ISSN 0389-4010
UDC 620.17.21;
539.37

航空宇宙技術研究所報告
TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-789

モアレ法による高分子材料帯板の座屈後のクリープ変形測定

越 出 慎 一

1983年11月

航 空 宇 宙 技 術 研 究 所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

This document is provided by JAXA.

モアレ法による高分子材料帯板の座屈後のクリープ変形測定*

越 出 慎 一**

Creep Deformation Measurement of Polymer Strips after Buckling by Moiré Method

Shinichi KOSHIDE

ABSTRACT

This paper describes the study of the creep deflection measurements for polymer strips by the Moiré method. The mechanical properties of polymer are normally dependent on temperature and time. The out-of-plane deformation of the materials, such as deflection caused by buckling, also are greatly affected by temperature and time. Especially, in the range above the glass transition temperature of the materials the stiffnesses decrease and the deformation shows considerable viscoelastic behaviour.

Deflection analysis with Moiré method in this paper is carried out by the following process. The refernce gratings are projected on the reference surface and the specimen surface subjected to deformation, then the grantings on those surfaces are recorded on film. Moiré fringe patterns are observed by inserting the film into an optical spatial filtering system. The fringe patterns are formed by differences in pitch of the gratings which depend on out-of-plane deformation of the specimens. The deflections are analysed from the fringe patterns.

The loading attachment in the furnace and the techniques of projecting and taking photographs, which combined with the strobo flash light source and motor drive camera unit, were used for the experiment in the study.

The Moiré method with the techniques described above were applied to measure the deflections caused by buckling of epoxy resin strips with fixed

---

* 昭和58年8月2日受付

** 機体第二部

This document is provided by JAXA.

ends under compression. The glass transition temperature of the resin was 32°C. The experiments were carried out at 15°C (room temperature), 20°C, 40°C and 60°C. A comparison of the results at room temperature, with deflections measured by a dial gauge, confirmed that the Moiré method was applicable to deflection measurements if the deflections were above 0.5 mm. Moreover, the viscoelastic behaviour for deflection of epoxy resin strips at 20°C, 40°C and 60°C were clarified by the results of the experiments in each temperature range.

1. 緒　　言

高分子材料あるいは固体推進薬のような高分子複合材料の材料特性は一般に温度と時間に依存する。とくに引張などの面内変形の場合には材料固有のガラス転移温度以上の温度領域になると剛性が著しく低下するとともに時間依存性が大きくなって顕著な応力緩和あるいはクリープなどの粘弾性挙動を示すことが明らかにされている[1)~5)]。一方，このような材料ではたわみなどの面外変形も温度と時間に依存し，上述の温度領域では曲げの剛性が低下するとともに変形の時間依存性も著しくなって行くことが予想される。しかしながら，温度と時間に依存する面外変形測定の実験はあまり行われていない。そこで，ここではまず粘弾性的な面外変位に関係したモアレじまの観察が可能な手法を考案し，筆者が先に導出した面外変位測定に対するモアレ法[6)]が応用できるようにした。さらに，本研究では上述の方法により高分子材料帯板の座屈後のたわみ測定の実験を行い，このような材料の面外変形における粘弾性的な挙動を明らかにすることを目的とした。

ここで適用したモアレ法は格子が投影されている物体面を写真撮影してフイルムに記録し，これから光学的空間フィルタリングシステムによる再生のしま模様を観察して面外変位を解析する方法である。本方法はこのしま模様を非接触で観察するものであるため，いろいろな温度下で時間的変化が記録できるような撮影手法などを工夫すれば，高分子材料のような温度と時間に依存する面外変位の解析にも有効な方法となる。そこで，ここではとくにストロボ光源とモータドライブのカメラユニットを連動させた投影光学系及び撮影法により，温度制御のできる炉内で負荷されしかも格子が投影されている試験片表面を特定な時間点で写真撮影し，さらにこのフイルムから面外変位に関係した再生モアレじまを観察する実験手法を考案した。

また，本研究では，40℃前後の温度が粘弾性領域となるエポキシ系樹脂で帯板試験片を製作し，室温から60℃までの間の何段階かの温度でこの試験片に圧縮荷重をかけた際の座屈後のたわみ測定実験を上述の手法によって行った。この実験の結果から，まず前述のモアレ法により温度変化によって剛性及び時間依存性が変化する高分子材料試験片のたわみ測定が十分可能であることが確認され，さらにこのような材料の各温度下における面外のクリープ変形挙動を明らかにすることができた。またこのことによって，高分子材料をマトリックスとした複合材料では，この高分子材料のガラス転移温度が実際に使用する場合の温度的な使用限度になることも推定された。

2. 実験装置及び試験片

2.1 実験方法と装置

ここでは時間依存性があり，しかもこの依存性が温度によって変化するような材料の面外変形測定に対して次のような実験方法及び装置による試験を行った。

まず，試験片表面に既知の間隔（ピッチ）を持った格子（基準格子）を投影し，この面を写真撮影する。このようにして記録された写真フイルムには格子の投影された試験片像が写されており，この格子像のピッチは試験片の面外変位によって変化する。

This document is provided by JAXA.

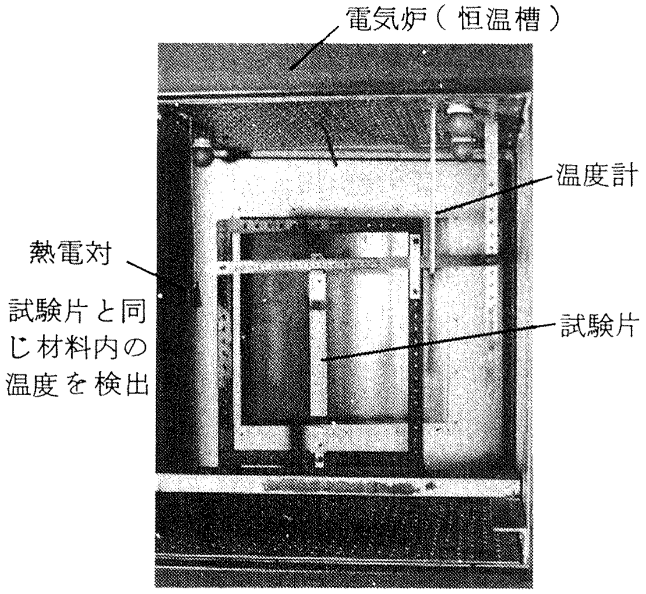


図1　負荷装置

したがって，この格子像の干渉によるモアレじまを形成させるとこのしまから面外変位が求められる。しかし材料が温度と時間に依存する特性を持っているため，温度制御が可能な炉内に試験片を取り付けて負荷し，さらに負荷後の既知の時間点で上述のような写真撮影を行う必要がある。そこで，室温から150℃までの温度制御ができ，かつ耐熱ガラスによる窓を持った炉内に図1に示すような負荷装置を固定し，これに試験片を取り付けて荷重をかけた。この負荷装置はテコ式のもので，アームなどの可動部分は枠に沿ったガイドで拘束され，試験片固定部分が面外に移動しないような機構になっている。

この状態で負荷装置に取り付けられた試験片表面には図2に示すような，レンズ及びコンデンサで構成された光学系とモータドライブユニットを備えたカメラによって炉外から窓を通して格子を投影しさらにこれを写真撮影した。この場合，投影光学系の光源にストロボフラッシュを適用し，これとカメラのモータドライブユニットとを連動させることによって，負荷後の特定な時間点で試験片表面を撮影することができるようにした。

一方，上述の装置によって負荷前，すなわち変形前の試験片表面あるいは試験片と平行な状態の基準面に格子を投影しこれを撮影したフイルムと負荷後座屈により面外変形をした試験片表面に格子を投影しこれを撮影したフイルムとを重ねると，この二枚のフイルム上の格子像のピッチが面外変形前と後では投影倍率の差からわずかに異なってくるので，干渉によるモアレじまが形成される。しかしながら，この場合のモアレじまはコントラストが低く観察し難い。そこでHe－Ne レーザ光などの可干渉光の回折を利用した光学的空間フイルタリングシステムによりコントラストの改善された再生モアレじま模様にして観察，記録する。

2.2　試験片

つぎに，本研究で扱った試験片について示す。試験片素材はエポキシ系樹脂，すなわち重量比で約30％の多硫化物LP−3（チオコール社）を含有したエ

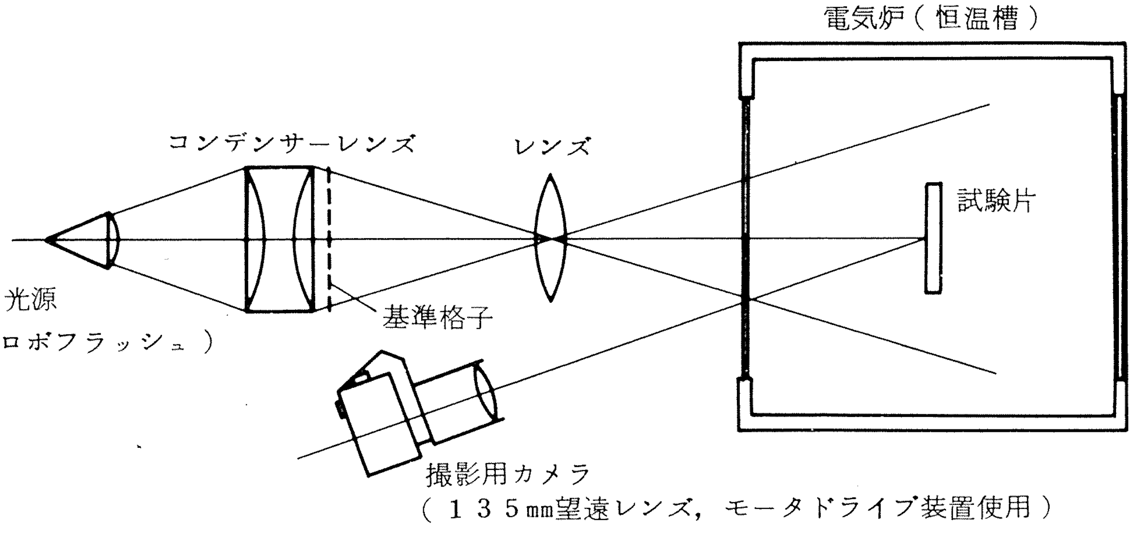


図2　実験装置の光学系

This document is provided by JAXA.

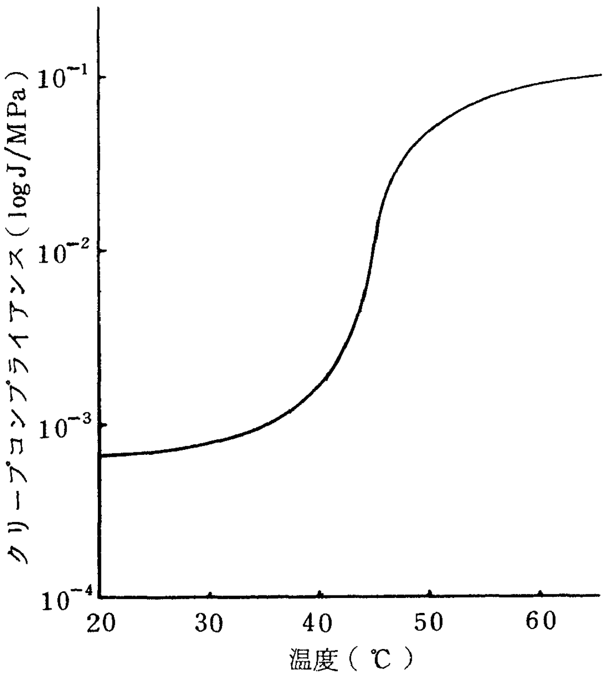


図３　エポキシ系樹脂の温度に対する負荷１０秒後のクリープコンプライアンスの変化

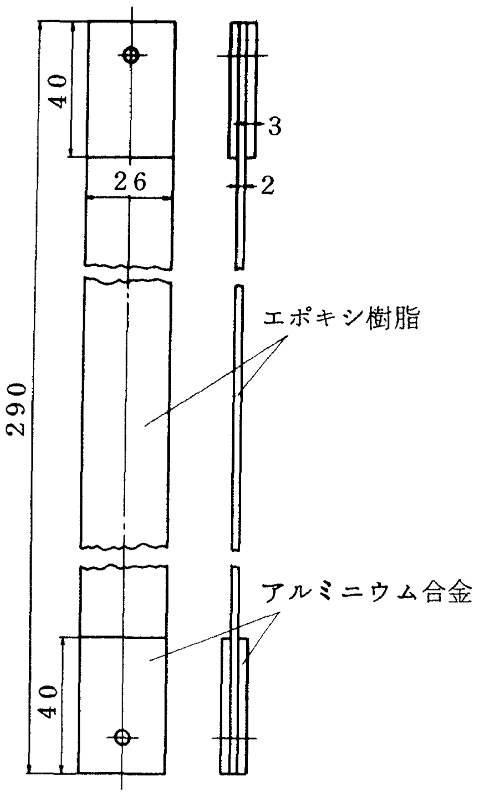


図４　試験片の形状寸法

ピコート８２８（シェル化学社）で，トリエチレンテトラミン（TTA）により硬化させたものである。図３にはこの材料の引張クリープ試験で得られた，温度に対する負荷１０秒後のクリープコンプライアンス曲線を示す。この資料から，本材料はガラス転移温度が３２℃ぐらいと推定され，したがってこれ以上の温度領域では急激に剛性が低下し，顕著な粘弾性挙動をする[7]。

図４にはこの実験で用いた試験片の形状寸法を示す。この試験片は幅２６㎜，厚さ２㎜，長さ２９０㎜の帯板で，上下端部には負荷装置への取り付けのためにアルミニウム合金の小片が接着されている。実験はこの端部を図１で示した装置にボルトで締結して，圧縮方向の負荷により行ったが，この装置では面内荷重のみがかかるので，ほぼ両端固定条件での帯板の圧縮試験となる。また，この材料は透明であるため，格子線を投影するにあたり試験片表面にスーパチェック（特殊塗料社）による塗装を施した。

3. たわみの解析

前章で述べた装置及び実験方法で得られたモアレじまから面外変形，すなわちたわみは次のような手法で決定することができる。

まず，試験片が変形する前と後の状態を写真撮影した二枚のフイルムにより再生のモアレじま模様を記録したとすると，このときのしま間隔と面外変位は基準格子のピッチ，投影光学系及び空間フイルタリングシステムの各パラメータにより次式で表わすことができる[6]。

$$\left.\begin{aligned} w &= \left\{ \frac{m_{a0}}{(\delta_a \pm p_{a0})} + \frac{1}{m_{a0}\delta_a} \right\} p_{a0} f_a \\ p_{a0} &= m_{a0} p_r \\ \delta_a &= \frac{1}{m_p} \delta_p \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

ここで，w；面外変位

p_r；基準格子のピッチ

p_a；物体面に投影された格子のピッチ

m_a；投影倍率

m_p；再生モアレじま模様の撮影倍率

δ_a；物体面上でしま模様が観察されたとした場合のしま間隔

f_a；投影光学系レンズの焦点距離

また，添字の０は変形前の場合を示し，±の符号

This document is provided by JAXA.

は変位の方向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＋，遠ざかるときは－をとる。

さらに，本研究で扱っている材料は温度と時間の依存性を持っている。したがって，w 及び δ_a の値は温度と時間の関数となるが，材料が熱粘弾性的に単純な物質であるとの仮定を導入すれば，温度的変化を時間的変化に換算することができ，一定の温度下で実験を行えば，各温度における時間のみの関数として扱うことができる[1)〜4)]。また，w の値はごく一般的な面外変位を表わしている。このため，たわみとともに平行あるいは回転による面外変位が存在するときはこれらを含んだものになるが，同一試験片の変形前後を撮影したフイルムによりしま模様を観察すれば負荷装置の固定を十分にすることにより平行あるいは回転による変位をなくすことができる。このときには，式(1)で得られる w はたわみのみを表わすものになる。しかしながら，上述の平行移動などの面外変位を含んだしま模様を観察する場合には，いわゆる線型ミスマッチを与えた状態となり，密なしま模様となるためにしま間隔の測定精度を向上させることができるとともに，変形後のしま模様の変化によって変位方向の判定も可能になる。

一方，変形前の試験片表面の代わりに試験片と同じような平面を持った基準面を用意し，これを負荷装置に取り付け，無負荷の状態で格子を投影してさらに撮影する。このときのフイルムと同じように格子が投影された変形後の試験片を撮影したフイルムとを重ねてしま模様を観察したとすると，基準面と試験片表面が同一面上にない限り，この模様は平行移動による線型ミスマッチを含んだ場合のものとなる。したがって，たわみを求めるためには式(1)で得られた w の値からこの平行移動による面外変位の分を取り除かなければならない。すなわち，

$$w_d = w - w_0 \tag{2}$$

ここで，w_d ；たわみ

w_0 ；平行移動による面外変位

さらに，この w_0 の値はつぎのいずれかの手法で決定できる。その一つは前に示した格子の投影光学系装置を光軸に沿って精密に移動させることによって直接 w_0 を測定する手法であり，もう一つは格子の投影された基準面と変形前の試験片表面を写真撮影した二枚のフイルムから線型ミスマッチのみによるしま模様を観察して，式(1)と同様な次式でこの値を求める手法である。

$$w_0 = \left\{ \frac{m_{a0}}{(\delta_{a0} \pm p_{a0})} + \frac{1}{m_{a0}\delta_{a0}} \right\} p_{a0} f_a \tag{3}$$

ここで，δ_{a0} ；基準面と変形前の試験片表面に投影された格子により形成された（線型ミスマッチのみによる）モアレじまのしま間隔

なお，線型ミスマッチに関係した w_0 の方向がたわみと同じ方向に与えられた場合は，たわみが大きくなるにしたがって密なしま模様となり，逆の場合は粗のしま模様になる。したがって，線型ミスマッチのみによるしま模様とたわみを含んだ面外変位によるしま模様を比較すれば，たわみの方向が判定できる。さらにこの基準面に投影した格子を用いる場合には，前の各式における m_{a0} 及び p_{a0} は基準面上の投影倍率及びピッチとなり，また δ_{a0} の値は再生のモアレじま模様から次の式で求められる。

$$\delta_{a0} = \frac{1}{m_p} \delta_{p0} \tag{4}$$

ここで，δ_{p0} ；線型ミスマッチによる再生モアレじまのしま間隔

一方，ここまでの各式に含まれる m_{a0}，p_{a0} 及び m_p の値は投影光学系，試験片の撮影及び再生像の観察における諸条件によって変化する値である。これに対しては試験片あるいは基準面上にあらかじめ適当な標点距離を定めておき，これを撮影したフイルム及び再生のしま模様が現われている物体像を記録したフイルムから次式により算出する。

$$p_{a0} = \frac{M_a}{n}, \quad m_{a0} = \frac{p_{a0}}{p_r}, \quad m_p = \frac{M_a}{M_p} \tag{5}$$

ここで，M_a ；試験片あるいは基準面上の標点距離

M_p ；再生像フイルム上の標点距離

n ；M_a 内の格子線の数

This document is provided by JAXA.

4.　実験例と実験結果

4.1　室温（15℃）におけるたわみの測定実験

本測定方法の妥当性を示す目的で，まず材料がガラス転移温度以下（ガラス領域）の15℃における座屈後のたわみ測定実験を行った。

図5は座屈によるたわみに対応したモアレじまの例である。このしま模様は基準面と試験片表面を撮影したフイルムを重ねて得られたもので，両端固定帯板の変形前及び変形後の中央部分，すなわちたわみが最大となる附近のものである。この実験では基準格子としてp_rが0.051mm（500本/in）の線型格子を，さらに投影光学系レンズにはf_aが75mmのものを用いており，基準面上のp_{a0}は0.283mmであった。また，この場合の投影光学系装置は精密な移動ができるように工夫されていて，これからw_0の値が直接求められる。一方，図5の変形前のしま模様はたわみと同方向の線型ミスマッチが与えられたときのものであり，w_0はこのしまと式(3)からも求められる。ここでは，まずおのおのの手法で求めたw_0の値を比較したが，この両者はよい一致を示した。

また，15℃前後の温度ではここで扱った材料の剛性が比較的高く，各変形段階での最大たわみはこのモアレ法のみでなくダイアルゲージによる測定も可能である。表1は各変形段階でのたわみを上述の二つの方法で測定した結果を比較したものであるが，

表1　モアレ法とダイアルゲージによるたわみ測定値の比較

図5に対応したしま模様	たわみ（mm）	
	モアレ法	ダイアルゲージ
(1)	8.72	8.71
(2)	13.80	13.81
(3)	20.50	20.09

この両者の値はほぼ一致している。しかし，ガラス領域における本材料の引張に対する弾性率は0.98〜1.08GPaであり[7]，粘弾性挙動も多少示す。このため，ここでは三段階の変位を与え，各段階でストッパにより変位が時間的に変化しないようにした場合のたわみを測定した。さらに，引張の弾性率から推定して曲げの剛性もそれほど高くないと思われるので，ダイアルゲージの測定圧力の影響は必ずしも無視できない。このため，表1の値は厳密には真のたわみよりも小さい値になっている可能性もある。しかしながら，二つの方法で同一のたわみ量を測定したものであるので，この両者の比較検討を目的とする場合には上述の点をとくに考慮する必要はなく，この結果から本モアレ法はたわみの測定に十分適用できることが確認された。また，しま模様の読み取り精度などによる誤差などから，0.5mm以上のたわみ量であれば測定可能であることも推定された。このたわみ量は先の報告で示した[6]，変形前と後の試

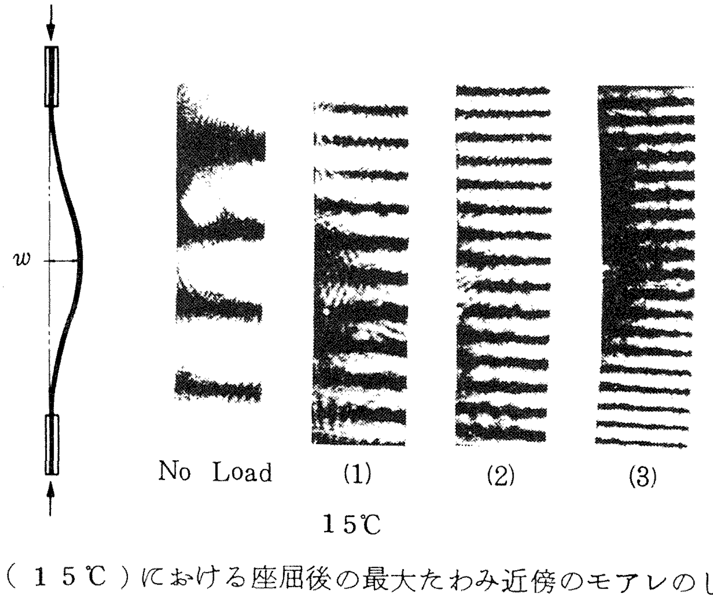


図5　室温（15℃）における座屈後の最大たわみ近傍のモアレのしま模様

This document is provided by JAXA.

験片像が記録されたフイルムを重ねてしま模様を観察する，すなわち線型ミスマッチが与えられていない場合の測定感度（測定可能な最小変位量）よりもかなりよくなっている。これは次のような理由による。線型ミスマッチが与えられていない場合，測定感度は十分観察できるしま模様が得られるかどうかで決定されるのに対しミスマッチを与えた場合は変形前後のしま模様の差がどこまで求められるかにより決定される。一般に前者に比べて後者の場合の方がより小さいところまで求めることができる。

4.2 各温度領域におけるたわみの測定実験

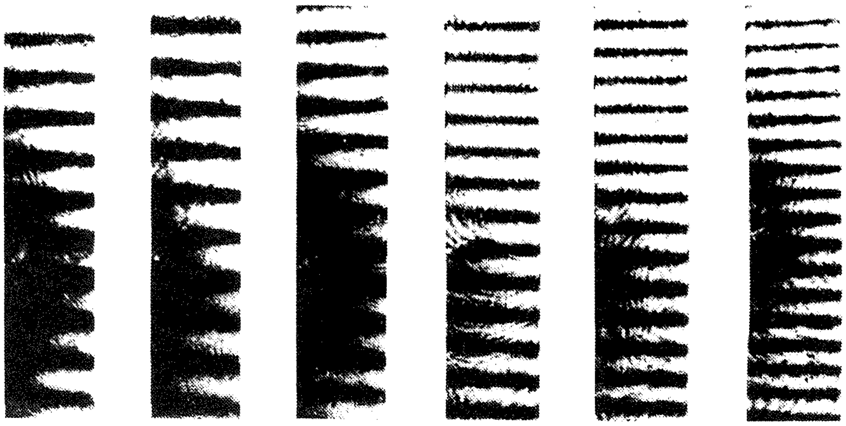
座屈後のたわみの温度及び時間依存性検討のために２０℃，４０℃，６０℃における実験を行った。

図６は各温度領域で得られた時間とともに変化するモアレじまの例である。２０℃，４０℃では負荷直後から3時間（１０８００秒）まで，６０℃では同じく３０分（１８００秒）までの各時間点でのものが示してある。この場合も室温（１５℃）の実験と同じ基準格子及び光学系装置を用いており，線型ミスマッチもたわみと同じ方向のものが与えられている。また，p_{a0}の値は図６に示されているように，各温度の場合で多少異なっているが，０.２８㎜前後であった。さらにこの実験では，各所定の温度下で負荷と同時に座屈をする大きさの一定荷重をかけた。したがって，このしま模様は一定荷重下で時間とともに変化する，いわゆるクリープたわみに関係したものである。一方，材料の曲げに対する剛性は引張の場合と同様に温度によって著しく変化することが予想された。したがって，同程度の密度でしま模様を観察する，すなわち同じ程度のたわみを生じさせるためには温度によって荷重の大きさを変える必要があった。

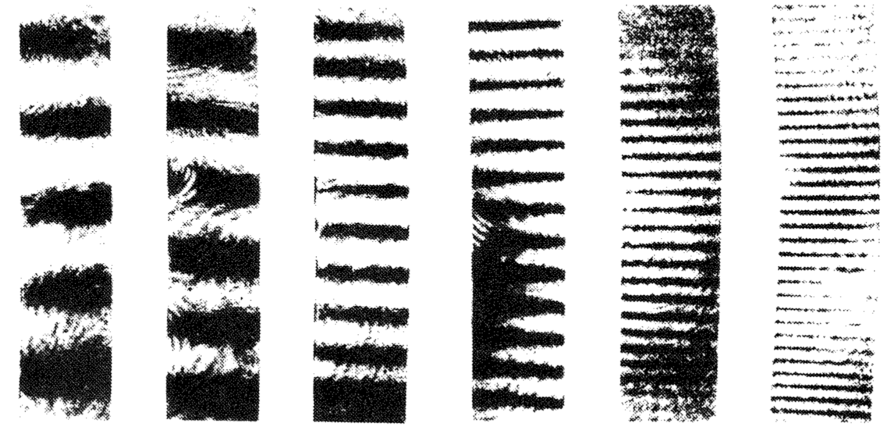
この図６のしま模様から定性的に本材料の面外変形特性が判定できる。まず２０℃の場合はしま模様の時間的な変化が少ない。これは材料がガラス領域の場合であるために，多少のクリープ変形はするが，あまり顕著でないことを表わしている。一方，４０℃の場合は時間とともにしま模様が著しく変化している。これはガラス転移温度を越えた領域になると顕著なクリープ変形をするようになることを示している。さらに，６０℃になると材料の曲げの剛性がかなり低下する。したがって，この場合は２０℃あるいは４０℃に比べて相当に低い荷重で実験をした。このために，６０℃におけるしま模様は比較的あらいものになっており，たわみが小さいことを現わしている。しかしながら，負荷後３０分（１８００秒）以上経過すると座屈による変形が急激に進み，しま模様の観察が不可能になってしまうので，ここではこの時間点までのしま模様しか示されていない。とくに６０℃前後の温度は本材料のゴム平担領域である[7]。一般にこの領域では材料の剛性は著しく低下するが，時間依存性は比較的小さくなる性質を持つようになる。このため，上述の現象は次のように考えられる。すなわち，負荷直後はたわみが小さく，しかも時間的な変化がわずかであっても，このたわみは徐々に大きくなって行く。そうして，たわみ量が臨界値に達する時間点に至ると，剛性の低い材料が弾性座屈をしたような状態になり，大変形をしてしまう。

さらに，各温度で得られたしま模様から最大たわみの値を求めてこれを単位圧縮応力（１MPa）当りの値に規準化したときのクリープたわみの曲線を図７に示す。この図には，２０℃の曲線に対し４０℃の曲線はたわみが時間とともに著しく大きくなる，さらに６０℃では負荷後３０分ぐらいまでたわみが徐々に大きくなる程度であるが，この時間を過ぎると急に大きくなることが示されている。また，同一の圧縮荷重を負荷した場合には温度により初期のたわみがかなり違っていて，材料の曲げの剛性が著しく変化しているのがわかる。温度に対する引張のクリープコンプライアンスについてはすでに図３に示したが，この値はガラス領域からゴム平担領域にかけて２桁の変化をしている。剛性はこのコンプライアンスの逆数に関係したものであるから，その低下の度合も２桁の変化をする。一方，曲げの場合の剛性はたわみに関係している。したがって，先に示した結果からこの場合の剛性変化も引張の場合に近い傾向となることが明らかになった。さらにガラス転移温度以上の領域では座屈で生じたたわみが小さな場合でも時間とともに大きくなる。ただ，引張試験の結果から推定して，低応力の場合はクリープ限が

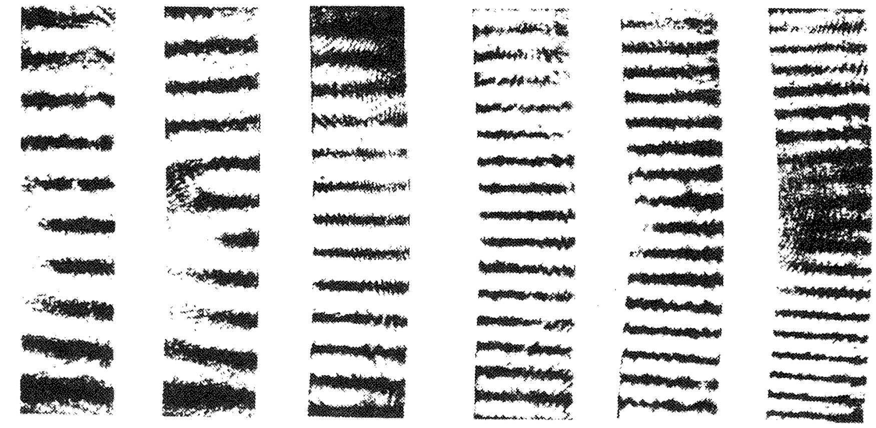
This document is provided by JAXA.



２０℃　荷重41.39N，p_{a0}=0.277㎜



４０℃　荷重33.88N，p_{a0}=0.277㎜



６０℃　荷重8.47N，p_{a0}=0.283㎜

図６　各温度下におけるクリープたわみに関係したモアレのしま模様

This document is provided by JAXA.

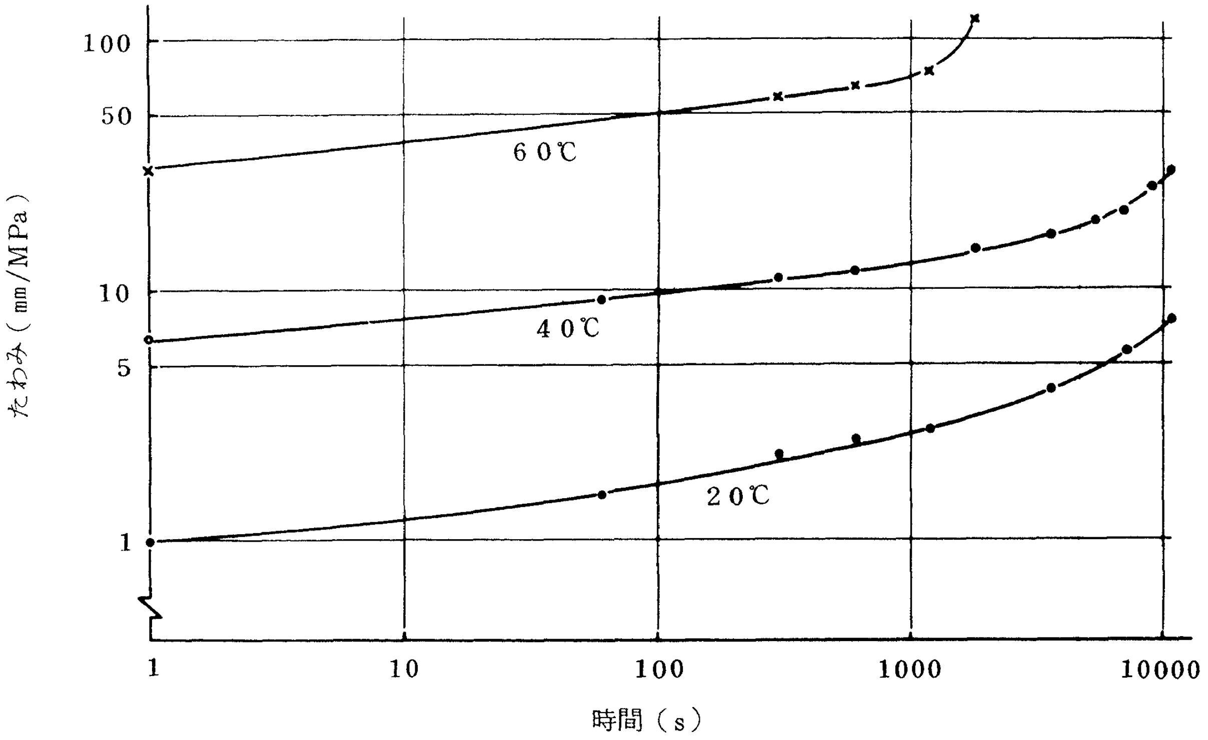


図7　規準化された最大たわみの温度と時間による変化

存在し，そこまで変形が進むと停留する点があると考えられる。しかしこの点ではすでに大変形となっているので，ここで行った方法ではたわみの測定が不可能であり，また構造部材としては使用限度をはるかに越えたものとなる。以上で示したことから，高分子材料を構造部材として用いる場合，ガラス転移温度以上の領域になると著しい粘弾性挙動を示し，この温度が材料の使用限度となる。ここではガラス転移温度が低い材料に対する実験例であったが，ガラス転移温度の高い耐熱高分子材料の場合もこの温度以上の領域では同じような挙動をするものと思われる。一般に，炭素繊維などによる強化複合材料用マトリックスには耐熱高分子材料が使われているが，以上のことから複合材料の場合もこのマトリックスのガラス転移温度が温度的な使用限度となることも十分予想される。

5. 実験装置及び方法に関する問題点の検討

前述の実験結果より，温度及び時間に依存する特性を持つ材料のたわみ測定に対してもここで示したモアレ法が有効であることがわかった。しかしながら，より広い範囲のたわみ分布を定量的に求める場合には実験装置に関係したいくつかの問題がある。

その一つとして，本研究での実験で取り上げた程度の大きさの試験片を対象にする場合には物体面と投影光学系装置との距離が小さいため，この面へ格子を投影する際の限界があることである。すなわち，投影光学系の焦点深度にもよるが，一般に物体が面外に変形している場合，面全体に格子を投影してもこれが鮮明に投影される範囲は局部的になり，例えば先の実験の最大たわみが生じている場所のように，変形量を求めたい場所附近に限られてしまう。原理的には変形した物体面を分割して考え，各部分に焦点を合せて格子を投影し，おのおののしま模様を観察すれば広い範囲にわたるたわみ分布を求めることは可能であるが，投影光学系の自動移動制御装置などを導入しない限り，実際に行う場合にはきわめてはん雑な操作となり，精度も保障できない。このようなことから，現段階では局部的な範囲でのたわみ分布測定にとどまってしまう。

次の問題として，ここで行っている実験装置では投影光学系の光軸を面外変形した試験片面に垂直にし，さらにこの面に対して傾いた方向から撮影した

This document is provided by JAXA.

フイルムによりモアレじまを観察している。図5あるいは図6の変形後の試験片像が曲っているのはこのためである。したがって，厳密には撮影倍率の差並びに投影光学系光軸からの傾き角を考慮した修正をする必要がある。これに対して，投影光学系の方を傾けて格子を投影し，垂直な方向から撮影する方法も考えられる。この場合には変形後でも試験片像は真っ直ぐであるが，投影された格子が扇形となって平行にならないため，この修正が必要となり，いずれの場合も効果は同じである。しかしながら，表1の結果を見る限り実際の測定においてはこの点を無視してもさしつかえない。

さらに，ここで行った実験は最高60℃までの温度であったためとくに考慮する必要がなかったが，この方法をより高い温度下の測定へ適用する場合には空気の対流によるゆらぎが問題になる。これに対しては，一般に短時間露出の撮影をすることで解決できる。本実験ではストロボフラッシュ光源による格子の投影並びにこれと連動した試験片表面の撮影をしている。この場合には露出時間がストロボフラッシュの閃光時間により決定され，今回の光源では1/800秒であった。したがって，この投影並びに撮影法によれば非常に短時間露出の撮影をすることになるので，より高温下での測定も十分可能である。しかも測定感度及び精度は温度には全く関係がない。

6. 結　　言

この研究では粘弾性的な面外変位を測定するために，まず温度変化のある環境下で時間により変化するモアレじまが観察可能な実験装置及び手法を開発し，これに先に筆者が導出したモアレ法による面外変位解析法を適用した方法について示した。

さらに，この方法の応用例として，室温よりわずかに高い温度領域で顕著な粘弾性特性を示すエポキシ系樹脂帯板試験片が室温から60℃までの間の何段階かの温度下で圧縮荷重を受けて座屈した後の時間とともに変化するたわみの測定実験を行った。また，この測定実験から次のような結論が得られた。

(1)　材料がガラス状である温度領域（15℃）の実験において，上述の方法で求められたたわみの値とダイアルゲージによる測定値とを比較した結果，この方法では0.5㎜以上の大きさの面外変位測定が可能である。

(2)　20℃，40℃，60℃の三段階の温度におけるクリープたわみ測定実験により，材料の剛性が低下ししかも著しいクリープなどの時間依存性を示す場合のたわみ測定が本方法で十分可能である。また，実際にクリープたわみの曲線を求めることによって，ここで扱った材料の粘弾性的な挙動を明らかにした。

(3)　上述の粘弾性的な挙動から推定して，一般に高分子材料をマトリックスとした複合材料はガラス転移温度がその材料の使用限界温度になると考えられる。

(4)　たわみの定量的な解析に対して，ここで行った実験の投影あるいは撮影光学系装置の配列に関する問題点の検討をしたが，今回得られた結果から限られた範囲におけるたわみ分布を求める場合実用的にはこれらを無視してもさしつかえない。

本モアレ法は非接触の方法でしかも時間的変化を記録することもできるため，温度と時間に依存する変形の測定に有効であることがわかったが，とくに短時間露出による写真撮影法を採用しているため，空気の対流によるゆらぎが問題になるような高温度においてもしま模様の観察が可能で，しかも測定感度あるいは精度は室温の場合と全く同じである。このことから，より高温度下における構造部材の曲げ，たわみなどの測定への本方法の応用が十分期待できる。

参　考　文　献

1)　村上，高橋，中村訳（A.V.Tobolsky)；高分子の物性と構造（Properties and Structure of Polymer)，東京化学同人（1970）

2)　小野木重治；レオロジー要論，槇書店（1967）

3)　牟岐鹿楼；線型粘弾性論の最近の進歩，日本機械学会誌，Vol.64，№513　(1961)

4)　伊藤勝彦；高分子の材料力学，日本機械学会誌，Vol.64，№513　(1961)

5)　国尾武，M.L.Williams　；粘弾性体の力学的挙動，日本機械学会誌，Vol.68，№552（1965）

6)　越出慎一；しま再生装置を用いたモアレ法によ

This document is provided by JAXA.

る面外変位解析の検討，航空宇宙技術研究所資料，TM−481（1983）
7）越出慎一；高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の応用，航空宇宙技術研究所報告，TR−470（1976）

This document is provided by JAXA.

航空宇宙技術研究所報告789号
昭和58年11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 実業公報社
東京都千代田区九段南4－2－12

This document is provided by JAXA.

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.