

## 矩形張力膜のリンクル現象の光学的全視野ひずみ・変位計測

Whole-field strain and deformation measurement for wrinkling phenomena of a rectangular tensioned membrane

松田浩\*・下郡康二\*\*・山下務\*\*\*・岩佐貴史\*\*\*\*

川口健一\*\*\*\*\*・阪上直美\*\*\*\*\*・森田千尋\*\*\*\*\*

Hiroshi MATSUDA, Koji SHIMOGORI, Takashi IWASA, Tsutomu YAMASHITA

Kenichi KAWAGUCHI, Naomi SAKAUE and Chihiro MORITA

\*工博, 長崎大学教授, 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-1-4)

\*\*長崎大学大学院, 生産科学研究科環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町1-1-4)

\*\*\*長崎大学技術職員, 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-1-4)

\*\*\*\*工博, 宇宙航空研究開発機構共同研究員, 宇宙科学研究本部 (〒229-8510 相模原市由野台3-1-1)

\*\*\*\*\*工博, 東京大学生産技術研究所助教授, (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

\*\*\*\*\*長崎大学助手, 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-1-4)

\*\*\*\*\*工博 長崎大学助教授, 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-1-4)

Tensioned membrane structures have so small flexural stiffness that they can not transmit compression stress. The wrinkling of membrane becomes a common problem. The increasing demand for better characterization of materials and components in many cases requires whole-field information for the analysis of the mechanical behavior in wrinkling generation process. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) offers the possibility of whole-field and non contact measurement of displacements and strains. In this paper, ESPI is applied to observe a wrinkling generation process of tensile tests of the rectangular membrane structures. It is found from the experimental test results that a wrinkling occurs at an inflection point of the load - minimum principal strain. Furthermore, using of noncontact and portable 3D-optic measuring device, the wrinkle of membrane are measured three-dimensionally.

*Key Words: tensioned membrane structure, wrinkling, whole-field deformation measurement, electronic speckle pattern interferometry (ESPI), 3D optic measuring system*

キーワード: 張力膜構造, リンクル, 全視野変位計測, 電子スペックルパターン干渉, 3D 形状計測

## 1. はじめに

膜材は, 収納性, 軽量性, 透光性に富んだ構造材料である。このため, 大空間を確保できるとともにデザイン性に富んだ大型膜構造物を形成することが可能となる。近年, その特徴を生かし, 建築分野ではスタジアムや体育館など, また, 航空宇宙工学分野ではソーラーセイル<sup>1)</sup>のように膜を積極的に利用した宇宙構造物が提案され, 次世代大型宇宙構造物を構成する重要な要素として期待されている。

一方, 膜材の特徴として, その薄さ故に曲げ剛性をほとんど持たないことが挙げられる。そのため, 曲げや圧縮に対する抵抗力がほとんどなく, 曲げ応力や圧縮応力を受けるとすぐにリンクル (しわ) やスラッグ (弛み) などの変形が生じやすい材料である。

膜構造物は膜材に張力を導入することによって, 構造系を形成しているが, 一方では過剰な張力の導入はこのリン

クル現象の発生要因となる。リンクル現象は, 膜構造物の美観を損ねるだけでなく, 膜材の破断の原因となったり, また, 雨水や雪がその箇所に溜まるポンティングという現象の原因になるなど, 膜材の維持管理上好ましくない種々の現象を引き起こし, 膜構造物にとって多大な影響を与えることになる。このため, リンクル現象の挙動を把握することは膜構造物にとって重要な問題となっており, リンクル発生や膜構造物の制御問題に関する実験的研究, および張力場理論や分岐座屈理論に基づく解析的な研究がこれまで数多く行われている。

ところで, 前述のように, 膜は材料の剛性の低さのため従来のセンサーではセンサー自体の剛性の影響が無視できず, 有効なセンシング法がないのが現状である。そのため, 膜のひずみ計測を目的として圧電ポリマーを用いた低剛性センサーの開発も行われている<sup>2)</sup>。しかしながら, これも接触式定点計測が基本であり, 膜面でのリンクル発生

位置を特定する場合には、数多くのセンサーを貼付する必要がある。また、たとえ数多くのセンサーを貼付したとしても正確にリンクル発生を検知できない場合もある。

本研究では非接触かつ全視野でのリンクル計測の必要性を鑑み、光学系を用いた電子スペックルパターン干渉法（以後、ESPI と略記）に注目した。この方法では、コヒーレントなレーザ光を用いて変位分布を求めるため、干渉を妨げる外乱がなければ静的および動的な载荷荷重への適用が可能である。ESPI は、粗面でのレーザ光の乱反射によって生じるスペックル模様の明暗の変化を検出する計測方法であり、①光学系が簡単、②可視光線下で計測、③CCD カメラなどの比較的低解像力の記録材料で計測、④リアルタイム計測が可能、などの利点が挙げられる<sup>3)-5)</sup>。

本研究の最終目的は、非接触かつ全視野計測により膜材のリンクル発生を考慮した構成則のための基礎データを取得、膜材のリンクル解析において用いられる張力場理論と分岐座屈理論の適用範囲等を検討することにある。さらに、非接触 3D レーザ計測装置を用いて膜曲面の形状—リンクル計測システムまで発展させることにある。

そのための第一ステップとして、本論文では、この ESPI 計測法を用いて、矩形張力膜のリンクル発生過程における全ひずみ分布を計測した。その結果、リンクル発生を荷重と最小主ひずみ線から特定できることが確認された。また、ESPI 計測装置は 3D 計測も可能であるが、現有装置では面内変位しか求めることができない。そこで、筆者らが試作開発した非接触 3D 形状計測装置を用いてリンクルによって生じる面外変形の計測を行い、その結果も併せて報告するものである。

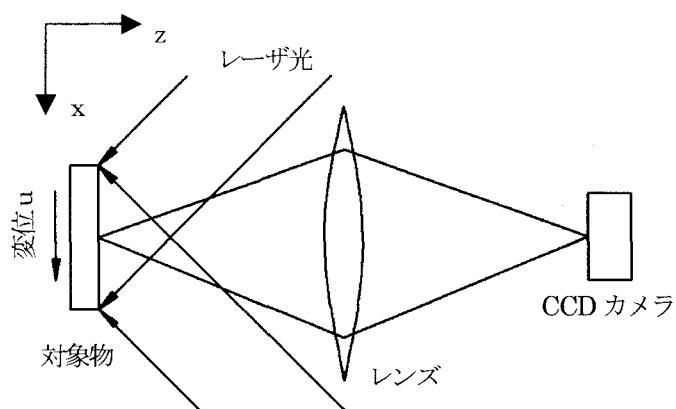
## 2. 電子スペックル干渉法 (ESPI) 計測の原理と性能照査

### 2.1 ESPI 計測の原理<sup>6)</sup>

図-1 にスペックル干渉法の光学系を示す。x 方向のみの光学系を示しているが、y 方向も同様である。同一面内上の二方向から同一波長のレーザ光を対象物の粗面に照射すると、粗面の各点で乱反射する。これらの干渉計の光路差は粗面の各点ごとに不規則に変化するため、互いにランダムな位相関係で重ね合わされ、CCD カメラに取り込まれた像面にはコントラストの高い流動性の斑点模様が形成される。これがスペックルパターンと呼ばれるものである。

例として図-2 に CT 試験片の先端に荷重を加えた場合のスペックルパターンと干渉縞の形成過程を示す。この試験片は高さ 100mm、幅 100mm、厚さ 20mm のアルミ合金からなり、中心に幅 6mm の開口部を有する。右上端部にはボルトが貫通取り付けられており、ボルトを回転させることにより試験片の右上部に上向きの変位を与えることが可能である。

レーザ光の波長を  $\lambda$ 、照射光の入射角を  $\theta$  とする。いま、対象物が面内方向に  $u$  だけ変形したとすると、変形前後で二つの光路を通る光の位相差  $\Delta\phi$  は次式(1)で表される。



$$\Delta\phi = \frac{4\pi u}{\lambda} \sin\theta \quad (1)$$

この位相差が生じるために、干渉強度が変化し、同時に対応するスペックルの明暗も変化し、像面には図-2(a)(b)に示すようなスペックルパターンが生じる。载荷により物体の各点の変位すると光の位相差が生じ、対応するスペックルは明暗を変えるが、(b)図に示すように明暗の変化はほとんど変化が認められず、模様全体は同じように見える。

一方、位相差の変化量が波長の整数倍なら、スペックルの明暗は元にとどまり、変化量が波長の半整数倍の位置では反転することがわかっている。CCD カメラと画像メモリを用いて、変形前のスペックル像と変形後のスペックル像の各点の光の強度を 256 階調に分解し、その差を 2 乗してモニターに表示すると、(c) 図に示すような干渉縞模様を得ることができる。この干渉縞はホログラフィ干渉計測で得られるものと同じものであるが、高解像度の記録媒体を必要とせず、CCD カメラなど解像度の低い記録媒体を使用することができる。

図-3 は、このときの位相の分布を示しており、 $0 \sim 2\pi$  の位相値を 8 ビットのグレースケールで表したものである。縞は位相差  $2\pi$  の間隔で形成されており、次式(2)により縞一本の形成に必要なとされる変位  $u$  を求めることができる。

$$u = \frac{\lambda}{2 \sin\theta} \quad (2)$$

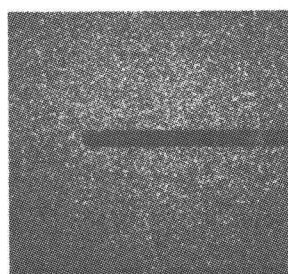
このとき観測される縞模様の分布は次式(3)で与えられ、右辺の第 3 項が干渉縞をつくり出す。すなわち、明暗の変化のない位置では暗く、変化した位置では明るい縞模様が見られる。この方法を電子スペックル干渉法 (Electronic speckle pattern interferometry: ESPI) と呼ぶ。

$$\begin{aligned} V_S &= [(I_{S1} - I_{S2})^2] \\ &= (I_{S1})^2 + (I_{S2})^2 - 2(I_{S1}I_{S2}) \end{aligned} \quad (3)$$

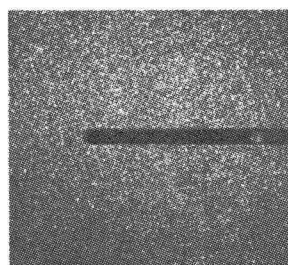
本研究では、干渉計に ETTEMEYER 社製のレーザストレーンアナライザ—2D-ESPI (図-4) を使用した。レーザ光には波長が 780nm (580mW×2) のダイオードレーザ

を用いており、計測レンジは $1\sim 20\mu\text{m}$ である( $20\mu\text{m}$ 以上は分割計測)。ESPIによる面内変位計測は、基本的にレーザ照射方向の変位分布のみしか求めることができない。そのため、本ESPI装置ではレーザをx軸とy軸のそれぞれ二方向から照射できるように配置してある。スペckルパターンを二方向個々に計測することにより面内変位分布の計測が可能となる。

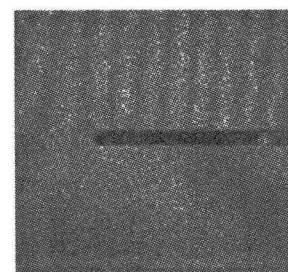
ESPI計測により、まず、図-5に示す1ピクセルごとの変位が求まる。各点の変位が求まると、変形する物体の一般的なひずみと変位の関係式により、図-6に示すようなひずみ値(ひずみ分布)を求めることができる。さらに、図-7に示すような3次元表示や応力状態のベクトル表示も可能である。なお、応力値は計測対象物の弾性係数とポアソン比を入力することにより求められる。



(a) 変形前  $I_{S1}$



(b) 変形後  $I_{S2}$



(c) 干渉縞  $[(I_{S1} - I_{S2})^2]$

図-2 干渉縞の形成

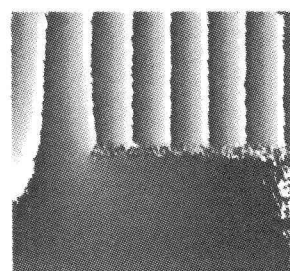


図-3 位相分布図

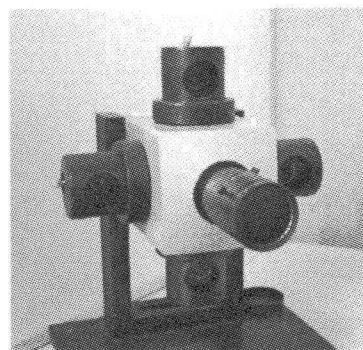


図-4 スペckル干渉計

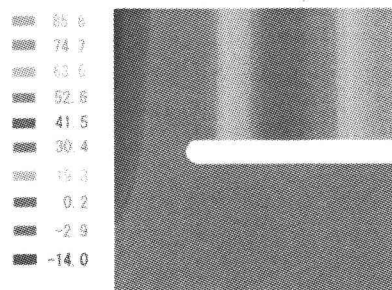


図-5 y方向変位分布 ( $\mu\text{m}$ )

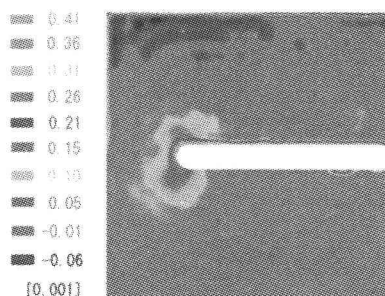


図-6 最大主ひずみ分布

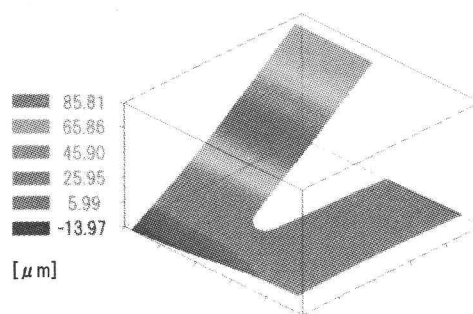


図-7 y方向変位(図-5)の3次元表示

## 2.2 計測性能照査

ESPI計測によるひずみ値測定の精度を確認するため、アルミニウム合金製の試験片(厚さ $2\text{mm}$ )を用いて一軸引張り試験を行った。材料特性を表-1、寸法を図-8に示す。試験片中央縦方向にひずみゲージを貼付し、ESPI計測による測定結果と比較を行なった。その結果を図-9

に示す。弾性域および塑性域においても ESPI 計測によって得られたひずみ値はひずみゲージによって得られたひずみ値とほぼ一致する結果となった。なお、ESPI 計測によるひずみ値は基準長さを任意に取ることができる。ここでの ESPI 計測によるひずみ値は、貼付したひずみゲージ長と同じ長さの平均ひずみ値である。

この結果より、ESPI によるひずみ計測はゲージ法と同程度の精度で計測が可能であることが確認できる。

表-1 アルミ合金の材料定数

| ヤング係数 E   | ポアソン比 $\nu$ | 密度 $\rho$             |
|-----------|-------------|-----------------------|
| 71000 MPa | 0.33        | 2.7 g/cm <sup>3</sup> |

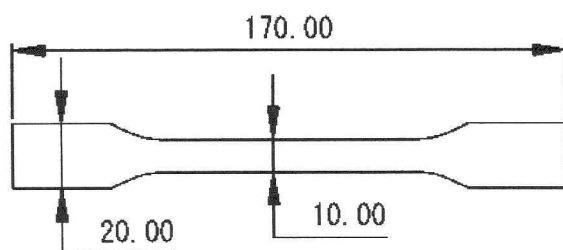


図-8 一軸引張り試験片

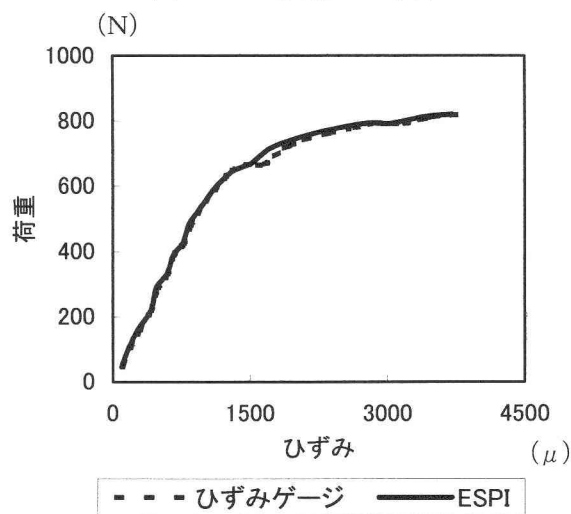


図-9 荷重-ひずみ曲線

### 3. ESPI 計測による張力膜のリンクル現象の計測

#### 3.1 実験概要

本研究では、張力膜のリンクル現象による面内のひずみ、応力の推移を、2章で説明した ESPI を用いて計測した。なお、ESPI によるひずみ値はリンクル発生前まではアルミ合金と同じように正確なひずみ値を与える。しかし、リンクル発生時、あるいはその後においては、分岐座屈後のひずみ値であり、面外変形が生じており、正確なひずみ値ではないことも考えられる。そこで、本実験での ESPI 計測は、リンクル発生荷重とリンクル発生箇所を特定することに注目した。リンクルの面外変形状状については4章で後述する。

図-10 にその計測風景を示す。ESPI は微小変形を計測するため、振動などの外部からの影響を受けやすい。そのため、図-10 のような治具を用いて引張試験機と ESPI を一体化し計測を行った。なお、本実験では膜材の下端を完全固定とし、上端に面内引張力を与えた。

膜材には、膜厚 50  $\mu$ m のポリエステルフィルムを使用した。ポリエステルフィルムのヤング係数は 4 GPa、ポアソン比は 0.2 である。試験片はアスペクト比（縦横辺長比）の異なる試験片 A, B, C の 3 種類を作製した。試験片の概要を表-2 に示す。

スペックル干渉法は対象物の粗面でレーザ光が乱反射することを利用した計測法である。本実験で使用した膜材の表面は滑らかなので、試験片の計測範囲に浸透探傷用現像剤エアゾールをスプレーすることにより表面を粗面処理した。なお、現像剤の有無がリンクル現象に与える影響を調べるため、現像剤を塗布した試験片と塗布していない試験片で予備試験を行ったが、それによるリンクル発生荷重の差異はほとんど認められなかった。

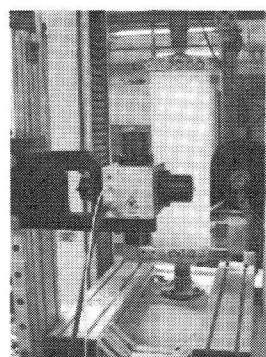


図-10 計測風景

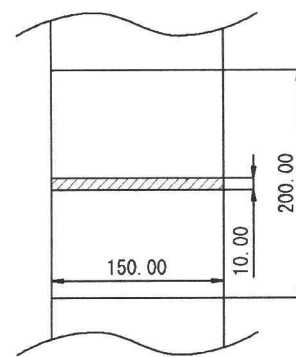


図-11 試験片計測範囲

表-2 試験片概要

| 試験片 | アスペクト比          |
|-----|-----------------|
| A   | 1:2 (150×300mm) |
| B   | 1:3 (150×450mm) |
| C   | 1:1 (150×150mm) |

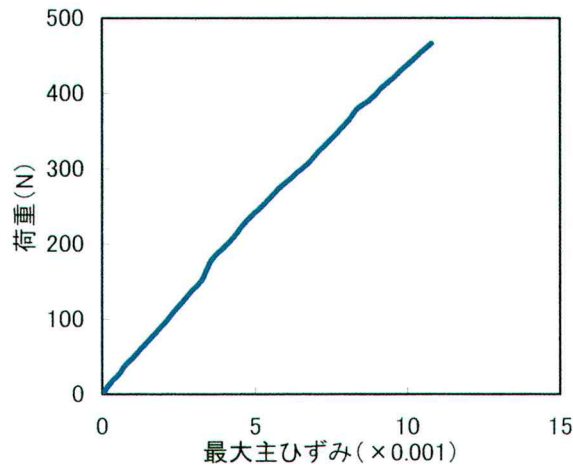
#### 3.2 実験結果

図-11 に示す 150×200mm の領域を計測範囲として、全視野計測を実施した。図-12 は、図-11 の斜線で囲まれた範囲 (150×10mm) の平均ひずみ値 (最大主ひずみ、最小主ひずみ、せん断ひずみ) の荷重-ひずみ曲線である。本実験において、目視観察による試験片 A のリンクル発生荷重は約 310N であった。一方、図-12 を見ると、荷重-最小主ひずみ曲線の図(b)において 310N の前の 260N の箇所ではひずみが緩和している特異な現象を確認できる。そこで、荷重-最小主ひずみ関係に注目して、試験片 B, C でも同様の載荷実験を行なった。表-3 には試験片 A,

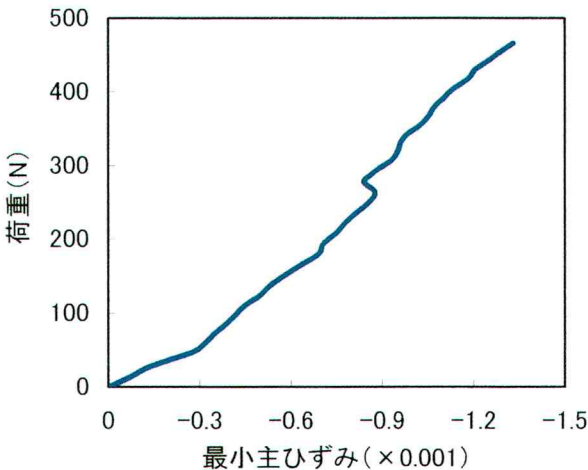
B, C のリンクル発生荷重と発生状態を示す。また、試験片 B, C 荷重－ひずみ曲線を図-13 に示す。

表-3 リンクル発生荷重

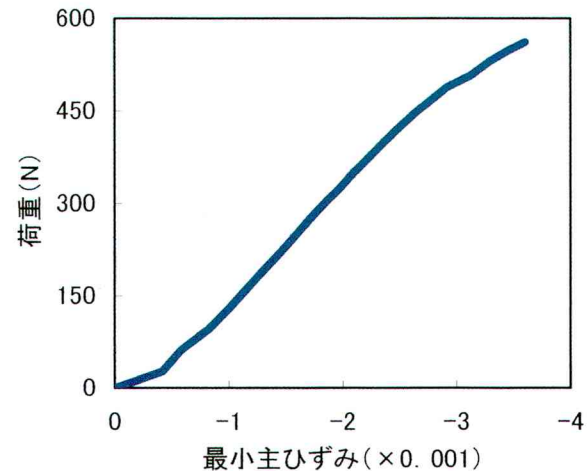
| 試験片 | 目視観察   | 主ひずみ緩和点 |
|-----|--------|---------|
| A   | 約 310N | 260N    |
| B   | 約 130N | 70N     |
| C   | —      | —       |



(a) 荷重－最大主ひずみ曲線

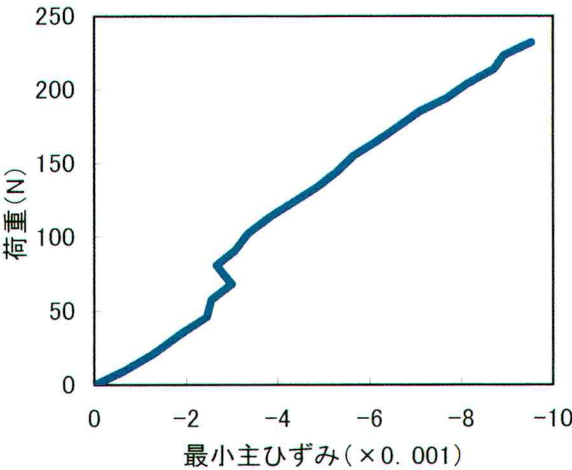


(b) 荷重－最小主ひずみ曲線

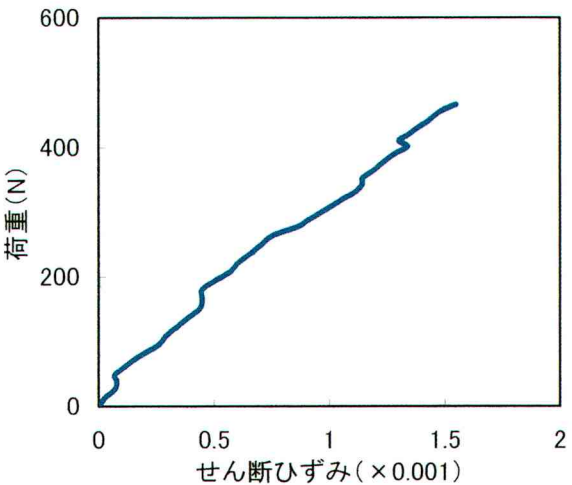


(c) 荷重－せん断ひずみ曲線

図-12 荷重－ひずみ曲線



(a) 試験片 B



(b) 試験片 C

図-13 荷重－最小主ひずみ曲線

試験片 B は試験片 A と同様に目視により得られたリンクル発生荷重(130N)より前の 70N で最小主ひずみが緩和している現象を確認できる。また、試験片 C では、目視観察では膜面にはリンクル発生を確認することができなかった。荷重－最小主ひずみ曲線にも緩和点は認められない。これらの実験結果より、矩形張力膜の単軸引張り試験における最小主ひずみのひずみ緩和をリンクル発生荷重と定義することができるものと考える。

なお、図-14 は試験片 A のリンクル発生状況を示したものである。



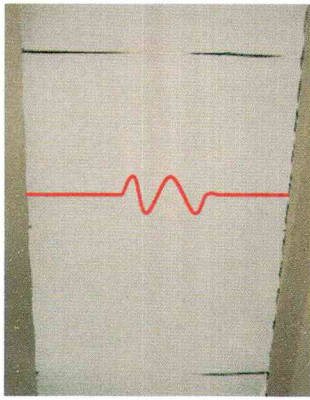


図-14 リンクル発生状況 (試験片 A)

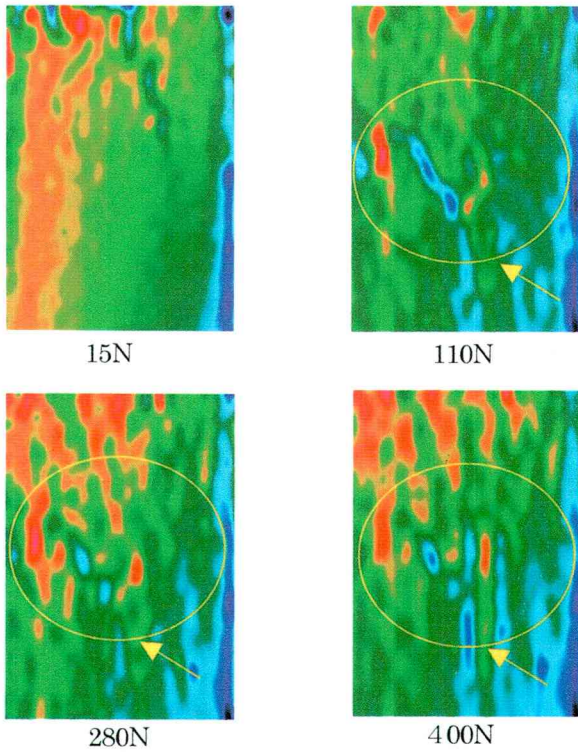


図-15 最小主ひずみ分布 (試験片 A)

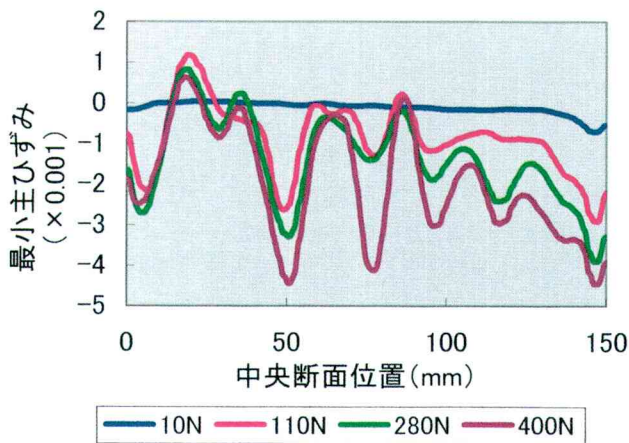


図-16 中央断面におけるひずみ分布 (試験片 A)

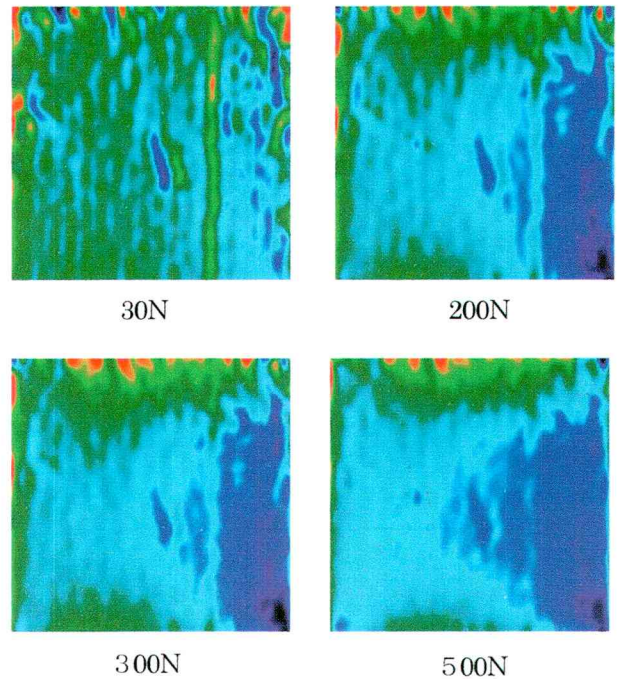


図-17 最小主ひずみ分布 (試験片 C)

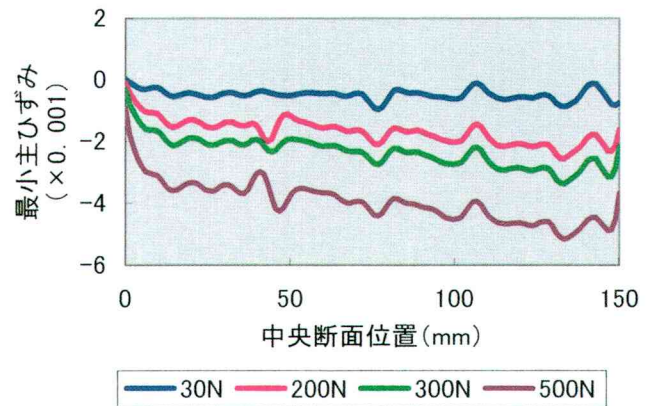


図-18 中央断面におけるひずみ分布 (試験片 C)

次に、以上の結果を踏まえ、最小主ひずみに注目して検討を行なった。試験片 A のリンクル発生過程における最小主ひずみの分布の推移を図-15 に示す。図-16 はその時の試験片中央断面での最小主ひずみの分布である。また、図-17 は膜面にリンクルの発生が認められなかった試験片 C の最小主ひずみ分布の推移であり、図-18 は中央断面の最小主ひずみを示す。

図-15 より、試験片 A では荷重が増加するにつれて、リンクルが発生している箇所に、正ひずみ (赤部) と負ひずみ (青部) のひずみが縞状に局所的に集中発生していることがわかる。リンクルが目視により確認できた約 310N 以前でも、その兆候を見ることができ、図-16 の中央断面におけるひずみ分布図からでもそのことを確認することができる。

また、リンクルの発生しなかった試験片 C では試験片 A

とは異なり、荷重が増加しても全体的に負ひずみ（青部）が増大しているだけで大きな変化はみられなかった。図-18の中央断面におけるひずみ分布図からも、全体的に負ひずみは増加し小さな凹凸が確認できるものの、試験片Aのような縞状に大きくひずみが集中する箇所は確認できなかった。

これらの結果から、最小主ひずみ分布を観察することにより、リンクル発生箇所を特定できることがわかる。

#### 4. 非接触三次元形状計測を用いたリンクル計測

本研究で使用している2D-ESPI計測器は、面内変位を計測するための光学系が構成されているため、面外変形である膜面に発生するリンクルの大きさを計測することは不可能である。膜材のような柔構造では触針式変位計での計測は困難で、レーザ変位計による非接触計測が不可欠なものとなる。しかし、レーザ変位計での多点計測には多くの時間を要する。そのため、本研究では、試作開発した非接触3D形状計測装置<sup>7)9)</sup>を用いてリンクルの形状計測を行った。

##### 4.1 非接触三次元形状計測装置の概要

図-19に示す三次元形状計測装置は、CCDカメラ1台とスポットレーザ投光器から構成され、スポットレーザ投光法はもちろん、光切断法とも呼ばれるスリットレーザ投影法による計測も可能である。光切断法は、照射されたスリットレーザラインをCCDカメラにより撮影し、スリットレーザラインが対象物に投影している部分の画像座標値を取得し、取得した画像座標値に透視変換行列を用いて三次元座標を算出する三次元計測法である。この手法では、現在多く用いられているレーザ変位計とは異なりレーザライン上の形状を瞬時に計測できるため、計測時間の短縮が可能である。



図-19 非接触3D形状計測装置

#### 4.2 計測性能照査

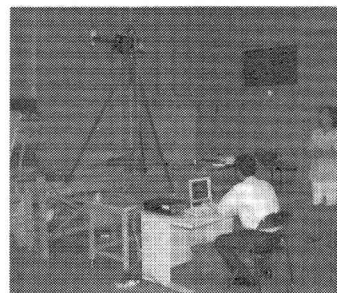
本実験装置の計測装置（図-20(a)）とレーザ変位計（図-20(b)）<sup>10)</sup>を用いて、矩形膜の単軸引張試験により生じるリンクルを計測し、性能照査を行った。膜材には直交異方性の厚さ0.6mmのC種膜材を用い、アスペクト比を1:3（350×1050mm）とした。膜材の材料特性を表-4に示す。また、図-21に中央断面に生じたリンクルの形状計測結果を示す。これよりレーザ変位計とほぼ同等な結果が得られることが確認できた。

なお、計測時間は、スリット計測では約3分、スポット計測では約20分、手動によるレーザ計測では2~3時間程度の時間を要した。

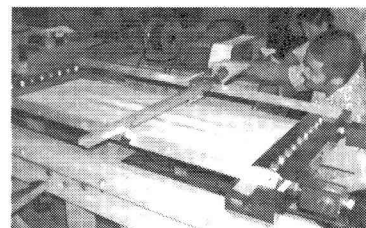
表-4 膜材の材料特性

| $E_1t$  | $\nu_{12}$ | $E_2t$  | $\nu_{21}$ | $G_t$    |
|---------|------------|---------|------------|----------|
| 238kN/m | 0.55       | 222kN/m | 0.51       | 23.7kN/m |

（添え字 1,2 は縦、横糸方向を示す。）



(a) 三次元計測器



(b) レーザ変位計

図-20 実験風景

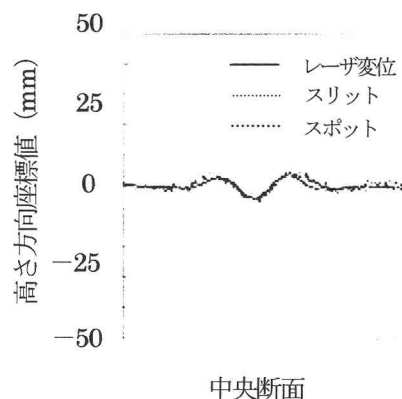


図-21 3計測手法におけるリンクル断面図

### 4.3 実験概要

前節で説明した計測装置を用いて矩形膜の単軸引張り試験におけるリンクルの形状計測を行った。試験片には前章で用いた試験片 A を使用した。またこの膜材は透明であるため、赤色のスプレーで着色し、さらにつや消しスプレーを塗布した。本実験では計測時間の短縮のため、スリット計測を用いた。

### 4.4 計測結果

図-22(a)に膜面に発生したリンクル状態(写真), および本計測による膜面形状データを用いて三次元画像化したものを同図(b)に示す。これらの図より, 試験片の中央縦方向にリンクルが発生していることを確認でき, その発生箇所は両図ともほぼ一致している。また, 中央部分における断面上の値を抜き取り, グラフ化したものを図-23 に示す。この図より, 多少の外乱も存在するが, リンクルの形状を把握することができる。

以上から, 本計測装置により膜面に発生したリンクルの形状を計測可能であることが確認される。

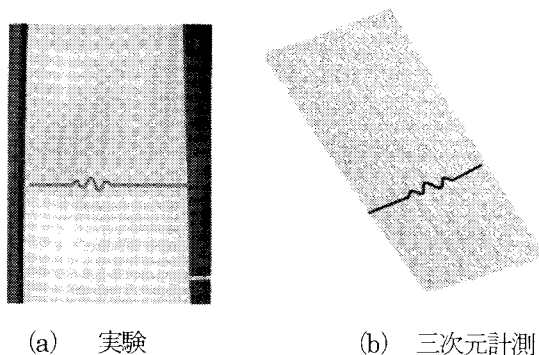


図-22 リンクル現象

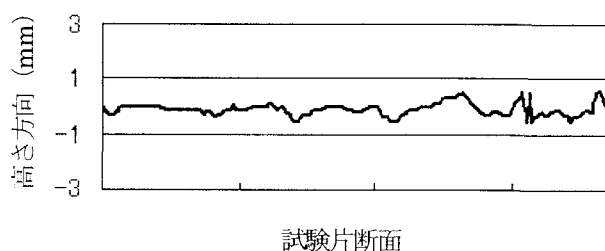


図-23 リンクル断面形状

### 5. まとめ

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 矩形張力膜のリンクル計測では, ESPI 計測による荷重-最小主ひずみ曲線におけるひずみ緩和点をリンクル発生荷重として捉えることができる。

- (2) ESPI 計測による全視野最小主ひずみ分布図より, リンクル発生箇所の予測が可能である。
- (3) 非接触可搬式 3D 計測装置を用いたリンクルの面外形状計測では, 微小なリンクルも計測できることが確認できた。

### 6. あとがき

今後の予定として, ESPI と非接触三次元形状計測を併用し, 様々な膜構造のリンクル現象の実験を行なうとともに, 非線形 FEM を用いて張力場理論や分岐理論などの解析的な面からも検討する予定である。

なお, 本研究は科学研究補助金, 基盤研究 (B) (2) (課題番号: 14350246) 及び萌芽研究 (課題番号: 16656138) の補助により行なわれたことを付記し, ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 三浦公亮, 長友伸人: ソーラーセイル, 宇宙帆船とルナカップレース, 丸善株式会社, 1993
- 2) 樫本信隆, 川口健一: 圧電ポリマーを用いた膜構造のための低剛性センサーの開発に関する基礎的研究, 生産研究, 52 巻 4 号, pp.19-22, 2000
- 3) 松田浩, 神原天鳴ほか: スペックル干渉による非接触全視野ひずみ計測法, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1081-1088, 2003
- 4) 松田浩, 神原天鳴ほか: スペックル干渉法による鋼部材の全視野ひずみ計測, 鋼構造年次論文報告集, 第 11 巻, pp.519-524, 2003
- 5) 松田浩, 安東祐樹ほか: 電子スペックルパターン干渉によるアルミニウム合金板の破壊挙動の全視野ひずみ計測, 応用力学論文集, Vol.7, pp.1241-1250, 2004
- 6) 高橋章, 豊岡了, 他: フォトメカニクス, 山海堂, 1997.
- 7) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩: 小規模三次元計測システムの開発, 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, pp.59-62, 1998
- 8) 松田浩, 小嶋悟ほか: 膜・シェル構造のための 3D 計測 + FEM 解析システムの開発, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.595-602, 2000
- 9) H.Matsuda, T.Sakiyama, C.Morita, and K.Kawaguchi: Development of finite element analysis for membrane and shell structures by using 3D-optic system, Trend in Computational Structural Mechanics, pp.511-518, 2001
- 10) 呂品琦, 川口健一: 引張り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, 膜構造論文集, pp.29-41, 2000.

(2004 年 9 月 17 日受付)