

ETFE フィルムの2軸引張特性と弾塑性応力・変形解析

吉野達矢*, 瀬川信哉*, 小田憲史*

梗概

ETFE フィルムを建築物に使用する場合、フィルムの特性を十分に把握する必要がある。そこで、ひずみ速度や応力比を変えた1軸・2軸引張試験を行い、(1) 等方性材料と見なせることを確認し、(2) 塑性特性を把握する。また、クッション型の空気膜構造を想定した矩形平面のフィルムに圧力を加える試験を行う。さらに、得られた構成則に基づき、加圧実験を模擬した弾塑性応力・変形解析を行い構成則の妥当性の検証を行う。

1. はじめに

ETFE フィルムを建築物に用いる場合、一般の膜構造と同様に2軸の張力が導入された状態で使用することが想定される。また、ガラス繊維の基布にコーティングした膜材料が脆性的な破断特性を示すことに対して、ETFE フィルムはひずみ1~2%で降伏するが、破断ひずみは数100%あり、靱性的な材料である。

ETFEに関する既往の研究として、Schwitterの研究¹⁾、森山、河端の研究^{2,3,4,5)}、柳井、佐藤、斎藤らの研究⁶⁾があり、1軸引張特性についての検討や加圧試験を行い、解析との比較などが行われている。森山、河端ら^{2,3)}は降伏条件としてMisesの降伏条件式を採用しているが、2軸張力下において、この条件を満足することは確認されていない。

そこで、ETFEフィルムの2軸引張試験を行い、2軸張力下における応力・ひずみ関係を調べるとともに、弾塑性特性についても分析する。また、正方形境界を有する平面フィルムに圧力を加える試験を行い、特性を把握する。さらに、この加圧試験について、応力・変形解析を行い、試験結果を模擬できることを示す。

なお、ここで対象とするETFEフィルムの厚さは200 μm と250 μm とする。

2. 材料特性確認試験

2.1 1軸引張試験

ISO 527-1:1993 (JIS K 7161:1994) に基づき、

200 μm 厚さのETFEフィルムの1軸引張試験を行う。試験条件は次の通りである。

試験片長さ×幅	: 200mm × 15mm
チャック間	: 100mm
引張速度	: 100mm/min.
ひずみ速度	: 100%/min.
温度	: 22°C

試験結果を図1に示す。この結果から、(1)MD方向とTD方向はほぼ同様な応力・ひずみ関係を示すことがわかる。(2) 既往の試験結果^{2,3)}と同様に、2つの折れ点が存在していることがわかる。(3) 弾性定数、降伏応力、降伏ひずみは表1に示す値となった。

2.2 2軸引張試験と面内せん断試験

200 μm と250 μm のETFEフィルムの2軸引張試験および面内せん断試験を行う。(1) 弾性定数を得るために、(社)日本膜構造協会試験法標準の弾性定数試験方法⁷⁾および剪断剛性試験方法⁸⁾(以下、膜協法)に準拠した試験を実施する。(2)ETFEフィルムの2軸特性および弾塑性特性を分析するために、単調载荷の2軸引張試験を行う。

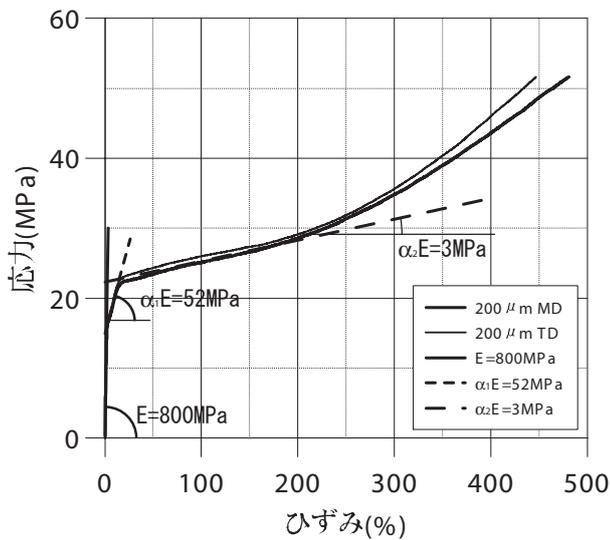
2.2.1 弾性定数確認試験

膜協法に準拠した試験^{7,8)}を行う。試験条件は次の通りである。

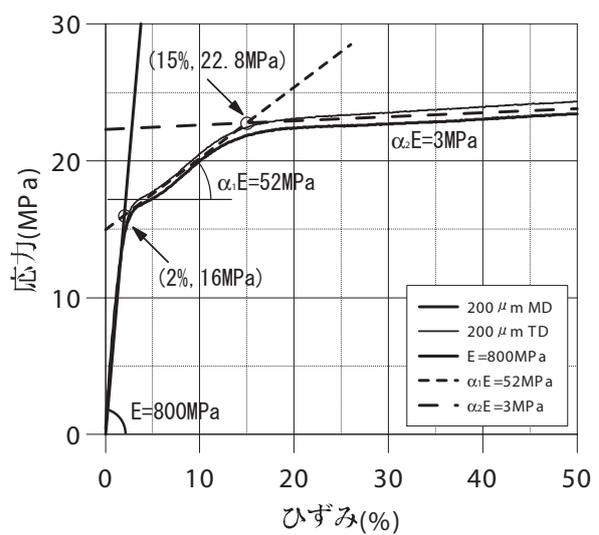
2軸引張試験の条件

試験体形状	: 図2
-------	------

* 太陽工業株式会社 空間技術研究所 博士 (工学)



(a) 全領域



(b) 低応力部分

図1 ひずみ速度 100%/min. の場合の応力・ひずみ関係

チャック間 : 600mm
 最大応力 : 19.6MPa
 引張速度 : 4mm/min.
 ひずみ速度 : 0.67%/min.
 温度 : 25 ~ 26°C

面内せん断試験の条件

初期張力 : 1.225MPa
 (0.125kgf/mm²)
 温度 : 22°C

膜協法に基づき、ETFE フィルムの弾性定数を求めた結果を表2に示す。また、等方性材料と見なして、ヤング係数およびポワソン比からせん断剛性を求めた結果も表2に示す。等方性と直交異方性のせん断剛性を比較すると3割弱の違いが見られた。

なお、膜協法における温度条件は20°C±2°Cであるが、2軸引張試験は25~26°Cの環境下で行った結果であることに注意しなければならない。

2.2.2 弾塑性特性確認試験

2軸張力下における単調荷重試験を行う。試験条件は応力比は(1:1), (1:0), (0:1), (2:1), (1:2)の5通りである。応力比(1:0), (0:1)の場合の試験形状は、図2の十字型ではなく、腕を切り落とした長方形とした。その他の試験条件は、膜協法における試験条件と同様である。

試験結果を図3に示す。この結果から、厚さの違いによる応力・ひずみ関係の違いは見られない。

次に、塑性変形について考える。ETFE フィルムの2軸引張試験結果を、Misesの降伏条件⁹⁾に基づき、相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ を用いて表したものを図4に示す。ただし、第1次剛性は800MPaとして求めた。

表1 1軸引張試験結果に基づく材料定数 (100%/min., 22°C)

第1次剛性 E	800MPa
第2次剛性 $\alpha_1 E$ (α_1)	52MPa (0.0650)
第3次剛性 $\alpha_2 E$ (α_2)	3MPa (0.00375)
第1降伏応力, ひずみ	16.0MPa, 2%
第2降伏応力, ひずみ	22.8MPa, 15%
第1次ひずみ硬化率 $H'_1(\beta_1)$	51MPa (0.0632)
第2次ひずみ硬化率 $H'_2(\beta_2)$	3MPa (0.00374)

表2 2軸引張試験結果に基づく材料定数 (0.67%/min., 25~26°C)

	等方性	直交異方性
E_x, E_y (MPa)	800	←
ν_x, ν_y	0.45	←
G (MPa)	276	200

表3 2軸引張試験結果に基づく材料定数 (0.67%/min., 25~26°C)

第1次剛性 E	800MPa
第2次剛性 $\alpha_1 E$ (α_1)	73MPa, (0.0913)
第1降伏応力, ひずみ	11.0MPa, 1.375%

表4 1軸引張試験結果に基づく材料定数 (0.5%/min., 22°C)

第1次剛性 E	800MPa
第2次剛性 $\alpha_1 E$ (α_1)	68MPa (0.0850)
第3次剛性 $\alpha_2 E$ (α_2)	3MPa (0.00375)
第1降伏応力, ひずみ	13.0MPa, 1.625%
第2降伏応力, ひずみ	22.1MPa, 15%
第1次ひずみ硬化率 $H'_1(\beta_1)$	63MPa (0.0783)
第2次ひずみ硬化率 $H'_2(\beta_2)$	3MPa (0.00374)

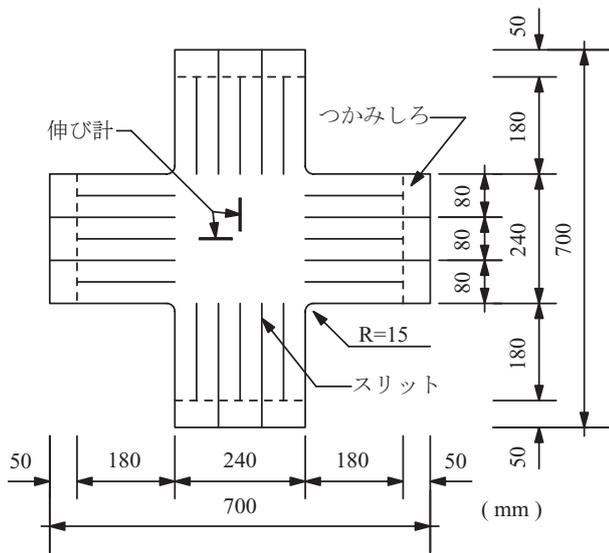
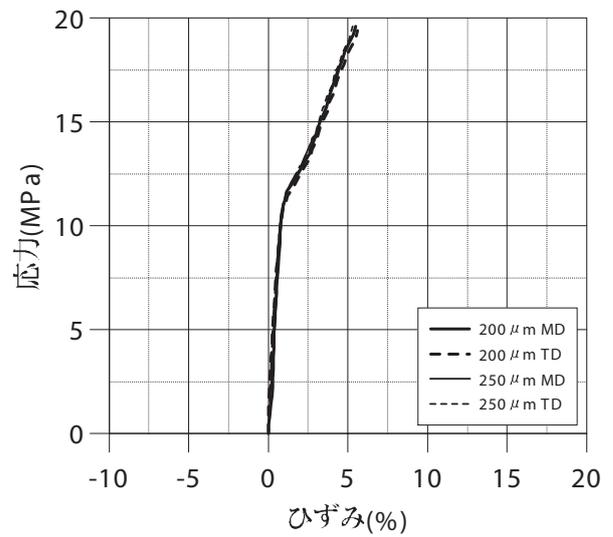
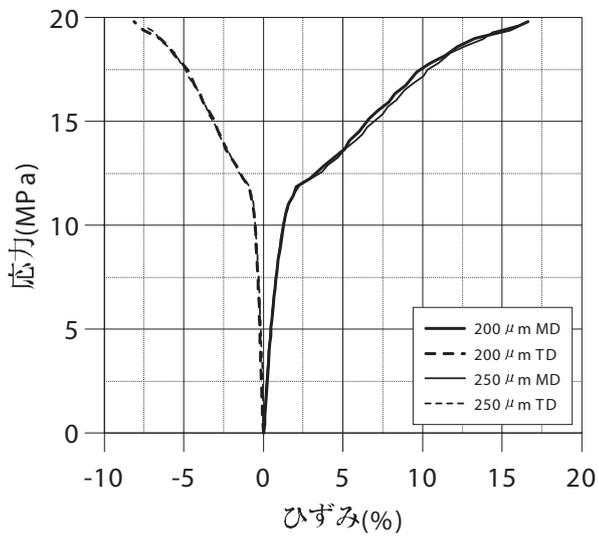


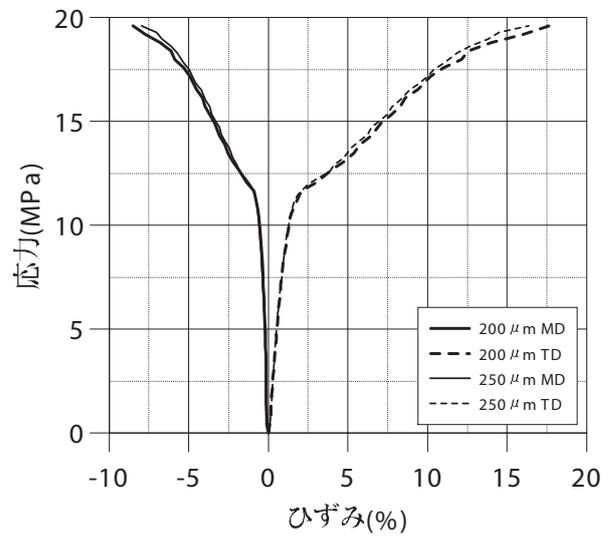
図2 2軸引張試験片形状



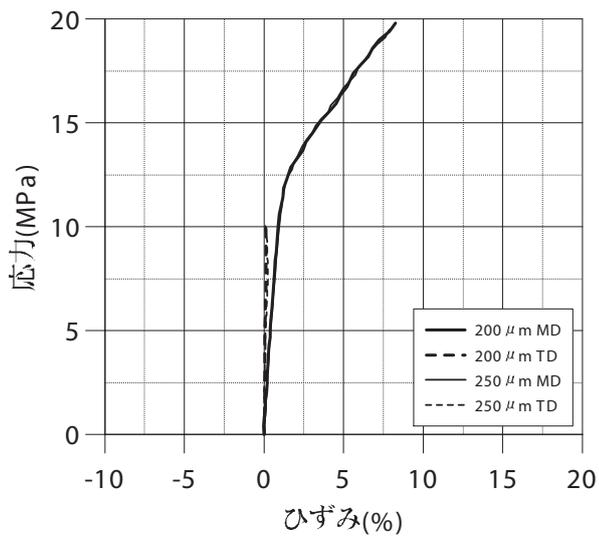
(a) 応力比 (1 : 1)



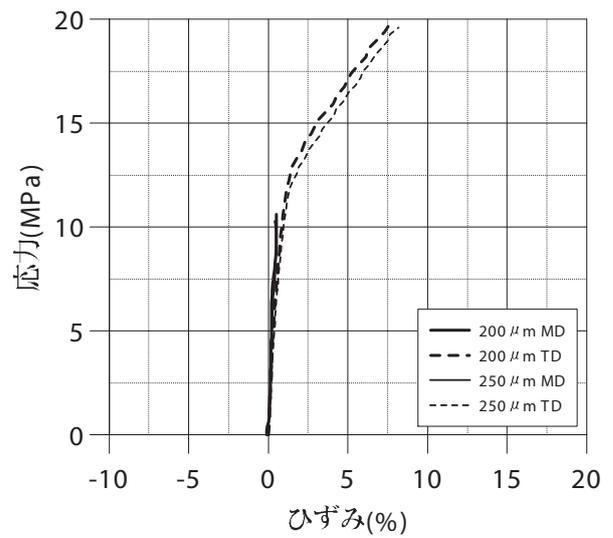
(b) 応力比 (1 : 0)



(c) 応力比 (0 : 1)



(d) 応力比 (2 : 1)



(e) 応力比 (1 : 2)

図3 フィルム厚さ 200 μ m と 250 μ m の応力・ひずみ関係

ただし、相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^{pl}$ はそれぞれ、

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

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

$$d\bar{\varepsilon}^{pl} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[(d\varepsilon_x^{pl})^2 + d\varepsilon_x^{pl} d\varepsilon_y^{pl} + (d\varepsilon_y^{pl})^2 + \frac{1}{4} (d\gamma_{xy}^{pl})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 σ_x 、 σ_y はMD方向およびTD方向応力、 τ_{xy} はせん断応力、 $d\varepsilon^{pl}$ は塑性増分ひずみである。なお、塑性増分ひずみは増分ひずみ $d\varepsilon$ から弾性増分ひずみ $d\varepsilon^{el}$ の成分を差し引いたものである。つまり、

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{pl} \quad (4)$$

また、図4、5に示す α 、 β 、 H' とは次の関係が成立する。

$$H' = \beta E \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad (6)$$

なお、図5は図3(b)の応力比(1:0)のMD方向の応力・ひずみ関係であり、その低応力部を拡大したものである。

以上の結果より、表3の定数を得た。ここで、主軸の最大応力19.6MPa時点での相当応力の違いに注目する。応力比(1:0)、(0:1)、(1:1)の場合は、式(1)より、相当応力は19.6MPaであるが、応力比(2:1)、(1:2)の場合は17.0MPaである。したがって、図4において、応力比(2:1)、(1:2)は17.0MPaまでの曲線となっていることに注意しなければならない。

また、図4より、応力比(1:1)の相当応力・相当ひずみ関係は他と相当塑性ひずみが5%を超えたところから違っている。これは相当塑性ひずみ速度が他に比べ速くなっているためであると考えられる。その理由を以下に示す。図3の応力・ひずみ関係から、それぞれの応力・ひずみ関係において、降伏点を仮定し、降伏から、最大応力19.6MPaとなるまでのひずみ(以下、降伏後ひずみと呼ぶ)を求める。この降伏後ひずみとひずみ速度0.67%/min.から、降伏後ひずみが発生するのに要した時間(以下、降伏後時間と呼ぶ)を求める。一方で、図4の相当応力・相当塑性ひずみ関係より、相当塑性ひずみを読み取り、降伏後時間で除したものを相当塑性ひずみ速度と定義する。求めた結果を表5に示す。この結果から、1軸引張から等2軸引張になるにつれて相当塑性ひずみ速度が大きくなっているの

がわかる。また、1軸引張の場合、ひずみ速度0.67%/min.に対して相当塑性ひずみ速度は0.64%/min.で、ほぼ同等と見なしてよい。また、応力比(1:1)の場合は、式(3)からもわかるが、1軸引張の場合の2倍の相当塑性ひずみ速度となることがわかる。

表5 相当塑性ひずみ速度

応力比	1:0, 0:1	2:1, 1:2	1:1
降伏後ひずみ (%)	15.4	7.1	4.5
降伏後時間 (min.)	23.1	10.6	6.7
相当塑性ひずみ (%)	14.8	7.9	8.8
相当塑性ひずみ速度 (%/min.)	0.64	0.74	1.31

以上より相当塑性ひずみ速度に依存して、ひずみ硬化率 H' が変化するものの、ETFEフィルムは2軸張力場においても、等方性材料のMisesの降伏条件を満足し、かつ、ひずみ硬化説を用いて塑性特性を表現可能であることがわかった。

2.3 弾塑性材料定数確認試験

表1、3の比較から、第1降伏応力および第2次剛性に差異が見られる。ここで、これらの試験条件の違いは、温度、試験片長さ、試験片幅、ひずみ速度である。また、河端ら²⁾によると、引張速度(ひずみ速度)によって、応力・ひずみ関係に差異が生じることが述べられている。

そこで、ひずみ速度を変えて、1軸引張試験を行い、応力・ひずみ関係の違いを調べる。なお、先の結果から、1軸引張試験の場合、ひずみ速度と相当塑性ひずみ速度はほぼ同じ値となることがわかっている。

ISO 527-1:1993 (JIS K 7161:1994)に基づき、1軸引張試験を行う。試験条件は次の通りである。

試験片長さ	と幅	200mm × 15mm
チャック間		100mm
引張速度		0.5mm/min.
ひずみ速度		0.5%/min.
温度		22°C
最大ひずみ		400%

ただし、試験は破断まででなく、ひずみ400%までとした。

試験結果を図6に、得られた定数を表4に示す。また、ひずみ速度100%/min.の場合についても、式(5)、(6)を用いて、 H' と β の値を求め、表1に示した。図7に、ひずみ速度100%/min.と0.5%/min.の応力・ひずみ関係を重ねたグラフを示す。これらの比較から、ひずみ速度を速くすることにより、応力に対するひずみは小さくなることがわかった。これは粘性特性によるものと思われる。

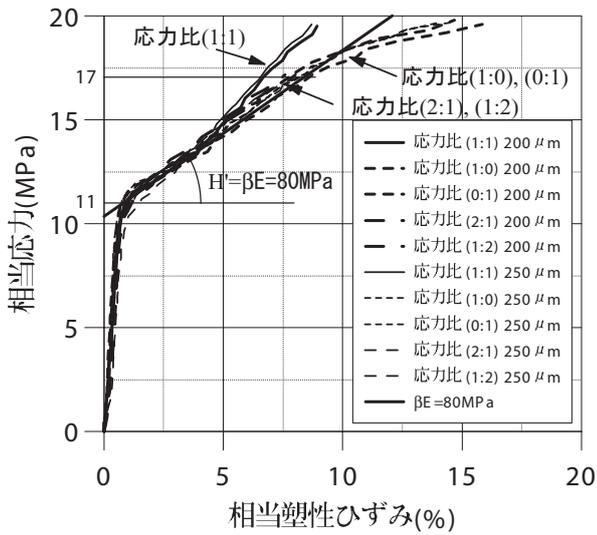


図4 相当応力・相当塑性ひずみ関係

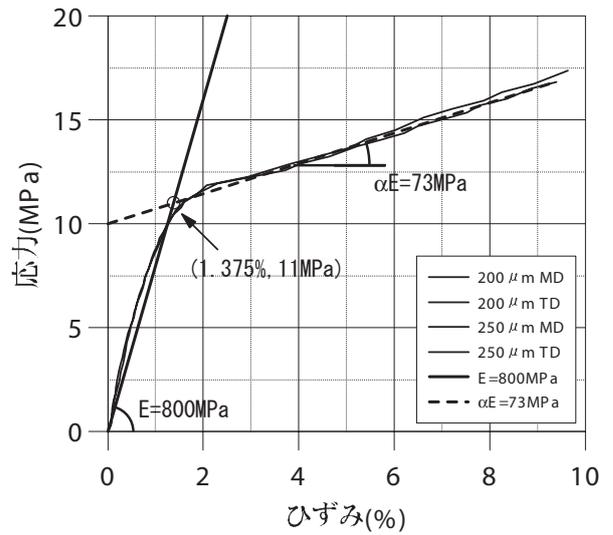
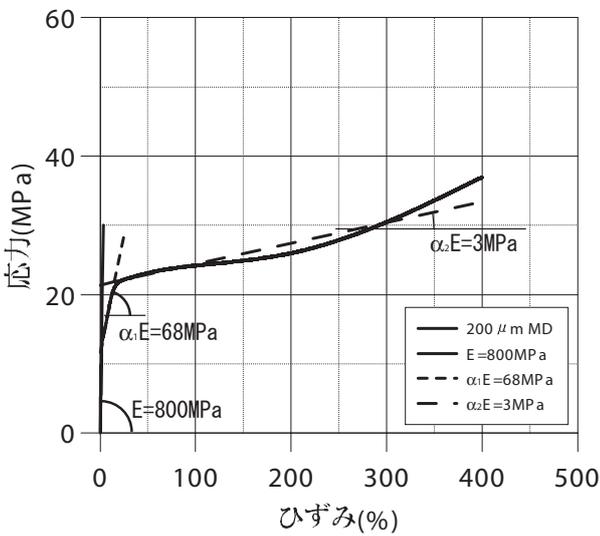
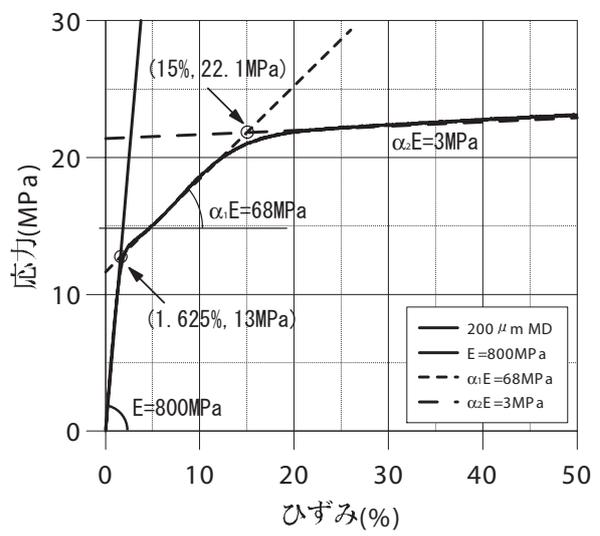


図5 1軸引張特性 応力比(1:0)

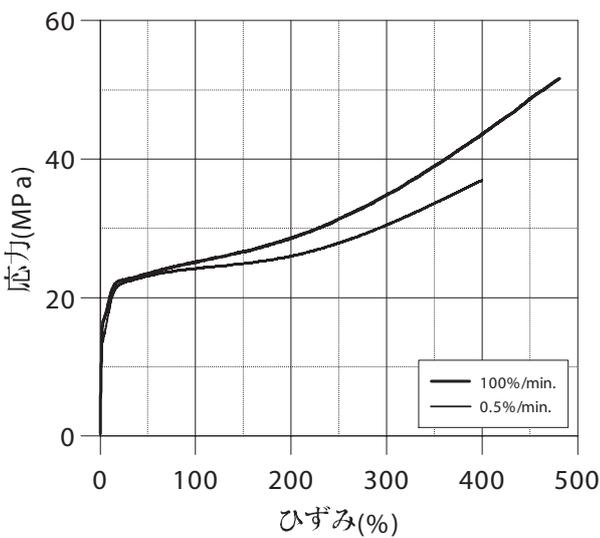


(a) 全領域

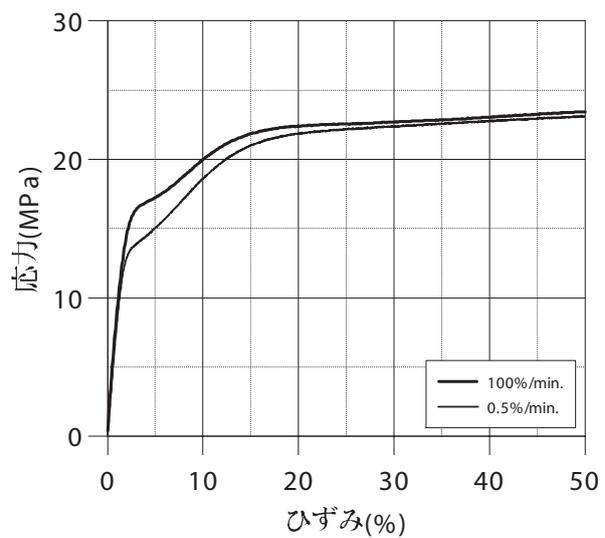


(b) 低応力部分

図6 ひずみ速度0.5%/min. の場合の応力・ひずみ関係



(a) 全領域



(b) 低応力部分

図7 ひずみ速度100%/min. と0.5%/min. の場合の応力・ひずみ関係

3. 正方形境界を有する平面膜の加圧試験

3.1 加圧試験

試験条件：

正方形境界を有する ETFE フィルムに圧力を加えた時の特性を調べるために、加圧試験を行う。

試験体は1辺が1.8mの正方形とし、200 μmのフィルムを用いる。なお、初期張力は導入せず、フィルム取り付け時には中央部にフィルムの自重を支える台を設置することにより、できるだけフィルムがたわまないように設置した。

測定は内圧と中央部の変位を測定する。なお、変位は圧力ゼロの状態の中央部の位置を基準とする。

加圧は表6に示す手順で行った。ただし、手動で圧力を調整したため、加圧と停止を繰り返している。

試験は21～23℃の環境下で行った。

試験結果：

試験風景を図8に示す。試験の結果、内圧と中央部変位の関係を図9、表6に示す。この結果から、(1)No.2からNo.3の間で50min.経過し、かつ、圧力変動があるが、明らかにクリープひずみによると思われる変位の増加は見られない。(2)No.4の0.99kPaで圧力一定で、

中央部が8mm変位している。この間3.75min.経過しているため、クリープによるものと判断できる。(3)1kPa以下においては、1度除荷をしたが、弾性的な挙動を示している。(4)1kPaを超えると、荷重・変位曲線の勾配が変化している。これより、第1降伏点に達したことがわかる。さらに、(5)4.5kPa付近で第2降伏点に達し、再度勾配が変化したことがわかる。

3.2 加圧試験を模擬した応力・変形解析

解析条件：

応力・変形解析に用いる材料定数は次の内容を理由に表2、4の値を用いる。表6からわかるように、No.6の加圧再開から、No.7の加圧終了まで60min.かけて行った。No.7の状態では、中央部の変位は451mmであった。ここで、XZ平面上のフィルムの形状を幅1800mm、高さ451mmの円弧と仮定する。したがって、円弧の長さは2086mm、伸びは286mm、ひずみは15.9%となる。また、

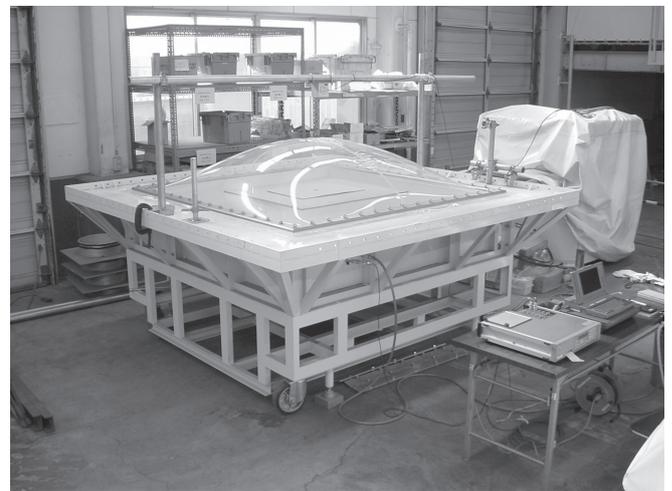
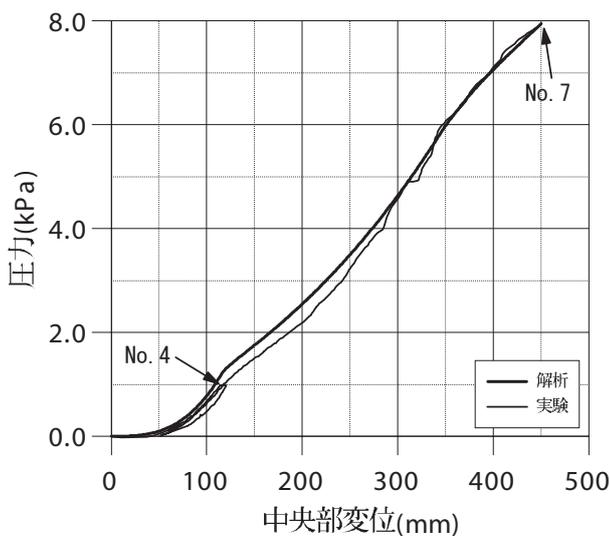


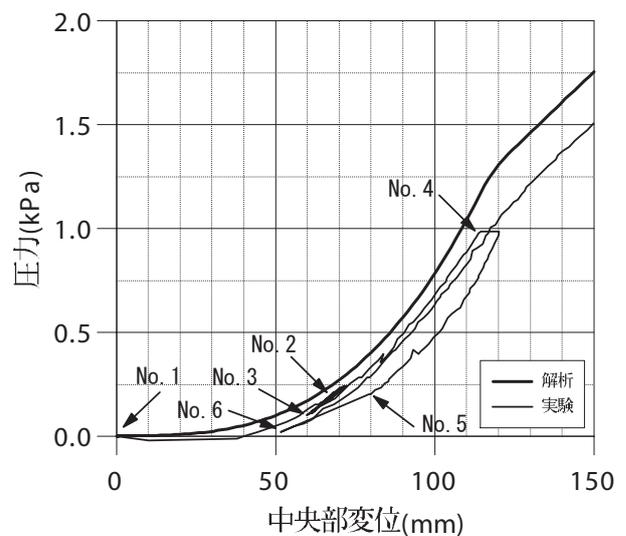
図8 試験風景

表6 加圧手順

No.	経過時間 (min.)	圧力 (kPa)	中央部変位 (mm)	内容
1	0	0.00	0	加圧開始
2	16	0.19	68	加圧中止
3	66	0.11	62	加圧再開
4	85	0.99	114	減圧開始
5	96	0.20	79	減圧中止
6	137	0.02	52	加圧再開
7	197	7.96	451	加圧終了



(a) 8kPa まで



(b) 1.5kPa 付近まで

図9 試験と解析による圧力と中央部変位の関係

XZ 平面上のフィルムは応力比 (1:1) の状態にあると仮定すると、相当塑性ひずみは塑性ひずみの 2 倍となること、また、図 3(a) より、応力比 (1:1) の降伏ひずみが約 1% であることから、ひずみ 15.9% における相当塑性ひずみは約 30% となり、相当塑性ひずみ速度は約 0.5%/min. となる。

解析は図 10 に示すように 4 分の 1 モデルとし、8 節点アイソパラメトリック要素を用いて、図 11 に示すように、36 個の要素に分割する。

境界条件は外周は固定とし、対称軸上の節点は XZ 平面内または YZ 平面内自由とし、面外方向を拘束する。

荷重は表 6 に示す手順とする。

構成則には等方硬化を導入した Mises の降伏条件を用いる。

解析結果：

圧力と中央部の変位を図 9 に、積分点 A, B の応力・ひずみ関係を図 12 に、内圧 0.99kPa 時、7.96kPa 時の応力分布と Z 方向変位を図 13, 14 に示す。

試験と同様に 0.99kPa から減圧し、再度加圧したが、弾性範囲であったため、図 9, 12 においては载荷と同じ曲線を示した。図 9(b) から、1kPa 以下においては、10mm 程度の差異が見られる。これは、試験の初期たわみが影響しているものと思われる。試験では、第 1 降伏点が 1kPa 付近に見られるが、数値解析では、1.25kPa

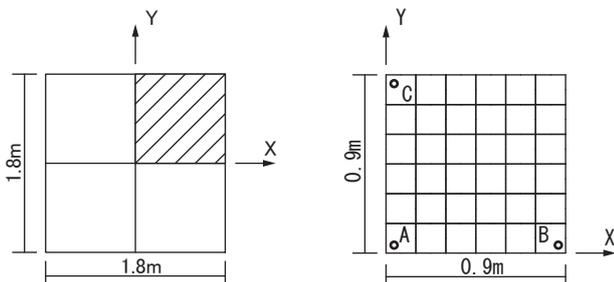


図 10 解析対象

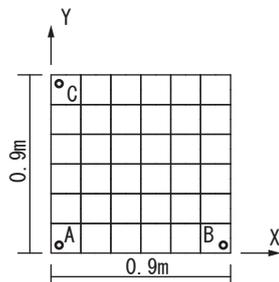


図 11 解析モデル

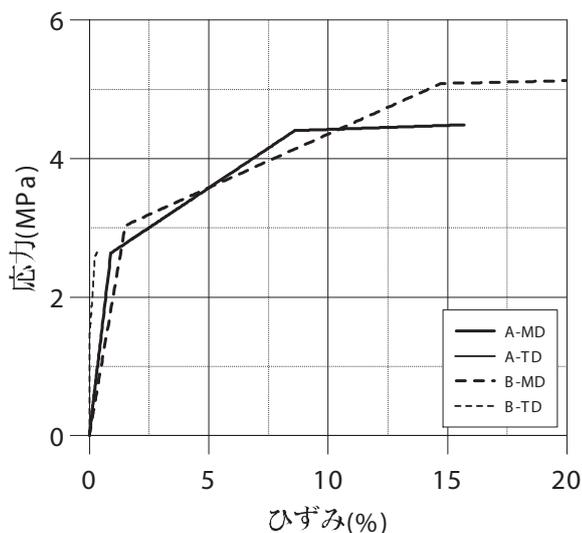


図 12 積分点 A, B の応力・ひずみ関係

付近であり、差異が見られる。この 1.0kPa 付近から 4.0kPa 付近まで変位で 15mm 程度の差異が見られるが、全体的に ETFE フィルムの構造特性を表現できていると言える。図 12, 13, 14 より、積分点 A では、降伏の前後にかかわらず応力比は (1:1) となっているが、積分点 B では弾性範囲では (2.2:1) の割合で応力が増加し、降伏後は MD 方向の比率が小さくなり、7.96kPa 時点では (1.9:1) となった。

図 13(c), 14(c) より、相当応力は積分点 A, B, C 付近から大きくなり、圧力 7.96kPa 時には、4.4 ~ 4.5MPa の領域がフィルム面の約 3/4 まで広がっていることがわかる。

図 13(f), 14(f) より、外周部分は正方形の境界があるため、等高線は正方形に近いが、中央に近づくにしたがって、等高線は円形に近づいているのがわかる。

以上の結果より、用いた諸定数で加圧試験を模擬できている。

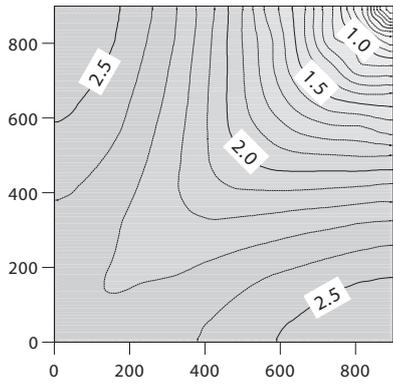
4. まとめ

ETFE フィルムの 2 軸張力下における材料特性の分析を行った。その結果、Mises の降伏条件および等方硬化特性を有していることを示した。また、応力・ひずみ関係はひずみ速度に依存していることを示した。さらに、加圧試験を実施し特性を分析するとともに、応力・変形解析を行い、加圧試験結果を十分に模擬でき、仮定した材料定数の妥当性を示した。

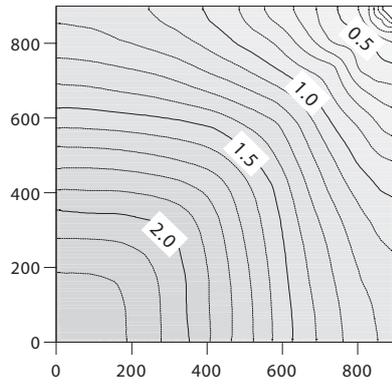
本報では、等方硬化を仮定して解析を行ったが、除荷時の特性を表現するために移動硬化を考慮した検討や粘性特性を考慮した検討が今後の課題である。

参考文献

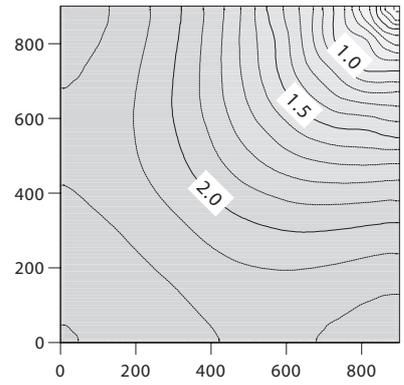
- 1) Craig Schwitter: The Use of ETFE Foils in Lightweight Roof Constructions, Proc. of IASS-ASCE International Symposium on Spatial, Lattice and Tension Structures, Atlanta, pp. 622-631, 1994. 4
- 2) 正木佳代子, 河端昌也, 森山史朗: ETFE フィルムの機械的特性と構造挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 941-942, 2003 年 9 月
- 3) 森山史朗, 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, pp. 21 ~ 26, 2003 年 12 月
- 4) 河端昌也, 森山史朗, 薛 学禎: ETFE フィルムを用いた四角形パネルの進行性ポンディング, 膜構造研究論文集 2003, No. 17, pp. 27 ~ 33, 2003 年 12 月
- 5) 森山史朗, 河端昌也: ETFE フィルムのクリープ特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 897-898, 2004 年 8 月



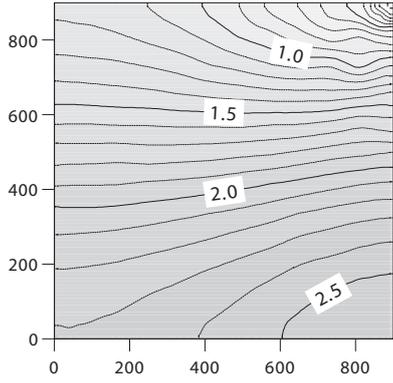
(a) 主応力 1 (MPa)



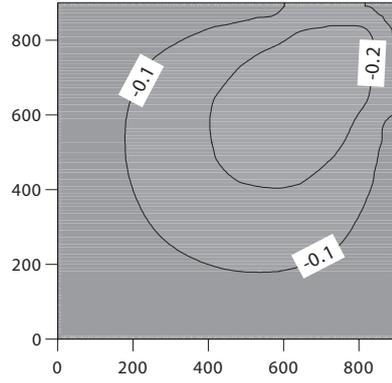
(b) 主応力 2 (MPa)



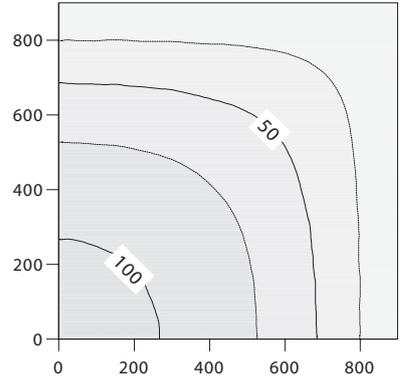
(c) 相当応力 (MPa)



(d) X 軸方向応力 (MPa)

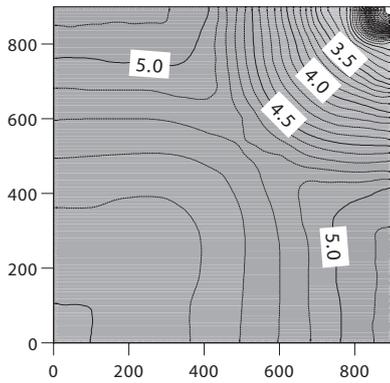


(e) せん断応力 (MPa)

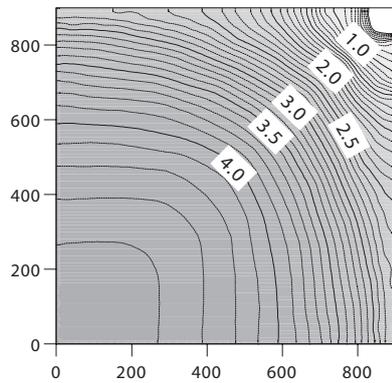


(f) Z 方向変位 (mm)

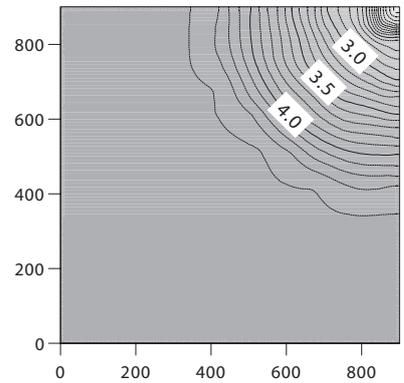
図 13 0.99kPa 時の応力分布と Z 方向変位



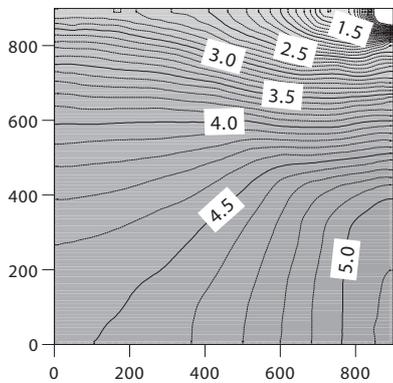
(a) 主応力 1 (MPa)



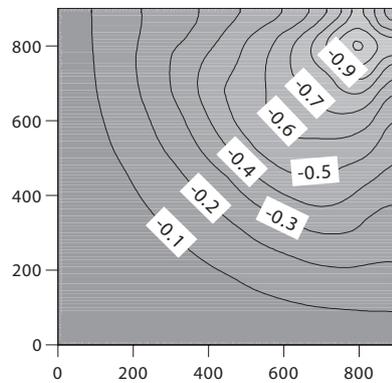
(b) 主応力 2 (MPa)



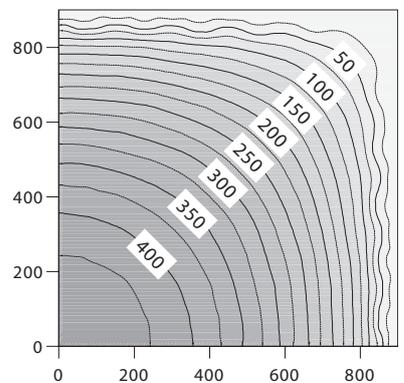
(c) 相当応力 (MPa)



(d) X 軸方向応力 (MPa)



(e) せん断応力 (MPa)



(f) Z 方向変位 (mm)

図 14 7.96kPa 時の応力分布と Z 方向変位

- 6) 柳井麻里, 佐藤裕子, 斎藤公男, 岡田 章, 宮里
レンズ方二重空気膜構造の基本構造特性 (その1) 小
規模模型実験による検討 (その2) 数値解析による
適用性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北
海道), pp. 911-914, 2004年8月
- 7) (社) 日本膜構造協会: 膜材料弾性定数試験方法 (MSAJ/
M-02-1995), 1995年
- 8) (社) 日本膜構造協会: 膜材料面内剪断剛性試験方
法 (MSAJ/M-01-1993), 1993年
- 9) 山田嘉昭: 有限要素法の基礎と応用シリーズ6 塑
性・粘弾性, 1992年10月

**MATERIAL CHARACTERISTICS OF ETFE FILM
UNDER THE BI-AXIAL TENSION
AND
STRESS-DISPLACEMENT ANALYSIS
CONSIDERING THE ELASTO-PLASTIC CHARACTERISTICS**

Tatsuya Yoshino*, Shinya Segawa*, Kenshi Oda*

SYNOPSIS

The present study aims at confirming the elasto-plastic characteristics of ETFE film under the bi-axial tensions. First, in the uni-axial loading tests, the characteristics of the film with different thickness are analyzed. Second, in the bi-axial loading tests with several stress ratios, it is examined that the relationships of equivalent stress and equivalent plastic strain satisfies the yield criterion of Mises and the hypothesis of strain-hardening. Third, the pressurizing examination concerning plane film with square boundary is executed. And the analysis that imitates the examination is executed.

* Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.