

# 引張力を受ける膜材料と基布のしわ性状に関する実験的研究

呂 品琦<sup>\*1)</sup>

川口健一<sup>\*2)</sup>

## 梗 概

本研究では、一方向引張力下で平面矩形膜に発生するしわについて、精密実験を行い、しわの発生機構及び性状について検討する。特に、建築用膜材の構成に着目し、複合膜材料のもととなる基布（コーティング前の膜材料）とコーティングされた膜材料を用いて、しわの発生及び形態について比較する。また、引張力方向と繊維方向とのなす角度の違い及び試験片の縦横比（アスペクト比）によるしわの性状の変化を調査する。しわ波の客観的比較を行うため、フーリエ・スペクトル解析を用いた、実験解析手法を適用する。

### 1. はじめに

膜構造に発生するしわの問題に関する詳細な実験的研究は少ない。比較的研究されているモデルは、振りを受ける円形張力膜のしわ発生問題である(文献3, 7))。また、せん断力を受ける膜のしわの発生問題についての実験も見られる(文献4, 5, 6))。過去に行われた実験の多くは、理論解析手法を確かめるため、特殊なモデルについて簡単な実験を行っているだけの場合が多い。また、発生するしわ形状を詳細に検討することがなく、写真撮影と解析形状を外形的に比較しているのみである。

本研究では、単純な境界条件でありながら従来あまり調査されていない、一方向引張力下で膜に発生するしわについて、精密実験を行い、しわの発生及び性状について検討することを目的とする。特に、建築用膜材の構成に着目し、複合膜材料のもととなる基布、つまりコーティングされていない膜材料とコーティングされた膜材料(C種)を用いて、単軸引張りを受ける膜材のしわ発生を精密実験を行い、しわの発生性状及び形態について比較する。

表1. 実験に用いた4種の材料の材料定数

材料名称	厚さ t (cm)	$E_1 t$ (kgf/cm)	$\nu_{12}$	$E_2 t$ (kgf/cm)	$\nu_{21}$	$G_t$ (kgf/cm)	$D_1 (\times 10^{-6})$ (kgf·cm <sup>2</sup> )	$D_2 (\times 10^{-6})$ (kgf·cm <sup>2</sup> )
C1 (C種膜材料) (コーティング済み)	0.062	243	0.55	227	0.51	24.19	4600	4290
C1の基布 (CK1)	0.052	182.83	0.77	158.18	0.67	-	2270	1960
C2 (C種膜材料) (コーティング済み)	0.053	326	0.34	232	0.24	12.82	4040	2880
C2の基布 (CK2)	0.026	179.38	0.63	200.14	0.56	-	263	293

また、引張力方向と繊維方向とのなす角度の違い及び試験片の縦横比（アスペクト比）によるしわの性状の変化を調査する。

しわ波の客観的比較を行うため、フーリエ・スペクトル解析を用いた、実験解析手法を適用する。

( $E_1 t$ : 縦方向引張剛性、 $E_2 t$ : 横方向引張剛性、 $\nu_{12}$ : 縦方向ポアソン比、 $\nu_{21}$ : 横方向ポアソン比、 $G_t$ : せん断剛性、 $t$ : 膜材料の厚さ、 $D_1$ 、 $D_2$ : 曲げ剛性、添え字 1, 2 は縦、横糸方向を示す。)

1) 東京大学大学院工学系研究科

2) 東京大学生産技術研究所 助教授 工学博士

## 2. 実験概要

実験方法については、文献1)に詳細に述べてあるので、ここでは、実験に用いた試験体についてのみ述べる。

試験体として、基布重量の異なる2種類のC種膜材(C1、C2)を採用している。両者共にポリエステル繊維にPVC(ポリ塩化ビニル)がコーティングされたC種膜材であり、繊維重量300g/m<sup>2</sup>のものをC1、繊維重量155g/m<sup>2</sup>のものをC2と呼ぶ。また、各膜材の基布の状態CK1、CK2でも同時に実験を行った。各試験体の材料定数を表1に示す。

引張力の方向と縦糸方向のなす角度が0°と45°の場合について実験を行った。

本実験では、表2に示された22ケースの試験体について実験を行った。膜材料については、C1膜材料及び基布の製品幅が1m以内のため、大きさ35cm×105cmの45°の場合には、実験ができなかった。

測定方法についても、前報(文献1)を参照されたい。

## 3. 実験結果

実験結果を写真1~5、表3及び図1~15に示す。写真1~5は各試験体のしわ発生の様子である。レーザ変位計の測定より求めた、各試験体しわ発生時の中心断面及び1/4断面のしわ波断面図を図1~12の(a)(b)に示す。また、長手方向5cm間隔で測定したしわ断面形状により求めた膜面全体の面外変形状態は図1~12の(d)に示している。ただし、面外方向(Z方向)変位を10倍に拡大してある。実験の都合のため、35×70cm

( $\theta=0^\circ$ )のCK2及び35×35cm( $\theta=45^\circ$ )のC2のしわ断面は測定することができなかった。

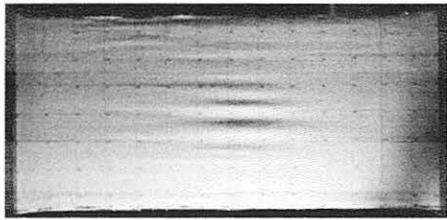
発生したしわ波の波数、しわ波間の長さ波長、しわ波の大きさ振幅、また、どんな振動数成分の波から成り立っているか、そのうちどんな成分のものが卓越しているか等、しわ波を客観的に調査するため、フーリエ変換によるスペクトル解析(高速フーリエ変換)を行った。ここでは、フーリエ・スペクトル解析結果のうち各試験体の中心断面のしわ波の波長—振幅パワー関係図を図1~12の(c)に示す。また、表4に中心断面のしわ波の卓越波長及び振幅の実験値(目視により確認したもの)とスペクトル解析結果を示す。

表2. 実験に用いた試験片形状(各1枚ずつ)

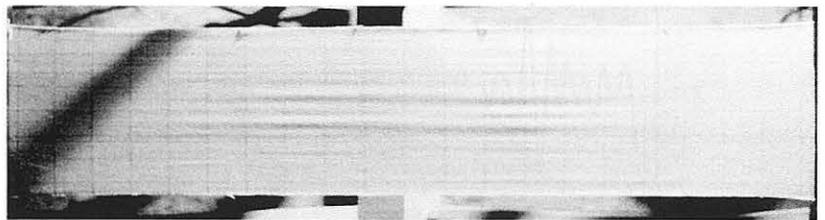
材料名称	$\theta=0^\circ$			$\theta=45^\circ$		
	35×35cm	35×70cm	35×105cm	35×35cm	35×70cm	35×105cm
C1 (C種膜材料) (コーティング済み)	○	○	○	○	○	—
C1の基布 (CK1)	○	○	○	○	○	—
C2 (C種膜材料) (コーティング済み)	○	○	○	○	○	○
C2の基布 (CK2)	○	○	○	○	○	○

表3. しわ発生の状態

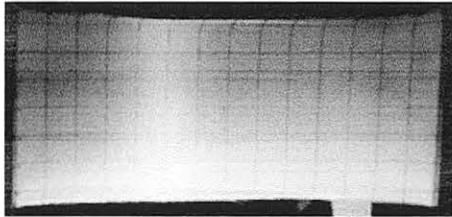
材料名称	厚さ (mm)	試験体 サイズ(cm)	しわ発生荷重 (kgf)	しわ本数 (本)
C種膜材料 (C1) ( $\theta=0^\circ$ )	0.62	35×35 35×70 35×105	1100 まで荷重 1300 まで荷重 800	無し 無し 2-3
C種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta=0^\circ$ )	0.52	35×35 35×70 35×105	500 まで荷重 82 250	無し 7-9 5-6
C種膜材料 (C2) ( $\theta=0^\circ$ )	0.53	35×35 35×70 35×105	1130 まで荷重 1600 まで荷重 950	無し 無し 細かいしわ多数
C種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta=0^\circ$ )	0.26	35×35 35×70 35×105	788 まで荷重 380 350	無し 細かいしわ多数 細かいしわ多数
C種膜材料 (C1) ( $\theta=45^\circ$ )	0.62	35×35 35×70 35×105	700 まで荷重 60 —	無し 4 —
C種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta=45^\circ$ )	0.52	35×35 35×70 35×105	275 まで荷重 10 —	無し 5 —
C種膜材料 (C2) ( $\theta=45^\circ$ )	0.53	35×35 35×70 35×105	330 34 16	2 5 2
C種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta=45^\circ$ )	0.26	35×35 35×70 35×105	146 2 引張と同時に	4 5 4



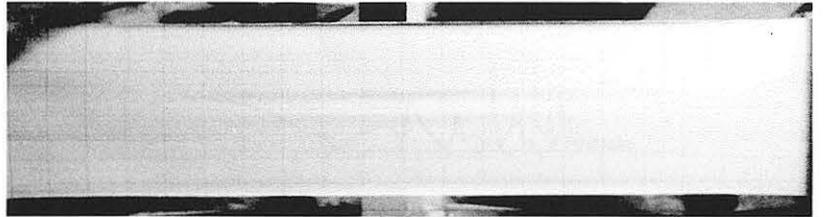
(a) CK1 (荷重 82kg)



(a) CK1 (荷重 250kg)

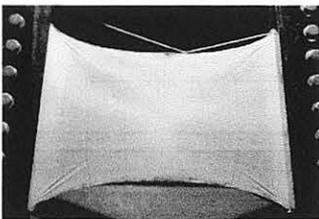


(b) CK2 (荷重 380kg)

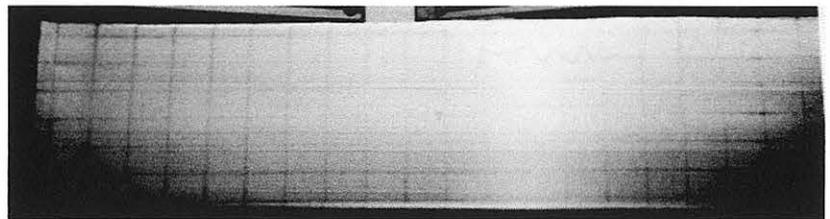


(b) C1 (荷重 800kg)

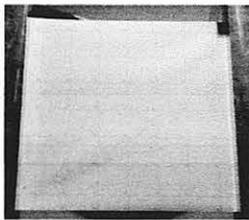
写真 1. 35×70cm ( $\theta=0^\circ$ ) のしわ発生の様子



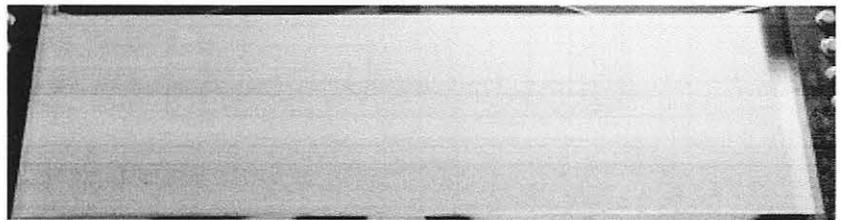
(a) CK2 (荷重 146kgf)



(c) CK2 (荷重 350kgf)



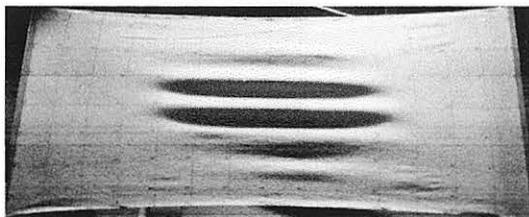
(b) C2 (荷重 330kgf)



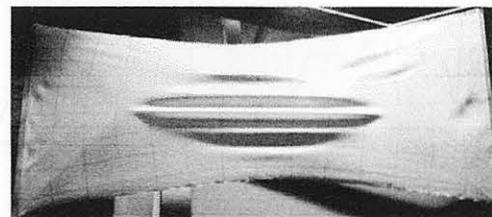
(d) C2 (荷重 950kg)

写真 3. 35×35cm ( $\theta=45^\circ$ ) のしわ発生の様子

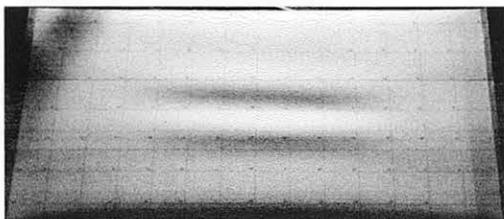
写真 2. 35×105cm ( $\theta=0^\circ$ ) のしわ発生の様子



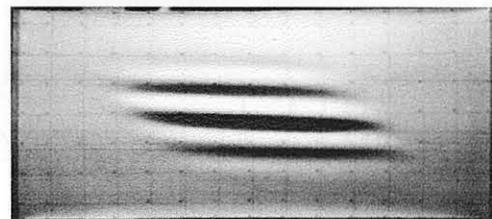
(a) CK1 (荷重 10kg)



(c) CK2 (荷重 2kg)

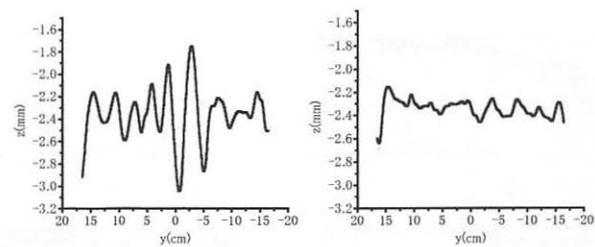


(b) C1 (荷重 60kg)



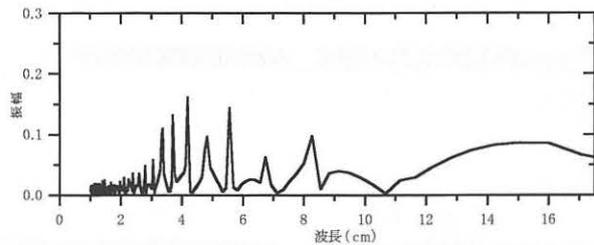
(d) C2 (荷重 34kg)

写真 4. 35×70cm ( $\theta=45^\circ$ ) のしわ発生の様子

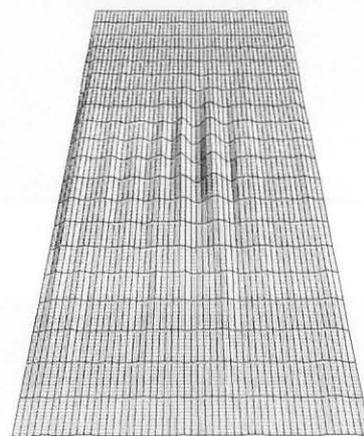


(a)中央断面図

(b)1/4断面図

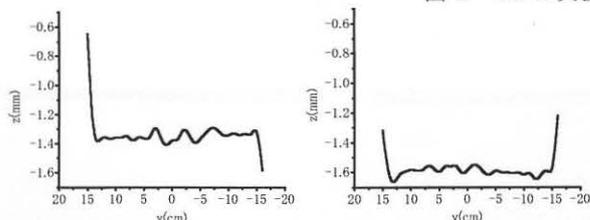


(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



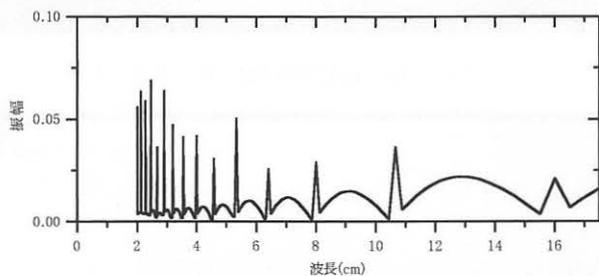
(d)しわの測定図

図1. CK1の実験結果—35×70cm ( $\theta = 0^\circ$ )

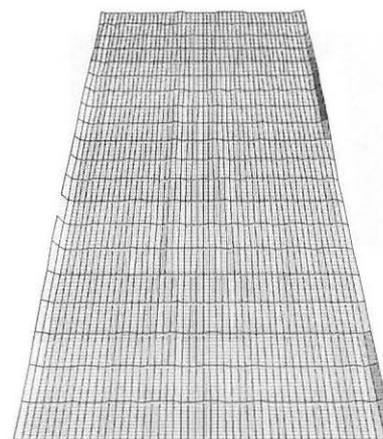


(a)中央断面図

(b)1/4断面図

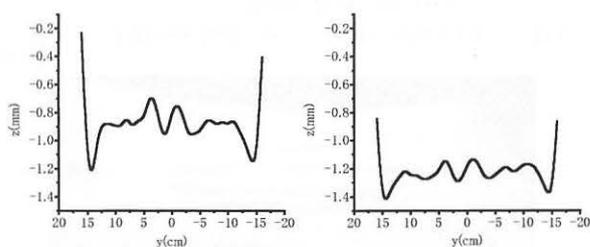


(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



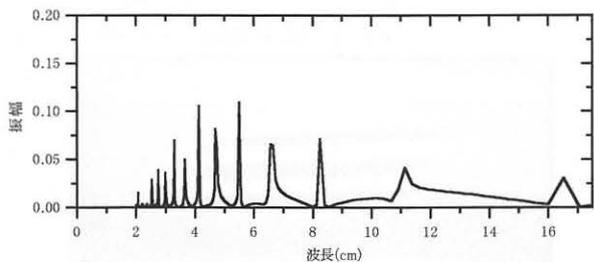
(d)しわの測定図

図2. CK1の実験結果—35×105cm ( $\theta = 0^\circ$ )

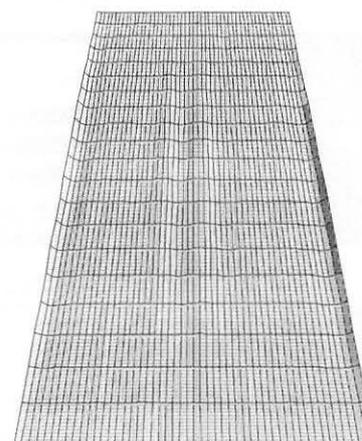


(a)中央断面図

(b)1/4断面図



(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



(d)しわの測定図

図3. C1の実験結果—35×105cm ( $\theta = 0^\circ$ )

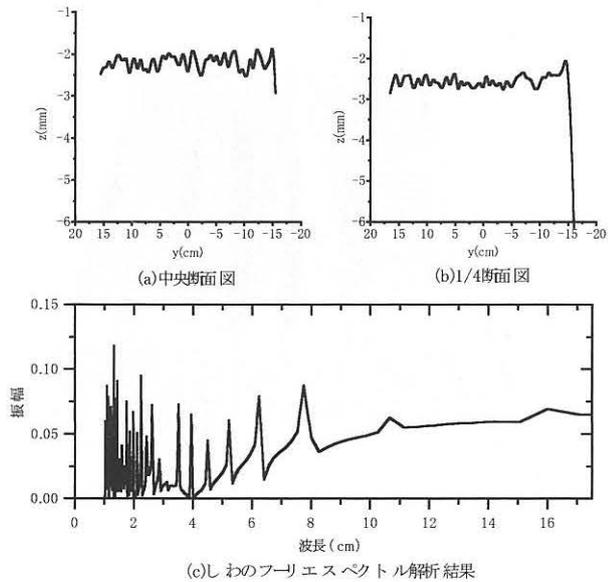


図4. CK2の実験結果—35×105cm ( $\theta=0^\circ$ )

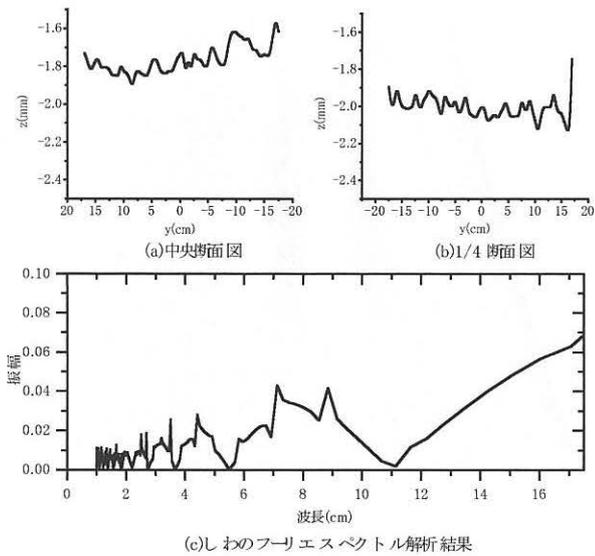


図5. C2の実験結果—35×105cm ( $\theta=0^\circ$ )

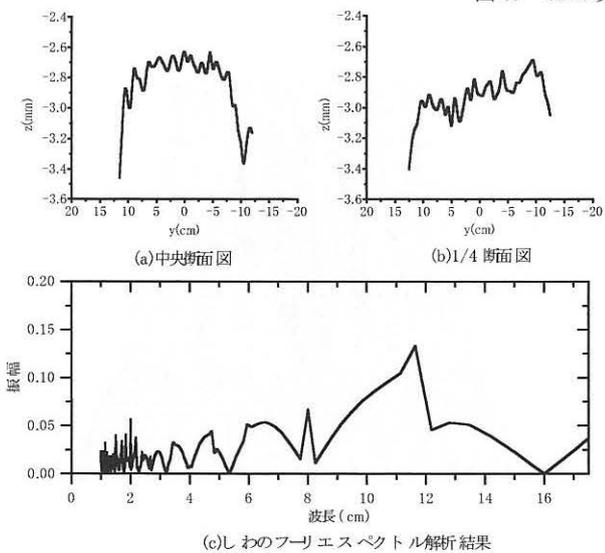
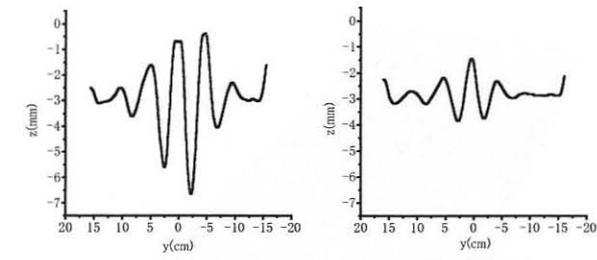
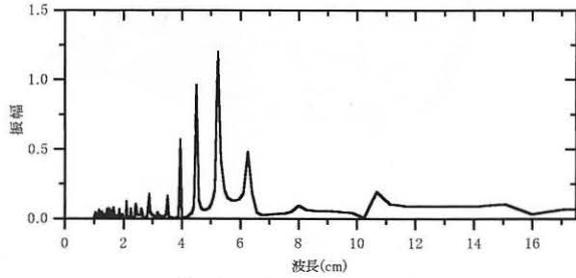


図6. CK2の実験結果—35×35cm ( $\theta=45^\circ$ )

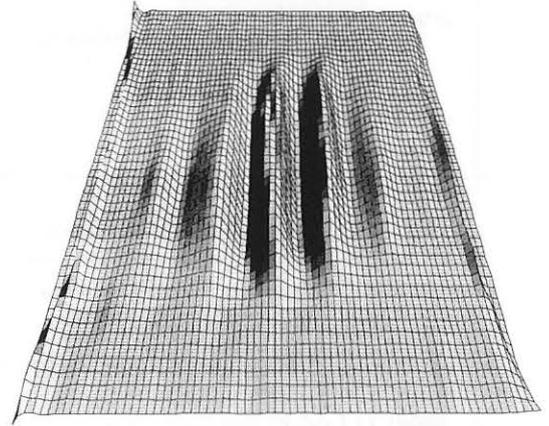


(a)中央断面図

(b)1/4 断面図

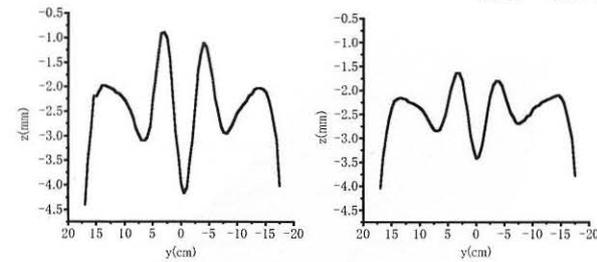


(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



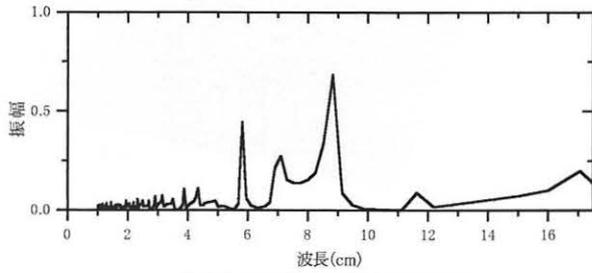
(d)しわの測定図

図 7. CK1 の実験結果—35×70cm ( $\theta = 45^\circ$ )

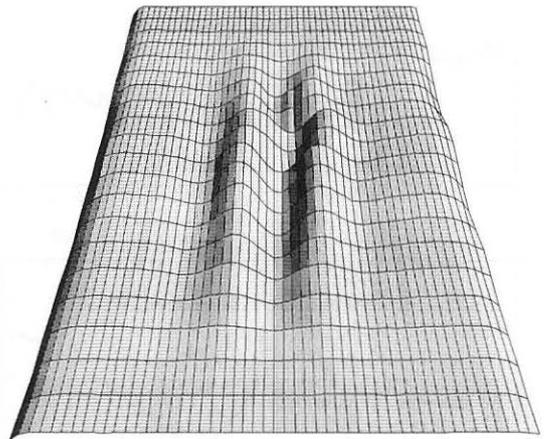


(a)中央断面図

(b)1/4 断面図

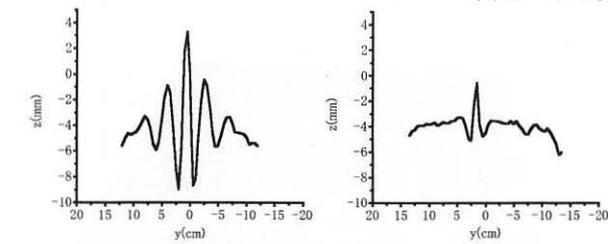


(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



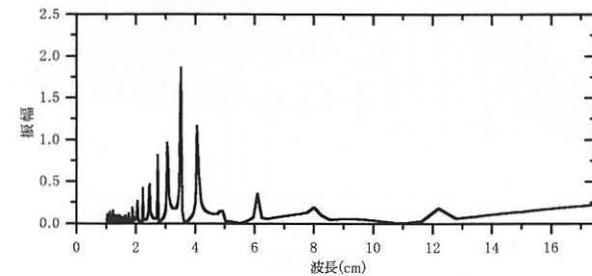
(d)しわの測定図

図 8. C1 の実験結果—35×70cm ( $\theta = 45^\circ$ )

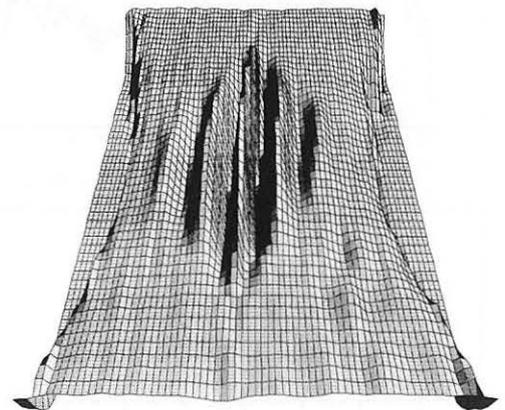


(a)中央断面図

(b)1/4 断面図



(c)しわのフーリエスペクトル解析結果



(d)しわの測定図

図 9. CK2 の実験結果—35×70cm ( $\theta = 45^\circ$ )

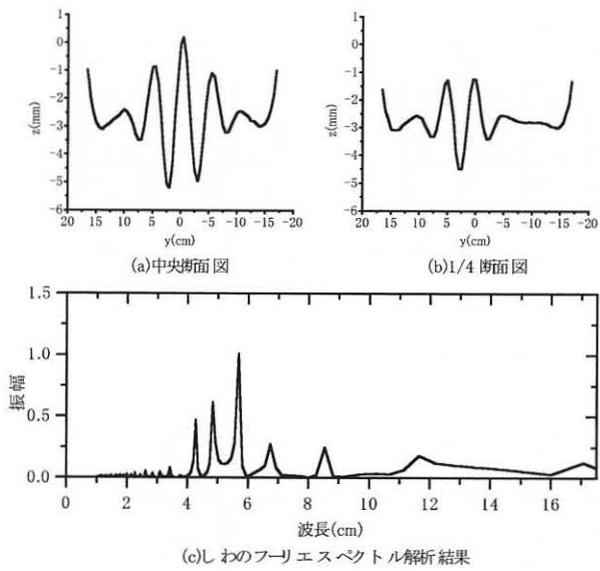
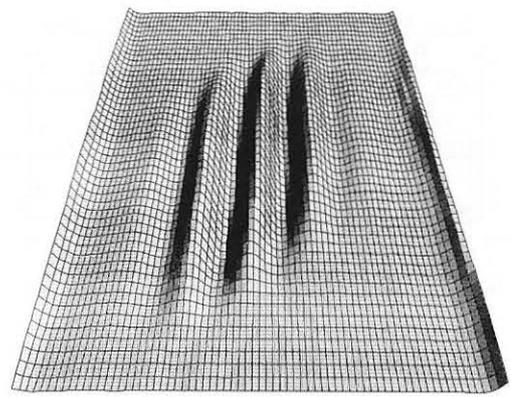


図 10. C2の実験結果—35×70cm ( $\theta=45^\circ$ )



(d)しわの測定図

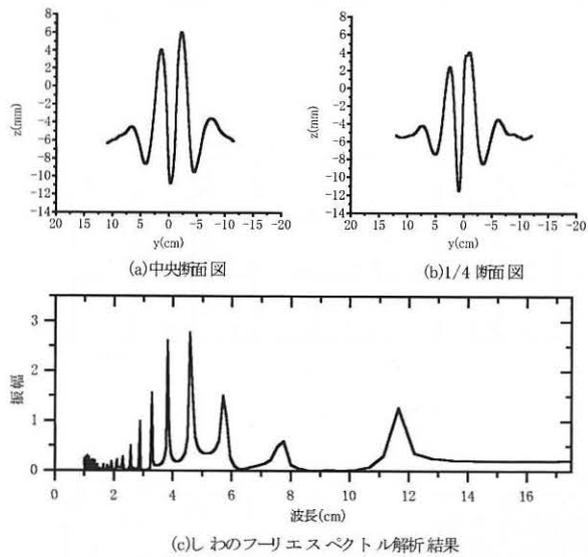
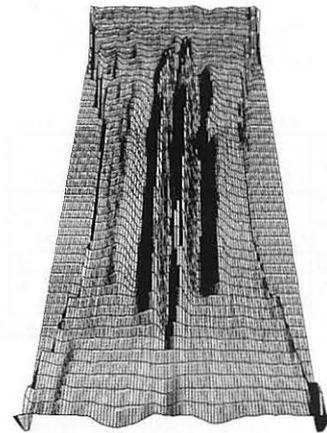


図 11. CK2の実験結果—35×105cm ( $\theta=45^\circ$ )



(d)しわの測定図

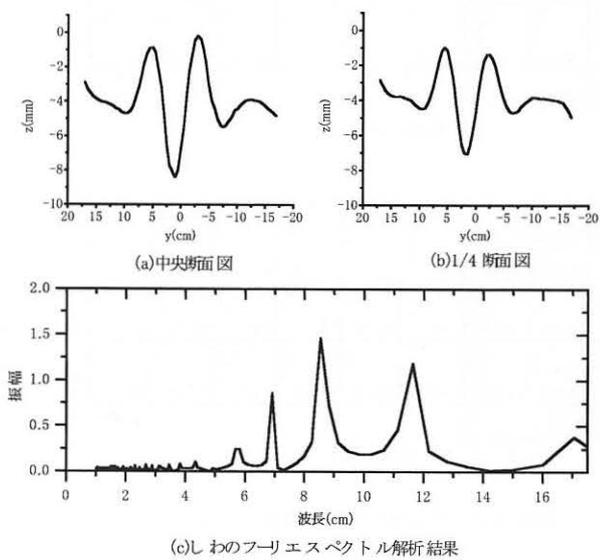
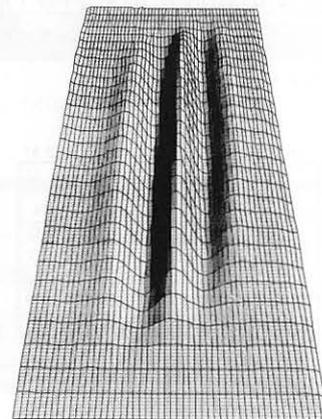
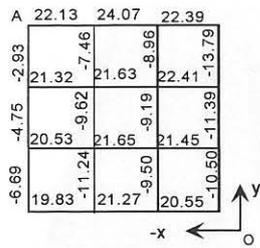


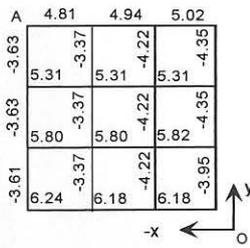
図 12の実験結果—C2 35×105cm ( $\theta=45^\circ$ )



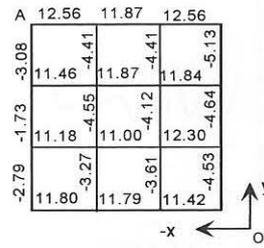
(d)しわの測定図



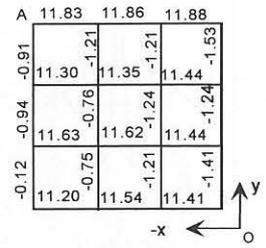
(a) CK1 (荷重 500kgf)



(b) C1 (荷重 1100kgf)

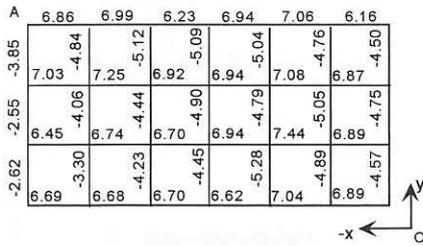


(c) CK2 (荷重 788kgf)

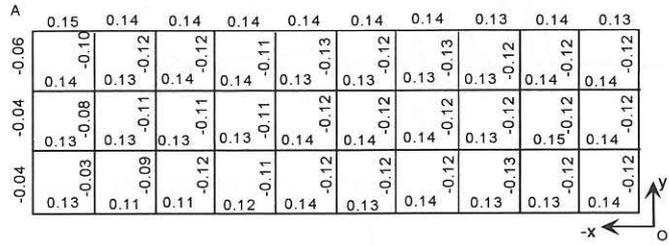


(d) C2 (荷重 1130kgf)

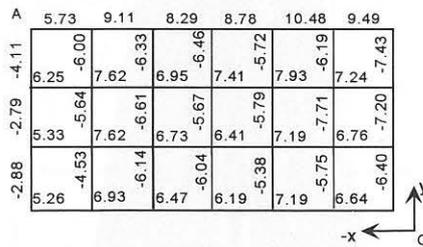
図 13. 膜面のひずみ分布—35×35cm ( $\theta=0^\circ$ )



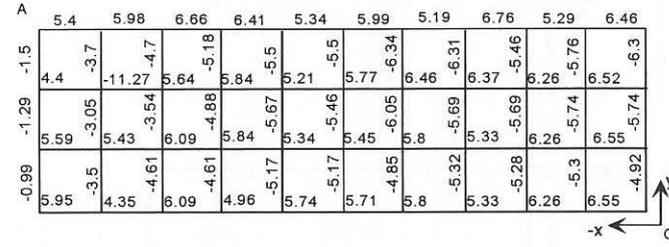
(a) CK1 (荷重 82kgf)



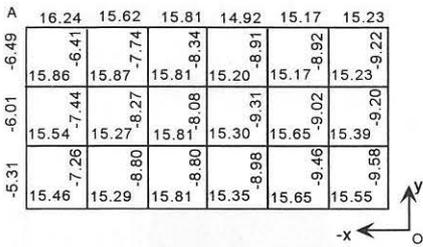
(a) CK1 (荷重 250kg)



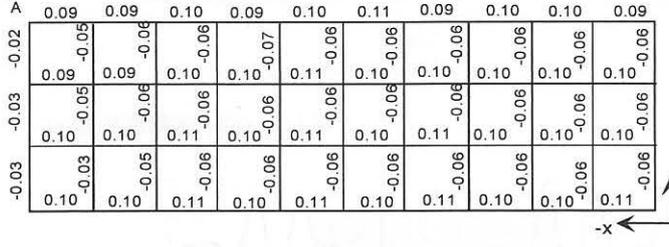
(b) CK2 (荷重 320kgf)



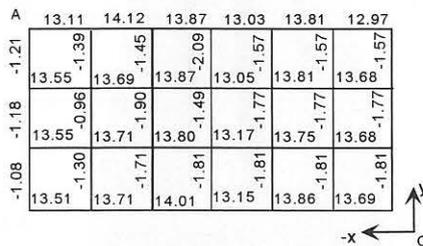
(b) CK2 (荷重 350kg)



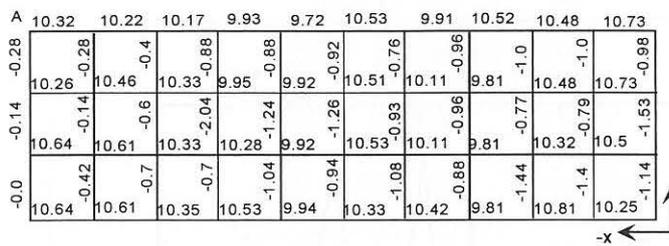
(c) C1 (荷重 1300kgf)



(c) C1 (荷重 800kg)



(d) C2 (荷重 1600kgf)



(d) C2 (荷重 950kg)

図 14. 膜面のひずみ分布—35×70cm ( $\theta=0^\circ$ )

図 15. 膜面のひずみ分布—35×105cm ( $\theta=0^\circ$ )



表 4. しわ波の卓越波長と振幅 (スペクトル解析結果と実験結果)

材 料 名 称	厚さ (mm)	供試体 サイズ(cm)	波長 (断面図目視) (mm)	波長 (スペクトル解析結果) (mm)	最大振幅 (実験値)	振幅パワー (スペクトル解析結果)
C 種膜材料 (C1) ( $\theta=0^\circ$ )	0.62	35×35 35×70 35×105	- - 40	- - 55.0	- - 0.32	- - 0.11
C 種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta=0^\circ$ )	0.52	35×35 35×70 35×105	- 45 30	- 41.9 24.0	- 0.14 0.17	- 0.16 0.07
C 種膜材料 (C2) ( $\theta=0^\circ$ )	0.53	35×35 35×70 35×105	- - 30	- - 71.2	- - 0.18	- - 0.04
C 種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta=0^\circ$ )	0.26	35×35 35×70 35×105	- - 15	- - 13.1	- - 0.58	- - 0.12
C 種膜材料 (C1) ( $\theta=45^\circ$ )	0.62	35×35 35×70 -	- 70 -	- 88.3 -	- 3.28 -	- 0.69 -
C 種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta=45^\circ$ )	0.52	35×35 35×70 -	- 45 -	- 51.7 -	- 6.60 -	- 1.20 -
C 種膜材料 (C2) ( $\theta=45^\circ$ )	0.53	35×35 35×70 35×105	- 50 80	- 57.0 84.9	- 5.13 8.24	- 1.01 1.46
C 種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta=45^\circ$ )	0.26	35×35 35×70 35×105	10 30 40	23.18 34.9 45.5	0.59 12.25 16.70	0.31 1.86 2.77

#### 4. 考察

##### 4.1 曲げ剛性の影響

膜材の曲げ剛性としわ発生荷重、しわ波の本数、しわ波の最大振幅、波長の関係を、引張方向と膜材料の縦糸となす角度が  $0^\circ$  と  $45^\circ$  それぞれの場合について、図 19(a) (b) に示す。曲げ剛性の代表値として  $D_2$  を用いている。

##### 1) 曲げ剛性としわ発生荷重の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、膜材料の曲げ剛性が小さくなると、しわの発生した試験体の数が増えることがわかる。コーティングされていない基布の場合には、コーティングされている膜材料より、曲げ剛性が小さく、しわ発生荷重も小さいことが見られる。

$\theta=45^\circ$  の場合には、しわ発生した試験体の数が、 $\theta=0^\circ$  時の試験体より増えることが見られ、しわ発生荷重も小さくなることから。

##### 2) 曲げ剛性としわ本数の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、コーティングされている膜材料より基布の方がしわ本数が多いことがわかる。また、基布 CK2 の曲げ剛性は CK1 より小さく、しわの本数も多くなっていることがわかる。

$\theta=45^\circ$  の場合には、曲げ剛性の変化によって、しわの本数が大きな変化がない。しわの本数が曲げ剛性と直接関係はないことが分かる。

##### 3) 曲げ剛性としわ波振幅の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、曲げ剛性が増加しても、しわ波の振幅が大きな変化は見られない。つまり、曲げ剛性としわ波の振幅との関係は少ないと考える。

$\theta=45^\circ$  の場合には、曲げ剛性が大きくなると、しわ波の振幅が

小さくなるのが分かる。また、基布の振幅がコーティングされる膜材料より、大きいであることが分かる。

##### 4) 曲げ剛性としわ波波長の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、曲げ剛性が増加しても、しわ波の波長には変化は見られなかった。つまり、しわ波の波長に対して曲げ剛性の影響は小さいと考えられる。

$\theta=45^\circ$  の場合には、曲げ剛性が増加すると、しわ波の波長が大きくなるのがわかる。

##### 4.2 アスペクト比の影響

アスペクト比としわ発生荷重、しわ波の本数、最大振幅、波長の関係を引張方向と直交異方性膜材料の縦糸となす角度が  $0^\circ$  と  $45^\circ$  それぞれの場合について、図 20(a) (b) に示す。

##### 1) アスペクト比としわ発生荷重の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、アスペクト比が大きくなると、しわの発生する試験体の数が増えることが分かる。アスペクト比が 1:1 の時、いずれもしわが発生しなかったが、1:2 の時、CK1 には細かいしわが生じ、CK2 には膜面にさらに細かいごつごつした感じのしわが発生した。アスペクト比が 1:3 の時、C1、CK1 はしわが発生し、C2 及び CK2 には膜面に細かいしわが発生した。アスペクト比が大きくなると、しわは発生し易くなると考えられる。

$\theta=45^\circ$  の場合には、C1 と CK1 はアスペクト比 1:1 の時、しわが生じなかった。アスペクト比 1:2 の時、小さい荷重でしわが発生した。C2 と CK2 の場合には、3つのアスペクト比に関わらず全てのタイプでしわが発生し、アスペクト比の増加に伴い荷重が減少した。アスペクト比が大きくなると、しわ発生荷重が小さくなること

がわかる。

2) アスペクト比としわ本数の関係

$\theta=0^\circ$  及び  $\theta=45^\circ$  の場合には、アスペクト比の増加に伴いしわの本数が変わらなかった。しわ本数に対するアスペクト比の影響は少ないことがわかる。

3) アスペクト比としわ波振幅の関係

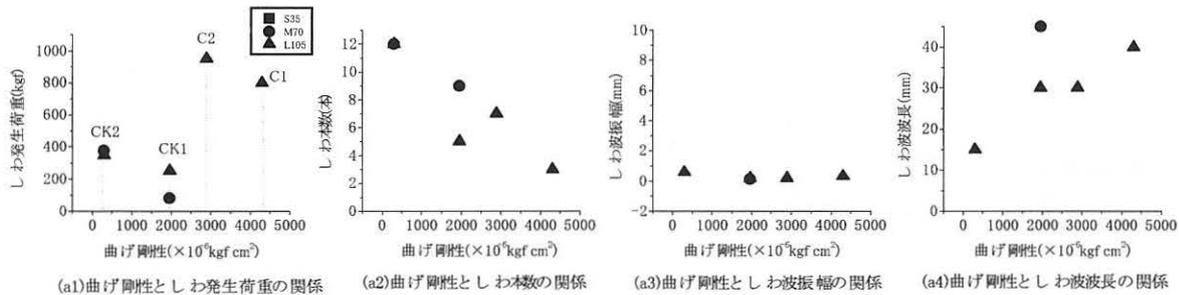
$\theta=0^\circ$  の場合には、特に影響が見られなかった。

$\theta=45^\circ$  の場合には、C1 と C2 のアスペクト比の増加に伴いしわの振幅が大きくなることわかる。

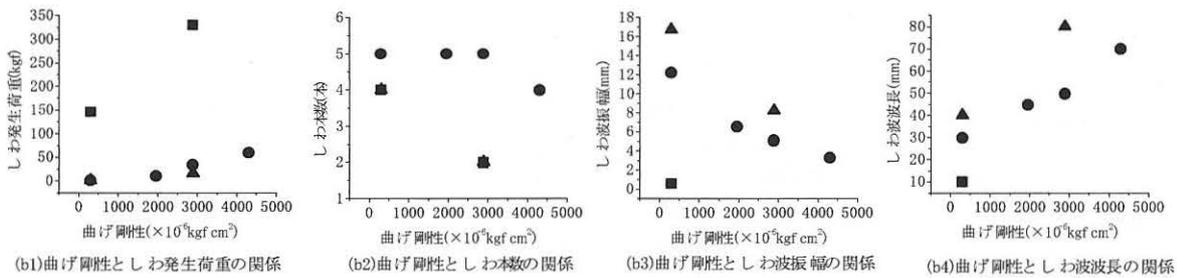
4) アスペクト比としわ波波長の関係

$\theta=0^\circ$  の場合には、しわ波の波長に大きな違いが見られなかった。基布 CK2 の場合には、しわ波の波長が非常に小さかった。

$\theta=45^\circ$  の場合には、アスペクト比が大きくなると、波長が大きくなることわかる。

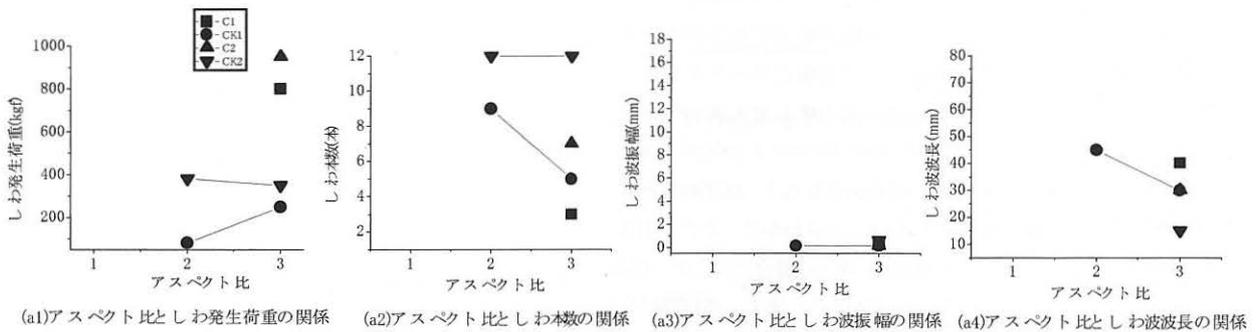


(a)  $\theta = 0^\circ$

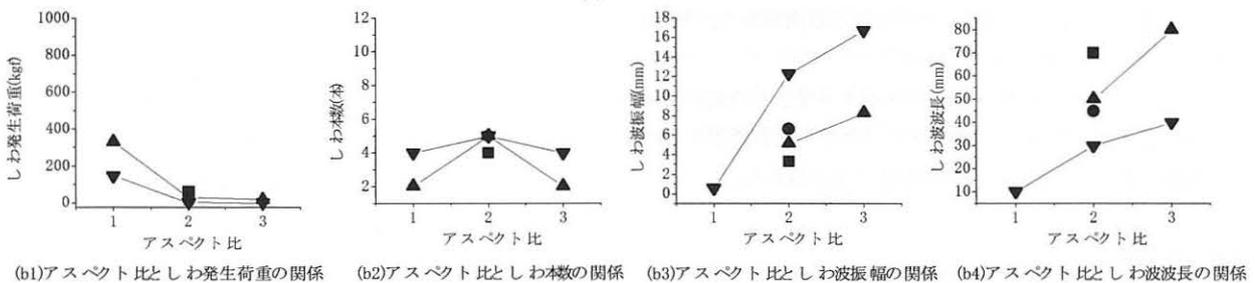


(b)  $\theta = 45^\circ$

図 19. 曲げ剛性の影響



(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

図 20. アスペクト比の影響

表 5. 実験結果の比較

材料名称	厚さ (mm)	供試体 サイズ(cm)	曲げ剛性 $D_2 (\times 10^{-6})$ ( $\text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ )	振幅 (mm)	振幅/厚さ	波長 (mm)	波長/厚さ
C 種膜材料 (C1) ( $\theta = 0^\circ$ )	0.62	35×35	4290	-	-	-	-
		35×70		-	-	-	-
		35×105		0.32	0.52	40	66
C 種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta = 0^\circ$ )	0.52	35×35	1960	-	-	-	-
		35×70		0.14	0.27	45	87
		35×105		0.17	0.32	30	58
C 種膜材料 (C2) ( $\theta = 0^\circ$ )	0.53	35×35	2880	-	-	-	-
		35×70		-	-	-	-
		35×105		0.18	-	30	-
C 種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta = 0^\circ$ )	0.26	35×35	293	-	-	-	-
		35×70		-	-	-	-
		35×105		0.58	2.23	15	58
C 種膜材料 (C1) ( $\theta = 45^\circ$ )	0.62	35×35	4290	-	-	-	-
		35×70		3.28	5.38	70	115
		35×105		-	-	-	-
C 種膜材料の基布 (CK1) ( $\theta = 45^\circ$ )	0.52	35×35	1960	-	-	-	-
		35×70		6.60	12.69	45	87
		35×105		-	-	-	-
C 種膜材料 (C2) ( $\theta = 45^\circ$ )	0.53	35×35	2880	-	-	-	-
		35×70		5.13	9.68	50	94
		35×105		8.24	15.55	80	151
C 種膜材料の基布 (CK2) ( $\theta = 45^\circ$ )	0.26	35×35	293	0.59	2.27	10	38
		35×70		12.25	47.12	30	96
		35×105		16.70	64.23	40	154

#### 4.3 しわ波の振幅及び波長

各試験体の実験結果を材料の厚さ、曲げ剛性ととも、表 5 に示す。この表中の値は図 19、20 に対応するものである。しわ波は材料によらず、中央断面付近で振幅が最大であるので、表中の最大振幅及び波長に中央断面における測定データをもとに計算した。また、振幅は波の z 座標の最小値と最大値の差を取っている。

曲げ剛性としわ波の最大振幅の関係図を見ると、曲げ剛性が小さい場合には、しわ波の振幅が大きいことがわかる。また、引張方向と膜材料の縦糸方向となす角度が  $45^\circ$  の場合には、 $0^\circ$  の場合より振幅が非常に大きくなることがわかる。また、曲げ剛性としわ波の波長の関係図 (図 19(a4)、(b4)) をみると、曲げ剛性の増加に伴い、しわ波の波長が大きくなる傾向があり、 $\theta = 45^\circ$  の場合には、その傾向が顕著であった。

アスペクト比としわ波の振幅、アスペクト比としわ波の波長の関係図を見ると、 $\theta = 45^\circ$  では、アスペクトル比が増加するに伴い、振幅と波長が増加する傾向のあることが分かる。

#### 4.4 歪分布

各試験体のひずみの分布を図 13~18 に示す。これらは、膜面に描いた 5cm 間隔の格子点をノギスで測って求めている。各試験体のデータを見ると、コーティングされた C 種膜材と基布の場合

には、おいてすぐしわが発生したため、歪が小さいことがわかる。引張荷重を受けた時の歪は C 種膜材料の基布が最も大きかった。C 種膜材料のしわ発生荷重は、その基布の 3 倍以上であるにもかかわらず、C 種膜材料のしわ発生時の歪分布はその基布におけるしわ発生時の歪より小さいことが分かる。

また、引張方向と C 種膜材料の縦糸方向となす角度が  $45^\circ$  の場合には、同角度が  $0^\circ$  の場合と比較して、ひずみが非常に大きかった。

#### 4.5 引張力方向と膜材料の糸方向角度

$\theta = 0^\circ$  と  $\theta = 45^\circ$  の実験結果は図 19、20 及び表 5 に同時に示されている。曲げ剛性としわ発生荷重の関係図を見ると、 $\theta = 45^\circ$  の場合には、しわの発生荷重が  $\theta = 0^\circ$  の時より、非常に小さくなり、しわが発生しやすいことが考えられる。

$\theta = 45^\circ$  の場合には、 $\theta = 0^\circ$  の場合よりしわの本数が少なく、振幅が非常に大きくなる結果が得られる。

$\theta = 45^\circ$  の場合には、 $\theta = 0^\circ$  の場合と比較して、ひずみが非常に大きかった。特に基布の場合には、y 方向へ大きく縮んでいることが分かる。

#### 4.6 フーリエスペクトル解析

しわ波の振幅が大きい場合には、スペクトル解析結果により、ピークがはっきり見られ、卓越成分の波長がよく目視結果と一致している。しわ波の振幅が小さい場合は、スペクトル解析結果により、連続ピークが現れ、卓越成分を良く表わせなかった。

#### 5. まとめ

本論文において得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 本実験では、コーティングされたC種膜材料とその基布について同様の実験を行っている。発生したしわの形状を見ると、基布とコーティングされた膜材料のしわ発生領域やしわ形状はよく似ており、膜材料のしわ性状に関する特性はその基布の特性に依存するものと推察できる。
- 2) レーザー変位計によって測定されたデータをもとに、フーリエ・スペクトル解析を行い、しわ波の卓越振幅と波長を求めた。解析結果と実験結果は振幅の大きいしわにおいてはよく一致している。
- 3) 膜材料の曲げ剛性の増加に伴い、しわ発生荷重は大きくなり、しわは発生しにくくなることが分かった。また、しわの本数は少なくなり、振幅は小さく、波長は長くなる傾向にあることがわかった。
- 4) 膜形状については、アスペクト比の増加に伴い、しわは発生しやすくなるという結果が得られた。また、しわの本数についてはあまり影響がみられなかったが、しわ波の振幅と波長は少し大きくなる傾向がみられた。
- 5) 膜の変形(ひずみ)については、引張方向と膜材料の縦糸方向とのなす角度 $\theta$ が $45^\circ$ の場合、同角度が $0^\circ$ の場合と比較

して、引張方向と垂直方向(y方向)に大きく縮むことがわかった。また、膜のコーティング材の効果により、y方向の縮みは大きくおさえられていることがわかった。

6) 引張方向と膜材料の縦糸方向とのなす角度 $\theta$ の影響については、 $\theta=45^\circ$ の場合には、 $\theta=0^\circ$ の場合よりも、しわ発生荷重が非常に小さくなり、しわが発生しやすいことがわかった。また、 $\theta=45^\circ$ の方がしわ本数が少なく、振幅が非常に大きくなる傾向にあること、また、y方向の縮みが大きくなることがわかった。

#### 謝辞:

本研究は財団法人能村膜構造技術振興財団の助成を受けて行った。ここに、記して謝意を表します。又、本研究に対し技術支援及び貴重なご助言を頂きました、太陽工業(株)小田憲史氏、林政秀氏に深く感謝します。

#### 参考文献:

1. 呂品琦, 川口健一: 平面矩形張力膜のしわ発生に関する実験的研究, 膜構造研究論文集'99, No.13, pp. 49-56
2. 呂品琦, 半谷裕彦, 川口健一: 矩形張力膜のしわ解析, 膜構造研究論文集'98, No.12, pp. 37-42
3. M. M. Mikulas, Jr: Behavior of a Flat Stretched Membrane Wrinkled by the Rotation of an Attached Hub, NASA TA D-2456, Sept. 1964
4. E. H. Mansfield: Load transfer via a wrinkled membrane, Proc. Roy. Soc. Lond. A. 316, pp.269-289, 1970
5. 菊池重昭: 張力場理論に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.621-622, 昭和48年10月
6. 塚越勇, 森本広明, 多野文義: セン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
7. 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

---

## The Experimental Research on Wrinkling Performance of Tensioned Membrane and Fabric under Uniaxial Tensile Force

Pinqi Lu<sup>1)</sup>

Ken'ichi Kawaguchi<sup>2)</sup>

### SYNOPSIS

In this paper, an experiment research on the wrinkling behavior of flat rectangular membrane has been introduced. Type C membrane with coating material PVC and its fabric PET without coating material have been used in the experiment. The occurrence of wrinkling, the influence of material character, shape, flexible stress, aspect ratio and tension force have been discussed. The angle between tensile force direction and warp direction has been discussed the same time. The wrinkling performances have been analysis by using Fourier Spectral Analysis.

---

1) Graduate School of Engineering, University of Tokyo

2) Associate Professor, Ph.D-Eng. Institute of Industrial Science, University of Tokyo