

スペックル干渉による非接触全視野ひずみ計測法

Dynamic and whole-field deformation measurement by Electronic Speckle Pattern Interferometry

松田 浩^{*1}・神原 天鳴^{*2}・才本 明秀^{*3}・阪上 直美^{*4}・山下 務^{*5}・崎山 毅^{*6}

Hiroshi Matsuda, Takanari Kanbara, Akihide Saimoto, Naomi Sakaue, Tsutomu Yamashita and Takeshi Sakiyama

^{*1}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*2}学生会員 長崎大学大学院生 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 1-14)

^{*3}非会員 長崎大学 工学部 機械システム工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*4}正会員 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*5}非会員 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*6}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) is a promising experimental techniques to investigate whole-field deformation analysis. The technique has been developed to make possible to observe dynamic feature of deformation. In this paper, the whole-field deformation analysis by the Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) is applied to observe tensile tests of Aluminium-alloy samples and a compression tests of brittle solids.

Key Words : whole-field deformation measurement, electronic speckle pattern interferometry (ESPI)

1. はじめに

筆者らは、ここ数年来、膜・シェル構造の形状計測のためにレーザ光と CCD カメラを用いた可搬型・非接触三次元計測装置を試作開発¹⁾するとともに、それにより得られる膨大な 3 次元座標情報を用いた形状計測²⁾³⁾⁴⁾と大規模ソリッド要素による FEM 解析を固有振動解析を実施している⁵⁾⁶⁾。その際、FEM 解析結果の信頼性と精度を検討するために、振動実験を行ない、共振周波数およびホログラフィ干渉計測装置を用いた振動モードとを比較検討した。

ホログラフィ干渉計測は、全視野ひずみ計測技術の一つで、光の波長程度の小さな変形や変位、振動状態などを精度よく測定することができ、自動車や航空機産業などの大規模工業において非破壊検査や振動解析に顕著な応用が見られた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。ホログラフィに関する研究は 1960 年代から活発になされていたが、比較的規模の大きな装置を必要とすること、またホログラムの記録媒体として写真乾板やフィルムを使用するため、記録と再生の間に時間を必要としリアルタイム計測ができない、さらにはコンピュータと FEM の技術の進歩、などの理由により、中小規模の企業や研究所への普及には至らなかった。

スペックル干渉計測は可視光線の中での計測が可能であるという特長をもち、干渉計測技術で得られる情報は、変位計測に関しては、ホログラフィ干渉で得られるものと同じタイプの情報である。

レーザ光で粗面を照射すると、粗面の各点で乱反射した光波が像面でランダムな位相関係で重ね合わさることによって、スペックルパターンと呼ばれる独特の干渉模様が発生する。このスペックルパターンを参照光と重ね合わせると、やはりスペックルパターンが現れる。これは物体が変形して個々のスペックルの干渉条件が変化すると、変形による位相差が 2π 変化するごとに、差画像の明暗が 1 周期変化する。このようにして、全視野にわたる変形の分布を、光波の 2π 位相変化を単位とする等高線として描かせることができる。

スペックル干渉計測で得られる縞パターンは、ホログラフィ干渉法によるものと等価で、光波長を基準とした高精度全視野計測が可能となる。ホログラフィと違って、CCD カメラとコンピュータさえあれば、すべてデジタル処理で結果が得られることから、電子スペックル干渉法 (ESPI) と呼ばれている。ESPI には、① 高感度全視野計測、② 非接触計測法であり、試験片に対する前処理が不要、③ 光学系の選択により、面外変形、面内変形、これらの空間微分などのバラエティがある、などの特長がある。また、近年のコンピュータ及び周辺技術の進歩は著しく、大量の画像データをメモリに蓄え、またデータ間の演算を高速に行うことが比較的容易になった。

これらの特徴を活かして、豊岡ら¹⁰⁾は、ESPI による高精度位相解析法についての研究を行っており、アルミニウム合金の引張試験の全過程を観察し、塑性変形過程で知られている局在する変形場 (リュウダス帯など)

の詳細な動的挙動の計測に成功している。高桑ら¹¹⁾は、電子スペックル干渉法による再生紙の二次元的な変位測定に應用している。また、内野¹²⁾は、レーザスペックル計測法のうち、特に高精度な計測法であるスペックル干渉法とそれを利用した計測として、ICチップに電流を流し駆動させた時の変形挙動の計測を行っている。

本研究では種々の試験片を製作し、スペックル干渉計測による変位計測を実施するとともに、全視野ひずみ計測法の建設材料への適用可能性を検討したものである。

2. スペックル干渉法の原理と概要

2.1 スペックル干渉法の原理

スペックル干渉法は一定方向の変位量の等高線を観察する技術である。図-1に示す光学系のように、測定面の法線に対して対称な2方向からレーザ光を照射し、法線方向から観察する。計測面が面内方向に 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、レーザの波長を λ 、照射光の入射角 θ をとすれば次式で表される。

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

レーザを粗面に照射すると、粗面の各点で乱反射した光波がランダムな位相関係で重ね合わさることによって、図-2(a)に示すような一様なスペックルパターンと呼ばれる斑点模様が形成される。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の明暗が変化するが、図-2(b)のように模様全体は同じように観察されるだけである。しかし、この場合に位相差の変化量がレーザ波長の整数倍なら、スペックルの明暗は元のままにとどまる一方、変化量が波長の半整数倍の位置では反転する。このスペックルパターンをCCDカメラと画像メモリーを使用して、変形前のスペックル I_{s1} と変形後のスペックル I_{s2} の強度の差の2乗をモニターに表示すると、図-2(c)のような一定方向の変位量の等高線の縞模様を観察することができる。縞模様の分布は次のように与えられ、右辺の第3項が干渉縞をつくり出す。

$$I_s = [(I_{s1} - I_{s2})^2] = (I_{s1})^2 + (I_{s2})^2 - 2(I_{s1}I_{s2}) \quad (2)$$

したがって、明暗が変化しない位置では暗く、明暗が変化した位置では逆に明るくなる、つまり、光の位相差が 2π ごとに、一本の干渉縞が表れる。干渉縞の本数および式(1)より対象物の変位量を計測することができる。この方法は電子式スペックル干渉法(Electronic speckle pattern interferometry:ESPI)と呼ばれ、変位の等高線を表す干渉縞をモニター上に実時間で観測できる。また変形量が増して縞が細くなったり、コントラストが低下したときでも、初期スペックル像を最新のものと交換することによって変形0で全面が暗い状態から再出発

し、交換時までの変位を加算することによりいくらでも大きな変位が測定できる。

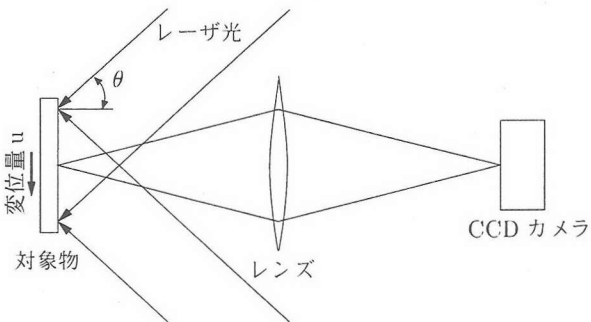
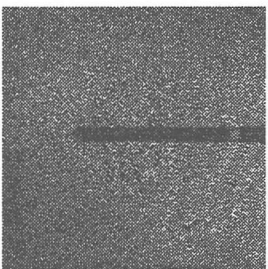
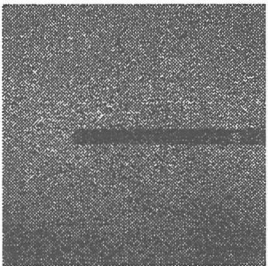


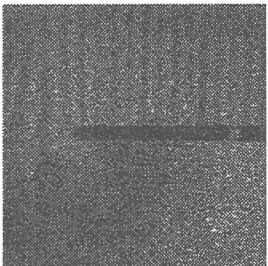
図-1 スペックル干渉法の光学系



(a) 変形前 I_{s1}

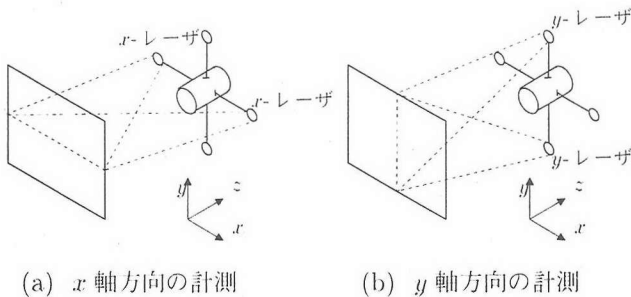


(b) 変形後 I_{s2}



(c) 干渉縞 $[(I_{s1} - I_{s2})^2]$

図-2 干渉縞の形成



(a) x 軸方向の計測

(b) y 軸方向の計測

図-3 面内変位計測 (x, y 方向)

2.2 電子スペckル干渉計概要

本研究で用いた電子スペckル干渉計は ETTEMEY ER 社製のレーザストレイナライザー 2D-ESPI を使用した。ESPI では基本的には面内変位計測ではレーザ照射方向の面内変位分布のみしか求めることができず、最大面内変位を求めるためには少くとも 2 方向から面内変位計測が必要である。2D-ESPI では図-3(a),(b) に示すような方法で変位が生じた時のスペckルパターンを x 軸方向、 y 軸方向個々に計測することで面内変位分布の計測が可能となる。

3. 計測性能照査

本研究で使用した ESPI 計測の計測性能を照査するために、汎用 FEM 解析ソフトによる解析、ひずみゲージ法によるひずみ計測、および電子スペckル干渉計測とを比較した。計測性能の照査にはひずみ値とひずみ分布図の二点から比較を行った。

3.1 ひずみ値照査

次に電子スペckル干渉計により出力される応力・ひずみの値に対して信頼性が持てることを確認するため、図-4 に示す試験片を用いて一軸引張り試験を行い、ひずみゲージ法によるひずみ値と電子スペckル干渉計によるひずみ値を比較した。

電子スペckル干渉計により得られたひずみ値および、ひずみゲージにより得られたひずみ値を比較するために、荷重-ひずみ曲線を図-5 に示す。ESPI による結果とひずみゲージによる結果がよく一致していることから、ESPI では、ひずみゲージと同等の精度でのひずみ計測が可能であることがわかる。

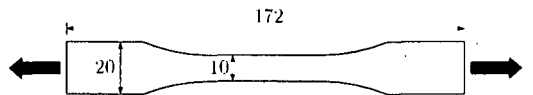


図-4 一軸引張り試験片 (mm)

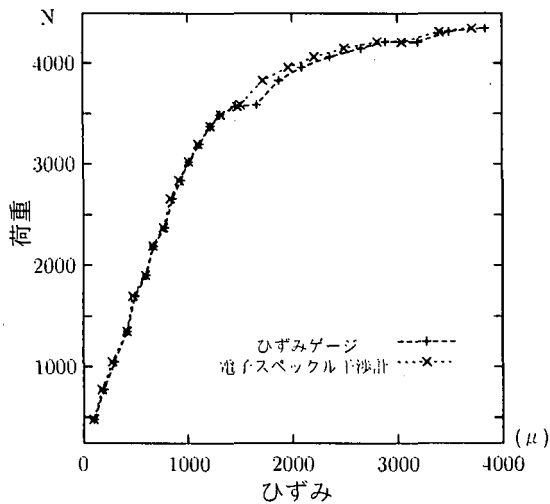


図-5 荷重-ひずみ曲線

3.2 分布図照査

応力・ひずみ分布図の照査のために試験体に微小変位を与えた際のひずみ分布、変位分布、応力分布を ESPI 計測により計測し、比較のために汎用 FEM ソフトで解析を行った。

(1) 計測実験概要

ひずみ分布図の照査のために使用した試験体の概形および寸法を図-6(a) に示す。

試験体は高さ 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。右側上端部にはボルトが貫通しており、ボルトを回転させることにより試験体の上部に上向き方向の変位を与えることが可能である。アルミ合金の材料定数は表-1 に示す通りである。

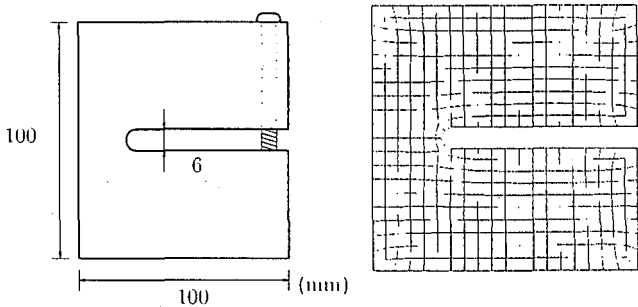
(2) 解析概要

ESPI 計測による応力・ひずみ分布の照査を行うために、汎用 FEM 解析ソフトを用いて弾性解析を行った。解析モデルの要素には 4 節点平面シェル要素を用い、要素分割には解析の上でひずみ値が的確に得られるように auto mesh 機能を用いて分割数を 396 とした。解析モデルを図-6(b) に示す。

(3) 解析および実験結果

x,y 方向の変位、 x,y 方向の応力、 x,y 方向のひずみ、最大主応力、最小主応力、最大主ひずみ、最小主ひずみの分布図において、応力照査のために計測実験と解析による結果を次頁図-7 に示す。

ESPI 計測での分布図では、実際の载荷点は開口部下側であり、その点付近では他に比べ応力集中が発生し、開口先端付近での値が判別しにくくなるため、分布図作成時に载荷点付近の画像を削除しているため、解析結果に比べ開口部付近以外の箇所での分布が異なる結果となった。値そのものに、わずかに誤差はみられるものの、開口部付近のひずみや応力集中の分布が類似した結果が得れたものと考える。

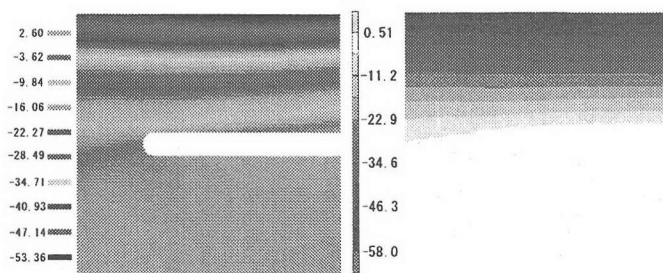


(a) 試験片寸法 (b) 解析モデル図

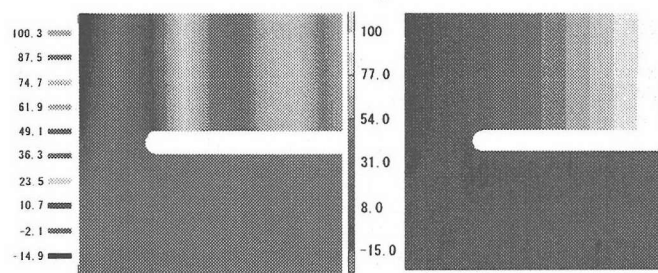
図-6 試験片寸法および解析モデル図

表-1 試験片材料定数

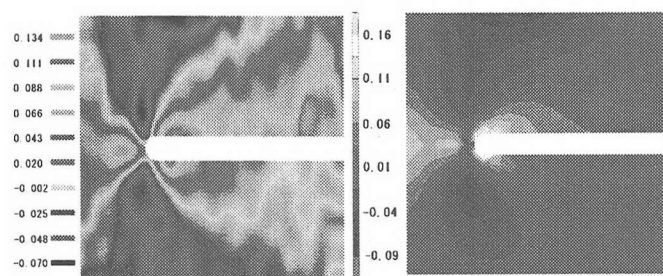
ヤング率 E	ポアソン比 ν	密度 ρ
71000MPa	0.33	2.7g/cm ³



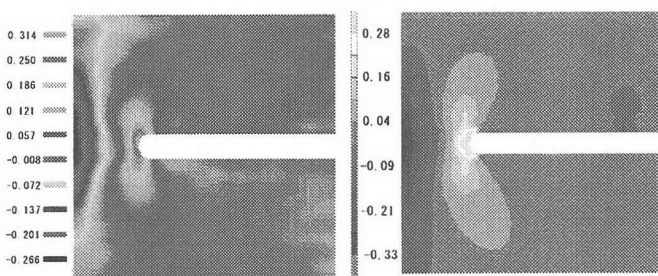
ESPI FEM 解析
x 方向変位 (μm)



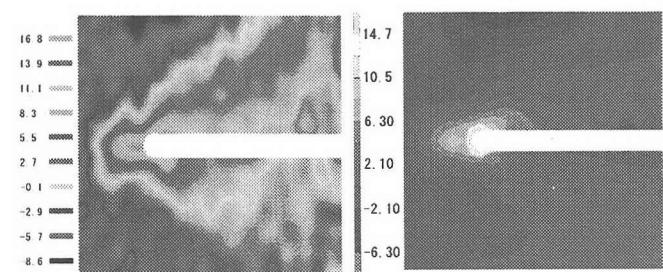
ESPI FEM 解析
y 方向変位 (μm)



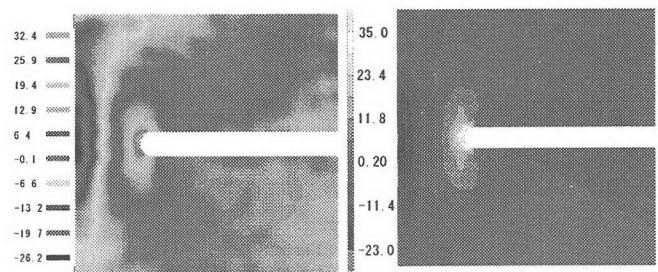
ESPI FEM 解析
x 方向ひずみ ($\varepsilon_x \times 10^{-3}$)



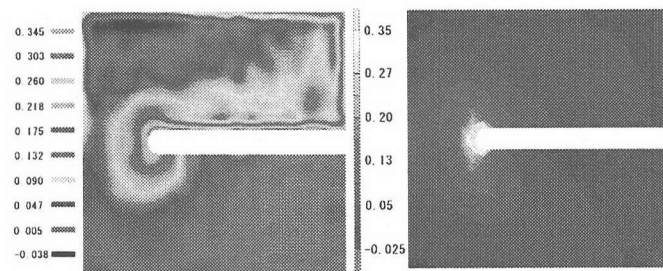
ESPI FEM 解析
y 方向ひずみ ($\varepsilon_y \times 10^{-3}$)



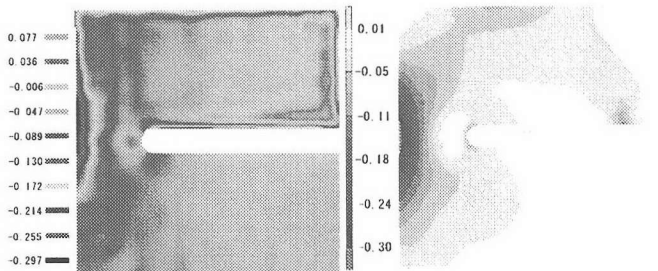
ESPI FEM 解析
x 方向応力 ($\sigma_x \text{ N/mm}^2$)



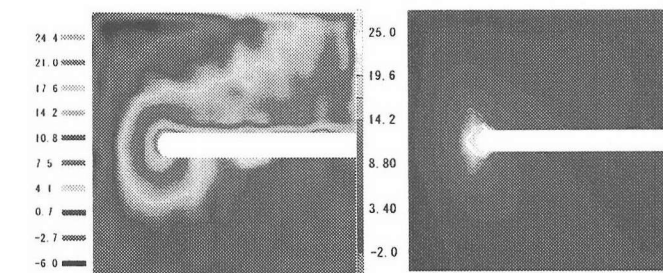
ESPI FEM 解析
y 方向応力 ($\sigma_y \text{ N/mm}^2$)



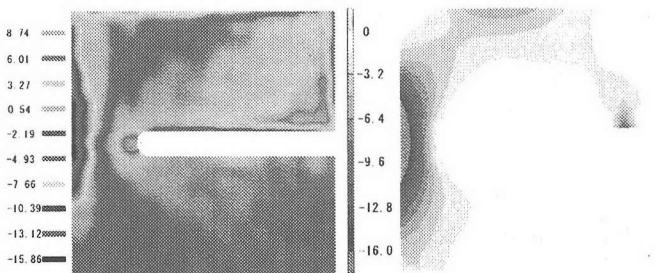
ESPI FEM 解析
最大主ひずみ ($\varepsilon_1 \times 10^{-3}$)



ESPI FEM 解析
最小主ひずみ ($\varepsilon_2 \times 10^{-3}$)



ESPI FEM 解析
最大主応力 ($\sigma_1 \text{ N/mm}^2$)



ESPI FEM 解析
最小主応力 ($\sigma_2 \text{ N/mm}^2$)

図-7 ESPI 計測および FEM 解析による分布図の比較

4. 全視野ひずみ計測の応用

前章において、ESPI 計測によって得られるひずみ分布および、ひずみ値に信頼性が持てることが確認された。この ESPI 計測を用いて様々な計測を行なった結果を示す。

4.1 孔を有する矩形板の一軸引張り

(1) 実験概要

試験体はアルミ合金により作成し、厚さ 1mm、高さ 200mm、幅 40mm であり、材料定数は前章において示した表 -1 と同値である。また、試験体中央部の孔は 10mm となっている。

引張実験においては、試験片のつかみの部分があるため、実際の計測範囲は図 -8 に示す斜線部の範囲である。

(2) 解析概要

全視野変位計測による応力・ひずみ分布の比較のために FEM 解析によって図 -9 に示すモデルを作成し解析を行った。解析モデルは実験による試験体と同様の形状を再現し平面応力要素を使用し、下端部を完全固定し、上端に上向きに 1440N を載荷した。

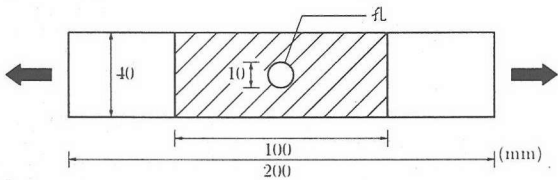


図 -8 試験片概要

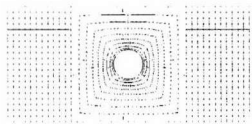


図 -9 解析モデル

(3) 計測結果

x, y 方向変位、 x, y 方向応力、 x, y 方向ひずみの順に計測結果と解析による結果を次頁図 -10 に示す。

図 -10、の変位、応力、ひずみ分布における ESPI の結果と解析結果を比較すると、解析による分布図のようなラインが描かれるべき図が、電子スเปックル干渉計においてはやや不均一なラインで出力されている。本計測装置では、CCD カメラに取り込まれた画像に対して x, y 座標を決定する。今回の実験では、カメラに対して計測対象が傾いていたため、ESPI によって得られた各種の分布図が左右対称でなくなっている。しかし、そのような差異はみられるものの、円孔周辺のひずみや応力の集中の分布、またその値は、ESPI による結果と解析結果が比較的一致しているものと考えられる。

4.2 張力膜しわ発生時の応力・ひずみ計測

張力膜は薄く、曲げおよび圧縮に対しての剛性がないために、しわが発生する。しわの発生は膜構造物の力学的特性および美観に影響を与えるため、しわ発生時の応力の計測は、

しわの発生防止と制御において重要となる。そこで、ESPI を用いて非接触で張力膜の計測を行った。

(1) 実験概要

本実験で使用した膜モデルは、図 -11 に示すように、PET フィルムからなり、膜厚 $50\mu\text{m}$ 、アスペクト比 2(150×300mm) である。今回、計測に用いた範囲は縦方向中央部の 150×125mm の領域である。計測範囲にはレーザー光を乱反射させるために現像剤を表面に吹き付け、ランダムな凹凸をつけた。

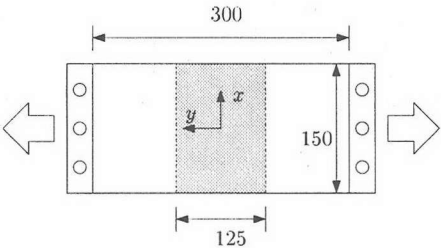


図 -11 膜寸法および計測範囲 (mm)

(2) 実験結果

目視によるしわ発生領域は中央部に 40mm の幅のしわが 2 本生じ、しわは膜モデル全域に分布していた。図 -12 に主応力、主ひずみ、せん断応力、せん断ひずみの分布図を示す。また、図 -13、図 -14 に中央部における最大主ひずみ、最小主ひずみの分布を示す。

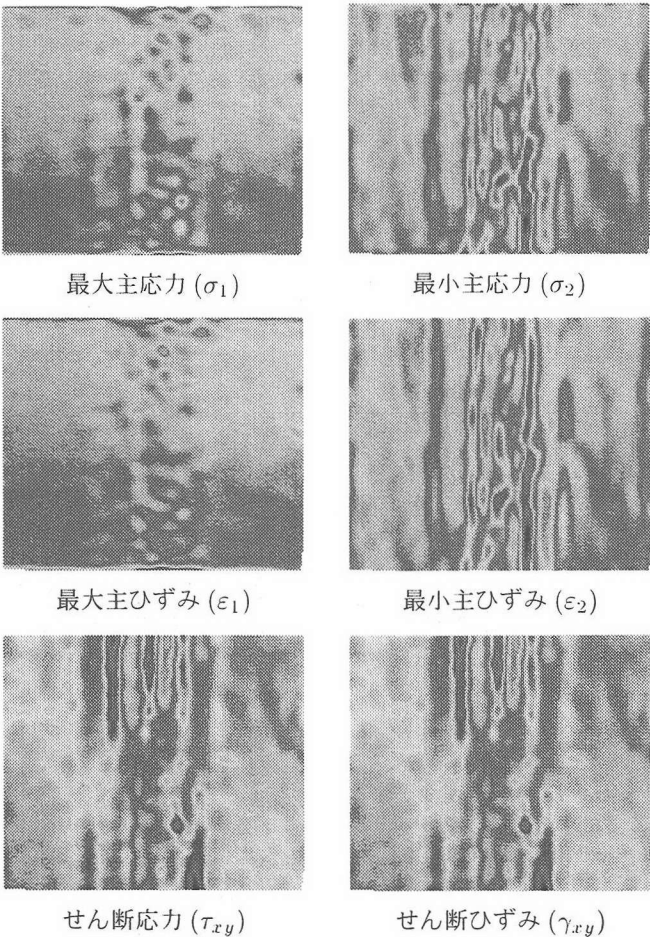


図 -12 ESPI 計測によって得られた応力・ひずみ分布図

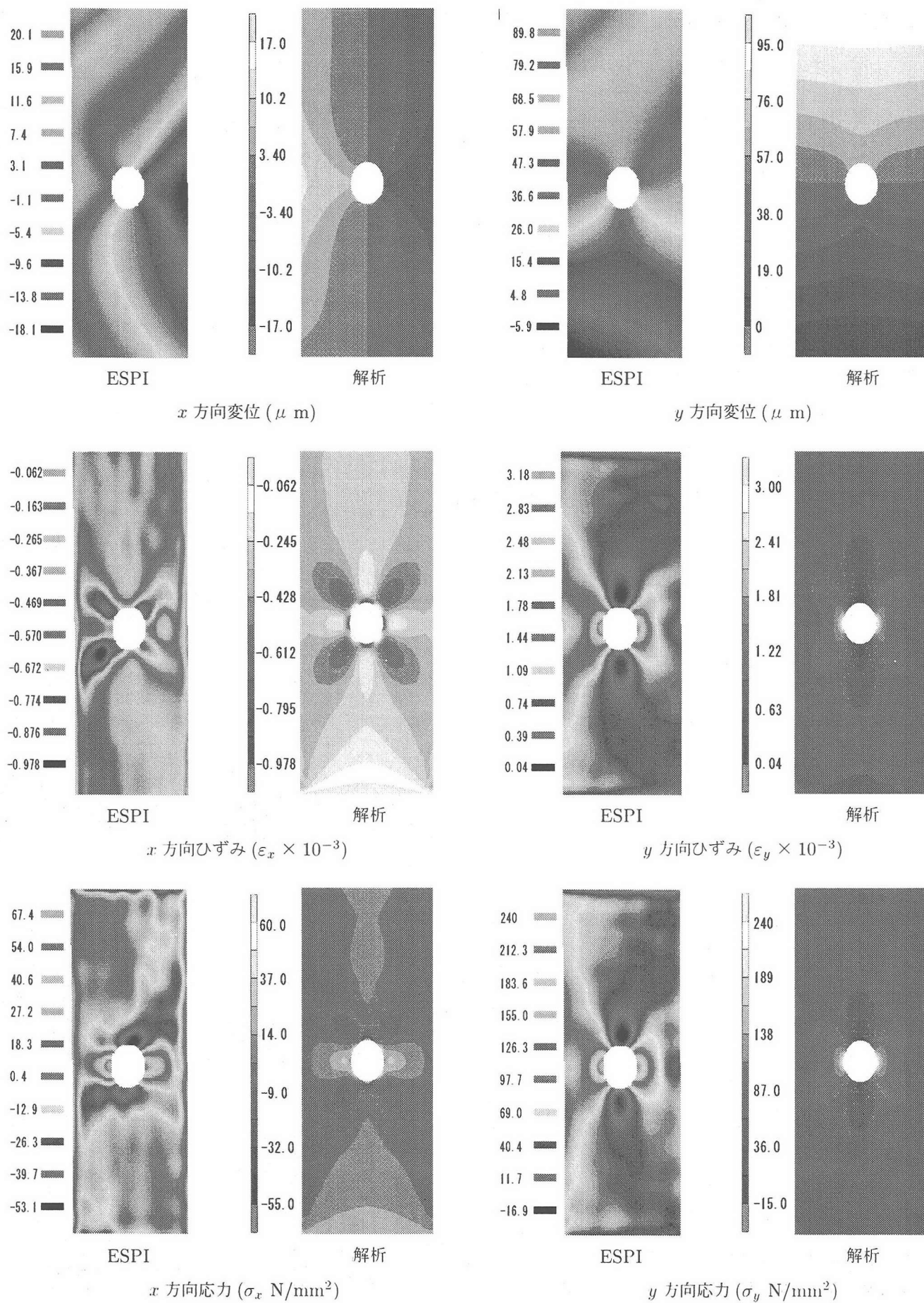


図-10 ESPI計測およびFEM解析によって得られた分布図の比較

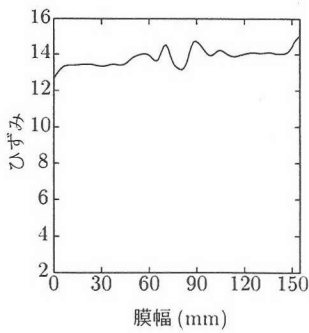


図-13 最大主ひずみ分布

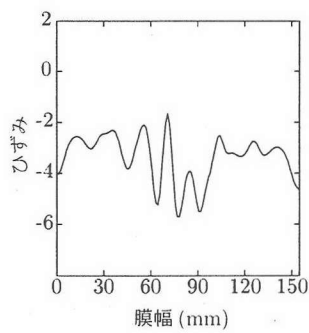


図-14 最小主ひずみ分布

表-2 y 変位量

step	変位 (μm)
step1	111.5
step2	306.0
step3	374.8
step4	529.4
step5	727.7
step6	1188
step7	1680

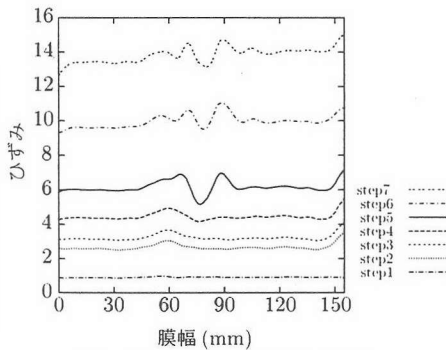


図-15 最大主ひずみ分布

本実験において、目視可能な大きなしわは2本発生していた。図-13, 14を比較すると、凹凸の数から、しわの発生は最小主ひずみではなく最大主ひずみの分布に依存していることがわかる。そこで、荷重増加に伴う最大主ひずみの変動を示したものが図-15であり、表-2は図-15での各stepに対応しており、y方向の最大変位を表したものである。

以上の結果より、張力により発生したしわの範囲が分布図により推定できる。また、実験においては、膜面に発生するしわは非常に微小であるため、しわ発生時期の確定は非常に困難であるが、最大主ひずみおよび最小主ひずみのグラフからしわの発生が予想できることがわかる。

4.3 一軸圧縮によるき裂先端部の応力・ひずみ計測

切欠きを有する試験片に荷重が作用すると、切欠きの先端に応力が集中する。応力が增大すると、やがて切欠き先端よりき裂が発生する。き裂は構造物を崩壊に導く因子であるため、き裂の発生、進展を把握することは非常に重要である。

(1) 実験概要

図-16に示す試験片を用いて圧縮試験を行う。試験片はアクリル樹脂からなり、縦80mm、幅40mm、厚さ6mmであり、直径4mmの孔を開け、孔から長さ16mm、幅0.5mmの切欠きを有する。この試験片に圧縮力を作用させる際、試験片の面外方向の座屈防止のためにガラス板を添えて載荷する。き裂の可視化の目的でアセトン塗布した。

(2) 実験結果

図-17に実験での載荷後のき裂の発生状況を示す。図-17から、き裂は切欠き延長線の斜めに進展するのではなく、圧縮方向と同じ方向に進展していくことがわかる。

図-18に、き裂発生直前の試験片の、ESPI計測による変位・ひずみ・応力の分布図を示す。同図の最大主応力の分布を見ると、き裂周辺が圧縮となっており、切欠きが閉口していることがわかる。また、切欠き先端の応力集中部のほかにも、切欠き先端から少し離れた切欠き延長線上の部分に高い応力が発生している箇所がみられる。

図-19に、載荷試験後の裏返した試験片の切欠き先端部の拡大図を示す。図-18と同様に、切欠き先端から少し離れた部分にき裂が切欠き方向と直角方向に発生していることが確認できる。また、円内に示す切欠き先端付近に階段状に分布した微細なき裂が多数みられるが、これはエcheロンクラックと呼ばれるもので、き裂先端部から発生した、ウィングクラックとは別の発生メカニズムによるものである。なお、エcheロンクラックはアセトンを塗布することにより目視での可視化が可能となる。

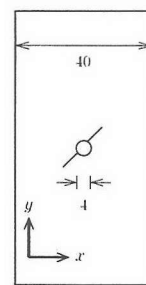


図-16 試験片寸法

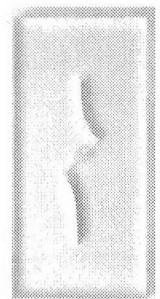


図-17 き裂の発生状況

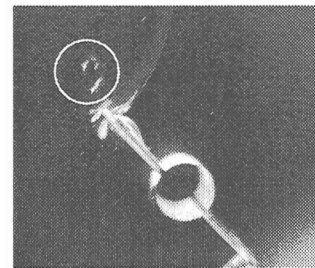


図-19 切欠き先端部・拡大図

5. まとめ

ESPI計測により得られた応力・ひずみ分布図はその結果がFEMによる結果とよく一致していた。またESPI計測によって得られたひずみ値はひずみゲージと同等の結果が得られることも示した。このことから、ESPI計測を用いた非接触での全視野計測の有用性が示せた。

ESPI計測を用いることで、孔を有する試験体のように応力集中が懸念される試験体においても、全視野計測によりその応力集中部を容易に得ることが可能である。

また、膜材のように変形しやすい材料に対しても、非接触であるため計測が可能であり、膜に発生するしわのように微小な変位を生じる物体においても、その検知が可能である。

ESPI計測は非接触全視野計測であるため、想定していない箇所き裂の発生にも、ひずみゲージのように計測が不能になることがないため、あらゆる状況での計測が可能である。

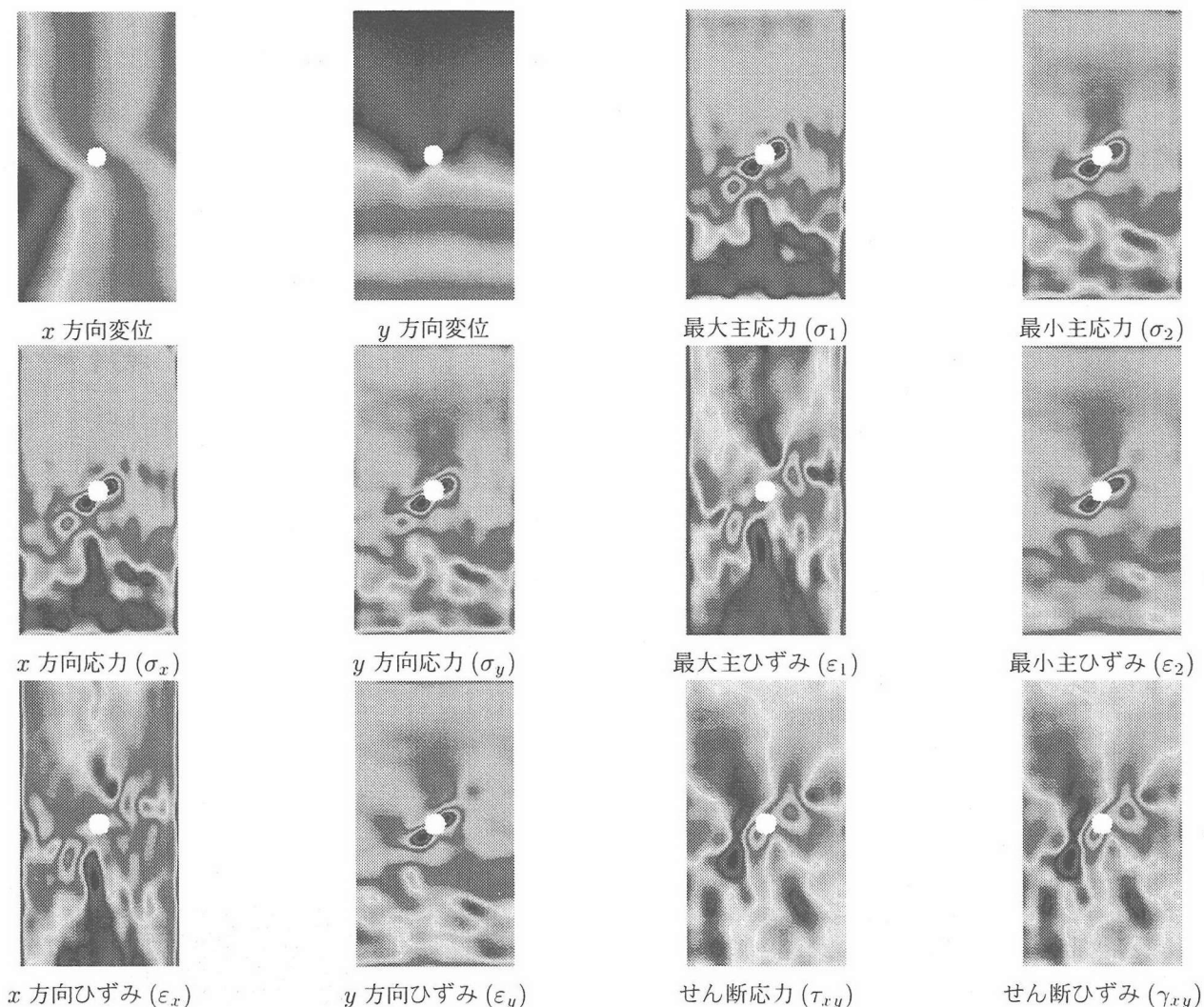


図-18 き裂発生前の分布図

あとがき

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究B, 課題番号14350246, 萌芽研究, 課題番号14655164), (財)前田記念工学振興財団の研究助成を得て行いました。また、本研究を進めるにあたり、埼玉大学理工学部豊岡了教授からはスペckル干渉計測法に関して多くの助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉原太郎ほか: 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
- 2) 仲村政彦ほか: 可搬・非接触型三次元計測装置を用いたコンクリートの表面計測, 土木構造・材料論文集, 第16号, pp.85-92, 2000
- 3) 松田浩ほか: 3次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.901-906, 2001
- 4) 松田浩ほか: 非接触型3D計測装置を用いた膜形状の計測, 膜構造論文集, No.14, pp.47-56, 2000
- 5) 松田浩ほか: 3D計測によるコンクリート打継部及び曲面の振動解析に関する研究, 応用力学論文集, Vol.3, pp.115-124, 2000
- 6) 松田浩ほか: 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, 第8巻, pp.595-602, 2000
- 7) 辻内順平: ホログラフィー, 裳華房, 1997
- 8) Paul Smigielski 著, 辻内順平 訳: ホログラフィーによる計測と検査 — 工業で使われるホログラフィー —, 新技術コミュニケーションズ, 1999
- 9) 久保田敏弘: ホログラフィ入門, 朝倉書店, 1995
- 10) 豊岡了ほか: 動的ESPIの和差法による高精度位相解析, 日本実験力学学会講演論文集, pp.271-274, 2002
- 11) 高桑淳之介ほか: 電子スペckル干渉法による再生紙の変形測定, 日本実験力学学会講演論文集, pp.275-279, 2002
- 12) 内野正和: レーザスペckル計測とその応用, 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫, 九州大学応用力学研究所, pp.71-75, 2002
- 13) 上原啓吾ほか: プレートテクトニクスに基づく地震断層の形成メカニズムに関する研究, 長崎大学工学部機械システム工学科卒業論文

(2003年4月18日受付)