電子的スペckル干渉法を用いた接合材料の熱変形計測と ヒルベルト変換法による高精度位相解析*

門野博史 **

Thermal Expansion Studies of Joint Material Using ESPI and Hilbert Transform Method for High Precision Phase Analysis / Hirofumi KADONO

Key words: electronic speckle pattern interferometry, joint material, thermal expansion, hilbert transform method, phase analysis

1. はじめに

物体の変形、ひずみ計測は様々な構造物、工業部品・材料の設計、信頼性評価、品質管理、安全管理などにおいて不可欠である。また、年々高機能化、高精細化する最先端の工業部品において要求される精度はミクロンオーダーにとどまらず場合によってはナノメートルの精度が要求される。対象とする物体の大きさは MEMS に代表される数ミクロン程度の微小構造物から自動車、飛行機、建物、橋梁に至る巨大構造物まで様々である。このように微小物体から大構造物に対して適用可能で高精度な変形、ひずみ計測の要求に応えられる技術として干渉計測法がある¹⁾。従来の干渉法は、ミラーやレンズなど表面粗さが光の波長に比べて十分に小さく、光学的に鏡面にのみ適用可能であり、適用範囲は光学部品など特殊な用途に限定されていた。

これに対して、スペckル干渉法と呼ばれる一連の計測技術^{2)~5)}を用いると物体表面に対する従来の制限がなくなり、かつ光干渉法で一般的に実現可能な高い計測精度を保ちつつ、光学的に粗い物体に対して干渉法が適用可能となる。このようにスペckル干渉法は極めて実用性の高い干渉技術である。本稿では、物体の熱変形計測に焦点を絞り、スペckル干渉法を適用する際の問題点ならびに最近著者らが提案した Hilbert 変換法による高精度位相解析⁴⁾について解説する。

2. スペckル干渉法

レーザ光のようなコヒーレントな光で粗面物体や散乱媒質を照射すると、図 1 に示すように、物体の回折界や像界にぎらぎら輝くコントラストの高いランダムな斑点模様の

パターンが容易に観測される。これがレーザスペckルと呼ばれるパターンであり、物体により散乱された光がランダムに干渉することにより生じるものである⁶⁾。レーザスペckルはその成因から明らかなように、物体に対する様々な情報を持っており、これまでに表面粗さ計測、速度計測、さらに干渉光学系を用いることにより高精度な物体の変形計測、ひずみ計測、振動計測などの応用計測が種々提案されてきた。後者の干渉光学系を用いた計測法がスペckル干渉法と呼ばれている。

図 2 に一般的に用いられる電子的スペckル干渉法 (ESPI) による面外変形計測光学系を示す。レーザ光はビームスプリッタにより 2 つに分けられ、基準となる物体およ

図 1 スペckルパターン

図 2 スペckル干渉法による面外変形計測光学系

*原稿受付 平成 16 年 10 月 13 日
**埼玉大学(さいたま市桜区下大久保 255)
門野博史

1997 年北海道大学大学院理工学研究科博士後期課程修了、工学博士。91 年埼玉大学工学部助教授。95 年同大学院理工学研究科環境制御工学専攻助教授。専門は、光計測、統計光学など、特にレーザースペckルを用いた干渉計測

図3 ESPIにより得られたスペックル相関縞

び被検物体を照明する。それぞれの表面で散乱された光は再びビームスプリッターで重ね合わされ、レンズ L_1 により CCD カメラ上に結像される。観察される画像は、それぞれの物体により発生した2つのスペックルパターンとのランダムな干渉画像として次式で表される。

$$I(x, t) = I_0(x, t) + I_m(x, t) \cos[\theta(x, t) + \phi(x, t)] \quad (1)$$

ここで、 x は物体面上での座標である。 I_0 、 I_m はそれぞれバイアス強度および変調強度である。また、 θ 、 ϕ はそれぞれ空間的にランダムなスペックル位相および物体の面外変形に起因する光路変化による物体位相である。ここで物体の変形前後 ($t = t_1, t_2$) でスペックル干渉画像の差の絶対値をとると

$$\Delta I(x, t_1, t_2) = |I(x, t_1) - I(x, t_2)| \quad (2)$$

$\approx 2I_m |\sin(\theta(x, t_1) + \Delta\phi(x, t_1, t_2)/2)| |\sin(\Delta\phi(x, t_1, t_2)/2)|$ となる。ここで、 $\Delta\phi$ は物体の変形に対応し、物体の面外変形量を $\Delta h(x, t_1, t_2) = h(x, t_1) - h(x, t_2)$ とすると

$$\Delta\phi(x, t_1, t_2) = (4\pi/\lambda) \Delta h(x, t_1, t_2) \quad (3)$$

で与えられる。図3にESPIにより物体の変形によって得られる典型的なスペックル相関縞を示す。(2)、(3)式より相関縞1本に対応する物体の面外変形量は光の1波長であることがわかる。

現代の干渉測定法では、干渉縞あるいはスペックル干渉法では相関縞の1本を空間的に補間することにより、波長の数十分の1から数百分の1という高感度な計測を実現している。これまでに相関縞の解析法としてフーリエ変換法など種々提案されているが、これらはスペックル相関縞を空間領域で解析している。スペックル相関縞はランダムなスペックルパターンで変調されており、ESPIでは一般にノイズの非常に大きな信号を処理しなければならない。これは(2)式においてスペックル位相 $\theta(x, t)$ が空間的に急激に変動していることに起因している。この問題は物体の変形分布が急激になり相関縞の縞間隔がスペックル粒子と同程度に近づいてくると顕著になり、高精度位相解析あるいは計算機による自動解析を非常に困難にしてきた。その結果、空間分解能はスペックル粒子の平均サイズに比べてかなり粗くなるという欠点がある。

3. Hilbert 変換法による高精度位相解析

空間領域での位相解析に伴う問題を解決するために、著者の研究室では最近スペックル干渉パターンを空間領域で位相解析をおこなう代わりに、パターン上の各点において時間領域で位相解析をおこなう Hilbert 変換法を提案した⁴⁾。この手法の利点は、図4に示すように観測画面上のある1

図4 ESPIで得られる空間信号(Spatial signal)と時間信号(Temporal signal)

点での強度に注目すると、時間領域においてはノイズの少ない干渉信号が容易に得られることにある。これは、ランダムなスペックル位相 $\theta(x, t)$ は時間的には緩やかに変動する性質をもつことによる。

時間領域において(1)式を位相解析することにより物体位相 $\phi(x, t)$ を高精度に解析するために Hilbert 変換を利用した位相解析法を提案した。実時間信号を $u(t)$ とするとその解析信号 $a(t)$ は

$$a(t) = u(t) + iv(t) \quad (4)$$

と表せる。実部と虚部は互いに Hilbert 変換により与えられる⁷⁾⁸⁾。すなわち

$$v(t) = HT[u(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(t')}{t' - t} dt' \quad (5)$$

により与えられる。ここで重要なことは、

$$\sin(\phi(t)) = HT[\cos(\phi(t))] \quad (6)$$

という性質である。すなわち Hilbert 変換により全周波数領域で位相を $\pi/2$ だけシフトさせた信号を得ることができる。(1)式よりバイアス強度 I_0 を取り除いた信号を $I_c(x, t)$ とすると、求めたい物体位相は次式で与えられる。

$$\theta(x, t) + \phi(x, t) = \tan^{-1} \left(\frac{HT[I_c(x, t)]}{I_c(x, t)} \right) \quad (7)$$

よって $t = t_0$ での位相分布を基準(参照位相分布)として、時刻 t での位相分布から差し引くと物体の変形量 $\Delta\phi(x, t, t_0)$ は

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x, t, t_0) &= \theta(x, t) + \phi(x, t) - [\theta(x, t_0) + \phi(x, t_0)] \\ &\approx \phi(x, t) - \phi(x, t_0) \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。(8)式はスペックル位相の相関が保たれる限り成り立つ。言い換えると非常に大きな変形に対してはスペックルパターン自体が変化し相関が徐々に失われ、計測精度が低下する。これを避けるにはスペックルパターンの相関が失われる前に参照点を順次更新すればよい。この方法はダイナミック ESPI として提案しており⁵⁾、物体が破壊に至るまでの過程の観察を可能にしている。ここで紹介した Hilbert 変換法による位相解析では、およそ光の波長の20分の1程度の精度を得ることができる。

4. 実験—接合材料の熱ひずみ計測—

まったく異なった性質を示す2種類の材料を接合し、新しい接合体を作製することにより、2つの材料の性質を合

図5 実験に用いた接合材料

図6 接合材料の面外熱変形

わせもつ新材料や新しい機能素子が誕生する。また接合によって、一方の材料の状態を変え、その材料自身の性質を向上させたり、さらには新しい機能を付け加えることができる。近年、産業界において、各種接合材料の重要性はますます増大し、その技術はいろいろな製品に应用されている。接合する材料の線膨張係数が大きく異なると、接合面に大きなひずみが集中し最悪の場合には破壊に至る。したがって接合境界付近での変形・ひずみ分布の計測は新材料開発にとって非常に重要である。

本稿では、セラミックスとステンレスを薄い銅の層を挟んで接合した材料の接合界面付近での熱変形の計測を紹介する。被検試料の構造を図5に示す。セラミックス、銅、ステンレスの線膨張係数はそれぞれ、 $3 \times 10^{-6}/K$ 、 $17.7 \times 10^{-6}/K$ 、 $15 \times 10^{-6}/K$ である。セラミックスとステンレスでは5倍の差がある。

4.1 面外熱変形の計測

接合材料の面外変形の計測には、図2に示すマイケルソントタイプの光学系を用いた。試料はペルチェ素子にマウントされており、25℃から55℃まで温度を変化させた。実験ではまず、55℃まで加熱した後ペルチェ素子への電流を切断し、自然冷却による温度低下に伴う試料の面外の熱

図7 接合材料の面内熱ひずみ計測の実験系

図8 接合材料の面内変形（接合境界に垂直方向）

変形を観測した。図6に55℃の初期加熱時を基準として17秒後の変形分布を示す。試料上の観測領域は3.5 mm × 8 mmである。接合境界は長手方向に4 mmの場所に位置する。領域0～約4 mmはステンレスであり、約4 mm～8 mmの領域はセラミックスである。

図からわかるように、セラミックス側に比べてステンレス側では大きく収縮しており、接合境界から約4 mmの場所で900 nmの変形が生じていることがわかる。

4.2 面内熱変形の計測

図7に面内変形の計測に用いた光学系を示す。光源として波長680 nmの半導体レーザを用いた。レーザ光はレンズ(Lens)により平行光となり、ビームの半分は物体法線に対して α の角度で直接物体を平行光で照明する。一方、照明ビームの他方の半分はミラー(Mirror)により物体を角度 $-\alpha$ で照明する。2つの照明光によって生じたスペックルパターンは観察結像系を通して重ね合わされて干渉し、干渉パターンはCCDカメラにより記録される。ここで物体の接合界面に垂直方向の面内変位を Δx とすると2つの光波の間に導入される位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x \sin\alpha \quad (9)$$

で与えられる。

(1)式の位相項の符号は単純に一枚の観測画像の強度から一意に決定することができない。この符号の不確実性を解決するための一般的な手法は、(1)式の位相項が常に単調増加となるように付加位相(あるいはしばしばキャリア成分と呼ばれる)を導入することである。このため光学系では、ミラーはピエゾトランスレータ(PZT)にマウントされており、時間的に線形な付加位相 ωt が導入される。

面外熱変形の計測時と同様に、55℃まで初期加熱した後自然冷却による面内の熱変形を計測した。17秒後の変形計測結果を図8に示す。試料への2つの照明光が作る照射平面が接合境界に対して垂直に設定されているため、接合境界に対して垂直方向の面内変形が計測されている。図8において、接合境界は長手方向(x方向)に約5mmに位置する。0mm～5mmの領域はステンレスであり、他方はセラミックスである。図からわかるように、それぞれの領域において、材料の線膨張係数の違いにより、変形のスロープが著しく異なることがわかる。ステンレスとセラミックスでは線膨張係数が約5倍異なるが、計測された変形分布の傾きの差はそれよりも大きいことがわかる。これは、セラミックスの熱伝導率が小さくステンレス側に比べて表面温度の変化が小さいためであると思われる。

さらに興味深い点は、接合境界で銅層の部分では局所的に変形の傾きに逆転が見られることである。ステンレスとセラミックスの大きな線膨張係数の差により柔らかい銅層へ大きな熱ひずみが集中した結果と思われる。

このような面内変位の干渉計測は、鏡面物体に対する従来の干渉法では実現不可能である。物体からの散乱光を利用したスペックル干渉法により初めて可能となる計測法である。

5. お わ り に

本稿では、スペックル干渉法による熱変形の2次元分布計測とHilbert変換法による高精度位相解析法について解説した。従来、ESPIでは、位相解析は空間領域でおこなわれていたが、本位相解析法では時間領域でおこなうこと

によりスペックルノイズの影響を最小にしている。得られる精度は $\lambda/20$ 程度である。さらに本方法では、観測画像の各点において独立に物体位相が求められるため、物体に亀裂など不連続な構造がある場合は特に有効である。また、空間分解能は個々のスペックル粒子が情報の基本単位となるためスペックルサイズと同程度まで向上する。

ここで紹介したスペックル干渉法以外に、我々が提案したまったく異なる原理に基づいた統計干渉法^{9)~12)}を用いると、物体上の1点に関してサブナノメートルの精度で変形、あるいはひずみを 10^{-7} strainの精度で計測することが可能である。詳細は参考文献に譲るが、統計干渉法は超高精度な測定法であるが、同時に2次元分布を得ることはできない。したがって、本稿で述べた2次元計測法と組み合わせることによって、必要に応じて柔軟な計測が可能である。

参 考 文 献

- 1) P. Hariharan: Optical Interferometry, Academic Press, (1985).
- 2) R.S. Sirohi (ed.), Speckle Metrology, (Marcel Dekker, Inc., 1993).
- 3) P. K. Rastogi (Ed.), Photomechanics, (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- 4) V. Madjarova, H. Kadono, and S. Toyooka, "Dynamic electronic speckle pattern interferometry (DESPI) phase analyses with temporal Hilbert transform", Optics Express, **11**, 6, (2003) 617-623.
- 5) V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti, H. Kadono, "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase," Opt. Commun. **212**, (2002) 35-43.
- 6) Dainty, J. C., ed.: Laser speckle and related phenomena, Springer-Verlag, Berlin, (1975).
- 7) Stefan L. Hahn, Hilbert Transforms in Signal Processing, Artech House, Boston, (1996).
- 8) Sanjit K. Mitra, Digital Signal Processing: A computer based approach, McGraw-Hill Companies, Inc., (2002).
- 9) H. Kadono, and S. Toyooka: "Statistical interferometry based on a statistics of speckle phase," Opt. Lett., **16**, (1991) 883-885.
- 10) H. Kadono, S. Toyooka, and Y. Iwasaki: "Speckle shearing interferometry using a liquid crystal cell as a phase modulator," J. Opt. Soc. Am, A8, (1991) 2001-2008.
- 11) 門野博史, 豊岡了: 統計的干渉計測法による高精度変位計測, 光技術コンタクト, **32**-5, (1994) 17-23.
- 12) H. Kadono, Y. Bitoh, and S. Toyooka: "Statistical interferometry based on fully developed speckle field: An experimental demonstration with noise analysis," J. Opt. Soc. Am A, **18**, (2001) 1267-1274.