

ISSN 0452-2982  
UDC 620.168.3  
539.382  
620.178.3  
620.179.152

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-736

直交積層 CFRP の引張特性試験方法に関する評価

野口 義男

1999年1月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1 . ま え が き .....	2
2 . 供 試 材 料 .....	2
2.1 素 材 構 成 .....	2
2.2 試 験 片 形 状 .....	2
2.3 試 験 片 製 作 .....	3
3 . 試 験 装 置 .....	3
4 . 静 的 特 性 試 験 .....	3
4.1 試 験 方 法 .....	3
4.2 試 験 結 果 .....	3
4.3 破 断 様 相 .....	4
4.4 弾 性 率 の 検 討 .....	4
5 . 疲 れ 試 験 .....	6
5.1 試 験 方 法 .....	6
5.2 破 断 様 相 .....	6
5.3 S - N 関 係 結 果 .....	10
6 . ま と め .....	12
7 . あ と が き .....	12
参 考 文 献 .....	12
付 録 .....	13

# 直交積層 CFRP の 引張特性試験方法に関する評価\*

野 口 義 男\*<sup>1</sup>

## Evaluation of Test Method on the Tensile Properties of Cross-ply CFRP \*

Yoshio NOGUCHI \*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

To establish a standardized test method for evaluating the strength characteristics of composite materials, we performed tensile tests on CFRP. Carbon fiber with high-strength and intermediate/elastic/modulus was used for the reinforced fiber with epoxy resin. Test plates were three kinds of cross-ply CFRP: four plies, eight plies and twelve plies, where all lamination numbers were symmetrical in respect of the unidirectional fiber reinforced prepreg. A straight-sided coupon test piece was used, and the cases in which the tip shape of tab material for the grip portions was tapered and at right angle were compared. Static tensile strength tests and tensile fatigue strength tests of each cross-ply CFRP were carried out. Damage and destruction aspects of the test pieces were observed by an X-ray radiography penetrative crack detection method. The tensile fatigue strength of cross-ply CFRP with lower lamination number was reduced. Due to adhesion peeling in the taper, the effect of the taper disappeared in the tip of the grip portion tab of the test piece.

**Key words:** Composite materials, Carbon/epoxy, Cross ply laminates, Tensile test, Fatigue strength, Damage, X-ray radiography

### 概 要

繊維強化複合材料の力学的特性を評価する試験技術の確立を目指した研究として、炭素繊維強化樹脂複合材(CFRP)の引張特性試験方法に関する検討を行った。CFRPの基材構成は、強化繊維に高強度・中弾性率の特性を有する炭素繊維(T800H)を用い、母材はエポキシ系樹脂(#3631)である。供試材料は、一方向繊維強化基材を対称積層による $[0/90]_s$ 、 $[0/90]_{2s}$  および $[0/90]_{3s}$ の直交積層CFRPとした。3種類の直交積層材について、静的引張特性試験および引張疲れ試験を実施した。引張試験における試験片形状の検討として、つかみ部の補強タブの先部形状を傾斜および直角とした場合を比較した。試験片の損傷状況および破壊様相の把握にX線透過探傷法を適用して観察した。

\* 受付け 平成10年9月9日受付 (received 9 September 1998)

\*<sup>1</sup> 構造研究部 (Structures Division)

## 1. まえがき

繊維強化樹脂複合材料(FRP)の開発と応用研究に、先進複合材料の一つと言われる炭素繊維強化樹脂複合材料(CFRP)を対象としたものがある。省エネルギーの追求から軽量構造材料として、CFRPを航空機部材などへ使用することが拡大している。強化基材としての炭素繊維はポリアクリルニトリル(PAN)やピッチ等を出発原料とし、形態(連続繊維、短繊維)や熱処理工程(耐炎化、炭化および黒鉛化)などの条件によって各種特性値を有する繊維が作られる。炭素繊維を高強度系、高弾性率系、高伸度系に分類しても各社より多くの繊維が販売されている。

FRPは強化繊維、母材樹脂、繊維含有率、積層構成などの組み合わせによって、必要とする特性値の材料が作られる。積層FRPにおいては破損過程が多様であり、何をもって破壊と定義したかで強度に差があることを考慮しなければならない。さらに疲れ強さ特性の取得には多大の時間を要する等により、個別の積層構成につき試験が行われているのが現状である<sup>1)・12)</sup>。これらによりFRPの力学的特性について各種データの蓄積がされているものは少ない。

本研究における供試材料は、高強度・中弾性率のPAN系炭素繊維(引張強さのカタログ値は5.6 GPa)とエポキシ樹脂による一方繊維強化基材を用いて、積層数を変えた3種類の直交積層CFRPとした。引張試験方法の評価として、繊維強化複合材料の力学的な主軸となる繊維方向について、静的引張試験および定荷重の引張-引張による繰り返し疲れ試験を実施した。さらに、これら試験に用いた試験片形状の評価として、つかみ部補強用のタブの先部を傾斜および直角とした場合も併せて検討した。

## 2. 供試材料

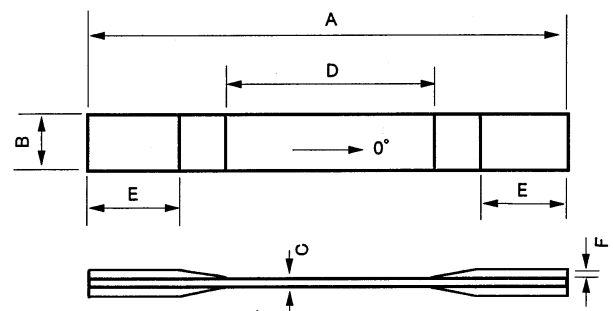
### 2.1 素材構成

基材は、炭素繊維(T800H)と180 硬化型エポキシ樹脂(#3631)による一方繊維強化プリプレグ(P2212-15:東レ(株))を用いた。供試材料は $[0\ 90]_s$ 、 $[0\ 90]_{2s}$ および $[0\ 90]_{3s}$ の積層構成によって平均厚さが0.5 mm, 1.1 mmおよび1.7 mmとなる直交積層材(以下においてはS, 2Sおよび3Sとする)である。これらの直交積層材寸法は500 mm×500 mmとし、オートクレーブ法により作成した。直交積層材の成形条件は、加熱温度180℃、加圧力0.6 MPa、において硬化成形時間に2時間の保持としたノンブリード成形法によって各3枚ずつ製作した。各直交積層材の繊維体積含有率の平均値は、57%または58%である。

### 2.2 試験片形状

FRPの静的引張試験方法は、米国材料試験規格ASTM D 3039<sup>13)</sup>が歴史的に古く、参考にした報告例も多い。なお、同規格は改定されてASTM D 3039/D 3039M規格<sup>14)</sup>となった。我が国では、CFRP関係の力学的特性試験方法の標準化に関する調査研究を経て、CFRPの引張試験方法が日本工業規格JIS K 7073<sup>15)</sup>として制定された。国際標準化機構(ISO)における規格では、プラスチック関係の引張試験方法としてISO 527-1~5が審議中である。その中にFRPの試験条件がDIS 527-4<sup>16)</sup>、および一方FRPの試験条件がDIS 527-5<sup>17)</sup>となり規格制定の最終段階にある。これらは翻訳され、ISOとの整合化を計ったJIS規格になる予定である<sup>18)</sup>。上記規格において、直交積層材や織物積層材を適用範囲とした試験片は、図1に示した様な両端のつかみ部に補強タブを接着した短冊形状である。タブの材料には、CFRPよりも軟質なGFRP等を用いて、つかみ部ですべりが生じないようにする。試験片の寸法は、各規格によって微妙に異なっているのが現状である。

一方、FRPの引張疲れ試験方法のISO規格は現在のところ存在しない。各国におけるFRPを適用範囲とした引張疲れ試験方法としてはASTM D 3479/D 3479M規格<sup>19)</sup>があり、CFRPの引張疲れ試験方法としてはJIS K 7083規格<sup>20)</sup>が制定されている。両規格における引張疲れ用試験片は、ASTM規格では引張試験方法<sup>14)</sup>と同じ形状と寸法のもの。JIS規格においても基本的には引張試験方法<sup>15)</sup>と



記号	試験片の部位	ASTM D 3039M	JIS K 7073	ISO/DIS 527-4
A	全長	250	200以上	250
B	幅	25	25	25または50±0.5
C	厚さ	2.5	2~3	2~10
D	評定部の長さ		100以上	150±1
E	つかみ部の長さ		35以上	50
F	タブの厚さ	1.5	1~2	1~3
	タブの傾斜部	5~90°	15~20	-

単位: mm

図1 引張試験方法規格における試験片の形状と寸法

同じ試験片形状である。ただし寸法は、図 1 において、厚さ (C) を  $2 \pm 0.4$  mm、評定部の長さ (D) を 70 mm 以上、つかみ部の長さ (E) を 50 mm 以上、に変更している。

そこで本評価試験における直交積層材の試験片は、上記の規格に準拠して幅 25 mm の短冊状とした。なお、試験片のタブ材料は織物 GFRP とし、タブの先部を傾斜および直角 (傾斜なし) のものを製作した。これらの試験片の形状と寸法を図 2 に示した。以下では、タブの先部が傾斜付きは a 試験片、タブの先部を直角のものは b 試験片とし、各直交積層材の略記号の後に a または b を付記して示す。ここで、試験片の区分をまとめて表 1 に示した。

### 2.3 試験片製作

各直交積層材の成形板の中央部分において 220 mm × 260 mm (a 試験片を 10 本分) または、200 mm × 260 mm (b 試験片を 10 本分) を採取して試験片用素板とした。

試験片つかみ部の端部補強用タブ材には、ガラス繊維を用いた朱子織物 (WE181D: 日東紡 (株)) と、120 硬化型エポキシ樹脂 (2500: 東レ (株)) によるプリプレグを 6 層積層し、オートクレーブ法 (加熱温度 120 , 加圧力 0.6 MPa, および硬化成形時間 2 時間) で GFRP を成形した (板厚さは約 1.5 mm)。前記試験片用素板の端部両面へ GFRP を接着するには、加熱硬化型エポキシ樹脂フィルム接着剤 (AF-126-2: 住友 3M (株)) を適用してオートクレーブ法 (加熱温度 120 , 加圧力 0.3 MPa, および

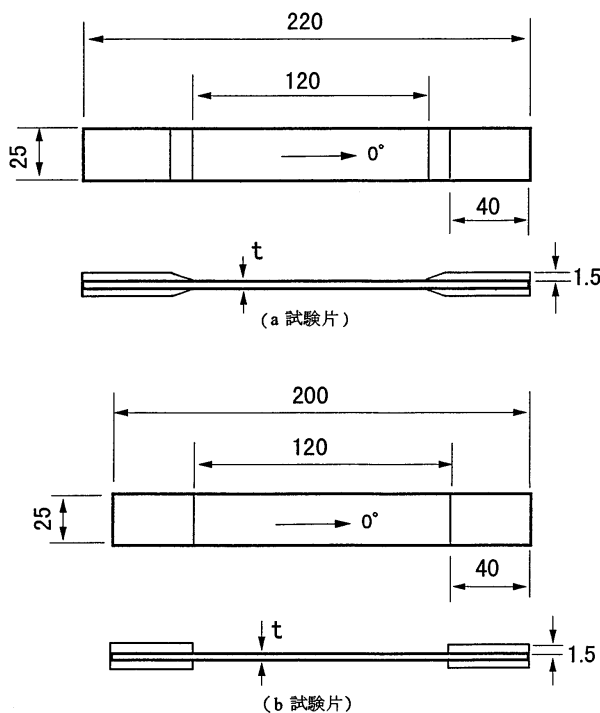


図 2 引張試験片の形状と寸法

硬化時間 2 時間) により固着した。

試験片は、幅が 25 mm で長さが 220 mm または 200 mm の短冊形状とし、ダイヤモンドカッターを使用した切断機で切出し加工を行った。なお供試材料の成形から試験片の加工については、東レ (株) に製作を依頼した。

### 3. 試験装置

試験室の環境は、温度  $23 \pm 3$  , 相対湿度  $50\% \pm 5$  % の雰囲気とした。静的引張特性試験、および引張疲れ試験は、荷重容量が 100 kN の電気油圧サーボ式材料試験機 (8501: インストロン (株)) を使用した。つかみ具は油圧式を用いて、試験片のつかみ部を試験中は一定圧力で締め付けるようにした。下部つかみ具を取り付けている本試験機のアクチュエータ軸は、油圧式つかみ具への油供給ホースによって回転する可能性があった。そこで同影響を防ぐためのガイドを取り付けて試験を行った。

### 4. 静的特性試験

#### 4.1 試験方法

引張特性測定用の試験片には試験片評定部の中央両面の長手方向に、ひずみゲージ (ゲージ長さ 5 mm) をシアノアクリレート系の常温高速硬化型接着剤を用いて貼付し、ひずみ履歴の計測用とした。引張試験における試験速度は、材料試験機のアクチュエータの移動速度を毎分 1 mm で実施した。なお、材料試験機よりの荷重出力と、ひずみゲージより動ひずみ計 (DPM-611B: 共和電業 (株)) を介しての出力は、X - Y 記録計 (WX4422-Z11: グラフテックス (株)) に試験片が破断に至るまで連続的に記録して、引張荷重と引張ひずみの関係を得た。

#### 4.2 試験結果

静的引張特性試験は各 5 本の試験片について行い、それぞれの弾性率、破断時の強さ、および破断伸度を取得した。引張荷重と引張ひずみの関係の結果として、図 3 に a 試験片の場合による各一例を示した。荷重とひずみの

表 1 試験片の区分

試験片	積層構成	厚さ (mm)	繊維体積 含有率 (%)	タブ形状
Sa	[0°/90°] <sub>s</sub>	0.53 ~ 0.57	57	傾斜
Sb	[0°/90°] <sub>s</sub>	0.54 ~ 0.56	58	直角
2Sa	[0°/90°] <sub>2s</sub>	1.08 ~ 1.12	57	傾斜
2Sb	[0°/90°] <sub>2s</sub>	1.10 ~ 1.12	58	直角
3Sa	[0°/90°] <sub>3s</sub>	1.66 ~ 1.70	57	傾斜
3Sb	[0°/90°] <sub>3s</sub>	1.63 ~ 1.70	58	直角

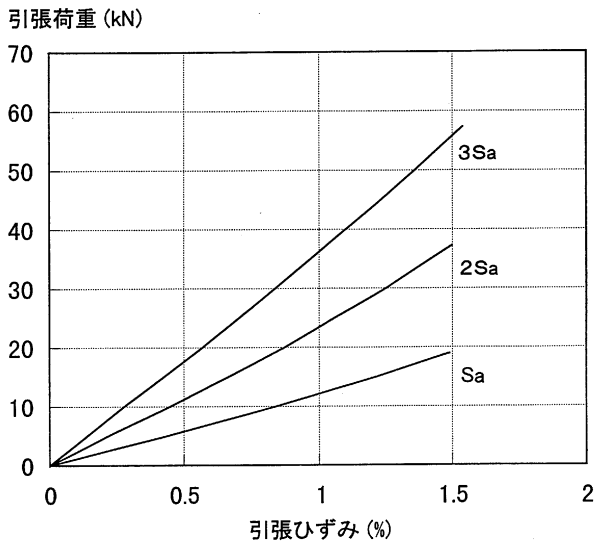


図3 静的引張試験における荷重とひずみの関係

表2 静的引張特性試験結果

試験片	弾性率 $E_t$ (GPa)	強さ $s_B$ (MPa)	破断伸度 $e_{max}$ (%)
Sa	86.0	1310	1.48
Sb	84.6	1308	1.50
2Sa	85.0	1332	1.51
2Sb	85.1	1330	1.53
3Sa	83.0	1339	1.56
3Sb	82.7	1349	1.52

関係は、何れも硬化型(下に凸な曲線)を呈している。そこで弾性率( $E_t$ )については、荷重とひずみ曲線における初期の直線部分(ひずみ量で0.1%と0.3%,増加分として0.2%<sup>4)</sup>)を用いて(1)式により算出した。

$$E_t = (DP/A_m)/De = D_s/De \quad (1)$$

ここで、 $DP$ は荷重の増加分、 $A_m$ は試験片の平均断面積、 $De$ は $DP$ または $D_s$ に対応するひずみの増加分、 $D_s$ は応力の増加分である。

強さ( $s_B$ )は、(2)式により算出した。

$$s_B = P_B/A_m \quad (2)$$

ここで、 $P_B$ は最大荷重である。

静的引張特性試験による各試験片個々の弾性率と強さの算出値、および破断伸度の測定値は付録にそれぞれ示し、表2には各試験結果の平均値をまとめて示した。

タブの先部が傾斜と直角による静的特性値への差は少なかった。強さと破断伸度は、積層数が少なくなるに伴って若干低下する傾向にある。

#### 4.3 破断様相

静的引張試験片の破断は、全て最大荷重において瞬時に90方向の分離破断を生じた。全ての試験片で破断場所が評定部内だけではなく、つかみ部内やタブ先部近傍における破断との複数箇所であった。破断後の試験片は、軟X線透過探傷装置(SV-100AW:ソフテックス(株))を使用して、X線フィルム(FR:富士写真フィルム(株))にX線透過撮影を行い、検討用の資料とした。

図4および図5には、a試験片とb試験片の静的特性試験によって破断した各直交積層材のX線透過写真例を示す。各試験片の評定部内で黒くなっている部分は、造影剤(ヨウ化亜鉛: $ZnI_2$ の希釈液)が浸透した、き裂や層間剥離の箇所である。破断箇所近傍は、破断時における二次的な層間剥離破損が生じたために複雑な破壊様相になったと判断した。

このことは、静的引張試験において90°方向に損傷したき裂が発生、進展する状況を次に説明する別の試験片で観察を行い確認した。その手順は、同一試験片に静的強さの平均値に対して70%、80%、90%、100%荷重の後、再び除荷をした状態それぞれにおいて、試験片のX線透過撮影を繰り返した。図6にSa試験片での結果を示す。この場合における90°方向のき裂の進行は、静的強さの70%後;両幅端より90°方向のき裂が内部方向に向かって生じた(き裂の数は2~3本/cm)。静的強さの80%後および90%後;短いものと長い90°方向のき裂があり、それらの間隔は疎らであった(き裂の数は8~10本/cm)。静的強さの100%後;荷重増大によって、き裂の数は増加したが、全幅に達する90°方向のき裂は、まだ見あたらない(き裂の数は15~20本/cm)。再度の静的強さの100%後;100%荷重直後に破断した。ここでは破断箇所近傍での損傷が大きく、全幅に達する90°方向のき裂も多数確認できた。

図7および図8には、2Saと3Sa試験片による同様の結果を示した。これらでは、静的強さの70%後および80%後における90°方向のき裂は確認できなかった。なお、2Saでは90%後でも90°方向のき裂が見あたらない。その後は、静的強さの98%および89%において破断したものである。これらによって、本直交積層材は、何れも最大荷重において脆性的な破壊を示すと判断できる。

#### 4.4 弾性率の検討

直交積層材の静的引張特性試験結果の弾性率について、複合則による算出値との比較を試みる。複合則とは、複合材料の特性を構成素材の特性値とその体積含有率のみにより表現されるとする関係式である。弾性率が単純な線形関係で与えらると仮定すると、直交積層材の引張弾性率( $E_t$ )は(3)式となる。

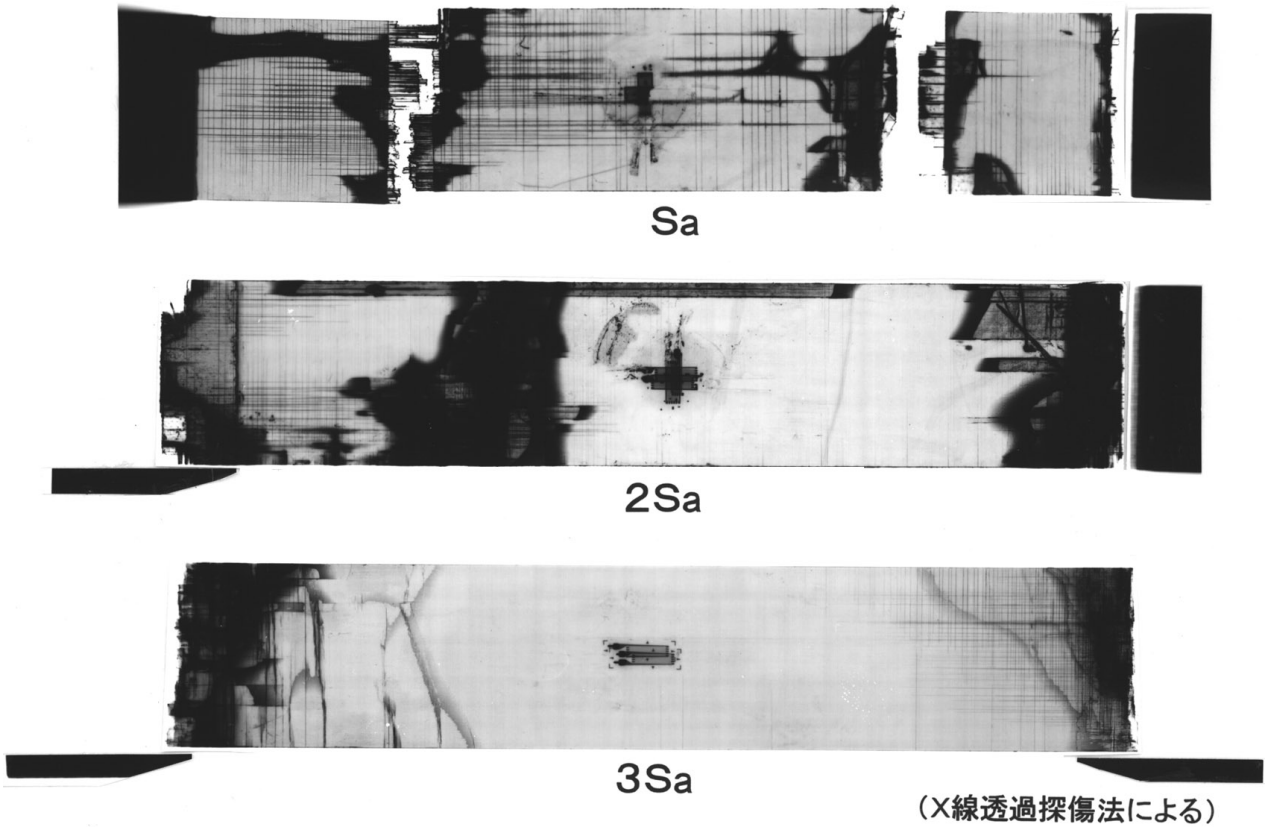


図4 静的引張試験における破断様相例 (a 試験片)

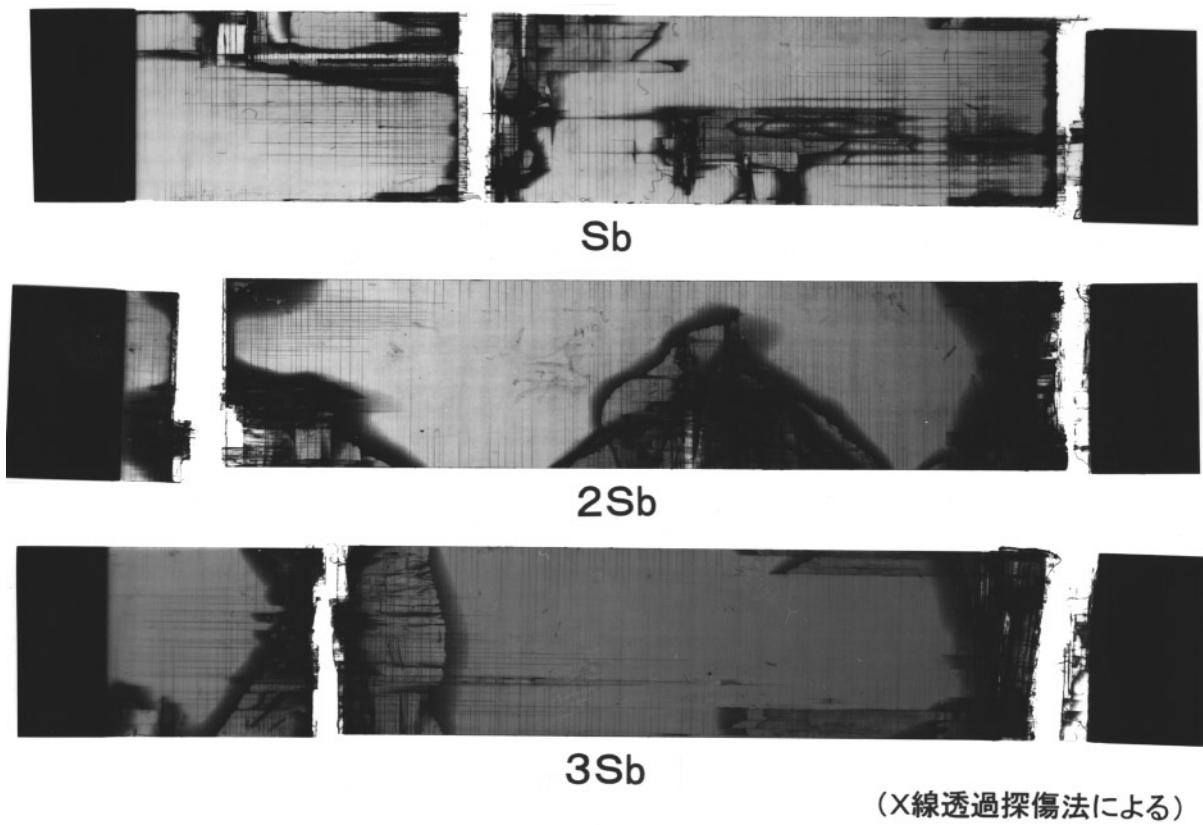


図5 静的引張試験における破断様相例 (b 試験片)

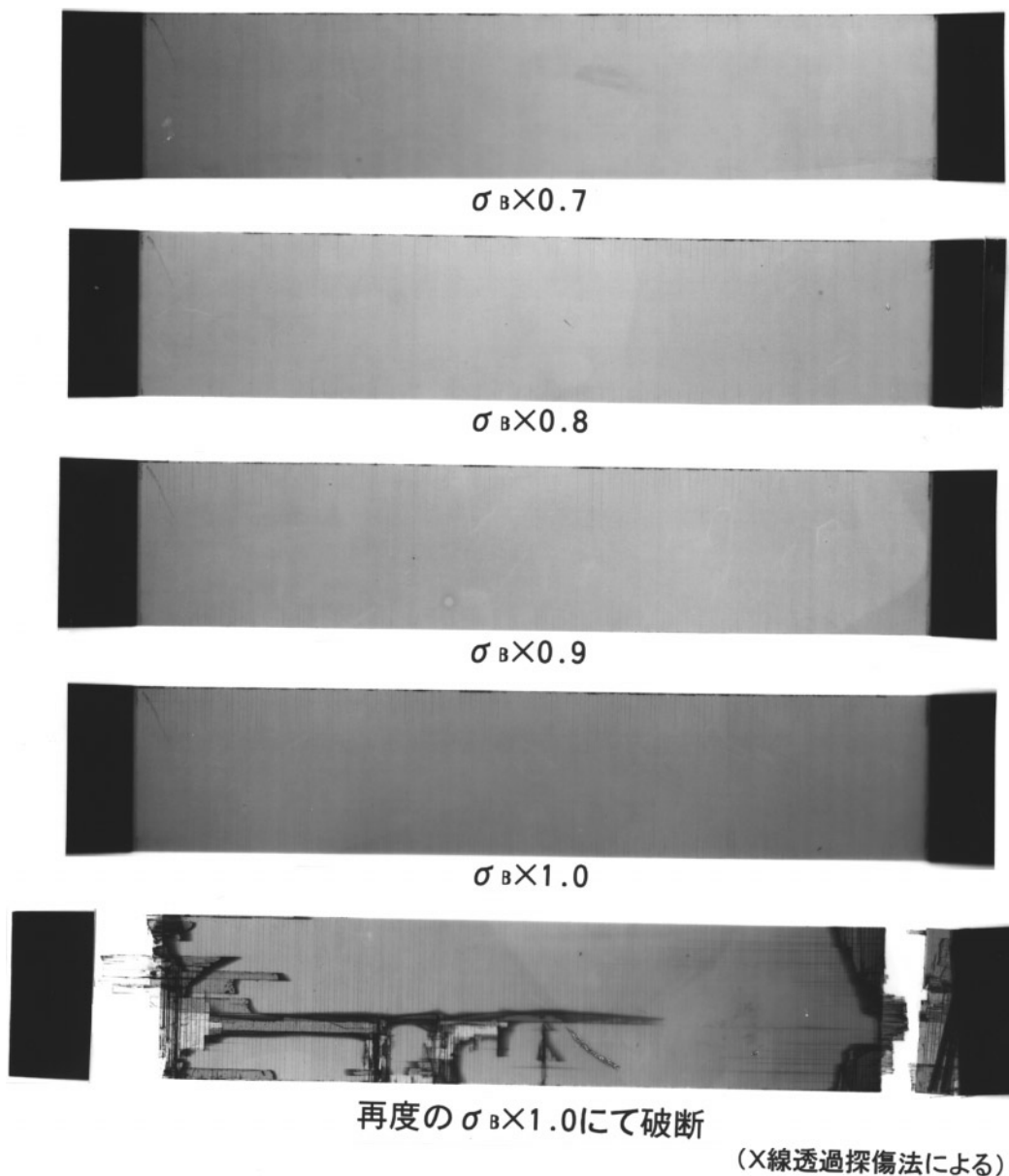


図6 静的引張によるき裂発生を観察 (Sa)

$$E_t = a \cdot E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3)$$

ここで、炭素繊維の引張弾性率  $E_f = 294$  GPa (カタログ値)、樹脂の引張弾性率  $E_m = 3.7$  GPa (カタログ値) とした。繊維含有率  $V_f$  は実測の平均値より 57% を用いる。 $a$  は強化繊維の形態による係数であり、一方向繊維強化材では 1.0 であるが、本積層材のような直交方向に等量の強化材では 0.5 とした。これらを (3) 式に代入すると、 $E_t$  の算出値は 85.4 GPa となる。これは、表 2 に示した弾性率の試験結果に近いものである。

## 5. 疲れ試験

### 5.1 試験方法

静的引張特性試験を実施した材料試験機を用いて、定

荷重制御による正弦波の部分片振り引張疲れ試験を行った。繰り返し最小応力 ( $s_{\min}$ ) / 繰り返し最大応力 ( $s_{\max}$ ) すなわち応力比は  $R = 0.1$  とした。疲れ試験の繰り返し速度は、全て 5 Hz で実施した。疲れ試験では、試験片が破断に至るまでの繰り返し数を取得した。一部の疲れ試験では、試験を一時的に中断して試験片の疲れ損傷状況、および引張疲れ破断後の試験片の破壊様相を X 線透過探傷法によって観察した。

### 5.2 破断様相

X 線透過探傷法を用いて、各直交積層材の疲れ試験に伴う破損進行を観察した結果によると、90° 層内の繊維に沿う方向の損傷き裂が、まず両幅端より内部方向に生じ



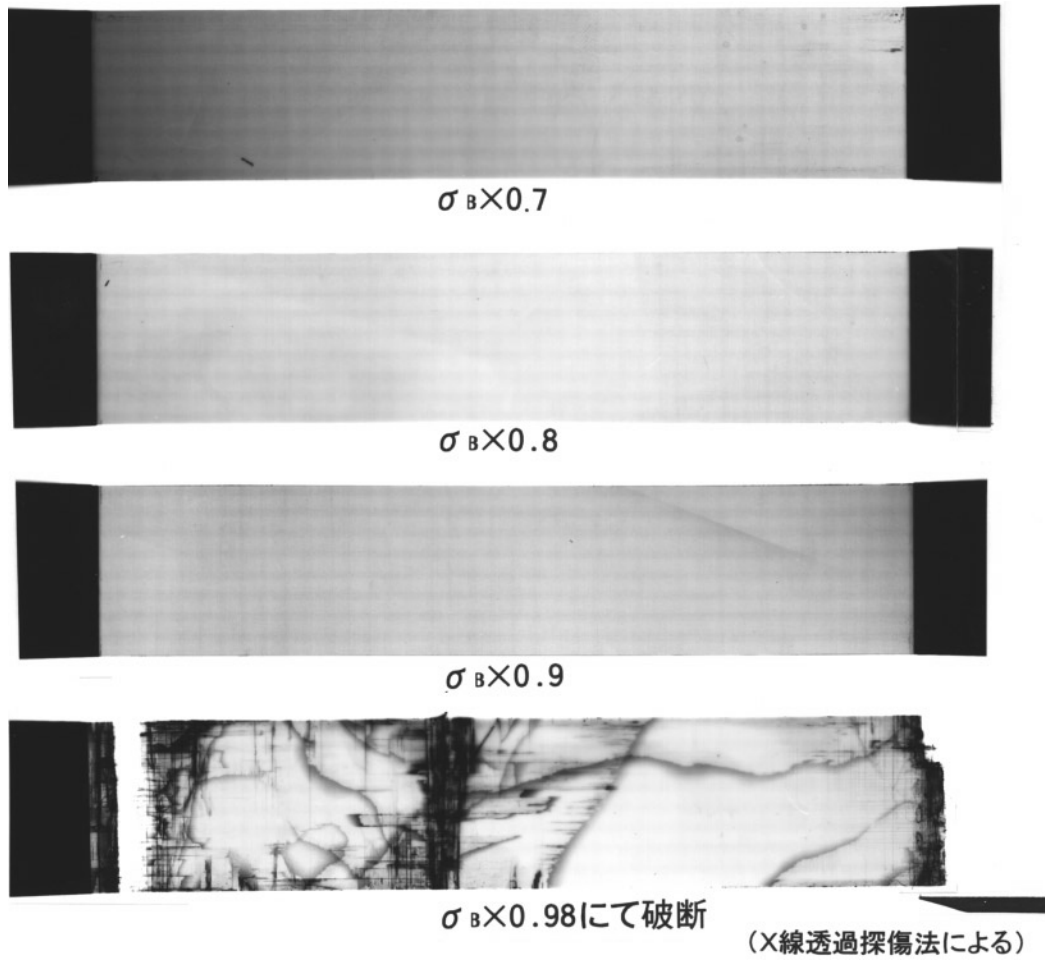


図7 静的引張によるき裂発生を観察 (2Sa)

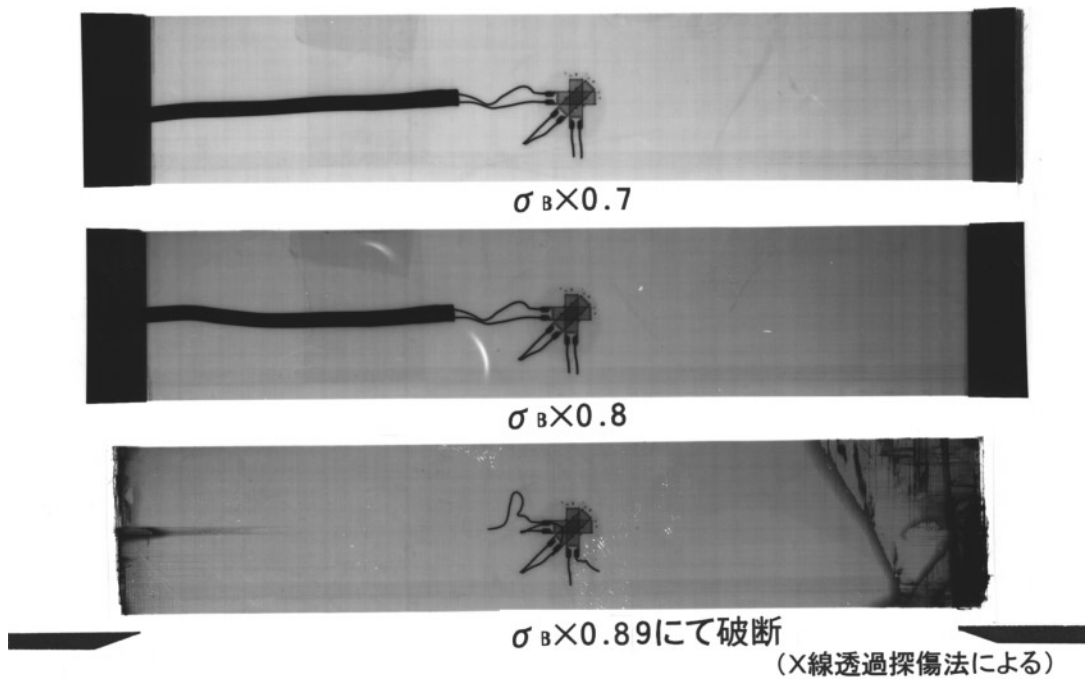


図8 静的引張によるき裂発生を観察 (3Sa)

る。これらの90°方向のき裂は、繰返し数の増加と共に全幅に達したき裂となり、その数を増していく。

長い寿命になる試験片では、タブ先部から0°方向にも損傷の進展が見られる場合が多くあった。その一例の写真を図9に示した。これは、疲れ試験によってタブ材が先部より剥離して、同部が試験片の表面に繰返し当たることによって表層の0°方向繊維を傷めたからである。この損傷は疲れ破断の主因にはならず、疲れ試験の継続には支障がなかった。一方、つかみ部における応力集中による問題点としては、残るもので今後の課題である。

タブの先部が傾斜の場合(a試験片)では、疲れ試験の早期にタブ接着層の傾斜部での剥離が発生する。さらにタブ傾斜部より内側の接着層にも剥離が進行する。図10には繰返し負荷により剥離部の接着剤が摩耗し、粉状になって側面に溢れ出た様相の写真を示した。その後は、応力集中によってつかみ部内で破断する傾向にあった。図11にはタブの傾斜部から、つかみ部内で破断した様相例を示した。

図12と図13には、a試験片およびb試験片の疲れ試験によって破断した各直交積層材のX線透過写真例をそれぞれ示した。破断箇所は、つかみ部内やタブ先部近傍におけるものが多く存在した。なお、破断箇所が評定部だけの試験片は、各直交積層材とも1~2本で、全試験数

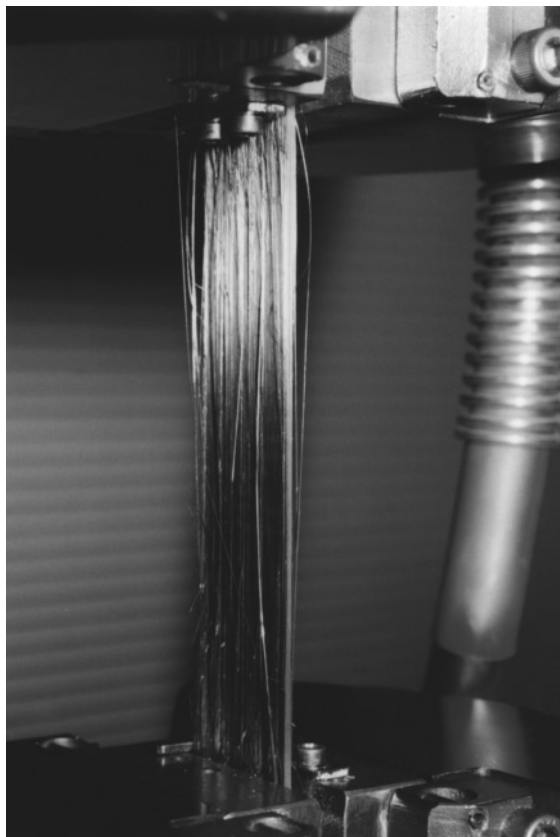


図9 表層がタブ先部によって損傷した様相



図10 タブ剥離部において接着剤が粉状になって溢れた様相

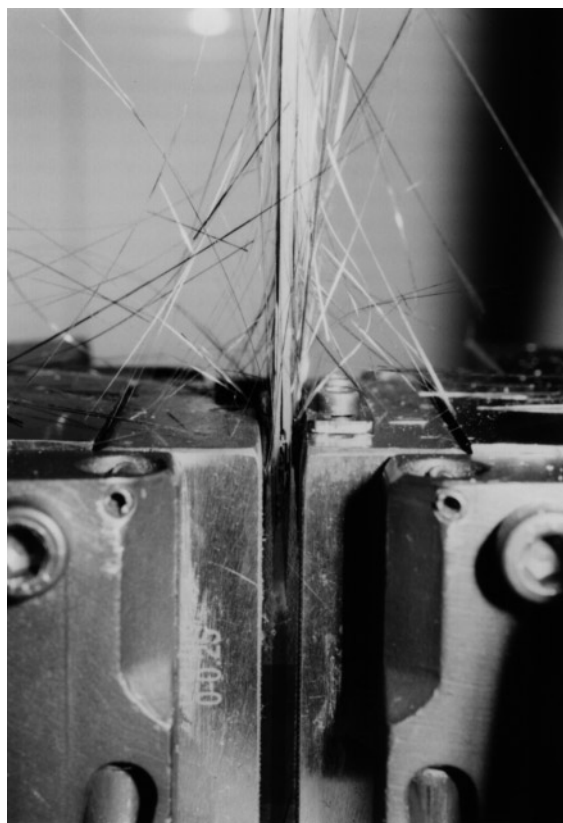


図11 タブ傾斜部における破断様相

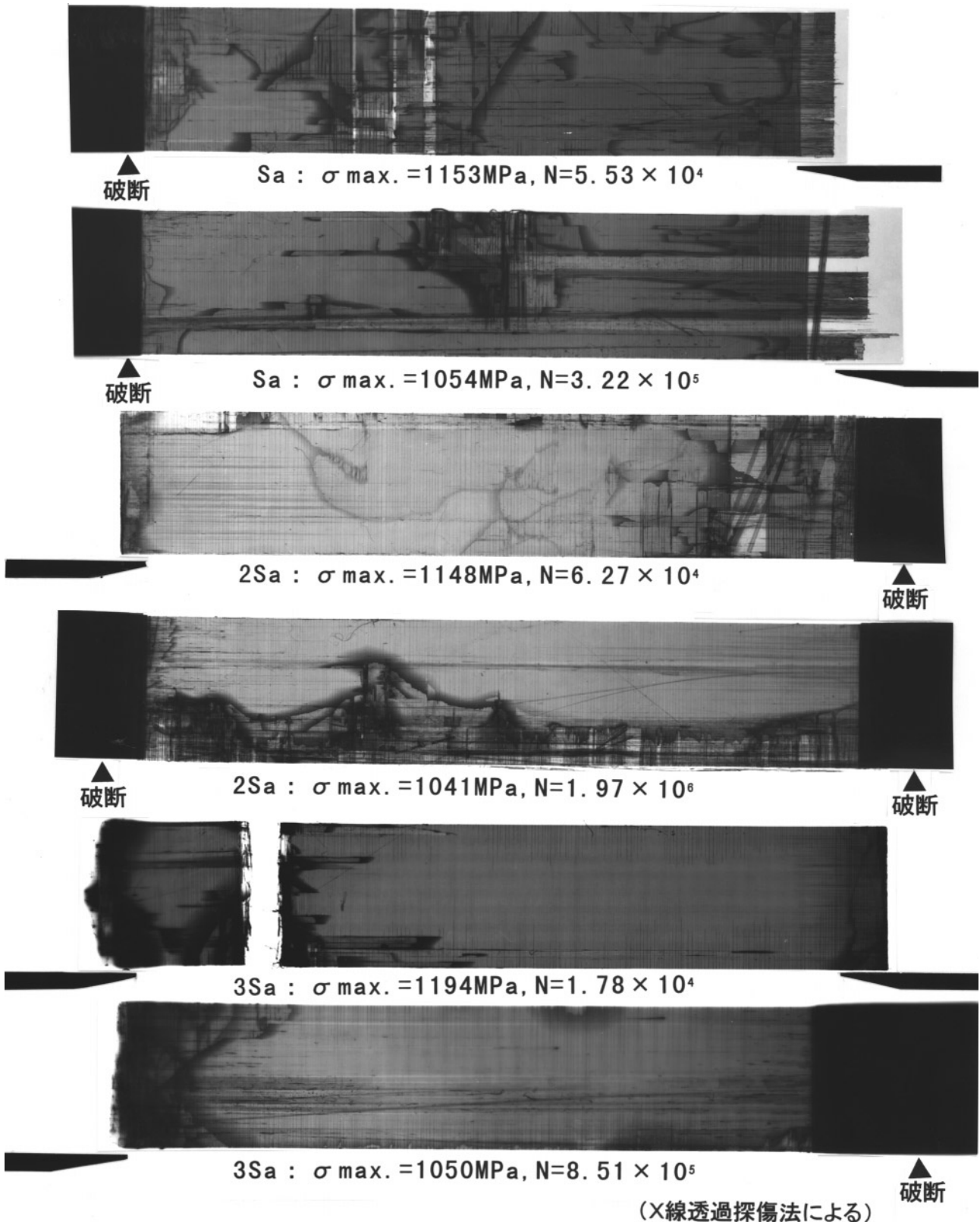


図12 引張疲れ試験による破断試験片例 (a 試験片)

に対する割合は15%程度である。

タブの先部が直角の場合にも3S材では、タブの接着層に剥離進行が若干認められた後に破断したものがあつた。

これらは繰り返し荷重によって、接着層が疲労したものと推測された。タブ取り付け用の接着剤の選定には、試験荷重条件、タブの材料や厚さ、試験機つかみ具の締め

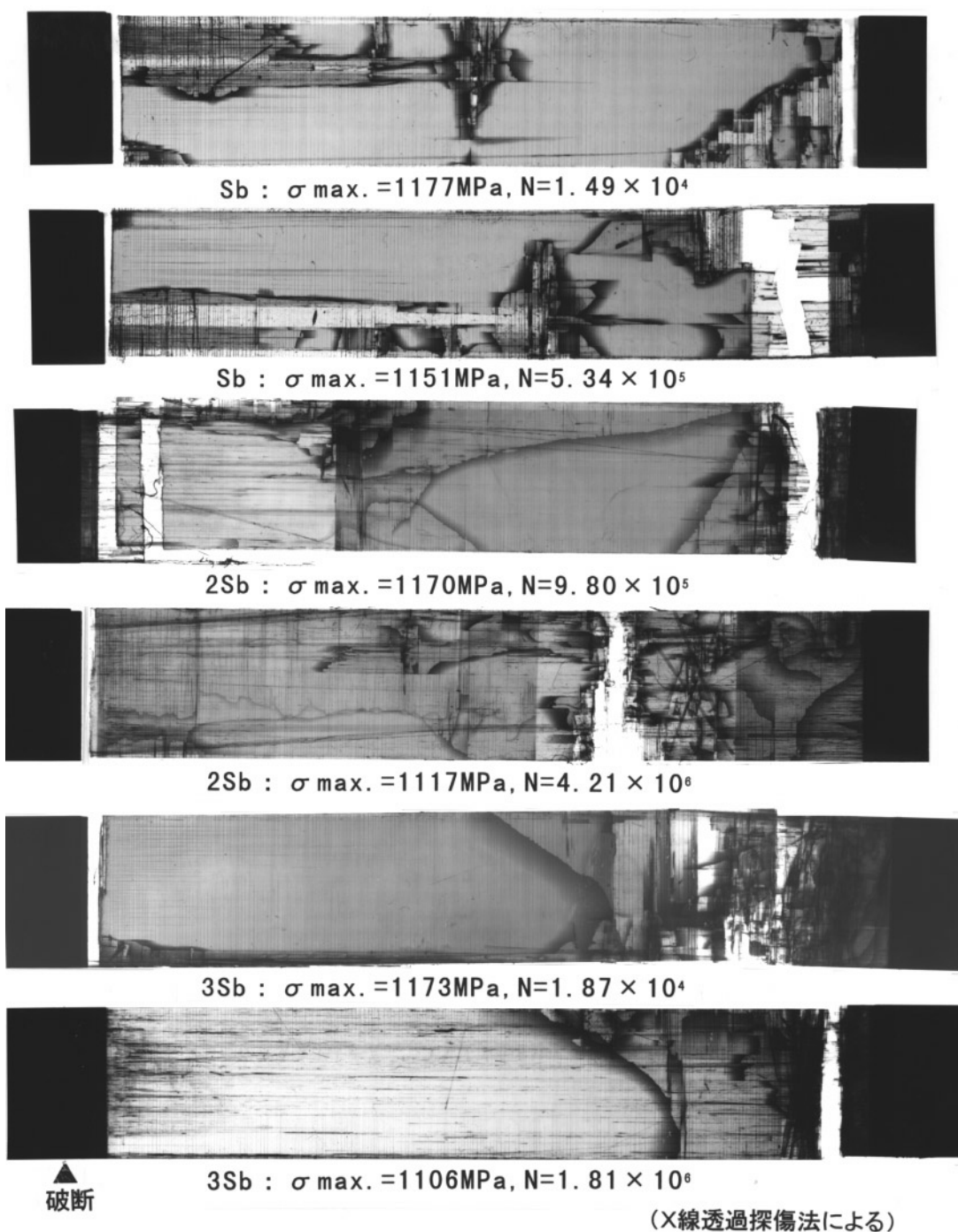


図13 引張疲れ試験による破断試験片例 (b 試験片)

付け力などが関連していることが考えられた。したがって、ここでは今後の影響因子の検討事項として記録するに止める。

試験片の側面部自由端からの層間剥離は、何れの試験片とも疲れ破断時まで認められなかった。そこで、引張疲れ試験によって破断した試験片で損傷領域が広い範囲に及んでいるのは、破断の際に急激な荷重解放がされたことにより、二次的な層間剥離が生じたと推定した。

### 5.3 S - N関係結果

引張疲れ試験は、試験片が破断に至るまでの繰り返し数(N)が $10^3 \sim 10^6$ 回程度となる繰り返し最大応力( $s_{\max}$ またはS)にて実施した。なお、取得した各直交積層材における個々の繰り返し最大応力と破断までの繰り返し数の試験結果は、試験片ごとに表示して付録に記載した。

各直交積層材の試験片におけるタブの先部形状から a 試験片および b 試験片とした試験結果による、S - N関係

を図 14 と図 15 にそれぞれ示す。Sa では疲れ試験の初期に、タブ傾斜部の剥離の発生と共に試験片が破断に至る場合が多くあった。同剥離現象で破断せずに、疲れ試験

の続行が可能であった試験片による試験結果は、ばらつきが大きい。Sb にも同様なばらつきが認められた。そこで、Sa と Sb については、試験結果を示すに止めた。一方、

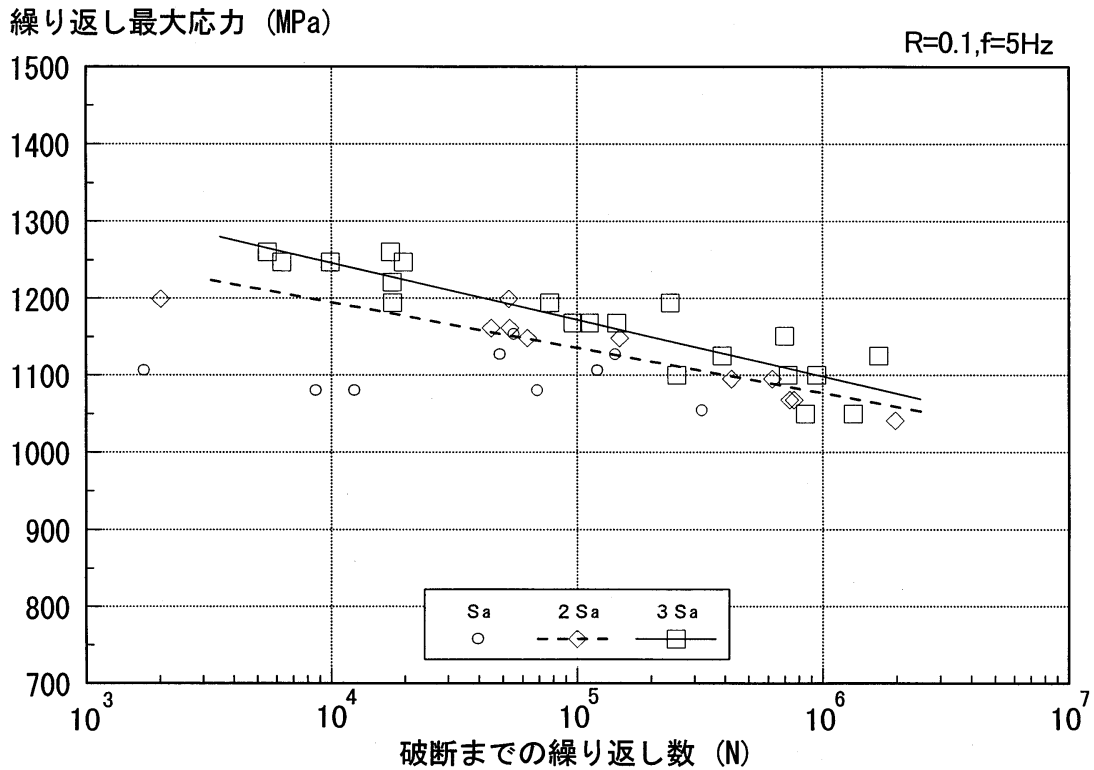


図 14 繰り返し最大応力と破断までの繰り返し数の関係 (a 試験片)

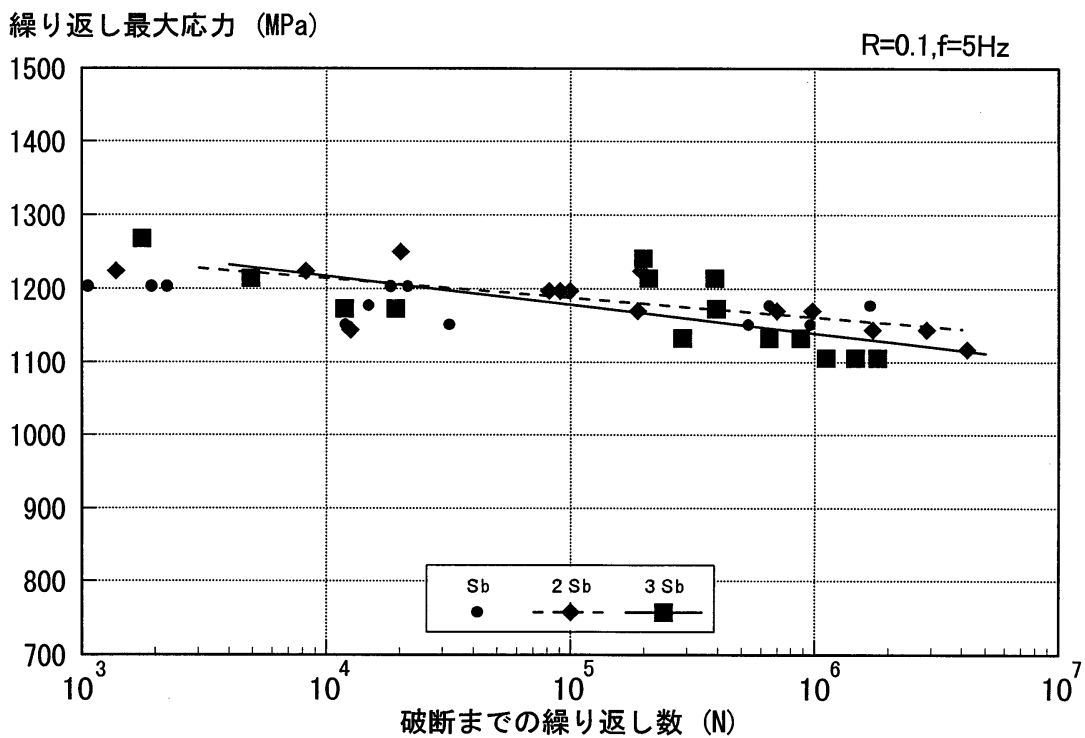


図 15 繰り返し最大応力と破断までの繰り返し数の関係 (b 試験片)

図中のSaとSb以外については、疲労寿命曲線が片対数座標上で(4)式の直線で表現できると仮定し、最小二乗法により近似したものを当てはめて示した。

$$s_{\max} = A \cdot B \cdot \log N \quad (4)$$

ここで、 $s_{\max}$  は繰り返し最大応力、AとBは共に実験定数、Nは破断までの繰り返し数である。

各直交積層材の試験結果に対する近似式と、これより外挿した $10^7$ 回時間における強さ( $s_w$ )、ならびに、静的引張試験より得た静的強さ( $s_B$ )との比較値を表3に示す。なお、SaとSbのS-N関係結果に対しての直線近似式は、試験結果のばらつきが大きいために参考として示したものである。直線近似式の定数A、すなわち $N=1$ における強さの推定値と $s_B$ との対応は、a試験片よりもb試験片の方が良好である。直線近似式の定数B、すなわち直線の傾きは、S材以外の2S材と3S材によるとa試験片よりもb試験片の方が小さい。静的強さに対する $10^7$ 回時間における強さとの比、すなわち $s_w/s_B$ は、a試験片よりもb試験片の方が大きい値である。現状の引張疲れ試験方法規格(JIS K 7083)に準じて実施した本直交積層材の疲れ特性として、 $s_w/s_B$ は2S材と3S材による結果より約0.8が推定された。

## 6. まとめ

高強度・中弾性率のPAN系炭素繊維(T800H)とエポキシ樹脂(#3631)による一方向繊維強化基材を用いた直交積層CFRPを供試材料とした。積層構成を[0°/90°]<sub>3</sub>、[0°/90°]<sub>2S</sub>および[0°/90°]<sub>3S</sub>とした3種類の直交積層材それぞれについて、静的引張特性試験および定荷重の引張-引張疲れ試験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 静的試験においては、積層数が少なく(板厚さが薄く)なるに伴い、引張強さは低目の傾向になった。
- 2) 静的特性値には、つかみ部補強タブの先部を傾斜と直角としたことによる影響は少なかった。
- 3) 疲れ試験において、タブの先部を傾斜とすると、タブの傾斜部の剥離が試験片の破断に影響した。特に直交積層材の厚さが薄い場合には、タブの剥離時に試験片が破断したものが多くあった。
- 4) 疲れ試験においては、タブの先部を傾斜よりも直角とした方が、タブの剥離部が供試材料に損傷を及ぼす影響が少なく、 $10^7$ 回時間における強さも直角とした方が、若干高目になった。

## 7. あとがき

現状のCFRPの引張試験方法規格における試験片形状は、つかみ部における応力集中の問題があり、つかみ部で破壊が生じやすい。評定部で破断することもあるが、目的とした引張破断であるかの判定が難しい。今後、CFRP

表3 引張疲れ試験結果

試験片	S - N 関係 (MPa)	$s_w$ (MPa)	A/ $s_B$	$s_w/s_B$
Sa	( $s_{\max} = 1105 - 0.848 \log N$ )	1099	0.84	0.84
Sb	( $s_{\max} = 1236 - 12.52 \log N$ )	1148	0.94	0.88
2Sa	$s_{\max} = 1430 - 58.97 \log N$	1017	1.07	0.76
2Sb	$s_{\max} = 1319 - 26.34 \log N$	1135	0.99	0.85
3Sa	$s_{\max} = 1542 - 73.91 \log N$	1024	1.15	0.76
3Sb	$s_{\max} = 1372 - 38.77 \log N$	1101	1.02	0.82

注)  $s_{\max} = A \cdot B \log N$  (直線近似式)、 $s_B$ : 静的強さ。

$s_w$ :  $10^7$ 回時間強さ。

試験片SaとSbの結果は、参考値として示した。

の引張特性試験方法の検討として、より高い力学的特性値を有する炭素繊維を用いた場合や、供試材料の積層数および板厚さの影響、つかみ部の締め付け力などについて評価を行うことが必要と考える。さらに、CFRPの引張疲れ試験では、試験荷重条件とタブ用の接着剤の耐久性も検討事項として加わる。これらの懸案事項に対する早急な取り組みを望むものである。

## 参考文献

- 1) J.T.Hartness, R. Y. Kim; A comparative study on fatigue behavior of polyetheretherketon and epoxy with reinforced graphite cloth, 28th National SAMPE Symposium, (1983) pp. 535-544.
- 2) R. F. Dickson, C. J. Jones, B. Harris; The environmental fatigue behaviour of carbon fibre reinforced polyether ether ketone, J. of Materials Science, 20 (1985) pp. 60-70.
- 3) C. Baron, K. Schulte, H. Harig; Influence of fibre and matrix failure strain on static and fatigue properties of carbon fibre-reinforced plastics, Composites Science and Technology, 29 (1987) pp. 257-272.
- 4) K. Schulte, E. Reese, T. W. Chou; Fatigue behaviour and damage development in woven fabric and hybrid fabric composites, ICCM-6 (1987) pp. 4.89-4.99.
- 5) C. Baron, K. Schulte; Fatigue damage response of CFRP with toughened matrices and improved fibres, ICCM-6, (1987) pp. 4.65-4.75.
- 6) O. Konur, F. L. Matthews; Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of composites: a review, Composites, 20-4 (1989) pp. 317-328.
- 7) S. Cler; Fatigue properties of composite materials auto-clave processed from carbon-epoxy woven fabric prepregs, 36th International SAMPE Symposium, (1991) pp. 1437-

1448.

- 8) C. Henaff-Gardin, M. C. Lafarie-Frenot; Fatigue behaviour of thermoset and thermoplastic cross-ply laminates, Composites, 23-2 (1992) pp. 109-116.
- 9) 村上理一, 他 4 名; 平織布 CFRP の疲労特性に及ぼす繊維方向の影響, 日本機械学会論文集 (A 編) 59-560 (1993) pp. 883-889.
- 10) M. Kawai, M. Morishita, K. Fuzi, T. Sakurai, K. Kemmochi; Effect of matrix ductility and progressive damage on fatigue strength of unnotched and notched carbon fiber plain woven roving fabric laminates, Composites: Part A 27A (1996) pp. 493-502.
- 11) 野口義男; 一方向強化 FRP の引張疲れ試験法に関する評価, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1241 (1994).
- 12) 宮入裕夫, 北條正樹; 高分子系複合材料の力学特性試験法標準化, 材料 45-10, (1996) pp. 1071-1077.
- 13) ASTM D 3039-76; Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites, American society for testing and materials (1982).
- 14) ASTM D 3039/D 3039M-95a; Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, American society for testing and materials (1995).
- 15) JIS K 7073; 日本工業規格 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法, 日本規格協会 (1988).
- 16) ISO/DIS 527 Part 4; Plastics - Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fiber-reinforced plastic composites, International organization for standardization (1994).
- 17) ISO/DIS 527 Part 5; Plastics - Determination of tensile properties. Part 5: Test conditions for unidirectional fiber-reinforced plastic composites, International organization for standardization (1994).
- 18) JIS K 7161; 日本工業規格 プラスチック - 引張特性の試験方法第 1 部: 通則, 日本規格協会 (1994).
- 19) ASTM D 3479/D 3479M-96; Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials, American society for testing and materials (1996).
- 20) JIS K 7083; 日本工業規格 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張 - 引張疲れ試験方法, 日本規格協会 (1993).

## 付 録

各直交積層材における個々の試験結果として, 静的引張特性の弾性率, 強さと破断伸度, および引張疲れ試験における繰返し最大応力と破断までの繰返し数の一覧表を以下にまとめて示す。

付表 1 [0 %/90 °]s 材 : Sa の試験結果  
静的引張試験

実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
86.4	84.5	86.5	88.1	84.7	86.0	2%
強さ $s_B$ (MPa)						
1329	1240	1329	1360	1294	1310	4%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.49	1.43	1.49	1.49	1.49	1.48	2%
引張疲れ試験						
繰返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)		静的強さ との比 $s_{max}/s_B$			破断までの 繰返し数 (N)	
1153		0.88			$5.530 \times 10^4$	
1127		0.86			$4.859 \times 10^4$	
1127		0.86			$1.431 \times 10^5$	
1106		0.84			$1.720 \times 10^3$	
1106		0.84			$1.207 \times 10^5$	
1080		0.82			$8.630 \times 10^3$	
1080		0.82			$1.241 \times 10^4$	
1080		0.82			$6.886 \times 10^4$	
1054		0.80			$3.225 \times 10^5$	

付表 2 [0 %/90 °]s 材 : Sb の試験結果  
静的引張試験

実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
85.1	85.6	84.0	83.8	84.4	84.6	1%
強さ $s_B$ (MPa)						
1426	1308	1275	1276	1256	1308	5%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.62	1.49	1.47	1.47	1.43	1.50	5%
引張疲れ試験						
繰返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)		静的強さ との比 $s_{max}/s_B$			破断までの 繰返し数 (N)	
1203		0.92			$1.060 \times 10^3$	
1203		0.92			$1.930 \times 10^3$	
1203		0.92			$2.230 \times 10^3$	
1203		0.92			$1.832 \times 10^4$	
1203		0.92			$2.160 \times 10^4$	
1177		0.90			$1.492 \times 10^4$	
1177		0.90			$6.510 \times 10^5$	
1177		0.90			$1.683 \times 10^6$	
1151		0.88			$1.196 \times 10^4$	
1151		0.88			$3.197 \times 10^4$	
1151		0.88			$5.344 \times 10^5$	
1151		0.88			$9.603 \times 10^5$	

付表3 [0°/90°]₂ₛ 材: 2Sa の試験結果  
静的引張試験

実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
85.4	84.7	84.6	84.6	85.5	85.0	1%
強さ $s_B$ (MPa)						
1247	1341	1361	1317	1396	1332	4%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.44	1.50	1.56	1.50	1.57	1.51	4%

## 引張疲れ試験

繰り返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)	静的強さ との比 $s_{max}/s_B$	破断までの 繰り返し数 (N)
1199	0.90	$2.010 \times 10^3$
1199	0.90	$5.273 \times 10^4$
1161	0.87	$4.470 \times 10^4$
1161	0.87	$5.324 \times 10^4$
1148	0.86	$6.276 \times 10^4$
1148	0.86	$1.488 \times 10^5$
1095	0.82	$4.248 \times 10^5$
1095	0.82	$6.250 \times 10^5$
1068	0.80	$7.347 \times 10^5$
1068	0.80	$7.658 \times 10^5$
1041	0.78	$1.976 \times 10^6$

付表4 [0°/90°]₂ₛ 材: 2Sb の試験結果  
静的引張試験

実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
84.0	84.6	89.1	84.1	83.9	85.1	1%
強さ $s_B$ (MPa)						
1364	1284	1380	1400	1220	1330	6%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.59	1.49	1.53	1.59	1.44	1.53	4%

## 引張疲れ試験

繰り返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)	静的強さ との比 $s_{max}/s_B$	破断までの 繰り返し数 (N)
1250	0.94	$2.017 \times 10^4$
1224	0.92	$1.380 \times 10^3$
1224	0.92	$8.240 \times 10^3$
1224	0.92	$1.949 \times 10^5$
1197	0.90	$8.169 \times 10^4$
1197	0.90	$9.065 \times 10^4$
1197	0.90	$9.945 \times 10^4$
1170	0.88	$1.884 \times 10^5$
1170	0.88	$6.881 \times 10^5$
1170	0.88	$9.798 \times 10^5$
1144	0.86	$1.253 \times 10^4$
1144	0.86	$1.724 \times 10^6$
1144	0.86	$2.871 \times 10^6$
1117	0.84	$4.206 \times 10^6$



付表5 [0°/90°]<sub>3S</sub>材：3Saの試験結果  
静的引張試験

静的引張試験						
実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
81.6	83.6	84.0	82.6	83.2	83.0	1%
強さ $s_B$ (MPa)						
1347	1322	1387	1337	1302	1339	2%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.60	1.54	1.54	1.60	1.50	1.56	3%

## 引張疲れ試験

繰り返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)	静的強さ との比 $s_{max}/s_B$	破断までの 繰り返し数 (N)
1260	0.94	$5.480 \times 10^3$
1260	0.94	$1.744 \times 10^4$
1247	0.93	$6.300 \times 10^3$
1247	0.93	$9.900 \times 10^3$
1247	0.93	$1.970 \times 10^4$
1221	0.91	$1.770 \times 10^4$
1194	0.89	$1.780 \times 10^4$
1194	0.89	$7.720 \times 10^4$
1194	0.89	$2.395 \times 10^5$
1168	0.87	$9.597 \times 10^4$
1168	0.87	$1.121 \times 10^5$
1168	0.87	$1.452 \times 10^5$
1151	0.86	$7.008 \times 10^5$
1125	0.84	$3.900 \times 10^5$
1125	0.84	$1.690 \times 10^6$
1100	0.82	$2.543 \times 10^5$
1100	0.82	$7.233 \times 10^5$
1100	0.82	$9.465 \times 10^5$
1050	0.78	$8.511 \times 10^5$
1050	0.78	$1.336 \times 10^6$

付表6 [0°/90°]<sub>3S</sub>材：3Sbの試験結果  
静的引張試験

静的引張試験						
実測値					平均値	変動率
弾性率 $E_t$ (GPa)						
83.9	82.9	82.1	81.4	83.2	82.7	1%
強さ $s_B$ (MPa)						
1452	1359	1240	1334	1360	1349	6%
破断伸度 $e_{max}$ (%)						
1.55	1.53	1.42	1.53	1.59	1.52	4%

## 引張疲れ試験

繰り返し 最大応力 $s_{max}$ (MPa)	静的強さ との比 $s_{max}/s_B$	破断までの 繰り返し数 (N)
1268	0.94	$1.760 \times 10^3$
1241	0.92	$1.989 \times 10^5$
1214	0.90	$4.910 \times 10^3$
1214	0.90	$2.089 \times 10^5$
1214	0.90	$3.896 \times 10^5$
1173	0.87	$1.187 \times 10^4$
1173	0.87	$1.926 \times 10^4$
1173	0.87	$3.958 \times 10^5$
1133	0.84	$2.875 \times 10^5$
1133	0.84	$6.496 \times 10^5$
1133	0.84	$8.747 \times 10^5$
1106	0.82	$1.113 \times 10^6$
1106	0.82	$1.467 \times 10^6$
1106	0.82	$1.809 \times 10^6$

---

## 航空宇宙技術研究所資料 736号

平成11年1月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話(0422)47-5911 ㊦182-8522  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

禁無断複写転載

本書(誌)からの複写,転載を希望される場合は,管理部 研究支援課係にご連絡ください。

Printed in Japan