

デジタル画像相関法を用いた矩形張力膜のリンクル計測

Wrinkle measurement of rectangular tensioned membrane by digital image correlation method

松田 浩^{*1} ・ 森下 喬^{*2} ・ 安東 祐樹^{*3} ・ 古屋 瞬^{*2}
山下 務^{*4} ・ 内野 正和^{*5} ・ 伊藤 幸広^{*6} ・ 崎山 毅^{*1}Hiroshi MATSUDA, Takashi MORISHITA, Yuki ANDOH, Shun FURUYA
Tsutomu YAMASHITA, Masakazu UCHINO, Yukihiro ITO, Takeshi SAKIYAMA^{*1} 工博, 長崎大学教授, 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)^{*2} 長崎大学大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)^{*3} ショーボンド建設(株) 補修工学研究員 (〒305-0003 つくば市桜1-17)^{*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1-14)^{*5} 博士(工学), 福岡県工業技術センター, 機械電子研究所 (〒807-0831 北九州市八幡西区則松3-6-1)^{*6} 博士(工学), 佐賀大学助教授, 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1 番地)

Membrane material does not possess flexural rigidity, so that it is not possible to resist to bending moment and compression force. When membrane structures receive bending stress and compressed stress, the wrinkle and the slug (looseness) occur. The wrinkling of membrane becomes a common problem in space engineering and architectural engineering. In order to manufacture the membrane structure in which the wrinkle does not occur, it is necessary precisely to observe the wrinkling phenomena to elucidate the occurrence mechanism of the wrinkle. Optical techniques make it possible for the full-field and non-contact displacement measuring. Digital image correlation method is one of the optical techniques and make it possible for the full-field and non-contact measurement of displacements and strains. In this paper, three dimensional digital image correlation method is applied to observe the wrinkling generation process in tensile tests of the rectangular membrane members. From the experimental results, the correlations between the minimum principal strain and three dimensional deformation have been observed in the occurrence of the wrinkle.

Key Words: tensioned membrane, wrinkling, digital image correlation method, optical full-field measurement

キーワード: 張力膜, リンクル, デジタル画像相関法, 光学的全視野計測

1. はじめに

膜材は薄く, 曲げ剛性を有しない材料である。そのため, 曲げや圧縮力が作用するとリンクル(しわ)やスラッグ(弛み)などの変形が生じる。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, 過剰な張力の導入はリンクル発生の原因となる。膜面に生じたリンクルは, 膜構造の力学特性に大きく影響を与えるとともに, 膜構造の美観に大きな影響を与える。そのため, 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, リンクル発生や制御問題に関しての実験的および解析的な研究が, 建築工学や宇宙工学の分野で, これまで多く行われている¹⁾。

張力膜構造のリンクル発生の実験では, リンクルの発生時の荷重と場所と数を計測する必要がある。そのための計

測法としてひずみゲージ法が考えられるが, 膜材自体が変形能が大きな材料であり, それに適応するひずみゲージがないことに加え, 膜材が薄いので多くのひずみゲージを貼り付けることにより膜材の特性が変化することも考えられる。前者に対しては, 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²⁾も行われている。しかし, リンクル計測には数多くのゲージを貼付することには変わりはない。

一方, レーザ変位計は非接触でリンクル形状を計測³⁾することが可能である。しかし, 通常のレーザ変位計では一個で一点の変位しか計測することができず, リンクルの発生場所と数を短時間で計測するためには, 多くの変位計もしくは可動式変位計などを用いる必要がある。

以上に鑑み, 筆者らは, 三次元形状計測装置を試作開発するとともに^{4) 5)}, 膜構造のリンクル計測に適用し, 非接

触全視野計測によりリンクル発生後の膜面の変形形状計測が可能であること、計測時間が飛躍的に短縮されることなどを確認してきた⁹⁻¹¹。しかしながら、レーザ光とCCDカメラを用いて自主開発した三次元計測器⁹は、CCDカメラの画素数が40万画素であること、単純な校正法を用いていたことなどの理由により、精度は1%程度で、奥行き方向の精度は1~2%とさらに劣るため、本研究で計測対象となる1mm以下の膜のリンクルの形状は精度良く計測することができなかった。

さらに、電子スペックルパターン干渉法(ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry)をアルミニウム板の引張試験に用いて、非接触全視野変位・ひずみ計測の使用性、適用性および計測精度等の性能照査を実施した上で^{10, 11}、変形能の大きな膜材にESPI法を適用し、矩形張力膜のリンクル発生過程におけるひずみ値の変化について検討を行った¹²。その結果、膜材の全視野面内変位計測から計算される最小主ひずみとリンクル発生との関係性を見出すことができた。しかし、現有のESPI装置は二次元計測のため面内のひずみ計測しか行えないこと、振動等の外乱に弱いこと、大きな変形には追従するには小さな荷重ステップで載荷する必要があるなど、いくつかの問題点も明らかになった。

一方、物体の二次元的変位を計測として様々な手法が考案されている。堀井ら¹³はパターンマッチングという考え方に基づいて変位場を求める方法、ひずみ算出法をはじめとして、デジタルカメラやデジタルビデオなどの種々の受像機器を用いた計測方法を開発している。また、森本ら¹⁴は、応力・ひずみ・形状・変形計測法として、光弾性法、モアレ干渉法、ホログラフィ法、ESPI法、デジタル画像相関法などの高速高精度全視野計測と光情報処理法に関する一連の研究を進めている。

本論文では、上記のスペックル干渉に基づくESPI計測の問題点を解決するために、光学的全視野計測法の一つである3Dデジタル画像相関法に注目した。この計測手法は、特殊な装置が必要でなく、カメラとパソコンがあれば十分であり、しかも振動に強く、大変形や大ひずみにも適用できるなどの特長を有している。また、2台のカメラを用いているので、二次元面内変位のみならず三次元変位計測も可能である。本研究ではデジタル画像相関法を用いて、矩形張力膜のリンクル形状と最小主ひずみに注目して検討を行った。

2. デジタル画像相関法

2.1 基本原理

デジタル画像相関法とは、CCDカメラのようなデジタルカメラで解析対象物表面の変形前後の二枚の画像をデジタル的に取り込み、変形前後を比較することで画像全体に渡って変形分布を求めることのできる方法である。まず、解析対象物表面をコントラストのあるランダムな模様にする必要がある。これは、ランダム性を基にして相関を行い、変形を求めるためである。取得されるデジタル画像は、

カメラの性能によって得られた画像の強度を何階調にするか決まっている。次に、解析対象物の変形前のデジタル画像を取得し、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ pixelsの任意領域であるサブセットを設定する。変形前のデジタル画像のサブセットを用いて、変形後のデジタル画像からそのサブセットの階調の強度分布に近いものを探し出すことで、変形量と方向を同時に求めることができる。

図-1に示すのは、変形前と変形後のデジタル画像である。カメラを固定したままで計測物に変位を与えると、変形後のデジタル画像のサブセットの位置は変化する。このサブセットの中心の移動量が計測点の変位量および変形方向である。

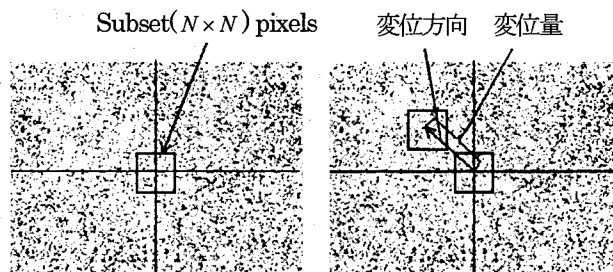


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

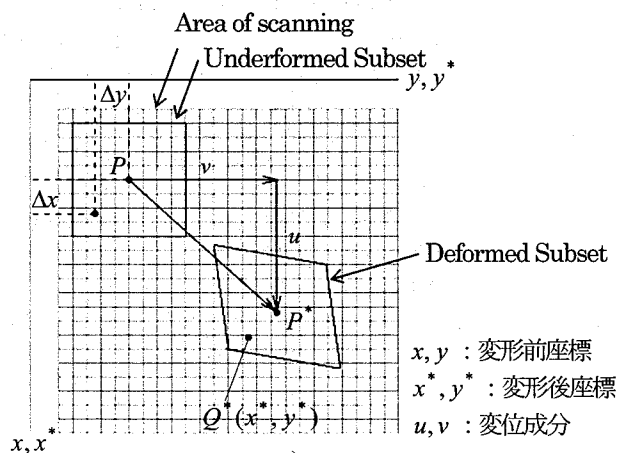


図-2 サブセットの変形

図-2にサブセットの変形を示す。この時、変形前のサブセット内の点 $Q(x, y)$ は弾性変形論より次式で与えられる点 $Q^*(x^*, y^*)$ に移動する。ここで、移動した点 $Q^*(x^*, y^*)$ は、式(1)、(2)で与えられる¹⁵。

$$x^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (1)$$

$$y^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

この時の変形前後のパターンの一致度は、式(3)の相関関係で評価する。

$$S\left(x, y, u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \frac{1 - \frac{\sum [I_u(x, y) I_d(x^*, y^*)]}{\sqrt{\sum I_u(x, y)^2 \sum I_d(x^*, y^*)^2}}}{(3)}$$

ここで、 I_u 、 I_d は変形前後の画像の輝度値である。ひずみ解析を行う方法として、電気抵抗式ひずみゲージを用いた3軸ひずみゲージ法と同様の原理に基づき、3方向のひずみを取得することにより主ひずみが算出される。

2.2 計測装置の概要

本研究で用いるデジタル画像相関法での変位、ひずみ計測には、3D コリレーションシステム(Correlated Solutions 社製)を使用した。図-3に計測装置と計測風景を示す。3D コリレーションシステムは、膜面の三次元形状を追跡することができ、また計測感度が 100μ と非常に大きいため、変形能が高い膜材の非接触全視野計測には有用である。

図-4に示すように2台のCCDカメラ(1280×1024pixels, 12bit, 白黒デジタルカメラ)が取り付けられており、この2台のカメラにより、異なる方向から解析対象物の画像を取り込み、変形画像の追跡とカメラの校正により、三次元形状と三次元の変形分布を取得することができる。三次元形状計測の原理は、2台のカメラによる三角測量の原理に基づくもので、筆者らも自作開発した三次元計測機器^{4)~6)}も同じ原理に基づくものである。また、計測で得られた三次元データから面内変位を抽出し表面ひずみ分布を算定することができる。本計測装置の仕様を、表-1に示す。

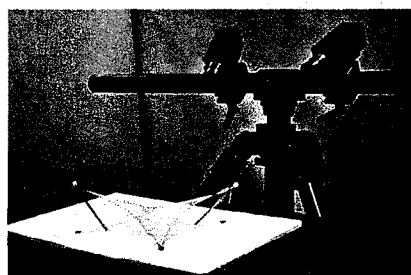


図-3 計測装置と計測風景

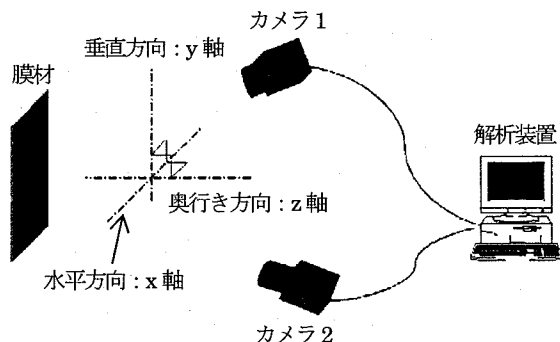


図-4 三次元変形計測方法

表-1 計測装置の仕様

計測エリア	10×10 mm～100×1000 mm
計測感度	100 μ
計測レンジ	数回に分割して計測すれば制限無し
計測距離	5～100 cm
空間分解能	100 mm平方のエリアの場合 1 mm以下 (ピクセル上では 100 μ m)
主な出力形式	表面三次元形状 変位(u, v, w 方向) ひずみパターン($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{\max}$)

2.3 ひずみ計測適用検証試験

(1) 計測概要

デジタル画像相関法によるひずみ計測の精度を検証するため、アルミニウム合金製の試験片を用いて一軸引張試験を行った。ひずみゲージにより計測したひずみとデジタル画像相関法を用いたひずみの値を比較し、デジタル画像相関法によって得られるひずみの有用性の検討を行った。

試験片の写真および試験片寸法を図-5に示す。試験片の概要として、縦弾性係数 71GPa、ポアソン比 0.33 の板厚 2 mm のアルミニウム合金の板から、金属材料試験片 JIS1 号の形状に倣い、切り出し作製した。長さ 172 mm、幅 10 mm、つかみ部の幅 20 mm で、中心裏側にひずみゲージを貼付し、測定した。また、計測で使ったサブセットの大きさは 19×19pixels とした。計測方法として、CCD カメラにより初期画像を取得して、荷重速度を一定にし、12 回 /min の速さで画像および荷重データ、ひずみ値を取得した。

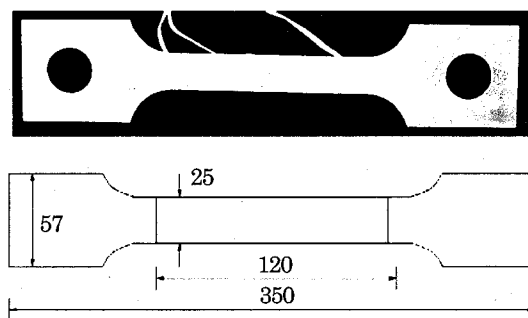


図-5 アルミニウム合金試験片 (mm)

(2) 計測結果

ひずみゲージによって得られたひずみと、本計測装置を用いて計測した同位置におけるひずみの値による荷重-ひずみ曲線を図-6に示す。両方で用いたひずみの値は共に最大主ひずみを用いた。試験結果より、デジタル画像相関法の弾性域においてはほぼ一致した結果が得られた。塑性域においては、一部にひずみの値が異なる部分が見られるが、その差はわずかであり、破壊に至るまでの荷重-ひずみ関係はひずみゲージの値とほぼ一致していると考えられる。以上より、デジタル画像相関法によるひずみ計測は、ひずみゲージによる計測と同程度であると検証できた。

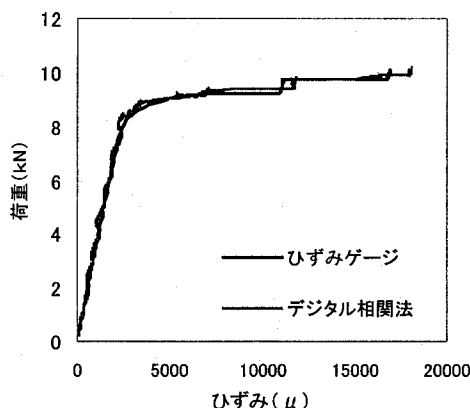


図-6 荷重-ひずみ曲線



図-7 リンクル現象

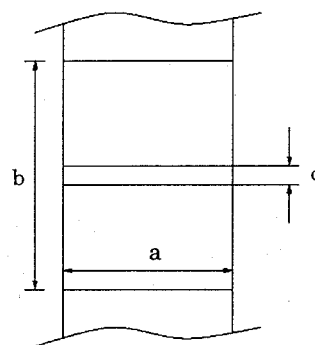


図-8 試験片形状と計測範囲

3. 矩形張力膜のリンクル計測

3.1 計測概要

ひずみゲージでは計測不可能な矩形張力膜のリンクル発生箇所における変形、ひずみの変化を、デジタル画像相関法を用いて計測を行った。

試験片材料には、膜厚 $50\mu\text{m}$ のポリエステルフィルム(ルミラー)を用いて、アスペクト比の異なる3種類の試験片を作製し、一軸引張試験を行った。膜材の下端を完全固定とし、上端に引張力を加えた。また、初期不整の影響を抑えるために、ジグと膜材の間にゴムを挟みこみボルトによって固定し、計測を行った。計測で使ったサブセットの大きさは、 $19 \times 19\text{pixels}$ とした。一軸引張試験によって得られたリンクル現象を図-7に示す。膜材の材料定数を表-2に示す。図-8に試験片形状を示し、網掛け部分内を計測範囲とした。また、各試験片の寸法および計測範囲を表-3に示す。なお、荷重-ひずみ曲線に用いる各ひずみ値には、図-8に示す試験片中央の $a\text{mm} \times c\text{mm}$ の計測領域の平均値を用いた。

実験を行う際、解析対象物表面に白黒の斑点模様を付けた。これは、今回用いた CCD カメラが白黒デジタルカメラであり、最もコントラスト比が高く、デジタル画像相関法ではランダム模様が得られるのは白黒の斑点模様であるためである。そこで、膜材の表面に浸透探傷試験などに用いられる現像剤を塗布し、そのうえから黒のスプレーを吹きつけ、計測を行った。なお、現像剤の有無によるリンクル現象に対する影響を検討するために、現像剤を塗布した試験片としていない試験片で予備実験を行った。その結果、リンクル発生荷重の相違はほとんど見られなかった。

3.2 計測結果

筆者らは、変形能の大きな膜材に ESPI 法を適用し、矩形張力膜のリンクル発生過程におけるひずみ値の変化について検討を行った結果、膜材の全視野面内変位計測から計算される最小主ひずみとリンクル発生の関係性を見出すことができた¹²⁾。したがって、デジタル画像相関法による計測結果も最小主ひずみに注目して整理することとする。

表-2 ポリエステルフィルム(ルミラー)の材料定数

破断強度 (MPa)	破断伸度 (%)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
215	170	4	0.3

表-3 試験片寸法と計測範囲

試験片	アスペクト比	寸法(mm)	計測範囲(mm)		
			a	b	c
A	1 : 1	150 × 150	100	100	2
B	1 : 2	150 × 300	130	200	2
C	1 : 3	150 × 450	80	200	2

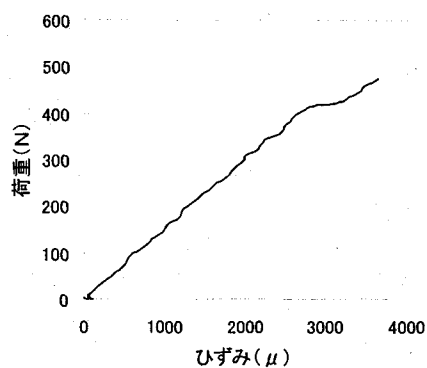
(1) 面内変位計測結果

図-9(a)~11(a)にデジタル画像相関法を適用して得られた荷重-最小主ひずみ曲線を示し、図-9(b)~11(b)に各試験片のリンクル発生後の x 方向変位、y 方向変位を示す。なお、図-9(b)~11(b)は、図-8 および表-3 に示すような計測範囲について示したものである。図 9(b)~11(b)に示すように、矩形張力膜の一軸引張試験において膜材の非接触全視野計測が可能であり、x 方向変位と y 方向変位が測定することができた。この変位を用いて、最小主ひずみを算出し、三次元形状と比較することで検討を行うものとする。

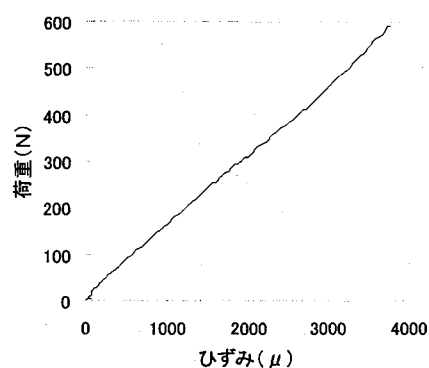
(2) 最小主ひずみと面外変位の比較検討

各試験片のリンクル発生荷重を表-4に示す。試験片 A, B, C において最小主ひずみに着目した計測結果を図-9(c), (d)~11(c), (d)に示す。なお、図-9(d)~11(d)は、図-8 および表-3 に示すような計測範囲について示したものである。

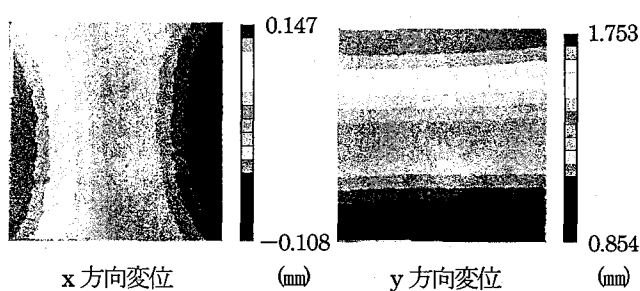
試験片 A では、リンクルの発生は確認されなかった。三次元形状計測においてもほとんど面外方向変位が見られなかった。図-9(c), (d)に示すように、荷重が増加するに従って、ひずみは増加していくが、リンクルが発生していないため縞状のひずみの集中はなかった。



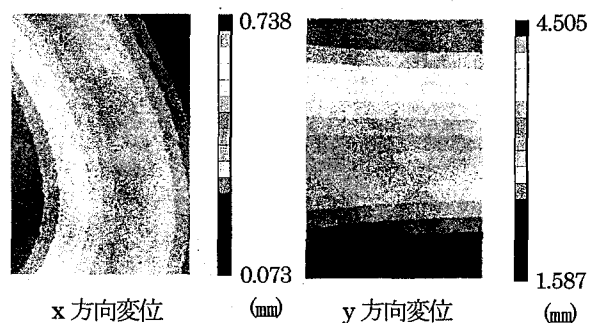
(a) 荷重—最小主ひずみ曲線



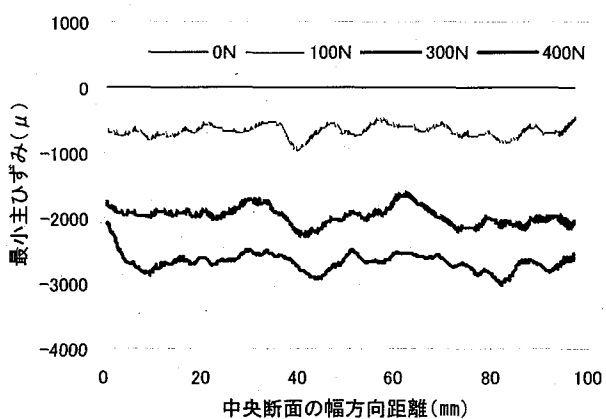
(a) 荷重—最小主ひずみ曲線



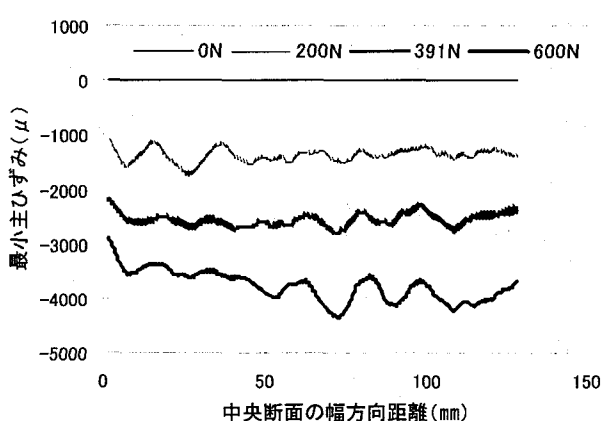
(b) 面内方向変位(400N)



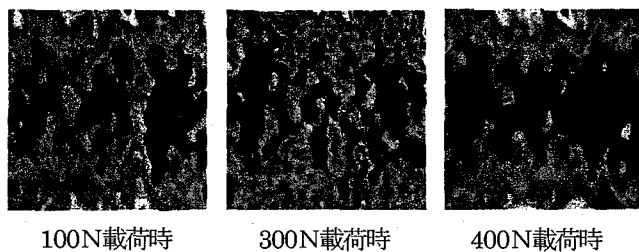
(b) 面内方向変位(リンクル発生後 600N)



(c) 中央断面の最小主ひずみ分布

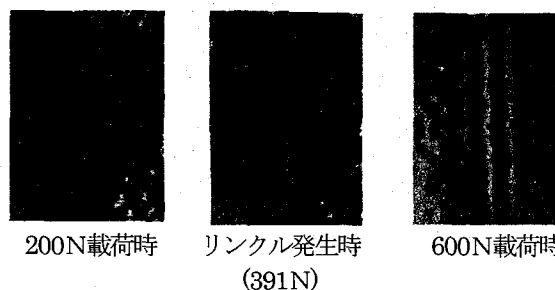


(c) 中央断面の最小主ひずみ分布



100N載荷時 300N載荷時 400N載荷時

(d) 最小主ひずみ分布の推移

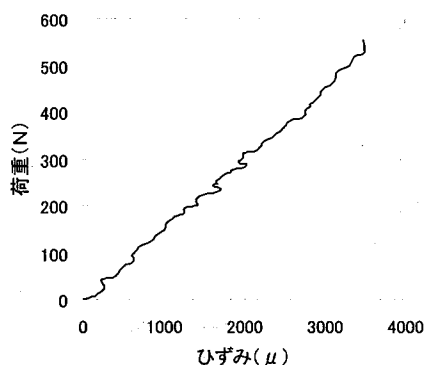


200N載荷時 リンクル発生時 (391N) 600N載荷時

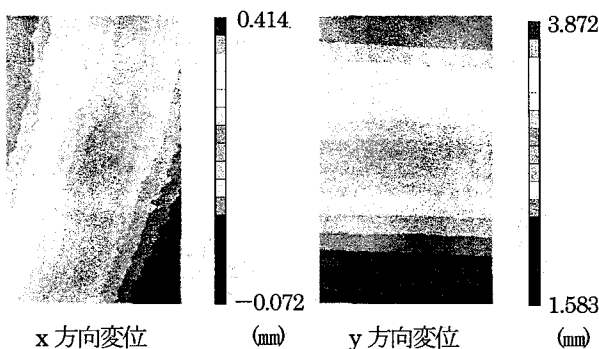
(d) 最小主ひずみ分布の推移

図-9 試験結果(試験片A)

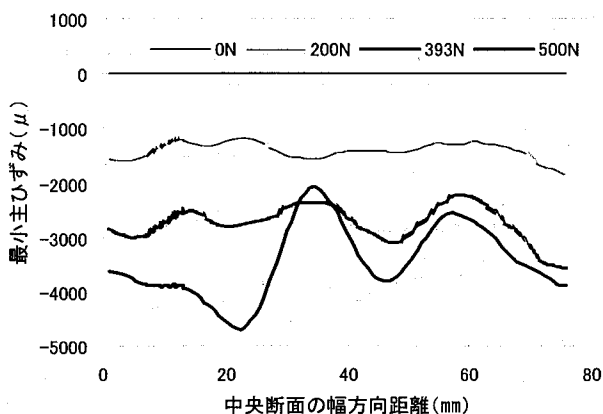
図-10 試験結果(試験片B)



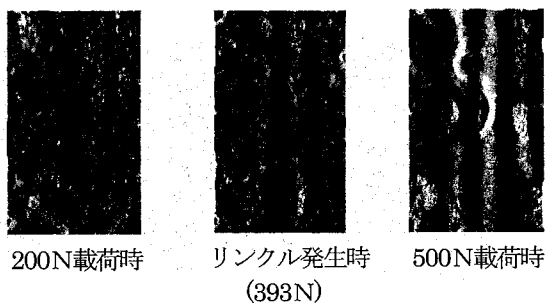
(a) 荷重—最小主ひずみ曲線



(b) 面内方向変位(リンクル発生後 500N)



(c) 中央断面の最小主ひずみ分布



(d) 最小主ひずみ分布の推移

図-11 試験結果(試験片C)

表4 リンクル発生荷重

試験片	リンクル発生の有無	リンクル発生荷重
A	×	無し
B	○	約 390.5N
C	○	約 393.4N

試験片Bにおいては、3本のリンクルの発生を確認することができた。図-10(d)の最小主ひずみ分布の推移図においてリンクル発生時(391N)にリンクル形状に沿った最小主ひずみの集中が確認できる。さらに、荷重を増加すると、図-10(d)の600N 載荷時において、リンクル形状に沿ったひずみの集中が明瞭になっていることがわかり、図-10(c)の中央断面における最小主ひずみ分布図を見ると、さらに明確に縞状のひずみ分布が確認できる。

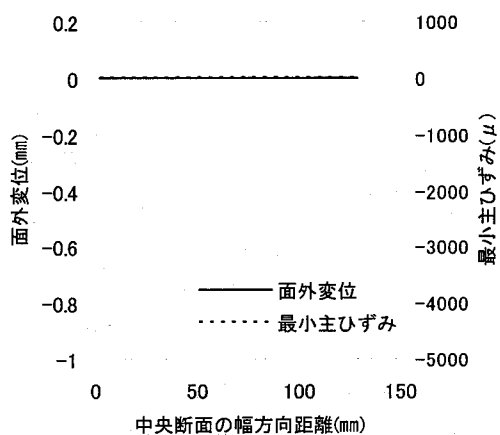
試験片Cにおいても、3本のリンクルの発生を確認することができた。図-11(d)の最小主ひずみ分布の推移図においてリンクル発生時(393N)に、リンクル形状に沿った最小主ひずみの集中を確認できる。さらに、荷重を増加すると、図-11(d)の500N 載荷時において、リンクル形状に沿ったひずみの集中が明瞭になっていることがわかる。また、図-11(c)では中央断面における最小主ひずみ分布形状を示したものであるが、この図から最小主ひずみが波状に分布することを確認できる。

これらの結果より、デジタル画像相関法を用いて膜材の全視野計測が可能になり、リンクルの発生を確認することができ、リンクル計測への有用性と有効性を確認することができた。また、リンクルの発生が確認された試験片B、Cの図-10(d)、図-11(d)の最小主ひずみ分布より、リンクル形状と最小主ひずみ分布に関連性があることが示唆される。そこで、リンクル形状と最小主ひずみ分布に着目し、両者の相関関係について検討する。

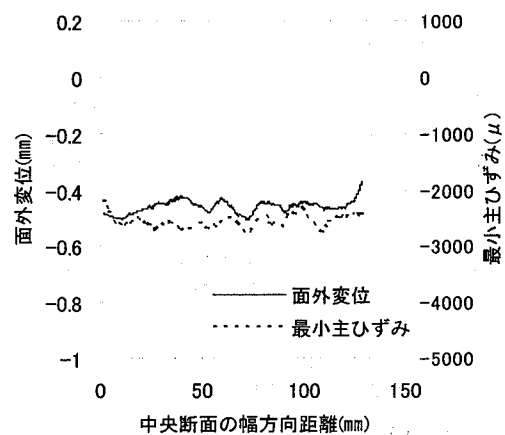
リンクル発生が確認できた試験片B、Cにおける各荷重での中央断面のリンクル形状および最小主ひずみの推移を図-12~19(a)に示し、得られたリンクルの三次元形状を図-12~19(b)に、また、最小主ひずみ分布を図-12~19(c)に示す。

試験片Bでは、図-12~15の(a)図に示すように、荷重が増大するにしたがって中央断面における面外変位と最小主ひずみの分布が相似関係になっていることがわかる。リンクル発生荷重(391N)では、その相似関係は顕著に見ることができ、両者の極小点、極大点がリンクルの形状に沿って現れていることが確認できる。

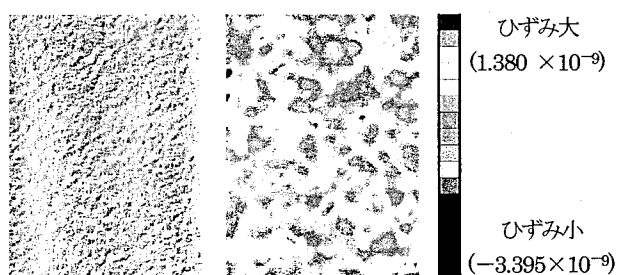
試験片Cにおいても同様に、図-16~19の(a)図に示すように、荷重が増大するにしたがって、中央断面における面外変位と最小主ひずみの分布が相似関係になっていることが確認できる。リンクル発生荷重(393N)においても、その相似関係を確認することができ、両者の極小点、極大点がリンクル形状に沿って現れている。特に、393Nのリンクル発生荷重点以降においては、最小主ひずみ分布形状の波形が顕著に現れていることが確認される。以上より、リンクル形状と最小主ひずみの間には、相関関係があることがわかる。



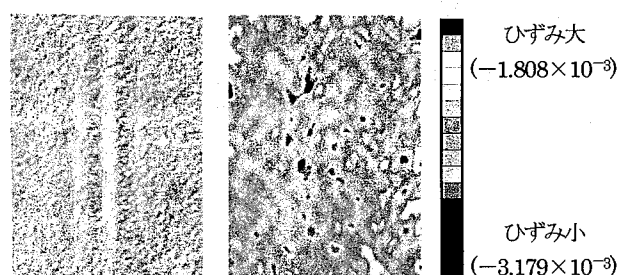
(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ



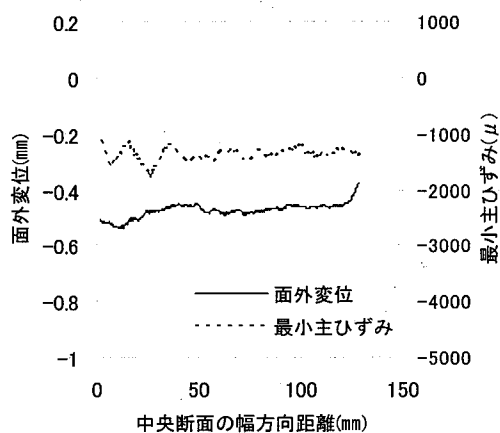
(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ



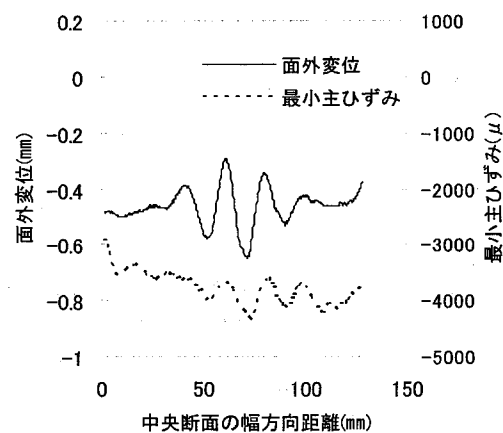
(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布
図-12 未荷荷時(試験片 B)



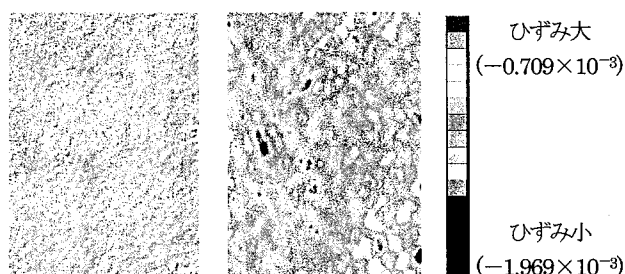
(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布
図-14 391N 荷荷時: リンクル発生荷重(試験片 B)



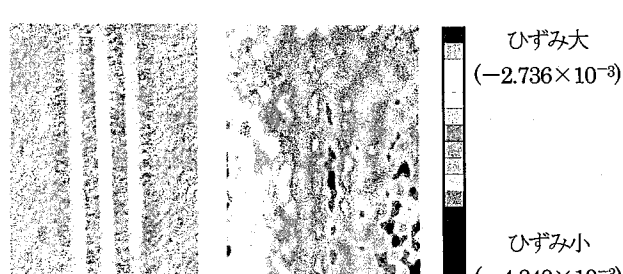
(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ



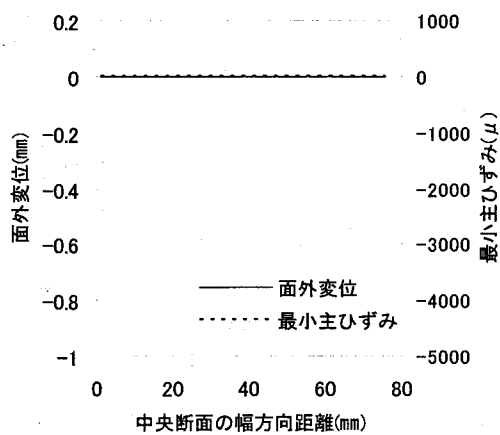
(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ



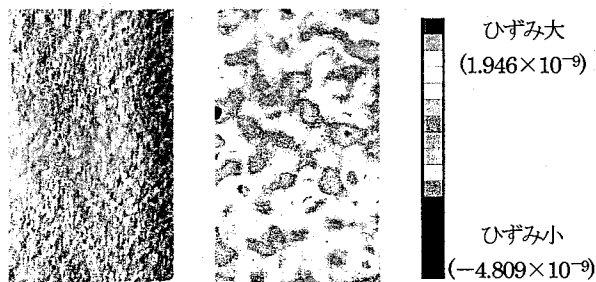
(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布
図-13 200N 荷荷時(試験片 B)



(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布
図-15 600N 荷荷時(試験片 B)

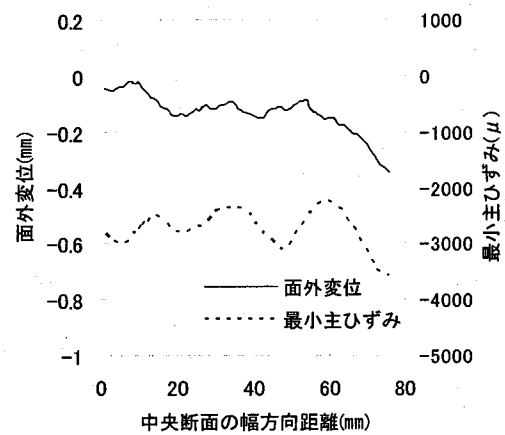


(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ

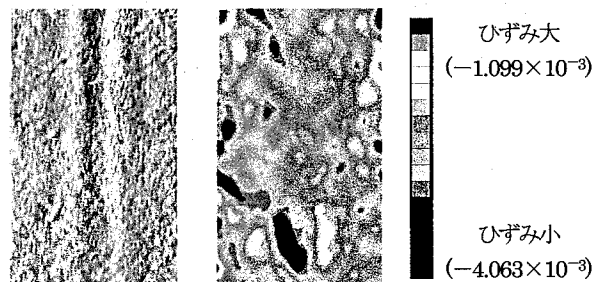


(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布

図-16 未荷荷時(試験片 C)

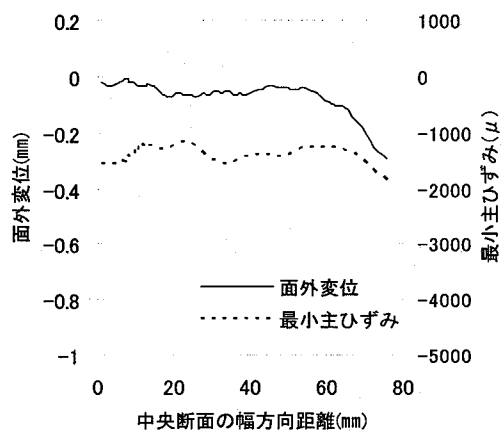


(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ

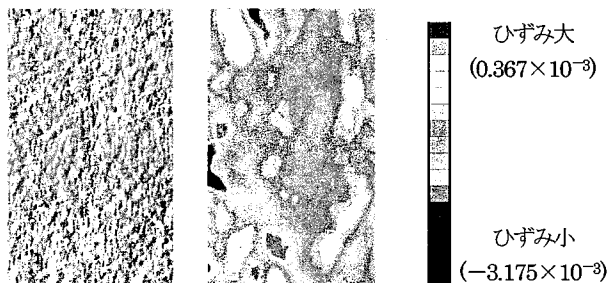


(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布

図-18 393N 荷荷時：リンクル発生荷重(試験片 C)

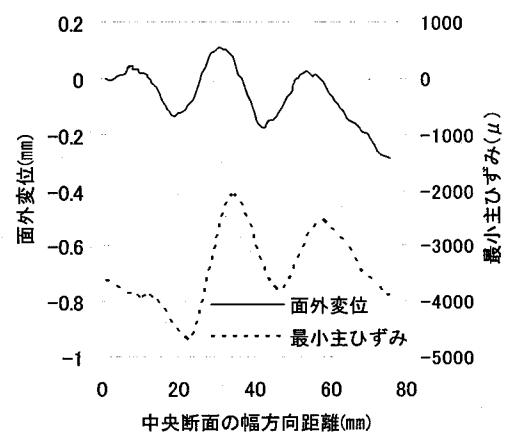


(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ

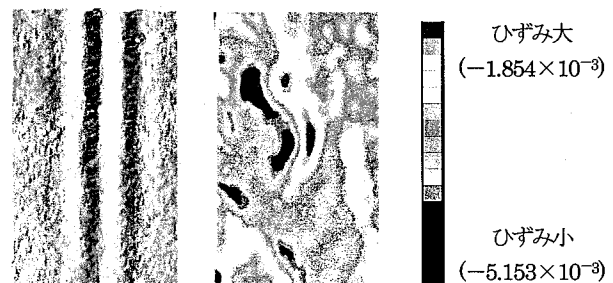


(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布

図-17 200N 荷荷時(試験片 C)



(a) 中央断面の面外方向変位と最小主ひずみ



(b) 三次元形状 (c) 最小主ひずみ分布

図-19 500N 荷荷時(試験片 C)

4. 考察および今後の課題

図-9~11の(d)図に示す最小主ひずみ分布の推移図は、三次元形状図に最小主ひずみ分布図を重ね合わせたものである。一方、図-12~19の(b)および(c)図は、図-9~11の(d)図に示す三次元形状図と最小主ひずみ分布図を別々に表示したものである。図-12~19の(b)および(c)図を観察する限りにおいては、リンクル形状と最小主ひずみ分布には相関関係は低いように見受けられる。これは、上下端の固定支持条件の影響であるものと考えられる。図-14, 15および図-18, 19の(b)図を観察すると、上下端部においてはリンクル高が小さくなっていることがわかる。そのため全体的な三次元形状を表示するレンジでは、最小主ひずみ分布図においてはリンクルの三次元形状と最小主ひずみ分布には相関関係が見られないように表示されるものと考えられる。

一方、図-14, 15および図-18, 19の(a)図を観察すると、リンクルの三次元形状と最小主ひずみ分布には高い相関関係があることが観察される。特に、リンクル発生荷重点である図-14および図-18の(a)図においては、三次元形状図よりも最小主ひずみ図の方が波状のリンクル形状を明瞭に表示していることがわかる。このことから、リンクル発生を最小主ひずみから評価できることがわかる。

筆者らは、先にESPI干渉計測による荷重-最小主ひずみ曲線図より、リンクル発生荷重点を特定できることを示した¹²⁾。(図-20)

しかし、本研究のデジタル画像相関法による荷重-最小主ひずみ曲線からは明確な最小主ひずみの緩和点を観察することはできなかった。これはESPI計測のひずみ計測感度は 1μ で、ひずみゲージと同程度であるのに対して、デジタル画像相関法によるひずみ計測感度は $100\sim 300\mu$ 程度であるので、最小主ひずみの緩和点を観察できなかったものと考えられる。

したがって、今後の課題として、リンクル発生荷重点を見出すためには、ESPI計測と3Dデジタル画像相関法とを同期させることによりリンクル発生現象を観察していく必要がある。

膜材の引張試験におけるリンクル現象を最小主ひずみに注目して観察する理由を以下に示す。

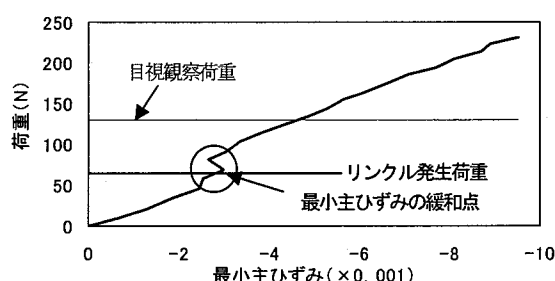


図-20 ESPI計測による荷重-最小主ひずみ曲線

膜材を引張試験機で引張ると、加力方向と直交する方向にはポアソン効果により圧縮力が作用する。本実験で使用した膜材の厚さは $50\mu\text{m}$ の薄膜であるので、わずかの圧縮力により座屈現象が生じる。すなわち、引張载荷方向と直交する方向のポアソン効果により圧縮力が生じ、それにより薄膜の分岐座屈が生じたものと考えられる。

矩形膜の引張試験において加力方向のひずみが最大主ひずみで、それと直交するひずみが最小主ひずみである。したがって、最小主ひずみを観察することによって、分岐座屈現象を観察することができる。図-14, 15および図-18, 19の(a)図から観察されるように、リンクルの三次元形状と最小主ひずみ分布には高い相関関係があるのはこの理由であると考えられる。

薄膜の引張試験は端部での固定方法により非常に小さい初期不整や残留ひずみが生じやすく、また、载荷中において上下端が平行であることを完全に保持することが難しく、偏心载荷によりねじれが生じたりする。板の圧縮座屈試験でも初期不整や残留応力が座屈強度に大きく影響を与えることはよく知られていることであり、矩形薄膜にリンクルが発生する現象も板の座屈現象と等価であると考えられる。

また、矩形膜のリンクル発生と座屈現象を対比して考えると、圧縮板においてはアスペクト比が大きくなると、弾性座屈荷重は一定値に収束する。アスペクト比が変化しても座屈波形が多くなるだけで最小弾性座屈荷重は同じである。本研究で用いた矩形張力膜の実験でも、アスペクト比が1ではリンクル現象が見られなかったが、2, 3となるとリンクル本数は3本程度であるがリンクル形状(振幅)は異なることが確認され、そのときのリンクル発生荷重はほぼ等しい結果であった。このことから板の座屈現象と矩形張力膜のリンクル現象が等価であることを窺えるものである。

今後は、上記のような、初期不整や残留ひずみや载荷装置の偏心を除去した载荷装置を考案するとともに、リンクル解析における分岐座屈理論と張力場理論の比較検討し、分岐座屈理論による張力場理論の定量的評価を実施していく必要がある。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (1) デジタル画像相関法により、変形能の大きい膜材に対しての全視野変位・ひずみ計測が可能であることを確認でき、また、リンクルの発生箇所および発生時を特定することができた。
- (2) 矩形膜のアスペクト比($a/b=1, 2, 3$)が異なることにより、リンクルの発生状態が異なることを確認することができた。アスペクト比が1の場合は、リンクルは確認できなかったが、アスペクト比2, 3ではリンクルが3~4本発生し、リンクル発生荷重はほぼ同じという結果が得られた。これは、板の座屈においてアスペクト比と座屈荷重の関係とほぼ同じ結果である。

- (3) 本研究で使用した装置は、デジタル画像相関法に基づき、三次元形状計測と変位・ひずみ計測が同期計測が可能である。
- (4) 同一時間での最小主ひずみと面外変位を比較することができ、リンクルの発生において最小主ひずみと面外変位との関連性を見出すことができた。

6. あとがき

本研究は科学研究費補助金、基盤研究(B)(2)(研究代表者：松田浩、課題番号：17360217)により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

また、本研究を遂行するにあたって現長菱リサーチ(株)杉原泰亮氏からは、多大な協力と多くの助言を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩佐貴史, 名取通弘, 樋口健：リンクル解析における分岐座屈理論と張力場理論の比較検討～分岐座屈理論による張力場理論の定量的評価～, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.319-326, 2003.
- 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, 第52巻4号, pp.19-22, 2000.
- 3) 呂品埼, 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, No.13, pp.49-55, 1999.
- 4) 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, 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集, pp.59-62, 1998.
- 5) 和田眞禎, 森山雅雄, 松田浩, 杉原太郎：レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集, pp.297-298, 1999.
- 6) 松田浩, 仲村政彦, 山本晃, 和田眞禎, 川口健一, 呂品埼：非接触型3D計測装置を用いた膜形状の計測, 膜構造研究論文集, No.14, pp.47-56, 2000.
- 7) 松田浩, 小嶋悟, 和田眞禎, 古賀掲維, 仲村政彦ほか, 膜・シェル構造解析のための3D計測+FEM解析システムの開発, 鋼構造年次論文報告集, Vol.8, pp.595-602, (社)日本鋼構造協会, 2000.
- 8) 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴：ホログラフィ干渉計測及び三次元計測に基づくFEM解析に薄肉板の振動解析, 日本実験力学学会講演論文集, No.2, pp.217-222, 2002.
- 9) 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴, 仲村政彦, 崎山毅：ホログラフィ干渉計測および3次元計測およびによる薄肉構造部材の非破壊検査に関する研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.847-854, 土木学会, 2002.
- 10) 松田浩, 神原天鳴, 才本明秀, 阪上直美, 山下務, 崎山毅：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, 土木学会, 2003.
- 11) 松田浩, 神原天鳴, 下郡康二, 崎山毅, 阪上直美：スペックル干渉法による鋼部材の非接触全視野ひずみ計測, 鋼構造年次論文報告集, Vol.11, pp.519-524, (社)日本鋼構造協会, 2003.
- 12) 松田浩, 下郡康二, 山下務, 阪上直美：電子スペックルパターン干渉法を用いた矩形膜のリンクル計測, 膜構造研究論文集, No.18, pp.69-74, 2004.
- 13) H. Horii, K. Takamatsu, J. Inoue and N. Sasaki: Measurement of displacement field by "Matching Method" and observation of strain localization in soft rock, Proc. of 2nd International Conference on Digital Image Technologies, Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering, pp.10-19, 1998.
- 14) 森本吉春, 野村孝徳, 藤垣元治, 米山聡：応力・ひずみ・形状・変形の高速度高精度全視野計測と光情報処理の研究, 和歌山大学システム工学部研究成果報告書, 2002.
- 15) 光学的計測法の基礎と応用～鋼・コンクリート構造物への応用～, JCI-JSEM ジョイントセミナー資料, 2005.

(2006年4月13日 受付)