

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-754

モアレ法による薄い複合材料のひずみ解析

越出 慎一 ・ 高松 英男 ・ 長崎 守高

1983 年 3 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

モアレ法による薄い複合材料のひずみ解析*

越 出 慎 一** 高 松 英 男*** 長 崎 守 高***

Strain Analysis of Thin Composites with Moiré Method

By

Shinichi KOSHIDE, Hideo TAKAMATSU
and Moritaka NAGASAKI

ABSTRACT

The paper describes the strain analysis of ultra-thin composites by the moiré method. A technique for printing moiré grating on the surface of ultra-thin materials and a testing procedure to accurately measure the strain on such materials, are contrived. The specimen gratings are recorded on the films by taking photographs of specimens under testing with the testing procedure. Moiré fringe patterns from underformed gratings and deformed gratings are observed by inserting the films into the optical spatial filtering system with coherent light. The differences between the fringe patterns depend on only in-plane displacement. Strain components are determined from the differences.

The method was applied to strain analysis for tensile tests and creep tests of two kinds of thin materials which were manufactured for trial use in balloon satellite structures. The materials are thin polyestel sheets reinforced with glass fiber cloth and thin composites consisting of polyethylene terephthalate film sandwiched between two layers of aluminum foil. The results of these tests indicated that the method was applicable to strain analysis and flaw detection in ultra-thin materials. Moreover, the mechanical properties of these thin composites were clarified with these tests.

1 緒 言

先に、筆者の一人は光学的空間フィルタリングと言われるしま再生装置によりモアレじまを観察してこれからひずみ成分を求める方法及び本方法による

* 昭和58年3月2日受付

** 機体第二部

*** 宇宙開発事業団

剛性の高い複合材料などへの応用例について示した⁽¹⁾⁽²⁾。ここでは、とくに剛性が低くしかも薄い材料のひずみ解析にこの方法を応用するための研究を行った。

上述の方法の最大の特長は非接触でしまを観察することであるため、原理的に剛性の非常に低い材料に対しても適用可能である。しかしながら、非常に薄い材料にまで適用する場合には、試験片格子をいかにして印刷するかが問題となり、またこのような材料に対して精度のよいひずみ測定をするために面内変形のみに関係したモアレのしま模様変化を観察できる方法で試験を行う必要があった。そこで、剛性が低くしかもきわめて薄い材料の表面へ高密度な格子を印刷する手法を工夫し、さらに変形前後の格子で観察されたモアレのしま模様が同一の線型ミスマッチを持ち、この模様の変化が面内変形のみに関係したのものになるような負荷装置による試験方法を考案することによって、このような材料でも十分ひずみが求められるようにした。

一方、最近気球型人工衛星の構体用として非常に薄い複合材料の使用が計画され、この材料の材料特性の測定が必要となった。ここではとくにこの構体用材料として試作された薄い複合材料の引張試験及びクリープ試験におけるひずみの測定に前述の手法並びに試験法を用いたモアレ法を応用した。この結果、ここで扱ったのはいずれもかなり薄い材料であったが、本方法により十分な精度でひずみを求められることが確認され、各材料の材料特性を明らかにすることができた。さらに、このような材料の欠陥検出にもここで示した方法の利用が可能であることもわかった。

2 モアレじまの観察とひずみの解析

従来から行ってきたモアレ法によるひずみの解析と同様この場合も基本的には材料表面に印刷された格子線の変形前後を写真撮影し、このフィルム上の像をしま再生装置に入れてモアレじまを観察する。したがって、まず薄い材料表面へ格子を印刷する手法を考案する必要があった。また、上述のように観察された変形前後のしま模様の線型ミスマッチが同じであるとすれば、ひずみはこの二つのしまから次

式により容易に解析できる。

$$\epsilon_i = \frac{p_s(\delta_{oi} - \delta_i)}{\delta_{oi}\delta_i - p_s(\delta_{oi} - \delta_i)} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_i は*i*方向の垂直ひずみ(Lagrangian表示)⁽⁴⁾成分、 p_s は試験片格子の変形前の格子間隔(ピッチ)、 δ_{oi} と δ_i は変形前と後の試験片格子により形成されたしま模様の*i*方向のしま間隔である。また*x*、*y*なる直交座標系の場合は*i* = *x*あるいは*y*となる。

しかし、ここで扱うようなきわめて薄い材料の場合は、無負荷すなわち変形前の試験片によるしま模様の観察が容易でなく、しかも一般に行われている負荷方法では負荷の前後で試験片が面外方向に動いてしまい同じ線型ミスマッチを持った変形前後のしま模様を観察することがきわめて困難となる。このようなことから、ここでは以下に示すような格子印刷の手法及び変形前も後も同一の線型ミスマッチになるようなしま模様が観察できる試験装置と方法を考案した。

2.1 格子の印刷手法

試験片格子には格子線焼付け法による、いわゆるフォトレジスト格子が広く用いられている。しかし、ある程度の厚さと剛性を持った板状の材料と違い、ここでは、例えば後の適用例で示すように、厚さが0.09~0.10mmあるいは0.02~0.03mmときわめて薄くしかも軟らかい材料を対象としているので、この表面の格子の印刷には簡単に上で述べた方法を適用することができない。そこで、次のような手法を試みた。

まず、この薄い材料の短冊形試験片を、これよりも少し大きいガラス板の表面にはり付ける。この上に金属の板状試験片表面に対して行われている方法と同様の格子線焼付け法でフォトレジスト格子を印刷する。この場合、補強効果を小さくするために高速回転による塗布によりフォトレジストの厚さをできるだけ薄くして変形方向に直角な方向の格子線で形成された線型格子を用いる必要があるが、それ以外はごく一般的に行われている手法を適用する。このようにして試験片上に格子を印刷した後これをガラスの板からはがす。なお、この試験片とガラスの

板は格子が印刷されるまで完全にはり付いていなければならず、一方印刷後は上述のようなきわめて薄くしかも剛性の低い試験片であるにもかかわらず、これを何ら損なうことなくはがさなければならないので、このはり付けには特別な方法を必要とした。ここではこのはり付けにアセトンのような気発性の高い液体とセロファン紙を用いる手法で行った。後の適用例で示す材料のように、表面がアルミニウム蒸着されたものあるいは表面がアルミニウム箔のものに対しては、ここで述べた手法によりピッチ p_s が 0.05 mm 程度までのフォトリソグラフィ格子の印刷が十分可能であった。またここで用いた高速回転による塗布ではフォトリソグラフィの層が $0.002\sim 0.003\text{ mm}$ であると推定された⁽³⁾。

2.2 試験装置と試験方法

つきに、きわめて薄い材料の材料特性を求めるための単軸引張試験用に考案した装置並びに実際に行った試験方法について示す。

いま、格子の印刷された試験片がある面上にあり、負荷により試験片がその面内で変形するようにすれば変形前後で同一の線型ミスマッチを持ったしま模様を観察できる。したがって、これから式(1)によってひずみが求められる。しかし、もし負荷により変形前後で格子の印刷された面が面外に移動してしまうと、線型ミスマッチ量がこれにつれて変化してしまうので、式(1)が適用できなくなってしまいます。さらにここで扱っているようなきわめて薄くしかも軟らかい材料では無負荷時の試験片が面外の方に曲ってしまっただけで強制的に平らな面に押し付けると格子の印刷されている表面が平らにならない。一方、このような試験片でも引張の荷重がかかっているときは平らにすることもできる。したがって、変形した時点では平らな面でのしま模様は得られるが、これと同一の面内で変形前の試験片のしま模様を得ることができなかった。このようなことから、図1に示

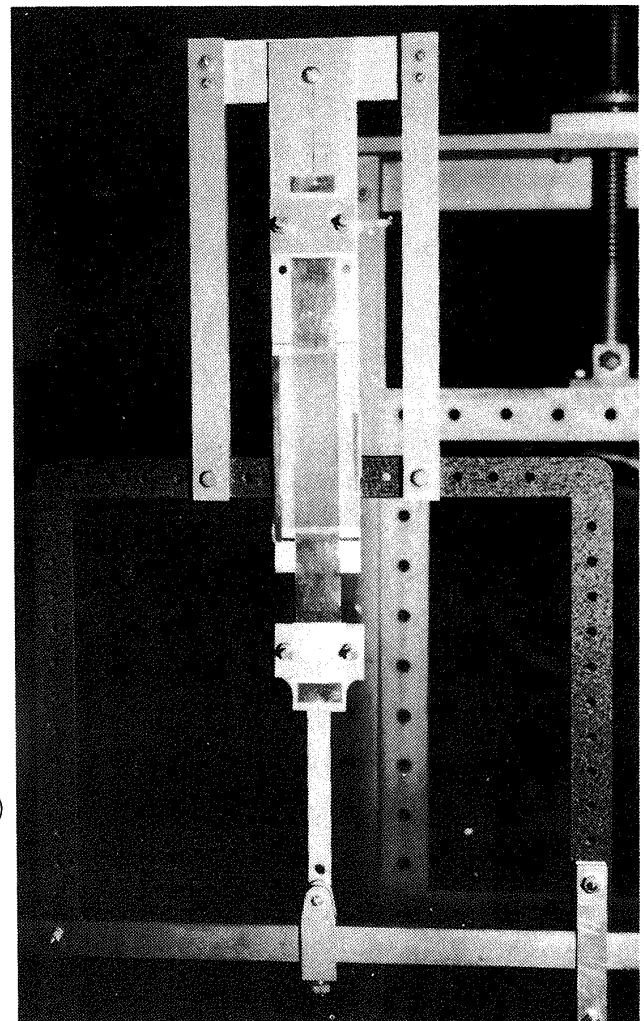
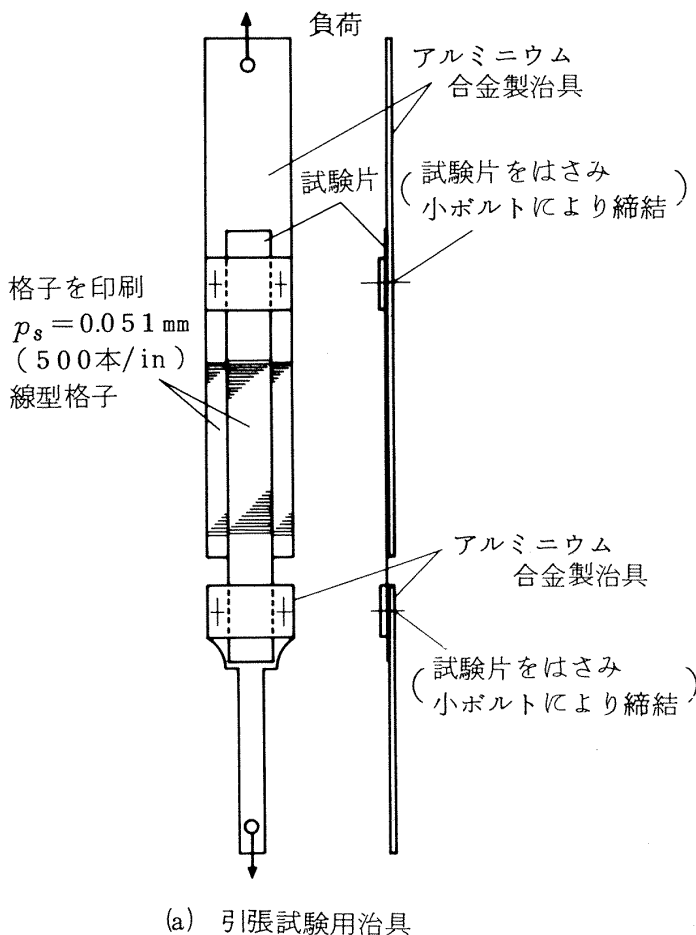


図1 引張試験装置と負荷状況

すような引張試験用の装置を考案した。すなわち、この図のように試験片表面と全く同じ格子が印刷されたアルミニウム合金板を用意し、この面に試験片を重ね、一端を小さな板ではさむような形で固定する。試験片のもう一端は、やはりアルミニウム合金で作られた治具にはさむ形で固定する。これをさらに同図(b)のようにテコ式の負荷装置に取り付けて試験片が格子の印刷されたアルミニウム合金板の面に沿って変形するように荷重をかける。この状態の表面を写真撮影すると、一枚の写真フィルム上にはアルミニウム合金表面の変形をしない格子と試験片表面の変形する格子の像が写る。したがって、この写真フィルムの上にさらに基準格子を撮影する、すなわち二重露光させるかあるいは基準格子のみを撮影したもう一枚の写真フィルムを重ねてしま再生装置に入れると変形前の格子と変形後の格子によるモアレじまを同時に観察することができる。とくに、ここではきわめて薄い材料を平らな板の上に重ねて撮影したものであるからこの変形前と後の格子線は同一面上にあると考えられる。このことから、ここで観察された二種類のしま模様は同じミスマッチが与えられたものになり、この模様の差は負荷による試験片の面内変形のみによるものとなる。

なお、ここでは p_g の小さな格子が印刷された表面の写真撮影をするため高解像力のフィルムを使用する必要がある。一般にこの種のフィルムは撮影感度が低いので先の報告で示したように⁽²⁾高出力の光源(アイランプ、ストロボフラッシュなど)による照明とモータドライブシステムを連動させた撮影法の使用を考えた。しかし、実際の測定では長い試験片を撮影するため上で示した照明では全長にわたって一様な明るさの写真像が得られない。そこで、今回は二本の長い蛍光灯による照明と長時間露出(1秒)による撮影法を適用した。

2.3 実際に観察されたしま模様からひずみを解析する場合の問題

前節で述べたように、ここで得られている変形前後のしま模様の差は材料の面内変形のみによるものであるため、これらの模様から線型ミスマッチ量には無関係に式(1)よりひずみが解析できる。しかし、

これにはさらにアルミニウム合金板表面の変形しない格子と試験片表面の変形する格子の格子線方向が一致しているという仮定が入っている。したがって、図2のようにこれが一致していない場合には回転ミスマッチ、すなわちこれらのフィルムを重ねたとき基準格子の格子線とこの変形前と後の格子線とのなす角 θ_1 、 θ_2 が異なってくるため、式(1)を用いてひずみを求めるとこれによる誤差が入ってくる。とくに二重露光撮影した写真フィルムを用いてしま模様を観察した場合は一般に θ_1 と θ_2 が異なってきて、これらの値を正確に求めることも困難なため、この誤差を取り除くことができない。一方、変形前後の格子を撮影したフィルムとこれとは独立に基準格子を撮影したフィルムを重ねてしま模様を観察する場合には、二枚のフィルムが任意の回転角を持つように重ねられるので、回転ミスマッチを変えてこれを零にすることが可能となる。とくにここでは試験片の縦方向に引張変形をさせるため、格子は横方向の線群で構成されていて回転ミスマッチが零の場合は横方向に平行なしま模様となる。したがって θ_1 と θ_2 が一致していなくても図3のように、いずれか一方の角、すなわち θ_1 を零及び θ_2 を零にしたときの二通りのしま模様を観察することができる。つまりこれらの模様の横方向になったしまはおのおの変形前と後の回転ミスマッチが零のものであるので、このしま間隔を測定して、式(1)よりひずみが求められる。

なお、図1に示した装置ではアルミニウム合金板表面の格子線と試験片表面の格子線が一致するようにはあらかじめセットすることは可能であるが、負荷とともに多少ずれてしまうことがある。またこの角度が小さくても観察されるしま模様はかなり影響を受けるのでこのような場合にはここで示した手法を使用する。さらに、このひずみの解析に用いている式(1)は近似的な変位とひずみの関係を基にして導出された Lagrangian 表示の垂直ひずみ成分を表わしている。ここで扱うような薄くしかも軟らかい材料は一般にひずみが大きくなるものと考えられる。しかし、変形前と後の試験片の回転が小さければ上述の関係から導出された式を用いて求められたひずみは、かなり大きくなってでもそれに含まれる誤差は小さいことがすでに示されている。⁽⁴⁾

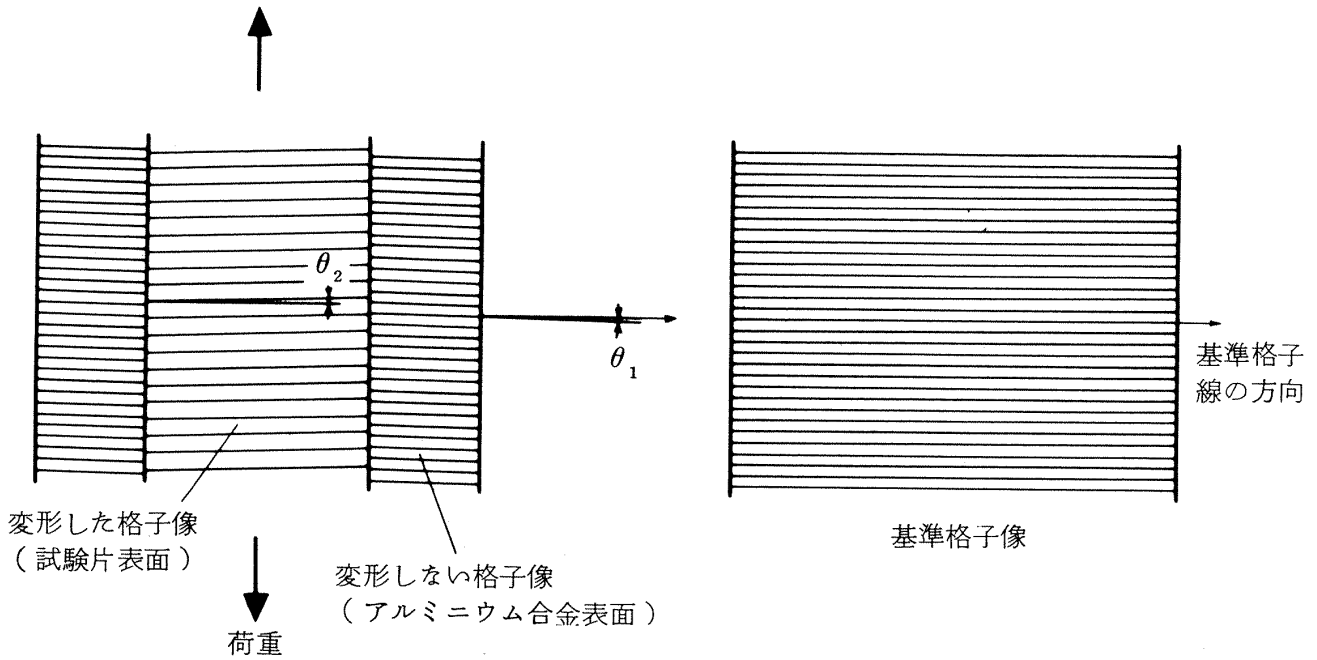


図2 格子線の方法と回転ミスマッチ

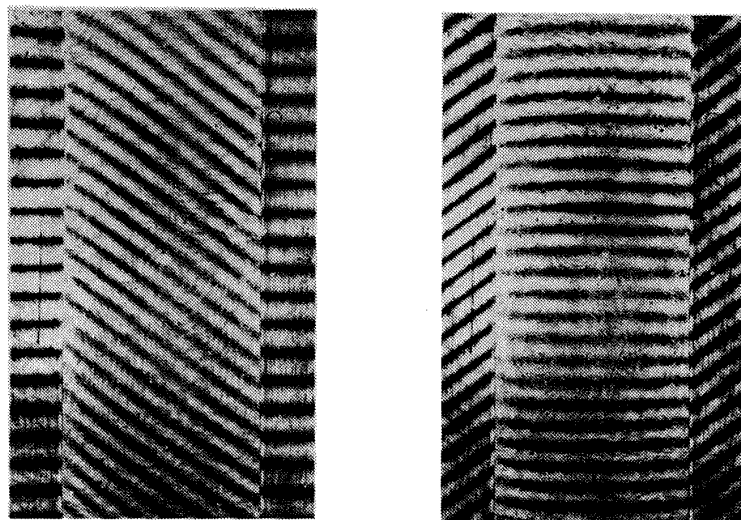


図3 変形前後で回転ミスマッチが異なる場合のモアレじま

3 薄い複合材料の材料特性測定への応用

測地衛星すなわち気球型人工衛星の構体材料としていく種類かの薄い複合材料が試作された。ここでは、先に示した方法の一つの応用例として、これらの材料の内とくに図4のような材料、すなわちガラス繊維クロスとポリエステルフィルムにより構成された複合材料(多重層材料)及びアルミニウム箔とポリエチレンテレフタレート(PET)により構成された材料(ラミネート材料)の短冊形試験片の引張試験及びクリーブ試験におけるひずみを求めた。

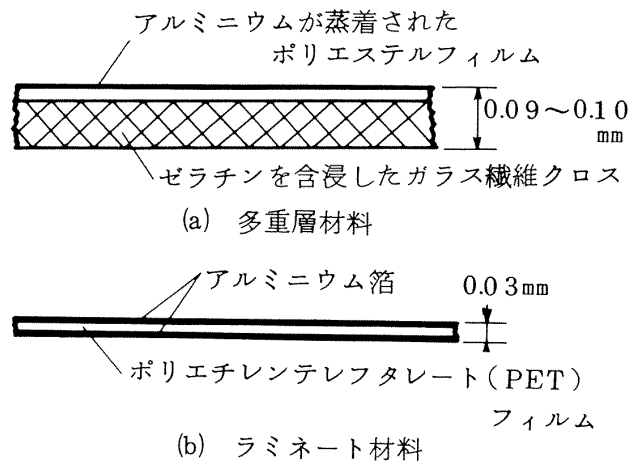


図4 気球型人工衛星構体用試作材料

また、これらの結果を検討し、このような材料に本方法が適用できることを確認するとともに、各材料の材料特性も明らかにした。

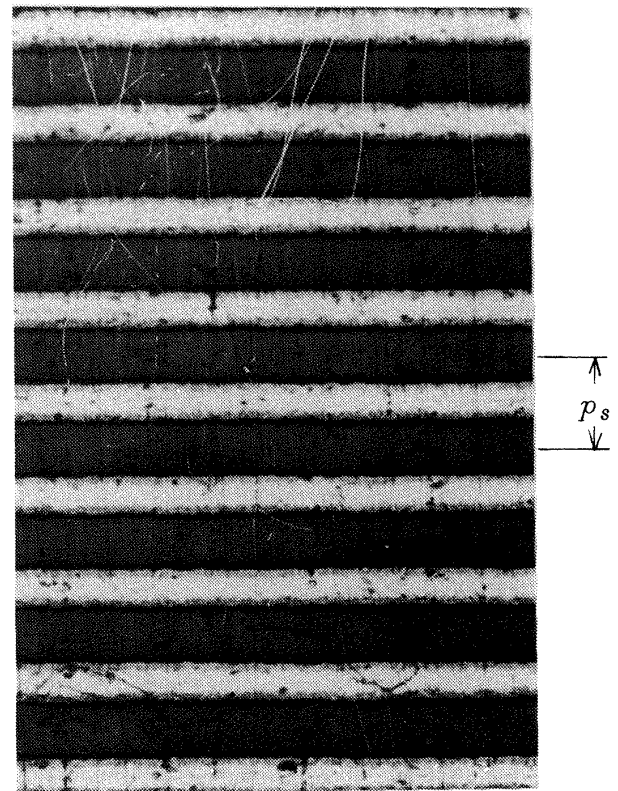
3.1 多重層材料

まず、多重層材料として試作された二種類（試験片記号のNシリーズ及びMシリーズ）の材料に対する引張試験を行った。これらの材料は繊維の状態など多少異なるが、いずれも図4(a)のような細いガラス繊維のクロスにゼラチンを含浸させこれを硬化させた強化層と表面にアルミニウムが蒸着されたポリエステルフィルムをはり合せた複合材料である。

3.1.1 多重層材料の引張試験

引張試験は幅 25 mm, 長さ 250 mm の短冊形試験片に対して行い、厚さは個々の試験片により多少異なるが 0.09~0.10 mm のものである。また、この材料は表面と裏面の状態が違っており、アルミニウムが蒸着されているポリエステルフィルムの表面に、先に示した手法により格子を印刷した。図5には格子の印刷された表面の例を示す。これは p_s が 0.051 mm (500 本/in) の線型格子が印刷された表面の拡大したものである。この材料では繊維強化層に比べてポリエステルフィルムがかなり薄いので、布状の表面になっていて必ずしも平滑でないが、非常に細かい繊維であるのでこの図で示されているように格子線はかなり良好に印刷されている。

図6はN及びM両シリーズ試験片の引張試験で得られたモアレじまの例である。この各荷重点におけるしま模様には中央部と両側の二種類の模様が現われているが、図1の試験装置で行っているので、前者は変形を受けた試験片表面の格子、後者は変形を受けないアルミニウム合金板表面の格子により形成されたものになる。したがって、このしまの間隔を測定して式(1)に入れば各荷重点のひずみが求められる。図7はこのひずみを基にして示した多重層材料の応力ひずみ線図である。本図はNシリーズの縦、横方向(N-L, N-T)試験片及びMシリーズの縦方向(M-L)試験片に対する結果を示したものである。しかし、Mシリーズの横方向(M-T)試験片は後に述べるように長手方向の材質が均一でなく、場所に



($p_s = 0.051$ mm 線型格子)

図5 多重層材料表面の格子線

よってひずみが急激に増大する分布となった。このため、標点間における一様なひずみが求められず、他の試験片で示したような応力ひずみ線図を示すことができなかった。

一方、ここでやっている方法はクリープひずみの解析へも適用可能である。図8にはその一例として一定応力下で時間とともに変化するひずみを求めるためのしま模様を示す。この場合には、本図のように各時間点におけるしま模様が観察されるので、先の引張試験の場合と同じように、各時間点でひずみが求まり、クリープ曲線が得られる。図9にはここで得られたクリープ曲線の例を示す。

3.1.2 多重層材料の材料特性

つぎに、以上で示した各試験結果より、この多重層材料の材料特性について検討してみる。

まず、先の図7(a)にはN-L, N-T試験片の応力ひずみの関係を示してあるが、いずれの場合も破断に近いところまでこの関係は線型で、いわゆる脆性材料に近い様子を示している。しかし、破断点に近づくと、多少クリープを生じる。これは、本材料の

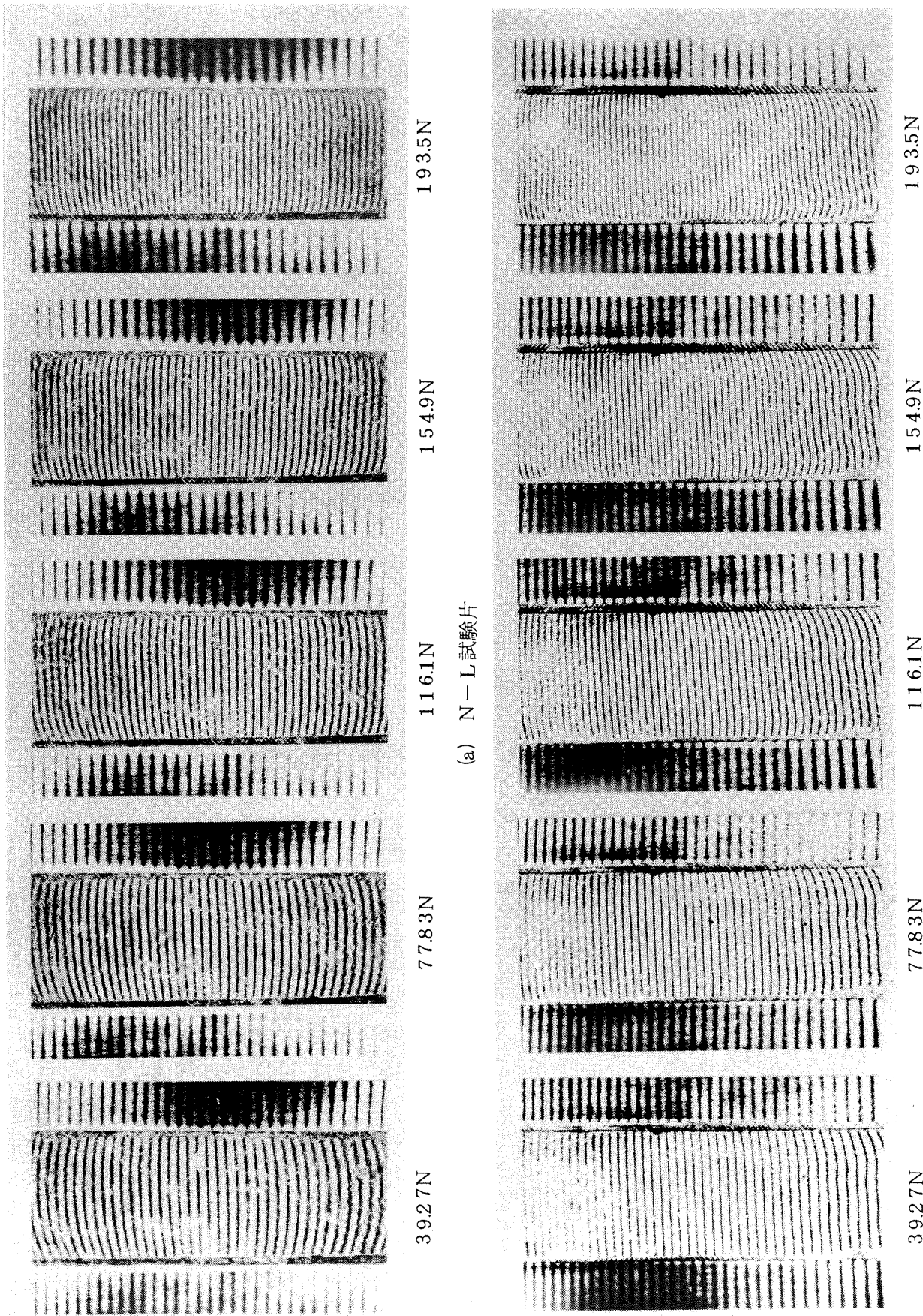


図6 多重層材料引張試験におけるモアレじまの例

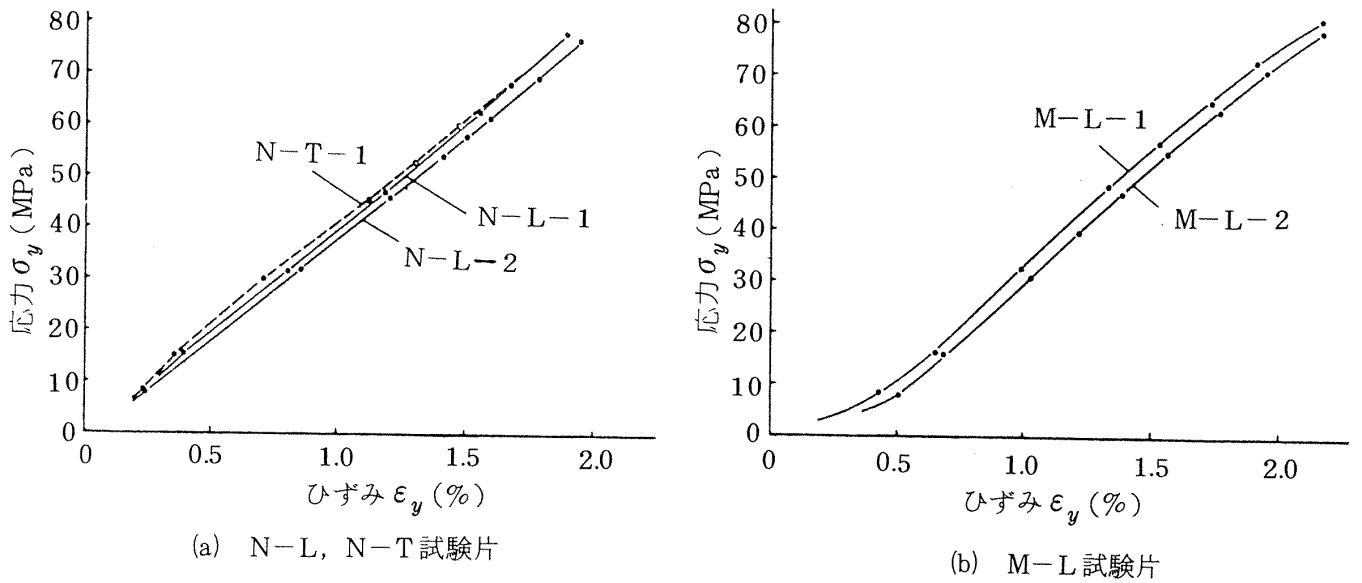


図7 多重層材料の応力ひずみ線図

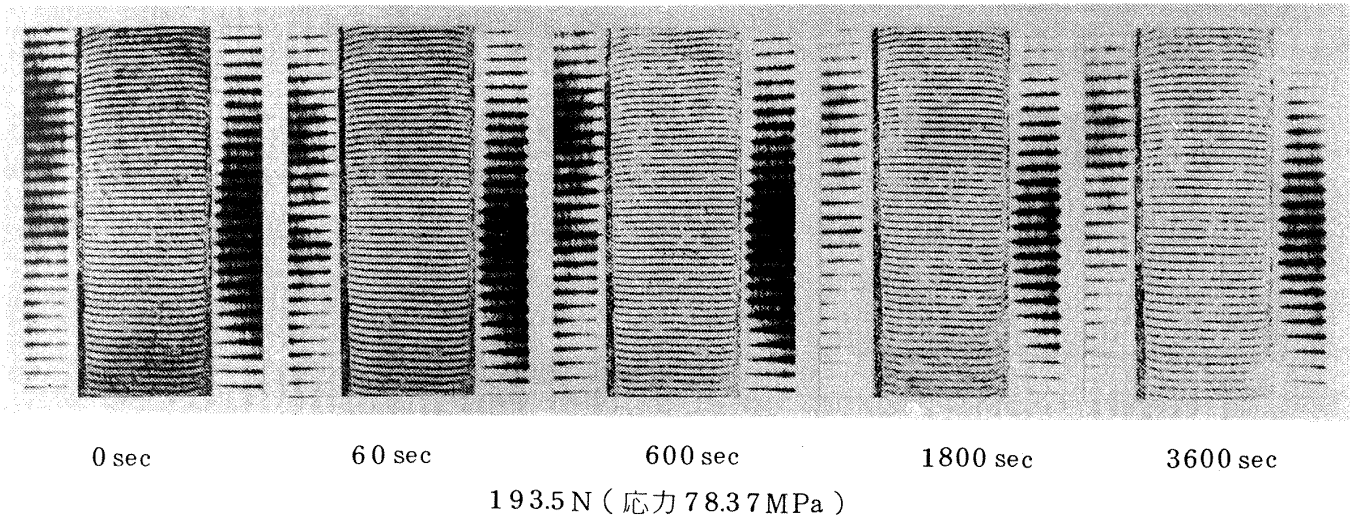


図8 多重層材料クリープ試験におけるモアレじまの例

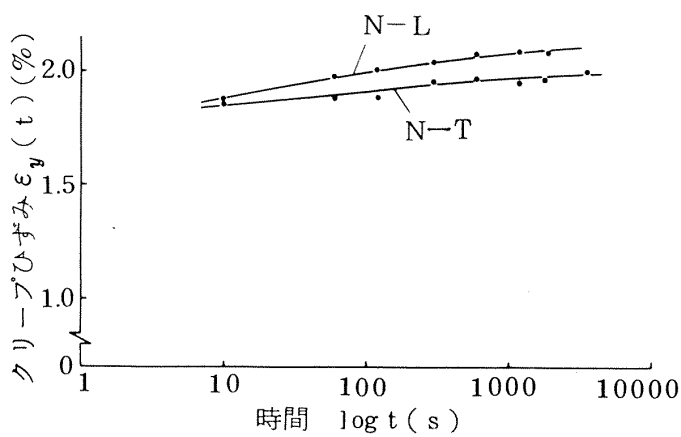


図9 多重層材料のクリープ曲線

強度がガラス繊維クロスで構成されている強化層に支配されており、破断はこの繊維が徐々に切れて行く状態で起きるためと思われる。また、図7(b)にはM-L試験片の応力ひずみの関係を示してある。このシリーズの材料は応力とひずみの関係が線型でなく、応力の低いところ及び破断に近いところで曲線になっている。とくに応力の低いところで非線型になっているのは、負荷前の試験片強化層の荷重を受ける方向の繊維が多少曲っていて、これが完全に引張られる荷重点まで繊維自体の伸びにこの曲った繊維の伸ばされる分が加わってひずみが大きくなるためと思われる。一方、破断に近づくとしたがって非線型になっているのは、先のNシリーズ試験片の場合

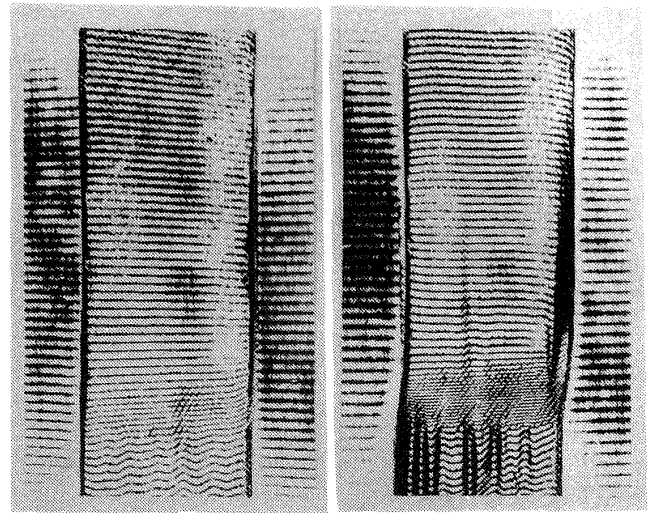
表1 多重層材料の弾性率及び引張試験の破断応力

試験片	弾性率 (G Pa)	破断応力 (MPa)
N-L-1	4.2	1 1 4.1
N-L-2	4.3	1 0 7.5
N-T-1	4.2	1 0 5.5
M-L-1	4.4	1 0 2.6
M-L-2	4.5	9 7.1
M-T-1	—	7 9.8
M-T-2	—	7 3.0

合と同様、繊維が徐々に切れて行くためと推察される。表1には以上で示した各試験片の弾性率及び破断応力を示す。なお、このM-L試験片の弾性率は応力ひずみ関係が線型になっている領域で求めたものである。

また、図8にはN-L, N-T試験片のかなり高い応力レベルでの短時間クリープ試験の結果を示してある。この結果では試験片の数が少なく、また1~2時間までの資料であるため、クリープ特性について十分な検討をすることはできない。しかし、ここで行った方法がクリープ試験への適用も十分可能であることは示されており、さらにこのNシリーズの試験片では比較的高い応力レベルで多少クリープすることも明らかになった。なお、この結果及び前に示した各結果より、Nシリーズの試験片に関しては縦方向、横方向ともほぼ同じ特性を持っていることもわかった。

一方、ここで扱った二種類の多重層材料の内とくにM-T試験片は他の試験片と全く異なった特性を示した。まず、図10にはこの試験片の引張試験で得られたしま模様を例を示す。このしま模様も両側は変形しない格子、中央部が変形した試験片上の格子で得られたものである。とくにこの図で、両側の変形していない場合のしま模様は図4のものと同じであるが、中央部の試験片上の格子から得られたしま模様はかなり違っている。ここでやっている方法で観察されるしま模様は引張方向に直角な方向の格子間隔が変化することにより生じたものである。また、線型ミスマッチの与え方によって引張変位に対ししま模様を密にするか粗にするかが決定される。



58.5N 97.1N
図10 多重層材料M-T試験片引張試験におけるモアレじまの例

一般にこのしま模様を密にした方が測定精度は向上する。このため、ここでも引張変位が大きくなるにしたがいしま模様が密、すなわちしま間隔が小さくなるような線型ミスマッチを与えている。したがって、単純な引張試験の場合のように試験片標点間全長にわたり一様な引張ひずみを受ける状態では、しま間隔は変化するが図6あるいは図8に示されているように標点間全長にわたり一定間隔のしま模様になる。しかし、図10をみると長手方向に沿ってしま間隔は一定でなく場所により非常に小さくなったところがある。これは引張方向のひずみが一様でなく場所によって変化し、しま間隔が小さいところではひずみが大きくなっていることを示している。図11には図10の二つの荷重点におけるしま模様からひずみを解析し、長手方向に沿った引張ひずみの分布を示した。この図からM-T試験片の場合は長手方向に沿ってひずみが一様でなく、非常に大きなひずみを生じる場所があることがわかる。この現象は次のような理由によるものと思われる。先に述べたように多重層材料では強度特性がガラス繊維の強化層に支配される。したがって、図12のような繊維の曲ったところでは引張を受けると他のところよりも伸びが大きくなる。ここで扱ったMシリーズの試験片ではM-L試験片も全体的に多少このような繊維の曲りがあったため、低い応力のところで応力とひずみの関係が非線型になったことを示したが、

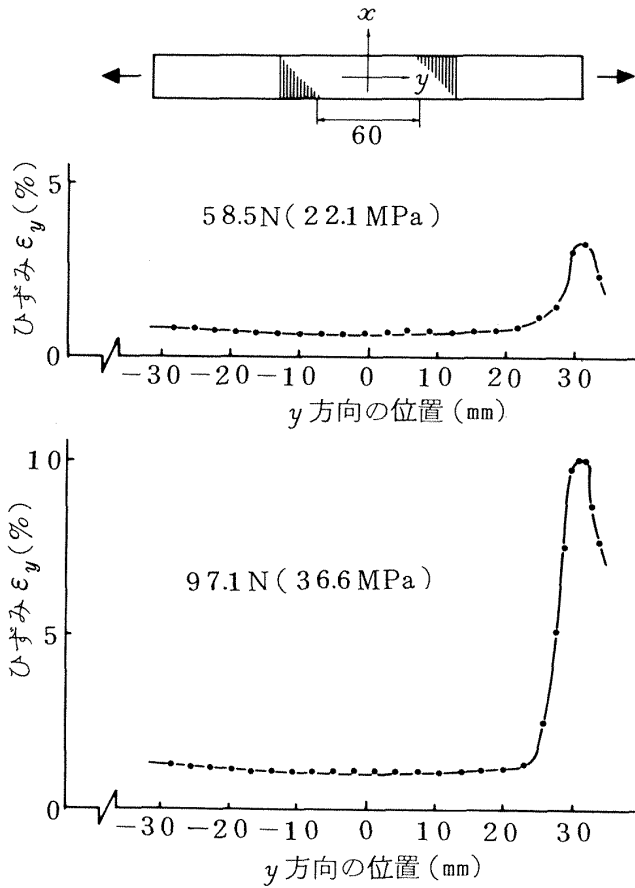


図11 M-T試験片の引張(y)方向ひずみの分布

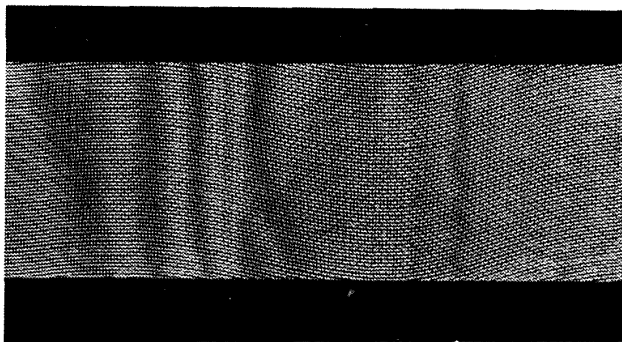


図12 多重層材料強化層のガラス繊維が曲っている部分の例

M-T試験片はとくに局部的に著しく曲ったところがあったため、ここで急激にひずみが大きくなったと考えられる。さらにこのように局部的に大きな変形をする場合にはこの附近に面外変形となるしわが生じる。これは図10のしま模様の下の部分の波打った横じまあるいは縦じまとなって表わされている。またこの部分は繊維による強化層の製作時に入った欠陥であり、実構造材料としての使用には問題があると思われる。したがって、このM-T試験片に対

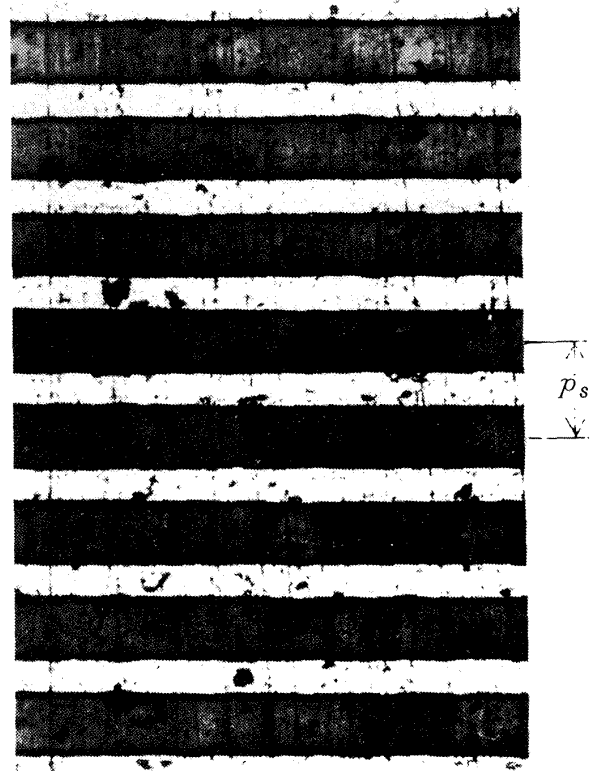
する結果は、ここで用いた方法が不均一な特性を持つ材料へも適用可能であるだけでなく、欠陥部分では一般に材料の強度が低下して健全な部分よりも変形が大きくなるために、局部的なしま模様の変化を低荷重のところを観察すればこの欠陥部分を判定することにも利用できることを示している。

3.2 ラミネート材料

ここでは、ラミネート材料の引張試験及びクリープ試験について示す。このラミネート材料は、図4(b)に示したようにPETフィルムをアルミニウム箔の間にはさんだサンドイッチ状の複合材料である。なお、これに使われたアルミニウム箔の厚さは0.007mm、PETフィルムは0.012mmで、接着層を含めても厚さが約0.03mmの非常に薄い材料である。

3.2.1 ラミネート材料の引張試験及びクリープ試験

引張及びクリープ試験用試験片は先の多重層材料の場合と同様な短冊形で、幅25mm、長さ300mmのものである。また、この材料は表面、裏面ともア



($p_s = 0.051$ mm線型格子)

図13 ラミネート材料表面の格子線

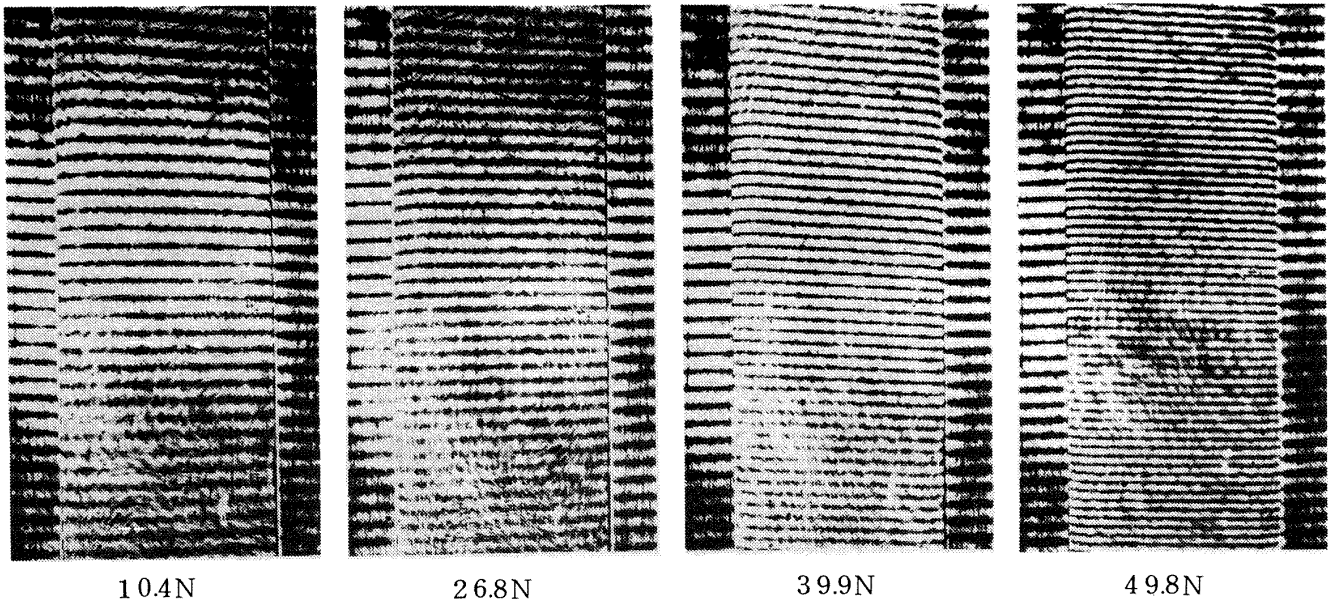


図14 ラミネート材料引張試験におけるモアレじまの例

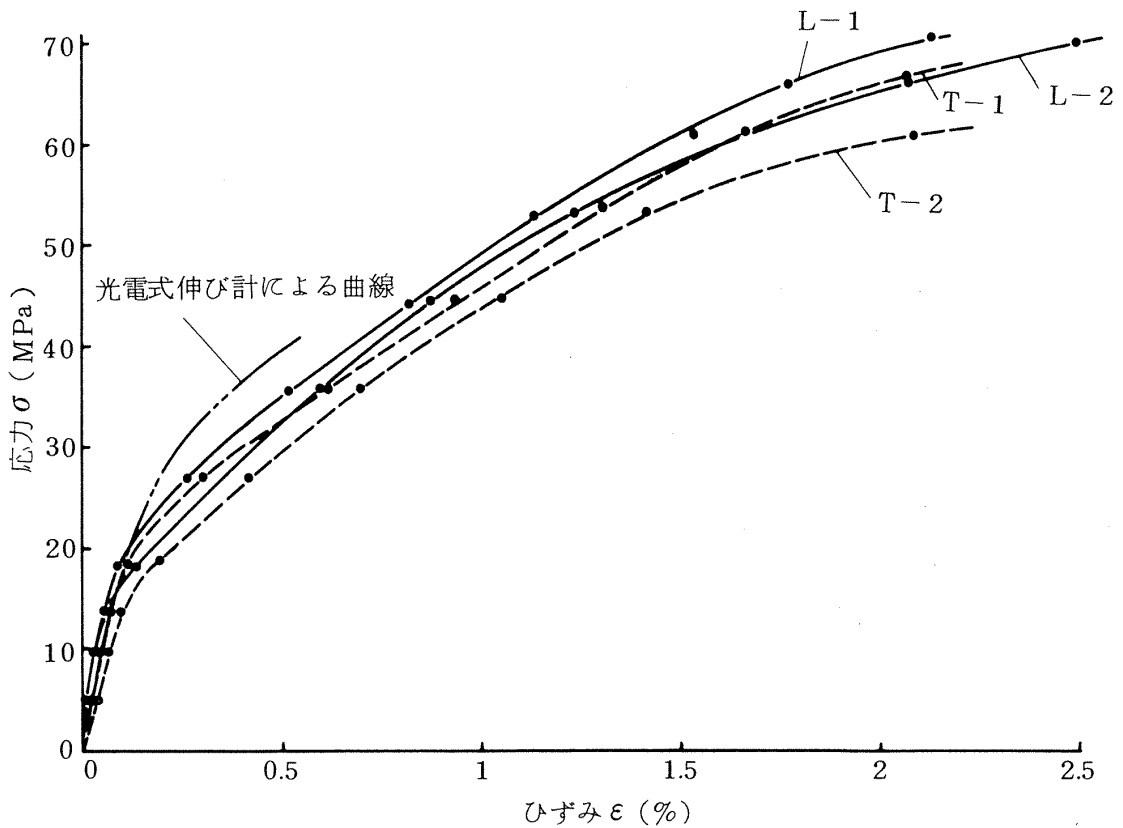


図15 ラミネート材料の応力ひずみ線図

ルミニウム箔であるため、同じ状態でしかもきわめて平滑な面になっている。しかし、非常に薄く、軟らかいので格子の印刷には細心の注意をする必要があったが、2.1節で述べた手法により良好な格子を印刷することができた。図13にはこの格子の拡大したものを示す。これも負荷方向に直角な線群で構成された p_s が0.051mmの線型格子である。

この引張試験、クリープ試験も先に示した装置並びに方法を用い、また格子の撮影及びモアレじまの観察も前に述べた方法で行った。図14には引張試験で得られたモアレじまの例を、また図15にはこれから解析されたひずみによるラミネート材料の応力ひずみ線図を示す。この場合もPETフィルム製造時の引き出し方向(試験片記号のL)とこれに直

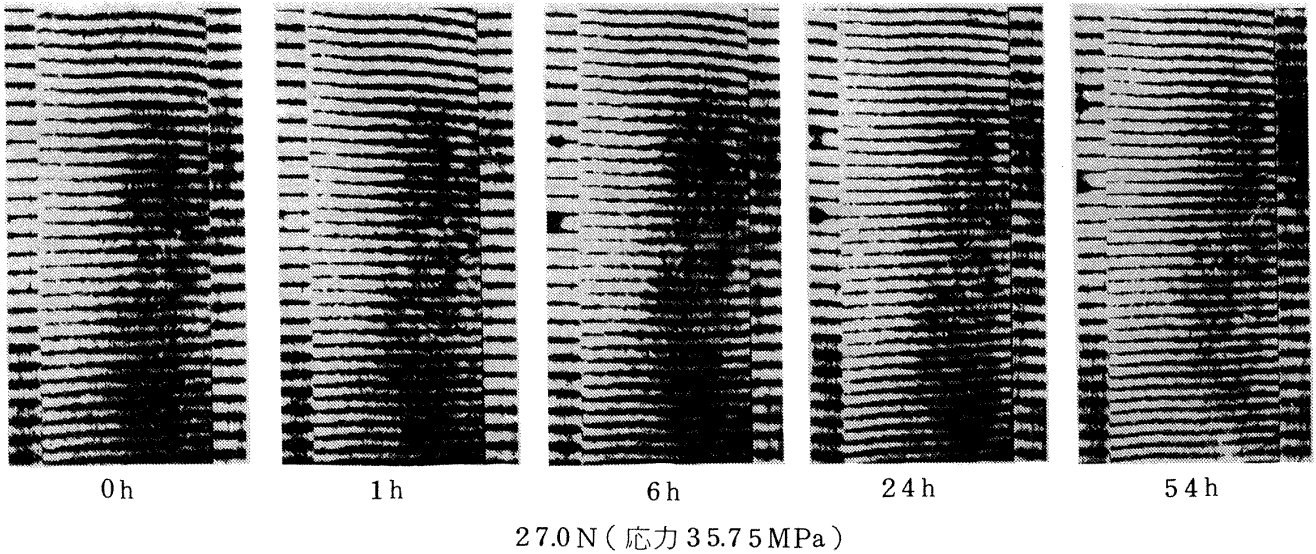


図16 ラミネート材料クリープ試験におけるモアレじまの例

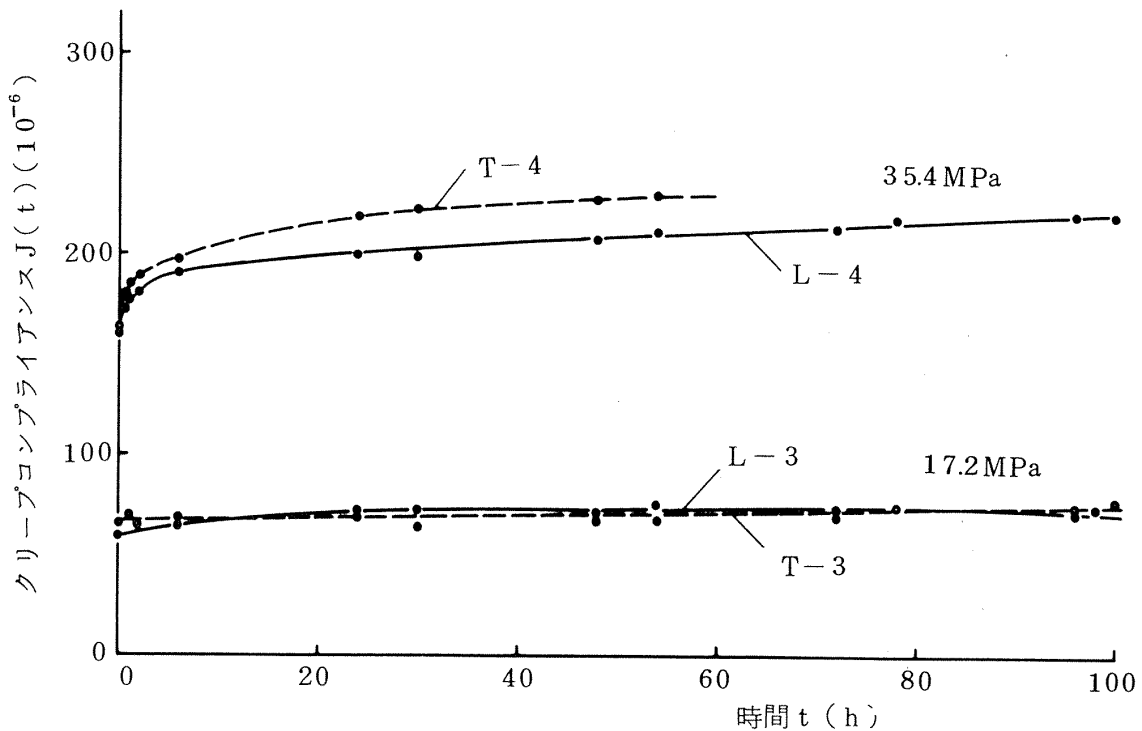


図17 ラミネート材料のクリープコンプライアンス曲線

角な方向(T)の試験片に対して試験を行った。またこの図 15 には参考のために光電式伸び計により得られた曲線と比較してある。小さなひずみ領域での比較であるが、この曲線はモアレ法で得られたものと同じ傾向を示している。

さらに、図 16 にはこのラミネート材料の 100 時間までのクリープ試験で得られたしま模様の例を示す。この場合も各時間点におけるしま模様からひずみが求められる。図 17 はこれから得られた L、

T 両方向試験片のクリープコンプライアンス $J(t)$ (単位応力 1MPa 当りのクリープひずみ) を示したものである。

3.2.2 ラミネート材料の材料特性

上で示した試験結果を検討し、ここで扱ったラミネート材料の材料特性についてつぎに述べる。

まず図 15 より、このラミネート材料では応力の低いところで応力ひずみの関係が多少線型に近くな

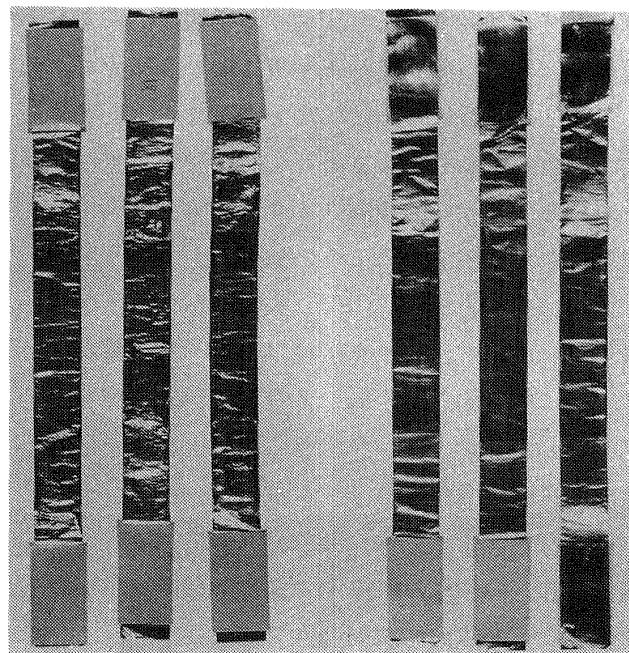
表2 ラミネート材料引張試験の最終応力

試験片	最終応力 (MPa)
L-1	87.9
L-2	87.7
T-1	79.4
T-2	87.7

っている。しかし、完全な直線となる領域はなく、いずれの試験片の場合も応力が20MPa付近に変曲点があって、これを過ぎるとひずみが大きくなるような曲線となっている。このため、この線図から本材料の弾性率は求められなかった。また試験片間のばらつきのため各試験片で得られた曲線は一致していないが、L、T両方向試験片ともこの傾向は類似していて、試験片の方向による差は確認できない。

表2にはラミネート材料各試験片の引張試験における最終の応力値を示す。本材料では、この応力に達すると急激なクリープ変形をして大きく伸びてしまいが、完全な破断は生じない。この現象はつぎのような理由によるものと考えられる。すなわち、本材料はアルミニウム箔とPETフィルムにより構成されているが、強度的にはまずアルミニウム箔が主に荷重を受け持つ。しかし、応力が増加し、上述の最終値に達するとこのアルミニウム箔が破断し、PETフィルムのみが荷重を受ける状態になる。このフィルムは軟らかくしかも著しいクリープをする。したがって試験片は大きく伸びてしまう。一方、図18にはこの最終応力のところで伸びきってしまった後の各試験片の表面状態を示した。この表面の状態はL試験片とT試験片では異なっており、前者の場合は非常に細かい横じわが生じているのに対し後者はしわがあまり生じていない様子が示されている。先の応力ひずみ線図及び表2の各試験片の最終応力値では試験片の方向による差があるかどうかの判定ができなかったが、この図18よりL試験片とT試験片とでは材料特性の上に多少差があって、わずかながら異方性のあることが推定される。

さらに、先に示した図17は二つの応力レベル(17.2及び35.4MPa)のクリープ試験で得られた



L方向試験片 T方向試験片
図18 伸びきった後のラミネート材料試験片表面の状態

結果である。この二つの応力レベルは図15の応力ひずみ曲線の変曲点より低い値及びこの2倍の、材料がかなり大きな変形をする点での値である。この図17の曲線はいずれも単位応力に換算した場合のクリープひずみに相当するクリープコンプライアンスである。しかし、この二つの応力レベルで得られた各時間点でのクリープコンプライアンスは全く異なっている。これは本材料の応力ひずみ関係が非線型なためであるが、クリープコンプライアンス曲線の傾向もかなり異なっている。すなわち、上述の変曲点以下の応力では著しいクリープ挙動をしないが、高い応力の場合にはかなり著しいクリープ挙動をする。これから、本ラミネート材料のクリープ特性は応力に依存するものと考えられる。なお、このクリープ試験もL、T両方向の試験片に対して行ったが、試験片の数が少ないため異方性に関する判定は不可能であった。またこの試験は恒温室で行ったものではなく、試験期間中にはかなりの温度変動(例えば図17のL-4試験片の場合は22.7~27.7℃)もあり、この影響が多少入っていると考えられる。

4 結 言

ここでは、薄い材料の試験片をガラス板表面には

り付けて高密度の格子を印刷する手法並びに変形を受けない格子の印刷された平板にこの試験片を重ねて負荷する装置による試験法を考案することによって、剛性が低くしかもきわめて薄い材料でもひずみを求めるのに光学的空間フィルタリングを利用したモアレ法が適用できるようにした。

また、この方法の応用例として気球型人工衛星の構体材料用に試作された二種類の薄い複合材料、具体的には厚さが約0.1mmの多重層材料及び厚さが約0.03mmのサンドイッチ状ラミネート材料を取り上げ、引張試験並びにクリーブ試験におけるひずみの測定を行い、この結果から各材料の応力とひずみの関係曲線、弾性率、クリーブ曲線、破断あるいは最終強度などを求めて材料特性を明らかにした。

一方、このモアレ法により求められた応力とひずみの関係曲線の一つを小さいひずみ領域で光電式伸び計により得られたものと比較したが、両者は一致した傾向を示し、この方法の妥当性が確認された。なお、本方法は材料の剛性がフォトレジストによる格子線の影響を受けるところまで適用可能である。このフォトレジストの剛性を正確に調べることは困難であるが、非常に低いと推定される。したがって、格子の印刷が可能であれば、実用的にはほとんどの場合に適用できると考えられる。また、薄い材料のかなり大きなひずみ領域まで測定可能であることか

ら、このような材料のひずみ測定に対して非常に有効な方法である。

さらに、前述の多重層材料の一つに強化層の欠陥を持つ試験片のシリーズがあった。本方法は均一材料のみでなく、ひずみ分布を求めてこのような不均一材料の特性を求めることができ、これから欠陥の存在及びその部分の強度低下の判定も可能であることがわかった。

最後に、本研究は航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団との測地衛星の構体材料に関する共同研究の一環として行ったものであることを付記しておく。

5 参考文献

- (1) 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）
- (2) 越出慎一；モアレ法による繊維強化複合材料のひずみ分布解析，航空宇宙技術研究所報告，TR-681，（1981）
- (3) 横田晃；最近の微細加工用フォトレジスト材料，半導体研究，XIV，51～53
- (4) V.J. Parks, A.J. Durelli: Various Forms of the Strain-displacement Relations Applied to Experimental Strain Analysis, *Experimental Mechanics*, Vol. 4, No. 2 (1964), 37-47

航空宇宙技術研究所報告 754 号

昭和 58 年 3 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
