

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-525

各種カーボン複合材の曲げ疲労強度

古田敏康・松嶋正道・野口義男

1978年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

各種カーボン複合材の曲げ疲労強度*

古田 敏康** 松嶋 正道** 野口 義男**

Flexural Fatigue Strength of Various Carbon Fiber Composites

By Toshiyasu FURUTA, Yoshio NOGUCHI and Masamichi MATUSHIMA

This paper presents the results of experimental investigation into the dynamic mechanical properties of various composite materials with carbon fiber reinforcement.

The composites consist of standard epoxy resin DX-210, denatured epoxy resins #3130, #241, #3501 and reinforced high tension type of carbon fiber, GRAFIL AS made by Mitsubishi Rayon Co., CARBOLON Z-3 by Nippon Carbon Co., and TORAYCA T-300 by Toray Co. The experiment was carried out at room temperature.

It was found that both static bending strength and flexural fatigue strength of carbon fiber composites depend mainly on the properties of the epoxy resin matrix.

The ratio of 10^7 cycles flexural fatigue strength to the static flexural strength was 0.44-0.55 and flexural fatigue strength did not change after the test piece was soaked in water for 3 weeks.

1 はしがき

さきにエポキシ樹脂の種類を変えた各種カーボン複合材 (CFRP) の静的強度特性¹⁾を求めたが、ここでは同種の試験片についての両振り曲げ疲労強度を求めた。すなわち現在国内で販売されている高強度タイプの3種類のカーボン繊維に対して、標準エポキシ樹脂と、各社が開発した変性エポキシ樹脂を使用した一方向強化CFRPの両振り曲げ疲労試験を行い、それぞれ比較検討した。さらに一部の試験片については3週間水につけた後に曲げ疲労試験を行い、含水しない試験片による結果との比較を行った。

2 各種カーボン複合材の製造

使用した各種カーボン繊維の特性 (カタログ値) を表1に示す。

一般の構造用CFRPに使用される樹脂としてはエポキシ樹脂が最適とされており、そのなかでもシェル化学社のDX-210がCFRP用として広く用いられている。そこでまず各社のカーボン繊維に対してDX-210を使用したCFRPを作り、つぎに各メーカーが開発した変性エポキシ樹脂のCFRPを作って、それぞれ曲げ疲労強度を求めた。それぞれの一方向強化CFRPの成形条件はつぎの通りである。

表1 各種カーボン繊維の特性

カーボン繊維	引張強度 (kg/mm ²)	弾性率 (kg/mm ²)	製作会社
Grafil AS	270	19400	三菱レイヨン (株)
Carbolon Z-3	280	23000	日本カーボン (株)
Torayca T-300	280	24000	東レ (株)

(カタログ値)

* 昭和52年11月10日受付

** 機体第一部

i) DX-210 の場合 (各社の繊維に対して共通)

加圧時温度	170℃
予熱時間	約3分間
成形圧力	7 kg/cm ²
加圧時間	4時間

ii) #3501 の場合 (三菱レイヨン株)

加圧時温度	175℃
予熱時間	135℃で20分間
成形圧力	7 kg/cm ²
加圧時間	30分間
後硬化	175℃で3時間

iii) #241 の場合 (日本カーボン株)

加圧時温度	170℃
予熱時間	約5分間
成形圧力	7 kg/cm ²
加圧時間	4時間
後硬化	200℃で12時間

iv) #3130 の場合 (東レ株)

加圧時温度	160℃
予熱時間	8.5分間
成形圧力	7 kg/cm ²
加圧時間	3時間
後硬化	170℃で3時間

以上の成形には、いずれもホットプレスを使用した。型の上下面に一部には離型用としてブリーダークロス(テフロン)を使用した。試験素材の大きさは厚さ約3mm, 縦, 横, それぞれ300mmとし, 繊維の体積含有率の目標値は60%とした。各種カーボン複合材の繊維の組合せを表2に示す。

3 疲労試験片の製作

まず試験素材をダイヤモンドカッター付のFRP用スライサーで所定の幅に切断し, 試験片調整ホルダー(図1, B)にはさみ, 試料調整装置(図2)の超硬カッターで図3の試験片のように仕上げた。その後図1のAの曲率加工用ホルダーで板厚方向にダイヤモンドカッターで300mm Rの曲率をつけた。これは前報²⁾でも報告したように, 試験片の中央部で破壊が起るようにした。

4 曲げ疲労試験法

疲労試験機は航技研で複合材用に改造^{2), 3)}した定荷重型疲労試験機B-70型を使用した。すなわちこの試験機には起動時に生じる異常振幅を押える超過荷重防止装置が取付けてある。前報²⁾でも述べたように繊維強化複合材は試験機の起動時に生じる超過荷重に敏感で, クラックが生じやすい。このような防止装置をつけた試験機でなければ, 複合材では正確な疲労強度は求められない。防止装置付の試験機の写真を図4に示す。この試験機の仕様は最大荷重70kgで, 繰返し数は1,800cpmで, 最大振幅は土

表2 各種カーボン複合材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	#3501
Carbolon Z-3	DX-210	#241
Torayca T-300	DX-210	#3130

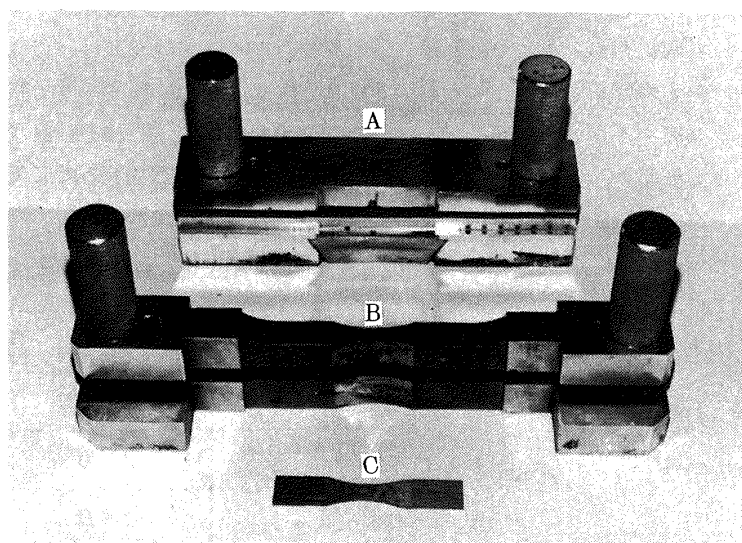


図1 試験片調整ホルダー

A: 曲率加工用ホルダー B: 試験片加工用ホルダー C: 試験片

8 mmである。

曲げ疲労試験の場合の4点曲げ荷重は図5のように与えるので、 σ_f は次式のように求められる。

$$\sigma_f = \frac{M}{Z} = \frac{3Wl}{bh^2} \quad (1)$$

ここで、

W : 荷重

l : 支点間距離(図5参照), $l = 30 \text{ mm}$ に設定してある。

b, h : 試験片の幅と厚さで, $b = 10 \text{ mm}$, $h = 2.5 \text{ mm}$ とした。

Z : 断面係数 ($bh^2/6$)

つぎに繰返し応力を σ とし, N を繰返し数とすると, つぎの実験式が得られる。

$$\sigma = A - B \log N \quad (2)$$

A, Bは定数で, Aは $N=1$ のときの時間強度で, 近似的には静的曲げ強度を表わし, Bは直線の傾きを表わす。過去いくつかのCFRPで行なわれた疲労試験では, 片対

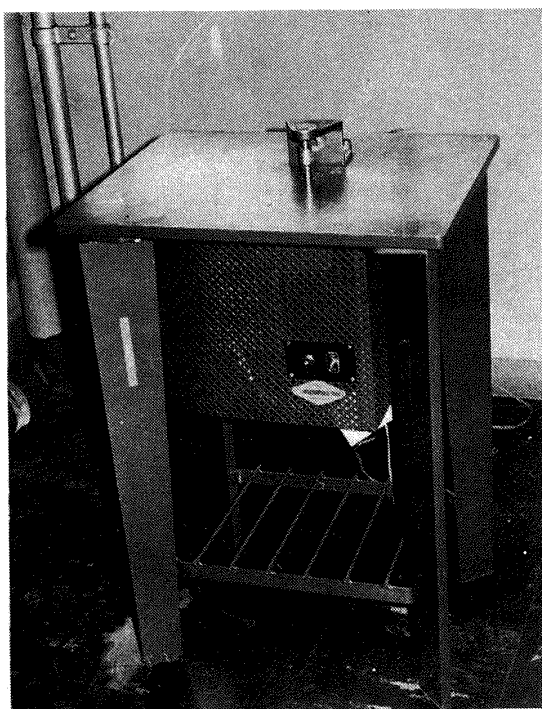


図 2 試料調整装置

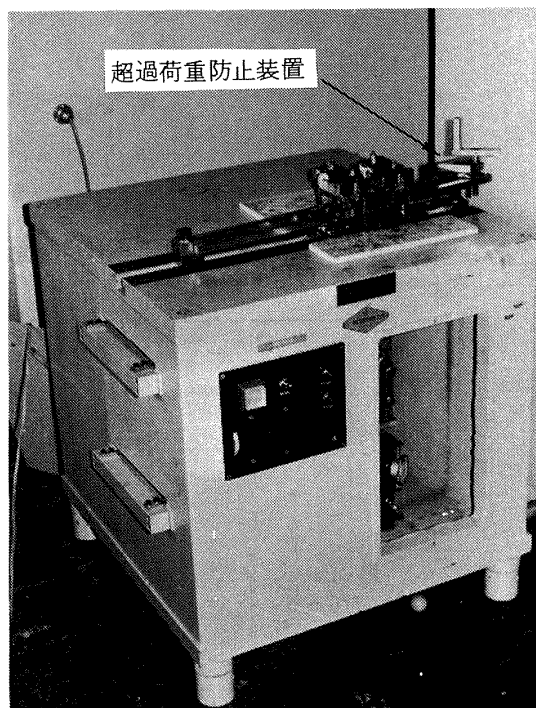


図 4 B-70型曲げ疲労試験機

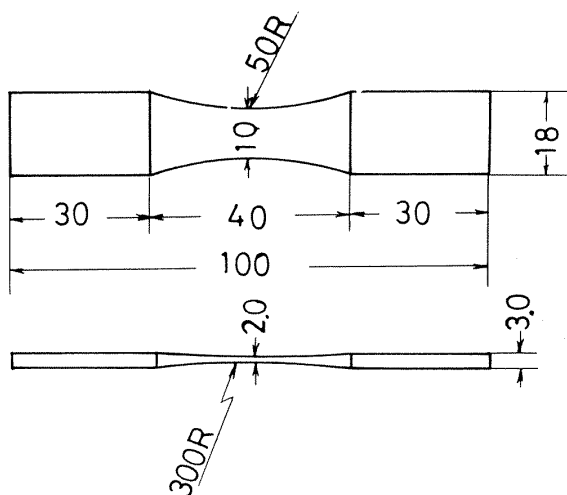


図 3 曲げ疲労試験片

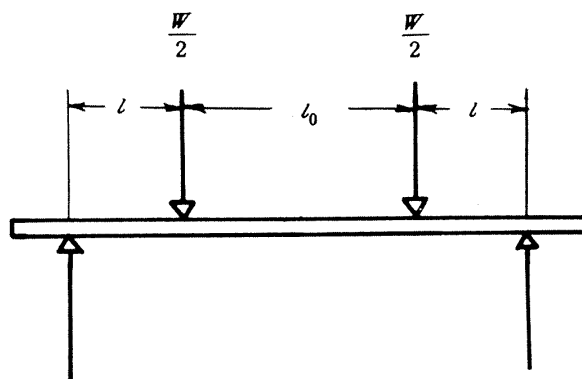


図 5 4点曲げ線図

数座標上で、S-N曲線は直線²⁾とみなせた。本研究の場合も後述するように、片対数座標上で、ほぼ直線関係にあるので、実験式としては(2)式が適用できる。(2)式に対して寿命側で最小二乗法をあてはめてS-N曲線を描いた。

5 曲げ疲労試験結果

各種CFRPの静的曲げ強度の試験結果¹⁾を表3に示す。まずCFRP用に開発された標準エポキシ樹脂DX-210のCFRPの曲げ疲労強度を求め、つぎに各社で開発した変性エポキシ樹脂のCFRPについても曲げ疲労強度を求め、それぞれ比較検討を行った。

表3 各種カーボン複合材の静的曲げ強度

CFRPの種類	曲げ強度 (kg/mm ²)
Grafil AS/DX-210	151
Grafil AS/#3501	180
Carbolon Z-3/DX-210	152
Carbolon Z-3/#241	165
Torayca T-300/DX-210	168
Torayca T-300/#3130	188

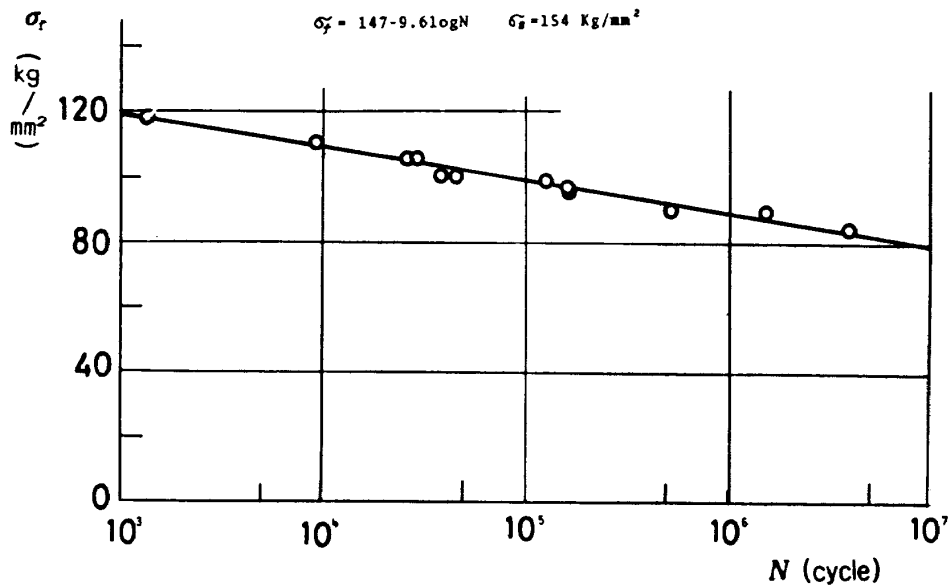


図6 Grafil AS/DX-210のS-N曲線 ($V_f = 61\%$)

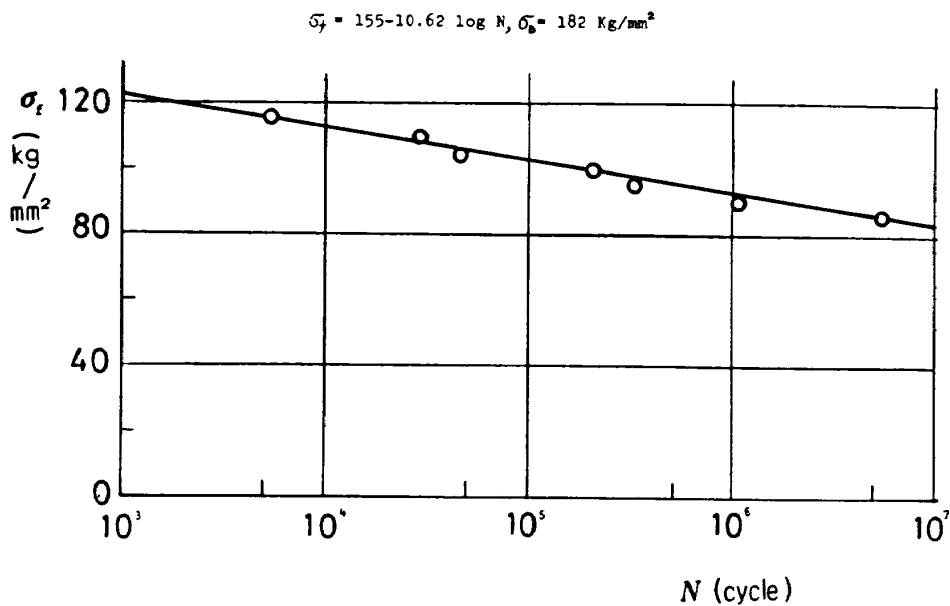


図7 Grafil AS/#3501のS-N曲線 ($V_f = 60\%$)

またGrafil AS/DX-210 については試験片を3週間水につけた状態にし、一個ずつ取り出して疲労試験を行い、含水しない場合の試験結果と比較を行った。これは一部の樹脂についてのCFRPの静的強度は含水させると強度の低下を生ずるといわれているので、ここでは曲げ疲労試験について、その確認を行ったものである。

5.1 Grafil AS 複合材の疲労試験結果

Grafil AS/DX-210 のCFRPのS-N 曲線を図6に示し、AS/#3501のCFRPのS-N曲線を図7に、両者を比較したのが図8である。いずれも 10^7 回迄は直線とみなすことができ、疲労限は認められなかった。図8に示

すようにカーボン繊維の種類を変えず、使用樹脂のみを変えた場合にはS-N曲線は殆んど平行で、従って直線の傾斜Bはほぼ等しい値を示している。 10^7 回に対する疲れ強さも、表2に示す静的曲げ強度の結果と同様に、変性エポキシ樹脂CFRPの方が強い値を示している。

つぎにAS/DX-210のCFRPについて、試験片に加工後水中に3週間浸したものを含水試験片と称し、そのままのものを含水しない試験片と称し、この場合のS-N曲線を図9に示す。白丸が含水しないもので、黒丸が含水後の実験点を示す。この結果からもわかるように、DX-210樹脂を使用した一方向強化CFRPではその差は全く認められなかった。

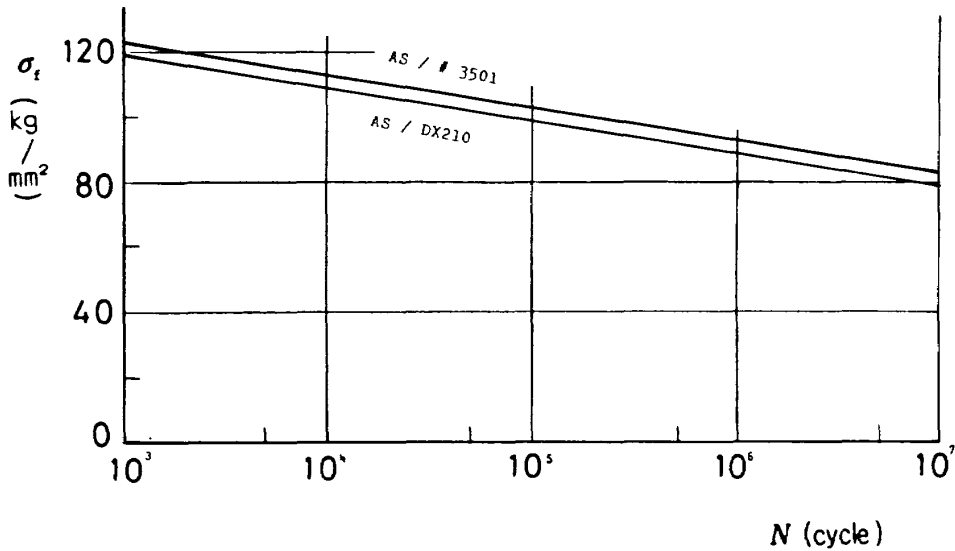


図 8 Grafil AS カーボン複合材のS-N曲線の比較

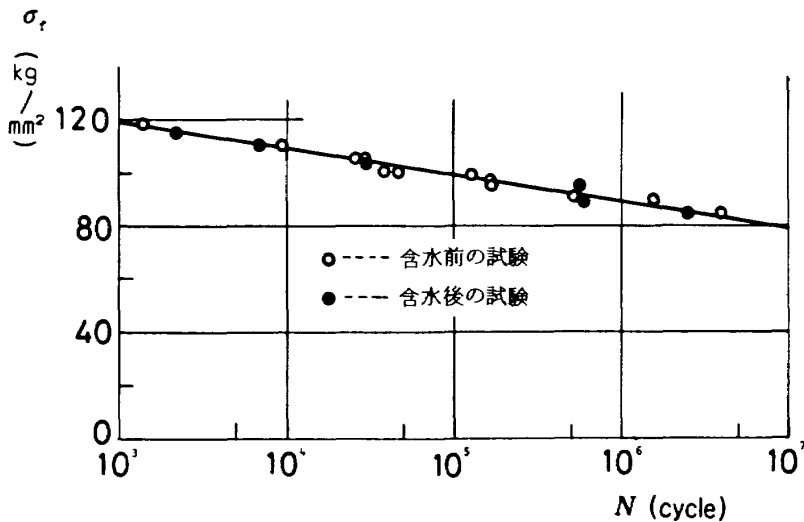


図 9 Grafil AS/DX210 の含水前と含水後のS-N曲線

5.2 Carbolon Z-3 複合材の疲労試験結果

ここではZ-3/DX-210と、Z-3/#241の一方強化CFRPの曲げ疲労強度を求めた。図10が、DX-210のCFRPのS-N曲線で、図11が#241のCFRPのS-N曲線で、両者を比較したのが図12である。前者の実験結果と同様に、変性エポキシ樹脂を使用したものの方が、疲労強度ははるかに増加し、また両者のS-N曲線は殆んど平行になった。

5.3 T-300 複合材の疲労試験結果

T-300/DX-210 CFRPのS-N曲線を図13に、T-300/#3130 CFRPのS-N曲線を図14に示し、両者を比較したものが図15である。この場合でもやはり変性エポキシ樹脂を使用したものが疲労強度は高く、S-N曲線は平行になった。

つぎに式(2)で、各実験の定数A, B, 10^7 回の時間強度(σ_f^*), 静的曲げ強度(σ_B)ならびに σ_f^*/σ_B , A/σ_B

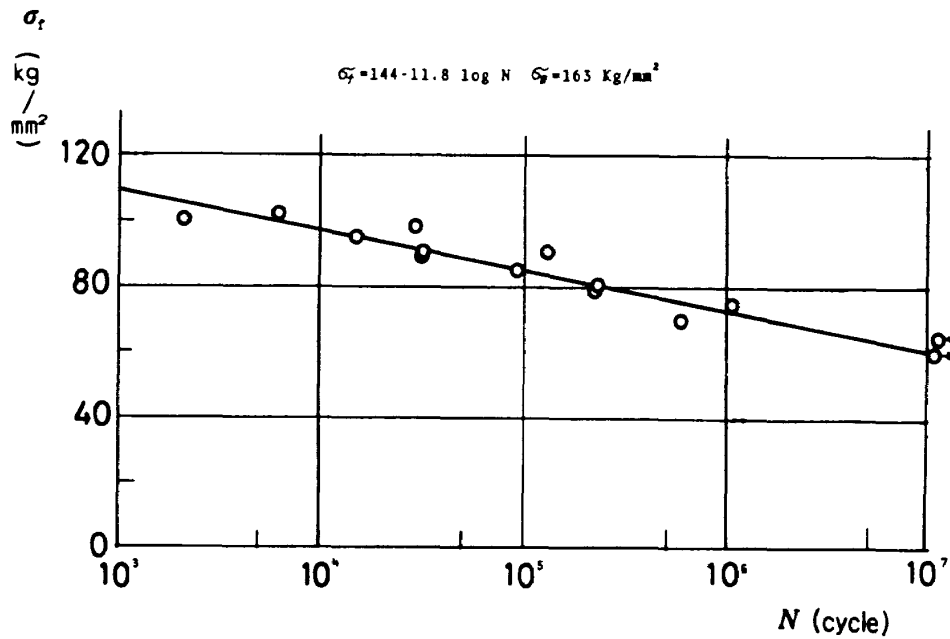


図 10 Carbolon Z-3/DX-210 の S-N 曲線 ($V_f = 64\%$)

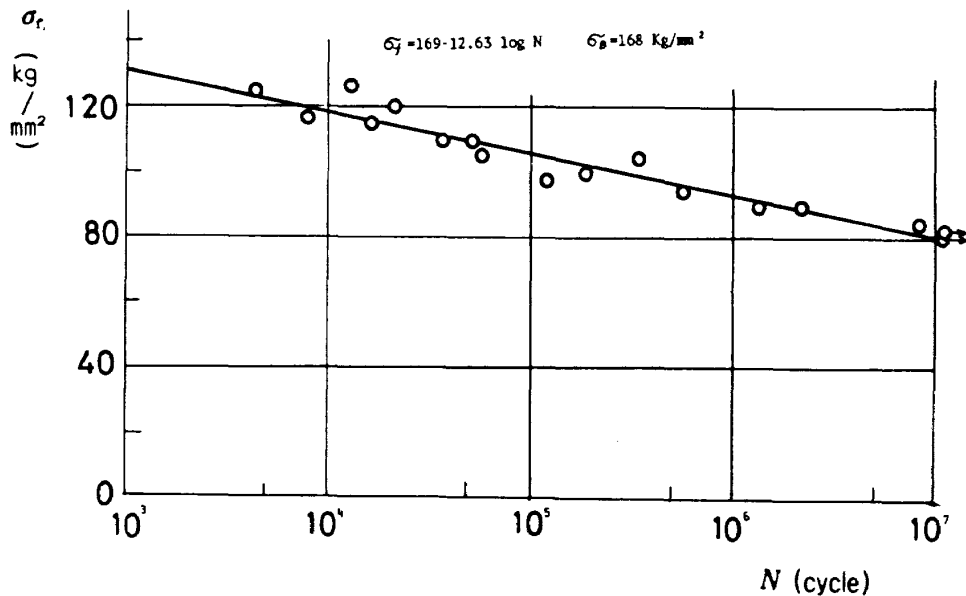


図 11 Carbolon Z-3/#241 の S-N 曲線 ($V_f = 60\%$)

などの疲労特性を表4に示す。

ここで A/σ_B の値は1に近い値で、曲げ疲労試験から求めた A の値と、静的曲げ強度 (σ_B) の値はほぼ等しい値である。これはここで用いた曲げ疲労試験機は前にも述べたように、航技研で複合材用に開発した超過荷重防止装置付の試験機を用いた結果と思われる。

また S-N 曲線の傾きを表わす B の値は、CFRP の各グループ毎にほぼ等しい値になっている。これは使用樹脂を変えても、同種のカーボン繊維を使用すれば S-N 曲線は殆んど平行となる。

つぎに σ_f^*/σ_B の値は Carbolon Z-3/DX-210 以外は殆んど 0.48 前後の値となっている。

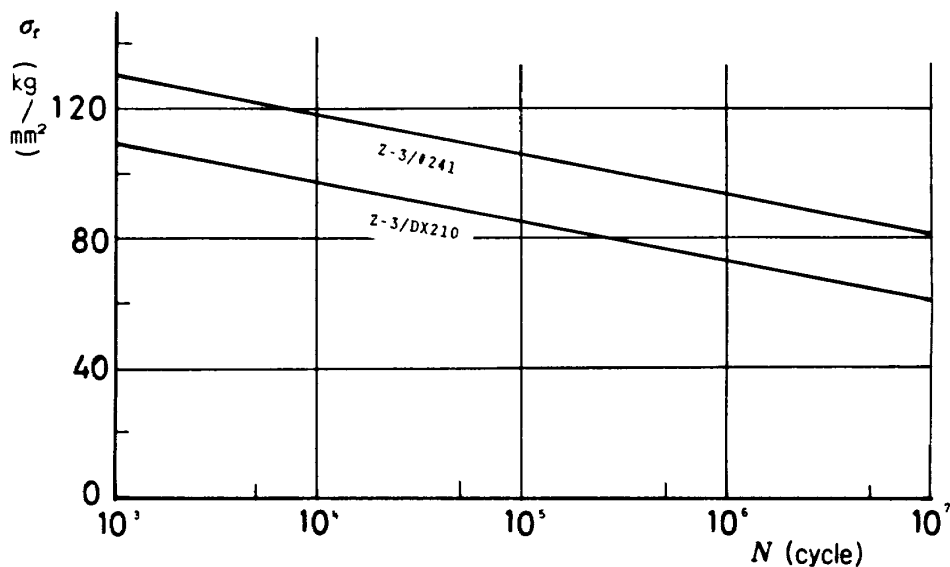


図 12 Carbolon Z-3 複合材の S-N 曲線の比較

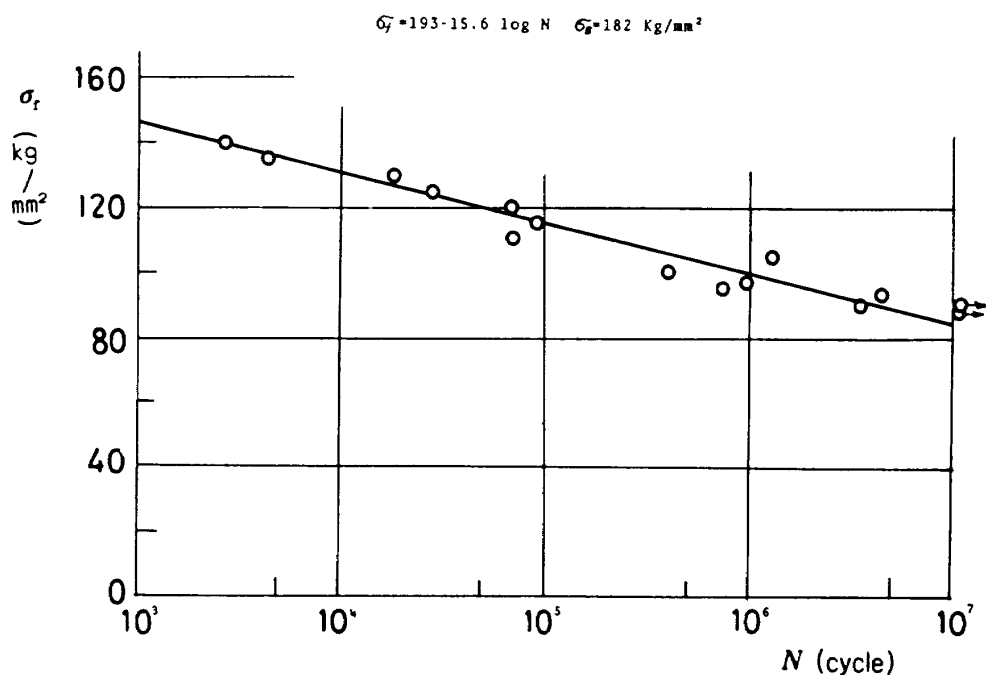


図 13 Torayca T-300/DX-210 の S-N 曲線 ($V_f = 65\%$)

6 あとがき

さきに各種カーボン繊維について、標準エポキシ樹脂D X-210と、各社で開発した変性エポキシ樹脂を使用した各種CFRPの静的強度について報告¹⁾したが、今回は同種のCFRPの曲げ疲労強度についてまとめたものである。以上を総合すると、変性エポキシ樹脂を使用したCFRPの方が、静的強度ならびに曲げ疲労強度とも優れていることがわかる。現在米国はじめ諸外国でも航空機構造材用C

FRPにはすべて変性エポキシ樹脂が使用されている理由が、これらの実験結果からも類推できる。この他に多層積層材としてのCFRPの静的強度、疲労強度、低温特性、含水特性なども航空機構造材として重要な事項であるので、この種の試験も行っている。

最後にこの報告書をまとめるに当り、カーボン繊維ならびに試験素材の成形について便宜をはかっていただいた三菱レイヨン(株)、日本カーボン(株)、東レ(株)の関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

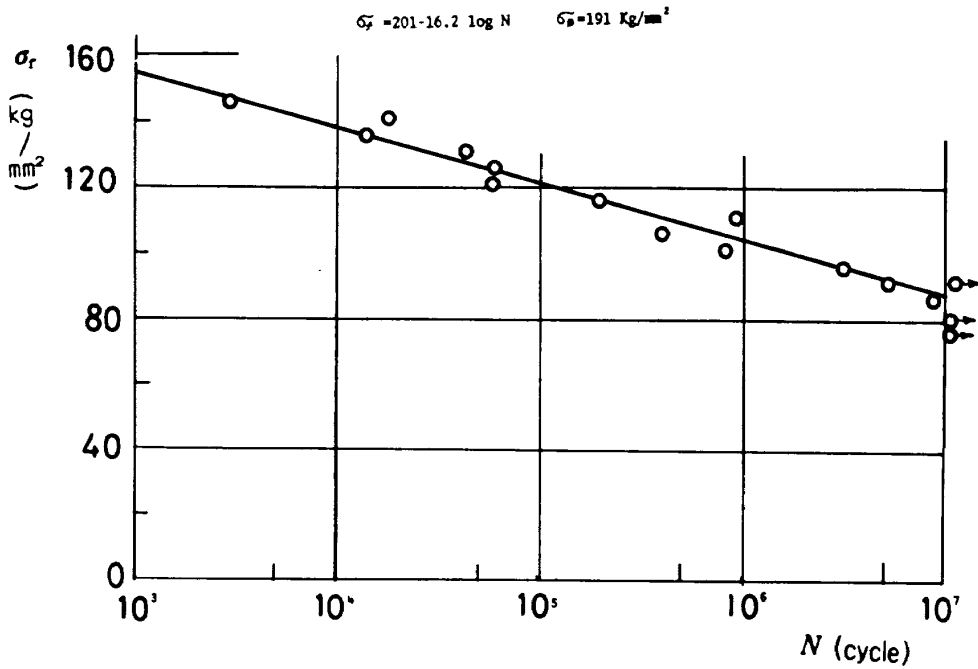


図 14 Torayca T-300/#3130 の S-N 曲線 ($V_f = 62\%$)

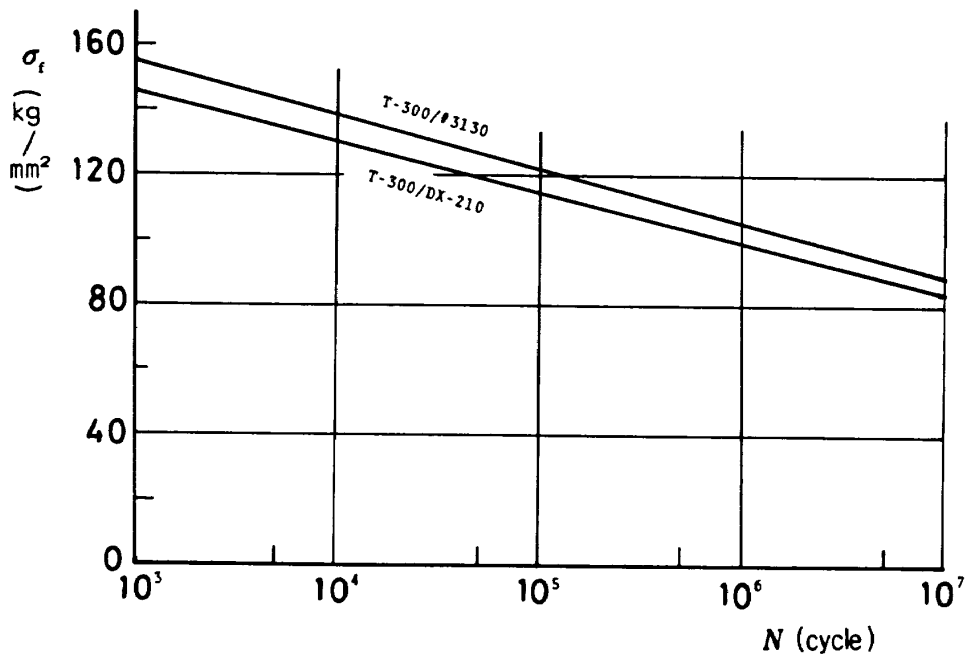


図 15 Torayca カーボン複合材の S-N 曲線の比較

表4 各種カーボン複合材の疲労特性

各種CFRP	V_f (%)	σ_B	A	B	σ_f^*	σ_f^*/σ_B	A/σ_B
Grafil AS/DX-210	61	154	147	9.67	80	0.52	0.95
Grafil AS/#3501	60	180	155	10.62	84	0.46	0.86
Carbolon Z-3/DX-210	64	163	144	11.80	61	0.37	0.88
Carbolon Z-3/#241	61	168	169	12.60	81	0.48	1.00
Torayca T-300/DX-210	65	182	193	15.60	84	0.46	1.06
Torayca T-300/#3130	62	191	201	16.20	88	0.46	1.05

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

σ_f^* : 10^7 回の疲れ強さ

文 献

- 1) 古田, 松嶋, 野口; 各種カーボン複合材の静的強度特性, 航技研資料, TM-330, 1977年4月
- 2) 古田, 野口, 松嶋; 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

- 3) 下河, 浜口; 航空機用アルミニウム合金2024-T4板における疲れ寿命のばらつきとS-N曲線との関係, 航技研報告, TR-367, 1974年4月

航空宇宙技術研究所報告 525号

昭和53年1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
