粘性特性を考慮した織構造格子モデルによる構成方程式

－クリープ及び応力緩和試験の数値シミュレーション－

加藤　史郎[*1]
南　　宏和[*2]
吉野　達矢[*3]
並田　忠政[*4]

梗　　　概

粘性特性を考慮した織構造格子モデルにより，粘弾塑性増分型構成方程式を定式化する。定式化にあたり，織構造格子モデルを構成する直線部材に4要素Voigtモデルが導入されるが，各部材の粘性特性をクリープ及び応力緩和試験より推定する。この推定された粘性に関する材料定数を用いて，クリープ及び応力緩和解析を行い，実験値と解析値とを比較することにより本手法の妥当性と応用性を検討する。また，膜構造物への初期張力の導入を想定した繰り返し載荷による応力緩和試験のシミュレーションも行う。

1．序

膜構造物に用いられる膜材料は，ガラス繊維平織物とコーティング材による複合材料であり，織布をコーティング材に浸す過程において膜材は常に縦糸方向に引張られる状態にあることから，応力・ひずみ関係は異方性を示すとともに強い非線形性を示す。その要因として(1)クリンプ交換などによる幾何学的非線形性，(2)構成材料の材料非線形性，(3)クリープ・応力緩和による時間依存性である粘性などが考えられる。

膜材料の1軸及び2軸応力状態にある非線形的な伸張特性に関する研究はこれまで数多く報告されている。著者らは，既報[1~5]において膜材を構成する織布の幾何形状とそれを覆うコーティング材を三次元トラスに置換し，糸材及びコーティング材の材料定数を1軸・2軸引張試験ならびにせん断試験より推定し，膜材の挙動を表現する手法を提案している。この構成則を用いれば，1軸・2軸引張試験ならびにせん断試験を定性的かつ定量的に表現できることを確認した。一方，粘性特性に関する研究としては，次のものが挙げられる。Itoh,Tanakaら[7~9]は，風・雪荷重を模擬した2軸応力緩和試験等を行い，張力膜構造における初期張力導入法について述べている。西川ら[10]は，膜パネルの縮小率の設定方法を提案し，実構造物におけるリラクゼーションの予測を行っている。また，南ら[6]は膜材A種及びC種における粘性特性を把握するためにクリープ及び応力緩和試験を行い，粘性特性がどのような要因に依存するか分析している。

張力膜構造物では，応力緩和により初期張力が減少し，空気膜構造物では，常時膜応力によりクリープ歪みが発生する。これが原因で設計曲面形状の変化，しわなどの問題が発生するが，そのメカニズムの定量的な解明は，設計・施工における重要な課題のひとつである。

本研究では，著者らが提案した織構造格子モデルに4要素Voigtモデルを援用し，A種の膜材を対象として，粘性を考慮した弾塑性構成方程式の定式化を行う。さらに，南ら[6]によって行なわれたクリープ及び応力緩和試験を引用し，材料定数の推定を行うととも

*1　豊橋技術科学大学建設工学系　教授　工博
*2　太陽工業（株）空間技術研究所　副所長　工博
*3　豊橋技術科学大学　機械·構造システム工学専攻　大学院生　工修
*4　豊橋技術科学大学　建設工学専攻　大学院生

に，実験結果と解析結果を比較することにより本手法の妥当性と応用性を検討する。また，引張速度をパラメータとした2軸引張試験を行い，粘性実験における初期状態設定方法を考察する。本研究から得られる構成方程式を有限要素法に適用すれば，膜材料の非線形性・粘性を考慮した膜構造物の解析が可能となり，長期的なクリープ変形や応力緩和に対する対応の一助となろう。

2．粘性を考慮した増分型構成方程式の定式化

2-1．織構造格子モデルの概略[5)]

図1に台形の織構造格子モデルを示す。縦糸方向を ξ，横糸方向を η とする $\xi-\eta$ 系を用い，単位要素の辺長を a_0, b_0 とする。この単位要素は，糸材・束材及びコーティング材に大別できる。

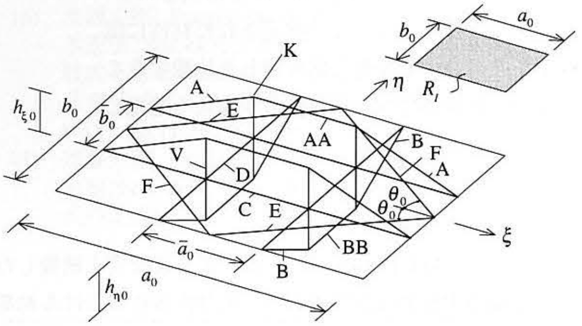


図1. 織構造格子モデル

(a)糸材（A,AA,B,BB）及び束材（V）

糸材は，できるだけ糸の形状を表現するためにモデル内に ξ と η 方向のそれぞれに2本のトラス材で置換する。縦糸はA部材，AA部材で，横糸はB部材，BB部材で表す。糸の波の形状を表すクリンプ高さを $h_{\xi 0}$ と $h_{\eta 0}$ で表し，縦糸と横糸は束材Vで結合されているものとする。この糸材は，主に高い荷重域で応力を負担すると考えられる部材である。また，縦糸と横糸を結合するV材は，クリンプ交換によって引き起こされる幾何学的非線形性を表現する重要な要素である。

(b)コーティング材（C,D,E,F, R_l）

織布の表面に塗布されるコーティング材を表す部材として，縦糸方向にC部材，横糸方向にD部材，ならびに斜め材EとFを用いる。これらは，主に膜材の低い荷重域で応力を負担し，CとD材は伸び作用に，EとF材はせん断ならびに伸び作用に関係する。また，糸材に浸潤し，コーティング材のせん断作用を表す部材としてせん断抵抗面要素 R_l を仮定する。

2-2．織構造格子モデルを構成する部材の材料特性

織構造格子モデルを構成する直線部材の力学的特性を表現するために単純Maxwell(g)要素と単純Voigt(i)要素の直列結合を用いる。これを図2示す。これは4要素Voigtモデルと呼ばれるものである。

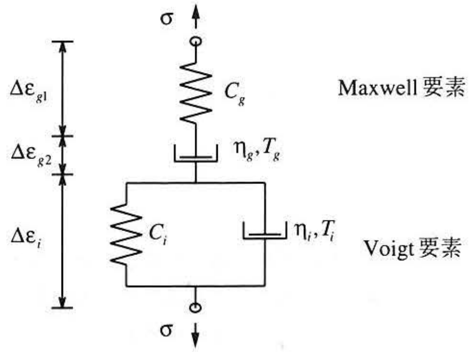


図2. 4要素Voigtモデル

ここで，C_g は各部材の区分的弾性定数 E_g の逆数，すなわち $C_g = 1/E_g$ であり，弾塑性特性を支配する定数である。一方，C_i はコンプライアンス $(=1/E_i)$，η_g および η_i は粘性係数であり，粘弾性特性を支配する定数である。また，T_g はMaxwell要素の緩和時間 $(=C_g\eta_g)$，T_i はVoigt要素の遅延時間 $(=C_i\eta_i)$ である。

本研究では，膜材の弾塑性成分と粘性成分が互いに独立していると考え，Maxwell要素のばねで部材の弾塑性特性を表す。したがって，増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ は式(1)のように3つの成分の和として表わされる。

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{g1} + \Delta\varepsilon_{g2} + \Delta\varepsilon_i \tag{1}$$

ただし，

$\Delta\varepsilon_{g1}$ ：Maxwell要素の弾塑性増分ひずみ成分
$\Delta\varepsilon_{g2}$ ：Maxwell要素の粘性増分ひずみ成分
$\Delta\varepsilon_i$ ：Voigt要素の粘弾性増分ひずみ成分

なお，直線部材の弾塑性履歴特性については，既報[5)]にその詳細が示されているのでここでは省略する。

また，ここでは任意時刻 t から $t+\Delta t$ への応力が線形的に変化すると仮定し(図3)，各増分ひずみ成分を導いていく。

$$\sigma(t) = \sigma(t_j) + \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}(t - t_j) \tag{2}$$

ただし，

$$\Delta\sigma = \sigma(t_{j+1}) - \sigma(t_j) \quad , \quad \Delta t = t_{j+1} - t_j$$

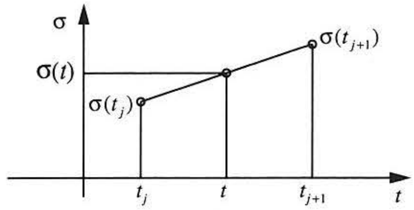


図3.　応力の線形性の仮定

(a) $\Delta\varepsilon_{g1}$：弾塑性増分ひずみ成分

単純Maxwell要素のばね要素の支配方程式より，

$$\Delta\varepsilon_{g1} = C_g \Delta\sigma \tag{3}$$

となる。この成分は，時間に依存しないので粘性を考慮しない場合の増分ひずみに相当する。

(b) $\Delta\varepsilon_{g2}$：粘性増分ひずみ成分

単純Maxwell要素のダッシュポット要素の支配方程式は，次式で与えられる。

$$\frac{d\varepsilon_{g2}}{dt} = \frac{C_g}{T_g}\sigma(t) \tag{4}$$

したがって時間変化Δtに対して，

$$\Delta\varepsilon_{g2} = \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{d\varepsilon_{g2}}{dt} dt = \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{C_g}{T_g}\sigma(t) dt$$

であり，式(2)を代入し積分を行うと，

$$\Delta\varepsilon_{g2} = \frac{C_g}{T_g}\sigma(t_j)\Delta t + \frac{\Delta t}{2T_g} C_g \Delta\sigma \tag{5}$$

を得る。

(c) $\Delta\varepsilon_i$：粘弾性増分ひずみ成分

単純Voigt要素の支配方程式は，次式で与えられる。

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} + \frac{\varepsilon_i}{T_i} = \frac{C_i}{T_i}\sigma(t) \tag{6}$$

ここで，式(2)を代入し，微分方程式を解くことによって次式を得る。

$$\Delta\varepsilon_i = (1 - \frac{T_i}{\Delta t} + \frac{T_i}{\Delta t} e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}) C_i \Delta\sigma + (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}) C_i \{\sigma(t_j) - \frac{\varepsilon_i(t_j)}{C_i}\} \tag{7}$$

(d) 4要素Voigtモデルの増分型構成方程式

求められた各増分ひずみ成分を，式(1)に代入することによって，織構造格子モデルの各部材に対する増分型構成方程式として，

$$\Delta\sigma = E_T \Delta\varepsilon + f \tag{8-1}$$

が得られる。ただし，

$$E_T = \left[C_g + \frac{C_g}{2T_g}\Delta t + (1 - \frac{T_i}{\Delta t} + \frac{T_i}{\Delta t} e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}) C_i \right]^{-1} \tag{8-2}$$

$$f = -E_T \left[\frac{\Delta t}{T_g} C_g \sigma(t_j) + (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}) C_i \{\sigma(t_j) - \frac{\varepsilon_i(t_j)}{C_i}\} \right]$$

である。ここで，$\Delta t \rightarrow 0$とすることにより，式(8)は式(3)となり，粘性を考慮しない場合の構成則として用いることができることは容易にわかる。

2-3．構成方程式の誘導

ここでは，織構造格子モデルを形成する単位要素に仮想仕事の原理を適用して，有限要素法への適用を目的とした増分型の構成方程式を誘導する。定式の詳細は，既報[2]に示されているので，ここではその概要を示すこととする。

織構造格子モデルを構成する部材Kの無ひずみ状態における長さがl_{0K}であり，増分前のひずみ状態での長さがl_K，増分後の長さが$\bar{l}_K$で表されるとき，増分ひずみを次のように定義する。

$$\Delta\varepsilon_K = \frac{(\bar{l}_K - l_K)}{l_{0K}} \tag{9}$$

また，式(8)を用いることにより，粘性を考慮した場合の織構造格子モデルを構成する各部材の増分後の軸力は，

$$N_K = E_{TK} A_{0K} \Delta\varepsilon_K + (\sigma_{0K} + f_K) A_{0K} \tag{10}$$

のように得られる。ここで，f_Kは粘性を考慮したときの見かけの応力である。同様に，粘弾塑性特性を考慮

した場合のせん断抵抗面要素の増分後のせん断力は，

$$S = K_T \Delta\gamma + (S_0 + f_S) \tag{11}$$

となる。したがって，単位要素を構成する各部材の仮想増分ひずみエネルギーの総和は，式(12)のようになる。

$$\begin{aligned}\delta U = & 4\delta(\Delta\varepsilon_A{}^L) l_{0A} N_A + 4\delta(\Delta\varepsilon_A{}^N) l_{0A}\sigma_{0A}A_{0A} \\ & +4\delta(\Delta\varepsilon_B{}^L) l_{0B} N_B + 4\delta(\Delta\varepsilon_B{}^N) l_{0B}\sigma_{0B}A_{0B} \\ & +2\delta(\Delta\varepsilon_{AA}) l_{0AA} N_{AA} + 2\delta(\Delta\varepsilon_{BB}) l_{0BB} N_{BB} \\ & +2\delta(\Delta\varepsilon_C) l_{0C} N_C + 2\delta(\Delta\varepsilon_D) l_{0D} N_D \\ & +2\delta(\Delta\varepsilon_E) l_{0E} N_E + 2\delta(\Delta\varepsilon_F) l_{0F} N_F \\ & +4\delta(\Delta\varepsilon_V) l_{0V} N_V + a\, b\, (\Delta\gamma) S\end{aligned} \tag{12}$$

また，仮想増分ひずみ$\delta(\Delta\varepsilon_\xi), \delta(\Delta\varepsilon_\eta), \delta(\Delta\gamma)$が与えられたとき，それに対応する膜材に作用する単位長さ当たりの断面力を$N_\xi, N_\eta, N_{\xi\eta}$とすると，膜材の仮想増分ひずみエネルギーは，式(13)のように表される。

$$\delta U = a\, b\, [N_\xi \delta(\Delta\varepsilon_\xi) + N_\eta \delta(\Delta\varepsilon_\eta) + N_{\xi\eta}\delta(\Delta\gamma)] \tag{13}$$

いま，式(12)と式(13)が等しく，仮想ひずみが任意であること，$\Delta\varepsilon_\xi$等の２次の項が微小であることを考え展開していくと，式(14)のような$\Delta\varepsilon_\xi, \Delta\varepsilon_\eta$および$\Delta\gamma$のみで表される求めるべき増分型構成方程式を得る。

$$\begin{Bmatrix} N_\xi \\ N_\eta \\ N_{\xi\eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_\xi \\ \Delta\varepsilon_\eta \\ \Delta\gamma \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N_{\xi 0} \\ N_{\eta 0} \\ N_{\xi\eta 0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \overline{N}_{\xi 0} \\ \overline{N}_{\eta 0} \\ \overline{N}_{\xi\eta 0} \end{Bmatrix} \tag{14}$$

３．引張速度をパラメータとする２軸引張試験

膜材料の粘性について考える際には，その初期状態である設定初期張力導入までの時間依存性が問題となる。

南ら[13] は，膜材の引張試験の載荷速度を*4mm/min*,*160mm/min*と変化させ，繰り返し載荷実験を行っている。その結果に基づき，応力・ひずみ曲線の非線形性，収れんまでの繰り返し数，残留ひずみを分析し，応力・ひずみ曲線の引張速度依存性について考察している。また，瀬川ら[14] は，載荷速度が遅い場合には膜材にはクリープひずみが大きく発生すると考えて，クリープの影響が無視できるような短い時間で載荷実験を進め，２軸引張試験より得られる応力・ひずみ曲線からクリープひずみを分離して膜材本来の剛性を得ようとする試験を行っている。上述の研究により，２軸引張試験の応力・ひずみ曲線が，載荷速度に依存することが明らかとなっている。よって，(1)２軸引張試験における応力・ひずみ曲線から完全にクリープひずみを除去しうる実験方法あるいは分析的に分離しうる方法が可能か，(2)設計解析用の膜材の応力・ひずみ関係に時間的な要素を付加すべきなのか，また(3)従来から行われている２軸引張試験における引張速度がどういう意味を持つのか，といった問題を再検討する必要があると考えられる。

ここでは，応力・ひずみ関係の引張速度依存性の確認のため，また，粘性実験における初期状態を設定するために，引張速度をパラメータとして１軸及び２軸引張試験を改めて行ったので，その結果を示す。

３－１．実験方法

縦糸及び横糸方向の応力比が(N_ξ, N_η)=(1:1),(1:0),(0:1)の３種類に対して，最大応力を*25kgf/cm*とした１軸及び２軸引張試験を実施した。引張速度は，0.4,4,40,160*mm/min*について行った。応力値をゼロから最大応力まで載荷し，その後ゼロまで除荷する工程を１サイクルとして，連続して計３サイクル行った。試験体の形状は，文献5）と同様なものを用いたのでここでは省略する。荷重は試験機に設置されているロードセルによって計測し，基準となる方向の応力値に対して他方の応力値を設定した応力比に保つようにした荷重制御としている。また引張速度は基準となる方向の治具の両端の移動量の合計として表している。

３－２．実験結果

図４に実験結果を示す。ここでは，実際の構造物に導入される初期張力を想定して，１回目載荷の*10kgf/cm*までの応力・ひずみ曲線のみを示した。但し，応力比1:1の引張速度40,160*mm/min*においては，試験機の性能上，その応力比を保つことができなかったので図から除いている。

実験結果より，どの応力比においても応力・ひずみ関係に非線形性現れているが，縦糸では引張速度に対する依存度がそれほど見られず，横糸では引張速度が速いほど初期剛性が高くなっており明らかに速度依存性が確認できる。

ここで，時間依存性が顕著に表れている応力比0:1に注目し，その10*kgf/cm*までの載荷に要した時間を表1に示す。4*mm/min*と160*mm/min*との載荷時間の差は，約10分である。すなわち，わずか数分間でこれだけのひずみの差が生じるということは，極めて短時間に生ずる荷重やひずみに対しては，低ひずみ・低応力状態ではそれなりに粘性の影響が現れることを示している。一方，載荷に要する時間が約10倍も異なる引張速度0.4*mm/min*と4*mm/min*でその応力・ひずみ曲線にそれほど差がない。雪荷重のように時間を単位とするような載荷状況を考えれば，膜材の挙動分析では，ある程度のゆっくりした載荷試験結果を用いることが便利であろう。したがって，160*mm/min*や40*mm/min*のように速度依存性の高い載荷よりも，速度依存性のより小さい4*mm/min*,0.4*mm/min*による実験から静的な特性を推定するのが望ましいと考えられる。また，実験の効率性から，0.4*mm/min*はあまりにも長時間を要するので，4*mm/min*が妥当な実験時間と想定する。

よって，本研究では4*mm/min*による2軸引張試験における応力・ひずみ関係を，時間に依存しない静的な挙動であると仮定する。したがって，粘性実験のシミュレーションに際して，設定初期張力までは従来の2軸引張試験による応力・ひずみ関係を用いて静的な弾塑性解析として取り扱い，その後クリープ・応力緩和解析を行うこととする。

表1.　載荷10*kgf/cm*までに要する時間(応力比0:1)

引張速度(*mm/min*)	0.4	4.0	40.0	160.0
時間(*min*)	97.5	10.5	1.1	0.3

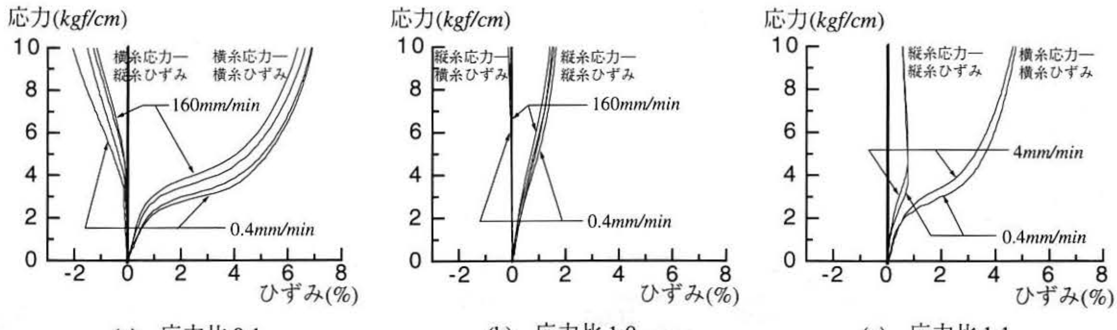
4．膜材料の粘性特性に関する実験

南ら[6)]は，膜材A種及びC種の粘弾性特性を把握するため，クリープ試験および応力緩和試験を行っている。膜構造物への初期張力導入に当っては，比較的低い張力で繰り返し載荷された後，初期張力が導入される。一般に，膜材の粘弾性挙動は張力作用の初期において顕著に現れる。南らは，その点に注目し初期張力導入後の最初の24時間の粘弾性特性を測定し考察している。本研究では，粘性を考慮した構成方程式の妥当性を検討するため，この文献6）の膜材A種に関する実験値を解析値との比較に用いる。なお，試験片の形状や載荷法などの実験に関する詳細は，文献6）によるものとする。

4－1．クリープ試験

応力比1:1で初期張力3.3,5.0,6.7*kgf/cm*まで載荷した2軸クリープ試験結果を図5に示す。この結果によれば，7*kgf/cm*以内であればクリープは縦糸方向ではどの応力でも起こらないが，横糸方向では一定応力が5*kgf/cm*を超えると起こるようになる。また，応力比依存性を考察するために応力比1:0,0:1の1軸応力状態におけるクリープ試験も行っている。その結果を図6に示す。1軸応力状態においては，3.3*kgf/cm*程度の応力に対しても縦糸方向，横糸方向ともにクリープ特性を示す。低い荷重域におけるこの試験は，クリンプ交換の影響をそれほど受けないので，糸材というよりはむしろコーティング材の粘性特性を示していると思われる。図5と図6の曲線は，観測値をプロットしたものに対して，式(15)に示すような関数で近似した実験式である。

$$N = a_1 \log_{10} t + b_1 \tag{15}$$



(a)　応力比0:1　　(b)　応力比1:0　　(c)　応力比1:1

図4.　引張速度を変化させることによる応力・ひずみ関係への影響

このクリープ試験の実験式(15)の各定数を表2に示す。ただし，これらの値は，文献6) から著者らが読み取った値である。

4－2． 応力緩和試験

応力比1:1で初期張力3.0,5.0,7.0*kgf/cm*まで載荷した2軸応力緩和試験結果を図7に示す。その結果，膜材A種においては，1～100分程度の間に応力緩和は顕著に現れることがわかる。クリープとは異なり，どの初期応力においても縦糸方向，横糸方向ともに応力緩和が起こり，初期張力が大きくなるにつれその特性は顕著になる。また，1軸応力緩和試験結果を図8に示す。図7と図8の応力緩和曲線には，緩和速度が不連続的に変化するような屈曲域が現れ，それ以後の応力緩和はかなり小さくなる傾向を示す。ここで，屈曲域を決

表2. クリープ試験の実験定数

	初期張力 (*kgf/cm*)	方向	a_1 ($1/\log_{10}(min)$)	b_1 (-)
1軸応力	3.3	ξ	0.0009	0.0072
		η	0.0029	0.0374
2軸応力	3.3	ξ	0.0000	0.0029
		η	0.0001	0.0218
	5.0	ξ	0.0000	0.0080
		η	0.0013	0.0365
	6.7	ξ	0.0000	0.0111
		η	0.0013	0.0434

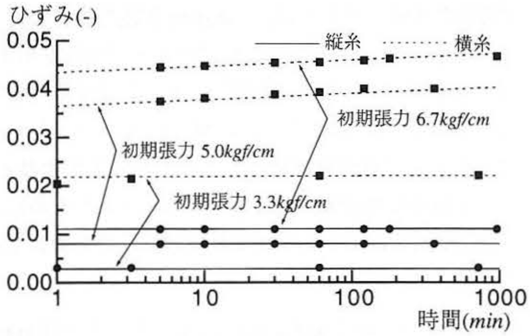


図5. 2軸クリープ試験の結果

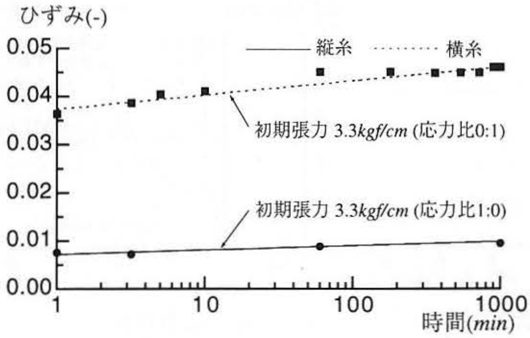


図6. 1軸クリープ試験の結果

表3. 応力緩和試験の実験定数

	初期張力 (*kgf/cm*)	方向	a_1,a_2 (*kgf/cm* $/\log_{10}(min)$)	b_1,b_2 (*kgf/cm*)	t_{in} (*min*)
1軸応力	3.0	ξ	0.2586 0.1768	2.5251 2.3720	75
		η	0.2903 0.1873	2.4512 2.2533	80
2軸応力	3.0	ξ	0.2443 0.0534	2.4962 2.0229	300
		η	0.2290 0.0611	2.2748 1.8168	530
	5.0	ξ	0.3664 0.1909	4.2214 3.8550	120
		η	0.4046 0.2062	3.9542 3.5573	100
	7.0	ξ	0.6260 0.3893	5.9695 5.7252	10
		η	0.6812 0.3587	5.5115 5.0534	25

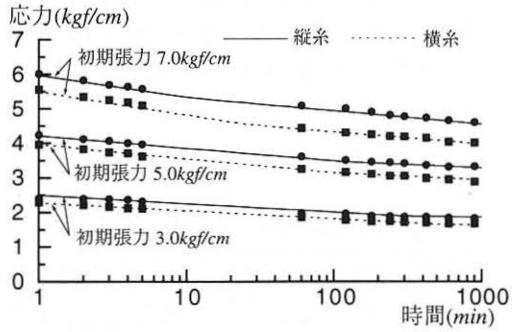


図7. 2軸応力緩和試験の結果

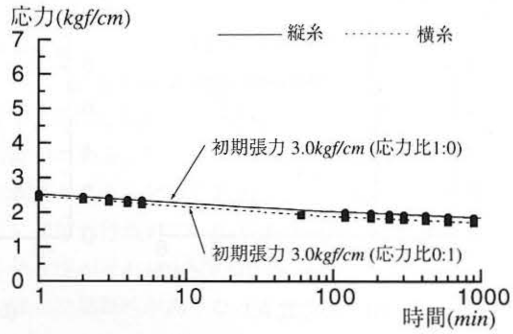


図8. 1軸応力緩和試験の結果

める観測時間をt_{in}として，実験曲線をt_{in}以前と以後にわけてそれぞれ式(16-1), (16-2)で表す。

$$N = -a_1 \log_{10} t + b_1 \text{ , } (0 < t < t_{in}) \qquad (16\text{-}1)$$

$$N = -a_2 \log_{10} t + b_2 \text{ , } (t_{in} < t) \qquad (16\text{-}2)$$

この応力緩和試験の実験式(16)の各定数を表3に示す。

5．織構造格子モデルによるクリープ及び応力緩和試験のシミュレーション

ここでは，先に示した粘性を考慮した構成方程式が，初期張力導入後の応力やひずみの時間依存性をどの程度表現できるかを検討する。

既報[5]において静的な挙動については，1軸及び2軸引張試験の静的な繰り返し載荷のシミュレーションを行った。その結果，織構造格子モデルを用いることにより，静的なその応力・ひずみ関係を十分な精度で表現できることを確認した。そこで本節では，設定張力までの静的な力学的挙動は表現できているものとして，その後のクリープ及び応力緩和リラクゼーションが織構造格子モデルによりシミュレーション可能かどうかを確かめることを目的とする。

5-1．4要素Voigtモデルのパラメータ推定

織構造格子モデルに直線部材を用いるが，これらの各部材に関して4要素Voigtモデルの粘性特性の表現に必要となるパラメータの第1近似値の推定法について述べる。なお，形状やMaxwell要素のばねに関する弾塑性特性の諸定数の推定法に関しては，文献5）によるものとする。その推定値を表4に示す。

5-1-1．粘性に関する力学的挙動のメカニズムの仮定

膜材を構成するガラス繊維でつくられる糸が粘性を強く持たないことから，粘性特性はコーティング材による力学的特性が主と考えられる。[6]

小松[11]は，膜材の応力緩和のメカニズムを次のように分析している。低張力状態においてコーティング材は，糸の三次元的変形をある時間拘束するだけの剛性を有しているが，クリンプ交換の過程で時間とともに強制的に変形させられ，その結果剛性が失われ糸の変形を拘束する効果が減少し，応力緩和が生ずると結論づけている。また，クリンプ交換などの糸による抵抗が現れないであろう張力3.0*kgf/cm*程度で粘性特性が顕著に現れることが実験的に確認できる事も勘案すると，この程度の応力ではコーティング材が膜材の粘性特性を支配すると考えられる。つまり膜材では，低ひずみ・低応力状態においては，主にコーティング材が抵抗することが知られている。従って，織構造格子モデルにおいては，低応力・低ひずみでは部材C,D,E,Fのモデル化が重要となる。しかし，部材E,Fの剛性が部材C,Dと比較してかなり低いことから[2]，伸び作用に対しては部材C,Dのみで抵抗すると仮定してもあまり影響はない[10]。よって，ここでは粘性特性を部材C,Dのみに導入することにする。また，膜材の実験ではクリープよりも応力緩和の方が時間領域で大きな変化が生ずるので，粘性特性を分析するには好都合である。そこで本報では，クリンプ交換の影響を含まないであろう1軸低応力状態にある応力緩和試験(初期張力

表4. 弾塑性特性に関する諸定数 (文献5)

$a_0 = 0.1375cm$，$b_0 = 0.1000cm$，$\overline{a}_0 = a_0/3$，$\overline{b}_0 = b_0/3$，$\theta_0 = 36.0°$，$h_{\xi 0} = 0.0102cm$，$h_{\eta 0} = 0.0162cm$

要素	A_0 (cm^2)	ℓ_0 (cm)	E_1, E_1' (kgf/cm)	E_2, E_2' (kgf/cm)	E_3, E_3' (kgf/cm)	$\varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y1}'$ (%)	$\varepsilon_{y2}, \varepsilon_{y2}'$ (%)	n	m_1	m_2
A	0.0016/2	0.0470	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
AA	0.0016/2	0.0458	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
B	0.0016/2	0.0371	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
BB	0.0016/2	0.0333	28550	28550	285500	0.00	0.30	-	-	-
C	0.0020/2	0.1375	34000, 34000	13500, 9000	6800, 2000	0.30, -0.06	1.20, -1.20	0.00	0.07	0.50
D	0.0020/2	0.1000	31500, 31500	12500, 12500	4000, 4000	0.30, -0.35	0.70, -0.70	0.00	0.08	0.50
E, F	0.0014	0.1700	5100, 5100	0, 0	0, 0	0.20, -0.20	1.00, -1.00	0.00	0.00	0.00
V	0.0025/4	0.0175	32	32000	-	-19.00	-	-	-	-

要素	a_0 (cm)	b_0 (cm)	k_1 (kgf/cm)	k_2 (kgf/cm)	k_3 (kgf/cm)	γ_{y1} (%)	γ_{y2} (%)	n	m_1	m_2
R_l	0.1375	0.1000	65.0	31.0	14.5	1.66	3.50	-0.40	0.25	0.45

3.0*kgf/cm*)を基に，材料定数の推定を行うこととする。

ここで，単材として縦糸あるいは横糸方向にそれぞれ独立な単位幅当たりの剛性を持つ１部材を考える。つまり，まず(1) 1軸応力緩和試験に対して膜材を縦糸あるいは横糸方向にそれぞれ単材を仮定して，特性の推定を行い，最終的に，(2) 5－1－5において織構造格子モデルに適用できる定数に変換することにする。先にも述べたが，伸び作用には部材C,Dのみによって抵抗すると仮定したので，ξ，η 方向の単材の剛性 E_ξ, E_η について次の関係が成立する。

織構造格子モデルでは，C材は間隔 b_0 に2本あり，その伸び剛性が $E_C \cdot 2A_{0C}$ であることから，

$$E_\xi = \frac{E_C \cdot 2A_{0C}}{b_0} \qquad (17\text{-}1)$$

また，同様にD材は間隔 a_0 に2本あり，その伸び剛性が $E_D \cdot 2A_{0D}$ であるので，

$$E_\eta = \frac{E_D \cdot 2A_{0D}}{a_0} \qquad (17\text{-}2)$$

となる。

5－1－2．モデルの等価性

4要素Voigtモデルと4要素Maxwellモデル（図9(b)）は，力学的に等価であることはよく知られており，同一な材料では次の関係が成立する。

$$E_e + E_i = \frac{1}{C_g} \qquad (18)$$

$$T_r T_{ri} = T_i T_g \qquad (19)$$

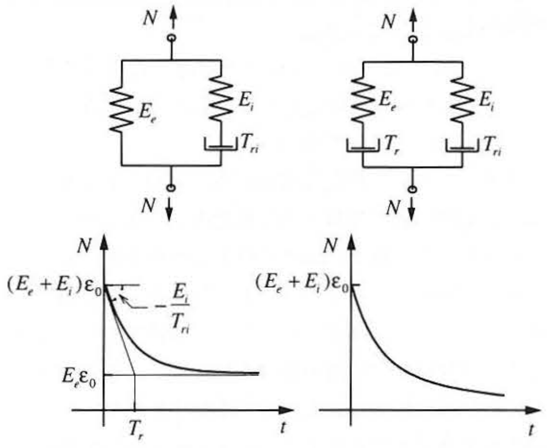
$$T_{ri} + T_r = T_i + (1 + \frac{C_i}{C_g}) T_g \qquad (20)$$

$$T_r E_e + T_{ri} E_i = \frac{T_g}{C_g} \qquad (21)$$

一般に，クリープ特性はVoigtモデル系列，応力緩和特性はMaxwellモデル系列がその力学的特性を表現するのに適していることが知られている。5－1－1で述べたようにここでは，1軸応力状態にある応力緩和試験を用いてパラメータ推定を行うので，まず4要素Maxwellモデルのパラメータを推定し，その推定値をモデルの等価性を利用することによって，4要素Voigtモデルのパラメータに置換するという，手順を踏むことにする。

5－1－3．Maxwellモデルの力学的特性

図9は，4要素及び3要素Maxwellモデルとそれぞれの応力緩和特性を示している。



(a) 3要素Maxwellモデル　(b) 4要素Maxwellモデル

図9. Maxwellモデルの力学的特性

ここで，4要素モデルの理論式を式(22)に示す。

$$N(t) = \varepsilon_0 \{E_e e^{-\frac{t}{T_r}} + E_i e^{-\frac{t}{T_{ri}}}\} \qquad (22)$$

また，3要素モデルの理論式はMaxwell要素の緩和時間 T_r を無限大にすることにより容易に得ることができる。

$$N(t) = \varepsilon_0 \{E_e + E_i e^{-\frac{t}{T_{ri}}}\} \qquad (23)$$

構成要素が偶数個であるモデルの力学的特性として，時間tの増加とともに応力がゼロに緩和することが挙げられる。これに対して，奇数個からなるモデルでは時間tが無限大の極限において，緩和応力が有限の値に漸近することが特徴である。ここで，膜材の実験による応力緩和曲線[6]を観察すると(図11)，ごく短い時間で張力は急激に減少し，その後は直線的にある傾きをもって徐々に減少する。また，その特性は観測時間1000分を越えてもなお応力緩和の傾向を示す。ここでは，この力学的特性の推定を簡便に行うために，まず，(1) 4要素Maxwellモデルの直線的に変化する定

常部分を推定し，次に，(2) 3 要素 Maxwell モデルの有限の値に漸近するという特性を利用して，各パラメータを推定する。

5-1-4．4要素Maxwellモデルのパラメータ推定

(a) $E_e\varepsilon_0$ の推定

1軸応力緩和試験の実験式は，式(16)で与えられている。この実験では，時間 t_{in} を境に実験式が異なる特性を持つ。4 要素Maxwellモデルの定常部分が，t_{in} 後にあるものとすると，ある時間 t' の傾きは次式で表される。

$$\dot{N}=\frac{dN}{dt}=-\frac{a_2}{t'}\log_{10}e \tag{24}$$

よって，t' 時の接線は

$$N=-a_2\log_{10}t'+b_2-(\frac{a_2}{t'}\log_{10}e)(t-t') \tag{25}$$

となる。ここで，t' をパラメータとして実験曲線に接線を引き，最も適当であると思われるものを選択する。その接線と $t=0$ との交点が $E_e\varepsilon_0$ であるので(図9,11)，t' 及び $t=0$ を式(25)に代入することにより，近似的に $E_e\varepsilon_0$ を求める。ここで，(1)本モデルでは弾塑性を考慮していること，(2)実験には応力緩和試験前のひずみ，すなわち $t=0$ におけるひずみが明記されていないことから，E_e と ε_0 の積が重要な意味を持つ。

まず，図10に示すように t' を 250,500,750,1000min と変化させて接線を引く。(ξ 方向のみ示す) その結果を参照して，$t'=750min$ を妥当と仮定する。これに基づき，式(25)より，

$$E_{e\xi}\varepsilon_{0\xi}=1.94kgf/cm,\ E_{e\eta}\varepsilon_{0\eta}=1.80kgf/cm$$

を推定する。

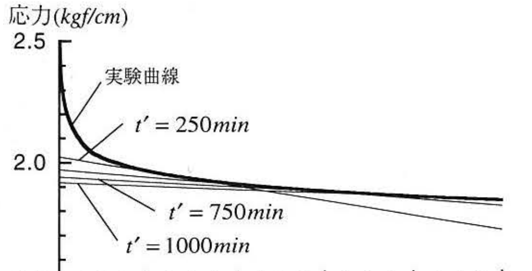


図10.　$E_e\varepsilon_0$ の推定（ξ 方向）

(b) T_r の推定

図11に，式(22),(23),(25)及び実験による応力緩和曲線を示す。ここで，t, T_r 及び T_{ri} の関係を調べる。T_{ri} は，実験においてごく短い時間で急激に減少することからその値は十分小さい。T_r は，実験において1000分を越えてもなお応力緩和の傾向を示すことから十分大きな値を持つ。よって，$T_{ri}\le t \ll T_r$ の状態を想定すると式(22)から，

$$N=\varepsilon_0E_e(1-\frac{t}{T_r}) \tag{26}$$

が得られる。

ここで，式(26)と式(25)の傾きが等しいとすると，縦糸(ξ)及び横糸(η)方向について次の関係が得られ，$T_{r\xi}, T_{r\eta}$ が推定できる。

$$T_{r\xi}=\frac{E_{e\xi}\varepsilon_{0\xi}}{\frac{a_{2\xi}}{t'}\log_{10}e}\ ,\quad T_{r\eta}=\frac{E_{e\eta}\varepsilon_{0\eta}}{\frac{a_{2\eta}}{t'}\log_{10}e} \tag{27}$$

よって，

$$T_{r\xi}=18950min,\ T_{r\eta}=16600min$$

を得る。

(c) $E_i\varepsilon_0$ の推定

設定初期張力を N_0 とすると，3 要素Maxwellモデルの特性を利用して，式(28)より $E_i\varepsilon_0$ を推定する。

$$E_i\varepsilon_0=N_0-E_e\varepsilon_0 \tag{28}$$

設定初期張力は，$N_{0\xi}=N_{0\eta}=3.0kgf/cm$ であるので，(a)で推定された $E_{e\xi}\varepsilon_{0\xi}, E_{e\eta}\varepsilon_{0\eta}$ より，

$$E_{i\xi}\varepsilon_{0\xi}=1.06kgf/cm,\ E_{i\eta}\varepsilon_{0\eta}=1.20kgf/cm$$

を得る。

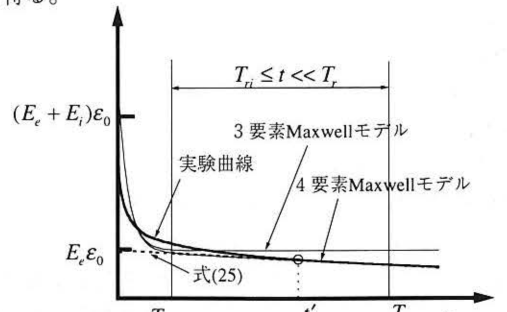


図11.　T_r の推定（ξ 方向）

(d) T_{ri}の推定

T_{ri}の推定には，式(16-1)の$t=0$時の接線の傾きを計算すべきであるが，解が得られないので，ここではT_{ri}をパラメータとしていくつかの曲線を描き，実験曲線を最も表現できているであろう値を用いることにする。

T_{ri}を10,20,30,40,50minと変化させたものを図12に示す。（ξ方向のみ示す）この結果より，100分以上の領域で比較的実験と合っていると考えられる，

$$T_{ri\xi}=30min,\ T_{ri\eta}=30min$$

を採用する。

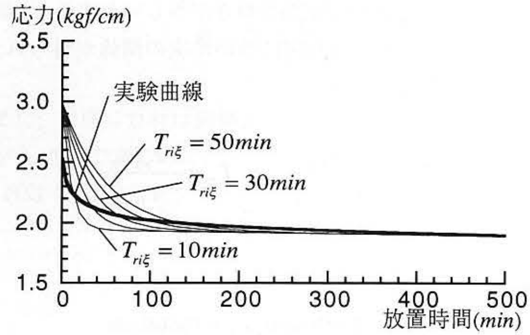


図12. T_{ri}の推定（ξ方向）

5-1-5．モデルの等価性を利用した4要素Voigtモデルへのパラメータの変換

ここでは，5-1-2で示したモデルの等価性を利用して4要素Maxwellモデルのパラメータを4要素Voigtモデルのパラメータへ変換する。ただし，C_gの値は2軸張力試験のシミュレーション[5)]の際に用いた値をそのまま用いることを前提としているので，逆にその値を用いてE_eとE_iの値を計算した後に，その他のパラメータの変換をする必要がある。さらにその場合，Maxwell要素のばねに弾塑性を適用しているため注意が必要である。

C_gの値は，式(18)のように剛性の逆数として定義されるが，剛性は部材の弾塑性を考慮する時，ひずみの進展にともない変化する。すなわち，式(18)よりE_e+E_iの値が変化する。今，応力緩和試験中のC_gがC'_gの状態である場合を想定する。C_gの状態が変化するとき，実験でこれを確かめたわけではないが，E_eとE_iを有する部材が同時に降伏すると仮定すると次の関係が得られる。

$$C'_g=\frac{1}{E'_e+E'_i} \tag{29}$$

ここで，どのC_gの状態においても，

$$\alpha=\frac{E'_i\varepsilon_0}{E'_e\varepsilon_0}=\frac{E'_i}{E'_e}=const. \tag{30}$$

であると仮定することにより，式(29)と式(30)より次式が得られ，E'_e, E'_iが計算できる。

$$E'_e=\frac{1}{(1+\alpha)C'_g}=\frac{E'_i}{\alpha} \tag{31}$$

織構造格子モデルにおいて部材C,Dの履歴特性は，多少の劣化を示すTri-linear最大点指向型と仮定している[5)]。応力緩和解析中において，部材C,Dの剛性は除荷勾配状態にある。したがって，表4の値を仮採用し，

$$E_{gC}=34000kgf/cm^2,\ E_{gD}=31500kgf/cm^2$$

であると推定しておく。よって，式(17)の関係を用い，その逆数をとることにより，

$$C'_{g\xi}=0.00147cm/kgf,\ C'_{g\eta}=0.00287cm/kgf$$

を得る。式(31)をξ，η方向に適用すると，

$$E'_{e\xi}=\frac{1}{(1+\alpha_\xi)C'_{g\xi}}=\frac{E'_{i\xi}}{\alpha_\xi},\ E'_{e\eta}=\frac{1}{(1+\alpha_\eta)C'_{g\eta}}=\frac{E'_{i\eta}}{\alpha_\eta} \tag{32}$$

となり，式(30)に5-1-4の(a),(c)で推定した

$$E'_{e\xi}\varepsilon_{0\xi},\ E'_{e\eta}\varepsilon_{0\eta},\ E'_{i\xi}\varepsilon_{0\xi},\ E'_{i\eta}\varepsilon_{0\eta}$$

を代入すると，

$$\alpha_\xi=E'_{i\xi}/E'_{e\xi}=0.55,\ \alpha_\eta=E'_{i\eta}/E'_{e\eta}=0.67$$

であることから，上記の$C'_{g\xi}, C'_{g\eta}$を併せ持ちいると式(32)より，

$$E'_{e\xi}=438.9kgf/cm,\ E'_{i\xi}=241.4kgf/cm$$

$$E'_{e\eta}=274.7kgf/cm,\ E'_{i\eta}=184.0kgf/cm$$

を得る。

また，C'_gの状態にあるその他の定数は$E'_{e\xi}, E'_{e\eta}, E'_{i\xi}, E'_{i\eta}$が求まったので，式(19)～(20)を用いることにより，

$$T'_{g\xi}=12240min,\ T'_{g\eta}=9950min,$$

$$T'_{i\xi}=50min,\ T'_{i\eta}=50min,$$

$$C'_{i\xi}=0.00080cm/kgf,\ C'_{i\eta}=0.00145cm/kgf$$

を得る。

5-1-6. 各パラメータの台形格子モデルへの適用

これまでに推定された4要素Voigtモデルの各パラメータを織構造格子モデルへ適用できる定数に置き直す。ここで変換の必要な定数は，C_gはすでに決められている値であり，T_g, T_iは時間の次元であることから，C_iのみとなる。

式(17)から，部材C,DにおけるVoigt要素のばねのコンプライアンスは，$C_{iC}=1/E_{iC}, C_{iD}=1/E_{iD}$より，

$$C_{iC}=\frac{2A_{0C}C_{i\xi}}{b_0} \quad , \quad C_{iD}=\frac{2A_{0D}C_{i\eta}}{a_0} \qquad (33)$$

で与えられる。よって，部材C,Dの断面積及び単位要素の辺長が，

$$A_{0C}=0.001cm^2,\ A_{0D}=0.001cm^2,$$
$$a_0=0.1375cm,\ b_0=0.1000cm$$

であるので式(33)より，C_{iC}, C_{iD}を得る。

$$C_{iC}=0.000016cm^2/kgf,\ C_{iD}=0.000021cm^2/kgf$$

5-1-7. 繰り返し試行によるパラメータの改善

これまでに推定された第1近似値を表5に示す。表5の値を用いて初期張力3.0*kgf/cm*の1軸応力緩和曲線をシミュレートしたところ，実験値に対して若干ずれが認められた。この第1近似値には，実験データの読み取り誤差等が含まれている。そこで，実験値とのずれを解消するために，繰り返し試行による定数の改善を行った。これにより得られた各定数を表6に示す。

5-1-8. クリンプ交換時の束材の効果

表6の値を用いて，2軸応力緩和曲線をシミュレートしたところ，図13に示すように，初期張力3.0*kgf/cm*に対しては，よい一致が見られたものの，5.0,7.0*kgf/cm*に対しては（図では5.0*kgf/cm*は省略する），十分な応力緩和が行なわれず大きなずれが認められた。そのため応力値に対して，C_iの値の変更を試みたが，実験曲線を追従するに至らなかった。これは，張力が大きくなることにより，クリンプ交換が生じ，糸材が応力に抵抗し始め，コーティング材の膜材としての応力に対する負担が減少したことが考えられる。この考察の結果，部材C,Dのみに粘性特性を考慮しただけでは，任意の応力状態に対する実験曲線を表現できないことが確かめられた。クリンプ交換を引き起こす部材である束材は，他の部材に比べ高剛性・高強度を有すると仮定した[2]が，糸の間に入り込んでいるコーティング材の作用も含まれると想定できる。そこで，2軸応力状態のクリンプ交換を含む応力緩和曲線を表現するために，束材(部材V)に粘性特性の導入を試みる。束材の粘性特性のパラメータの推定法に関しては，現在のところ持ち合わせていないので，部材C,Dを参照して第1近似値を定め，初期張力5.0*kgf/cm*の2軸応力緩和曲線に合うよう，繰り返し試行錯誤によって決定する。なお，部材C,Dの各パラメータに対しては，5-1-7で決定された値(表6)を固定して推定を行う。推定された部材Vも含め，粘性等の特性を表7に示す。表7の値を用いて実験をシミュレートしたところ，束材を考慮することにより，束材の粘性を無視したことが原因と考えられる不具合が解消され，応力比・導入張力に関係なく実験曲線が表現できることを確認した。その結果を，次節で示す。

表5. 部材C,Dの4要素Voigtモデルの第1近似値

要素	T_g (*min*)	C_i (cm^2/kgf)	T_i (*min*)
C	12240	0.000016	50
D	9950	0.000021	50

表6. 部材C,Dの4要素Voigtモデルの修正値

要素	T_g (*min*)	C_i (cm^2/kgf)	T_i (*min*)
C	7000	0.000017	25
D	6000	0.000021	25

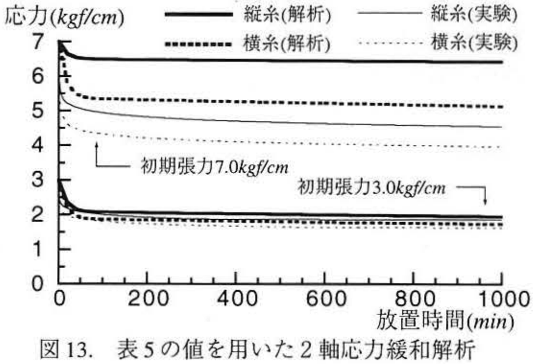


図13. 表5の値を用いた2軸応力緩和解析

表7. 部材C,D,Vの諸定数

要素	T_g (*min*)	C_i (cm^2/kgf)	T_i (*min*)
C	7000	0.000017	25
D	6000	0.000021	25
V	20000	0.000120	50

5-2. 実験シミュレーション

ここでは，弾塑性に関しては文献5）で定められた定数(表4)，粘性に関しては5-1で推定された材料定数(表6)を用いて，4節で示したクリープ及び応力緩和試験をシミュレートし，実験値と解析値に比較を行うことによって，本手法の整合性の検討を行う。なお，解析手順は，(1)設定初期張力までは静的弾塑性解析を行い，その後，(2)時間を考慮して，クリープ及び応力緩和解析を行う。

5-2-1. 応力緩和解析

2軸応力状態において3.0,5.0,7.0*kgf/cm*，1軸応力状態において3.0*kgf/cm*の初期張力に対する放置時間1000分間の応力緩和試験のシミュレートを行う。その結果を，実験値とともに図14～17に示す。解析の結果，応力比1:1の初期張力7.0*kgf/cm*で若干ずれが見られるが，応力比，導入張力の大きさに関係なく実験による応力緩和曲線を表現できている。観測時間50分までは，実験曲線をうまく表現できていないが，3節でも述べたように短い時間における粘性特性は敏感であるという理由も含めて，長期的な予測をするという目的では問題がない。ここで，初期張力N_0と最終張力N_f（t=1000*min*時)を用いて，緩和応力の減少率λ_dを次のように定義する。

$$\lambda_d = \frac{N_0 - N_f}{N_0} \tag{34}$$

実験値と解析値の減少率を図18に示す。これから，全体的に実験値と解析値がよく一致しており，定量的にも応力緩和特性を表現できているといえる。

5-2-2. クリープ解析

2軸応力状態において3.3,5.0,6.7*kgf/cm*，1軸応力状態において3.3*kgf/cm*の初期張力に対する放置時間1000分間のクリープ試験のシミュレートを行う。その結果を，実験値とともに図19～22に示す。実験値と解析値を比較すると，初期ひずみに差異はあるものの，その後の傾向はほぼ表現できているといえる。特に，応力比1:1の初期張力5.0,6.7*kgf/cm*の解析においては，クリンプ交換の影響により，η方向は粘性特性を示すがξ方向は示さないという実験結果の様子がうまく表現されている。しかし，応力比1:1の初期張力3.3*kgf/cm*の解析においては，実験ではξ，η方向とも粘性特性を示さないにもかかわらず，解析ではその特性を示す結果となった。また，初期ひずみの差異は，(1)弾塑性に関する諸定数の推定に用いた2軸引張試験と文献6）の実験との試験片・載荷状態等の実験諸条件の違い，(2)弾塑性解析における初期張力までの応力・ひずみ曲線の不一致，(3)クリープ試験における初期状態の設定が原因だと考えられる。ここで，初期ひずみε_0と最終ひずみε_f（t=1000*min*時)を用いて，クリープひずみの増加率λ_iを次のように定義する。

$$\lambda_i = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \tag{35}$$

実験値と解析値の増加率を図23に示す。2軸応力状態において，大きく値の異なる結果となった。特に，初期張力3.3*kgf/cm*の場合には，1軸応力状態の場合と同じくらいの増加率となった。また，5.0,6.7*kgf/cm*の場合，η方向では一致しているが，ξ方向ではクリンプ交換の影響によりひずみが減少している。しかし，この現象は，約3～5分間という短い時間で起こっており，その後は実験で見られるような一定値をとっている。初期状態の設定方法が困難なクリープ試験においては，今後，さらに詳細な分析が必要となろう。

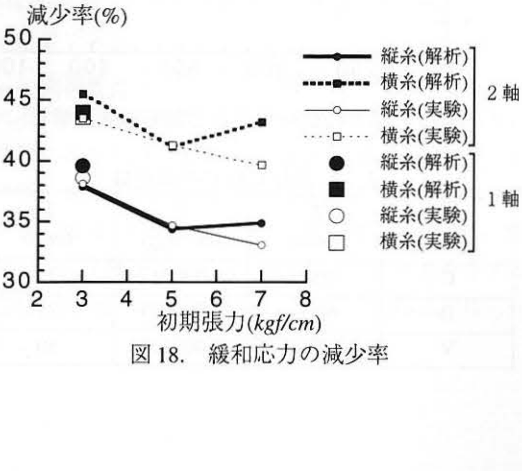


図18. 緩和応力の減少率

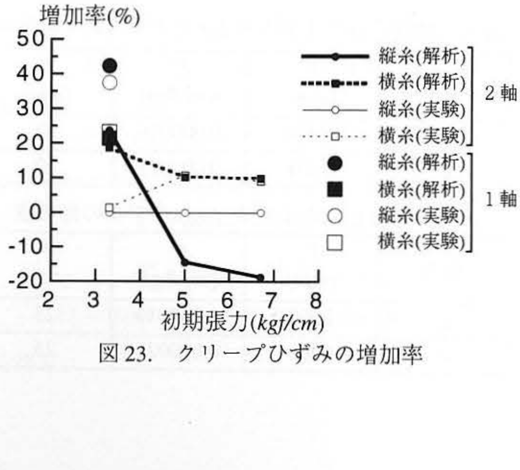


図23. クリープひずみの増加率

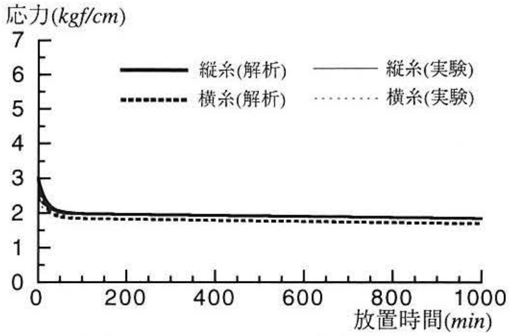


図 14. 初期張力 3.0*kgf/cm* の 1 軸応力緩和解析

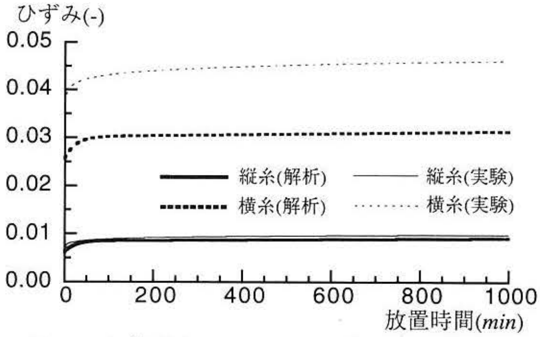


図 19. 初期張力 3.3*kgf/cm* の 1 軸クリープ解析

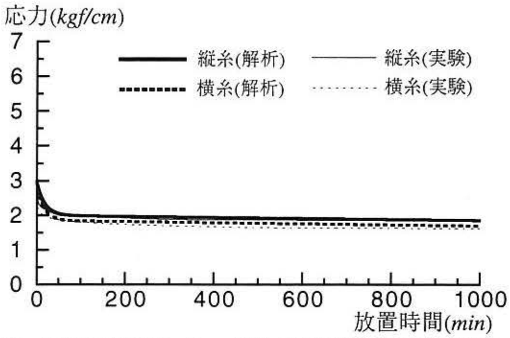


図 15. 初期張力 3.0*kgf/cm* の等 2 軸初期応力緩和解析

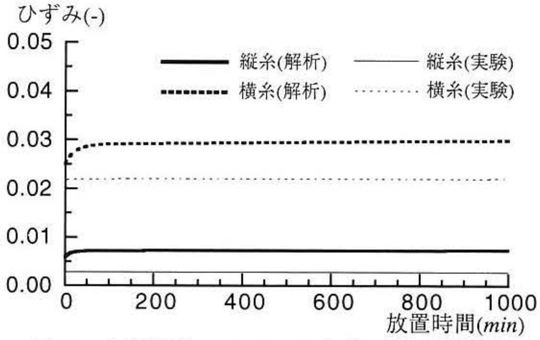


図 20. 初期張力 3.3*kgf/cm* の 2 軸クリープ解析

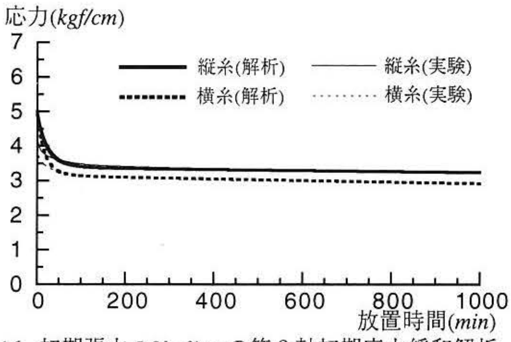


図 16. 初期張力 5.0*kgf/cm* の等 2 軸初期応力緩和解析

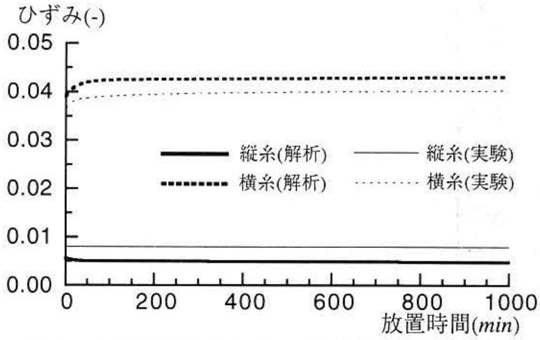


図 21. 初期張力 5.0*kgf/cm* の 2 軸クリープ解析

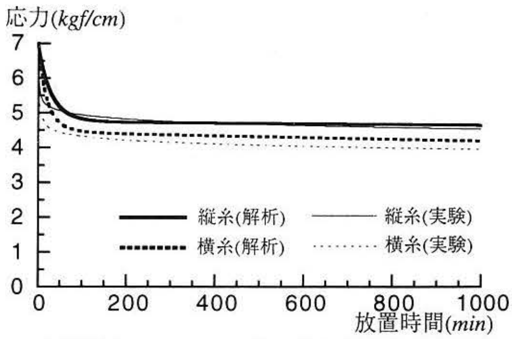


図 17. 初期張力 7.0*kgf/cm* の等 2 軸初期応力緩和解析

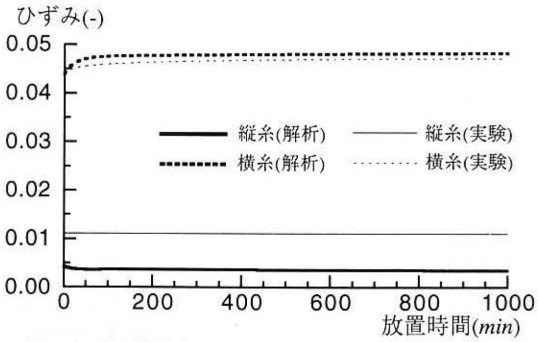


図 22. 初期張力 6.7*kgf/cm* の 2 軸クリープ解析

5-2-3. 繰り返し載荷を受ける応力緩和解析

南ら[6]は，膜構造物への初期張力の導入を想定した繰り返し載荷による応力緩和試験を行い，その収束性を観察することによって応力緩和特性の繰り返し回数依存性について考察している。ここでは，この実験で得られるような繰り返し回数依存性を本手法を用いることにより表現できるか確かめる。

応力比1:0と0:1の1軸あるいは応力比1:1の等2軸初期応力状態で，初期張力3.0*kgf/cm*まで静的弾塑性解析を行い，一定観測時間10分間放置させた後，設定初期張力状態になるよう再び3.0*kgf/cm*まで載荷する。この作業をある程度張力が収れんするまで行う。その様子を等2軸初期応力状態のみ図24，25に示す。繰り返しごとの一定観測時間での応力値及び，張力再導入時のひずみを1軸応力状態に対しては図26，等2軸初期応力状態に対しては図27に示す。解析の結果，繰り返し回数とともに応力値，ひずみともにある値に収束するという実験で見られる傾向が表現できている。等2軸初期応力状態でのひずみの不一致は，初期状態の設定や，実験と解析との設定初期張力までの応力・ひずみ関係の不一致が原因であると考えられる。

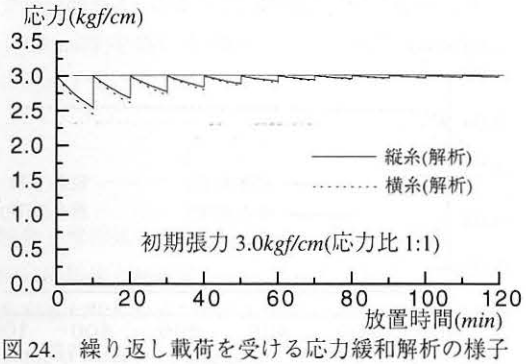


図24. 繰り返し載荷を受ける応力緩和解析の様子（応力—時間関係）

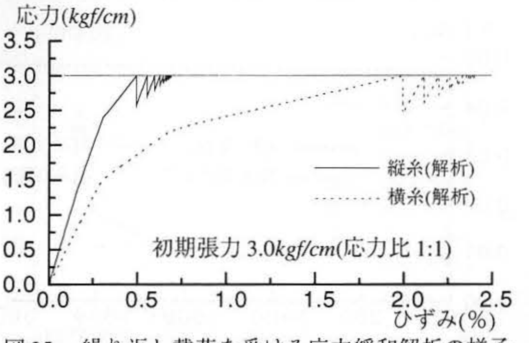


図25. 繰り返し載荷を受ける応力緩和解析の様子（応力—ひずみ関係）

6. 結語

織構造格子モデルに4要素Voigtモデルを採用し，粘性特性を考慮した構成方程式の定式化を行った。実験と解析の比較の結果，クリープ解析における初期ひずみや応力緩和解析における放置時間の初期の段階での緩和曲線にずれが見られるものの，本手法を用いることにより膜材料の長期間での粘性特性を定性的に表現可能であることがわかった。

7. 謝辞

研究の遂行にあたり貴重な示唆を頂くとともに，膜の材料試験において全面的にご支援頂いた太陽工業空間技術研究所戸田郁也氏，小田憲史博士，瀬川信哉博士，豊田宏氏，武田文義氏，豊橋技術科学大学大学院生小野智子氏に感謝いたします。

なお，本研究は豊橋技術科学大学プロジェクト研究「構造用膜材料の弾塑性・クリープ等に関する構成則」（平成8年3月～平成10年3月）の一環として実施したものである。

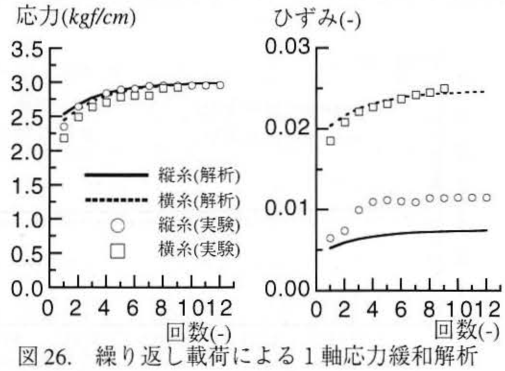


図26. 繰り返し載荷による1軸応力緩和解析（初期張力3.0*kgf/cm*）

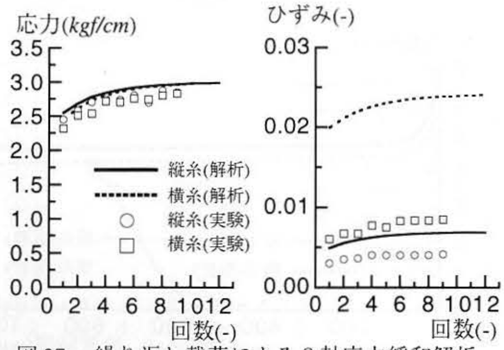


図27. 繰り返し載荷による2軸応力緩和解析（初期張力3.0*kgf/cm*）

[参考文献]
1）加藤史郎，Pongpo Petch：材料非線形を考慮した膜材料の構成方程式の定式化 —織構造格子モデル—，膜構造研究論文'93，pp.11-21，1993年12月
2）加藤史郎，Pongpo Petch，武田文義，吉野達矢，松本恵美：Schockモデルに基づいて膜材料の構成方程式を誘導する方法について —連続体としての増分型構成方程式の提案—，膜構造研究論文'94，pp.11-26，1994年12月
3）加藤史郎，武田文義，吉野達矢，松本恵美，並田忠政：Schockモデルに基づいた膜材料の構成方程式の定式化（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.731-736，1995年8月
4）加藤史郎，武田文義，吉野達矢，並田忠政，小野智子：Schockモデルに基づいた膜材料の構成方程式の定式化（その4），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.887-888，1996年9月
5）加藤史郎，吉野達矢，武田文義：織構造格子モデルに基づいた膜材料の構成方程式に関する研究 —繰り返し載荷に対する応力・ひずみ関係の実験と解析との比較—，構造工学論文集，Vol.43B，1997年3月（投稿中）
6）南　宏和，豊田　宏，瀬川信哉：膜構造物用膜材料であるコーテッド平織物の1軸・2軸応力状態での応力緩和とクリープの特性，日本建築学会論文報告集，第408号，pp1-9，1990年2月
7）Kohichi Itoh, Kohtaro Tanaka, Yoshiaki Ohuchi：An experimental study on tension characteristics of suspension membranes, Proc. of the IASS Int. Symposium, Osaka, pp193-200, 1986
8）田中耕太郎，菊池哲雄：剛境界サスペンション膜構造物に用いられる膜パネルの張力導入方法について，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1325-1326，昭和62年10月
9）斎藤公男，田中耕太郎：張力膜初期曲面形成の為の縮少率の設定について，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1183-1184，1989年10月
10）小竹達也，菊嶋　誠，西川　薫：膜材のリラクゼーションについて（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.881-884，1996年9月
11）小松　清：局部破断を有する膜材料の織構造モデルによる応力シミュレーション，膜構造研究論文'92，pp.45-78，1992年12月
12）加藤史郎，吉野達矢，松本恵美，武田文義：アイソパラメトリック曲面要素を用いた膜構造解析，膜構造研究論文'95，pp.9-21，1995年12月
13）南　宏和，瀬川信哉：コーテッド平織物の2軸伸張実験，材料（日本材料学会誌），Vol.41，No.463，pp451-457，1992年4月
14）瀬川信哉，三井康司，笹川　明：膜材料の応力—ひずみ曲線からクリープを分離した材料定数評価に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41B，pp259-269，1995年3月

VISCO-INELASTIC CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR FABRIC MEMBRANES BASED ON FABRIC LATTICE MODEL

— SIMULATIONS FOR CREEP AND RELAXATION COMPARED WITH EXPERIMENTS —

Shiro KATO[*1]
Hirokazu MINAMI[*2]
Tatsuya YOSHINO[*3]
Tadamasa NAMITA[*4]

SYNOPSIS

The present paper describes the formulation for constitutive equations to simulate visco-inelastic behaviours of fabric membranes subjected to long lasting loads. The formulation adopts a lattice model by which membranes are replaced by a set of straight truss elements with viscosity as well with elasto-plastic material nonlinearities. Identification methods for visco-plastic properties are also presented. The simulated results are compared with those for creep and relaxation based on experiments and the validity is confirmed.

*1 Professor, Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology, Tempaku, Toyohashi 441, Japan
*2 Vice President of Space Technology Research Center, Taiyo-Kogyo, Hirakata, Osaka
*3 Graduate Student, Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology
*4 Graduate Student, Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology