

## ETFE フィルムの粘性特性

### —温度変化を考慮した非線形粘弾性構成方程式と 2 軸クリープ試験—

吉野達矢\*1  
加藤史郎\*2

#### 梗 概

本研究は FEM 解析を行うことによって, 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ってきた。

本論文では, 2 軸張力場で温度が変化するときの粘弾性特性に注目している。そこで, 1) 温度変化を伴う 2 軸クリープ試験を行う。数種類の張力比に対して試験を行い, 温度ひずみを含むクリープひずみを確認する。2) 前報で提案した増分型構成方程式を用いて, 温度変化に伴う 2 軸クリープ試験のシミュレーションを行い, 提案する増分型構成方程式の妥当性を確認する。

#### 1. はじめに

ETFE フィルムは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。また, ETFE 樹脂の線膨張係数は鋼材等と比べると, 1桁大きい。そのため, 温度変化に伴い, 伸び縮みが問題になる場合も考えられる。また, 膜構造として使用することから 2 軸特性が重要である。そこで, ETFE フィルム膜構造の設計・施工をするために, 粘弾性特性に注目した研究がなされてきた。

ETFE フィルムの粘性に注目した研究として, 著者らの研究以外に, 森山・河端[1,2]の研究, 丁・河端ら[3,4]の研究, Wuらの研究[5], Galliot and Luchsingerの研究[6], Li and Wuの研究[7], Hu, Wu and Xiang[8]などがある。これらの研究は, 粘性の考慮, 温度変化の考慮, 構成則の FEM への導入のいずれかを行っているものの, すべてを考慮した研究はない。

著者ら[9]は, 温度一定の条件下で, (1) MSAJ 法[10, 11]に基づいて, 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[9]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, 文献[13]で, 2 軸張力場に拡張し, その妥当性の確認を行なっている。

前報[14]では, 温度変化に伴う伸縮成分を追加した 2 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, 温度変化を伴う 1 軸クリープ試験を行い, 構成則の妥当性の検討を行っている。

そこで, 本論文では, 既報で示した構成則が, 温度変化を伴う 2 軸クリープ試験結果を表現することで, 時間経過, 応力変化, 温度変化を考慮することが可能であることを確認する。

具体的には,

- 1) 既報で提案した 2 軸張力場用増分型構成方程式に温度変化に伴う伸縮成分を追加した方程式に拡張する。
- 2) 温度変化を伴う 2 軸クリープ試験を行い, その結果を示す。
- 3) 提案する構成則と前報で示した諸定数を用いて, 温度変化を伴う 2 軸クリープ試験のシミュレーションを行う。

#### 2. ETFE フィルムの増分型構成方程式の定式化

前報で提案した増分型構成方程式を以下に示す。

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。

##### 2.1.1. 増分応力と温度変化

$j$  番目の時刻  $t_j$  における応力  $\sigma(t_j)$  と温度  $T_j$  を考える。増分時間  $\Delta t$  の間に, 増分応力  $\Delta \sigma$  変化したと考える。つまり,

\*1 太陽工業株式会社 設計本部 博士 (工学)

\*2 豊橋技術科学大学 名誉教授 工学博士

$$t_{j+1} = t_j + \Delta t \quad (2.1.1)$$

$$\sigma(t_{j+1}) = \sigma(t_j) + \Delta\sigma \quad (2.1.2)$$

ここで、図 2.1.1 に示すように増分時間  $\Delta t$  の間の応力の変化率が一定だと考える。つまり、

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = \frac{\sigma(t_{j+1}) - \sigma(t_j)}{t_{j+1} - t_j} = \text{const.} \quad (2.1.3)$$

$$\sigma(\tau) = \sigma(t_j) + \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}(\tau - t_j) \quad (2.1.4)$$

増分温度  $\Delta T$  だけ変化すると考えると同様に、

$$T(\tau) = T(t_j) + \frac{\Delta T}{\Delta t}(\tau - t_j) \quad (2.1.5)$$

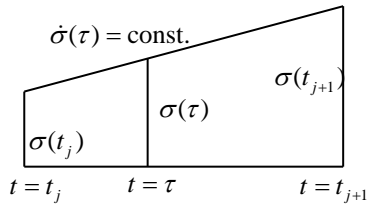


図 2.1.1 増分時間  $\Delta t$  の間の応力の変化

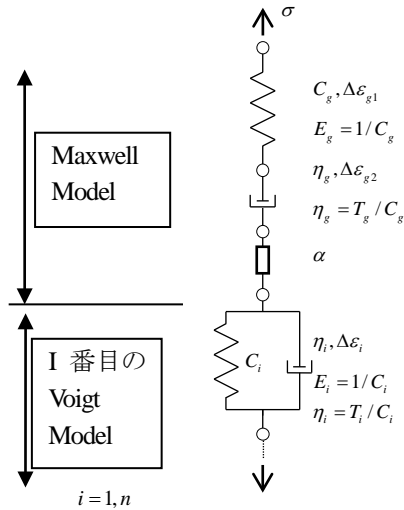


図 2.1.2 一般化 Voigt モデル

### 2.1.2. 要素の増分型粘弾性ひずみ

図 2.1.2 に示す一般化 Voigt モデルの粘弾性ひずみ増分  $\Delta\epsilon^{el}$  について、偏差成分(′)と体積成分( $m$ )を考える。温度変化に伴う伸縮成分は Maxwell 要素にのみ考える。

表 2.1.1 2 軸張力場の構成方程式の変数表

項目	変数
Maxwell 要素用	下添字 $g$
Voigt 要素用	下添字 $i$
時間間隔	$\Delta t$
温度増分	$\Delta T$
応力増分	$\Delta\sigma', \Delta\sigma_m$
粘弾性ひずみ増分	$\Delta\epsilon^{el}$
Maxwell 要素の増分型ひずみ	$\Delta\epsilon_{g1}', \Delta\epsilon_{g2}',$ $\Delta\epsilon_{g1m}, \Delta\epsilon_{g2m}, \Delta\epsilon_{g3m}$
Voigt 要素 $i$ の増分型ひずみ	$\Delta\epsilon_i', \Delta\epsilon_{im}$
弾性バネ要素のコンプライアンス	$C_{Gg}, C_{Kg},$ $C_{Gi}, C_{Ki}$
粘性係数	$\eta_{Gg}, \eta_{Kg}, \eta_{Gi}, \eta_{Ki}$
緩和時間と遅延時間	$T_g = T_{Gg} = T_{Kg},$ $T_i = T_{Gi} = T_{Ki}$
線膨張係数	$\alpha$

### 2.1.2.1. 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。

$$\Delta\epsilon_{g1}^{el'} = \frac{C_{Gg}}{2} \cdot \Delta\sigma' \quad (2.1.6)$$

$$\Delta\epsilon_{g1m}^{el} = \frac{C_{Kg}}{3} \cdot \Delta\sigma_m$$

$$\Delta\epsilon_{g2}^{el'} = \frac{1}{\eta_{Gg}} \Delta t \left( \sigma'(t_j) + \frac{1}{2} \Delta\sigma' \right) \quad (2.1.7)$$

$$\Delta\epsilon_{g2m}^{el} = \frac{1}{\eta_{Kg}} \Delta t \left( \sigma_m(t_j) + \frac{1}{2} \Delta\sigma_m \right)$$

また、温度変化  $\Delta T$  に伴う増分熱ひずみ  $\Delta\epsilon_\theta$  は線膨張係数  $\alpha(T)$  を使って次式で表す。線膨張係数  $\alpha(T)$  は温度  $T$  の関数である。

$$\Delta\epsilon^\theta = \alpha(T) \Delta T \quad (2.1.8)$$

### 2.1.2.2. 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、次式となる。

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_i^{el'} &= \left( \frac{C_{Gi}}{2} \sigma'(t_j) - \varepsilon_i^{el'}(t_j) \right) (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \\ &\quad + \frac{C_{Gi}}{2} \cdot \Delta \sigma' \left( 1 - \frac{T_i}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \right) \\ \Delta \varepsilon_{im}^{el} &= \left( \frac{C_{Ki}}{3} \sigma_m(t_j) - \varepsilon_{im}^{el}(t_j) \right) (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \\ &\quad + \frac{C_{Ki}}{3} \cdot \Delta \sigma_m \left( 1 - \frac{T_i}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \right)\end{aligned}\quad (2.1.9)$$

### 2.1.3. 増分型の線形粘弾性構成方程式

以上から、増分応力は次のようになる。

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma' + \Delta \sigma_m = \frac{2\Delta \varepsilon'}{\bar{C}_G(t)} + \frac{3\Delta \varepsilon_m}{\bar{C}_K(t)} - \frac{\Delta \varepsilon'_\alpha}{\bar{C}_G(t)} - \frac{\Delta \varepsilon_{am}}{\bar{C}_K(t)} - \frac{\Delta \varepsilon^\theta}{\bar{C}_K(t)} \quad (2.1.10)$$

ここに、

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon' &= \frac{1}{2} \left( C_G + \frac{\Delta t}{2\eta_G} \right) \Delta \sigma' \\ &\quad + \sum_i \frac{C_{Gi}}{2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \frac{T_{Gi}}{\Delta t} \right\} \Delta \sigma' \\ &\quad + \frac{\Delta t}{2\eta_G} \sigma'(t) + \sum_i \frac{C_{Gi}}{2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \sigma'(t) \\ &\quad - \sum_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \varepsilon'_i(t)\end{aligned}\quad (2.1.11)$$

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon'_a &= \frac{\Delta t}{\eta_G} \sigma'(t) + \sum_i C_{Gi} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \sigma'(t) \\ &\quad - 2 \sum_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \varepsilon'_i(t)\end{aligned}\quad (2.1.12)$$

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_m &= \frac{1}{2} \left( C_K + \frac{\Delta t}{3\eta_K} \right) \Delta \sigma_m \\ &\quad + \sum_i \frac{C_{Ki}}{3} \left\{ 1 - \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \frac{T_{Ki}}{\Delta t} \right\} \Delta \sigma_m \\ &\quad + \frac{\Delta t}{3\eta_K} \sigma_m(t) + \sum_i \frac{C_{Ki}}{3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \sigma_m(t) \\ &\quad - \sum_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \varepsilon_{mi}(t)\end{aligned}\quad (2.1.13)$$

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_{am} &= \frac{\Delta t}{\eta_K} \sigma_m(t) + \sum_i C_{Ki} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \sigma_m(t) \\ &\quad - 3 \sum_i \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \varepsilon_{mi}(t)\end{aligned}\quad (2.1.14)$$

$$\bar{C}_G(t) = C_{Gg} + \frac{\Delta t}{2\eta_G} + \sum_i C_{Gi} \left\{ 1 - \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Gi}}\right) \right] \frac{T_{Gi}}{\Delta t} \right\} \quad (2.1.15)$$

$$\bar{C}_K(t) = C_{Kg} + \frac{\Delta t}{2\eta_K} + \sum_i C_{Ki} \left\{ 1 - \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{Ki}}\right) \right] \frac{T_{Ki}}{\Delta t} \right\} \quad (2.1.16)$$

## 2.2. 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 $\beta(\bar{\sigma})$ を使って次式で表す。ただし、温度変化に伴う伸縮成分は除外する。すなわち、

$$\{\varepsilon^{nl}\} = \beta(\bar{\sigma}) \cdot \left\{ \{\varepsilon^{el}\} - \{\varepsilon^\theta\} \right\} + \{\varepsilon^\theta\} \quad (2.2.1)$$

ここに、

$$\bar{\sigma} = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (2.2.2)$$

また、非線形化粘弾性係数 $\beta(\bar{\sigma})$ は次式で表すものとし、係数 $B_2, B_1, B_0$ は別途求める。

$$\beta(\bar{\sigma}_i) = B_2 \bar{\sigma}_i^2 + B_1 \bar{\sigma}_i + B_0 \quad (2.2.3)$$

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。

$$\{\varepsilon^{nl}_j\} = \beta(\bar{\sigma}_j) \cdot \left\{ \{\varepsilon^{el}_j\} - \{\varepsilon^\theta_j\} \right\} + \{\varepsilon^\theta_j\} \quad (2.2.4)$$

$$\{\varepsilon^{nl}_{j+1}\} = \beta(\bar{\sigma}_{j+1}) \cdot \left\{ \{\varepsilon^{el}_{j+1}\} - \{\varepsilon^\theta_{j+1}\} \right\} + \{\varepsilon^\theta_{j+1}\} \quad (2.2.5)$$

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(2.2.4)と式(2.2.5)の差分から、次式となる。

$$\begin{aligned}\{\Delta \varepsilon^{nl}_{j+1}\} &= \{\varepsilon^{nl}_{j+1}\} - \{\varepsilon^{nl}_j\} \\ &= \left[ \beta(\bar{\sigma}_{j+1}) - \beta(\bar{\sigma}_j) \right] \left[ \{\varepsilon^{el}_j\} - \{\varepsilon^\theta_j\} \right] \\ &\quad + \beta(\bar{\sigma}_{j+1}) \left[ \{\Delta \varepsilon^{el}_{j+1}\} - \{\Delta \varepsilon^\theta_{j+1}\} \right] + \{\Delta \varepsilon^\theta_{j+1}\}\end{aligned}\quad (2.2.6)$$

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

## 2.3. 時間・温度換算則

一般的に、高分子材料は時間・温度換算則[15]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。

$$t' = t / a_{T_0}(T) \quad (2.3.1)$$

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  $T_0$  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  $\Delta H$  を用いて、次式より求める。

$$\log_{10} a_{T_0}(T) = \frac{1}{2.303} \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2.3.2)$$

ここに、 $R = 8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

### 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 $\Delta H$

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  $\Delta H$  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  $\Delta H$  [1,2]

温度 $T$	活性化エネルギー $\Delta H$
$T < 313\text{K}$ ( $T < 40^\circ\text{C}$ )	113.707
$313\text{K} < T < 363\text{K}$ ( $40^\circ\text{C} < T < 90^\circ\text{C}$ )	342.261
$363\text{K} < T$ ( $90^\circ\text{C} < T$ )	447.237

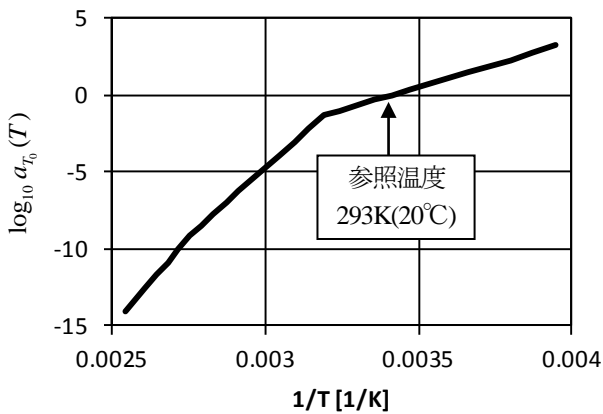


図 3.1.1 温度  $T$  とシフトファクターの関係

#### 3.2. ETFE フィルムのクリープコンプライアンス

既報[9]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。本報では、Voigt モデルを 26 個として、表 3.2.1, 3.2.2 に示す値を用いる。

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	$C_g$	5.27E-04

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  $C_i$

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

#### 3.3. 線膨張係数 $\alpha(T)$

線膨張係数  $\alpha(T)$  は JIS K 7197-1991 「プラスチックの熱機械分析による線膨張率試験方法」に基づいた試験より求める。フィルムを室温から 423K まで温度上昇し、223K まで除冷する。その後、再度 423K まで上昇させて、線膨張係数を求めている。その結果を図 3.3.1 に示す。この結果から次の近似式を得た。

$$\alpha(T) = -2.057 \times 10^{-8} T^4 + 3.289 \times 10^{-5} T^3 - 1.847 \times 10^{-2} T^2 + 4.443 T - 379.6 \quad (3.3.1)$$

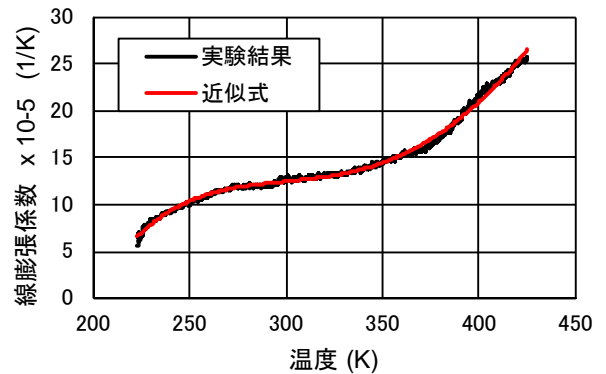


図 3.3.1 線膨張係数  $\alpha(T)$

### 3.4. 非線形化粘弾性係数

本論文では、非線形化粘弾性係数 $\beta(\bar{\sigma})$ は次式を使う。つまり、線形粘弾性とみなしている。

$$\beta(\bar{\sigma}_i) = 1 \quad (3.4.1)$$

### 4. 繰り返し温度変化を伴う ETFE フィルムの 2 軸クリープ試験

2 軸引張試験機で、繰り返し温度変化を伴う 2 軸クリープ試験を行う。

試験片形状を図 4.1 に、試験条件を表 4.1 に示す。試験環境の温度変化の履歴を図 4.2 に、クリープ試験結果を図 4.3 に示す。一部、7 日間の途中で試験を中断した結果が含まれている。

この結果から、18°C の温度差で 0.3% 程度の温度ひずみが発生していることがわかる。試験対象の ETFE フィルムは MD, TD に依存しない同様な温度ひずみを示していることがわかる。

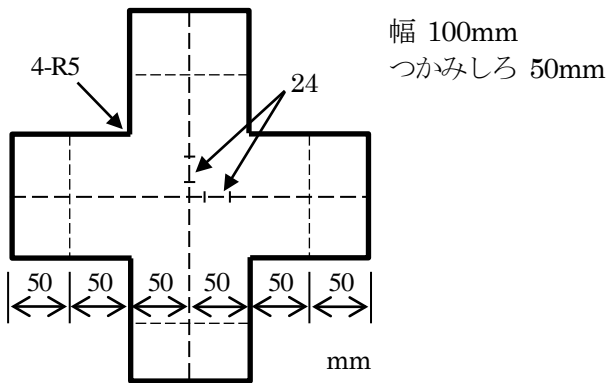


図 4.1 2 軸クリープ用試験片形状

表 4.1 2 軸引張試験の条件

フィルム厚さ	250 $\mu$ m
試験片幅	100mm
最大応力	6, 8MPa
応力比	1:1, 2:1, 1:2, 5:1, 1:5, 1:0, 0:1
载荷速度	おおよそ 2sec. で载荷
設定温度	20.4 と 2.6°C を 12 時間毎に 7 サイクル (図 4.2) 参照

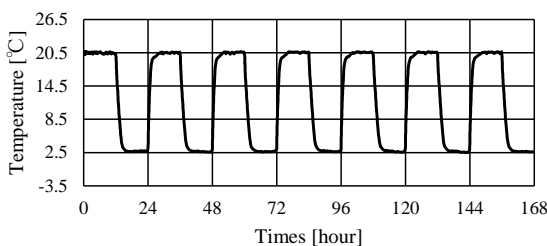


図 4.2 クリープ試験の温度

### 5. 試験のシミュレーション

提案した構成則を用いて 4 章で実施した温度変化を伴う 2 軸クリープ試験のシミュレーションを行う。諸定数は 3 章に示す値を用いる。

シミュレーションの結果を図 4.3 に示す。最大応力 8MPa, 応力比(1:0), (0:1), 载荷方向のひずみの差異は 0.5% 程度であり、また、非载荷方向は 0.25% 程度と大きい。その他については、0.15% 以下であることが確認できる。最大応力 8MPa, 応力比(1:0), (0:1)を除いて、十分にクリープひずみを推定できていることが確認できる。本報では、非線形化粘弾性係数を 1 とし、粘弾性とみなしてシミュレーションを行っていることから、最大応力 8MPa, 応力比(1:0), (0:1)の条件で差異が現れた。差異を減らすには非線形性を考慮する必要があると思われる。

### 6. まとめ

本論文では、温度変化を伴う複数の応力に対して 2 軸クリープ試験を行い、温度に依存した 2 軸クリープ特性を確認した。

さらに、提案した構成則を用いて、温度に依存した 2 軸クリープ試験のシミュレーションを行い、温度および応力比が変化するクリープ特性を表現可能であることを示した。

以上より、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。

今後は対象とする応力範囲を拡大し、塑性特性を含む場合について、2 軸クリープ試験を行い、非線形化粘弾性特性、および、塑性特性を把握するとともに、その特性を表現可能な構成則の提案を行う。

#### 参考文献

- 1) 河端昌也, 森山史朗, 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, 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 軸引張時におけるの応力-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) Wu M., Li Y.: Revised finite element formulation for membrane creep analysis, Proc. of the IASS-SLTE 2014, Paper No. 209, 2014
- 6) Galliot C, Luchsinger RH.: Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils, Polymer Testing, 2011; 30(4); 356-365.
- 7) Li Y., Wu M., Wang H.: biaxial creep tests of ETFE foil, Proc. of the IASS-SLTE 2014, Paper No. 136, 2014

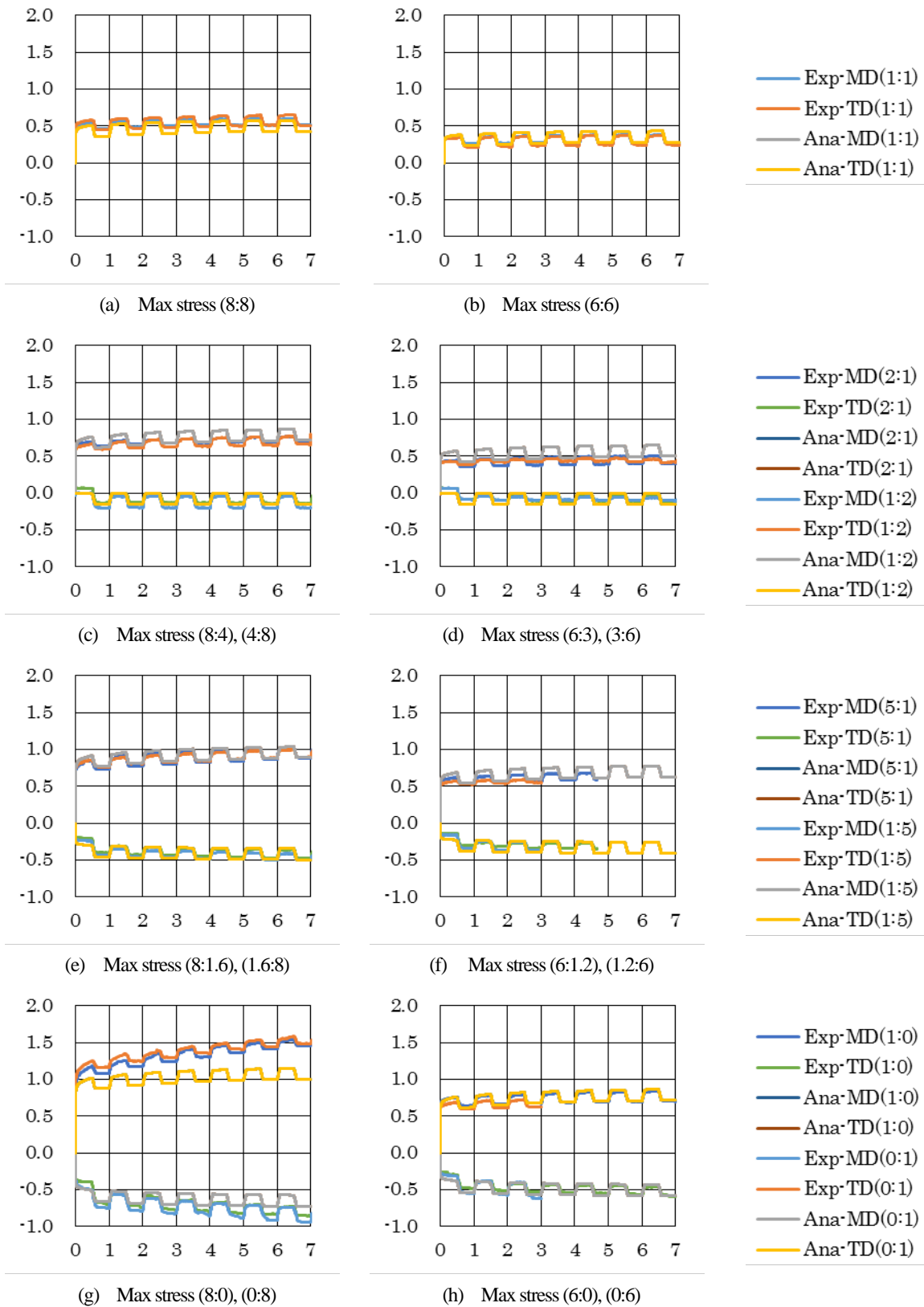


図4.3 2軸クリープ試験結果 (Ana: 解析結果, Exp: 実験結果, 横軸: 時間 [day], 縦軸: ひずみ [%])

- 8) Hongming HU, Minger WU, Ping XIANG: Forming method of flat-patterning ETFE cushions considering creep behavior, Proceedings of the IASS Symposium 2018, July 16-20, 2018, MIT, Boston, USA, IASS2018\_FullPaper\_21.pdf, 2018
- 9) 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
- 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) 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
- 13) 吉野達矢, 加藤 史郎: 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 -, 膜構造研究論文集 2015, No.29, pp.13~20, 2016年3月
- 14) 吉野達矢, 加藤 史郎: ETFE フィルムの粘性特性 - 温度変化を考慮した非線形粘弾性構成方程式と1軸クリープ試験 -, 膜構造研究論文集 2017, No.31, pp.1~7, 2018年3月
- 15) 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

- Non-linear visco-elastic constitutive equations that consider the change in temperature and biaxial creep tests -

Tatsuya Yoshino<sup>\*1)</sup>

Shiro Kato<sup>\*2)</sup>

### SYNOPSIS

In this research, the target is to clarify the behaviour of the membrane structure of the ETFE film using the FEM analysis. ETFE film shows the behavior of both of elasto-plastic characteristics and visco-elastic characteristics. The authors have carried out researches focusing on these characteristics.

This paper will focus on visco-elastic characteristics when temperature changes during biaxial tension creep tests.

First, biaxial creep tests accompanied with temperature change are performed. During the tests, thermal strain and creep strain are recorded against different types of tension ratios. Second, the incremental constitutive equations - proposed in previous paper - are used to carryout simulation of biaxial creep tests accompanied with temperature change. Then, validity of the proposed incremental constitutive equations is to be proofed

---

\*1) Ph. D., Engineering division, Taiyo Kogyo Corporation

\*2) Ph. D., Professor Emeritus, Toyohashi University of Technology