

電子スペックルパターン干渉法による アルミニウム合金板の破壊挙動の全視野ひずみ計測

Whole-field strain and deformation measurement of the fracture behavior of aluminium alloy plates by Electronic Speckle Pattern Interferometry

松田 浩^{*1}・安東 祐樹^{*2}・杉原 泰亮^{*3}・山下 務^{*4}・神原 天鳴^{*5}

下郡 康二^{*6}・崎山 毅^{*7}・森田 千尋^{*8}

Hiroshi Matsuda, Yuki Andoh, Yasuaki Sugihara, Tsutomu Yamashita, Takanari Kanbara,
Koji Simogori, Takeshi Sakiyama and Chihiro Morita

^{*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}正会員 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (〒 305-0003 つくば市桜 1-17)

^{*3}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)

^{*4}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)

^{*5}正会員 (株) リョウセンエンジニアズ・技術計算センター (〒 733-0034 広島市西区南観音 6-4-31)

^{*6}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)

^{*7}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)

^{*8}正会員 博士(工学) 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

The increasing demand for better characterization of materials and components in many cases requires full field information for the analysis of the mechanical behavior in destructive process. Speckle interferometry offers the possibility of full field and non contact measurement of displacements and strains.

In this paper, Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) is applied to observe an entire process of tensile tests of Aluminium-alloy samples with a notch and some holes, and to present changes of displacement and strain distribution and generations of strain concentration in notch point and around holes.

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

1. まえがき

近年、既設構造物の維持管理に対する研究が注目され、アセット・マネジメントや新たな電子機器類の開発で活況の構造物モニタリング技術に関する研究が多々行われるようになった。

構造物の劣化損傷の評価法としてのモニタリング技術は、どんな変状をどの段階でどのような精度で得て、どんな対策につなげることができるのかが重要になる。それと同時に、センサやシステムの特性と構造物に生じる変状の特性との適合性に関して考察することが重要である¹⁾。

鋼部材の場合、疲労き裂の発生位置は溶接継手かその周辺などであるが、その探傷試験として、目視試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験などがあり、部材内部の探傷試験として、放射線透過試験、超音波探傷試験などがある。これらの試験手法はいずれも、き裂やひび割れの有無、位置、大きさ、深さなどを検査するもので、き裂やひび割れがすでに発生した後の試験法で

ある。

一方、これまで、構造部材の変形状態を把握する手段として主にひずみゲージによる計測が行われてきた。ひずみゲージ法は適切な位置、方向、状態、環境の下でひずみゲージを貼ることで信頼性の高い評価を得ることができる。しかし、ひずみゲージを用いた計測法では、得られるひずみ値は定点あるいはゲージ長の平均的なひずみであり、また、対象物全体のひずみ分布を得るには多くのゲージが必要となる。また、ひずみゲージ法においては対象物に直接ゲージを貼付する必要があるため、環境条件によっては計測が制限される場合がある。

以上に鑑み、非接触・全視野計測が可能である光学的計測技術を構造部材のひずみ計測に適用することに着目した。本研究ではレーザホログラフィ干渉法の関連技術である電子スペックルパターン干渉法(Electronic Speckle Pattern Interferometry:ESPI)を用いた。本方法では、コヒーレントなレーザ光を利用し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及び動的な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変

[†] Dedicated to the memory of Prof. Michihiro KITAHARA

化を検出する計測方法であり、① 光学系が簡単、② 可視光線下で計測可能、③ CCD カメラなどの比較的低解像力の記録材料で可能、④ リアルタイム計測が可能、などの利点がある。

本研究は、ESPIによる構造部材の破壊挙動の全視野ひずみ計測への適用可能性について検討することを目的としたものである。本論文では、ESPIによる全視野ひずみ計測の精度や有効性などを調べるとともに、切欠きあるいは孔を有するアルミニウム合金板の引張試験を実施し、荷重の載荷から破壊に至るまでの挙動の全過程をESPIにより全視野計測を行い、それらの破壊挙動特性について検討したものである。

2. 電子スペckルパターン干渉計測

2.1 スペckルパターン干渉法

スペckルパターン干渉法の原理^{2)~5)}は、同一光源から出たレーザ光を振幅分割し、各光線を光散乱物体に照射して生じた散乱光により生じるスペckル場を再び重ね合せると、互いに干渉したスペckル場によるスペckルパターンが得られることを利用するものである。分割した一方の光が位相のずれを含む光によるスペckル場と、位相のずれを含まない光によるスペckル場との干渉により、位相差に応じて個々のスペckルの輝度に変化する。このとき得られるスペckルパターンと、基準スペckルパターンとの差画像を取ると、明と暗のスペckルが縞状に分布し、スペckル相関縞が生じる。この縞は物体の微小変位や変形などの一定割合の変化を表わしているため、縞数を数えることにより、定量化することができる。この方法では、ホログラフィ干渉法のように高解像度記録媒体を必要とせず、CCD カメラなどの解像度の低い記録媒体が使用できるという特長を有している。

ESPI計測の光学系を図-1に示す。2方向から照射された同一波長のレーザ光が対象物の粗面に当たり、粗面の各点で拡散反射(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独特な流動性の斑点模様が形成される。これがスペckルパターンと呼ばれるものである。

図-1に示す光学系において、レーザ光の入射角を θ 、波長を λ とする。いま、対象物が u だけ変化すると、次式

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

に示す関係の位相差($\Delta\Phi$)が生じるため、干渉強度が変化する。同時に、対応するスペckルも明暗を変える。光路差の変化量が波長の整数倍なら、スペckルの明暗は元のままだが、変化量が波長の半整数倍の位置では

反転する。CCD カメラにより取り込んだスペckルパターンを図-2に示す。画像メモリを用いて、変形前のスペckル像と変形後のスペckル像の各点の光の強度(I_{s1} , I_{s2})を256階調に分解し、その差の2乗を表示すると、図-3のような干渉縞を変位の等高線として得ることができる。縞の分布は次式

$$V_s = (I_{s1})^2 + (I_{s2})^2 - 2(I_{s1}I_{s2}) \quad (2)$$

のように与えられ、右辺の第3項が干渉縞をつくりだす。また、図-4は、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示している。干渉縞の強度分布は 2π の位相変化で明暗が正弦的に変化する。したがって、式(1)の $\Delta\Phi$ に 2π を代入すると、縞一本の形成に必要なとされる変位 u は次式で表される。

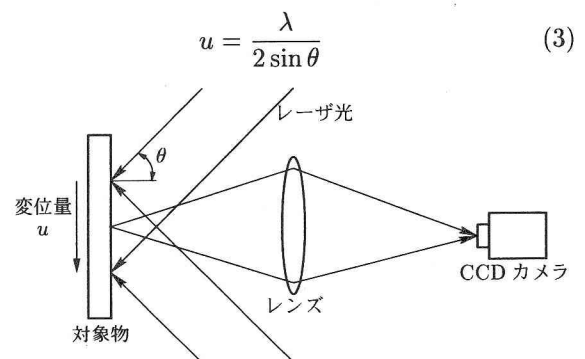


図-1: ESPIの光学系

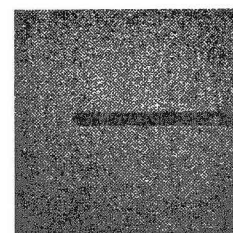


図-2: スペckルパターン

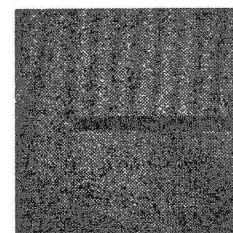


図-3: 干渉縞の形成

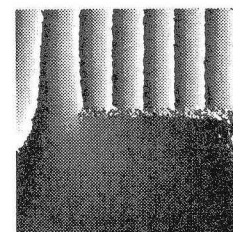


図-4: 位相図

2.2 電子スペckル干渉計測装置の概要

本研究では、干渉計に ETTEMEYER 社製のレーザストレイナアナライザ 2D-ESPI(図-5)を使用した。レーザ光には波長が 780nm(50mW×2) のダイオードレーザを用いており、計測感度は 0.03 ~ 0.1 μ m、計測レンジは 1 ~ 20 μ m (20 μ m 以上は分割計測) であり、0.1 ~ 1.5m の距離から 200×300mm の範囲を計測することが可能である。スペckルパターン干渉法による面内変位の計測は、基本的に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ない。そのため、本 ESPI 装置はレーザを x 軸方向と y 軸方向のそれぞれ 2 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 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。

ESPI 計測により、まず、図-6 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-7 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-6 を元に、図-8 に示すように等高線表示したり、応力状態をベクトル表示することも可能である。なお、応力値は計測対象物の弾性係数やポアソン比を入力することにより求められる。

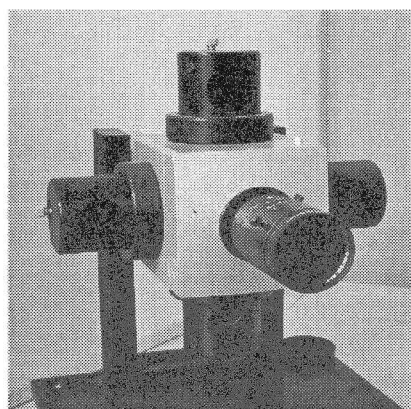


図-5: スペckル干渉計

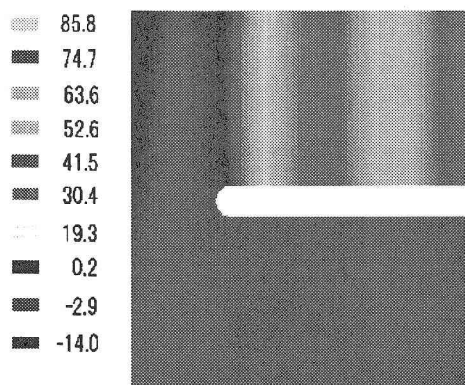


図-6: y 方向変位分布 (μ m)

ESPI は、粗面の変形を特殊な前処理を施すことなく、非接触で測定でき、光波長を基準とした干渉縞が得られること、スペckル干渉法は写真記録の過程を経ずにリアルタイムでモニターに変位分布を表示できること、などの利点がある。

スペckルパターンは対象物からの反射光がランダムな位相関係で干渉し合うことで生じるため、対象物表面が粗面であることが必要条件である。本研究では、計測対象物の表面でレーザ光が乱反射しやすくし、スペckルパターンを明確に表示させる目的で、浸透探傷用の微粉末現像剤(拭取り可能)を表面にスプレーして、対象物表面を粗面処理し計測を行った。なお、アルミ合金の試験体は、鏡面とはいわないまでも比較的滑らかな面であるため、現像剤を必要とするが、コンクリートなどの表面は粗面であるので、そのままの状態での計測が可能である。

また、ESPI は対象物の変形が大きくなると干渉縞の間隔が狭まり、縞を確認することができなくなる。そのため、スペckルパターンを撮るたびに、その全てのスペckルを初期化して微小区間の変位を断続的に検出し、重ね合わせることでより大きな変位の測定を可能としている。よって、小さな変位で計測を行えば(計測回数を増やせば)、精度向上が可能であるため、式(3)より対象物とカメラを可能な限り短い距離で計測を行うことが望まれる。

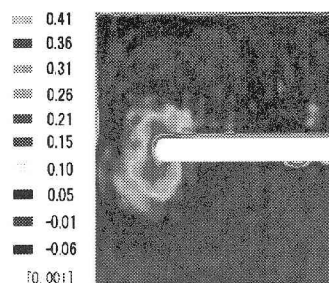


図-7: 最大主ひずみ分布
($\times 0.001$)

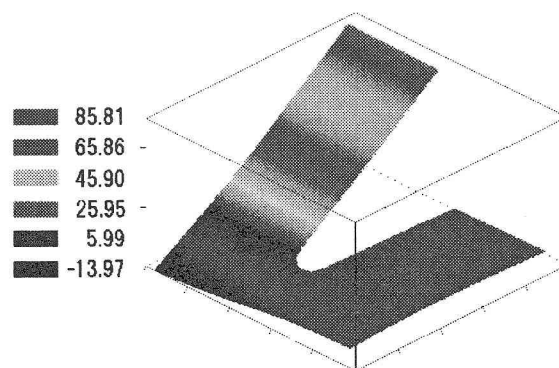


図-8: 等高線表示 (μ m)

表-1: アルミ合金の材料定数

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

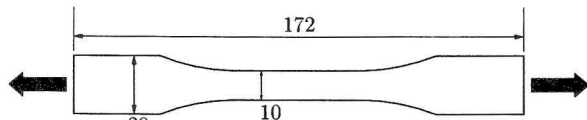


図-9: 一軸引張り試験片

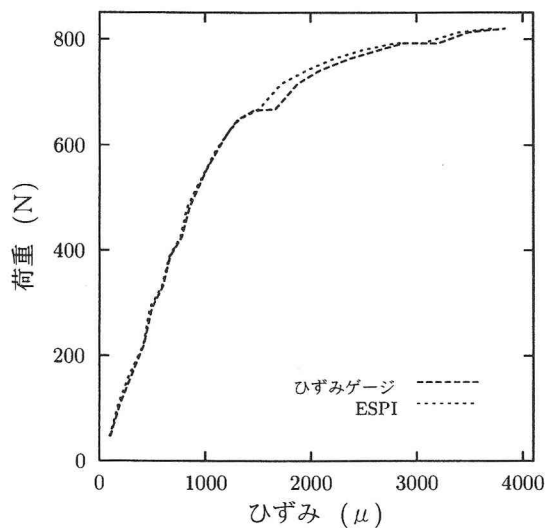


図-10: 荷重 - ひずみ曲線

2.3 ひずみ計測適用検証試験

ESPIのひずみ測定への適用性を確認するための試験を行った。試験は、表-1に示す材料定数で図-9に示す寸法のアルミ合金製の試験片(厚さ2mm)の一軸引張り試験を行った。この試験片にひずみゲージを貼付し、ESPIとの比較を行った。得られた結果を図-10に示す。試験結果より、ESPIの結果は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ひずみの値が異なる部分が見られる。しかし、その差はわずかであり、破壊に到るまでの荷重-ひずみの関係はひずみゲージの値と概ね一致していると考えられる。

以上より、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示せた。

3. 引張り試験

ひずみゲージでは計測不可能な、鋼部材の不連続部における応力集中、ひずみ変化の計測をESPIにより行った。このことにより、非接触による全視野計測の有用性を調べるとともに、ESPIによる破壊進行予測が可能であることを実証する。

3.1 切欠きを有する板の引張り試験

表-1に示す材料定数のアルミ板により、図-11に示すような切欠きを有する試験片を製作し引張り試験を行った。なお、計測範囲は寸法図の斜線部分である。切欠き部は計測面に対して裏側に有しており、ESPIによる各ひずみ・応力分布を時系列計算することにより、ひずみ・応力集中から不可視の異常を検知し、弾性域における欠陥検知への可能性を検討した。

試験前後の写真を図-12、図-13に示す。試験片の写真と破断図を比較すると、破断は切欠きに沿っていることは自明である。一軸引張り試験により得られた、切欠きの右端部分のひずみに着目した荷重-ひずみ曲線を図-14に示す。また、試験片全体の最大主ひずみ、最小主ひずみ、せん断ひずみ、最大主応力それぞれの分布の推移を図-15～18に示す。

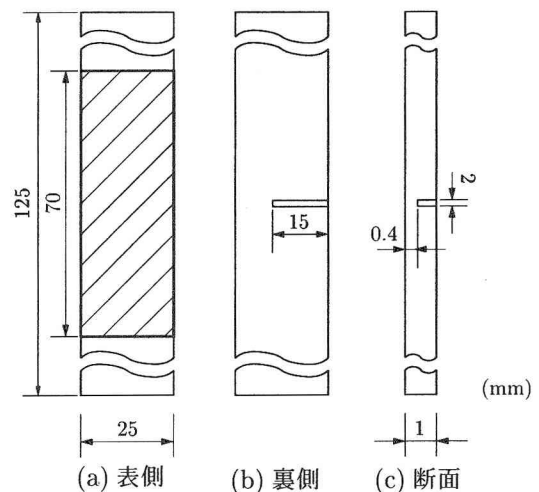


図-11: 試験片寸法

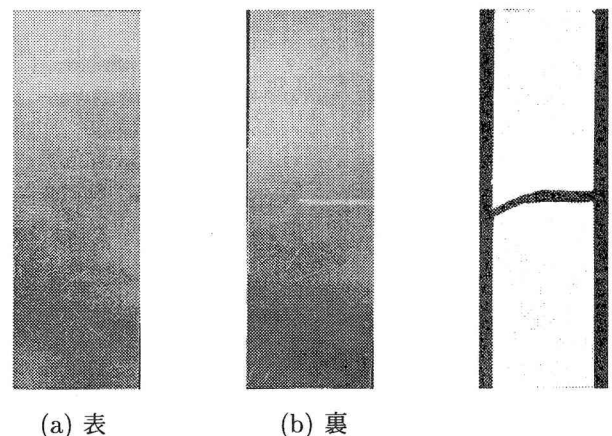


図-12: 試験前

図-13: 試験後

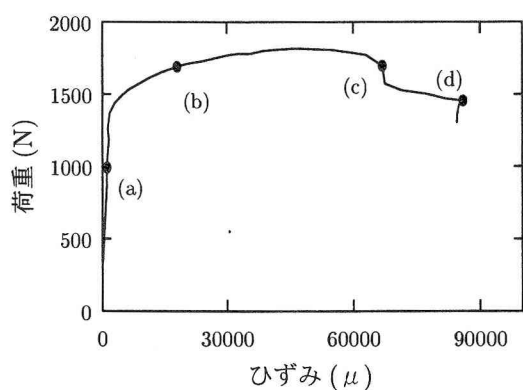


図-14: 荷重 - ひずみ曲線

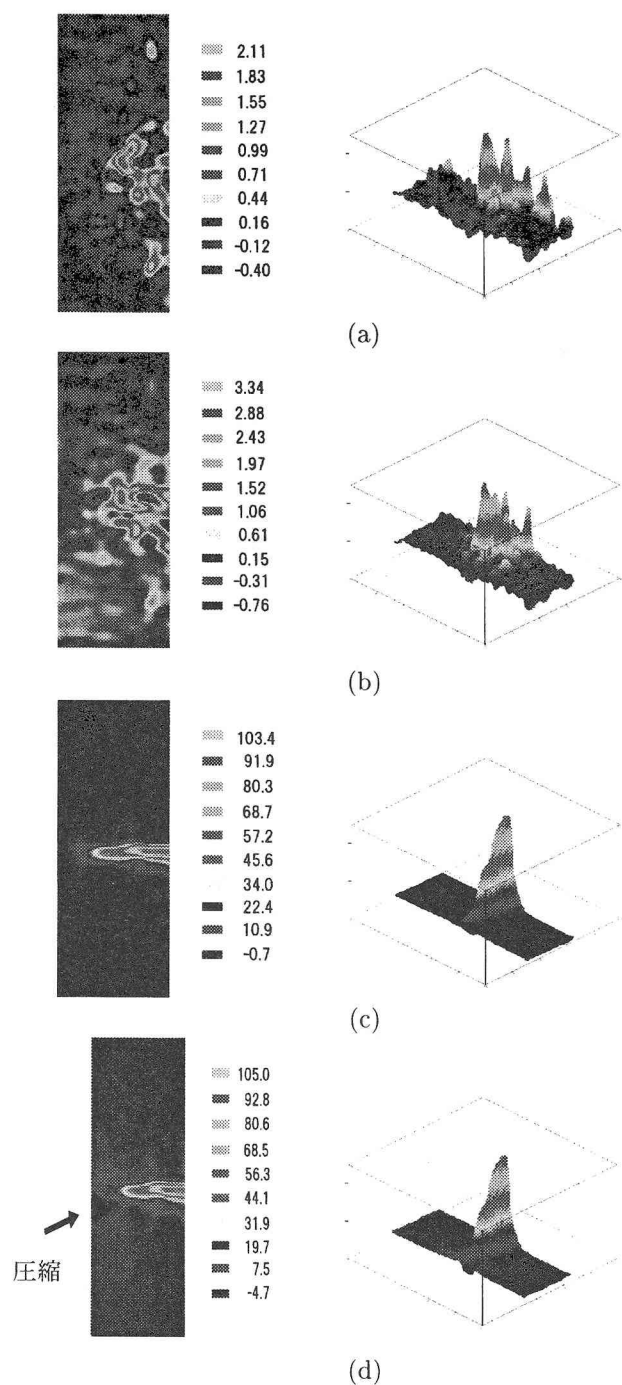


図-15: 最大主ひずみ分布の推移 ($\times 0.001$)

グラフ上の弾性域と思われる(a)点において、図-15(a)のように試験片の中央、右側部分に斑点状にひずみの集中が現れ始める。これは、ひずみゲージでの計測のように対象箇所が特定できなくても、全視野計測を用いれば欠陥検知が可能であることを示唆するものである。従って、荷重の小さい範囲でひずみが局所化する箇所が観察されるので欠陥検知に有効であると考えられる。また、初期荷重時から欠陥検知を行うことが十分可能であった。

さらに荷重を増加させると、図-15(c)のように切欠き部分の集中が明瞭となっていった。破断直前になると、切欠き部では引張りの集中が見られるが、切欠きから左下に圧縮の集中が確認できるようになる。これは、試験片が引張りから曲げ破壊へと変化したことが原因と推察される。

試験後の写真より、き裂は切欠き先端から圧縮ひずみの集中が見られた左斜め下へと伸展している。以上より、分布の変化から ESPI の破断予測の可能性を示すことができた。

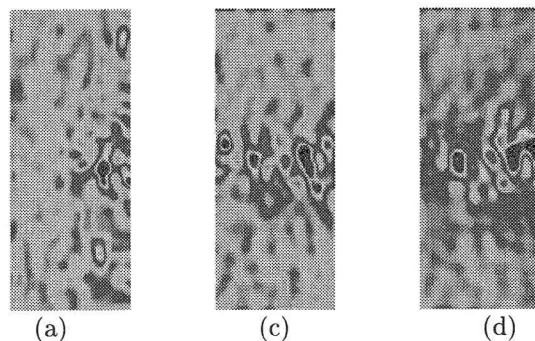


図-16: 最小主ひずみ分布の推移

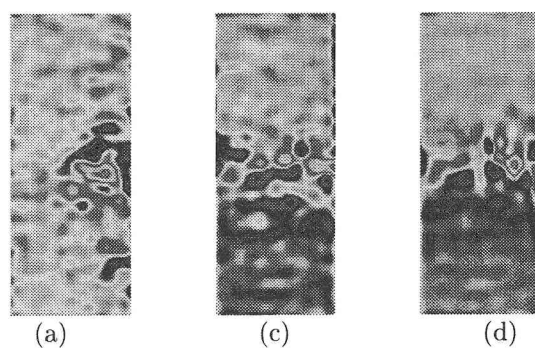


図-17: せん断ひずみ分布の推移

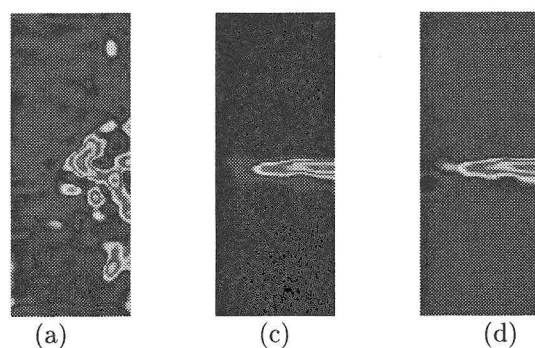


図-18: 最大主応力分布の推移

3.2 千鳥配置された孔

(1) Cochrane-Smith の慣用式

ボルトやリベットで部材を接合する場合、部材に孔をあけなければならない。孔の存在により、例えば1個の孔がある板に様な応力が働いているような場合でも応力が乱される。孔がある材料を引張ると、孔の周辺には応力集中により多軸状態にあり、部材の自由な変形が妨げられるため、静的強度は純断面積をとって考えたものより割増しとなって現われる。道路橋示方書ではこういった現象を無視して純断面積をとって考えている⁶⁾。

複数個の孔がある場合には、孔がある程度以上離れていると、互いに及ぼし合う影響は小さくなる。

図-19に示すように孔が千鳥状にある場合については、静的強度、疲労強度ともに1断面上にある場合より複雑な様相を示すが、実用的にはCochrane-Smithの慣用式(4)が用いられている^{6)~8)}。式(4)の第3項は、第2項の影響は放物線形に減少するとしたものである⁶⁾。

以上に鑑み、本節ではボルト孔やリベット孔などの複数の円孔を有する鋼材の引張り試験を行い、ひずみ集中の伸展を観察した。また、純断面積から破断面を予想し、予想破断面と異なる場合においては、分布図によりその原因を推察した。

$$w_n = w - \Sigma d + \Sigma \frac{s^2}{4g} \quad (4)$$

w_n : 純断面積

w : 総断面積

Σd : 経路中のすべての孔の径の和

s : スタッガー (応力方向の孔のずれ)

g : ゲージ長

(2) 試験片概要

今回使用した試験片は孔数・形状を統一し、各試験片ごとに同一の孔の位置を各々変化させたものである。今回は経路を少なくし、最大主ひずみ分布の推移を捉えやすくする目的で、このような形状の試験片を製作した。なお、計測範囲は寸法図の太線で囲まれた範囲である。

この孔の配置の変化によるひずみ・応力分布の変化、ひずみ集中の伸展を考察した。試験片は、切欠きを有する試験同様、表-1に示す材料定数のアルミ板を用い、図-20(a)~22(a)に示すような切り抜いた带状試験片にて試験を行った。ここで、各試験片の違いは、図中の孔Cの鉛直方向における配置の違いである。

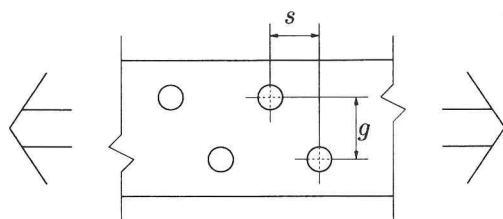


図-19: 千鳥配置

表-2: 断面幅の計算値及び破断面

試験片	断面幅 (mm)			破断面
	A-B	A-C-B	B-C-D	
試験片 I	34	33.5	44.8	A-C-B
試験片 II	34	42.9	42.9	A-B
試験片 III	34	56	44.8	B-C-D

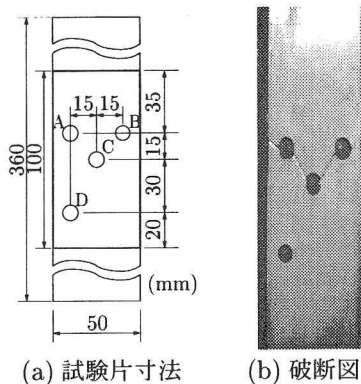


図-20: 試験片 I

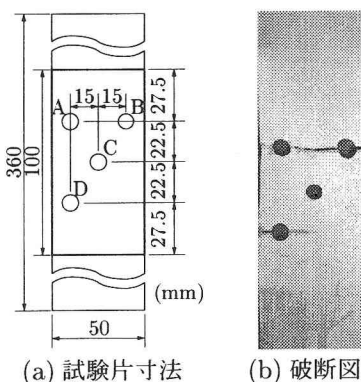


図-21: 試験片 II

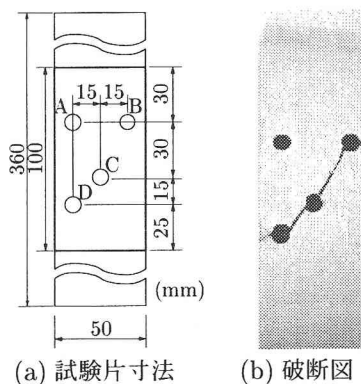


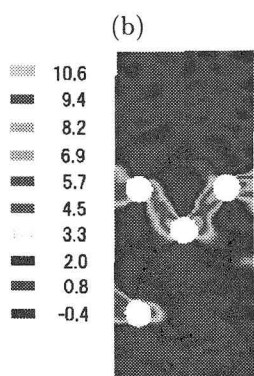
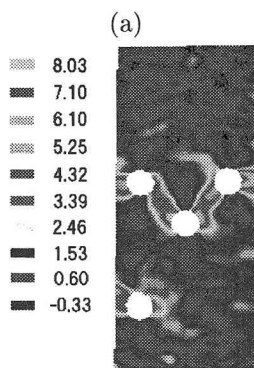
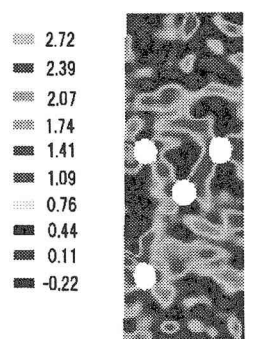
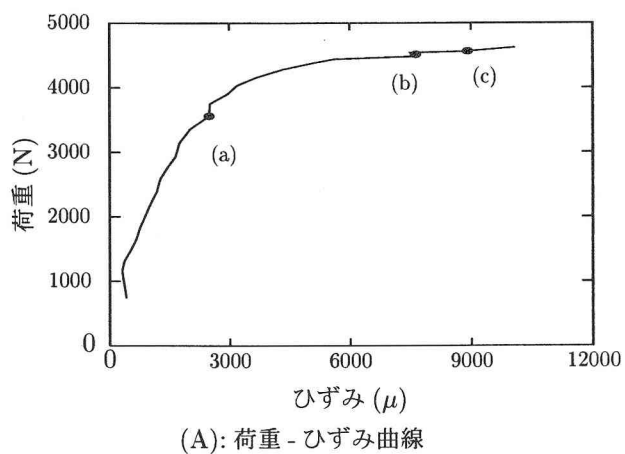
図-22: 試験片 III

(3) 実験結果

Cochrane-Smith 式により各試験片の破断面を予想したものと、実際の破断面とを比較したものを表-2に示す。表中の太字は純幅が最小のものを表しており、この断面で破断すると予想される。

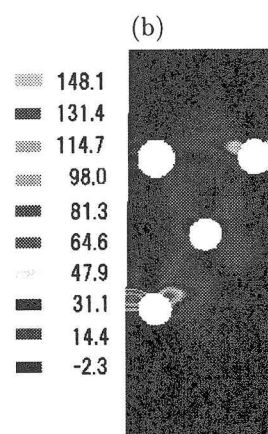
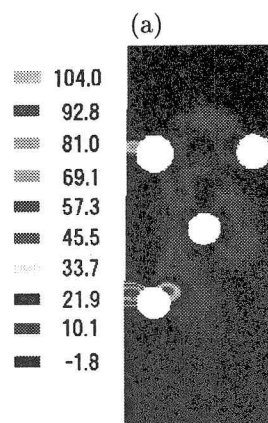
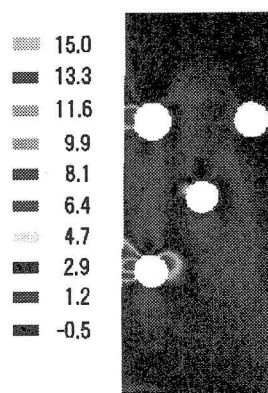
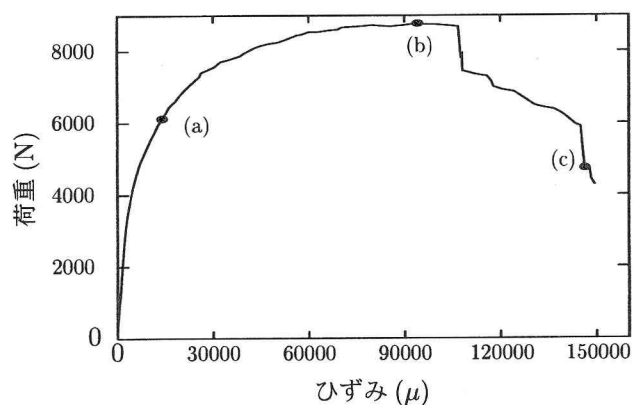
孔の配置の違いにより、予想断面および実破断面に違いが生じていることが確認できた。しかしながら、試験

片Ⅰは予想と実破断面が一致したが、試験片Ⅱでは予想した断面の他に左下の孔にもき裂が生じた。さらに、試験片Ⅲに至っては、予想とは全く異なる破断経路で破断するという結果となった。



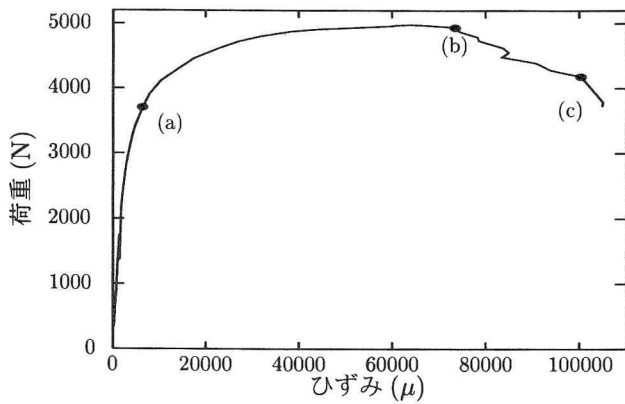
(B): 最大主ひずみ分布 ($\times 0.001$)

図-23: 試験片Ⅰ

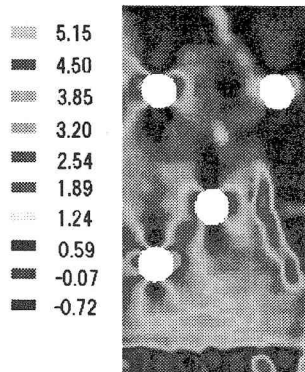


(B): 最大主ひずみ分布 ($\times 0.001$)

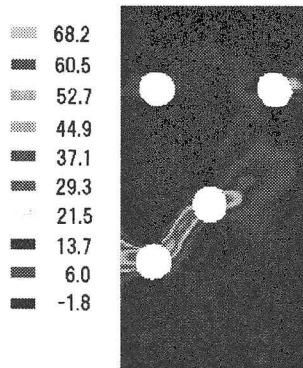
図-24: 試験片Ⅱ



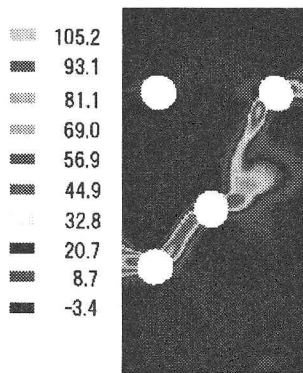
(A): 荷重 - ひずみ曲線



(a)



(b)



(c)

(B): 最大主ひずみ分布 ($\times 0.001$)

図-25: 試験片 III

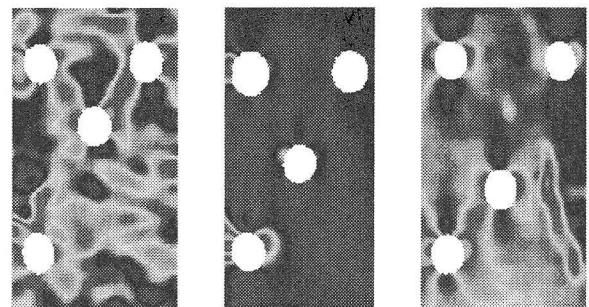
図-23 ~ 25 に試験片ごとの (A) 荷重 - ひずみ曲線, および (B) 最大主ひずみ分布図を示す. なお, ひずみ値の着目点は破断直前の主ひずみが最大となる点である.

試験片 I の弾性域において, 最大主ひずみ分布は全体的に疎ではあるが, 経路 A-C-B に集中が存在していることが確認でき, 破断が経路 A-C-B において生じると予測できる. さらに塑性域に入ると, 経路 A-C-B に沿ってひずみの集中が明瞭となり, 破断経路が特定可能となる.

試験片 II では, 予想した A-B 断面とは別の孔において, き裂の発生を確認できた. 弾性域の分布では, ひずみが左下の孔 D の縁端側に高く集中しているのが確認できる. この集中は破断直前まで続き, 孔 D の縁端側にき裂が生じたものと考えられる. 予想破断面であった経路 A-B では, 弾性域において孔 A にひずみの集中が確認できる. しかし, ひずみが増加するにつれて各孔縁端側のひずみの集中が大きくなったため, 経路 A-B に沿った分布を得ることはできなかったと考える.

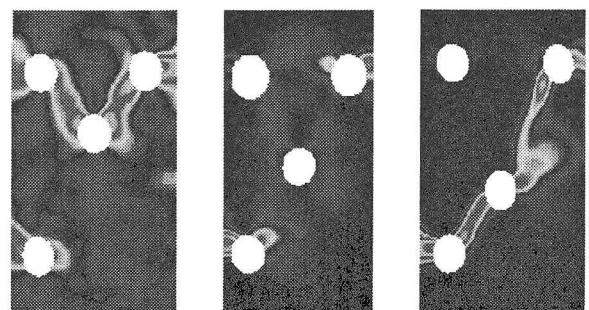
試験片 III では予想断面とは全く異なる破断を生じた. 分布図を見ると, 全体的にひずみの集中が見られるが, 当然のことであるが予想断面の孔 A にも集中が見られた. しかし, 塑性域 (b) に入ると孔 A の縁端側のひずみは小さくなり, 孔 D から孔 C 間のひずみの集中が明瞭となった. また, 孔 B の縁端側にも集中が見られ始め, 最後は, 孔 C に向けたひずみが顕著となり, 実破断に沿ったひずみの分布が得られた.

図-26 に各試験片の弾性域における最大主ひずみ分布, 図-27 ~ 29 に破断前の最大主ひずみ分布, 最大主応力分布, せん断ひずみ分布を示す.



(a) 試験片 I (b) 試験片 II (c) 試験片 III

図-26: 最大主ひずみ分布 (弾性域)



(a) 試験片 I (b) 試験片 II (c) 試験片 III

図-27: 最大主ひずみ分布 (破断前)

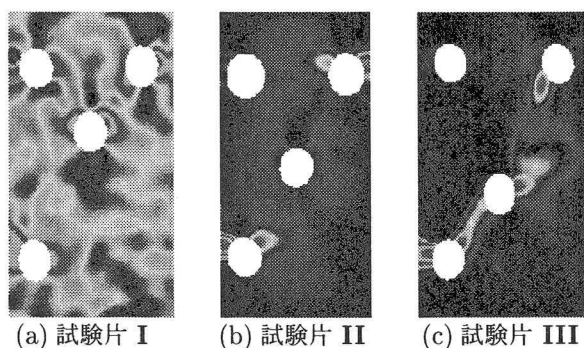


図-28: 最大主応力分布 (破断前)

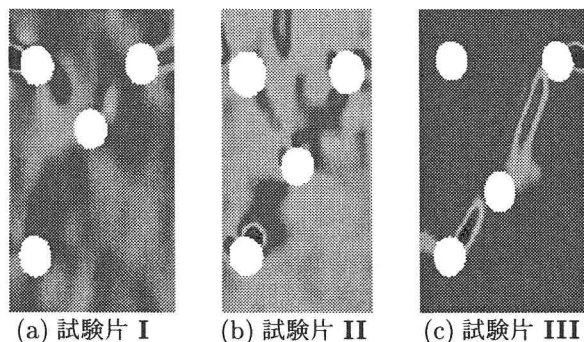


図-29: せん断ひずみ分布 (破断前)

各試験片とも、弾性域において破断面に沿った集中が見られることから、初期段階から破断予測が ESPI によってある程度可能である。また、破断直前においては破断経路に沿った明確な分布を得ることができた。

図-29 のせん断ひずみ分布より、試験片 I, II には見られないが、試験片 III では破断面に沿った集中が現れている。このことから、ESPI の計測で孔の配置の変化による破断形式の変化をとらえることが可能であった。

4. まとめ

今回の検証により得られた知見を以下に示す。

(1) ESPI の適正検証試験

- ひずみ分布図により、試験片に生じているひずみの集中を確認できた。
- ひずみゲージと同等の精度での計測が可能であった。

(2) 切欠きを有するアルミ板

- 試験片裏側の切欠きという不可視の箇所でも、分布図によりその影響を確認することができた。
- 弾性域において、ひずみの集中が切欠き部分付近に斑点状に現われたことから、早期の欠陥検知の可能性を示すことができた。

(3) 孔を有するアルミ板

- き裂の進展状況と比較しながら、き裂発生時に生じるひずみ・応力の分布の変化を捉えることができた。

- 孔の配置次第で、試験片のひずみ・応力状態が変化し、破断に大きく影響した。
- 試験片によっては、最大のひずみの集中が作用する箇所が、必ずしも計算により求めた破断面と一致しないことがわかり、全視野計測での必要性が示された。
- ほとんどの試験片において、破断面は Cochrane-Smith の慣用式によるものと一致したが、試験片 III のように慣用式と異なる場合もあった。

最後に、孔を有するアルミ板において、試験片製作の際に、孔の縁端距離および中心間隔などを考慮していなかった。そのため、慣用式と実験値に違いが生じたと考えられる。今後は孔径、縁端距離、中心間隔を各基準に基くものとし、より実際の設計に近い試験片を製作し実験を行う予定である。また、数値解析などによるアプローチにより、理論的に考察することで、Cochrane-Smith の慣用式の妥当性についても検討する予定である。

5. 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 14350264, 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、福岡県工業技術センター内野正和氏からはスペckル干渉計測法に関して多くの助言を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 西川 和廣: 「橋梁マネジメント」分野における技術展望, 土木構造・材料論文集(九州橋梁・構造工学研究会), 第 19 号, pp.9-14, 2003
- 2) 豊岡了, マジャロバ・ヴィオレッタ, 門野博史: 動的 ESPI の和差法による高精度位相解析, 日本実験力学会講演論文集, pp.271-274, 2002
- 3) 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
- 4) 辻内順平, 黒田和男: 最新光学技術ハンドブック, 朝倉書店
- 5) 高橋賞: フォトメカニクス, 山海堂
- 6) 倉西 茂: 鋼構造(第 4 版), 技報堂出版, 2000
- 7) 伊藤學: 改訂 鋼構造学, コロナ社
- 8) 三木千壽: 鋼構造, 共立出版株式会社

(2004 年 4 月 16 日 受付)