

UDC 678.643:  
620.171.5

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-390

高強度耐熱エポキシ樹脂の材料特性の測定

越 出 慎 一

1979年8月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 高強度耐熱エポキシ樹脂の材料特性の測定\*

越 出 慎 一\*\*

## Measurements of Material Properties of Heat Resistant and High Strength Epoxy Resins

By Shinichi KOSHIDE

### ABSTRACT

Material properties, i. e. thermal expansion, stress-strain relation, elastic modulus and creep compliances, of heat resisting and high strength epoxy resins for graphite fiber reinforced composites were measured at room temperature and at 90°~150°C by the Moire method using the "Fringe reconstructor," which is an optical filtering system with coherent light.

The results indicate that the resins have high rigidity, and considerable creep deformation does not occur at temperatures below 150°C. Therefore, it is expected that the fiber reinforced composites using the resins are of high strength and are usable for structural members in temperatures range below 150°C

### 1. 結 言

航空機の主要構造部材として、炭素繊維強化の複合材料が使用されるようになってきたが、この材料のマトリックスには主にエポキシ系の樹脂が用いられている。しかし、この複合材料を実際に使用する場合に層間せん断強度が問題となり、しかも高温にさらされるとこの強度はかなり低下する。またこの強度の低下はマトリックス、すなわちそこで用いられている樹脂の高温における材料特性に依存することが指摘されている。<sup>(1)</sup> 一方、最近になって複合材料をある程度の高温下でも使用することが要求されはじめた。この要求に答えるため、このマトリックス用として高強度の耐熱エポキシ樹脂と言われものがいくつか開発された。ここでは、このような耐

熱エポキシ樹脂の一つで、まだ十分温度変化に関係した材料特性の資料が得られていないものについて高温(90°~150°C)における特性の測定を行った。

この測定には、先に発表したしま再生装置を利用するモアレ法<sup>(2)</sup>を主に適用した。しかし、ここで扱った樹脂は格子線の印刷が必ずしも容易でない、剛性が高く面内変形が小さいので面外移動の影響が無いようにしないと測定精度が悪くなるなど、この方法を適用するに当っては問題があった。これに対し、まず材料表面を処理して格子線を印刷する手法を用い、格子線撮影法を考慮し、また特別な試験片形状にするなどによりひずみを求め、材料特性を測定することができた。なお、モアレ法では精度の上で多少問題が残ったので、いくつかの例に対し電気抵抗ひずみ計及び標点間変化からひずみを求める方法による測定も併用し、これらによる値とモアレ法による値とを比較検討した。その結果モアレ法による値が実用的には十分であることが確認できた。

\* 昭和54年5月30日受付

\*\* 機体第二部

本報告では、ここで扱った高強度耐熱エポキシ樹脂の高温におけるひずみ測定にモアレ法を用いる場合の手法、これによる結果と他の方法の結果との比較による検討及び測定結果から得られたこの材料の温度が変化するときの特性について示した。

## 2. 高強度耐熱エポキシ樹脂へのモアレ法の適用

### 2.1 試験片格子の印刷

ここで扱った高温硬化形の高強度耐熱エポキシ樹脂（三菱レーヨン 3501）は濃い褐色をしており、表面には硬化後鑄型の取りはずしを容易にするための離型剤が附着している。このため、表面が凸凹であるとともに感光液をはじいてしまう。また、先の報告で扱った室温硬化形のエポキシ樹脂（シェル化学エピコート 828）では格子線焼き付け法により非常に良好な格子の印刷が可能であった。<sup>(3)</sup> しかし、ここで扱う材料の場合は、上で述べたように表面状態が悪く、色彩的にも不適當であり、このままでは格子線焼き付け法によりコントラストの高い良好な格子を印刷するのが困難であった。そこで、まず

試験片表面を 500 番及び 1000 番の耐水研磨紙で磨き、離型剤を取り去るとともに表面を平滑にし、その上に先の報告<sup>(3)</sup>で示したと同様な格子線焼き付け法を適用して格子を印刷した。しかしながら、材料の色を変えることはできず、この格子線が濃青色であるため、印刷はかなり良好であったがコントラストが低く、通常の写真撮影ではフィルム上の格子線像をしま再生装置の回折格子として用いるのには不十分であった。これに対しては、後の節で述べるような方法で格子線を撮影することによってコントラストを高め、しま模様を観察することができた。

### 2.2 実験方法及び試験片格子の撮影法

ここで行うモアレ法は格子の印刷された試験片を負荷中に写真撮影し、そのネガフィルムから各負荷点でのモアレじまをしま再生装置により観察してひずみを解析するものである。しかしながら、ここでは温度を変化させた条件のもとでの実験をする必要がある。さらに、前に述べたようにコントラストが低い格子線が印刷された試験片であり、このままでは一般に行われている撮影法で撮影されたフィルムからは十分なモアレじまの観察がで

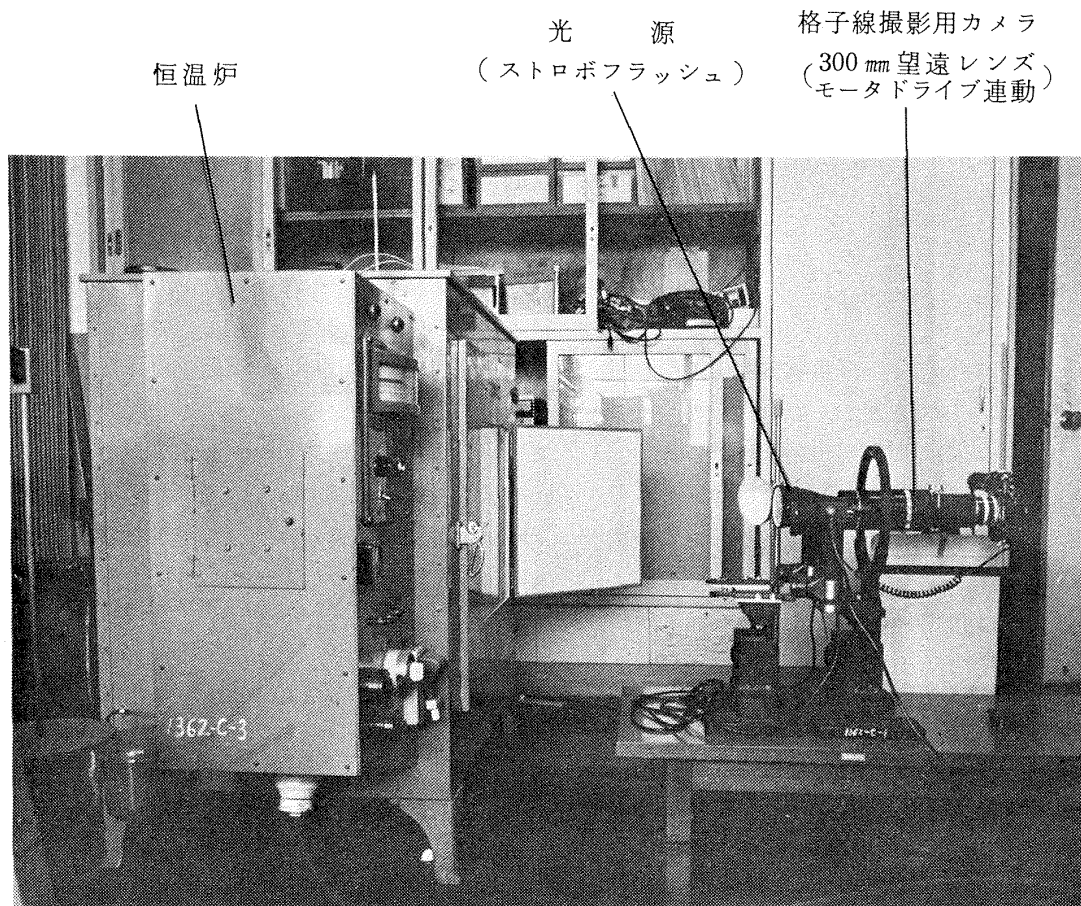


図1 実験装置

きない。そこで、実験及び試験片上の格子線撮影は次のような方法で行った。

まず、図1に示すように、耐熱ガラスの窓を持った恒温炉（ここでは光弾性実験用電気炉を流用）の中の負荷装置に試験片を取り付け、所定の温度にし、炉の外部から死重による荷重をかけた。この温度は試験片と同じ材料で熱電対が埋め込まれたブロックを試験片近傍に取り付け、この出力をデジタル温度計に入れて検出した。また、この温度を絶えず監視し、手動で炉の温度制御を行った。

一方、この場合には試験片が炉の中に取り付けられ、しかも炉の周辺が高温になるため、撮影用のカメラは試験片からかなり離れた場所に固定することになる。したがって、撮影された格子線像を回折格子として使用できるような格子間隔にするためには、焦点距離の長いレンズなどによる拡大撮影が必要であった。また、一般に高分子材料はガラス転移温度以上になると時間依存性のある粘弾性挙動を示す。今回扱った材料も温度条件によってはこのような状態になる可能性があることを考慮すると、高速露出の撮影をしなければならない。ところが、コントラストの低い高密度の格子線を撮影するため、感度の低い高解像力のフィルムを使用する。このために普通の光源による照明では、上述とは全く逆の長時間露出の撮影をしなければならない。ここでは、このような条件を満たす撮影をするために、まず蛇腹と二個の中間リングにより構成された焦点距離 300 mm の望遠レンズを用いた。また、感度の低い高解像力フィルムでも強い光源を用いて高速露出の撮影を行えば鮮明な格子線像が得られ、コントラストもかなり改善されることがわかった。そこで、高解像力フィルム・ミニコピーHR-IIを使用し、二個の高出力ストロボフラッシュによる光源をモータドライブと連動させて試験片上の格子線の撮影を行った。なお、この方法によれば、材料が時間依存性を持ち、時間とともに変形が進むような場合でも、特定の時間点での撮影が可能となる。

### 2.3 しま模様の観察と記録

前に示した方法により撮影されたフィルムを現像処理し、これを回折格子としてしま再生装置に入れるとさらにコントラストの高められたモアレのしま模様が観察できる。<sup>(2)</sup> この場合、しま再生装置の高次回折光を用いれば測定感度を向上させることもできるが、小型カメラ用35フィルムではこのようなしまの観察は必ずしも容易でない。また、ここでは定量的な解析をすることが主眼であるから、これが可能である1次の回折光によるしま模様を観察した。このように観察されたしま模様は、さら

にしま再生装置に結合されたカメラにより写真撮影して記録した。これを記録するときは十分コントラストの高いしま模様が観察されているので、一般の高感度フィルムを使用することができる。

### 2.4 ひずみの解析

ここでのモアレ法は面内変位に関係したしま模様を観察・記録している。しかもこの模様はミスマッチ及びミスアラインメントが与えられた状態で二枚の格子を重ねたときに得られるモアレじまと全く同じ性質のものである。同一条件のもとで、負荷により変形した試験片と変形していない試験片によるモアレじまを観察、記録するようにすれば、これらのしま模様の差は負荷による面内変位に関係したものとなる。したがって、面内の垂直ひずみ成分は、試験片格子のピッチが基準格子のピッチよりも大きいようなミスマッチを与えたものとする、次の式で求められる。

$$\varepsilon_i = \frac{p(\delta_{0i} - \delta_i)}{\delta_{0i}\delta_i - p(\delta_{0i} - \delta_i)} \quad (1)$$

ここで  $\varepsilon_i$  は  $i$  方向のひずみ成分、 $\delta_{0i}$ 、 $\delta_i$  は  $i$  に垂直な方向の格子線で形成される変形前（ミスマッチによる）と変形後のモアレじまのしま間隔、 $p$  は試験片上に印刷された格子のピッチである。

また、前の節で示した撮影法によれば、時間依存性がある場合でも時間とともに変わる変形に関係した格子線の撮影ができ、これから各時間点でのしま模様を観察することができる。したがって、クリープひずみの解析も可能である。

## 3. 測定実験とその結果

材料特性の測定実験としてここでは高強度耐熱エポキシ樹脂の熱膨脹ひずみ、室温及び高温（90°～150°C）における引張試験並びに高温（130°C、150°C）の短時間引張クリープ試験によるひずみの測定を行った。

まず、図2には150°Cまでの熱膨脹によるモアレじまの変化の一例を示す。これは  $p$  が 0.0508 (500本/in) の線型格子によるものである。この場合は試験片の一点を固定し、他は自由に膨脹できるような状態にして温度を変化させて行き、各温度で図2のようなしま模様を観察する。ある基準となる温度でのしま模様を変形前とし、他の各温度におけるしま模様を変形後と考えると、式(1)より基準温度から各温度までの熱膨脹ひずみを求めることができる。図3は基準温度を30°Cとした場合の熱膨脹ひずみを解析した結果であって、試験片上に付けた標点間距離の変化から求めた値とも比較してある。

つぎに、図4には今回の引張試験並びに引張クリープ

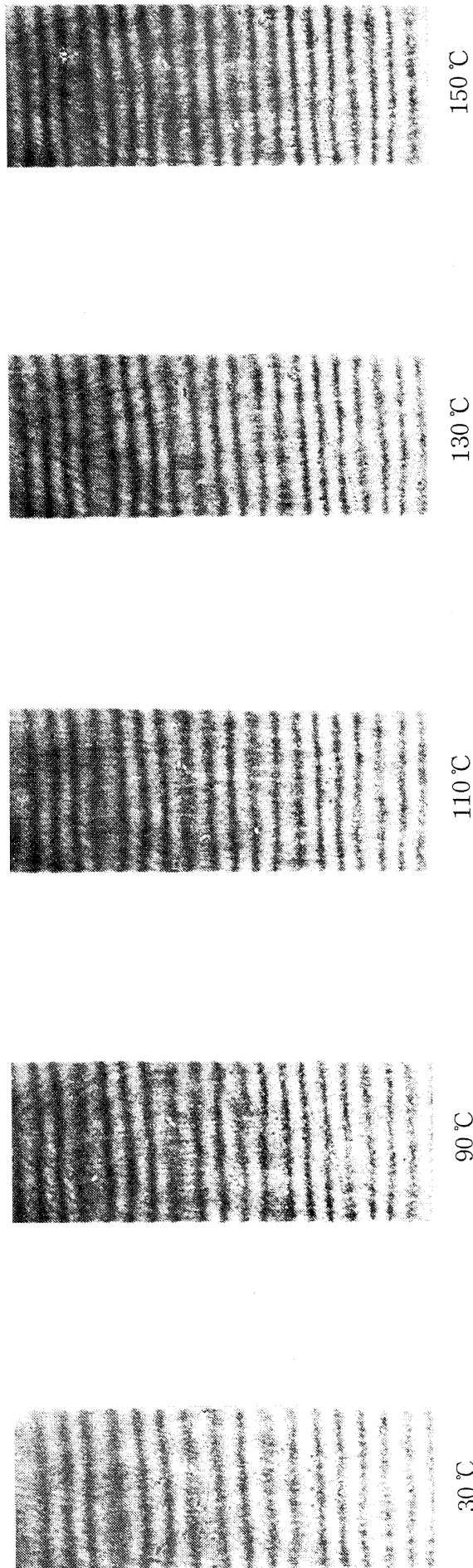


図2 熱膨脹によるしま模様の変化

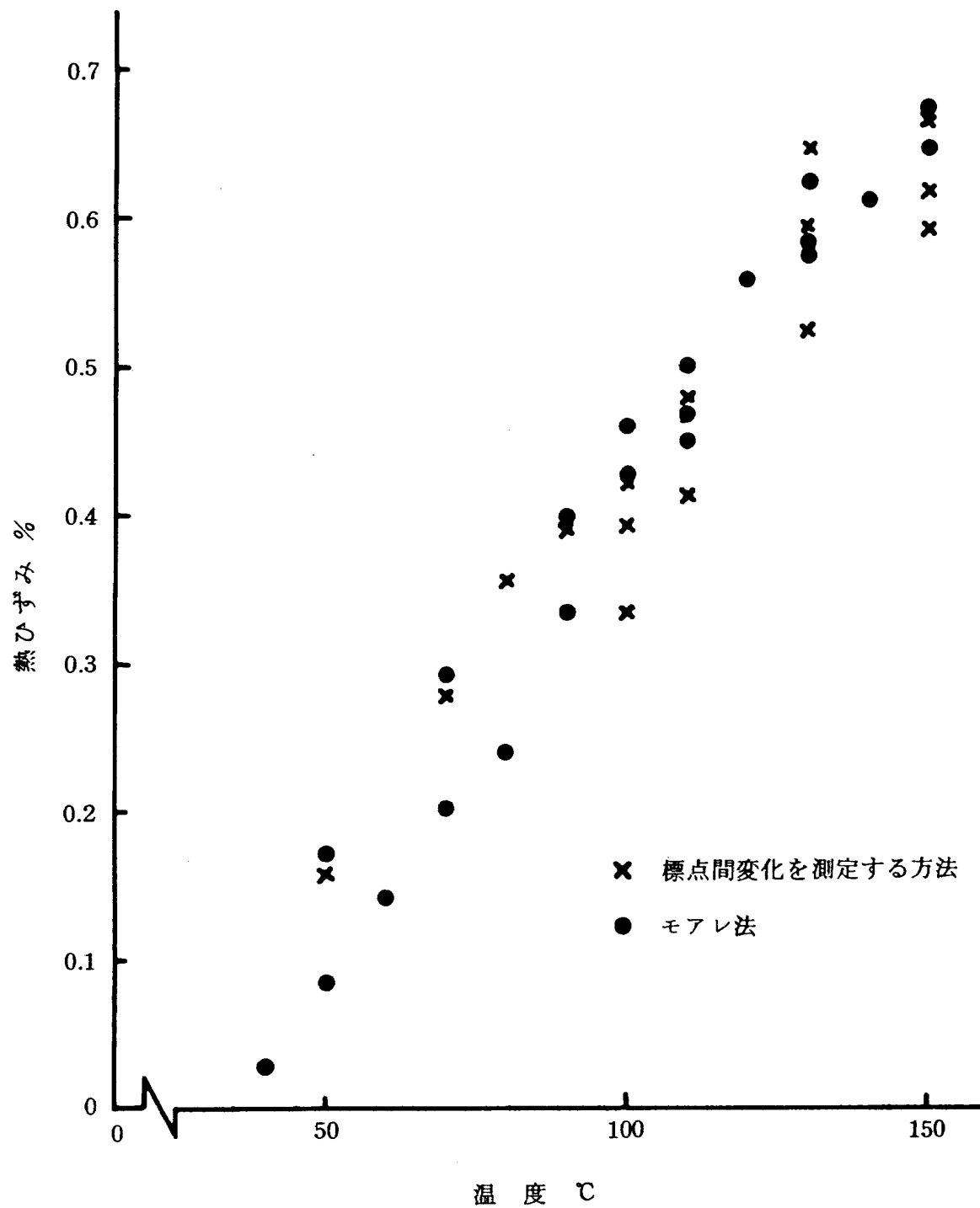


図3 熱膨張によるひびずみ (基準温度 30 °C)

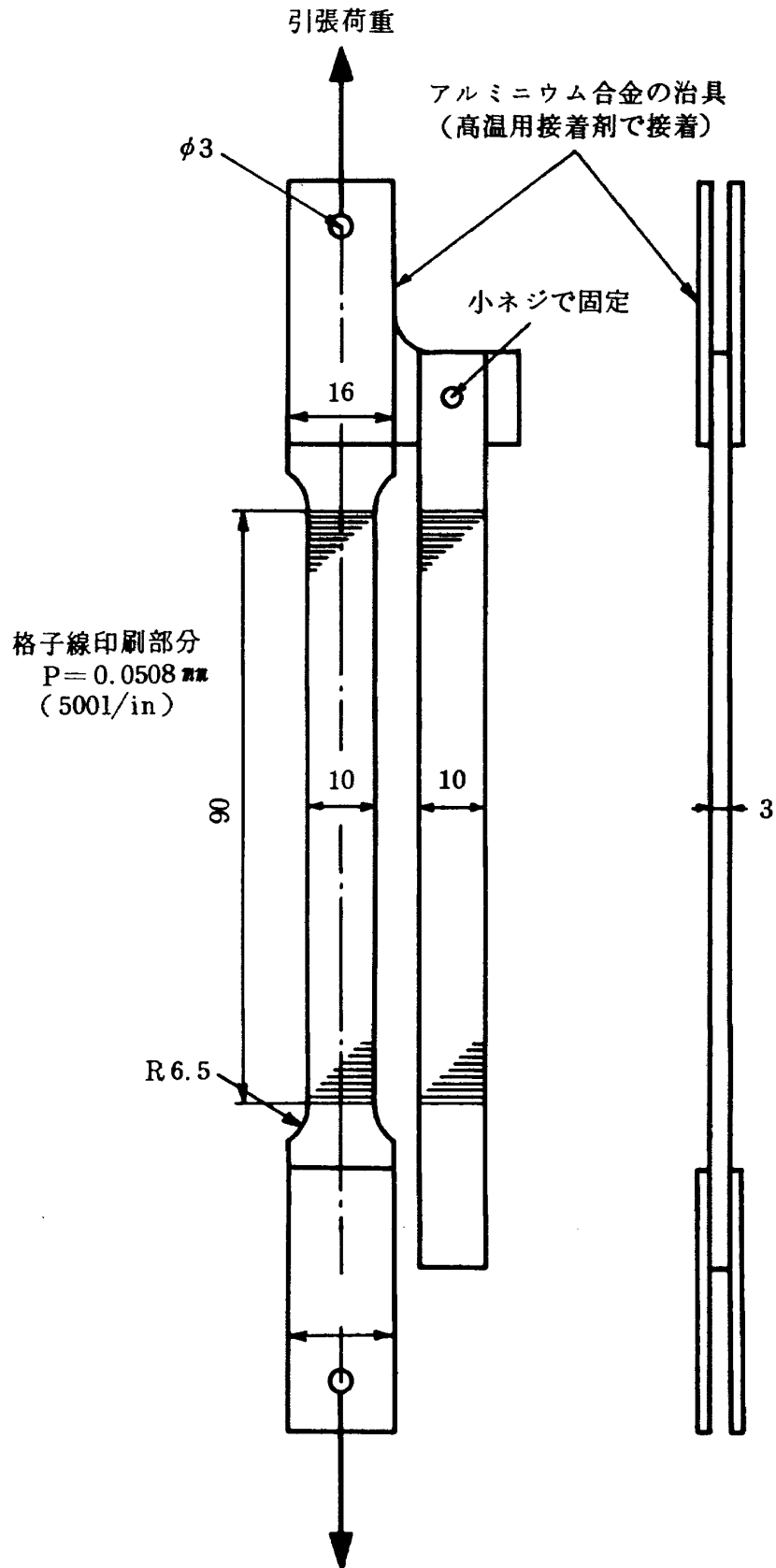


図4 引張試験，引張クリープ試験の試験片形状寸法

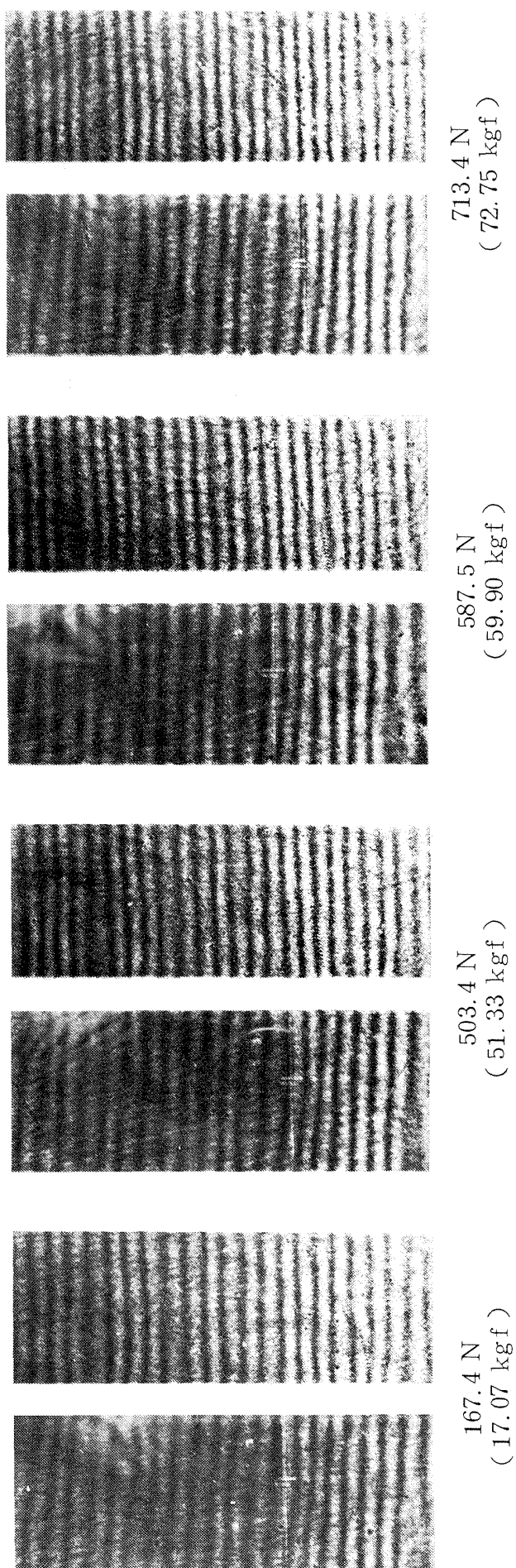


図5 引張試験におけるモアレじまの例(150℃)



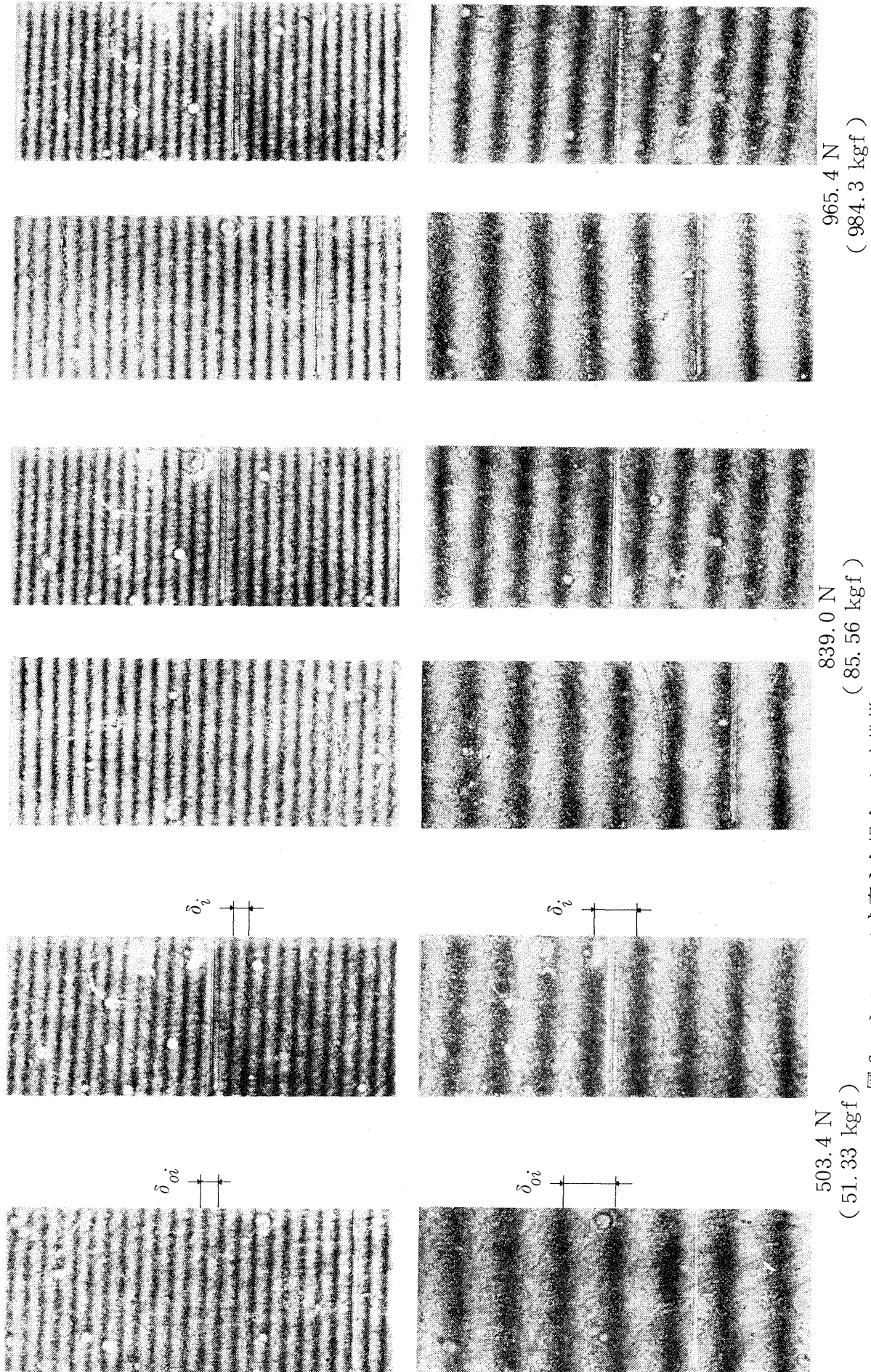


図6 ミスマッチを変えた場合のしま模様  
 (上側・ミスマッチが大きい場合, 下側・ミスマッチが小さい場合, 18℃)

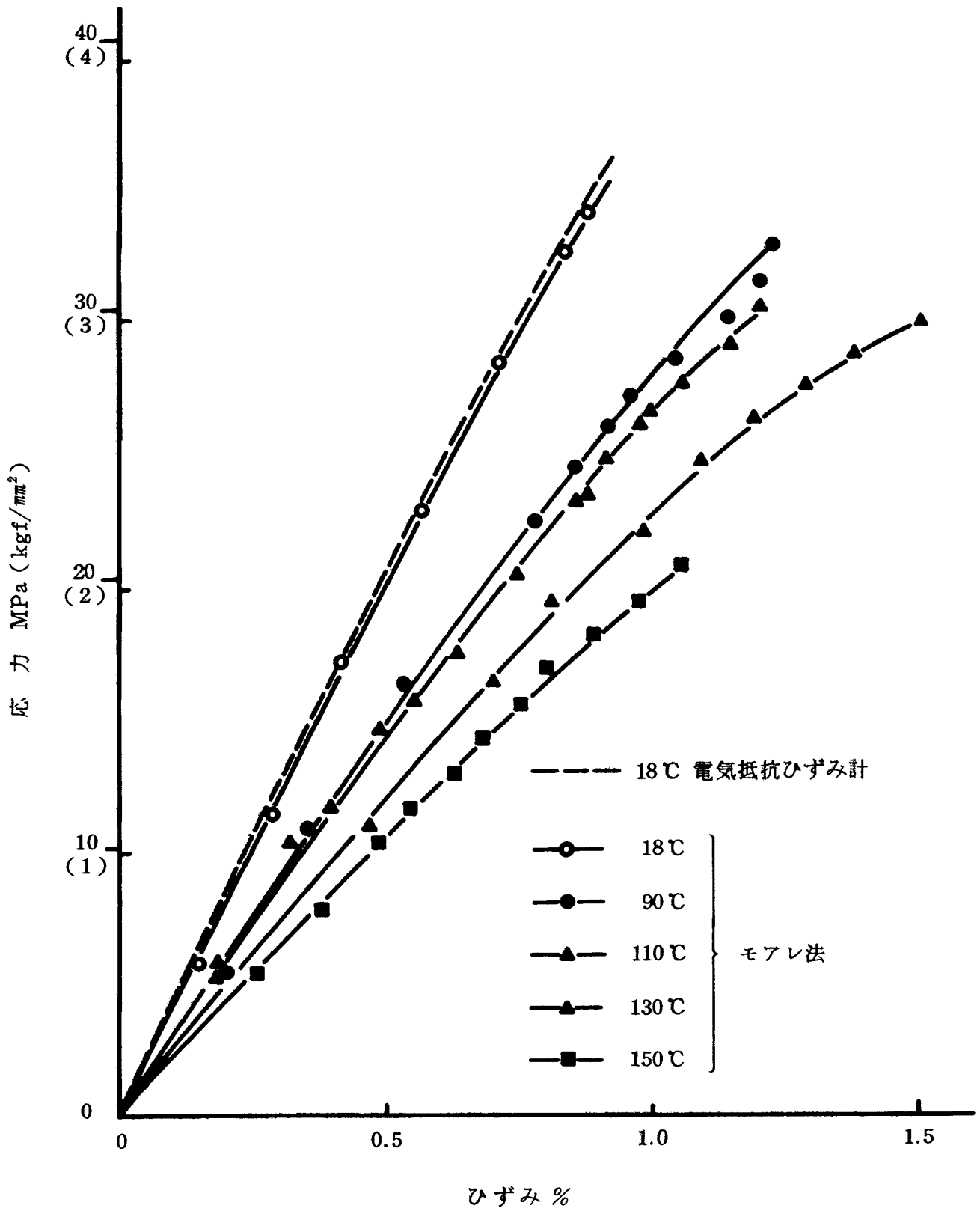


図7 各温度における応力ひずみ関係

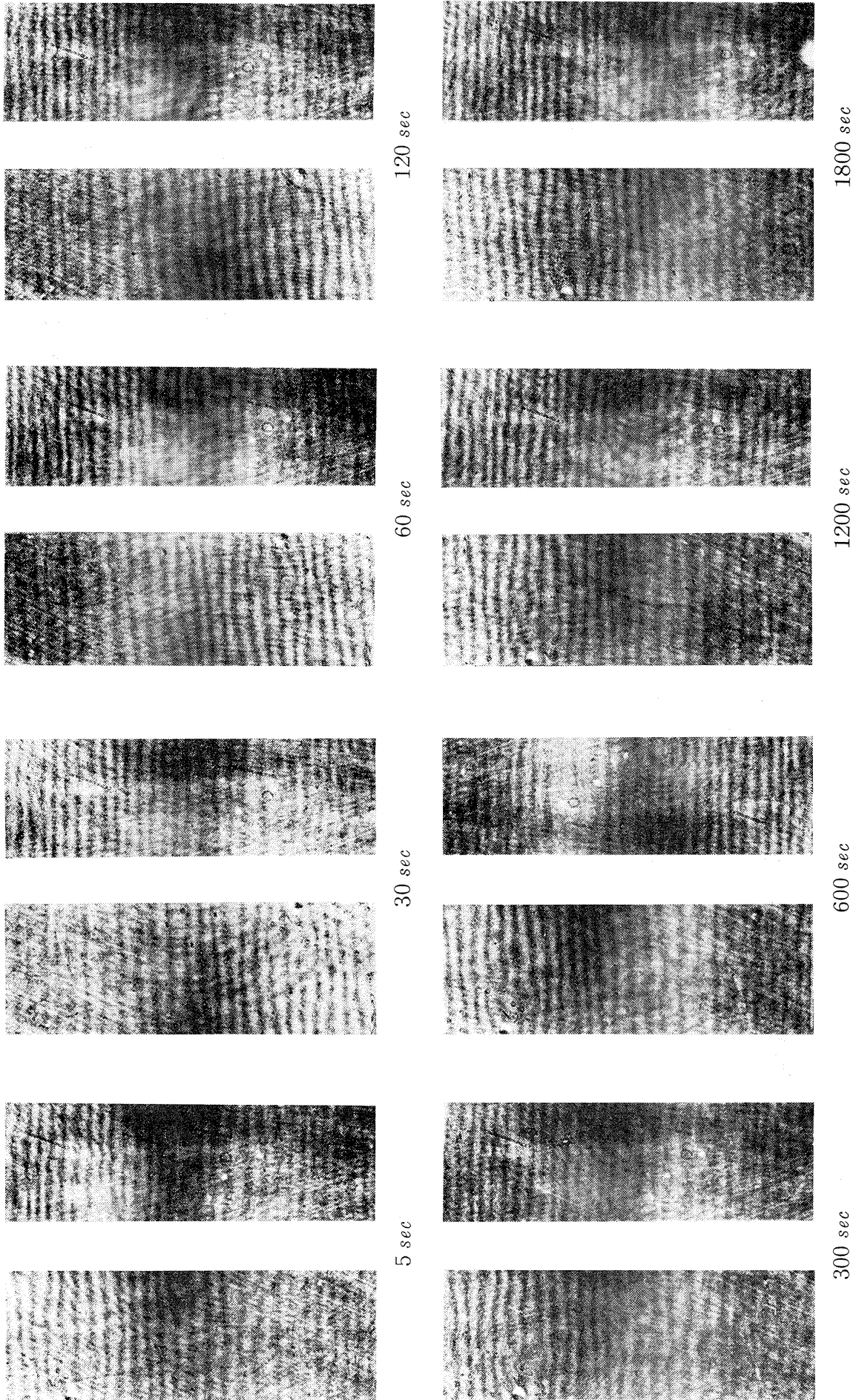


図 8 引張クリープ試験におけるモアレじまの例  
 (150℃ 引張応力 17.9 MPa [1.82 kgf/mm<sup>2</sup>])

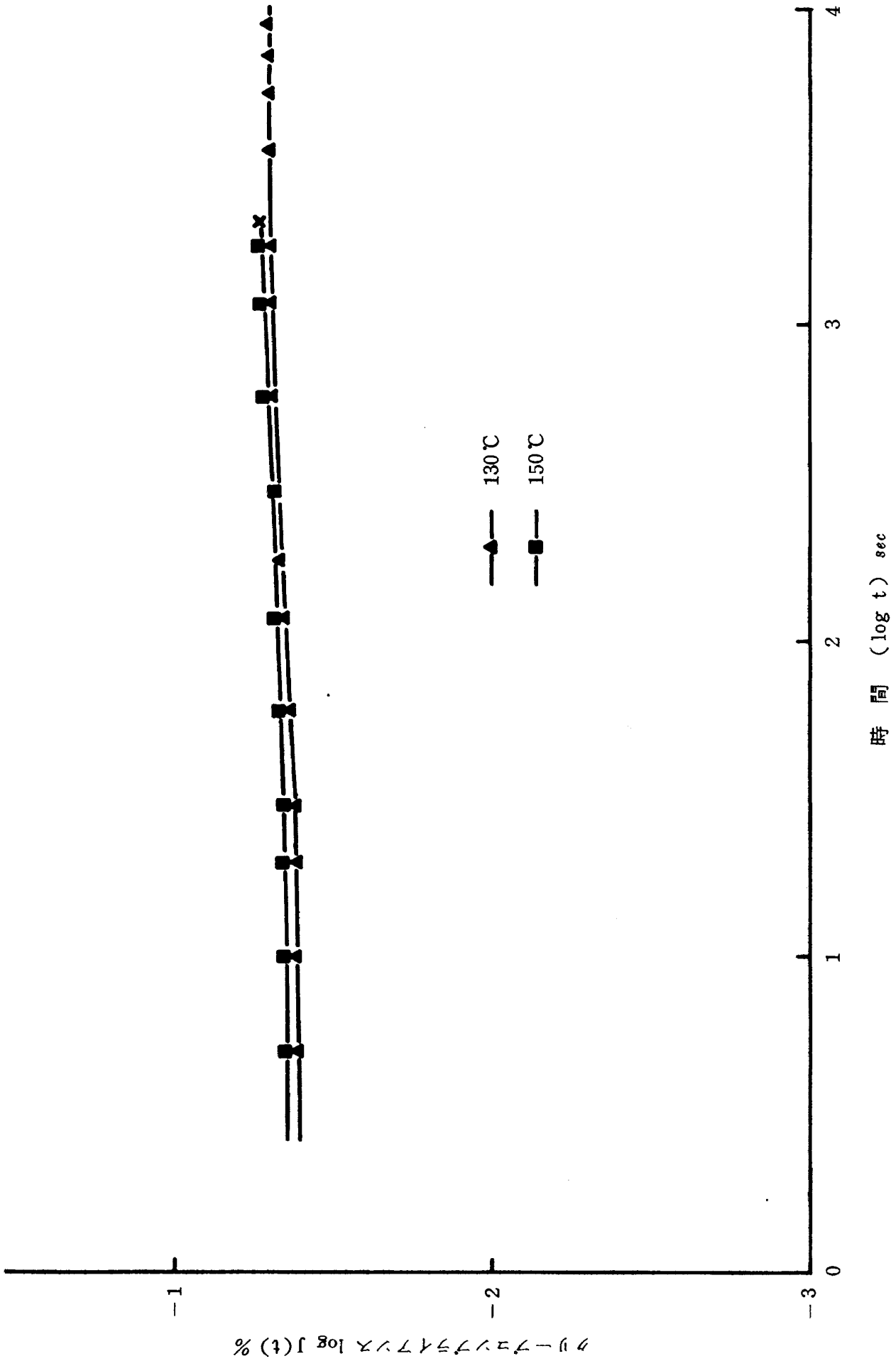


図9 高温におけるクリープコンプライアンス

試験で使用した試験片の形状を示してある。この試験片は同じ材料で  $p$  が  $0.0508 \text{ mm}$  の全く同じ線型格子が印刷された二本の試験片により構成されており、この内の一本がピンを介して負荷され、他の一本は一端が自由の状態になるようにしてある。したがって、負荷中のこの二本の試験片を一枚のフィルム上に撮影すると、同一条件下で負荷により変形した格子線像と変形していない格子線像が同時に得られる。このフィルムをしま再生装置に入れると、二本の試験片上の格子線像により二種類のモアレじまが観察でき、このしま模様は変形前と変形後のしまを表わすことになる。とくにこのような試験片を用いたのは次のような理由のためである。まずこの二つのしま模様の差、すなわち変形前と後のしま模様の変化は温度変化による材料の熱膨張に無関係である。したがって、この差は負荷したときの試験片の変形のみによるものと考えられる。原理的には一本の試験片による変形前と後のしま模様を観察すればよいが、負荷とともに試験片が面外の移動をしてしまう場合にはこのしま模様の変化は面外の移動と面内変形の両方に関係してくる。しかも面内変形が小さいと面外の移動によるしま模様の変化は相対的に大きくなっていく。このため、一本の試験片のしまを観察する方法では面外の移動によるしまの変化量と面内変形による変化量が分離できない限り面内ひずみの解析は不可能である。一方、図4のような形状の試験片を用いれば、二本の試験片面は面外に移動しても同時に動き、二つの試験片面は絶えず同一面上にある。したがって、二つのしま模様の差は面内変形のみによるものとなり、より小さな面内ひずみの解析も可能となる。

図5には高温 ( $150^\circ\text{C}$ ) の引張試験により得られたモアレじまの例を示す。この図の各荷重点におけるしま模様の左側は変形をしていない試験片、右側は変形をした試験片のしまを示したものである。また図6は引張試験における二通りのミスマッチ量に対するしま模様で、同一の変形点でもミスマッチを変えるとしま模様が変わることを示したものである。このような各温度で得られたしま模様と式(1)から容易にひずみが解析できる。図7はこの結果として、 $150^\circ\text{C}$  までの各温度における応力とひずみの関係を示したものである。

さらに、図8には引張クリープ試験の負荷後の各時間点におけるしま模様を示した。この場合も図4のような試験片を用いており、左側は変形前、右側は変形後のしまである。一定負荷後の各時間点でこのようなしま模様を観察すれば、各時間点でのひずみが求められる。図9は  $130^\circ\text{C}$  及び  $150^\circ\text{C}$  におけるクリープ試験で得られた耐熱エポキシ樹脂のクリープコンプライアンス (単位応力、

ここでは  $1 \text{ MPa} = 0.10197 \text{ kgf/mm}^2$  当りのクリープひずみ) である。

#### 4. 実験結果と材料特性に対する検討

##### 4.1 実験結果に対する検討

前の図3には、ここで扱った材料の熱膨張ひずみの解析結果を示してある。とくに、この図ではモアレ法による結果を検討する意味で、これと標点間変化から求めたひずみの値とを比較してあるが、両者の傾向はほぼ一致している。これから、本材料では  $150^\circ\text{C}$  ぐらいまで熱膨張による変化が直線的になっており、熱膨張率がほぼ一定であることがわかる。一方、両者とも各温度での値にはばらつきがある。これは、いずれの方法も測定感度がここで示されているような大きさのひずみ領域に対して必ずしも十分でないこと及び加工し難い材料であるので試験片間のばらつきが大きくなるのが原因であると思われる。しかし、ある程度の誤差はあるが、ここで示したモアレ法を引張試験などにより材料の特性を知る場合のひずみ測定に用いることが十分できる。

また、図5、6には引張試験で得られたモアレじまの一例が示されている。材料の剛性が高く、変形が小さいので、かなり大きな荷重点まで変形前と後のしま模様の相違はわずかであるが、図4のような試験片を用いれば面外変位や温度変化にはほとんど関係がないので、このわずかな相違から面内ひずみが求められる。なお、図6のように同一の変形に対してもミスマッチ量によりしま模様は変わり、変形前と後のしま模様の相違もこのミスマッチの与え方により変化する。一般にミスマッチ量を小さくすると図6の下のようにしま模様が粗くなり、両者の相違が大きくなるので、より小さなひずみの解析も可能となる。しかし、ミスマッチ量が小さくなるにしたがい、しま模様の観察に対するフィルム上の格子線像の鮮明度に対する条件が厳しくなる。このため、しま模様が不明瞭になってしまい、しま間隔の測定精度が悪くなり、ひずみの解析できる範囲も制限されてしまう。そこで、これをより正確に検討するため、室温 ( $18^\circ\text{C}$ ) の場合に対してモアレ法の値と電気抵抗ひずみ計の値とから得られた応力ひずみ曲線を比較した。ここで行ったモアレ法の測定可能な領域はひずみ量で  $0.1\%$  以上である<sup>(2)</sup> したがってこれ以上のところでの比較を行ったが、図7に示したように両者はほぼ一致している。電気抵抗ひずみ計を高分子材料に適用する場合、一様なひずみ分布であれば非常に簡単であるが、材料の熱伝導率が小さいことによるドリフトの問題があった。このため、次の節で示すような電気抵抗ひずみ計の適用に関する検討を行っ

た結果、ここで扱った材料(3501材)には室温近傍であれば、これを使用することができることがわかった。したがって、ここで行ったモアレ法にはこの他に、たとえば光学系のレンズ取差などによる誤差の原因となる点も含んでいるが、これらの影響は無視することができ、これにより得られた値は十分信頼し得るものであることが確認できた。

しかし、電気抵抗ひずみ計による値は温度変化によって影響を受け、高温下での高分子材料に対してはほとんど適用不可能と思われる。一方、モアレ法は格子線の耐熱性に関する問題があるが、測定精度には温度の影響がないので、この格子線が耐え得る温度まで適用でき、このときの結果は室温と同じ精度である。

#### 4.2 電気抵抗ひずみ計の適用に対する検討

先に示したように、モアレ法の結果を電気抵抗ひずみ計による結果と比較したが、ここでは高分子材料、とくにエポキシ系の樹脂にごく一般的な方法でこのひずみ計を適用した場合について簡単な検討を試みた。

高温あるいは温度変動下でのひずみを求めるのに電気抵抗ひずみ計を適用する場合には、温度変化によるみかけのひずみが生じることはよく知られている。さらにエポキシ樹脂のような高分子材料では材料の熱伝導率が小さいので、ひずみゲージの自己加熱によるドリフトも問題になってくる。<sup>(4)</sup> とくに、この影響はゲージに電流を流した瞬間の測定値が時間の経過とともに変動する形で現われてくる。したがって、室温の場合でも、ここで扱っている材料に対して電気抵抗ひずみ計を適用するには、測定値の時間依存性も検討しておく必要があった。このような観点から次に示す条件により、温度及び時間によるゲージの零点ドリフトの測定を行った。

まず、使用したゲージは長さ5mm、幅1.5mm、ゲージ抵抗120Ω、ゲージ率2.08の塑性箔ひずみゲージ(昭和測器・YF-5)で、シアノアクリレート系接着剤(共和電業・CC-15A)によりエポキシ樹脂(3501材)試験片に接着した。また、アクチブゲージ、ダミーゲージとも恒温炉内の同一の環境下におき、同一長さのリード線により結線し、2ゲージ法により行った。ドリフトによる見かけのひずみ測定にはデジタル式ひずみ計とスイッチボックス(共和電業・SD-400型及びSS-24A型)を使用した。

図10は今回扱ったエポキシ樹脂の6個の試験片にゲージを貼り、それから三つのアクチブとダミーゲージの組み合わせを作って、負荷によるひずみがない場合の温度によるみかけのひずみを調べた結果である。これによると各々組み合わせたときのゲージの特性によってみかけ

のひずみの変化する傾向、値とも全く異ってしまう。しかし、比較的このひずみの小さいもの、例えば図10の63などを利用すれば今回の測定条件でも100℃ぐらいまでは一様な傾向で変化し、ひずみ量もあまり大きくならない。一方、再現性は必ずしも保障できず、また110℃以上の温度、すなわち図10の点線で示した領域になると、接着剤が高温用でない、リード線が耐熱性の被覆をされていないなどのため、ゲージの特性には関係なくみかけのひずみは全く不安定になってしまう。この結果から、ここで使用した接着剤(CC-15A)及びビニールのみで被覆されたリード線はほぼ100℃が限界であると考えられる。

さらに、ゲージを貼ったいくつかの試験片を作り、40℃ぐらいまでの予備試験で温度によるみかけのひずみが比較的小さいゲージの組合せを選び、90℃ぐらいまでのいくつかの温度レベルで時間依存性の検討を行った。この結果を図11に示す。これによると、室温(16°~18℃)で約3時間経過中のドリフト量は $\pm 10 \times 10^{-6}$ 以下、また90℃ぐらいまでならば、約1時間経過後でも $\pm 30 \times 10^{-6}$ 以下になっており、ここで行ったような測定条件でもとくに時間によるドリフトには問題がないことがわかった。なお、従来の場合と比較してこの自己加熱によるドリフトが小さくなったのはひずみ測定時のみゲージに電流を流す方式の測定法であったことが一つの原因であると思われる。

以上のことから、室温における電気抵抗ひずみ計による値は十分信頼できる。また、この温度近傍では、しま模様からひずみを解析する必要があるモアレ法よりも電気抵抗ひずみ計による測定の方が簡単で、実際には有利な方法である。さらに、温度によるみかけのひずみが比較的小さいアクチブゲージとダミーゲージの組み合わせのものを同一環境下で使用すれば90°~100℃、測定時間1時間ぐらいまでは適用可能と考えられる。しかし、これ以上の温度での適用には、測定精度が温度変化に関係のないモアレ法と異なり、高温で使用するための対策をするとともに温度変化によるみかけのひずみの修正方法を確立する必要がある。従来から、金属材料の高温における電気抵抗ひずみ計の適用に関する研究は多く行われているが、高分子材料に対しては行われていないようであり、今回行った実験の温度領域(90°~150℃)での電気抵抗ひずみ計の適用は不可能であると思われる。

#### 4.3 高強度耐熱エポキシ樹脂の材料特性に対する検討

図7は室温及び90℃から150℃まで20℃間隔で行った実験により得られた応力ひずみ線図である。これからもわかるように、ここで扱った材料は150℃以下では、温

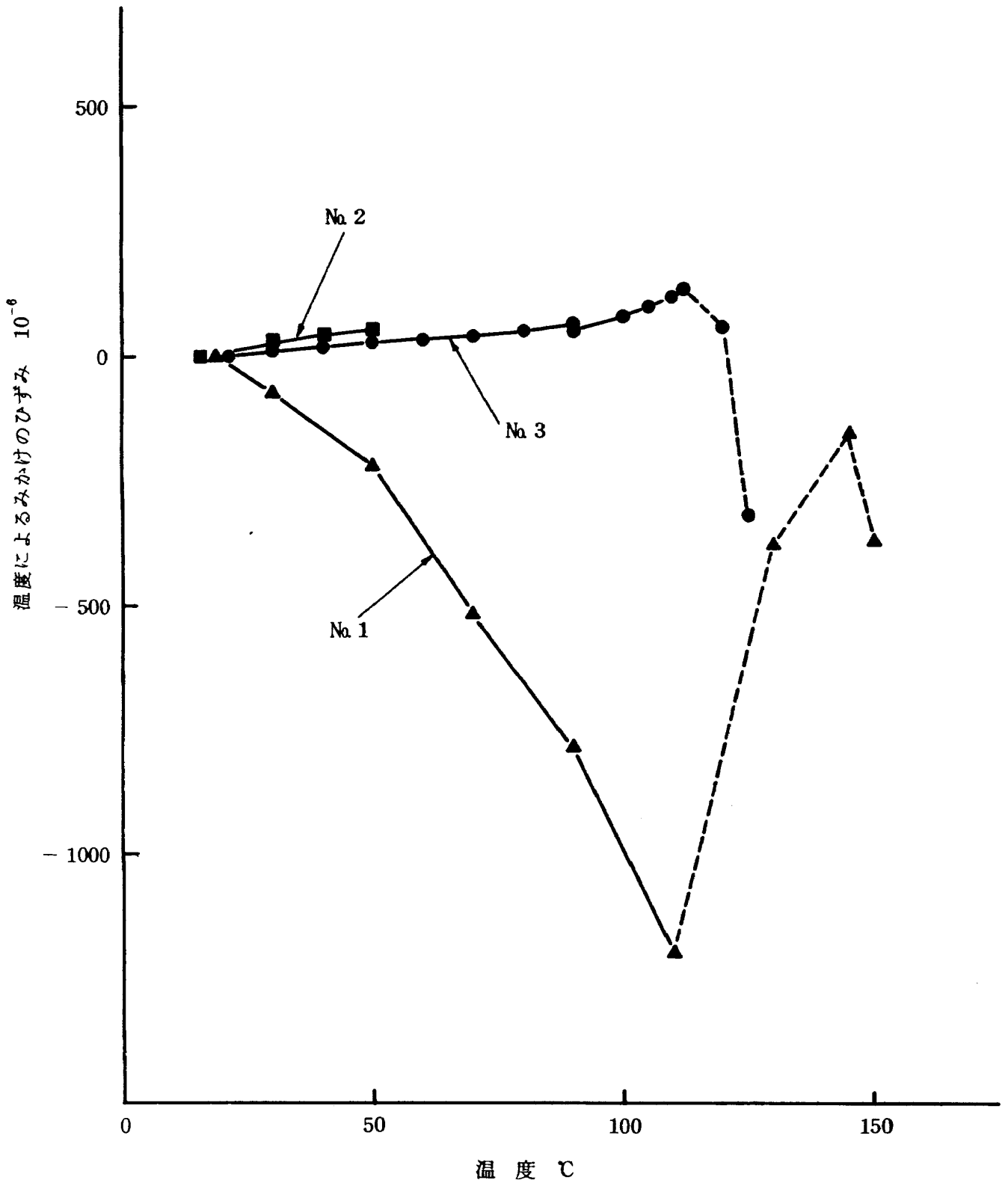


図10 温度変化によるみかけのひずみ

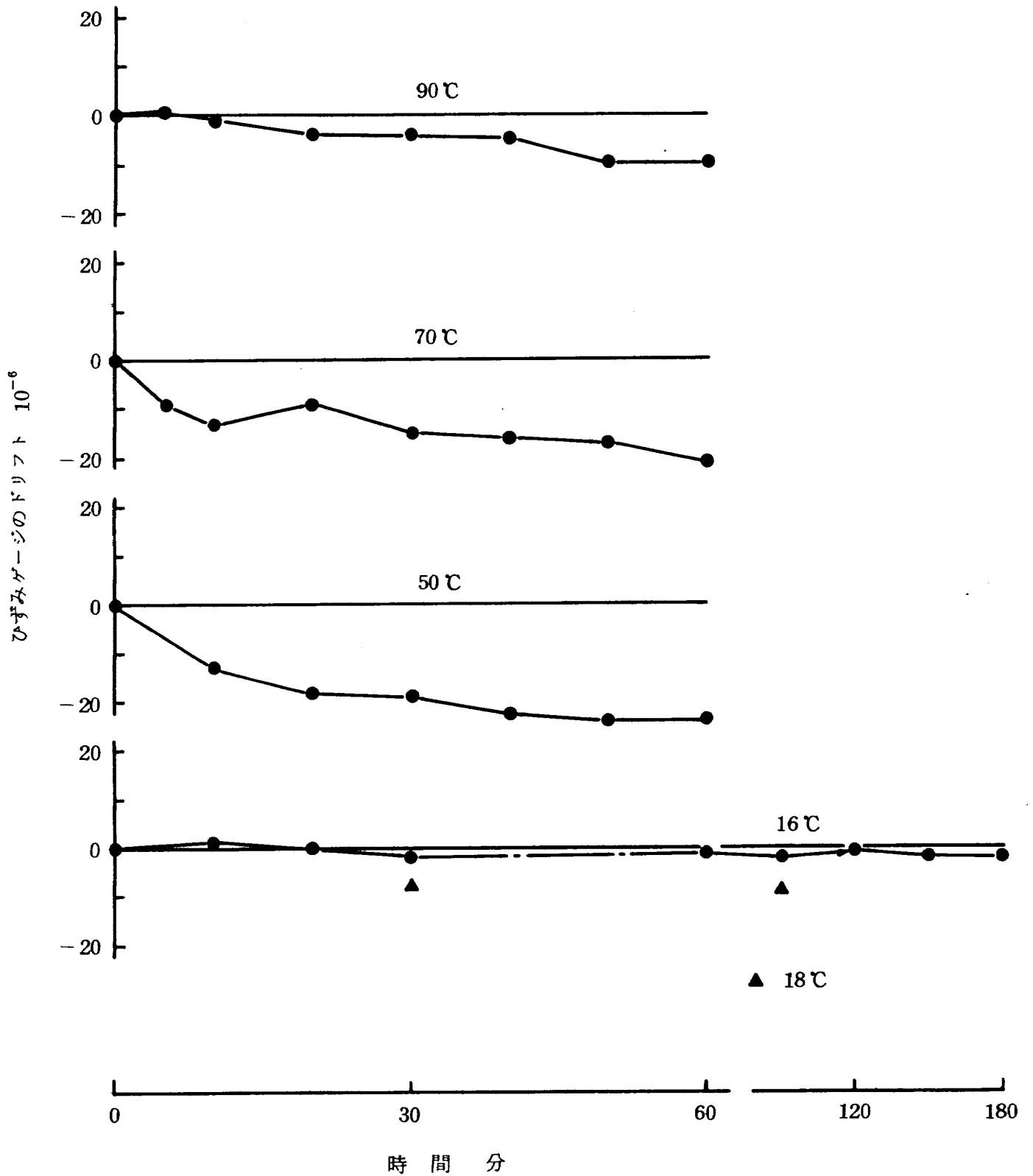


図 11 時間によるひずみゲージのドリフト



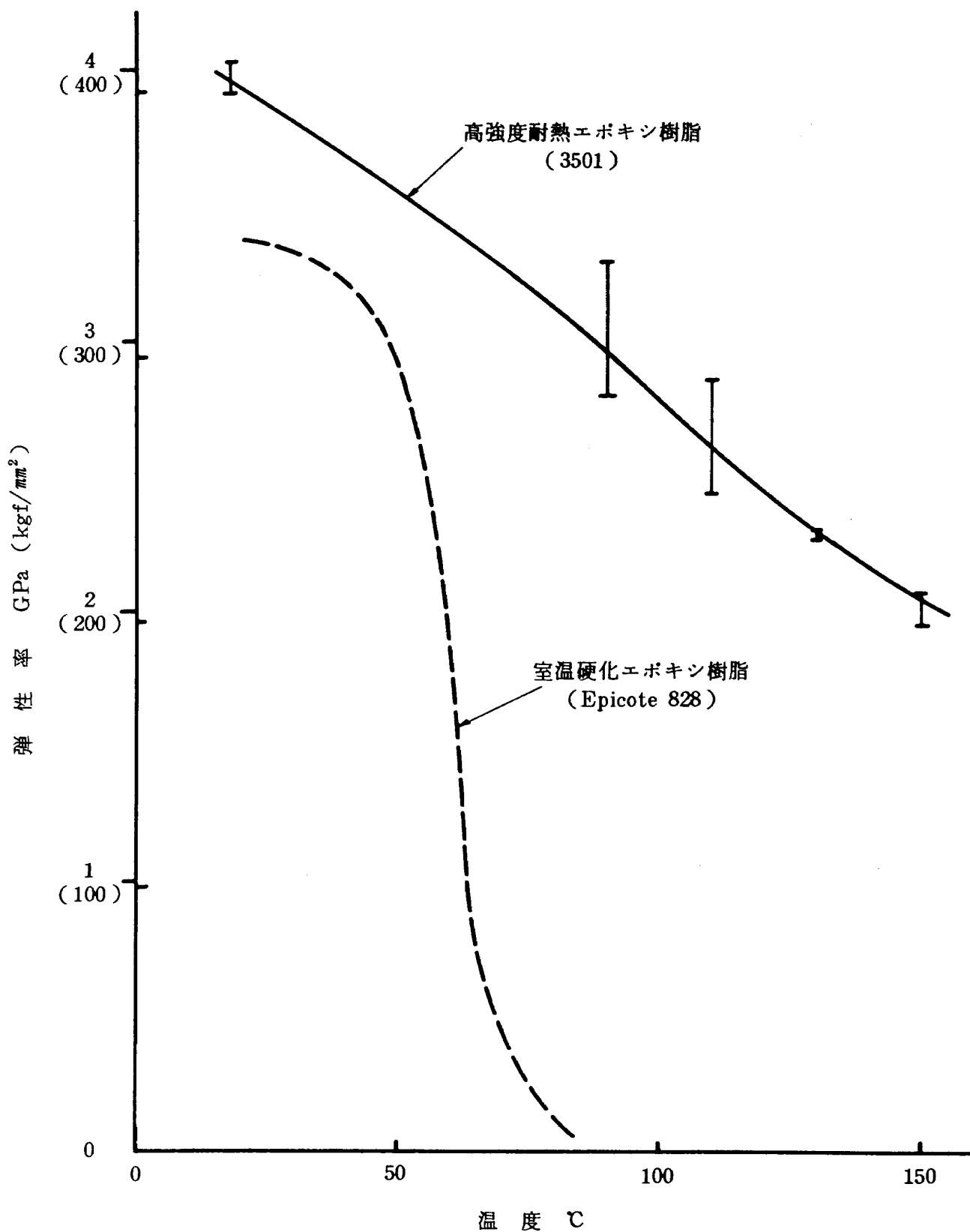


図 12 温度変化に対する弾性率の変化

度上昇にともない応力とひずみの関係がわずかに曲った曲線となってくる。また、応力の低い直線部分での傾きは温度上昇とともに小さくなっており、弾性率がかなり低くなるのが推定される。そこでこれらの資料から弾性率を求め、これと温度との関係を図12に示した。この曲線は各温度における弾性率の平均値を示したものである。またこの図には、参考のためにガラス転移温度が65℃前後にある、室温で硬化したエポキシ樹脂（エピコート828）の温度による弾性率の変化も示してある。この室温硬化の樹脂は室温での剛性が比較的高く、弾性率は3.5 GPa (357 kgf/mm<sup>2</sup>)ぐらいあるが、ガラス転移温度以上の粘弾性領域になると弾性率は急激に低下し、しかも著しい時間依存性を持つようになる。しかしながら、高強度耐熱の樹脂(3501材)の方は室温で4.0 GPa(408 kgf/mm<sup>2</sup>)ぐらいあった弾性率が150℃では2.0 GPa(204 kgf/mm<sup>2</sup>)ぐらいまで下るが、エピコート828材が粘弾性領域で示すような急激な低下はしていない。これにより本材料のガラス転移温度が150℃以上のところにあると推定できる。

さらに、図8には本材料の130℃及び150℃におけるクリープコンプライアンスを示した。この温度では時間とともに多少ひずみが増加してクリープをしているが、粘弾性領域で示すような著しいクリープ、すなわち時間依存性は示していない。この結果からも、この材料が150℃以下ではガラス状であることが確認できた。なお、ここで示したのは約3時間程度の比較的短い時間のク

リープ試験である。しかし、一般に高分子材料は温度的変化と時間的变化に類似性があり、これを利用することによって、いろいろな温度レベルにおける短時間のクリープ試験結果をある基準の温度におけるクリープ特性に変換することができる。<sup>(3)</sup>したがって、ガラス転移温度以上の領域の実験を行えば、この方法で長時間のクリープ特性が求められる。今回は使用した電気炉の能力不足から150℃までの資料を得るのが限度であった。また、実際にここで扱った材料をマトリックスとして使う複合材料は150℃以下での使用が予定されていることから、ここで示した温度域の資料で十分であると思われる。しかし、より広範囲な材料特性を知る必要がある場合には150℃以上の温度における実験を行わなければならない。

一方、今回の実験では死重による負荷であるため、ステップ状の引張荷重となって正確な破断荷重がわからない。さらに、図4で示したような試験片を用いたが、この上と下に高温用接着剤（エポキシ系高温接着剤、共和電業EP-17）で接着されたアルミニウム合金を介して荷重をかけた。また、この接着部は中央の平行部よりもかなり幅を広くし、1.6倍の断面積にしてある。しかし、高温における実験では、試験片がこの接着部分の境界で、図13のように破断しており、真の破断強度を示す状態にならない。このために、材料の高温における引張の破断強度の正確な資料が得られなかった。しかし、この破断の状況から、本材料は非常に脆性であることが推定され、実構造用複合材料の樹脂として使う場合の一つの問題点になる可能性があることがわかった。

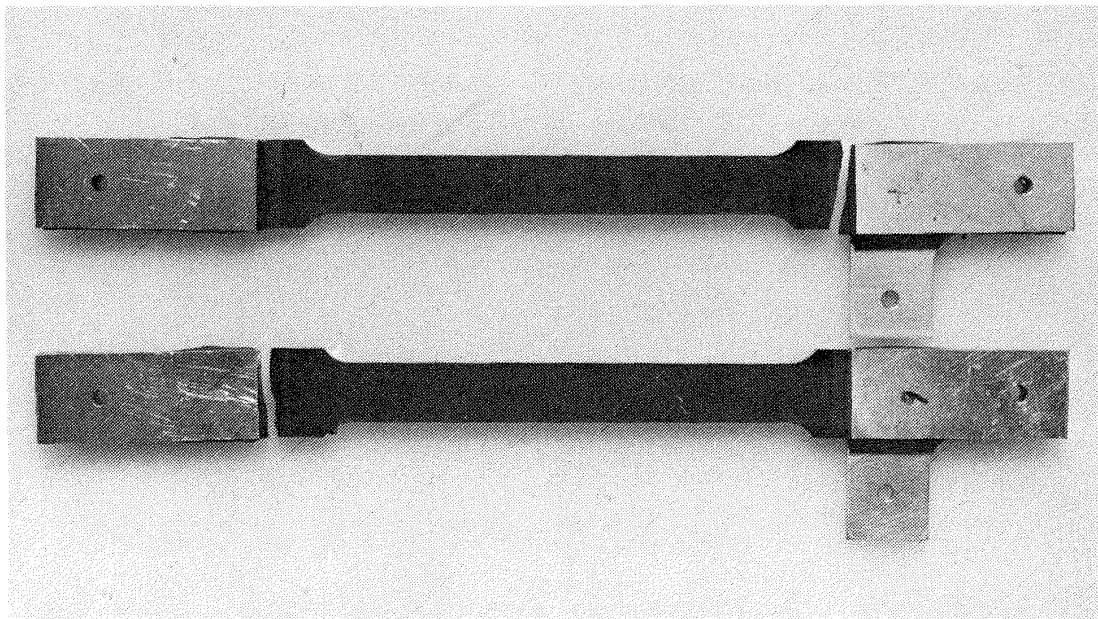


図13 試験片の破断状況

## 5. 結 言

航空機構造用複合材料は高温下の使用も要求され、このために、この複合材料用高強度耐熱エポキシ樹脂が開発された。ここでは、この種の耐熱エポキシ樹脂の一つ（3501材）を取り上げた。とくにこの材料に対しては90°～150℃ぐらいまでの材料特性を知る必要があったので、主にしま再生装置を利用したモアレ法により測定を行った。

このモアレ法は高温下の測定が可能であるため、この場合にも非常に有効な方法である。しかし、これを適用するに当っては、格子の印刷法、格子線の撮影法、小さな面内変位の測定法に問題があった。これらに対し、まず材料の表面の適当な処理により良好な格子線の印刷に成功した。また、ストロボフラッシュによる光源と撮影光学系を連動操作できる装置及び二つの試験片を一組とした試験片にして変形前後のモアレじまを同時に観察する方法を考案することにより、従来よりもより小さな面内ひずみを解析することができるようになった。

以上に示した方法の検討をするために、まず耐熱エポキシ樹脂の熱膨張ひずみを測定した。この結果は標点変化を測定する方法により求めたものと比較したが、ほぼ一致しており、この材料のひずみ測定にモアレ法の適用が十分可能であることを確認した。またこれから、150℃以下ではこの材料の熱膨張ひずみが温度に対しほぼ直線的に変化する、すなわち熱膨張率が一定であることもわかった。

つぎに、引張試験及び引張クリープ試験に適用し、ここで扱った耐熱エポキシ樹脂に関する次のような性質がわかった。(1)150℃以下の温度はこの材料のガラス状領域である。(2)応力とひずみの関係は、室温近傍ではほぼ線型であるが温度上昇とともに多少曲ってくる。(3)弾性率

も温度上昇とともに小さくなる。しかし150℃以下では粘弾性領域で示すような弾性率の急激な低下は起きない。

(4)150℃ぐらいまではクリープ変形も小さく、著しい時間依存性は示さない。このようなことから、従来のエポキシ樹脂と比べてこの材料は弾性率が高く、耐熱性もあり、150℃ぐらいまでの温度であればこれを使用した複合材料がかなり高強度なものになることが予想される。

なお、今回の実験では試験片形状と負荷方法が不適当であったため、温度変化による材料の破断強度を正確に知ることができなかった。しかし、この破断の状況から、本材料がかなり高温でも脆性であることが推定できた。

最後に、この研究を行うに当り材料の入手などでいろいろお世話になった航空宇宙技術研究所機体第一部・古田敏康主任研究官に感謝の意を表します。また、本研究で扱ったエポキシ樹脂は三菱レーヨン株式会社のご好意により提供していただいたものであることを付記しておく。

## 参 考 文 献

- (1) D. H. Kaelble, P. J. Dynes ; Nondestructive Testes for Shear Strength Degradation of a Graphite - Epoxy Composite, ASTM, STP617, 1977, 190~200
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 竹中幸彦, 小川敏一, 遠藤修司；ひずみゲージの自己加熱によるひずみドリフト, 非破壊検査, vol.17, №9, 1968, 373~379

## 既刊資料

- TM-380 液体ロケット燃料タンク構造用材料の極低温  
(4 K)における強度特性  
1979年3月  
浜口泰正, 飯田宗四郎, 中井暎一, 寺田博公  
角田義秋, 埴 武敏
- TM-381 水素・酸素空気系燃焼生成ガスの特性値  
1979年5月  
豊川光雄, 鈴木和雄, 毛呂明夫
- TM-382 航空宇宙技術研究所大型電子計算機ジョブの  
統計  
1979年5月  
中村絹代, 原田公一
- TM-383 航技研120 mm × 360 mm ルートビーク管の特性  
とそれを用いた遷音速二次元翼試験  
1979年6月  
高島一明, 高橋 宏, 桑野尚明, 青木竹夫,  
星野秀雄, 野口正芳, 唐沢敏夫, 野中 修
- TM-384 FACOM 230-75 アレイプロセッサシステム  
に対するジョブプロセッシングシミュレータ  
1979年6月  
末松和代, 中村絹代, 吉田正廣, 原田公一,  
三好 甫
- TM-385\* FJR 710/60 エンジン燃焼器設計のための環  
状および箱型燃焼器による要素試験  
1979年6月  
田丸 卓, 鈴木邦男, 堀内正司, 石井浅五郎  
斎藤 隆, 下平一雄, 山田秀志, 小倉五郎  
黒沢要治
- TM-386 実時間飛行シミュレーション用汎用プログラム  
1979年7月  
原田公一, 土屋雅子
- TM-387 液体水素ロケット燃焼器高空性能試験設備  
1979年7月  
大塚貞吉, 鈴木昭夫, 宮島 博, 山田 晃  
黒田行郎, 日下和夫, 熊谷達夫, 毛呂明夫  
植野 孝, 鈴木和雄, 木皿且人, 佐藤政裕  
阿部 登, 鎌田 眞
- TM-388 永久磁石を使用した吸引型磁気軸受の試作  
1979年8月  
村上 力, 狼 嘉彰, 中島 厚, 木田 隆
- TM-389\* FJR 710/20 エンジン用燃焼器のセクタ模型  
による高空性能再着火試験  
1979年8月  
黒沢要治, 下平一雄, 田丸 卓

\* 印は配布先限定

---

## 航空宇宙技術研究所資料390号

昭和54年8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 三興印刷  
東京都新宿区信濃町12

---

