

膜構造物の応力減少に関する解析的予測

加藤史郎^{*1}

吉野達矢^{*2}

南 宏和^{*3}

梗 概

著者らは膜材料の材料非線形性を表現するために織構造格子モデルに基づいた構成則を、また、幾何学的非線形性を考慮した応力・変形解析を行うために、8節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素解析手法を提案してきた。そこで本報では、次の荷重履歴：初期張力 3kgf/cm が導入された偏平HP膜構造物を1年間放置し；そこへ、積雪荷重 60kgf/m^2 を鉛直下向きに載荷し；この状態でさらに1日放置し；最後に荷重の除荷を想定した解析を行う。この解析結果より、時間の経過および積雪荷重の載荷・除荷に伴い応力がどのように変化するかについて予測を行う。

1. 序

膜材料の応力・ひずみ関係は非線形性が強く、粘性により応力緩和およびクリープが生じる。また、膜材料を用いて形成された曲面は比較的変形が大きい。したがって、実際の膜構造の挙動を精度よく分析するには、粘性を含んだ材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮する必要がある。しかし、通常の設計では、材料線形・幾何学的非線形として解析されている場合が多い。このため、実際の膜構造物に生じる応力等を正確に表現できていない可能性が考えられるばかりでなく、施工時およびその数年後の応力状態を予測することが難しい。これらの現象に注目した研究が続けられてきたが、特に、粘性に注目した研究¹⁻³⁾はほとんどなく、最近では、西川らの研究⁴⁾と著者らの研究¹⁰⁾のみである。

著者らは、応力・ひずみ関係の非線形性を表現することを目的として次に示す研究を行ってきた。膜の材料非線形性を表現するためにH.J.Schock⁷⁾により提案されているモデルを拡張した織構造格子モデル⁸⁾を提案した。このモデルでは、膜材料が繰り返し載荷を受ける場合⁹⁾膜材料に作用する応力の比が載荷ごとに変化する場合⁹⁾においても実験結果の応力・ひずみ関係を表現できることを示した。さらに、前報¹⁰⁾では、粘性に注目し、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、構成方程式を拡張した。南ら⁴⁾による応力緩和およびクリープ試験の結果と比較し、提案したモデルの妥当性を確認した。

一方、織構造格子モデル⁸⁾を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解析手法¹¹⁾に導入し、材料非線形性を考慮した応力・変形解析例として、2軸引張試験のシミュレーション¹²⁾を行った。また、HP曲面に積雪荷重を載荷する解析¹³⁾を行い、日本膜構造協会が提案する直交異方性体¹⁴⁾と仮定した構成方程式を用いた応力・変形解析結果と比較することにより、著者らが提案した解析手法の有用性を示した。さらに、南ら¹⁵⁾と瀬川⁵⁾によって行われた実験（正方形平面膜に分布荷重および集中荷重を載荷した実験）と比較し、本手法の応用性を確認した¹⁶⁾。

そこで本研究では、初期張力が 3kgf/cm のHP曲面に外力を与えず1年間放置し、その後、積雪荷重を想定した面外力が作用させ、1日放置し、積雪荷重を除荷する応力・変形解析を行う。各状態での応力分布を求め、初期張力に対して応力がどの程度変化するかについて分析する。ただし、構成方程式には織構造格子モデルに基づいた構成則⁸⁾を8節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法¹¹⁾を用いる。

*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・副所長（豊橋技術科学大学建設工学系・客員教授），工博

2 膜材料の構成則

本報では、恒久建築物に使用されるA種の膜材料を対象とする。解析に当たり、膜材料の応力・ひずみ関係に織構造格子モデルを用いた構成則を用いる。

2.1 織構造格子モデル⁸⁾

2.1.1 単位要素（織構造格子モデル）による構成則

H.J.Schock⁹⁾により提案されているモデルを拡張した織構造格子モデル（図1）に基づいて構成則の定式化を既報¹⁶⁾において行った。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。グラスファイバーで撚り合わされているたて糸とよこ糸のそれぞれを表すために、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に塗布されるコーティング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.Schock⁹⁾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。

2-2. 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部材に単純Maxwell(g)要素と単純Voigt(i)要素を直列結合した図2示す4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。

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 $\Delta \epsilon$ は式(1)のように3つの成分の和として表わされる。

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。

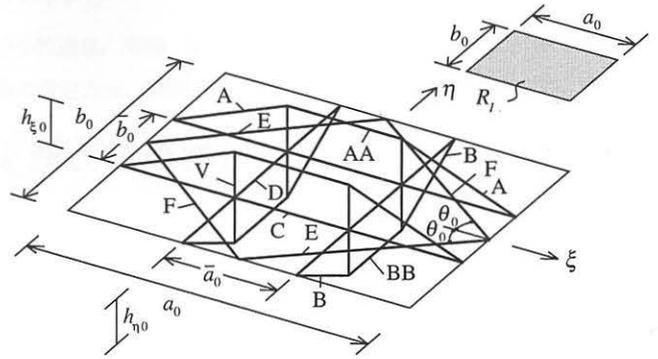


図1 織構造格子モデル

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_{g1} + \Delta \epsilon_{g2} + \Delta \epsilon_i \quad (1)$$

ただし、

$\Delta \epsilon_{g1}$: Maxwell要素の弾塑性増分ひずみ成分

$\Delta \epsilon_{g2}$: Maxwell要素の粘性増分ひずみ成分

$\Delta \epsilon_i$: 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⁹⁾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3)と仮定する。

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

ただし、

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

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、

$$\Delta \sigma = E_T \Delta \epsilon + f \quad (4)$$

を得る。ただし、

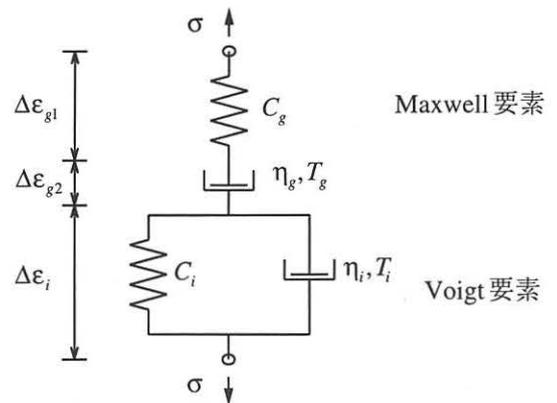


図2 4要素Voigtモデル

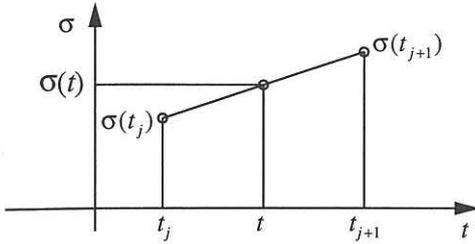


図3 応力の線形性の仮定

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

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

である。ここで、 $\Delta t \rightarrow 0$ とすることにより、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。定式化の詳細は、既報⁹⁾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 $\bar{\ell}_K$ で表されるとき、増分ひずみを次式のように定義する。

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

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、

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

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、

$$S = K_T \Delta \gamma + (S_0 + f_S) \quad (8)$$

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。

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

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。

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

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。

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

2.2.3 織構造格子モデルを構成する部材の諸定数の決定

織構造モデルを構成する部材の諸定数は文献⁹⁾において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確認した表1に示す値を用いる。ただし、粘性に関する諸定数は表2に示す値を用いる。この定数は応力緩和においてたて糸方向・よこ糸方向ともに3kgf/cmの初期張力が1年後に半分の1.5kgf/cm程度になるように著者らによって仮定された値である。これらの諸定数を用いて初期張力3kgf/cmで応力比が(1:0), (0:1), (1:1)に対する応力緩和現象のシミュレート結果を図4に示す。

3. 増分型剛性方程式

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¹¹⁾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。

4. 応力・変形解析

4.1 解析条件

等張力曲面として近似理論解が知られているHP曲面を想定する。図5に解析モデルの形状を示す。ただし、曲面は次式で与えられる。

$$Z = \frac{X \cdot Y}{A \cdot B} \cdot H \quad (15)$$

ここに、 $A=5m, B=5m, H=1.25m$ とする。また、要素分割を図6に示す。

表1 織構造格子モデルの諸定数

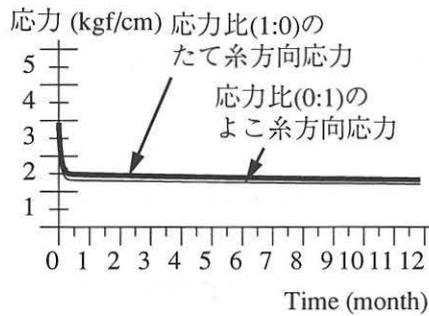
$$a_0 = 0.1375\text{cm}, b_0 = 0.1000\text{cm}, \bar{a}_0 = a_0/3, \bar{b}_0 = b_0/3, \theta_0 = 36.0^\circ, h_{\xi_0} = 0.0102\text{cm}, h_{\eta_0} = 0.0162\text{cm}$$

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)	$\epsilon_{y1}, \epsilon_{y1}'$ (%)	$\epsilon_{y2}, \epsilon_{y2}'$ (%)	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	-	-	-	-

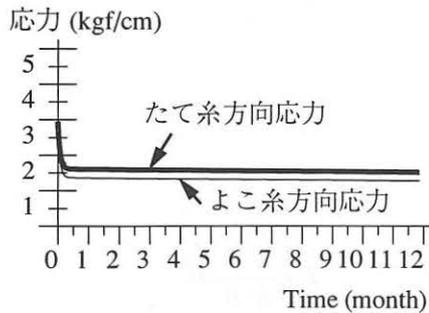
要素	a_0 (cm)	b_0 (cm)	k_1 (kgf/cm)	k_2 (kgf/cm)	k_3 (kgf/cm)	γ_{y1} (%)	γ_{y2} (%)	n	m_1	m_2
R_l	0.1375	0.1000	65.0	31.0	14.5	1.66	3.50	-0.40	0.25	0.45

表2 粘性に関する諸定数

要素	T_g (min)	C_i (cm^2/kgf)	T_i (min)
C	3000000	0.000035	7000
D	2800000	0.000043	7000
V	2000000	0.000001	50



(a) 応力比(1:0)と(0:1)



(b) 応力比(1:1)

図4 初期張力 3.0kgf/cm に対する応力緩和

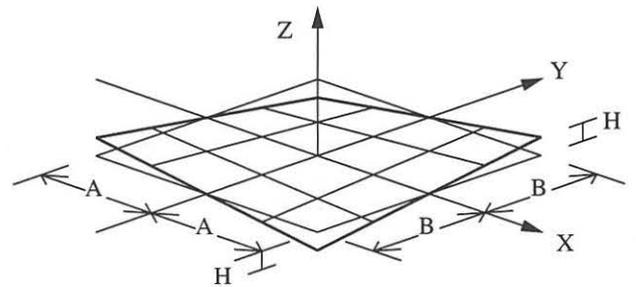


図5 HP 曲面

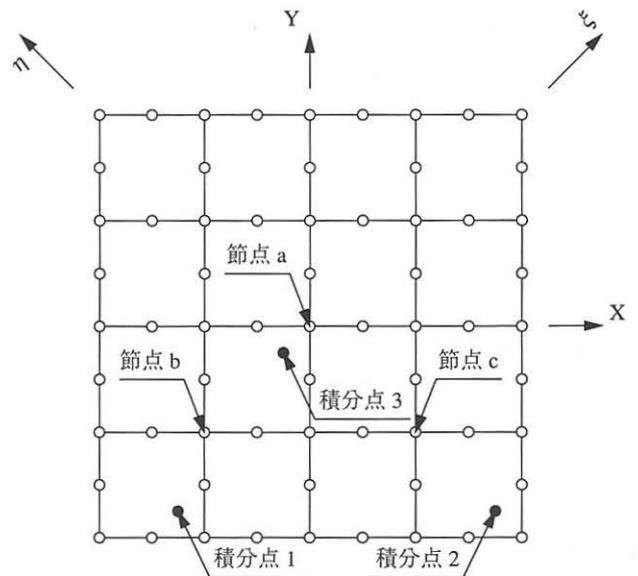


図6 要素分割

境界条件は外周の節点の変位をすべて拘束し、内部の節点はすべて自由とする。

荷重は次の手順で導入される。たて糸方向およびよこ糸方向共に初期張力 3kgf/cm を導入する。この状態を(0)と定義する。初期張力が導入されたまま、1年間放置する。1年後の状態を(1)と定義する。ただし、この間に外力は載荷されないものとする。積雪荷重を想定し、鉛直下向き 60kg/m^2 の等分布荷重を瞬時に載荷する。載荷後の状態を(2)と定義する。ここで、 60kg/m^2 を載荷したまま、1日間放置する。1日放置した後の状態を(3)と定義する。 60kg/m^2 の荷重を除荷し、荷重を開放する。この状態を(4)と定義する。ただし、膜材料の自重は考慮しない。

膜材料のたて糸方向 ξ は、曲面の吊りとなる方向に、また、よこ糸方向 η は、曲面の押さえとなる方向に配置する(図6)。なお、剛性マトリックス等の積分には、 2×2 の Gauss 積分を用いる。

4. 2 解析結果

図6に示す積分点1, 2, 3に関する応力・ひずみ曲線を図7に、応力・時間曲線を図8に、そして、各状態における応力の値を表3に示す。積分点1は積雪荷重を載荷した時点でたて糸方向の応力が最大となる積分点で、積分点2は同時点でよこ糸方向の応力が最小となる積分点である。積分点3は膜曲面中央部に一番近い積分点である。また、鉛直荷重に対して、図6に示す節点A, B, Cの鉛直変位を図10に、各状態における鉛直変位を表4に示す。さらに、各状態における曲面全体の応力分布および等高線をそれぞれ図9, 11に示す。

状態(0)において、膜曲面のたて糸方向およびよこ糸方向に導入した 3kgf/cm の初期張力が1年後の状態(1)で約 $1.2 \sim 1.5\text{kgf/cm}$ (初期張力の30~50%)程度まで減少した。この時、曲面中央は 0.3cm 上向きに変位した。この原因は次に示すことであると考えられる。応力(1:1)の時の各糸方向の応力緩和量は図4に示すように、たて糸方向よりよこ糸方向が大きくなるように定義している。このため、膜曲面においてもたて糸方向に比べよこ糸方向の応力が緩和し、押さえ方向(よこ糸方向)が吊り方向(たて糸方向)の応力に比べ小さくなり、上向きの不釣り合い力が生じる。この不釣り合い力により、膜曲面中央が持ち上がることになる。本解析では膜材料の自重や吊り荷重を考慮していないが、これらを考慮することにより鉛直下向きに変形する性状が現れるだろう。

(1)の状態に積雪荷重を想定した 60kg/m^2 を鉛直下向きに載荷した状態(2)に注目する。積分点1の応力がたて糸方向、よこ糸方向それぞれ、 $11.2, 2.4\text{kgf/cm}$ となり、たて糸方向の応力が全積分点において最大であった。また、積分点2は同様にそれぞれ、 $1.5, -0.2\text{kgf/cm}$ となり、よこ糸方向の応力が全積分点において、唯一、負の応力(圧縮)を示した積分点であった。積分点2の周辺でたて糸方向の

しわが発生するものと考えられる。また、剪断応力は最大 0.3kgf/cm であり、ほとんど発生していない。

60kg/m^2 の荷重を載荷したまま、1日間放置した状態(3)に注目する。この1日間において、積分点2のよこ糸方向が引張応力になったこと以外、応力および変位において大きな変化は見られなかった。ただし、この状態における鉛直変位が中央で -25.9cm であり最大であった。

荷重を除荷した、無荷重状態(4)では、積分点1のたて糸方向とよこ糸方向の応力がそれぞれ、 $0.3, 0.9\text{kgf/cm}$ となり、全積分点において初期張力として導入した 3kgf/cm に対し、約10~35%まで減少することが予測される。

5. 結語と今後の課題

本報では、粘性をも考慮した構成方程式を用い、膜材料で形成されたHP曲面の時間経過と外力の載荷に対する応力・変形解析を行った。ただし、粘性に関する定数は1年間の放置した応力緩和およびクリープ試験結果がなかったため、著者らによって仮定された値を用いた。この結果から、膜曲面に導入した初期張力は、積雪荷重の載荷時に圧縮力が生じる領域が存在すること、また、最終的に約10~35%まで減少することが予測された。

本報で用いた粘性に関する諸定数は著者らによって仮定した値に過ぎない。今後の課題として、1カ月、1年程度の応力緩和およびクリープに関する特性を把握することを目的とした実験を、また、膜材料の裁断形状および初期張力導入に伴う施工時のプロセスを考慮した応力・変形解析を行う予定である。

7. 謝辞

本研究は能村膜構造技術振興財団の研究助成(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)の一環として実施されたものであり、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。また、研究上の貴重な示唆を頂きました太陽工業株式会社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、瀬川信哉博士に感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 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: 膜材料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
 - 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 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式の提案—, 膜構造研究論文集'94, No.8, 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, No.10, pp.1~16, 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, No.10, pp.29~43, 1996年12月
 - 11) 加藤史郎, 吉野達矢, 松本恵美, 武田文義: アイン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
 - 12) 吉野達矢, 松本恵美, 武田文義, 加藤史郎: 膜の材料非線形性を考慮した2軸引張試験のシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.885~886, 1996年9月
 - 13) 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, No.10, pp.17~28, 1996年12月
 - 14) (社)日本膜構造協会: 膜材料弾性定数試験方法(MSAJ/M-02-1995)
 - 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) 加藤史郎, 吉野達矢, 南宏和, 瀬川信哉, 小野智子: 織構造格子モデルによる膜構造の粘弾塑性解析—実験と解析の比較—, 膜構造研究論文集'97, No.10, 1997年12月(投稿中)

表3 積分点1, 2, 3の応力 (kgf/cm)

状態	積分点1			積分点2			積分点3		
	N_{ξ}	N_{η}	$N_{\xi\eta}$	N_{ξ}	N_{η}	$N_{\xi\eta}$	N_{ξ}	N_{η}	$N_{\xi\eta}$
(1)	1.2	1.2	0.0	1.5	1.3	0.0	1.2	1.2	0.0
(2)	11.2	2.4	0.3	1.5	-0.2	0.0	9.8	0.9	0.1
(3)	11.4	2.7	0.3	1.4	0.1	0.0	10.0	1.1	0.0
(4)	0.3	0.9	0.1	1.3	1.0	0.0	0.7	0.8	0.0

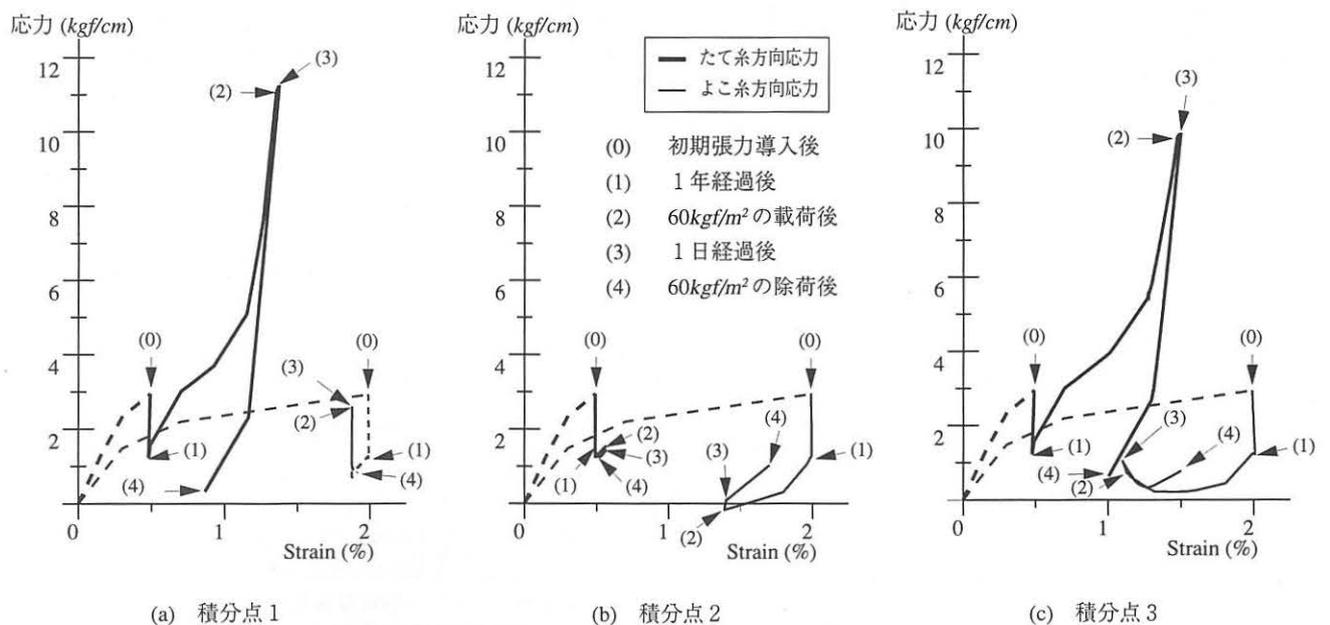
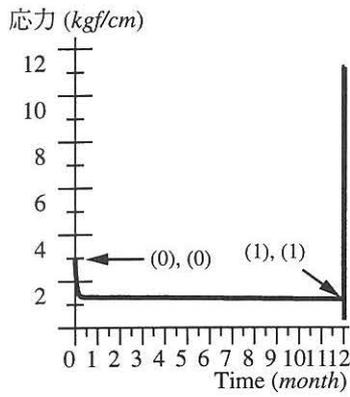
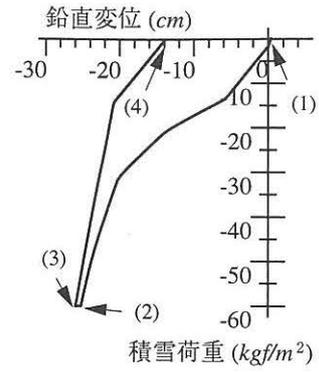
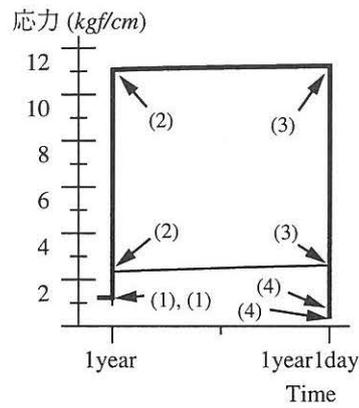


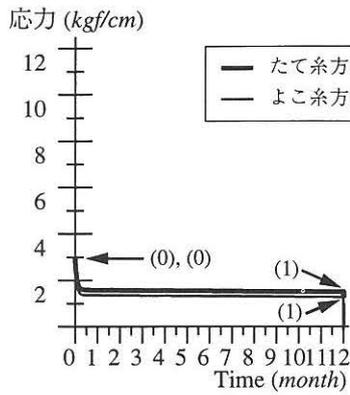
図7 応力・ひずみ関係



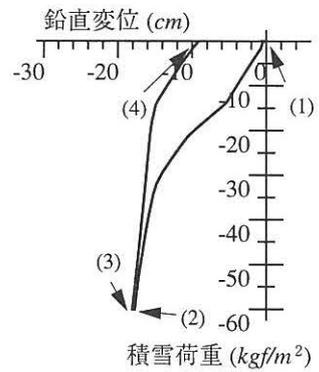
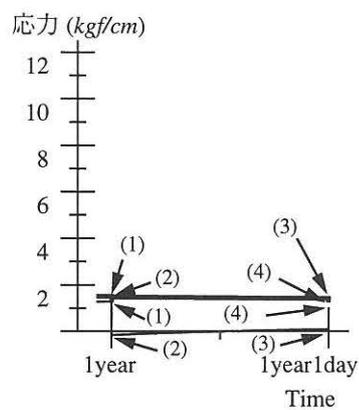
(a) 積分点 1



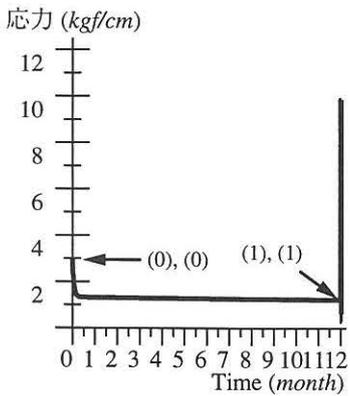
(a) 節点 A



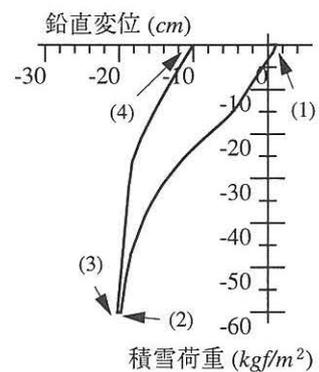
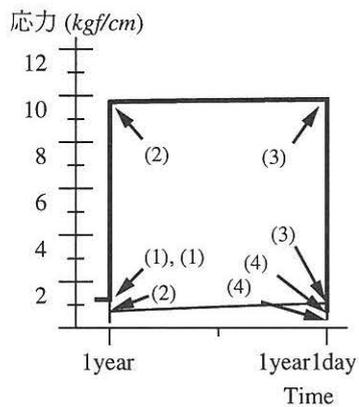
(b) 積分点 2



(b) 節点 B



(c) 積分点 3



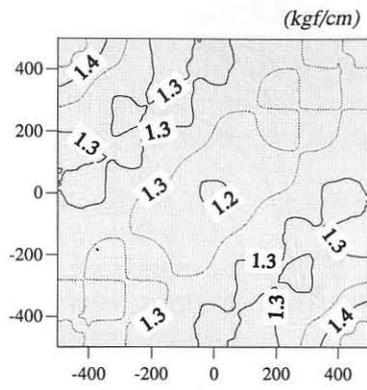
(c) 節点 C

図 8 応力・ひずみ関係

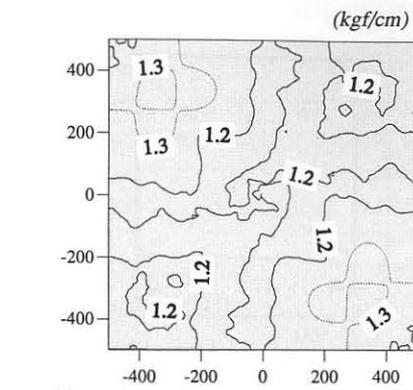
図 10 荷重・変位関係

表 4 節点 A, B, C の変位 (cm)

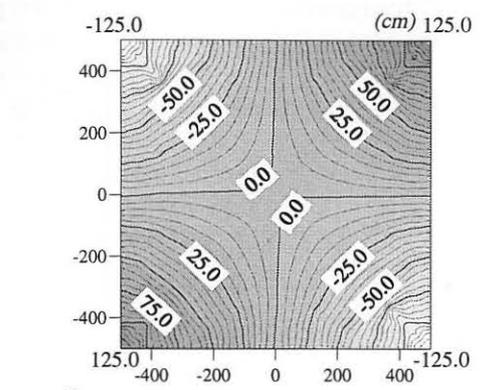
State	Node A			Node B			Node C		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
(1)	0.0	0.0	0.3	2.1	2.1	-0.4	-2.0	2.0	1.1
(2)	0.0	0.0	-25.2	0.4	0.4	-17.7	-3.7	3.7	-19.8
(3)	0.0	0.0	-25.9	0.4	0.4	-18.0	-3.8	3.8	-20.3
(4)	0.0	0.0	-13.9	1.3	1.3	-9.1	-3.0	3.0	-10.0



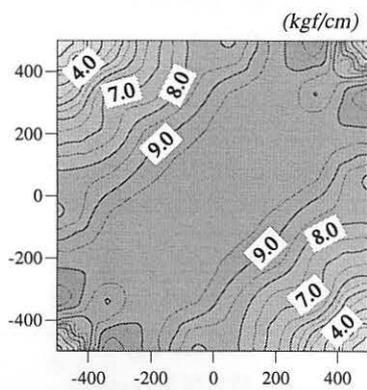
(a) 状態 1



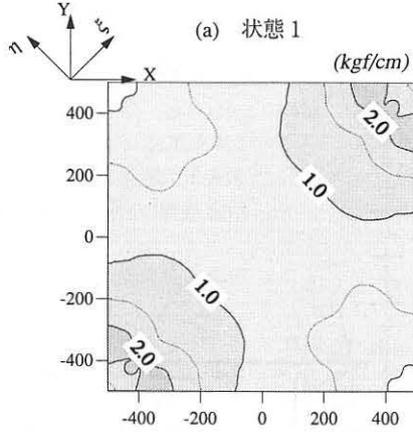
(a) 状態 1



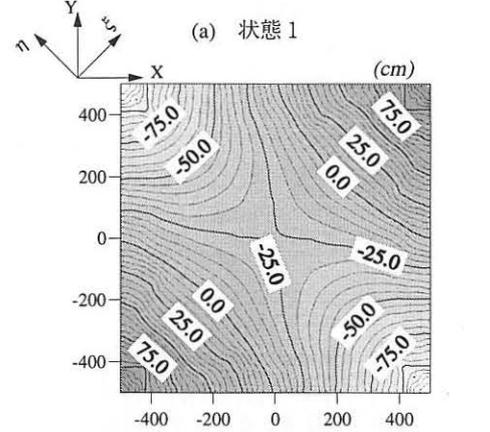
(a) 状態 1



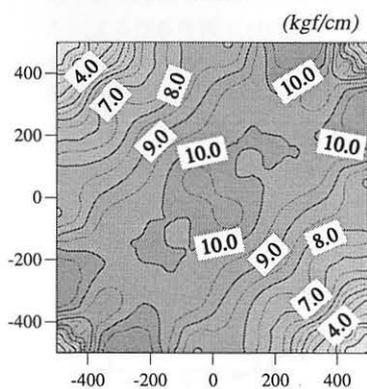
(b) 状態 2



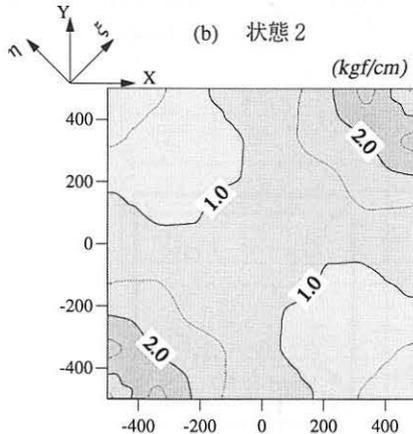
(b) 状態 2



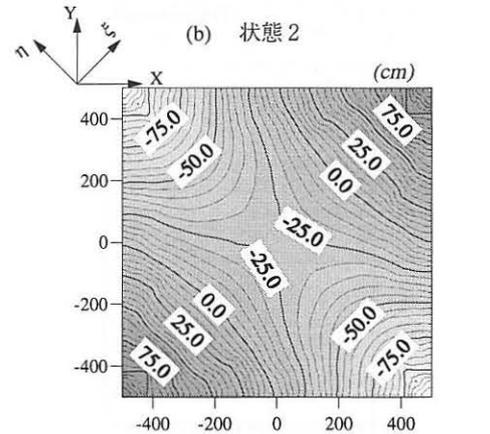
(b) 状態 2



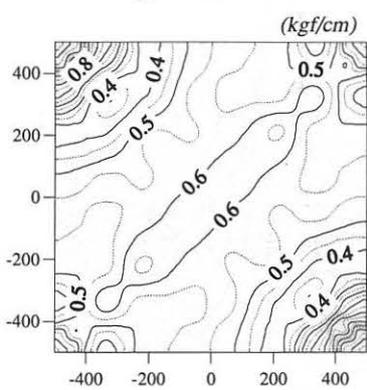
(c) 状態 3



(c) 状態 3

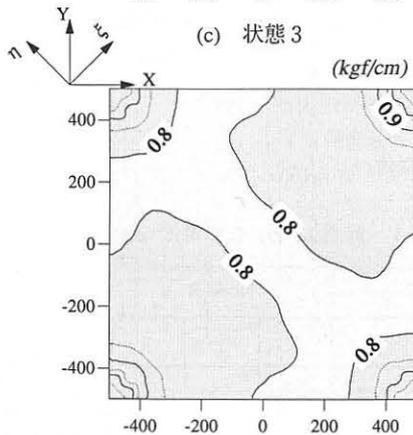


(c) 状態 3



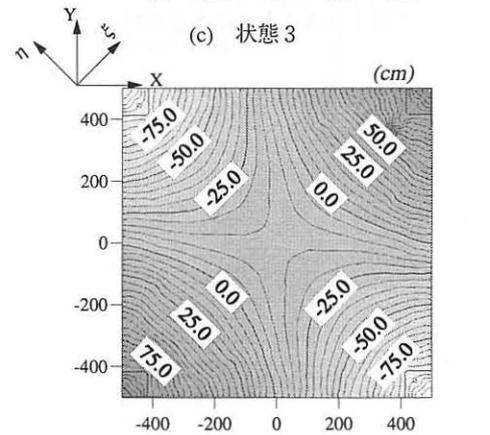
(d) 状態 4

(たて糸方向応力分布)



(d) 状態 4

(よこ糸方向応力分布)



(d) 状態 4

図 9 応力分布図

図 11 等高線

ANALYTICAL ESTIMATION FOR STRESS RELAXATION ON TENSIONED MEMBRANES UNDER LONG TERM LOADING

Shiro Kato*¹
Tatsuya Yoshino*²
Hirokazu Minami*³

SYNOPSIS

The present paper focuses on relaxation of initial stresses in hyperbolic paraboloidal roof of tensioned membranes for long term loadings. To follow such a behavior, eight-node isoparametric elements including visco-elasto-plastic constitutive equations that have been drawn by fabric lattice model, are utilized. The long term loadings are applied to HP roof through following 5 steps; (0) initial stresses are introduced into the membrane roof to form the HP roof, (1) the roof is left for one year without external loading, and (2) uniform snow loading of 60kgf/m² are applied, and then, (3) the roof is left for one day with the uniform snow loading, and finally, (4) the snow load is released to zero.

From the analytical results, the facts that almost of initial stresses are lost for long term loadings are revealed.

*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., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.), Dr. Eng.