面内振りを受ける円形張力膜のしわ

—ポリエステルフィルムとC種膜の実験—

WRINKLING ON STRETCHED CIRCULAR MEMBRANES UNDER
INPLANE TORSION

—Experiments with polyester films and coated fabrics—

宮村 倫司*, 半谷 裕彦**

Tomoshi MIYAMURA and Yasuhiko HANGAI

The problem of circular stretched membranes under inplane torsion is a typical example in studying wrinkling on membrane structures. In this paper experiments of the example are carried out. A feature of the experiment is that both isotropic polyester films and orthotropic coated fabrics are treated, since membranes used in spatial architectures are usually orthotropic. Few studies on wrinkling on orthotropic membranes can be found. Another feature of the experiment is that stresses in the wrinkled membranes are measured. For that purpose, first a method for measuring stresses in thin membranes is presented. Second stresses in the wrinkled circular membranes are measured by using the method, and finally principal stresses are obtained. The results show that (1) there are no compressive stresses in the wrinkled membranes, (2) directions of tensile principal stresses almost coincide with directions of wrinkles, and (3) in the coated fabrics, these two kinds of directions almost coincide with directions of fabrics. Photos of wrinkles on various kinds of membranes are also shown.

Keywords : *wrinkling, circular stretched membrane, torsion, orthotropic membrane, experiment, measurement of stresses*

しわ、円形張力膜、振り、直交異方性、実験、応力測定

1 はじめに

しわの問題は膜構造を考える上で本質的な問題であり、これまでも多くの研究が行われてきた。2節に示す面内振りを受ける円形張力膜の問題は、しわの研究における標準的な例題であるといえる。本論文ではこの例題に関して著者等がこれまでにやってきた実験の結果をまとめて報告する。

円形張力膜の面内振りの既往の実験例として Mikulas(1964)⁴⁾によるものがある。実験に用いられた膜は等方性のポリエステルフィルムである。ここでは初期張力の精密な導入法、微小な回転角の精密な測定法等が示されている。各種の初期張力に対する振りモーメント-回転角曲線は、Stein等(1961)³⁾の理論に基づく解と非常に良く一致している。Hamada等(1986)¹⁰⁾は各種の境界条件に対して差分法により座屈解析を行い、同時に行った実験結果と比較している。ただし、実験、解析共に鋼板に対するものであり、初期張力は導入されていない。

この他にも Dean(1924)¹⁾が座屈解析との比較のために、また Stein等³⁾も部分的な領域の張力場の理論解との比較のためにそれぞれ実験を行ったが、どちらも写真が示されているのみである。

円形膜の振り以外の例題についてもいくつかの実験例がある。川口(1977)⁹⁾は偏平な回転曲面に内圧をかけた時に生じるしわの

実験を行った。Mansfield(1970)⁵⁾は自由境界を持つ矩形膜にせん断力を与えた場合について張力場理論による解析例とともに実物の写真を示している。Moriya等(1971)は円形の穴を有する矩形板のせん断座屈の実験を行った。菊池(1974)⁷⁾は矩形フィルムの単純せん断について実験を行い、歪ゲージによる測定の結果から応力を求めた。ただし、歪ゲージの剛性を考慮していないため、得られた応力は実際よりも小さいようにみえる。菊池は正方形開口を持つ場合についても実験を行った⁸⁾。Roddeман等(1987)¹²⁾は彼らが提案したしわの解析法¹¹⁾の検証のために、引き伸ばした矩形膜をせん断変形させる実験を行った。結果は良く一致している。塚越等(1995)¹⁴⁾はいろいろなパターンのスリットを持つ鋼板耐震壁の挙動を調べるために、切れ目を入れた薄膜のしわの実験を行った。

以上に示した膜のしわに関する実験的な研究では、建築の膜構造で一般的な直交異方性膜に関するものはないようである。そこで、本論文では等方性および直交異方性の膜を対象とした、円形張力膜の振りの実験について報告する。本実験のもうひとつの特徴はしわ発生時の応力の測定を試みたことである。しわの発生機構は膜の応力場と密接な関係があるから、応力の測定は有意義であるといえる。応力測定は Mikulas⁴⁾の実験においても行われて

本論文の一部は既に文献15)~19), 21), 22)において発表している。

* 東京大学生産技術研究所2部 助手・博士(工学)

** 東京大学生産技術研究所5部 教授・工博

Res. Assoc., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

おらず、その他の測定例もあまりない。そのため最初に薄い膜の応力測定法を開発することが必要となった。

本実験に関してはこれまでも報告を行ってきた^{15) 16) 21) 19)}。これらの中で初期の論文^{15) 16) 21)}に示した応力の測定結果は、測定方法が曖昧であり精度に問題がある。本論文ではこのような点を正し、文献¹⁹⁾の結果を中心に一連の実験結果をまとめて最終的な考察を行ったものである。文献¹⁹⁾に示した結果は、後に有限要素法による分岐解析の結果と比較し、妥当であることを確認している²¹⁾。

2 面内振りを受ける円形張力膜

図1のように円形膜の中央に剛体の円盤を取り付けた後に、外側境界を半径方向外向きに一樣変位させて初期張力を導入する。なお、先に初期張力を導入してから、円盤を取り付けば等張力となるが、ここでは扱わない。初期張力導入後に外側境界は固定し、中央円盤を面内に回転させる。

図1: 面内振りを受ける円形張力膜

3 実験方法

3.1 概要

第1節にも述べたように、面内振りを受ける円形張力膜のしわに関しては、等方性弾性体についてMikulasが精密な実験を行った⁴⁾。そこでは、非常に精密な初期張力の導入法により、初期張力の大きさやモードが振りモーメント・回転角関係におよぼす影響を調査している。ただし、等方性弾性体の膜のみを扱っている。

本実験ではMikulasの実験で行われていない事項に重点を置くことにする。すなわち、本実験では直交異方性の膜も扱い、また、しわ発生時の膜の応力を測定する。薄い膜の応力を測定した例はあまりないため、最初に歪ゲージの測定値を利用して応力を求めるための方法を提案する¹⁸⁾。

3.2 実験に用いる膜

実験で使用する膜材とそれらの弾性材料定数を表1に示す。ポリエステルフィルム（商品名：東レのルミラー）はほぼ理想的な等方性弾性体である。C種膜はPVCコーティングされたポリエステル繊維であり¹³⁾、小規模な空間建築に用いられる。直交異方性であり、応力-歪曲線は初期には剛性が低く、繊維のゆるみが終わった時点で剛性が上がる。

ポリエステルフィルムについては一軸引張試験を行い、膜に取り付けた変位計により測定した歪と荷重から求めた応力の関係から、ヤング率とポアソン比を求めた。せん断剛性係数は弾性体の公式から計算した。

一方、瀬川等¹³⁾によれば、C種膜は材料非線形性が強く、その材料定数は荷重レベルや応力比により異なる。ここでは二方向のヤング率とポアソン比として、応力比1:1で応力が3.5kgf/cm程度の時にクリープを除いて得られる値を文献¹³⁾より引用した。C種膜のせん断剛性係数は膜構造協会試験法標準²³⁾に従った材料試験により求めた。なお、これらの材料定数は解析を行なう場合に必要となる。

表1: 実験に用いた膜材料

(厚さの単位: cm, E_1t, Gt の単位: kgf/cm)

材料名	厚さ t	E_1t	ν_{12}	E_2t	ν_{21}	Gt
ポリエステル	0.018	1022	0.267	-	-	404
C種膜	0.050	391	0.0	194	0.36	11

3.3 試験装置

写真1は試験風景であり、図2、3はそれぞれ試験装置の平面図と側面図である。平面図に示すように、8個のチャックにより膜の周辺部を挟んで固定し、これらのチャックを錘で引っ張ることにより近似的に半径方向への一樣な引張を表す（写真2参照）。チャックのスライド部にはベアリングが入っていないので摩擦が多少はある。膜の中央部は二枚の鉄の円盤で挟む。この円盤の中心には軸を取り付け、ベアリングの入った軸受けにより架台に固定する。中心軸にはアームを取り付け、これを錘で引くことにより振りを導入する。この錘の重さはロードセルで連続的に測定する。ロードセルの測定値にアームの長さを掛けたものと振りモーメントとなる。

写真1: 実験風景

図2: 試験機平面図

図3: 試験機側面図（縦）

3.4 薄い膜の応力測定法^{18) 19)}

3.4.1 概要

膜材は一般的に非線形材料特性を示すが、薄い膜に歪ゲージを貼るとそこでは線形に近い材料特性となる。このため引張試験により、歪ゲージと膜および接着剤からなる一種の複合材料の材

写真2: 張力導入用チャック

写真3: 歪ゲージを貼った試験体

料定数を評価しておけば、歪ゲージの測定値からゲージを貼った点の応力を計算することができる。歪ゲージを貼った点には小さなロードセルが埋め込まれていると考えればよい。歪ゲージが貼ってある点の応力とその周辺の応力とは釣り合っているため、ゲージにかかる応力によりこの点の本来の応力を評価することができる。ただし、ゲージを貼った部分への応力集中が多少はあるためこれが誤差となる。なお、以下では全て平面応力を考えている。

ゲージを貼った部分の剛性を評価するために、図4や写真3に示す細長い試験体を用いて引張試験を行う。しわ発生領域は一軸的な引張応力場となることが予想されるため、このような細長い試験体の一軸引張試験時とほぼ同様な応力場となると考えられる。参考までに、井合²⁾はしわの方向に膜を切断しても歪エネルギーは減少しないと仮定し、しわ発生領域を細長い帯の集合体であると考えることにより張力場理論の基礎式を導いた。直交異方性のC種膜ではゲージの貼られた部分は直交異方性の弾性体であるとみなし、ふたつの繊維方向およびそれに対して45度の方向について引張試験を行うことにより五個（理論的には独立なものは四個）の弾性係数を求める¹⁸⁾。

3.4.2 試験体形状と用いる歪ゲージ

図4は試験体の形状である。円形の二方向歪ゲージを使う。なお、しわの実験ではこれと同寸法の三方向ゲージを用いる。二方向ゲージと三方向ゲージの剛性は同じであるとみなす。歪ゲージの貼ってある部分に全ての荷重をかけるために、試験体幅はゲージのベースの直径の1.1cmと一致させる。ゲージは各試験体とも両面に貼り、ふたつの面の値の平均を用いる。

図4: 材料試験用試験体

3.4.3 引張試験の結果と応力測定用材料定数の評価

ポリエステルフィルムとC種膜（三方向）についてそれぞれ二回試験を行ったところ、各々ほぼ同じ結果が得られた。図5にポリエステルフィルムの結果、図6~8にC種膜の三方向の結果を示す。合

応力は荷重を試験体幅で割ることにより求め、歪は表と裏のゲージの測定値の平均である。載荷方向とそれに直交する方向の歪の測定値をまとめて示す。それぞれ弾性的挙動を示している。そこで、最小二乗法により求めた直線を破線で示す。表2にこれらの図から得られた応力測定用の材料定数を示す。表1に示した本当の材料定数とは全く異なっていることに注意する。なお、表2の値は $\nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2$ を満たしていないがこのまま用いることにした。

表2: 応力測定用の材料定数 (E_1t, Gt の単位: kgf/cm)

材料名	E_1t	ν_{12}	E_2t	ν_{21}	Gt
ポリエステルフィルム	2668	0.315	-	-	1015
C種膜	3690	0.298	1908	0.337	588

図5: 応力-歪曲線 (ポリエステルフィルム) 19)

図6: 応力-歪曲線 (C種膜、縦糸方向) 19)

図7: 応力-歪曲線 (C種膜、横糸方向) 19)

図8: 応力-歪曲線 (C種膜、45度方向) 19)

3.4.4 提案した応力測定法の簡単な検証

、応力測定的最も簡単な例として、図9に示すような幅4cmの試験体（C種膜、縦糸方向）の中央に歪ゲージを貼り応力を求めてみる。図10は幅4cmの試験体の引張試験の結果である。この時、荷重を試験体の幅で割ることにより歪ゲージの貼っていない断面（例えば、図9の点線をつけたところ）の応力を求めることができる。これは求めたい本当の応力であり一般の構造ではわからない。歪ゲージの測定値に対する本当の応力は実線でプロットする。ただし、荷重が大きくなるとポアソン比の影響で幅は4cmよりもやや小さくなるため、応力は図10の実線よりも少し大きくなる。一方、歪ゲージにかかる応力は図6により評価されるから、これを点線で重ねて描いておく。ポアソン比の影響が小さい初期段階から、点線で示す提案した応力測定法による応力の方がやや大きい。つまり、ゲージを貼った部分に応力集中が少しはあることがわかる。しかし、その差は小さく、図5~8の応力-歪曲線から応力を推定してもそれほど悪い結果とはならない。

図9：応力測定の検証用試験体

図10：応力測定法の検証（点線は図6より推定した応力）

4 実験結果

4.1 円形膜試験体

三方向円形歪ゲージを膜の両面に貼る（3.4.2節参照）。歪ゲージの位置は図11~13に示す三種類である。図13のAとCのゲージは直交異方性の場合、繊維方向と一致した中央円盤の接線上にある。また、図11のBのゲージも同様である。直交異方性の膜ではこの接線上の応力が高いという数値解析の結果を考慮している。各ゲージの向きは図14に示しており、C種膜の場合には繊維の方向に一致させる。表3に膜材とゲージ配置の組み合わせ、および、試験体の記号を示す。

表3：試験体

試験体の記号	膜の名称	ゲージ配置
ML1	ポリエステルフィルム	図11
ML2	ポリエステルフィルム	図12
MC1	C種膜	図11
MC2	C種膜	図13

4.2 応力測定

初期張力の導入では、相対する二個のチャックの皿に同時に錘を載せていき、いつも対称に荷重がかかるようにする。最初は各々

10kgfの錘を載せ、その後各々計8kgfの錘を4kgfずつ二回に分けて載せて計18kgfとする。振りの導入では、錘を1kgfずつ載せる。一個あたり数秒かけて載せていき、最後の錘を載せたらすぐに一個ずつ降ろす。最後に初期張力導入用の錘を順に降ろす。

図15、16は振りモーメントと歪の関係である。表3の試験体ML2とMC2についての結果のみ示す。歪は表と裏の平均値であり、図中の先頭にcの付いた番号は図14の表のゲージ番号に対応している。しわの発生により曲線が折れ曲がっている。等方性のポリエステルフィルムの場合は各曲線がほぼ同時に折れ曲がるが、C種膜では変形が周方向について均質ではないため、折れ曲がる点はゲージ位置により異なる。参考のためにしわ発生が目で確認された荷重を表4に示す。

C種膜ではクリープ等により変形が進むため、錘の重さを一定にしても中央円盤は時間と共に回転していく。しかし、応力は一定の重さの錘に釣合っているためそれ程変化しない。ところで、3.4節に示したように歪ゲージの測定値は応力に比例するものであり膜の変形を表してはいない。従って、応力を表す図16の歪ゲージの測定値は錘により段階的に载荷しているにもかかわらずかなり滑らかであり、载荷と除荷の経路もそれ程異ならない。

最後にロゼット解析によりせん断歪を求め、先の引張試験で得た表2の値を用いれば応力が得られる。

表4. しわが確認された荷重

試験体の記号	錘の数	振りモーメント
ML1	4個	160 kgf・cm
ML2	5個	200 kgf・cm
MC1	2個	80 kgf・cm
MC2	4個	160 kgf・cm

4.3 主応力図

図17、18に得られた主応力図を示す。初期張力導入後（振りモーメントは0）、しわ発生直後、および、振りモーメントが最大（400 kgf・cm）の状態における主応力である。しわ発生直後の振りモーメントは、前節に示した振りモーメント-歪曲線の折れ曲がる点と表4を参考にして、ポリエステルフィルム：160kgf・cm、C種膜：80kgf・cmとした。ML1とML2、および、MC1とMC2はそれぞれゲージ位置が異なるだけで同じ条件で実験しているので、主応力をひとつの図に重ねて描く。

ポリエステルフィルムの初期張力導入直後の結果では主応力の方向にやや乱れがある。また、この位置では半径方向の応力が大きいはずだがそうでない点もある。初期張力導入の精度はそれ程良くない。C種膜についても同様である。ただし、後の図に示すように、振りによる応力は初期張力に比べてかなり大きくなるので、最終的な状態における初期張力の乱れの影響は相対的に小さい。なお、外周のチャックのスライド部の摩擦等により、錘の重さの約80%程度が膜面に伝わっていることが、ポリエステルフィルムの測定結果と理論解の比較から分かったので、解析との比較を行う場合にはこれを考慮する必要がある。

振り導入後の各主応力図をみると圧縮応力はほとんど発生しておらず、理想的な張力場に近い状態であるといえる。曲げ剛性がある程度大きいと圧縮応力の存在が許容されると考えられるが、ここで取上げた膜の曲げ剛性程度では、圧縮応力はほとんど解放

図 11: ML1, MC1 ゲージ配置図 (単位:cm)

(15a)

(16a)

図 12: ML2 ゲージ配置図 (単位:cm)

(15b)

(16b)

図 13: MC2 ゲージ配置図 (単位:cm)

(15c)

(16c)

(15d)

(16d)

図 14: 各歪ゲージ (配置図中のA,B,C,Dに対応) の向き

図 15: 振りモーメント-歪曲線¹⁹⁾
(ML2: ポリエステルフィルム)
各図中の c+ 番号は図 14 に示す表の
歪ゲージの番号に対応する。

図 16: 振りモーメント-歪曲線¹⁹⁾
(MC2: C 種膜)
各図中の c+ 番号は図 14 に示す表の
歪ゲージの番号に対応する。

写真 4: ポリエステルフィルム (ML1)、振りモーメント=400kgf・cm

写真 5: C 種膜 (MC1)、振りモーメント=400kgf・cm

(17a) 初期張力導入直後
(外周の外向き合応力=0.626Kgf/cm、1 チャック 18Kgf)

引張

(18a) 初期張力導入直後
(外周の外向き合応力=0.626Kgf/cm、1 チャック 18Kgf)

(17b) しわ発生直後 (160Kgf・cm)

(18b) しわ発生直後 (80Kgf・cm)

(17c) 振りモーメント最大 (400Kgf・cm)

(18c) 振りモーメント最大 (400Kgf・cm)

図 17: 主応力図 (ML1+ML2: ポリエステルフィルム) ¹⁹⁾

図 18: 主応力図 (MC1+MC2: C 種膜) ¹⁹⁾

されている。ただし、実際の膜には厚さがあるので片方の面の歪ゲージの測定値より得られる縁応力は圧縮となることもある。

直交異方性のC種膜では主応力の向きは繊維方向とほぼ一致しており、また、図の横軸である縦糸方向の応力は横糸方向の応力よりも大きい。更に、繊維方向と一致した中央円盤の接線上の応力が特に大きいことがわかる。

写真4、5に試験体の様子を示す。ポリエステルフィルムは透明なのであまりきれいに写らない(写真4)。C種膜では繊維の方向に沿ってしわが発生している様子がわかる(写真5)。また、後に示す写真10、11、13から分かるようにしわの形の特徴はゲージを貼ったことによってそれほど乱されていない。しわの波状の変形の中に貼られたゲージ付近も、一軸的な応力状態となっていることが分かる。写真を主応力図と比較すると、おおむね主応力の向きに沿ってしわが発生しているといえる。

4.4 各種の膜に発生したしわの形状

前節までに示した膜以外にもいくつかの膜について実験を行っている。ここでは写真のみを示す。写真6~8は等方性の膜であり、それぞれゴム膜、厚めのテフロン膜、薄めのテフロン膜である。順に薄くなるためしわの本数が多くなっている。残りの写真は直交異方性の膜である。写真9は気球用の膜であり、透明のシートの中に約2.5mm間隔の格子状にガラス繊維の糸が埋めこまれている。写真10はC種膜であるが、初期張力が前節に示した例よりも小さい。しわが全体に広がっている。写真の上下方向が縦糸方向であり、この方向のしわの方が長い。写真11は同じ試験体を接写したものである。写真12は厚さ0.15mmの薄い直交異方性のシートである。写真13では同じものにゲージを貼って応力測定を行っている。初期張力は写真12の試験体の時よりも大きいため、しわの本数は写真12よりも多くなっている。応力測定の結果は本論文では省略しているが、最初のC種膜の結果と良く似たものとなった。

5 結論

- (1) しわの発生した薄膜の応力測定法を提案した。測定結果からこの方法は妥当であると考えられる。
- (2) しわ発生領域では中央面の圧縮応力はほぼ零であることが確認された。従って、それ程厚い膜でなければ、圧縮応力が存在しないという仮定に基づく張力場理論を適用しても良いといえる。
- (3) 直交異方性膜では引張主応力の向きはほぼ繊維に沿っていることが確認された。しわの向きも同様である。これはせん断剛性がヤング率に比べて相対的に小さいためであると考えられる。建築では直交異方性の膜が一般的であるので、注意が必要である。
- (4) おおむね主応力の向きに沿ってしわは発生する。
- (5) C種膜のように材料非線形性が強い上にクリーブを起こすような材料であっても、荷重を一定にしておけば、膜の応力状態はそれ程変化しない。

本実験の結果は有限要素法による分岐解析の結果と比較することにより検証している²¹⁾。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)によって行った。また、一部の材料試験は太陽工業株式会社空間技

術研究所において同所所員の皆様の協力を得て行った。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) W. R. Dean : The Elastic Stability of an Annular Plate, Proc. Roy. Soc. Lond. A.106, pp. 268-284, 1924
- 2) 井合毅 : 極大エネルギーの定理による弾性問題の解法、日本航空学会誌、第10巻96号、pp. 158-180、昭和18年4月
- 3) M. Stein, J. H. Hedgepeth : Analysis of Partly Wrinkled Membrane, NASA TN D-813, 1961.7
- 4) M. M. Mikulas, Jr. : Behavior of a Flat Stretched Membrane Wrinkled by the Rotation of an Attached Hub, NASA TN D-2456, 1964.9
- 5) E. H. Mansfield : Load transfer via a wrinkled membrane, Proc. Roy. Soc. Lond. A.316, pp. 269-289, 1970
- 6) K. Moriya, M. Uemura : An Analysis of the Tension Field after Wrinkling in Flat Membrane Structures, Proc. IASS Pacific Symposium Part 2 on TENSION STRUCTURES and SPACE FRAMES, Tokyo and Kyoto, pp. 189-198, 1971
- 7) 菊池重昭 : 張力場理論に関する研究—その1、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp. 621-622、1973年10月
- 8) 菊池重昭 : 張力場理論に関する研究—その2、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp. 797-798、1974年10月
- 9) M. Kawaguchi : The Shallowest Possible Pneumatic Forms, IASS Bulletin, No. 63, 1977
- 10) M. Hamada and T. Harima : In-plane Torsional Buckling of an Annular Plate, Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 250, pp. 1089-1095, 1986
- 11) D. G. Roddeman, J. Drukker, C. W. J. Oomens and J. D. Janssen : The Wrinkling of Thin Membranes: Part I-Theory, Part II-Numerical Analysis, Transactions of the ASME, Vol.54, pp.884-892, 1987
- 12) D. G. Roddeman, M. C. van Hout, C. W. J. Oomens, J. D. Janssen and J. Drukker : The Wrinkling of Thin Membranes - Comparison Between Experiments and Theory, ASME AMD(Appl. Mech. Div.), Vol. 84, 267-270, 1987
- 13) 瀬川信哉、三井康司、笹川明 : 膜材の応力-ひずみ曲線からクリーブを分離した材料定数評価に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 41B, pp. 259-269、1995
- 14) 塚越勇、森本広明、大野文義 : せん断座屈後の薄膜と鋼板の剛性に与えるスリットの影響 —鋼板耐震壁の剛性調整に関する研究(その1)、日本建築学会構造系論文集、No. 467, pp. 131-137、1995
- 15) 宮村倫司、小田憲史、半谷裕彦 : 面内振りを受ける円形張力膜に発生するしわの実験、膜構造研究論文集'93、第7巻、pp. 1-9、1993年12月
- 16) 宮村倫司、半谷裕彦 : 面内振りを受ける円形張力膜に発生するしわの実験および解析、膜構造研究論文集'94、第8巻、pp. 1-10、1994年12月
- 17) T. Miyamura and Y. Hangai : Wrinkling on Isotropic and Orthotropic Elastic Circular Membranes under In-plane Torsion, IASS-Symposium 1995(Milano, Italy), Vol.2, pp.851-858, 1995.6
- 18) 宮村倫司、半谷裕彦 : 薄膜構造における近似的な応力測定、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1(北海道)、pp. 731-732、1995年8月
- 19) 宮村倫司、半谷裕彦 : 面内振りを受ける直交異方性円形張力膜のしわ発生時の応力測定、膜構造研究論文集'95、pp. 37-44、平成7年12月
- 20) 宮村倫司、半谷裕彦 : 回転対称膜構造物に発生するしわの有限要素法による解析、日本建築学会構造系論文集、第481号、pp. 63-70、1996年3月
- 21) 宮村倫司、半谷裕彦 : 面内振りを受ける円形張力膜のしわの実験と解析の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集B1(近畿)、pp. 889-890、1996年9月
- 22) 宮村倫司 : 張力膜におけるしわの分岐解析および実験、東京大学博士論文、平成7年12月
- 23) 日本膜構造協会試験法標準: 膜材料面内せん断剛性試験法(MSAJ/M-01-1993)、日本膜構造協会、1993

写真6: ゴム (厚さ=1.0mm、等方性) ¹⁵⁾

写真10: C種膜 (厚さ=0.5mm、直交異方性、MC1、MC2と同じ膜、初期張力はチャックあたり10Kgf)

写真7: テフロンフィルム (厚さ=0.20mm、等方性)

写真11: C種膜 (写真10の接写)

写真8: テフロンフィルム (厚さ=0.10mm、等方性) ¹⁵⁾

写真12: コーティングされた薄い膜 (厚さ=0.15mm、直交異方性、初期張力はチャックあたり10Kgf) ¹⁶⁾

写真9: 気球用の膜 (厚さ=0.10mm、直交異方性) ¹⁵⁾

写真13: コーティングされた薄い膜 (写真12と同じ膜にゲージを貼って応力を測定中、初期張力はチャックあたり18Kgf)

(1996年10月9日原稿受理、1996年12月12日採用決定)