

535.4/.5 : 539.3.082.5

ホログラフィ・モアレ法によるひずみ測定*

入交 裕**, 竹内洋一郎***, 野田直剛†, 米谷 彰††

1. 緒 言

実験的応力解析, 変位計測の方法として広くモアレ法が用いられている。モアレ法は平面的ひずみの広域分布の概要を直視的に察知し得る特長をもっている。しかし, その反面ひずみ感度および測定精度において, 他の解析測定法に比し低いことが指摘されている。したがって, 変形の大きい分野ではよく利用されているのに対し, 弾性域のような微小変形に対する利用には難があるようである。モアレ法の感度は試料に付せられている格子線の密度に依存し, 現時点では, 1 in 当たり 2000 本が限度とされている。この限られた線密度の格子を付した測定対象物の変形の情報をつかいて高感度・高精度で得るかの方法について内外において各種の研究が行われ, 数多くのすぐれた提案や実験が報告されている。その主たるもの一つとして, Guild⁽¹⁾, Post⁽²⁾ らによって提唱され, Sciammarella⁽³⁾, Boone⁽⁴⁾, 松本⁽⁵⁾, 加藤⁽⁶⁾によって実用的な改善がなされた「マルチプリケーション法」がある。これは比較的薄い透明試料の面内変形に適用されるもので, 格子線を印加した試料面に可干渉性の平行単一光を照射し, 変形前および変形後の格子で回折してくる光を同一感光乾板上で干渉させ, 適当な高次の回折光を選択することにより, より密な格子線から得られるモアレじまと同等のものを得るもので, 10 倍程度の改善は容易である。これが実行に当たり, 平行光が試料を通過する時に生じる回折光のうち, 適当な一対の共役なものを選びレンズ系を通して干渉させる方法と, 試料で回折後, 同一光軸に合致するように, 試料前面から適当な高次回折角をもたせた二つの平行光で照射し, 光軸上の乾板上で干渉させる方法⁽⁷⁾との二つがある。前者においては 10 倍以上の増倍を望むには回折角が大きくなるので大形のレンズ装置を必要とし, かつ利用する回折光は非常に弱いも

のとなる。これに対し, 後者では, 回折角, 光の強さの選択において範囲の広いという利点があり, 加藤⁽⁸⁾, 奥野⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾はこれに mismatch 法, misalignment 法を併用して, 変位量拡大・感度向上に良い成果を挙げている。

変位を表すモアレじまから, ひずみに関する必要な情報を得るためには, 微分操作を必要とする。変位を表すモアレじまを測微光度計などを用いて精密に計測し, 結果を数値的に, あるいは幾何学的に微分する方法と, 変位モアレじまを微小量シフトして, 二次モアレじまを作りこれからひずみ成分を讀取する方法とがある。この二次モアレ法で導関数のしま模様を得る方法は, Dantu⁽¹¹⁾により示唆され, さらに荷重によって変形した格子から直接微分モアレじまが得られることを Parks-Durelli⁽¹²⁾ が指摘し, Sciammarella-Chang⁽¹³⁾ により発展させられている。わが国においても, ここ数年来, 加藤⁽⁶⁾⁽⁸⁾, 松本⁽¹⁴⁾がシフト法の二次モアレじまを mismatch 法により改善する方法などの研究がなされている。

さらに Boone-Verbiest⁽⁴⁾, Saito ら⁽¹⁵⁾は微弱なモアレ回折光の記録にホログラフィの応用が可能であることを示し, 齊藤⁽¹⁶⁾, 加藤⁽⁶⁾も同種の手法により高感度の結果が得られることを報告している。

本研究は負荷により変形した格子線を乾板上に写し撮り, これを格子原板として, モアレシフト法を用いて, 二次モアレじまに相当する変位の微分のしま模様を変形格子から直接得るもので, 高次の微弱な回折光をホログラフィを応用して記録, 二重露光法により同一乾板上に干渉じまを作らせるもので, 複雑な光学装置を多用せず, 高倍率のマルチプリケーションを達成し, 透明試験片の面内変形のひずみ成分の広域モアレじまによる測定につき報告するものである。

2. 測定理論

透明試料に付された直交格子によって得られる振幅伝達関数はフーリエ理論を用いると

$$F(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{mn} \exp \left[2\pi i \left(\frac{nx}{p_x} + \frac{my}{p_y} \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

で表すことができる。ここに, C_{mn} はフーリエ係数,

* 昭和 50 年 11 月 27 日 中国四国支部徳島地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 51 年 2 月 20 日。

** 正員, 阿南工業高等専門学校 (阿南市見能林町青木)。

*** 正員, 大阪府立大学工学部。

† 正員, 静岡大学工学部。

†† 准員, 石川島播磨重工業会社。

p_x および p_y はそれぞれ印加された格子の x 軸方向, y 軸方向のピッチである. ($n, m=0$) および ($n=0, m$) で与えられる次数の回折光はそれぞれ x 方向および y 方向の導関数を得るために用いられる. そして ($n, m=0$) 次の回折光の強度は次の式で与えられる.

$$I(n, 0) = \kappa C_{n,0}^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで, κ は定数である.

図1に示すようなホログラフィによる測定装置において参照光の複素振幅 E_r は,

$$E_r = e_r \exp(i\phi_r) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる. ここで e_r, ϕ_r はそれぞれ参照光の振幅, 位相を表す.

また, 変形した格子を記録した乾板からの n 次の回折光の複素振幅 (E_n) は,

$$E_n = e_n \exp\left\{i \frac{2\pi n x}{p(x)}\right\} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる. ここで, e_n は n 次の回折光の振幅を表し, $p(x)$ は変形した格子のピッチである. 第1回目の露光によって乾板に記録される複素振幅 E_i は,

$$E_i = E_r + E_n \dots\dots\dots (5)$$

これに対応する光の強度は,

$$I_1 = e_r^2 + e_n^2 + e_r e_n \left[\exp\left\{i \left(\frac{2\pi n x}{p(x)} - \phi_r \right)\right\} + \exp\left\{-i \left(\frac{2\pi n x}{p(x)} - \phi_r \right)\right\} \right] \dots\dots\dots (6)$$

ついで, 変形した格子を記録した乾板を Δx だけ移動すなわちシフトし, 同乾板上に第2回目の露光を行う. シフトした後の n 次回折光の複素振幅 E_n' は,

$$E_n' = e_n' \exp\left\{i \frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)}\right\} \dots\dots\dots (7)$$

で表される. ここで, e_n' はシフト後の n 次回折光の振幅, $p(x+\Delta x)$ はシフト後の変形格子のピッチである. 第2回目の露光で乾板に記録される強度は,

$$I_2 = e_r^2 + e_n'^2 + e_r e_n' \left[\exp\left\{i \left(\frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)} - \phi_r \right)\right\} + \exp\left\{-i \left(\frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)} - \phi_r \right)\right\} \right] \dots\dots\dots (8)$$

この2回にわたる露光によって得られる総強度は,

$$I_t = I_1 + I_2 \dots\dots\dots (9)$$

露光時間を τ とすると, 乾板上の総露光量は

$$U_t = \tau I_t \dots\dots\dots (10)$$

露光が写真乾板の露光特性曲線の直線部分内で行われたとすれば, 現像後の乾板の伝達関数 T は, 次の式で与えられる.

$$T = a - b U_t \dots\dots\dots (11)$$

ここで, a および b は乾板に使用されて

いる感光乳剤の特性に依存する定数である. 式(11)に式(6), (8), (9) および(10)の諸式を代入する. 考察を簡単にするために, $e_n = e_n'$ とすると,

$$T = a - b \tau \left[2(e_r^2 + e_n^2) + e_r e_n \left\{ \exp\left(i \frac{2\pi n x}{p(x)} - i\phi_r\right) + \exp\left(-i \frac{2\pi n x}{p(x)} + i\phi_r\right) + \exp\left(i \frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)} - i\phi_r\right) + \exp\left(-i \frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)} + i\phi_r\right) \right\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

このようにして作られたホログラムを参照光で照射し, 記録された情報を再生する.

参照光 E_r で照射すると観察される再生像の複素振幅 E_{TR} は次のようになる.

$$E_{TR} = e_r^2 e_n \left[\exp\left\{i \frac{2\pi n x}{p(x)}\right\} + \exp\left\{i \frac{2\pi n x}{p(x+\Delta x)}\right\} \right] \dots\dots\dots (13)$$

再生像の強度は,

$$I_{TR} = 2e_r^4 e_n^2 + 2e_r^2 e_n \cos 2\pi n x \left[\frac{1}{p(x+\Delta x)} - \frac{1}{p(x)} \right] \dots\dots\dots (14)$$

式(14)のコサイン項は,

$$2\pi n x \left[\frac{1}{p(x+\Delta x)} - \frac{1}{p(x)} \right] = 2\pi n x \left[\left\{ \frac{1}{p(x+\Delta x)} - \frac{1}{p} \right\} - \left\{ \frac{1}{p(x)} - \frac{1}{p} \right\} \right]$$

のように考えることができる. ここで, p は変形していない格子のピッチである.

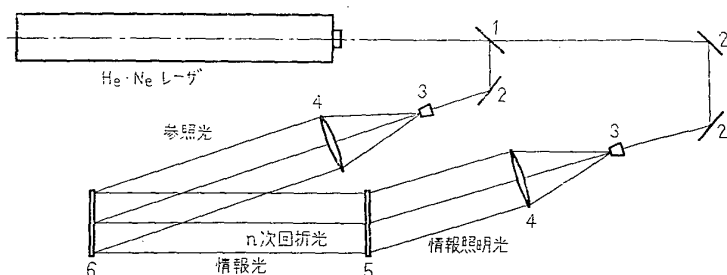
$U(x)$ を x 方向の変位成分とすると,

$$2\pi n x \left[\frac{1}{p(x)} - \frac{1}{p} \right] = \frac{2\pi n}{p} (u(x))$$

と表すことができ, コサイン項は次のようになる.

$$2\pi n x \left\{ \frac{1}{p(x+\Delta x)} - \frac{1}{p} \right\} - 2\pi n x \left\{ \frac{1}{p(x)} - \frac{1}{p} \right\} = \frac{2\pi n}{p} u(x+\Delta x) - \frac{2\pi n}{p} u(x) = \frac{2\pi n}{p} \{u(x+\Delta x) - u(x)\}$$

したがって, 式(14)は次のように表される.



- 1 ビームスプリッタ
- 2 全反射鏡
- 3 ピンホール
- 4 コリメーティングレンズ
- 5 変形格子を撮影した乾板
- 6 ホログラム乾板

図1 ホログラフィによる測定装置

$$I_{TR} = 2e_r^4 e_n^2 + 2e_r^2 e_n \cos \frac{2\pi n}{p} \{u(x+\Delta x) - u(x)\} \dots (15)$$

微分法の平均値定理により,

$$\frac{\Delta u(x)}{\Delta x} = \frac{u(x+\Delta x) - u(x)}{\Delta x} = \frac{\partial u(x+\theta \Delta x)}{\partial x} \quad (0 < \theta < 1) \dots (16)$$

式 (16) を (15) に適用して,

$$I_{TR} = 2e_r^4 e_n^2 + 2e_r^2 e_n \cos 2\pi \left[\frac{n \Delta x}{p} \frac{\partial u(x+\theta \Delta x)}{\partial x} \right] \dots (17)$$

式 (17) 中の

$$\cos 2\pi \left[\frac{n \Delta x}{p} \frac{\partial u(x+\theta \Delta x)}{\partial x} \right]$$

によって, 等ひずみを示す「しま模様」が得られる. ひずみを表す導関数は, $\partial u(x+\theta \Delta x)/\partial x$ でひずみを $n \Delta x/p$ 倍した明暗のしま模様が現れてくる. したがって, 得られたモアレじまのしま間隔は $p/(n \Delta x)$ のひずみを表し, この $p/(n \Delta x)$ を「しま値」という. シフト量 Δx が十分小さいとき真のひずみ $\partial u(x)/\partial x$ に近づく. 格子密度が高くなるほど, すなわち p が小さくなるほど, また回折次数 n が高くなるほど, さらにシフト量 Δx が大きいほど「しま値」は小さくなり, 高感度のひずみ成分のモアレじまが得られる. しかし, Δx の増大は精度の低下をきたす.

3. 実験

実験は次のような順序で行われた.

- (1) 変形格子を記録した乾板の製作
- (2) ホログラムの製作
- (3) 再生像の撮影

3.1 変形格子を記録した乾板の製作 表面に感光乳剤を塗布した厚さ 6.35 mm の透明エポキシ樹脂板の全面に 1 in 当たり 1000 本の密度の直交格子をマスタープレートを用いて写真法により転写する. この板から内径 50.8 mm, 外径 101.6 mm の円環を削り出

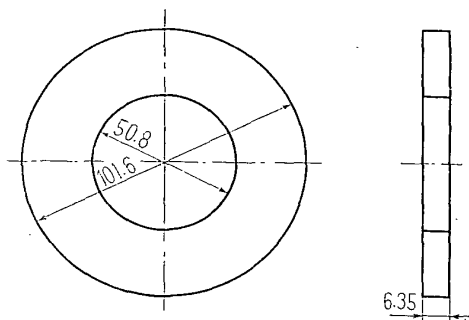


図 2 試験片の形状寸法.

した. このとき, 切削部に与える熱影響を少なくするように十分注意した. 図 3 に示すように適当な荷重装置を用いて, 円環に直径方向の圧縮荷重を加え, 円環に写真乾板を密着させておき, 円環側よりレーザー平行光を照射して荷重によって変形した直交格子を乾板に写し撮った.

3.2 ホログラムの製作

図 1 に示したようなホログラフィ装置を準備する. 3.1 節に述べたようにして作られた直交格子の変形を記録した乾板を水平および垂直方向に微動できる保持台に取付け, 図中 5 の位置に置き, He-Ne レーザからのコヒーレントな単色平面波の照射を受ける. 格子を通過する光は一定角の回折をして進む. その回折角は記録をのぞむ回折光の次数から, 次に示す関係から算出される.

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{p}$$

ここに, θ は回折角, n は回折次数, λ は照射する光の波長, そして p は格子のピッチである. この回折角によりホログラムを撮影する位置を定め, 6 の位置に乾板をおき, 変形格子を記録した乾板 5 からの情報光と, 情報光と光源を同じくする参照光との照射を同時に受ける. 情報光と参照光との強さは, 本実験においては同じ程度が適当であったが, 装置の状態と乾板の感度により変化が考えられ, 数回の試行により決定される. 第 1 回の露光について, 変形格子を記録した乾板を垂直方向または水平方向に微小量シフトさせ, 第 2 回の露光を重ねる. 垂直格子が変形したものを一次露光し, その上に, この乾板を水平方向にシフトしたものを二重撮影すると $\partial u/\partial x$ の情報を含んだホログラムが得られる. 同様に, 垂直格子の変形とその垂直移動, 水平格子の変形とその水平移動, 水平格子の変形とその垂直移動の各組合せで, それぞれ $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$, $\partial v/\partial y$ の情報をもったホログラムが得られる.

3.3 再生像の撮影

得られたホログラムを図 1 におけるホログラム撮影時の位置 6 におく. 変形格子

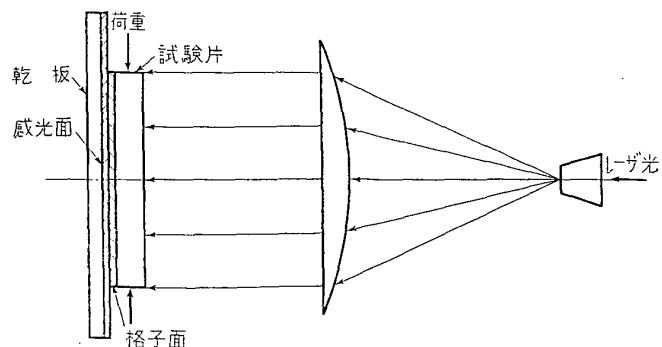
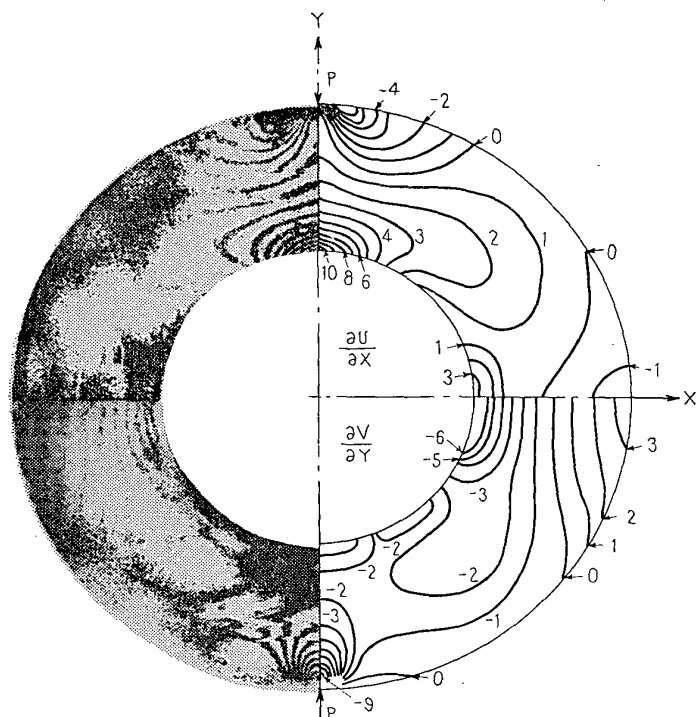


図 3 変形した格子を記録した乾板の製作

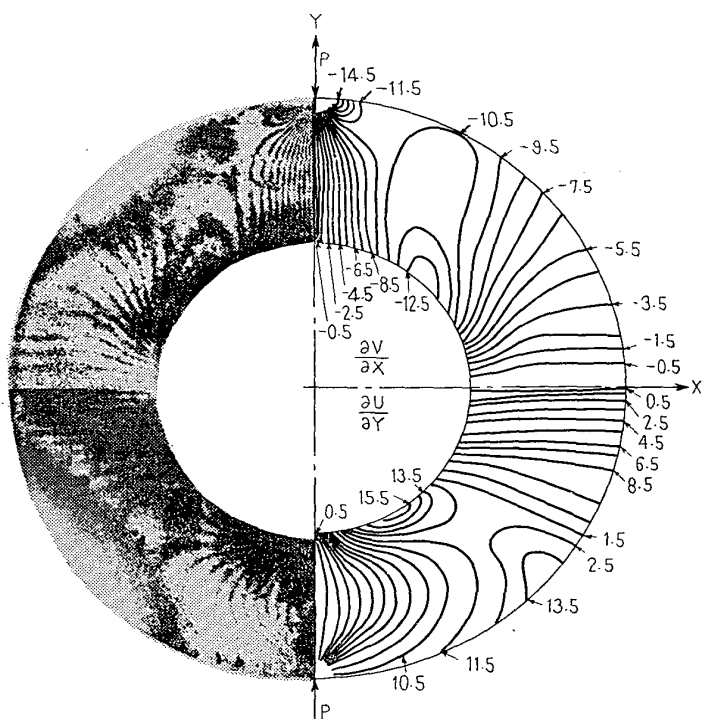
の乾板を照射した光はついでににてさえぎられ, 参照光のみで照射し, ホログラムの後方から観察すると, 変形格子の乾板の置いてあった位置にひずみ成分のしま模様を含む虚像を得る. レンズ系を通して, その虚像内にあるひずみ成分の分布を示す「しま模様」を拡大し, カメラで撮影する.

4. 実験結果と考察

ひずみの二次元的表現 $\epsilon_x = \partial u / \partial x$, $\epsilon_y = \partial v / \partial y$ および $r = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$ に必要な $\partial u / \partial x$, $\partial u / \partial y$, $\partial v / \partial x$, $\partial v / \partial y$ の4種のひずみ成分のモアレじまを得, 図4(a), (b)に示した. これらは1in 当たり1000本の直交格子を印加した円環形試験片を用いての第九次の回折光によるモアレじまで, 1in 当たり9000本の格子密度をもつものに対応するしま模様である. これらのしまは, ひずみ間隔が0.00222の等ひずみ線を表し, 4種の線図より試験片表面の任意の点におけるひずみが容易に決定できる. また, 円環の水平軸に沿った部分のひずみ分布について, 実験で得られた結果と理論解析値*との比較をして図5に示した. さきに, Sciammarella⁽¹³⁾らは, 本実験に使用した試験片とほぼ同一形状のものに1in 当たり300本の格子を用いて, 第四次の回折光による結果を発表している. それと比較するとひずみ分布は全く相似していると共に, 本実験では8倍近い感度の向上が達成されている. とは申せ, 弾性域変形の計測に応用するに



(a) ひずみ成分 $\partial u / \partial x$, $\partial v / \partial y$ の干渉じま (しま値 0.00222)



(b) ひずみ成分 $\partial u / \partial y$, $\partial v / \partial x$ の干渉じま (しま値 0.00222)

図4

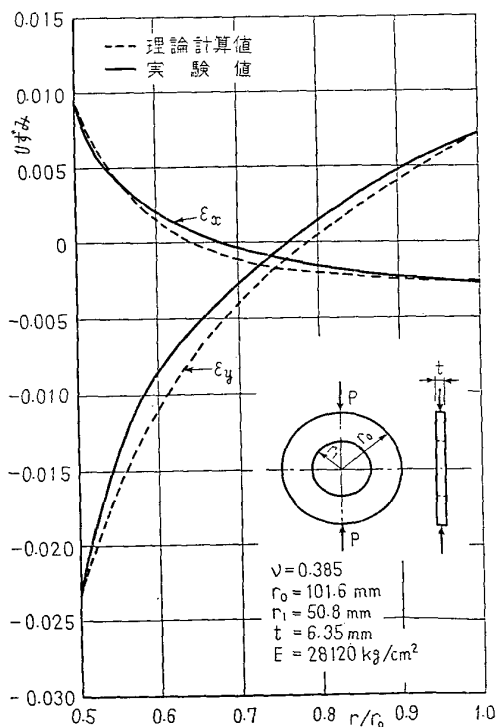


図5 円環の水平軸に沿った部分のひずみ分布

* 円板に集中荷重が作用する場合の解⁽¹⁷⁾を参考にして, 複素関数法を用いて解析した. その解析概要は付録に示す.

は今一步の感がある。本実験では、ミスマッチ法は用いられていないが、変形格子基板を製作の際、適当なミスマッチを与えることにより、加藤ら⁽⁶⁾が報告されているように、一段の改善が期待できる。また、不透明物体表面の変形測定については格別の関心が払われている所であるが、変形した試料表面の格子を奥野ら⁽¹⁰⁾が用いた手法により撮影し、得られた原乾板を本実験における格子乾板とすればよく、さらにこの段階で、ミスマッチを与えることも考慮されることである。本研究の実験装置は比較的単純・簡単なもので、特殊な技術も必要とせず、10 cm、四方程度の広さの広域変形・ひずみ状態を測定できる特長を有し、今後、ホログラフィ技術、写真処理技術の進歩そしてミスマッチ法などの併用などにより、さらに高次の回折光による測定も可能である。以上のようなことから、今後内外の諸成果を参考にし、測定の感度・精度の向上改善につとめ、特に、不透明体の弾性的変形の測定に簡易に応用し得る方途を求めたいと思っている。なお、この研究は、昭和 47 年度、文部省科学研究費によって行われたものであり、いろいろ指導をいただいた C. A. Sciammarella に心から感謝の意を表します。

付 録

平面応力の場合、応力-ひずみの間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), & \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\ \varepsilon_{xy} (= \gamma) &= \frac{1}{G}\sigma_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

直角座標系の応力と円柱極座標系の応力 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$ の間の関係は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta - \sigma_r + 2i\sigma_{r\theta} &= e^{2i\theta}(\sigma_y - \sigma_x + 2i\sigma_{xy}) \\ \sigma_\theta + \sigma_r &= \sigma_x + \sigma_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

複素応力関数 $\phi(z), \psi(z)$ を用いると

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r + \sigma_\theta &= 4R_\theta[\phi'(z)] \\ \sigma_\theta - \sigma_r + 2i\sigma_{r\theta} &= 2e^{2i\theta}\{\bar{z}\phi''(z) + \psi''(z)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{r_1^2 P}{2r_0(r_1^2 - r_0^2)\pi} \\ A_{2K+1} &= \frac{P[(r_1/r_0)^{4K+2} - 4K^2(r_1/r_0)^4 + (8K^2 + 2K - 1)(r_1/r_0)^2 - 4K^2 - 2K]}{\pi(2K+1)r_0^{2K+1}[(r_1/r_0)^{4K+1} + (r_1/r_0)^{-4K+2} - 4K^2\{(r_1/r_0)^2 - 1\}^2 - 2(r_1/r_0)^2]}, & K \geq 1 \\ A_{1-2K} &= \frac{P[(r_1/r_0)^{4K+2} + (2K-1)(r_1/r_0)^2 - 2K]}{\pi(2K-1)r_0^{-2K+1}[(r_1/r_0)^{4K+2} + (r_1/r_0)^{-4K} - 4K^2\{(r_1/r_0)^2 - 1\}^2 - 2(r_1/r_0)^2]}, & K \geq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

未知係数 A_{2K+1} が式 (25) により求められ、式 (22) の $\phi_1(z)$ が決定される。 $\phi_1(z)$ を式 (23) に代入すること

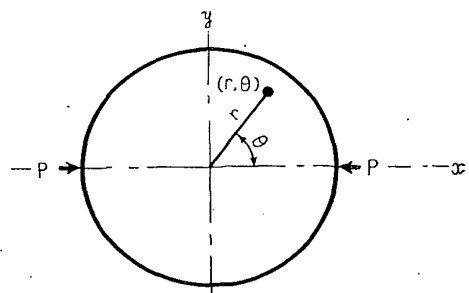


図 6

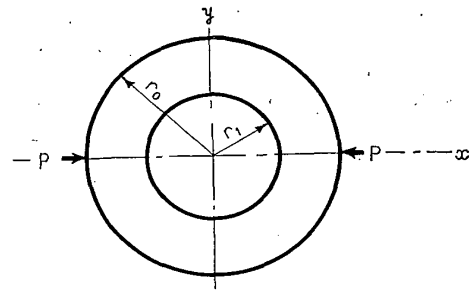


図 7

ここに、 $\bar{z} = x - iy$

円板の場合の解を参考にすると、本問題に対し

$$\left. \begin{aligned} \phi(z) &= -\frac{P}{r_0} \left\{ \frac{r_0}{2\pi} \ln \frac{1+z/r_0}{1-z/r_0} - \frac{z}{2\pi} \right\} + \phi_1(z) \\ \psi(z) &= \frac{Pz}{2\pi} \ln \frac{1+z/r_0}{1-z/r_0} + \psi_1(z) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

と置くことができる。

領域と荷重の対称性により

$$\phi_1(z) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} A_{2K+1} z^{2K+1} \dots\dots\dots(22)$$

となる。ここに、 A_{2K+1} は未知係数、 K は整数である。

ここで、解析接続法を導入する。

$r=r_0$ の外側境界条件より

$$\phi_1'(z) = -\frac{r_0^2}{z} \phi_1'(z) - \bar{\phi}_1\left(\frac{r_0^2}{z}\right) \dots\dots\dots(23)$$

となる。ここに、 $\bar{\phi}_1$ は解析関数 $\phi_1(z)$ の共役関数を表す。内側境界条件 $r=r_1$ で

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = 0 \dots\dots\dots(24)$$

により, $\phi_1'(z)$ が定まり, ついで式(21)の $\phi(z)$ および $\psi(z)$ が決定される.

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ は $\phi(z), \psi(z)$ を式(18)~(20)に考慮して求められる.

文 献

- (1) Guild, J., *The Interference Systems of Crossed Diffraction Gratings*, (1956), Oxford Univ. Press.
- (2) Post, D., *Appl. Opt.*, 6-11 (1967-11), 1938.
- (3) Sciammarella, C.A. and Lurowist, N., *Trans. ASME, Ser. E*, 34-2 (1967-6), 425.
- (4) Boone, P. and Verbiest, R., *Optical Acta.*, 16-5 (1969), 555.
- (5) 松本・小倉, 機誌, 74-631 (昭 46-8), 1036.
- (6) 加藤・ほか3名, 機論, 39-318 (昭 48-2), 546.
- (7) 加藤, 機誌, 79-697 (昭 51-12), 1151.
- (8) 加藤・ほか2名, 機論, 41-346 (昭 50-6), 1702.
- (9) 奥野・ほか3名, 精密機械, 41-5 (昭 50-5), 448.
- (10) 奥野・ほか2名, 精密機械, 41-6 (昭 50-6), 547.
- (11) Dantu, P., *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Publ. No. 57-6 (1957).
- (12) Parks, V.J. and Durelli, A.J., *Trans. ASME, Ser. E*, 33-4 (1966-12), 901.
- (13) Sciammarella, C. A. and Chang, F. Y., *Exp. Mech.*, 11-3 (1971-3), 97.
- (14) Matsumoto, K., ほか4名, *Proc. ICO Conf. on Optical Method in Scientific and Industrial Measurements*, (1975), 455.
- (15) Saito, H., ほか2名, *Seminar of Information Processing by Holography, Washington D.C.*, (1969), 105.
- (16) Saito, H., ほか2名, *Sci. Papers Inst. Phys. & Chem. Reser.*, 64 (1970), 104.
- (17) Muskhelishvili, N.I., *Some Basic Problems of The Mathematical Theory of Elasticity*, (1963), 330, Noordhoff.

討 論

〔質問〕 加藤和典(東京工業大学)

(1) 試験片上の格子をいったん乾板に記録してから用いるのは回折効率を高めるためか. またその記録の際レーザを用いておられるが, レーザの強度のむらは問題にならないであろうか.

(2) ホログラム製作時の露光時間, レーザ出力, 乾板の種類, 漂白液, エポキシ樹脂板上の感光乳剤の種類などを付記していただければ幸いです.

〔回答〕 (1) 本法においては, 荷重により変形した状態の格子をシフトするわけであるので, ホログラム作製の場において, 試験片に荷重をかけた状態で荷重装置系全体を X 方向または Y 方向に微量シフトすることは困難であった. したがって, 乾板に転写する方法をとった. さらに, 本報告では, 実験結果を理論計算結果と比較する必要上, 得られる像が試験片の軸について対称であることが望ましかった. しかし, 垂直格子線と荷重軸とを一致させ, 軸に対称な変形を与えることは難しく, 試行を重ね最適の乾板を選択する方法を用いた. 以上が, いったん乾板に記録した主な理由だが, 適当な装置を製作・使用すれば, その煩は相当軽減され得るものと考ええる. なお, この際のレーザ照射光の強度むらは少なくとも実験に支障を与える程のものではなかった.

(2) ご質問に答え, 列記する.

試験片材料は Kodak Photoplast Plate (8 in × 10 in) 厚さ 0.250 in を用いた. これには一般乾板と同じように感光乳剤が塗布されており, これに直交格子原板(イギリス製 8 in × 10 in)を重ね, 露光し Kodak 指定のとおり現象・定着の処理をした.

乾板は, AGFA-GEVAERT SCIENTIA 10 E 70 および 10 E 75 を用い, 現象, 定着は指定のとおり

行った.

レーザ出力について, 試験片の変形格子を 10 E 75 に転写する際は, 20 mW 出力のレーザを, ホログラム製作時には 100 mW 出力のものを使用した.

ホログラム製作時の, 物体照射光と参照光との強度比は 5:5 ないし 4:6 で, 露光時間は, シフト前およびシフト後それぞれ 2分 30秒, 計5分である.

〔質問〕 高崎 宏(静岡大学工学部)

(1) 結果には関係しないが, 変形格子の置いてあった位置に, しま模様の虚像を見るのであれば, モアレと考えるより, ホログラフィによる二重露光干渉として統一して考えたほうがよいように思われる. どう考えられるか.

(2) この方法では, 試料に印加された格子の, 基準状態における誤差が, そのまま結果に影響すると思われる. 基準状態の試料に, 同じ倍率の測定を行ったとき, 全視野にわたる一様性は, どの程度であったか.

〔回答〕 (1) 本報告は, 変位モアレじまのモアレじまである所の変位の微分像を得るため, ホログラフィという光学的方法の利用が可なる提案であり, 仮題的な意味も含み標題のような表現とした. しかし本質的見地から考えるともっともなご指摘であるので, 今後この種のものについては, ご提言の趣旨を考慮させていただきこととする. ご教示に感謝する.

(2) 試料に印加された格子の基準状態において誤差が存在する可能性は多分にある.

実験にあたり, 無負荷時の誤差状態を同倍率で検討した所, 対象となる誤差しま模様は全視野にわたり観測されなかった. したがって, 誤差に対する配慮は別に要しないものとして以後の実験を行った.