

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-481

しま再生装置を用いたモアレ法による
面外変位解析の検討

越 出 慎 一

1983年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

しま再生装置を用いたモアレ法による 面外変位解析の検討*

越 出 慎 一**

1. 緒 言

最近の航空機は空力加熱、エンジンの燃焼ガスなどにより構造の一部が高温にさらされるため、このような場合の熱あるいは負荷による変形の測定が必要となった。また、高温にさらされている構造物の変形測定には物体に直接接触させたりする方法よりも非接触でしかも感度や精度が温度に関係のない方法が望ましい。この見地から、非接触でしま模様の観察が可能なモアレ法は高温における面外変位の解析手段としても有効な方法である。そこで、ここではこのような場合に対しても適用可能と思われるモアレ法について検討をした。

面外変位の測定あるいは物体の形状計測に対するモアレ法としてはすでに格子照射法、格子投影法などが示されており、とくに格子照射法では実構造物あるいは模型の変形の定量的な測定が行われている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾しかし、この格子照射法は被測定物と同じ大きさの基準格子を物体表面近傍においてしま模様を観察するため高温での適用が困難となる。また、格子投影法は遠方でしま模様が観察でき、しかも被測定物の大小に関係なく適用できるが、現状では定量的な測定に対して、精度の面で必ずしも十分でない。

一方、筆者は先にモアレ法によるひずみ分布の解析法として格子の印刷された物体面を撮影したフィルムとしま再生装置を利用した方法について示した。⁵⁾この方法はひずみ(面内変位)によるモアレじまをしま再生装置でコントラストの改善された模様にして観察し、それからひずみ成分を解析するものである。このために測定精度は向上し、しかも被測

定物表面から離れたところで測定するのこの方法の一つの特徴であるため被測定物が高温にさらされている場合でも適用可能である。

また、この再生装置は面外変位によるしま模様を観察するのにも利用できる。そこで、ここでは物体面に印刷した格子と面外変位によるモアレじまをこの装置で観察してこの面外変位を解析する方法並びに物体面に投影した格子と面外変位によるしまを同装置で観察してこの変位を解析する方法の二つの方法を導出した。さらに、既知の面外変位に対応したしま模様を観察する実験を行い、上述各方法の実用性に対する検討をした。その結果、印刷した格子による方法では部材の変形による面外変位のように表面ひずみをとまなう場合にはこのひずみの項を分離しないと誤差が大きくなることがわかり、さらに高温での適用には耐熱格子を印刷する必要がある。一方、投影された格子による方法は高温における部材の変形による面外変位の解析へも十分適用できることが明らかになった。

2. 記 号

w	面外変位
b	物体面から撮影用カメラレンズまでの距離
d	カメラレンズからフィルム面までの距離
L	物体面からフィルム面までの距離
l	物体面から投影光学系レンズまでの距離
c	投影光学系レンズから基準格子までの距離
p_r	基準格子の格子間隔(ピッチ)
p_s	物体面に印刷された格子のピッチ
p_a	物体面に投影された格子のピッチ
p_f	写真フィルム上の格子像のピッチ
f_c	撮影用カメラレンズの焦点距離
f_a	投影光学系レンズの焦点距離
δ_a	物体面上でモアレのしま模様が観察されたと

* 昭和57年11月30日受付

** 機体第二部

	した場合のしま間隔
δ_f	物体面が撮影されたフィルムを重ねて観察したしま模様 のしま間隔
δ_p	しま再生装置で観察されたしま模様を撮影した フィルム上のしま間隔
m_f	撮影倍率
m_a	投影倍率
m_p	しま再生装置のしま模様を撮影したときの倍 率
M_a	物体面上の標点距離
M_p	しま再生装置のしま模様を撮影したフィルム の物体像上の標点距離
n	M_a 内の格子線の数

さらに、添字の o は変位前、 i は変位後を示す

3. 物体面に印刷された格子でしま模様を観察した場合の面外変位の解析

3.1 しま模様の観察

すでに、Chiang らにより物体面に印刷された格子によりモアレじまを生じさせ、これから面外変位を解析する方法が提案されている⁶⁾。しかし、この方法による実験を試みた結果、1枚のレンズによる光学系を使用しているため、小さな変位でないと鮮明なしま模様の観察が困難で、しかも透明な材料の場合にしか適用できない。そこで、この手法を基にしてより一般的な場合にも適用できるようなしま模様の観察方法を提案した。

まず、平面状の物体面に格子線焼付け法などにより格子を印刷し、この面が面外変位する前と後の状態を一般に用いられているカメラで撮影する。この場合、面外変位により撮影倍率が変わるため、変位前と後の物体面を撮影したフィルムの格子像のピッチが異なってくる。したがって、この二枚のフィルムを重ねるとモアレじまが生じ、これから面外変位を解析することができる。しかし、一般にこのフィルムを重ねたときのしま模様はコントラストが悪く観察し難いので、これを可干渉光の回折を利用したしま再生装置に入れてコントラストの改善されたしま模様にして観察、記録する。

3.2 しま模様と面外変位の関係

いま、図1のように格子が印刷された物体面の面外変位前と後の状態を固定されたカメラで撮影したとすると、この変位は次の式で示すことができる。

$$W = \pm(b_o - b_i) \pm(d_o - d_i) \quad (1)$$

また、カメラレンズの幾何光学的な関係及び撮影倍率から次の各式が得られる。

$$\frac{1}{b_o} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{b_i} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f_c} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{fo} &= \frac{d_o}{b_o} p_s = m_{fo} p_s \\ p_{fi} &= \frac{d_i}{b_i} p_s = m_{fi} p_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

一方、この二枚のフィルムをおのおのの格子像の格子線が平行な状態、すなわち回転ミスマッチがないように重ねたとすると、このときに生じるしま模様と各格子像のピッチは次の関係がある。

$$\frac{p_{fi} \mp p_{fo}}{p_{fo}} = \frac{p_{fo}}{\delta_f \mp p_{fo}} \quad (4)$$

以上で示した各式より、次のような w と δ_f の関係式が得られる。

$$w = \pm b_o \left\{ \left(1 - \frac{d_i}{d_o} \right) \pm \frac{d_i p_s}{b_o \delta_f} \right\} \pm (d_o - d_i) \quad (5)$$

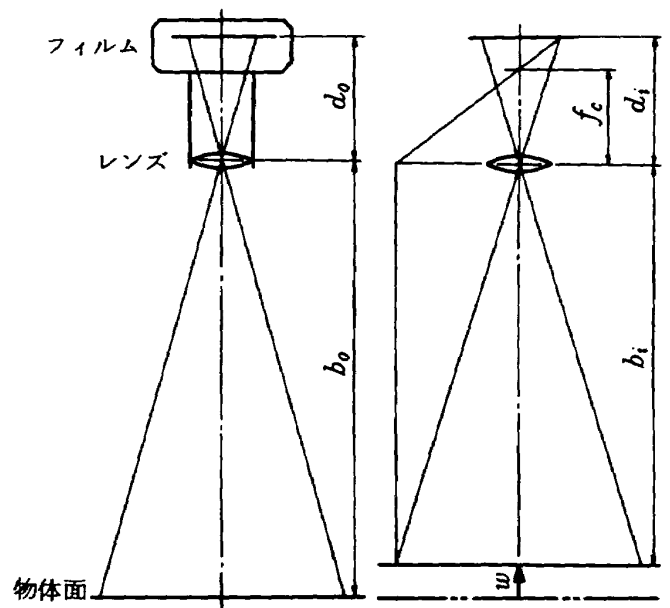


図1 格子が印刷された物体面の変位前後の写真撮影

しかしながら、ここではしま再生装置でしま模様を観察しているため、この模様のしま間隔 δ_p を求めることになり、式(5)の δ_f は直接求められない。そこで、まずこの再生装置に現われているしま模様を撮影したフィルム上の像と実際の物体とからこのときの倍率 m_p を求め、物体面上でしま模様が観察されたときと仮定したときのしま間隔 δ_a を次の式で算出する。

$$\delta_a = \frac{1}{m_p} \delta_p \quad (6)$$

さらに、物体面を撮影したときの倍率から

$$\delta_f = m_{f_o} \delta_a = \frac{d_o}{b_o} \delta_a \quad (7)$$

となり、これを式(5)に代入して次の w と δ_a の式が得られる。

$$w = \pm b_o \left\{ \left(1 - \frac{d_i}{d_o} \right) \pm \frac{d_i P_s}{d_o \delta_a} \right\} \pm (d_o - d_i) \quad (8)$$

しかし、この式(8)に含まれる b_o 、 d_o 及び d_i の値は実際に行う場合容易に測定できない。そこで、変位前の物体面とカメラの固定された位置から L_o を測定し、これと先の式(2)及び $L_o = b_o + d_o$ なる関係から導出された次の各式によりこれらの各値を決定する。

$$\left. \begin{aligned} b_o &= \frac{1}{2} (L_o + \sqrt{L_o^2 - 4L_o f_c}) \\ d_o &= \frac{1}{2} (L_o - \sqrt{L_o^2 - 4L_o f_c}) \\ d_i &= \frac{1}{2} (L_i - \sqrt{L_i^2 - 4L_i f_c}) \\ L_i &= L_o \pm w \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここまでの各式における \pm の符号は変位の方向により決まるもので、この変位がカメラに近づく方向の場合は上側の符号を、遠ざかる方向の場合は下側の符号をとる。

3.3 簡単な実験による検討

前節で導出した方法の有効性を検討する目的で、格子が印刷された長方形板に平行移動による既知の面外変位を与え、このときのしま模様を観察する実験を行った。

図2は格子線焼付け法により表面に P_s が 0.1016

mm (250本/in) の直交格子が印刷されたアルミニウム合金板及び P_s が 0.0508mm (500本/in) の直交格子が印刷されたガラス板を上方向に移動させたときの各変位に対応して観察されたモアレじまの例である。これらの例はごく一般に使われている一眼レフ小型カメラ ($f_c = 50$ mm) と高解像力フィルム (ミニコピーHRⅡ) で撮影した格子像を $H_e - N_e$ レーザの回折を利用したしま再生装置に入れて得られたものである。ここでは直交格子が印刷されているので、互に直交した二方向のしま模様が生じているはずであるが、しま再生装置で観察するとこの例のように一方向のみのしま模様を取り出すことができる。また、図3は上述の各板の変位に対応したしま模様からしま間隔 δ_a を求めてプロットしたものと実験したときの各値で決定される式(8)の $w \sim \delta_a$ 曲線とを比較して示したものである。これらの図で明らかのように各変位に対して実際に観察されたしま模様の間隔はこの曲線上にのっている。さらに、先の図2のしま模様から P_s に 0.1mm 程度の格子を使った場合は面外変位が 1mm 以上、また 0.05mm 程度の場合はこの変位が 0.5mm 以上になれば十分しま模様が観察できる。したがって、この場合の測定感度は前者が 1mm、後者が 0.5mm ぐらいの変位と推定される。

以上の実験結果より未知の面外変位で観察されたしま模様と前節で示した関係式からこの変位の解析が可能であることが確認された。また図2の(a)は物体面を反射法により撮影した場合、(b)は透過法により撮影した場合に得られたしま模様であることから本方法は金属材料などの不透明物体でもガラス、高分子材料などの透明物体でも適用できることがわかる。しかしながら、部材の変形による面外変位、たとえば板の曲げの場合のように表面にひずみ(面内変位)が生じるときは物体面に印刷された格子のピッチがこのひずみによっても変化する。しかも、先のひずみ解析における結果⁵⁾から推定して、このひずみによるしま模様の変化は面外変位によるものと同程度になる。このため、観察されたモアレじまはひずみにもかなり関係したものとなり、面外変位のみの解析をする場合にはこのひずみによる分を取り除かなければならない。原理的には、このひずみ

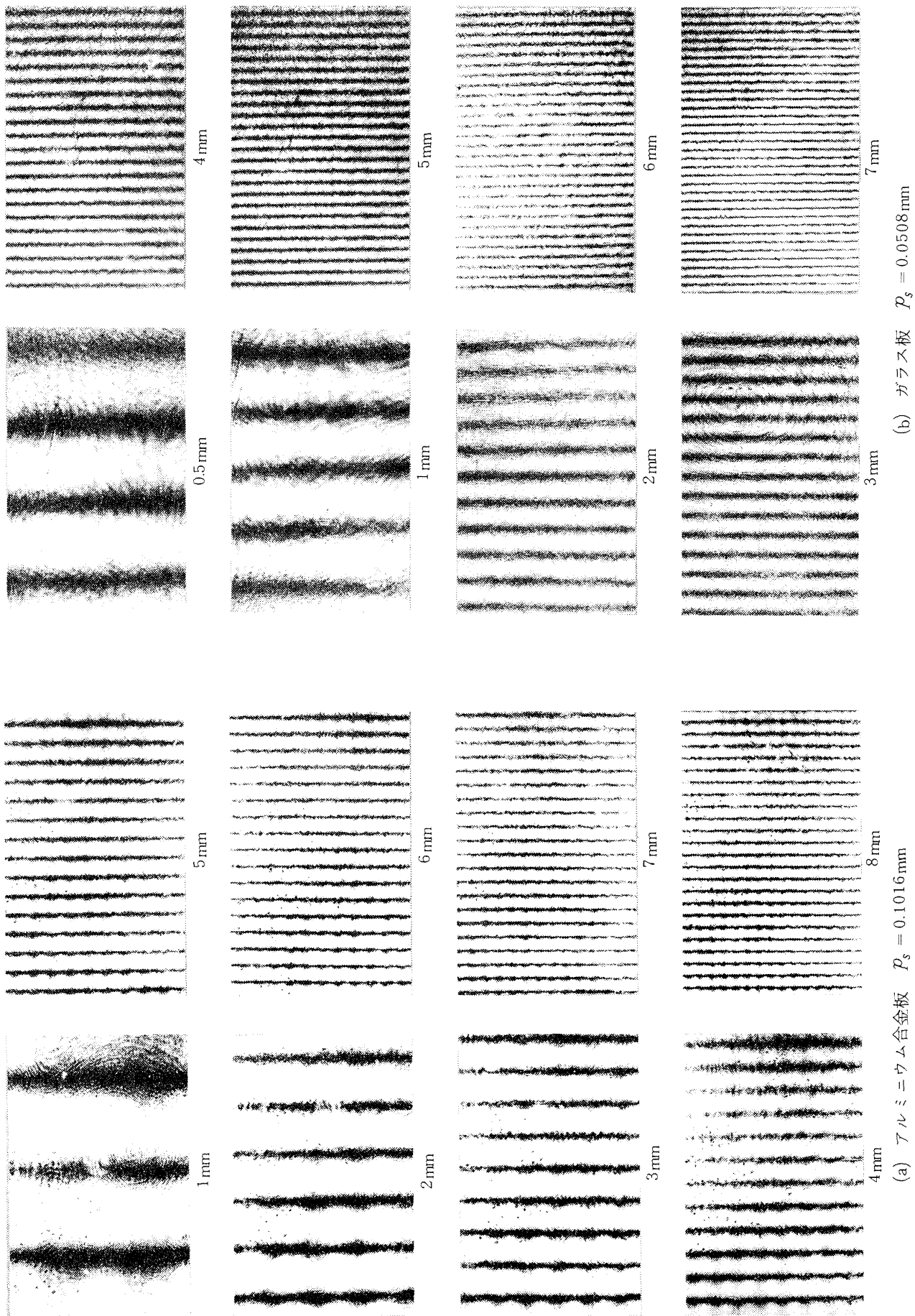
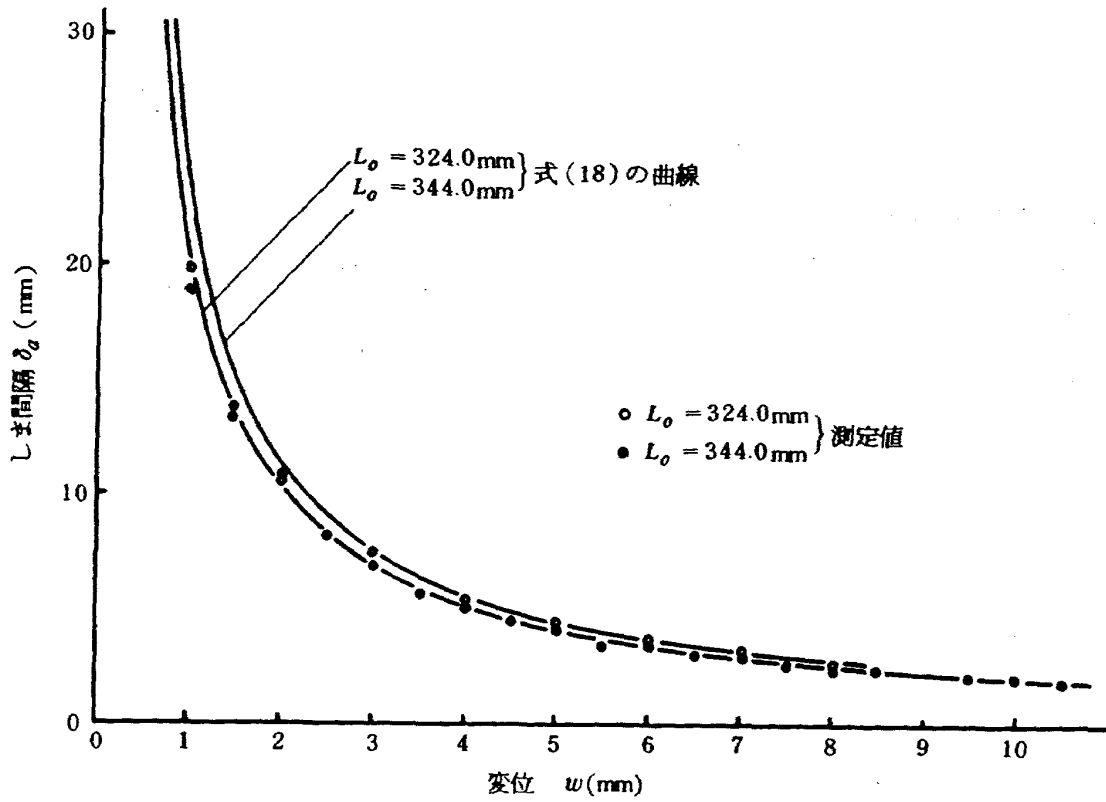
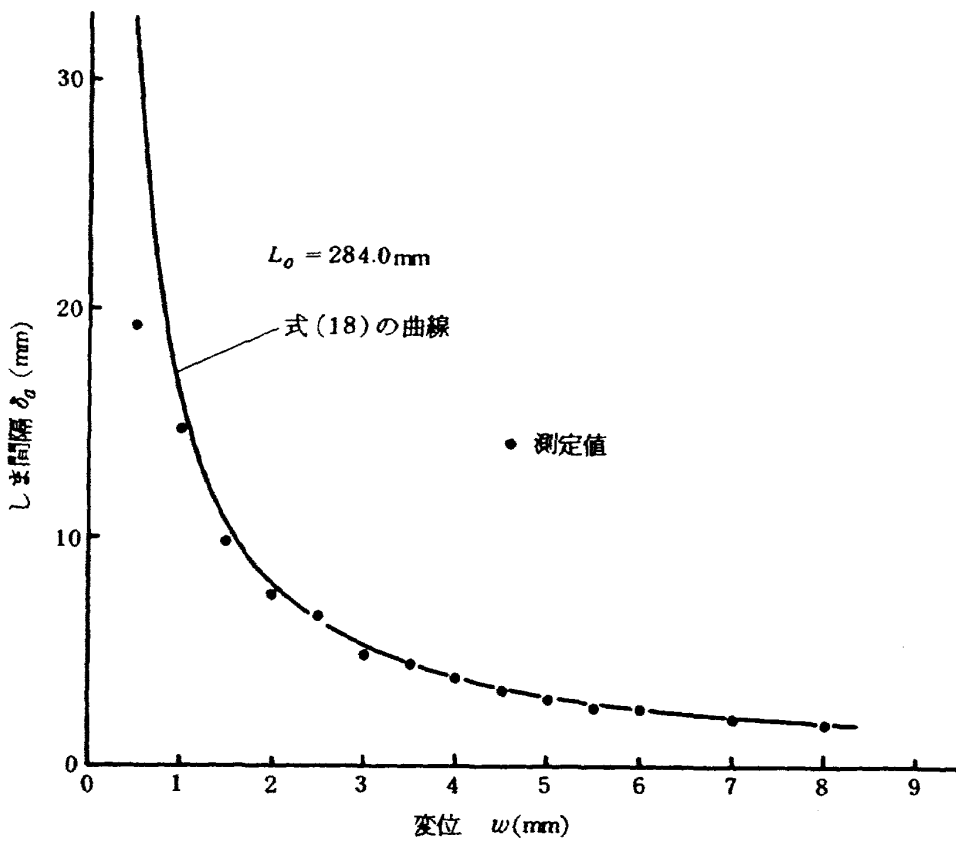


図 2 格子が印刷された平板の上方向平行移動の変位に対応したモアレじま



(a) $p_s = 0.1016\text{mm}$



(b) $p_s = 0.0508\text{mm}$

図3 各変位で観測されたしま間隔と式(8)の曲線との比較

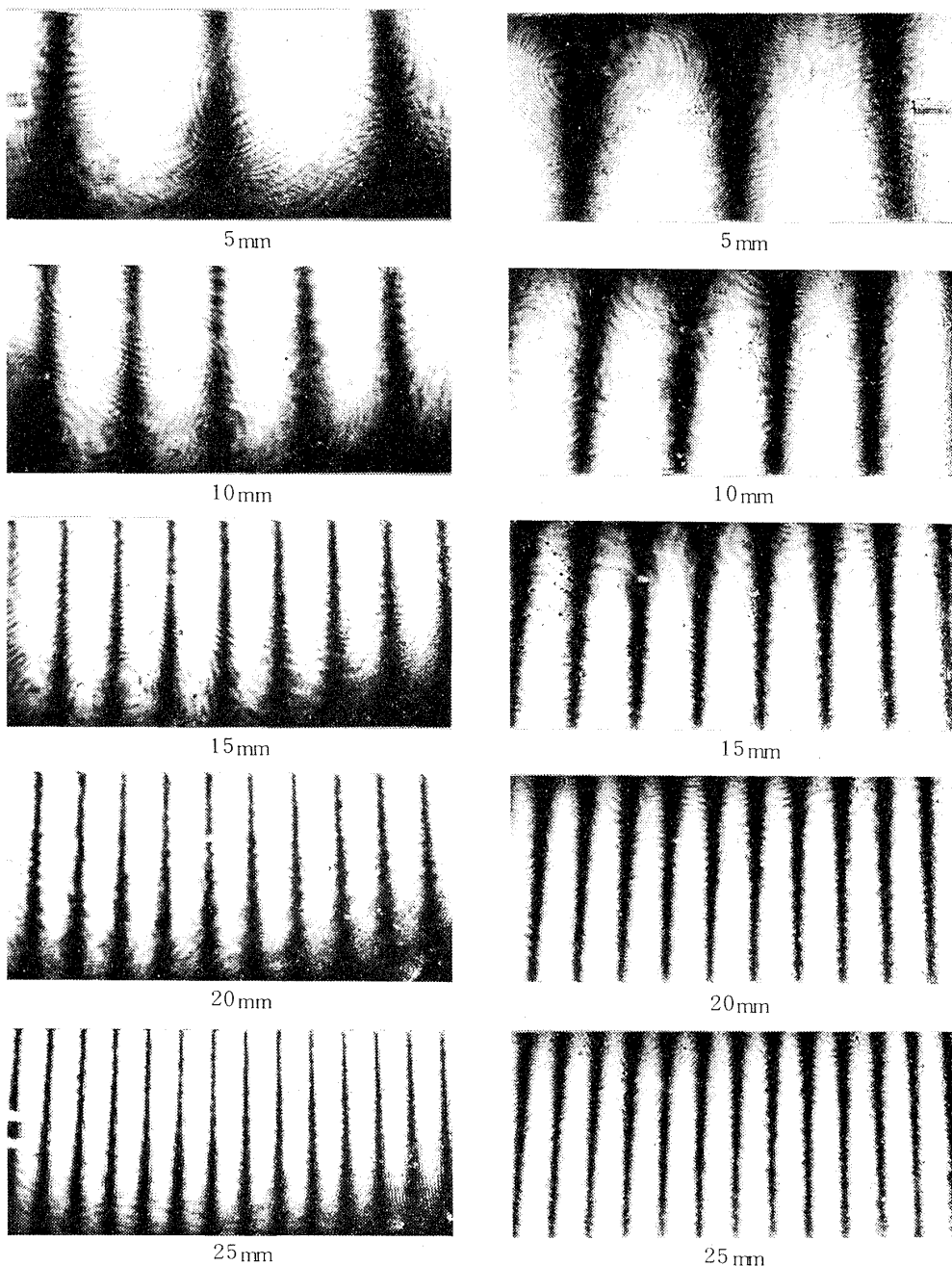
ここまでの各式の土の符号は変位の方によって決まるもので、投影光学系レンズに近づく方向のときは上側、遠ざかるときは下側をとる。

しかしながら、この式(14)は変位としま模様との関係を表わしているが、 δ_a は直接測定することができず、 p_{ao} 、 m_{ao} も投影光学系の状態により変化する値である。これに対して、まず δ_a は実際にしま再生装置で観察したしま模様から δ_b を測定し、先の印刷された格子による方法の場合と同様に倍率 m_b を求めて式(6)で算出する。また、 p_{ao} 、 m_{ao} の

値は変位前の物体を撮影したフィルムから次のような手法で求めることができる。すなわち、物体面上の標点距離 M_a をあらかじめ定めておき、上述のフィルムを万能投影器などで拡大することによって M_a 内に投影された格子線の数 n を測定する。そこで、この数と基準格子のピッチ p_r が既知であることから、上で述べた各値は次の式で求められる。

$$p_{ao} = \frac{M_a}{n}, \quad m_{ao} = \frac{p_{ao}}{p_r} \quad (15)$$

なお、この手法ではフィルム上の像を拡大してい



上方向変位 $p_{ao} = 0.355 \text{ mm}$

下方向変位 $p_{ao} = 0.354 \text{ mm}$

図5 格子が投影された平板の上下方向平行移動の変位に対応したモアレじま

るのでこれから p_{ao} の値を直接測定することも可能であるが、精度の面で n を測定した方が有利である。

4.3 実験例

前述で示した方法を検討するために、ここでは板が上下に平行移動したときの変位並びに帯板の一端を上方向に移動したときの変位、すなわち傾斜面の高さに関係したしま模様を観察する実験を行った。この実験の投影光学系には写真用引伸機 ($f_a = 75\text{mm}$) の改造したものを使用し、また先の例と同じ一眼レフ小型カメラ及び高解像力フィルムにより物体面の撮影をした。

図5は平板が上下に平行移動したときの既知の変位に対応して得られたモアレじまの例である。この例はエポキシ樹脂の平板に p_r が 0.0508mm (500本/in) の線型格子を投影して観察したものである。また、この実験における p_{ao} の値は上方向変位の場合が 0.355mm 、下方向変位の場合が 0.354mm であった。さらに、各変位の値に対して得られたしま模様から δ_a を求めてプロットしたものと、この場合の装置によって決定される式(14)の $w \sim \delta_a$ 曲線と

比較して図6に示した。

これらの図から次のようなことが明らかになった。まず、図5よりここでの実験では変位が 5mm 以上ならないとしま模様が観察できない。したがって、測定感度は 5mm ぐらいの変位と考えられる。また、図6では各変位量のところで実際に観察したしま模様の δ_a の値が前節で導入した式(14)の曲線にのっている。これらのことから、観察されたしま模様とこの式により上で述べた感度以上の大きさの変位を解析することができる。

そこで、さらに本方法が場所により変位量が変化する場合へも適用し得るかどうかを確かめるために傾斜面の高さを求める実験を行った。図7にはこの場合のしま模様の例を示す。このしまは水平面(基準面)に投影された格子と傾斜した帯板の面に投影された格子により形成されたものである。この帯板は $300 \times 25 \times 5\text{mm}$ のアルミニウム合金板で、一端の移動量 h は 15 及び 30mm の場合である。また、基準面に投影された格子の p_{ao} は 0.347mm であった。さらに、この図7のしま模様と先の式(14)を用いて近似的に各しまとしまの中央の位置における基準

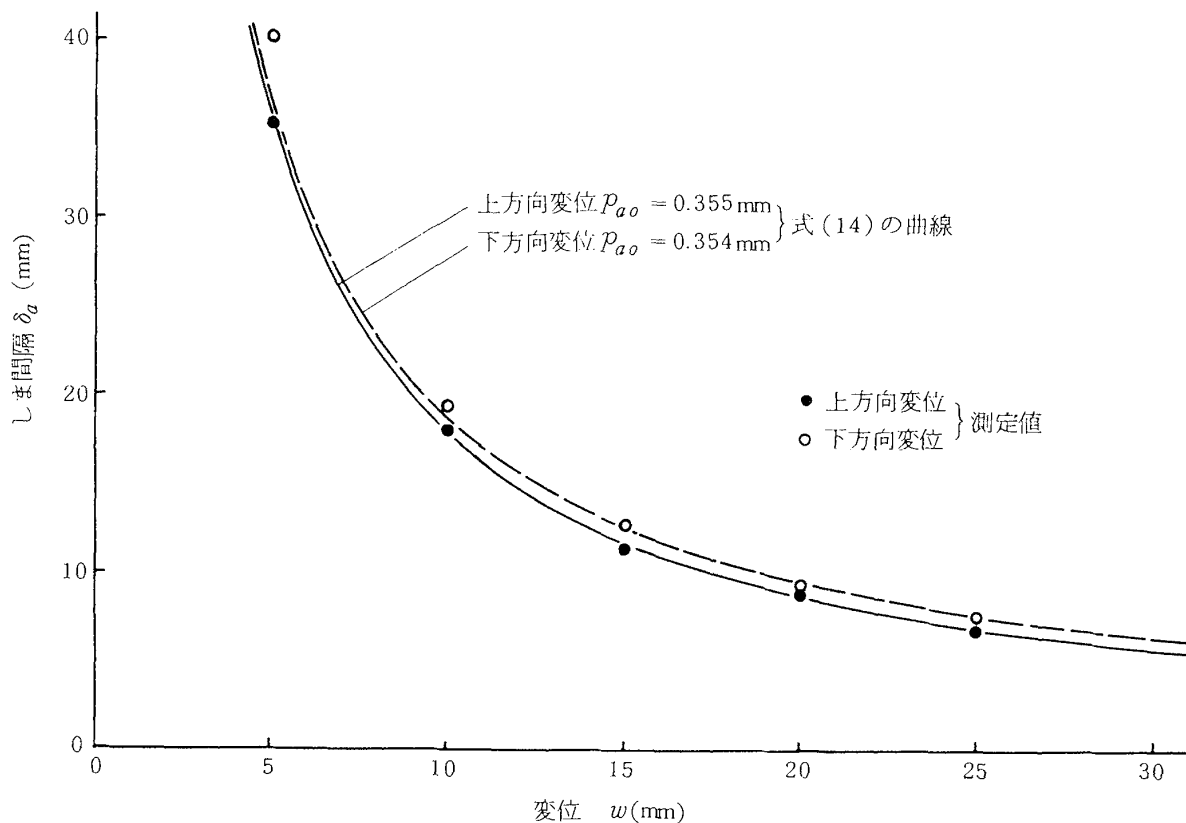


図6 各変位で観測されたしま間隔と式(14)の曲線との比較

面から帯板上面までの高さを求め、これと与えられた傾斜面とを比較して図8に示した。この図により7mm以上の高さになれば両者が一致しており、ここで使用した装置でもこの程度以上の高さになれば十分その値が求められることがわかった。

4.4 実験結果とこの方法に対する検討

前述で示した実験例により、ここで行った変位解析法の問題点を検討してみる。

まず、本方法では図4で示したように格子が投影された物体面を斜めから撮影したフィルムによりし

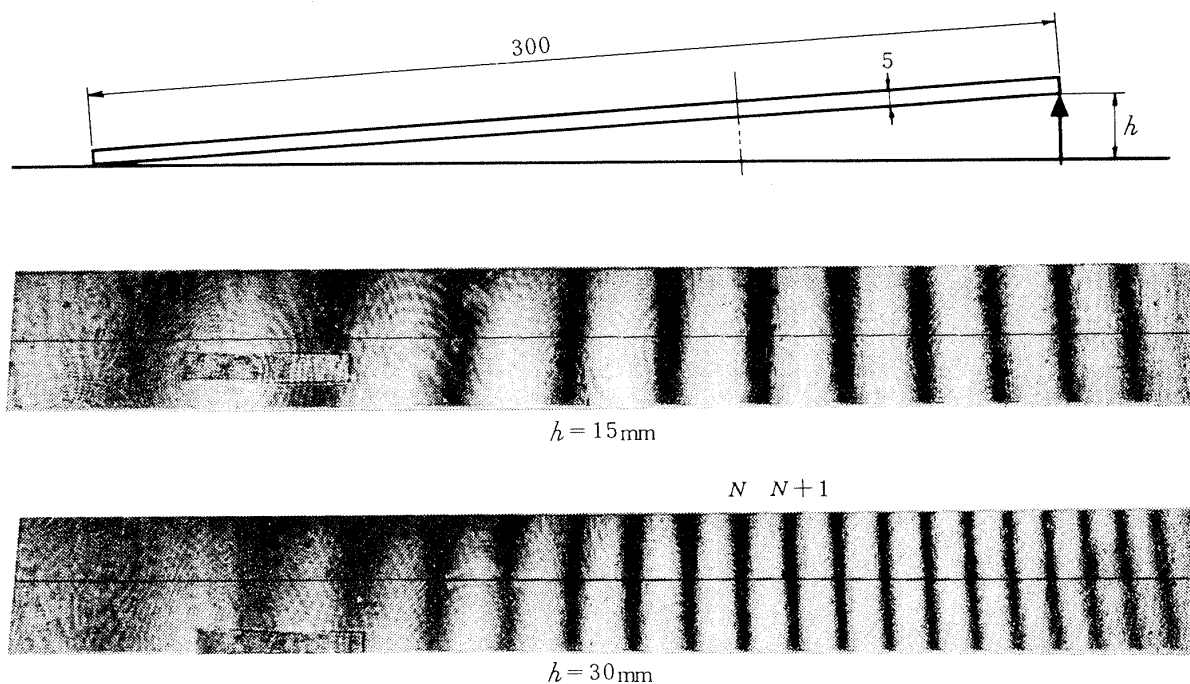


図7 傾斜面の高さ変化に対応したモアレじま

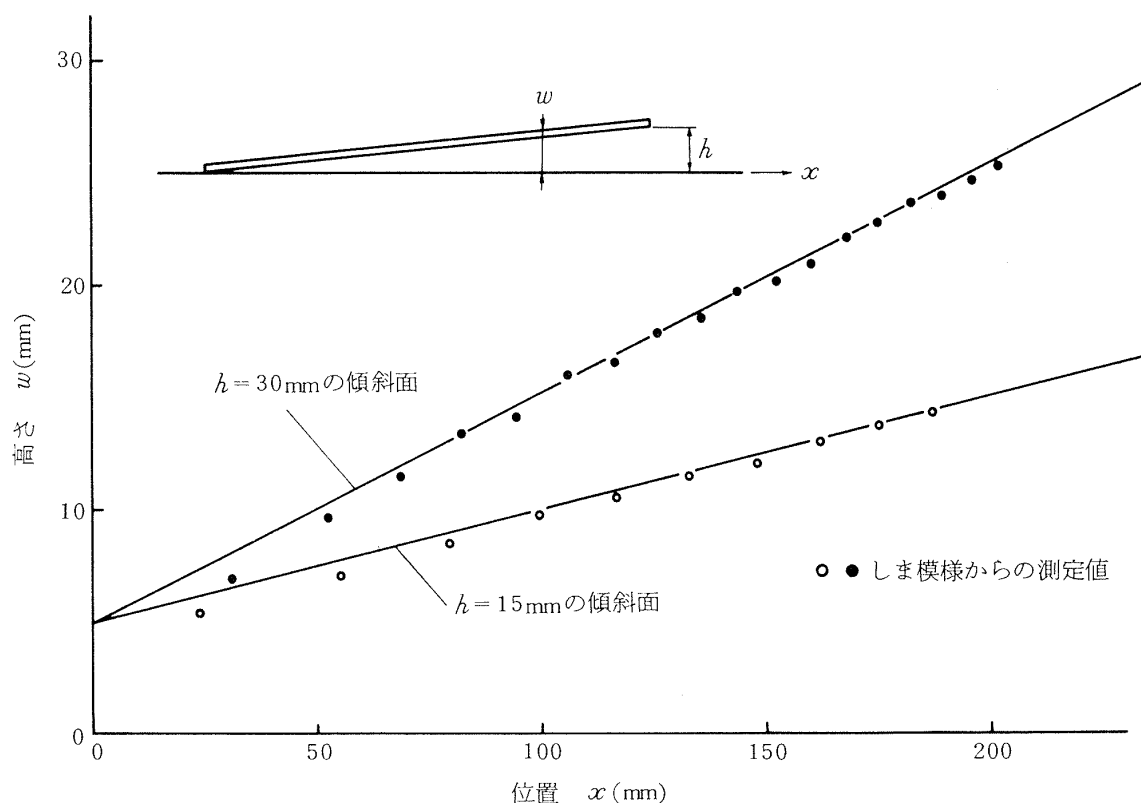


図8 モアレじまから得られた各位置の高さと与えられた傾斜面との比較

ま模様を観察している。したがって、線型の基準格子を物体面に垂直に投影すればこの面上の格子は平行な線群になるが、これを図9の(a)の方向から撮影したとするとフィルム上の格子像は平行な線群にならない。しかし、この図のA-A線に沿ったところを考えると、フィルム上の格子像のこれに対応した線上のピッチ p_f は一定になる。このために、平行移動の場合の変位前と後の物体面を同一方向から撮影したとするとこの線に沿った格子像ピッチ p_{f_0} と p_{f_i} の差はこの変位のみに関係したものになる。一方、物体面上の格子を図9の(b)の方向から撮影した場合はフィルム上の格子像も平行な線群になる。しかし、この場合は格子像のA-A線に対応した線に沿う p_f は一定にならないので、これを修正する必要がある。

また、傾斜面の高さに対する例のように場所により変位が変わる場合には次のような検討すべき点がある。その一つとして、ここで導出した方法は平行移動の場合のように投影された格子の p_0 は全面にわたり一定であるとしている。しかし、例えば傾斜面の場合には p_0 が一定でなく高さによって変化している。つまり、このときのモアレじまは極端な表わし方をすると図10のように全面にわたり p_{a_0} の一定な格子と p_{a_i} が場所によって変化する格子を重ねて生じたものである。したがって、ある二本のしま、例えば図7に示した任意の N 番目のしま次数と $N+1$ 番目のしま次数の間で求めた変位の値がこの間の中央の位置の高さであるという保証はない。ここでは傾斜面を階段状におき換え、近似的に各段の高さをこの中央の位置の高さとして求めているに過ぎない。もう一つの問題は物体面が傾斜しているために、この面のどこに焦点を合わせて撮影するか

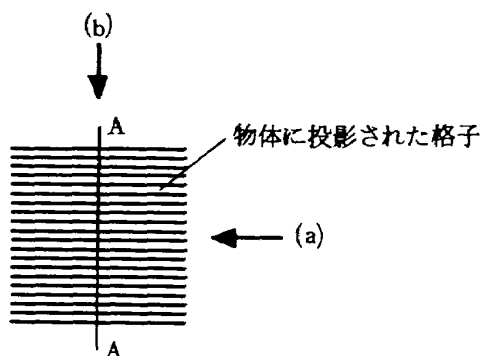


図9 投影された格子の撮影方向

よってわずかに撮影倍率が変ってくることである。先の平板の平行移動の実験から投影倍率に比べこの撮影倍率の変位への影響はかなり小さいことが確認されたので、ここでは投影倍率の変化のみにより p_0 が変わるとして変位を解析している。しかし、撮影されたフィルムでしま模様を観察し、これから変位を解析すると正確にはこの撮影倍率の変化に対する修正をしなければならない。

ここでの実験結果に対して厳密な検討をすると以上のようないくつかの問題が生じてくる。しかし、図8の結果にはこの撮影法などに関係した問題の影響はとくに顕著に現われていないので、現段階では無視できる。また、この実験例は物体の移動による面外変位について行っているが、たわみなどの変形による場合も、この変位のしま模様を生じさせるためのピッチ変化への効果は全く同じである。このような観点から、変位量に比較してこの実験の場合あるいはこれ以上の大きさの寸法を持った試験片にすれば物体の変形による面外変位を十分な精度で解析できる。ただ、相対的に小さな試験片のより高精度な解析を行う場合には前述の問題点を考慮すべきであるが、それと同時に実験装置を改良する必要もある。さらに、本方法は高温の場合でも格子が投影された物体面の写真撮影が十分できる状態であれば適用可能で、しかも精度は室温の場合と同じである。

なお、ここでの傾斜面に対する実験の場合のように変位前の物体面とは全く別の平滑で水平な基準面

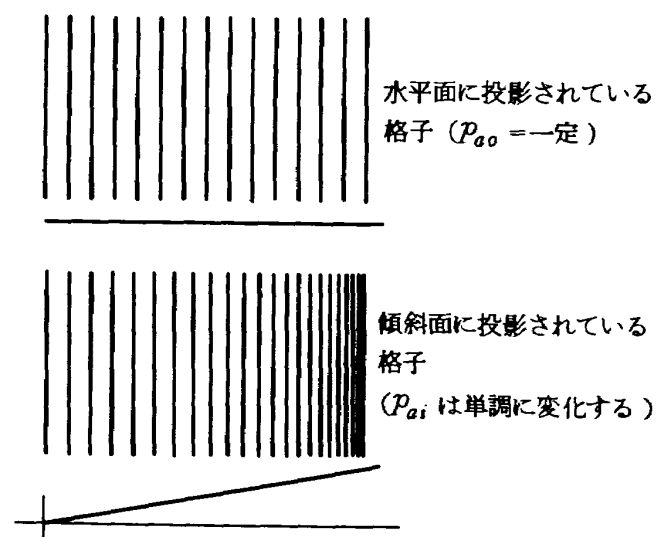


図10 傾斜面の高さに関したしまを観察する場合の格子の状態

を使い、これに投影した格子のピッチを p_{a0} とする手法を適用すれば、任意の線型ミスマッチを与えたときのしま模様の観察が可能となり、測定精度及び感度の向上が期待できる。

5. 結 言

ここでは、すでにひずみ分布解析に応用してきたしま再生装置を利用するモアレ法の面外変位の解析への適用について述べた。とくに、しま模様の観察方法として物体面に印刷された格子を用いる場合と投影された格子を用いる場合とを示し、おのおの場合の変位の解析法を導出した。また、これらの各方法を検討するための実験を行い、次のようなことが明らかになった。

いずれの方法も物体面の写真撮影ができる状態であれば面外変位に関係したモアレじまの観察が可能である。しかし、印刷された格子による方法は板の曲げのようにひずみが生じる場合には面外変位の定量的な解析に対してこのひずみ(面内変位)を分離しなければならず、さらに高温での適用には格子の耐熱性を考慮する必要がある。一方、投影された格子による方法は上述のような場合に対しても十分適用可能である。また、今回の実験に用いた装置では測定感度が5mmぐらいの変位の値であった。したがって、この値に対し相対的に大きな試験片を用いれば十分な精度で面外変位を求めることができる。しかし、物体面の撮影に関して多少誤差の入る可能性があり、小さな試験片の変位をより高精度に解析するためには光学系及び測定法を改良する余地がある。

なお、以上の結果からとくに投影された格子による方法は繊維強化複合材料などによる部材の高温における曲げや座屈の面外変位の解析に適用可能なことがわかったが、さらに本方法の今後の適用が期待される例としては、時間変化に対応した撮影法と組合せてクリープなどの準静的な場合、衝撃や振動などの動的な場合の面外変位の解析が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 鈴木正根, 金谷元徳, 鈴木喜義; モアレ縞による三次元計測, 精密機械, Vol. 40, No. 9, 746 ~ 753, (1974).
- 2) P. S. Theocaris; Moiré Topography of Curved Surface, Experimental Mechanics, Vol. 7, No. 7, 289 ~ 296, (1967).
- 3) 平田利英, 渡辺正昭; モアレ法による変形測定, 非破壊検査, Vol. 23, No. 2, 58 ~ 65, (1974).
- 4) 太田啓, 本堂実; モアレ法による形状計測, 非破壊検査, Vol. 28, No. 10, 655 ~ 661, (1979).
- 5) 越出慎一; しま再生装置を利用したモアレ法によるひずみの解析, 航空宇宙技術研究所報告, TR - 513, (1977).
- 6) F. P. Chiang, B. Ranganayakamma; Deflection Measurements Using Moire Gap Effect, Experimental Mechanics, Vol. 11, No. 7, 269 ~ 302, (1971).

航空宇宙技術研究所資料481号

昭和58年1月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
