

スペckル干渉計でのモジュレーション変動下の 連続大変形計測*

安達 正明** 高山 稔*** 稲部 勝幸*** 松本 哲也†

Measurement of Large Changing Deformation Phase under Fluctuational Modulation
of Speckle-Light Intensity Changes

Masaaki ADACHI, Minoru TAKAYAMA, Katsuyuki INABE and Tetsuya MATSUMOTO

We propose a new method which can measure large changing deformation phases with a speckle interferometry. In a large object deformation, modulations of light intensity change in speckle interferometry often fluctuate, then the modulations can not be assumed, even-roughly, constant over the deformation. In the proposed changing-phase measurement method, large number of changing speckle images during the deformation are continuously captured. A few-tens continuing frames are extracted from all the captured frames, and modulations are estimated over the extracted frames. The estimated modulations and light intensity changes are used to calculate deformation phases and also the final phases in the extracted frame. These calculating process are repeated over all the captured frames. With this method we can measure deformation more than 200 μ m.

Key words: speckle interferometry, changing deformation phase, continuous measurement, large deformation

1. 結 言

ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) を用いた粗面の変形計測では、スペckル干渉像の光強度が変形前に対してどれくらい変化したかを、電子回路で計算しTV画面に表示した。ミクロンオーダーの変形情報が縞画像として物体像に重ねて出力されるので、画像の総ての点で二次元変形分布を実時間でモニターできた¹⁾。しかし、縞画像は変形の情報を縞の形や縞の密度として定性的に与えるだけであり、変形の向きや変形強度の詳細値は画像から識別できなかった。

これを解決する方法として、スペckル干渉に位相シフト法が導入された²⁾。変形の前と後での干渉画像に関し、位相シフト法を用いてそれぞれの位相値を求め、差を位相変化量として計算することで、変形に関し方向を含む高精度な情報が画像の各点で得られることになった。

しかし位相シフト法では位相測定を行う時、被測定物体が静止している(変形が止まっている)必要がある。そのため熱移動に伴う変形などでは変形が止まるまでに時間がかかり、変形量や変形の時間変化が測定しにくかった。のみならず、変形が止まっても変形に伴う表面の絶対的な移動量は測定しにくい等の問題もあった。位相変化分布から移動量を抽出するには、画面内に得られるとは限らない絶対静止部分を必要とし、さらにその点から測定したい点までが連続して変形量が大きくなるなどの「変形データからの移動量計算に、位相のアンラップ処理を応用できる条件」を満たす必要があったからである。

我々はそこで、変形の時間変化や表面の移動量を測定するために、物体の干渉像を時間的にとぎれることなくコンピュータに取り込み、取り込んだ画像の光強度変化を用いる方法を研究して来た^{3,4)}。そして連続取込みと、スペckル位相のランダム性を利用する統計処理とを用いることで変位の方向や時間変

化を精度良く抽出できることを示した⁵⁾。

この方法は、カメラの各画素で個々に与えられる干渉光強度の最大値と最小値と、さらに変形測定が必要な時点の光強度から、逆余弦計算(アークコサイン)で位相値の候補となる情報をまず求める。そして、局所域内では変形量が一定なることを利用して位相変化量を抽出した⁶⁾。

しかし、スペckル干渉では粗面の変形が大きくなると、スペckル形状の変形や移動が不可避的に発生する。その結果、干渉光強度の最大値と最小値さらにスペckルの位相分布が変形と共に変化する。そして、スペckル干渉像からの変形量の計算値に無視できない誤差を発生させる。この現象は我々が提案してきた方法だけでなく、ESPIで得られる縞画像では縞の可視度低下を生じさせ、変形が進むと縞が判別しにくい状況を作り出す。位相シフト法においても、スペckル変形に依る位相変化が余分に加わるので、測定結果の信号対雑音強度比を次第に悪くさせ、空間フィルタリング処理を必要とさせる。最終的にはフィルタリング処理を介しても変形抽出が難しくなる。

そこで本研究ではスペckル干渉像を連続的にコンピュータに取り込み処理する変形計測法において、スペckル形状の変形や移動に伴って、光強度のモジュレーション(最大値-最小値、広い意味では平均値なども含めて良いと考える)やスペckル位相が大きく変化しても、計測開始からの変形量を高精度に抽出するための方法を調べた。その結果、「変形計測の前後を含めて変形が止まっている必要はなく、変形量が数百 μ mに及んでスペckル形状の変形が発生しても、変形量や表面の移動量の定量的測定が可能となる」方法の開発が行い得た。

この方法は干渉像の連続取込みを行うため大容量のメモリを必要とする。しかし、最近ではコンピュータハードウェアの高性能化と低価格化も進んでおり大容量記録と高速処理が非常に利用し易くなっている。このことは本測定法の今後の展開と応用を著しく容易にすると我々は考えている。

2. 連続大変形計測の原理

研究のスタート台としたのは、コンピュータ内に連続的に取

* 原稿受付 平成14年1月9日
** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)
*** 金沢大学工学部
† 兵庫県工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

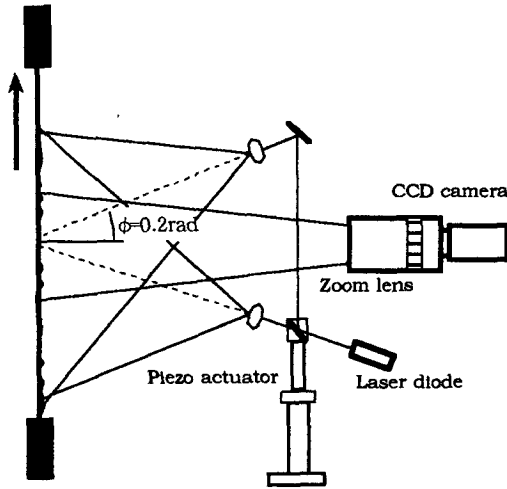


Fig. 1 Optical layout of measuring large changing deformation phase. A tensile tester is set in the left side to pull a aluminium thin plate painted white

り込まれた変形中のスペックル干渉像の時間変化を利用する変形計測法である⁵⁾。この方法はモジュレーションがあまり変化しない範囲の変形計測に適用可能な方法であり、このままでは（モジュレーションが大きく変化する）大変形計測には適用できない。しかし、本研究ではこの変形計測法をスタート台とし、開発した方法は一部をそのまま利用するので、読者の便宜も考えて以下に簡単に取り上げる。

2.1 連続取込みによる変形（位相変化）量計測

スタート台にした位相変化量の計測法は、2つの処理を組み合わせている。1つは連続低速変形下の任意時点での位相を求める方法であり⁴⁾、変形を方向を特定できるように、画像取込み中は参照光路を強制的に短くする操作を含んでいる。もう1つは、このようにして求めた位相を使ってその後の位相変化量を効率的に計算する方法である⁵⁾。なお後者はより速い変形でも、また反対方向の変形を同一画像内に含んでいても、方向を含めて定量的な変形の測定が可能である。

2.1.1 連続低速変形下の任意時点での位相計測

ここで想定している測定光学系を図1に示す。これは後の実験で用いた光学系でもある。右に配置したCCDカメラが撮る物体表面の点は、上のミラーで反射されたレーザー光と、下のビームスプリッターを直進して来たレーザー光を、カメラレンズの方向にそれぞれ反射している。反射点近傍のマイクロな凹凸構造はそれぞれの反射光の強度を決め、両者が互いに干渉して反射点の光強度としてCCDの画素で観察される。物体が上方向へゆっくり引っ張られると、反射光強度を与えている表面のマイクロな凹凸も移動し、上下2つの光路の差が変化する。凹凸の1秒当たりの移動量はレーザー光の波長のオーダーであるので、図1の光学配置のスケールに対しては非常に小さい。故に、レンズを介して捉えているCCDの画素内から急速にはみ出ることではない（後の考察では画素内からゆっくりとはみ出てもここでの計測原理に問題がないことも示す）。このためこの移動は、ある画素の光強度変化として図2のように測定される。

実はこの強度変化は物体表面が上方向に移動しても下方向に移動しても、正弦波形の一部ようになるので、変化の仕方からは変形方向を決められない。干渉光強度は光路差の偶関数であり、強度変化は光の半波長の光路差変化毎に増と減を繰り返すからである。ところで、図2で示した光強度変化の最大値 $I_{max}(r)$ と最小値 $I_{min}(r)$ が分かっていると、下記の式を用いて

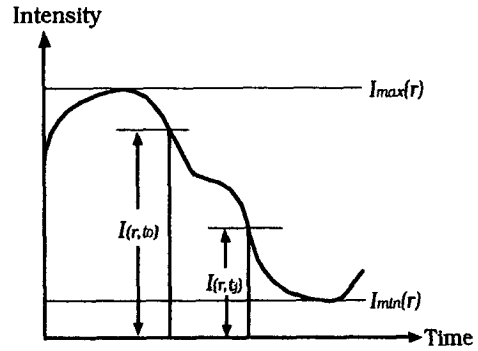


Fig. 2 Light intensity change on a pixel of CCD camera. It is observed under a continuous object deformation

時間 t_0 の光強度 $I(r, t_0)$ からその時の干渉位相 $\psi(r, t_0)$ に関する絶対値を知ることができる。

$$|\psi(r, t_0)| = \cos^{-1} \left[\frac{I(r, t_0) - \{I_{max}(r) + I_{min}(r)\}/2}{\{I_{max}(r) - I_{min}(r)\}/2} \right] \quad (1)$$

さらに、少し時間が経った t_j でも、その時の光強度 $I(r, t_j)$ から位相 $\psi(r, t_j)$ の絶対値が同様に求まる。この2つの時点における正しい位相は実は正負どちらか一方だけである。この間の位相変化量を、「変形では変形量が局所域内の画素では殆ど同じ値になる」ことを利用して統計的に抽出する⁴⁾。しかし、抽出した変形量は絶対値が分かるのみで方向までは決められない。そこで図1のように光路にピエゾ素子を配置し、変形速度が小さくて1画像取込み時間あたり $\pi/4$ 以下の位相変化の時に、上側光路を強制的に1画像取込み時間あたり $\pi/4$ の速度で短くし、変形を含んでも画面の総ての部分で光路差が一方に変化するようにして画像を連続的に取り込む。そして、上の方法で位相変化量 $\Delta\psi(r, t_j - t_0)$ を抽出する。今、この抽出量は画像の総ての部分で符号が同一であるのでこれを正と定義する。この $\Delta\psi(r, t_j - t_0)$ に関し三角関数の加法定理から次式が成立する。

$$\begin{aligned} & \sin\{\psi(r, t_0)\} \sin\{\Delta\psi(r, t_j - t_0)\} \\ &= \cos\{\psi(r, t_0)\} \cos\{\Delta\psi(r, t_j - t_0)\} \\ & \quad - \cos\{\psi(r, t_0) + \Delta\psi(r, t_j - t_0)\} \\ &= \cos\{\psi(r, t_0)\} \cos\{\Delta\psi(r, t_j - t_0)\} - \cos\{\psi(r, t_j)\} \end{aligned} \quad (2)$$

この右辺では、位相変化量の絶対値から $\Delta\psi(r, t_j - t_0)$ が分かっており、さらに干渉光強度から $\cos\{\psi(r, t_0)\}$ や $\cos\{\psi(r, t_j)\}$ も分かっている。故に左辺が計算できる。これと、 $\Delta\psi(r, t_j - t_0)$ や $\cos\{\psi(r, t_0)\}$ も用いると、次式から位相 $\psi(r, t_0)$ が求まる（符号は強制変化の方向が正）。

$$\begin{aligned} \psi(r, t_0) = & \arg \left[\cos\{\psi(r, t_0)\} \sin\{\Delta\psi(r, t_j - t_0)\} \right. \\ & \left. + i \sin\{\psi(r, t_0)\} \sin\{\Delta\psi(r, t_j - t_0)\} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

この値は $\Delta\psi(r, t_j - t_0)$ が位相の絶対値から正しく評価されることを前提としており、 $0 < \Delta\psi < \pi$ の総ての時点での位相変化に応用できる。故に、式(3)の右辺の角括弧内をこの条件を満たす図2の総ての光強度に関して複素平面上でプロットした図

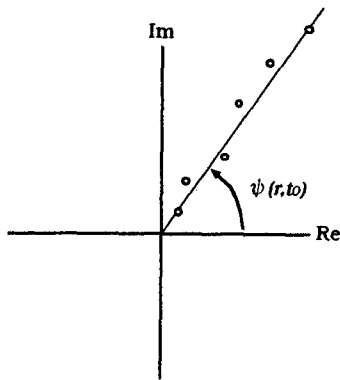


Fig.3 Complex plane plotting of $\cos\{\psi(r,t_0)\}\sin\{\Delta\psi(r,t_k-t_0)\} + i\sin\{\psi(r,t_0)\}\sin\{\Delta\psi(r,t_k-t_0)\}$, where t_k is $t_0 < t_k \leq t$

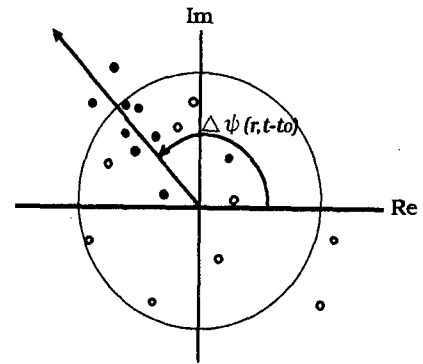


Fig.4 Complex plane plot of $Z = \{(I_{max}(r) - I_{min}(r))/2\}\exp(i\Delta\psi(r,t-t_0))$

3から、原点とプロット点を通る直線を作る偏角として t_0 での位相が高精度に求まる。

2.1.2 求めた位相を使用するそれ以降の位相変化量の測定

$I_{max}(r)$, $I_{min}(r)$ と光強度 $I(r,t)$ から式(1)でそれ以降の時点 t でも位相の絶対値 $|\psi(r,t)|$ が求まる。これと先の方法で求めた t_0 での位相 $\psi(r,t_0)$ から、正しい値を50%の確率で持つ t_0 からの位相変化量 $\Delta\psi(r,t-t_0) = \pm\psi(r,t) - \psi(r,t_0)$ が求まる。この値に関し、複素空間で $Z = [I_{max}(r) - I_{min}(r)]/2 \exp(i\Delta\psi(r,t-t_0))$ を測定対象画素を中心とする局所域内(例えば 3×3 画素)の総ての画素に関してプロットする。これは図4のようになり、モジュレーションの振幅を重みとして考慮した位相変化量として正しい値を50%含む。それ以外はランダムなスペックル位相の影響を受けて偏角が散っている。そこで \pm の2つの値に関し、すべての点の複素平均値が持つ偏角から遠いものはスペックル位相の影響を受けたもの(白丸)として排除すると、残り(黒丸)は正しい位相変化量を持つ点のみと考えられる。故にそれらを平均した値の偏角から精度の高い位相変化量が効率的に求まる。なお、この測定では1画像取込み時間あたり π 以下の位相変化速度であれば測定が原理的に可能である。

2.2 連続大変形計測への展開

上に述べた連続取込みによる変形(位相変化)量計測の手法で変形開始後の暫くは位相を正しく求めることができる⁵⁾。しかし時間が進み変形が大きくなると、反射表面のミクロな凹凸構造も変化し始めてスペックル形状も大きく変形し、光強度が次頁の図6に示すように激しく変化する状況が現れる。この時、図6の一部を拡大した図5に示すように I_{max} が I_{min} と大きく変わらない状態や、光強度の変化が位相で π を越したとは思えない内に再度反転するように見える状態などが発生する。

このようにしてスペックル形状の変形により、 I_{max} や I_{min} だけでなくスペックルの位相も変化して行く。その結果、2.1.1で求めた各画素の位相は、変形の進行と共に最初は変形量に相当する位相変化を示すが、その内に少しずつだが画素毎にランダムに変化する成分を持ち始める。言い換えると、変形による位相変化量は局所領域では殆ど同じ値となるべきなのに、変形が大きくなるにつれ画素間でのばらつき(変動)が増える。すなわち変形が進むと2.1.2の方法で求めた位相変化量を初期の位相に加えても、加算値は真のスペックル位相とずれ始める。故に加えて得られた位相を基にして、新たに I_{max} や I_{min} を更新するだけで、再度、2.1.2の方法を適用してそれ以降の位相変化量を抽出し続けると、位相変化量の抽出精度は徐々に悪くな

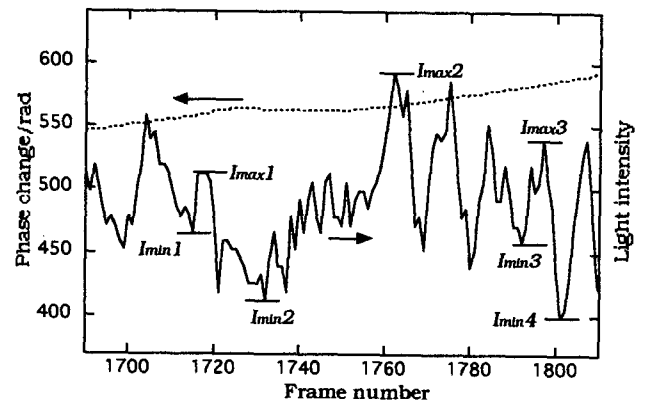


Fig.5 Fluctuating modulation in interferenced light intensity changes. A broken line shows deformation phase change.

り、最終的には計算不能となる(後の実験で詳細を述べるが、この様子を図6の一点鎖線に示す。すなわち、途中までは正しく計算できるが途中で計算不能になる)。このことは大変形の測定に対しては致命的である。

そこで次の方法を開発した。今、図5のように光強度が雑音やスペックル変形等の影響を受け、強度変化が変形に対して滑らかな \cos 関数とはなっていない画素の信号を考える。この時間変化を $I(r,t)$ とし、求めたいのは変形が進んだ時点 t での位相とする。そこで最初に、2.1の方法で測定点付近での位相変化量 $\Delta\psi(r,t)$ を求める。そして位相測定したい時点 t から位相変化量の絶対値が 2π 少ない時点 t_k から求め、これを t_k とする。この t_k から t までの位相変化量 $\Delta\psi(r,t_k) - \Delta\psi(r,t) = \theta(r,t_k-t)$ を利用して、次式を計算する。

$$I_c(r,t) = \int_{t_k}^t I(r,t_k-t_m) \cos\{\theta(r,t_k-t_m)\} \frac{d\theta(r,t_k-t_m)}{dt_m} dt_m$$

$$= \int_{-2\pi}^0 I(r,\theta) \cos\theta d\theta = \int_{-2\pi}^0 \{A \cos(\theta + \phi) + Bn(\theta) + C\} \cos\theta d\theta \quad (4)$$

$$\approx A\pi \cos\phi$$

ここで ϕ は $I(r,t)$ の位相とし、 $I(r,t_k-t_m)$ の雑音成分を $Bn(\theta)$ 、DC成分を C とし、 $Bn(\theta)$ と C は変形の位相に関して相関を持たないとして $\cos\theta$ との積分をゼロとした。同様に $I(r,t_k-t_m)$ と $\sin(\theta(r,t_k-t_m))$ との積に関しても以下のように計算できる。

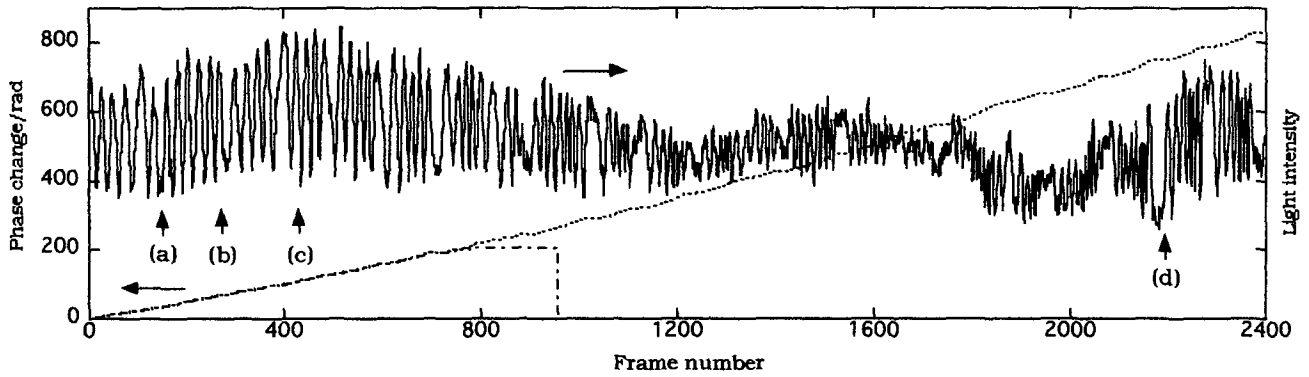


Fig.6 Light intensity change under large object deformation. Total deformation is estimated 250 μ m. A broken line shows deformation phase change. An alternate long and short dash line shows a fail of phase change extraction with our previously-developed method.

$$\begin{aligned}
 I_s(r,t) &= \int_{-\pi}^{\pi} I(r,t_k - t_m) \sin\{\theta(r,t_k - t_m)\} \frac{d\theta(r,t_k - t_m)}{dt_m} dt_m \\
 &= \int_{-\pi}^{\pi} I(r,\theta) \sin\theta d\theta = \int_{-\pi}^{\pi} \{A \cos(\theta + \phi) + Bn(\theta) + C\} \sin\theta d\theta \quad (5) \\
 &\approx -A\pi \sin\phi
 \end{aligned}$$

故に、この2式から時間 t での位相 ϕ が次式で計算される。

$$\phi(r,t) = \arg\{I_c(r,t) - iI_s(r,t)\} \quad (6)$$

このように変形量に相関を持たない信号等の影響を排除して、時間 t での位相が画素毎に求められる。この t は位相変化量 $\Delta\psi(r,t)$ が計算できる領域であればどこでも良く、故に、いったん、スペックル形状の変形によりモジュレーションがゼロ近くになった画素でも、その後の回復した強度変化を用いて計算することもできる。

このようにして求められた位相を、「2.1.2 求めた位相を使用するそれ以降の位相変化量の測定」にスペックル形状の変形情報を含んだ t での高精度な位相値として渡す。そして、次に処理すべき範囲のデータから新たに抽出した I_{max} や I_{min} と共に用いることによって、その後の位相変化を計算する。このようにして得られる位相変化量に対して以上の処理を次々と繰り返すことで、大変形の場合でも位相変化量を正しく抽出できることとなる。

3. 実 験

図1に示すように小型の引っ張り試験器にアルミ板を取り付け、歪み速度を一定(約0.00005/秒)となるようにしながら、デジタルカメラ(浜松ホトニクス社製C7300-10)で干渉像を連続してコンピュータに取り込んだ。カメラはサブアレイ取込みモードで用いており、1024×64画素の画像を12bitで量子化し100画像/秒の速度で取り込める。約25秒間に渡って2500枚分連続して取り込んだ画像データはいったんハードディスクに保存した後、解析用プログラムで読み出し、位相変化量を抽出した。取り込んだデータから、ある画素の干渉光強度の時間変化をグラフにしたものが図6上部の実線である。変形が大きくなるに従い、モジュレーションが大きく変動し、同時に光強度が激しく変化していく様子が分かる。

3.1 変形によるスペックル強度の相関値減少

図6に示した変化の(a),(b),(c),(d)の各時点について、その時の画像と取込み開始時の画像との相関を調べた。ESPIにお

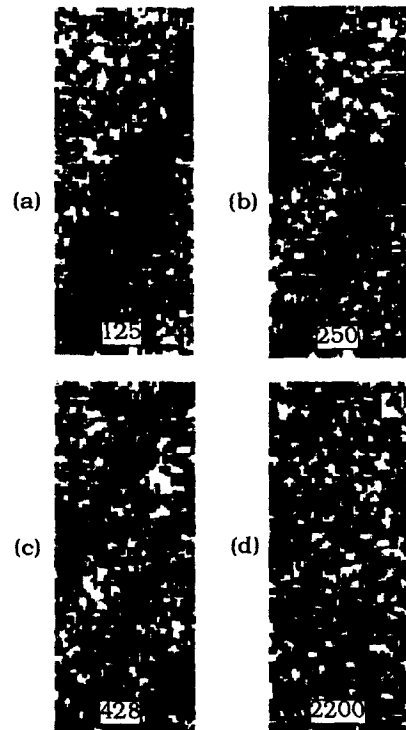


Fig.7 ESPI TV image simulations at the time showed allows in Fig.6. (a) Correlation fringes are clearly recognized at 125-th frame. (b) Correlation fringes are still clear at 250-th frame. (c) Visibility of correlation fringes becomes low at 428-th frame. (d) No correlation fringes are recognized at 2200-th frame.

いてTV画面表示に良く用いられる「光強度の差の2乗」をコンピュータで計算したものを図7に示す。暗の縞がくっきりと現れ、コントラストが良いものは、差の計算値が画素によってあまりばらついていないことを示し、初期画像との相関が良いことを示す。一方、コントラストが悪いものは相関が悪くなっていることを示す。点(c)ではコントラストの低下が見られ、スペックルの変形によりモジュレーションや位相が少なからず変化していると思われる。点(d)では全く相関がなくなっている。

3.2 モジュレーション変動下の変形(位相変化)量計測の結果

3.2.1 スタート台にした位相変化量計測法での結果

取り込んだ2500枚に関して、研究のスタート台にした方法で局所域を5×5として位相変化を抽出した結果を、一点鎖線の変化として図6の下部に示す。これは2.1.2の方法での位相変化量を効率的に抽出する画像枚数を60枚とし、60枚毎にモ

ジュレーション値を更新して位相変化量を抽出し、これを初期位相に加えて60枚目のスペckル位相とし、さらにこれを次の60枚の初期位相として2.1.2の方法を再度適用して位相抽出を繰り返したものである。グラフは800枚目付近から位相測定ができなくなり、平坦な出力結果となっている。この方法ではその原理から、一旦、位相データが測定できなくなると、モジュレーションが回復してもずっと測定できない状態が続く（それまでに抽出された位相変化量を初期位相に加算し、それ以後の位相変化量計測の初期位相とするので）。

3.2.2 提案する手法を用いての位相変化量計測結果

式(6)を用いて位相を求める時点 t の画像を、2.1.2の方法で処理する60枚目と決め、位相抽出処理を繰り返して変形位相を測定した結果を図6に点線で示す。従来法では測定できなくなった領域でも正しく測定が行い得ている。そして光強度変化がさらに激しくなっても位相変化量の測定は可能となっている。これはスペckル形状の変形により位相変化量測定で誤差が発生しても、式(6)を使って正しく次の60枚のスタート時の初期位相を回復できるからである。

なお、モジュレーション変動下で大きく変化し続ける I_{max} と I_{min} をどのようにして正確に求めるかについてはあまりこだわらなかった。なぜなら図5に示したように、破線の位相変化（提案する方法から求めた）が 2π の数周期を越えない内にモジュレーション変動により I_{max} や I_{min} が大きく変わる場合も見られ、この場合の I_{max} と I_{min} の取り扱いには厳密性が与えられないからである。と言うのは図に示した I_{min} 3は画像番号1790付近の最小光強度であり、1810では I_{min} 4となるが、どこまでの画像が I_{min} 3に属し、どこからがそうでないかは残念ながら判断できないからである。提案する処理では結果的に60枚毎の画像を通して求めた最大最小光強度をその60枚における I_{max} と I_{min} とした。これは3.2.1の場合と同じである。

このようにして計算した最終的な変形位相量（約800rad）の大きさと、図1に示したレーザビームの交差角度(0.2rad)、ならびにレーザ光の波長(0.78 μm) から2500枚目での全変形量を見積もると、約250 μm となることが計算できた。

4. 考 察

2.1.1の項でも触れたが、変形が大きくなるに従い、これまではある画素で測定されていた反射点が、その画素の測定域からはみ出て隣の画素に移る場合が存在する。この場合、その画素での光強度変化はどうなるかを考えてみる。測定されていた点近傍は周辺の凹凸構造が個々に反射する光が干渉し、カメラのレンズ方向に強い光を反射していたとする。その構造は変形に伴い隣の画素が測定していた点に少しずつ動き、徐々に大きく影響することになる。カメラの画素はその領域に入って来る光の空間積分強度値を画像信号として出力するので、隣の画素の信号は進入してくる測定点の影響を徐々に受け始める。入ってくる反射光の光強度が特に大きい場合、位相変化の1周期以内に I_{max} と I_{min} が大きく変わる状況が発生する。一方、反

射点が抜けていく画素でもこのような変化が発生する。

しかし、新たに付け加わったり、抜けたりする信号の変形による強度変化もそれ以外の信号と同じ周期をもっている。故に初期値と振幅が異なるが同じ周期を持つ正弦波同士の加算や減算となり、単純計算では同じ周期の正弦波となる（ただし、初期位相値は加算や減算で変化する）。故に付け加わったり、抜けたりする信号が徐々にその影響を及ぼすものであるならば、変形による位相変化は近似的には似たような周期を維持すると考えられる。しかし当然、大きな値の加算や減算がなされる領域ではモジュレーションや位相は急速に変化すると思われる。変形により反射面のマイクロ凹凸構造が変化する場合は、変化によりレンズ方向の反射光強度が急激に強め合ったり弱め合ったりするのでこの状況がさらに激しくなる。図5はこのような場合と我々は考えている。

5. 結 論

提案してきた連続大変形計測法をまとめると、この方法は以下の特徴を持つと言える。

- 1) スペckル干渉像を連続して取り込み、その時間変化から粗面の変形に伴う位相の時間変化を定量測定できる。
- 2) 変形はどの時点でも止まっている必要が無い。
- 3) 変形方向（光路差が増減する方向）を区別して測定が可能である。
- 4) 変形量は局所域で統計処理されて出力される。その結果、画素の光強度変化が図5に示すような激しい変化をしても位相変化が抽出できる。この位相変化を基に必要な時点のスペckル位相を高精度に抽出することにより、大変形で良く見られる干渉光強度の激しいモジュレーション変動があっても変形量の測定は可能となる（250 μm の変形が測定できている）。

最後に本研究は科学研究費補助金（研究課題番号(c) (2) 11650120）を基になされたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) R. Jone & C. Wykes: "Electronic speckle pattern correlation interferometry in " Holographic and Speckle Interferometry", Second Ed., Cambridge University Press 1989, 165.
- 2) K. Creath: "Phase-shifting speckle interferometry, Appl. Opt., 24, 18, (1985) 3053.
- 3) M. Adachi, Y. Ueyama, K. Inabe: "Automatic deformation analysis in Electronic speckle pattern interferometry using one speckle interferogram of deformed object, Optical Review, 4, 3 (1997) 429.
- 4) 安達正明, 稲部勝幸: "連続取込みスペckル干渉画像における初期位相測定法, 精密工学会誌, 66, 9, (2000) 1419.
- 5) M. Adachi, J. N. Petzing, and D. Kerr: "Deformation-phase measurement of diffuse objects that have started nonrepeatable dynamic deformation, Appl. Opt., 40, 34 (2001) 6187.