高次モアレひずみ測定器の試作*

奥野卓夫** 高島松雄*** 輪竹千三郎† 山田嘉昭†

A New Moiré Measuring System Based on Multiplied Fringe Shift Technique

Takuo OKUNO, Matsuo TAKASHIMA, Senzaburo WATAKE, Yoshiaki YAMADA

A new sensitive strain measuring system which is based on the multiplied fringe shift moiré technique or fringe multiplication technique has been developed. The system consists of a photographing apparatus and an observing apparatus to avoid the effect of environmental disturbances such as vibration and airturbulence to the measurement. An autocollimator is attached to the photographing apparatus to secure the parallel relationship between specimen surface and the emulsion surface of a photographic plate. The illuminating optical system gives uniform illumination of a specimen under test. The observing system is an interferometer, which brings two higher order diffracted waves from the processed photographic plate to two-beam interference. The characteristic feature of the system is the sensitivity attained, which is ten times higher than that of a conventional moiré technique. The mismatching and misalignment can be applied easily by tilting mirrors in the observing apparatus. The measurement is possible not only with transparent specimens but also opaque metallic specimens. The grating applied or photo-printed to the specimen is rather coarse and normally is 500 lines/inch, and with the above mentioned sensitivity the grating is equivalent to 5000 lines/inch in a conventional moiré technique. With this system it is possible to obtain elastic and even elasto-plastic strain.

1. 緒 言

材料試験で用いられる応力あるいはひずみの測定法には抵抗線ひずみゲージ法、光弾性法、モアレ法などがある。このうちモアレ法はほかの方法に比べて、測定原理の上で次のような利点をもっている。

- (1) 特殊なモデル材料は必要でなく、実際に測定したい試料に直接適用して測定することができる。
- (2) 直交2方向の格子線からなる直角網目格子を用いると、1枚の写真から、平面内のひずみ3成分をすべて決定することができる。
- (3) 抵抗線ひずみゲージによる測定の場合のように、温度補償の問題にわずらわされることがない。
- (4) 測定は光学的であるので非接触であり、熱変形の測定を行うことも簡単で、試料を高温の炉に入れて観測窓を通して測定すればよい。

以上のような利点があるが、モアレ法を実際に適用するときには、精度の問題に直面する。モアレ法ではなんらかの方法で試料の上に格子線をつくる、普通は格子焼付法が行われているが、現段階においては、格子原板製

作の精度、焼付技術などによる制約のため、困難なくかなり広い面積に焼付けることができるのは、1000線/in(格子間隔25 μ m)どまりである。したがってフォトメータで光量変化を観測するなど特殊なデータ処理をしない限り^{1),2)}、0.1%以下のひずみを精度よく測定すること、すなわち弾性限度内のひずみの測定はほとんど不可能であった。これを解決する方法の一つとして、細かな格子線(5000線/in以上)を試料上につくる技術の開発に努力が払われたことはもちろんであるが^{3),4)}、より根本的な解決法として光干渉を用いる方法が登場してきたことに注目しなければならない。Guild⁵⁾、Post^{6),7)}、Sciammarella^{8),9)}の方法、また松本^{10),14)}および加藤^{11),15)}による変位量拡大モアレ法などがその代表的な例である。

松本らおよび加藤らの変位量拡大モアレ法は、試料表面上に焼付けられた格子線を互いに可干渉な二つのレーザ光束で照明し、格子により回折される回折波のうち、互いに共役な二つの高次回折波の干渉縞を用いることにより、従来のモアレ法に比べ、ひずみ測定感度を向上することを目的としたものである。

変位量拡大モアレ法は、比較的粗い格子を用いることによって感度の高いひずみの測定を可能にし、モアレ法の応用範囲を格段に拡大したが、一般に透明試料でないと、適用が困難という欠点があった。また、試料を照

* 原稿受付 昭和49年4月15日。昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和48年10月5日)にて発表。

** 正会員 キヤノン(株)(東京都大田区下丸子3-30-2)

*** キヤノン(株)

† 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

図1 乾板に記録された試料像のモデル

明する光学系は干渉光学系であるので、外部からの振動、あるいは試料周辺のふん囲気のゆらぎの影響があると、二つの照明光の位相差が変化し、観測面上の干渉縞を変形させ、測定誤差を生ずるおそれがある。そのほか、試料に直交格子を焼付けると二次元の変形を測定することができるとしても、照明系全体を 90° 回転しなければならないので、二次元の測定はほとんど実施不可能であった。

これらの問題は、測定を二つの段階に分離する方法により解決することができる。すなわち、まず試料面上の格子線を撮影し、次に再生光学系によって、変位量を拡大したのと同等の干渉縞をつくり、変形の状態を観測する方法である。直交格子を用いれば、撮影した格子像の中に二次元の面内変形の情報が完全に含まれており、この場合は再生光学系の中で格子像の方を 90° 回転すればよく、二次元のひずみの測定も比較的容易になる。また、振動とふん囲気のゆらぎは撮影された格子像のぼけとして現れるだけで、直接変形量の誤差としては影響しない。

本報では上記測定原理に基づいて試作した変位量拡大高次モアレひずみ測定器について報告する。

2. 測定原理

試料表面に焼付けた格子線を適当な光源により照明し、カメラを用いて乾板上に格子線の像を記録する。図1は、一方向格子線を用いた場合について得られた試料像のモデルを表す。この乾板を平行光束で照明すると、記録された格子像は回折格子として働き、一般に複数の回折光が得られる。平行光束はレーザ光を用い、また乾板には硬調現像処理をした後さらに漂白処理を行うようにすれば、回折光の強度をより大きくすることができる。

上のようにして格子像が記録された乾板は位相型回折格子となり、図1のように格子線の方を y 軸に平行とすれば、回折格子の振幅透過率は次式により与えられることになる。

$$T(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_m \exp \left\{ \frac{2\pi i m}{p} [x + u(x)] \right\} \quad (1)$$

ここで整数 m は格子面に平行な波面をもつ平面波で回折格子を照明した場合の回折光の次数、 p は格子間隔、 $u(x)$

図2 高次回折光による二光束干渉縞観測用光学系

は試料の面内変形のために、注目する格子線が変形前の位置より移動した x 方向の変位量を表す。 b_m は m 次回折光の振幅絶対値であり、 $|b_m|^2$ は回折光強度を与える。また i は複素数 $i = \sqrt{-1}$ を表す

いま、この格子を互いに可干渉な二つの平面波で図2のように照明するものとしよう。この際、格子に対する入射方向は格子面の法線 n と x 軸を含む面内とする。二つの入射波面の法線と格子面法線のなす入射角はそれぞれ α_1, α_2 である。このとき照明光の振幅分布は格子面で

$$U(x) = \exp \left(\frac{2\pi i}{\lambda} x \sin \alpha_1 \right) + \exp \left(\frac{2\pi i}{\lambda} x \sin \alpha_2 \right) \quad (2)$$

と与えられる。ただし λ は光の波長を表し、各照明光の強度分布は一樣であるとする。式(1)および式(2)より、二つの照明光により照明された回折格子からの回折光の振幅分布は

$$V(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_m \exp \frac{2\pi i}{p} \left[\left(m + \frac{p}{\lambda} \sin \alpha_1 \right) x + m u(x) \right] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n \exp \frac{2\pi i}{p} \left[\left(n + \frac{p}{\lambda} \sin \alpha_2 \right) x + n u(x) \right] \quad (3)$$

と与えられる。ここで整数 m, n は二つの照明光それぞれによる回折光の次数である。

ここで、一方の照明光が、この照明光から得られる回折光の中の N 次回折光が格子の法線方向に回折されるような角度より微小角 θ_x だけ傾けた角度で入射されるものとしよう。いま式(3)の右辺第1項で $m = N$ とし x の係数をゼロとすることにより回折光が法線方向に射出されるための入射角は $\sin^{-1}(-N\lambda/p)$ となり、 θ_x を加えることによって、照明光入射角は

$$\alpha_1 = \sin^{-1}(-N\lambda/p) + \theta_x$$

となる。もう一方の照明光の入射角 α_2 は、この照明光から得られる M 次の回折光が格子の法線方向に回折されるような角度、すなわち

$$\alpha_2 = \sin^{-1}(-M\lambda/p)$$

とする。このように、二つの入射方向 α_1 と α_2 を選び、図 2 に示すように回折格子の後ろにレンズを配置し、さらにレンズの後側焦点面内の光軸上にピンホールをおいて、格子の法線方向に回折される二つの回折光、すなわち光線 1 では N 次、光線 2 では M 次のもののみを取り出すようにする。その結果として得られる干渉縞の強度分布は、格子像と共役な像面上において、

$$I(x, y) = \left| b_N \exp 2\pi i \left[\epsilon \frac{x \sin \theta_x}{\lambda} + \frac{Nu(x)}{p} \right] + b_M \exp 2\pi i \left[\frac{Mu(x)}{p} \right] \right|^2 \quad (4)$$

となる。ただし

$$\epsilon = \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{-N\lambda}{p} \right) \right]$$

式 (4) より、強度分布は

$$I(x, y) = b_N^2 + b_M^2 + 2b_N b_M \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon x \sin \theta_x) + 2\pi \frac{N-M}{p} u(x) \right] \quad (5)$$

で表されることになる。

式 (5) で与えられる二光束干渉縞のコントラストを最大にするには、干渉する各干渉光の強度を等しくすればよい。回折格子から回折される光の強度は次数によって変化するが、互いに共役な次数、例えば $\pm N$ では強度が等しくなる。したがって、式 (5) では $M = -N$ とすればよく、このときの干渉縞強度分布は

$$I(x, y) = 2b_N^2 \left[1 + \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon x \sin \theta_x) + 2\pi \frac{2N}{p} u(x) \right\} \right] \quad (6)$$

となる。式 (6) により明縞は右辺余弦関数の偏角がゼロまたは 2π の整数倍で生じ、したがって偏角を $2\pi Q$ において明縞の座標を求めると

$$x = D \left[Q - \frac{2N}{p} u(x) \right], \quad Q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

ただし

$$D = \frac{\lambda}{\epsilon \sin \theta_x}$$

D は変位がゼロのとき、すなわち初期状態における干渉縞の縞間隔を表し、格子線ピッチ p 、照明光の波長 λ 、縞次数のほか、入射の微小な傾角 θ_x によって定まる。変位量 $u(x) = 0$ の初期状態から、変位 $u(x)$ を生じたときの縞座標の変化は式 (7) より

$$\Delta x = \frac{D}{(p/2N)} u(x) \quad (8)$$

したがって Δx を測定することにより変位量 $u(x)$ は

$$u(x) = \frac{(p/2N)}{D} \Delta x \quad (9)$$

として求められる。従来のモアレ法では、あらかじめミスマッチを与え、間隔を D とした初期モアレを用いる場合、変位量 $u(x)$ によるモアレ縞の x 座標の変化は

$$\Delta x = \frac{D}{p} u(x) \quad (10)$$

で与えられる。したがって、従来法での変位量の計算式は

$$u(x) = \frac{p}{D} \Delta x \quad (11)$$

で与えられる。

式 (8) と式 (10) あるいは式 (9) と式 (11) を比較すると、ここでの変位量拡大モアレ法では格子間隔 p の格子線を用いて、従来のモアレ法で格子間隔 $p/2N$ の格子線を用いた場合と同じ測定感度のひずみ測定が可能であることがわかる。いいかえると、同一変位量 $u(x)$ に対して、干渉縞観測面上での座標変位は従来のモアレ法に比較して $2N$ 倍に拡大されて観測されることになり、これが変位量拡大モアレ法という名前を用いている理由でもある。

式 (6) または式 (7) により、照明光のうち一方をわずかに傾けて与えた角 θ_x によって、干渉縞の間隔が任意に変化することがわかる。これはモアレ法でミスマッチを与えることに相当する。一方において、試料の y 軸方向に対して微小な入射角を与えれば、干渉縞を観測面上で任意に回転することが可能であり、これはモアレ法でミスマッチメントを与えることに相当する。

以上の説明は簡単のために y 軸に平行な平行格子線の場合について行ったが、 x, y 軸に平行な直交格子線を用いる場合にも拡張することができ、二次元の面内変形量 $u(x, y)$ が試料面上でゆるやかに変化するときには、試料を 90° 回転し、 x 軸に平行な格子線についても測定を繰返すことにより、変位量の x および y 方向成分、さらにそれからひずみの 3 成分を求めることが可能である。その詳細およびモアレ法におけるデータ処理の試みについては、本報告の変位量拡大法も含めて、モアレ法によるひずみの測定法を解説した山田ら^{12,13)}の研究を参照されたい。さらに、図 2 では透過型回折格子を示したが、反射型の回折格子についても同様に測定が可能である。

3. 試作装置の構造

本節では、上の 2 節で述べた原理に基づいて試作した測定器について説明する。測定器は撮影装置と再生装置から構成され、図 3 は各装置の外観写真、図 4 は装置構造の説明図である。測定は、500 線/in の密度の格子線を用

(a) 撮影装置

(b) 再生装置

図3 試作装置

表面に焼付けた試料について行うことを標準とし、試験前の状態あるいは試料に負荷を加えたときの格子線の変形状態を撮影装置で乾板上に撮影する。次に、こうして得た乾板を再生装置にセットして、モアレ縞を観察する方式をとっている。以下に撮影装置と再生装置の構造を詳しく説明する。

i) 撮影装置: 撮影装置は試料の格子線の状態を正確に乾板に撮影する装置である。倍率が1/2の縮小撮影であり、試料の50 mm ϕ の範囲を撮影できるようになっている。装置は、ハロゲン電球による照明系を内蔵しており、45°に傾けた半透鏡により、試料に対しても垂直にムラのない照明を行うことができるようになっている。

撮影にあたっては、試料面と乾板面が平行でないと、倍率誤差のために、格子線が見かけ上、変形したのと同じ状態で乾板上に像が写されてしまう。そのオーダは、試料面と乾板面の相対的な傾きが5分のとき、ひずみに換算して、約0.02%の程度である。したがって、撮影装置はオートコリメータによって乾板面と試料面の傾きをチェックし、補正できるような構造となっている。オー

(a) 撮影装置

(b) 再生装置

図4

トコリメータは撮影時には支障のないように、はね上げ式になっている。このほか、50倍の合焦用顕微鏡で像面の状態を観察することができ、これにより正確なビント合せを行うことができる仕組である。

ii) 再生装置: 再生装置は、一種の光学干渉計であって、He-Neガスレーザからのビームは顕微鏡対物レンズとコリメータレンズとによって、30 mm ϕ に広げられた平行光束となる。こうしてできた平行光束はビームスプリッタにより二つに分割され、格子線を撮影した乾板を2方向から照明することになる。入射角は、一方の照明光によって乾板上の格子線が生じる+5次の回折光と、もう一方の照明光により生じる-5次回折光がいずれも乾板面からほぼ垂直に出射するように決めてある。

撮影レンズの焦点面には絞りが設けてあって、前記の+5次回折光と-5次回折光以外の光は通過できないようになっている。したがって、絞りの後では+5次回折光と-5次回折光との2光束の干渉の結果がモアレ縞と

して観察されることになる。こうして得られるモアレ縞は、前節で述べた理論によれば従来のモアレ縞に比べて10倍の感度を有し、従来の方法で5000線/inの線密度の格子線を用いる場合とまったく等価である。干渉によってできたモアレ縞は35mmカメラのフィルム上に撮影記録する。そのあとの処理、すなわちモアレ縞模様からひずみを求める方法は、従来法の場合とほとんど差がない。

ここでの再生装置では、二つの照明光を相対的に傾けることによって、従来のモアレ法というミスマッチとミスマイメントを簡単に与えることができる。それを実際に行うには、図4に示したように再生装置の二つのミラーを適当に傾ければよい。また、乾板を保持する保持台は、容易に90°回転することができ、試料に直交格子を焼付けておけば、試料平面内のひずみの3成分を求めることも困難でない。なお、撮影レンズを通った光束はビームスプリッターで分けられ、その一部分がビントガラス面に向かうが、ビントガラスは撮影レンズの焦点面上におかれていて、各次数の回折パターンの観察に用いることができる。その結果をモニタとして、乾板保持部の回転位置の割出し、および±5次回折光の選択を行っている。

ガラス板や樹脂板などの透明な材料では、再生装置の乾板保持部の位置に試料をセットするようにすれば、撮影装置での撮影は必要でなく、直接に変形の測定が可能である。ただし、そのときは撮影装置が倍率1/2に設計されていることを考えて、試料に焼付ける格子線の線密度を1000線/inとしなければならない。これに伴って測定の感度は上がり、従来法で10000線/inの線密度をもつ格子線を用いる場合に等価となる。

以上に述べた試作装置によって弾性および弾・塑性ひずみの測定を行った例については別報で報告したい。

4. まとめと謝辞

本論文では、変位量拡大モアレ法（または縞数拡大モアレ法）の原理を解説し、それに基づいて試作した装置の概要について報告した。本論文の方法は、従来のモアレ法に比較して10倍の感度を有し、いままで困難とされていた弾性オーダのひずみの測定に十分に耐え得ることが期待できる。しかも開発した装置によりモアレ法の適用は、精度の点ばかりでなく、きわめて容易になったと考えられる。測定の実際と適用例については次報で改

めて報告するが、モアレ法の感度を格段に向上したこの方法が、工学の分野で広く利用されるにいたることを筆者らは期待している。

終わりにこの試作装置の製作にあたって、キャノン株式会社・大塚実氏を始め各位の協力を得たことに感謝する。

文 献

- 1) C. A. Sciammarella: Basic Optical Law in the Interpretation of Moiré Patterns Applied to the Analysis of Strains—Part 1, Exp. Mech., 5, 5 (1965) 154.
- 2) B. E. Ross, C. A. Sciammarella and D. Sturgeon: Basic Optical Law in the Interpretation of Moiré Patterns Applied to the Analysis of Strains—Part 2, Exp. Mech., 5, 6 (1965) 161.
- 3) J. H. Underwood and D. P. Kendall: Measurement of Microscopic Plastic-strain Distributions in the Region of a Crack Tip, Exp. Mech., 9, 7 (1969) 296.
- 4) B. J. Schaeffer, H. W. Liu and J. S. Ke: Deformation and the Strip Necking Zone in a Cracked Steel Sheet, Exp. Mech., 11, 4 (1971) 172.
- 5) J. Guild: The Interference Systems of Crossed Diffraction Gratings, Oxford Univ. Press, London (1956).
- 6) D. Post: Analysis of Moiré Fringe Multiplication Phenomena, Appl. Opt., 6, 11 (1967) 1938.
- 7) D. Post: New Optical Methods of Moiré Fringe Multiplication, Exp. Mech., 8, 2 (1968) 63.
- 8) C. A. Sciammarella and N. Lurowist: Multiplication and Interpolation of Moiré Fringe Orders by Purely Optical Techniques, Trans. ASME, Ser. E, 34, 2 (1967) 425.
- 9) C. A. Sciammarella: Moiré-fringe Multiplication by Means of Filtering and a Wave-front Reconstruction Process, Exp. Mech., 9, 4 (1969) 179.
- 10) 松本和也, 高島松雄, 小瀬輝次: 位相差増幅干渉法(IV), 第18回応用物理学関係連合講演会予稿集(1971-4) 211.
- 11) 加藤和典, 山本文雄, 室田忠雄, 神馬 敬: 回折光の干渉によるモアレ法について, 昭和46年度塑性加工春季講演会講演論文集(1971-5) 269.
- 12) 山田嘉昭: モアレひずみ測定法の原理と応用, 塑性と加工, 13, 132 (1972) 68.
- 13) 山田嘉昭, 横内康人, 輪竹千三郎: モアレ法のデータ処理に関する試み, 昭和47年度塑性加工春季講演会講演論文集(1972-5) 233.
- 14) K. Matsumoto and M. Takashima: Improvement on Moiré Technique for In-plane Deformation Measurements, Appl. Opt., 12, 4 (1973) 858.
- 15) 加藤和典, 山本文雄, 室田忠雄, 神馬 敬: 回折光の干渉を用いるモアレ法によるひずみ測定法の改良, 日本機械学会論文集, 39, 318 (1973) 546.