

UDC 678.067.9:  
620.172/176:  
620.178.322.3

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-289

KEVLAR-29複合材の強度と曲げ疲労強度

古田敏康・野口義男

松嶋正道

1975年12月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# KEVLAR-29複合材の強度と曲げ疲労強度\*

古田 敏 康\*\*・野 口 義 男\*\*

松 嶋 正 道\*\*

## 1. はしがき

KEVLAR-29 (以前はPRD-29と称していた) 繊維はE. I. Dupont社で研究開発された有機合成繊維(アラミッド)で、KEVLAR-49とともに発売され、前者は主としてロープ、タイヤコード用などとして、後者は複合材用として開発され、日本では1973年2月から発売された新しい強化用繊維で、いずれも低密度、高強度の特性をもっている。われわれはKEVLAR-49複合材については強度、曲げ疲労強度特性<sup>1)</sup>を求め、航空機構造材としての評価を行った。今回はKEVLAR-29も将来複合材用に使用される可能性があるので、これらの複合材の強度、曲げ疲労強度の特性を求めた。

ここではエポキシ樹脂(Epon 828)を使用したKEVLAR-29複合材の一方方向強化材、カーボンとの混合複合材(Hybrid)などの引張、曲げ、せん断強度ならびに剛性試験、ポアソン比などの測定を行った。ポアソン比の測定はストレングス法と、レーザーホログラフィ法を用いた。その他の試験法は前報<sup>1)</sup>と同じ方法を用いた。

この結果、KEVLAR-29複合材はKEVLAR-49複合材に比較して強度と弾性率はやや劣るが、その他の特性は大體等しく、価格はKEVLAR-49の約1/10で、使用する目的によっては前者の方が有利な場合もあると思われる。なおカーボンとのHybrid材ではその特性はかな

り向上される。ここでは前報<sup>1)</sup>のKEVLAR-49複合材、CFRPなどとの比較評価も行った。

## 2. 繊維特性

KEVLAR-29, KEVLAR-49, ならびにカーボン繊維の特性を表1に示す。KEVLAR 繊維は低密度のため、比強度(強度/比重)は一番高い、しかしKEVLAR-29は他の繊維に比較して弾性率がかなり低い。

KEVLAR-29 繊維でもその種類は多いが、ここで使用したものはロービングで、T-950 Typeの1500デニールで、1000フィラメントのものを使用した。参考までにKEVLAR 繊維の特性を表2に示す。その他Hybrid用カーボン繊維はトレカT300AのブリブREG P 301を使用した。

## 3. 複合材の成形

### 3.1 KEVLAR-29一方方向強化材

使用した樹脂の配合はつぎのとおりである。

エポキシ樹脂(Epon 828)	100phr.
硬化剤(MHAC)	102phr.
促進剤(BDMA)	1.0phr.

以上の処方によりフィラメントワインディング(FW)法によりブリブREGシートを作り、つぎの硬化条件によ

表1 各種繊維特性

(カタログ値)

繊維	直径( $\mu$ )	$\sigma_T$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\rho$ (g/cc)
KEVLAR-49	11.7	280	13,300	1.45
KEVLAR-29	12.0	280	6,350	1.44
トレカT300A	8.5	250以上	22,000以上	1.78

$\sigma_T$ : 引張強度,  $E_T$ : 縦弾性率,  $\rho$ : 密度

\* 昭和50年10月17日 受付

\*\* 機体第一部

表2 KEVLAR 繊維特性

(カタログ値)

呼 称	用 途	Type	Denier	Firament N.	単位重量	備 考	
KEVLAR-29	タイヤコード	T-950	1000	666			
			1500	1000			
	ゴム加工	T-956	"	"			
	ケーブル コード ロープ ロード	T-960	1000	666			
			"	768			
			1500	1000			
			15000				
	コーテッド・ファブリック 帆 布 スリングテープ ひ も 類	T-964	200	134			
			400	267			
			1000	666			
1500			1000				
KEVLAR-49	ヤ ー ン	T-968	195	134	0.02 g/m		
			380	267	0.04		
			1420	1000	0.16		
	ロービング Chopped Fiber	T-969(A)	(1140×4) 4560	3072	0.50	宇宙航空機用 保証グレード	
		T-968(B)	7100	5000	0.79	標準一級品 グレード	
		T-967(C)	6000		0.66	BMC・SMC 用普及品	
	ファブリック	Style 120	平 織				38" 幅
							50" "
		Style 181	朱 子 織				38" "
							50" "

り成形した。

160°Cで1時間、プレス圧4 kg/cm<sup>2</sup>で加圧後、ポストキュアを160°Cで4時間行った。

### 3.2 KEVLAR-29とカーボンとのHybrid材

3.1.で述べたKEVLAR-29のブリブレグと、トレカP301のブリブレグを、積層数はKEVLAR-29は7層、カーボンは6層とし、交互積層法でつぎの硬化条件で成形した。

160°Cで1時間、プレス圧4 kg/cm<sup>2</sup>で加圧後、ポストキュアは160°Cで4時間行った。

### 4. 強度試験

強度試験は前報<sup>1)</sup>と同じ方法で行った。引張弾性率と引張強度試験片は図1に、3点曲げ試験片は図2に、4点曲げ試験片は図3に、層間せん断試験片は図4に示す。繊維含有率( $V_f$ )の測定は硝酸煮沸法<sup>1)</sup>を用いた。カーボンとのHybrid材は硝酸で煮沸後各繊維は混合されてしまい、分離は不可能となったので $V_f$ の測定はできなかった。

## 5. 強度試験結果

KEVLAR-29 一方向強化材の厚さ 3 mm の場合の強度の測定値を表 3 に示し、厚さ 5 mm の場合は表 4 に示す。5 mm の場合の強度の強いのは繊維含有率 ( $V_f$ ) が高いためと思われる。このときのポアソン比の測定はストレンゲージ法を用いた。

つぎにカーボンとの Hybrid 材の強度の測定値を表 5 に示す。この場合のポアソン比の測定はレーザーホログラフィ法<sup>1)</sup>を用いた。前者に比較して Hybrid 材は強度のかなりの向上が認められた。

KEVLAR-29 一方向強化材の 3 点曲げの荷重-変位線図を図 5 に、4 点曲げの場合を図 6 に、層間せん断の場合を図 7 に示す。曲げ試験では試験片は全く破断せず、荷重に対する変形量の多いのが特徴である。

つぎに KEVLAR-29/Carbon の Hybrid 材については図 8～図 11 に示す。前者に比較して変形量はだいぶ少なくなっている。

以上の試験結果をまとめて図示した。弾性率の比較が図 12 で、引張強度の比較が図 13 で、曲げ強度の比較が図 14 で、層間せん断強度の比較が図 15 である。他の複合材との比較のために KEVLAR-49<sup>1)</sup>ならびに CFRP<sup>2)</sup>の値も入れた。

ここで K-29 の記号は KEVLAR-29 一方向強化材を、K-49 は KEVLAR-49 一方向強化材を、K-29/C は KEVLAR-29/Carbon の Hybrid 材を示す。

以上の試験の結果、KEVLAR-49 複合材と比較して、KEVLAR-29 一方向強化材の特徴と欠点はつぎのとおりである。

- 1) 弾性率は KEVLAR-49 よりかなり低い。
- 2) 引張強度はやや低下する。
- 3) 曲げ強度は大体同じ値が得られた。
- 4) 層間せん断強度はやや高い値である。

以上の欠点を補う目的で、KEVLAR-29/Carbon の Hybrid 材の試験も行ったが、その特徴はつぎのとおりである。

- 1) 弾性率は KEVLAR-49 一方向強化材と大体同じ値が得られた。
- 2) 引張強度は KEVLAR-29 複合材単体よりはやや低下する。これは KEVLAR-49 の Hybrid 材でも認められたことだが、その原因は繊維の破断伸び率が異なる結果、各繊維が別々に切断するためと思われる。
- 3) 曲げ強度は約 2 倍程向上する。
- 4) 層間せん断強度もかなり向上する。

つぎにレーザーホログラフィによる Hybrid 材のポア

ソン比の測定例を図 16 に示す。

## 6. 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験法は前報<sup>1)</sup>と同じ方法を用いた。疲労試験機は複合材用に改造した B-70 型を使用した。

### 6.1 試験片

KEVLAR-29 一方向強化材の試験片は図 17 に示す通りで、試験片中央部の板厚方向に 300 mm R の曲率をつけたものと、平板のままの 2 種類について比較実験を行った。

図 18 は Hybrid 材用で、これは全部板厚方向にも 300 mm R の曲率をつけた。これは前報<sup>1)3)</sup>にも示したように、CFRP を含んだ Hybrid 材はたて割れを生じやすいので、それを防ぎ、試験片の中央部で破断させるためである。ただし試験片の積層数を同一条件とするために、図示のように試験片の両面に 0.5 mm のガラスクロス層を接着し、ガラス層のみを削って曲率をつけ、中央部の積層構成は同じとした。

### 6.2 疲労試験結果

#### 6.2.1 KEVLAR-29 一方向強化材 (平板のもの)

疲労試験結果を図 19 に示す。ここで  $\sigma$  は応力振幅で、 $N$  は繰返し数である。直線はすべて最小二乗法を用いて整理した。試験片の破断の様態を図 20 ならびに図 21 に示した。KEVLAR-49 複合材と同じように、平板でも中央部で破断した。

#### 6.2.2 KEVLAR-29 一方向強化材 (300 mm R 付)

これは CFRP の疲労試験<sup>3)</sup>でも述べているように、曲率をつけた場合は必ず中央部で破断したのに対し、平板のものはたて割れを生じて、疲労強度はかなり低い値となった。

KEVLAR-29 一方向強化材でも平板と曲率をつけた場合の 2 種類の実験を行ったが、その差はほとんど認められなかった。試験結果を図 22 に示す。破断はやはり中央部で生じた。

#### 6.2.3 KEVLAR-29/Carbon Hybrid 材

いままでの実験結果より、KEVLAR-29 一方向強化材は、曲げ強度ならびに疲労強度は非常に低いので、それらの特性を向上させる目的で、カーボンとの Hybrid 材を考え曲げ疲労試験を行った。

KEVLAR-29/Carbon 材の試験片形状は図 18 に示す通りで、両面に 0.5 mm のガラスクロス層を設け、ガラス層のみを 300 mm R の曲率で削り、中央の厚さを 2.7 mm とした。

疲労試験結果を図 23 に示す。KEVLAR-29 一方向強化材に比較して疲労強度はかなり向上している。破断の

模様を図 24 ならびに図 25 に示す。KEVLAR-49/Carbon Hybrid 材と同じように中央部はささくれ、各繊維はばらばらになり、側面部はくさび状にクラックが進行している。

#### 6.2.4 複合材の疲労特性

いままでの実験結果を実験式で整理すると、表 6 のようになる。実験式はつぎのとおりである。

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

ここで  $A$ 、 $B$  は定数で、 $A$  は  $N = 1$  のときの時間強度、 $B$  は直線の傾きを表わす。 $\sigma$  は応力振幅、 $\sigma_b$  は静的曲げ強度、 $\sigma_f$  は  $10^7$  回の時間強度である。

$\sigma_f / \sigma_b$  の値の比較したのが図 26 である。ここで CFRP の値は前報<sup>3)</sup>から引用し、また KEVLAR-49 の値は他の報告書<sup>1)</sup>から引用した。

つぎにいままでの曲げ疲労試験結果をまとめて図示したのが図 27 で、CFRP が一番高く、KEVLAR-29 はかなり低い値である。しかし Hybrid 材の特性はかなり向上した。KEVLAR-29 と KEVLAR-49 の Hybrid 材の差はあまり認められない。

## 7. 結 論

KEVLAR-29 複合材は KEVLAR-49 複合材に比較して弾性率は約半分であるが、その他はほとんど同じであり、しかも繊維の価格は約 1/10 で、非常に魅力ある材

料と思われる。しかし現在ではタイヤ用、ローブ用などに限定されている。

われわれの実験結果によれば、KEVLAR-49 複合材の報告書<sup>1)</sup>にも述べたように、KEVLAR-29 でもカーボンとの Hybrid 材が構造材用に適していると思われる。

## 9. あとがき

この研究により航空機構造材としての KEVLAR-29 複合材の一応の評価を行うことができた。

本研究の一部は横浜ゴム K.K. の航空部品部の受託研究で行ったもので、KEVLAR-29 複合材の成形、加工、 $V_f$  の測定などは同社で行った。この報告書をまとめるに当り、各種資料の提供を戴いた河合弘治工場長、佐藤孝主査、山崎保課長、大畑一郎、若山泰三主席研究員、宮前英昭、須田英男、林田正研究員に深く感謝致します。

## 文 献

- 1) 古田敏康ほか；KEVLAR-49 複合材の強度と曲げ疲労強度，航技研報告，TR-413，1975年5月
- 2) 古田敏康ほか；カーボン複合材の強度特性，航技研資料，TM-241，1973年6月
- 3) 古田敏康ほか；カーボン複合材の曲げ疲労強度，航技研報告，TR-366，1974年6月

表3 KEVLAR-29 U. D. t = 3.0 mm

項目	測定値 (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{X}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	S (kg/mm <sup>2</sup> )	C.V. (%)
引張弾性率	4670 4280 5600 4460	4760	610	13
引張強度	109 112 117 120 119 113	115	4.3	3
曲げ弾性率	4530 4240 5340 4480	4700	490	10
曲げ強さ				
3点曲げ				
4点曲げ	39 41 41 38	40	1.5	5
層間せん断強さ	5.0 5.0 5.1 5.1 5.3 5.6 5.2 5.2	5.2	0.20	10
ポアソン比				
繊維含有率(%)	53.7			

平均値  $\bar{X}$  標準偏差 S 変動率 C.V.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_n, \quad S = \sqrt{\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{n-1}}$$

$$C.V. = (S/\bar{X}) \times 100\%$$

表4 KEVLAR-29 U. D. t = 5.0 mm

項目	測定値 (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{X}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	S (kg/mm <sup>2</sup> )	C.V. (%)
引張弾性率				
引張強度				
曲げ弾性率	4700 5830	5470	280	5
曲げ強度				
3点曲げ	66 71	69	2.7	4
4点曲げ	57 59	58	1.2	2
層間せん断強度	5.0 5.5 5.8 4.5	5.2	0.57	11
ポアソン比	0.38 (Strain gage 法)			
繊維含有率(%)	56.7			

平均値  $\bar{X}$ , 標準偏差 S, 変動率 C.V.

表5 KEVLAR-29/Carbon Hybrid

項目	測定値 (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{X}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$S$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$C.V.$ (%)
引張弾性率				
引張強度	99 104 114	106	7.8	7
曲げ弾性率 (Dead Weight法)	7790 8060 7680 7530 7660	7740	200	3
曲げ強度				
3点曲げ	126 139 123	129	8.3	6
4点曲げ	120 126 127	124	3.7	3
層間せん断強度	7.6 7.5 7.0 6.9	7.2	0.37	5
ポアソン比	0.22 (ホログラフィ, $2\alpha = 51^\circ$ $\nu = \tan^2 \alpha$ )			

平均値  $\bar{X}$  標準偏差  $S$  変動率  $C.V.$

表6 各種複合材の疲労特性

種類	$A$	$B$	$\sigma_b$	$\sigma_f/\sigma_b$	$\sigma_b/A$
K-29 (平板)	38	3.0	40	0.42	1.05
K-29 (300 mm R付)	43	4.0	58	0.37	1.35
K-49 (300 mm R付)	51	4.7	64	0.27	1.26
K-29/C(300mm R付)	131	13.4	124	0.32	0.94
CFRP	175	14.8	140	0.59	0.80

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

$A$ ;  $N = 1$  の強度,  $B$ ; 傾斜,  $\sigma_f$ ;  $10^7$  の時間強度,  $\sigma_b$ ; 静的曲げ強度

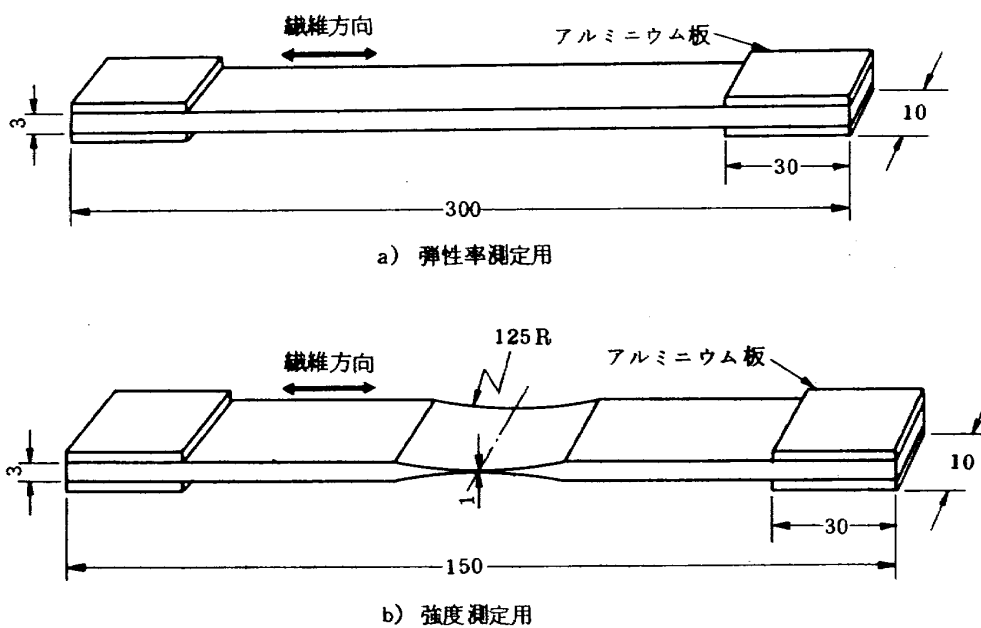


図1 引張試験片

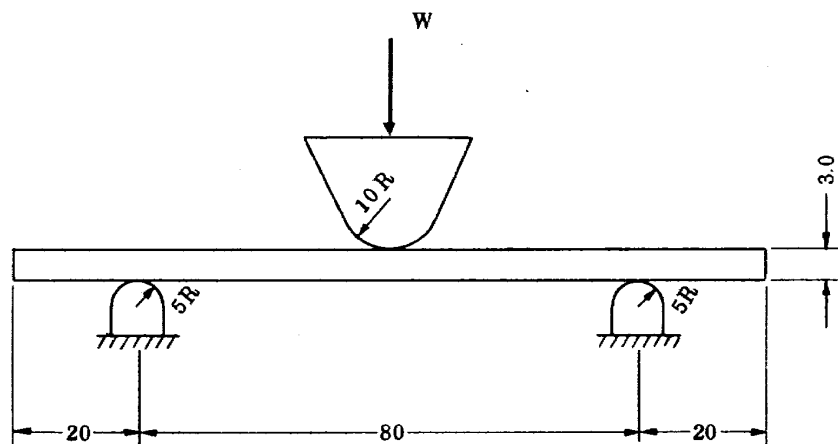


図2 3点曲げ試験法

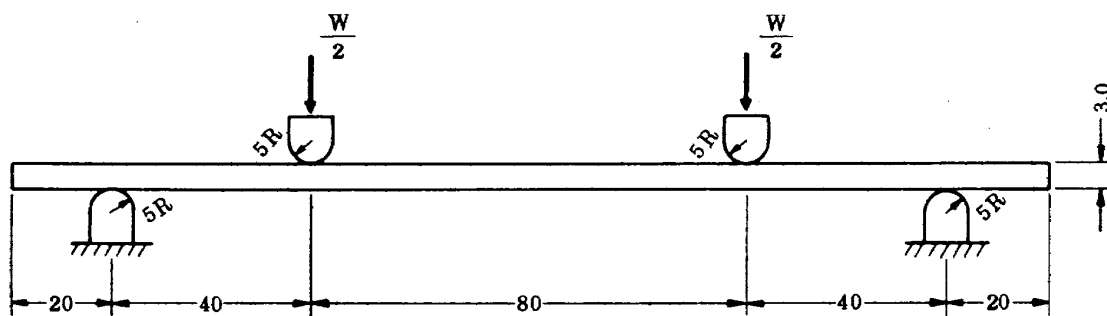


図3 4点曲げ試験法



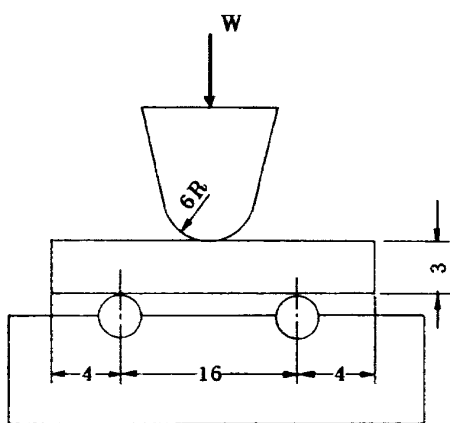


図 4 層間せん断試験法

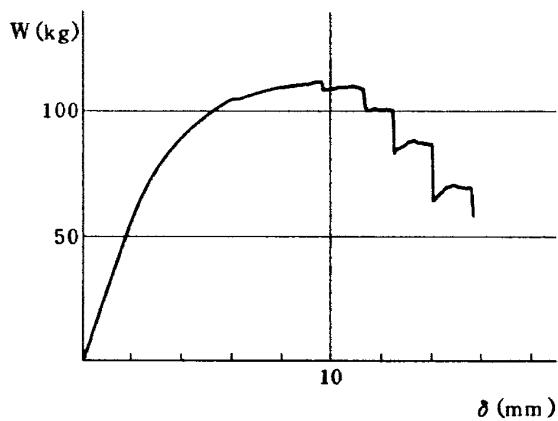


図 5 KEVLAR-29, 3点曲げ荷重と変位線図

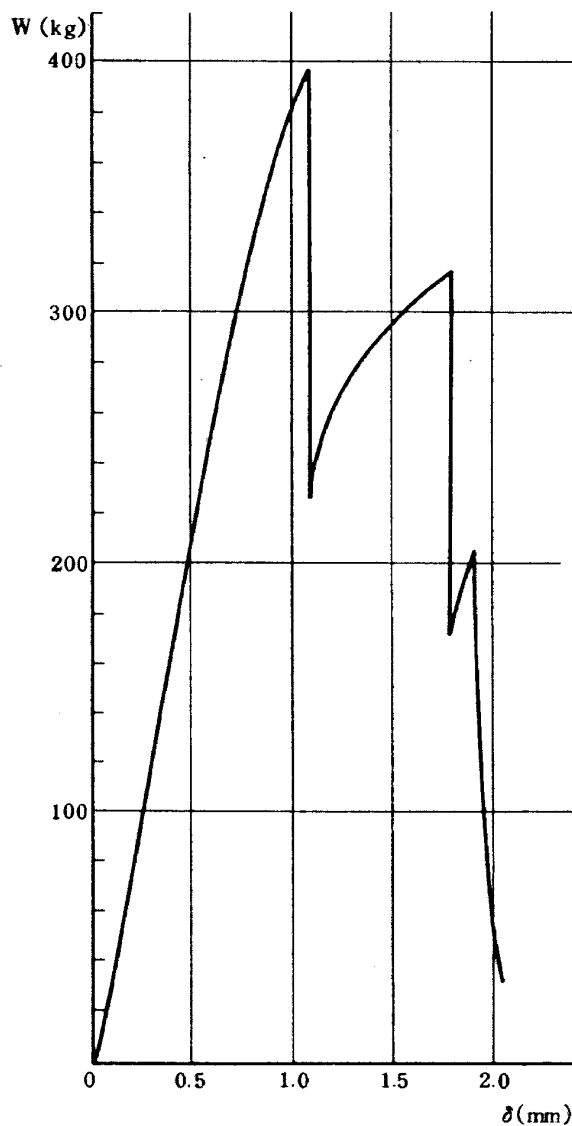


図 7 KEVLAR-29, 層間せん断荷重と変位線図

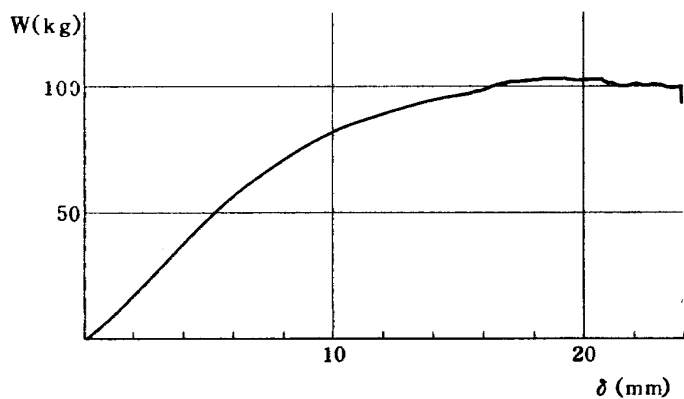


図 6 KEVLAR-29, 4点曲げ荷重と変位線図

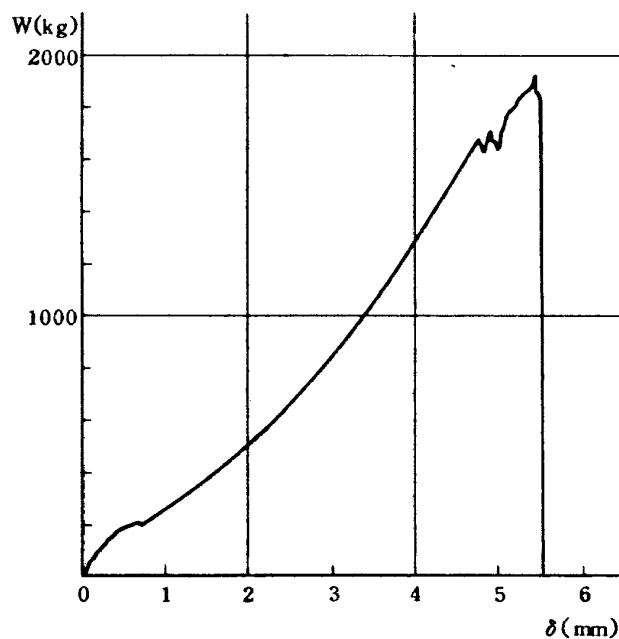


図 8 KEVLAR-29/Carbon Hybrid の引張荷重と変位線図

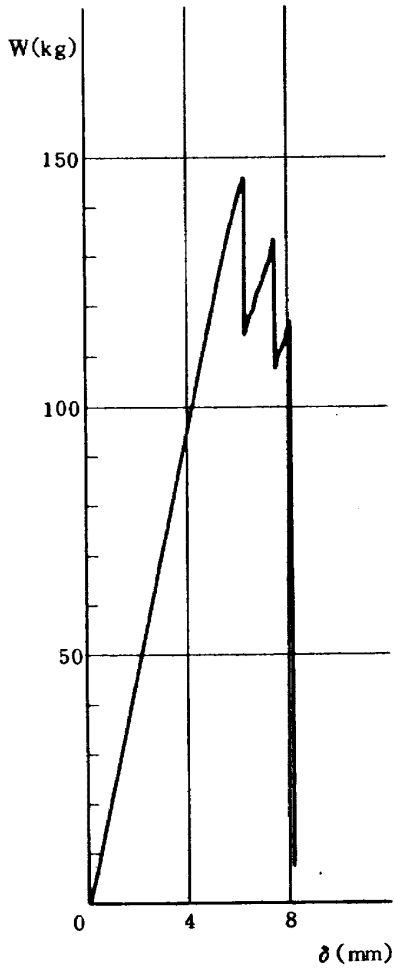


図9 KEVLAR-29/Carbon Hybrid  
の3点曲げ荷重と変位線図

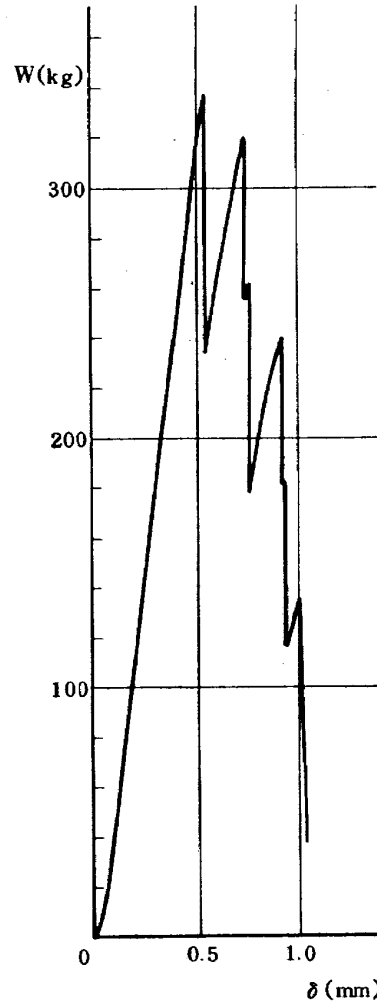


図11 KEVLAR-29/Carbon Hybrid  
の層間せん断荷重と変位線図

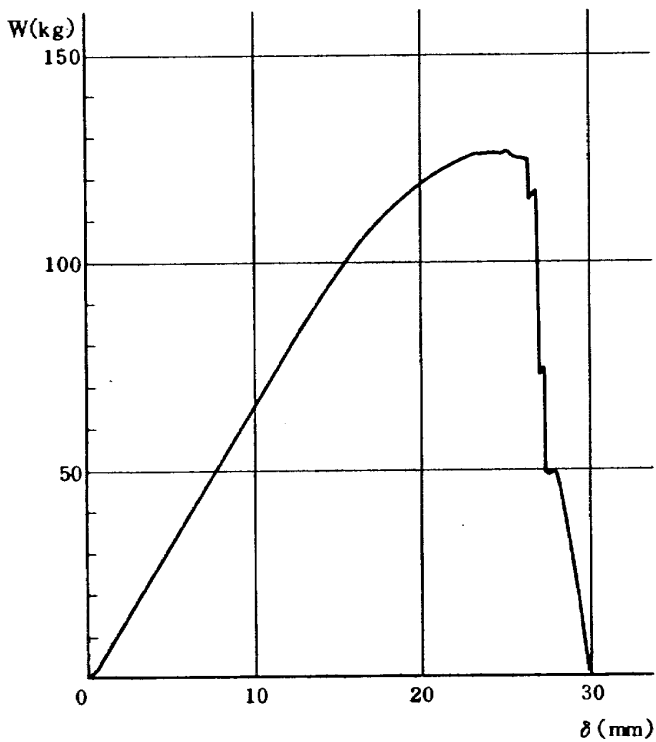


図10 KEVLAR-29/Carbon Hybrid  
の4点曲げ荷重と変位線図

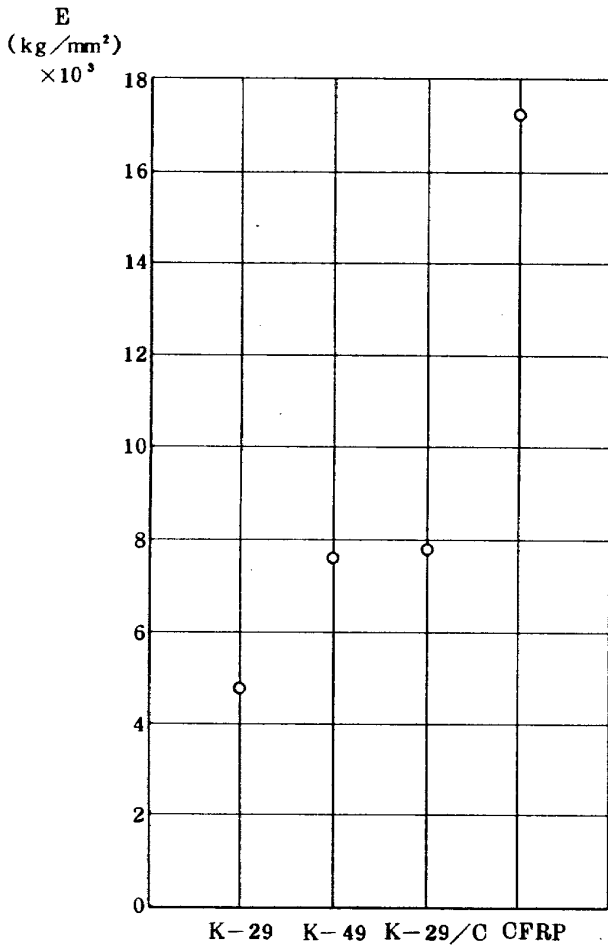


図 12 弾性率の比較

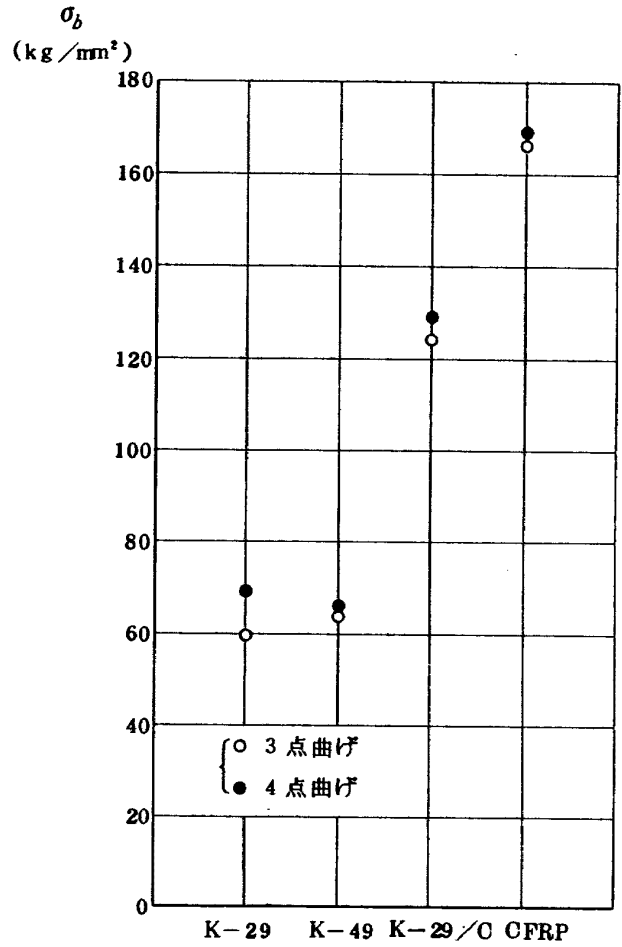


図 14 曲げ強度の比較

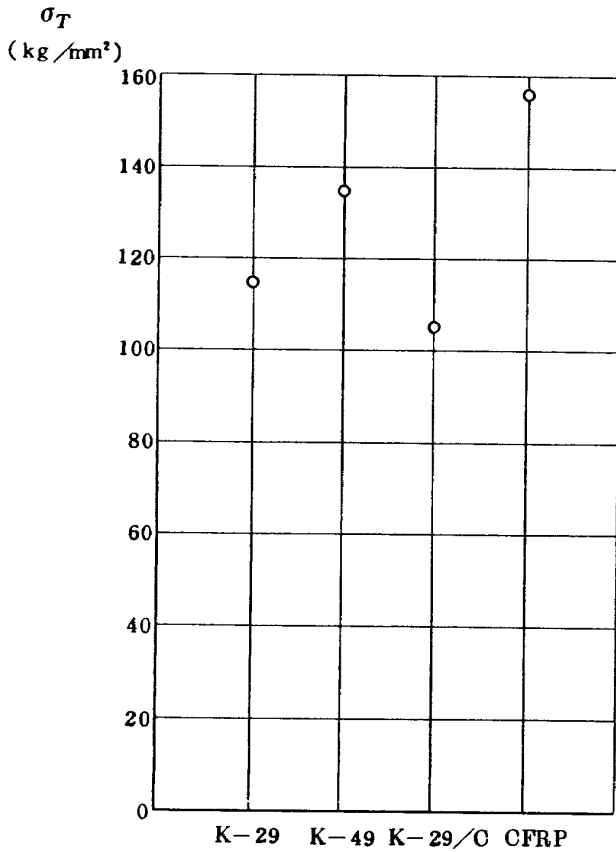


図 13 引張強度の比較

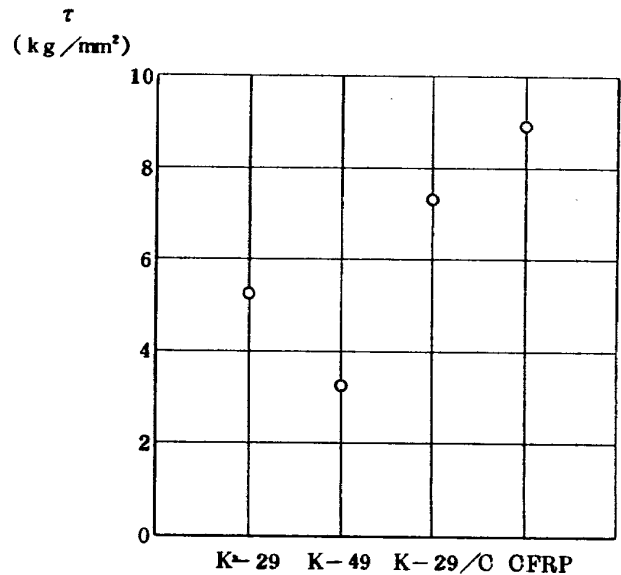
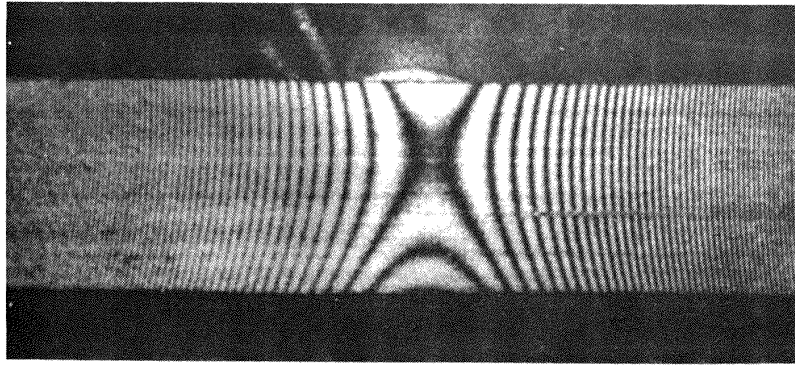


図 15 層間せん断強度の比較



KEVLAR-29 / Carbon Hybrid 材の場合  
 $2\alpha = 51^\circ$   $\nu = \tan^2\alpha = 0.22$

図 16 ホログラフィカメラによる Poisson's ratio の測定

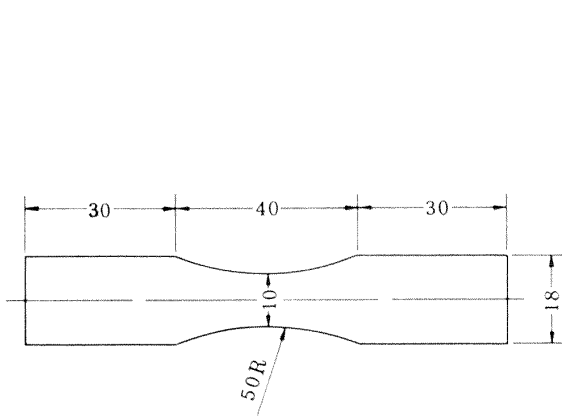


図 17 一方向強化材の疲労試験片

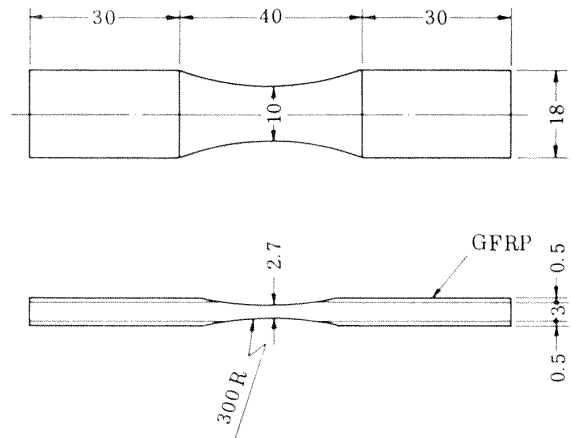


図 18 Hybrid 材の疲労試験片

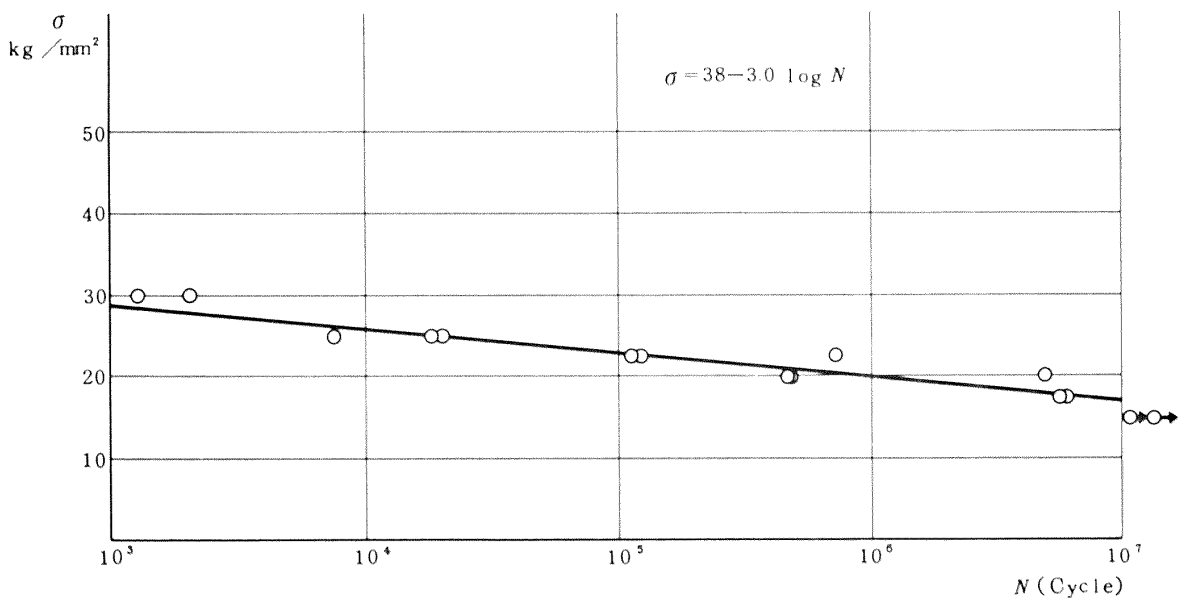


図 19 KEVLAR-29 一方向強化材の疲労曲線 (平板のもの)

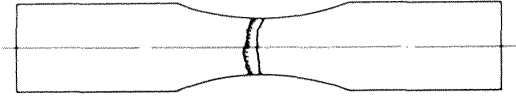


図 20 KEVLAR-29 一方向強化材 (平板) の破断

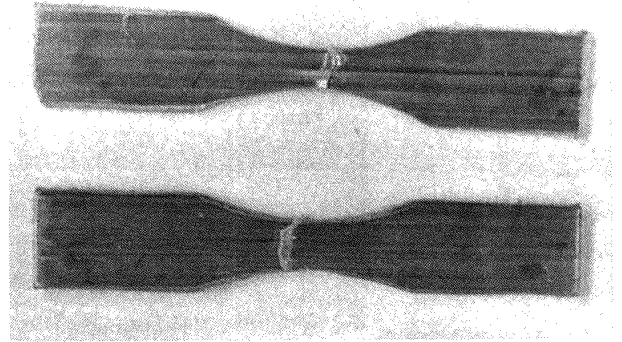


図 21 KEVLAR-29 一方向強化材 (平板) の破断写真

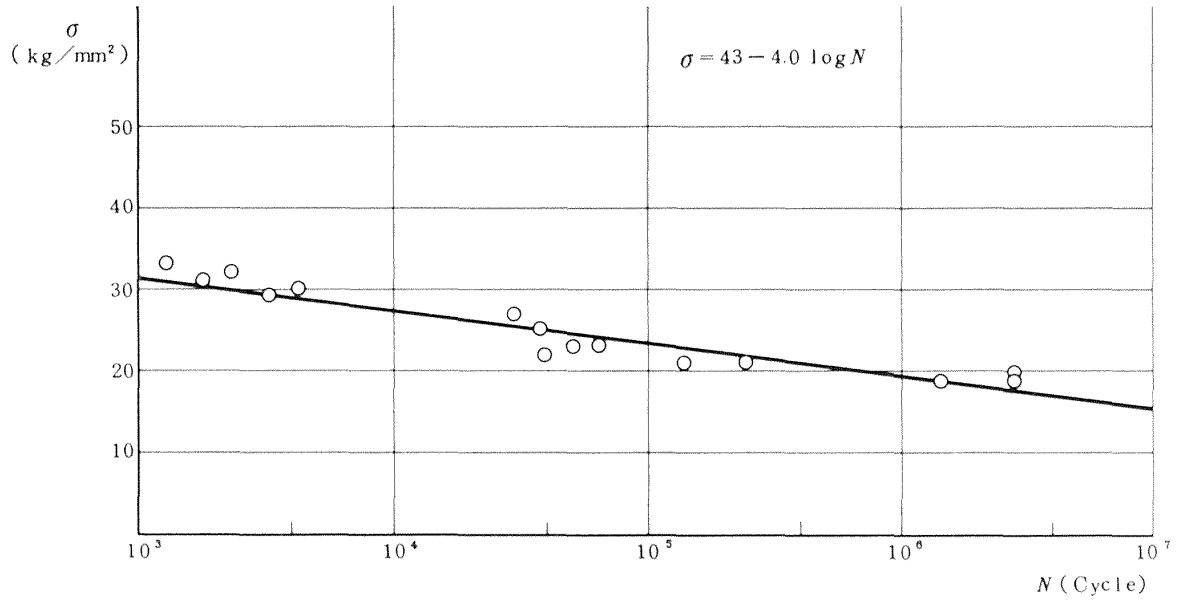


図 22 KEVLAR-29 一方向強化材の疲労曲線 (曲率 300mm R 付)

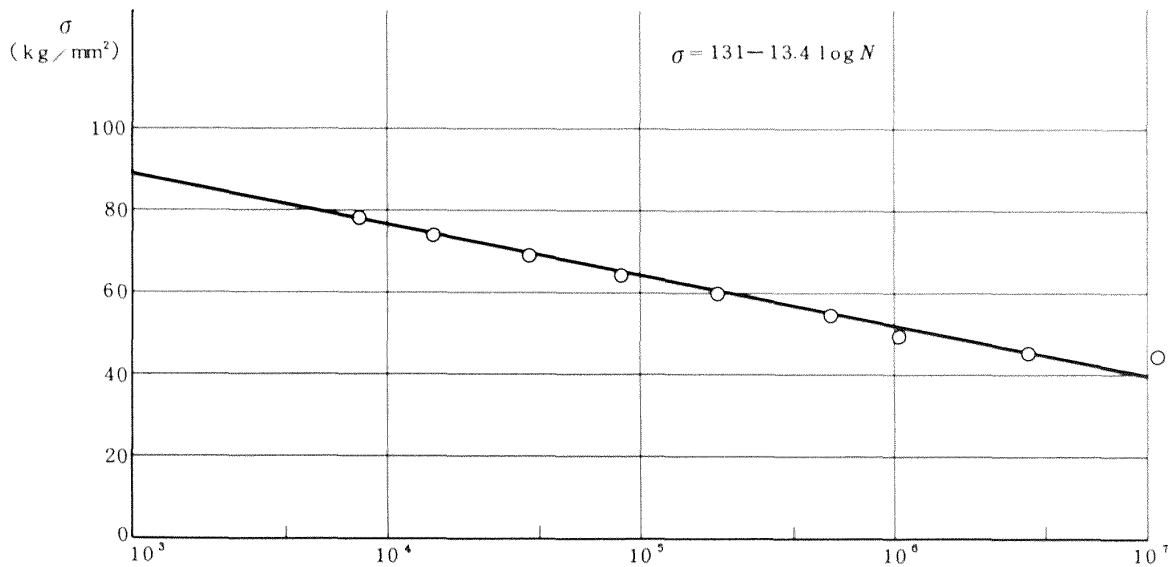


図 23 KEVLAR-29/Carbon Hybrid 材の疲労曲線 (曲率: 300mm R 付)

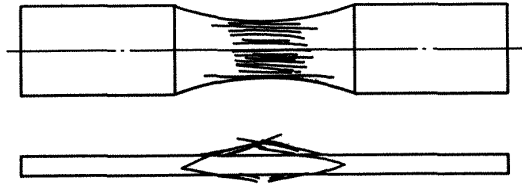


図 24 KEVLAR-29/Carbon Hybrid 材の破断

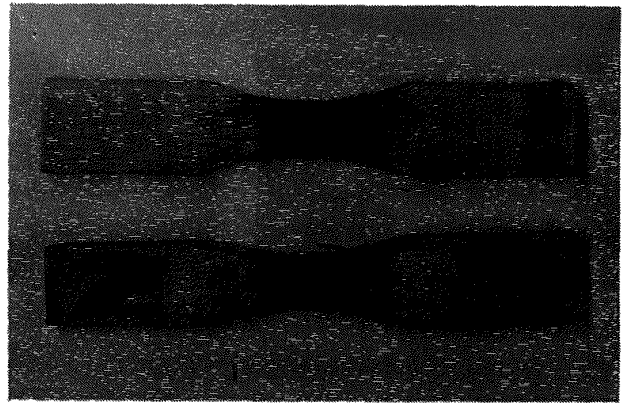


図 25 KEVLAR-29/Carbon Hybrid 材の破断写真

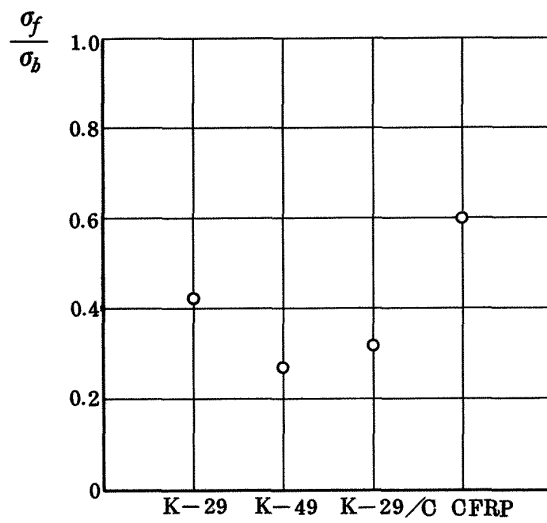


図 26  $\frac{\sigma_f}{\sigma_b}$  の比較  
( $\sigma_f$ :  $10^7$  の時間強度,  $\sigma_b$ : 静的曲げ強度)

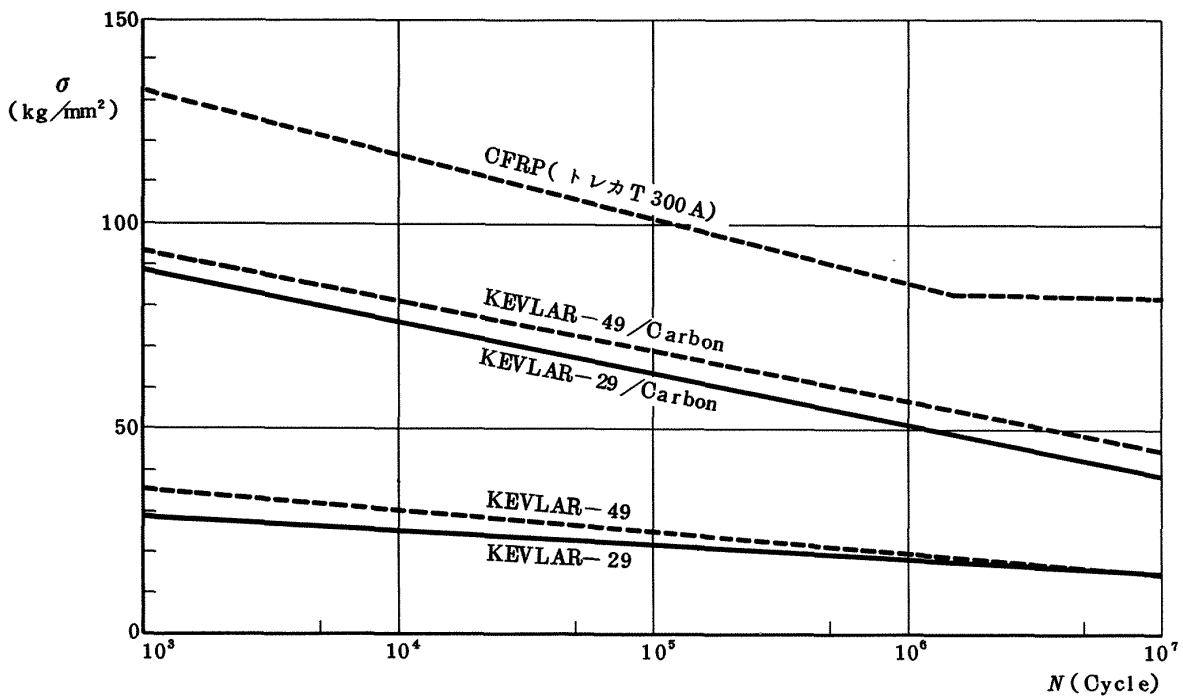


図 27 KEVLAR 複合材の疲労曲線

---

## 航空宇宙技術研究所資料 289号

昭和50年12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)

---

