膜構造研究論文集 第29号, 13-20, 2015年
Research Paper on Membrane Structures, No.29, 13-20, 2015

ETFEフィルムの粘性特性
－2軸張力場における非線形粘弾性構成方程式－

吉野達矢[*1]
加藤史郎[*2]

梗　　概

本研究はFEM解析を行い，ETFEフィルム膜構造の挙動を明らかにすることを目的としている。ETFEフィルムは弾塑性と粘弾性の両方の挙動を示す。これらの特性に注目した研究を著者らは行なってきた。本論文では，試験および数値解析によって，2軸張力場における粘弾性特性に注目している。

まず，2軸張力場を対象とした増分型構成方程式を提案する。この構成方程式は既報における1軸張力場の増分型非線形粘弾性構成方程式を拡張したものであり，かつ，FEM解析に導入可能な形式である。温度変化は，温度・時間換算則を含むことによって，考慮することができる。

1.　はじめに

近年，ETFEフィルム膜材料を用いた様々な膜構造が建設されている。ETFEフィルムは織物ではないことから，PTFE膜材料などの伸び特性とは違う。また，高分子材料であることから，粘弾性特性が顕著に見られる。

そこで，ETFEフィルム膜構造の設計をするために，1軸・2軸引張特性や粘弾性特性に注目した研究がなされてきた。

1軸引張特性については多数の研究がある。特に，1軸の粘弾性特性に注目した研究には，森山・河端の研究[1,2]，丁・河端ら[3,4]の研究，著者らの研究[5]，Wu and Liの研究[6]がある。

また，ETFEフィルム膜構造は2軸張力場で使用するため，2軸引張特性は重要である。2軸引張特性に関する研究には，著者らの研究[7]，Galliot and Luchsingerの研究[8]，丁・河端ら[4]の研究やLi and Wuの研究[9]がある。

森山・河端[1,2]の研究では，動的粘弾性試験を実施し，ETFEフィルムの時間，温度依存性を考慮した非線形粘弾性構成則を得ている。この構成則はFEMに取り込みにくい形となっている。

丁・河端ら[3,4]の研究では，移動硬化クリープ理論と非線形移動効果理論を合わせた粘塑性構成式を用いて，ひずみ速度依存性がある応力・ひずみ関係の内，載荷の過程についてのみ，塑性域まで表現できることを示している。この構成式は3軸問題として定式化されているため，2軸張力場にも適用可能である。著者らが実施した2軸引張試験結果[7]との比較により，載荷については良い一致を示している。ただし，温度が変化する場合やFEMへの適用については触れられていない。

Wuらの研究[6]では，温度一定を条件とし，線形補間を使いながら，積分点毎に発生する応力に粘弾性構成則の係数を使っている。なお，”Creep Coefficients in each element are all determined according to its stress after loading process. By means of table, creep coefficients are calculated by linear interpolation according to stress.”と書かれている。したがって，載荷時のクリープは考慮されていない。また，時間の変化に伴い，応力が変化する場合の定数の使い方については言及されていない。

Galliot and Luchsingerの研究[8]においても，相当応力と相当ひずみに注目し，応力比に依存しないことを確認している。また，真降伏応力が真塑性ひずみ速度に依存することを示している。いずれも，相当応力，相当ひずみとひずみ速度に注目し，弾塑性特性を表現している。

Li and Wuの研究[9]では，温度一定の条件下で，1軸・2軸クリープ試験と応力解析を行なっている。2種類の載荷時間と2種類の応力の組み合わせに対する1軸クリープ係数を求めている。弾性解析を行って発生応力を求め，その発生応力に合わせた1軸クリープ係数を用いている。考え方は文献[7]と同じであるが，文献[9]では，応力の違いは無視し，全要素同じ係数を使用している。文献[4, 7, 8, 9]においては，温度とひずみ速度は一定の条件で行われている。したがって，温度やひずみ速度が違う場合は，その条件下で係数を求めなおす必要がある。さらには，それらが時間の変化に伴い変化する場合，より複雑になることに注意しなければならない。

著者ら[7]は，温度一定の条件下で，(1) MSAJ法[10, 11]に基

*1　太陽工業株式会社　技術研究所　博士（工学）
*2　豊橋技術科学大学　名誉教授　工学博士

づいて, ETFEフィルムの2軸引張試験とせん断試験を行なった。この結果から, 設計用弾性定数を得た。(2) 5種類の応力比について, 2 軸引張試験を行い, 相当応力・相当塑性ひずみの関係を確認した。その結果, 応力比に関係なく, 相当応力・相当塑性ひずみ曲線は一致した。(3) 弾塑性構成則を提案し, 降伏応力および降伏後の応力・ひずみ関係を表現できることを確認した。(4) 正方形平面膜の加圧試験を実施し, 提案する弾塑性構成則で十分に表現可能であることを示した。

さらに, 文献[6]で, 1 軸張力場における増分型の非線形粘弾性構成則を提案し, その妥当性の確認を行なっている。この構成則は FEM への取り込むことを前提として, 増分型で定式化している。また, 時間経過, 応力変化, 温度変化を考慮することができる。

そこで, 本論文では, 既報で示した 1 軸張力場の増分型の非線形粘弾性構成則を2軸張力場に拡張し, 時間経過, 応力変化, 温度変化を考慮することが可能な構成則であることを確認する。

具体的には,

1) 既報で提案した 1 軸張力場用増分型構成方程式を示し, 2 軸張力場用に拡張する。
2) 2 軸引張試験を行い, その結果を示す。温度およびひずみ速度は一定である。

2. ETFE フィルムの増分型構成方程式の定式化

2.1. 1軸張力場の増分型の線形粘弾性構成方程式

図 2.1.1 に示す一般化 Voigt モデルに基づいて増分型の線形粘弾性構成方程式を既報[6]で提案した。式を以下に示す。変数は表 2.1.1 に示す。

$$\Delta\sigma = \frac{1}{J}\Delta\varepsilon^{el} + f \tag{2.1.1}$$

ここに,

$$f = -\frac{1}{J}\left\{\frac{\Delta t}{\eta_g}\sigma(t_j) + \sum_i\left(C_i\sigma(t_j) - \varepsilon^{el}{}_i(t_j)\right)\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right)\right\} \tag{2.1.2}$$

$$J = C_g + \frac{\Delta t}{2\eta_g} + \sum_i\left\{C_i\left(1-\frac{T_i}{\Delta t}\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right)\right)\right\} \tag{2.1.3}$$

2.2. 増分型の線形粘弾性構成方程式の 2 軸張力場への拡張

2軸張力場を考えるために, Maxwell 要素および Voigt 要素に関連する応力とひずみについて偏差成分と体積成分に分ける。分けたものを表 2.1.1 に示す。1 軸張力場と同じように定式化を行う。

2.2.1. 増分応力

j 番目の時刻 t_j における応力 $\sigma(t_j)$ とひずみ $\varepsilon(t_j)$ を考える。増分時間 Δt の間に, 増分応力 $\Delta\sigma$ と増分線形ひずみ $\Delta\varepsilon^{el}$ だけ変化したと考える。つまり,

$$t_{j+1} = t_j + \Delta t \tag{2.2.1}$$

$$\sigma(t_{j+1}) = \sigma(t_j) + \Delta\sigma \tag{2.2.2}$$

$$\varepsilon^{el}(t_{j+1}) = \varepsilon^{el}(t_j) + \Delta\varepsilon^{el} \tag{2.2.3}$$

ここで, 図 2.1.2 に示すように増分時間 Δt の間の応力の変化率が一定だと考える。つまり,

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = \frac{\sigma(t_{j+1}) - \sigma(t_j)}{t_{j+1} - t_j} = \text{const.} \tag{2.2.4}$$

$$\sigma(\tau) = \sigma(t_j) + \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}(\tau - t_j) \tag{2.2.5}$$

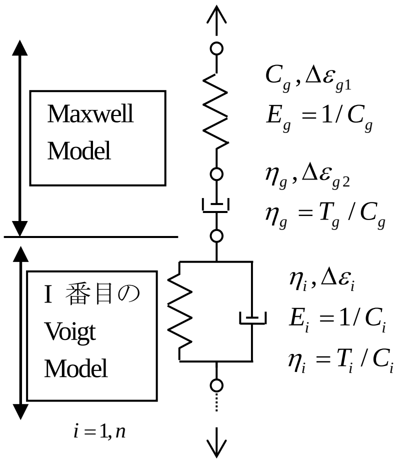


図 2.1.1 一般化 Voigt モデル

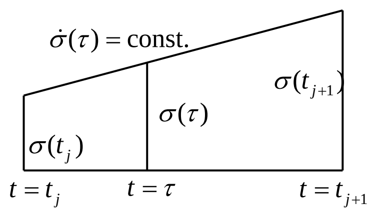


図 2.1.2 増分時間 Δt の間の応力の変化

2.2.2. 要素の増分型粘弾性ひずみ

図 2.1.1 に示す一般化 Voigt モデルの粘弾性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon^{el}$ について, 偏差成分と体積成分を考える。

2.2.2.1. Maxwell 要素

Maxwell 要素の増分ひずみを偏差成分($'$)と体積成分(m)に分けて考える。なお, 増分ひずみは, 時刻 t_j から t_{j+1} を積分して求める。その結果は次式となった。

$$\Delta\varepsilon^{el}{}_{g1}{}' = \frac{C_{Gg}}{2}\cdot\Delta\sigma'$$
$$\Delta\varepsilon^{el}{}_{g1m} = \frac{C_{Kg}}{3}\cdot\Delta\sigma_m \quad (2.2.6)$$

$$\Delta\varepsilon^{el}{}_{g2}{}' = \frac{1}{2\eta_{Gg}}\Delta t\left(\sigma'(t_j)+\frac{1}{2}\Delta\sigma'\right)$$
$$\Delta\varepsilon^{el}{}_{g2m} = \frac{1}{3\eta_{Kg}}\Delta t\left(\sigma_m(t_j)+\frac{1}{2}\Delta\sigma_m\right) \quad (2.2.7)$$

2.2.2.2. Voigt 要素

同様に Voigt 要素の偏差成分($'$)と体積成分(m)について考える。つまり,

$$\Delta\varepsilon^{el}{}_i{}' = \left(\frac{C_{Gi}}{2}\sigma'(t_j)-\varepsilon^{el}{}_i{}'(t_j)\right)\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right) + \frac{C_{Gi}}{2}\cdot\Delta\sigma'\left(1-\frac{T_i}{\Delta t}\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right)\right)$$
$$\Delta\varepsilon^{el}{}_{im} = \left(\frac{C_{Ki}}{3}\sigma_m(t_j)-\varepsilon^{el}{}_{im}(t_j)\right)\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right) + \frac{C_{Ki}}{3}\cdot\Delta\sigma_m\left(1-\frac{T_i}{\Delta t}\left(1-e^{-\Delta t/T_i}\right)\right) \quad (2.2.8)$$

表 2.1.1 変数表

	1 軸張力場の構成方程式の変数	2 軸張力場の構成方程式の変数の体積成分と偏差成分
Maxwell 要素用	下添字 g	←
Voigt 要素用	下添字 i	←
時間間隔	Δt	←
応力増分	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma', \Delta\sigma_m$
粘弾性ひずみ増分	$\Delta\varepsilon^{el}$	-
Maxwell 要素の増分型ひずみ	$\Delta\varepsilon_{g1}, \Delta\varepsilon_{g2}$	$\Delta\varepsilon_{g1}{}'$, $\Delta\varepsilon_{g2}{}'$, $\Delta\varepsilon_{g1m}$, $\Delta\varepsilon_{g2m}$
Voigt 要素 i の増分型ひずみ	$\Delta\varepsilon_i$	$\Delta\varepsilon_i{}'$, $\Delta\varepsilon_{im}$
弾性バネ要素のコンプライアンス	C_g, C_i	C_{Gg}, C_{Kg}, C_{Gi}, C_{mi}
粘性係数	η_g, η_i	η_{Gg}, η_{Kg}, η_{Gi}, η_{Ki}
緩和時間と遅延時間	T_g, T_i	$T_g = T_{Gg} = T_{Kg}$ $T_i = T_{Gi} = T_{Ki}$

2.2.3. 増分型の線形粘弾性構成方程式

式(2.2.6), (2.2.7), (2.2.8)から，増分応力は次のようになる。

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\sigma_m = \frac{2\Delta\varepsilon'}{\bar{C}_G(t)} + \frac{3\Delta\varepsilon_m}{\bar{C}_K(t)} - \frac{\Delta\varepsilon_\alpha{}'}{\bar{C}_G(t)} - \frac{\Delta\varepsilon_{\alpha m}}{\bar{C}_K(t)} \quad (2.2.9)$$

ここに,

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon' = {} & \frac{1}{2}\left(C_G+\frac{\Delta t}{2\eta_G}\right)\Delta\sigma' \\ & + \sum_i \frac{C_{Gi}}{2}\left\{1-\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\frac{T_{Gi}}{\Delta t}\right\}\Delta\sigma' \\ & + \frac{\Delta t}{2\eta_G}\sigma'(t) + \sum_i \frac{C_{Gi}}{2}\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\sigma'(t) \\ & - \sum_i\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\varepsilon_i{}'(t)\end{aligned} \quad (2.2.10)$$

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_a{}' = {} & \frac{\Delta t}{\eta_G}\sigma'(t) + \sum_i C_{Gi}\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\sigma'(t) \\ & - 2\sum_i\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\varepsilon_i{}'(t)s\end{aligned} \quad (2.2.11)$$

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_m = {} & \frac{1}{2}\left(C_K+\frac{\Delta t}{3\eta_K}\right)\Delta\sigma_m \\ & + \sum_i \frac{C_{Ki}}{3}\left\{1-\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\frac{T_{Ki}}{\Delta t}\right\}\Delta\sigma_m \\ & + \frac{\Delta t}{3\eta_K}\sigma_m(t) + \sum_i \frac{C_{Ki}}{3}\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\sigma_m(t) \\ & - \sum_i\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\varepsilon_{mi}(t)\end{aligned} \quad (2.2.12)$$

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{am} = {} & \frac{\Delta t}{\eta_K}\sigma_m(t) + \sum_i C_{Ki}\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\sigma_m(t) \\ & - 3\sum_i\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\varepsilon_{mi}(t)\end{aligned} \quad (2.2.13)$$

$$\bar{C}_G(t) = C_G + \frac{\Delta t}{2\eta_G} + \sum_i C_{Gi}\left\{1-\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right)\right]\frac{T_{Gi}}{\Delta t}\right\} \quad (2.2.14)$$

$$\bar{C}_K(t) = C_K + \frac{\Delta t}{2\eta_K} + \sum_i C_{Ki}\left\{1-\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right)\right]\frac{T_{Ki}}{\Delta t}\right\} \quad (2.2.15)$$

2.3. 1 軸張力場における増分型非線形粘弾性構成方程式

ここでは，既報と同様に非線形粘弾性ひずみを求める。ETFE フィルムは応力レベルに依存して，クリープひずみは非線形性

を示す。そこで，線形ひずみベクトル$\{\varepsilon^{el}\}$と非線形ひずみベクトル$\{\varepsilon^{nl}\}$の関係は，非線形化粘弾性係数$a(\overline{\sigma})$を使って次式で表す。

$$\{\varepsilon^{nl}\}=a(\overline{\sigma})\cdot\{\varepsilon^{el}\} \tag{2.3.1}$$

ここに，

$$\overline{\sigma}=\left(\sigma_x{}^2-\sigma_x\sigma_y+\sigma_y{}^2+3\tau_{xy}{}^2\right)^{1/2} \tag{2.3.2}$$

また，非線形化粘弾性係数$a(\overline{\sigma})$は次式で表すものとし，係数A_2, A_1, A_0は別途求める。

$$a(\overline{\sigma}_i)=A_2\overline{\sigma}_i{}^2+A_1\overline{\sigma}_i+A_0 \tag{2.3.3}$$

ここで，時刻t_jとt_{j+1}におけるそれぞれのひずみベクトルは次式となる。

$$\{\varepsilon^{nl}{}_j\}=a(\overline{\sigma}_j)\cdot\{\varepsilon^{el}{}_j\} \tag{2.3.4}$$

$$\{\varepsilon^{nl}{}_{j+1}\}=a(\overline{\sigma}_{j+1})\cdot\{\varepsilon^{el}{}_{j+1}\} \tag{2.3.5}$$

さらに，非線形粘弾性ひずみ増分ベクトル$\{\Delta\varepsilon^{nl}{}_{i+1}\}$は式(2.3.4)と式(2.3.5)の差分から，次式となる。

$$\begin{aligned}\{\Delta\varepsilon^{nl}{}_{j+1}\}&=\{\varepsilon^{nl}{}_{j+1}\}-\{\varepsilon^{nl}{}_j\}\\&=\left[a(\overline{\sigma}_{j+1})-a(\overline{\sigma}_j)\right]\{\varepsilon^{el}{}_j\}+a(\overline{\sigma}_{j+1})\{\varepsilon^{el}{}_{j+1}\}\end{aligned} \tag{2.3.6}$$

以上より，非線形化粘弾性係数$a(\sigma)$を使って，非線形粘弾性ひずみ増分ベクトル$\{\Delta\varepsilon^{nl}{}_{j+1}\}$を求めた。

2.4. 時間・温度換算則

一般的に，高分子材料は時間・温度換算則[12]が成り立つ。ETFE フィルム材料についても，森山・河端らにより，時間・温度換算則に関する特性が確認されている。時間と温度の換算関係は次式で表される。

$$t'=t/a_{T_0}(T) \tag{2.4.1}$$

これは，実温度Tの環境における実時間tをシフトファクター$a_{T_0}(T)$に用いて，参照温度T_oの環境における換算時間t'を求めるものである。
シフトファクターa_{T_0}は活性化エネルギーΔHを用いて，次式より求める。

$$\log_{10}a_{T_0}(T)=\frac{1}{2.303}\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_o}\right) \tag{2.4.2}$$

ここに，$R=8.314\times10^{-3}\,kJ/(mol\cdot K)$。

3. 増分型構成方程式で使用する定数の評価

3.1. 活性化エネルギーΔH

本論文では，既報と同様に森山・河端[1,2]によって得られた活性化エネルギーΔHを使用する。その値を表 3.1.1 と図 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 活性化エネルギーΔH [1,2]

温度 T	活性化エネルギーΔH
T < 313K (T < 40°C)	113.707
313K < T < 363K (40°C <T < 90°C)	342.261
363K < T (90°C < T)	447.237

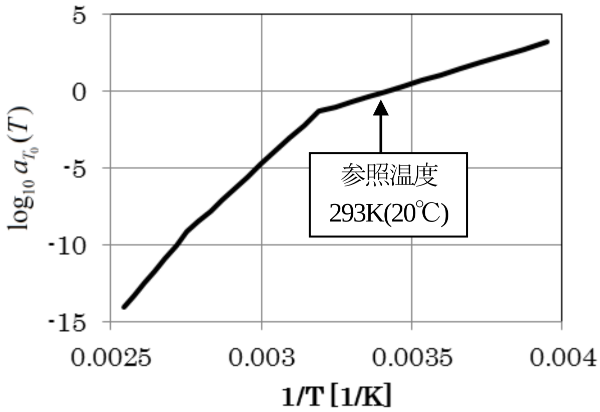


図 3.1.1 温度Tとシフトファクターの関係;

3.2. ETFE フィルムのクリープコンプライアンス

既報[5]で，森山・河端[1,2]の実験結果に合うように，一般化 Voigt モデルの定数を推定した。既報の最小の遅延時間は10^{-3} sec であった。本報では，高温時の特性をより詳細に表現するために，最小の遅延時間 を0.49×10^{-6}secとして，再度，定数を求めなおした。その結果を表 3.2.1, 3.2.2 に示す。なお，Voigt モデルは 26 個とした。

表 3.2.1 Maxwell 要素の定数の
緩和時間T_gとコンプライアンスC_g

T_g	0	C_g	4.14E-04

4. ETFE フィルムの伸び特性

4.1. 2軸引張試験

既報[3]において，2軸張力場における単調載荷試験を行った。その試験片形状を図 4.1.1 に，試験条件を表 4.1.1 に，試験結果を図 4.1.2 に示す。

表 3.2.2　Voigt 要素の定数の遅延時間T_iとコンプライアンスC_i

i	T_i	C_i	i	T_i	C_i	i	T_i	C_i	i	T_i	C_i
1	9.13E+13	9.12E-04	8	2.34E+08	1.21E-04	15	2.99E+03	1.35E-04	22	1.53E-03	8.20E-07
2	3.65E+12	2.37E-04	9	4.67E+07	4.61E-04	16	5.98E+02	3.49E-05	23	3.06E-04	1.48E-04
3	7.30E+11	6.65E-04	10	9.35E+06	1.72E-05	17	1.20E+02	1.28E-04	24	1.23E-05	1.92E-05
4	1.46E+11	2.65E-04	11	1.87E+06	2.69E-04	18	4.79E+00	6.30E-05	25	2.45E-06	5.54E-05
5	2.92E+10	1.07E-03	12	3.74E+05	4.70E-05	19	9.57E-01	1.25E-05	26	4.90E-07	7.44E-06
6	5.84E+09	1.54E-04	13	7.48E+04	1.98E-04	20	1.91E-01	6.04E-05			
7	1.17E+09	7.95E-04	14	1.50E+04	2.22E-05	21	7.66E-03	1.66E-05			

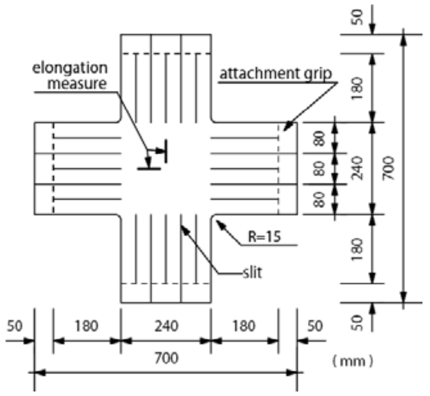
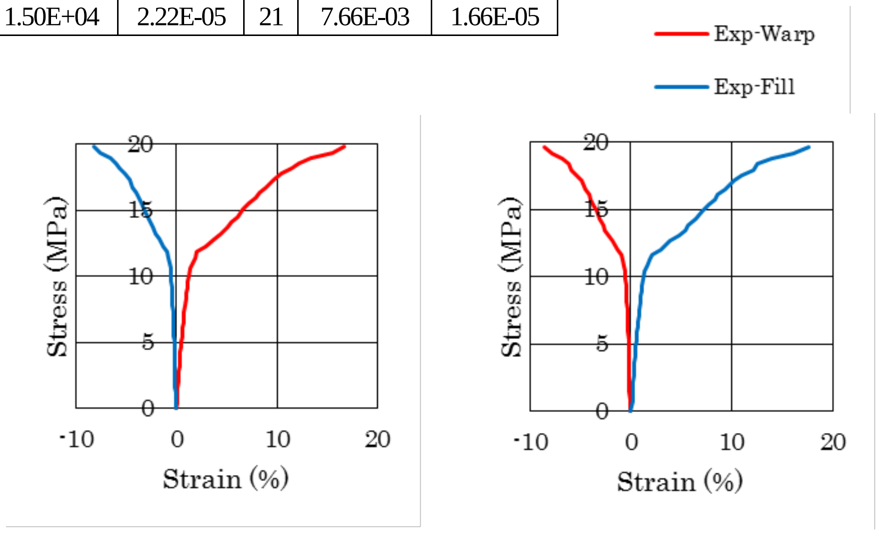
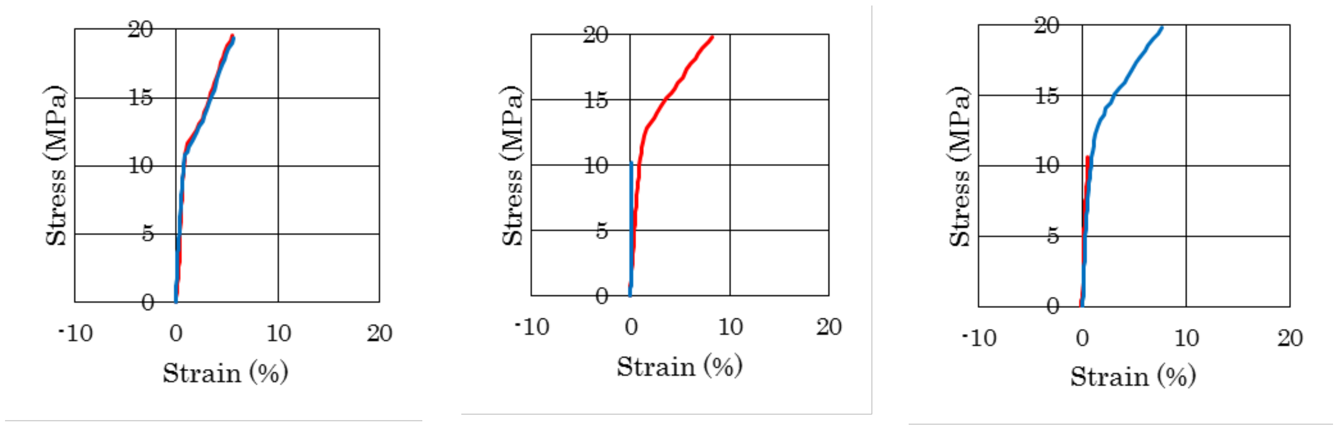


図 4.1.1　2 軸引張試験片形状



(a)　応力比(1:0)

(b)　応力比(0:1)



(c)　応力比(1:1)

(d)　応力比(2:1)

(e)　応力比(1:2)

図 4.1.2　応力・ひずみ関係（ETFE 厚さ 250μm）

表 4.1.1　2 軸引張試験の条件

フィルム厚さ	250μm
方向	MD and TD
応力比	(1:1), (1:0), (0:1), (2:1), (1:2)
チャック間距離	600mm
最大応力	19.6MPa
ひずみ速度	0.67%/min.
温度	25～26℃

表 4.2.1　2 軸クリープ試験の条件

フィルム厚さ	250μm
方向	MD and TD
応力比	(1:1)
チャック間距離	600mm
最大応力	6, 9MPa
応力増分	6, 9MPa/min.
温度	20～23℃

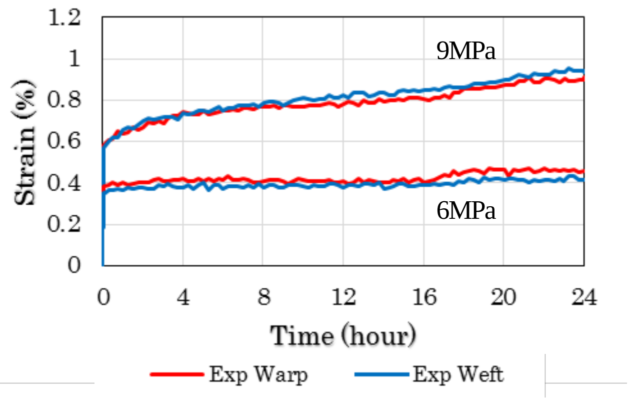


図 4.2.1　2 軸クリープ試験のひずみ・時間関係

4.2.　2 軸クリープ試験

次に，2 軸クリープ試験を行う。試験条件を表 4.2.1 に，図 4.2.1 に試験結果を示す。なお，試験片は図 4.1.1 に示す 2 軸引張試験と同じ形状である。

この結果から，応力 6MPa に対して，応力 9MPa は，1.5 倍の応力であるが，24 時間後のひずみは約 2 倍発生していることがわかる。

5.　試験のシミュレーション

5.1.　2 軸引張試験のシミュレーション

次に，4.1 で示した 2 軸引張試験のシミュレーションを行う。この試験は 25～26℃の環境で行なった試験結果である。そこで，解析では，25.5℃一定とした。

この 2 軸引張試験結果に合うように，非線形化粘弾性係数を求め直した。その結果は次式である。

$$a(\overline{\sigma}_i) = 0.0846\overline{\sigma}_i + 0.592 \qquad (5.1.1)$$

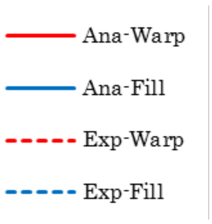
この非線形化粘弾性係数を用いて，2 軸引張試験をシミュレートした結果を図 5.1.1 に示す。

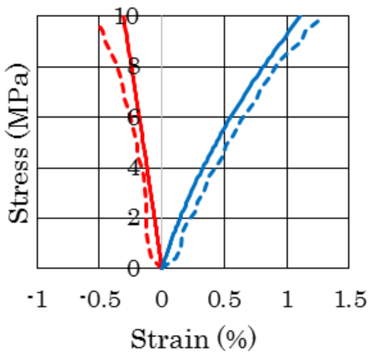
この結果から，(1:0), (0:1)の非載荷側のひずみに注目すると，解析結果が小さい。その他については，十分に実験結果をシミュレートできていると言える。

5.2.　2 軸クリープ試験のシミュレーション

最後に，2 軸クリープ試験のシミュレーションを行う。試験温度の平均である 21.5℃一定として解析を行う。なお，非線形化粘弾性係数は 5.1 で求めた式 5.1.1 の値を使用する。

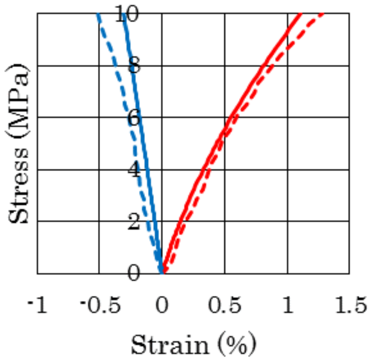
解析結果を図 5.2.1 に示す。この結果から，十分な精度でクリープひずみを予測できていることがわかる。





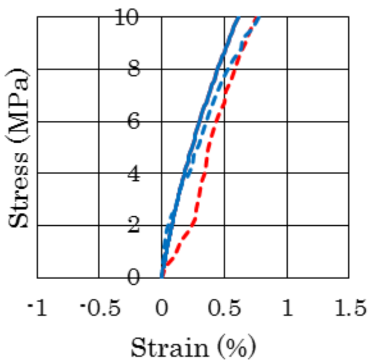
(a)　応力比(1:0)

(c)

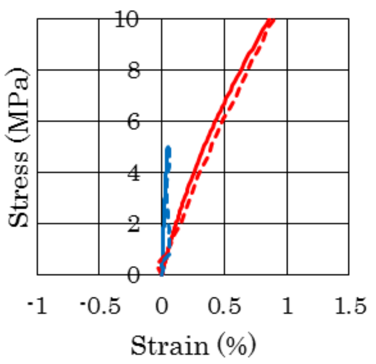


(b)　応力比(0:1)

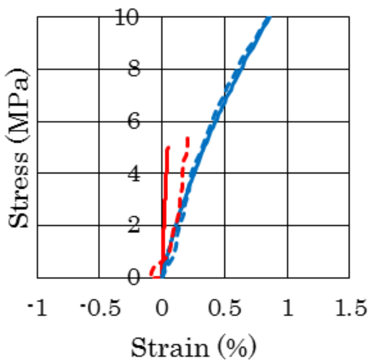
(d)



(e)　応力比 (1:1)



(f)　応力比(2:1)



(g)　応力比(1:2)

図 5.1.1　2 軸引張試験のシミュレーション

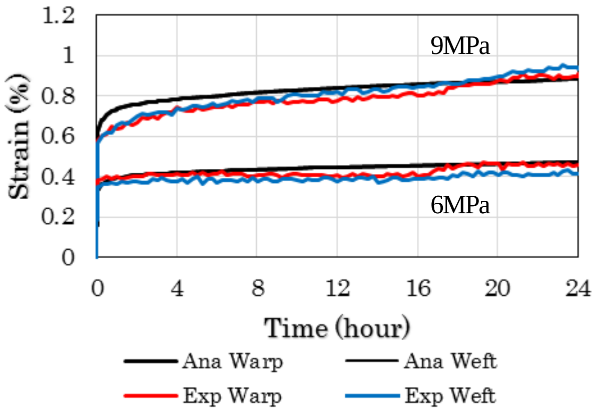


図 5.2.1　2 軸クリープ試験のシミュレーション

6.　まとめ

本論文では，既報で示した 1 軸張力場の増分型の非線形粘弾性構成則を 2 軸張力場に拡張し，時間経過，応力変化，温度変化を考慮することが可能な構成則であることを確認した。限られた条件の試験結果との比較であるため，さらなる比較検討が必要である。例えば，任意の応力比における 2 軸クリープや温度変化を伴う場合などが考えられる。

参考文献

1) 河端昌也，森山史朗，曾田裕昌：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，pp.1～8，2006 年 2 月

2) 森山史朗：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　博士論文，2006

3) 丁乙碩，河端昌也：ETFE フィルムの粘塑性構成式　－粘塑性定数の決定と 1 軸引張の負荷過程に関する検討－，膜構造研究論文集 2009，No.23，pp.9～14，2010 年 3 月

4) 丁乙碩，河端昌也：ETFE フィルムの粘塑性構成式　－アニーリング処理に従う 1 軸・2 軸引張時においての応力－ひずみ関係の検討－，膜構造研究論文集 2011，No.25，pp.55～64，2012 年 3 月

5) 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，pp.31～39，2005 年 2 月

6) Tatsuya Yoshino, Shiro Kato : Formulation of non-linear incremental constitutive equation of ETFE film structure considering the dependence on temperature change, Proceedings of IASS 2013, 2013

7) Wu M., Li Y. : Revised finite element formulation for membrane creep analysis, Proc. of the IASS-SLTE 2014, Paper No. 209, 2014

8) Galliot C, Luchsinger RH. : Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils, Polymer Testing, 2011; 30(4); 356-365.

9) Li Y., Wu M., Wang H. : biaxial creep tests of ETFE foil, Proc. of the IASS-SLTE 2014, Paper No. 136, 2014

10) （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

11) （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

12) 日本レオロジー学会編：講座・レオロジー，高分子刊行会，2001 年

Viscous characteristics of ETFE Film sheet

- A non-linear viscoelastic constitutive equation under biaxial tensions -

Tatsuya Yoshino*1)
Shiro Kato*2)

SYNOPSIS

This study aims at clarifyin the behaviour of ETFE film sheet using the FEM analysis. ETFE film exhibits both elasto-plastic and viscoelastic characteristics under stress. These characteristics have been discussed in the author's studies [3, 4]. In this paper, the viscoelastic characteristics under biaxial tension are described from the viewpoint of experimental tests and numerical simulations.

First, the incremental constitutive equation under biaxial tension is proposed. It is based on the incremental nonlinear viscoelastic equation [4] under uniaxial condition. Then, it is developed in an applicable formula to biaxial stresses in the FEM analysis. The variation of temperature is included using a time-temperature changing equation. The parameters of constitutive equation are again estimated from results [1, 2] of dynamic viscoelastic experiment.

Second, two types of experimental tests are performed. Then, the validity of constitutive equation is confirmed through comparison with results of numerical simulations. One experimental test is biaxial tension test. It is monotonic loading test with various stress ratios. The other one is biaxial creep test. It is two stress level test.

*1) Ph. D., Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation
*2) Ph. D., Professor Emeritus, Toyohashi University of Technology