

# ETFE フィルムの粘弾性挙動について

河端 昌也\*  
森山 史朗\*\*  
會田 裕昌\*\*

## 梗 概

既報<sup>[1]</sup>のクリープに関する検討では、ETFEフィルムの力学的挙動が温度依存性や時間依存性のほかに応力依存性を有することを確認した。このような材料は、荷重条件によって降伏応力や弾性勾配が変化するため、弾塑性による評価では温度やひずみ速度によって材料定数を変更しなければならない。本論文では、動的粘弾性実験よりETFEフィルムの粘弾性物性を把握し、応力-ひずみ関係を一つの粘弾性挙動として連続的に捉えることができるボルツマンの重畳原理に基づく粘弾性解析を提案する。

### 1. はじめに

高分子材料は、多数の鎖状高分子が凝集した物質である。このような材料は、図 1 に示すように原子間の「化学的結合」と、鎖状高分子間の「物理的拘束」の二つの力が共存すると考えられている<sup>[2]</sup>。前者は、非常に強い結合力を持つため弾性的な働きをされると考えられる。後者は前者に比べて弱い力であるため、温度が上昇すれば各鎖状高分子の分子運動が活発になり拘束力はさらに弱まるとされている。よって、クリープや応力緩和現象に代表される高分子材料の粘弾性挙動は、主に物理的拘束内で生じる流動現象に起因していると考えられる。

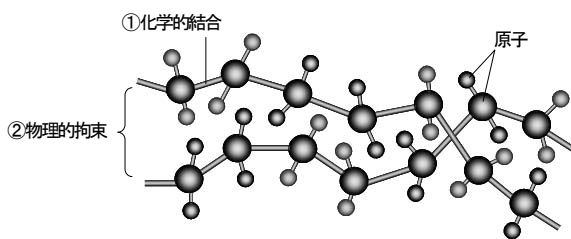


図1 高分子材料の内部構造

対象とする ETFE フィルムは、四フッ化エチレンとエチレンの共重合体を基本組成とする熱可塑性の高分子材料である。本材料を建築物に用いる場合は、エアクッションのように内圧力が継続的に作用するケースや台風時等の動的荷重によって高レベルの応力応答が周期的に発生するケースがあるため、その粘弾性挙動を詳細に把握しておくことが望ましい。

既報<sup>[1]</sup>では、クリープに関する検討を実施し、ETFE フィルムの力学的挙動は高分子材料特有の温度依存性や時間依存性のほかに応力依存性を有することを確認した。また、四要素の力学的モデルを用いて実際の長期クリープ挙動を検討する場合、粘弾性挙動を部分的に表現することは可能であるが、応力レベルや評価時間に応じた粘弾性定数の設定が必要であることが明らかになった。よって、長時間にわたるクリープや応力緩和などの挙動を力学的モデルで詳細に検討するためには、多要素モデルを設定する必要がある。本論文では、動的粘弾性実験による粘弾性物性計測から多要素モデルに対応した粘弾性定数を決定し、クリープ実験や応力緩和実験、および引張試験やインフレート実験の挙動も再現できるボルツマンの重畳原理に基づく粘弾性解析を示すことを目的とする。

ETFE フィルムの応力-ひずみ関係は、初期の段階(ひずみ2%付近)で著しい剛性変化を示すが、文献<sup>[3][4]</sup>をはじめ既往の研究では、この剛性変化を二つの直線で捉え、その交点を降伏応力と設定している。しかし、文献<sup>[5][6]</sup>で確認しているように、弾性勾配や降伏応力は温度やひずみ速度によって変動するため、「弾性」「塑性」の二つの特性で応力-ひずみ関係を評価する解析では、温度や速度条件によって材料定数を変更しなければならないと一般的とは言えない。本論文で示す粘弾性解析は、動的粘弾性実験で得られる粘弾性物性の評価手法を応用することで、文献<sup>[5]</sup>で示した降伏応力を超える領域までの常温(23°C)時における応力-ひずみ関係を、一つの粘弾性挙動として連続的に評価を行うことが可能となっている。

\* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻  
\*\* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻

助教授 博士 (工学)  
大学院生

## 2. 動的粘弾性実験

動的粘弾性実験は、応力緩和実験やクリープ実験などの静的実験に比べ、短時間で長い時間領域、あらゆる温度の粘弾性物性を計測することができる。本論文では、動的粘弾性実験を通して ETFE フィルムの粘弾性物性を計測し、その計測結果から多要素モデルの粘弾性定数を求めていく。

計測機は、セイコー電子工業株式会社製のDMS200を使用した。この計測機は、試験片に定常的な正弦波振動を与え貯蔵弾性率  $E'$ 、損失弾性率  $E''$  を自動計測する。 $E'$  は動的な変形におけるエネルギーの貯蔵に関する弾性率であり、 $E''$  は熱によって行なわれるエネルギーの散逸に関する弾性率である。一般に粘弾性材料は、正弦波振動が加えられると図 2 に示すように応力とひずみの間で位相のずれ ( $\delta/2\pi f$ ) が生じる。この応力と時間的な遅れを持つひずみは、複素弾性率  $E^*$  として表現され式(1)、式(2)<sup>[7]</sup>のような関係となる。式(1)、式(2)の関係を図で示すと、図 3 のようになる。

$$E^* = E' + iE'' \quad (i = \sqrt{-1}) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2)$$

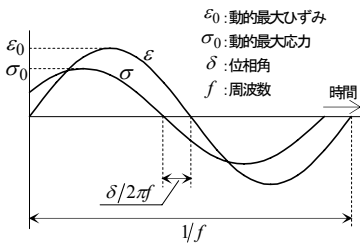


図2 応力とひずみの位相関係

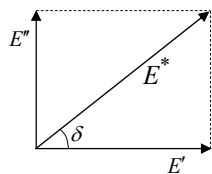


図3 複素弾性率の概念

実験手順について説明する。試験片は幅 5mm、長さ 35mm、厚さ 200  $\mu\text{m}$  の ETFE フィルムを用い、チャック間 20mm で計測機に取り付ける。試験片を取り付け後、恒温槽で試験片全体を覆い、窒素ガスを用いて雰囲気温度を  $-20^\circ\text{C}$  まで下げる。温度が安定したら、昇温速度  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  で  $-20^\circ\text{C}$  から  $120^\circ\text{C}$  まで温度を上昇させながら、線形粘弾性が保たれる範囲で試験片に動的ひずみを与える。本実験では、試験片に対しひずみの振幅が 0.15% となるように振動を与え、周波数は 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0Hz の合計 8 種類とした。本実験で使用した試験片の異方性は、無視できるほど小さいことが確認されたため、MD (Machine Direction) 方向のみを使用している。また、試験片を変えても同様の挙動を示すことが事前に確認されたため、各周波数において使用する試験片数は各 1 片とした。なお、アニーリング (フィルム製造時に生じる残留ひずみを除去するための熱処理) を施したフィルムと施さないフィルムでは、実験結果に違いはあまり見られなかったため、本実験ではアニーリングを施さないフィルムを使用した。

図 4 は、代表結果として周波数 1.0Hz における  $E'$ 、 $E''$  および  $\tan \delta$  の計測データを示している。他の周波数においても、

$E'$  と  $\tan \delta$  ではガラス転移に伴い  $40^\circ\text{C}$  あたりから上昇が始まり  $85\sim 105^\circ\text{C}$  付近にピークが見られた。

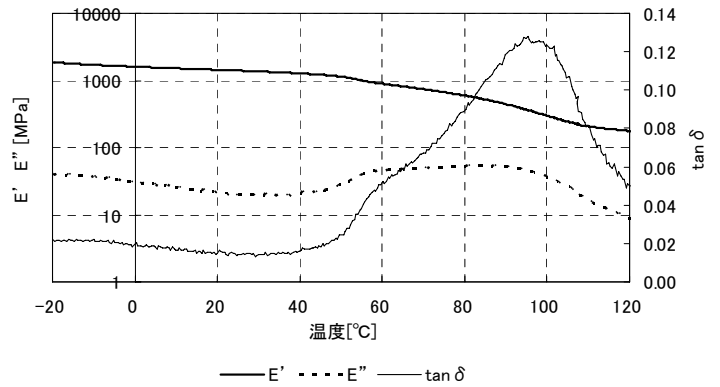


図4 1.0Hz 実験結果 (昇温速度  $1^\circ\text{C}/\text{min}$ )

## 3. 合成曲線の作成

図 5 および図 6 は、図 4 に示した周波数ごとの計測データから  $5^\circ\text{C}$  間隔で  $E'$  および  $E''$  を取り出し、弾性率と角振動数  $\omega$  の関係を表したものである。これらのデータを横軸に沿って平行移動すると、一本の合成曲線を作ることができる<sup>[8]</sup>。図 7 は、 $20^\circ\text{C}$  を基準にして得られた  $E'$  および  $E''$  の合成曲線を示す。

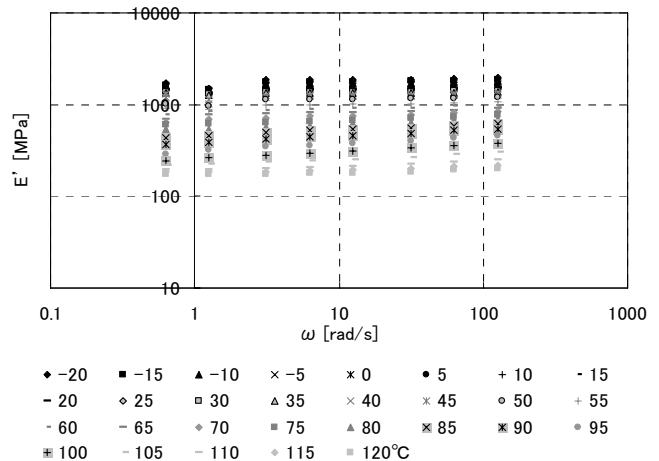


図5 貯蔵弾性率  $E'$

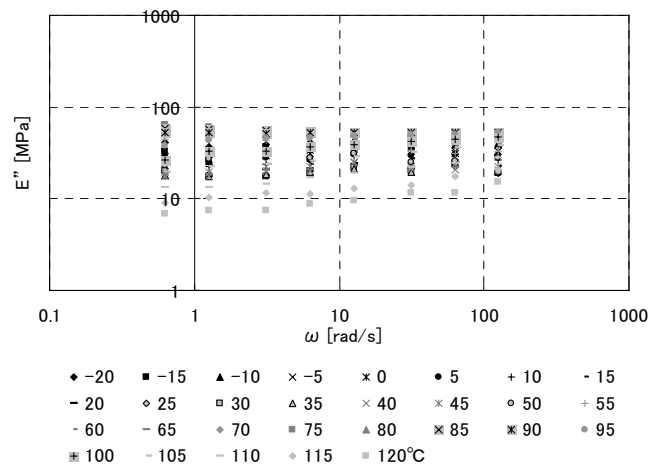


図6 損失弾性率  $E''$

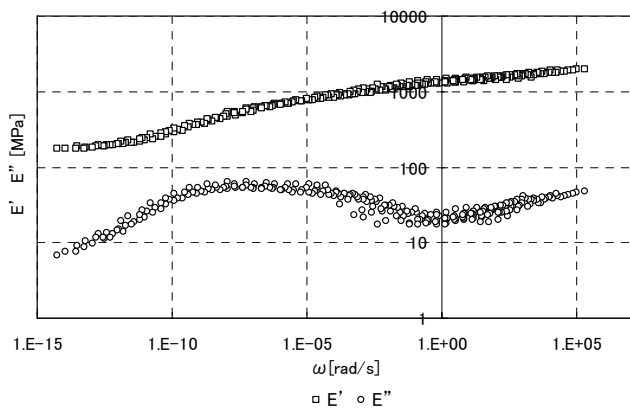


図7 E' および E'' の合成曲線(20°C)

種々の温度における各曲線の平行移動量は、次式<sup>[9]</sup>に示すシフトファクター  $a_{T_0}(T)$  で表される。

$$a_{T_0}(T) = \frac{\omega'}{\omega} \quad (3)$$

ここで、 $\omega$  は温度  $T$  での現象を観測する際の角振動数 (rad/s) であり、 $\omega'$  は同現象がある基準温度  $T_0$  で見た場合の換算角振動数 (rad/s) である。式(3)により、異なる温度条件下で観測された挙動を特定の基準温度下での挙動に書き直すことができる。 $a_{T_0}(T)$  の定量的表現としては、W.L.F式とアレニウス式が一般的に使用されている。W.L.F式は、ガラス転移温度とそれより100°C高い温度の間で成立するとされているが<sup>[10]</sup>、ガラス転移温度が90°C前後とされるETFEフィルムでは、通常のフィルムパネル屋根の想定温度範囲外となり実用的ではないため、本論文ではアレニウス式を使用した。アレニウス式は、化学反応における速度過程の考え方を高分子材料中の分子の流動変形過程に形式的に適用したもので、次式<sup>[8]</sup>のように表現される。

$$\log_{10} a_{T_0}(T) = \frac{1}{2.303} \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

気体定数:  $R \approx 8.314 \times 10^{-3}$  (kJ/(mol·K))

$\Delta H$  (kJ/(mol·K))は、分子の流動に基づく緩和過程の活性化エネルギーであるが、ETFEフィルムの  $\Delta H$  の値は既往の文献で示された例がないため、次式<sup>[8]</sup>を用いて算定した。

$$\Delta H = 2.303R \frac{d \log_{10} a_{T_0}(T)}{d(1/T)} \quad (5)$$

式(5)で示すように、 $a_{T_0}(T)$  を  $1/T$  (K<sup>-1</sup>) に対してプロットすれば、 $\Delta H$  はその勾配として求められる。なお、シフトファクター  $a_{T_0}(T)$  も実験前は未知であったため、まず図5、図6に示す結果を、式(4)を用いずにそのまま平行移動させて特定の基準温度における合成曲線を作成し、 $a_{T_0}(T)$  を算定した。

図8は、式(4)を用いずに基準温度90°Cの合成曲線を作成し

た際に算定された  $a_{T_0}(T)$  を、 $1/T$  に対してプロットしたグラフである。このグラフの勾配を、式(5)に適用して活性化エネルギー  $\Delta H$  を求めると表1のようになる。40°Cを境に、 $\Delta H$  が大きく異なる値となっている。なお、90°C以外を基準温度に設定し合成曲線を作成しても表1の値になることが確認されている。

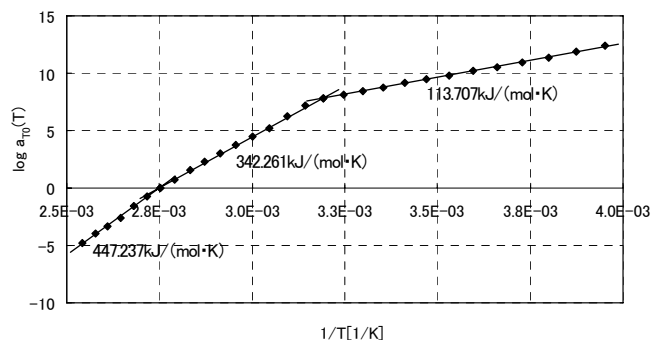


図8 90°C基準の  $\log a_{T_0}(T)$  対  $1/T$  プロット

表1 式(5)を用いて算定した  $\Delta H$

温度(°C)	$\Delta H$ (kJ/(mol·K))
-20~40	113.707
40~90	342.261
90~120	447.237

動的粘弾性実験から求められた貯蔵弾性率  $E'$  と損失弾性率  $E''$  は、周波数関数であるため時間関数の緩和弾性率  $E_r(t)$  (MPa)に変換する必要がある。 $E_r(t)$  への変換式は、次式<sup>[10]</sup>のように表現される。

$$E_r(t) = E'(\omega) - 0.4E''(0.4\omega) + 0.014E''(10\omega) \quad (6)$$

$$1/\omega = t \text{ (秒)}$$

クリープコンプライアンス  $J(t)$  (1/MPa)を求める場合は、まず式(7)、式(8)<sup>[11]</sup>より貯蔵コンプライアンス  $J'$  と損失コンプライアンス  $J''$  を算定し、それらを式(9)<sup>[10]</sup>へ代入する。

$$J' = \frac{E'}{E'^2 + E''^2} \quad (7)$$

$$J'' = \frac{E''}{E'^2 + E''^2} \quad (8)$$

$$J(t) = J'(\omega) + 0.4J''(0.4\omega) - 0.014J''(10\omega) \quad (9)$$

$$1/\omega = t \text{ (秒)}$$

図9は、図7に示す  $E'$  と  $E''$  の合成曲線を式(6)から式(9)までを使用して  $E_r(t)$  と  $J(t)$  の合成曲線に変換した結果である。

図10は、 $E_r(t)$  と  $1/J(t)$  を示しているが、ETFEフィルムの  $E_r(t)$  と  $J(t)$  は、ほぼ逆数関係に近いことが読みとれる。 $E_r(t)$  と  $J(t)$  は、必ずしも簡単に逆数関係が成り立つ保証はないが、ETFEフィルムの場合は逆数で変換を行っても支障はないと考えられる。

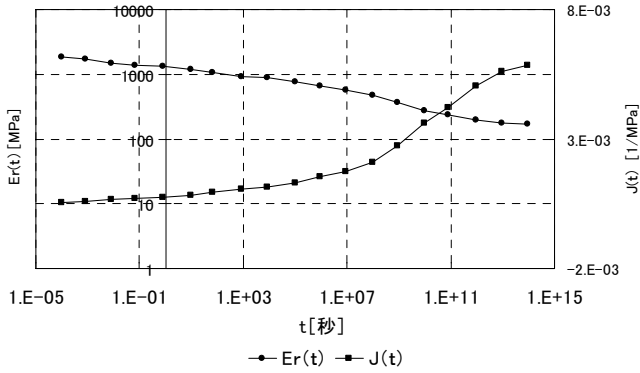


図9  $E_r(t)$ と $J(t)$ の合成曲線(20°C)

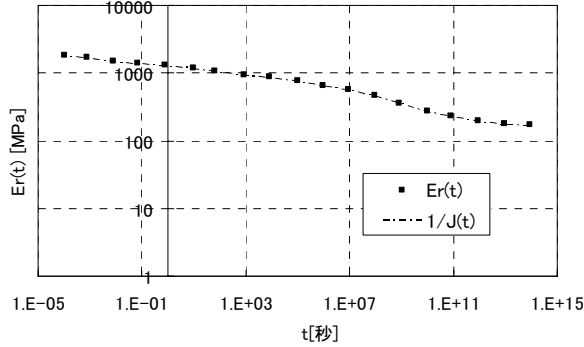


図10  $E_r(t)$ と $1/J(t)$ (20°C)

#### 4. 粘弾性定数の決定

緩和弾性率  $E_r(t)$  は、多要素の力学的モデルで表現すると図11のように示される。このモデルは、一般化マクスウェルモデルと呼ばれており式(10)<sup>[9]</sup>で表現できる。

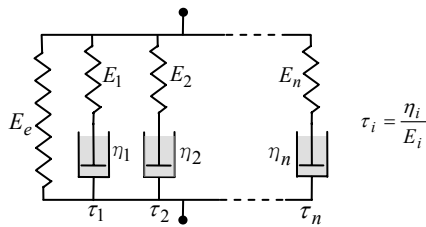


図11 一般化マクスウェルモデル

$$E_r(t) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (10)$$

ここで  $E_e$  は、すべてのばねが緩和したときの緩和弾性率  $E_r(\infty) = E_e$  を表す。また  $E_i$  は各ばねの弾性率、 $\tau_i$  は緩和時間、 $\eta_i$  は粘性率である。なお、式(10)はプロニー級数と呼ばれ、モデル要素数  $n$  個の級数和である。この式を用いて合成曲線の数式近似を行えば、マクスウェルモデル内の各定数を決定することができる。

数式近似法の一つとして、粘弾性挙動が指数関数的に減衰する性質を利用したコロケーション法がある<sup>[9]</sup>。表2および図12はこの手法を用いて数式近似した結果であるが、負の剛性が算出されており、また近似曲線が振動している。より滑らかな曲

線を得るために、データの読み取りにおいて時間間隔を変化させる等を試みたが結果は変わらなかった。

現在、このような問題を解決する方法として様々な提案がなされている<sup>[12]</sup>。本論文では、ETFEフィルムの合成曲線はコロケーション法では精度の高い近似を行えないことが明らかであるため、市販のカーブフィットプログラム<sup>[13]</sup>を利用して数式近似を行なった。

同プログラムは、図7に示すような周波数関数である貯蔵弾性率  $E'$  および損失弾性率  $E''$  の合成曲線に直接フィットさせて、 $E_i$  (MPa)と  $\tau_i$  (秒)を出力するのが特徴である。使用されている算定式<sup>[13]</sup>を以下に示す。なお、このプログラムは常に正の剛性になるように設定されている。

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2} E_i \quad (11)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2} E_i \quad (12)$$

表3は、カーブフィットプログラムより算出した結果を示す。図13には、表3より得られる  $E_r(t)$  を示しているが、振動のない滑らかな近似曲線となっている。

表2 コロケーション法による計算結果(20°C)

$i$	$\tau_i$ (秒)	$E_i$ (MPa)
1	1.000E+13	2.051E+01
2	1.000E+12	2.040E+01
3	1.000E+11	4.047E+01
4	1.000E+10	9.564E+01
5	1.000E+09	6.569E+01
6	1.000E+08	1.706E+02
7	1.000E+07	1.676E+01
8	1.000E+06	2.004E+02
9	1.000E+05	-1.022E+01
10	1.000E+04	2.753E+02
11	1.000E+03	-1.140E+02
12	1.000E+02	4.758E+02
13	1.000E+01	-3.499E+02
14	1.000E+00	6.516E+02
15	1.000E-01	-5.980E+02
16	1.000E-02	9.109E+02
17	1.000E-03	-1.116E+03
	$E_e$	1.709E+02

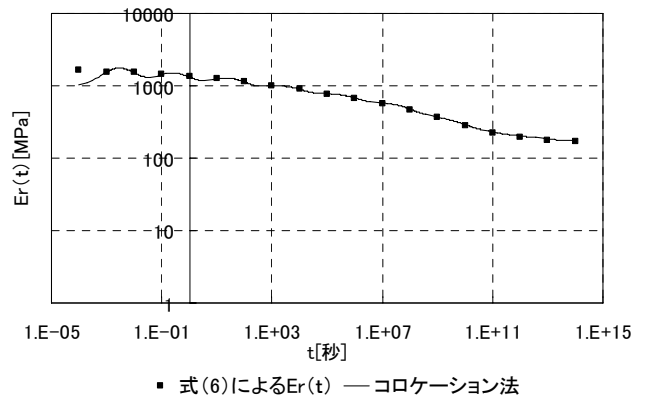


図12 コロケーション法による近似曲線(20°C)

表3 カーブフィットプログラムによる計算結果(20°C)

$i$	$\tau_i$ (秒)	$E_i$ (MPa)
1	1.573E+13	2.179E+01
2	9.164E+11	2.262E+01
3	8.062E+10	4.152E+01
4	5.994E+09	8.508E+01
5	3.386E+08	1.180E+02
6	2.327E+07	1.155E+02
7	1.715E+06	9.792E+01
8	1.532E+05	1.061E+02
9	8.368E+03	8.652E+01
10	5.903E+02	4.822E+01
11	4.138E+01	4.421E+01
12	3.084E+00	2.763E+01
13	3.066E-01	3.749E+01
14	1.533E-02	4.423E+01
15	1.029E-03	5.465E+01
16	7.809E-05	6.674E+01
17	5.013E-06	9.370E+01
	$E_e$	1.756E+02

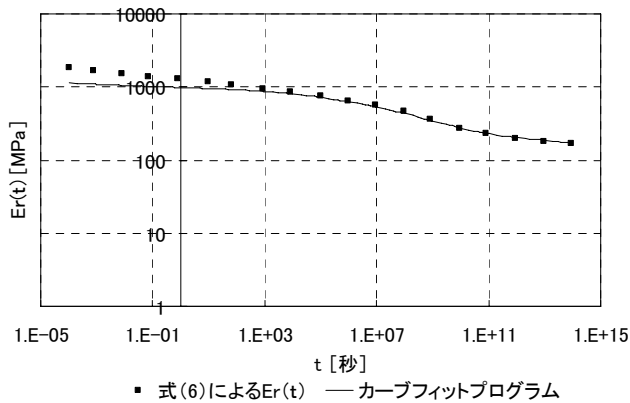


図13 カーブフィットプログラムによる近似曲線(20°C)

### 5. 粘弾性解析

ここでは、ボルツマンの重畳原理を利用して粘弾性解析を行う。重畳原理は、様々な荷重履歴に対する材料の応答を記述するもので、種々の粘弾性材料の挙動予測を行えるものとされている。

応力緩和現象をはじめ、ひずみ履歴に対する応力応答を求める場合は、次式<sup>10)</sup>で表される。

$$\sigma(t) = Er(t) \cdot \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^n Er(t-t_i) \cdot \Delta \varepsilon_i \quad (13)$$

ここで、 $\varepsilon_0$  は初期ひずみ、 $\Delta \varepsilon_i$  は時刻  $t_i$  におけるひずみ増分値である。なお本解析では、前述のカーブフィットプログラムから求められた緩和弾性率  $Er(t)$  を利用する。

同様の重畳原理は、クリープ現象をはじめとする応力履歴に対するひずみ応答を計算する場合にも成立し、次式<sup>10)</sup>で表される。

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 + \sum_{i=1}^n J(t-t_i) \cdot \Delta \sigma_i \quad (14)$$

$\sigma_0$  は初期応力、 $\Delta \sigma_i$  は時刻  $t_i$  における応力増分値である。本解析で用いるクリープコンプライアンス  $J(t)$  は、 $Er(t)$  とほぼ逆数関係であることが確認されたため、カーブフィットプログラムより求められた  $Er(t)$  の逆数を用いることにする。

既報<sup>1)</sup>において四要素モデルを用いたクリープ挙動の検討を行った際に、ETFEフィルム粘弾性定数は応力依存性があり、応力とクリープひずみには比例関係がないことが確認された。線形粘弾性であれば応力によらず粘弾性定数が一定であり、応力とクリープひずみは比例関係を示す。ここでは、応力レベルが特定のレベルを超えると線形粘弾性が成立しない領域、すなわち非線形粘弾性の領域に入ると仮定して検討を進めることにする。本論文で扱う  $Er(t)$  と  $J(t)$  は、線形粘弾性域における動的実験から求められたものであるため、これらを非線形粘弾性域における解析にそのまま使用することはできない。

図14は、既報<sup>1)</sup>で実施した72時間クリープ実験(23°C)における30分経過後のクリープの応力依存性を示している。グラフ左軸  $J/J_0$  の  $J_0$  は動的粘弾性実験で得られたクリープコンプライアンス(23°C基準)、 $J$  は既報<sup>1)</sup>の72時間クリープ実験で得られたクリープコンプライアンスである。 $J$  が線形粘弾性であれば、 $J/J_0$  による比は1になると考えられる。しかし、5MPaあたりから  $J/J_0$  が1以上になり、応力レベルが高まるほど粘弾性の非線形性が強くなっている。

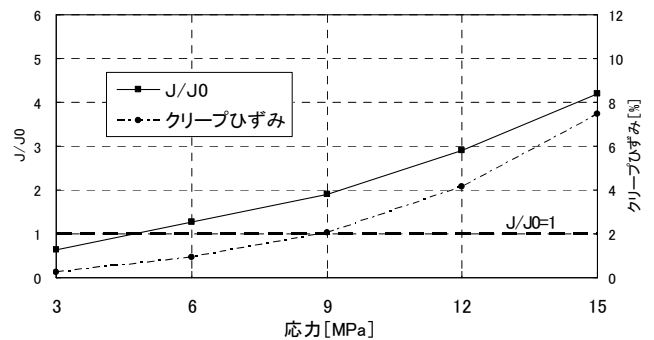


図14 30分経過後の  $J/J_0$  とクリープひずみ(23°C)

$J/J_0$  を経時変化で表すと図15のようになる。図15に示す3~15MPaまでの  $J/J_0$  を数式で表現すれば、式(15)になる。

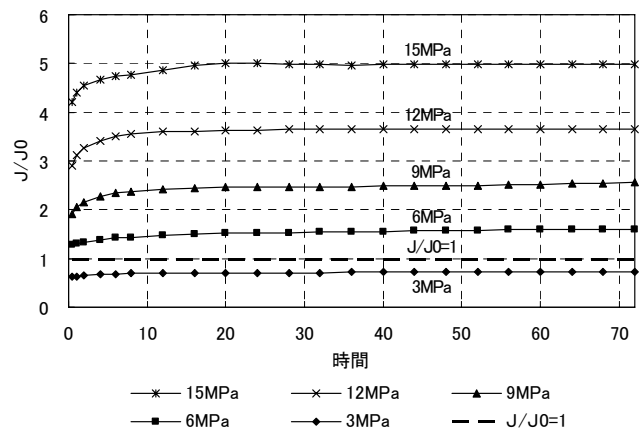


図15  $J/J_0$  の経時変化(23°C)

$$J/J_0 = \{0.081 \cdot \ln(\sigma) - 0.070\} \cdot \ln(t) + 0.018\sigma^2 - 0.099\sigma + 0.628 \quad (15)$$

同式は、図 15 に示す各曲線を最小二乗法で対数近似して得られた結果である( $t$ は秒とする)。なお $J/J_0$ は、重畳原理による粘弾性解析を非線形粘弾性域で適用する際に補正值として扱うことにする。またクリープの解析では、式(14)の $\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0$ に $J/J_0$ を乗じることで非線形粘弾性を考慮する。

次に、上記手法による解析結果をクリープ実験結果と比較する。図 16 は、既報<sup>1)</sup>で実施した 6MPa における 72 時間クリープ実験(23°C)と解析を示している。補正を施さない線形粘弾性解析の結果は、実験結果と異なっている。しかし、補正を施した非線形粘弾性解析は実挙動をよく表している。図 17 は、既報<sup>1)</sup>で実施した 3、6、9、12、15MPa における 72 時間クリープ実験(23°C)と解析を示す。非線形粘弾性を考慮した解析を実施しているため、全ての実験結果と同様の挙動を示すことができている。図 18 は、6MPa における一ヶ月クリープ実験(23°C)と解析を示している(一ヶ月クリープ実験は、72 時間のクリープ実験と同様の試験条件で行なっている)。グラフより、非線形粘弾性を考慮した解析は、一ヶ月間という長期挙動にも対応可能であることがわかる。図 19 では、30 年間のクリープ予測を行なっている。本解析は、常温時における種々の長期クリープ予測が可能である。図 20 は、3MPa の 0、20、40、60°C におけるクリープ予測を示している。3MPa において、如何なる温度条件下でも $J/J_0 = 1$ と仮定すれば、様々な温度でのクリープ予測ができる。ただし、長期クリープおよび常温以外のクリープについては予測の段階であるため、実験による検証が必要である。

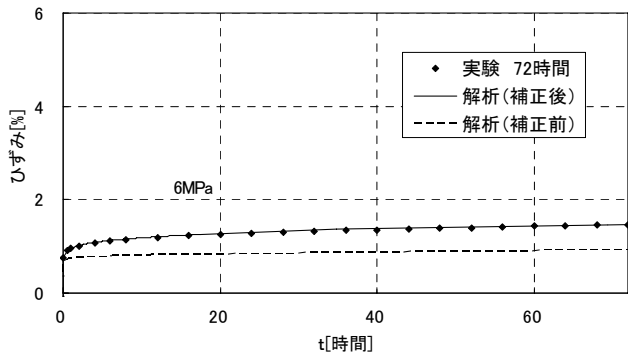


図 16 6MPa での 72 時間クリープ(23°C)

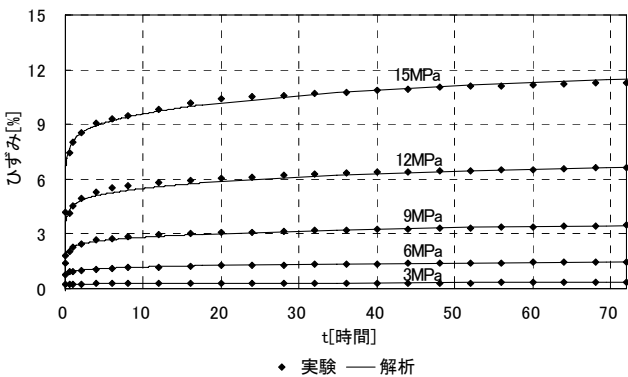


図 17 72 時間クリープ(23°C)

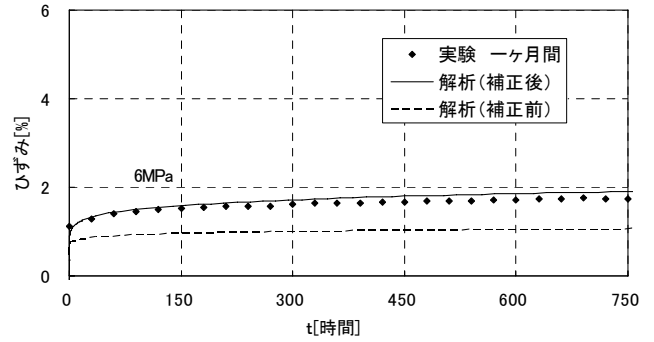


図 18 6MPa での一ヶ月クリープ(23°C)

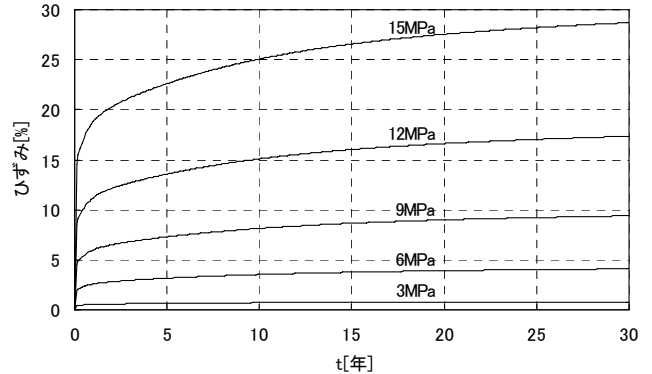


図 19 30年クリープ予測(23°C)

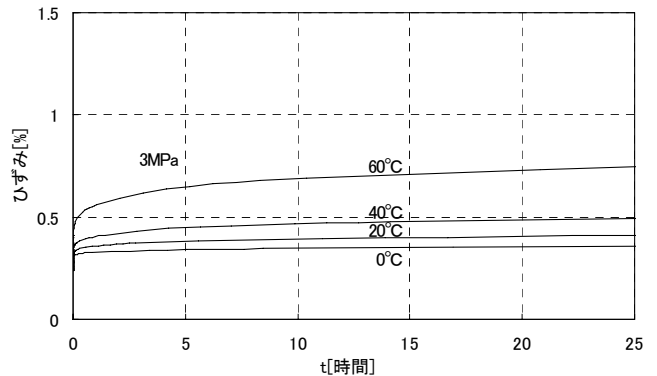


図 20 3MPa での温度別クリープ予測(25 時間)

図 21 から図 27 は、異なるひずみ速度での定ひずみ速度一軸引張試験(23°C)と解析を示している。引張試験は、ひずみ速度 1~100%/min においては幅 30mm、チャック間長さ 200mm、厚さ 200  $\mu$ m の短冊形試験片を使用し、ひずみ速度 400~2000%/min においては幅 10mm、チャック間長さ 100mm、厚さ 200  $\mu$ m の短冊形試験片を使用して定伸長形引張試験機による一軸引張を行なっている。解析では、ひずみ履歴に対する応力応答を計算する式(13)を用いているが、 $J/J_0$ による補正計算を加味している。例えば $t_1 = 1$ の時のひずみ増分値 $\Delta\varepsilon_1$ によって $\sigma(t_1)$ の応力が生じ、式(13)の $J/J_0$ が $\alpha_1 = J(t_1, \sigma)/J_0(t_1)$ のとき、

$$\sigma(t_1) = \frac{E_r(t_1 - t_1)}{\alpha_1} \Delta\varepsilon_1 = \frac{E_r(0)}{\alpha_1} \Delta\varepsilon_1 \quad (16)$$

とし、また  $t_2 = 2$  の時のひずみ増分値  $\Delta\varepsilon_2$  によって  $\sigma(t_2)$  となり、 $J/J_0$  が  $\alpha_2 = J(t_2, \sigma)/J_0(t_2)$  のとき、

$$\sigma(t_2) = \frac{E_r(t_2 - t_1)}{\alpha_1} \Delta\varepsilon_1 + \frac{E_r(t_2 - t_2)}{\alpha_2} \Delta\varepsilon_2 = \frac{E_r(1)}{\alpha_1} \Delta\varepsilon_1 + \frac{E_r(0)}{\alpha_2} \Delta\varepsilon_2 \quad (17)$$

⋮

とする。ただし、 $J/J_0$  が 1 以下のときは線形粘弾性と仮定して補正を行わないことにした。

図 21 のひずみ速度 1%/min の結果では、補正前と補正後の解析結果を合わせて示しているが、非線形粘弾性を考慮する補正計算の有効性がわかる。図 26 と図 27 については、高速引張で実験値を細かく計測できなかったため、やや精度は低いですが、どのひずみ速度においても実験値の著しい剛性変化が生じるまでは、解析値は同様の挙動を示している。本解析は、文献[5]で示した降伏応力を超える領域まで十分適用できている。図 28 は、解析値が実験値と分岐した時の応力値をひずみ速度毎にプロットしたものである。文献[5]で示すひずみ速度と引張降伏応力の関係と同様、分岐応力もひずみ速度の対数に比例する傾向にある。図 29 は、文献[4]で実施した円形タイプ試験体のインフレート実験における単調加力の結果と粘弾性解析の結果を示している。実験の応力は、等張力の球の膜応力  $PR/2t$  ( $P$ :内圧、 $R$ :曲率半径、 $t$ :フィルム厚)を用いた見かけの応力で示している。曲率半径  $R$  は、中央部鉛直変位  $h$  とスパン  $l$  から  $R = (l^2 + 4h^2)/8h$  で求めている。なお実験のひずみは、試験体の膜面中央部に取り付けられたポテンシオメータより計測したものである。引張試験の場合と同じように、実験値の著しい剛性変化が生じるまでは、解析値がほぼ同様の挙動を表現している。

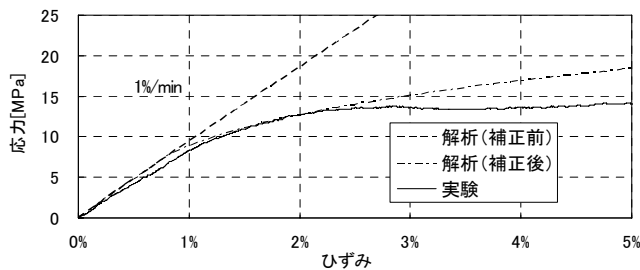


図 21 ひずみ速度 1%/min (23°C)

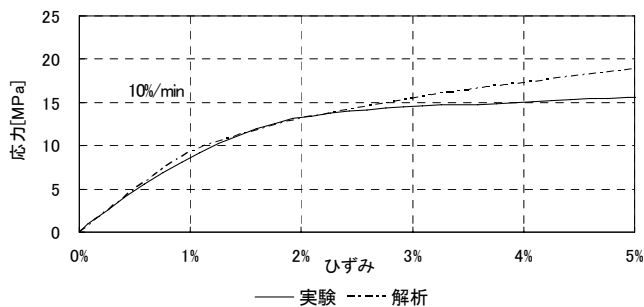


図 22 ひずみ速度 10%/min (23°C)

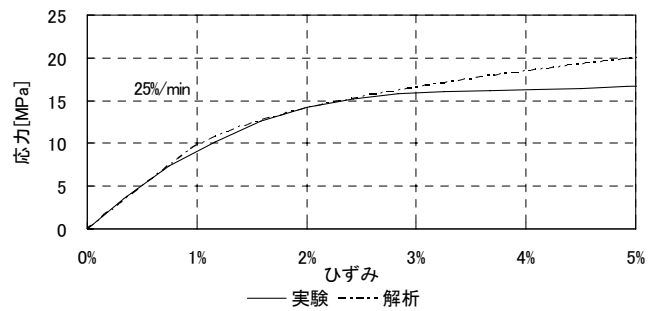


図 23 ひずみ速度 25%/min (23°C)

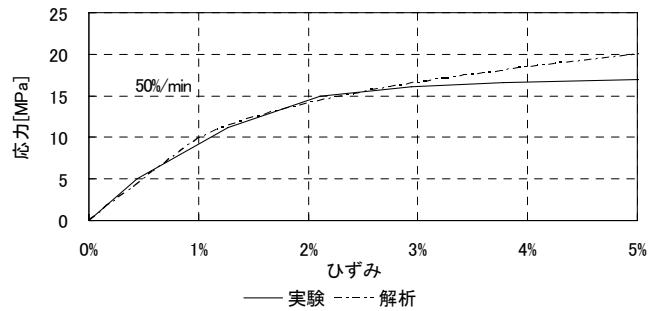


図 24 ひずみ速度 50%/min (23°C)

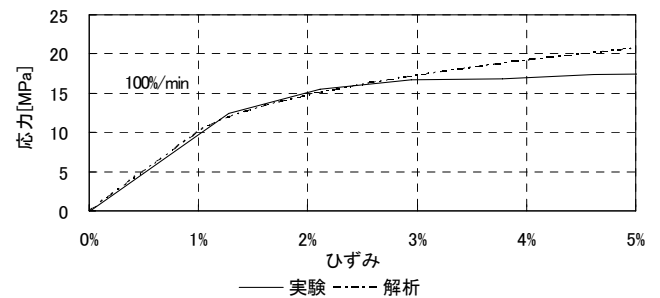


図 25 ひずみ速度 100%/min (23°C)

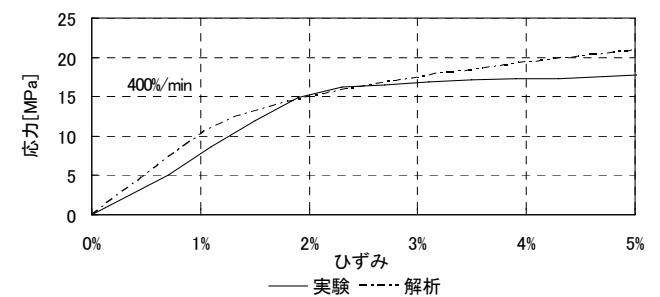


図 26 ひずみ速度 400%/min (23°C)

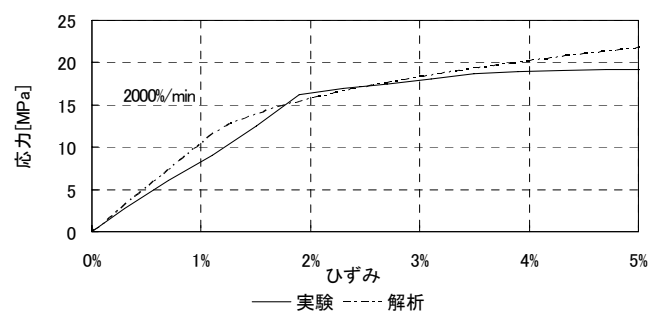


図 27 ひずみ速度 2000%/min (23°C)

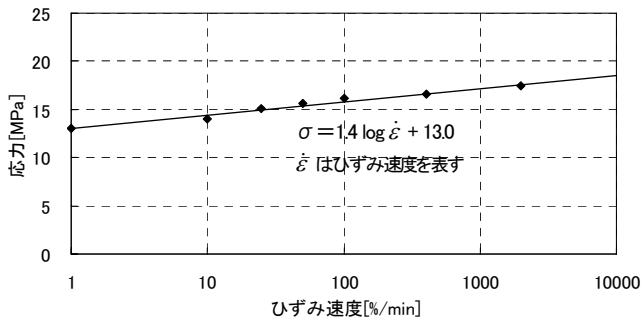


図 28 実験値と解析値の分岐応力(23°C)

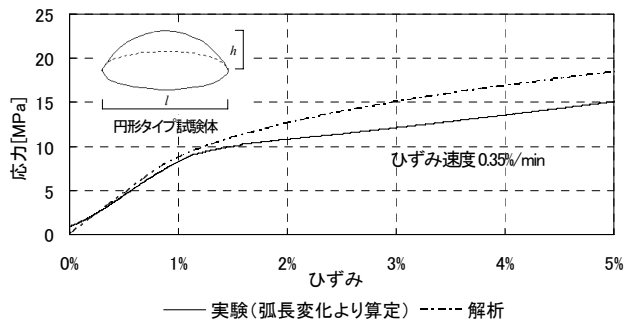


図 29 インフレーション時の挙動(23°C)

## 6. まとめ

本論文は、降伏応力<sup>[5]</sup>を超える領域までの常温時における応力-ひずみ関係を、一つの粘弾性挙動として連続的に評価できる解析手法を確立した。

本論文では、まず動的粘弾性実験を通して ETFE フィルムの活性化エネルギー  $\Delta H$ 、シフトファクター  $a_{T0}(T)$  を求め、温度変化にも対応できる非常に長い時間領域を持つ合成曲線を作成した。このとき  $\Delta H$  は、40°C を境に大きく異なることが確認された。次にプロローグ級数を用いた数式近似を行い、多要素モデルの粘弾性定数を決定した。ここで合成曲線および粘弾性定数を得たことによって、ETFE フィルムの緩和弾性率  $E_r(t)$  とクリープコンプライアンス  $J(t)$  はほぼ逆数関係が成り立つこと

がわかった。また、 $E_r(t)$  および  $J(t)$  は重畳原理に適用することでクリープ実験、応力緩和実験、引張試験、インフレーション実験などの解析が行なえることを確認できた。しかし、 $J/J_0$  が 1 を超える応力レベルの解析を実施する場合は、 $E_r(t)$  および  $J(t)$  に粘弾性の非線形性を考慮した補正を施さなければ、実挙動に対応した予測を行なえないことが明らかになった。

常温時において降伏応力以降の挙動予測も行なえる解析手法を検討していく場合は、15MPa 超の応力レベルでのクリープ実験から得られる  $J/J_0$  を用いることで解析が可能になると思われる。また、本手法は、単調増加加力時の挙動を表現することが確認されたため、今後は除荷および繰返し加力時の挙動に対する検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] 森山史朗、河端昌也: ETFE フィルムのクリープ特性-遅延時間の分布関数による考察-、膜構造研究論文集 2004, pp47-51, 2005
- [2] 岡小天: レオロジー入門、株式会社工業調査会、1970
- [3] Craig Schwitter: The Use of ETFE Foils in Lightweight Roof Constructions, Proc. of the IASS-ASCE International Symposium '94, Atlanta, pp622-631, 1994
- [4] 森山史朗、河端昌也、正木佳代子: ETFE フィルムの弾塑性挙動について、膜構造研究論文集 2003, pp21-26, 2004
- [5] 河端昌也、森山史朗: 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, pp41-46, 2005
- [6] 森山史朗、河端昌也、西川薫、小竹達也、山内優、薛学禎: ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究(その 1)(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp929-932, 2005
- [7] JIS K 7198 プラスチックの非共振強制振動法による動的粘弾性の温度依存性に関する試験方法、1991
- [8] 高分子学会編: 高分子科学の基礎 第 2 版、株式会社東京化学同人、1994
- [9] 隆雅久: 固体高分子材料の力学的挙動、株式会社メカニカルデザイン 2004
- [10] L・E・NIELSEN: 高分子と複合材料の力学的性質、株式会社化学同人、1976
- [11] John・D・Ferry: 高分子の粘弾性、株式会社東京化学同人、1964
- [12] 藤川正毅、隆雅久: Collocation 法を基にした線形粘弾性マクスウェルモデルの Prony 級数近似法、実験力学第三巻第四号 2003, pp.60-66, 2003
- [13] メカニカルデザイン: 粘弾性材料カーブフィットプログラム、株式会社メカニカルデザイン、2005

## 謝辞

動的粘弾性実験を実施するにあたり、旭硝子株式会社 小田康一 様のご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

# Viscoelastic characteristic of ETFE film

Masaya Kawabata <sup>\*)</sup>  
 Fumio Moriyama <sup>\*\*)</sup>  
 Hiromasa Aida <sup>\*\*)</sup>

## SYNOPSIS

In the reported creep experiment, it was confirmed that mechanical property of ETFE film has stress dependency besides temperature and time dependency. The yield stress and Young's modulus on this kind of material vary depending on the load condition. Therefore, the material constant has to be adjusted according to temperature and strain rate in the analysis evaluated by Elasto-plasticity.

This research clarifies the viscoelastic characteristic of ETFE film through dynamic viscoelastic test, and proposes an analytical method by which stress-strain properties can be continuously captured as one viscoelastic behavior.

<sup>\*)</sup> Dr.-Eng. Associate Prof., Department of Architecture and Building Science, Faculty of Engineering, Yokohama National University

<sup>\*\*)</sup> Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Yokohama National University