

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—

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, 1 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。

まず, 温度変化に伴うひずみの変化量を考慮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 2 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。

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。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[7], Galliot and Luchsingerの研究[8], Li and Wuの研究[9]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[5]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[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, 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。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, 温度の違いを考慮することができる。ただし, 温度については, 1)温度の違いが粘性成分に与える影響を時間・温度換算則によって考慮できているが, 2)温度変化に伴う伸縮成分が考慮できていない。

そこで, 本論文では, 既報で示した 2 軸張力場の増分型の非線形粘弾性構成則を温度変化に伴う伸縮成分を考慮できる構成則に拡張し, 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 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) 温度変化に伴う 1 軸クリープ試験を行い, その結果を示す。その結果から, 温度変化に伴う伸縮成分に注目し, 構成方程式に必要な諸定数を算出する。
- 3) 提案する構成則と算出した諸定数を用いて, 温度変化に伴う 1 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

2.1. 増分型の線形粘弾性構成方程式の温度変化による伸縮成分の追加

前報[13]にて, 2 軸張力場を考えるために, 増分型非線形粘弾性構成方程式を提案した。本報では, さらに, 温度変化に伴う伸縮成分を追加する。

2 軸張力場を考えるために, Maxwell 要素および Voigt 要素に

*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

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 Δt の間に、増分応力 $\Delta\sigma$ 変化したと考える。つまり、

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

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

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

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

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

増分温度 ΔT だけ変化すると考えると同様に、

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

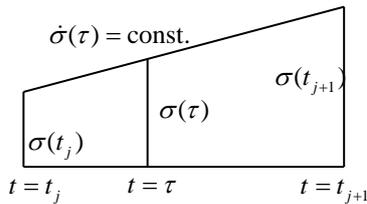


図 2.1.1 増分時間 Δt の間の応力の変化

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 | Δt |
| 温度増分 | ΔT |
| 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 | α |

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 ΔT 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。

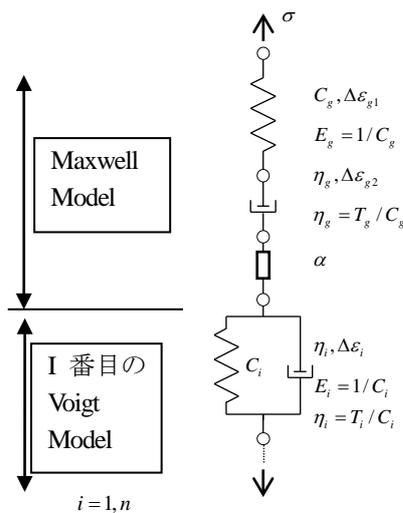


図 2.1.2 一般化 Voigt モデル

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

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。

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

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{im}^{el} &= \left(\frac{C_{Ki}}{3} \sigma_m(t_j) - \varepsilon_{im}^{el}(t_j) \right) (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \\ &\quad + \frac{C_{Ki}}{3} \cdot \Delta \sigma_m \left(1 - \frac{T_i}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/T_i}) \right) \end{aligned}$$

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。

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

ここに、

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

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

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

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

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

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

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、

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

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。

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

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

さらに、非線形粘弾性ひずみ増分ベクトル $\{\Delta \varepsilon_{i+1}^{nl}\}$ は式(2.2.4)と式(2.2.5)の差分から、次式となる。

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

以上より、非線形化粘弾性係数 $\beta(\sigma)$ を使って、非線形粘弾

性ひずみ増分ベクトル $\{\Delta \varepsilon_{j+1}^n\}$ 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[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。

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

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 ΔH を用いて、次式より求める。

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

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 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 |
|--|---------------------|
| $T < 313\text{K}$ ($T < 40^\circ\text{C}$) | 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 |

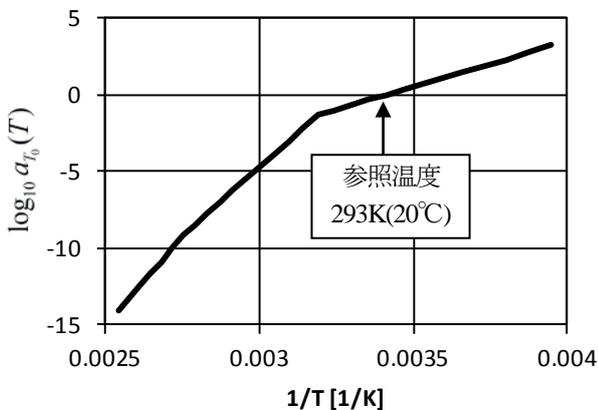


図 3.1.1 温度 T とシフトファクターの関係

3.2. ETFE フィルムのクリープコンプライアンス

既報[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。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。

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

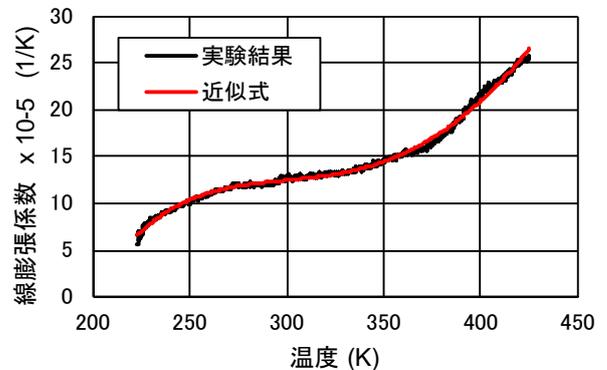


図 3.3.1 線膨張係数 $\alpha(T)$

4. ETFE フィルムの1軸クリープ試験

4.1. 温度一定1軸クリープ試験

1軸引張試験機で、温度一定で1軸クリープ試験を行う。

試験片形状を図 4.1.1 に、試験条件を表 4.1.1 に示す。

クリープ試験結果を図 4.1.2 に示す。なお、ひずみは、温度変化に伴い、治具自身が線膨張係数分だけ伸び縮みする。そこで、試験結果として得られたひずみから、治具の伸び分だけ差し引いて、ETFE フィルムだけのひずみを求めた。他の試験結果についても同様である。

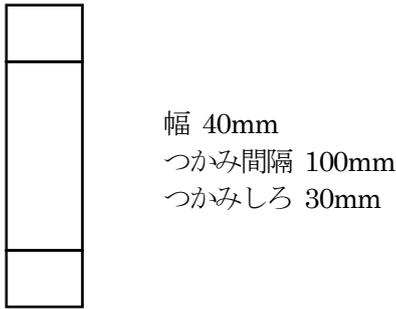


図 4.1.1 1軸クリープ用試験片形状

表 4.1.1 1軸引張試験の条件

| | |
|---------|---------------------|
| フィルム厚さ | 250 μ m |
| 方向 | MD |
| 試験片幅 | 40mm |
| チャック間距離 | 100mm |
| 最大応力 | 6.1MPa |
| 载荷速度 | 0.5MPa/min. |
| 設定温度 | 温度一定 4, 25°Cの2通り |

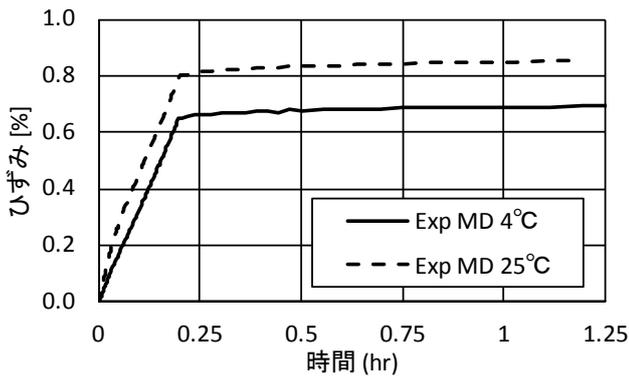


図 4.1.2 ひずみ・時間関係

4.2. 30°Cの温度変化のある1軸クリープ試験

1軸引張試験機で、温度変化を伴うクリープ試験を行う。温度変化の条件を表 4.2.1 に、その他の条件は表 4.1.1 に示す。試験片は図 4.1.1 の形状とする。

温度は表 4.2.1 に示す温度を設定したが、試験機の仕様によ

り、図 4.2.1 に示す値となった。試験結果を図 4.2.2, 4.2.3 に示す。

表 4.2.1 温度変化の設定

| | |
|------|--|
| 設定温度 | 初期温度 30°C, 载荷時と1時間放置 30~0°C, 6 サイクル サイクル時の温度速度 30°C/1hr. |
|------|--|

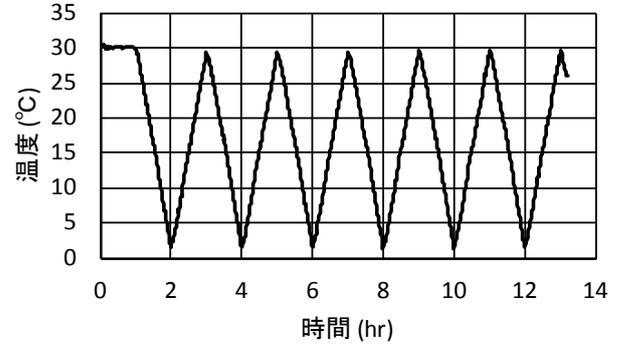


図 4.2.1 クリープ試験の温度

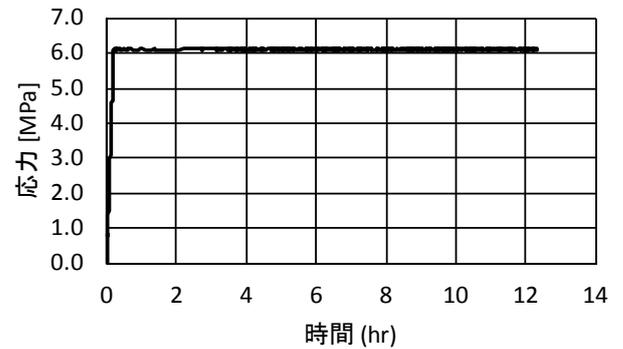


図 4.2.2 応力・時間関係

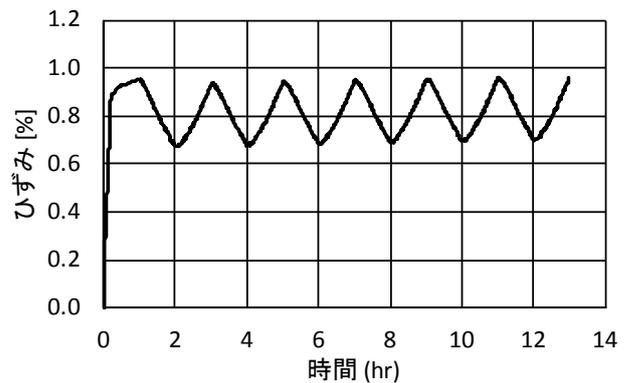


図 4.2.3 ひずみ・時間関係

4.3. 10°Cの温度変化のある1軸クリープ試験

1軸引張試験機で、温度変化を伴うクリープ試験を行う。温度変化の条件を表 4.3.1 に、その他の条件は表 4.1.1 に示す。試

験片は図 4.1.1 の形状とする。

温度は表 4.3.1 に示す温度を設定したが、試験機の仕様により、図 4.3.1 に示す値となった。試験結果を図 4.3.2, 4.3.3 に示す。

表 4.3.1 温度変化の設定

| | |
|------|---|
| 設定温度 | 初期温度 30°C, 荷重時と 3 時間放置 30~20°C, 20~10°C, 10~0°Cを それぞれ各 5 サイクル サイクル時の温度速度 10°C/15min. |
|------|---|

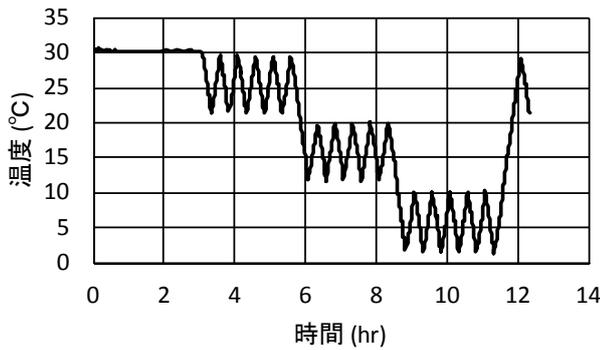


図 4.3.1 クリープ試験の温度

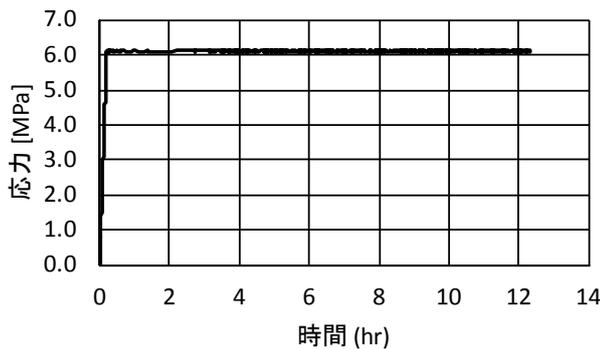


図 4.3.2 応力・時間関係

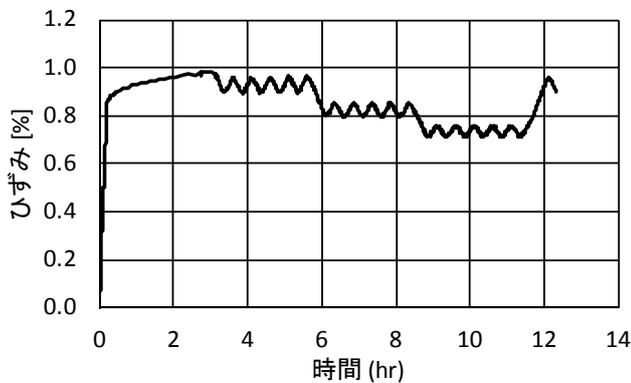


図 4.3.3 ひずみ・時間関係

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 1 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 5.1~5.3 に示す。いずれも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。

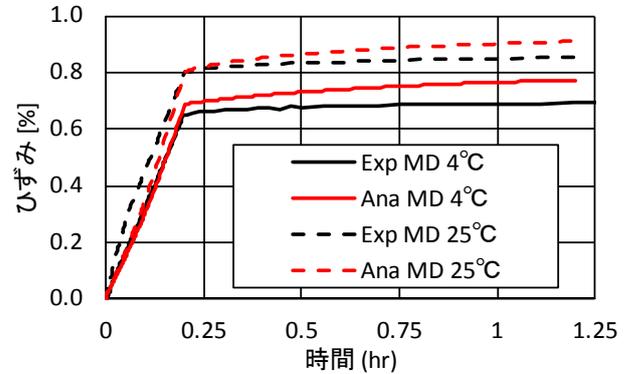


図 5.1 ひずみ・時間関係(温度一定)

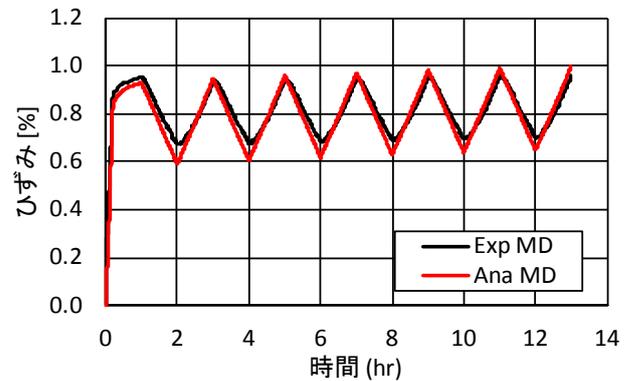


図 5.2 ひずみ・時間関係(30°C変化)

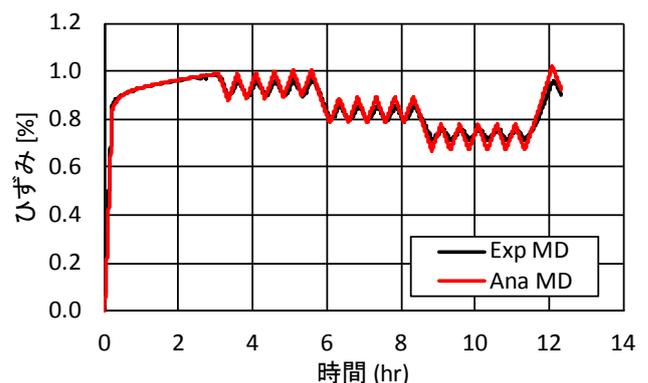


図 5.3 ひずみ・時間関係(10°C変化)

6. まとめ

本論文では、2 軸張力場用の増分型の非線形粘弾性構成則を、温度変化に伴う伸びの成分を考慮できるように拡張した。温度変化に伴う伸びの特性は熱機械分析により、線膨張係数として得た。

また、温度一定および温度変化のある1軸クリープ試験を行い、温度に依存した1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1軸クリープ試験のシミュレーションを行い、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。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。

謝辞

研究の遂行にあたり、旭硝子株式会社有賀広志氏に貴重なデータを提供頂きました。厚くお礼申し上げます。

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 – アニール処理に従う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) 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
- 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

Viscous characteristics of ETFE Film sheet

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

Tatsuya Yoshino^{*1)}
Shiro Kato^{*2)}

SYNOPSIS

In our researchs ,using FEM analysis, the target is to clarify the behavior of ETFE film sheets. ETFE film shows both of elasto-plastic and visco-elastic behaviors. The authors have carried out studies focusing on these characteristics.

In this paper, through experimental and numerical analysis, we will focus on visco-elastic characteristics when temperatures change during uniaxial tension.

First, the incremental constitutive equations which takes into account the change in amount of strain due to change in temperature is proposed.

These constitutive equations are extension of the previous nonlinear incremental visco-elastic constitutive equations for biaxial tensions.

Yet, they are in a format that can be used in FEM analysis.

*1) Ph. D., Advanced Structures R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation

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