

電子スペックルパターン干渉法を用いた 欠陥を有するアルミニウム合金板の破壊挙動に関する実験的研究

Experimental study on destructive behavior of defective aluminum alloy plates
by electronic speckle pattern interferometry measurement.

松田 浩^{*1}・古屋 瞬^{*2}・安東祐樹^{*3}・森下 喬^{*4}
杉原 泰亮^{*5}・山下 務^{*6}・崎山 毅^{*1}・黄美^{*7}

Hiroshi MATSUDA, Shun FURUYA, Yuki ANDOH, Takashi MORISHITA
Yasuaki SUGIHARA, Tsutomu YAMASHITA, Takeshi SAKIYAMA and Mei HUANG

^{*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}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)

^{*4}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)

^{*5}非会員 長菱リサーチ(株) (〒851-0392 長崎市深堀町 5 丁目 717 番地 1)

^{*6}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)

^{*7}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)

In order to estimate the life time of the structures, it is necessary to observe the deterioration mechanism of the material accurately. Optical measurement technology is surface measurement, but it is possible to measure when, where, and how destruction of the material occurs. In this study, the application possibility to defective inspection of the electronic speckle pattern interferometry (ESPI) measurement which is one of the optical measurement techniques have been examined. Uniaxial tensile test was performed to the defected aluminum alloy plates, and the destructive behavior was precisely observed. Moving features of strain localized bands which propagate over the specimens is precisely investigated.

Key Words: *electronic speckle pattern interferometry (ESPI), defective inspection, uniaxial tensile test, aluminum alloy, strain localized bands*

キーワード: 電子スペックルパターン干渉法, 欠陥検知, 一軸引張試験
アルミニウム合金, すべり帯

1. はじめに

近年の鋼製橋脚隅角部や鋼床版における疲労き裂損傷の顕在化を契機として、効率的・高精度な面的探傷技術の研究開発が望まれている。

鋼溶接構造物の非破壊検査技術は、欠陥の探傷とひずみ測定に大別される¹⁾。探傷技術としては、放射線透過試験、超音波探傷試験の内部欠陥検出法、また、表層部欠陥検出法として浸透探傷試験、磁粉探傷試験、電磁誘導試験などが用いられている。これらの方法はいずれも欠陥が既に発生した後に試験する方法である。一方、ひずみ測定は、疲労や腐食等による既存構造物の経年劣化に対する安全性をモニタリングするために用いられる。

現在、ひずみ測定法には多くの方法があるが、その中で最も広く使用されているのはひずみゲージ法である。

ひずみゲージ法は、高精度で簡便にひずみ計測が可能である。しかし、ひずみゲージ法で得られるひずみ値は、貼付したゲージ長の平均長のひずみ値であり、また貼付した一点のみの定点計測値である。そのため、き裂や応力集中などの対象物の欠陥を検知するためには、多くのひずみゲージを貼付する必要がある。さらには、電気抵抗式ひずみゲージ自体のセンサーとしての耐久性が長期間にわたるモニタリングには課題が残るとともに、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もある。

そのため非接触によるひずみ測定法として、モアレ法、ホログラフィ法、スペックル法、コースティック法、デジタル画像相関法などの光学的計測法の研究開発が鋭意進められている。光学的計測技術は、構造物の表面計測を基本とするものであるが、構造部材を構成する材料

の破壊が、いつ、どこに、どのように、生じるかを、非接触で全視野計測することができる。材料の劣化を診断し、余寿命を予測するためには、材料の劣化メカニズムを面的に精確に把握し、材料が劣化に至るまでの状態をリアルタイムに計測する必要がある。その先に、効果的な補修・補強等の維持管理法があるものとする。

筆者らはレーザーホログラフィ干渉法による欠陥を有する曲面板の振動モード測定を行い、欠陥検知の可能性を示した²⁾。しかし、ホログラフィ干渉計測は暗室で行われ、屋外での計測には適さない。建設構造物は現場で施工・検査・補修を行わなければならないことから、実験室的な計測が可能な機械工学分野に比べるとはるかに計測環境が悪い状態での計測が求められる。

以上に鑑み、本研究では光学的計測手法の一つである電子スペックルパターン干渉計測法(Electronic Speckle Pattern Interferometry: 以後 ESPI)に注目して、ロバストな計測がどこまで可能か、また、非接触非破壊検査の可能性はあるのかについて検討した。ESPI は、コヒーレントなレーザー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。本法は対象物の粗面でのレーザー光の乱反射によって生じるスペックルパターンの明暗の変化を検出する計測方法であり、レーザー光の波長を基準とした高精度計測が可能で、可視光線下で計測が可能で、さらにはリアルタイム計測が可能などの利点がある。

本論文では、切欠き、孔等を有するアルミニウム合金板からなる試験片を製作し、一軸引張試験を行い、荷重の載荷から破壊に至るまでの挙動過程を ESPI によるスペックル干渉縞の変化に注目してモニタリングし、欠陥の有無による破壊挙動の違いについて検討した。

2. 電子スペックルパターン干渉法

2.1 電子スペックルパターン干渉法の概要

レーザー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せられることによってスペックルパターンが現れるが、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、パターンの明暗が変化し、変形前後のスペックルパターンも周期変化する。これにより、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。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、光波長をものさしにした高精度全視野計測ができる。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、電子スペックルパターン干渉法と呼ばれる^{3)~5)}。

ESPIは、高感度全視野計測が可能な非接触計測法であり、試験片に対する前処理は不要である。さらに、光学系の選択により、面外変形、面内変形計測が可能である。本研究で用いたESPIの光学系(図-1)は2光束法と呼ばれるもので、面内変位計測用である。

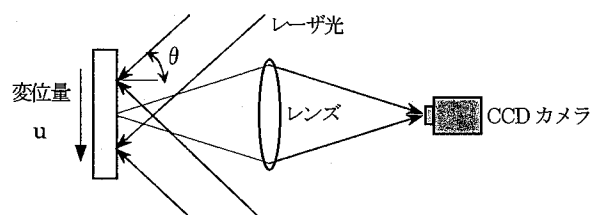


図-1 ESPIの光学系

図-1に示す光学系において、レーザー光の入射角を θ 、波長を λ とする。ここで、対象物表面に変位量 u が生じると、2方向からのレーザーの位相差は変化し、各点におけるスペックルの干渉強度が変化する。このとき対象物の変形前と変形後におけるレーザー光の位相差の増加分を $\Delta\phi$ とすると、式(1)のように表すことができる⁵⁾。

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

ESPIは、光路差の変化により生じるスペックル干渉縞の明暗を利用して一定方向の変位成分の等高線を得ている。変形前後におけるそれぞれのスペックルパターンは、CCDカメラによって取り込まれ電子的に記録される。

対象物に何らかの力が作用し変形前と変形後のレーザー光の位相差に変化が生じると、変形前と変形後では明暗の異なるスペックルパターンが得られるが、図-2、図-3に示すようにスペックルパターン全体は変化していないように見える。対象物表面の各点における光路差の変化量が波長の整数倍ならスペックル干渉縞の明暗は元のまま、変化量が波長の半整数倍の位置ではスペックル干渉縞の明暗は反転している。

スペックルパターンの光の明暗の度合は256階調に分けられており、変形前や変形後の光強度差の絶対値を取って計算した画像を差画像として出力すると、図-4に示すように、明暗に変化のない位置では像は暗く、変化した位置では逆に明るいというスペックル干渉縞が表示される。この干渉縞は、全視野における一定方向の変位分布を光波長を単位とした等高線として表したものである。

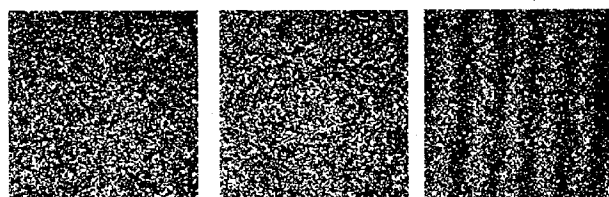


図-2 変形前 図-3 変形後 図-4 干渉縞

スペックル干渉縞はレーザー光の位相差の増分 2π の間隔で形成されており、式(1)の $\Delta\phi$ に 2π を代入することで縞一本の形成に必要とされる変位 u を、式(2)のように表すことができる⁵⁾。

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

ESPIは、対象物の変形が大きくなるとスペックル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、スペックルパターンを撮るごとに、その全てのスペックルを初期化することで微小区間の変位を連続的に検出し、重ね合わせることで大きな変位の測定を可能としている。また、小さな変位で縞が形成される程、高精度の計測が可能であるため、式(2)より $\sin \theta$ が1に近い程、つまり対象物とカメラが可能な限り短い距離での計測が望まれる。この計測方法では計測に指向性を持たせることが可能となる。すなわち、計測対象物の表面のある一点に着目した場合、計測対象が目的方向に変位したときのみ差画像の光強度に変化が現れ、他方向への変位には影響を受けずに計測ができる。

本計測装置およびESPIを用いて変位分布の計測を行う場合、スペック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、レーザ光の散乱を促すために計測対象物の表面形状が粗面である必要がある。コンクリートや木材等を用いて建設された一般的な構造物の表面形状であれば、計測を行うことは十分可能であるが、金属や膜材など凹凸が著しく少なく、滑らかな表面形状の部材を対象として計測を行うことは困難である。この場合、計測対象が表面に対して着色・拭き取り作業を行うことが可能な構造物であるならば、白またはシルバー等のスプレー剤を吹き付け、表面に簡易的な凹凸を形成することで計測を行うことが可能となる。

2.2 ESPI 計測装置の概要

本研究では、電子スペックル干渉計としてETTEMMEYER社製のレーザストレイナアナライザ2D-ESPI(レーザ波長 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$, 入射角 $\theta = 10.235^\circ$)を用いた。

センサーヘッド(図-5)は、ESPIの干渉系を一体化した計測装置である。内部にダイオードレーザ発振装置、ビームスプリッタ、ビームエキスパンダを、また、外部中心にCCDカメラを、4方向にレーザを照射するためのアームを配しており、これによりx軸方向およびy軸方向の変位を、互いの影響を受けることなく計測することが可能となる。また、センサーヘッド内の全てを制御装置によってコントロールし、内部シャッターにより2方向の切り換えを行う。そのシャッターの切り換え時間は約200msであるので、ほぼ同時に同一エリアの計測が可能である。本装置での計測風景を図-6に示す。

本装置の計測レンジは計測対象物との距離に依存し1~20 μm である。本実験では計測距離を360mmに固定して実施しているので、縞1本当たりの間隔は2.2 μm となる。前述したように、ESPIは対象物の変形が大きくなるとスペックル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、大きな変位に対しては、スペックル干渉縞が鮮明に現れる範囲を撮影間隔を短く区切って撮影し、撮影ごとにスペックルを初期化することで微小区間の変位を連続的に検出し、重ね合わせることで大きな変位の測定を実施した。

なお、本計測装置は2D計測であり、3D計測には対応

していない。そのため、面外方向(z軸方向)の変位を起こす計測物の面外変位は計測不可であり、面内変形のノイズとして影響する。しかし、本研究においては、アルミニウムの引張試験を対象としており、面外変形は極めて小さいものと判断し、面内変位だけを計測した。

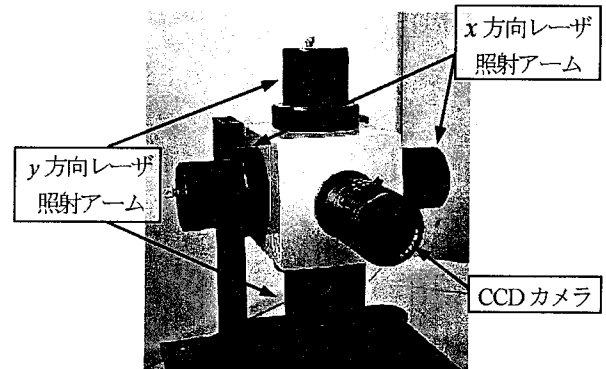


図-5 センサーヘッド

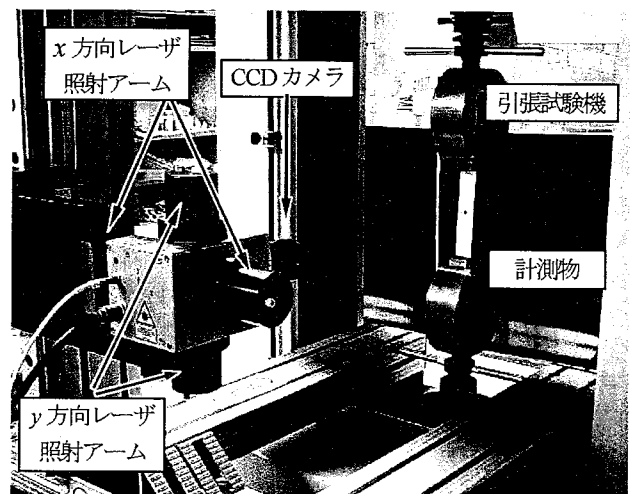


図-6 計測風景

2.3 ESPI 計測の性能照査

(1) ひずみ値の比較

ESPIによるひずみ計測の精度を確認するため、アルミ合金製の試験片での一軸引張試験を行った。ひずみゲージ法による計測結果とESPIによる計測結果を比較し、電子スペックル干渉法によって得られるひずみ値の有用性の検討を行った。試験片には、図-7に示す寸法のアルミ合金製の試験片A(厚さ2mm)を用い、一軸引張試験を行った。試験片Aの材料定数を表-1に示す。

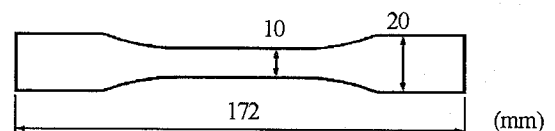


図-7 一軸引張試験片 A

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

得られた試験結果を図-8に示す。結果より、弾性域においては、ESPIはひずみゲージ法とほぼ同等のひずみ値が得られた。塑性域においては、一部ひずみ値が大きく異なる部分があるが、これは計測中に試験片の塑性状況の検討を行なった際、ひずみゲージとESPIのひずみ値を読み取るのに若干の時間差が生じたためと考えられる。この点を考慮して比較すると、双方のひずみ値がよく一致していることから、本計測装置およびESPIを用いて得られるひずみ値は、ひずみゲージによるひずみ値と同程度の信頼性があることが確認できた。

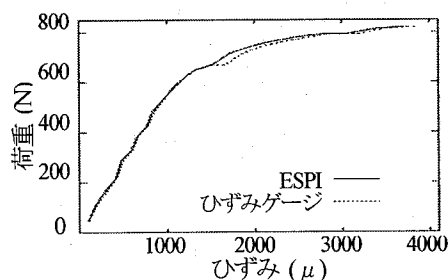


図-8 荷重-ひずみ曲線

(2) ひずみ分布の検討

ESPI によって得られるひずみ分布の信頼性を確認するために、FEM 解析により得られる変位・ひずみ分布と比較し、有効性の検討を行った。簡便に変形を与えることが可能な試験片 B を使用し計測を行った。試験片 B の寸法形状を図-9 に示す。材料係数は試験片 A と同様である。試験片 B の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片に変位を与え切欠きを開閉することが可能である。

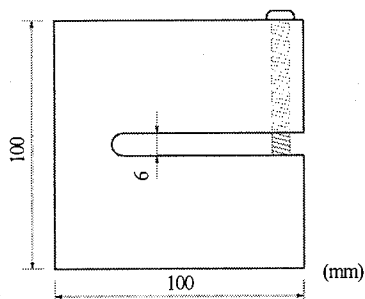


図-9 試験片 B

ESPI と FEM 解析による y 方向変位分布を図-9 に、最大主ひずみ分布を図-10 に示す。外縁部付近のひずみ分布に異なる部分が見られる。この原因として、本計測において計測領域の境界線を決定する際に、試験片以外の部分を含むことによって計測結果に誤差が発生する可能性があるため、試験片端部よりも内側に境界線を引いたことが挙げられる。

ESPI による分布図と FEM 解析による分布図は全体的にほぼ近似していると言え、ESPI による変位、ひずみ分布図の信頼性が確認された。

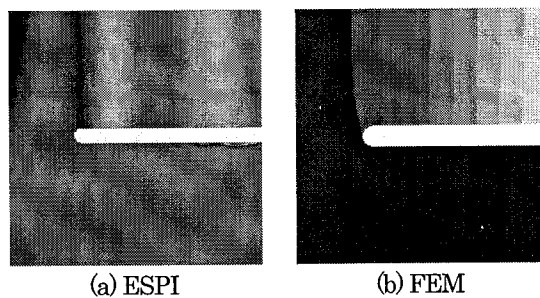


図-9 y 方向変位分布

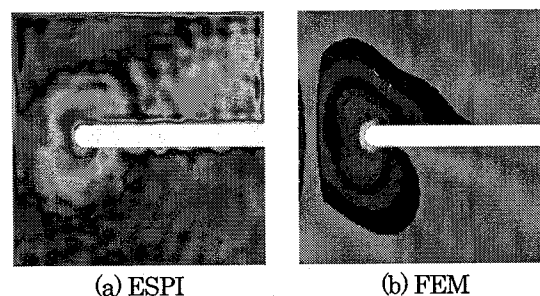


図-10 最大主ひずみ分布

3. ESPI を用いた欠陥検知

不可視の欠陥を検知することを目的に、下記の種類の試験片を作製した。

- ・試験片 C: 欠陥の無いアルミ板
- ・試験片 D: 不可視の切欠きを有するアルミ板
- ・試験片 E: 不可視の孔を有するアルミ板

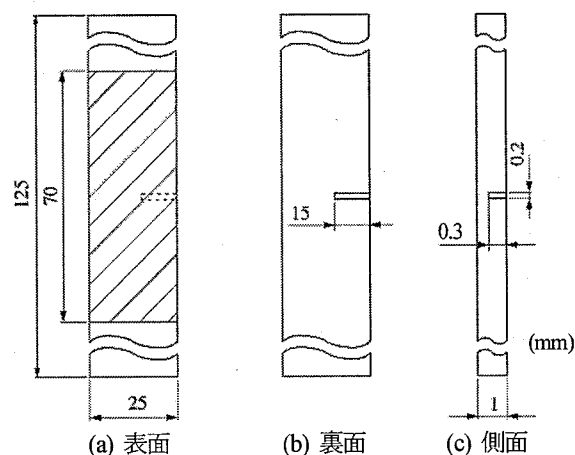


図-11 試験片 D の寸法形状

3.1 切欠きを有する板の引張試験

表-1 に示す材料定数のアルミ合金板により、図-11 に示すような切欠きを有する試験片 D を製作し引張試験を行った。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・応力分布より不可視の異常を検知し、同時に载荷開始から終局状態までのスペックル干渉縞の様子の観察をする。双方の関連性を見出し、弾性域における欠陥検知への適用を検討する。

一軸引張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-12 に示す。また、試験片全体の最大主ひずみ分布の推移を図-13 に示す。図-14 の(1)~(9)は、図-12 に示すように弾性域から塑性域におけるスペckル干渉縞の変化を示したものである。

また、本研究では、試験片Dと同寸法で欠陥を有さない試験片Cの引張試験も行い、切欠きの有無がスペckル干渉縞等を与える影響を観察した。y方向変位分布による比較を図-15に、干渉縞による比較を図-16に示す。

切欠きが無い試験片の場合、図-15に示すようにy方向の変位分布は横縞である。y方向の変位量のもととなるスペckル干渉縞を現す図-16から明らかなように、横縞が観察できないということは欠陥が生じていると考えられる。

最大主ひずみの分布において、図-13に示すように、弾性域から(a)のように切欠き部分に集中が現れはじめ、塑性域に達した(b), (c)点では、切欠き部分に顕著に現れてくる。

スペckル干渉縞においては、弾性域において図-14 の(1)に見られる様に、試験片の中央右側部のスペckル干渉縞が薄くなっているのがわかる。これは試験片全体の変位量とこの部分の変位量が異なるためであり、欠陥が存在していることを示している。弾性限付近の(4)ではスペckル干渉縞が切欠きを境に向きを変えており、その後荷重が上がるにつれて、切欠きを中心に放射状に伸びていることが分かる。

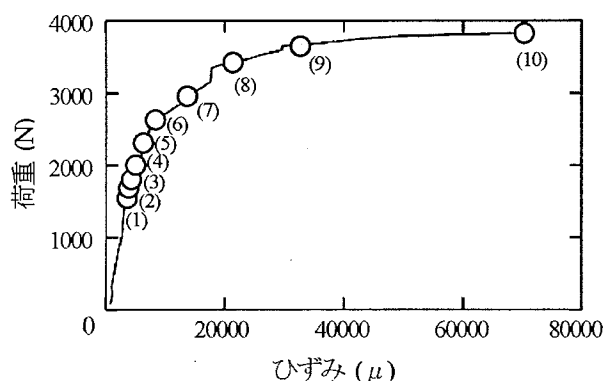


図-12 荷重-ひずみ曲線

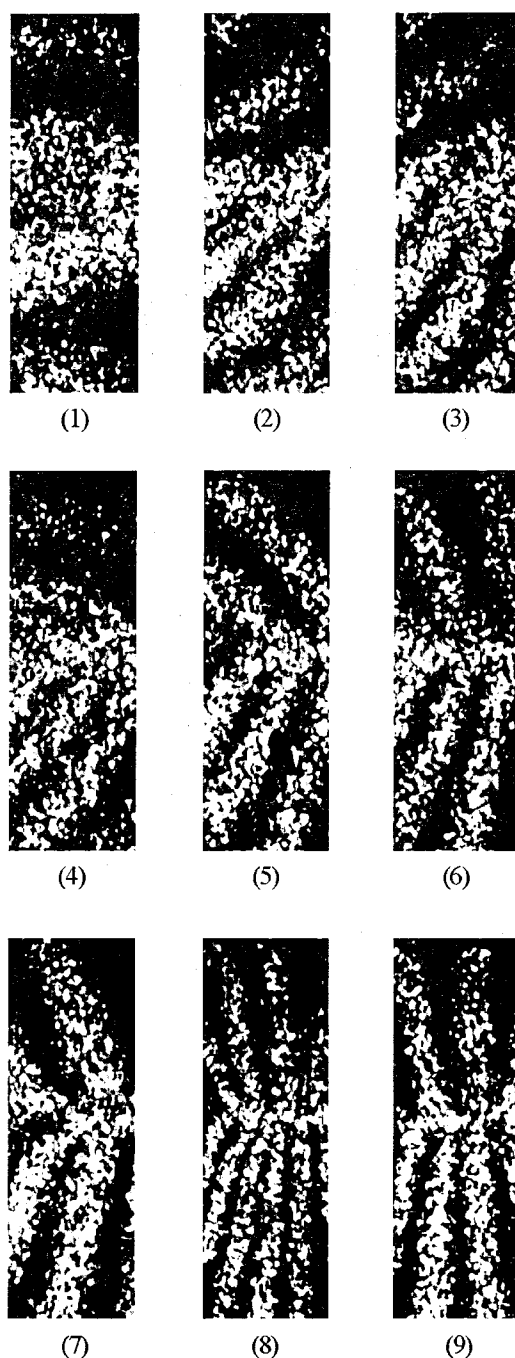


図-14 干渉縞

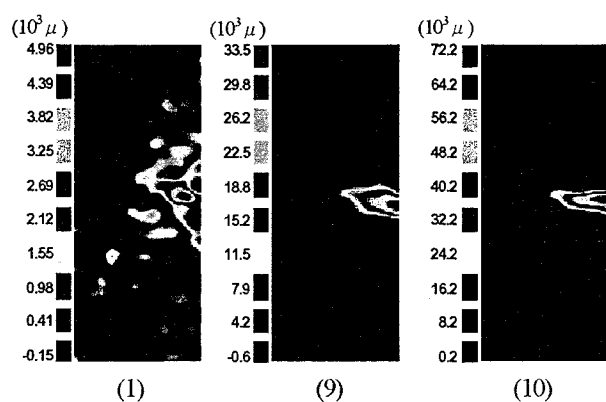


図-13 最大主ひずみ分布

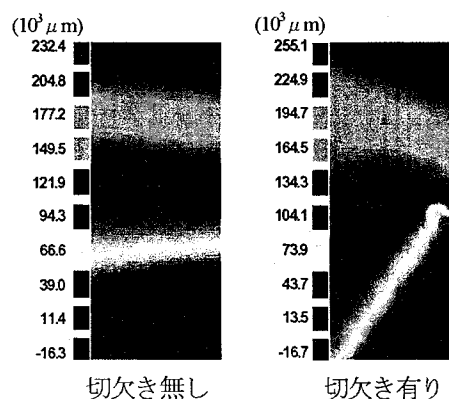


図-15 y 方向変位分布による比較

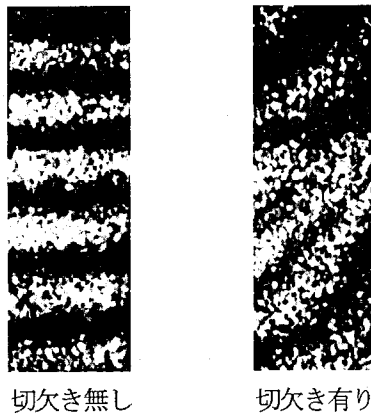


図-16 干渉縞による比較

3.2 アルミニウムのすべり帯の計測

一般的なアルミニウムの塑性変形において、微視的には特定の格子面(すべり面)に沿う特定の方向(すべり方向)への変形が生じる。すべり変形の結果、結晶表面にすべり線(slip line)またはすべり帯(slip band)と呼ばれるステップが生じる。

焼きなました多結晶体の降伏挙動は、均一変形による降伏と不均一変形による降伏に分けられる。図-17はそれぞれの場合の応力-ひずみ曲線の例を示す。均一変形の場合でも、すべりやすい結晶方位の結晶粒からすべりが発生し、応力上昇とともに次第にそれが試料全面に及ぶことによって巨視的な降伏に達する。

不均一変形による降伏の場合には、降伏点降下現象(yield drop)を有する図-17(b)のような応力-ひずみ曲線が得られる。上降伏点で、試験片の一部で集中してすべり帯が発生し、それが成長して断面積を覆ったところで下降伏点に達し、その後、変形帯は長さ方向に徐々に伝ばする。このような伝ばする変形帯をリュウダース帯(Lüders-band)とよび、リュウダース帯の伝ばによる変形をリュウダース変形という⁶⁾。リュウダース変形を図-18に模擬的に示す。

面心立方格子構造(FCC: face-centered cubic lattice)の金属に分類されるアルミニウムや銅のような金属は一般に図-17(a)型の降伏を示し、多結晶体でははじめから多重すべりが生じるので、単結晶のような3段階硬化は生じない。しかし、アルミニウムの場合、金属単結晶の降伏応力は共通してきわめて小さいため、塑性域に入るとすべり帯が連続して現れ、荷重-ひずみ曲線にギザギザが生じる。

本研究では、ESPIを用いてアルミニウムにおけるすべり帯の計測を行い、欠陥の有無によるすべり帯の変化についての計測も行った。

表-1に示す材料定数のアルミ合金板により、図-19に示すような孔を有する試験片Eを製作し引張試験を行った。計測範囲は寸法図の斜線部分である。3.1節の試験片Eと同様に、孔部は計測面に対して裏側に有している。

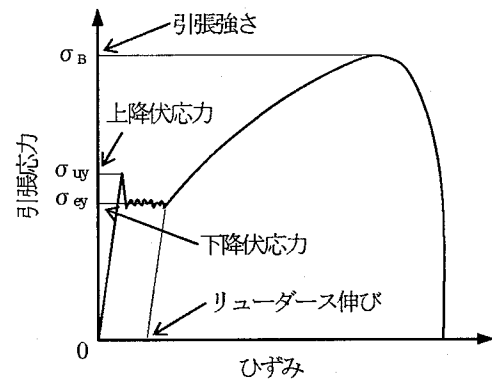
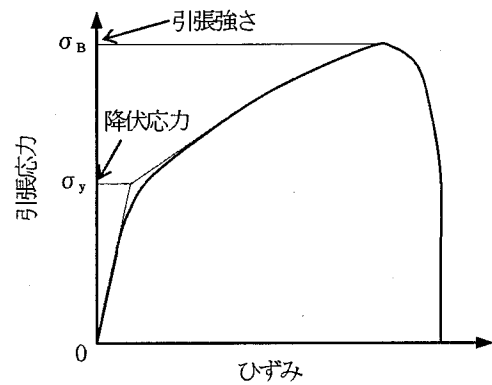


図-17 応力-ひずみ曲線

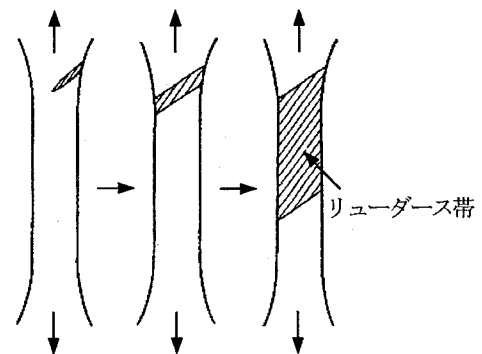


図-18 リュウダース帯の伝ば

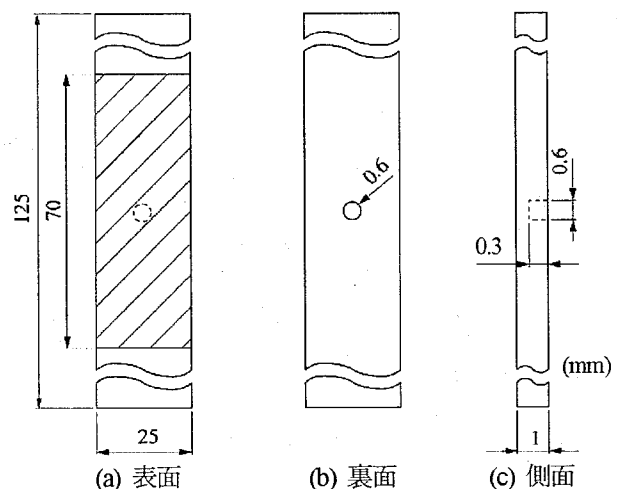


図-19 試験片Eの寸法形状

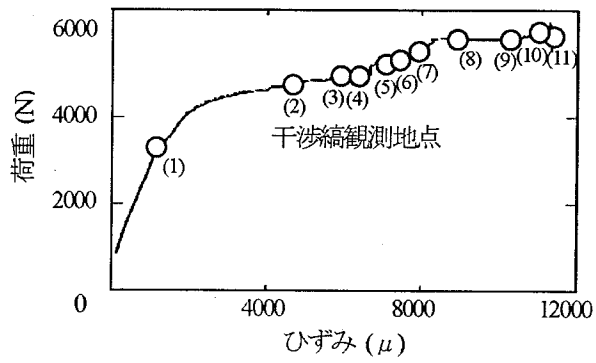


図-20 荷重-ひずみ曲線(試験片B)

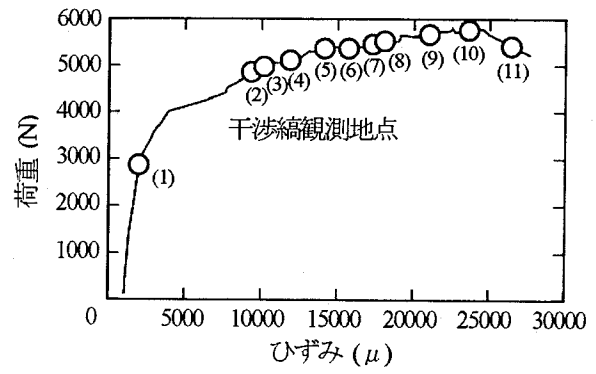


図-22 荷重-ひずみ曲線(試験片E)

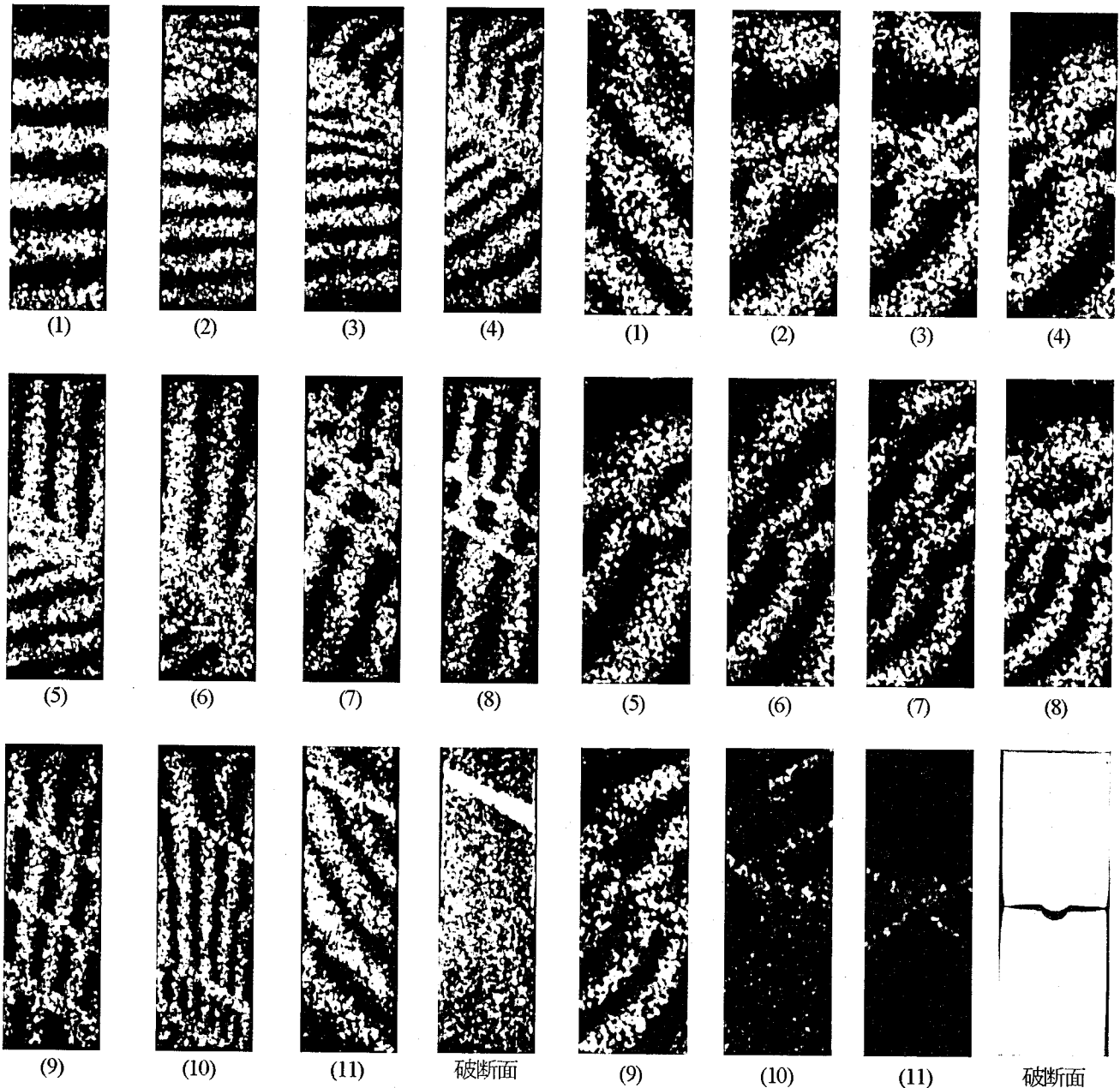


図-21 スペックル干渉縞(試験片B)

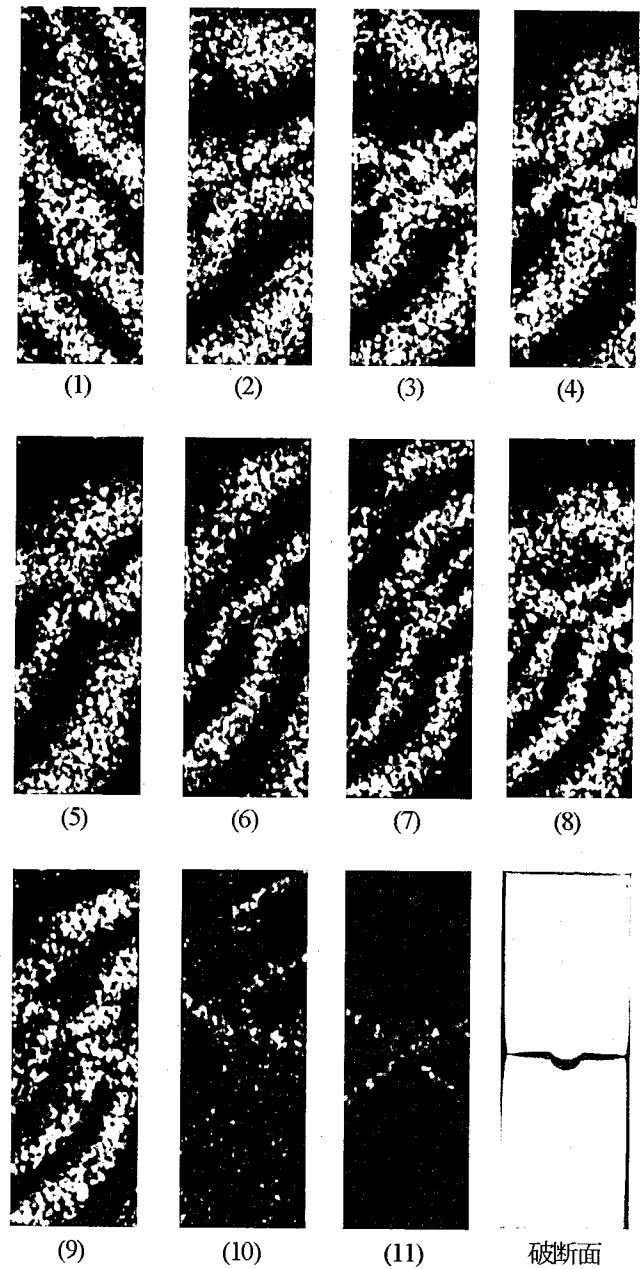


図-23 スペックル干渉縞(試験片E)

まず、欠陥が無い試験片Bの試験結果から示す。図-20に試験片中心位置のひずみを用いた荷重-ひずみ曲線を示す。図-21には塑性変形中のスペックル干渉縞の変化を示す。なお、このスペックル干渉縞中の白い帯が先ほど述べたすべり帯である。

次に孔を有する試験片Eの試験結果を示す。図-22に試験片中心位置のひずみを用いた荷重-ひずみ曲線を示す。図-23には塑性変形中のスペックル干渉縞の変化を示す。

アルミニウムの単結晶の弾性限はきわめて低く、外力によって容易に塑性変形を起こし、肉眼でも見えるようなすべり帯が現れる。ESPIでは計測レンジが $1\sim 20\mu\text{m}$ であるため、すべり帯を白状の帯として計測が可能となる。

欠陥が無い試験片Cにおいて弾性限を過ぎると、図-21の(1)~(5)に示すように上部にすべり帯が生じ、下部方向に推移する。試験片全体ですべり帯が生じた後、すべり帯が2~4本程度単独に生じる。すべり帯はすべて同じ方向に生じており、破断直前になると破断箇所のみが生じる。

それに対し、不可視の欠陥を模擬した孔を有する試験片Dにおいては、常に試験片中央の切欠き部にすべり帯が生じ、他の場所ですべり帯が2, 3本生じる。試験片D(欠陥有)におけるすべり帯は切欠き部のみ他とは異なったすべり方向であり、試験片B(欠陥無)のように一般的なすべり方向ではない。破断直前になると、図-23(11)のように切欠き部を中心にすべり帯が交差する現象を捉えた。

このように、ESPIを用いることで鋼材のすべり帯を計測することができ、孔の有無によるすべり帯の変状を捉えることができた。

3.3 考察および今後の課題

以上よりESPIでの欠陥検知の可能性を示せた。

スペックル干渉縞は、変位やひずみ分布図と異なり、計算過程を省略して、直接モニター上に表示することができる(本装置を用いた場合、1つの試験片の各種分布図を得るために有した計算時間は、平均して1時間程度であった)。

そのため、リアルタイムでの欠陥検知が可能となるので、超音波探傷試験や放射線透過試験などの非破壊検査法と同様な計測が可能となる。

しかしながら、実構造への展開を考える場合、本論文で使用了試験片は、深い切欠きや円孔であり、応力集中係数が大きく、結果として縞模様の変化・変状が観察されやすい状態となっていることも考えられる。実構造に内在する欠陥では、本研究で模擬した欠陥板よりも浅いあるいは応力集中係数が小さい場合がほとんどである。さらには、構造形状に起因する応力集中や溶接に起因する残留応力がある場合の内在欠陥の検知に対しても検討する必要があるものと考えている。このような点に注目して、今後まだ多くの実構造物を対象とした実証実験を行なう必要がある。その際、ESPIのみならず既往の磁粉探傷試験や超音波探傷試験などの非破壊検査法を併用することにより検

討していくことを予定している。

一方、ESPIによる欠陥検知の原理は、特別の非破壊試験のために物体に、機械的、空気力学的、熱的等々の負荷を受けた物体の干渉計測を実現することである。この負荷は内在欠陥によって構造物の表面に一樣でない変形を引き起こし、スペックル干渉縞が特別な模様に変換される。したがって、与えられた材料と環境において、どのような負荷を選ぶかが重要となる。

“1. はじめに”においても述べたように、建設構造物は現場で施工・検査・補修を行わなければならないことから、実験室的な計測が可能な機械工学分野に比べるとはるかに悪い計測環境下での計測が求められる。本研究では、可視光線下でも計測可能な光学的手法の一つであるESPI計測を用いて、レーザホログラフィ干渉計測に比べるとはるかにロバストな計測が可能であることを確認した。しかし、建設現場での計測にはまだまだ実用に供するには検討すべき問題は山積している。しかしながら、超高速カメラや特殊な光波などを用いることにより、振動や光の明暗などの外乱に対して安定して干渉縞を取得できるようになれば、橋梁構造物の活荷重を荷重荷重とする検査手法が確立されるものと考えられる。このような検査技術の開発は、建設構造物の欠陥検知にとってきわめて重要な技術課題と考えられる。

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による欠陥検知

- 試験片裏側の不可視の切欠きでも、弾性域の最大主ひずみ分布図、y方向変位分布図を描画することによって、ひずみ集中を可視化が可能であることがわかった。
- 欠陥はスペックル干渉縞のみでも位置を特定することができることがわかった。そのため、変位やひずみのを算定する計算過程が省略され、非接触かつリアルタイムでのモニタリングの可能性が確認された。
- 欠陥検知の場合には、計測対象物に負荷を与えなければならないため、実構造物に適用するには負荷方法等の検討が必要である。

(2) 欠陥がスペックル干渉縞に及ぼす影響

- 欠陥が無い場合のスペックル干渉縞は、弾性域では横方向に一樣に発生し、それに対応する変位分布も同様であることが確認された。
- 欠陥が有る場合のスペックル干渉縞は、弾性域においても、変形量が大きい欠陥箇所で乱れ、斜め方向に表示される。

(3) ESPIによるすべり帯の計測

- すべり帯は局所的な変形で、その変形量も大きいいため、スペックル干渉縞がその部分で密になり白く表示される。これにより、ESPIですべり帯の可視化が可能であることがわかった。

- ・ 欠陥が無い場合のすべり帯は、弾性限を過ぎると試験片上部に現れ、試験片の下方に移動する。その後、ランダムに2～4本のすべり帯が現れるが、その方向は全て同一方向である。
- ・ 欠陥孔が有る場合のすべり帯は、欠陥が無い場合と同様に2～4本生じるが、欠陥箇所のみ他とは異なったすべり方向で現れる。

あとがき

本研究は平成17年度科学研究費補助金、基盤研究(B)(2)(研究代表者 松田浩、課題番号:17360217)の一部により行われました。また、本研究を遂行するにあたり、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) イラストで学ぶ非破壊試験入門, 日本非破壊検査協会, 2002.
- 2) 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次元計測による薄肉構造部材の非破壊検査法に関する研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.847-854, 2002.
- 3) 辻内順平, 黒田和男: 最新光学技術ハンドブック, 朝倉書店, pp.503-520, 2002.
- 4) 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, 日本実験力学学会講演論文集, pp.271-274, 2002.
- 5) 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研究集会報告, pp.71-75, 2002.
- 6) アルミニウムハンドブック, 軽金属協会, 朝倉書店, 1963.

(2006年4月13日 受付)