

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

丁 乙碩*
安武 信一**
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の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例が増え続けているが、フィルムのクリープ、リラクセーションのような粘性挙動に対する課題も持っている。著者らはこれまでにフィルムの延伸成形方法を提案し、テンション方式における有効性を確認した。

一方、テンション方式に延伸成形を適用するうえで、色々な張力導入方法や裁断方法を考慮する必要があると考えられるが、ETFE フィルムを用いたテンション方式の延伸成形に関する研究例はほとんどない。

そこで、本報では、テンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、様々な形状のモデルを対象として延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握する。

1. はじめに

近年、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE フィルムを用いた事例が増えており、その構造形式にはクッション方式とテンション方式が効率的な方法として用いられているが、フィルムのクリープ、リラクセーションのような粘性挙動の懸念から、内圧により発生応力を抑えられるクッション方式の施工例が多く報告されている。一方、テンション方式は内圧の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例[図 1]が増え続けているが、粘性挙動に対する問題点を解決しなければならない課題も持っている。

著者らは、これまでにフィルムの耐力を高める方法として、施工時にフィルムを延伸する方法を提案し、テンション方式におけるその有効性を確認した^[1]。また、延伸成形による実験的検証を行い、長時間に渡って張力測定を行った結果、リラクセーション現象は起きるものの、張力保持率はほぼ50%以上を維持しながら安定していく傾向が確認されたことより、延伸成形の適用可能性を確認した^[2] [図 2]。

一方、テンション方式に延伸成形を適用するうえで、考えられる課題としては、張力導入方法や裁断方法などが挙げられる。まず、フィルムの延伸成形時における張力導入方法としては、現在、外周から引き込む方法が一般に行われているが、フィルムの場合、応力集中による引裂きの問題^{[3][4]}が生じることやフィルムの高耐力化のための張力導入装置が必要となることを考えると、他の張力導入方法も考慮する必要がある。次に、フィルムの裁断方法を考えると、膜構造においては初期張力により形成される曲面を等張力曲面と仮定し、施工時に等張力曲面を形成するために、形状解析からの3次元要素データを平面に展開し、裁断パーツを決定、そして分割されたパーツを結合するという

立体的裁断が行われている。また、フィルムの場合、既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かせば、立体的裁断や溶着作業などを減らしたシンプルな曲面形成も可能であると考えられる。また、テンション方式の様々な形状を実現するためにも色々な張力導入方法を考慮する必要があると考えられるが、ETFE フィルムを用いたテンション方式の延伸成形に関する研究例はほとんどない。

そこで、本報では、テンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、様々な形状のモデルを対象として延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握する。



(a) Training Center for Mt. Rescue (2008) (b) Queens Wharf Cloud(2011)

図1 ETFE フィルムを用いたテンション方式の事例



図2 延伸成形によるテンション方式の実証実験

* 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 大学院生

** 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 大学院生

*** 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 建築都市文化専攻 准教授 博士(工学)

2. ケーススタディー

2.1 スタディーモデル及び概要

延伸成形による様々な形状への適用可能性を確認するためにスタディーモデルを作成して比較検討を行う。スタディーモデルは、図3のような四角形パネルタイプにおけるアーチの位置によって形成される5つのモデルとする。

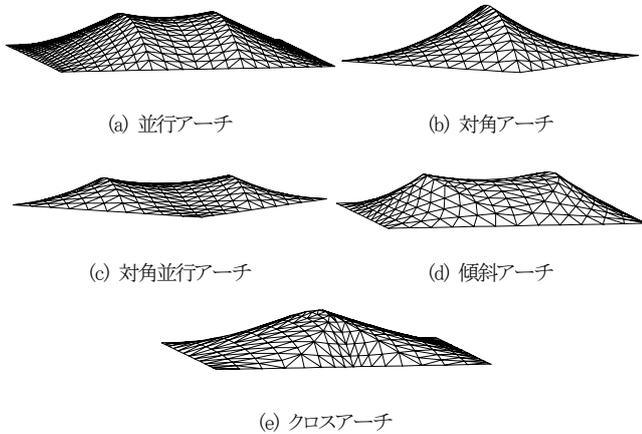


図3 スタディーモデルの分類

モデルの試験体は実大スケールに対して部材検討を行い、1/5の縮尺とする。実大パネルの規模は、フレームを3,000mm角の正方形、アーチの高さはスパンの15%、ETFEフィルムの厚さは250 μm と想定する。荷重条件はフィルムに対して長期及び短期荷重(積雪、風)を考慮し、図4のように設定した。また、フィルムの解析結果を用いて外周フレーム及びアーチに対する部材検討を行った。その結果のうち、並行アーチモデルの結果を図5に示す。部材検討結果より、外周フレームには $-150 \times 75 \times 9 \times 12.5$ の溝形鋼が、アーチには $\phi -60.5 \times 3.2$ の鋼管が必要という結果が得られた。

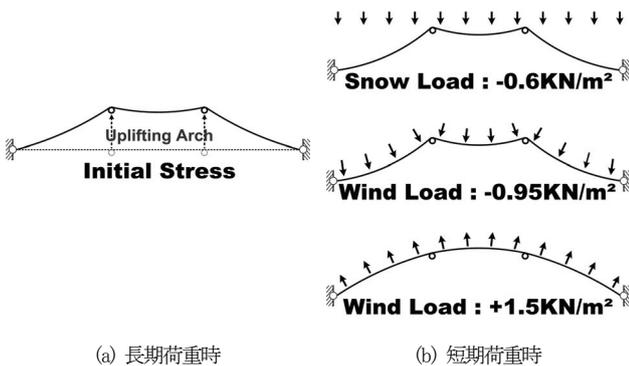


図4 付加荷重条件

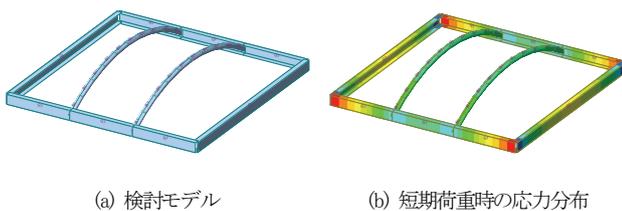


図5 並行アーチモデルの部材検討

以上の結果をふまえて、スタディーモデルの試作は600mm角の正方形に対してETFEフィルムの厚さを50 μm 、外周フレームをアングル材(L-30 \times 30 \times 2 \times 600)、アーチをアルミパイプ($\phi -13 \times 1$)とした。並行アーチモデルの試験体の様子を図6に示す。

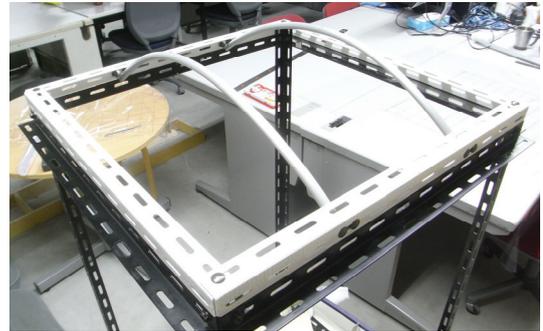


図6 スタディーモデルの様子

2.2 スタディーモデルの形状探索及び裁断図

スタディーモデルを対象として延伸成形を適用するために、各モデルの形状探索を行い、その結果より各モデルに対する裁断図を検討する。形状探索には汎用プログラムANSYSを用いた。材料モデルは、フィルムの弾塑性挙動を現すために、Von-Mises降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性モデルを採用した。フィルムの材料定数を図7に示す。解析条件は、初期張力を想定して初期の平面状態からアーチの位置でZ方向に強制変位を与えた。なお、解析領域は、モデルの対称性を考慮して全体の1/4とした。

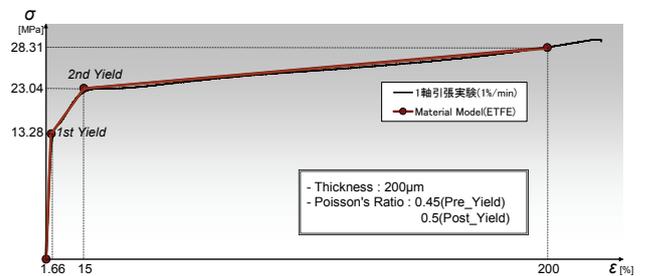


図7 フィルムの材料モデル

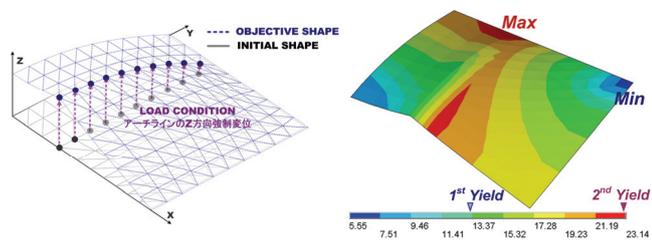
延伸によるフィルムの釣合形状と膜面の応力分布を図8に示す。解析の結果、延伸による各モデルの形状は等張力曲面とほぼ同じ結果となったが、応力分布は強制変位を与えたアーチ及びアーチ端部付近に高い応力が生じる結果となった。

次に、形状探索の結果を用いて、各モデルの裁断図について検討を行う。本節では、立体裁断をせずに、平面からの延伸によって曲面を形成することを試みる。まず、解析結果より、600mm角の正方形パターンを用いる場合、応力分布は第2降伏点を超えるため、外周引き込みによる延伸成形は相当大変な作業になると考えられる。

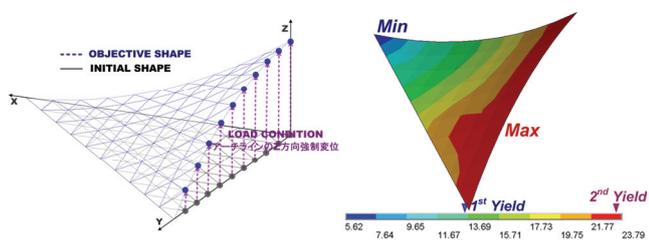
従って、スタディーモデルを対象として延伸成形を行うために、2つの方針に基づいて裁断図を検討する。1つは張力導入時に同じ辺を同時に引き込めるように直線で結ぶことで、外周が四角

形になるようにする。もう1つは形状探索結果より求めた 3 次元曲面の面積を裁断図の面積とほぼ同じにすることで、外周の長さを決定する。

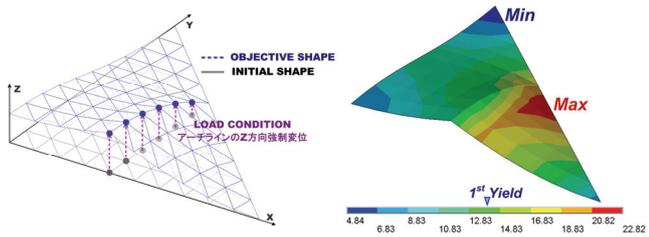
以上の方針により、各モデルに対して設定した裁断図を図9に示す。図の中で、左側は曲面を平面展開した図で、右側は裁断図である。



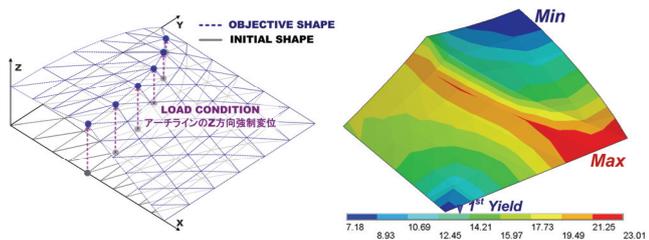
(a) 並行アーチ



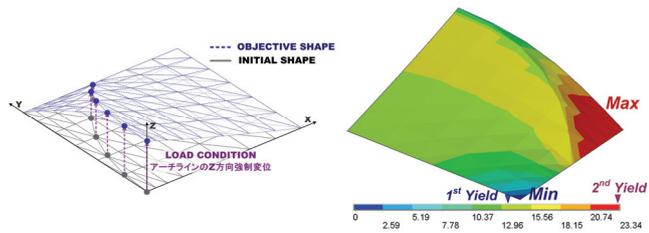
(b) 対角アーチ



(c) 対角並行アーチ

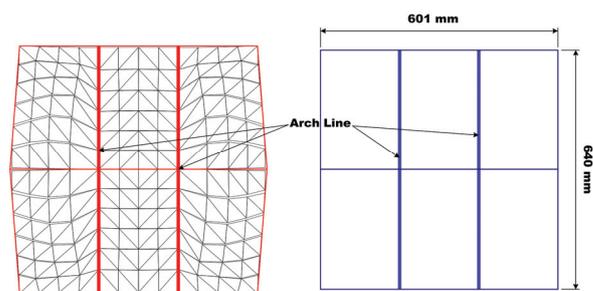


(d) 傾斜アーチ

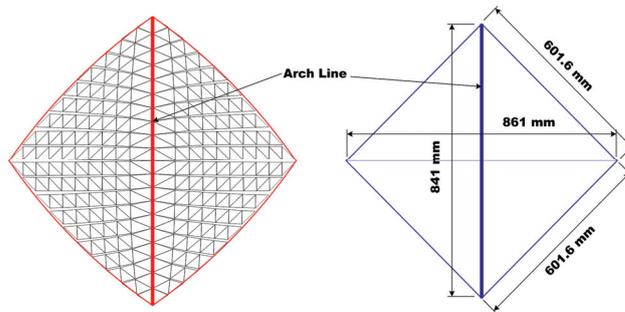


(e) クロスアーチ

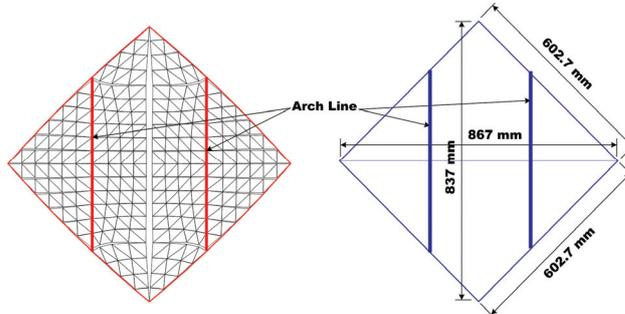
図8 延伸による初期形状及び応力分布図



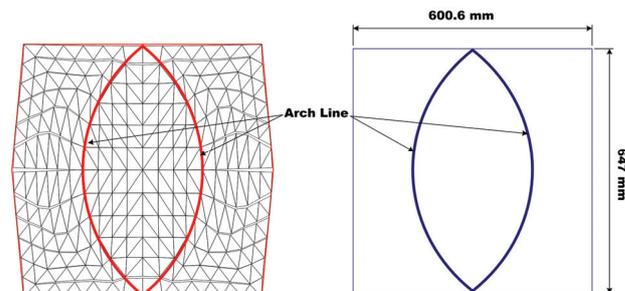
(a) 並行アーチ



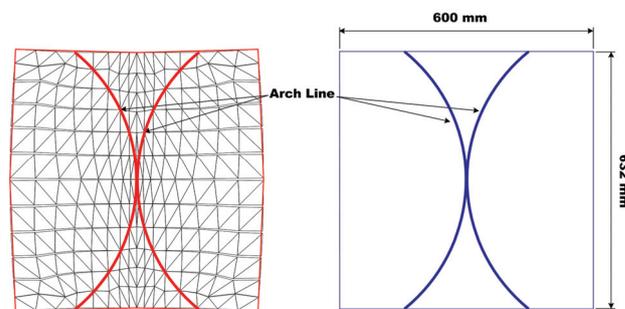
(b) 対角アーチ



(c) 対角並行アーチ



(d) 傾斜アーチ



(e) クロスアーチ

図9 スタディーモデルの裁断図

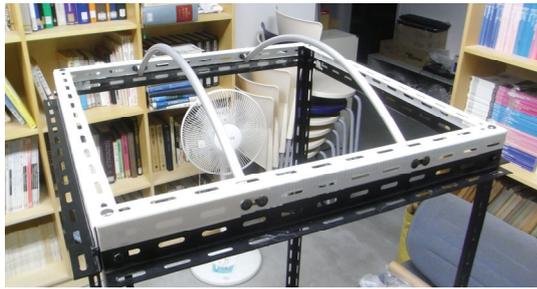
2.3 スタディーモデルの試作と考察

前節の手法で求めた裁断図を各モデルの試作に用いることで、延伸成形の適用可能性を検討する。試作の流れを図10に示す。延伸成形は外周引き込みにより行い、引き込みの目標値は、予め裁断図の上に各モデル別に縮小率を考慮した基準線までとした。なお、引き込み完了時はフィルムの上にフラットバーを付け、ボルト締めにより固定した。

5つのスタディーモデルを対象とした延伸成形による試作結果を図11に示す。試作結果より、延伸により様々なテンション方式の形状形成が可能で、形状に合わせた裁断図を使うことで、効果的に延伸成形を行えることが分かった。

次に、各モデルのライズ比と面積の比較結果を表1に表す。初期の要素面積と裁断図の面積を比較すると、並行・対角並行・傾斜・クロスアーチではほぼ同じ面積比にすることが可能である。対角アーチでは、面積比の誤差が大きかったため、試作時にその誤差分の縮小率を考慮した結果となった。また、初期の要素面積と試験体の平面面積を比較すると、対角アーチで約15%と最も大きく、他では約5%前・後の面積比となっており、裁断図を考慮する場合には、面積比の目標値を5%前・後にした方が望ましいと考えられる。

また、実構造物の場合、フィルムの厚さが厚くなるため、試作時より張力導入が困難になることが予想された。そこで、実証実験では、アーチを利用した張力導入を行うこととした。



(a) モデルのフレーム製作



(b) 外部引き込みによる延伸成形



(c) フラットバーによる固定

図10 延伸成形の流れ

表1 スタディーモデルのライズ比と面積比

モデル名	試作時のライズ比	②初期の要素面積	③裁断図の面積	面積比(②と③)	面積比(①と②)
(a) 並行アーチ	15.0%	3,837 cm ²	3,837 cm ²	0%	6.59%
(b) 対角アーチ	17.6%	4,131 cm ²	3,618 cm ²	12.4%	14.74%
(c) 対角並行アーチ	11.5%	3,754 cm ²	3,630 cm ²	3.3%	4.28%
(d) 傾斜アーチ	14.2%	3,888 cm ²	3,888 cm ²	0%	8.01%
(e) クロスアーチ	15.8%	3,791 cm ²	3,791 cm ²	0%	5.32%

※ ①：試験体の平面面積(3,600 cm²)を指す。



(a) 並行アーチ(縮小率2%)



(b) 対角アーチ(縮小率6%)



(c) 対角並行アーチ(縮小率3%)



(d) 傾斜アーチ(縮小率3%)



(e) クロスアーチ(縮小率2%)

図11 試作後の様子

3. 実証実験

3.1 実験の概要

延伸成形の実構造物への適用性の確認を目的として、スタディーモデルのうち、対角アーチモデルの実証実験を行う。特に、スタディーモデルの試作では明確でなかった曲面形成時のフィルムの応力分布や延伸成形後の時間経過によるフィルムの力学的挙動についても検討を行う。本実験で、対角アーチモデルを選んだ理由としては、フィルムの応力分布及びリラクセーションのような粘性挙動を比較検討しやすいこと、デザインがシンプルなこと、対称形のための施工性が良いこと等が挙げられる。

試験体の規模は ETFE フィルムは厚さ 200 μm 、フレームは 1,500mm 角の正方形、アーチの高さはスパンに対するライズ比 10%と 15%の 2 通りとした。

3.2 解析的検討

まず、試験体の部材選定のため、解析的検討を行った。フィルムの形状解析や応力-変形解析には汎用プログラム ANSYS を、フレームの応力解析には MidasGEN を用いた。まず、フィルムを対象として長期(初期張力)及び短期荷重(積雪・風荷重)に対する解析を行う。さらに、実証モデルにおける張力保持率を把握するために、付加荷重の除荷後を想定した解析を行う。これらの解析の流れを図 12 に示す。なお、解析条件及びフィルムの材料モデルは、2. 2節と同様とした。

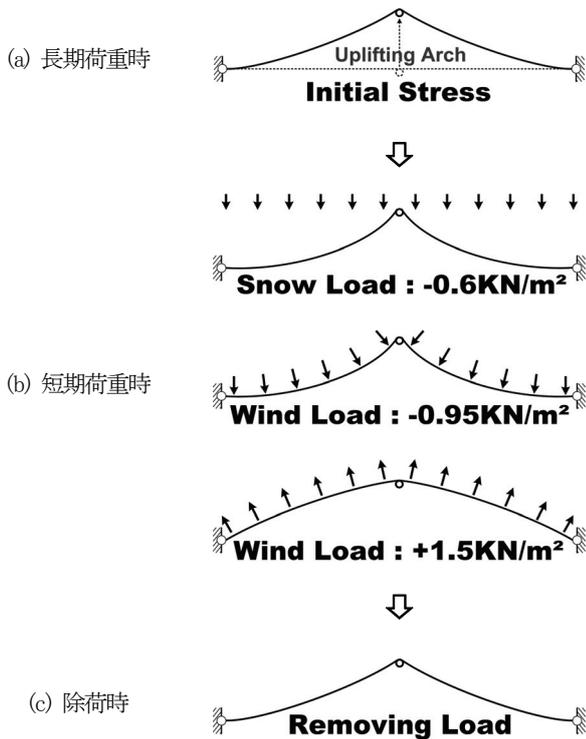


図 12 解析の流れ

長期及び短期荷重に対するライズ比 10%の結果を図 13 に、ライズ比 15%の結果を図 15 に示す。フィルムの最大応力はライズ比 10%の場合、アーチを中心に広い範囲で第 1 降伏点(13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)には至つ

てない。一方、ライズ比 15%の場合は、ライズ比 10%時より塑性域が大きく広がり、アーチ周辺部の応力は張力導入時及び風荷重(負圧)時に第 2 降伏点に達している。一方、アーチの直交方向のコーナー部は応力が低くなる結果となった。

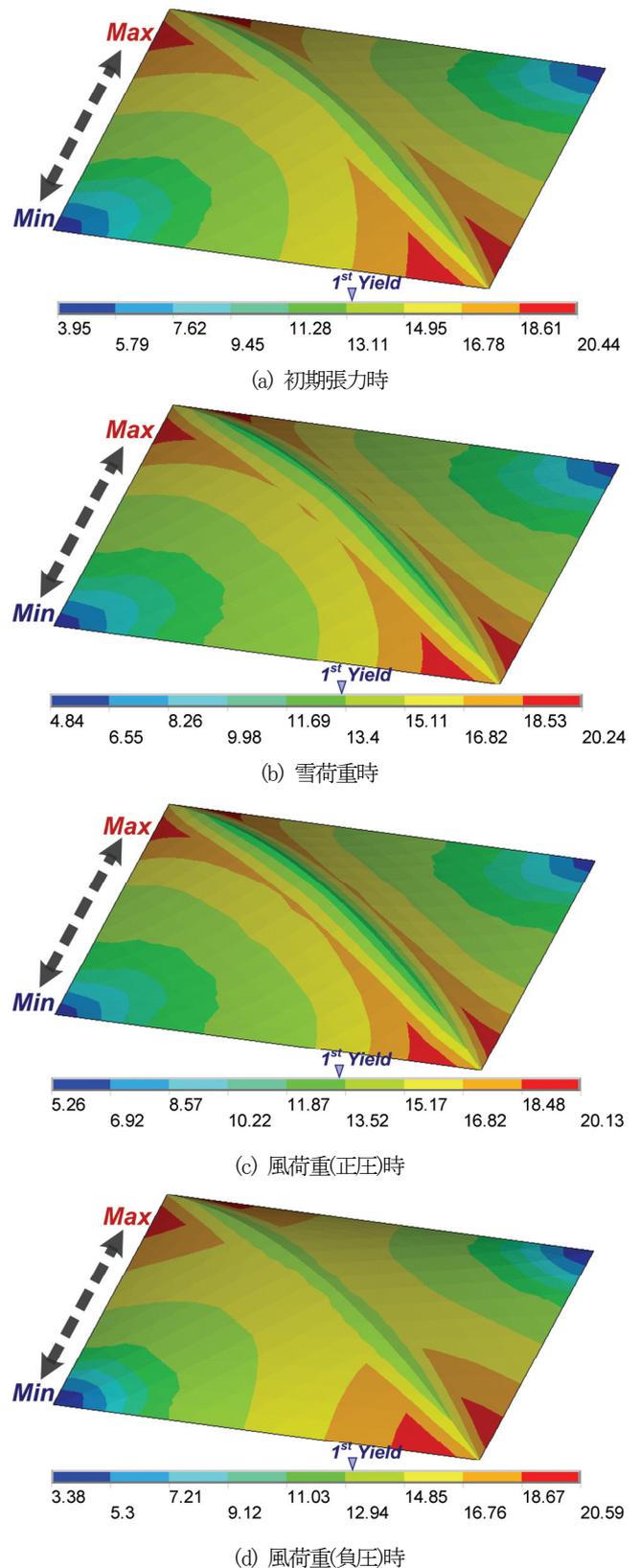


図 13 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 10%時)

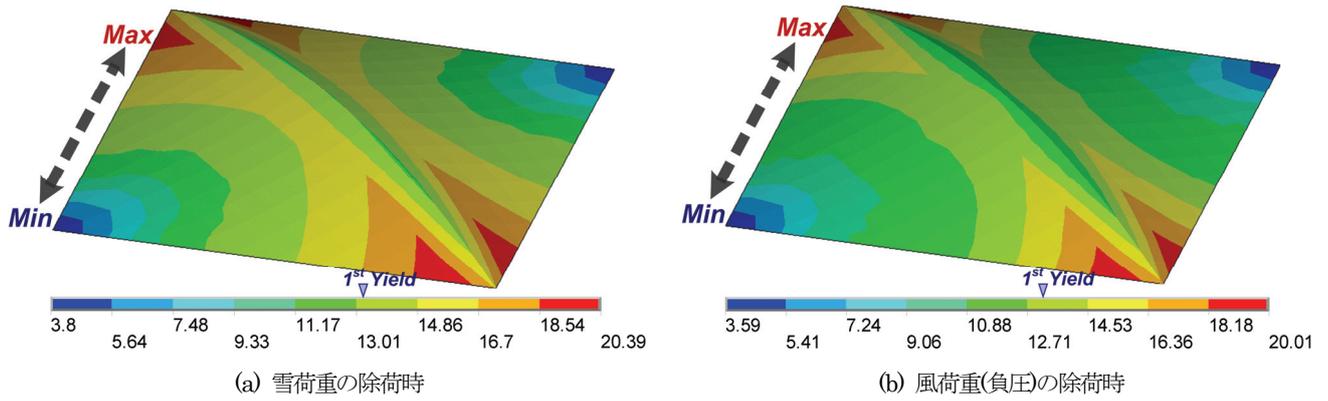


図 14 付加荷重の除荷後の応力分布(ライズ比 10%時)

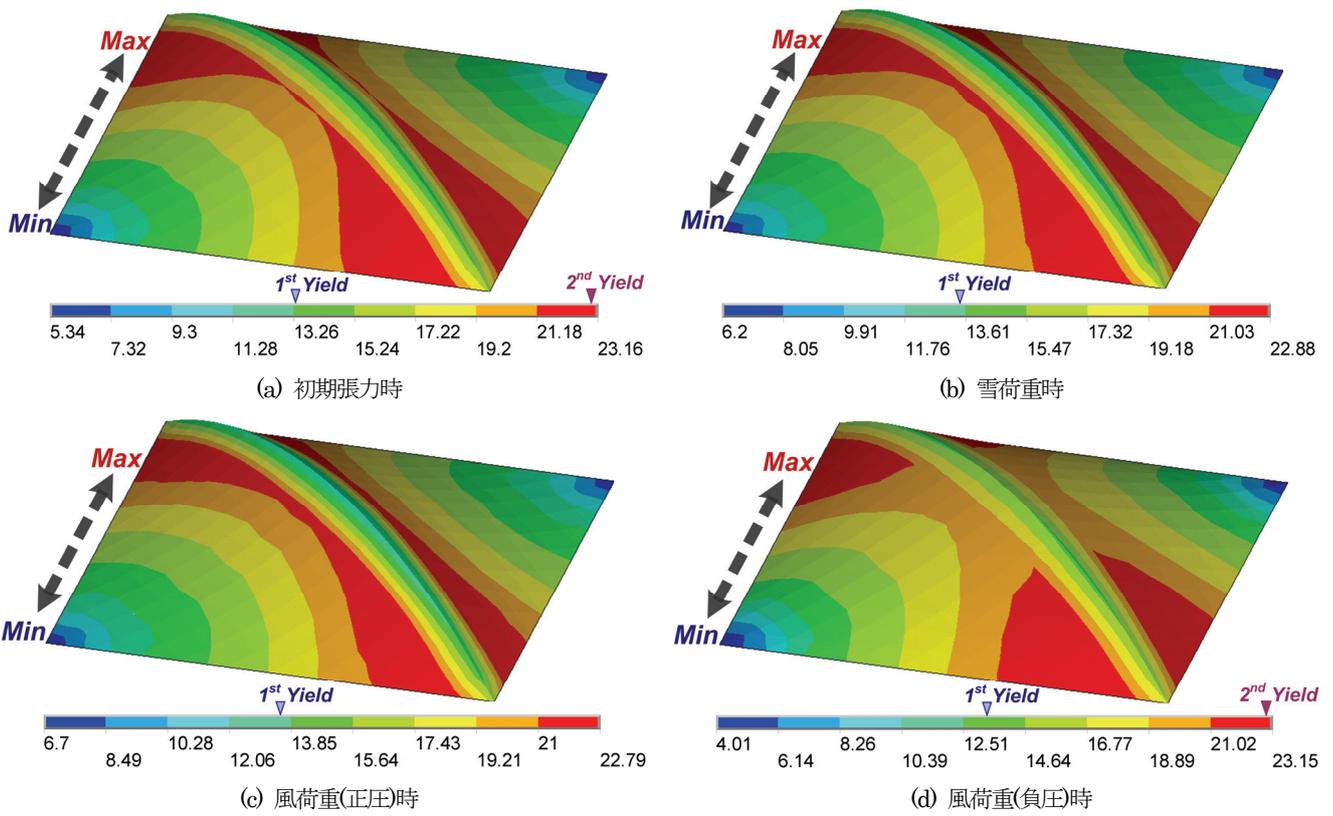


図 15 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 15%時)

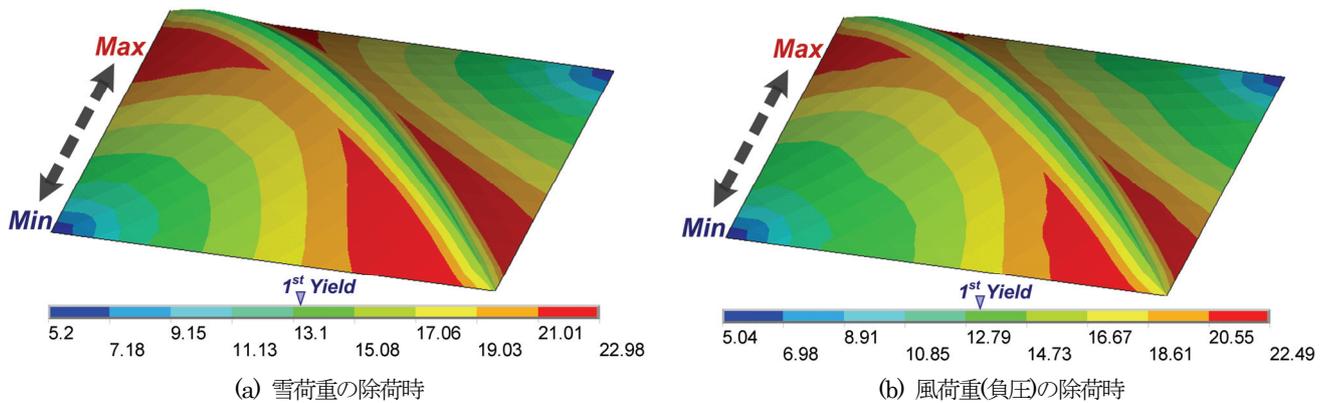


図 16 付加荷重の除荷後の応力分布ライズ比 15%時

次に、外部荷重の除荷時の応力分布を図14、図16に示す。図17にはライズ比10%に対して、張力導入(延伸成形) → 荷重の負荷 → 除荷時における応力-ひずみの関係をフィルムの1軸及び2軸(応力比1:1)引張時の曲線と合わせて示す。張力導入後のフィルムは各位置で応力が異なる。

そこで、次式で表される相当応力($\bar{\sigma}$)及び相当塑性ひずみ($\bar{\varepsilon}^p$)の関係を考える。これらを図17にプロットすると、1軸引張時の応力-ひずみ関係とはほぼ一致する結果となった。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)} \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon}^p = \int d\bar{\varepsilon}^p \quad (2)$$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{4}{3}[(d\varepsilon_x^p)^2 + d\varepsilon_x^p d\varepsilon_y^p + (d\varepsilon_y^p)^2 + (\frac{d\gamma_{xy}^p}{4})^2]} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \bar{\varepsilon}^p \quad (4)$$

ただし、 ε^e は弾性ひずみ、 $\bar{\varepsilon}^p$ は相当塑性ひずみを表す。

これらを用いて、ライズ比10%と15%時の相当応力-相当ひずみの関係を図18、図19に示す。張力導入後、積雪または風荷重の負荷により、応力は上昇し、除荷により応力は低下する。除荷後応力の初期応力に対する比率を張力保持率とすると、ライズ比10%の場合は積雪荷重に対して94%、風荷重時に対して86%、ライズ比15%の場合は積雪荷重に対して97%、風荷重時に対して92%の張力保持率となった。

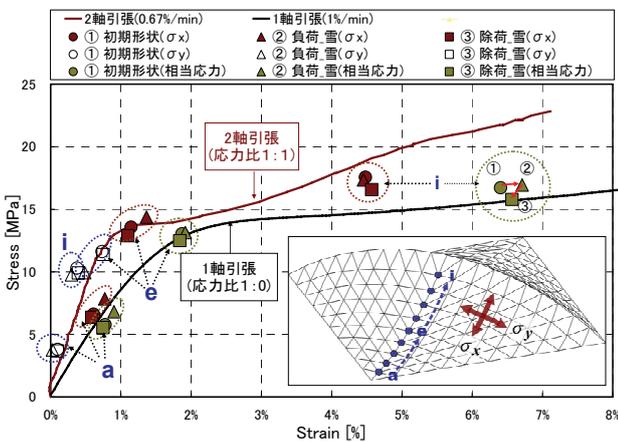
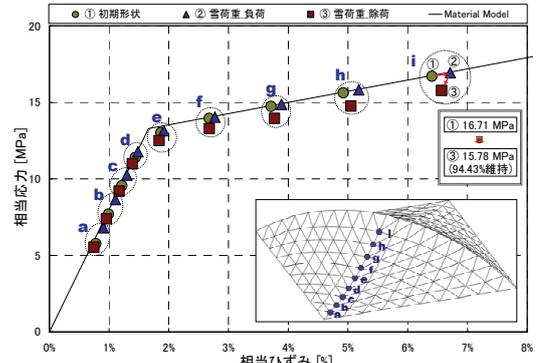
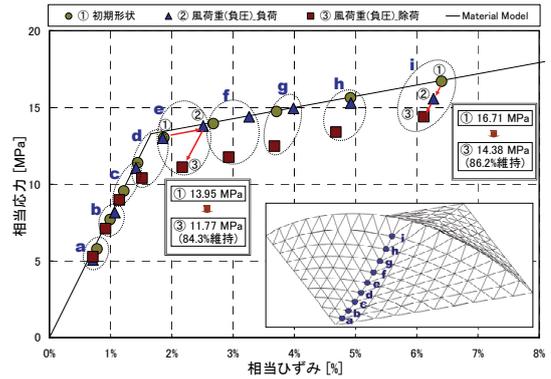


図17 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比10%時)

次に、フィルム境界部の反力値をアーチ及びフレームに荷重値として加えた場合の応力分布を図20に示す。結果より、外周フレームには[-100×50×5×7.5の溝形鋼が、アーチにはφ-34×2.3の鋼管が適切であることが確認された。

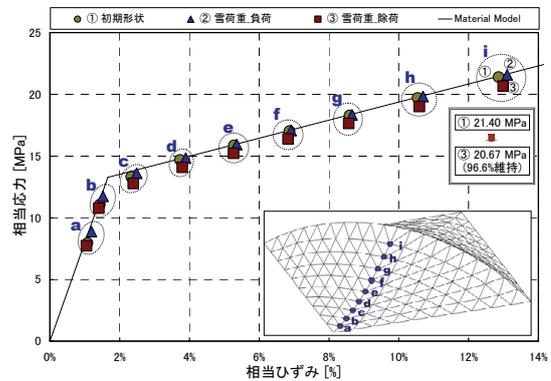


(a) 積雪荷重時

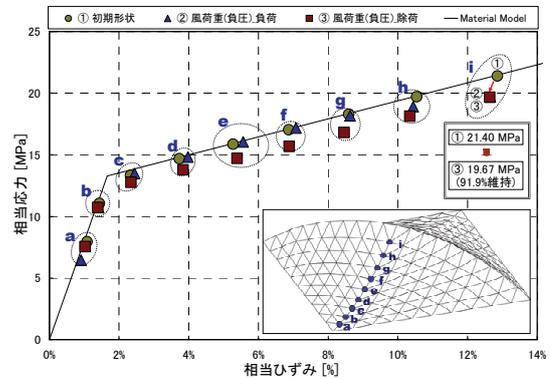


(b) 風荷重時

図18 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比10%時)

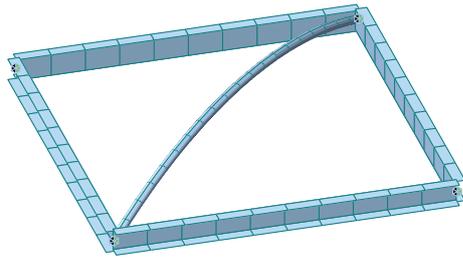


(a) 積雪荷重時

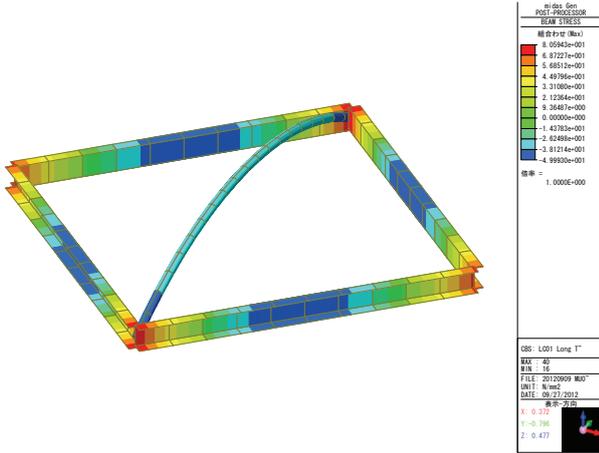


(b) 風荷重時

図19 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比15%時)



(a) 実験モデル



(b) 応力-変形解析(長期荷重)

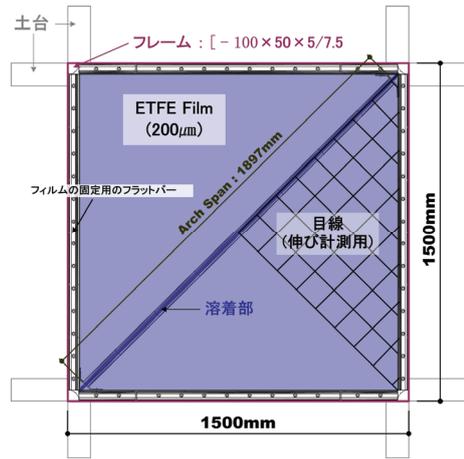
図20 アーチ及びフレームの部材検討

3.3 実験的検討

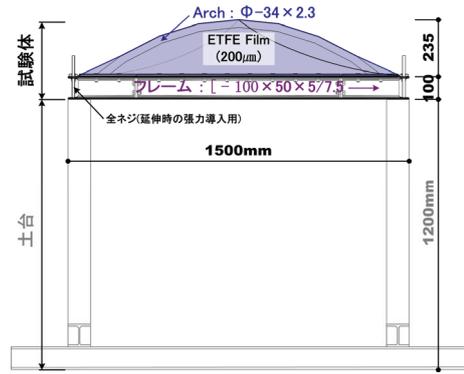
試験体の概要を図21に示す。試験体は1.5m×1.5mのフレーム、ライズ比10%と15%のアーチ、200 μ mのETFEフィルム、そして定着用のフラットバーからなるパネル形式の試験体と延伸成形時に反力を受け取る土台から構成される。また、延伸成形時のフィルムの応力状態を把握するために、各柱のネジ棒及びアーチの中央部・端部にひずみゲージを貼付した。これからのひずみより、柱の反力とアーチの軸力を求めて解析との比較を行う。また、フィルムにはあらかじめ格子線を描き、延伸成形前・後の変形及び残留変形を計測した。

延伸成形の手順を図22に示す。はじめに、フィルムをフレームに取り付ける。次に、延伸のためのアーチを柱に固定する。最後に、フレームを各柱のネジ棒に通し、ネジ締めによりフレームを降下させて延伸成形を行う。フレームは各点のバランスを取るために、インターバルを取りながら2mmずつ下げていった。なお、フレームに固定するフィルムの寸法は内法長さで1.4mの正方形とした。

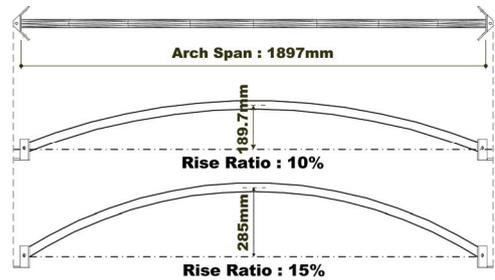
実験時の様子を図23、図24に示す。アーチの突き上げにより、フィルムの延伸成形が安定的に行えている。また、スタディーモデルでは懸念された応力の通りによる問題は、本方式では特に見られなかった。ただし、実験後、ライズ比15%の試験体においてはアーチと直交方向のコーナー部でフィルムの張力によるフレームの変形が大きく、柱から取り外すことができなかった。



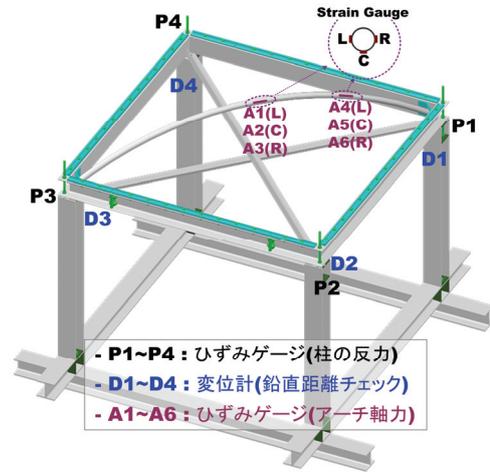
(a) Plan



(b) Section



(c) Arch



(d) 計測位置

図21 試験体の概要図

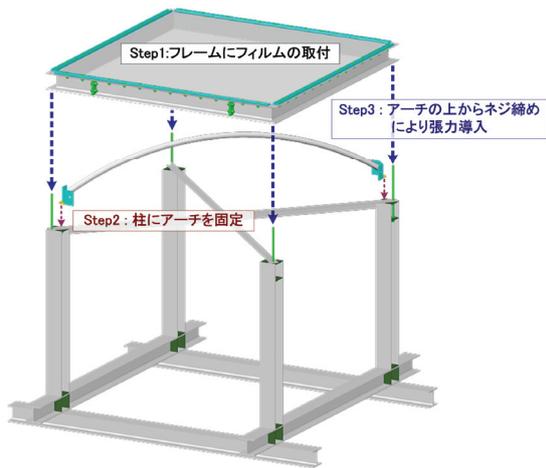
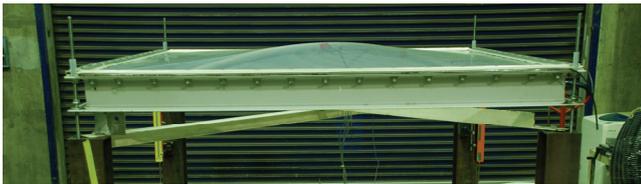


図 22 延伸成形の手順



(a) 延伸成形前



(b) 延伸成形途中



(c) 延伸成形完了

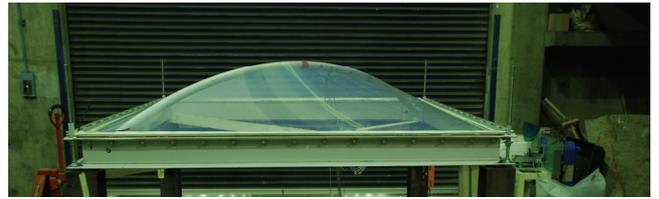
図 23 延伸成形の様子(ライズ比 10%時)



(a) 延伸成形前



(b) 延伸成形途中



(c) 延伸成形完了

図 24 延伸成形の様子(ライズ比 15%時)

3.4 解析と実験の比較

フレームの鉛直変位とアーチ中央部及び端部軸力の関係を図 25、図 26 に示す。実験と解析の結果では、軸力に大きな差異が見られた。アーチ及び支柱の寸法誤差のため、取付時にアーチに強制曲げを加える必要があったことが原因と考えられる。

そこで、これらを考慮して再度解析を行ったものが図 27、図 28 である。その結果、両者はほぼ一致しており、実験時の現象を解析で再現できることが分かった。

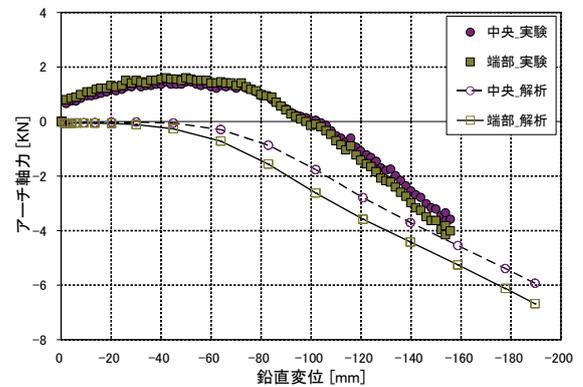


図 25 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 10%)

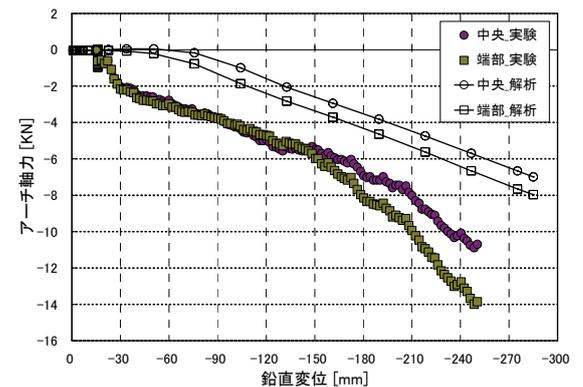


図 26 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 15%)

次に、実験の時間経過に対するアーチの軸力および室温の変化を図 29、図 30 に示す。延伸成形完了直後は、アーチの圧縮力が低下するが、約20分後からは反転して、増加する傾向が見られた。その後のアーチ軸力は室温の変化とほぼ同調している。このことから、フィルムのリラクセーションは、延伸直後 20 分程度は生じるが、その後はわずかであると言える。

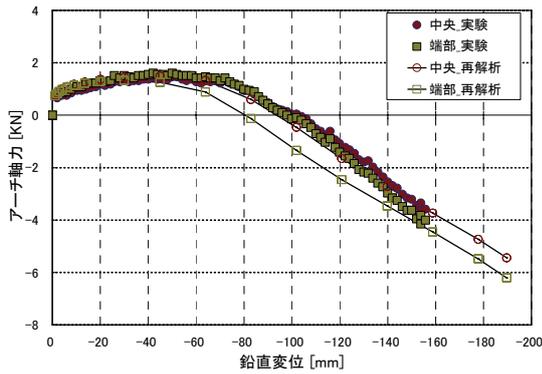


図 27 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 10%の再解析)

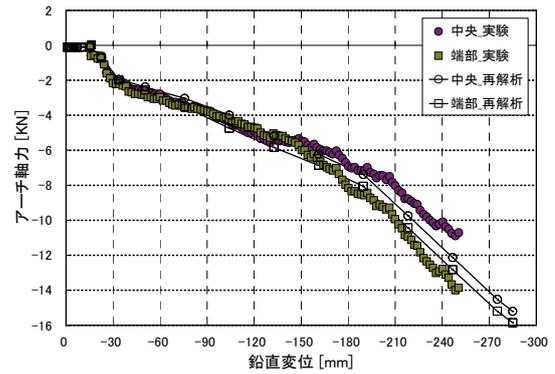


図 28 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 15%の再解析)

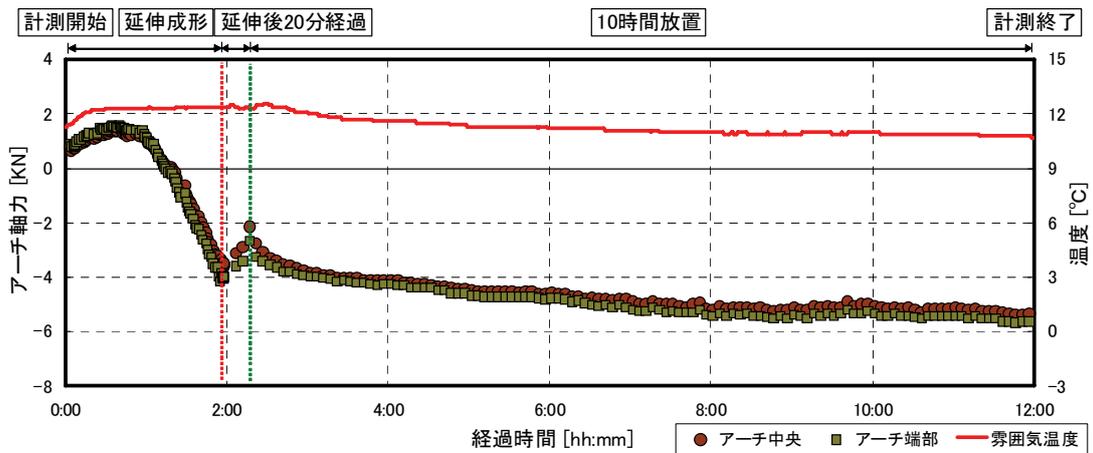


図 29 時間経過による軸力と温度の関係(ライズ比 10%)

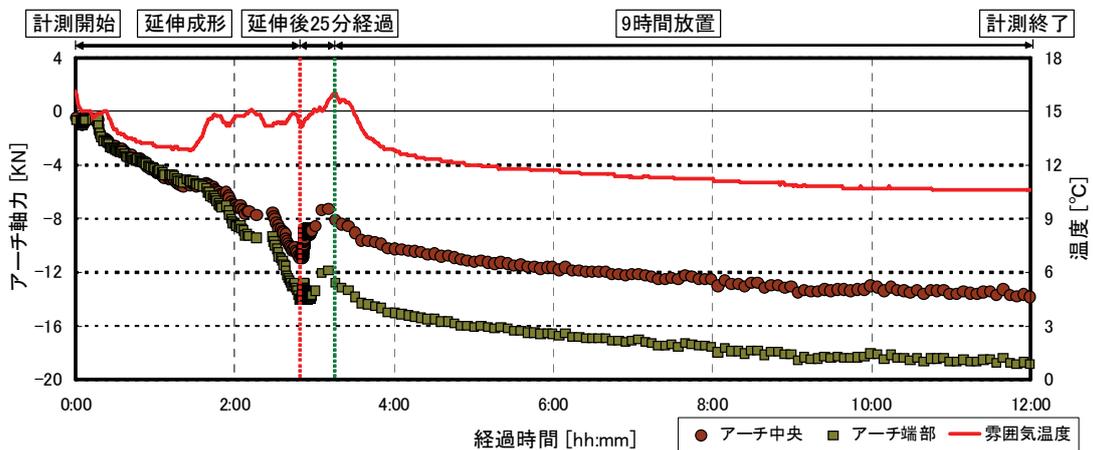
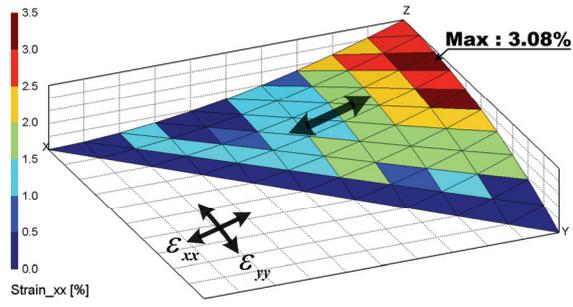


図 30 時間経過による軸力と温度の関係(ライズ比 15%)

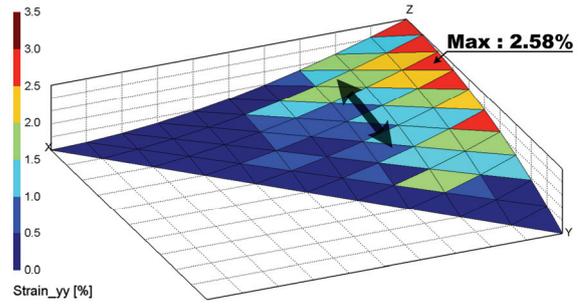
次に、フィルムの格子点間距離の変化から求めたひずみをそれぞれ図31、図32に示す。ひずみはアーチ方向(Y方向)及びアーチの直交方向(X方向)のベクトルの変化から変形勾配テンソル F を求め、次式で定義されるグリーンひずみテンソルで評価した。

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - I) \quad (5)$$

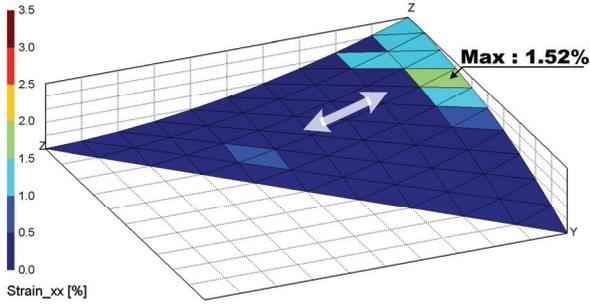
延伸成形時の結果では、ライズ比 10%時に最大ひずみ 3.1%、ライズ比 15%時に最大ひずみ 7.8%となっており、いずれもアーチ方向よりアーチ直交方向の変形が大きい結果となった。さらに、計測終了後、試験体から外したフィルムに対して残留変形を計測した結果では、ライズ比 10%時はアーチ周辺で局部的に 0.51~1.52%の残留変形が計測されたが、ライズ比 15%時は残留変形領域の広がり確認された。



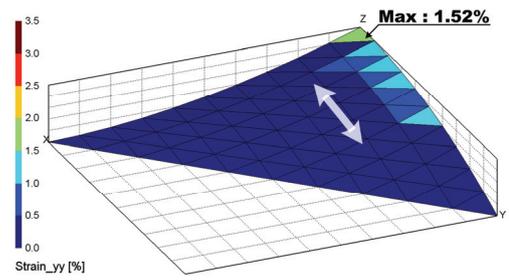
(a) ϵ_{xx} (延伸成形時)



(b) ϵ_{yy} (延伸成形時)

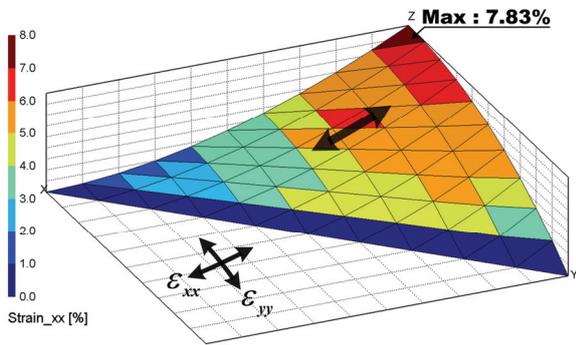


(c) ϵ_{xx} (残留変形)

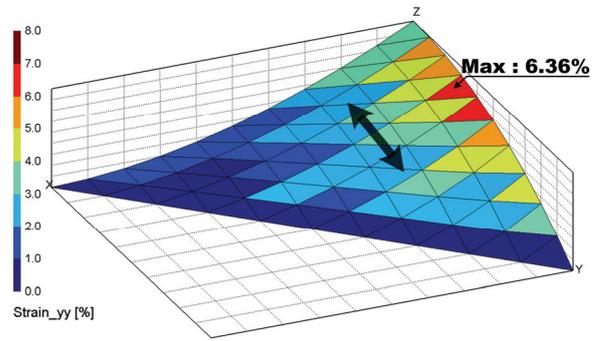


(d) ϵ_{yy} (残留変形)

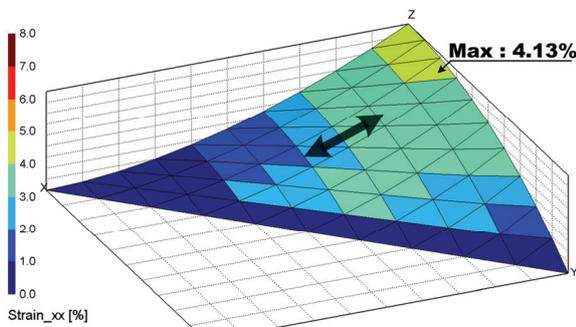
図 31 フィルムのひずみ変化(ライズ比 10%)



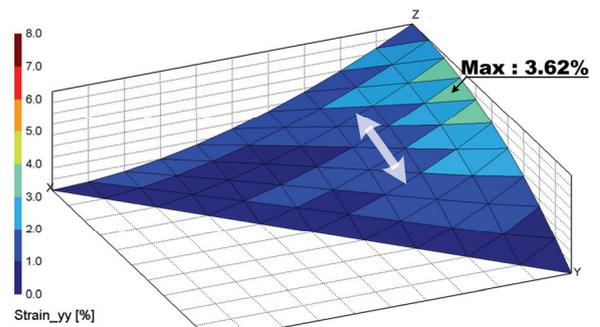
(a) ϵ_{xx} (延伸成形時)



(b) ϵ_{yy} (延伸成形時)



(c) ϵ_{xx} (残留変形)



(d) ϵ_{yy} (残留変形)

図 32 フィルムのひずみ変化(ライズ比 15%)

4. まとめ

本報では、ETFEフィルムを用いたテンション方式のスタディーモデル及び実大モデルを対象として、延伸成形の適用可能性を検討し、以下の知見を得た。

- 1) スタディーモデルの試作及び実証実験の結果、フィルムの延伸成形は、色々な形状のテンション方式に適用可能であり、フィルムの高耐力化に有効な手法となり得ることを確認した。また、裁断図を用いることで、より効率的な延伸成形が可能であり、初期形状の要素面積と約 5%程度の面積比が有効であると考えられる。
- 2) 張力導入方法については、外周引き込みよりもアーチの突き上げによる延伸成形が効率的であることが分かった。
- 3) 実証実験の結果、延伸成形でのアーチの軸力変化は解析とほぼ同じ傾向を示しており、弾塑性解析が有効であることが分かった。
- 4) 時間経過によるアーチ軸力の変化では、延伸成形後に引張力が生じた後、圧縮力が大きくなる結果となったが、それはフィルムのリラクセーションによる影響より、温度変化による影響であることがわかった。

今後は、フィルムのクリープやリラクセーションのような粘性挙動の考慮が必要と思われる。

謝辞

ETFE フィルムの延伸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] 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
- [2] 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
- [3] 岡村卯吉、丁乙碩、河端昌也: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 2) 切欠き形状による応力集中の実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp921-922、2012
- [4] 丁乙碩、岡村卯吉、河端昌也: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 3) 切欠き形状による応力集中の解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp923-924、2012
- [5] 森山史郎、河端昌也、正木佳代子:ETFE フィルムの弾塑性挙動、膜構造研究論文集2003、No.17、pp21-26、2003
- [6] 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史:ETFE フィルムの 2 軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp31-39、2004
- [7] 河端昌也、森山史郎:ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp41-46、2005
- [8] 河端昌也、森山史郎、會田裕昌:ETFE フィルムの粘弾性挙動について、膜構造研究論文集 2005、No.19、pp1-8、2006

A Study on the Stretching Method of Tensile Membrane Structures using ETFE films

Eul-Seok JEONG *)
Shinichi YASUTAKE **)
Masaya KAWABATA ***)

SYNOPSIS

Most of the structural forms in which ETFE film is used are the cushion type (pneumatic membrane structures) and tension type (tensile membrane structures), which are generally accepted to be the most efficient forms. For the tension type, the structures are pulled outward from the exterior to introduce membrane tension. And such structures offer the advantage of a natural shape formed by tensile stress and eliminate the need for blast air. Recently, the number of tension type structures is increasing. But, there are problems of creep and relaxation of ETFE films under long-term stresses. In previous works, the authors proposed a method for stretching the film into the plastic region during initial tensioning as a way to increase its strength, and demonstrate its effectiveness. To apply a stretching method in tension type structures, it will be necessary to introduce the initial stress and to generate a cutting pattern.

In this paper, we investigate a possibility of stretching method in study models for various shapes. And then we examine its effectiveness by applying stretching method for membrane structures of tension type using ETFE films.

*) Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Yokohama National University

**) Graduate Student, Department of Architecture and Urban Culture, Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University

***) Dr. Eng., Associate Prof., Department of Architecture and Urban Culture, Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University