ホログラフィ干渉法を利用した熱変形計測

(第1報)*

——補正台による干渉じま補償法を応用した熱変形計測装置の開発——

木村 秀行** 高橋 毅***

Measurement of Thermal Deformation Utilizing Holographic Interferometry (1st Report)
—Development of Measurement Apparatus for Thermal Deformation Utilizing
Compensation Method of Interferometric Fringes by Correcting Stand—

Hideyuki KIMURA and Tsuyoshi TAKAHASHI

This paper describes a development of an apparatus for highly accurate measurement of a thermal deformation of a mechanical part. The apparatus makes possible a real time monitoring a microscopic change of the thermal deformation pattern by using real-time holographic interferometry. One of the most important problems to be solved on a measurement of thermal deformation is how to fix a measuring object. When environmental temperature changes, the spurious interferometric fringes are happened by an unnecessary slip between contact surfaces of the measuring object and its holder, due to thermal expansion differences between them. An adjustable correcting stand utilizing piezoelectric elements is developed for a real time compensation of the spurious fringes. The effectiveness of the correcting stand for a precise and real time measurement of the thermal deformation pattern was confirmed experimentally. An air bath that has an optically stable window for observation of the deformation from outside is used for highly accurate control of the temperature of the measuring object. The interferometric fringes are recorded on a thermoplastic plate for real time monitoring of the changing process of the thermal deformation pattern.

Key words: holographic interferometry, thermal deformation, temperature control, piezoelectric element, thermoplastic plate, real time, pattern measurement

1. 緒 言

光ディスク装置、磁気ディスク装置などの記憶装置およびプリンタ、ファックス、VTRなどの記録装置では、部品の熱変形を微小にすることが高精度・高密度化達成の重要課題であり、微小な熱変形の高精度計測技術の確立が必須となってきた。熱変形の要因としては、①部品の一部分の発熱と②環境温度の変化がある。部品の一部分の発熱による熱変形の計測例としては、ホログラフィ干渉法による工作機械の熱変形¹⁾やプリント配線板の熱変形²⁾が報告されているが、環境温度の変化による熱変形の計測例は見当たらない。ただし、環境温度を変化させて試料の線膨張係

数を光干渉計により求めた例³⁾は報告されている。

環境温度変化時の熱変形計測の難しさは、変形前後の測定部品の正確な温度制御や部品とその保持台との固定法にある。固定の難しさは、部品の一部分の発熱による熱変形の計測においても認められるものである。たとえば、前述のプリント配線板の熱変形計測でも配線板の固定の影響が干渉じまに現れており、この干渉じまからプリント配線板の熱変形のみを正確に求めるには、固定の影響を除去しなければならない。一方、環境温度変化時の熱変形計測の場合、部品と保持台はともに温度変化するため、部品と保持台の熱膨張差によるずれのため、この固定の影響はさらに顕著にでる。

本報では、環境温度変化時の熱変形計測に主眼をおき、かつ上記問題点を解決する熱変形計測装置の開発を行ったので、その概要について報告する。計測法として変形をパターン計測できるホログラフィ干渉法を

* 原稿受付 平成2年11月29日。1990年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成2年9月29日)にて発表

** 正会員 (株)日立製作所(土浦市神立町502)

*** 正会員 (株)日立製作所(小田原市国府津2880)

Fig. 1 Investigated items on measurement of thermal deformation

採用し、精度良く実時間計測するため、安定性の良い温度制御空気槽の製作および感光材料としてサーモプラスチック板の利用を行った。

2. 実験方法および装置

2.1 熱変形計測のための検討項目

環境温度変化時の部品の熱変形を精度良く計測するためのおもな検討項目として図1の3つがあげられる。

① 温度制御法： 部品の熱変形を高精度に計測するには、部品の温度を精度良く制御する必要がある。加熱・冷却できる温度制御槽が必要である。空気槽は熱源からの熱を空気を介して対流で部品に伝えるもので、加熱と冷却の両方が容易に行えるが、空気のゆらぎを生じるという欠点がある。一方、真空槽は熱源からの熱を輻射により部品に伝えるもので、空気のゆらぎ等の外乱は生じないが、温度分布が不均一になりやすく、装置が大がかりとなり、さらに作業性も悪くなるという欠点がある。本報では、対象とする製品の使用環境温度が10～50℃程度であることから、その範囲では空気のゆらぎは比較的少ないと考え、加熱と冷却が容易に行える空気槽を採用した。

② 熱変形計測法： 変形（変位）を計測する手段として、光干渉を利用した光学式や静電容量式および渦電流式などの変位計があるが、いずれもワンポイントのみの計測であり、後者2つの変位計は校正作業も必要である。これに対し、ホログラフィ干渉法はパターン計測ができ、基準面が不要で、かつ粗面物体の計測が可能であり、熱変形計測に適している。このため、本報ではホログラフィ干渉法を採用した。

③ 部品固定部の変形補償法： 測定部品を保持台

Fig. 2 Generation of slip at contact surface

の上に静置して全体の温度を変化させると、部品と保持台との熱膨張差によりその接触面に不必要なずれが生じ、計測の大きな誤差要因になる。図2はその説明図で、熱膨張率の大きい試料1（測定部品：たとえばアルミニウム）を小さい試料2（保持台：たとえば石英ガラス）上に静置し、環境温度を変化させた場合を考えると、それぞれの試料の熱膨張量が異なる（ $\delta_1 > \delta_2$ ）ため、接触面にずれが生じる。ホログラフィ干渉法の場合、特に面外方向（紙面に垂直方向）の変形には感度が良好なため、この不必要なずれにより生じた干渉じまは部品本来の熱変形による干渉じまに加算されてしまい、その干渉じまから熱変形を精度良く求めることは難しくなる。

この不必要な変形（ずれ）を補償する方法としては、計算機を利用した画像処理による方法⁴⁾もあるが、処理時間を考えると実時間計測には不向きであり、金銭的にも高価なものになってしまう。このた

1 Heat-insulating box	2 Heat source
3 Thermo sensor	4 Controller
5 Fused silica stand	6 Fused silica window
7 Correcting stand	8 Measuring object
9 Holder	10 Optical table
11 Direction of view

Fig. 3 Temperature controllable air bath

め、本報では補正台を利用して不必要な変形を即座に補償できる実時間計測に適した干渉じま補償法を考案し、熱変形計測に適用した。以下に、これら①～③の詳細を述べる。

2.2 温度制御空気槽

図3は測定部品の温度制御を行う空気槽（300 mm角の箱体）であり、熱源として加熱と冷却の両方が行えるベルチエ素子⁵⁾を利用し、温度制御はPID連続電流比例制御法を採用した。目標とする制御可能な温度範囲は10～50℃である。

特に注意を払ったのは次の4点である。①測定部品を載せる保持台は低熱膨張材の石英ガラスで製作し、その石英ガラス台は光学定盤にしっかりと固定した。②観察用の石英ガラス窓（厚さ10 mm）は断熱箱の変形の影響を受けないように断熱箱から分離し、光学定盤に直接固定した。そして石英ガラス窓と断熱箱はスポンジを介して接触させ、気密を保った。③断熱箱は厚さ10 mmの亚克力板（外枠）と30 mmの発泡スチロール板で構成し、周囲と熱の授受が生じないようにした。④光学定盤および空気槽の置かれる周囲温度は空調機により20℃±1℃以内に制御した。

図4は空気槽の温度制御精度の性能を示すもので、横軸は空気槽内に置いた測定部品であるアルミニウム試料の平均温度、縦軸は試料局部温度のずれ幅を示している。すなわち、試料温度を直径φ0.1 mmの銅・コンスタンタン熱電対により4点測定し、その温度分

Fig. 4 Ability of air bath

1 Ar-laser source	2 Shutter
3 Beam splitter	4 Reflecting mirror
5 Filter	6 Pinhole
7 Convex lens	8 Thermoplastic
9 TV camera	10 Object light
11 Reference light	12 Correcting stand
13 Measuring object	14 Air bath
15 Optical table

Fig. 5 Optical system of holographic interferometry

布のばらつきをずれ幅として表している。

本報で目標とする温度範囲10～50℃において、部品の温度分布の幅はおおよそ±0.1℃以内に制御できている。ここで、測定部品の平均温度が20℃で最も精度良く制御できているのは、空気槽の周囲温度を空調機により20℃一定に制御していることに起因している。それ以外の温度で温度分布が悪くなるのは、断熱箱の断熱がまだ不十分であるためと考えられる。

2.3 ホログラフィ干渉法の光学系

図5はホログラフィ干渉法の光学系である。ホログラフィ干渉法の原理等の詳細な説明は専門書⁶⁾⁷⁾に記載されているので、ここでは概略を述べる。光学定盤（広さ2400 mm×1500 mm、厚さ460 mm）の端部に置かれたアルゴンレーザ源（波長0.5145 μm、出力

Fig. 6 Correcting stand utilizing piezoelectric elements

0.4 W) からのレーザ光をビームスプリッタで物体光と参照光に分け、いずれもピンホールとレンズで平行光にし、物体光を測定部品に、参照光を感光材料であるサーモプラスチック板⁹⁾(以下 TP 板と称する)に照射する。そして、測定部品からの反射光と参照光を部品の変形の前後において干渉させ、変形に応じた干渉じま(等変位線)を観測する。本報では TP 板を利用し、干渉じまの変化を実時間で観測できるようにした。本光学系における計測の感度(1 しま当たりの変形量) δ は、次式(1)より $0.27 \mu\text{m}$ である。

$$\delta = \frac{\lambda}{\cos \theta_i + \cos \theta_o} \quad (1)$$

ここで、 λ , θ_i , θ_o はレーザ光の波長、測定部品への入射角および出射角であり、本報では $\theta_i = 25^\circ$, $\theta_o = 0^\circ$ である。 $\theta_i = \theta_o = 0^\circ$ のとき、計測の感度は最高で $\delta = \lambda/2$ となる。

2.4 部品固定部の変形補償法

図 6 は部品固定部の変形を補償するために製作した補正台で、積層形圧電素子をアクチュエータとしている。可動台は中央に設けた 1 本の引張りばねとその回りに 120° 間隔で設けられた 3 本の圧電素子によりベース上に保持されており、それぞれの圧電素子への印加電圧を制御することにより、X 軸および Y 軸方向の回転と Z 軸方向の平行移動の 3 自由度の調節が可能である。後述するが、図 2 に示した不必要な変形は、おもに X 軸および Y 軸方向の回転により補正できる。

図 7 は補正台に用いる積層形圧電素子の印加電圧と変位量の関係であり、電圧上昇時と下降時でヒステリシスを持つが、100 V の印加電圧により約 $6 \mu\text{m}$ の変

Fig. 7 Characteristic of piezoelectric element

位を得ることができる。補正台への利用においては、電圧下降時の曲線を使用し、50 V を基準にして ± 50 V 電圧変化させることにより、約 $\pm 3 \mu\text{m}$ の変位を得るようにした。これを補正台の補正可能な量に換算すると、X 軸方向の回転量が約 $\pm 2.3 \times 10^{-4} \text{ rad}$ および Y 軸方向の回転量が約 $\pm 2.0 \times 10^{-4} \text{ rad}$ に相当する。

なお、補正台の形状は図 6 に限る必要はなく、不必要な変形を補償できる最低の自由度を持っていればよい。初心者にとっては自由度の少ない方が扱いやすい。

3. 実験結果および検討

3.1 光学系の安定性の確認

環境温度変化時の熱変形の計測においては、測定部品を図 3 の空気槽で加熱あるいは冷却するため、計測に 30 分程度の時間を要する。熱変形を精度良く計測するには、この間光学系が安定でなければならないので、まず光学系の安定性を確認する。方法としては、空気槽は温度変化させず、図 5 の光学系でまず基準の干渉波面を TP 板上に作成し、そのまま一定時間放置する。外乱により光学系の位置あるいは光路長が変化すれば、TP 板上に干渉じまが現れるので、それを観測すればよい。

この結果、30 分以上放置しても干渉じまは現れず、光学系は安定であることがわかった。これは、光学系のおもな不安定要因として周囲の温度変化⁹⁾があげられるのに対し、本報では光学系の置かれる実験室内を空調機により $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 以内に制御しているためと考えられる。ただし、空調機作動中は空気がゆらぎ、計測に不向きとなるため、空調機により温度制御された実験室内に暗幕により仕切った空間を設け、その中に

1	Measuring object	2	Aluminium plate
3	Adhesives	4	F P C
5	Polyimide	6	Copper foil
7	Holder (Al)	8	Direction of view

Fig. 8 Schematic view of measuring object

光学系を設置して空気のゆらぎを抑えた。さらに、撮影時のみ空調機を一時停止した。また、測定者が光学系に近づくと空気がゆらぐ場合があるので、光学系はできる限り暗幕の外側より遠隔操作できる構成にした。

また、本光学系により測定部品を載せる石英ガラス台の熱変形についても確認したが、温度範囲 10～50℃では干渉じまは現れなかった。これは、温度変化 30℃程度における石英ガラス台の熱膨張量は約 2 μm であり、これによる石英ガラス台の面外方向の熱変形は本光学系の計測感度 (0.27 μm) 以下であるためと考えられる。

3.2 変形補償法の有効性の確認

次に、前述の装置により、測定部品固定部のずれにより生じた不必要な干渉じまを補償し、部品本来の熱変形のみをうまく抽出できるか否かを確認する。

図 8 は測定部品およびホルダの概略図であり、測定部品は厚さ 2.5 mm のアルミニウム板の片面に厚さ 0.18 mm の FPC が接着されている。FPC は Flexible Printed Circuit の略称で、銅箔リード線と 2 枚のポリイミド樹脂が層状に接着されている。測定部品はアルミニウムねじにより締付けトルク約 2 kgf でホルダに締結され、補正台上に載せられる。温度変化があると、アルミニウム板と FPC の熱膨張差により測定部品が面外方向に熱変形（たわみ変形）するので、この熱変形を精度良く実時間計測するのがここでの課題である。

図 9 は環境温度を 10℃ 変化（加熱）させた時の測

1	Fused silica stand	2	Holder (Al)
3	Fixed part	4	Correcting stand
5	Measuring object

Fig. 9 Correction of interferometric fringes due to slip at contact surface

定部品の熱変形の計測結果である。左の写真がホルダを石英ガラス台に直接静置した補正前の干渉じまパターンで、測定部品本来の熱変形による干渉じまに図 2 で説明した石英ガラス台とアルミニウムホルダの熱膨張差によって接触面に生じる不必要なずれによる干渉じまが加算され、この写真から測定部品の熱変形のみをすぐに求めることは難しい。ここで、ホルダ上に現れているしまが不必要な干渉じまであり、縦じま（垂直方向のしま）であることからずれば Y 軸方向の回転であることがわかる。

これに対し、右の写真は補正後の干渉じまパターンで、接触面に生じた不必要なずれによる干渉じまを補償したもので、測定部品面上には水平方向の干渉じまのみが残り、測定部品本来の面外方向の熱変形を忠実に抽出していることがわかる。そして、この干渉じまのしま次数からホルダ部を基準にした測定部品の面外方向の熱変形量を正確に求めることができる。

前述の干渉じま補償法は、温度変化しても熱変形しないアルミニウムホルダ（単一材料）上に現れている干渉じまを消去するように、その干渉じまを目視しながら、補正台に設けた 3 本の圧電素子への印加電圧をそれぞれ調節し、補正台を微動させて行う。この操作は、接触面において石英ガラス台との熱膨張差により

アルミニウムホルダがずれた量だけ補正台を微動させ、ホルダを元の位置にもどすことに相当し、実時間で行われる。補償の判定は、ホルダに現れている干渉じまが消去できたか否かにより行い、干渉じまが完全に消去できればホルダが元の位置にもどったことになる。以上の結果より、接触面のずれなどによるホルダの剛体的な移動のみであれば、補正は完全に行うことができ、補正台を利用した干渉じま補償法の熱変形計測における有効性が確認できた。

次に、熱変形計測装置としての精度について検討する。精度を左右するおもな要因は、測定部品の温度制御精度、干渉じま補償精度および空気槽内の空気の流れである。部品の温度は図3の空気槽により $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内の精度で制御されており、その熱変形への影響は、図9の計測結果の場合 $\pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。干渉じま補償の精度は、目視によりホルダ上のしめの消去を行っているため、最大で $\pm 0.27\text{ }\mu\text{m}$ (1しめ分)であるが、次式(2)により精度を向上させて、 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下にしている。

$$V_0 = \frac{V_1 + V_{-1}}{2} \quad (2)$$

ここで、 V_0 はしめを完全に消去するため圧電素子に印加する電圧、 V_1 および V_{-1} はホルダ上に現れているしめのしま次数が+1および-1のときに圧電素子に印加している電圧であり、いずれも電圧下降時の特性曲線を使用する。空気の流れは空気槽内の温度変化が大きいかほど激しいが、本報の温度範囲においては若干ゆらぐ程度で、 $\pm 0.27\text{ }\mu\text{m}$ (1しめ分)を越えることはなかった。

これより、本報における熱変形計測装置の計測精度は、 $\pm 0.27\text{ }\mu\text{m}$ (1しめ分)程度と考えられる。さらに前述の補正台を用いて、干渉じま補償後のしめに干渉じま走査法などの操作を加えれば、熱変形をより高精度に計測し、かつ変形の方法まで求めることができる。たとえば、図9右写真の干渉じまを走査させ、その干渉じまの増減から変形の方法が容易に求められる。これらについては現在検討中で、引き続き報告したい。

4. 結 論

本研究は、環境温度変化時の熱変形を実時間で精度

良くパターン計測するため、ホログラフィ干渉法を利用した熱変形計測法について検討し、次の結論を得た。

- (1) 温度範囲 10 から 50°C において、部品の温度 (温度分布含む) を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に制御できる温度制御空気槽を製作した。
- (2) 圧電素子を利用した補正台により、測定部品固定部のずれにより生じる不必要な干渉じまを、最大でも $\pm 0.27\text{ }\mu\text{m}$ (1しめ分) の精度で補正する干渉じま補償法を考案し、その有効性を実験的に確認した。
- (3) 上記 (1) および (2) より、環境温度変化時の熱変形を、 $\pm 0.27\text{ }\mu\text{m}$ (1しめ分) 程度の精度で実時間によりパターン計測できる熱変形計測装置を開発した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御指導、御助言をいただきました東京大学工学部精密機械工学科大園成夫教授に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 佐田登志夫, 佐伯幸洋, 大久保信行, 竹内芳美, 鈴木正根: ホログラフィによる工作機械構造の3次元変形測定, 精密機械, **41**, 9 (1975) 902.
- 2) 谷口正成, 沖 允人, 井上寿雄, 高木 相: ホログラフィックパターン計測法による電流通電中のプリント配線板の熱変形解析, 電子情報通信学会技術研究報告 (R 86-58), **86**, 350 (1987) 25.
- 3) 岡路正博, 今井秀孝, 樋田並照, 飯塚幸三: レーザ干渉計を用いた線膨張係数測定装置の試作と精度の検討, 応用物理, **50**, 7 (1981) 714.
- 4) 谷口正成, 沖 允人, 高木 相: ホログラフィックパターン計測法の振動解析への応用, 電子情報通信学会論文誌 C, **J 71-C**, 1 (1988) 74.
- 5) ヒートパイプ・ペルチェ冷却, 伝熱工学資料改訂第4版, 日本機械学会, (1986) 280.
- 6) 松田浄史: ホログラフィ干渉計測, 光応用機械計測技術, 日本機械学会, (1985) 68.
- 7) 鈴木正根: ホログラフィの原理, 実践ホログラフィ技術, オプトロニクス社, (1986) 19. など.
- 8) 鈴木正根: 感光材料, 実践ホログラフィ技術, オプトロニクス社, (1986) 61. など.
- 9) 谷村吉久, 桜井好正, 藤沼憲幾: レーザ干渉測長における誤差要因とその解析, 計量研究所報告, **27**, 3 (1978) 235.