

UDC 678.643:
621.171.5

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-470

高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の応用

越 出 慎 一

1976 年 9 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の応用*

越 出 慎 一**

Application of Moire Method to Strain Analysis of Polymers

By Shinichi KOSHIDE

ABSTRACT

This paper describes application of the Moire method to strain analysis of polymers. The mechanical properties of polymers are normally dependent on time and temperature. Especially, the stiffnesses of such materials are greatly effected by temperature. In the range above the "glass transition temperature", polymers show viscoelastic behavior, become soft and greatly deformed. In the range below the temperature, however, the materials become as hard and brittle as glass.

Employing the Moire method, however, makes it possible to measure the large displacement of soft materials without the influence of temperature change or the reinforcing effect. Moreover, strain is easily analysed by differentiation of displacement. Therefore, the method can be applied to the displacement or strain analysis of polymers in higher temperature ranges.

As an example, the Moire method was applied to the analysis of creep strain, thermal strain and residual strain of epoxy resins. The experimental results indicate that the thermo-mechanical property of epoxy resins in each temperature range can be determined by the Moire fringe patterns, along with the strains obtained by the fringe patterns. The validity of the results were verified by comparison with strains analysed by other methods. Moreover, various applications, limitations and improved techniques of the Moire method are also discussed.

1. 緒 言

最近、高分子材料あるいはこの複合材料が航空、宇宙分野での構造部材として広く使用されるようになった。そのため、この種の材料の強度特性を知る必要が生じてきたが、普通この特性を実験的に求める場合は、力を受けたときの変形あるいはひずみを精密に測定する方法で行なわれている。しかし、一般に高分子材料は温度と時間に著しい依存性を持つ粘弾性材料であり、とくに温度変化によって材料の剛性が大きく変化し、それにともなって時間依存性も変わってくると言う性質を持っている。このため、広い温度あるいは時間領域にわたるひずみを求めるには、剛性の高い領域の微小ひずみから剛性の低い領域の大ひずみまでを精度よく測定する必要がある。これには測定器を直接接触させる機械的な方法やゲージ

を接着する電気抵抗線ひずみ計のような方法では補強効果やゲージのドリフトなどの影響が大きくなって、ほとんど測定が不可能である。このような理由から、高分子材料のひずみ測定にモアレ法の適用を試みた。

本報告では、まず温度と時間に依存した特性を持つ高分子材料に対しモアレ法を応用した場合のひずみの解析方法について示す。また、この方法の有効性を検討するため、実際の適用例として、繊維強化複合材料用樹脂に使われているエポキシ系樹脂に関して行なった実験について示す。このエポキシ系樹脂は可塑剤として多硫化重合物を添加することにより、温度依存性を変化させることができる。ここではモアレ法によりこのような材料の室温近傍で著しい粘弾性挙動を示す試験片の単軸引張クリーブならびに応力緩和のひずみ、熱膨張によるひずみおよび大変形後の残留ひずみの解析を行なった。

これらの実験結果から、エポキシ樹脂の力学的特性を

* 昭和51年7月14日 受付

** 機体第二部

求め、高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の妥当性を検討した。さらに本方法の問題点を指摘し、その解決策なども示した。また最後に、この方法の他の面への応用についても簡単に付け加えた。

2. 高分子材料の温度と時間に依存する性質

高分子材料の粘弾性挙動は温度によって著しく変化する。例えば、図1にはある高分子材料の温度と剛性(ここでは負荷後ある特定な時間における緩和弾性率 $E(t)$)との関係を定性的に示したが、一般に高分子材料はこの図のように温度変化に対していくつかの領域を持っている。⁽¹⁾これらの領域で、ガラス転移温度以下のところでは、材料の剛性が高く時間依存性が小さい。しかしガラス転移温度近傍では材料の剛性が急激に低下し、著しい時間依存性を持つようになる。この領域よりも高い温度のところでは、非常に軟らかくなるが時間依存性の小ささ、いわゆるゴムの状態を示すようになる。さらに高い温度のところでは、ゴム流動、液状流動の領域となり、構造部材としては全く使用できない状態となる。

一方、高分子材料の時間依存性は上で示した温度の依存性と類似している。すなわち、温度の低下は時間スケールを短かくすること、上昇はこのスケールを長くすることに対応する性質を持っている。とくに、ほとんどの高分子材料がほぼ満たすといわれている、熱粘弾的に単純な物質であるという条件の場合には、各々の材料の弾性率と粘性係数に関係した緩和(あるいは遅延)時間が次のように表わされる。⁽²⁾

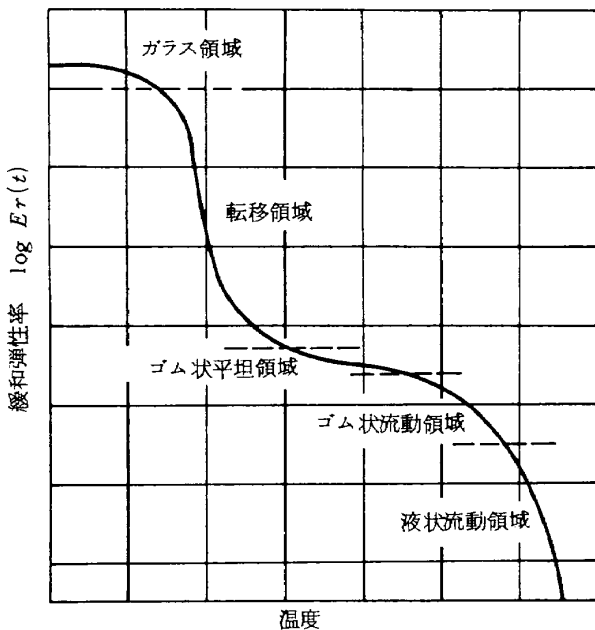


図1 高分子材料の温度と緩和弾性率の関係

$$\tau = a_T \tau_0 \tag{1}$$

ここで、 τ_0 :ある基準温度での緩和(遅延)時間
 τ :任意温度での緩和(遅延)時間
 a_T :比例定数

この関係から任意温度と基準温度での力学的特性である緩和弾性率(あるいはクリープコンプライアンス)が次式の形で表示でき、

$$\left. \begin{aligned} E(\tau_0, T_0) &= L(\log \tau_0) \\ E(\tau, T) &= L(\log a_T + \log \tau_0) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

ここで E :緩和弾性率(クリープコンプライアンス)
 T_0 :基準温度
 T :任意の温度

この式(2)より、任意の温度で得られた $E(\tau, T)$ は基準温度の $E(\tau_0, T_0)$ を $\log a_T$ だけ平行移動したものであることがわかる。さらにこの移動量は

$$\log a_T = \frac{C_1(T-T_0)}{C_2 + (T-T_0)} \tag{3}$$

なる式で求められ、この式の定数 C_1, C_2 はほとんどの高分子材料に共通な普遍定数で、基準温度 T_0 を各材料固有のガラス転移温度にとると、それぞれ 17.4 および 51.6 である。

なお、ここでは時間のパラメータとして緩和(遅延)時間を用いているが、一般の物理時間 t, t_0 を用いた場合も同じ様に表示することができる。また、温度変化により材料の密度も変化するが、この量は非常に小さく、無視しても差し支えないとされている。⁽²⁾

このようにして、高分子材料が熱粘弾的に単純な物質であると仮定すれば、いろいろな温度下の実験で得られた値を基準温度の値に規格化し、移動させることによって広い時間領域におけるマスター曲線を求めることができる。普通、高分子材料のような粘弾性体の解析にはこのような曲線で示された物性値が用いられる。⁽³⁾しかし先に示したように、このマスター曲線は材料の性質が著しく変化するいろいろな温度下の変形あるいはひずみを精確に測定し解析することによって求めなければならない。そのため、これらのことが非常に大きな問題となってくる。

3. モアレ法による面内ひずみの解析

一般に、モアレ法は重ねられた2枚の格子を通る光を観察した場合あるいは物体上に格子の影を作り、それを他の格子を通し観察した場合に生じる干渉縞を利用して、変位やひずみを解析する方法である。⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ とくに面内のひずみを解析する場合には、上で述べた前者の場合

の干渉しま、すなわち試験片表面に間隔が一定で精確な線群で構成された格子を印刷あるいは彫刻し、それにもう一つの基準となる格子を重ねたときに生じる干渉しまを利用する。とくに、この2つの格子をレンズ系を使って重ねる方法を用いると、剛性が変化したり、温度領域が変化したりする場合にも適用が可能である。

二次元のひずみ成分の解析には、互に直交する2つの線群からなる格子を用いる。いま x, y なる直交座標系をとり、 x および y 軸に沿った線群をおのおの Y および X 格子とする。このような格子を2枚重ねると Y 格子と X 格子による2種類の干渉しまが観察される。この内、前者のしまは2枚の格子の y 方向の格子間隔の変化および格子線相互の回転によるものであり、試験片格子が変形を受けた場合は、 y 方向の変位に関係している。同様にして後者のしまは x 方向の変位に関係したものになっている。しかし、レンズ系を使って2つの格子を重ねるような場合には、試験片格子の変形による格子間隔の変化だけでなく、あらかじめ与えられていた2枚の格子の格子間隔の差(ミスマッチ)および格子線の回転(ミスアライメント)が加わった状態で干渉しまが生じている。この場合には Y, X 各格子によるしまのみかけの変位と二次元のひずみ成分の関係が次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= 1 - (1 + \lambda) \cos \theta + \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= 1 - (1 + \lambda) \cos \theta + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$: ひずみの成分

u, v : x および y 方向のみかけの変位

λ : ミスマッチ量 (試験片格子, 基準格子の格子間隔を p', p とすると $p'/p - 1$)

θ : ミスアライメント量 (2つの格子の格子線回転角)

ところが、実際にモアレ法で観察、記録されるのはしま模様である。したがって、この模様から直接測定できるしま間隔でひずみ成分を求める式を表わせれば、後の解析が容易となる。そこで、ここでは上述のような手法で解析するための式を導出した。とくにミスアライメントが無い、すなわち $\theta = 0$ の状態で測定実験を行なったとすれば、式(4)および相隣接した二つのモアレしまの間ではひずみが一様であるとの仮定から次のような関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\pm p (\delta_{ox} - \delta_x)}{(\delta_{ox} \mp p)(\delta_x \mp p)} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_y &= \frac{\pm p (\delta_{oy} - \delta_y)}{(\delta_{oy} \mp p)(\delta_y \mp p)} \\ \gamma_{xy} &= p \left(\frac{1}{\alpha_x} - \frac{1}{\alpha_y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 p : 基準格子の格子間隔

δ_{ox}, δ_{oy} : ミスマッチにより生じたモアレしまの x および y 方向の間隔

δ_x, α_y : 変形後の X 格子により生じたしまの x および y 方向の間隔

δ_y, α_x : 同じく Y 格子により生じたしまの y および x 方向の間隔

±の符号はミスマッチの与え方により決定される。

なお、この式は相隣接した2つのしまの間の平均ひずみを求めるものである。とくにひずみ集中のあるような場合、各点でのひずみを解析し、ひずみの分布を求めるためには、このしまの間を小さくしないと近似が悪くなってしまふ。しかし、これはミスマッチ量 λ を変えればよく、またレンズ系を使って2つの格子を重ねる方法では、容易に λ を変化させることができる。

4. 高分子材料のひずみ解析に対するモアレ法の応用

すでに述べたように、温度領域によって高分子材料の剛性あるいは力学的特性は著しく異なっている。ただ材料固有のガラス転移温度以下では、時間依存性を無視しても差支えない状態なので、この領域でのひずみ解析には前に示した方法でモアレ法を適用することができる。しかし、ガラス転移温度以上になると、著しい時間依存性を持つようになり、応力やひずみは時間の関数となってくる。ここではこのような状態の高分子材料の引張クリープひずみの解析にモアレ法を適用した場合について述べる。

一般に高分子材料の力学的特性を実験的に求めるには、材料に一定ひずみを与えたときの応力変化から得られる緩和弾性率よりも、一定応力に対するひずみの変化から得られるクリープコンプライアンスを求める方が容易である。またこの両者の間には次のような関係がある。

$$t = \int_0^t E(t-t') J(t) dt' \quad (6)$$

ここで、 $E(t)$: 緩和弾性率

$J(t)$: クリープコンプライアンス

このようなことから、とくにここでは $J(t)$ を求めるための引張クリープ試験のひずみ解析にモアレ法を応用した。

まず、取り上げた高分子材料は熱粘弾性的に単純な物

質であるとする。この場合にはいろいろな温度下での試験を行う必要があるが、一つの温度下では試験時間中その温度で一定であるとする。したがってひずみは時間のみの関数となる。一方、モアレ法によれば、このひずみはモアレじまに関係してくるものであるから、このしま模様も時間により変化してくる。いま、 y 方向の単軸引張試験をしたとすると、ひずみとしまの関係は式(5)より

$$\epsilon_y(t) = \frac{\pm p [\delta_{0y} - \delta_y(t)]}{(\delta_{0y} + p)(\delta_y(t) + p)} \quad (7)$$

となる。ここで $\epsilon_y(t)$ 、 $\delta_y(t)$ はひずみならびにモアレじまの間隔であるが、時間の関数である。

さらに、板状の平滑試験片などでは、平滑部分が一樣なひずみ状態になる。このようなときには、この平滑部分の標点距離を考え、この距離内に生じたモアレじまの数から平均ひずみの形でこれを求めることができる。この場合には、

$$\delta_{0y} = \frac{l_0}{n_0}, \quad \delta_y(t) = \frac{l_0}{n(t)} \quad (8)$$

ここで、 l_0 : 標点距離

$n_0, n(t)$: 標点距離内の変形前および変形後
任意時点でのしま数

なる関係から、これを式(7)に代入して、

$$\epsilon_y(t) = \frac{\pm p l_0 [n_0 - n(t)]}{(l_0 + n_0 p)(l_0 + n(t) p)} \quad (9)$$

となる。実際のひずみ解析に、時間とともに変化するしまの様子を写真に撮り、それを解析する方法を用いるときには、測定精度を上げることが容易なため、この式(9)

を使う方法の方が有利である。しかし、この方法は一樣なひずみ状態のときのみしか適用できない。

5. エポキシ樹脂のクリープひずみ解析の実験

モアレ法による高分子材料のひずみ解析実験例として、ガラス転移温度が室温近傍にあるようなエポキシ系樹脂の引張クリープ試験を行なった。

この試験片はシェル化学のエピコート 828 に可塑剤として適量の高硫化重合物を添加し、硬化剤にはトリエチレンテトラミンを用いて板状の材料に鋳造し、これを図2に示した形状寸法に機械加工したものである。またこの材料のガラス転移温度は32°Cであった。

試験片表面の格子の印刷は、まず表面に感光剤を塗布し、基準格子ネガをその上に重ねて露光し、現像後さらに染色剤の処理をして格子線のコントラストを高める方法によって行なった。この実験で使用した格子は250本/in(格子間隔 $p = 0.102\text{mm}$)の直交格子である。したがって、ここでは二方向、すなわち引張方向とこれに直角方向のひずみに関係したモアレじまが観察される。

図3はここで用いた実験装置を示したものである。すでに述べたように、ここで扱う材料は温度依存性を有するため、試験片は温度調節のできる恒温槽に入れ引張の一定荷重をかけた。また、材料が透明であるため、図に示したように、透過法により行なった。この測定法では、試験片の像がしま観測装置のレンズによって、この背後にあるピントガラス面に結ばれ、この面上に基準格子が貼られているために、二つの格子が重なり合っ

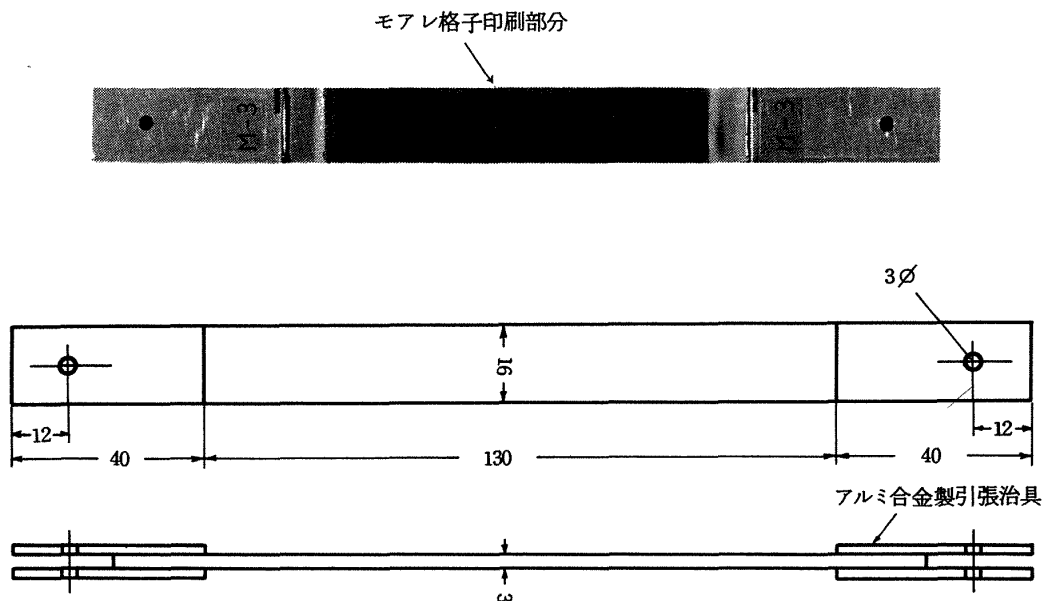


図2 引張クリープ試験の試験片形状寸法

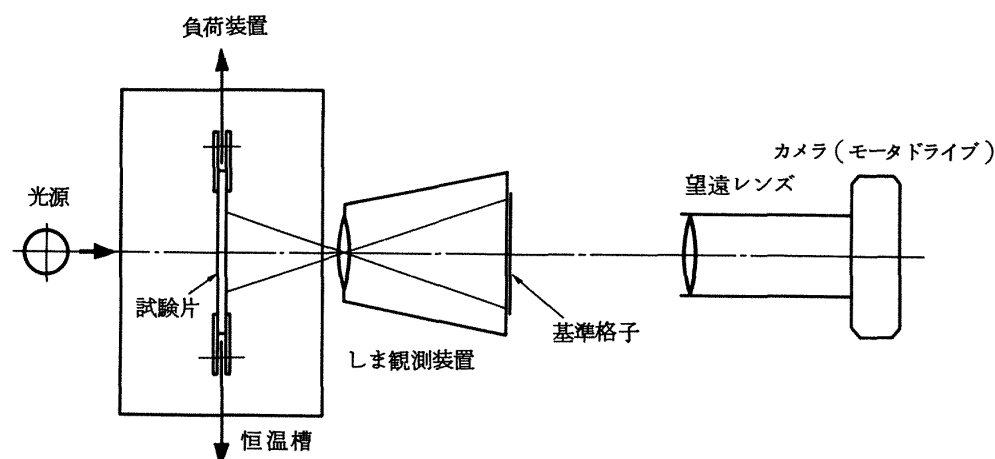
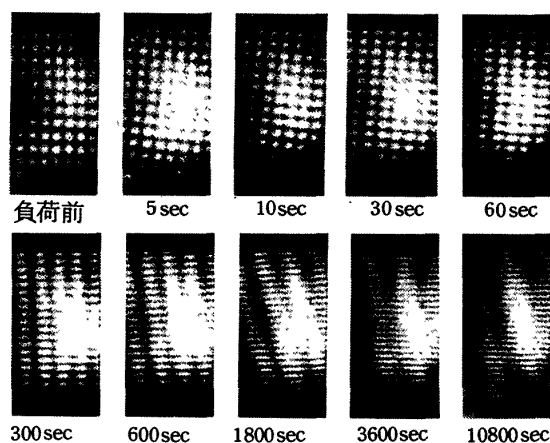


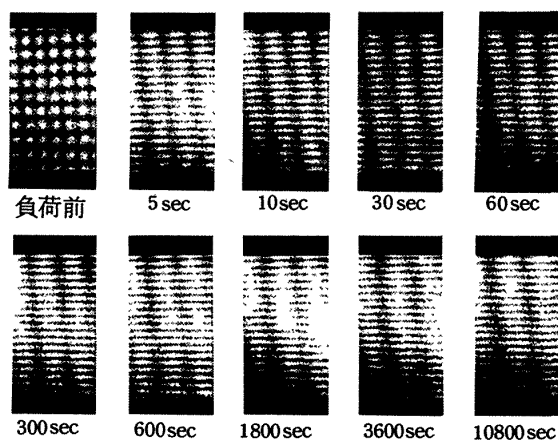
図3 実験装置

しまが観察できる。試験片格子と基準格子が全く同一の場合でも、このガラス面にできる像の大きさによって、両格子間隔に差が生じてしまうが、これがミスマッチを与えたことになり、装置を移動させることにより、この量を変えることができる。一方、ピントガラス面はこの面内で回転できるようになっているため、ミスアライメント量の調整も可能である。なお、ここでのしま観測装置は古い暗箱カメラを改造したものである。さらに荷重をかけた後のモアレじまは、試験片材料が時間の依存性も持っているため、時間とともに変化をして行く。したがって、このしまの様子はモータドライブカメラを連動させ、適当な時間点で写真撮影して記録した。

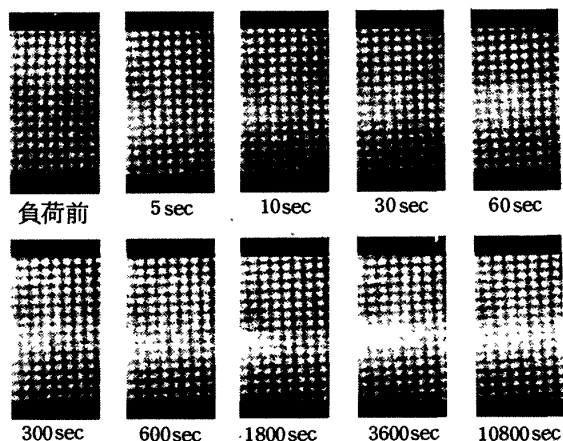
図4はいくつかの温度下におけるモアレじまの時間による変化の様子を示したものである。このしま模様と式(7)あるいは式(9)から各時間点でのひずみが求まるが、図



(2) 45°C $\sigma = 6.83 \text{ kg/cm}^2$



(3) 65°C $\sigma = 5.10 \text{ kg/cm}^2$



(1) 25°C $\sigma = 67.82 \text{ kg/cm}^2$

図4 エポキシ樹脂引張クリープ試験における温度と時間によるモアレじまの変化

5には3時間の試験時間に対して実際に得られたいろいろな温度下でのクリープひずみを示した。この図は横軸に対数時間 $\log t$ 、縦軸に対数スケールでとった単位応力当りのクリープひずみ、すなわちクリープコンプライアンス $\log J(t)$ をとったものである。

さらに、ここで取り上げたエポキシ系樹脂を熱弾性的に単純な物質であると仮定すれば、図5で示したような各温度下での値を、ある基準温度に規格化し、各温度とこの基準温度の差を求め、式(3)を用いて $\log a_T$ を計算し、クリープコンプライアンスのマスター曲線が得られる。図6はガラス転移温度を基準温度 ($T_0 = 32^\circ\text{C}$)としたときの、エポキシ系樹脂のクリープコンプライアンス $J(\xi)$ のマスター曲線である。ここで ξ は t における換算時間で、 $\xi = t/a_T$ で与えられるものである。

6. 実験結果とエポキシ樹脂の力学的性質

高分子材料の一例として、エポキシ系樹脂のクリープ試験に対する実験結果を示したが、これらの結果からこの材料の温度依存性のある力学的性質に関する検討をすることができる。

まず、図4の写真は 25°C 、 45°C 、 65°C におけるモアレ

じまの時間による変化の様子を示したもので、とくにこれはここで取り上げたエポキシ系樹脂のガラス領域、転移領域、ゴム平坦領域におけるクリープ変形の様子を示したものである。この写真では、横じまが引張方向の変形、縦じまはこれに直角、この場合には横方向に縮む変形を表わしており、しま数の増加は引張を、減少は圧縮を示すような mismatches が与えられている。

25°C でのしま写真を見ると、しま模様は時間に対してあまり変化していない。これはガラス領域で試験片材料が硬く、変形が小さくかつ時間依存性も小さいことを表している。ところが、 45°C の写真はしま模様が時間の経過とともに著しく変って行く様子が出ている。しかも 25°C の場合に比べて応力値はほぼ1桁小さいにもかかわらず、横じまの数が著しく増加しているのは、材料がかなり軟化し、変形も大きくなり、時間依存性も大きくなる、すなわち顕著なクリープ変形していることを表わしている。さらに 65°C の写真になると、負荷の前と後のしま模様が著しく異なっており、負荷直後に横じまが急激に増加し、縦じまが減少している。しかしその後のしま模様は時間によってあまり変化していない。これは材料が軟化し、負荷直後に急激に変形するが、その後はあまり変

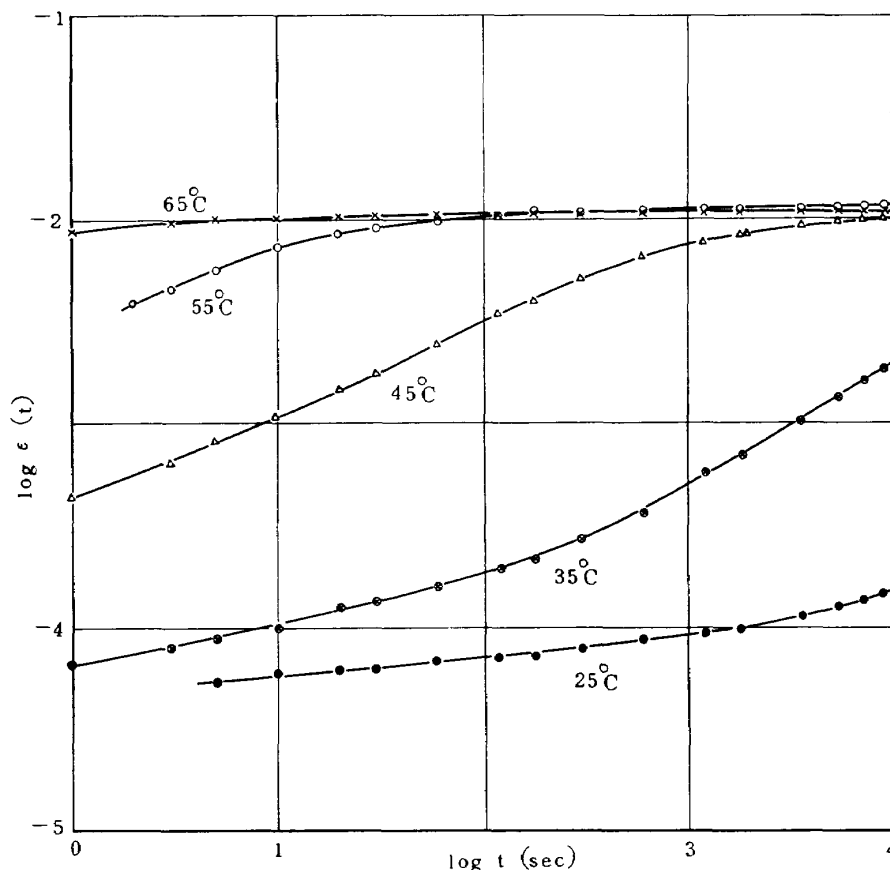


図5 エポキシ樹脂の各温度におけるクリープ曲線

形しないと言うゴム平坦領域の特徴を表わしている。このように、モアレのしま模様から温度変化に対する力学的性質を定性的に判定することができる。図5はこれらの特徴を定量的に示したもので、温度が変化することによりクリーブ曲線が変化し、しかも65°Cの単位応力当りのひずみは25°Cのときよりも2桁以上も大きくなり、温度によって材料の剛性が大きく低下して行くことがわかる。

図6はガラス転移温度における換算時間 $\log \xi$ に対するクリーブコンプライアンス $J(\xi)$ のマスター曲線である。このように、各温度下における測定値がほぼ一本のマスター曲線上に乗ることは、この材料が熱弾性的に単純な物質であるという性質を満たしていることを表わしている。

なお、ここまではクリーブ試験、すなわち一定応力に対するひずみの温度ならび時間による変化より $J(\xi)$ を求めてきたが、粘弾性体の応力解析を行なうには、一定ひずみに対する応力の変化から求まる緩和弾性率 $E(\xi)$ がしばしば用いられる。この $J(\xi)$ と $E(\xi)$ はすでに述べたように式(6)により関係づけられる。したがって、ここで実験的に得られた $J(\xi)$ からこの式を使って $E(\xi)$ を求めることができるが、エポキシ樹脂のような材料では近似的な

$$E(\xi) = \frac{1}{J(\xi)} \quad (10)$$

なる式で求めた値でも実用上十分であると言われている⁽⁷⁾。図7には、上で求められた $J(\xi)$ を式(10)に入れて得られた $E(\xi)$ とこの材料の応力緩和試験から直接得られた $E(\xi)$ とを比較して示した。この応力緩和試験は先のクリーブ試験と同一の装置を使い、一定なひずみはモアレ法により測定し、応力変化は負荷装置に小型ロードセルを挿入して測定したものである。この場合、厳密に $J(\xi)$ から $E(\xi)$ を求めるには式(6)を解かねばならないが、応力緩和試験はクリーブ試験よりも負荷が難かしく、得られた資料も精度があまり良くない。また粘弾性体の試験片はこれらの間のばらつきも多少大きくなる。そのようなことから、近似の式(10)による値との比較でも十分であると考えられる。

7. エポキシ樹脂の熱膨張ひずみと残留ひずみの実験

エポキシ樹脂のもう一つの実験例として、この材料の熱膨張によるひずみと高温下で大変形をした後の残留ひずみの測定結果を次に示す。これらの例はモアレ法による結果と他の測定法による結果とを比較検討するために行ったもので、熱膨張ひずみの例は比較的小さなひずみの解析例、残留ひずみの例は大きなひずみの解析例として取り上げたものである。

図8は熱膨張によるひずみを板状試験片のモアレ法による測定とブロック状試験片の H_v-N 、レーザ光の干渉

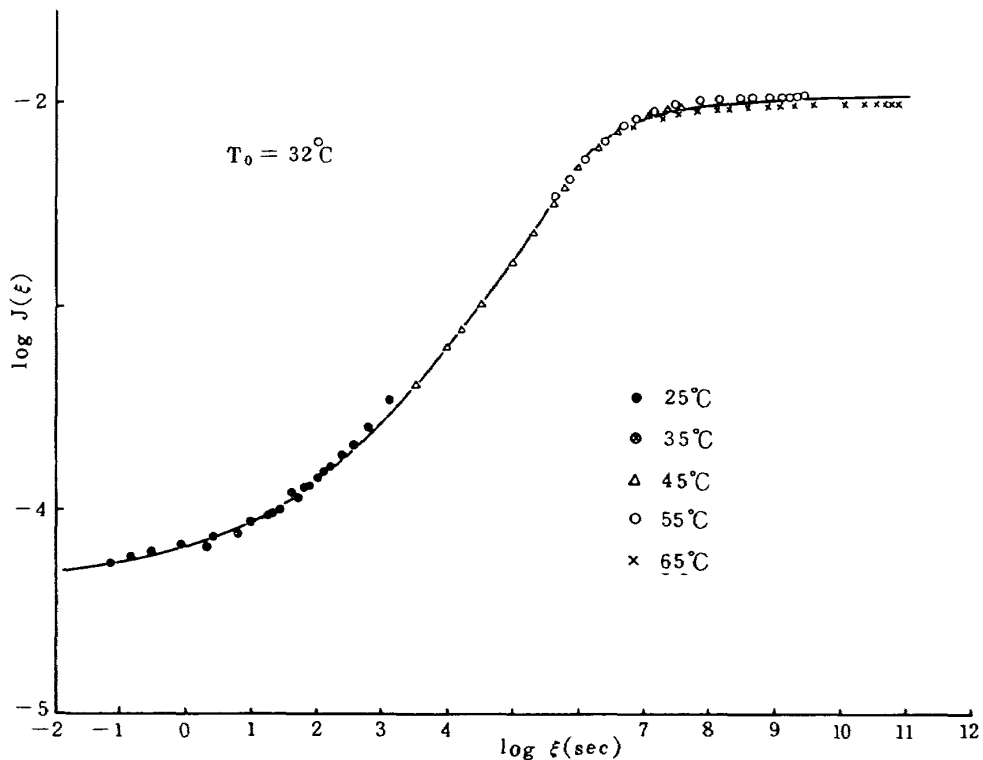


図6 エポキシ樹脂のクリーブコンプライアンス，マスター曲線

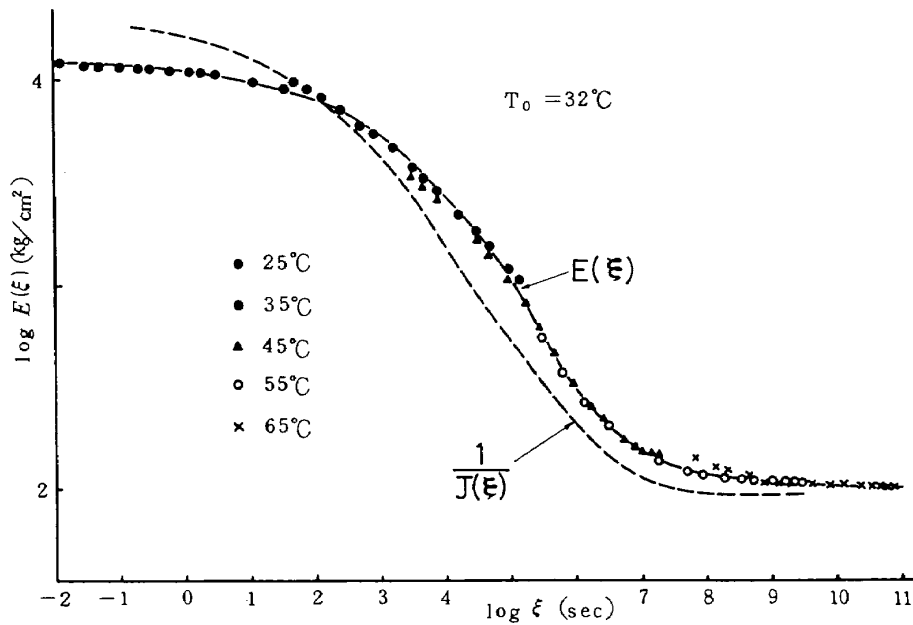


図7 エポキシ樹脂の緩和弾性率マスター曲線

を利用した膨張計による測定との値を比較したものである。この両者の傾向は一致しているが、ひずみ量が小さいこと、モアレ法では光源の熱の影響を受けることなどのため、測定値は必ずしも十分な一致はしていない。また、この図で、温度が50°と60°Cの間で膨張の傾向が急変している様子が示されている。これは材料が転移領域からゴム平坦領域になる変態温度近傍で生じており、板状試験片素材を鋳造する際に流し込み方向に平行にとった試験片ではこの点で急に膨張し、これと直角方向にとった試験片ではこの点のところで多少収縮するという現象が現われている。なお干渉膨張計では56°Cまでの値しか示していないが、これは上述の変態点によりこの方法では測定ができなかったためである。

図9は同じく測定法の検討を目的として行なった、高温下で大きな引張変形させた後の残留ひずみをモアレ法ならびに試験片上に印された標点間変化を観測する方法によって求め、それを比較したものである。ここで示した標点間変化を観測する方法は、変形前後の標点間距離 l_0, l を測定して、ひずみ ϵ を

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

で求める、最も初歩的なものである。この方法は非常に単純であるが、感度的には十分でなく、比較的大きなひずみの測定には適用できるが、ここで用いたモアレ法に比べて感度は1桁悪い。また、この図に示した比較結果では、モアレ法による値の方が若干大きめになっている。これはモアレ法により測定した後多少時間が経過してから標点変化観測の方法による測定を行なったため、残留

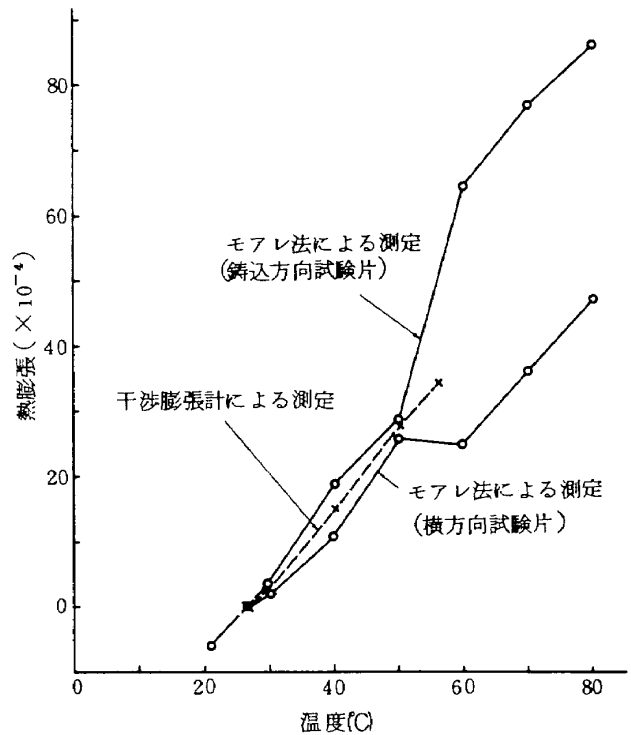


図8 エポキシ樹脂の熱膨張ひずみ

ひずみが時間とともに徐々に変化して行く高分子材料の特性により起きる収縮および温度変化による収縮のためと思われる。

さらに、この両測定方法による縦横のひずみの値よりポアソン比を求めると、ともにほぼ0.5となる。等方性材料の比較的大きなひずみ領域では非圧縮性の条件から導出されるポアソン比は0.5となるが、上述の結果はこ

の値に一致している。しかし非圧縮性条件の満たされない小さなひずみ領域でのポアソン比の測定には、今回行なった程度のモアレ法では感度および精度の面でまだ十分とは言えない。このような場合のポアソン比の測定には、例えばより高密度のモアレ格子を用いたり、モアレじまの倍増法を使用したりするなど、感度、精度を向上させた測定法が必要である。

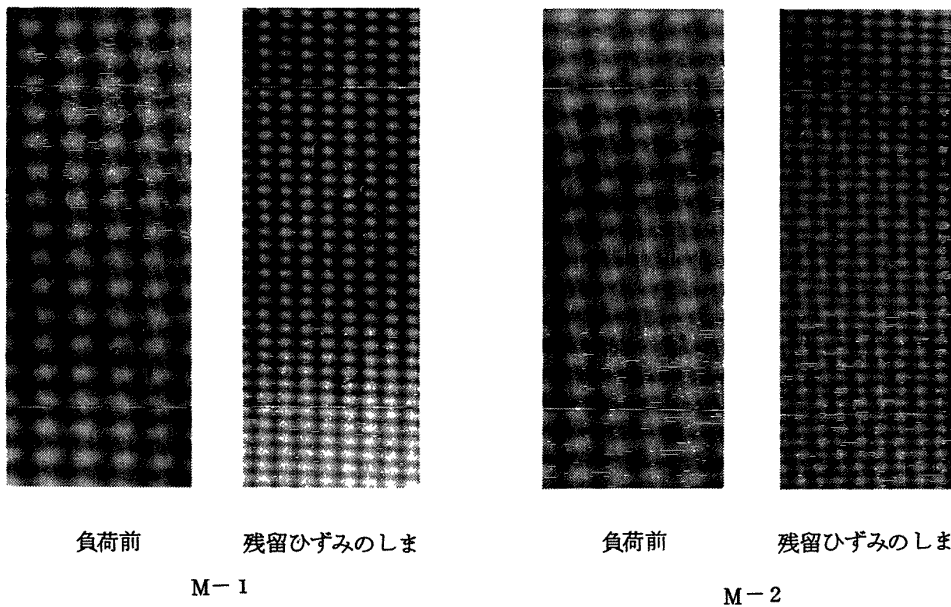
8. モアレ法によるひずみ解析の問題点

光学的な測定手段であるモアレ法は、金属材料の塑性ひずみ⁽⁸⁾、梁や板のたわみ⁽⁹⁾、殻構造物の変形などの解析⁽¹⁰⁾にまで応用されている。しかし、現在一般に行なわれているモアレ法では、直接得られる情報が変位である。したがって、ひずみを解析する場合には、先の式(4)に示されているように、得られた変位を微分しなければならない。とくに複雑な形状をした物体のひずみを求めるような場合には、精度の面で非常に不利である。また、定性的にモアレじまの模様からひずみ分布を推定することも可能であるが、局部的に大きなひずみ集中を示すような場合には必ずしも有効な方法ではない。一方、しまとひずみの関係式は比較的簡単な形で示すことができるため、

定量的な値を求めることは容易である。このようなことから、最近モアレ法と光弾性法とを併用した方法も行なわれている。⁽¹¹⁾

つぎに、モアレ法の測定感度と精度の問題がある。この方法による感度は使用する格子の密度に左右され、この密度が高いほどよくなる。しかし、格子密度が高くなるにしたがい、その製作ならびに印刷が難かしくなってくる。現在、2000本/in、すなわち格子間隔に換算して0.013mm ぐらいまでの格子も製作されている。しかし、実用的には1000本/in、格子間隔で0.025mm ぐらいが限度である。したがって、測定精度にも関係するが、ひずみ量にして約0.05%ぐらいの感度である。高分子材料を対象とする場合には、比較の変形量が大きいため、これよりも密度の低い格子でも十分であるが、金属材料の弾性域などでは必ずしも十分であるとは言えない。

一方、測定精度の問題であるが、これには得られたしま模様の読み取りの精度が重要になってくる。このためには、しまのコントラストをよくする必要がある。一般に、このしまのコントラストはしまの数が多くなる、すなわちしまの密度が高くなるほどよくなる。これには、ミスマッチ、ミスアライメントを与える方法が用いられ



試験片番号	M - 1		M - 2	
	標点変化	モアレ	標点変化	モアレ
軸方向のひずみ (%)	5.2	5.40	6.2	6.35
横方向のひずみ (%)	-2.6	-2.72	-3.0	-3.25

図9 高温下で引張を受けたときの残留ひずみ

ていた。とくに、今回の実験で行なった方法ではレンズ系によりピントガラス面上に試験片格子像を作り、それと基準格子を重ねてモアレじまを観察している。この場合には、この試験片像の大きさを変えることによってミスマッチが与えられるが、この像が試験片よりも大きいときには、変形によるしま数が引張に対して増加し、圧縮に対して減少する。したがって像が小さいときにはこの逆の現象を示す。このため、ポアソン比を求めるときのように、引張ひずみと圧縮ひずみとを同時に測定したい場合には、いずれか一方のしまの測定精度が落ちてしまう。

その他、試験片表面への格子印刷の問題がある。これにはいくつかの手法が用いられ、例えばグリットシートと言われる格子線の印刷されたフィルムを表面に接着するような方法も行なわれていたが、今回行なった写真のプリントと同様な格子線焼き付け法が最も良好のようである。しかし、いずれの方法でも高密度な格子を印刷するためには試験片表面が平滑である必要がある。さらに高分子材料の場合には格子線焼き付け法の現象あるいは染色の段階で材料自身が薬品に侵され、この方法を適用するには何等かの工夫を必要とするものがある。例えば、ポリエステル樹脂は染色剤に表面を侵され、印刷された格子線のコントラストが低下してしまい、これにより得られるモアレじまは非常に観察し難い状態になってしまう。

なお、最近 H_e-N_e レーザのような可干渉光を利用した、光学的フィルタリングと言われている方法が開発され、モアレ法にも応用されている⁽¹²⁾。この方法を用いると、モアレじまのコントラストの改善、しま次数の倍増、しま模様の分離などができる。したがって測定感度ならびに精度の向上、ひずみ解析の単純化が期待でき、さらに前に述べたポリエステル樹脂のように、格子線のコントラストがかなり悪い場合にもモアレじまの観察が可能になる。

9. 結 言

従来、温度ならびに時間に著しい依存性を持つため、構造部材として用いる高分子材料の変形やひずみを定量的に解析するのに十分な方法がなかった。このような観点から、ここではこの解析に対しモアレ法を応用した。とくに実際例として行なったエポキシ系樹脂のひずみ解析実験の例を中心に述べてきた。その結果次のようなことが明らかになった。

ここで行なった実験の結果から、エポキシ樹脂のような高分子材料の温度変化に対する力学的性質の変化をモ

アレのしま模様により定性的に判定することができ、このしまから解析された、温度と時間に依存するひずみの定量的な値も、この種の材料の物性値に関する資料として十分であることがわかった。すなわち、モアレ法が高分子材料のように粘弾性挙動を示す材料の定性的な力学特性の判定および定量的な変形やひずみの解析にも有効な方法であることが確認された。

また、モアレ法をさらに広く応用する場合にはいくつかの問題点のあることも指摘しておいた。しかしこれらの点に関しては、新しい測定方法の導入、他の解析法、測定法などを併用することにより解決できるものと期待している。とくに新たに開発された測定法を利用すれば、ガラス繊維などによる強化複合材料の変形やひずみの解析にも応用できるものと考えている。

さらに、モアレ法は光弾性皮膜法と同じように、実構造部材の、ある領域全体にわたるしま模様を記録することによってひずみ分布を解析することができる。しかも格子線焼き付け法によれば格子を印刷するための感光膜は非常に薄く、これによる補強効果はほとんど無視することができる。このようなことから、ある特定の点での情報しか得られない電気抵抗線ひずみ計による方法や皮膜の補強効果が問題になる光弾性皮膜法よりも場合によっては有効な方法となる。

最後に、本研究を行うにあたり、当所機体第二部青木由雄技官には格子の印刷に協力していただいた。また、管理部工作課原島愿治技官には各種の試験用治具を製作していただいた。ここでこれら諸氏に感謝の意を表わす次第である。

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: 線型粘弾性理論の最近の進歩, 日本機械学会誌, Vol. 64, No 513 (1961)
- (4) A. J. Durelli, V. J. Parks: Moiré Analysis of Strain, Prentice-Hall, (1970)
- (5) 越出慎一: 最近のモアレ法による変形解析(I), 機械の研究, Vol. 27, No 9 (1975)
- (6) 青木由雄: モアレ法によるひずみ解析, 航空宇宙技術研究所報告, TR-336, (1973)
- (7) 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, No 552, (1965)
- (8) 山田嘉昭: モアレ法による塑性ひずみ測定の可能性,

- 機械の研究, Vol.19, No.8, (1967)
- (9) F. P. Chiang, B. Ranganayakamma : Deflection Measurement Using Moiré Gap Effect ,
Experimental Mechanics , Vol.11, No.7 (1971)
- (10) P. S. Theocaris : Moiré Topography of Curved Surfaces, Experimental Mechanics, Vol.7, No.6, (1967)
- (11) 島田平八, 小幡充男 : モアレ用試料格子上の光弾性皮膜によるひずみ測定の実用例, 第8回応力ひずみ測定シンポジウム講演集, (1976)
- (12) 越出慎一 : しま再生装置のモアレ法への応用, 第8回応力ひずみ測定シンポジウム講演集, (1976)

既 刊 報 告

- | | | | |
|---------|--|----------|---|
| TR-460 | 音圧反射係数の測定法と地面反射補正について
On a Measurement Method of Pressure Reflection Coefficients and the Ground Reflection Correction | 1976年 6月 | 渡辺 実, 武田克己 |
| TR-461 | 推力中断型固体ロケット用プロペラント組成と急速減圧燃焼中断性との関係
Relation between the Depressurization Extinction and the Composition on Fluid-Controlled Solid Rocket Propellants | 1976年 7月 | 五代富文, 藤原 勉
清水盛生, 種村利春
伊藤克弥 |
| TR-462 | 油圧式ソフトサーボ機構非線形モデルの数値解析
Non-Linear Simulation Study of a Hydraulic Soft Servomechanism with Velocity-Feedback Loop | 1976年 7月 | 池谷光栄, 梶井 誠 |
| TR-463T | A Prototype of a Rotary-Drive Vibratory-output Rate Gyro | 1976年 7月 | Hiroshi YAMADA |
| TR-464 | 正規分布における母数推定のためのプロット法
A New Plotting Method for Estimating Population Parameters of a Normal Distribution | 1976年 7月 | 下河 利行 |
| TR-465 | 二次元風洞構成要素の研究(1)
—プラグ型調圧弁および多孔板の特性—
Investigation of the Components of the NAL High Reynolds Number Two-dimensional Wind Tunnel Part 1 (Preliminary Tests of the Regulating Valve and Perforated Plate Type Pressure Reducer) | 1976年 7月 | 榊原盛三, 馬場滋夫 |
| TR-466 | 空冷軸流タービンの空力性能に関する研究
(第2報・動翼先端すきまが全体性能, 内部流動に及ぼす影響—実験結果と計算方法—)
Aerodynamic Investigation of an Air-Cooled Axial-Flow Turbine Part 1/Rotor Blade Tip-Clearance Effects on the Overall Turbine Performance and Internal Gas Flow Conditions —Experimental Results and Prediction Methods— | 1976年 8月 | 山本孝正, 三村富嗣雄
高原北雄, 井上重雄
能瀬弘幸, 白井 弘 |
| TR-467 | コンデンサで終端されたロケット搭載用VHF帯伝送線路型アンテナの研究
Study on the VHF Transmission-Line Rocket Antenna Terminated in a Capacitor | 1976年 8月 | 桜井善雄 |
| TR-468 | 境界潤滑におよぼす雰囲気の影響, 第2報
Effect of Atmosphere on Boundary Lubrication (II) | 1976年 8月 | 西村 允, 松本 豊 |
| TR-469 | 翼後縁部より二次空気の吹き出しをともなう二次元翼列性能—解析方法と結果—
Two-Dimensional Aerodynamic Performance of Cascades of Blades with Secondary-Air Injection from the Blade Trailing-Edges —An Analytical Method and the Results — | 1976年 9月 | 山本孝正 |

航空宇宙技術研究所報告470号

昭和51年9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 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
