有限要素法を応用したコーティング平織物解析法*

南 宏 和** 中 原 義 雄***

Application of Finite-Element Method to Deformation Analysis of Coated Plain-Weave Fabrics

by

Hirokazu MINAMI and Yoshio NAKAHARA

(Technical R & D Dept., Taiyo Kogyo Co. Ltd., Osaka)

No satisfactory method has been developed so far for analysing coated plain-weave fabric which has properties of nonlinear elasticity. In this paper, a method which is promising for use in engineering applications like the strength analysis of membrane structures was presented. The finite element method using rectangular elements consisting of plain-weave fabric and coating material was applied. Experimental verification of the method was made by using uniaxial stress-strain responses. A square piece of coated plain-weave fabric with a square hole was analyzed as an example of application of the present method.

(Received Jan. 19, 1980)

キー・ワード：コーティング織物，膜構造解析，有限要素法

1. 緒 言

コーティング織物は一般に織物をコーティング材で仕上げた柔軟な複合材料である。本報告は平織物を軟質コーティング材で仕上げたコーティング平織物 (Fig. 1 参照) を対象にした研究報告である。コーティング平織物はつり構造物や空気膜構造物などの膜構造の引張強度材料として利用されている。

コーティング平織物の2軸応力-ひずみ応答は、たて糸とよこ糸方向の荷重比、ひずみ速度、織構造の幾何学的形態、糸の曲げ・ねじり・伸び・直交する糸の交差部での圧縮やすべりの特性、コーティング材料の特性、織物とコーティング材との間の相互干渉の特性、その他に依存する。特に荷重比によってその応答が大きく変わる特性は重要である。本報告の供試体の1軸応力-ひずみ応答を Fig. 3 に示すが、これよりコーティング平織物は特有の非線形形の応力-ひずみ特性を示すことがわかる。

Fig. 3 に示したような特性を対象にしてコーティング平織物およびこれに類似した特性を有する平織物そのものの基礎的研究が行われてきた。たて糸とよこ糸

がからみ合った単位織構造 (Fig. 2 (b) 左に図解) のモデル化を行い、非線形2軸特性を数理的に表現して研究されたものであるが、これらはその目的によって二つの流れに分けることができる。第1は機械的性質そのものの評価法を求めようとする研究である。川端らの研究は平織物そのものに対するもので、その非線形特性に影響を及ぼす種々の要因を詳細に追求したものである。他に Huang などの研究がある。第2はその非線形特性に適合した膜構造解析法を志向する研究である。これには Freeston らおよび Testa らの研究があるが、これらの結論は構成式の導出とその評価に止まっており、膜構造解析法へのその組み込みは成されていない。著者の知る限りでは平織物あるいはコーティング平織物の特有の非線形特性に適合した膜構造解析法は世界的に提出されていない。

このような背景のもとに、膜構造の解析に際してはコーティング平織物を均質線形弾性体とみなして弾性理論が適用されたりしてきた。しかしながら、前記のような特性を有するコーティング平織物にそのような弾性理論を適用しても応力や変形の実用的な予測が得られない場合があるので、実用的な膜構造解析法の研究は重要な課題である。

本報では、コーティング平織物の非線形特性に適合

* 原稿受理 昭和55年1月19日

** 正 会 員 太陽工業(株) 大阪市淀川区木川東

*** 太陽工業(株) 大阪市淀川区木川東

する実用的な膜構造解析法（前記第2の目的）に向けてより見通しのよい解析法を導いた結果の報告を主とするものであり、それに対する実験的検証は特定のコーティング平織物を取りあげて2軸応力状態の特殊な場合である1軸応力状態についてのみしか行われていない。またその解析法の応用計算として1例だけ報告した。解析法はコーティング平織物が非線形弾性の特性をもつと考えると導かれ、織物および平面応力状態の等方性弾性板と仮定されたコーティング材とから構成される要素を用いる有限要素法が導入された。

なお本報告では、特記の他は、応力を膜の単位幅当りの力と定義して材料力学で一般に使用する応力のように用いる。

2 解析法

コーティング平織物の応力-ひずみ応答を数理的方法で表そうとすると、第1に、糸やコーティング材などの個々の構造要素の実際の挙動に目を向けずコーティング平織物そのものを現象論的にとらえようとする考え方、第2に、その構造要素の実際の挙動のそれぞれを適切に考慮してそれらを適当なモデル化によって構成しようとする半微視的な考え方がある。コーティング平織物の機械的性質には緒言で説明した多くの非線形要因が複雑に影響しているという特徴があるため、膜構造解析のような工学的実用のために第2の考え方を採用することは実際的ではないと考える。そこで著者は第1の考え方を採用して有限要素法の要素モデルを提出した。つまり、以下に説明する要素モデルの構成要素の設定はコーティング平織物の構造要素の実際の幾何学的および力学的形態に類似してはいるが、それらの材料定数や寸法はそれらに対応する構造要素に個有の実際値と一致する必要はなく、要は得られる解析法が実用的に充分であればよいという考え方である。

Fig.1は、コーティング平織物の直交する糸に平行な辺を有する矩形要素と、その要素に設定された x 、 y 座標軸を示す。要素の幅は x 、 y 方向にそれぞれ b_x 、 b_y である。 i 、 j 、 k 、 l 節点における x 、 y 方向への変位はそれぞれ u_i 、 v_i 、 u_j 、 v_j 、 u_k 、 v_k 、 u_l 、 v_l 、節点力はそれぞれ F_{xi} 、 F_{yi} 、 F_{xj} 、 F_{yj} 、 F_{xk} 、 F_{yk} 、 F_{xl} 、 F_{yl} である。

Fig.1に示したような要素を使った有限要素を応用するに際して、要素内のコーティング平織物の挙動に関して次のような仮定が導入された。

(1) 要素内の任意点の変位は x - y 平面内で線形に変化する。

(2) コーティング材を、平面応力状態のそして厚さ t_0 およびヤング率 E_0 を有する等方性線形弾性板とみなす。

Fig. 1. Rectangular element of coated plain-weave fabric.

(3) 平織物の x 、 y 方向の糸は荷重の作用前（初期状態）は直交している。

(4) x 、 y 方向の糸の交差部での糸どうしのすべりはなく、横圧による糸の圧縮の効果は無視する。

(5) x 、 y 方向の糸は隣合う交差点の間でまっすぐで、伸びに対する剛性がそれぞれ E_x 、 E_y である。すなわち、糸の張力 $= (E_x \text{ または } E_y) \cdot (\text{伸びひずみ})$ 。

単なる平織物を対象とする研究³⁾では交差部での糸の圧縮の効果が考慮されているが、加圧されながらコーティング加工をされる場合のあるコーティング平織物の場合はその横圧の影響は複雑であることから、取扱いの簡単化のために横圧に関して仮定4を設けた。また、著者らは本報の計算法を糸の破断張力よりかなり小さい糸張力の範囲で使うことが適当であると考えているが、この条件があれば仮定5を設けることは妥当であると判断した。

なお、単なる平織物が純せん断変形をする場合の抵抗はないが、本報の計算法にはコーティング材の効果を仮定2のように考慮しているのでFig.1に示したモデルの純せん断変形に対しては抵抗がある。

第1に、一つの要素に関する節点力によるポテンシャルエネルギー V^e は

$$V^e = u_i F_{xi} + v_i F_{yi} + u_j F_{xj} + v_j F_{yj} + u_k F_{xk} + v_k F_{yk} + u_l F_{xl} + v_l F_{yl}. \quad (1)$$

第2に、一つの要素の中の織物のひずみエネルギーは以下に説明するように節点変位の関数として表される。

Fig.2は交差点に対応する5個の節点を含む単位織構造モデルを示す。要素の各境界上の糸は半分の伸び剛性しか持たないという条件のもとで、要素の中の織物は x 、 y 方向にそれぞれ $N+1$ 、 $M+1$ 本の糸から成る。

Fig.2(a)のように各糸の中心線につけた番号によって、要素中の交差点の位置が組番号 (m, n) を使って表せる。単位織構造の中の交差点 (m, n) 、 $(m+1, n)$ および $(m, n+1)$ における変位の x 、 y 成分を次のように表す。

Fig. 2. Fabric in an element and idealized unit weave structure.

$$u_{m,n}, v_{m,n}, u_{m+1,n}, v_{m+1,n}, u_{m,n+1}, v_{m,n+1}. \quad (2)$$

さらに、交差点に原点を有し、隣合う交差点で互いに逆の方向をもって z 軸が要素内のすべての交差点に定義された (Fig. 2 (b) 参照). (2)の表現に対応して交差点の z 方向変位成分を $w_{m,n}, w_{m+1,n}, w_{m,n+1}$ とする. Fig. 2 (b) の a_x, a_y および d_y, d_x はそれぞれ x, y 方向の波うつ糸の中心線の振幅と間隔である.

初期状態において、交差点 (m, n) と $(m+1, n)$ 間の糸長さ l_{ox} と、 (m, n) と $(m, n+1)$ 間の糸長さ l_{oy} は

$$l_{ox} = (d_x^2 + 4a_x^2)^{1/2}, \quad l_{oy} = (d_y^2 + 4a_y^2)^{1/2}. \quad (3)$$

変形後の交差点 (m, n) と $(m+1, n)$ 間の糸のひずみエネルギー $(U_1)_{m,n}$ および (m, n) と $(m, n+1)$ 間の糸のひずみエネルギー $(U_2)_{m,n}$ は次のように表せる.

$$\begin{aligned} (U_1)_{m,n} &= \left\{ (d_x + u_{m+1,n} - u_{m,n})^2 + (v_{m+1,n} - v_{m,n})^2 \right. \\ &\quad \left. + (2a_x - w_{m,n} - w_{m+1,n})^2 \right\}^{1/2} - l_{ox} \Big/ (2l_{ox}), \\ (U_2)_{m,n} &= \left\{ (u_{m,n} - u_{m,n+1})^2 + (d_y + v_{m,n+1} - v_{m,n})^2 \right. \\ &\quad \left. + (2a_y + w_{m,n} + w_{m,n+1})^2 \right\}^{1/2} - l_{oy} \Big/ (2l_{oy}). \end{aligned} \quad (4)$$

変位は要素内で線形に変化すると仮定したので、交差点 (m, n) における x, y, z 変位成分は要素の節点変位を用いて

$$\begin{aligned} u_{m,n} &= \left(1 - \frac{m}{M}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right) u_i + \frac{m}{M} \left(1 - \frac{n}{N}\right) u_j \\ &\quad + \left(1 - \frac{m}{M}\right) \frac{n}{N} u_k + \frac{m}{M} \frac{n}{N} u_l, \\ v_{m,n} &= \left(1 - \frac{m}{M}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right) v_i + \frac{m}{M} \left(1 - \frac{n}{N}\right) v_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left(1 - \frac{m}{M}\right) \frac{n}{N} v_k + \frac{m}{M} \frac{n}{N} v_l, \\ w_{m,n} &= \left(1 - \frac{m}{M}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right) w_i + \frac{m}{M} \left(1 - \frac{n}{N}\right) w_j \\ &\quad + \left(1 - \frac{m}{M}\right) \frac{n}{N} w_k + \frac{m}{M} \frac{n}{N} w_l. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで w_i, w_j, w_k, w_l は節点 i, j, k, l における z 方向節点変位成分である.

平織物の単位幅当りの糸数 (打込糸数) を用いると糸の間隔 d_x, d_y はそれぞれ

$$d_x = 1/n_y, \quad d_y = 1/n_x. \quad (6)$$

ここに n_x, n_y はそれぞれ x, y 方向の糸の打込糸数. 要素の境界上の糸については $1/2$ 本と計算して、 y, x 方向の糸の総数 M, N は

$$M = b_x/d_x, \quad N = b_y/d_y. \quad (7)$$

結局、一つの要素の中の織物のひずみエネルギー U_f^e は

$$\begin{aligned} U_f^e &= k_x k_y \sum_{n=0, k_y}^N \sum_{m=0, k_x}^{M-1} \gamma_m (U_1)_{m,n} \\ &\quad + k_x k_y \sum_{n=0, k_y}^{N-1} \sum_{m=0, k_x}^M \gamma_m (U_2)_{m,n}. \end{aligned} \quad (8)$$

ここに γ_m と γ_n は、要素の内部の交差点 (m, n) に対しては 1.0 であるが、その境界上の交差点、すなわち m が 0 または M および n が 0 または N のときは 0.5 である. また、要素が大きくて x, y 方向に多くの糸をもつ場合は (8) 式の中の 2 重総和記号に対応する計算時間が問題になるので、その近似計算のために (8) 式の中の整数 k_x, k_y および 2 重総和記号は次のような考え方で定義されるものである.

M, N がそれぞれ k_x, k_y に対して充分大きく、 m, n のそれぞれ k_x, k_y 個の連続する値に対応する各項 (次の説明の $C_{m,n}$) が近似的に等しいとおけるならば、一般形式で説明すると次のような表現が可能である.

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M C_{m,n} &\doteq \sum_{n=0}^N (k_x C_{0,n} + k_x C_{k_x,n} \\ &\quad + k_x C_{2k_x,n} + \cdots + k_x C_{\bar{M}k_x,n}) \end{aligned} \quad (9)$$

ここに $\bar{M}$ は $(M+1)/k_x - 1$ を切上げて整数化した値である. ここで m に関する段階的総和記号を次式のように定義する.

$$\begin{aligned} \sum_{m=0, k_x}^M C_{m,n} &\equiv C_{0,n} + C_{k_x,n} + C_{2k_x,n} \\ &\quad + \cdots + C_{\bar{M}k_x,n}. \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式を用いると (9) 式は

$$\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M C_{m,n} \doteq \sum_{n=0}^N k_x \sum_{m=0, k_x}^M C_{m,n}. \quad (11)$$

n についても同様に考えれば

$$\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M C_{m,n} \doteq k_x k_y \sum_{n=0, k_y}^N \sum_{m=0, k_x}^M C_{m,n}. \quad (12)$$

以上が (8) 式に現れた k_x, k_y および 2 重総和記号の定義の説明である. ひずみエネルギーの変化が要素内で小

さく、このような近似計算が実用上可能である場合もあると考えられる。

(5)式を(8)式に代入すると要素内の平織物のひずみエネルギーが節点変位を用いて表されることになる。

第3に、平面応力の等方性弾性板と考えるコーティング材のひずみエネルギーは次の説明のように表される。

(5)式と類似に、要素内の任意点の x , y 変位成分 u , v は

$$\left. \begin{aligned} u &= \left(1 - \frac{x}{b_x}\right) \left(1 - \frac{y}{b_y}\right) u_i + \frac{x}{b_x} \left(1 - \frac{y}{b_y}\right) u_j \\ &\quad + \left(1 - \frac{x}{b_x}\right) \frac{y}{b_y} u_k + \frac{x}{b_x} \frac{y}{b_y} u_l, \\ v &= \left(1 - \frac{x}{b_x}\right) \left(1 - \frac{y}{b_y}\right) v_i + \frac{x}{b_x} \left(1 - \frac{y}{b_y}\right) v_j \\ &\quad + \left(1 - \frac{x}{b_x}\right) \frac{y}{b_y} v_k + \frac{x}{b_x} \frac{y}{b_y} v_l. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

x , y 方向のひずみとせん断ひずみを構成成分とするひずみベクトルを次式のように表す。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\}^T &= \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\} \\ &= \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

ここで文字 T は転置ベクトルや転置マトリクスを意味する上添字である。(13)式を(14)式に代入して

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}^e \quad (15)$$

ここに $\{\delta\}^e$ は次式で定義する節点変位ベクトル。

$$\{\delta\}^{eT} = \{u_i, u_j, u_k, u_l, v_i, v_j, v_k, v_l, w_i, w_j, w_k, w_l\} \quad (16)$$

ひずみベクトルに対応する応力ベクトルは

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} [D] \{\varepsilon\} \\ &= \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu_c & 0 \\ \nu_c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu_c}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (17)$$

ここに ν_c はコーティング材のポアソン比で、左辺の応力は単位面積当りの内力を意味する応力である。

(15)式と(17)式を用いてコーティング材のひずみエネルギーは一つの要素について次式のように表される。

$$\begin{aligned} U_c^e &= \frac{t_c}{2} \int_0^{b_y} \int_0^{b_x} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dx dy \\ &= \frac{E_c t_c}{2(1 - \nu_c^2)} \int_0^{b_y} \int_0^{b_x} \{\delta\}^{eT} [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy. \end{aligned} \quad (18)$$

結局、一つの要素に関する全ポテンシャルエネルギー Π^e は次式のように表せる。

$$\Pi^e = U_f^e + U_c^e - V^e. \quad (19)$$

(19)式は問題が幾何学的非線形であることを示す。そこで(19)式を解くために増分手法を導入したのでこれを以下に説明する。

次式は r 回の繰返し計算で得られ既知と考える節点変位ベクトルである。

$$\{\delta\}^{e,rT} = \{u_i^r, u_j^r, u_k^r, u_l^r, v_i^r, v_j^r, v_k^r, v_l^r, w_i^r, w_j^r, w_k^r, w_l^r\}. \quad (20)$$

$r+1$ 回の繰返し計算で得られる節点変位ベクトルを

$$\{\delta\}^{e,r+1} = \{\delta\}^{e,r} + \{\Delta\}^e, \quad (21)$$

とおく。ここに $\{\Delta\}^e$ は未知変位増分ベクトルで

$$\{\Delta\}^{eT} = \{\Delta u_i, \Delta u_j, \Delta u_k, \dots, \Delta w_l\}. \quad (22)$$

$r+1$ 回目の繰返し計算のための節点力ベクトルを

$$\begin{aligned} \{f\}^{e,r+1T} &= F_{xi}^r + \Delta F_{xi}, F_{xj}^r + \Delta F_{xj}, \dots, \\ &\quad F_{yl}^r + \Delta F_{yl}, 0, 0, 0, 0. \end{aligned} \quad (23)$$

(21)式と(23)式を(19)式に代入すると $r+1$ 回目の繰返し計算に対応する全ポテンシャルエネルギー $\Pi^{e,r+1}$ が得られる。これは未知変位増分の関数で、変分原理

$$\delta \Pi^{e,r+1} = 0, \quad (24)$$

により次式の基礎つりあい方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \{g\}^{e,r+1T} &= \{0, 0, \dots, 0\} \\ &= \{\alpha\}^{e,r+1T} + \frac{E_c t_c}{1 - \nu_c^2} \{\delta\}^{e,r+1T} \int_0^{b_y} \int_0^{b_x} \\ &\quad [B]^T [D] [B] dx dy - \{f\}^{e,r+1T}. \end{aligned} \quad (25)$$

上式で、 $\{g\}^{e,r+1}$ は12個の0成分から成るベクトルで、 $\{\alpha\}^{e,r+1}$ は U_f^e から得られるベクトル、第2項は U_c^e から得られ、第3項は V^e から得られる。 $\{\delta\}^{e,r}$ および $\{\Delta\}^{e,r+1}$ の成分は $\{\alpha\}^{e,r+1}$ の成分の中に含まれる。

そこで(25)式に対して節点変位増分に関する Taylor 展開を施し、第1近似を用いると、未知変位増分の数値計算のために直接使われる結論的方程式が次式のよう

$$\begin{aligned} \{g\}^{e,r+1} &\doteq ([K]_{f^r} + [K]_c) \{\Delta\}^e - \{q\}_{f^e,r} \\ &\quad + \{q\}_{c^e,r} - \{f\}^{e,r+1}. \end{aligned} \quad (26)$$

平織物に関係している $[K]_{f^r}$ と $\{q\}_{f^e,r}$ は $\{\alpha\}^{e,r+1}$ から得られ、コーティング材に関係する $[K]_c$ と $\{q\}_{c^e,r}$ は(25)式の第2項から得られる。 $[K]_{f^r}$, $\{q\}_{f^e,r}$ および $\{q\}_{c^e,r}$ の成分には(20)式の成分が含まれる。

3 1軸引張試験の結果を用いた検証

Fig. 3 の Warp 曲線はたて糸方向に荷重がかけられた場合のたて糸方向の応答の、また Filling 曲線はよこ糸方向に荷重がかけられた場合のよこ糸方向の応答の試験結果を示す。Fig. 6 の実線曲線は Fig. 3 に示した破断応力の約10%までの領域を拡大したものである。Fig. 3 に示したような1軸引張試験に供試されたコーティング平織物の主要目を Table I に示す。Fig. 4 は Fig. 3 に示した試験片をモデル化した試験片モデルの寸法と拘束条件および1/4部分での分割を示す。

x 方向がたて糸方向に設定された場合の計算定数を次に示す。

$$\left. \begin{aligned} E_x &= 58 \text{ kg}, E_y = 13 \text{ kg}, n_x = n_y = 10.5 / \text{cm} \\ a_x &= 0.010 \text{ mm}, a_y = 0.125 \text{ mm} \\ E_c \cdot t_c &= 51 \text{ kg/cm}, \nu_c = 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Table I. Principal properties of specimen.

Base fabric	Yarn	Corting material	Yarn count	Thickness	Breaking stress (kg/cm)	Breaking strain
Polyester	1000 d filament yarn	PVC	10 5/cm (Warp & Filling)	0.65 mm	80*(Warp) 76*(Fill)	0.27** (Warp) 0.36* (Fill)

* Mean of five specimens under uniaxial loading speed 20 mm/min.

** Mean of four specimens under uniaxial loading speed 20 mm/min.

Fig. 3. Typical uniaxial stress-strain response.

Fig. 4. Idealized specimen model.

ここに、 n_x と n_y は測定値、 a_x と a_y はループを用いた測定値、 ν_c は設定値で、 E_x 、 E_y および $E_c \cdot t_c$ は試験結果と計算結果が充分に一致するように試行錯誤を行って決定したものである。

よこ糸方向の1軸引張試験に対応する試験片モデル

Fig. 5. Deformation and stress distribution in specimen model.

Fig. 6. Comparison in stress-strain response between theoretical and experimental results of uniaxial tensile test.

の解析結果として、節点1, 2, 3において等しい強制変位が荷重方向に与えられた場合の変形と応力分布の計算結果が Fig. 5 に示されている。

Fig. 4 の試験片モデルの解析から得られた1軸応力-ひずみ応答を Fig. 6 に示す。この図で Warp, Filling に対応する計算結果は、荷重方向にそれぞれ x 、 y 軸が設定されて27式に表示の計算定数が使われて得られたものである。最終の繰返し計算までの荷重増分ステップ数は、たて糸引張モデルについては5で、よこ糸

Fig. 7. Square coated plain-weave fabric with an 8-mm square hole.

Fig. 8. Stress distributions in some sections.

引張モデルについては10である。

4 応用計算

8mm×8mmの正方形穴を有し2軸応力をうける正方形のコーティング平織物が解析された。その分割、拘束状態および寸法が Fig. 7 に示されている。計算定数は図式の表示と同じである。いくつかの断面内の応力分布と、等しい強制変位をうける境界が Fig. 8

に示されている。荷重増分ステップ数は4である。

5 まとめ

ここに報告した解析法に対する実験的検証は特定の供試材料についてのみ行われているだけであるので、今後は種々のコーティング平織物についても検証が行われなくてはならない。また、ここで検証に用いた実験結果は1軸応力-ひずみ応答であるが、実構造の中での応力状態は一般に2軸応力状態であるので、今後は各種荷重比に対応する2軸応力状態のもとの実験結果を用いて検証が行われる必要がある。さらに、検証のための計算に用いた各種の材料定数のうち、繊維とコーティング材の弾性定数は計算の試行錯誤によって決定されたものであるが、この方法は実用的ではない。1軸あるいは2軸応力実験の結果から必要な情報を抽出してそれら弾性定数（このときの繊維は線形仮定が妥当なものに限る）が実用的に決定される方法が設定される必要がある。

上記のような問題点を今後の研究によって解決して行く必要があるが、実験的検証および応用計算の結果より、本報告の解析法は、コーティング平織物の特有の機械的性質に適した実用的な膜構造解析法を整備、確立することの第1歩として、より見通しのよい解析法であると考えられる。

参考文献

- 1) 牧 広, 島村昭治, “複合材料技術集成”, p. 648 (1976) 産業技術センター
- 2) Sebring, R. E., M. M. Schoppee, W. D. Freeston, Tech. Report 69-75-GP, Fabric Research Labo. (1969).
- 3) Kawabata, S., M. Niwa, H. Kawai, J. of the Textile Institute, **64**, 21 (1973).
- 4) Huang, N. C., J. of App. Mech., **46**, 651 (1979).
- 5) Freeston, W. D., M. M. Platt, M. M. Schoppee, Tech. Report AFML-TR-67-44, Fabric Research Labo. (1967).
- 6) Minami, H., Proc. of the 1st Int. Conf. and Exhibition on Eng. Software, Southampton, 123 (1979).
- 7) Testa, R. B., N. Stubbs, W. R. Spillers, J. of the Eng. Mech. Division, **104**, 1027 (1978).