程式                                                              |
|-----|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 負荷側 | $0 \leq x < 0.947$       | $y = 96.9x^6 - 204.1x^5 + 156.3x^4 - 50.1x^3 + 5.2x^2 + 1.9x + 0.01$ |
|     | $0.947 \leq x \leq 2.62$ | $y = 0.97x^3 - 7.8x^2 + 26.01x - 46.3x + 48.6x - 17.0$               |
| 除荷側 | $0 \leq x \leq 2.62$     | $y = 2.45x + \alpha$                                                 |
|     |                          | $\alpha$ は除荷前のひずみ値に応じて設定する。                                          |

|     | ひずみゲージ値                   | 変換近似方程式                                                 |
|-----|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| 負荷側 | $0 \leq x < 1.376$        | $y = 5.65x^4 - 11.813x^3 + 7.922x^2 - 0.375x + 0.106$   |
|     | $1.376 \leq x \leq 4.729$ | $y = -0.082x^4 + 1.158x^3 - 6.087x^2 + 15.372x - 8.062$ |
| 除荷側 | $0 \leq x \leq 4.729$     | $y = 1.653x + \beta$                                    |
|     |                           | $\beta$ は除荷前のひずみ値に応じて設定する。                              |

図9 補正概要

## 2.4 応力緩和率の推定

仮想温度を用いて応力緩和を模擬する場合、応力の緩和量の把握が必要となる。膜面の応力を測定するには音波測定機を用いる方法があるが、対角アーチ試験体は膜面の曲率が大きく、その方法は適用しづらい。従って、フィルムの応力が反映されるアーチ軸力を用いて、応力緩和について考察する。

厚さ200 $\mu$ m・ライズ比15%の試験体から得られた、中央部アーチ直交方向のフィルムひずみ(変換後)と、アーチ頂点部の軸力の関係を図10に示す。A点で傾きが変化していることからフィルムが一次降伏点に達したと考えられる。延伸後の2時間放置によってB点まで軸力が低下しているが、このときの値はA点と一致している。このことから、フィルム中央部では2時間程度で一次降伏点付近まで応力が緩和すると推定できる。

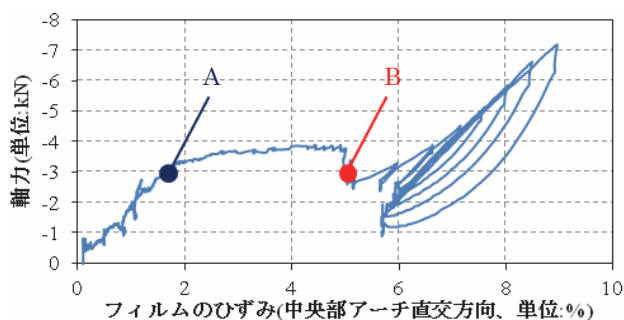


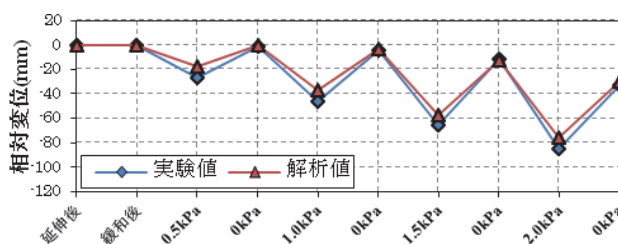
図10 アーチ軸力とフィルムのひずみの推移

## 2.5 実験と解析の比較

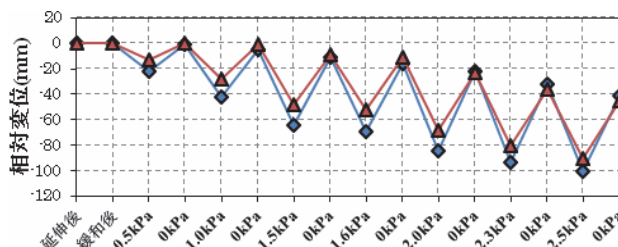
フィルム中央部付近での鉛直変位の推移を図11に示す。ここでは延伸立体成形後を基点(=0)とし、それ以降の相対変化

量について比較する。負荷側は実験値が解析値より大きな値となっているが、これは加力中のクリープによる影響と考えられ、全体的には除荷後の値がほぼ同じであることや、残留変形が発生するタイミングが同時であるなど概ね近い結果と言える。

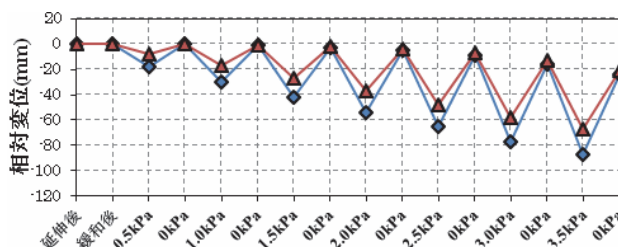
次に、各試験体の中央部および頂点部におけるフィルムのひずみ計測値・解析値、及び格子長さの測定値を図12に示す。全試験体で2.3節で示したひずみゲージの感度が鈍い区間を含んでおり、この区間では差異が大きくなっているが、それ以外では良好に一致している。



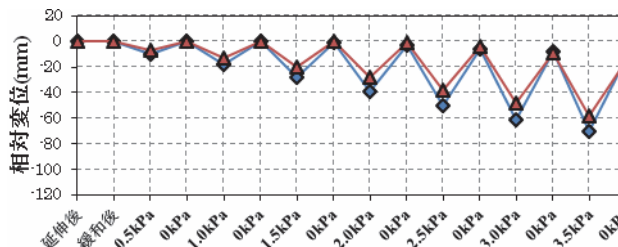
(a) 厚さ100 $\mu$ m ライズ比10%試験体



(b) 厚さ100 $\mu$ m ライズ比15%試験体

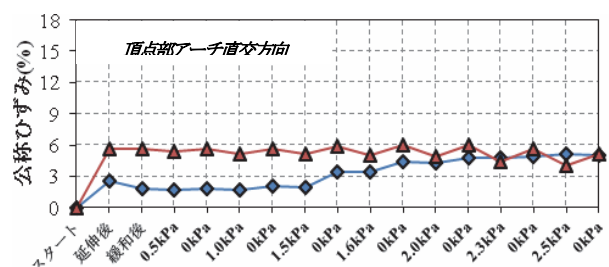
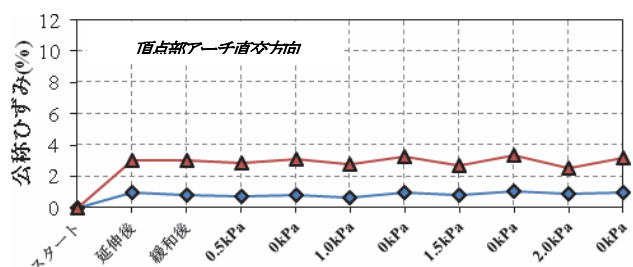
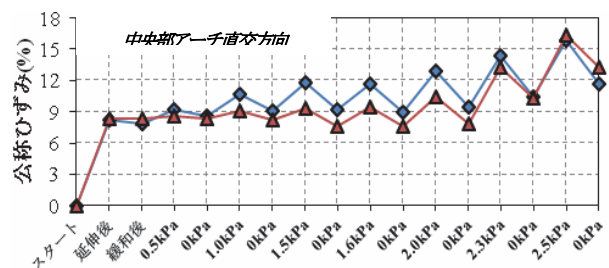
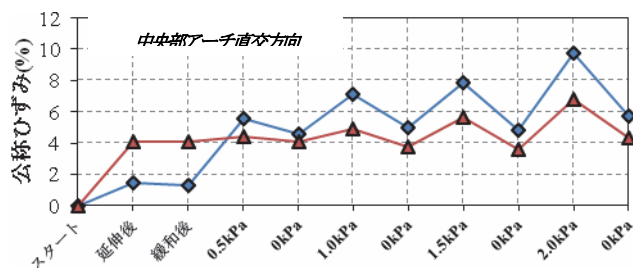
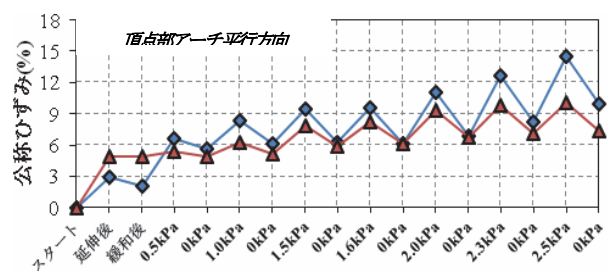
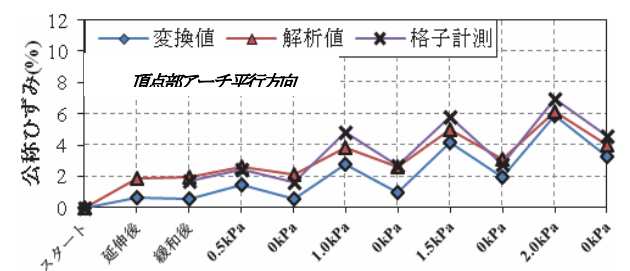


(c) 厚さ200 $\mu$ m ライズ比10%試験体



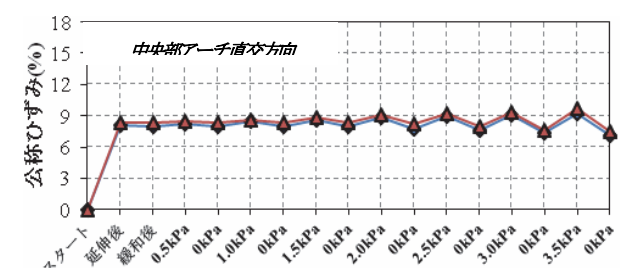
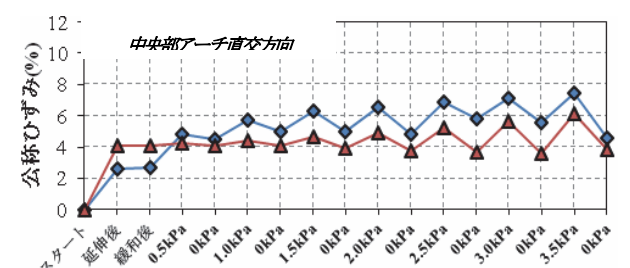
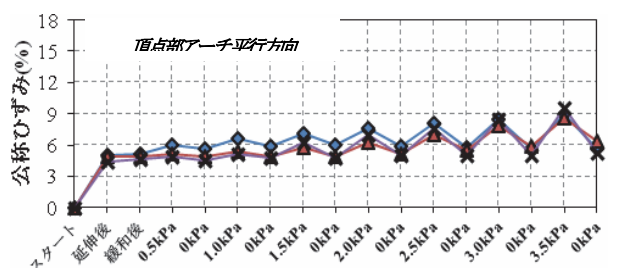
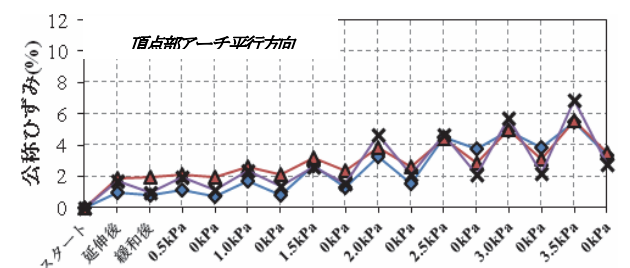
(d) 厚さ200 $\mu$ m ライズ比15%試験体

図11 鉛直変位比較



(a) 厚さ 100 $\mu$ m ライズ比 10%試験体

(b) 厚さ 100 $\mu$ m ライズ比 15%試験体



(c) 厚さ 200 $\mu$ m ライズ比 10%試験体

(d) 厚さ 200 $\mu$ m ライズ比 15%試験体

図 12 フィルムのひずみ

図13にアーチ軸力の比較結果を示す。実験値は、鋼管の中心を中立軸と仮定し、アーチ側面(図5(a)の頂点部:①③、中間部:④⑥)の平均ひずみに、アーチ断面積と鋼のヤング係数 $205,000\text{N/mm}^2$ を乗じて求めている。文献<sup>9)</sup>で延伸時の挙動を確認しているため、ここでは延伸後を基点として考察する。応力緩和中の値に差異が見受けられる一方で、全試験体で雰囲気温度に変化が存在している。そのため、ライズ比10%試験体からフィルムを取り除いたアーチ単体について、温度を変化させてテストしたところ( $20\pm1.5^\circ\text{C}$ )、約 $2\text{kN/}^\circ\text{C}$ の違いが確認できた。このことから、その熱ひずみの影響であると考えられる。これを考慮すると、応力緩和後の負荷荷重時における相対変化量は非常に比較的良い評価できている。

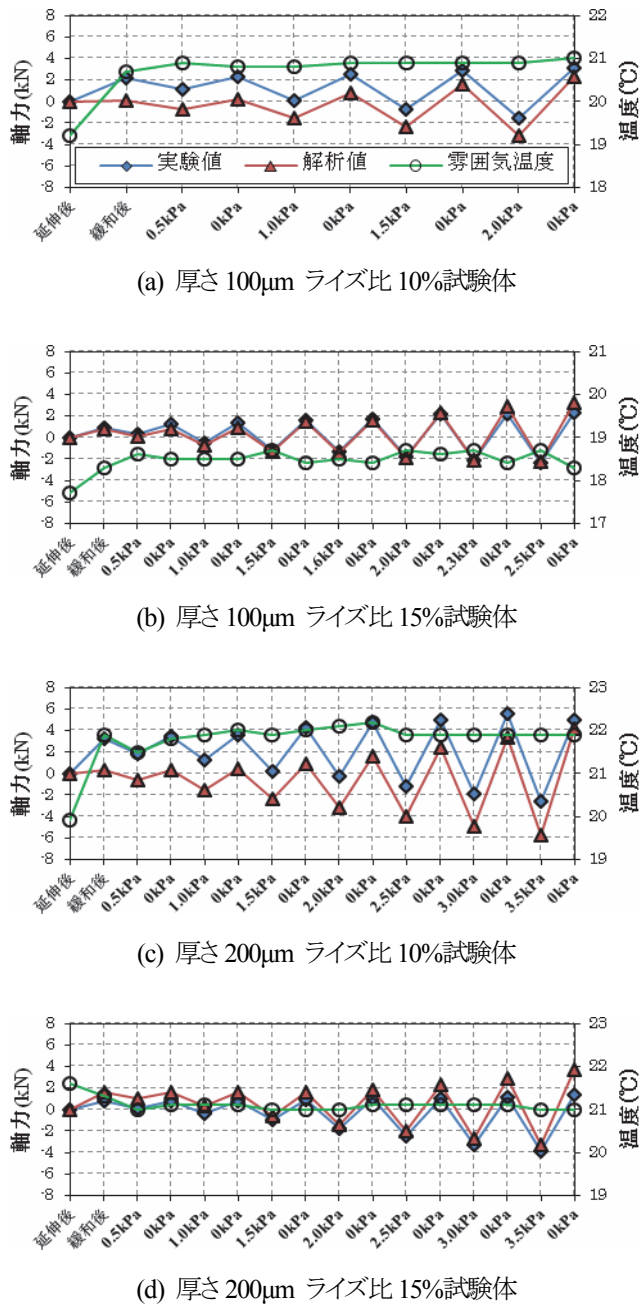


図13 軸力比較

### 3. 延伸後の耐力

#### 3.1 解析概要

図14に示すモデルを対象として弾塑性解析を行う。応力緩和量は、フィルム中央部で一次降伏点まで緩和する短期間と、フィルム中央部で50%緩和する長期間の2パターンとする。

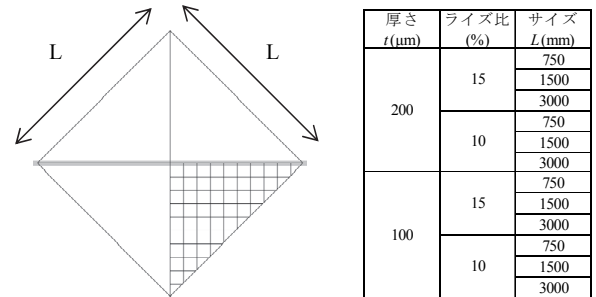


図14 対象モデル

#### 3.2 定義

一般的に建築材料工学の分野で用いられる「耐力」という用語は、アルミニウム合金のような降伏点が明瞭でない材料において、降伏応力に相当する値のことをいう。ただし、本報では延伸により塑性域に達したフィルムが負担できる荷重の最大値を「延伸後の耐力」と定義する。

前章において、弾塑性解析モデルの妥当性が確認されたため、そのモデルを用いて、応力緩和後の各荷重時の応力状態を再現する。ただし、文献<sup>2)</sup>からテンション方式の場合、長期間経過により約50%の応力緩和が発生することが分かっているため、本節では緩和率を50%とする。

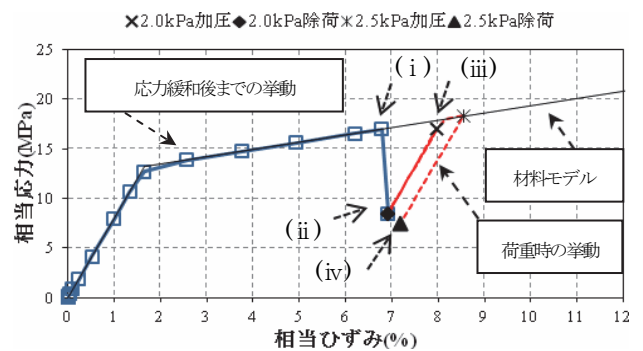


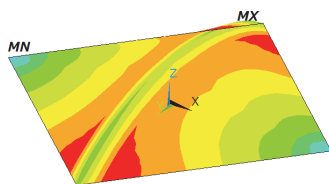
図15 解析による挙動再現(200 $\mu\text{m}$ ・15%・1500mmモデル)

中央部アーチ直交方向におけるフィルムの相当ひずみと相当応力の関係を図15、また図中の(i)～(iv)における応力分布図を図16に示す。これより負荷時の応力状態が延伸直後の応力値を超えない場合、除荷後の応力値は負荷前と同じ値に戻っていることが分かる。従って、対象モデルが過去に経験した最大応力に相当する荷重が「延伸後の耐力」と言える。このことは、弾塑性挙動における加工硬化現象と類似している。

(i) 延伸後

$$\sigma_{eq}^{\max} = 6.24$$

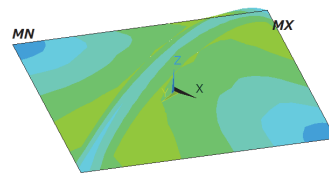
$$\sigma_{eq}^{\min} = 23.0$$



(ii) 応力緩和後

$$\sigma_{eq}^{\max} = 2.78$$

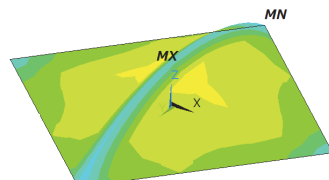
$$\sigma_{eq}^{\min} = 13.3$$



(iii) 2.0kPa負荷時

$$\sigma_{eq}^{\max} = 6.00$$

$$\sigma_{eq}^{\min} = 18.1$$



(iv) 2.0kPa除荷時

$$\sigma_{eq}^{\max} = 2.78$$

$$\sigma_{eq}^{\min} = 13.3$$

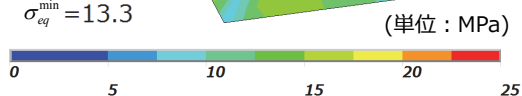
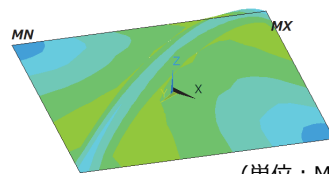


図 16 応力分布図(200 $\mu$ m・15%・1500mm モデル)

### 3.3 フィルムの熱収縮現象

ポリエチレンは結晶部と非晶部からなる結晶性樹脂であり、製造中に電子線を照射することで非晶部においてエチレン分子同士が繋がった架橋点が形成される。一般的には電子線照射後に成形のための加熱・冷却加工により、膨張した架橋ポリエチレンが得られるが、これは結晶部の融点以上の加熱により結晶が融解して軟化し、架橋点の存在から膨張前の形状まで熱収縮する[図 17]。

このような形状記憶効果はエチレン分子結合を多く含んだフィルムでも得られ、実際に図 18 のように温風(約 70℃)をかけることで塑性ひずみが回復する現象が見られる。

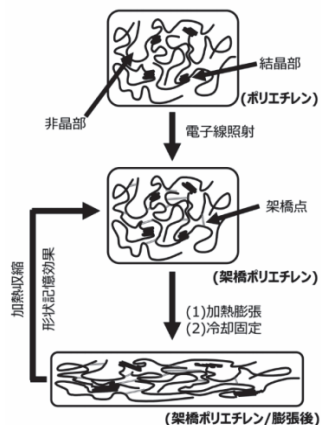
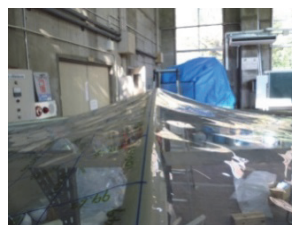
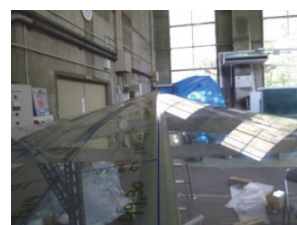


図 17 熱収縮の原理<sup>7)</sup>



(a) 処理前



(b) 温風(約 70℃)処理後

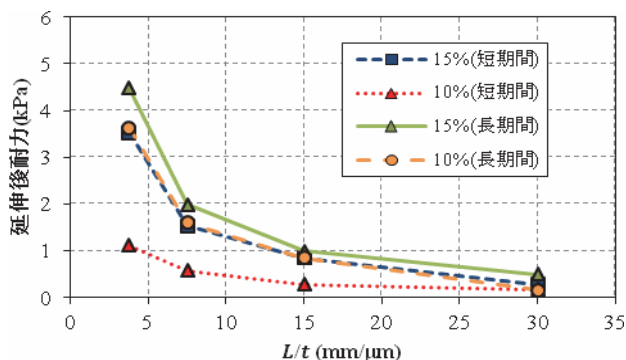
図 18 温風によるひずみ回復現象

### 3.4 延伸後の耐力

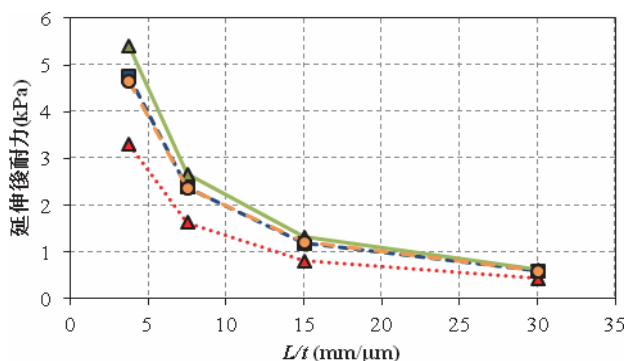
応力変化の大きいフィルムの中央部における除荷後の残留ひずみに着目し、①残留ひずみが増加しない場合と、②残留ひずみ増加量が 0.5%以内の場合について、延伸後の耐力を提案する。ただし、②の設定値 0.5%は、熱収縮現象により、温風をかけることで残留ひずみを許容できる可能性があることから、これを考慮して仮に設定している。

フィルムを固定するフレームの辺長  $L$  をフィルムの厚さ  $t$  で除した値を横軸にとり、延伸後の耐力を縦軸に示す[図 19]。①②共に横軸が 10 以下になると急激に耐力が上昇する傾向を示している。ライズ比 10%モデルは 15%よりも全体的に耐力が低い、長期間の応力緩和により大幅に向上していることが見て取れる。また、0.5%の残留ひずみの発生を許容し

た場合、サイズ/厚さ比( $L/t$ )が小さくなるほど影響が大きくなることが分かった。



(a) 提案①: 残留ひずみ増加無し



(b) 提案②: 残留ひずみ増加 0.5%以内

図 19 延伸後の耐力

#### 4. まとめ

本報では、フィルムを用いた対角アーチ型延伸立体成形張力膜構造について、実験及び解析から以下の知見を得た。

- 1) 延伸成形後、時間経過により応力緩和が発生しており、フィルム中央部において二時間程度で一次降伏応力まで緩和すると考えられる。
- 2) 実験の検証結果から、実験と解析は似た傾向を示しており、応力緩和を仮想温度で模擬することにより、弾塑性解析が有効である。
- 3) 弾塑性解析を用いて検証した結果、塑性化したフィルムの応力緩和後における許容応力はそれまでに材料が経験した最大応力値と同値であると思われる。
- 4) 複数のモデルについて解析を行った結果、サイズを小さくする、アーチのライズ比を大きくすることで許容荷重が上がる傾向がある。

今後は、解析の再現性を向上するために粘性を含んだモデルを構築する必要がある。

#### 謝辞

ETFE フィルムの延伸立体成形実験を実施するにあたり、太陽工業(株)、旭硝子(株)のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 森山史郎: ETFE フィルム空気膜構造における粘弾性挙動に関する研究、横浜国立大学大学院博士論文、2006
- 2) 丁乙碩: ETFE フィルムを用いた張力膜構造の粘塑性挙動と延伸成形に関する研究、横浜国立大学大学院博士論文、2013
- 3) 水野公義、斎藤公男、岡田章、宮里直也: ETFE フィルムの張力膜構造への適用性に関する基礎的研究 ばねストラット式張力膜構造の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp911-912、2007
- 4) 河端昌也、丁乙碩: ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 (その 1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2008
- 5) 河端昌也、丁乙碩、岡村卯吉: 外周引込によるテンション方式フィルム膜構造に関する研究 (その 1) 施工時延伸と経年後の張力変動、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp919-920、2012
- 6) 丁乙碩、安武信一、河端昌也: ETFE フィルムを用いた張力膜構造の延伸成形に関する研究、膜構造論文集 2012、pp1-12、2013
- 7) 住友電気工業: SEI テクニカルレビュー第 184 号、pp66-70 2014 年 1 月

---

## A Study on Proof Stress after the Stretch Fabrication of Diagonal Arch Square Panel using ETFE Film

Soichiro FURUTANI <sup>\*)</sup>

Masaya KAWABATA <sup>\*\*)</sup>

#### SYNOPSIS

The tension type is widely being accepted as the structural form in which ETFE film is used, because such structures offer the advantage of various shapes formed by tensile stress and elimination of the need for blast air. Recently, the numbers of tension type structures are increasing, but there are problems of viscosity behavior such as relaxation of ETFE films under long-term stress. In previous works, “Stretch-fabrication of Three-Dimensional Shapes Using ETFE Film” was proposed as a way to form a curved surface by pressing film against an arch, and it was confirmed that such structure has the effectiveness of introducing tension.

In this paper, to raise the possibility of “Stretch-fabrication of Three-Dimensional Shapes Using ETFE Film”, we investigate the influences of viscosity and the behavior under additional loads after the stretch fabrication, from both structural experiments and FEM analysis. In addition, we propose the proof stress after the stretch formed by analyzing various scales.

---

<sup>\*)</sup> Graduate Student, Department of Architecture and Urban Culture, Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University

<sup>\*\*)</sup> Dr-Eng. Associate Prof., Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University