

織構造格子モデルによる膜構造の粘弾塑性解析

—実験と解析との比較—

加藤史郎^{*1}
吉野達矢^{*2}
小野智子^{*3}
南 宏和^{*4}
瀬川信哉^{*5}

膜は応力・ひずみ関係に強い非線形性を示すと同時に粘性による時間依存的な変形挙動を併せ持つ複雑な材料である。著者らはこうした膜材料の特性を表現するために織構造格子モデルに4要素Voigtモデルを援用し粘弾塑性増分型構成方程式を定式化した。また幾何学的非線形性を考慮した応力・変形解析を行なうために8節点アイソパラメトリック要素を用いたFEM解析手法を提案してきた。

そこで本報ではFEM解析に粘弾塑性増分型構成方程式を導入し応力・変形解析を行う。解析は、弾塑性織構造格子モデルによる膜の弾塑性解析と粘弾塑性織構造格子モデルによる膜の粘弾塑性解析について実施する。さらに双方の解析結果を既存の変形実験と比較し膜の弾塑性および粘弾塑性挙動に対する織構造格子モデルの有用性を検討する。

1. 序

構造物に用いられる膜材料は、織布にコーティングを施した複合材料であり、その応力・ひずみ関係は強い非線形性を示す。非線形性を示す要因としては、織布の特性であるクリープ交換によって発現する幾何学的非線形性と、織布材料が持つ材料非線形性がある。さらにコーティング材に存在する粘性の影響により、時間依存性の複雑な挙動が現われる。

膜材料の非線形性を考慮し、応力・変形解析を行なうことを目的とした研究はそれほど多くはない。石井¹⁾は、膜材料を平面弾性体としてではなく織布とコーティング材の複合要素として扱い、解析に取り入れる方法を概説している。また、西川・石井²⁾は織布特性を考慮した応力・変形解析法について述べている。最近では、織布にコーティングを施した膜材料を単一の連続体とみなし、多段線形近似を手法を適用した南³⁾の研究がある。

一方、変形の時間依存性の要因の一つである粘性特性は、応力緩和による張力減少や、常時膜応力によるクリープひずみとしてあらわれる。クリープや応力緩和は、形状変化やしわの原因となるため、

これらの粘性特性の把握は重要な研究課題である。粘性特性に関する研究には次のものがある。南⁴⁾は、膜材A種およびC種の粘性特性の把握のためにクリープおよび応力緩和試験を行ない、挙動の分析を行なっている。瀬川⁵⁾は、クリープひずみを応力・ひずみ関係から分離する手法を提案し、FEM解析に適用している。また、瀬川は載荷中に荷重の状態を保持したまま放置してクリープひずみを発生させる繰り返し実験を行ない、実験結果と解析結果の比較から手法の妥当性を検討している。小竹・西川⁶⁾は、粘性特性を取り入れた膜材料の縮小率の設定法を提案している。

著者らは先に、H.J.Schockにより提案された格子モデル⁷⁾を拡張した織構造格子モデル⁸⁾を提案し、これに基づいて構成方程式を誘導した。織構造格子モデルは、膜材料を構成する織布とコーティング材を3次元トラスに置換したものであり、モデルの幾何形状によってクリープ交換、すなわち幾何学的非線形性を表現し、トラス部材の履歴特性によって材料非線形性を表現する。文献9)において、モデルを構成する部材の材料定数を1軸・2軸引張試験およびせん断試験結果から推定した。さらに、織構造格子モデルに基づく

*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 機械・構造システム工学専攻 大学院生 工修

*3 豊橋技術科学大学 建設工学専攻 大学院生

*4 太陽工業(株)空間技術研究所 副所長 (豊橋技術科学大学建設工学系客員教授) 工博

*5 太陽工業(株)空間技術研究所 主幹研究員 工博

構成方程式が1軸・2軸引張試験およびせん断試験の応力・ひずみ関係を表現できることを確認している。

次に、膜材料の示すクリープ・応力緩和などの時間依存性を表現するため、織構造格子モデルを構成するトラス材に4要素Voigtモデルを援用し、粘性特性を考慮した弾塑性構成方程式¹⁰⁾に拡張した。粘性に関する諸定数の推定を行なうため、南らのクリープおよび応力緩和試験⁴⁾を援用した。提案したモデルによる解析結果を実験結果と比較して、手法の妥当性と応用性を示した。これら一連の織構造格子モデルに関する研究によって、著者らは膜材料の応力・ひずみ関係や粘性挙動を表現しうる構成方程式を提案してきた。さらに8節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法に構成方程式を導入し、形状解析や応力・変形解析を進めた。例題として初期張力を導入したHP膜の応力・変形解析¹¹⁾を行ない、その結果から、積雪荷重の載荷・除荷後に張力減少や残留ひずみが発生することを確認した。このような傾向は実際の膜にも現われるものと思われるが、実験との比較については言及していなかった。

そこで、本研究では、織構造格子モデルの構成方程式を8節点アイソパラメトリック要素に導入して、(1)弾塑性織構造格子モデルによる膜の応力・変形解析および(2)粘弾塑性織構造格子モデルによる膜の応力・変形解析を行う。また、(3)南らの正方形平面膜に短時間で空気圧を与えた実験³⁾を時間依存性の少ない非粘性的な実験とみなし、(1)の解析結果と比較する。また、(4)正方形平面膜を空気圧で載荷し、載荷途中で荷重状態を保持したまま放置してクリープひずみを発生させる瀬川の繰り返し実験⁵⁾を引用し、(2)の解析結果と比較する。これらの既存の変形実験との比較から、膜の挙動に対する織構造格子モデルの有用性を検討する。

2. 粘性特性を考慮した増分型構成方程式の概略

既報⁹⁾において誘導した織構造格子モデルによる増分型構成方程式の概略を述べる。

織構造格子モデルは、図1に示す3次元トラス要素である。たて

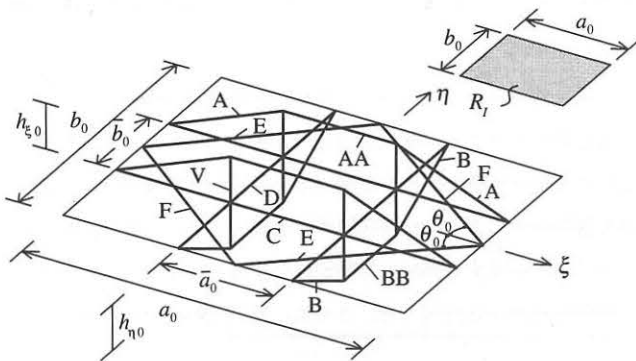


図1 織構造格子モデル

糸方向を ξ 、よこ糸方向を η とする ξ - η 座標系を用いる。この単位要素は、糸材の挙動を表す部材(A, AA, B, BB), コーティング材の挙動を表す部材(C, D, E, F, R₁), クリンプ交換を表す束材(V)によって構成されている。膜材料の粘性挙動を表すために、織構造格子モデルのトラス材(C, DおよびV)に、図2の4要素Voigtモデルを導入する。

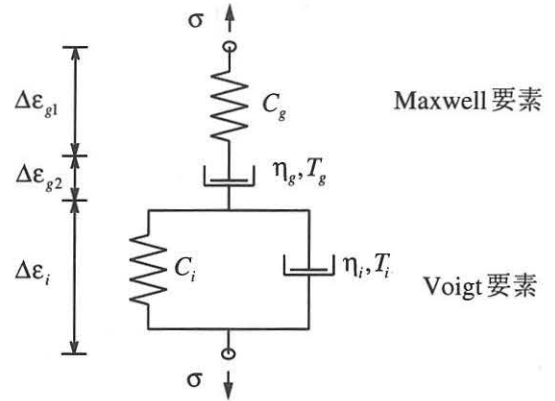


図2 4要素Voigtモデル

ここで C_g は各部材の区分的弾性定数 E_g の逆数、即ち $C_g=1/E_g$ であり、弾塑性特性を支配する定数である。また、 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。 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。

ここで、膜材料の弾塑性成分と粘性成分は互いに独立していると仮定する。Maxwell要素のばねで部材の弾塑性特性を表し、粘性はMaxwell要素のダッシュポットとVoigt要素で表すこととする。

2-1 4要素Voigtモデルの増分型構成方程式

織構造格子モデルの各部材に対する時刻 Δt 後の増分型構成方程式は、式(1)として表される。

$$\Delta\sigma = E_T\Delta\varepsilon + f \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon$ は4要素Voigtモデル全体の増分ひずみである。本研究では膜材料の粘性特性と弾塑性特性を独立のものとして仮定しているため、 $\Delta\varepsilon$ は各要素のひずみ成分の和として式(2)のように表される。

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{g1} + \Delta\varepsilon_{g2} + \Delta\varepsilon_i \quad (2)$$

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

また、

$$E_T = \left[C_g + \frac{C_g}{2} T_g \Delta t + \left(1 - \frac{T_i}{\Delta t} + \frac{T_i}{\Delta t} e^{-\frac{\Delta t}{T_i}}\right) C_i \right]^{-1} \quad (3)$$

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

ここで、 $\Delta t \rightarrow 0$ とすると、式(1)は式(4)の単純Maxwell要素のばねの支配方程式となり、粘性を考慮しない場合の構成方程式として用いることができる。

$$\Delta \varepsilon = C_g \Delta \sigma \quad (4)$$

2-2 織構造格子モデルの構成方程式

織構造格子モデルによる膜要素の構成方程式の誘導は、文献9に詳しく述べられている。

誘導の大まかな流れは次のようにまとめられる。

- [1] 単位要素の幾何学的関係から各部材の増分ひずみを求める。
- [2] 部材の増分ひずみおよび式(1)を用いて各部材の増分後の軸力を求める。
- [3] 仮想仕事の原理を適用して、式(5)の構成方程式を導く。

$$\begin{Bmatrix} N_\xi \\ N_\eta \\ N_{\xi\eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_\xi \\ \Delta \varepsilon_\eta \\ \Delta \gamma \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N_{\xi 0} \\ N_{\eta 0} \\ N_{\xi\eta 0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{N}_{\xi 0} \\ \bar{N}_{\eta 0} \\ \bar{N}_{\xi\eta 0} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式(5)は、たて糸方向およびよこ糸方向の増分ひずみ $\Delta \varepsilon_\xi$, $\Delta \varepsilon_\eta$ とせん断増分ひずみ $\Delta \gamma$ のみであらわされる増分型の構成方程式である。

2-3 4要素Voigtモデルのパラメータ推定

4要素Voigtモデルの構成方程式の誘導において、織構造格子モデルを構成するトラス材の力学的特性のうち、弾塑性挙動は

Maxwellばね要素、粘性挙動はMaxwell要素のダッシュポットおよびVoigt要素であらわされると仮定する。

弾塑性特性に関する諸定数は、1軸・2軸引張試験結果およびせん断試験結果の応力・ひずみ関係を用いて推定される。推定法は、既報⁹⁾に詳しく述べた。試験結果の応力・ひずみ関係には、常に粘性の影響が存在しているため、推定によって得られた定数にも粘性の影響が含まれることになる。引張試験結果に現われる粘性の影響を調べるために、引張速度をパラメータとする2軸引張試験を行なった¹⁰⁾。その結果から、著者らは引張速度4 mm/minで行なわれる引張試験結果の応力・ひずみ関係を時間に依存しない静的な挙動とみなしうると判断した。引張速度4 mm/minは従来の引張試験で採用されてきた値であり、織構造格子モデルの弾塑性特性に関する諸定数の推定に用いた1軸・2軸引張試験も同じ引張速度で行なわれている。従って、既報⁹⁾で推定した織構造格子モデルの弾塑性特性に関する定数を、時間に依存しない非粘性的な挙動を表すものとみなす。弾塑性特性に関する諸定数の推定値⁹⁾を表1に示す。

文献9において、表1の推定値を用いて1軸および2軸引張試験の非粘性的な繰返し載荷をシミュレートし、著者らの実験結果⁹⁾と比較した。それによって、織構造格子モデルの構成方程式が非粘性的な応力・ひずみ関係を十分な精度で表現できることは、すでに確認されている。

一方、ガラス繊維で作られている糸材が粘性特性を強く持たないこと、さらに応力緩和、クリープ現象といった粘性特性が、張力3 kgf/cm程度の低応力域で顕著であることなどから、膜材料の粘性特性は主にコーティング材によるものであると考えられる。また、織構造格子モデルにおいて、コーティング材の特性を表す部材のうち伸び作用に抵抗するのは主に部材C、Dであること、クリップ交換はたて糸とよこ糸の相互作用であるが、糸材間に侵潤したコーティング材の影響も含んでいると想定できることなどから、文献10)では粘性特性を部材C、DおよびVに導入することとした。部材C、D、Vの粘性特性を表す諸定数を表2に示す。

表2に示した諸定数の推定法は、文献2に詳細を述べた。このパラメータを用いて実験のシミュレーションを行なったところ、南

表1 弾塑性特性に関する諸定数の推定値

| Element | $a_{0,2}$ (cm^2) | l_0 (cm) | E_1 (kgf/cm) | E_2 (kgf/cm) | E_3 (kgf/cm) | ε_{y1} (%) | ε_{y2} (%) | n | m_1 | m_2 |
|---------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------|-------|-------|
| A | 0.0016/2 | 0.0470 | 28550 | 28550 | 2855000 | 0.00 | 0.30 | - | - | - |
| AA | 0.0016/2 | 0.0458 | 28550 | 28550 | 2855000 | 0.00 | 0.30 | - | - | - |
| B | 0.0016/2 | 0.0371 | 28550 | 28550 | 2855000 | 0.00 | 0.30 | - | - | - |
| BB | 0.0016/2 | 0.0333 | 28550 | 28550 | 2855000 | 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) | 0.35 (-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 | - | - | - | - |

| Element | $a_{0,2}$ (cm^2) | 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 |

による実験曲線³⁾をほぼ表現できることが確認された。

表2 粘性特性に関する諸定数の推定値

| Element | T_g (min) | C_i (cm^2/kgf) | T_i (min) |
|---------|----------------|-------------------------|----------------|
| C | 7000.0 | 0.000017 | 25.0 |
| D | 6000.0 | 0.000021 | 25.0 |
| V | 20000.0 | 0.000120 | 50.0 |

3. 弾塑性繊維構造格子モデルによる応力・変形解析

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繊維構造格子モデルの構成方程式を導入し、応力・変形解析を行う。ここでは粘性特性は導入せず、時間変化を考慮しない非粘性的な挙動を解析する。解析結果と実験結果を比較することにより、繊維構造格子モデルがどの程度膜構造物の弾塑性的な力学挙動を表現しているかを検討する。ただし、対象とする実験結果には南らの実験³⁾を用いるものとする。

3-1 解析対象

実験は、一辺40cmの正方形平面膜の四辺の全方向を固定し、空気圧を与えるものである。加圧のために供試体と同じ大きさのスチール製正方形容器が用いられた。容器の天面は開放されており、供試体はこの開口部に取り付けられた。供試体の周辺は、押さえプレートによって固定され密閉された。載荷は、1500mmAqの空気圧を3回載荷するものであり、図3のような手順で行われた。

載荷速度は、通常の2軸試験による載荷速度とほぼ同程度になるように設定されている。そのため、本研究ではこの実験を時間依存性の少ない非粘性的な実験とみなし、粘性要素を考慮しない応力・変形解析の対象とした。試験体中央部の鉛直変位がダイヤルゲージによって測定された。南の平面膜実験では、試験体は接合部やしわを持たず、初期たわみも正確にゼロに設定されており、膜材料の変形特性が精密に測定されている。実験は、室温23.5℃の環境下で実施された。なお、この実験に用いられた膜材料と繊維構造格子モデルの材料定数推定の対象とした実験に用いられた膜材料とは、同一の

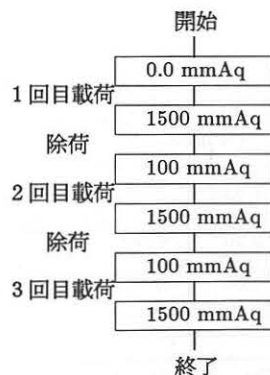


図3 載荷手順

PTFEコーテッド平織物を使用しているが、ロットが異なることを断っておく。

3-2 解析モデル

解析モデルを図4に示す。実験における試験体形状と荷重の対称性から、解析モデルは1/4モデルとした。モデルは、たて糸方向をX方向、よこ糸方向をY方向となるように配置した。境界条件は、外周の節点は全方向を固定し、X軸上の節点はY方向を、Y軸上の節点はX方向を固定した。また、その他の内部の節点はすべて自由とした。固定された外周の隅角部は要素を細かく設定した。要素数は18、節点数は73である。載荷は、まず(1)1500mmAqの空気圧を載荷し、ついで(2)100mmAqまで除荷する。この工程を1サイクルとして3サイクル繰り返すこととした。また、実験は初期張力をゼロとして行なわれているが、解析では、面外剛性を持たせるため、荷重載荷時に発生する最大応力に対して十分に小さい0.01kgf/cmの初期張力を導入している。なお、数値積分には2×2のガウス積分を用いた。

3-3 解析結果

図4の節点aでの荷重・変位関係を図5に示す。太い実線が解析結果を、細い実線が実験結果を示している。また、表3に各回載荷及び除荷時の変位量を示す。

異なるロットによる比較ではあるが、解析結果は、実験結果の傾向をよく表している。特に、1回目載荷時の荷重1000mmAq付近までは十分に実験結果を表現している。解析結果は約1000mmAq以降に急激に勾配が大きくなり実験結果から離れていくが、傾向的には載荷時だけでなく除荷時の実験結果もよく追跡できているといえる。1回目の最大荷重時における実験と解析の変位差は、0.24cmとなった。

図6に解析結果の応力分布図を示す。積分点1、2および3は、それぞれ解析結果のたて糸方向、よこ糸方向およびせん断応力の最

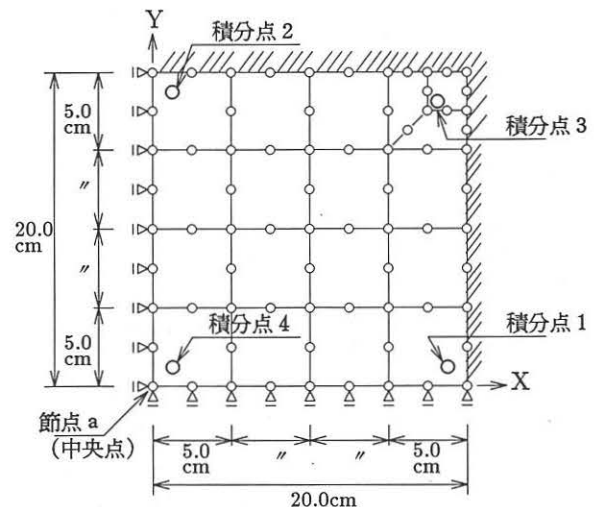


図4 解析モデル (粘性なし)

大応力点である。積分点4は節点aにもっとも近い積分点である。

たて糸方向の応力の等高線は糸方向にほぼ平行に分布しているがよこ糸方向の応力の等高線は中央部付近でたて糸の応力の影響を受け、曲線的な分布になっている。また、たて糸方向、よこ糸方向ともに全固定された境界付近に最大応力が生じていることが分かる。最大せん断応力は、全固定された隅角部に生じている。

図7に、各積分点の応力・ひずみ関係と積分点1～3の低応力・

表3 実験と解析の変位量の比較

[単位: cm]

| | 最大荷重時 | | | 除荷時 | | |
|-----|-------|------|------|------|------|------|
| | 実験 | 解析 | 変位差 | 実験 | 解析 | 変位差 |
| 1回目 | 3.31 | 3.06 | 0.24 | 2.42 | 2.33 | 0.09 |
| 2回目 | 3.35 | 3.06 | 0.28 | 2.58 | 2.34 | 0.24 |
| 3回目 | 3.36 | 3.06 | 0.29 | - | - | - |
| 最大値 | 3.36 | 3.06 | 0.29 | 2.58 | 2.34 | 0.24 |

低ひずみ部分の拡大図を示す。○印は最大荷重時の応力・ひずみを×印は除荷時を示している。さらに、△印は1回目荷重における荷重1000mmAqの時の応力・ひずみである。図中の(1), (2), (3)はそれぞれ1回目荷重における荷重400mmAq, 800mmAq, 1200mmAqの時の応力・ひずみである。

図7(a)は1500mmAq荷重時にたて糸方向の応力が最大となる積分点(積分点1)での応力・ひずみ曲線である。たて糸方向の最大応力は10.1kgf/cmであった。このときのよこ糸方向の応力は1.1kgf/cmで応力比はほぼ9.2:1.0であり、この応力比は荷重中ほぼ保たれていた。このように、積分点1における応力比は常にたて糸方向が大きく、荷重の全過程においてたて糸方向の応力が支配的であることがわかった。また、応力・ひずみ曲線の形状から、たて糸方向の応力は△点付近から糸材の応力負担の割合がコーティング材に比べて大きくなる応力域に入っていることがわかる。よこ糸方向

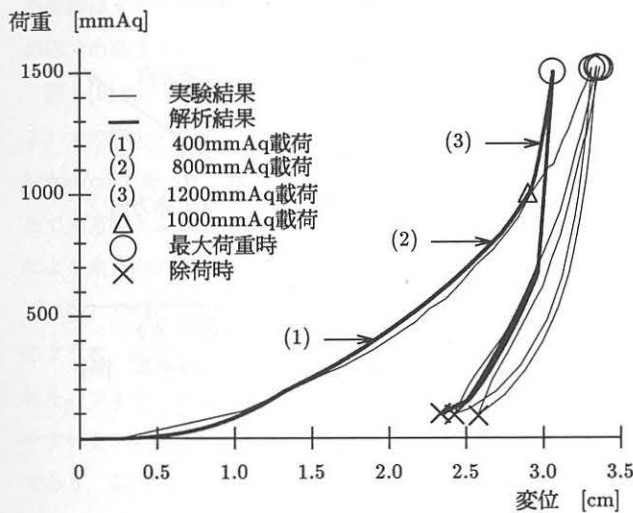
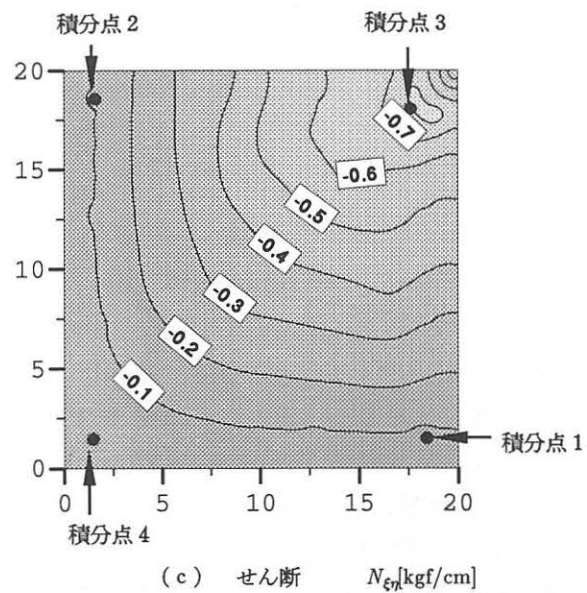
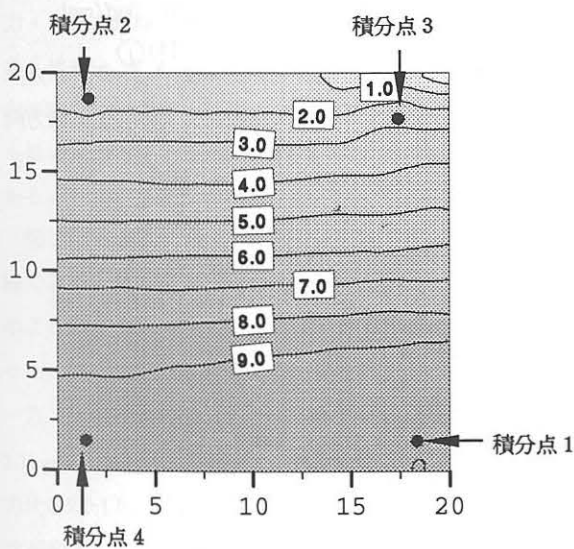


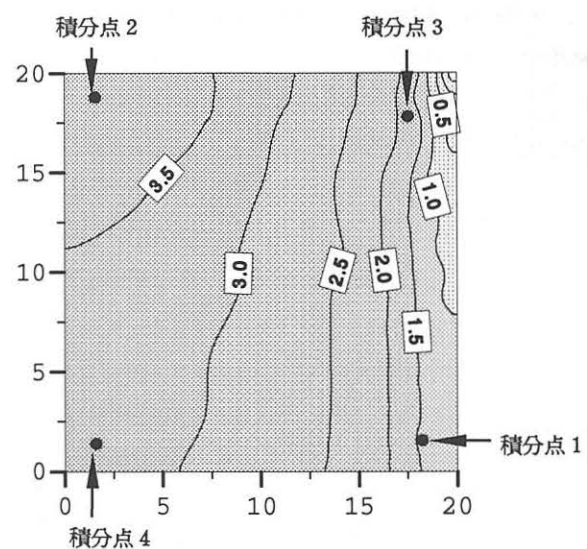
図5 荷重・変位曲線(粘性なし)



(c) せん断 N_{τ} [kgf/cm]

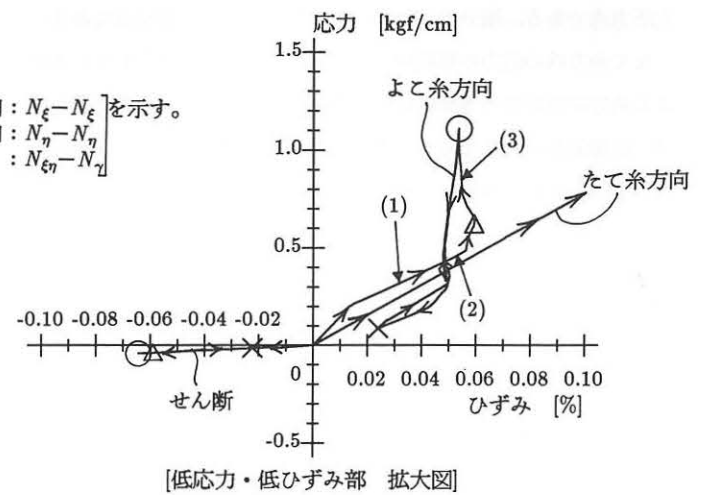
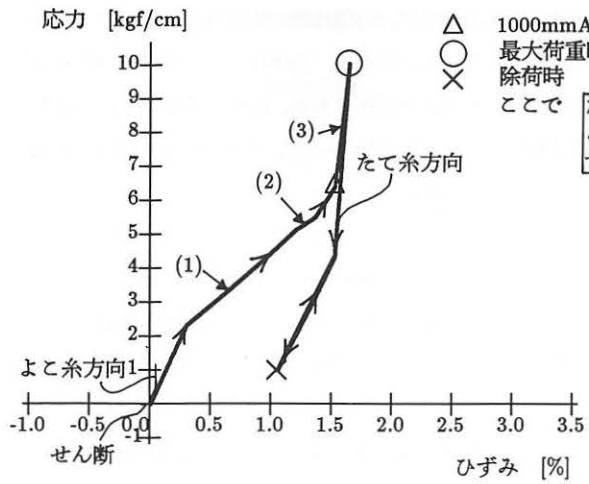


(a) たて糸方向 N_{ξ} [kgf/cm]

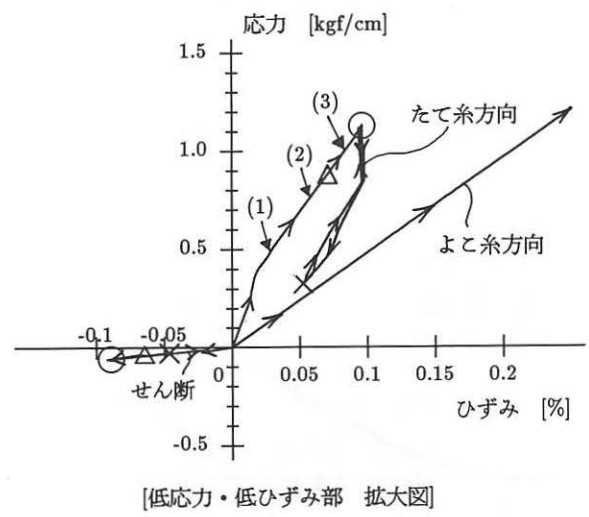
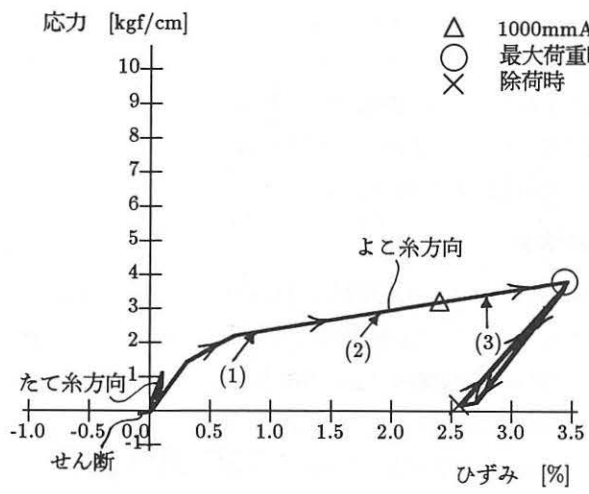


(b) よこ糸方向 N_{η} [kgf/cm]

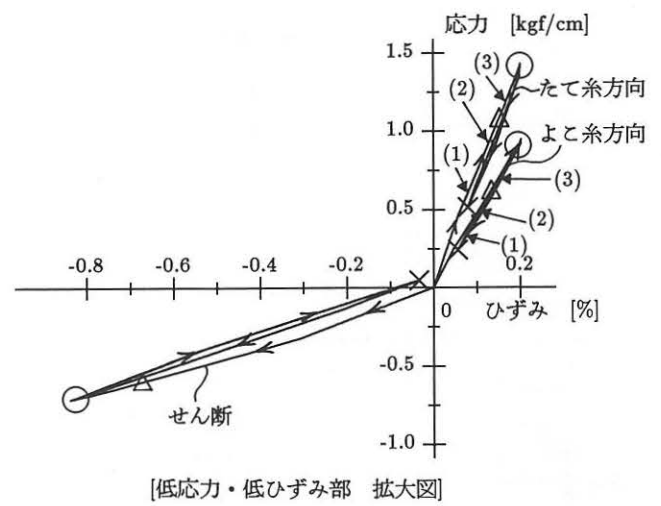
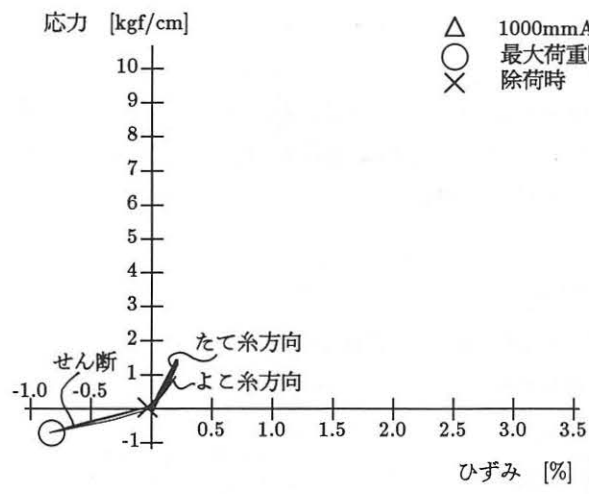
図6 応力分布図 (粘性なし)



(a) 積分点 1

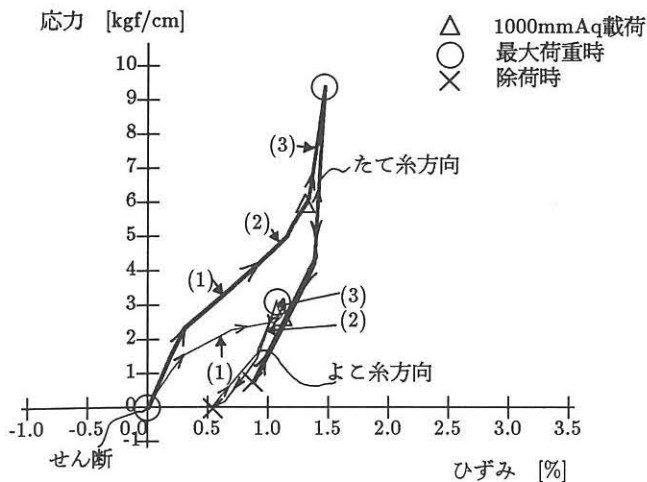


(b) 積分点 2



(c) 積分点 3

図 7 - 1 各積分点での応力・ひずみ関係 (粘性なし)



(d) 節点 a に最も近い点 (積分点 4)

図 7-2 各積分点での応力・ひずみ関係 (粘性なし)

の曲線はクリンプ交換による縮みの挙動を示しており、たて糸方向の応力の高さを表している。

図 7(b) は同様によこ糸方向の応力が最大になる積分点 (積分点 2) での応力・ひずみ曲線である。よこ糸方向の最大応力は 3.8kgf/cm であった。このときのたて糸方向の応力は 1.1kgf/cm で、たて糸方向とよこ糸方向の応力比は $1.0 : 3.5$ であった。荷重中は常によこ糸方向の応力がたて糸方向を上回っている。しかし、除荷点 (×印) での応力比は各サイクルにおいて $2.0 : 1.0$ と逆転した。このように、荷重中の荷重レベルにより、応力比に多少の変化がみられた。つまり、よこ糸方向の挙動はたて糸方向の挙動の影響を受けやすいといえる。よこ糸方向の最大応力は 4.0kgf/cm 以下と低応力であり、応力・ひずみ曲線の形状からもコーティング材の応力負担域にあることが推察できる。

図 7(c) は、せん断応力が最大となる積分点 (積分点 3) での応力・ひずみ曲線である。最大せん断応力は -0.7kgf/cm であり、大きくはない。このときのたて糸方向の応力は 1.5kgf/cm 、よこ糸方向の応力は 0.9kgf/cm と最大せん断応力を上回っているが、いずれも低い値であり、隅角部にはあまり応力が発生していないことがわかる。

図 7(d) は試験体の中央に最も近い積分点 4 での応力・ひずみ曲線である。最大応力はたて糸方向で 9.4kgf/cm であった。このときによこ糸方向の応力は 3.1kgf/cm であり、ほぼ $3.0 : 1.0$ の応力比となった。せん断応力は -0.007kgf/cm であり、ほとんどゼロに近い。一方、(1)点での応力はたて糸方向で 3.2kgf/cm 、よこ糸方向で 2.1kgf/cm であり、応力比は $1.3 : 1.0$ であった。同様に、(2)点での応力比は $2.0 : 1.0$ 、(3)点では $2.5 : 1.0$ であり、荷重の上昇に従って応力比が変化した。荷重約 1000mmAq 付近から、たて糸方向およびよこ糸方向の挙動において、特に注目すべき変化が現われている。具体的には、(a) よこ糸方向の応力増分に比べてたて糸方向の応力増分が

大きいことから、たて糸方向のクリンプがよこ糸方向にクリンプ交換によって移り、よこ糸方向のひずみを減少させている。また、(b) たて糸方向の応力・ひずみ関係は急激な勾配へ変化している。これらの原因としては次に示すことが考えられる。約 1000mmAq 程度の外力に対して、よこ糸方向に発生した応力は約 2.5kgf/cm と小さいため、その応力のほとんどすべてをコーティング材で負担している。しかし、たて糸方向は約 6.0kgf/cm 程度あり、著者らのモデル化でいうところの糸の緩みおよび束材のギャップが解消したと考えられる。このため、さらには糸材の剛性がコーティング材のそれらに比べて大きいことを考慮することによって、たて糸方向の応力の増分はほとんど糸材が負担することになり、糸材の高剛性が現われ、変形が抑制されるものと考えられる。

4. 粘弾塑性織構造格子モデルによる応力・変形解析

本節では、表 1 の弾塑性特性に関する諸定数に加え、表 2 の粘性定数を用い、粘性を考慮した場合の応力・変形解析を行う。解析対象は瀬川の実験⁵⁾とする。解析結果と実験結果を比較することにより、織構造格子モデルがどの程度、膜構造物の粘弾塑性的な力学挙動を表現しているかを検討する。

4-1 解析対象

実験⁵⁾は、一辺 218.0cm の正方形平面膜の四辺を全方向を固定し、空気圧を与えるものである。膜平面に空気圧を与えるために、実験供試体の下側に C 種膜材料による、供試体と同じ大きさのシール膜を敷き、周囲を押さえプレートで密閉している。

荷重は、 20mmAq の空気圧の増加後、20分間放置してクリープひずみを発生させる。この工程を 1 ステップとして、 0mmAq から 200mmAq の最大圧力まで計 10 ステップ繰り返された。荷重の手順を図 8 に示す。ただし、20分間の放置の間、圧力を一定に保つように行なわれたが、一部、不都合により保たれていない区間もある。実験は、平均室温 32.5°C の環境下で実施された。

瀬川の実験では、中央部の鉛直変位量と最終段階での形状の相対座標が測定されている。ただし、鉛直変位量の測定は、座標測定の都合上、中央点 (図 9 節点 a の位置) より 10.0mm ずらした位置で行なわれた。

4-2 解析モデル

解析モデルを図 9 に示す。実験における試験体形状と荷重の対称性から、解析モデルは $1/4$ モデルとし、たて糸方向を X 方向、よこ糸方向を Y 方向となるように配置した。境界条件は、外周の節点は全方向を固定し、X 軸上の節点は Y 方向を、Y 軸上の節点は X 方向を固定した。また、その他の内部の節点はすべて自由とした。固定された外周の隅角部は要素を細かく取った。要素数は 27、節点数は 104 である。解析において時間変化は空気圧の加圧中には考慮せず、20分間の放置時間においてのみ導入している。本解析におい

でも前節の解析と同じく、面外剛性を持たせるため 0.01kgf/cmの初期張力を導入した。

4-3 解析結果

図9の節点aでの荷重・変位関係について、実験結果と解析結果の比較を図10に示す。太線が節点aでの解析結果、細線が実験結果である。荷重40~120mmAqの間では実験結果では20分間放置という荷重方法にもかかわらず、クリープ的な挙動が明瞭には観察できない。この現象の理由として、内圧の調整に不具合があったことが原因であろうと文献5)で述べられている。最終的な変位量を比較すると、解析結果で16.3cm、実験結果で15.9cmであり、解析結果の変位量の方が実験結果よりも大きくなった。最大の変位差は約0.4cmであった。また、粘性を考慮しない場合の変位量は14.9cmであり、実験結果との変位差は約1.0cm、粘性を考慮した解析結果との変位差は約1.4cmとなった。高々200分の間に1.0cm程度のクリープ変形が生じていることになり、粘性特性を考慮することは重要であると言える。実験結果のクリープ性状が多少不明瞭であるものの、実験と解析は全体的に傾向がよく合っていると見える。荷重100mmAq付近までの実験結果と解析結果の曲線の傾きはほぼ一致

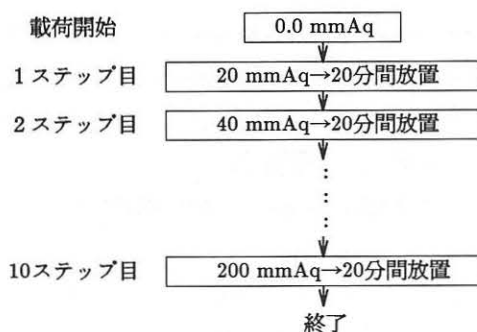


図8 荷重手順

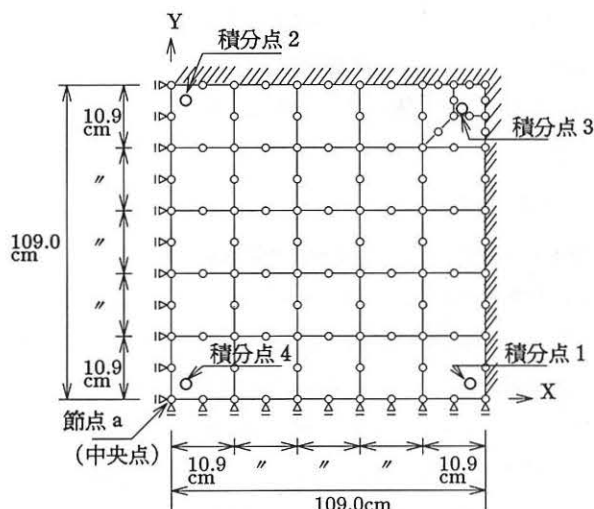


図9 解析モデル (粘性あり)

している。また、クリープが明確である荷重20mmAqでのクリープ変位は実験で約0.6cm、解析でも約0.6cmであり、良い一致を見た。一方、解析結果では荷重が高くなるにしたがってクリープ変位量が減少する傾向が見られた。5, 6ステップ目からはほとんどクリープ変位が生じていない結果となっている。これらの力学挙動を把握するために解析結果の応力状態の分析を行なった。

図11に200mmAqまで載荷し、20分間放置後の解析結果の応力分布図を示す。積分点1, 2および3は、それぞれ解析結果のたて糸方向、よこ糸方向およびせん断応力がそれぞれ最大となる応力点である。積分点4は節点aにもっとも近い積分点である。

たて糸方向、よこ糸方向ともに全固定された境界付近に最大応力が生じていることがわかる。最大せん断応力は、全固定された隅角部に生じている。

図12に、各積分点での応力・ひずみ関係と積分点1~3の低応力・低ひずみ部分の拡大図を示す。○印は載荷ステップ終了(20mmAq載荷→20分間放置後)の時点での応力・ひずみを示している。

図12(a)は、200mmAqまで載荷し、20分間放置後にたて糸方向で応力が最大となる積分点(積分点1)での応力・ひずみ曲線である。6ステップ目付近から、たて糸方向の応力・ひずみ曲線に、クリップ交換を示す非線形的な挙動が見られる。よこ糸方向では、クリップ交換の影響でひずみの減少が現われている。クリープひずみは9, 10ステップ目ではほとんど見られなくなった。たて糸方向の最大応力は7.5kgf/cmであり、このときのよこ糸方向の最大応力は0.7kgf/cmとおよそ11.0:1.0の応力比となった。たて糸方向の応力がよこ糸方向の応力を常に上回っており、たて糸方向の応力が支配的であることがわかる。このことから、ステップの増加に伴うたて糸方向のクリープひずみ量の減少の要因として、次のことが考えられる。文献10)において、粘性特性に関する諸定数を推定するために初期張力3kgf/cmおよび初期張力5kgf/cmの2軸応力緩和試験を参照した。図13は、その結果得られた表2の定数を用いた初期張力3kgf/cm, 7kgf/cmの2軸応力緩和解析と、初期張力3.3kgf/cm, 6.7kgf/cmのクリープ解析の結果を実験結果とともに示したものである。実験と解析を比較すると、推定の対象とした応力緩和解析は実験結果とよく一致している。しかし、推定の対象としなかったクリープに対しては、解析結果は曲線の形状は表現できているものの、初期ひずみに差異が見られる。また、張力が高いほど差異は大きく、発生するひずみ量が実験よりも小さくなっている。そのため、本解析においても荷重が上昇し応力が高くなるにつれクリープひずみの発生量が小さくなるものと考えられる。

図12(b)は、よこ糸方向の最大応力点(積分点2)での応力・ひずみ曲線である。よこ糸方向の最大応力は3.3kgf/cm、このときのたて糸方向の最大応力は0.7kgf/cmであり、たて糸方向とよこ糸方

向の応力比は1.0 : 4.7となった。よこ糸方向では応力は全体に低く、コーティング材の負担領域に留まっていると思われるが、クリープひずみは5ステップ目付近から現われにくくなっている。この原因としては、先に述べた初期クリープひずみの差異とともに、たて糸による変位の抑制が考えられる。積分点1のたて糸方向の応力・ひずみ関係(図12(a))では、クリープひずみ量がステップごとに減少すると同時に、応力の上昇により糸材の高剛性が発揮され、さらにひずみが発生しにくくなっている。一方、よこ糸方向にはさらにひずみが発生する余地があるが、全体としての変形をたて糸に拘束されてしまうため、ひずみの発生量も抑制されるものと考えられる。

図12(c)は、同様にせん断応力が最大となる積分点(積分点3)での応力・ひずみ曲線である。最大せん断応力は -0.8kgf/cm であった。このときのたて糸方向の応力は 1.1kgf/cm 、よこ糸方向の応力は 0.5kgf/cm であり、 $2.2 : 1.0$ の応力比となっている。いずれの

応力も値は低く、クリープひずみもわずかにしか発生していない。

図12(d)は積分点4での応力・ひずみ曲線である。積分点4は、節点aにもっとも近い積分点である。最大応力はたて糸方向の 6.9kgf/cm であった。このときのよこ糸方向の応力は 2.7kgf/cm であり、 $2.6 : 1.0$ の応力比となった。せん断応力は -0.002kgf/cm であった。クリープひずみは初期のステップではたて糸・よこ糸とも同じように発生しているが、6ステップ目付近からよこ糸のクリープひずみの発生量が急に減少している。このときのひずみ量は約1.0%である。図12(b)におけるクリープひずみ量の抑制もひずみが1.0%前後となる時点から始まっていることから、積分点2と同様の理由によるものと判断できる。また、たて糸方向のクリープひずみの発生量は図12(a)と同様に応力が高くなると減少する結果となった。

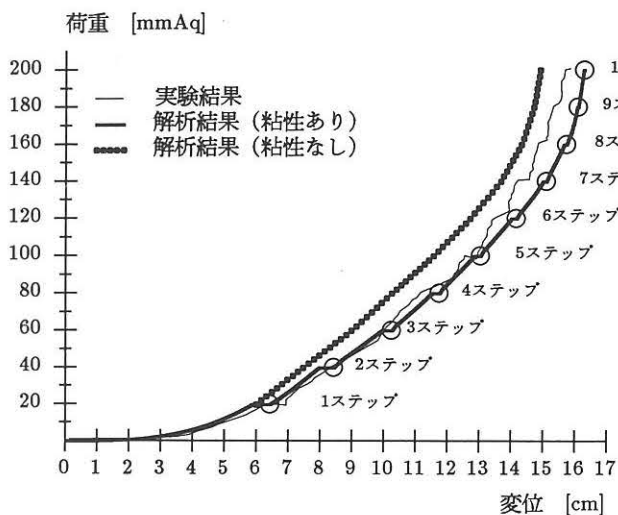
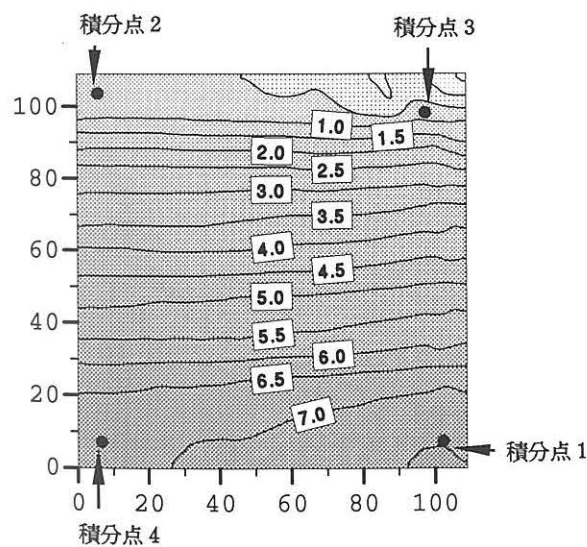
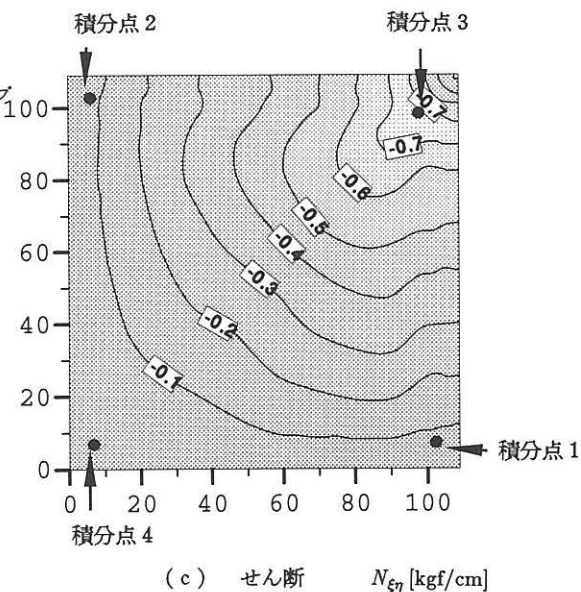
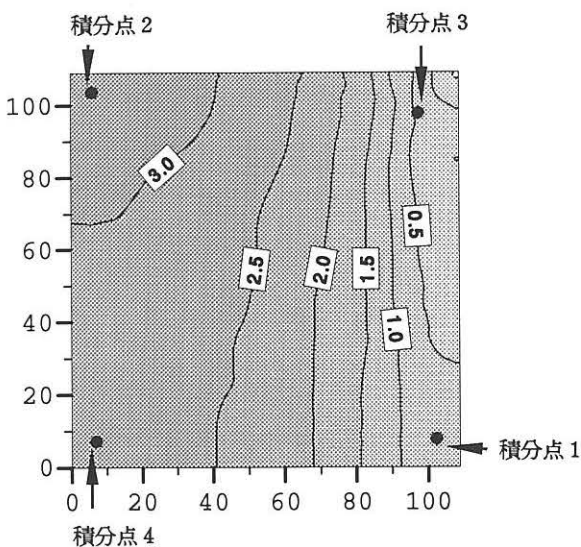


図10 荷重・変位曲線(粘性あり)

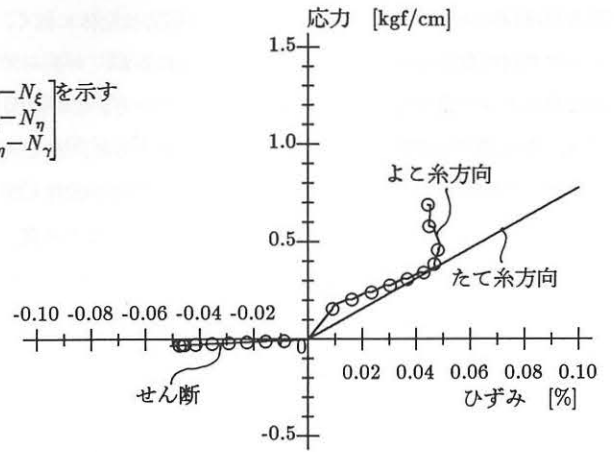
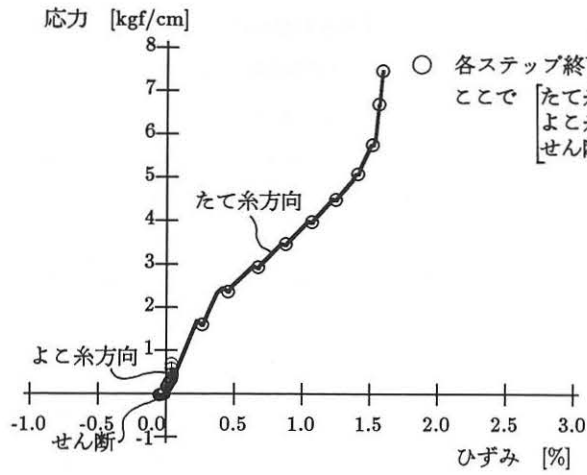


(a) たて糸方向 N_{ξ} [kgf/cm]



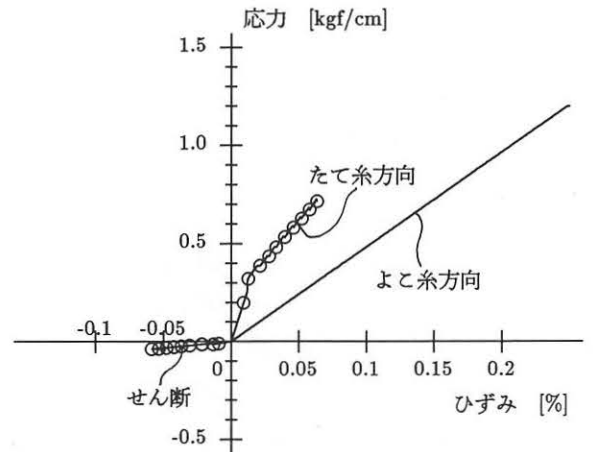
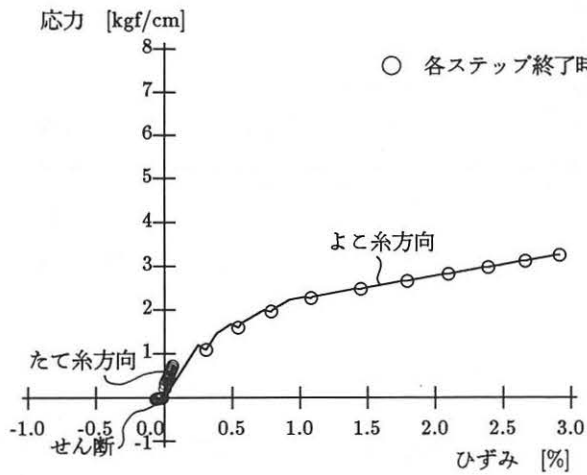
(b) よこ糸方向 N_{η} [kgf/cm]

図11 応力分布図(粘性あり)



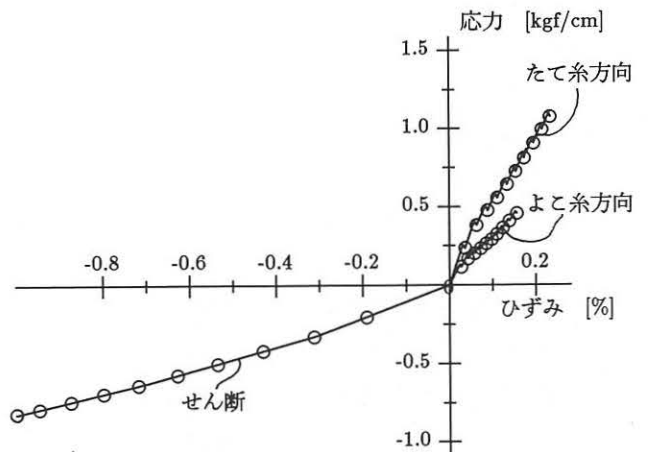
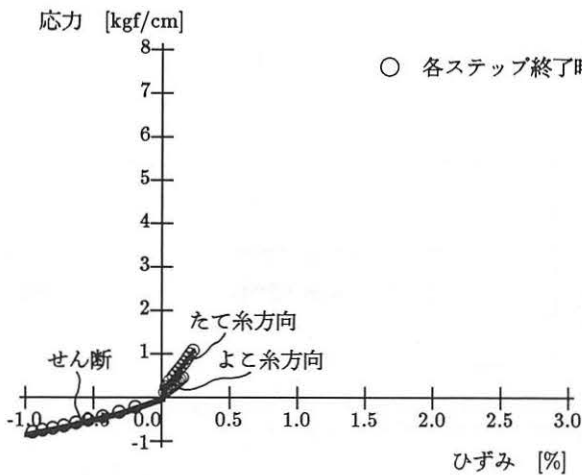
[低応力・低ひずみ部 拡大図]

(a) 積分点1



[低応力・低ひずみ部 拡大図]

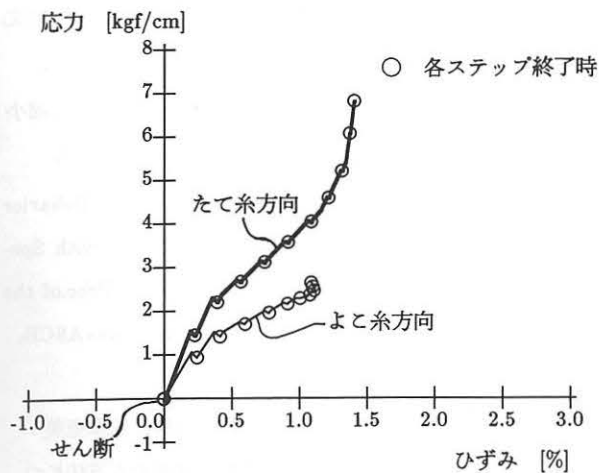
(b) 積分点2



[低応力・低ひずみ部 拡大図]

(c) 積分点3

図12-1 各積分点での応力・ひずみ関係 (粘性あり)



(d) 節点 a に最も近い点 (積分点 4)

図12-2 各積分点での応力・ひずみ関係 (粘性あり)

5. 結語

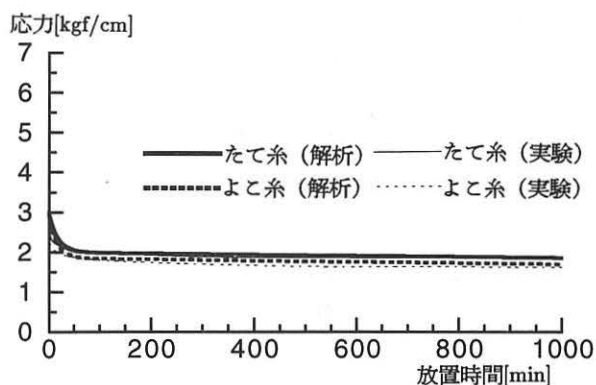
織構造格子モデルを有限要素法に導入し、粘性特性を考慮しない場合と粘性特性を考慮した場合について応力・変形解析を行ない、既存の実験と比較した。

粘性特性を考慮しないケースでは、解析結果は実験結果の荷重・変位関係の傾向をよく表現できた。低荷重域での曲線はよく似た形状が得られたが、荷重がある程度大きくなると解析においては変位が出にくくなるという現象が見られた。この現象の原因としてはロットの違いや、荷重が大きいことからたて糸の高剛性が発揮され変位が生じにくくなったことなどが想定される。

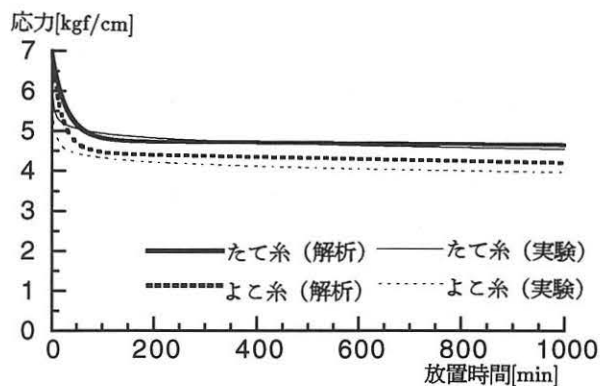
粘性を考慮したケースでも、解析は実験の傾向をほぼ表現できていると考えられる。特に低荷重域での傾向がよく一致している。荷重が上昇するにしたがってクリープひずみの発生量が減少した。解析結果の応力・ひずみ曲線を分析したところ、クリープひずみの減少の原因として、文献(10)で推定した粘性に関する諸定数では初期クリープひずみが出にくくなっていることや、応力やひずみが大きくなることによって素材の高剛性が発揮され、変形が抑制されることなどがわかった。

また、両方のケースにおいて、荷重の上昇に従って内部に発生するたて糸方向とよこ糸方向の応力比が変化するという結果が得られた。

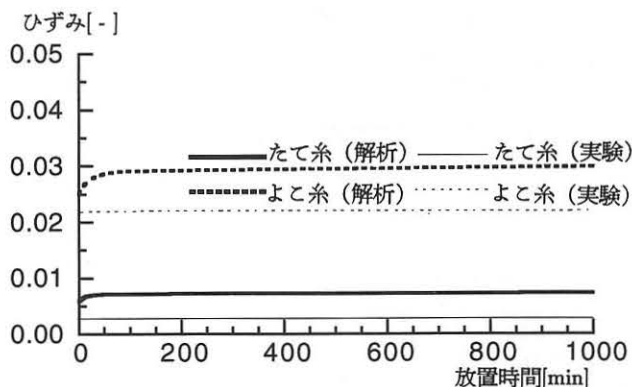
全体的には解析と実験は定性的にも定量的にもほぼ一致した結果となっているが、さらに長期間のクリープ等を考察の対象とする場合、今後の課題としては、(1)クリープ解析における初期ひずみの不一致を解消するために、粘性に関する諸定数推定法を再検討すること、(2)例えば1ヶ月間以上の長期間の2軸クリープ試験および応力緩和試験を用いて粘性定数の推定をやりなおし、妥当性を検討すること、などが挙げられる。



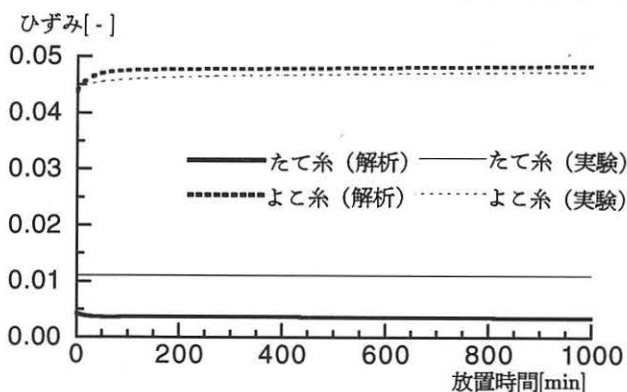
(a) 初期張力3.0kgf/cmの等2軸初期応力緩和解析



(b) 初期張力7.0kgf/cmの等2軸初期応力緩和解析



(c) 初期張力3.3kgf/cmの2軸クリープ解析



(d) 初期張力6.7kgf/cmの2軸クリープ解析

図13 応力緩和解析,クリープ解析 (文献9)

6. 謝辞

本研究を遂行する上で貴重な示唆を頂くとともに、膜材料に関する各種試験を行うにあたって全面的にご支援頂いた太陽工業(株)空間技術研究所所長戸田郁也氏, 同建築システム事業部設計部小田憲史博士, 同空間技術研究所豊田宏博士, 小西建築構造設計事務所並田忠政氏に深く感謝致します。

なお, 本研究は能村膜構造技術振興会の研究助成(研究代表者: 加藤史郎)を受け, 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り, 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)石井一夫: 膜構造用膜材料概説—力学的挙動と解析モデル—, 膜構造研究論文集'92, pp.91-119, 1992年12月
- 2)西川 薫, 石井一夫, 小竹達也: 織布特性を考慮した膜構造の応力・変形解析法, 膜構造研究論文集'89, pp.41-55, 1989年12月
- 3)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ータ算定法, 膜構造研究論文集'96, pp.45-51, 1996年12月
- 4)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, pp.1-9, 1990年2月
- 5)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
- 6)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, pp.71-78, 1996年12月
- 7)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
- 8)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—, 膜構造研究論文集'94, pp.11-26, 1994年12月
- 9)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, pp.1-29, 1996年12月
- 10)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, pp.29-44, 1996年12月
- 11)加藤史郎, 吉野達矢: 膜の材料非線形性を考慮した応力・変形解析—構成則に直交異方性弾性体と織構造格子モデルを用いた場合の比較—, 膜構造研究論文集'96, pp.17-28, 1996年12月

Stress-Deformation Analyses of Membrane Structures Based on The Fabric Lattice Model Considering Visco-Inelasticity -Comparison between The Experimental and Analytical Results-

Shiro KATO *1
Tatsuya YOSHINO *2
Tomoko ONO *3
Hirokazu MINAMI *4
Shinya SEGAWA *5

SYNOPSIS

The present paper describes the stress-deformation analyses by using the constitutive equation of the Fabric lattice model considering visco-inelasticity. Eight-node isoparametric element is utilized in FEM analysis. The stress-deformation analyses are performed treating elasto-plasticity in one case and visco-inelasticity in another case. These analytical results are compared with the former experimental results and the validity of the analysis is confirmed based on the Fabric lattice model.

- *1 Professor, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.
- *2 Graduate Student, Dept. of Mechanical and Structural Eng. Systems, Toyohashi Univ. of Tech., M. Eng.
- *3 Graduate Student, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.
- *4 Assistant General Manager, Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Co., (Guest Professor, Dept. of Arch. & Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.), Dr. Eng.
- *5 Senior Research Engineer, Center for Space Structures Research, Taiyo Kogyo Co., Dr. Eng.