施工手順を模擬した膜構造の粘弾塑性応力･変形解析
－織構造格子モデルによる定式化と解析－

加藤史郎[*1]
吉野達矢[*2]
南　宏和[*3]
瀬川信哉[*4]

梗　　　概

膜構造の施工に注目し，繰り返し強制ひずみを受ける膜材料の応力緩和試験のシミュレーションを行う。このために織構造格子モデルに基づいた増分型構成方程式を提案し，織構造格子モデルの適合性について議論する。また，織構造格子モデルを構成する部材の粘性に関する諸定数の第1近似値の推定方法を提案するとともに，より精度よく実験結果をシミュレートする諸定数を遺伝的アルゴリズムを用いて求める。次に，強制ひずみを与える手順の違いにより発生する応力の違いを分析するとともに，実際の膜構造の施工手順を模擬するような張力導入を行い，その手順の違いによりどのように応力集中が発生し，かつ，導入後の応力分布がどのようになるかを考察する。

1．序

建築物に用いられている膜材料はガラス繊維より成る糸を平織りし，その両面に合成樹脂をコーティングした物である。膜材料を構成する材料およびその製造過程が原因して，応力・ひずみ関係は弾塑性特性と粘性特性が現われ強い非線形性を示す。このため，時間の経過を考慮しながら荷重履歴による応力分布および形状の変化を予測することは，膜構造の設計・施工において重要となる。

膜材料の1軸および2軸の引張特性および剪断特性に関する研究はこれまでに報告されている[1,2,3]。また，粘性特性に関する研究としては，Itho, Tanakaらの研究[4,5,6]，南らの研究[7]などがある。最近では，小竹ら[8]により膜パネルの縮小率の設定方法が提案され，実構造物におけるリラクゼーションの予測が行われている。さらに，南ら[9]により，初期応力導入後に生じる応力緩和の後の応力あるいはクリープの後のひずみを弾性解析で予測することを目的として，応力緩和後あるいはクリープ後の応力・ひずみ関係を議論している。小竹ら[8]，南ら[9]のどちらもある程度時間が経過し，応力緩和およびクリープが相当程度進行した状態を想定しており，これらの方法では施工時のような応力緩和およびクリープが十分に進行していない状態下での応力分布や形状を予測することは難しい。

施工時において膜面に圧縮力が働きしわが生じないか，施工後において十分な応力が膜面に導入されているか，などの重要な施工上の問題を考えると，膜構造の施工過程を十分にシミュレート可能な解析手法が必要とされる。著者らはこれまでの実験，具体的には，2軸引張および剪断試験[10,11]，日本膜構造協会[12]が定める新2軸引張試験[11]および南らのクリープおよび応力緩和試験[7]との比較から織構造格子モデルに基づく増分型の粘弾塑性構成則[10,11,13]の妥当性の検討を行った。この実験との比較から著者らが提案する織構造格子モデルを用いることにより，膜材料の粘弾塑性特性をある程度表現可能であることを示した。また，8節点アイソパラメトリック曲面要素を用いた有限要素法による増分型の剛性方程式を提案した[14]。さらに，織構造格子モデルに基づく構成方程式を導入し，南ら[15]による平面膜に短時間で空気圧を与えた実験，平面膜に空気圧を載荷しクリープひずみを発生させる瀬川[16]による実験結果と比較を行い，著者らが提案する増分型構成方程式および増分型剛性方程式の妥当性を示した[17]。

そこで，本研究では，まず，(1)施工時に繰り返し張力が導入されることを考え，繰り返し強制ひずみを受ける膜材料の応力緩和特性に注目し，実験との比較から本モデルの妥当性の検討を行う。実験のシミュレーションを行うに当り，織構造格子モデルの諸定数を推定する必要があるが，形状および弾塑性特性に関する諸定数は文献

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

11で既に妥当性が示された定数を用い，(2)粘性に関する諸定数は基準となる第1近似値を求める手法を提案し，(3)より精度よく実験結果をシミュレートできるような諸定数を推定する方法を提案する。推定には古川・矢川[18]にって提案された連続探索空間のための遺伝的アルゴリズムを用いる。さらに，(4)施工時の張力導入手順の違いが内部に発生する応力にどの程度影響を与えるかを調べるために，まず，構成方程式を用いて強制ひずみの与え方と張力導入にともなう時間経過の影響を調べる。さらに，(5)実際の施工時の張力導入手順を勘案し，異なった3つの張力導入手順を想定し，手順の違いが張力導入時にどのような応力集中を生じさせるか，導入後の応力分布や，1週間経過後の応力分布がどう影響されるかについて分析を行う。

2　膜の粘弾塑性解析法の定式化と定式化に用いられる線材の粘弾塑性挙動のモデル化

2．1　膜材料の粘性挙動の特性分析

ここで対象とする膜材料A種（四フッ化エチレン樹脂コートガラス繊維平織物）はガラス繊維をより成る糸を平織りし，その両面に四フッ化エチレン樹脂をコーティングしたものである。その製造過程から，糸には緩みが，たて糸とよこ糸との間にすき間があり，コーティング材がその糸の緩みやすき間に浸潤していることなどが考えられる。これらを考慮するために，著者らが提案した織構造格子モデル[10]を構成するすべての部材に材料非線形性を考慮する。

7種類の応力比に対する2軸引張試験結果の低応力部分を図1に示す[11]。図1より，1軸引張時の非張力導入方向を除いて，応力比にかかわらず約$3kgf/cm$までにおいて，応力・ひずみ関係はほぼ同様な傾向を示している。それぞれの応力比において，その後の曲線が大きく変化していが，これをクリンプ交換によるものだと考えるならば，約$3kgf/cm$までの応力・ひずみ関係はクリンプ交換が少ない変形が起こっているものと考えてよい。糸材が応力を負担し始めるとクリンプ交換が起きる。このため，クリンプ交換が起こるまでの間，糸材の緩みは解消しても糸の負担応力は小さいと考えられる。換言すれば，約$3kgf/cm$までの応力・ひずみ関係は主にコーティング材の伸び特性を示していると言える。

次に粘性特性について注目する。南らのクリープおよび応力緩和試験の結果[7]，糸はガラス繊維からできていること，クリンプ形状の変化およびクリンプ交換が生じる応力，そして，応力に対する構成材料の応力負担などを勘案すると次のように分析できる。1)約$3kgf/cm$程度までの区間では，コーティング材が主に応力を負担する。2)約$3kgf/cm$程度を越えると糸材が応力を負担するようになり，クリンプ交換が起きはじめる。このとき，糸自身がしまってその断面が扁平になる，そして，糸を構成する繊維に浸潤しているコーティングおよびたて糸とよこ糸の間のコーティングが圧縮される。以上のことを踏まえ，著者らが提案する織構造格子モデルにおいて粘性特性はコーティング材の特性を表す部材でのみ生じるものと仮定する。

著者ら[13]は粘性特性を考慮するために，図2に示す織構造格子モデルを構成する部材に4要素Voigtモデルを導入した。これを用いて，南らの1000分間放置のクリープおよび応力緩和試験[7]のシミュレーションを行った。応力緩和試験結果について，4要素Voigtモデルを仮定した方法は全体的に実験を模擬できたが，初期の1～2時間の応力緩和量の推定には何がしかの差が実験との間に認められた。このため，中期的な応力緩和量の予測には使用できるものの，施工時解析に使用した場合，初期の緩和量の推定誤差が解析結果に影響を及ぼす恐れが考えられる。そこで，初期の応力緩和量の推定精度を上げるために，さらに単純Voigtモデルを追加した6要素Voigtモデルを採用するものとする。

2．2　織構造格子モデル[10,13]

織構造格子モデル（図2）に基づいて構成則の定式化を既報[10]において行った。ここでは，その概略を示す。たて糸方向をξ，よこ糸方向をηとする座標系を用い，この単位要素は一辺の長さがそれぞれa_0とb_0の長方形である。ガラス繊維を束ねたたて糸とよこ糸を表すために，たて糸方向にはA部材，AA部材，A部材が，よこ糸方向にはB部材，BB部材，B部材がそれぞれ2組ずつ配置されている。たて糸とよこ糸は，交点Kで束材Vによって結合されているものとする。これらは，主に膜材料の1軸・2軸の特性とクリンプ交換を表すための要素である。一方，たて糸とよこ糸で構成される薄いシートの裏と表のコーティング材料の特性を表す部材として，たて糸方向にC部材，よこ糸方向にD部材，ならびに，斜め材

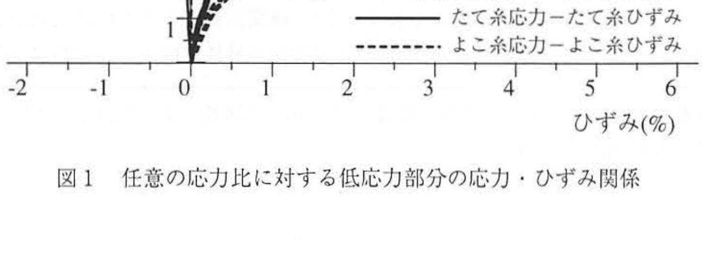


図1　任意の応力比に対する低応力部分の応力・ひずみ関係

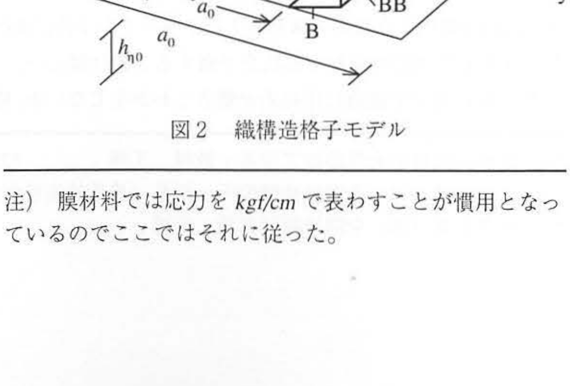


図2　織構造格子モデル

注）膜材料では応力をkgf/cmで表わすことが慣用となっているのでここではそれに従った。

としてE, F部材が配置される。C, D部材は，主にコーティング材の伸び作用に，E, F部材はコーティング材の剪断並びに伸び作用に関連する。コーティング材は，たて糸とよこ糸に挟まれた領域にも浸潤しているため，たて糸とよこ糸のなす角の変化に抵抗すると想定される。したがって，H.J.Schock[19]のモデルでは採用されていないが純剪断を表す剪断抵抗面要素 R_I が仮定されている。これより，膜材全体としての面内剪断作用は，先のE, F部材とこの剪断抵抗面要素 R_I の和で表される。

2．3． 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部材に単純Maxwell(g)要素と単純Voigt(i)要素を直列結合した図3示す6要素Voigtモデルを導入する。

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 $(i=1,2)$。

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。

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

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
$\Delta\varepsilon_i$ ：i 番目の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[12]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(図4)と仮定する。

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

ただし，

$$\Delta\sigma = \sigma(t_{j+1}) - \sigma(t_j) \quad , \quad \Delta t = t_{j+1} - t_j \tag{3}$$

各増分ひずみ成分を求め，式(1)に代入し，織構造格子モデルの各部材に対する増分型構成方程式，

$$\Delta\sigma = E_T \Delta\varepsilon + f \tag{4}$$

を得る。ただし，

$$E_T = \left[C_g + \frac{C_g}{2T_g}\Delta t + \sum_i \left(1 - \frac{T_i}{\Delta t} + \frac{T_i}{\Delta t} e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}\right) C_i \right]^{-1} \tag{5-1}$$

$$f = -E_T \left[\frac{\Delta t}{T_g} C_g \sigma(t_j) + \sum_i \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}\right) C_i \left\{ \sigma(t_j) - \frac{\varepsilon_i(t_j)}{C_i} \right\} \right] \tag{5-2}$$

である。ここで，$\Delta t \to 0$ とすれば，式(4)は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。

2．4． 構成方程式の誘導

ここでは，織構造格子モデルに仮想仕事の原理を適用した増分型の構成方程式を誘導する。定式化の詳細は，既報[10]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 $\overline{\ell}_K$ で表されるとき，増分ひずみを次式のように定義する。

$$\Delta\varepsilon_K = \frac{(\overline{\ell}_K - \ell_K)}{\ell_{0K}} \tag{6}$$

また，式(3)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，

$$N_K = (E_{TK}\Delta\varepsilon_K + \sigma_{0K} + f_K)\cdot A_{0K} \tag{7}$$

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剪断抵抗面要素の増分後の剪断力は，

$$S = k_T \Delta\gamma + S_0 \tag{8}$$

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次式となる。

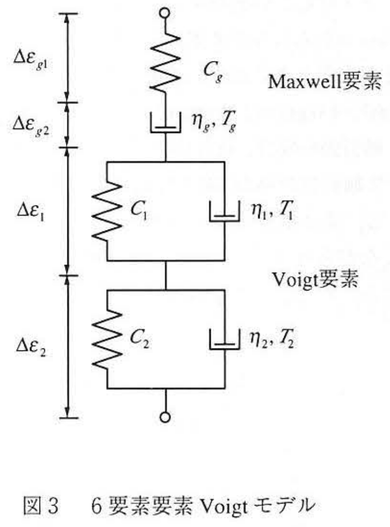


図3 6要素要素Voigtモデル

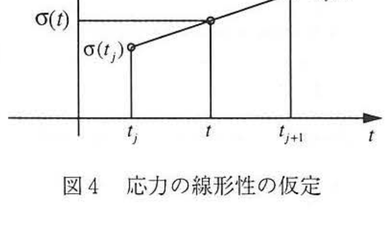


図4 応力の線形性の仮定

$$
\begin{aligned}
\delta U = {} & 4\delta(\Delta\varepsilon_A{}^L)l_{0A}N_A + 4\delta(\Delta\varepsilon_A{}^N)l_{0A}\sigma_{0A}A_{0A} \\
& +4\delta(\Delta\varepsilon_B{}^L)l_{0B}N_B + 4\delta(\Delta\varepsilon_B{}^N)l_{0B}\sigma_{0B}A_{0B} \\
& +2\delta(\Delta\varepsilon_{AA})l_{0AA}N_{AA} + 2\delta(\Delta\varepsilon_{BB})l_{0BB}N_{BB} \\
& +2\delta(\Delta\varepsilon_C)l_{0C}N_C + 2\delta(\Delta\varepsilon_D)l_{0D}N_D \\
& +2\delta(\Delta\varepsilon_E)l_{0E}N_E + 2\delta(\Delta\varepsilon_F)l_{0F}N_F \\
& +4\delta(\Delta\varepsilon_V)l_{0V}N_V + a\, b\, (\Delta\gamma)S
\end{aligned}
\tag{9}
$$

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次式となる。

$$
\delta U = a\, b\, [N_\xi \delta(\Delta\varepsilon_\xi) + N_\eta \delta(\Delta\varepsilon_\eta) + N_{\xi\eta}\delta(\Delta\gamma)] \tag{10}
$$

いま，式(9)と式(10)が等しく仮想ひずみが任意であること，また，$\Delta\varepsilon_\xi$等の2次の項が微小であることより，$\Delta\varepsilon_\xi, \Delta\varepsilon_\eta$および$\Delta\gamma$を未知数とする増分型構成方程式を得る。

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

§3　膜材料の応力緩和試験

膜の変形・応力の時系列的変化を研究するにあたり，クリープと応力緩和試験は必須事項である。ここでは，膜材料の粘性に関する基本的性質を調べるため，応力緩和試験を行った。実験は，以下の2種類である。

3．1　単純応力緩和試験

強制的に2軸変位を与えて初期応力を発生させ，その後は，ひずみ一定のまま2軸応力の観察を行った。1辺が40cmの正方形の膜材料にジグのつかみしろを考慮した試験片を図5に示す。初期に導入するたて糸方向とよこ糸方向の応力を(3kgf/cm：0kgf/cm)，(0kgf/cm：3kgf/cm)，(3kgf/cm：3kgf/cm)，(5kgf/cm：5kgf/cm)の4種類とする。1軸引張の場合，載荷側のジグ間引張速度を*1mm/sec*として引張り，2軸引張の場合，載荷はたて糸方向のジグ間引張速度を*1mm/sec*とし，よこ糸方向は応力比（1：1）を満足するように速度を調整しながら行う。所定の応力まで載荷し，ジグを固定して1週間放置する。ただし，実験は室内で行い，室温は最低5.7℃から最高31.4℃であった。

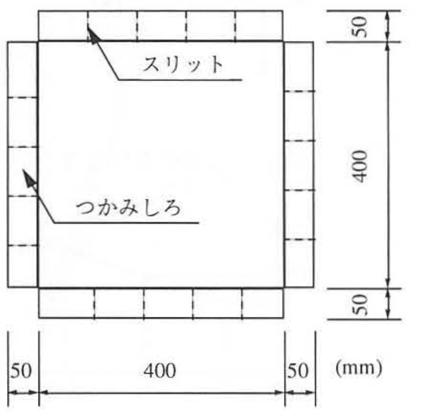


図5　応力緩和試験の試験片形状

図6～9に実験結果の応力・ひずみ関係を示す。この結果は南らの実験結果[7]と同傾向を示している。1週間後のたて糸およびよこ糸方向の応力を表1に示す。初期張力の導入後，1週間放置することにより，導入する応力に依存するが，約40%～60%の応力に緩和することがわかる。

3．2　繰り返し強制ひずみをともなう応力緩和試験

低応力状態の下で初期形状を形成するにあたり，その後の荷重履歴や粘性が原因で発生する内部応力の減少を防止することが膜構造の品質維持に有益となる。この方法のひとつが，施工時に繰り返し載荷（繰り返し強制変位プロセス）を行うことである。この効果を調べるため，以下の実験を進めた。

3．1と同様に試験を行う。ただし，応力は（3kgf/cm：3kgf/cm），（5kgf/cm：5kgf/cm）とし，所定の応力まで載荷した後に，6時間放置を行う。さらに，緩和した応力分を再度載荷し，再度，6時間放置する。載荷と放置を5回繰り返し，5回目の載荷後の放置は1週間とする。また，室温は最低11.3℃から最高31.0℃であった。

図10～11に実験結果の応力・ひずみ関係を示す。1週間後のたて糸およびよこ糸方向の応力を表1に示す。この結果も南らの実験結果[7]と同傾向を示しており，1週間後のたて糸およびよこ糸方向の応力がそれぞれ初期導入張力（3kgf/cm：3kgf/cm）に対し，約2.3kgf/cm，約1.9kgf/cm（初期張力の77%，63%）であり，（5kgf/cm：5kgf/cm）に対し，約4.2kgf/cm，約3.3kgf/cm（初期張力の84%，66%）程度までしか緩和しなかった。また，繰り返し載荷毎の応力の緩和量は各回毎に減少していることがわかる。図8，9との比較から，繰り返し載荷することにより，応力の緩和量が相当に減少することがわかる。

§4　織構造格子モデルによる実験のシミュレーション

織構造格子モデルを構成する部材の諸定数は表2に示す値を用いる。この値を用いれば，2軸引張および剪断試験結果をシミュレートすることが可能であることを文献11において確認した。ただし，粘性に関する諸定数は以下に示す手順により求める。

これまで，弾塑性特性に関する諸定数の値を決定するにあたり第1近似値を求める手法[11]を提案しているが，その第1近似値を用いた解析結果では実験結果を十分に模擬できていない。既報[11]では，その第1近似値をもとに実験結果を模擬できるよう繰り返し試行を行ってきた。本報でも弾塑性特性に関する諸定数は既報[11]の値を用

表1　1週間後の保有応力

初期導入張力 たて糸：よこ糸方向 (kgf/cm)	3：0	0：3	3：3		5：5	
繰り返し回数	1	1	1	5	1	5
1週間後のたて糸方向応力 (kgf/cm)	1.7 (57%)	-	1.8 (60%)	2.3 (77%)	2.5 (50%)	4.2 (84%)
1週間後のよこ糸方向応力 (kgf/cm)	-	1.5 (50%)	1.5 (50%)	1.9 (63%)	2.0 (40%)	3.3 (66%)

( ) 内は残存率を示す。

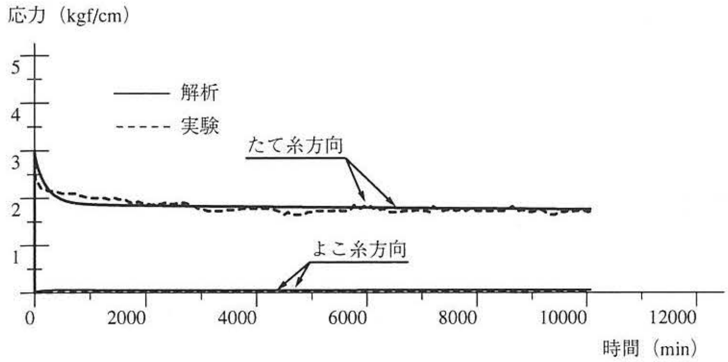


図6　単純応力緩和試験　導入張力（3kgf/cm：0kgf/cm）

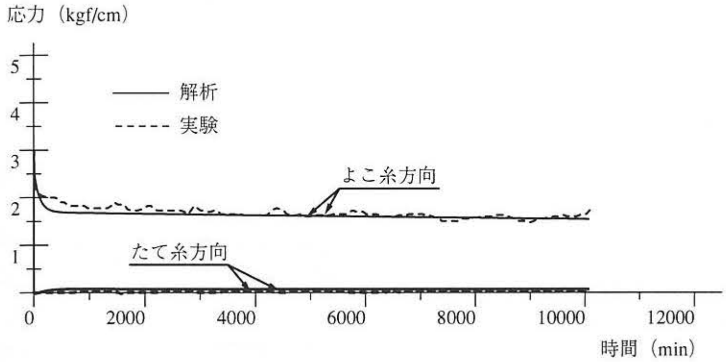


図7　単純応力緩和試験　導入張力（0kgf/cm：3kgf/cm）

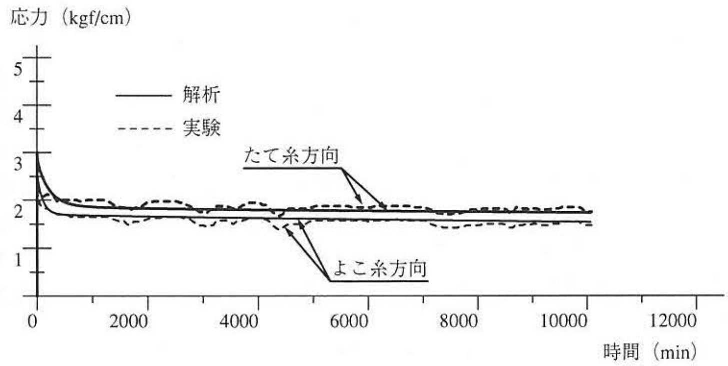


図8　単純応力緩和試験　導入張力（3kgf/cm：3kgf/cm）

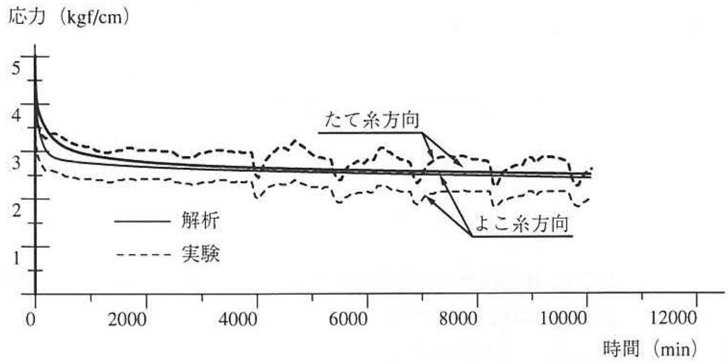


図9　単純応力緩和試験　導入張力（5kgf/cm：5kgf/cm）

いる。一方，本報では，新たに粘性に関する諸定数の第1近似値を求める方法を示し，得られた第1近似値をもとに連続探索空間のための遺伝的アルゴリズム[18]を用いて実験結果をより模擬可能な諸定数を決定する。次に得られた諸定数を用いて第3節で行った実験結果のシミュレーションを行う。

4．1　粘性に関する諸定数の第1近似値の推定方法

約3*kgf/cm*までの応力･ひずみ関係が同様な挙動を示していることから（図1），粘性特性はコーティング材の特性を表すC, D, V材で表現するものとする。この3つの部材の内，C, D材については　図6，7の1軸の単純応力緩和試験結果をもとに織構造格子モデルの粘性に関する諸定数を推定する。この推定値を第1近似値とする。

推定方法を提案するにあたり，6要素Voigtモデルを構成する要素の特性を考える。まず，Maxwell要素のバネは膜材料の弾塑性特性を表す。Maxwell要素のダッシュポットと2つのVoigt要素の特性が次の3つの時間帯で顕著に表れるものと考える。(1) 1つ目のVoigt要素は応力緩和における数時間程度の急激な応力緩和現象を，さらに，(2) 2つめのVoigt要素は数日間の特性を，そして，(3) Maxwellモデルのダッシュポットでその後の緩やかな応力緩和を表す。そこで，図12に示すように，応力・時間関係を3本の直線で近似する。

4．1．1　数時間程度の応力緩和現象

初期の1，2時間程度の間においても，Maxwell要素のダッシュポットと2つ目のVoigt要素により応力緩和が生じるが，ここではそれらを無視し，Maxwell要素の弾塑性バネとVoigt要素で構成される3要素Voigtモデル（図13）によって，初期の特性を表す。ここで，Maxwell要素のバネのひずみをε_g，Voigt要素のひずみをε_1と表す。時刻$t=0$において応力σ_0が載荷され，モデル全体でひずみε_0が生じたとする。

$$\varepsilon_g(t=0)=\varepsilon_0 \tag{12}$$

ここで，バネは弾塑性であることから，コンプライアンスC_gはひずみの関数であり，応力とひずみの関係を線形関係で表現できない。この状態でひずみを固定し，放置する。この放置によりVoigt要素は伸び始める。弾塑性バネとVoigt要素は直列に接続されていることからそれぞれに生じている応力はともにσである。Voigt要素のバネの応力をσ_{1S}，ダッシュポットの応力をσ_{1D}とするとき，時刻tにおいて要素全体に生じている応力σとの間には次式が成立する。

$$\sigma=\sigma_{1S}+\sigma_{1D} \tag{13}$$

ここに，

$$\sigma_{1S}=\frac{1}{C_1}\cdot\varepsilon_1 \tag{14}$$

$$\sigma_{1D}=\eta_1\cdot\dot{\varepsilon}_1 \tag{15}$$

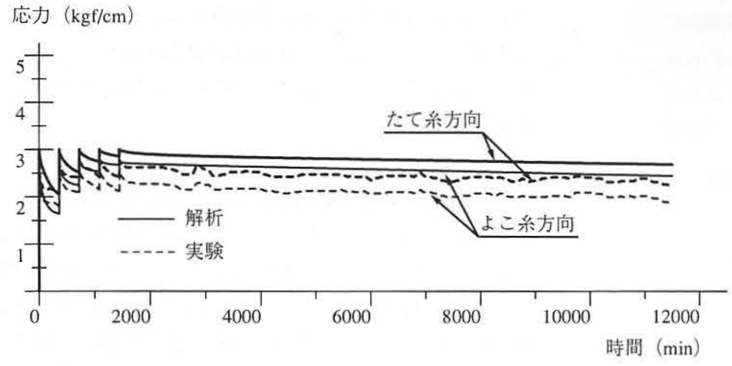


図10　繰り返し応力緩和試験　導入張力（3kgf/cm：3kgf/cm）

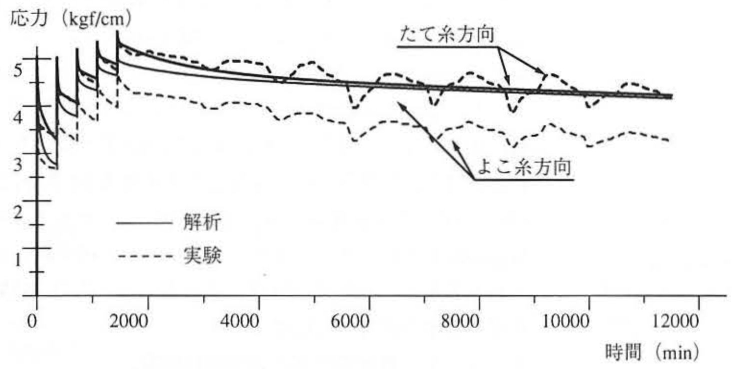


図11　繰り返し応力緩和試験　導入張力（5kgf/cm：5kgf/cm）

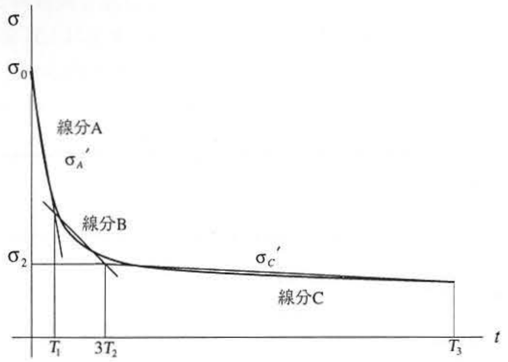


図12　応力・時間関係の理想化

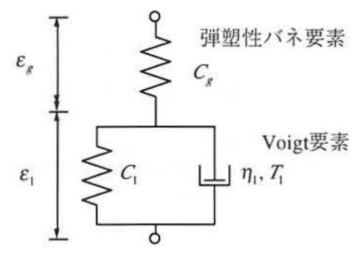


図13　3要素Voigtモデル

表2　織構造格子モデルの諸定数

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

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_t	0.1375	0.1000	65.0	31.0	14.5	1.66	3.50	-0.40	0.25	0.45

$$\eta_1 = T_1 / C_1 \tag{16}$$

よって，

$$\sigma = \frac{1}{C_1} \cdot \varepsilon_1 + \frac{T_1}{C_1} \cdot \dot{\varepsilon}_1 \tag{17}$$

Voigt要素がε_1だけ伸びることにより，弾塑性バネはε_1だけ縮む。つまり，

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 - \varepsilon_1 \tag{18}$$

ここで，弾塑性バネの特性を考えると，ひずみに対して応力は図14よりE_4の勾配で減少することから，応力とひずみの関係は

$$\sigma = \sigma_0 - E_4 \varepsilon_1 \tag{19}$$

となる。式(17),(19)と$t = 0$で$\varepsilon_1 = 0$より，

$$\varepsilon_1 = \frac{C_1 \cdot \sigma_0}{1 + C_1 \cdot E_4}(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \tag{20}$$

となる。式(20)を式(19)に代入すると，

$$\sigma = \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{C_1 \cdot E_4}{1 + C_1 \cdot E_4}(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \right\} \tag{21}$$

となる。ここで，テーラー展開し，$t << T_1$において，

$$\sigma \approx \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{C_1 \cdot E_4}{1 + C_1 \cdot E_4} \frac{t}{T_1} \right\} \tag{22}$$

と近似できる。この結果，図12における線分Aの勾配$\sigma_A{}'$を読み取ることにより，次式でC_1を得ることができる。ただし，T_1は線分Aと線分Bの交点の値とする。

$$C_1 = \frac{-T_1 \cdot \sigma_A{}'}{E_4(\sigma_0 - T_1 \cdot \sigma_A{}')} \tag{23}$$

4．1．2　数日間程度の応力緩和現象

次に，1，2日間程度の応力緩和減少に注目する。先と同様にMaxwellモデルのダッシュポットによる応力緩和が生じるが，ここでは無視し，Maxwell要素の弾塑性バネと2つのVoigt要素による5要素Voigtモデル（図15）によって，挙動を理想化する。ここで，Maxwell要素のバネのひずみをε_g，1つ目のVoigt要素のひずみをε_1，2つ目をε_2と表す。時刻$t = 0$において応力σ_0が載荷され，モデル全体でひずみε_0が生じたとする。

$$\varepsilon_g(t = 0) = \varepsilon_0 \tag{24}$$

この状態でひずみを固定し，放置する。この放置によりVoigt要素は伸び始める。弾塑性バネとVoigt要素は直列に接続されていることからそれぞれに生じている応力はともにσである。1つ目のVoigt要素のバネの応力をσ_{1S}，ダッシュポットの応力をσ_{1D}，2つ目のVoigt要素のバネの応力をσ_{2S}，ダッシュポットの応力をσ_{2D}とするとき，時刻tにおいて要素全体に生じている応力σとの間には次式が成立する。

$$\sigma = \sigma_{1S} + \sigma_{1D} = \sigma_{2S} + \sigma_{2D} \tag{25}$$

ここに，

$$\sigma_{1S} = \frac{1}{C_1} \cdot \varepsilon_1, \quad \sigma_{2S} = \frac{1}{C_2} \cdot \varepsilon_2 \tag{26}$$

$$\sigma_{1D} = \eta_1 \cdot \dot{\varepsilon}_1, \quad \sigma_{2D} = \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2 \tag{27}$$

$$\eta_1 = T_1 / C_1, \quad \eta_2 = T_2 / C_2 \tag{28}$$

よって，

$$\sigma = \frac{1}{C_1} \cdot \varepsilon_1 + \frac{T_1}{C_1} \cdot \dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{C_2} \cdot \varepsilon_2 + \frac{T_2}{C_2} \cdot \dot{\varepsilon}_2 \tag{29}$$

Voigt要素がそれぞれε_1，ε_2だけ伸びることにより，弾塑性バネは$\varepsilon_1 + \varepsilon_2$だけ縮む。つまり，

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \tag{30}$$

ここで，同様に，応力とひずみの関係は

$$\sigma = \sigma_0 - E_4(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \tag{31}$$

となる。よって，式(25)，(31)と$t = 0$においてε_1，$\varepsilon_2 = 0$より，

$$\varepsilon_1 = \frac{C_1 \cdot \sigma_0}{1 + C_1 \cdot E_4 + C_2 \cdot E_4}(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$$
$$\varepsilon_2 = \frac{C_2 \cdot \sigma_0}{1 + C_1 \cdot E_4 + C_2 \cdot E_4}(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) \tag{32}$$

となる。式(32)を式(31)に代入すると，

$$\sigma = \sigma_0 - E_4 \left\{ \frac{\sigma_0}{1 + C_1 \cdot E_4 + C_2 \cdot E_4} \left(C_1(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + C_2(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) \right) \right\} \tag{33}$$

ここで，$t = \infty$において

$$\sigma(t = \infty) = \frac{\sigma_0}{1 + C_1 E_4 + C_2 E_4} \tag{34}$$

が成り立つことから，C_2は

$$C_2 = \frac{1}{E_4}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_2} - (1 + C_1 E_4) \right) \tag{35}$$

となる。ここで，$e^{-3} = 0.050$より，$e^{-\frac{t}{T_2}}(t = 3 \cdot T_2)$は1に対し5％あるものの十分小さいと判断し，線分Bと線分Cの交点を$(3T_2, \sigma_2)$とする。

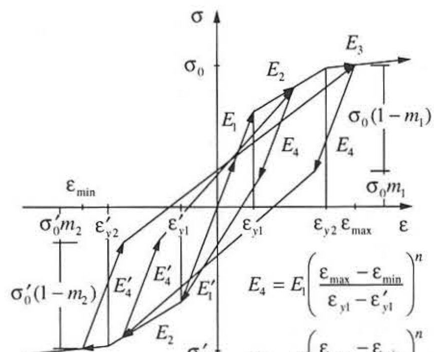


図14　コーティング材の復元力特性

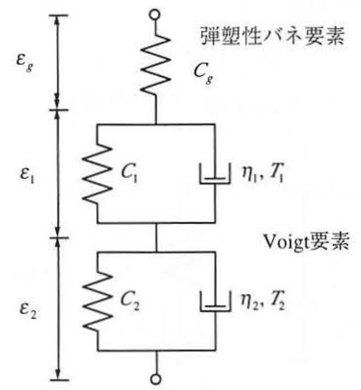


図15　5要素Voigtモデル

4．1．3　その後の応力緩和現象

時刻$t=3\cdot T_2$以降では，Maxwellモデルのダッシュポットのひずみの増分がが支配的になる。そこで，$t=3\cdot T_2$以降の応力の緩和量はダッシュポットによるものと仮定する。図16に示すMaxwell要素に応力σ_0を作用させ，ひずみε_0が生じている。この状態で，ひずみを固定し，放置する。応力と時間の関係は

$$\sigma(t)=\sigma_0\cdot e^{-\frac{t}{T_g}} \tag{36}$$

となる。ここで，$t<<T$において，

$$\sigma(t)\approx-\frac{\sigma_0}{T_g}t \tag{37}$$

と近似できる。線分Cの勾配$\sigma_C{}'$を応力・ひずみ関係から読み取ることにより，次式でT_gを求めることができる。ただし，$t=0$における応力にσ_2を用いている。

$$T_g=\frac{\sigma_2}{\sigma_3{}'} \tag{38}$$

以上の方法により，C, D材の粘性に関する諸定数を推定することができた。次にV材の粘性に関する諸定数を推定しなければならないが，V材に関する粘性特性だけを分離することは難しい。このことから，ここでは，C, D材の諸定数の平均値を第1近似値として採用する。

4．2　第1近似値をもとにした諸定数の修正方法

本研究では粘性に関する諸定数の決定にあたり，連続空間を探索するのに適した遺伝的アルゴリズム(GA)[18]を用いる。従来のGAは変数の探索空間を離散化し，その離散化された値の中から最適な値を求めることになる。これに対し，本手法は変数として実数値をそのまま扱う。このため，本手法では従来の手法に比べ，より最適化された厳密な値が得られる可能性がある。

本手法では，図17に示すような手順で探索を行う。まず，j番目の個体x^jはn個の変数x_iにより，

$$x^j=\{x_1{}^j,\ x_2{}^j,\ \cdots,\ x_n{}^j\} \tag{39}$$

と表す。本研究では粘性に関する諸定数を求めるため，適応度Fは任意時刻tにおける応力の実験結果と解析結果の差の2乗和の平均値をSとするとき，

$$F=\delta/(S+\delta) \tag{40}$$

として求める。ここで，δは適応度Fの値域をゼロから1にするための補正係数である。各個体の初期値は第1近似値が得られているものとし，その値およびその値に平均値μ_i，標準偏差σ_iの正規乱数で得られる値を乗じた値を用いる。淘汰および増殖は全個体同一の選択確率により次世代の個体が選択されることにより行われる。交叉は淘汰および増殖によって選ばれたm個の個体の中から全個体に対し同一の選択確率で2つの個体（親）x^α，x^βを選び，交叉後の2つの個体（子）$\bar{x}^\alpha$，$\bar{x}^\beta$を次式の線形補間により求める。

$$\begin{aligned}\bar{x}_i{}^\alpha&=(1-\mu)\cdot x_i{}^\alpha+\mu\cdot x_i{}^\beta\\ \bar{x}_i{}^\beta&=\mu\cdot x_i{}^\alpha+(1-\mu)\cdot x_i{}^\beta\end{aligned} \tag{41}$$

ただし，補間係数μは平均μ_c，標準偏差σ_cの正規乱数として，n_c回選択を行い交叉確率P_cで交叉を行う。ここで，μがゼロに近いと，親に似た個子が生成され，μがゼロから離れると親に似ていない子が生成される。このため，容易に親に似ていない子が生成されるが，本手法ではさらに突然変異をさせて親に似ていない子を作成する。なお，突然変異はすべての個体に対し，突然変異確率P_mで突然変異させるかどうか判断し，突然変異させる場合はその個体を構成する変数のそれぞれに対して平均値μ_m，標準偏差σ_mの正規乱数を乗じる。また，エリート保存戦略を行い，適応度の高いn_e個の個体を必ず次世代に継承する。局所探索は適応度の高い個体を選び，その個体が持つ変数x_iに平均値μ_S，標準偏差σ_Sの正規乱数を乗じて新しい個体を作成し，適応度が大きくなる場合，直線探索を行う。ただし，局所探索回数はk_Sとする。

4．3　応力緩和試験のシミュレーション

織構造格子モデルを構成する諸定数の形状および弾塑性に関する諸定数は表2の値を用いる。この値は既に文献11で弾塑性特性を十分に表現可能な定数として確認されている。

粘性に関する諸定数は4．1で示した方法で推定する。この推定された諸定数をもとに4．2で示したの遺伝的アルゴリズムを用いて，より実験結果に合うような諸定数を求め，値を表3に示す。ただし，$n=5$とし，変数は（T_g, C_1, T_1, C_2, T_2），$m=20$，$\delta=1.0\times10^{-5}$，

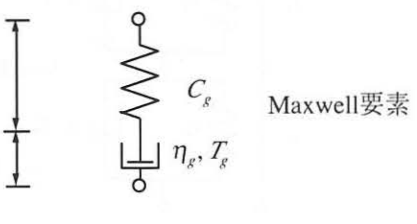


図16　Maxwell要素

図17　遺伝的アルゴリズムのフローチャート

$\mu_i = 1.0$, $\sigma_i = 0.02$, $P_c = 0.9$ $n_c = 20$, $\mu_c = 0.0$, $\sigma_c = 0.02$, $P_m = 0.3$, $\mu_m = 1.0$, $\sigma_m = -\log(F)/7$ ($F \geq 10^{-2.1}$) または0.3 ($F < 10^{-2.1}$), $n_e = 2$, $n_S = 5$, $k_S = 5$, $\mu_S = 1.0$, $\sigma_S = 0.3$ とする。また，４種類の単純応力緩和試験に関する応力・時間関係を用いて適応度を計算する。

表３に示す得られた粘性に関する諸定数を用いて，第２章で示した２種類の応力緩和試験をシミュレートした結果を図６～11に示す。この結果より，まず，４要素Voigtモデルを用いた場合[13]には１週間程度（中期間）の応力・時間関係をある程度シミュレートできていたが，１，２時間程度の短い時間の範囲では応力・時間関係に差異が生じていた。図６～８が示すように６要素Voigtモデルを用いることにより，その差異を大きく改善することができた。繰り返し強制ひずみをともなう応力緩和試験において，解析結果のよこ糸方向の応力緩和量は実験結果に比べ，緩和量が小さくなる傾向が現れ，不一致があるものの，膜材料の粘性挙動の傾向は示すことができている。

５．増分型剛性方程式

施工手順を模擬した膜構造の応力・変形解析を行うにあたり，８節点アイソパラメトリック曲面要素を用いた増分型剛性方程式を用いる。ただし，増分型剛性方程式の誘導は既報[14]が詳しいので，本報では省略する。

応力・変形解析において圧縮応力が生じた場合，一般に膜材料が圧縮に抵抗し得ない材料と考えられていることから，要素の剛性の低下を考える必要がある。著者らの提案する織構造格子モデルは，格子を構成する部材の履歴特性として剛性の低下を考慮している。

６．施工手順を模擬した応力・変形解析

６．１　載荷手順の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

応力・ひずみ関係において，応力の載荷手順が応力・ひずみ関係にどの程度影響を与えるかを数値解析的に調べる。

まず，西川ら[8]によって示されている従来の縮小率の決定方法に基づいて縮小率を決定する。本報では，織構造格子モデルを用いて応力（16kgf/cm:16*kgf/cm*）までの載荷と除荷を３回繰り返し，３回目の載荷の2*kgf/cm*におけるひずみを読み取る。図18にその応力・ひずみ曲線を示す。この結果たて糸方向に0.3%，よこ糸方向4.4%の縮小率とする。本節では，この縮小率分だけ次に示す方法で引張る。載荷の手順は表４に示すような５種類とする。ただし，(2)~(5)において，一方を引張っている時，他方のひずみは固定しておくものとする。また，応力の載荷にともなう時間経過を無視した解析と，考慮した解析の２種類行う。時間の経過を考慮しない場合，時刻ゼロにおいて，所定のひずみまで引張り，ひずみを固定し１週間放置する。時間の経過を考慮する場合，６時間掛けて載荷を行うものとし，たて糸方向とよこ糸方向のひずみの増分速度は，それぞれ１時間当り，(1)で（0.050%, 0.733%）(2), (3)で（0.025%, 0.367% ）, (4), (5)で（0.0125%, 0.0.183%）となる。載荷後，ひずみを固定し１週間放置する。

図19, 20に応力・時間曲線を，表５に強制ひずみを与えた後の状態での応力を，そして，表６にひずみを固定して１週間放置した後の応力を示す。この結果から，張力導入にともなう時間経過を考慮しない場合，載荷手順に依存しなく，同一な結果を示す。これは，ひずみを一定にするか，増加させているため，織構造格子モデルを構成する要素のそれぞれにおいてもひずみは減少しない。そのため，それぞれの要素の応力・ひずみ関係は骨格曲線をたどることとなり，強制ひずみを与えた後の状態ではすべて同一な状態であるので，応力が同一となる。また，時間経過を考慮した場合も，手順に多少の差が見られるもののほぼ同一の結果を示している。また，時間経過を考慮することにより，強制ひずみを与えた後の状態で，応力が10%～28%減少していることがわかる。これは強制ひずみを

表３　粘弾性に関する諸定数

要素	T_g (*min*)	C_1 (*cm²/kgf*)	T_2 (*min*)	C_2 (*cm²/kgf*)	T_2 (*min*)
C	104000	0.00000062	0.7	0.0000195	350.1
D	57860	0.00000523	3.7	0.0000211	158.7
V	4252	0.00013870	23.3	0.0001653	1736.0

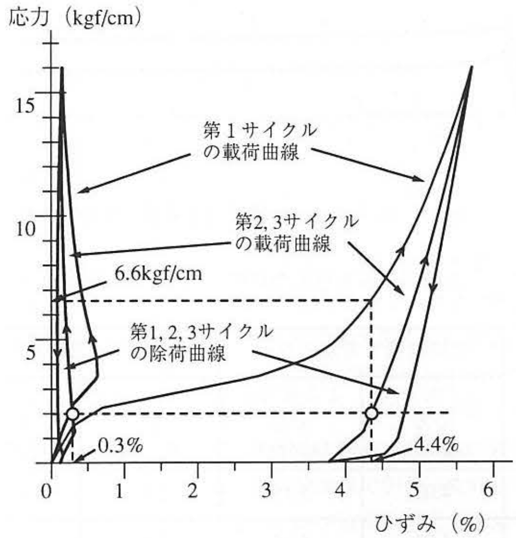


図18　引張応力(16:16kgf/cm)の応力・ひずみ曲線

表４　載荷手順

	名称	手順（単位はkgf/cm）
(1)	２軸同時載荷	たて糸方向に0.3%，よこ糸方向に4.4%同時に引張る
(2)	たて糸方向２段階載荷	たて糸方向に0.3%引張り，よこ糸方向に4.4%引張る。
(3)	よこ糸方向２段階載荷	よこ糸方向に4.4%引張り，たて糸方向に0.3%引張る。
(4)	たて糸方向４段階載荷	たて糸方向に0.15%引張り，よこ糸方向に2.2%引張る。再度たて糸方向を0.15%引張り，よこ糸方向に2.2%引張る。
(5)	よこ糸方向４段階載荷	よこ糸方向に2.2%引張り，たて糸方向に0.15%引張る。再度よこ糸方向を2.2%引張り，たて糸方向に0.15%引張る。

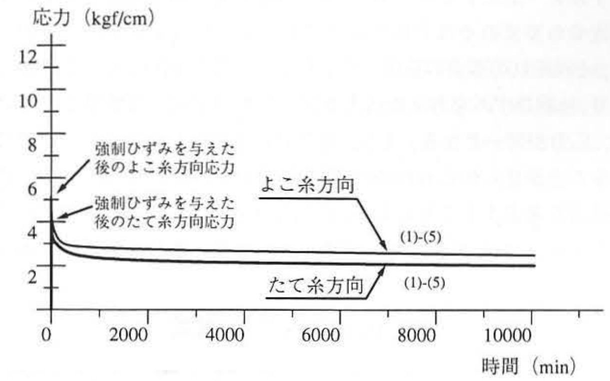


図19　応力・時間曲線（時間経過を考慮しない，0.30%, 4.40%）

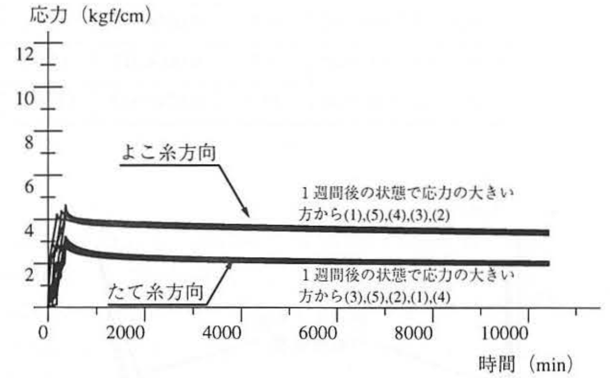


図20　応力・時間曲線（時間経過を考慮，0.30%, 4.40%）

表5　強制ひずみを与えた状態での応力（0.30%, 4.40%）

	時間経過を考慮しない		時間経過を考慮	
	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)
(1)	4.02	5.15	2.98	4.52
(2)	4.02	5.15	2.94	4.64
(3)	4.05	5.16	3.20	4.04
(4)	4.05	5.16	2.93	4.57
(5)	4.05	5.16	3.07	4.23

表6　ひずみを固定して1週間放置した後の応力（0.30, 4.40%）

	時間経過を考慮しない		時間経過を考慮	
	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)
(1)	2.03	2.51	1.99	3.53
(2)	2.03	2.51	2.00	3.32
(3)	2.03	2.51	2.11	3.37
(4)	2.03	2.51	1.96	3.41
(5)	2.03	2.51	2.07	3.46

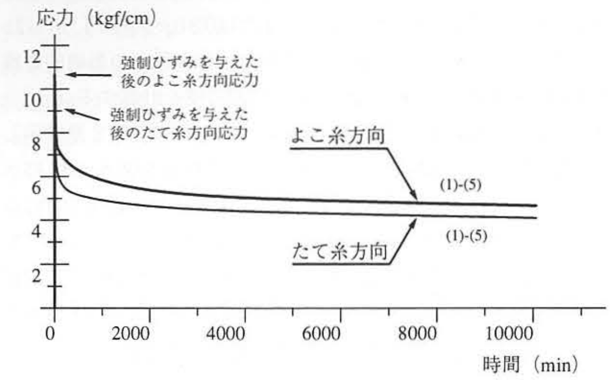


図21　応力・時間曲線（時間経過を考慮しない，0.33%, 4.84%）

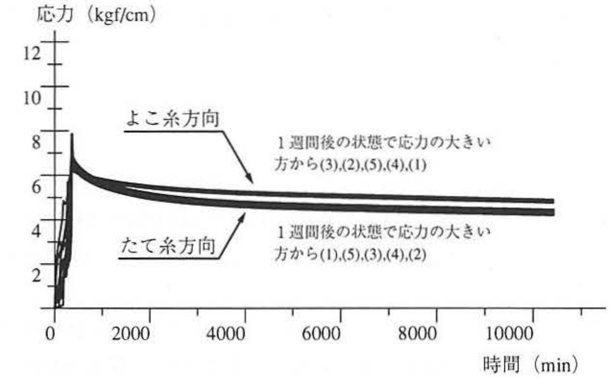


図22　応力・時間曲線（時間経過を考慮，0.33%, 4.84%）

表7　強制ひずみを与えた状態での応力（0.33%, 4.84%）

	時間経過を考慮しない		時間経過を考慮	
	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)
(1)	10.66	9.20	7.33	7.14
(2)	10.66	9.20	7.84	7.60
(3)	10.66	9.20	7.08	6.36
(4)	10.66	9.20	7.65	7.41
(5)	10.66	9.20	6.77	6.46

表8　ひずみを固定して1週間放置した後の応力（0.33, 4.84%）

	時間経過を考慮しない		時間経過を考慮	
	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)	たて糸方向応力 (*kgf/cm*)	よこ糸方向応力 (*kgf/cm*)
(1)	4.64	4.09	4.21	4.90
(2)	4.64	4.09	4.36	4.75
(3)	4.64	4.09	4.43	4.79
(4)	4.64	4.09	4.22	4.79
(5)	4.64	4.09	4.27	4.81

与えている間の緩和分であり，先に高い応力に達したものほど応力の緩和量が大きくなり，強制ひずみを与えた後の状態での発生応力が小さくなっている。1週間後の応力を比較すると，たて糸方向応力はほぼ同様であるが，よこ糸方向の応力は時間を考慮することにより大きくなっている。これは式(5)の第2式からわかる。時間経過を考慮しない場合，強制ひずみを与えた後において，2つのVoigt要素のひずみε_iはゼロであるのに対し，時間経過を考慮した場合，2つのVoigt要素のひずみε_iは既にゼロより大きくなっている。この違いが，強制ひずみを与えた後における応力緩和量の違いである。なお，時間経過を無視した解析は初期に導入される応力は考慮した場合に比べて，相当に大きくなっている。

そこで，次に，両方向に与える強制ひずみをそれぞれ1割増やし0.33%と4.84%とした場合の解析を行う。応力・時間曲線を図21, 22に，強制ひずみを与えた後の状態での応力を表7に，そして，ひずみを固定して1週間放置した後の応力を表8に示す。

この結果からもやはり載荷手順に依存せず，ほぼ同一な結果が得られた。

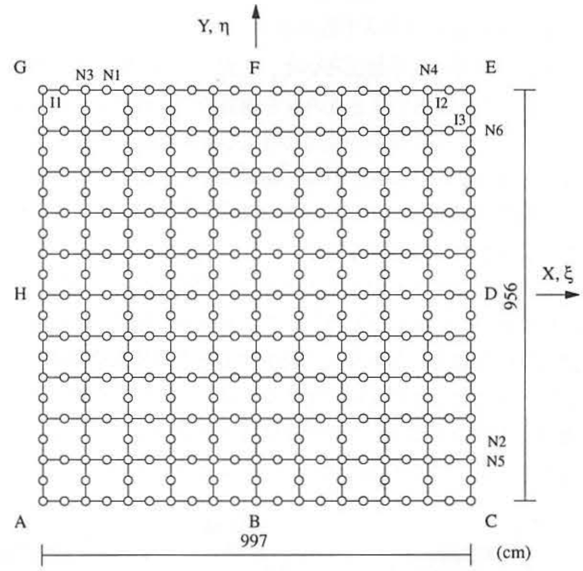


図23　要素分割

6．2　施工手順を模擬した載荷手順の違いが応力分布に与える影響

6．2．1　解析条件

ここでは，たて糸方向に0.3%，よこ糸方向4.4%の縮小した平面膜を実際の施工を模擬した載荷手順で引張り，載荷手順の違いが施工後およびそれから1週間経過後の応力分布に与える影響を調べる。1辺10mの正方形の境界に膜材料を取り付けることを想定し，縮小率0.3，4.4%より，997×956cmを裁断形状とする。ただし，X方向をたて糸方向とし，Y方向をよこ糸方向とする。この裁断形状を8節点アイソパラメトリック要素で10×10の100要素に分割する（図23）。よって，節点は1辺当り21点となる。

載荷は次に示す3つの手順で行う。(1)A点を始点，E点を終点とし，辺ABCDEと辺AHGFE上の対応する1組の節点を同時に境界上の目標とする位置（境界の1辺を20等分する点）まで順に引張る（以下対角軸に対称な載荷と呼ぶ）。(2)B点を始点，F点を終点とし，辺BAHGFと辺BCDEF上の対応する1組の節点を同時に境界上の目標とする位置まで順に引張る（以下Y軸に対称な載荷と呼ぶ）。(3)H点を始点，D点を終点とし，辺HABCDと辺HGFED上の対応する1組の節点を同時に境界上の目標とする位置まで順に引張る（以下X軸に対称な載荷と呼ぶ）。1組の節点を引張ることを1工程とし，この1工程を行うのに必要となる時間経過を，独断的に10分と仮定する。ただし，面外（Z方向）はすべて拘束した2次元問題として扱い，境界条件は始点のX,Y方向を固定し，始点の隣の節点を周方向ローラー支持とする。構成則として，織構造格子モデルを用い，諸定数は表2，3に示す値を用いる。

6．2．2　対角軸に対称な載荷の解析結果

図24～26に，最も大きな応力がよこ糸方向に生じた状態，外周のすべてを引張った状態，そして，引張った後1週間経過した状態の応力分布を示す。図24は図23に示す節点N1, N2点を目標位置まで引張った時点であり，図23に示す積分点I1においてたて糸方向とよこ糸方向とも応力集中が生じている。このように膜材料の一部分を強制的に引張る場合，その点近傍で応力集中が生じていることがわかる。図25から外周をすべて目標位置まで引張った時点ではE点周りでたて糸方向，よこ糸方向ともに応力が多少高くなっており，膜面全体の応力が不均一となっている。この状態から1週間放置した状態での応力分布である図26より，外周のすべてを引張った状態よりも，応力集中の度合いが減ったものの，応力分布の不均一性が見られる。

6．2．3　Y軸（よこ糸方向）に対称な載荷の解析結果

図27～29に，最も大きな応力がよこ糸方向に生じた状態，外周のすべてを引張った状態，そして，引張った後1週間経過した状態の応力分布を示す。ただし，等高線作図プログラムの機能上，応力分布に非対称性が生じた。図27は図23に示す節点N3, N4点を目標位置まで引張った時点であり，図23に示す積分点I2においてたて糸方向とよこ糸方向ともに応力集中が生じている。対角軸に対称な載荷と同様に，よこ糸方向に引張り始めた時点で最大応力が発生している。図28から外周をすべて目標位置まで引張った時点ではたて糸方向がE,G点周りで，よこ糸方向がF点周りで応力が集中しており，膜面全体の応力が不均一となっている。この状態から1週間放置した状態での応力分布である図29より，外周のすべてを引張った状態よりも，応力集中の度合いが減ったものの，応力分布の不均一性が見られる。

6．2．4　X軸（たて糸方向）に対称な載荷の解析結果

図30～32に，最も大きな応力がたて糸方向に生じた状態，外周のすべてを引張った状態，そして，引張った後1週間経過した状態の応力分布を示す。図30は図23に示す節点N5, N6点を目標位置まで引張った時点であり，図23に示す積分点I3においてたて糸方向とよこ糸方向ともに応力集中が生じている。このように引張った場合，先の2つの結果と違い，たて糸方向を糸方向に引張り始めた時点で最大応力が発生している。図31から外周をすべて目標位置まで引張った時点ではたて糸方向が辺ABCと辺EFGの近傍で応力が集中しているが，よこ糸方向は応力集中がほとんどみられない。この状態から1週間放置した状態での応力分布である図32より，外周のすべてを引張った状態よりも，応力集中の度合いが減っている。

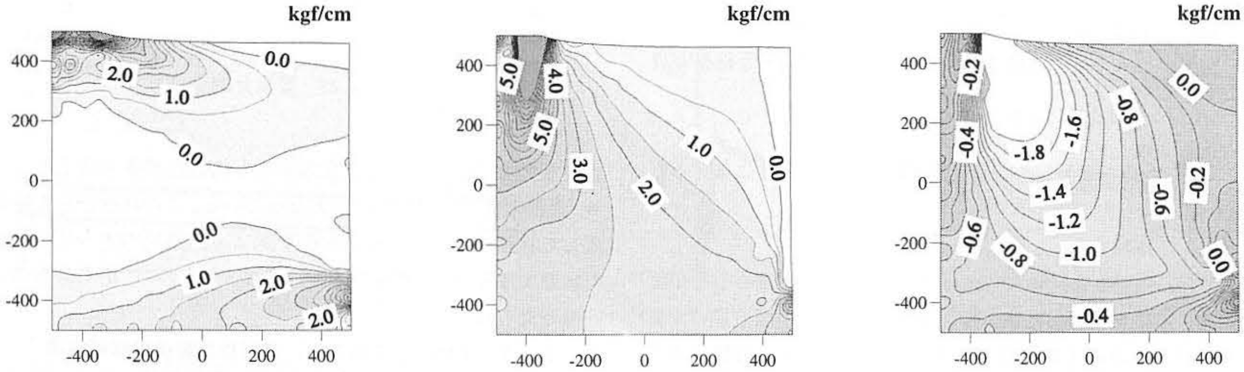
6．3　まとめ

3種類の張力導入手順について，応力・変形解析を行った。本研究で仮定した載荷方法は2点のみを強制的に目標とする位置まで引張っているため応力集中が生じやすく，実際の施工を反映しているとは言えない。実際の施工手順を勘案すると，より実際の施工方法に近い載荷手順で解析を行う必要があると言える。

このような手順で張力導入を行うと，(1)引張っている節点近傍で，何がしかの応力集中が発生すること，(2)境界形状が正方形の場合，X軸（たて糸方向）およびY軸（よこ糸方向）に対称に張力導入を行う途上で張力導入にともなって発生する応力の最大値を押さえることができること，また，(3)張力導入手順の違いにより張力導入後の応力分布が異なること，さらには(4) 1週間放置することにより，応力分布の不均一性が緩和されること，などを解析的に予想した。しかしながら，本研究の解析による推定の妥当性については，実験による検証が必要であることは言うを待たない。今後は，より精度の高い施工手順解析に関する研究が必要とされる。

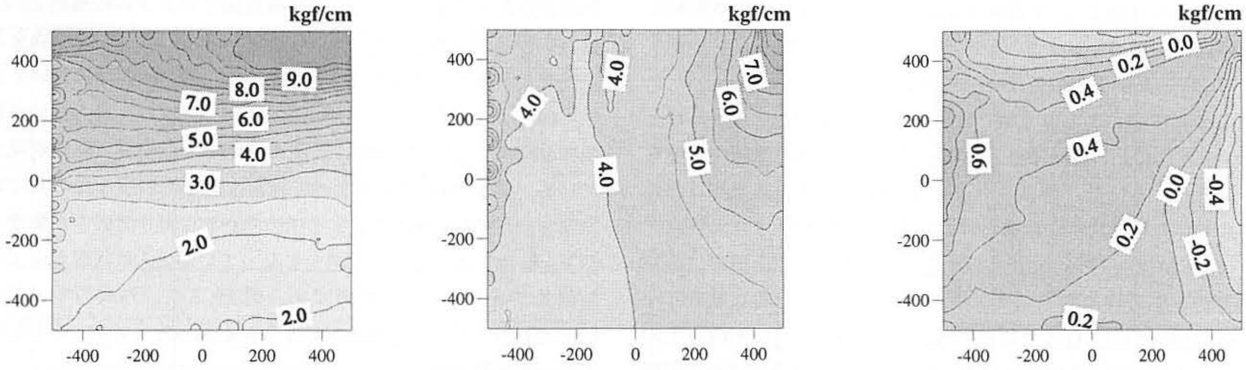
7．結語

本報告では，(1)膜構造の施工に注目し，繰り返し強制ひずみを受ける膜材料の応力緩和試験を行い，繰り返し載荷することで応力緩和量を減少させることができることがわかった。織構造格子モデルを構成する部材の諸定数の推定にあたり，(2)粘性に関する諸定数の基準となる第1近似値を求める手法を提案した。また，(3)より精度よく実験結果をシミュレート可能な諸定数を求めるために，既報においては繰り返しの試行を行ってきたが，本報では遺伝的アルゴリ



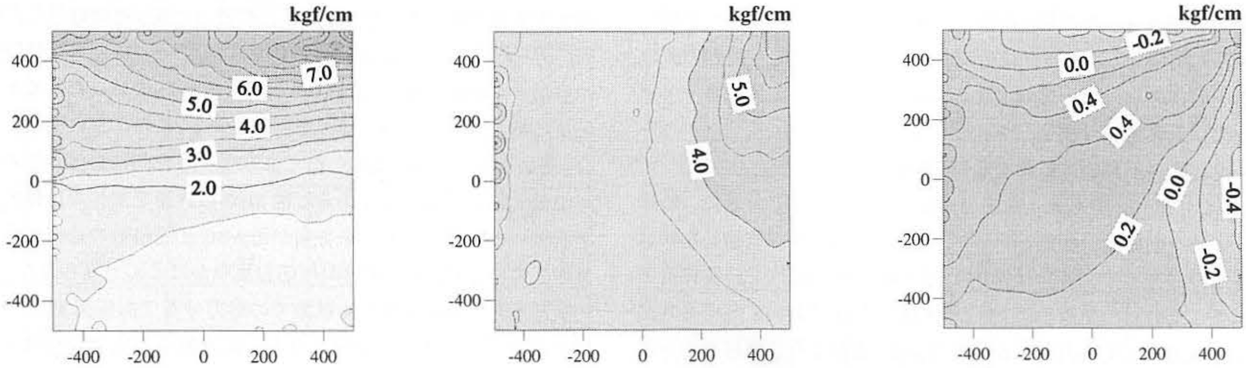
(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

図24　対角軸に対称な載荷；最大引張応力が発生した状態



(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

図25　対角軸に対称な載荷；外周をすべて固定した状態



(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

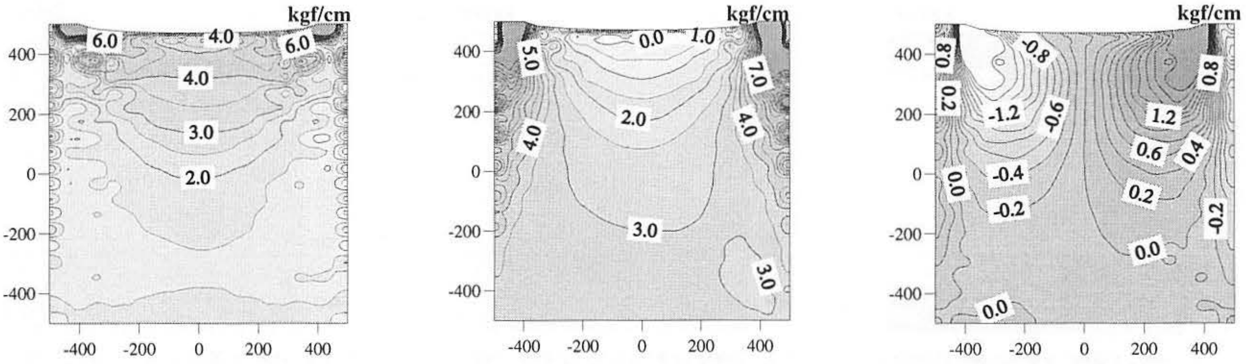
図26　対角軸に対称な載荷；1週間後状態

ズムを用いた手法を示し，よりよい値を求めることが可能となった。(4) 6要素Voigtモデルを導入した織構造格子モデルを用いることにより，4要素Voigtモデルを導入した場合に比べ，膜材料の応力緩和特性をより精度よく表現できることを示した。また，繰り返し強制ひずみを受ける応力緩和試験結果のシミュレートも行い，応力の緩和量に差異が見られた。より精度よく応力緩和特性を表現するにはさらなる織構造モデルの改善が必要となる。

さらに，施工時の張力導入手順を考慮し，載荷手順の違いが内部に発生する応力にどの程度影響を与えるかを調べるために，まず，(5)構成方程式を用いて，強制ひずみの与え方と張力導入にともなう時間経過の影響を調べた。その結果，張力導入手順によらず，発生応力はほぼ同一であったが，時間経過を考慮することにより，強制ひずみを与えた直後の状態で発生する応力が小さくなることと，載荷の手順の違いよって，先に高応力に達するものほどわずかではあるが1週間後の残存応力は小さくなった。また，(6)実際の施工手順を模擬した応力・変形解析を行うことにより，応力集中が生じていることを解析的に予想するとともに，その手順の違いにより発生する最大応力が違うことと，張力導入後の応力分布が全く違うこと，さらには1週間放置することにより，応力分布の不均一性が緩和されることを示した。

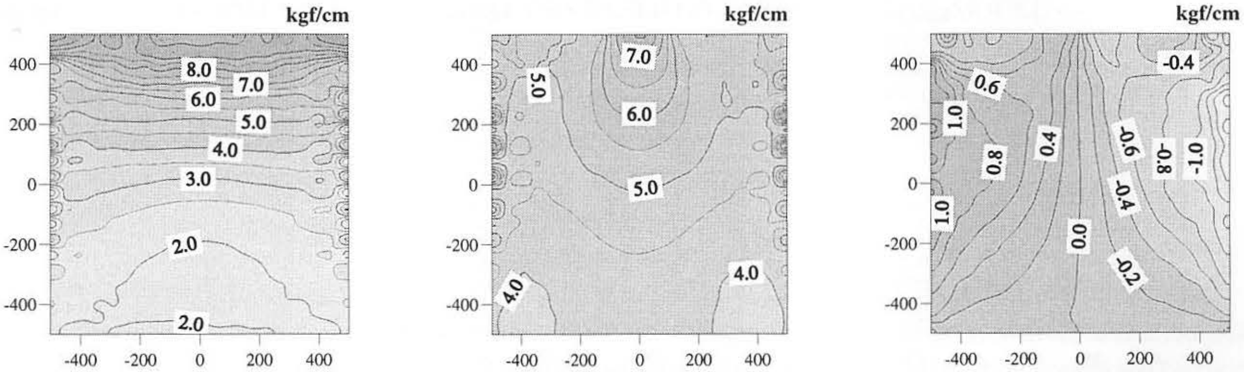
謝辞

研究の遂行にあたり貴重な示唆を頂いた横浜国立大学教授石井一夫博士，また，全面的にご支援をいただいた太陽工業空間技術研究所前所長戸田郁也氏，実験を行うにあたり貴重な示唆を頂いた同副所長小田憲史博士，同課長豊田宏博士に感謝いたします。



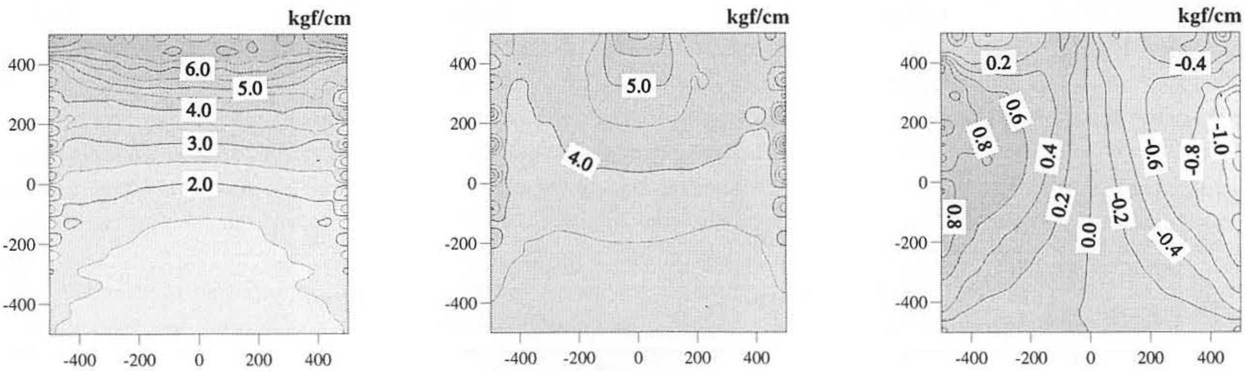
(a) たて糸方向応力分布　(b) よこ糸方向応力分布　(c) 剪断応力分布

図27 Y軸（よこ糸方向）に対称な載荷；最大引張応力が発生した状態



(a) たて糸方向応力分布　(b) よこ糸方向応力分布　(c) 剪断応力分布

図28 Y軸（よこ糸方向）に対称な載荷；外周をすべて固定した状態



(a) たて糸方向応力分布　(b) よこ糸方向応力分布　(c) 剪断応力分布

図29 Y軸（よこ糸方向）に対称な載荷；1週間後状態

本研究は，平成9年度能村膜構造技術振興財団の研究助成（代表者：加藤史郎）を受けて実施された成果であり，かつ，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・クリープ特性に関する構成則ならびに構成則の骨組み膜構造への応用」として実施されたものである。ここに能村膜構造技術振興財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 西川　薫，石井一夫，達富浩：構造用膜材料の荷重－歪特性と構造モデル，膜構造研究論文集'88，PP.39～50，1988年12月

2) 南　宏和：PTFEコーティング・ガラス繊維布（膜材料A種）の非線形伸張曲線への多段階線形近似とその応用，日本建築学会構造系論文報告集，第436号，pp.13～19，1992年6月

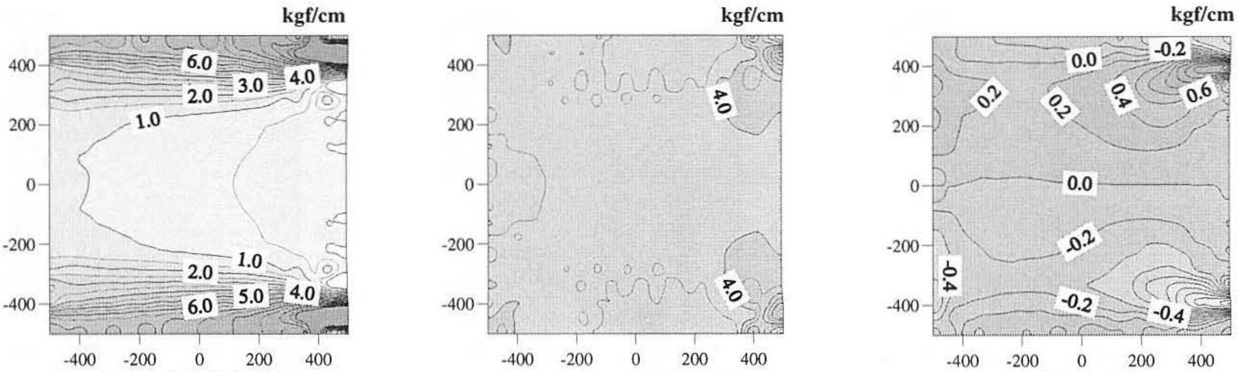
3) 石井一夫：膜構造用膜材料概説，膜構造研究論文集'92，No.6，pp.91-119，1992年12月

4) 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

5) 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

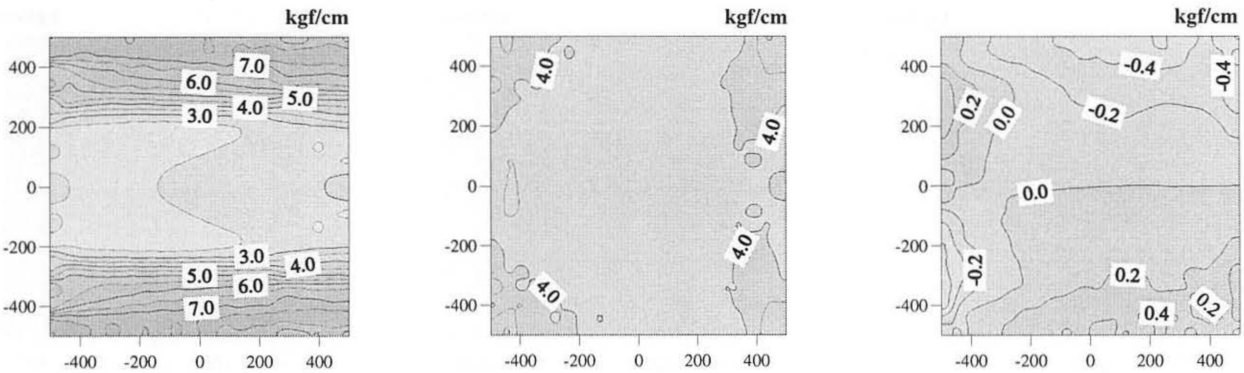
6) 斎藤公男，田中耕太郎：張力膜初期曲面形成の為の縮少率の設定について，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1183-1184，1989年10月

7) 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



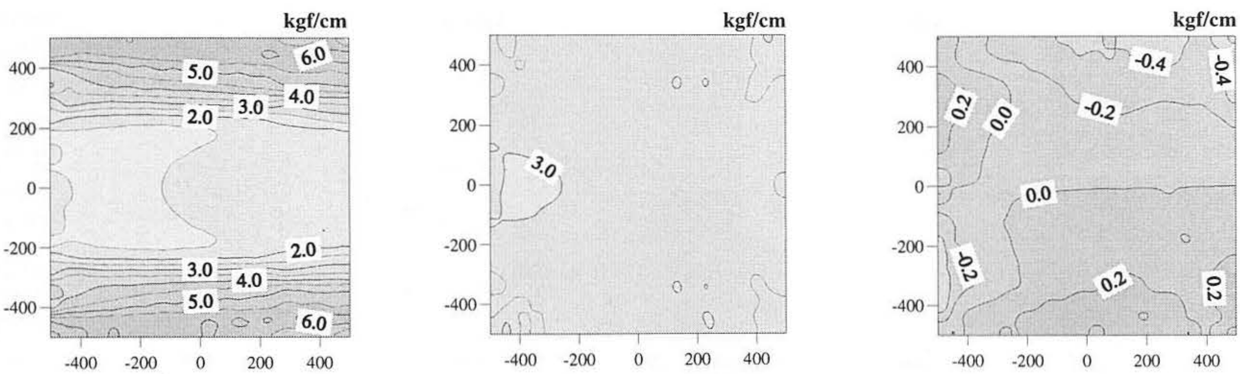
(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

図30　X軸（たて糸方向）に対称な載荷；最大引張応力が発生した状態



(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

図31　X軸（たて糸方向）に対称な載荷；外周をすべて固定した状態



(a)　たて糸方向応力分布　(b)　よこ糸方向応力分布　(c)　剪断応力分布

図32　X軸（たて糸方向）に対称な載荷；1週間後状態

本建築学会論文報告集，第408号，pp1-9, 1990年2月
8) 小竹達也，菊嶋 誠，西川 薫：膜材の織布特性を考慮した縮小率の設定方法，膜構造研究論文集'96, No.10, pp.71～78, 1996年12月
9) 南宏和，山本千秋，瀬川信哉，河野義裕：応力緩和後およびクリープ後の膜の弾性応答解析に適合する応力－ひずみ曲線の測定法，膜構造研究論文集'97, No.11, pp.23～29, 1997年12月
10) 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式の提案－，膜構造研究論文集'94, No.8, pp.11～26, 1994年12月
11) 加藤史郎，吉野達矢，武田文義，小野智子：織構造格子モデルの構成則の検証－日本膜構造協会の試験法による実験結果との比較－，膜構造研究論文集'96, No.10, pp.1～16, 1996年12月
12) (社) 日本膜構造協会：膜材料弾性定数試験方法(MSAJ/M-02-1995)
13) 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，膜構造研究論文集'95, No.9, pp.9～21, 1995年12月
14) 加藤史郎，南 宏和，吉野達矢，並田忠政：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－，膜構造研究論文集'96, No.10, pp.29～43, 1996年12月
15) 南 宏和，山本千秋，瀬川信哉，河野義裕：多段線形近似による膜の材料非線形解析のための弾性パラメタ算定法，膜構造研究論文集'96, No.10, pp.45～51, 1996年12月
16) 瀬川信哉：膜材料の材料非線形性に関する実験的研究，博士論文，1996年3月
17) 加藤史郎，吉野達矢，小野智子，南 宏和，瀬川信哉：織構造格子モデルによる膜構造の粘弾塑性解析，膜構造研究論文集'97, No.11, pp.1～12, 1997年12月
18) 古川知成，矢川元基：連続探索空間のための遺伝的アルゴリズムとその非線形逆問題への応用，日本機械学会論文集（A編），61巻，586号，1995年6月
19) H.J.Schock：Some general Remarks on the Structural Behavior and Load-Extension Characteristics of Coated Fabrics with Special Reference to PTFE Coated Glass Fiber Fabric, Proc. of the Structural Congress '89, Applications of Tension Structures ASCE, San Francisco, pp. 21～30, 1988.5

VISCO-ELASTO-PLASTIC STRESS-DISPLAYCEMENT ANALYSIS OF MEMBRNE STRACTURES FOR SIMULATING CONSTRUCTION PROCESS

- FORMULATION AND ANALYSIS BASED ON FABRIC LATTICE MODEL -

Shiro Kato[*1]
Tatsuya Yoshino[*2]
Hirokazu Minami[*3]
Shinya Segawa[*4]

SYNOPSIS

The present study aims to make clear the influences of several initial loading processes under construction on the distributions of stresses and on the configurations from a view point that there will arise some important irregularities in stresses and geometries if proper understanding of viscous characteristics and stress-starin relationships of fabric materials is not taken during construction. Fist, the formulation of Fabric Lattice Model with 6-parameter Voigt model is described considering the components in the Fabric lattice model.

Second, relaxation tests performed to obtain fundamental data of small square pieces under cyclic loading are briefly explained. These experimental results have revealed that the initially introduced stresses are much decreased in all test cases due to relaxation but that repeated retensioning after stress relaxation has much improved the stress reduction. The data are also utilized to identify the elasto-plastic constants and viscous parameters of the components in the Fabric Lattice Model.

Third, the constitutive equations for both elasto-plastic and viscous behaviors are simulated based on the identified parameters. And the simulated ones are compared with the experiments. A very fine agreement is reported between the simulation and experiment.

Finally, the construction processes introducing initial tension into a 10m by 10m flat fabric membrane is studied on how the process influences the stress distributions and the strained fabric during several kinds of introducing processes.

*1 Prof., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.
*2 Graduate Student, Dept. of Mechanical & Structural Eng. Systems, Toyohashi Univ. of Tech., M. Eng.
*3 Assistant general manager, Center for space structures research, Taiyo Kogyo Corporation (Guest Prof., Toyohashi Univ. of Tech.), Dr. Eng.
*4 Center for space structures research, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.