

動的 ESPI の和差法による高精度位相解析

Subtraction and addition method for phase analysis of dynamic ESPI

豊岡 了^{1*}, 門野博史¹, マジャロバ・ヴィオレッタ¹, 松田信一^{2, 3}, 齊藤隆行³, 孫 萍³

S.Toyooka, H.Kadono, V.Madjarova, S.Matsuda, T.Saito, and P.Sun

¹埼玉大学大学院理工学研究科 環境制御工学専攻

Department of Environmental Science and Human Engineering, Saitama University

²埼玉大学 地域共同研究センター

Cooperative Research Center, Saitama University

³富士写真光機株式会社

Fuji Photo Optical CO., LTD

Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) has been developed to make possible to observe dynamic feature of deformation in Dynamic ESPI (DESPI). In DESPI for phase analysis, conventional phase shifting method cannot be applied. We have proposed alternative method, subtraction and addition method in which phase variation may be deduced only by sequential speckle data without any additional data. In this paper, DESPI is applied to measure entire process of tensile experiment of an aluminum alloy sample. Propagation of strain localized band was clearly analyzed. Accuracy of phase analysis is estimated to be about $2\pi/10$.

Key words: dynamic ESPI, phase analysis, subtraction and addition method, plastic deformation, strain localized band

1. はじめに

ESPI (電子スペックル干渉法) は, 簡単な光学系と CCD カメラおよびコンピュータからなるシステムで, 粗面の変形を非接触で計測する手段であり, 次のような特徴がある¹⁾.

- (1) 光波長を基準とする高感度全視野計測
- (2) 非接触計測法であり, 試験片に対する前処理は一切不要
- (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.
- (4) 位相解析法により, サブミクロンからナノメートルの高い精度で定量解析が可能である.

筆者らはこの技術を, 塑性変形から破壊にいたる大変形領域での動的測定に対応できるための技術開発を行ってきた²⁻⁹⁾. 動的現象に対応できる ESPI という意味で, ダイナミック ESPI または DESPI と呼ぶこ

とにする. DESPI においては, 一定時間間隔でサンプリングした一連の干渉スペックルパターン列から適当なフレーム間隔で 2 パターンを取り出し, 差を計算し, また位相解析し, これを時系列的に連続して行う. このことにより, 一連の変形の時間差分パターンを連続的にモニター上で観察することができる. サンプリングレートが変形速度に比べて十分大きければ, 変形の時系列変化を連続的な相関縞変化または位相マップの変化をしてアニメーション観察することができる.

感度的に同程度の性能が期待できる技術にモアレ干渉法があるが, この場合は試験片表面に非常に微細な格子模様を刻む必要があり, 塑性変形がある程度進行すると, 格子模様が破損してしまうおそれがある. それに対して, ESPI では初期の微小変形から破壊に至る全過程を観察し計測することができる.

2. 面内変形測定のための ESPI 実験系

従来, ESPI の相関縞の位相解析には, 位相シフト法が用いられてきた. すなわち, 変形前のスペック

*〒338-8570 さいたま市下大久保 2 5 5

電話 : 048-8658-3459 FAX : 048-858

Email : toyooka@mech.saitama-u.ac.jp

ルパターンに対して、3ステップ以上の位相シフト画像を得て、それらの強度分布の式より連立方程式を解いて、個々のスペックルの位相を計算し、変形後のスペックルパターンに対しても同様に位相を計算し、両者の差が変形による位相差であるとする方法である。この方法では、変形前と変形後にそれぞれ複数のスペックルパターンを取得する必要があることから、その間、物体は光波長レベルで厳密に静止していることが要求される。これは、実際の変形解析においては非現実的である。

それに対して、筆者らが試みている和差法においては、時系列的に変化するスペックルパターンのみから、一定時間差における位相変化を求めることができる。その手順を以下に示す。スペックル干渉法においては、物体で反射した光波と参照光波の重ね合わせによって生じる干渉スペックルパターンを記録する。図1は筆者らが **DESPI** による引張試験の観察と解析を行った実験系の概略図である。この光学系は、図における y 方向の変形成分を計測するための配置になっている。試験片 (S) の両端は引張試験機のクロスヘッドに固定され、上側クロスヘッドが一定速度で移動することによる変形を測定する。試験片下側のクロスヘッドの直前には平面鏡 **M3** が試験片と直角に置かれている。レーザ (**L1**) から発した平面鏡 **M1** と **M2** で反射し、顕微鏡対物レンズで拡げられた後、試験片と平面鏡 **M3** を照射する。結果的に試験片は面内で法線に対して対称な2つの光で拡散照明される。その結果、試験片法線の方向に置かれた **CCD** カメラの像面では、2光波の干渉によるスペックルパターンが発生する。試験片の変形に伴って刻々変化していくスペックルパターンは撮像され、コンピュータに保存される。

3. 和差法による位相解析¹⁰⁾

ある時点におけるスペックルパターンの強度を次式のように書くことにする。

$$I_1(x, y) = I_0(x, y)[1 + \gamma \cos\{\theta(x, y) + \varphi_1(x, y)\}] \quad (1)$$

ここで、 $I_0(x, y)$ は平均強度、 γ は可視度、 $\alpha(x, y)$ は粗面で反射した2つの光波の位相差で、空間的に激しく変化するランダムな値をとる。また $\varphi_1(x, y)$ は物体の変形による位相変化を表す項である。次に物体が変形し、いま、位相が $\varphi_1(x, y)$ から $\varphi_2(x, y)$ に変化したとすると、そのときのスペックル強度は次式のように書くことができる。

$$I_2(x, y) = I_0(x, y)[1 + \gamma \cos\{\theta(x, y) + \varphi_2(x, y)\}] \quad (2)$$

両者の差の絶対値をとると次のようになる。

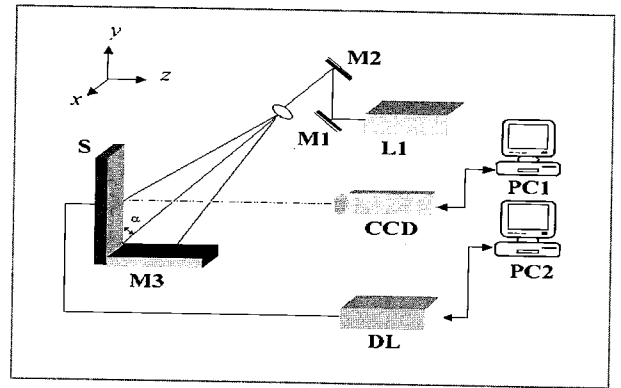


Fig.1 面内変形測定用 ESPI の実験系

$$I_{sub}(x, y) = 2I_0(x, y)\gamma \left| \sin\left(\theta + \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right) \right| \quad (3)$$

これは、通常の **ESPI** における相関縞である。はじめの **sin** の項はランダム位相 θ によって空間的に細かく変化するのに対して、後の **sin** 項は物体の変形による空間的に緩やかな変動成分である。細かいスペックルノイズが第2の **sin** 項によってゆっくり変調され、結果的に変形による等高線縞模様がえられる。

和差法においては、さらに強度和の計算をする。ここで、バイアス強度 I_0 をあらかじめ差し引いておくと、次式のようなになる。

$$\begin{aligned} I_{add}(x, y) &= |I_2 + I_1 - 2I_0| \\ &= 2I_0(x, y)\gamma \left| \cos\left(\theta + \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2}\right) \right| \quad (4) \end{aligned}$$

(3)式と(4)式は対称な形をしており、両者の比の逆正接は

$$\frac{\Delta\varphi(x, y)}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{\langle I_{add}(x, y) \rangle}{\langle I_{sub}(x, y) \rangle} \right) \quad (5)$$

となり、2つのスペックルパターン間の位相変化が求められる。

ここで、 $\langle \rangle$ は後述の平滑化フィルタによるアンサンブル平均の意味である。通常の位相シフト法とは異なり、逆正接の引数の分母分子は絶対値としてしか得られないので、得られる位相値は、0と π の間で主値をとることになる。図2を用いてこれを説明する。図では、0から 4π の間で直線的な位相変化を仮定し、横軸は空間の一つの軸を、縦軸は位相または強度を表すものとする。また、スペックルノイズは考えないものとする。実曲線と点曲線はそれぞれ I_{sub} および I_{add} である。これらのデータから(5)式で計算した位相は0と π の間の値をとる三角波関数になる。このようにして得られたラップされた位相値から変形量を求めるためには、三角波関数の折れ線を引き伸ばすアンラップ処理が必要になる。このためには、三角波関数の折点をさがし、折点をつなぐ峰線を境界

として領域を図に示すように Area-1, 2, 3, 4 のように分割する. π , 2π , 3π における折れ点を見出すことができれば, 折りたたまれた位相 φ' から次式より位相 φ を求めることができる.

$$\varphi = 2\pi [n/2] + (-1)^{n-1} \varphi' \quad (6)$$

ここで, $n=1,2,\dots$, $[]$ は内の整数部のみをとるガウスの記号である. 現実の相関縞は背景としてのスペckルノイズに埋もれており, 三角波のピークを見出すことは必ずしも容易ではない. ノイズ対策として, 実験では, 和画像および差画像にガウス型フィルタをかけ, ノイズを平滑化した. その上で逆正接を計算し, 得られた折りたたみデータに対して (6) 式のアンラッピングを施した. その過程を図 3 に示す.

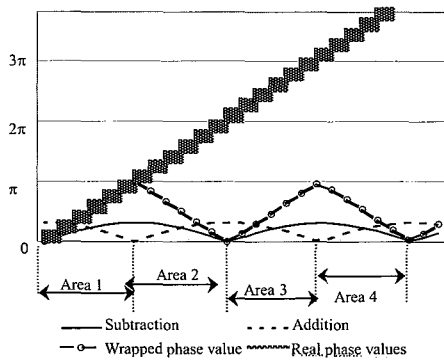


Fig.2 和強度, 差強度および位相

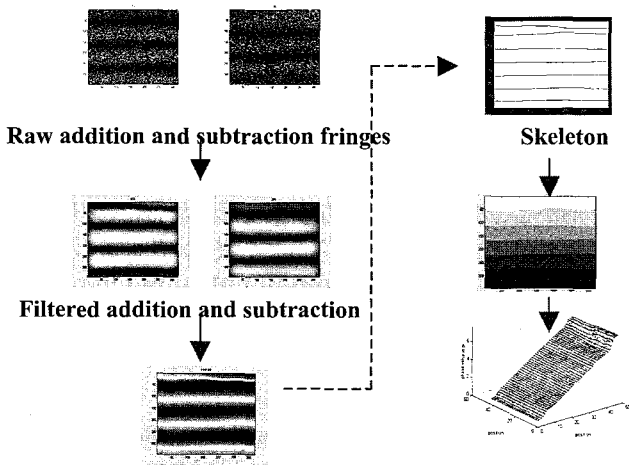


Fig.3 平板の微小回転による ESPI 縞の和差法による解析

これは, 図 1 の光学系において, サンプルの位置に回転平板を置き, わずかに回転する前後で得られたスペckル相関縞の和差法による解析プロセスを示している. 左上の 2 枚の相関縞はそれぞれとおおよび差の相関縞で, (4) 式及び (3) 式の相当する. このままではスペckルノイズに埋もれているので, これをガウス型のローパスフィルタで平滑化した. これらに (5) 式の計算を施し, 三角波型

に折り畳まれた位相図を得た. この位相図において山と谷の線を抽出しこのようにして領域分割を行った後, (6) 式のルールに従って折り畳みを解除し, 最終的な変形分布を得た.

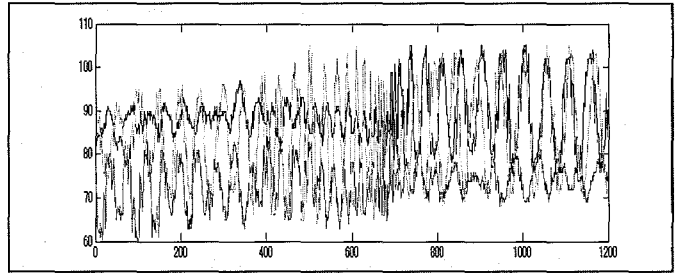


Fig.4 試験片上の 3 点における
スペckル強度の時間変化

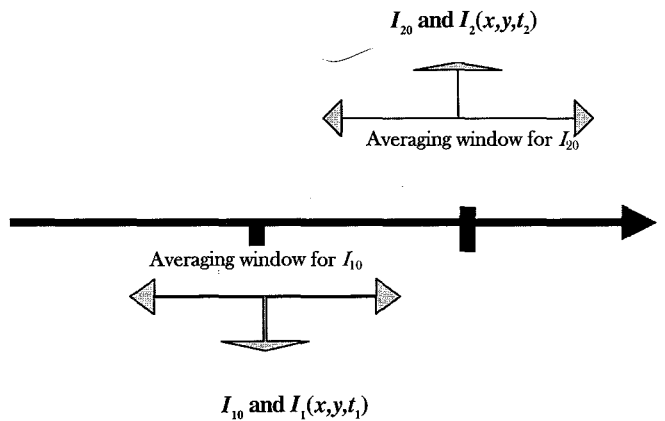


Fig.5 バイアス強度ゆらぎの影響を
抑えるための時間平均法

ここで問題となるのは, バイアス強度 I_0 である. 当初は, 変形実験の開始前に物体を照射する 2 光束の強度を別々に測って, 両者の和を取る方式を採用した. しかし, 引っ張り試験においては, 長時間にわたって DESPI 観察を行わなければならない, その間バイアスが一定である保証はない. 実際に, レーザ光の強度変動, 物体表面の状態変化による反射強度の変動などの影響を無視できないことが明らかになった. 図 4 はアルミニウム合金の引張試験において, 試験片上の 3 点における干渉スペckル信号の時間変化を示している. 3 点でそれぞれ平均強度と変動幅に揺らぎがあることがわかる. 変動の周波数が中央付近で不連続的に高くなっているが, これは PLC 効果による局在ひずみ帯が通過した時点に対応している. 平均強度に注目しただけでも, 大きく変動していることがわかる. このような信号変化に対して, 一定の強度バイアス値で位相を計算することには無理がある. そこで, 次なる対策として, 図 5 に示すように, 2 つの時点 t_1 と t_2 における強度値, (1) 式および (2) 式において, それぞれの時点の前後に時間窓をもおけ, その間の平均

値を計算し、それをこれらの式のバイアス強度として採用することとした。この過程を図5に模式的にしめす。右向き矢印は時間の経過を示す。いま、 t_1 と t_2 でスペックルパターン I_1 と I_2 を撮像し、両者の位相差を計算する場合を考える。両時点の前後に Δt の幅の時間窓を設け、その間の平均強度を I_{01} 、 I_{02} とする。それぞれのデータ収集時点には、平均強度 I_0 および $I_i(x,y,t)$ ($i=1,2$)を出力する。このようにして、バイアス強度の変動をほぼ抑えることができた。

4. アルミニウム合金引張試験における変形解析

以上述べた方法で得られた位相解析結果二例を図6と図7示す。これは、アルミニウム合金の引張試験において、PLC帯が走っている状況に対応する時間差分等高線である。いずれも左から和縞、差縞、折り畳まれた位相図である。これらのパターンに対して前節で述べた画像処理を施したうえ折り畳みを解消し、変形に換算し、3次元表示した結果を同図右に示す。図6の結果は、引張試験前半に典型的に現れた縞パターンで、変形が右上がりの狭い帯状の部分に局在し、その上下ではほとんど変形している。局在する変形は約 $1.5\mu\text{m}$ の高さの非常にシャープなステップとなっており、その前後ではほとんどフラットであること、すなわち、変形は帯部以外に集中し、それ以外ではほとんど起こっていないことが示されている。図7は同じ引張り試験において後半部で典

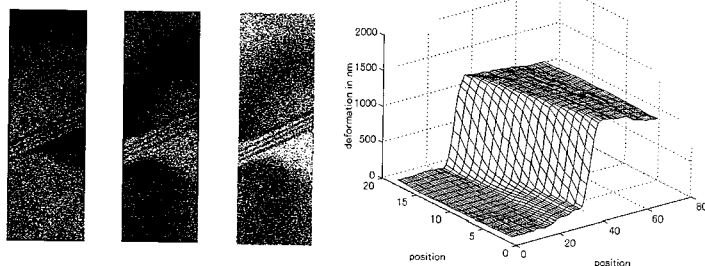


Fig.6 左から和縞、差縞、折り畳まれた位相図および変形の3次元表示

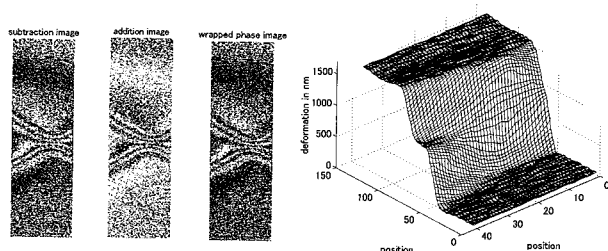


Fig.7 左から和縞、差縞、折り畳まれた位相図および変形の3次元表示

型的に観察された縞パターンの変化で、右上がりのひずみ局在帯が左上がりにスイッチする瞬間を捉えたものである。アニメーションで連続観察すると、このような変化が脈動を伴いながら進展し、局在位置が平均的にほぼ一定の速度で上方または下方に移動していくことがわかった。アルミニウム合金の引張試験におけるひずみ局在帯の伝播はPLC効果として知られていたが、伝播機構の詳細が実験的に明らかにされたのは、筆者らの実験による観察がはじめてである。

5. まとめ

動的変形をESPIで計測する場合の独自の位相解析法として、和差法を2次元視野で行う方法を試みた。強度バイアスの変動の問題、スペックルノイズの除去、そして位相の折り畳み解除の問題等を克服することによって、刻々変化するスペックルパターンの情報のみから位相を解析することができた。解析精度は $2\pi/10$ 程度(約 30nm)と推定される。

従来の位相シフト法による解析においては、データ収集時には現象を光波長レベルで静止状態に保たなければならぬ。それに対して、本研究で提案した和差法によれば、動的現象に対して、刻々変化するスペックル画像のみから位相が求められることである。この方法を用いれば、機械構造物の動的診断や材料評価において、動いているままの状態での計測が可能となり、今後、様々な問題への新しい計測法として適応できることが考えられる。

問題点をあげるとすれば、(5)式の右辺の分母分子の符号が決まらないことで、 0 と π の間でアンビギュエティーが生じてしまい、位相変化が図2に示すように三角波型になることである。その結果として、変形の方向が一意に決まらない。対象としている変形がここで示したような引張変形の場合は、変形の方向はア prioriに知られているので問題はないが、より一般的な変形の場合は問題になるであろう。今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) R. S. Sirohi, "Speckle Methods in Experimental Mechanics", Speckle Metrology, ed. R. S. Sirohi, Marcel Dekker, New York (1993).
- 2) S. Toyooka and X. L. Gong, "Digital speckle pattern interferometry for observing the Entire process of plastic deformation of a solid object", Jpn. J. Appl. Phys., 34, L1666-L1668 (1995).
- 3) S. Yoshida, Suprapedi, Rini Widiastuti, M. Pardede, and A. Kusnovo, "Direct observation of plastic deformation and its application to nondestructive testing", Jpn. J. Appl. Phys., 35, L1854-L857 (1996).
- 4) Suprapedi and S. Toyooka, "Time-division

- observation of plastic deformation process using digital speckle pattern interferometry”, *Optical Review*, 4, 284-287 (1997).
- 5) Suprapedi and S . Toyooka, “Spatio-temporal observation of plastic deformation and fracture by laser speckle interferometry”, *Physical Mesomechanics*, 1, 51-56 (1998).
 - 6) X. L. Gong and S. Toyooka, “Investigation of mechanism of plastic deformation process using digital speckle pattern interferometry”, *Exp. Mech.* , 39, 25-29 (1999).
 - 7) Q. C. Zhang, S. Toyooka, Z. Meng, and Suprapedi, “Investigation of slipband propagation in aluminum alloy with dynamic speckle interferometry”, *Proc. SPIE Vol. 3585*, 389-398, (1999).
 - 8) S. Yoshida, Muchiar, I. Muhamad, Rini Widiastuti, and A. Kusnovo, “Optical Interferometric technique for deformation analysis”, *Optics Express*, 2, 516-530, (1998).
 - 9) S. Toyooka, Rini Widiastuti, Q. C. Zhang, and H. Kato, “Dynamic Observation of Localized Strain Pulsation Generated in the Plastic Deformation Process by Electronic Speckle Pattern Interferometry”, *Jpn. J. Appl. Phys.* , 40, pp. 873-876 (2001).
 - 10) S. Yoshida, Suprapedi, R. Widiastuti, E. T. Triastuti and A. Kusnowo, "Phase Evaluation for Electronic Speckle-pattern Interferometry deformation analyses," *Optics Letters*, 20, pp.755-757, (1995).
 - 11) S. Toyooka, V. Madjarova, Q. C. Zhang, and Suprapedi, “Dynamic Deformation Analysis by ESPI”, *Proc. the 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns* pp.605-612, (2001)