

UDC 678.067.9:  
620.178.322.3

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-366

カーボン複合材の曲げ疲労強度

古田敏康・野口義男・松嶋正道

1974年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# カーボン複合材の曲げ疲労強度\*

古田敏康,\*\* 野口義男,\*\* 松嶋正道\*\*

## Flexural Fatigue Strength of Carbon Fiber Composites

By Toshiyasu FURUTA, Yoshio NOGUCHI  
and Masamichi MATUSHIMA

The static and dynamic mechanical properties of composite materials with carbon fiber reinforcement were investigated experimentally.

The test was performed on the composites consisting of matrices of epoxy (EPON 828) and polyimide resin (KERIMID 601), and the reinforcement of high tension type of carbon fibers, CARBOLON Z-2-1 and CARBOLON Z-2-2 made by the Nippon Carbon Co., and TORAYCA T 300 A by the Toray Co.,.

The experiment was carried out both at room temperature and at 120°C.

The static flexural strength and Young's modulus as well as the flexural fatigue strength were determined.

The results show that the ratio of  $10^7$  cycles flexural fatigue strength to the static flexural strength is about 0.6~0.67 times.

Some important improvements in the fatigue testing machine were made and are explained in the present report.

### 1. は し が き

金属材料などの疲労試験用として荷重一定型疲労試験機が広く使用されてきたが、そのまま複合材用を使用すると不都合であることがわかった。すちわち試験機の検定の結果、試験片に生じる始動時の初期ひずみが定常ひずみの約2倍となり、複合材の場合にはこの時点でクラックを生じ、それ以降の複合材の寿命に大いに影響する。そこでこの試験機の改造を行ない、異常な初期ひずみを完全に取除くことに成功した。なおカーボンの一方向強化材の平板のままでは繊維方向にそって割れを生じやすいので、板厚方向にも曲率をつけることにより繊維方向の割れを防ぎ、良い結果を得た。これら試験の結果他のガラス複合材(GFRP)や金属材料に比較してカーボン複合材(CFRP)の曲げ疲労強度はかなり高いこともわかった。

使用したカーボン繊維はトレカ T 300 A (東レ製)カーボロン Z-2-1, Z-2-2 (日本カーボン製)の3種類を、マトリックスとしてはエポキシ樹脂および耐熱性のあるポリイミド系のケルイミド 601 樹脂を使用した。またカーボン繊維とガラス繊維

との交互積層による混合複合材 (Hybrid Composite) の曲げ疲労強度も求めた。

### 2. カーボン繊維および複合材の製法

使用したカーボン繊維の強度特性 (カタログ値) を表 1, 2 に示す。

表 1. T 300A 繊維(東レ高強度糸)の強度特性

引張強度 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	250 以上
弾性率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	22,000 以上
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.78
直径 ( $\mu$ )	8.5
伸度 (%)	0.9 ~ 1.1

(カタログ値)

表 2. カーボロン繊維(日本カーボン高強度糸)の強度特性

	Z-2-1	Z-2-2
引張強度 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	300	260
弾性率 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	20,000	24,000
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.74	1.63
直径 ( $\mu$ )	5.5	5.5
伸度 (%)	1.5	1.1

(カタログ値)

\* 昭和49年 2月13日受付

\*\* 機体第一部

複合材の製造はまずプリプレグ ( prepreg ) をつくり、ホットプレスで成形した。

ここでプリプレグとは pre-impregnate の略で、繊維を予め樹脂に含浸後、それを半乾燥状態にしたもので、これを B stage ともいい、離型紙にはさんで保管するもので、このまま約 6ヶ月間くらいは保存でき、これを積層し、加圧、加熱することにより成形できる。最近はこちらの方法が広く用いられており、この成形法を乾式法という。

使用した樹脂および成形条件はつぎのとおりである。

a) エポキシ系樹脂

樹脂：エピコート 828 100部

硬化剤：DDS/BF<sub>3</sub>・MEA 3部

この処方ですまずカーボン繊維のプリプレグをつくり、金型に積層後、つぎの成形条件で複合材をつくった。

予熱：120℃ 20分

加圧：プランジャーがスペーサーに達するまで10分間を要す。

加熱：200℃で約60分間加熱

後硬化：170℃で3時間

b) ポリイミド系樹脂 (ケルイミド 601)

耐熱 CFRP の成形はエポキシ樹脂と同じように、まずプリプレグを作り、金型に積層後つぎの成形条件で作った。

樹脂：ケルイミド 601 (フランスのローヌブーラン社製ポリイミド系樹脂) 100部

溶剤：Nメチルピロリドン 100部

予熱：110℃

加圧：プランジャーがスペーサーに達するまで10分間を要す。

加熱：250℃で約60分間加熱

後硬化：250℃で24時間

試験片の大きさは 340 × 250 × 3mm とし、この1枚の平板から静的曲げ強度試験片を各3本とり、まず曲げ弾性率ならびに曲げ強度を求めた。曲げ疲労試験の場合には4点曲げ方式であるから静的曲げ強度試験はいずれも4点曲げ方式を採用した。静的強度試験法については航技研資料 TM-241<sup>1)</sup>を参照されたい。

強化木、エポキシ系樹脂 CFRP の常温における曲げ強度特性を表3、4に示し、ポリイミド系樹脂CF

表3. 強化木の強度特性

試片番号	弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kg/mm <sup>2</sup> )
1	1,990	14.5
2	2,130	15.9
3	2,180	15.9
4	2,210	16.4

$$\bar{E} = 2,130$$

$$\bar{\sigma} = 15.7$$

表4. CFRP (エポキシ樹脂) の曲げ強度特性

カーボンの種類	曲げ弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	V <sub>f</sub> (%)
カーボン Z-2-1	11600	133	52~64
" Z-2-2	11500	118	52~60
混合複合材 (Z-2-1)	8300	87	—
トレカ T300A	13600	140	60~63
混合複合材 (T300A)	11100	116	—

曲げ試験は4点曲げ方式、V<sub>f</sub> (%) は体積含有率 (%)

表5. CFRP (ポリイミド系樹脂) の曲げ、せん断強度特性

試験片番号	試験温度 (℃)	曲げ弾性率 (kg/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	層間せん断強度 (kg/mm <sup>2</sup> )
Np - 1	20~25	10,800	103	5.7
Np - 2	120~125	7,400	79	3.0
Np - 3	180~185	8,600	71	2.9
Tp - 1	20~25	11,700	116	5.5

曲げ試験は4点方式、Np:カーボンZ-2-1,

V<sub>f</sub> = 58~67% Tp:トレカT300A

RP の常温および高温における曲げ強度特性を表5に示す。カーボン繊維の体積含有率の測定は燃焼法<sup>1)</sup>を採用した。静的強度試験片をとったあと、同一の平板から疲労試験片をとった。

### 3. 疲労試験機の改造と検定

疲労試験機は荷重一定型疲労試験機2台を使用した。その仕様はつぎのとおりである。

UF-500型 (島津製作所製)

繰返し荷重 最大 500 kg

繰返し数 1,000 cpm

最大振幅 ± 5mm

4点曲げ方式

B-70型 (東洋精機製作所製)

繰返し荷重 最大 70 kg

繰返し数 1,800 cpm

最大振幅 ± 8mm

4点曲げ方式

まずUF-500型、B-70型の疲労試験機の改造を行なった。用いた試験片寸法は図1、図2に示す。

図1がUF-500型用で強化木の試験に用いたもので、図2がB-70型用でCFRPの試験に用いたものである。ここで強化木とは木材を薄くスライスしたものをフェノール樹脂に含浸後、半乾燥させてプリプレグを

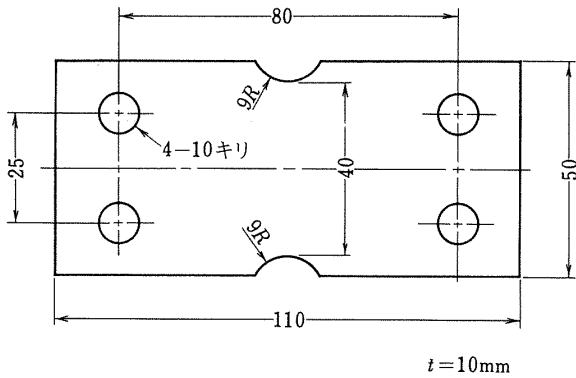


図1 強化木試験片

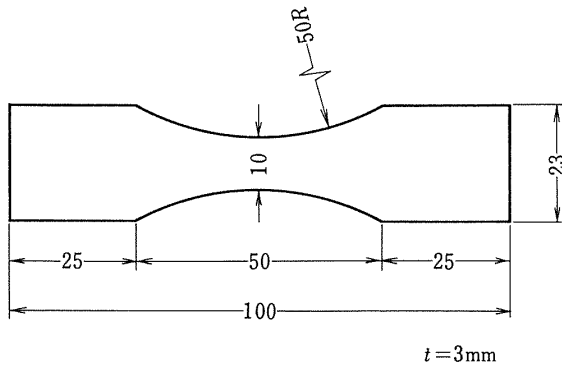
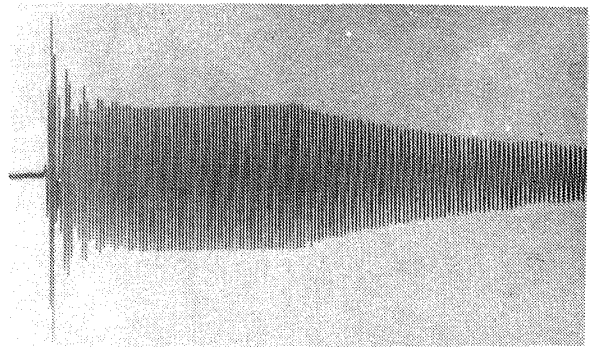


図2 CFRP試験片

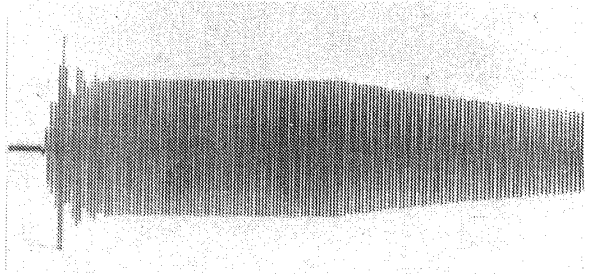
作り，ホットプレスで成形したものである。これらの材料はぜい性材料で疲労試験機の検定には最適と思われたので採用した。

まずUF-500型で強化木の実験例を示すと，強化木試験片に抵抗線ひずみゲージをシアノアクリレート系接着剤（アロンα）で貼り，荷重を70kg（応力が $4.2\text{ kg/mm}^2$ に相当）に設定し，4点曲げ両振りの曲げ疲労試験のときに，試験片に生じるひずみを動ひずみ計を用いて直記式電磁オシログラフに記録させたものが図3のa)で，始動と同時に初期ひずみが定常ひずみの約2倍も生ずることがわかった。この時点ですでに強化木試験片にクラックの入るのが認められた。

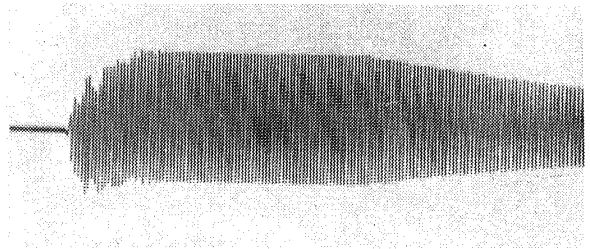
そこで疲労試験機の改造を試みた。改造の第1としてモータ軸にフライホイールをつけ，モータの起動速度を緩和させる方法をとった。このときの疲労試験片に生じるひずみの記録が図3のb)で，これだけでも初期ひずみがかなり減少していることがわかる。フライホイールの大きさにも最適重量があり，いろいろと変えて試み，UF-500型では3kgのものが一番よいことがわかった。この場合にモータ軸でなく，可動軸にフライホイールを取付けた場合にはタイミングベルトに過大ロードがかかり，ベルトが切れることがある。



a)



b)



c)

図3 試験片に生じたひずみ

この取付けた状態を写真1に示す。これだけでは初期ひずみを完全に取除くことができないので，さらに第2の方法として試験機の上下可動部分に押え装置をつけることにより，図3のc)に示すように初期ひずみを完全に取除くことに成功した。この装置を写真2に示す。

この方法はB-70型でもまったく同じ結果を得られたのでここでは省略する。ただしフライホイールの重量は2kgとした。これらの模様を写真3，4に示す。

つぎにB-70型の改造後の検定を行なった。すなわち試験片はCFRP-方向強化材を使用し，試験片寸法は図2に示す通りである。試験片に抵抗線ひずみゲージを貼り，動ひずみ計の記録から応力を測定した。

疲労試験機の設定荷重を5，10，15，25，30kg

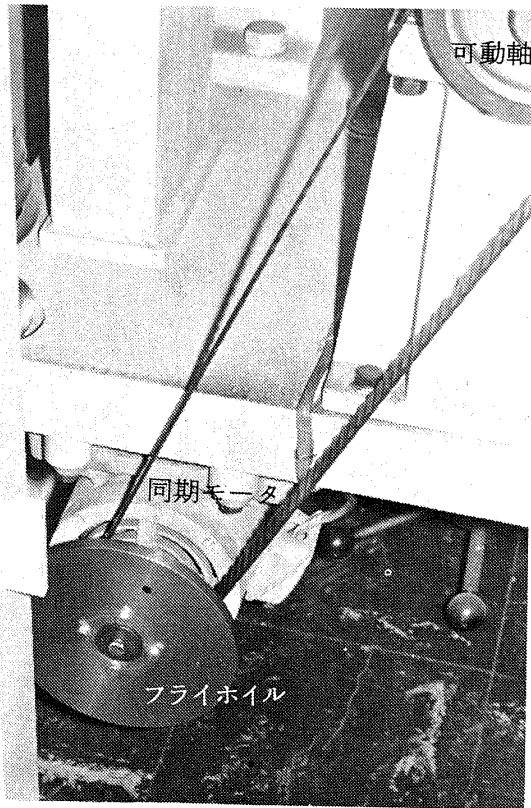


写真1 フライホイールの取付状況  
(UF-500 型用)

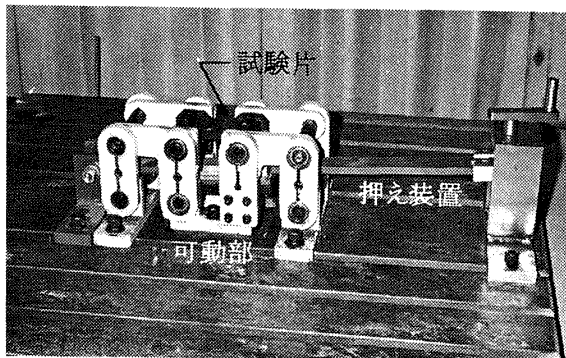


写真2 押え装置の取付状況  
(UF-500 型用)

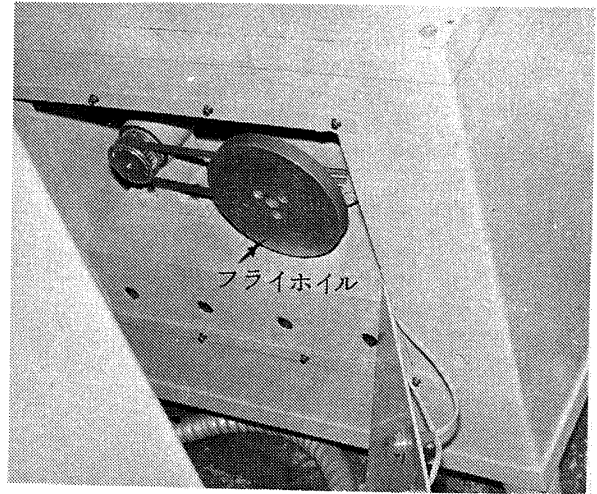


写真3 フライホイールの取付状況  
(B-70 型用)

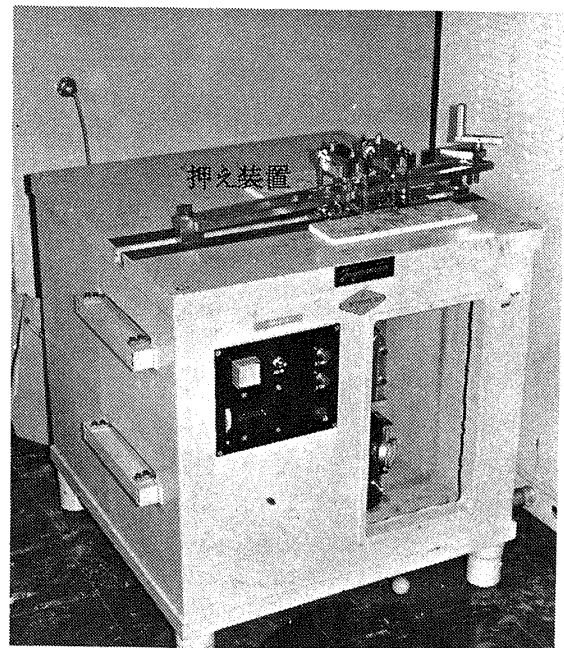


写真4 押え装置の取付状況  
(B-70 型用)

表 6. 疲労試験機の検定結果 (B-70 型)

荷重 (kg)	設定値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	実測値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
5	6.75	6.74
10	13.50	13.24
15	20.25	20.24
20	27.00	26.99
25	33.75	33.99
30	40.50	40.49

と変えた場合の設定値と、動ひずみ計の記録から求めた実測値との比較を表 6 に示す、設定値と実測値とが非常によく合っていることがわかる。その他ジュラルミン、強化木試験片についても同様な結果が得られた。

#### 4. 試験片の大きさ(幅, 厚さ)の決定法

複合材の場合に静的強度試験法により曲げ弾性率 ( $E_b$ ) と、曲げ強度 ( $\sigma_b$ ) は求められたが、疲労試験片の大きさをどう決めるかが問題である。金属材料のように多くの既知データのあるものは、それらを利用す

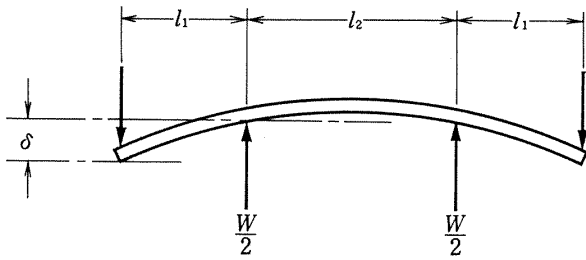


図4 4点曲げ線図

ればよいが、新しい材料はつぎの式から計算によりチャートをつくり決定しなければならない。曲げ疲労試験の場合の4点曲げ応力( $\sigma$ )の式は図4を参照して

$$\sigma = \frac{3Wl_1}{bh^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \frac{3\delta Eh}{l_1(2l_1+3l_2)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

- W: 荷重
- $l_1, l_2$ : 支点間距離(図4参照)
- E: 試験片の弾性率
- b, h: 試験片の幅と厚さ
- $\delta$ : 試験機の最大振幅

まず強化木の例を示すと、UF-500型で、静的強度試験により弾性率  $E = 2,000 \text{ kg/mm}^2$ 、曲げ強度  $\sigma_b = 15 \text{ kg/mm}^2$ と求められており(表3参照)、試験片の板幅はここでは  $40 \text{ mm}$ とした。最大振幅は  $5 \text{ mm}$ と定められているから、(1)、(2)式から求めたチャートは図5のようになる。同図で(1)式から荷重 100, 200 kgと仮定し

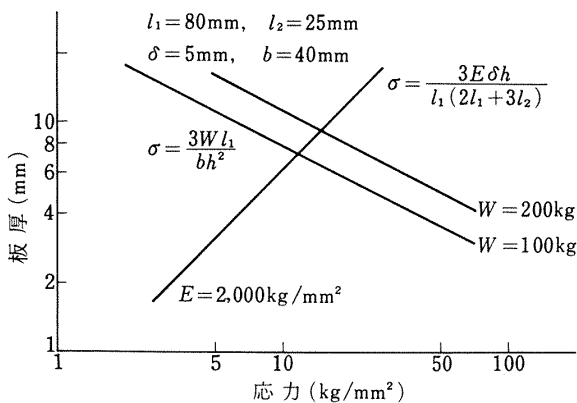


図5 板厚と応力の関係 (UF-500型)

た場合に右下りの直線が求められる。つぎに(2)式で  $E = 2,000 \text{ kg/mm}^2$ の値を入れると、同図の右上りの直線が求められる。両直線の交点が最小板厚を示す。実際の場合にはこれよりやや厚い試験片をとればよい、強化木の場合には荷重 200 kgで計算上最小板厚は  $9.0 \text{ mm}$

になるので  $10 \text{ mm}$ と決めた。同図より荷重 100 kgと板厚  $10 \text{ mm}$ との交点からそのときの応力は  $6 \text{ kg/mm}^2$ と求まり、荷重 200 kgと板厚  $10 \text{ mm}$ との交点より、そのときの応力は  $12 \text{ kg/mm}^2$ と求まる。 $\sigma_b = 15 \text{ kg/mm}^2$ であるから板厚を  $10 \text{ mm}$ としたときの曲げ疲労試験の荷重範囲は 200 kg以下で行なえばよい。

CFRP (B-70型)の場合も同じ手法で求め、図2に示す試験片寸法がえられた。ここでは板厚を  $3 \text{ mm}$ とした。

5. 疲労試験片の製作

強化木およびCFRPの疲労試験片は、まず試験片素材からダイヤモンド歯付のFRPスライサーで所定の幅に切断後、試験片調整ホルダー(写真5)にはさみ、試料調整装置(写真6)のダイヤモンドカッター

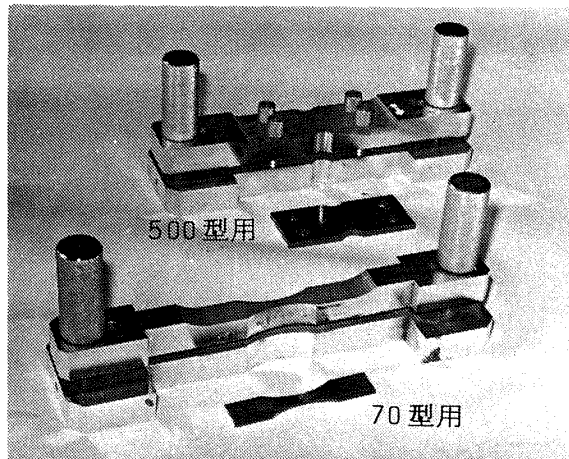


写真5 試験片調整ホルダーと試験片

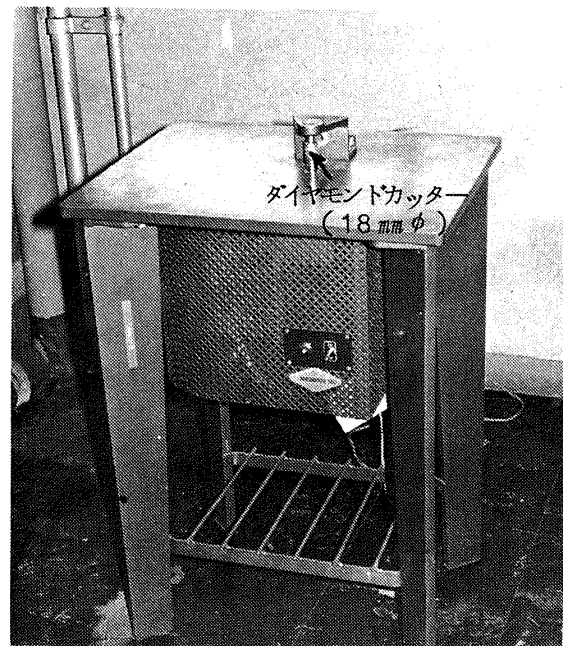


写真6 試料調整装置

で仕上げた。試験片調整ホルダーは試験片が滑りやすいので、1mmのゴム板を上、下面に貼りつけた。疲労試験片の加工で一番注意するところは曲率部で、加工が悪いとそこからクラックが進行しやすい。よい結果を得るためには試験片の加工に細心の注意をはらい、十分に管理する必要がある。

## 6. 疲労試験結果

### 6.1 強化木の疲労試験結果

この試験の目的は疲労試験機の改造前と改造後とで、疲労寿命がいかにか変わるかを調べたもので、試験片としてぜい性材料である強化木を選んだ。UF-500型での曲げ疲労試験結果を図6に示す。ここで点線が試

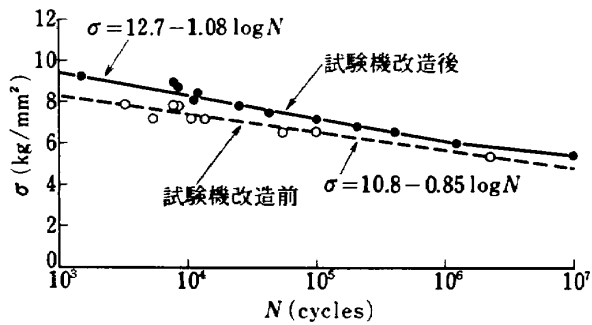


図6 強化木の疲労曲線

験機改造前のデータで、始動と同時にピシッという音をたててクラックの入るのが認められた。実線は試験機の改造後のデータで、その疲れ寿命は改造前に比較して1桁向上することがわかった。強化木はぜい性材料であるからこれらの結果が顕著に表われたものと思う。10<sup>7</sup>回の曲げ疲労強度( $\sigma_f$ )は5.0 kg/mm<sup>2</sup>で、静的曲げ強度( $\sigma_b$ )は表4に示す通り15 kg/mm<sup>2</sup>であるから、疲労強度と静的強度との比はつぎのようになった。

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_b} = \frac{5.0}{15.0} = 0.33$$

### 6.2 CFRPの疲労試験

ここではB-70型疲労試験機(改造型)について、エポキシ系樹脂CFRPと、カーボンとガラス繊維(ロービングブリブreg使用)との交互積層によるエポキシ系樹脂混合複合材(Hybrid Composite)の常温における疲労試験と、耐熱性のよいポリイミド系樹脂CFRPの常温および120℃における疲労試験を行なった。

CFRPでは従来のGFRPとは異なった試験法が必要であることがわかった。すなわちCFRPでは平板のままの試験片では繊維方向に割れを生じやすい。そこで板厚方向にも曲率をつけて試験を行ない、良い

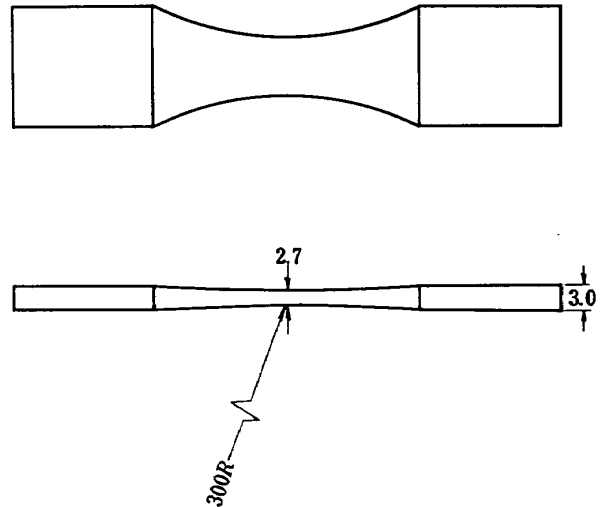


図7 CFRP試験片

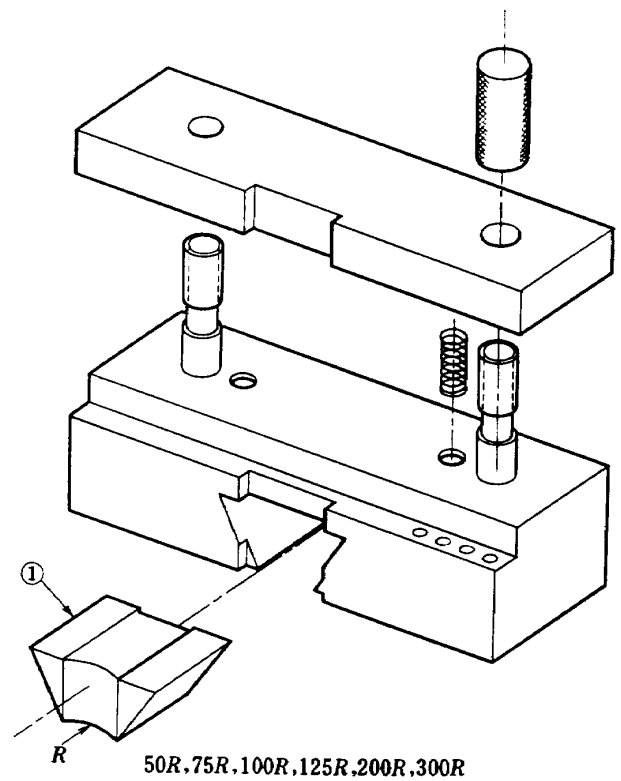


図8 曲率加工用ホルダー

結果を得た。使用した試験片はすべて一方向強化材とした。

図7は板厚方向にも曲率をつけた試験片で、中央部を300mmRで加工し、中央部の厚さを約2.7mmとした。もとの厚さは約3mmである。この曲率加工用のホルダーを図8に示す。図示のように①の部品をとりかえることにより50mmRから300mmRまで任意の曲率の加工ができる曲率加工用専用ホルダーである。これに平板試験片をはさみ、試料調整装置のダイヤモンドカッターで仕上げた。

6.3 CFRPの疲労試験結果(エポキシ系樹脂)

a) トレカ T 300 A CFRPの場合

平板のままの試験片と、板厚方向にも 300mm Rの曲率をつけた試験片についての疲労試験結果を比較したものが図9で、 $\sigma$ を応力振幅とし、 $N$ を繰り返し数と

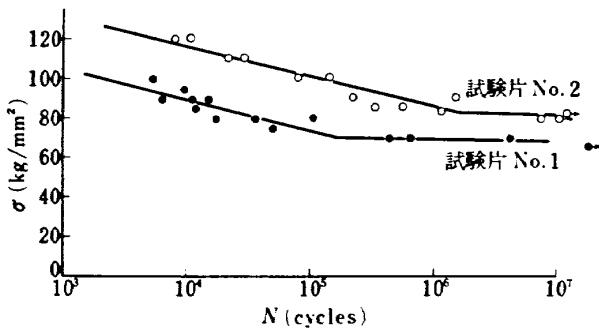


図9 CFRP(トレカT300A)の疲労曲線

する。No.1は平板のままの試験結果で、No.2は試験片の板厚方向にも 300mm Rの曲率をつけた場合のデータで、両試験の間にかんがりの差のあることがわかる。平板のままの試験片の破壊の様態を図10-a), b)に示す。ほとんどがa)のように破壊した。繊維方向の割れを生じると、剛性が低下し、振幅が大きくなり試験片の

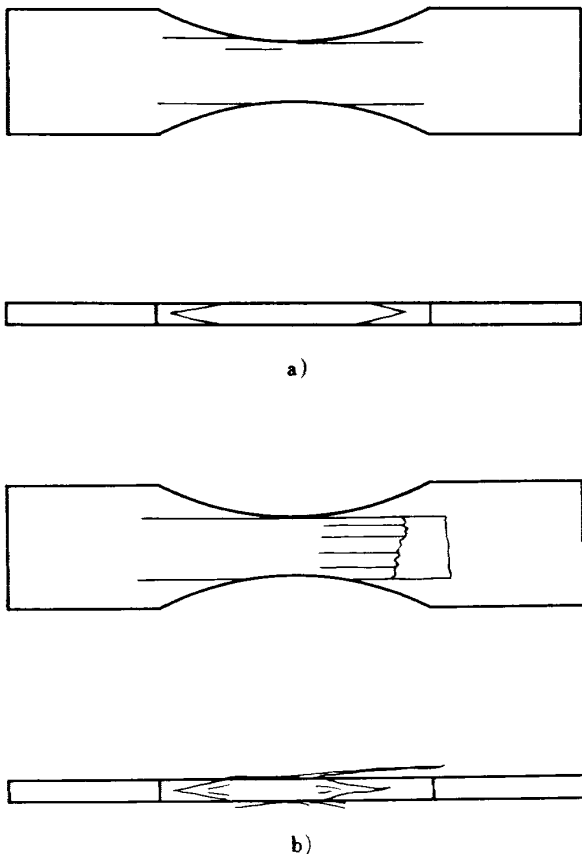


図10 CFRPの破断模様(トレカT300A)

破断前に試験機が止まる(最大振幅±8mm)したがって見かけ上低い値となっている。その他b)の破壊のものが数本認められた。

そこで中央部で破壊が起こるように試験片の中央部に板厚方向に300mm Rの曲率をつけた。同じ試験片でもかなり試験値は高い値を示している。この場合の試験片の破壊状況を図11-a), b)に示す。a)のような破壊が大部分で、数本がb)のように破壊した。理想的な曲げ破断を示し、したがって疲労強度も増加している。

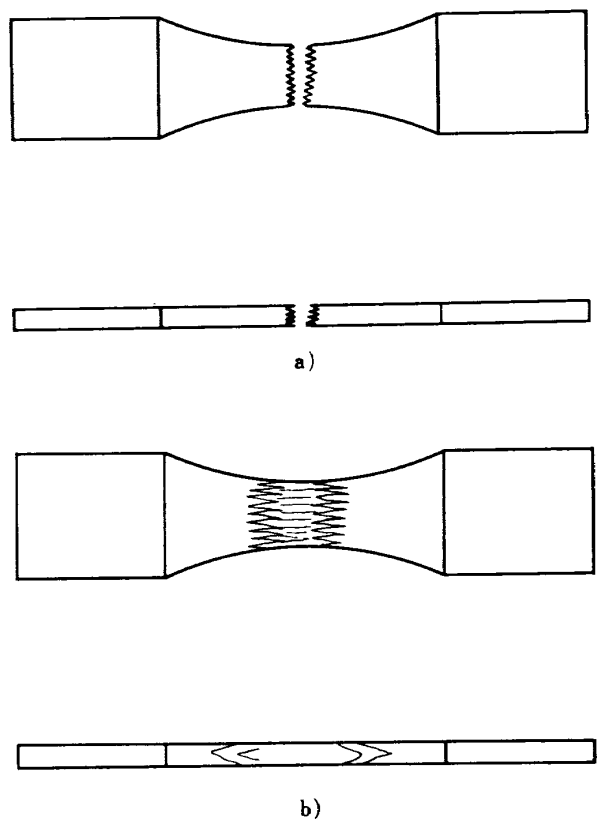


図11 CFRPの破断模様(トレカT300A)

なおこの繊維方向の割れを防ぐ方法として、ガラスのスクリムクロス(Scrim cloth 目の荒いクロス)をカーボンの中に入れることによりこれを防止し、疲労強度を増加させる方法なども報告<sup>2)</sup>されている。

b) カーボンCFRPの場合

カーボンZ-2-1の疲労試験結果を図12に示す。この疲労曲線は最小二乗法を用いて求めたものである。この場合 10<sup>7</sup>回まで殆んど直線で疲労限は示さなかった。

ここで時間強度を $\sigma$ とし、 $N$ を繰り返し数とすると、つぎの実験式が得られる。

$$\sigma = A - B \log N \quad \dots\dots\dots (3)$$

A, Bは定数で、AはN=1のときの時間強度で、



Bは直線の傾きを表わす。

試験片の破断の状況を図13に示す。この場合もやは

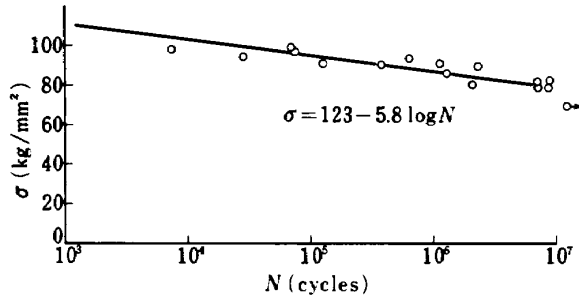


図12 CFRP(カーボンZ-2-1)の疲労曲線



図13 CFRPの破断模様(カーボンZ-2-1)

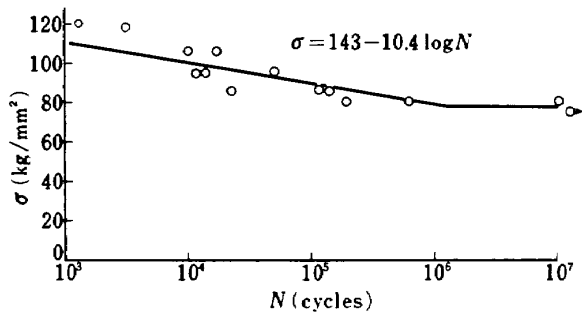


図14 CFRP(カーボンZ-2-2)の疲労曲線

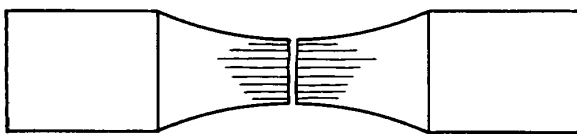


図15 CFRPの破断模様(カーボンZ-2-2)

り試験片の板厚方法にも曲率をつけたもので、破断はやはり中央部で起り、理想的な曲げ破断をしめしている。

つぎにカーボンZ-2-2の疲労試験結果を図14に示し、破断の模様を図15に示す。これも中央部に300mmRの曲率をつけたもので、やはり中央部で破断している。

いままでの実験結果を考察すると、カーボン繊維の弾性率が20,000kg/mm<sup>2</sup>程度のCFRPでは疲労曲線は10<sup>7</sup>回迄は直線を示す。疲労曲線の傾斜(B)は弾性率の低いカーボンZ-2-1が、他の弾性率の高いトレカT300A、カーボンZ-2-2より低く、弾性率が22,000kg/mm<sup>2</sup>以上になると10<sup>6</sup>回で折線を示す。

つぎに(3)式で各実験の定数A、Bを求めたものが表7である。ここで興味のあることは直線の傾斜(B)

表7. CFRP(エポキシ樹脂)の疲労特性

複合材の種類	A	B	$\sigma_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_f/\sigma_b$
カーボンZ-2-1	123	5.8	80	0.60
カーボンZ-2-2	143	10.4	79	0.67
トレカT300A(№1)	154	16.0	68	0.49
トレカT300A(№2)	175	14.8	82	0.59

$$\sigma = A - B \log N$$

$\sigma_f$  : 10<sup>7</sup>回の時間強度

$\sigma_b$  : 静的強度

の値はカーボン繊維の弾性率(表4参照)に比例して高い値を示している。すなわちBの値の大きさの順序は

$$\text{トレカ T 300 A} > \text{Z-2-2} > \text{Z-2-1}$$

となる。

いままでのCFRPの実験結果を応力振幅 $\sigma$ と、静的強度 $\sigma_b$ との比 $\sigma/\sigma_b$ と、繰返し数Nで整理したのが図16で、弾性率の似ているトレカT300Aと、カーボンZ-2-2がほとんど同じような傾向を示し、

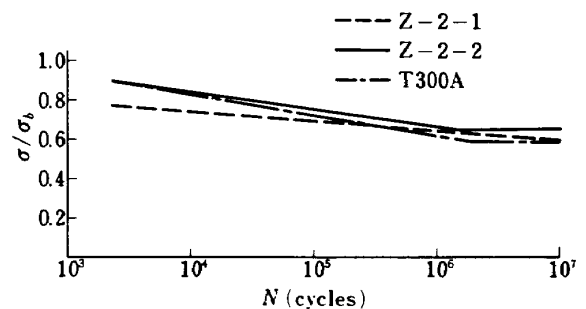


図16  $\sigma/\sigma_b - N$  曲線

弾性率のやや低いカーボンZ-2-1はやや異なる直線を示している。

6.4 混合複合材の疲労試験結果(エポキシ系樹脂)

カーボンとガラス(3M社製)のプリプレグを交互に積層後、ホットプレスで加圧、加熱し成形したもので、カーボンの剛性の強い利点と、カーボンに比較してガラスの変形の大きい利点とを組合せたもので、CFRPよりかなり大きなひずみに耐える複合材といえる。その静的強度特性は表4に示す通りである。

トレカT300Aの混合複合材の疲労試験結果を図17に示し、破断の様態を図18に示す。疲労曲線は $10^7$ 回まではほとんど直線である。カーボンとガラスとの交互積層であるから板厚方向への曲率はとれず、試験片は平板のままとした。したがって破断は繊維方向の割れを生じた。

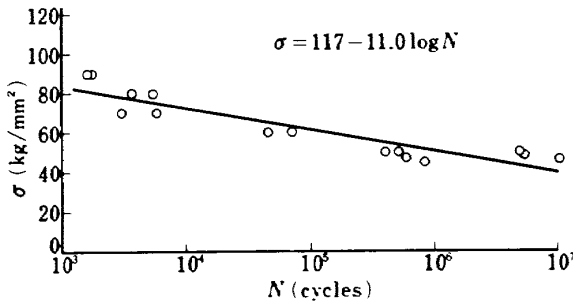


図17 Hybrid (トレカT300A)の疲労曲線

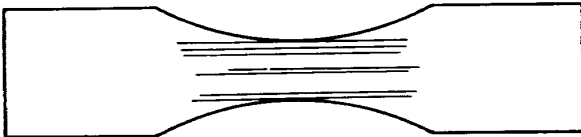


図18 Hybrid (トレカT300A)の破断模様

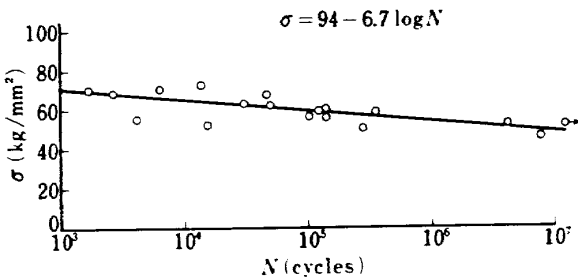


図19 Hybrid (カーボンZ-2-1)の疲労曲線

図19にカーボンZ-2-1混合複合材の疲労試験結果を示し、破断の様態を図20に示す。これも平板の

試験片のため、やはり繊維方向の割れを生じた。

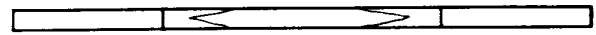
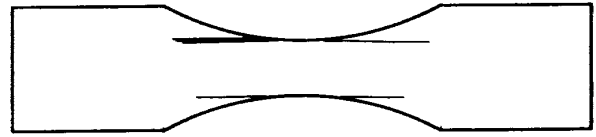


図20 Hybrid (カーボンZ-2-1)の破断模様

以上の結果を応力振幅 $\sigma$ と静的強度 $\sigma_b$ との比 $\sigma/\sigma_b$ と、繰返し数 $N$ について整理したのが図21で、実験式のA、Bの各定数を表8に示す。

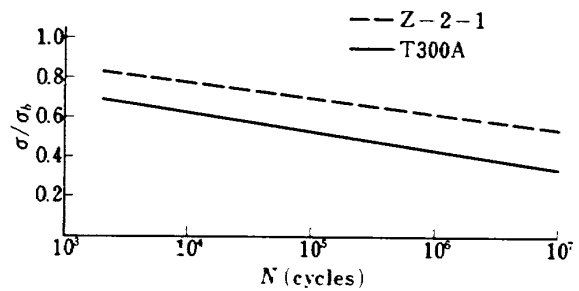


図21  $\sigma/\sigma_b - N$  曲線 (Hybrid)

表8 混合複合材の疲労特性

混合複合材の種類	A	B	$\sigma_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_f/\sigma_b$
カーボンZ-2-1	94	6.7	49	0.56
トレカ T300A	117	11.0	40	0.34

$$\sigma = A - B \log N$$

$\sigma_f$  :  $10^7$  回の時間強度

$\sigma_b$  : 静的強度

6.5 耐熱CFRPの疲労試験結果

(ポリイミド系樹脂)

従来のエポキシ系樹脂のCFRPは耐熱性がおとり、 $100^\circ\text{C}$ 以上の使用には耐えられない。最近フランスのローヌプーラン社よりポリイミド系で複合材の成形に適した耐熱樹脂が“ケルイミド601”の商品名で発売され、これらの複合材は英国などでは既にエンジン部品として使用されており、今後益々航空、宇宙部品として使用される傾向にある。

これらの複合材は $250^\circ\text{C}$ の耐熱性がある。そこでこれらのCFRPの常温( $20\sim 25^\circ\text{C}$ )、 $120^\circ\text{C}$ 、 $180^\circ\text{C}$ の静的強度試験と、常温、 $120^\circ\text{C}$ における疲労試験

を行なった。250℃の疲労試験を行なったが試験機に不都合を生じたので中止した。静的曲げ強度特性は表5に示す通りである。ここで $N_p$ とはカーボンZ-2-1,  $T_p$ とはトレカT 300 Aの耐熱CFRPを示す。なお各温度における曲げ強度, 弾性率, 層間せん断強度などを図示したのが図22である。

耐熱CFRPの疲労試験にはB-70型疲労試験機に, 島津製作所UF-15型用の恒温装置(写真7)を用いて, 常温と120℃で行なった。

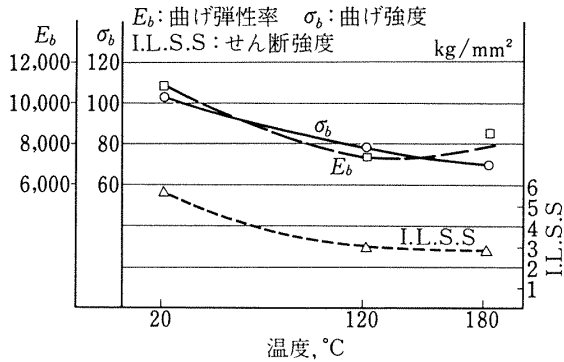


図22 CFRP(ケルイミド601)の静的曲げ強度

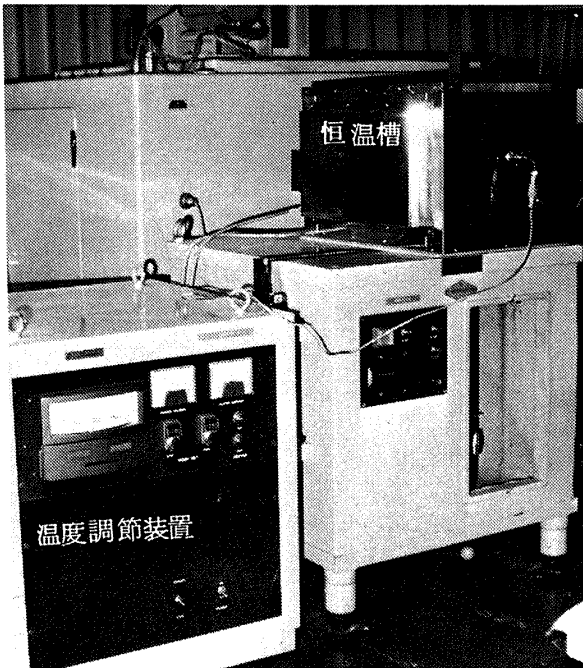


写真7 恒温試験装置

図23が $N_p-1$ (カーボンZ-2-1)の常温における疲労曲線で, 図24が $N_p-2$ の120℃における疲労曲線で, 図25が $T_p-1$ (トレカT 300 A)の常温

における疲労曲線である。いずれも板厚方向に300mm Rの曲率をつけたもので, 試験片はいずれも中央部で破断している。

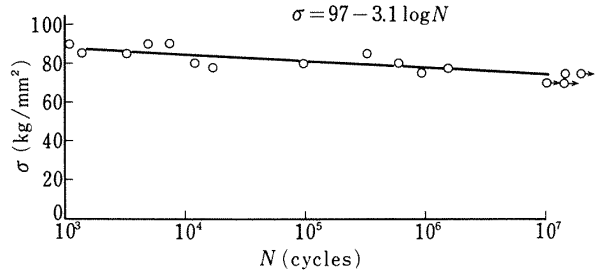


図23 CFRP( $N_p-1$ )の疲労曲線(常温)  
(カーボンZ-2-1・ケルイミド601)

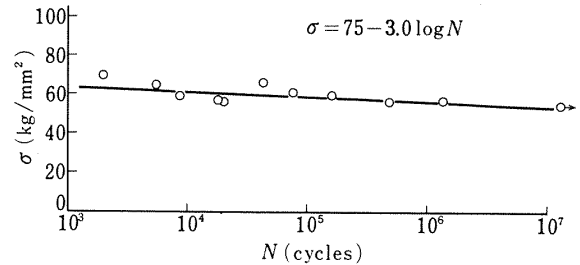


図24 CFRP( $N_p-2$ )の疲労曲線(120℃)  
(カーボンZ-2-1・ケルイミド601)

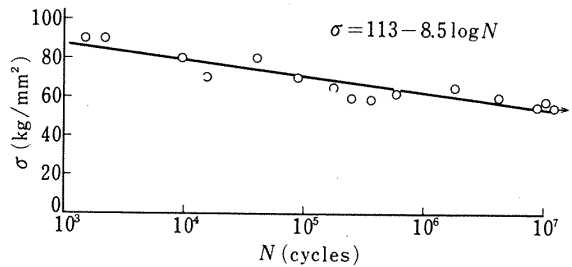


図25 CFRP( $T_p-1$ )の疲労曲線(常温)  
(トレカT 300 A・ケルイミド601)

以上の結果を $\sigma/\sigma_b$ と繰返し数 $N$ で整理したのが図26で, カーボンの種類によって特性の異なることがわかる。(3)式により疲労特性を整理したのが表9である。

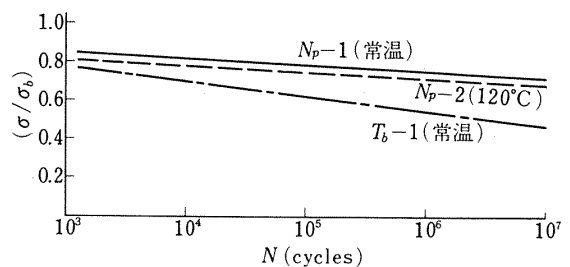


図26  $\sigma/\sigma_b - N$  曲線(ケルイミド601)

表9. CFRP (ポリイミド樹脂) の疲労特性

複合材の種類	A	B	$\sigma_f(\text{kg}/\text{mm}^2)$	$\sigma_f/\sigma_b$
$N_p - 1$	97	3.1	75	0.73
$N_p - 2$	75	3.0	54	0.68
$T_p - 1$	113	8.5	54	0.47

$N_p$ :カーボン Z-2-1  $\sigma = A-B\log N$   
 $T_p$ :トレカ T300A  $\sigma_f$ : $10^7$ 回の時間強度  
 $\sigma_b$ :静的強度

つぎに試験中における試験片中央部の温度上昇を測定した。すなわち熱電対線(0.3mmφAC線)を試験片中央部のうら、おもてにガラスローピングでとりつけ、温度を測定したところ、実験開始後すぐに約15~18°Cの温度上昇が認められ、そのままその温度を維持し、破断前約5分頃に急な温度の上昇が認められた。この一例を図27に示す。これは破断近くなると繊維がばらばらになり、その摩擦で発熱するものと思われる。

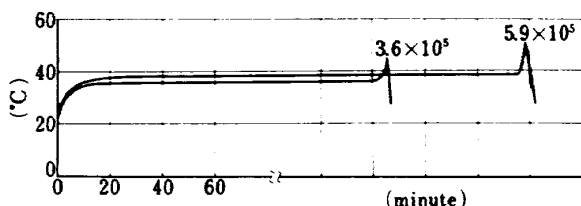


図27 CFRP (ケルイミド601)の疲労破断までの温度上昇

7. あ と が き

CFRPの疲労試験のために疲労試験機の改造を行ない、また試験片の板厚方向にも曲率を与えることにより、繊維方向の割れを防ぎよい結果を得た。これらのデータは設計に貴重な資料となるものと思う。ただし実際の構造物としてはやはり繊維方向の割れを防ぐ方法を考えなければならない。その一つの方法としてスクリムクロスなどの交互積層法などはよい方法と思われる。

この試験の結果CFRPは従来のGFRPに比較して疲労強度は格段と高い。しかしカーボンの種類により疲労強度は異なる。

ガラスとの混合複合材の静的強度と $10^7$ 回の疲労強度比はCFRPの値に対し、やや低い値となった。また耐熱CFRPは120°Cでも疲労強度は高いことなどがわかった。

本研究を行なうに当たり、試験機の改造について機体第二部の下河利行技官の助言を戴き、試験機の改造については東洋精機の設計の方々に、カーボン試験片の成形については住友電工㈱、日本カーボン研究所の方々の協力を得たこと、カーボン繊維については日本カーボン㈱、東レ㈱の方々に便宜をはかって戴いたことについて感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 古田, 野口, 松嶋, カーボン複合材の強度特性, 航技研資料, TM-241, 1973年6月
- 2) P.N.Rao, K.E.Hofer: Investigation of Influence of Material Variables on Fatigue Mechanisms in Composites. Department of the Navy Naval Air Systems paper. Mar. 1971.

---

## 航空宇宙技術研究所報告366号

昭和49年6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

---

