

UDC 661.66
678.067.9
620.168/.17

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-330

各種カーボン複合材の静的強度特性

古田敏康・松嶋正道・野口義男

1977年4月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

各種カーボン複合材の静的強度特性*

古田 敏康** 松嶋 正道** 野口 義男**

1 はしがき

カーボン複合材(CFRP)は開発されてからすでに10年たち、その間にカーボン繊維、使用樹脂(エポキシ樹脂)なども大部改良され、CFRPの静的強度特性も初期のものに比較して格段と改善され、航空機の構造材をはじめ一般の構造部材として幅広く応用されるようになってきた。

そこで、ここでは現在国内で販売されているM、N、T社の高強度タイプカーボン繊維の6種類について、また使用樹脂については5種類のエポキシ樹脂の組合せについて各種強度特性を求めた。まず各繊維についてはCFRP用に開発されたエポキシ樹脂DX-210(シェル化学)を使用したものと、つぎに各カーボンメーカの開発した変性エポキシ樹脂を使用したCFRPについて、曲げ弾性率、3点曲げ強度、4点曲げ強度、引張強度、層間せん断強度などを求めた。また強度、弾性率の複合則との関係も検討した。

2 各種カーボン繊維

わが国で生産販売されているカーボン繊維は、延伸したポリアクリロニトリル(PAN)繊維を高温で炭化させた、いわゆる高強度タイプのカーボン繊維である。各社の繊維の特性値を表1に示す。

各社ともプリプレグに加工し販売している。ここでプリプレグとはエポキシ樹脂を含ませ、シート状にしたものを半乾燥させたもので、これを離型紙にはさんで販売している。これは3カ月位の貯蔵ができる。

3 複合材の製法

一般にCFRP用としてはエポキシ樹脂が最適とされている。そのなかでも特にCFRP用に開発されたDX-210が広く用いられている。ここではDX-210と、各カーボンメーカから航空機の構造用として開発された変性エポキシ樹脂の#3501(M社)、#241(N社)、#2000、#3130(T社)などについてCFRPの試料を作った。その組合せを表2に示す。

1) まずDX-210樹脂を使用した場合の成形条件はつ

ぎの通りである。

加圧時温度 170℃
 予熱時間 約3分間
 成形圧力 5~7 kg/cm²
 加圧時間 4時間
 後硬化 120℃で10時間

2) #3501の場合

予備加熱 135℃で12~20分間
 加圧時温度 175℃
 成形圧力 7 kg/cm²
 加熱時間 30分、その後100℃迄保冷
 後硬化 175℃で3時間

表1. 各種カーボン繊維の特性

カーボン繊維	引張強度(kg/cm ²)	弾性率(kg/cm ²)
Grafil AS	270	19400
Grafil HTS	300	24000
Carbolon Z-2	260	19000
Carbolon Z-3	280	23000
Torayca T-200	250	22400
Torayca T-300	280	24000

(カタログ値)

表2 CFRPの繊維と樹脂の組合せ

カーボン繊維	エポキシ樹脂	変性エポキシ樹脂
Grafil AS	DX-210	—
Grafil HTS	DX-210	#3501
Carbolon Z-2	DX-210	#241
Carbolon Z-3	DX-210	#241
Torayca T-200	DX-210	—
Torayca T-300	DX-210	#3130
Torayca T-300	—	#2000

* 昭和51年11月4日受付

** 機体の一部

- 3) #241の場合
 予備加熱 170℃で5分間
 加圧時温度 170℃
 成形圧力 7kg/cm²
 加熱時間 4時間
 後硬化 200℃で12時間
- 4) #2000の場合
 加圧時温度 130℃
 成形圧力 5kg/cm²

- 加熱時間 1時間
 後硬化 150℃で3時間
- 5) #3130の場合
 予備加熱 160℃で約8.5分間
 加熱時温度 160℃
 成形圧力 7kg/cm²
 加熱時間 3時間
 後硬化 170℃で3時間

4 静的強度試験法

静的強度の試験は曲げ弾性率、3点曲げ強度、4点曲げ強度、引張強度、層間せん断強度などがある。これらの強度試験にはインストロンタイプのオートグラフIS-20T(島津製作所製、最大荷重容量20ton)を用いた。試験法は以前にわれわれがCFRP用に開発した方法¹⁾で行ったが、簡単にその方法を述べるとつぎのとおりである。

4.1 曲げ弾性率試験

曲げ弾性率の測定は以前にわれわれが開発したDead Weight法¹⁾を採用した。この装置を図1に示す。この装置は4点曲げ方式で、図2を参照して、 $L_1 = 50\text{mm}$ 、 $L_2 = 200\text{mm}$ に設定してある。

この場合の曲げ弾性率(E_b)は下記のとおりに求められる。

$$E_b = \frac{P L_1 L_2^2}{8 I \delta} = \frac{3}{2} \frac{P L_1 L_2^2}{b h^3 \delta} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{12} b h^3, \quad P = W/2 \quad (2)$$

W は重錘の重量、 δ は試験片中央部の変位(ダイヤルゲージで測定)、 b 、 h はそれぞれ試験片の幅と厚さである。まずDead Weight(500g単位)をのこることにより、

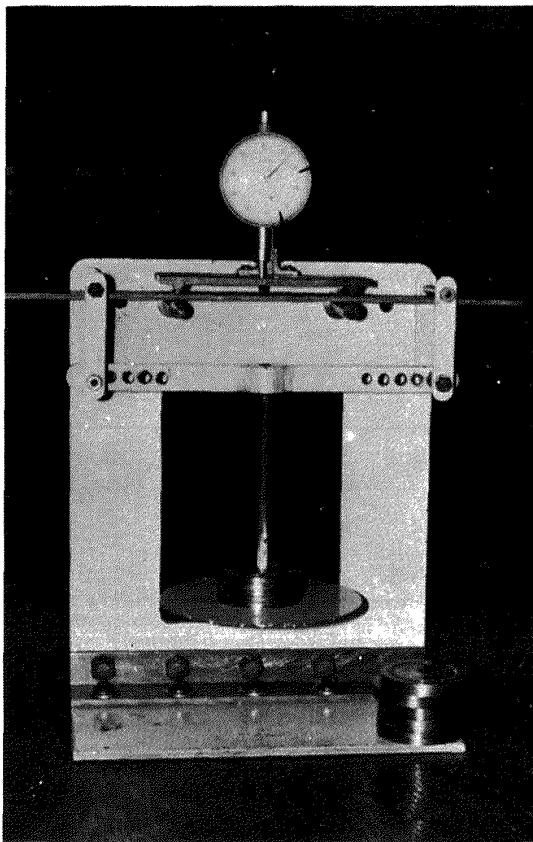


図1 曲げ弾性率測定装置(Dead Weight法)

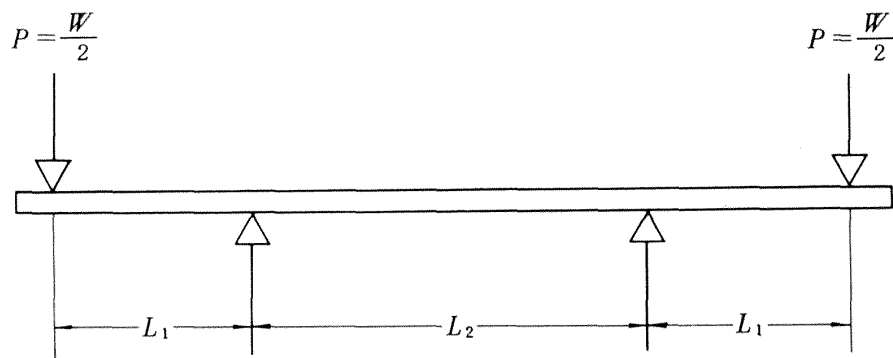


図2 4点曲げの原理図

中央部の変位(δ)を測定し、(1)式から曲げ弾性率は求められる。

なお引張試験によっても弾性率は求められるが、曲げ弾性率と同じ値となる¹⁾ので、ここでは前者の方法で弾性率を求めた。

4.2 曲げ強度試験

曲げ強度試験法には3点曲げ法と、4点曲げ法とがあるが、CFRPの場合には一般には4点曲げ法が採用されているが、ここでは参考のために3点曲げ法も行った。

4.2.1 3点曲げ試験

3点曲げ法は図3に示すとおりで、中央の支点部の曲率を12.5mmRと大きくとり、中央部でのせん断破損を防ぐようにした。曲げ強度(σ_b)はつぎのとおり求まる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{WL}{4} \frac{6}{bh^2} = \frac{3}{2} \frac{WL}{bh^2} \quad (3)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6}, \quad M = \frac{WL}{4} \quad (4)$$

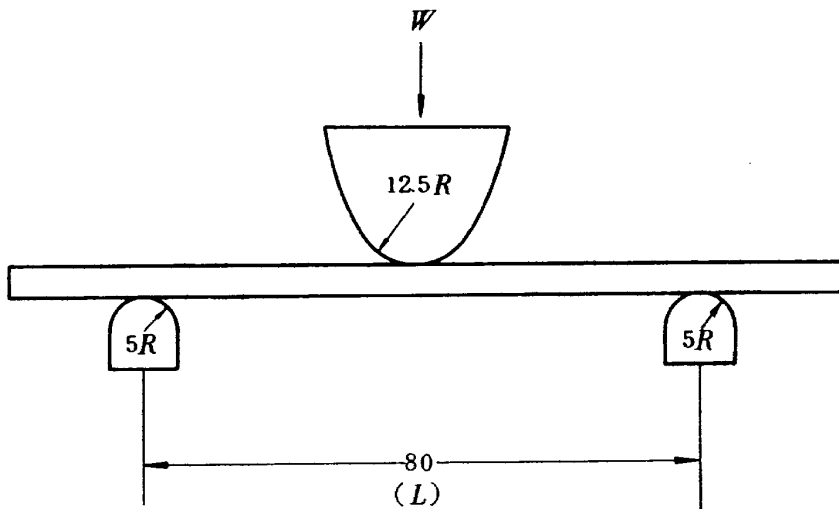


図 3 3点曲げ法

4.2.2 4点曲げ試験

4点曲げ法は図4に示すとおりで、4つの支点部の曲率半径はすべて5mmRとした。曲げ強度(σ_b)はつぎのとおり求まる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{WL_1}{2} \frac{6}{bh^2} = \frac{3WL_1}{bh^2} \quad (5)$$

4.3 引張強度試験

引張強度試験片は図5に示すとおりである。試験片の中央部の板厚方向に両側から12.5mmRの曲率をつけ、中央部の板厚を約1mmとした。なお試験片全体の板厚は約3mmである。これらの曲率の加工法は特殊治具を作り、ダイヤモンドカッターで正確に作るができるようにした。

この試験法は以前にいろいろと曲率を変えた試験を行った結果¹⁾、最適な試験法であったのでこれを採用した。なおこの方法は現在CFRPの引張強度標準試験法として採用されつつある。試験片の上下両端面には試験機のチャック部の滑り止めに1mmのアルミニウム板を接着してある。引張強度(σ_T)はつぎのとおり求められる。

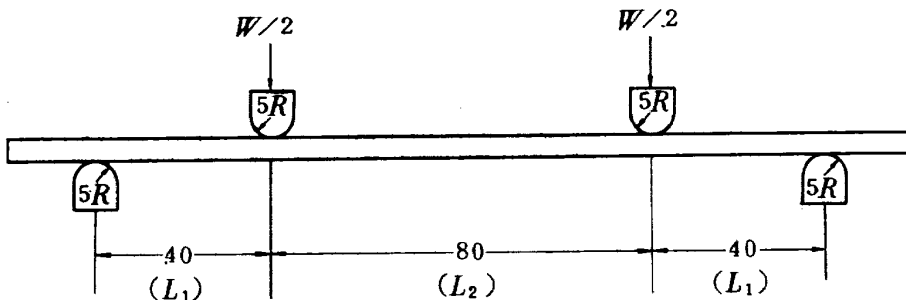


図 4 4点曲げ法

$$\sigma_T = \frac{W}{A} \tag{6}$$

ここで、 W は試験片破断時の最大荷重で、 A は試験片中央部の断面積である。

4.4 層間せん断試験

層間せん断試験法にはいろいろあるが、CFRPの場合には一般にショートビーム法が現在広く用いられている。

その原理図を図6に示す。試験片の中立面に働く最大せん断応力(τ)はつぎのように求まる。

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{W}{bh} = \frac{3}{4} \frac{W}{A} \tag{7}$$

ここで A は試験片の断面積、 W は最大荷重である。この場合に中央支点部の曲率半径を余り小さくすると試験片の中央部で軸と直角方向のせん断破損となるため、ここでは中央支点部の曲率半径を $6 \text{ mm} \approx R$ とした。また試験片の厚さを h とし、スパンを L とすると、 L/h の比を余り大きくすると曲げ破損となるため、ここでは L/h の値を5とした。CFRPの場合には L/h の値は5前後の試験法が広く用いられている。

4.5 繊維含有率の測定

CFRP中のカーボン繊維の含有率の測定法は硫酸煮沸法と、燃焼法の2つの方法があるが、後者の方が簡単なので、最近燃焼法が一般に用いられている。これは一定重量の小試験片をガスバーナの還元火炎中で2~3分間加熱し、CFRP中のエポキシ樹脂を燃焼させてから、水中に急冷し、残ったカーボン繊維の重量を測定し、繊維の含有率を算出する方法で、硫酸煮沸法と差はなかった¹⁾のでここではすべて燃焼法により求めた。

5 静的強度試験結果

5.1 複合則

CFRPの一方方向強化材の強度、剛性は主としてカーボン繊維によるもので、カーボン繊維および樹脂の弾性率を E_f, E_m 、応力を σ_f, σ_m 、断面積を A_f, A_m とし、全断面積を A とすれば、力のつりあいより、

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{8}$$

繊維および樹脂の体積含有率を V_f, V_m とすれば、 $V_f = A_f/A, V_m = A_m/A, V_f + V_m = 1$ であるからCFRPの平均引張応力 σ_c は下記のように求められる。

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \tag{9}$$

これを強度の複合則という。

繊維および樹脂がともに弾性域のときは、CFRPの平均弾性率 E_c は、 $\sigma_c = E_c \epsilon, \sigma_f = E_f \epsilon, \sigma_m = E_m \epsilon$ であるから(9)式から下記のように求められる。

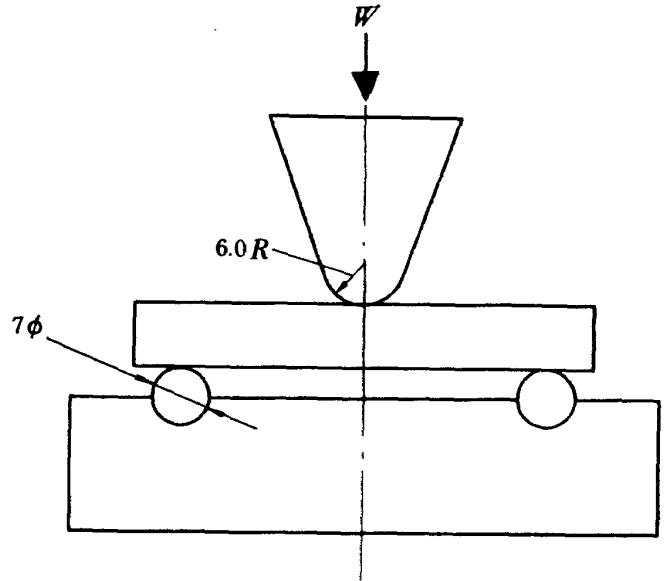


図6 層間せん断試験法(ショートビーム法)

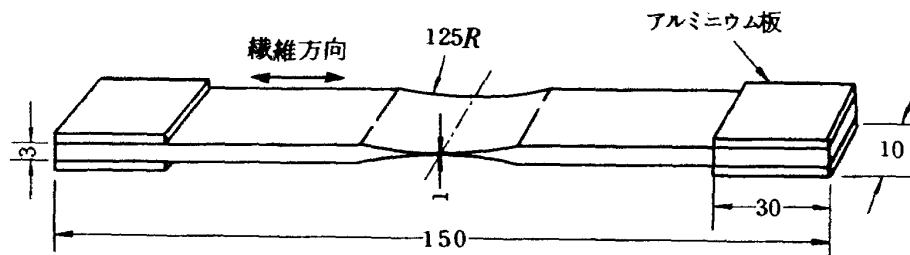


図5 引張強度試験片

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (10)$$

これを弾性率の複合則という。

以上の複合則はCFRPの一方方向強化材の強度、弾性率の基本的なもので、理想的に作られたCFRPの試験片については実験値と比較的よく一致するが、一般の構造用に作られたCFRP材の場合には、成形過程ではいつてくる空孔や、繊維の配向性の乱れ、繊維と樹脂の接着状態などの影響などを受け、複合則に合わない場合が多い。

そこでつぎの式のように、複合則に低減係数 α 、 β の係数を乗じて近似的に表わしている。²⁾

$$\sigma_c = \beta \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (11)$$

$$E_c = \alpha E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (12)$$

5.2 Rosenの強度式³⁾

Rosenは複合材の破損は各繊維がつきつきと破損をくり返していくという考え方で、統計的手法を導入して、つぎの強度式をえている。

$$\sigma_c = \sigma_f V_f \left(\frac{1 - V_f^{1/2}}{V_f^{1/2}} \right)^{-\frac{1}{2\beta'}} \quad (13)$$

ここで β' は繊維強度分布がWeibull分布をしている

として求めた形状母数である。

5.3 各種強度試験結果

曲げ弾性率、3点曲げ強度、4点曲げ強度、引張強度、層間せん断強度などについて、それぞれ5~6個の試験を行ない、平均値(\bar{X})、標準偏差(s)、変動率(C.V.)などを求めた。

すなわちつぎのように求めた。

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

$$C.V. = (s / \bar{X}) \times 100 \% \quad (14)$$

表3から表8は使用樹脂をDX-210とし、CFRPの成形条件を全く同一としたときの静的強度の試験結果である。この表で60%換算とは、実際の試験片は V_f が異なるCFRPの試験結果であるので、これを比較するために V_f を60%におきかえたときの強度を換算して求めた。

つぎに表9から表13は、各カーボンメーカの試作した変性エポキシ樹脂を使用し、かつ各カーボンメーカ自身で成形したCFRPの静的強度試験結果である。

つぎにこれらの静的強度の60%換算値を図で示したの

表3 CFRP 強度試験結果 Grafil AS (DX-210)

項目	測定値 (kg/mm ²)		\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	11330	11140	11450	399	35	11260
	11270	11680				
	11120	12150				
3点曲げ強度	161	147	147	10.1	6.9	145
	151	142				
	134					
4点曲げ強度	151	144	154	6.6	4.3	151
	159	156				
	160					
引張強度	129	133	136	6.3	4.6	134
	135	140				
	146	131				
層間せん断強度	9.3	7.5	8.5	0.70	8.2	8.4
	9.0	8.9				
	8.3	7.9				

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 270 \text{ kg/ml} & E_f &= 19400 \text{ kg/ml} \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/ml} & E_m &= 350 \text{ kg/ml} \\ V_f &= 61 \% \end{aligned}$$

表 4 CFRP 強度試験結果 Grafil HTS (DX-210)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	13270	13450			
	13730	13750	13640	284	2.1
	14000				12400
3点曲げ強度	193	190			
	206	189	194	68	3.5
	194				176
4点曲げ強度	187	193			
	190	193	190	28	1.5
	188				173
引張強度	188	182			
	193	186	187	38	2.0
	187	184			170
層間せん断強度	81	75			
	78	69	75	0.58	7.7
	80	67			68

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 300 \text{ Kg/cm}^2 & E_f &= 24000 \text{ Kg/cm}^2 & V_f &= 66\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ Kg/cm}^2 & E_m &= 350 \text{ Kg/cm}^2 & & \end{aligned}$$

表 5 CFRP 強度試験結果 Carbolon Z-2 (DX-210)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	10830	10870			
	9960	10060	10310	422	4.1
	10070	10060			10310
3点曲げ強度	174	159			
	184	149	164	127	7.7
	159	158			164
4点曲げ強度	160	152			
	152	154	154	59	3.8
	161	145			154
引張強度	116	120			
	116	139	125	9.2	7.4
	127	131			125
層間せん断強度	81	82			
	85	83	82	0.20	2.4
	81	79			82

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 260 \text{ kg/cm}^2 & E_f &= 19000 \text{ kg/cm}^2 & V_f &= 60\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/cm}^2 & E_m &= 350 \text{ kg/cm}^2 & & \end{aligned}$$

表6 CFRP 強度試験結果 Carbolon Z-3 (DX-210)

項目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	12200	12650			
	12920	12710	12440	376	30
	12260	11920			11660
3点曲げ強度	141	154			
	155	167	154	93	60
	151				144
4点曲げ強度	145	184			
	155	161	158	159	10.1
	146				148
引張強度	146	156			
	144	151	149	49	33
	146				140
層間せん断強度	80	81			
	78	80	80	0.11	14
	81	80			7.5

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 280 \text{ kg/mm} & E_f &= 23000 \text{ kg/mm} & V_f &= 64\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/mm} & E_m &= 350 \text{ kg/mm} \end{aligned}$$

表7 CFRP 強度試験結果 Torayca T-200 (DX-210)

項目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	12570	12470			
	12380	12380	12440	77	06
	12450	12370			12870
3点曲げ強度	148	167			
	138	167	157	11.6	7.4
	159	162			162
4点曲げ強度	181	188			
	183	160	179	9.9	5.5
	183	176			185
引張強度	143	162			
	151	158	154	6.6	4.3
	153	157			159
層間せん断強度	9.2	8.8			
	8.8	8.4	8.7	0.31	3.6
	8.5	8.4			9.0

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 250 \text{ kg/mm} & E_f &= 22400 \text{ kg/mm} & V_f &= 58\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/mm} & E_m &= 350 \text{ kg/mm} \end{aligned}$$

表 8 CFRP 強度試験結果 Torayca T-300 (DX-210)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	15390 13140				
	13900 14410	14170	623	58	13080
	13990				
3点曲げ強度	184 179				
	188 193	186	5.1	27	172
	186				
4点曲げ強度	179 173				
	179 186	182	7.7	42	168
	193				
引張強度	159 164				
	162 170	163	55	34	150
	156 169				
層間せん断強度	84 82				
	84 80	83	0.18	22	7.7
	85 84				

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 280 \text{ kg/cm} & E_f &= 24000 \text{ kg/cm} & V_f &= 65\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/cm} & E_m &= 350 \text{ kg/cm} & & \end{aligned}$$

表 9 CFRP 強度試験結果 Grafil HTS (#3501)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	13590 14390				
	14100 14100	13940	340	24	13710
	13490 13950				
3点曲げ強度	195 175				
	188 186	191	11.6	6.1	188
	192 210				
4点曲げ強度	175 193				
	202 191	193	9.7	50	190
	200 196				
引張強度	167 182				
	165 167	163	16.9	104	160
	131 166				
層間せん断強度	120 123				
	124 126	123	0.22	18	12.1
	124 12.1				

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 300 \text{ kg/cm} & E_f &= 24000 \text{ kg/cm} & V_f &= 61\% \\ \sigma_m &= 8.7 \text{ kg/cm} & E_m &= 350 \text{ kg/cm} & & \end{aligned}$$

表10 CFRP 強度試験結果 Carbolon Z-2 (#241)

項目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	11950	12330			
	12570	12360	12320	226	18
	12370				11370
3点曲げ強度	178	174			
	157	190	172	135	7.8
	160				159
4点曲げ強度	160	175			
	159	174	168	7.6	45
	170				155
引張強度	188	172			
	170	177	180	7.9	4.4
	188	183			166
層間せん断強度	109	108			
	107	109	108	0.18	1.7
	105	110			100

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 260 \text{ kg/ml} & E_f &= 19000 \text{ kg/ml} & V_f &= 65\% \\ \sigma_m &= 8.8 \text{ kg/ml} & E_m &= 350 \text{ kg/ml} \end{aligned}$$

表11 CFRP 強度試験結果 Carbolon Z-3 (#241)

項目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	12640	12690			
	12610	12150	12620	272	22
	12620	13000			12410
3点曲げ強度	167	180			
	161	171	177	136	7.7
	186	198			174
4点曲げ強度	174	163	162		
	150	176	179	168	10.3
	173				6.1
引張強度	158	181	160		
	176	154	155	165	11.4
	174	176	152		6.9
層間せん断強度	130	126	126		
	126	125	130	127	0.19
	127	127			1.5

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 280 \text{ kg/ml} & E_f &= 23000 \text{ kg/ml} & V_f &= 61\% \\ \sigma_m &= 8.8 \text{ kg/ml} & E_m &= 350 \text{ kg/ml} \end{aligned}$$

表 12 CFRP 強度試験結果 Torayca T-300 (#2000)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	15340	15890			
	15030	15940	15640	400	26
	15580	16050			14900
3点曲げ強度	177	190			
	154	161	170	133	7.8
	176	162			162
4点曲げ強度	202	179			
	213	186	193	138	7.2
	198	179			184
引張強度	145	157			
	150	154	154	53	3.4
	155	160			147
層間せん断強度	9.7	9.5			
	9.4	9.5	9.6	0.13	1.4
	9.7				9.1

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 280 \text{ kg/cm}^2 & E_f &= 24000 \text{ kg/cm}^2 & V_f &= 63\% \\ \sigma_m &= 4.5 \text{ kg/cm}^2 & E_m &= 350 \text{ kg/cm}^2 & & \end{aligned}$$

表 13 CFRP 強度試験結果 Torayca T-300 (#3130)

項 目	測定値 (kg/mm ²)	\bar{X} (kg/mm ²)	s (kg/mm ²)	C.V.(%)	60%換算
曲げ弾性率	14570	14870			
	15270	15100	14930	282	1.9
	15120	14640			14450
3点曲げ強度	193	200			
	197	204	202	7.4	3.7
	214	206			195
4点曲げ強度	195	196			
	194	189	191	6.6	3.5
	180				185
引張強度	172	167			
	172	157	166	6.3	3.8
	164				161
層間せん断強度	12.1	12.7			
	12.2	12.4	12.4	0.23	1.9
	12.4	12.6			11.9

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 280 \text{ kg/cm}^2 & E_f &= 24000 \text{ kg/cm}^2 & V_f &= 62\% \\ \sigma_m &= 8.7 \text{ kg/cm}^2 & E_m &= 350 \text{ kg/cm}^2 & & \end{aligned}$$

が、図7から図11である。ここで横軸の上の方の記号がカーボン繊維の種類を示し、その下の数字は変性エポキシ樹脂の種類を示し、それぞれの実験値を黒丸で示している。つきにCFRP用に開発されたDX-210エポキシ樹脂によるCFRPの実験値は白丸で示してある。

この実験でわかったことは、各社のカーボン繊維の種類によっても各強度は異なること、また従来はCFRPとしては最適とされてきたDX-210エポキシ樹脂を使用したCFRPよりも、各社で開発した変性エポキシ樹脂を使用したCFRPの方が各強度の強いことなどもわかった。

5.4 考 察

式(1)と式(2)について、弾性率の複合則の低減係数 α と、強度の複合則の低減係数 β について、引張強度について整理したのが表14、15である。表14はCFRP用DX-210樹脂を使用したCFRPの場合で、 α の平均値は

0.89で、 β の平均値は0.88となった。

一方、表15は変性エポキシ樹脂のCFRPの場合で、 α の平均値は0.97で、 β の平均値は0.93となり、変性エポキシ樹脂のCFRPの方が低減係数の値が大きいこと、すなわち複合則に比較的好く合うことがわかった。

複合則に合わない原因として考えられることは、カーボン繊維の強度、弾性率のバラツキ、複合材の成形時の繊維の配向性の乱れや、ポイドの存在、あるいは繊維と樹脂とのぬれ性などがあるものと思われる。

変性エポキシ樹脂の場合は成形時の繊維の配向性が乱れにくいこと、または繊維と樹脂とのぬれ性がよいため低減係数の値が大きくなったものと考えられる。

この実験によりCFRP用樹脂DX-210を使用したCFRPの強度、弾性率の複合則の低減係数 α 、 β の値はそれぞれ0.9、また変性エポキシ樹脂を使用した場合の α 、 β の値は0.95とすれば近似的に複合則と実験値とが合う

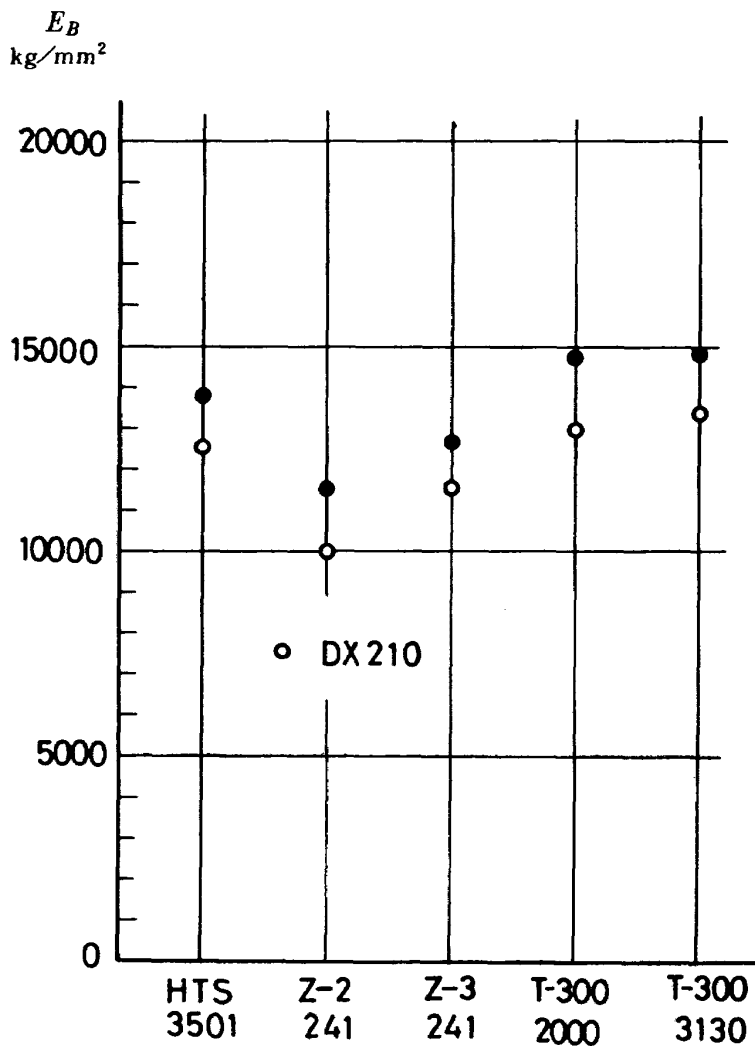


図 7 曲げ弾性率

ことがわかった。

つぎに式(13)から係数 β' の値を実験値より求めたものをやはり表14, 15のなかに示す。この式をガラス複合材に適用した場合は $\beta' = 7.7$ となることが報告³⁾されているが、CFRPの場合にはその値がバラツキ、一定値に収束しなかった。この原因は不明である。

6 あとがき

この実験によりCFRPの強度特性はカーボン繊維の種類によって異なること、また繊維を同一にした場合でも、従来のCFRP用樹脂DX-210を使用したCFRPよりも、各社で開発した変性エポキシ樹脂を使用したCFRPの方が、さらに静的強度特性がよいこと、特にいままでCFRPの欠点とされた層間せん断強度がDX-210の場合は約 8 kg/mm^2 に対し、変性エポキシ樹脂の場合は約 12 kg/mm^2 と50%も層間せん断強度が増加したことなどがわかった。

表14 α, β, β' の値

CFRP	α	β	β'
Grafil AS (DX-210)	0.956	0.815	- 3.32
Grafil HTS (DX-210)	0.854	0.937	-12.81
Carbolon Z-2(DX-210)	0.892	0.790	- 2.78
Carbolon Z-3(DX-210)	0.837	0.817	- 3.62
Torayca T-200(DX-210)	0.946	1.049	+ 9.94
Torayca T-300(DX-210)	0.900	0.887	- 6.46
Average Value	0.897	0.883	- 3.17

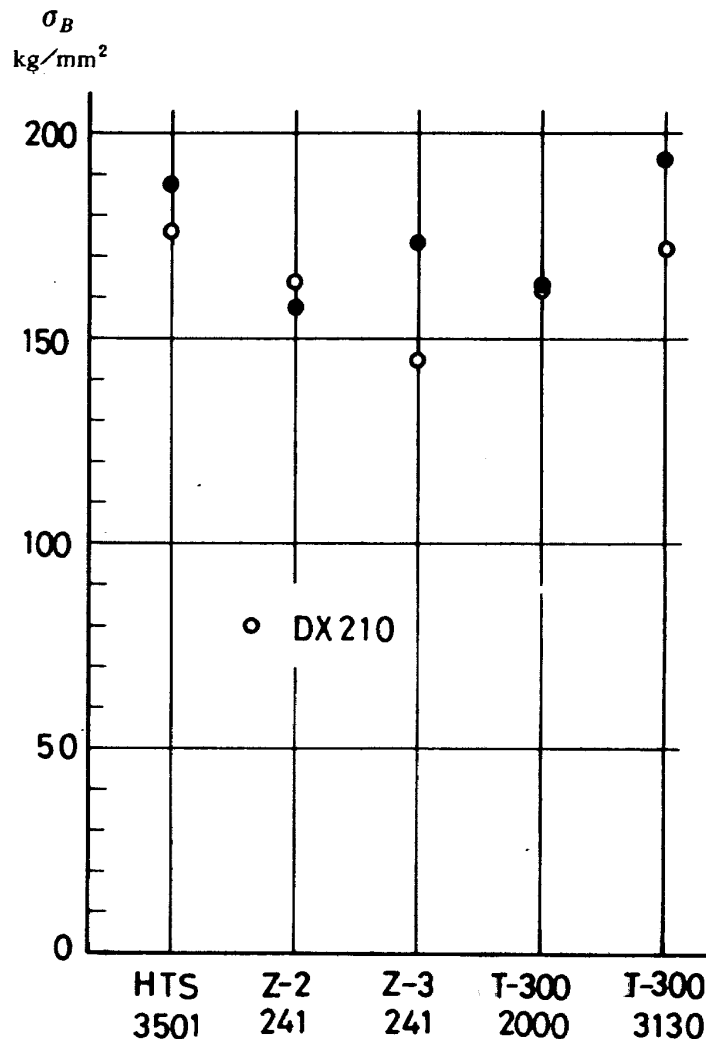


図 8 3点曲げ強度

表 15 α , β , β' の値

CFRP	α	β	β'
Grafil HTS (#3501)	0.943	0.872	- 5.30
Carbolon Z-2(# 241)	0.988	1.047	+11.30
Carbolon Z-3(# 241)	0.890	0.946	-18.38
Torayca T-300(#2000)	1.026	0.858	- 4.73
Torayca T-300(#3130)	0.994	0.937	-12.97
Average Value	0.967	0.932	- 6.01

また複合則で、DX-210の場合の低減係数 α , β の値を0.9, 変性エポキシ樹脂の場合は α , β の値を0.95とすれば、実験値とほぼ合うことなどがわかった。

これからもCFRP用にさらに適した樹脂が開発され、強度特性も向上するものと思われる。したがって今後CFRPが航空機の軽量構造材として益々使用されるものと思う。

なお疲労強度の実験も行っており、別の報告書にまとめる予定にしている。

最後にこの報告書をまとめるにあたり、各種の資料の提供を受けた三菱レイヨン(株)、日本カーボン(株)、東レ(株)の関係者に厚く御礼申し上げます。

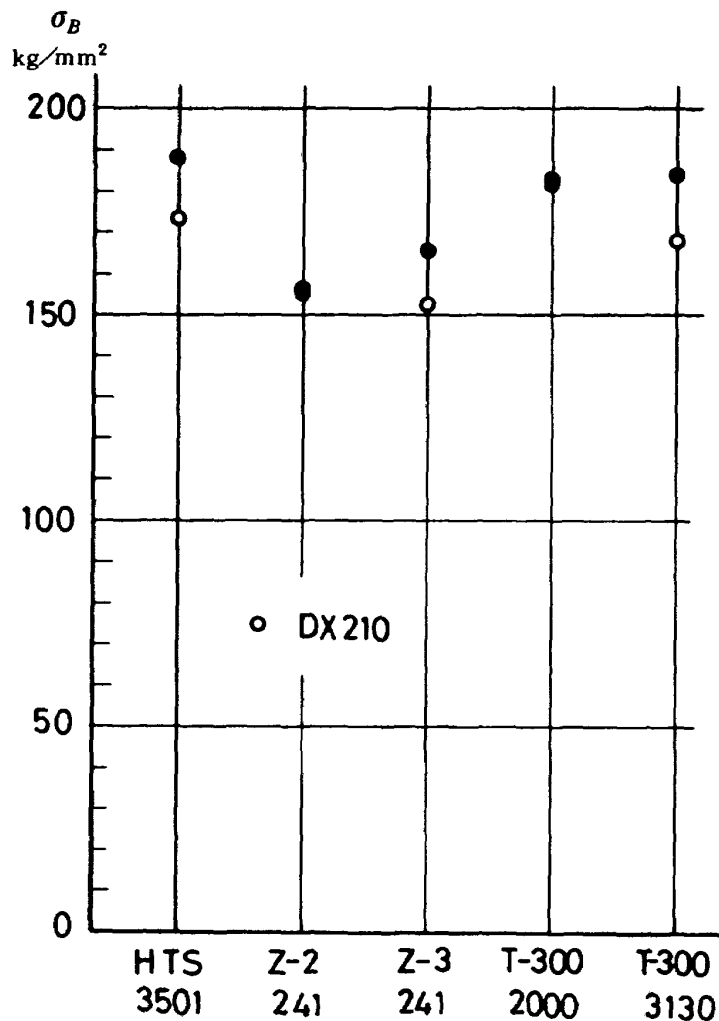


図 9 4点曲げ強度

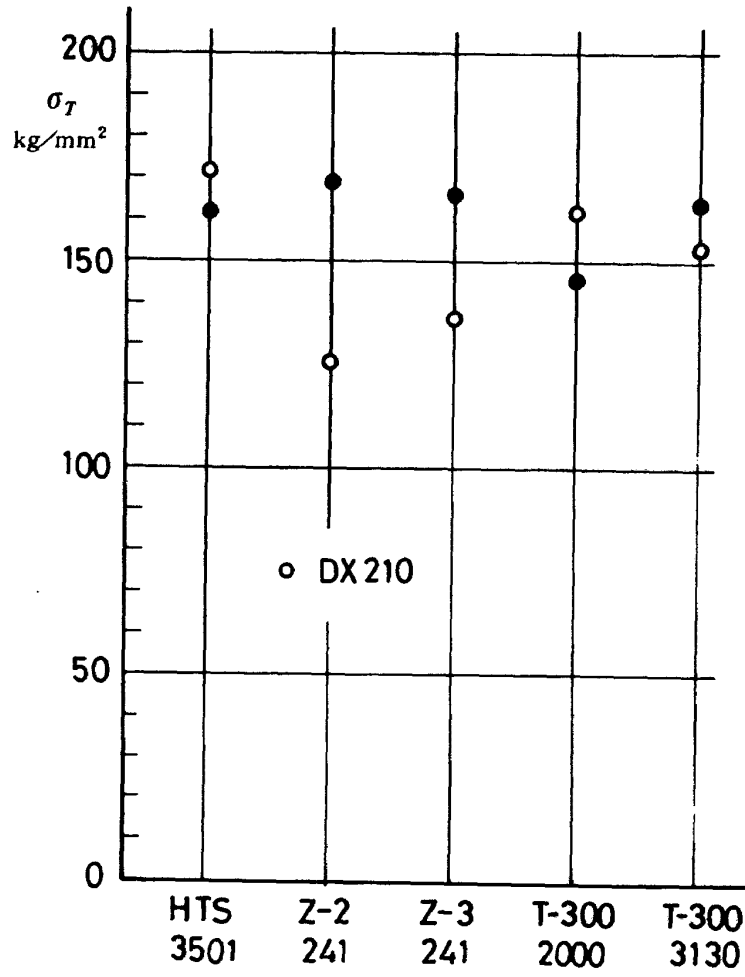


図 10 引張強度

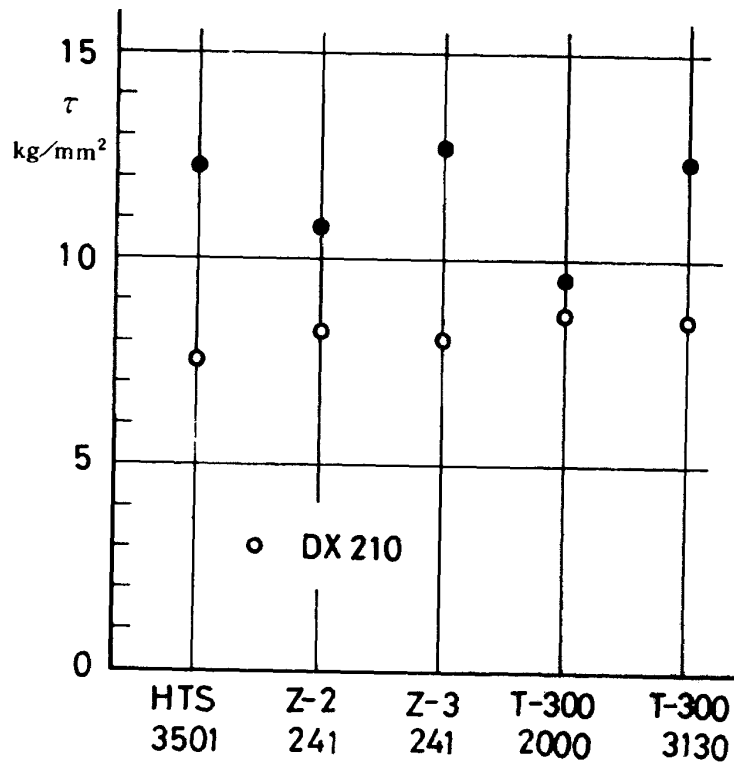


図 11 層間せん断強度

文 献

- 1) 古田敏康, 野口義男, 松嶋正道; カーボン複合材の強度特性, 航技研資料, TM-241, 1973年6月
- 2) J.E.Bell, The Effect of Glass Fiber Geometry on Composite Material Strength. Paper No.1583-60 American Rocket So. (1960)
- 3) Dow.N.F.and B.W.Rosen, NASA, CR-207 (1965)

既刊資料

TM-320	フレキシャ・ジンバル支持モーメンタム・ホイール搭載衛星のニューテーション運動	1976年11月	村上 力, 中島 厚
*TM-321	ファンエンジン FJR710 による円筒吸入消音ダクトの実機試験	1976年11月	渡辺 実, 鳥崎 忠雄, 武田 克巳, 小林 紘, 関根 静雄, 中山 普, 吉田 晃, 越 沼 威, 松田 幸雄
TM-322	40° 後退翼の非対称翼端板に関する低速風洞実験	1976年12月	宮本 義人, 北村 清美, 岡田 典秋, 村上 義隆
TM-323	Small Deviation 法による空冷タービンの空力性能に及ぼす冷却空気の影響の解析法	1976年12月	山本 孝正, 高原 北雄, 臼井 弘
*TM-324	新形式ガスタービン燃焼器の研究 (第2報 AS-20 系セクタ燃焼器の特性)	1977年 1月	田丸 卓, 鈴木 邦男, 山田 秀志, 堀内 正司, 下平 一雄, 石井 浅五郎
*TM-325	FACOM-230-アレイプロセッサーについて (I)——ハードウェアの性能——	1977年 2月	三好 甫, 末松 俊二
TM-326	超音速に於ける円錐フレヤーの圧力係数	1977年 3月	野溝 国生
TM-327	航技研 FACOM230-75 システムセンタルーチンの作成	1977年 4月	中村 孝, 石塚 只夫, 吉田 正廣
*TM-328	新形式ガスタービン燃焼器の研究 (第3報, 環状燃焼器 AS-250 の特性)	1977年 4月	田丸 卓, 鈴木 邦男, 小倉 五郎, 黒沢 要治, 石井 浅五郎
TM-329	補助ブースタをもったロケットの空力特性に関する研究	1977年 4月	近藤 洋史, 清水 福寿, 野田 順一, 関根 英夫, 竹内 理, 宮沢 文, 中野 富雄, 高 塚 均

* 印は配付先限定

航空宇宙技術研究所資料330号

昭和52年4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
