

UDC 678.067.9:
620.17:
620.168

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-241

カーボン複合材の強度特性

古田敏康・野口義男・松嶋正道

1973年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-205	自由飛行模型 FFM-10 の動安定微係数の推定について	1971年7月	河崎俊夫, 河本 巖
TM-206	静止衛星の軌道保持シミュレーションシステムの構成 (I) —地球の重力場による摂動—	1971年8月	松島弘一
TM-207	対称スピン衛星用ニューテーション・ダンパの解析	1971年9月	村上 力, 狼 嘉彰
TM-208	薄板継手構造の強度についての実験 —接着およびリベット継手—	1971年11月	池田為治, 熊倉郁夫 竹内和之
TM-209	試作接着面応力センサの較正試験	1971年11月	大竹邦彦, 遠藤修司 大野口義男
TM-210	小型加速度計による風胴模型姿勢角の測定	1971年12月	原 亘利
TM-211	軽量ジェットブースト STOL の一検討	1971年12月	西村博史
TM-212	原動機部要素試験設備用消音装置の特性試験	1972年1月	鳥崎忠雄, 小林 実
TM-213	フライングテストベッド空気系統試験	1972年2月	田辺義一, 小暮泰之 川崎純男
TM-214	フライングテストベッド燃料系統試験	1972年2月	田辺義一, 小暮泰之 川崎純男
TM-216	安定板を有する固体ロケットの操舵要求軽減法	1972年2月	大石 晃, 山中龍夫 冠 昭夫
TM-217	フライングテストベッド自動安定装置性能試験 (I) —製作時性能試験—	1972年7月	小川敏雄, 甲斐忠夫 十河 弘, 増原 恢
TM-218	フライングテストベッド自動安定装置性能試験 (II) —実験前性能試験—	1972年7月	小川敏雄, 甲斐忠夫 十河 弘, 増原 恢
TM-219	フライングテストベッド脚性能試験	1972年5月	渋谷昭義, 川崎純男
TM-220	フライングテストベッドテレメータ性能試験	1972年5月	小野幸一, 十河 弘 池上 博
TM-221	ロケット模型の動安定微係数の測定	1972年5月	谷 喬, 高島一明 関根英夫, 中村正剛
TM-223	自由飛行模型 FFM-10 の強度について	1972年5月	河崎俊夫, 斎藤秀夫 河崎武敏, 多田保夫 林 洋一, 戸田勸一 日下和夫, 越出慎一 築地恒夫, 中井暎孝 森田甫之, 菊地孝男 高橋 実, 東久保正年
TM-224	フライングテストベッド油圧系統試験	1972年5月	藤枝郭俊, 十河 弘 川崎純男, 中村公昭
TM-225	ストラップダウン方式の慣性機器誤差によって生ずる飛しょう径路誤差の一考察	1972年5月	大月正男, 新宮博公 鈴木孝雄
TM-226	フライングテストベッド機体強度剛性試験	1972年7月	渋谷昭義, 丸山 茂 川崎純男
TM-227	フライングテストベッド操縦系統試験	1972年7月	藤枝郭俊, 牧野 健 川崎純男
TM-228	航空用ガスタービンの高圧形燃焼器の予備実験	1972年7月	鈴木邦男, 石井浅五郎
TM-229	液体酸素中におけるころがり軸受の性能	1972年7月	宮川行雄, 関 勝美
TM-230	航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究 (2)	1972年7月	斎藤 隆, 鈴木邦男
TM-231	フライングテストベッド全機振動試験	1972年8月	渋谷昭義, 岡田典秋 丸山 茂, 川崎純男

目 次

1. はしがき	1
2. カーボン繊維	1
3. 複合材の製法	1
3.1 モールディング法	2
3.2 真空含浸法	2
3.3 引抜き法	3
3.4 ハンドレイアップ法	3
4. 強度特性	3
4.1 引張試験	3
a) 測定方法	6
b) 結果の考察（複合則との比較）	7
c) 破壊状況	11
d) 曲率半径と強度について	12
4.2 曲げ試験	13
a) 曲げ弾性率測定	13
b) 3点曲げ試験	14
c) 4点曲げ試験	16
d) 曲げ弾性率と強度試験結果	19
4.3 圧縮試験	19
a) 弾性率の測定	19
b) 圧縮強度の測定	21
c) 試験結果および考察	24
4.4 層間せん断試験	30
5. 繊維含有率の測定	38
a) 硫酸煮沸法	38
b) 燃焼法	40
6. 熱膨張率の測定	42
7. 熱的物性値の測定	43
8. あとがき	45

カーボン複合材の強度特性*

古田敏康**・野口義男**・松嶋正道**

1. はしがき

近い将来の航空機の構造で軽量化の有力な方法として複合材が構造に多用される形勢にある。

従来の複合材たとえばガラスファイバー強化プラスチック (GFRP, Glass Fiber Reinforced Plastics) や金属材料などに比較して、比強度 (強度/密度)、比剛性 (剛性/密度) が格段に高いカーボンファイバー強化プラスチック (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics) が開発され、この特性をいかして、航空、宇宙の構造材料としての研究が盛んになってきた。それにはまず複合材の構造材料としての応用に必要な諸特性を求めなければならない。その特性を求める試験には静的強度試験と動的強度試験とがある。

静的試験には引張試験、圧縮試験、曲げ試験、せん断試験、熱膨張試験、繊維含有率試験などがあり、動的試験には振動試験、疲労試験、クリープ試験、衝撃試験、耐久試験などがあり、以上の試験をへて構造材料としての特性が把握される。

しかしながらカーボン繊維複合材の試験法はまだ確立されておらず、いま世界各国、各企業などが別々の方法で行なっているのが現状で、イギリスでは RAE (Royal Aircraft Establishment) が中心となって規格の統一をはかろうという努力がなされている。カーボン繊維には低弾性、高弾性、高強度タイプの各種類があり、構造用としては主に高強度タイプの繊維が使用されるので、ここでは主として高強度カーボン複合材の静的強度特性について述べる。動的特性については別の報告書にゆずりたい。

2. カーボン繊維

現在生産されているカーボン繊維は合成繊維を焼成、炭化したもので、ここで使用したものは日本カーボン (株)、東レ (株) の製品で、いずれもポリアクリロニトリル系 (PAN) ——これはボンネル、エックスランなど冬の衣料でなじみの合成繊維——を延伸させながら炭化した、いわゆる高強度タイプのカーボン繊維で、その一般特性を表1に示す。

カーボン繊維は焼成方法、製造工程の違いにより、低弾性、高弾性、高強度タイプなどにわかれ、また製品別ではマット、クロス、シート、テープ、束 (tow)、ひも、ガラス繊維との混織、またはプリプレグシート (Prepreg sheet)、プリプレグテープなど数種ある。構造用には主として高弾性または高強度タイプのカーボン繊維が用いられる。カーボロンは日本カーボン、トレカ T300A は東レの繊維を示す。

3. 複合材の製法

カーボン複合材の製法は一般のガラス複合材の製法とだいたい同じような手法が用いられるが、その取扱いには特別の注意をはらう必要がある。すなわちカーボン繊維は糸切れ、けば立ちなどの現象を起こしやすいので、ガラス繊維のような大胆な取扱いはできない。

カーボン複合材の製法にはクロスよりも一般にはトウ (束) の形またはプリプレグシートの形で用いられることが多い。プリプレグとはカーボン繊維をシート状にのぼし、それに樹脂を含浸させ、シート状にした

表1 各種カーボン繊維の特性

特 性	低 弾 性	高 弾 性	高 強 度
密 度 (g/cm ³)	1.75	1.96	1.75
直 径 (μ)	10	6	6~7
引張強度 (kg/mm ²)	100	140~250	250~300
弾 性 率 (kg/mm ²)	6,000	35,000	25,000

* 昭和48年3月26日受付

** 機体第一部

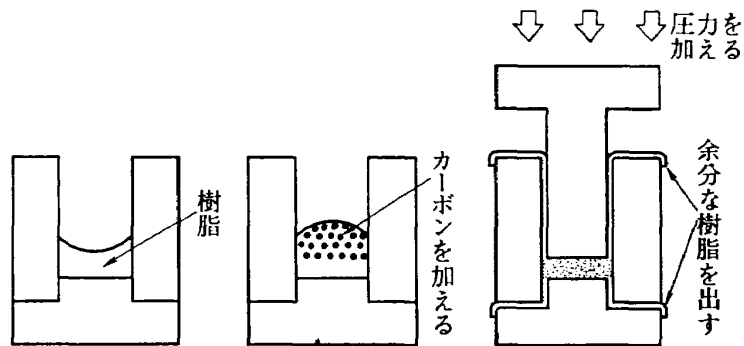


図 1 モールディング法

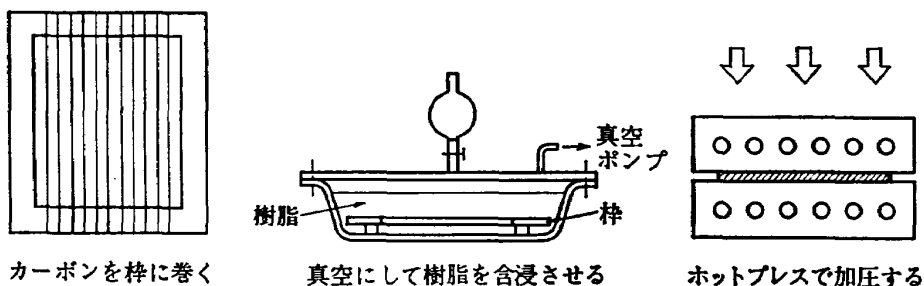


図 2 真空含浸法

ものを半乾燥（予備硬化ともいい、またはこれを B Stage ともいう）させたもので、これを離型紙にはさんで市販している。この状態では硬化せず数ヶ月の保存ができる。これを積層後加熱することにより成形される。ここで用いた複合材の成形法はつぎのとおりである。

3.1 モールディング法

この方法はカーボン繊維の開発の初期に用いられた方法で、図 1 に示すように、まず金型に樹脂を流し込み、つぎにアセトンなどを使ってひきそろえたカーボン繊維を加えて、上からプランジャーで押し、余分の樹脂は型の外に逃がして、加熱、硬化させる。そのあとに後硬化（after cure）を数時間行ない、金型から取り出す。この製法によると任意のカーボン繊維含有率の緻密な複合材ができる。ただしあまり大きな板はできない。以上はウェット法（Wet Method）で、この他にプリプレグシートを用いたドライ法（Dry Method）もある。

3.2 真空含浸法

これも初期に用いた成形法で、図 2 に示すように用意した厚さ約 1mm ほどの鉄製枠にカーボン繊維を巻きつけ、それを枠ごと真空槽の中に入れ、水銀柱で 10~20 mmHg 程度にしてからエポキシ樹脂を注入し含浸させる。十分に脱泡させてから定板の上でスクイズし余分の樹脂を取除き、ホットプレスで加熱させな

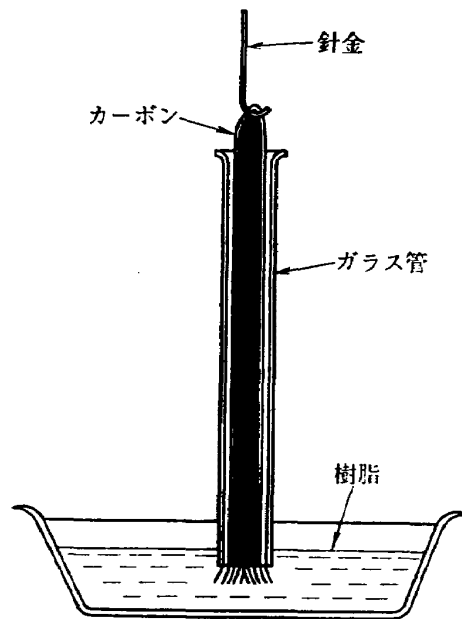


図 3 引抜き法

がら 10 kg/cm² 程度の圧力をかけながら成形する。用いた樹脂および硬化条件はつぎのとおりである。

エボン 828	100 部
無水メチルハイミック酸	90 部
BDMA	2 部

まず 85°C で 3.5 時間キュア後、200°C で 20 時間の後硬化（after cure）を行なった。比較的大きな一方向性複合材の平板を作ることができる。ただしこ

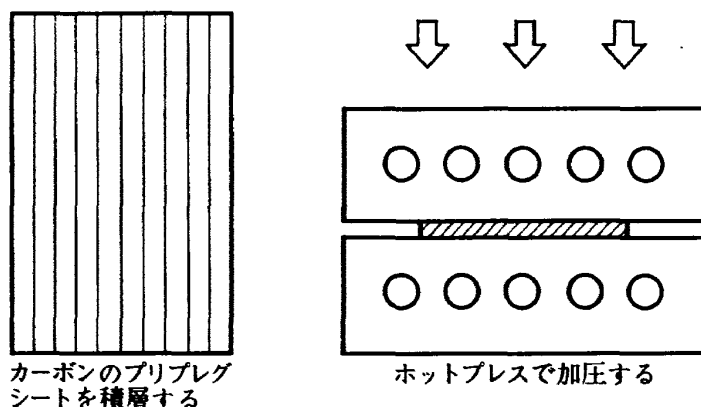


図 4 積層法 (ハンドレイアップ法)

の方法は樹脂をスクイズしたとき、または加圧のときに繊維の方向性を乱すおそれがあり、最近は余り用いられない。

3.3 引抜き法

これは圧縮試験片用の丸棒状の複合材を作ったときの方法で、図3に示すようにまずカーボン繊維をエポキシ樹脂のなかで十分に含浸させ、よくひきそろえてから、用意したガラス管の中に針金でひきこみ、そのままガラス管ごと加熱して硬化させる。その後ガラス管を割ってとりだす。最近では銅管のなかにテフロンチューブをはめ込み使用している。

この方法は比較的簡単な設備ででき、しかも精度は比較的良好、適当なガラス管を選ぶことにより任意の太さの丸棒状複合材ができる。しかも繊維の方向性のよい複合材ができる利点がある。ただし 10mmφ 以上のものはボイドが入りやすく特別の工夫が必要である。初期のうちには以上の3通りの方法で大日本硝子(株)に依頼して作製した。

3.4 ハンドレイアップ法

これは手積み法または積層法ともいい、繊維基材を裁断して型の上にしきつめ、触媒を加えた樹脂をはけやローラーでその上に塗り込めたのち自然に硬化させ、脱型して仕上げる方法で上記の方法を湿式法という。これに対してプリプレグを使う方法を乾式法という。すなわちプリプレグを任意の大きさ、厚さ、あるいは任意の角度に積層後、両側にスペーサをはさんでホットプレスで加圧、加熱して硬化させる方法である(図4参照)。これは積層する繊維の方向性を任意に選べるし、また大きさ、厚さなども自由に選べる特長をもっている。カーボン繊維複合材の代表的な製法といえる。この方法で住友電工ゴムプラスチック事業部に依頼して試験片を作った。この成形法の特長は治具費が安く、大規模な設備投資がさけられるなどの

利点がある。

4. 強度特性

カーボン複合材は従来行なわれてきたプラスチック標準試験法による試験法ではほとんど適用できないことがわかった。そこで、ここではモルガナイト法¹⁾、RAE 法²⁾などを参考とし、独自の方法で試験を行なった。わが国では日科技連複合材料研究会のなかのカーボンコンポジット試験法分科会(分科会長古田敏康)が中心となって試験法の規格の統一をはかろうとする努力がなされている。

4.1 引張試験

長さ 330、幅 160、厚さ 3mm に成形した CFRP より図5に示すように切断した。引張弾性率測定用試験片は a) 図のように、両端部にはアルミニウム板(30×10×1mm)をエポキシ樹脂で接着し、チャック部のスベリを止めるように補強した。縦ひずみは図6および写真1に示すようなマルテンス式エクステンソメータおよび抵抗線ひずみゲージにより測定した。前者のマルテンス式は鋭いナイフエッジにより深い傷ができないように注意する必要がある。抵抗線ひずみゲージ(箔ゲージで gage length 5mm)をアロンα(シアノアクリレート系)瞬間接着剤で接着した。測定にはアクティブゲージ(Active gage)とダミーゲージ(Dummy gage)とを使用するが、ダミー部も同じ CFRP に接着する必要がある。すなわちこれを別種のガラス FRP 等に接着すると CFRP との熱容量、熱伝導率などの差により抵抗線ひずみゲージの自己加熱によるひずみドリフトが生じやすい。

引張強度試験片は図5の b) に示す通りで、長さ 150、幅 10、厚さ 3mm に切断し、両端部には弾性率用試験片と同様に 1mm のアルミニウム板を接着してチャック部でのすべりを防いだ、また中央部で破

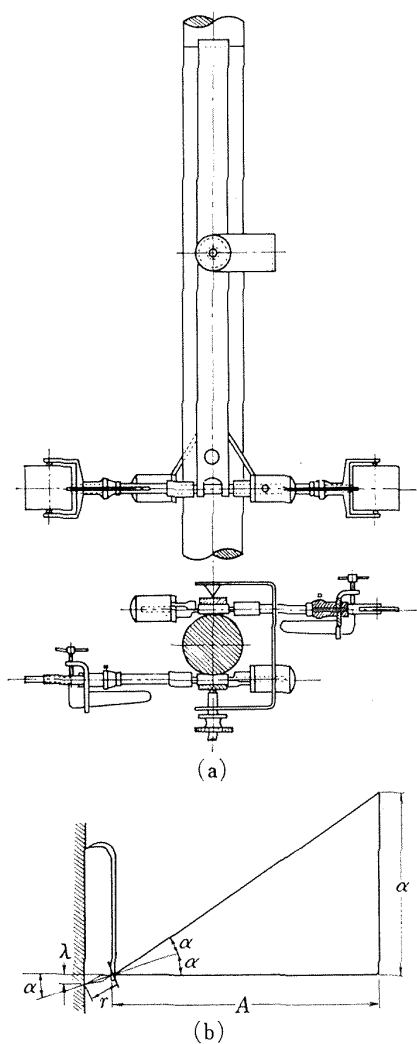
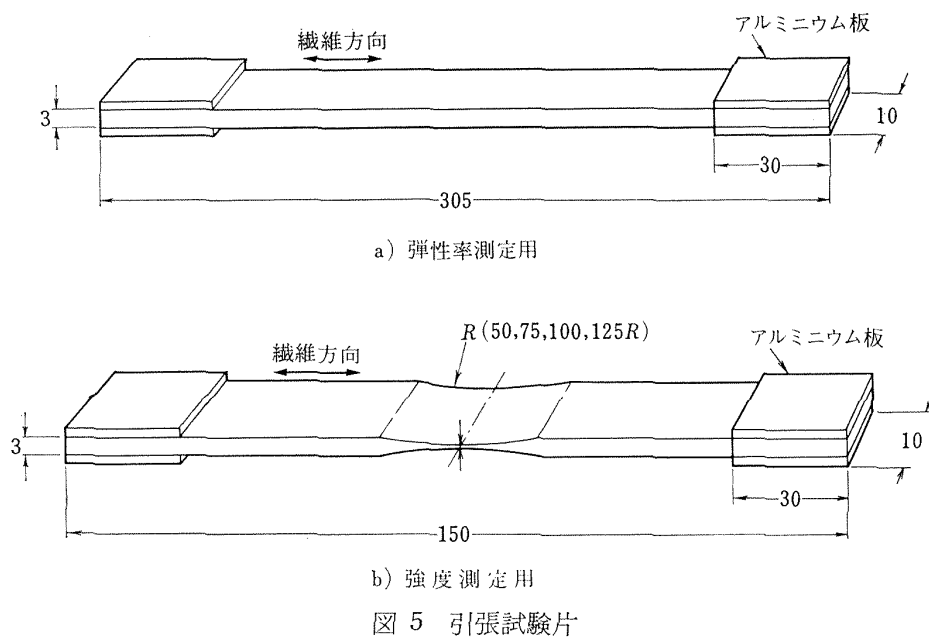


図 6 マルテンス・エクステンソメーター

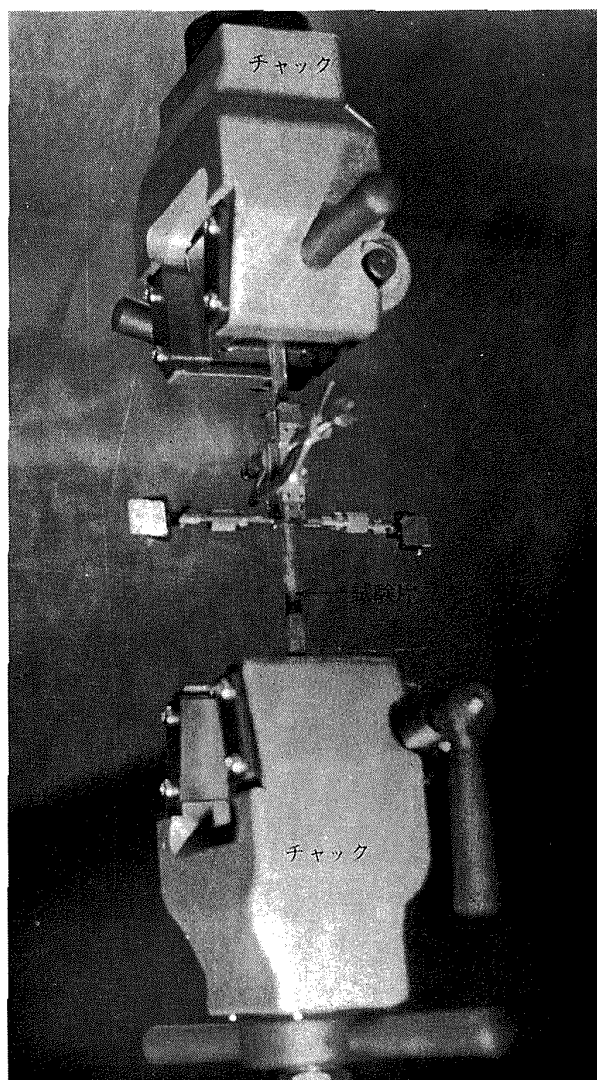


写真 1 マルテンスエクステンソメーターの使用状況

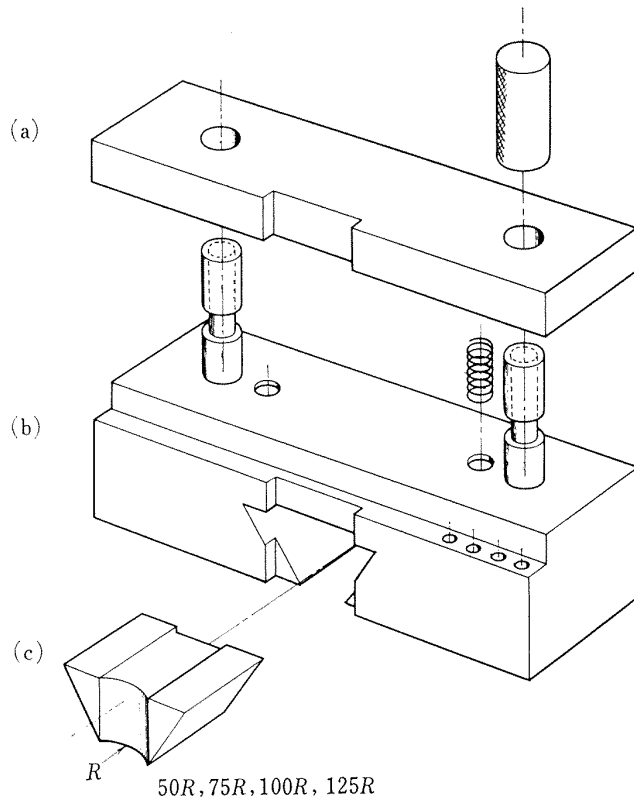


図 7 引張試験片（強度用）作成ホルダー

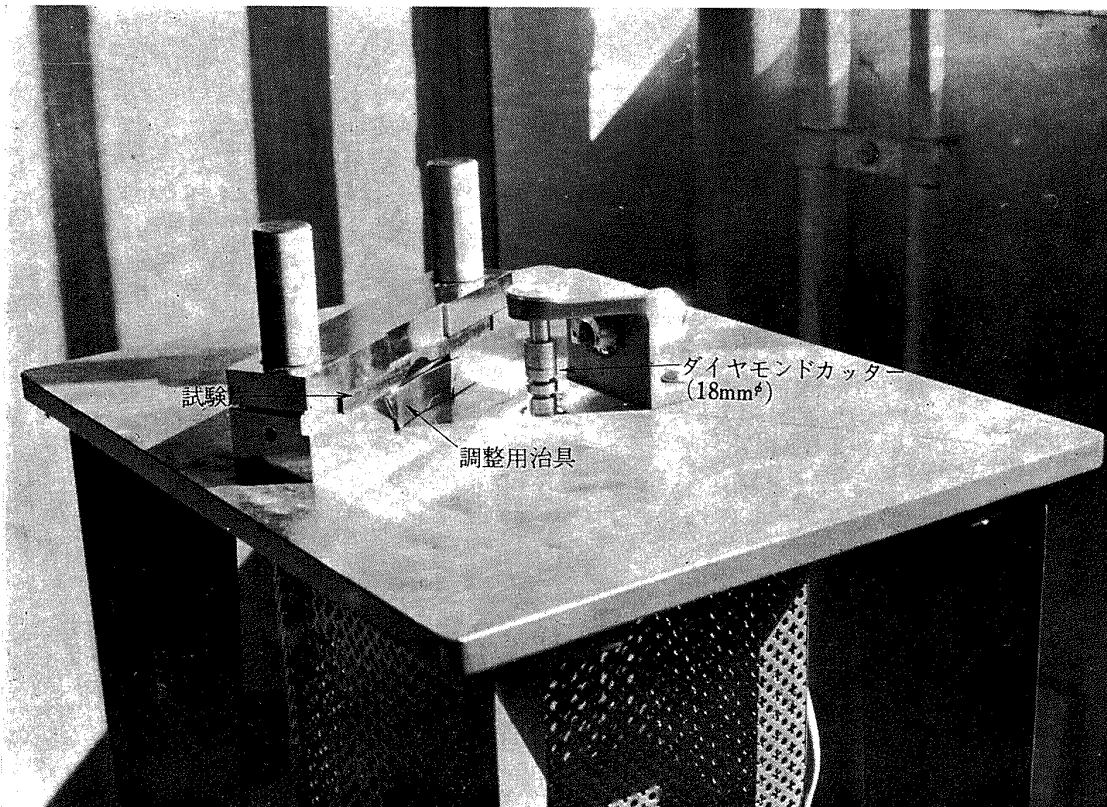


写真 2 試験片調整装置

断するように中央部の厚さを 1mm とした。その加工にはモルガナイト法を参照した。その部分の曲率半径はモルガナイト法では 50 mm, RAE 法では 125 mm と決めているが、まだ確立されたものではない。そこでここでは曲率半径を 50, 75, 100, 125 mm に変えたときの強度の相関性を調べた。初めのうちは中央部の厚さを削る方法としてはフライス盤を使用した

ルダを設計しよい結果を得ている。すなわち 18 mm ϕ のダイヤモンドカッターを使用しているので加工面が正確にしかもきれいに仕上がり、曲率半径を変えるときは図 7, (c) の部品を変えることにより簡単に行える利点がある。加工した試験片を写真 3 に示す。

a) 測定方法

縦弾性率の測定にはインストロンタイプの万能試験機（島津製作所製、オートグラフ IS-20 T 型、最大容量 20 ton）を使用した。それを写真 4 に示す。

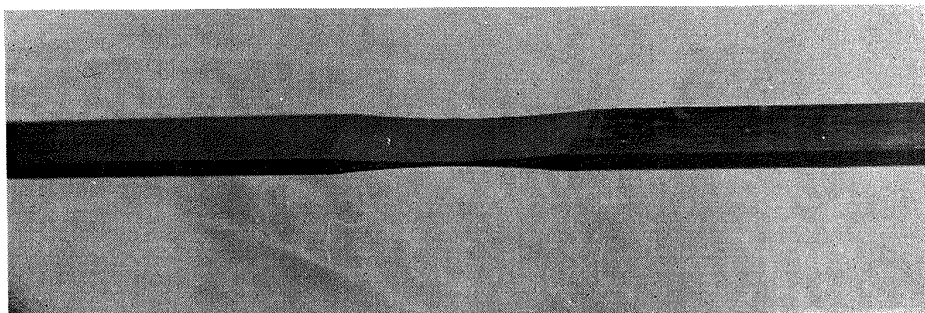


写真 3 引張試験片

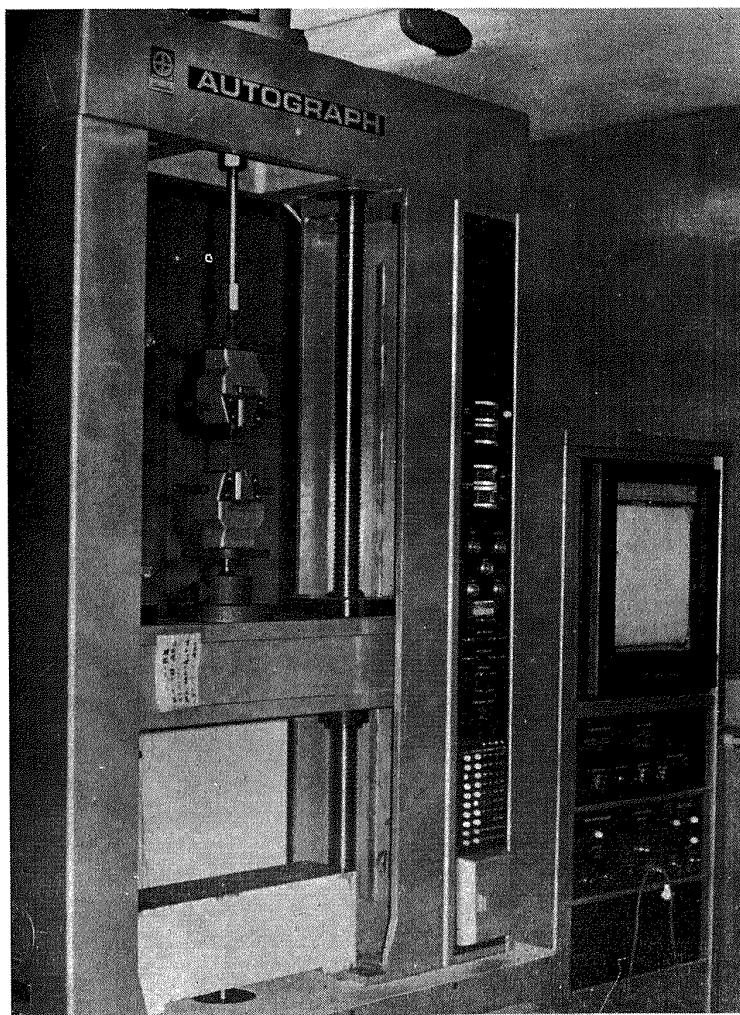


写真 4 オートグラフ (IS-20 T 型, 最大容量 20 ton)

引張荷重を加えたときの試験片中央部軸方向のひずみをひずみゲージにより測定し、それと直角方向のひずみも同時に測定し、ポアソン比も求めた。荷重の設定は最大ひずみ量が $1,000 \times 10^{-6}$ 程度までとし、次式により縦弾性率を求めた。

$$E_T = \frac{W}{A \cdot \epsilon} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

E_T : 縦弾性率, A : 断面積, ϵ : ひずみ, W : 荷重である。

引張強度の測定は、オートグラフのクロスヘッド速度を 1mm/min で引張り、破断時の最大荷重から求める。引張強度を σ_T とすると

$$\sigma_T = \frac{P}{A}$$

A : 断面積, P : 最大荷重

使用したカーボン繊維ならびにエポキシ樹脂の強度特性を表 2 に、繊維含有率と縦弾性率の測定結果を表 3 に示す。

トレカ T 300A 複合材で曲率半径を変えたときの強度測定結果を表 4 に示し、それぞれの応力と変位の関係を図 8~11 に示す。またカーボロン複合材で曲率半径を変えたときの強度測定結果を表 5 に示し、それぞれの応力と変位の関係を図 12~15 に示す。いずれも変位はクロスヘッドの移動量である。最小断面の

ところに抵抗線ひずみゲージを接着し、その部分の縦ひずみを直接測定した結果が図 16 で、荷重とひずみの関係を示している。

b) 結果の考察 (複合則との比較)

連続繊維からなる一方向強化材で、繊維と樹脂が十分に結合している場合には繊維方向の引張りによって繊維と樹脂は同じひずみ ϵ を生じ、そのときの応力は

$$\sigma_f = E_f \cdot \epsilon \quad \sigma_m = E_m \cdot \epsilon \quad (1)$$

により表わされる。ここで E_f , E_m は繊維 (fiber) と樹脂 (matrix) の弾性率とする。 V_f , V_m を繊維、樹脂の体積含有率とすれば、複合材の繊維方向 (L) の平均引張応力は

$$\sigma_L = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2)$$

繊維方向の弾性率 E_L は

$$E_L = \sigma_L / \epsilon \quad (3)$$

と定義されるので、(1)~(3) 式より複合材の繊維方向の弾性率は

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4)$$

となる。

(2) 式は応力の複合則、(4) 式は弾性率の複合則という。さらに複合材の破壊は全繊維が同時に破断するとすれば、複合材の引張強度は

(2) 式より

表 2 繊維特性 (カタログ値)

試料	引張弾性率	引張強度
東レ トレカ T 300 A	22000 kg/mm ²	250 kg/mm ²
日本カーボン カーボロン Z-2-0	20000	260 以上
カーボロン Z-2-1	20000	300 以上
カーボロン Z-2-2	25000	260~300
樹脂 Epoxy (100%)	350	4.5

表 3 繊維含有率および縦弾性率の測定結果

試料	繊維含有率		引張弾性率
トレカ T 300 A	78.1 W_f (%)	73.0 V_f (%)	15720~16010 kg/mm ²
カーボロン Z-2-0	65.5	54.8	9900~10400
カーボロン Z-2-1	62.4	54.2	11110~11280

W_f : 重量含有率

V_f : 体積含有率

表 4 引張強度の測定結果

試料	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kg)	強度 (kg/mm ²)	
トレカ T 300 A						
50 R-1	10.39	0.99	10.29	1310	127	平均値: 156 kg/mm ² 標準偏差: 25.4 kg/mm ² 変動率: 16.3%
2	10.31	1.09	11.24	1600	142	
3	10.07	0.96	9.67	1890	195	
4	10.27	1.00	10.27	1640	160	
75 R-1	10.35	1.06	10.97	1350	123	平均値: 146 kg/mm ² 標準偏差: 20.1 kg/mm ² 変動率: 13.8%
2	10.06	0.98	9.86	1730	175	
3	10.10	0.88	8.89	1170	132	
4	10.40	1.00	10.40	1590	153	
100 R-1	10.56	0.94	9.93	1560	157	平均値: 140 kg/mm ² 標準偏差: 20.5 kg/mm ² 変動率: 14.6%
2	10.14	0.81	8.21	1340	163	
3	10.24	1.07	10.96	1270	116	
4	10.25	0.95	9.74	1200	123	
125 R-1	10.24	1.02	10.44	1110	106	平均値: 149 kg/mm ² 標準偏差: 28.3 kg/mm ² 変動率: 19.0%
2	9.73	0.90	8.76	1400	160	
3	10.17	1.02	10.37	1910	184	
4	10.32	1.03	10.63	1560	147	

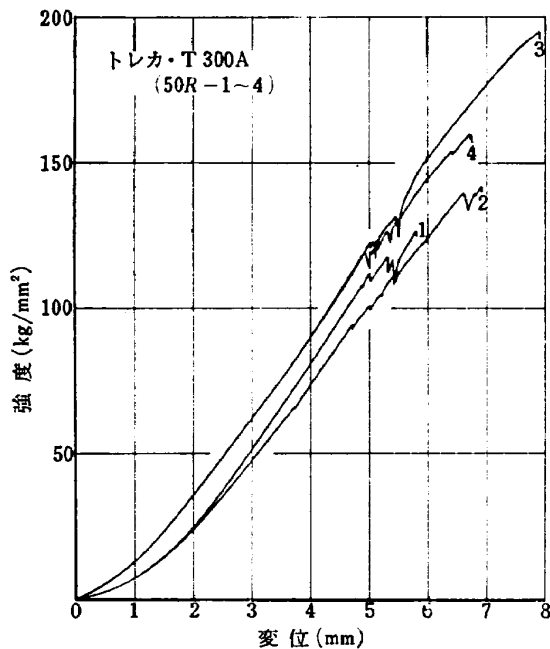


図 8 強度と変位線図

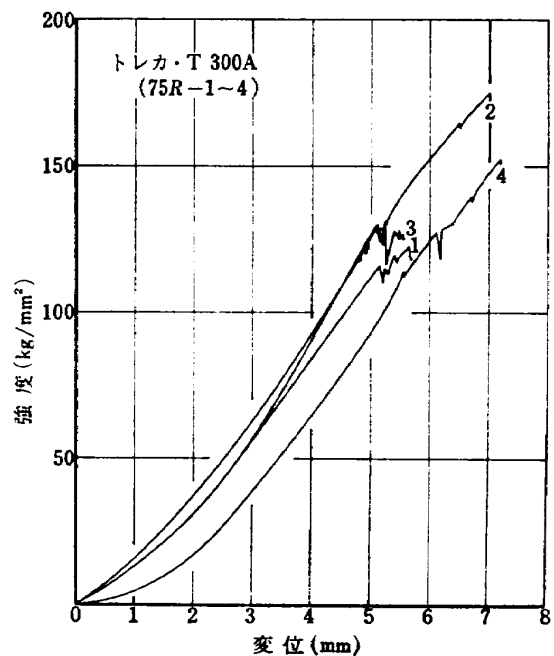


図 9 強度と変位線図

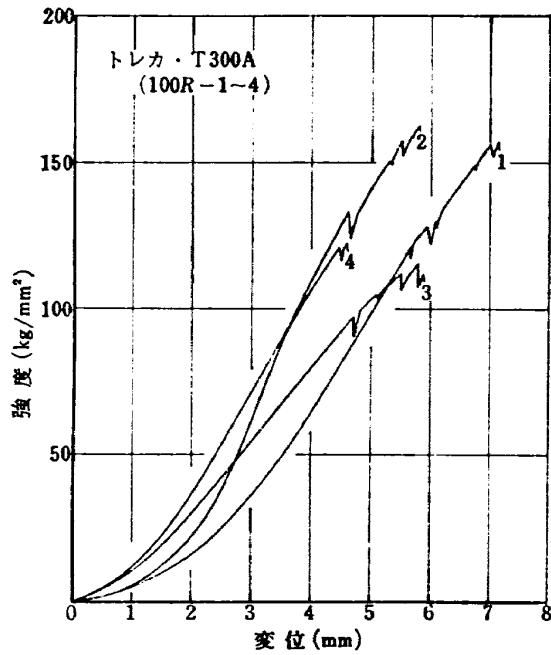


図 10 強度と位線図変

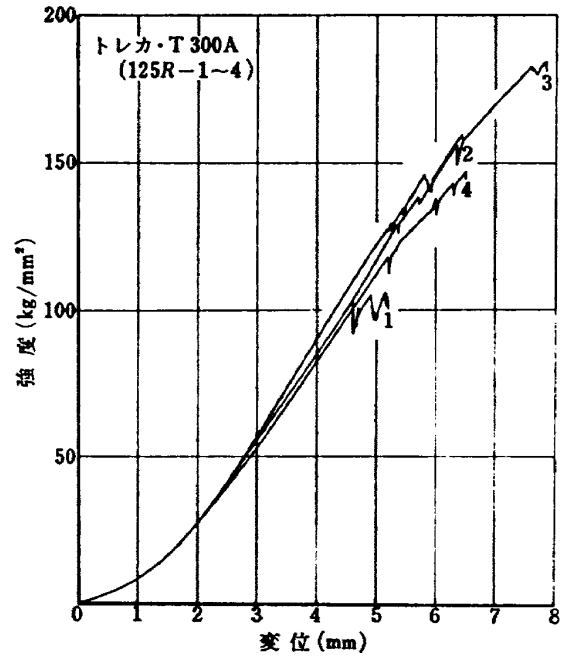


図 11 強度と変位線図

表 5 引張強度の測定結果

試料	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kg)	強度 (kg/mm ²)	
カーボン Z-2-0						
75 R-1	10.34	1.06	10.96	1270	116	平均値: 122 kg/mm ² 標準偏差: 4.6 kg/mm ² 変動率: 3.8%
2	10.30	1.06	10.92	1410	129	
3	10.40	1.04	10.83	1320	122	
4	8.89	1.06	9.42	1140	121	
100 R-1	10.45	1.06	11.08	1350	122	平均値: 123 kg/mm ² 標準偏差: 5.1 kg/mm ² 変動率: 4.1%
2	10.24	1.05	10.75	1280	119	
3	10.21	1.05	10.72	1260	118	
4	8.91	1.04	9.27	1210	131	
カーボン Z-2-1						
100 R-1	10.08	0.91	9.17	1560	170	平均値: 155 kg/mm ² 標準偏差: 13.1 kg/mm ² 変動率: 8.5%
2	10.15	0.83	8.42	1430	170	
3	9.90	0.99	9.80	1270	130	
4	10.20	0.98	10.00	1510	151	
125 R-1	9.97	0.97	9.67	1630	169	平均値: 158 kg/mm ² 標準偏差: 7.7 kg/mm ² 変動率: 4.9%
2	10.03	0.88	8.83	1320	149	
3	9.90	0.87	8.61	1390	161	
4	9.89	0.94	9.31	1420	153	

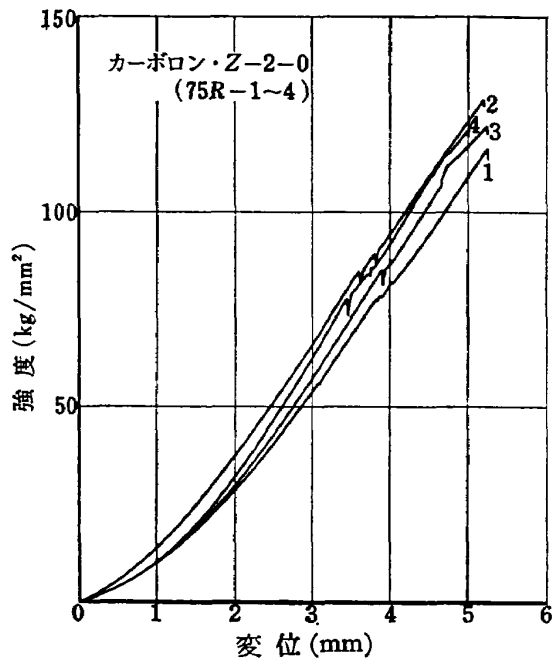


図 12 強度と変位線図

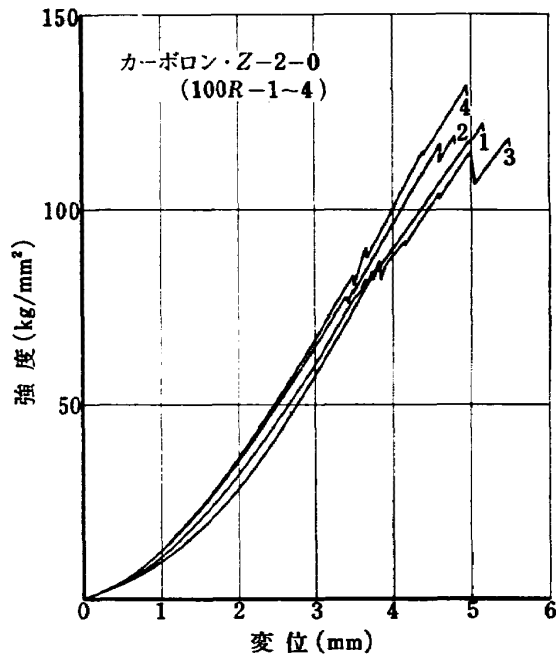


図 13 強度と変位線図

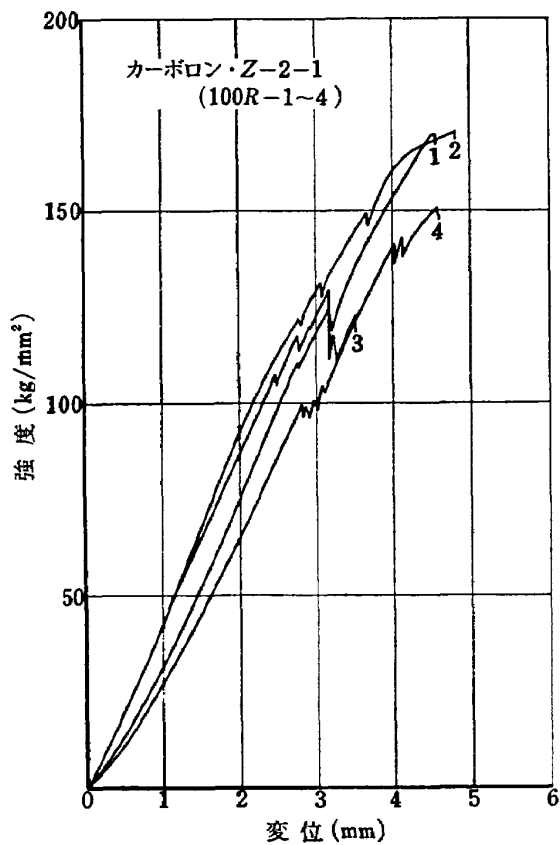


図 14 強度と変位線図

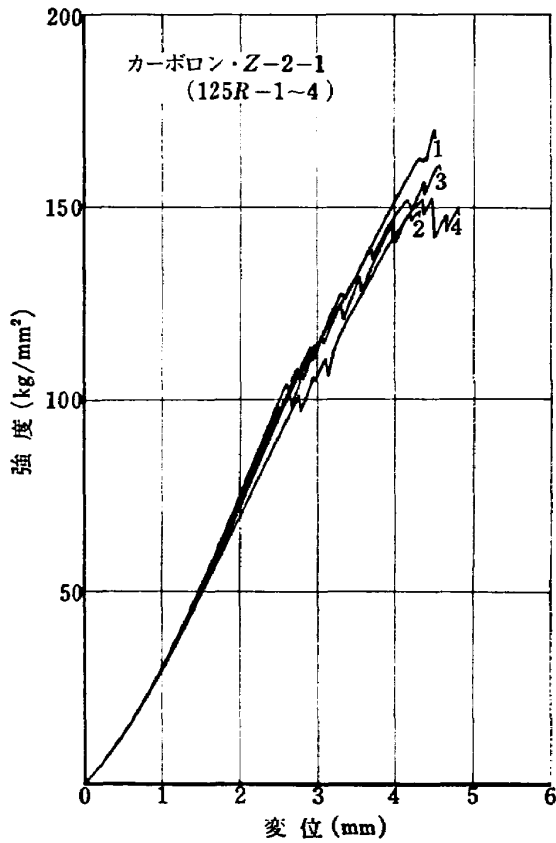


図 15 強度と変位線図

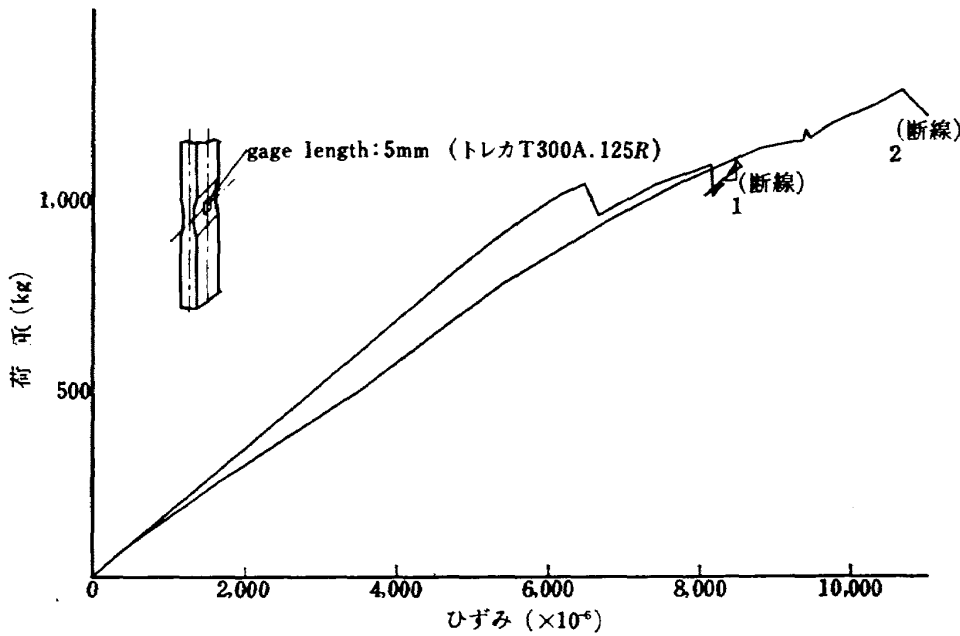


図 16 引張強度測定時における荷重とひずみ

表 6 複合則による弾性率と引張強度

試料	(4)式による弾性率	(5)式による引張強度
トレカ T 300 A	16140 kg/mm ²	184 kg/mm ²
カーボン Z-2-0	11120	145
カーボン Z-2-1	10990	165

$$\sigma_T = \sigma_f^* V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (5)$$

ここで σ_f^* は繊維の引張強度、 σ_m^* は繊維破断ひずみに対応する樹脂の強度である。

まず (4) 式により縦弾性率の考察をすれば、繊維特性 (表 2) および繊維含有率 (表 3) を (4) 式に代入して理論値を求めると表 6 の値となり、実測値 (表 3) の値とよく一致する。

つぎに引張強度の測定結果と複合則による理論値との比較を行なってみると、繊維特性 (表 2) と、繊維含有率 (表 3) を (5) 式に代入すれば、表 6 のようになる。これを強度の実測値 (表 4) および (表 5) と比較すると、理論値に近い結果も見えるが、平均値と比較した場合に、トレカ T 300A 複合材では試験片中央部を加工したときの曲率半径が 50, 75, 100, 125 mm の場合にそれぞれ 85, 79, 76, 81% となり、カーボン Z-2-0 複合材の場合、曲率半径が 75, 100 mm での結果は 84, 85%, カーボン Z-2-1 複合材について曲率半径 100, 125 mm での結果は 94, 96% となった。

各曲率半径については 4 本ずつの試験片を用いた。

その試験結果の変動率はトレカ T 300A 複合材では 14~19%, カーボン Z-2-0 複合材では 4%, カーボン Z-2-1 では 5~9% となった。

カーボン複合材の強度特性は成形条件によってもかなりの差がでてしまう。一方、各繊維に等しい張力を加えながら成形すれば、後述の実験からも明らかのように複合則によく合う。ところが、一般の成形では各繊維に多少のゆるみも生じるし、また多少の角度もつきやすい状態で成形している場合が多い。そこでわれわれは複合則の強度に 0.8~0.9 の係数をかけたものが妥当な値と思える。

c) 破壊状況

破壊状況を観察したところつぎのことがわかった。トレカ T 300A 複合材では応力が 120~130 kg/mm² で、カーボン Z-2-0 複合材では 80~90 kg/mm² で、カーボン Z-2-1 においては 100~110 kg/mm² でクラックが中央部近くで発生し始めた (図 17 参照)、このクラックは連続繊維が曲率半径の加工によって、最小断面部の繊維の切れ始めるところから起っている (図 17, A 部詳細参照)。このクラック発生

以後はクラックの増加がさらに進み破断に至るものと、クラックの増加があまりおこらず、さらに高負荷の荷重に耐えた後に破断する場合とが観察された。破断後の試験片を写真 5, 6 に示す。

d) 曲率半径と強度について

曲率半径と強度の関係をまとめたのが図 18 である。この図からもわかるように曲率半径のちがいによる強度の差はほとんど認められない。しかし試験片の

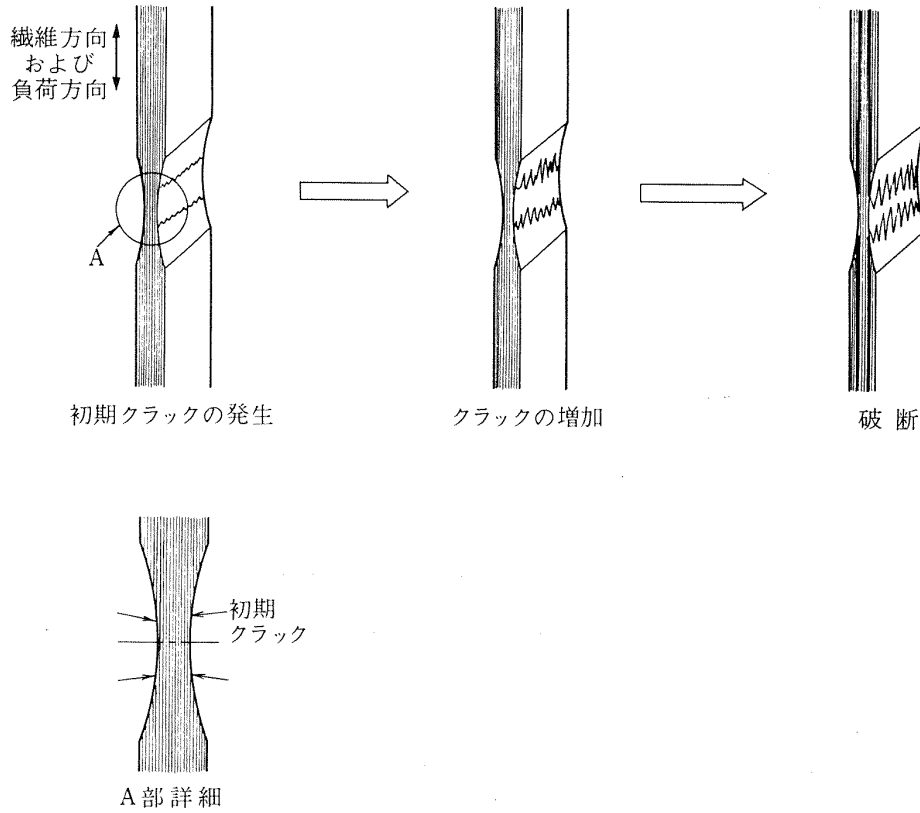


図 17 破断状況

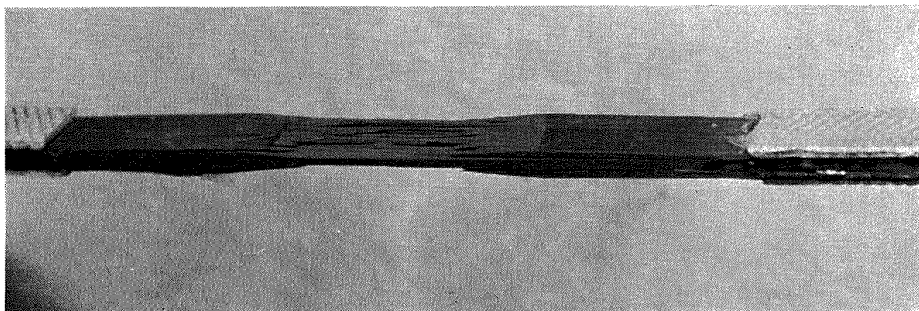


写真 5 引張破断後の試験片

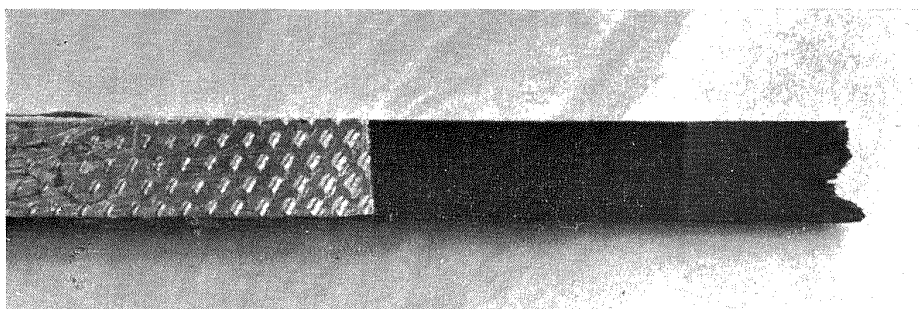


写真 6 引張破断後の試験片

最小断面部は表裏別々に加工するため、曲率半径の小さい場合は図 19 のように多少でもずれると、引張試験のさい曲げモーメントを受けやすいので、曲率半径は 100 ないし 125 mm が望ましい。

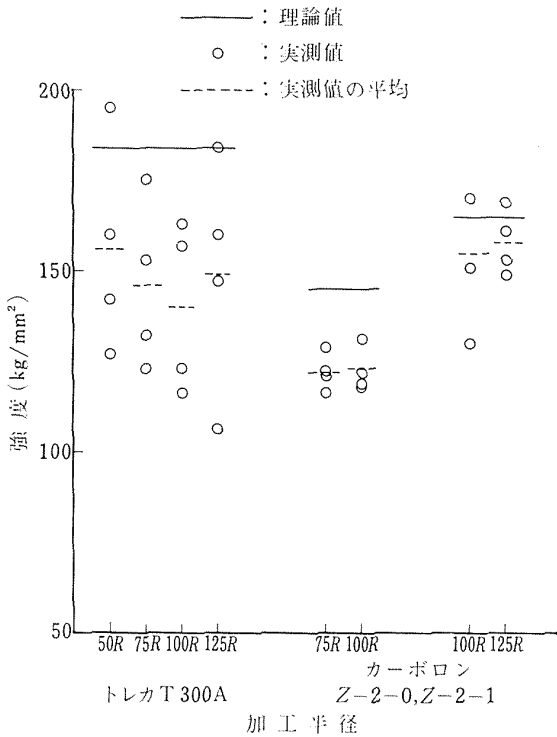


図 18 中央部加工半径と引張強度

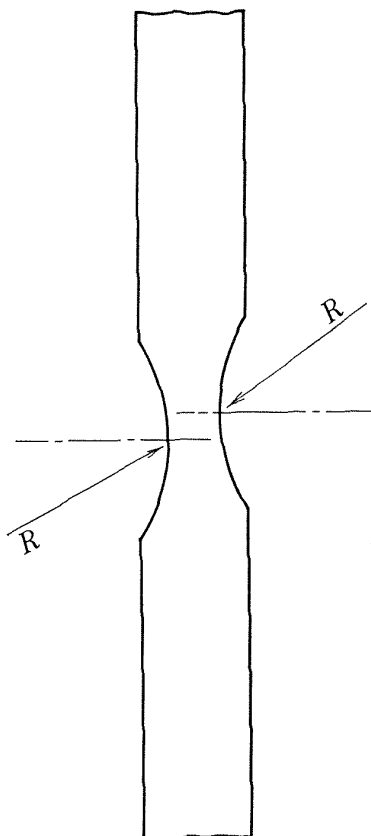


図 19 R 加工のずれた場合

4.2 曲げ試験

曲げ試験法には 3 点曲げ法と 4 点曲げ法の 2 とおりがあり、3 点曲げは簡便な方法で広く用いられているが、4 点曲げの方が理想的な試験法といえる。

強度試験は両方とも行ない比較し、弾性率は 4 点曲げ方式を採用した。

a) 曲げ弾性率測定

弾性率の測定にも 3 点曲げ方式、4 点曲げ方式があり、いずれも中央部の変位と荷重とから求める方法、または抵抗線ひずみゲージを接着し、そのひずみと荷重から求める方法があり、さらに荷重の加える方式としてはオートグラフ、油圧式万能試験機、電子管式万能試験機などを用いる方式がある、いずれも荷重は非常に小さい範囲で使用するので誤差が大きすぎる。そこで写真 7 に示す Dead Weight 法 (航技研法ともいう) による弾性率測定装置を考案し弾性率を測定した。すなわち図 20 に示すように対称 4 点曲げでは負荷点間のせん断力が 0 で、またモーメントは一定となり理想的な純曲げ試験ができる。この装置は 4 点曲げ方式で $L_1=50\text{ mm}$ 、 $L_2=100\text{ mm}$ と設定してある。

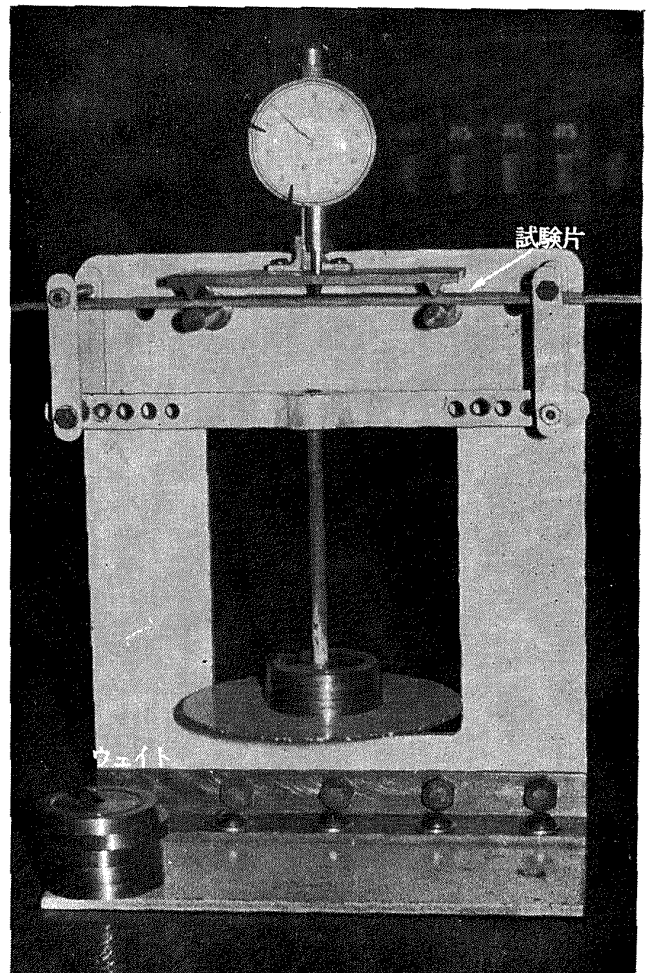


写真 7 Dead weight 法

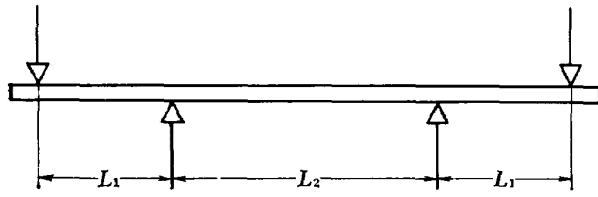


図 20 4点曲げの原理

この場合の曲げ弾性率 (E_b) および曲げ強度 (σ_b) は下記のとおり求められる。

$$E_b = \frac{WL_1L_2}{8I\delta} = \frac{3}{2} \frac{WL_1L_2}{bh^3\delta}, \quad I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (6)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{WL_1}{2} \frac{6}{bh^2} = \frac{3WL_1}{bh^2} \quad (7)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6}$$

ここで W は荷重, δ は中央部の変位 (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。まずウェイト (500g 単位) をのせることにより中央部の変位をダイヤルゲージで測定し, 式 (6) により弾性率は簡単に求められる。個人差, 試験機などによる誤差もなく, また平板だけでなく, 丸棒も測定でき非常に良い結果を得ている。またこの装置により試験前にまずこの装置で全部の種類試験片素材の検定を行ない, 極端な不良試験片素材は除外でき, 品質の管理にも使用している。すなわち目視検査では発見できなかった CFRP 内部のクラック, ボイドなどによる欠陥試験片は未然に発見できる特長がある。

CFRP の実測のデータを図 21 に示す。

b) 3点曲げ試験

対称3点曲げではその断面には曲げモーメントとせん断力が働き, その分布は図 22 のとおりとなる。すなわちせん断力は荷重点において最大となり, また曲げモーメントは両支点で0, 荷重点において最大となる。3点曲げ弾性率 (E_b), および強度 (σ_b) は次の

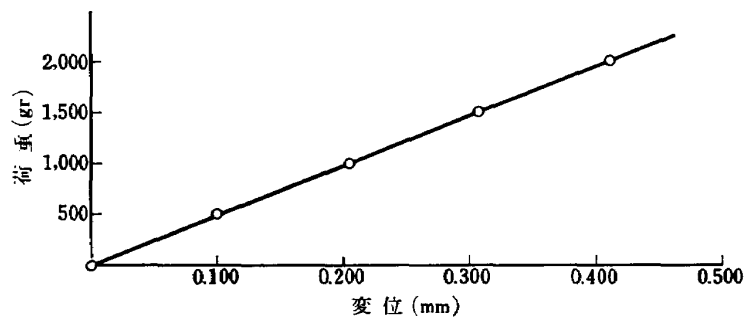
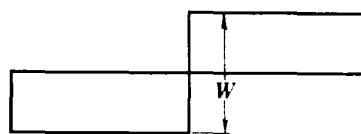
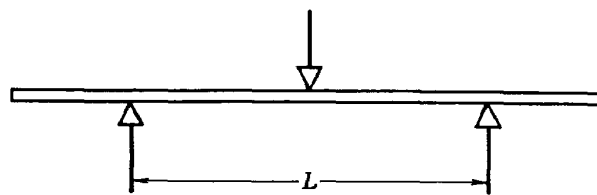
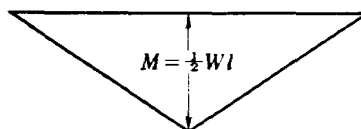


図 21 Dead Weight 法における荷重と変位



せん断力図



曲げモーメント図

図 22 3点曲げモーメント図

とおり求まる。

$$E_b = \frac{L^3 p}{48 I \delta} = \frac{L^3 p}{4 b h^3 \delta}, \quad I = \frac{b h^3}{12} \quad (8)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{p L}{4} \frac{6}{b h^2} = \frac{3}{2} \frac{p L}{b h^2}, \quad Z = \frac{b h^2}{6} \quad (9)$$

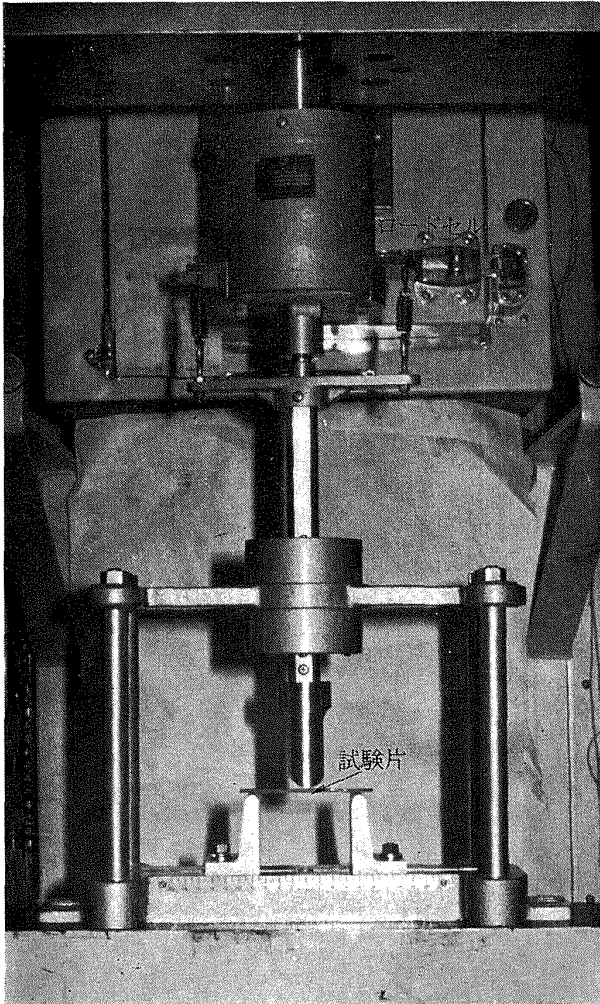


写真 8 3点曲げ装置

写真8に3点曲げ装置を示す。この装置もわれわれの研究室で改造したもので、上の円筒状のものが5tonのロードセルで、支点部をスプリングでつり、試験片には支点部の荷重が直接加わらないように工夫してある。支点部の曲率半径はなるべく大きい方がよく、ここではRAE方式を参考として12.5mm (1/2" R)とし下側の両支点は5mmとした。試験装置の拡大図を写真9に示す。

試験片は弾性率測定後(試験片の長さは300mm)、その試験片を100mm, 200mmにそれぞれ切断し、前者を3点曲げ用、後者を4点曲げ用として使用した。

これらを図23に示す。

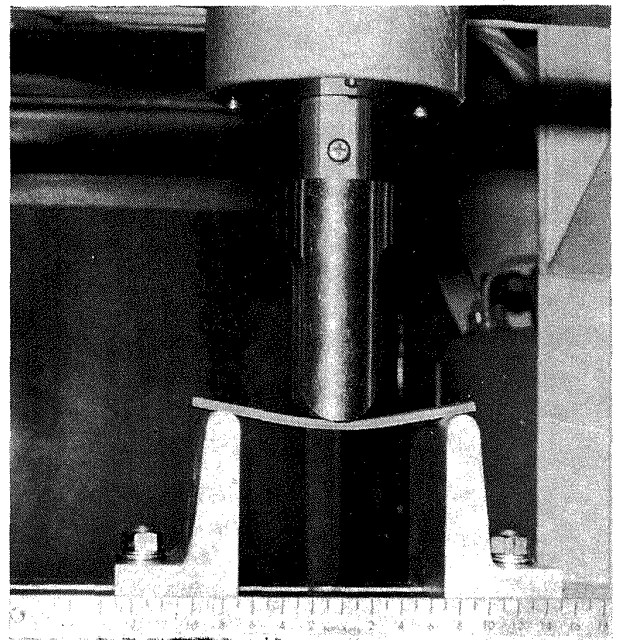
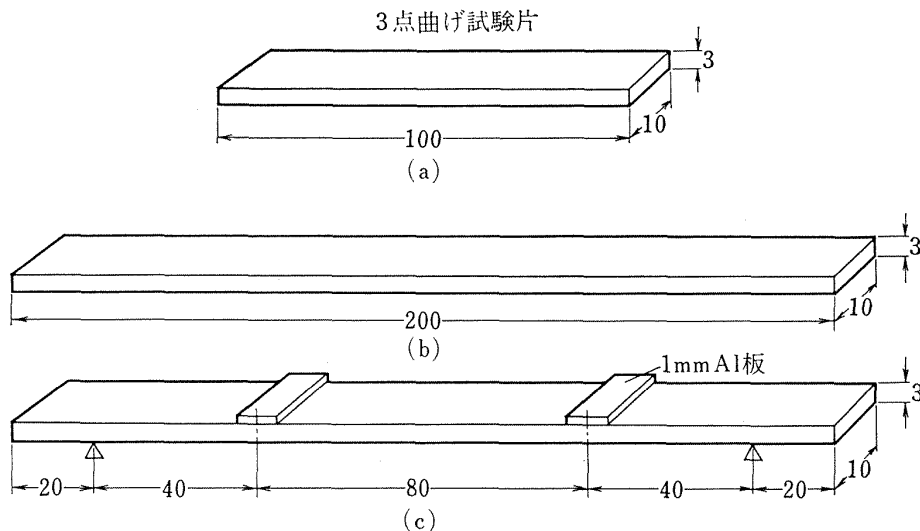


写真 9 3点曲げ拡大図



4点曲げ試験片

図 23 曲げ試験片

3点曲げの各種破断の様態を図 24 に示す。同図の (a) は横せん断破断、(b) は層間せん断破断、(c) は横せん断と層間せん断の混合型といえる。このうち (a) 型は強度が強く (c) 型が一番強度が弱い写真 10 に (b) 型の破断の様態を、写真 11 に (a) 型の破断の様態を示す。

3点曲げ破断と強度との関係を図 25 に示す。この図でもわかるように横せん断破断を起こしたものが応

力が 147 kg/mm^2 、層間せん断と横せん断が 122 kg/mm^2 で層間せん断のときが 99 kg/mm^2 となっている。なぜこのようないろいろな破断様式が生ずるか原因は不明である。

c) 4点曲げ試験

写真 12 に 4点曲げ試験装置の全体を示し、4点曲げ装置の拡大したものを写真 13 に示す。この装置もやはり航技研で開発したもので、上下とも支点部の位

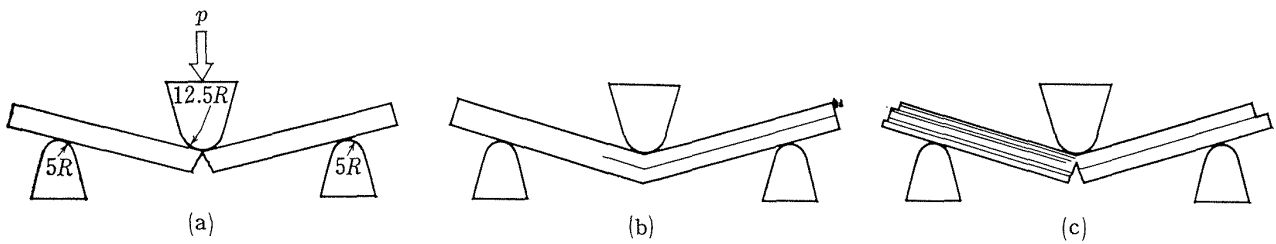


図 24 3点曲げ破断図

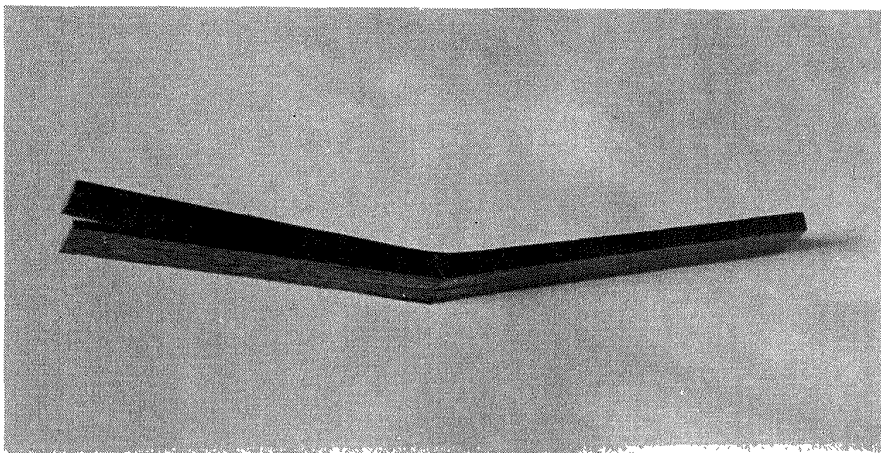


写真 10 3点曲げ破断

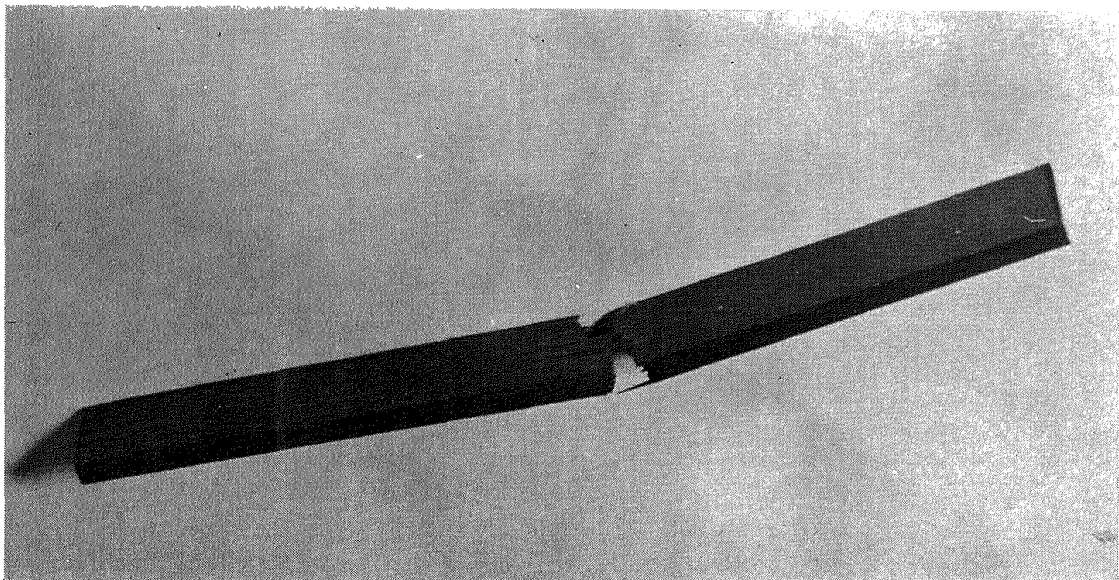


写真 11 3点曲げ破断

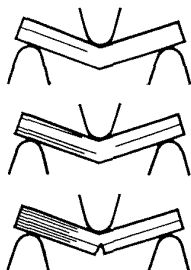
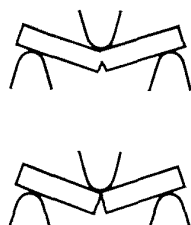
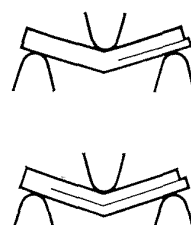
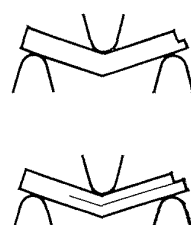
No.	Z-2-0		V _f =50%	
	1	2	3	4
				
σkg/mm ²	122.3	147.8	100.0	99.5

図 25 曲げ破断と強度

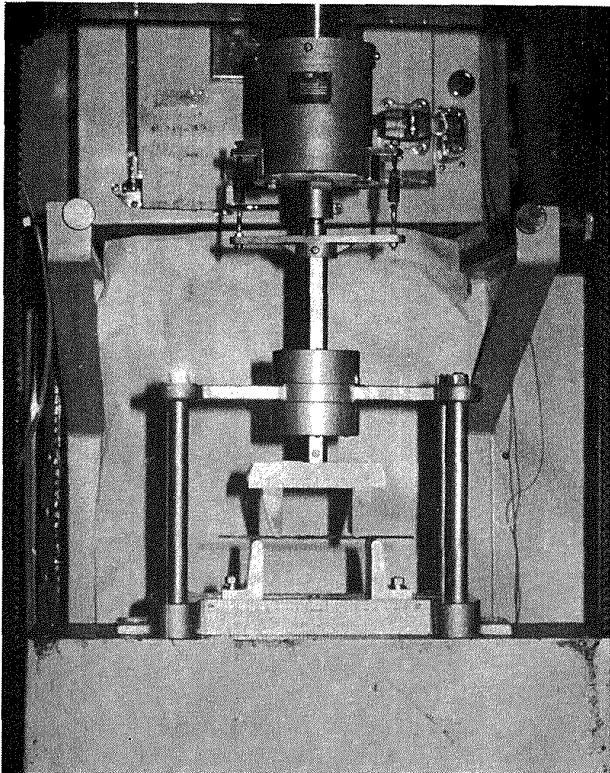


写真 12 4点曲げ装置

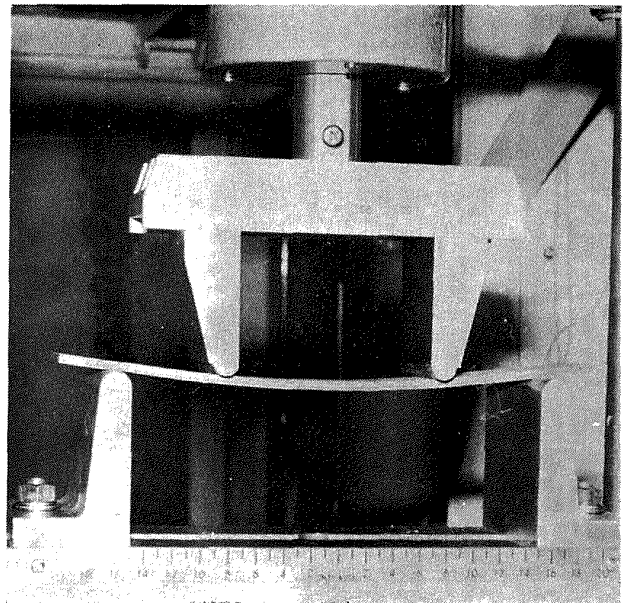


写真 13 4点曲げ拡大図

置は自由に横にスライド出来るようにしてある。支点部は上下とも曲率半径を 5 mm とした，対称 4 点曲げでは負荷点間のせん断力が 0 で，またモーメントはその間一定となり，理想的な純曲げ試験ができる。そのモーメント線図を図 26 に示す。4 点曲げの強度 (σ) は (10) 式に示すとおりである。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{Wl_1}{2} \frac{6}{bh^2} = \frac{3Wl_1}{bh^2} \quad (10)$$

$$\text{ただし } Z = \frac{bh^3}{6}$$

ここで b , h はそれぞれ試験片の幅と厚さである。カーボン複合材のようにせん断強度の弱い材料では，支点部でせん断破壊を起しやすいので図 27 に示すように 1 mm のアルミニウム板で補強すると中央部で曲げ破断を起す。4 点曲げの場合で，図 26 の l_1 は 40 mm, l_2 を 80 mm とした。

カーボン Z-2-0 複合材について支点部にアルミニウム補強板 (10×10×1.0 mm) を接着したときと，接着しなかったときの破断応力と破断模様を図 27 に

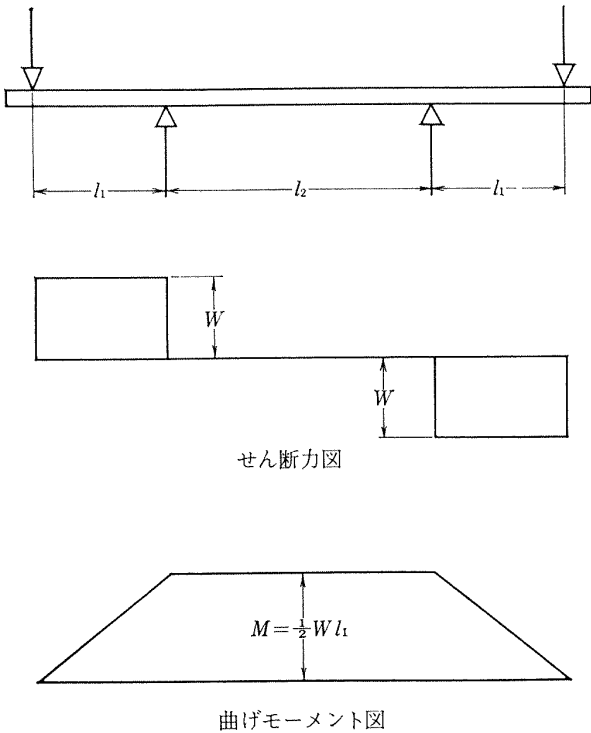


図 26 4点曲げモーメント図

示す。ここで同図 (a) は補強板なしの場合で、上側の支点部の外側から層間せん断を起して最後に支点部で破断し中央部では全く破壊を起こさないため、応力は 79.9 kg/mm^2 と非常に低い値となる。その破断模様を写真 14 に示す。

つぎに支点部の下側に補強板を接着した場合 (b) で、この場合には曲げ変形により途中ではなく離し飛散する、やはり支点部でクラックが入り、そこで破断してしまい、強度は (a) よりやや高い値で、大きくは変わらない。

つぎは上側支点部 (試験片の上側) に接着した場合 (c) で、この場合には中央部で曲げ破断を起し、そのときの強度も最高の値を示している。尚後日の実験では補強板を接着しないでのせる事でもかなり効果のあることがわかった。写真 15 にその破断模様を示す。

つぎは支点部の試験片の上下面に補強板を接着した場合 (d) で、この場合にはまず中央部で層間せん断を起しそれから破断しており、その強度は (c) に比

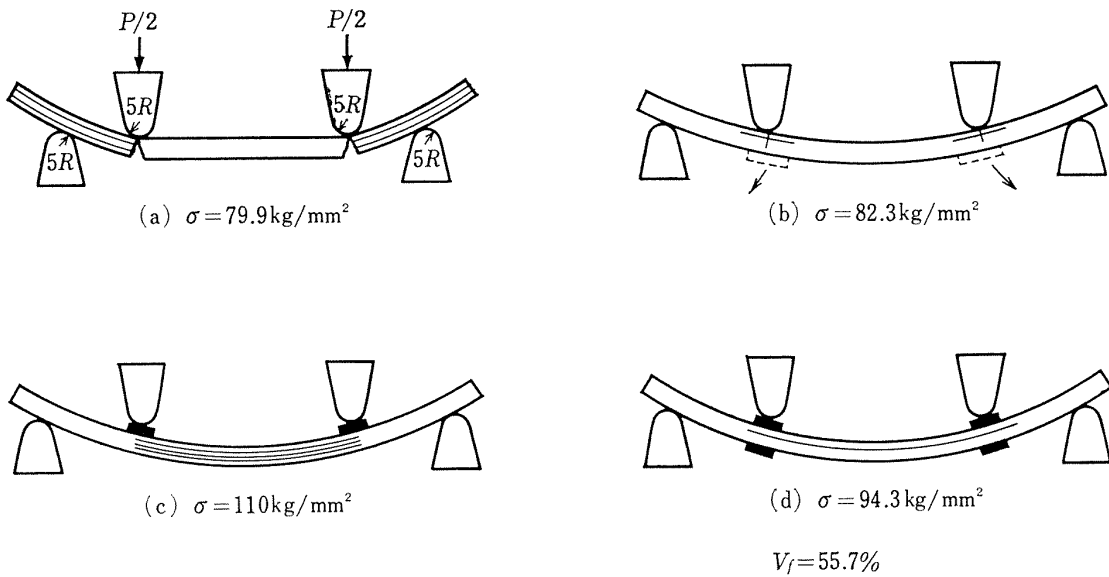


図 27 4点曲げ破断図

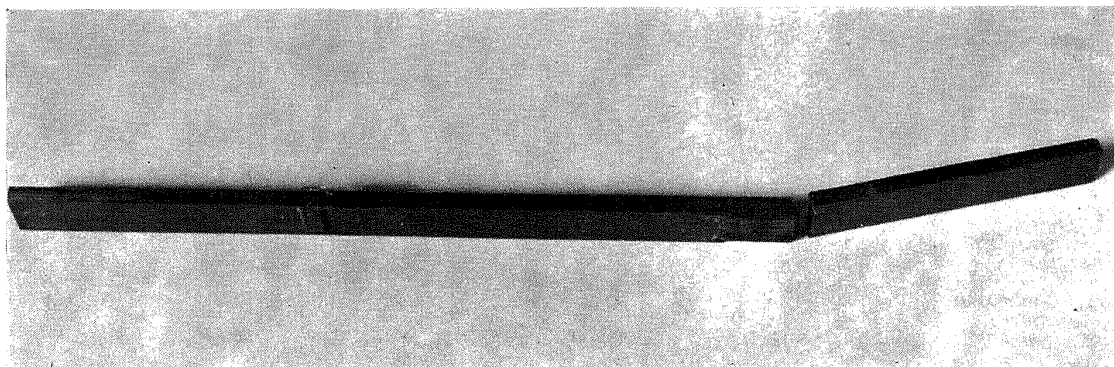


写真 14 4点曲げ破断 (支点部で破断)

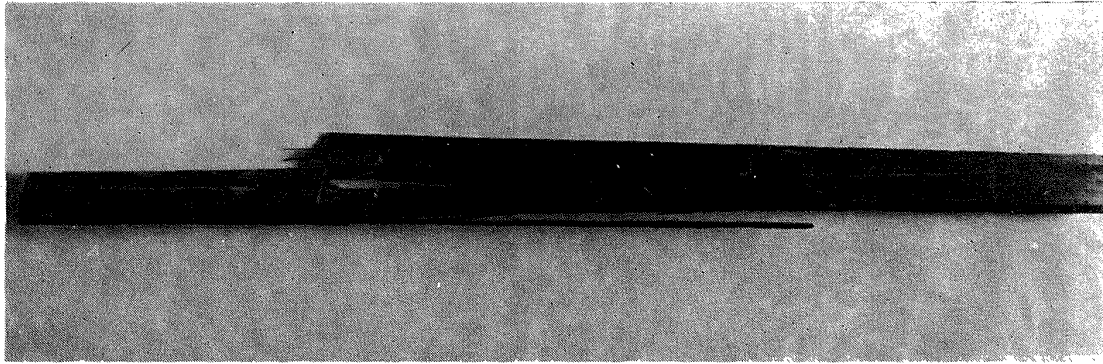


写真 15 4点曲げ破断

表 7 弾性率の理論値と実測値 (Dead Weight 法)

	Z-2-0	Z-2-1	Z-2-2	トレカ T 300 A
\bar{E}	10400 kg/mm ²	12500 kg/mm ²	11970 kg/mm ²	17200 kg/mm ²
V_f %	50%	59.5%	57.4%	73.7%
理論値*	10175 kg/mm ²	12042 kg/mm ²	12777 kg/mm ²	17043 kg/mm ²
E_f	20000 kg/mm ²	20000 kg/mm ²	22000 kg/mm ²	23000 kg/mm ²
σ_f	260 kg/mm ²	300 kg/mm ²	260~300 kg/mm ²	250 kg/mm ²
E_m	350 kg/mm ²	350 kg/mm ²	350 kg/mm ²	350 kg/mm ²

* $E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$

較してやや落ちるようである。多少補強による影響もでていられるかもしれない。以上の結果より (c) の場合のように補強板を試験片の上に接着もしくははのせる方法が一番良いと思う。

d) 曲げ弾性率と強度試験結果

Dead Weight 法による弾性率の測定結果を表 7 に示す。弾性率は理論値によく合うことがわかる。

強度は 3 点曲げ法による強度測定結果を図 28 に示す。破断の様態も示しておいた。4 点曲げの測定結果を表 8 に示す。破断の様子により強度はいちぢるしく変わり、その原因については、よくわからない事が多いが、カーボン繊維の表面処理法と樹脂のぬれの問題が大いに影響するように思われる。

4.3 圧縮試験

圧縮試験も非常に問題の多い試験法である。試験片は製法の項でも述べた通り引抜き法により 7 mmφ×300 mm の棒状複合材を作り、その体積含有率 (V_f) はそれぞれ 50, 60, 70% を目標として作った。

a) 弾性率の測定

各繊維含有率の試料について長さ 35 mm の試片を切り出し両端面を上仕上げの後 (図 29 (a) 参照)、中央部周囲に抵抗線ひずみゲージ (gage length 1 mm)


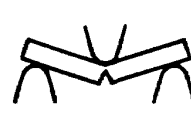




表 8 4点曲げ強度

	No.	σ_b (kg/mm ²)
Z-2-1 $V_f=59.5$	1	128.1
	2	138.8
	3	121.7
	4	141.6
Z-2-2 $V_f=57.4$	1	101.2
	2	95.2
	3	122.7
	4	117.4
トレカ T 300 A $V_f=73.7$	1	167.4
	2	139.7
	3	175.4
	4	189.2







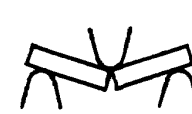
を 3 枚、120 度の間隔で円周上にシアノアクリレート系接着剤により接着した。

試験はオートグラフに 5 ton のロードセルを使い、圧縮荷重を加え、静ひずみ測定器により試験片の縦ひずみを測定した。



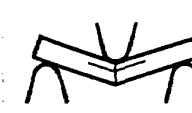

最大ひずみ量が $1,000 \times 10^{-6}$ 程度までの荷重を加

		Z-2-1		$V_f = 59.5\%$	
No.	1	2	3	4	
					
					
$\sigma \text{kg/mm}^2$	111.0	103.3	112.0	126.5	

(a)

		Z-2-2		$V_f = 57.4\%$	
No.	1-1	1-2	2-1	2-2	
					
				飛散	
$\sigma \text{kg/mm}^2$	129.9	106.0	134.1	129.8	

(b)

		トレカ T300A		$V_f = 73.7\%$	
No.	1-1	1-2	2-1	2-2	
					
$\sigma \text{kg/mm}^2$	158.8	153.6	184.9	186.4	

(c)

図 28 3点曲げ強度

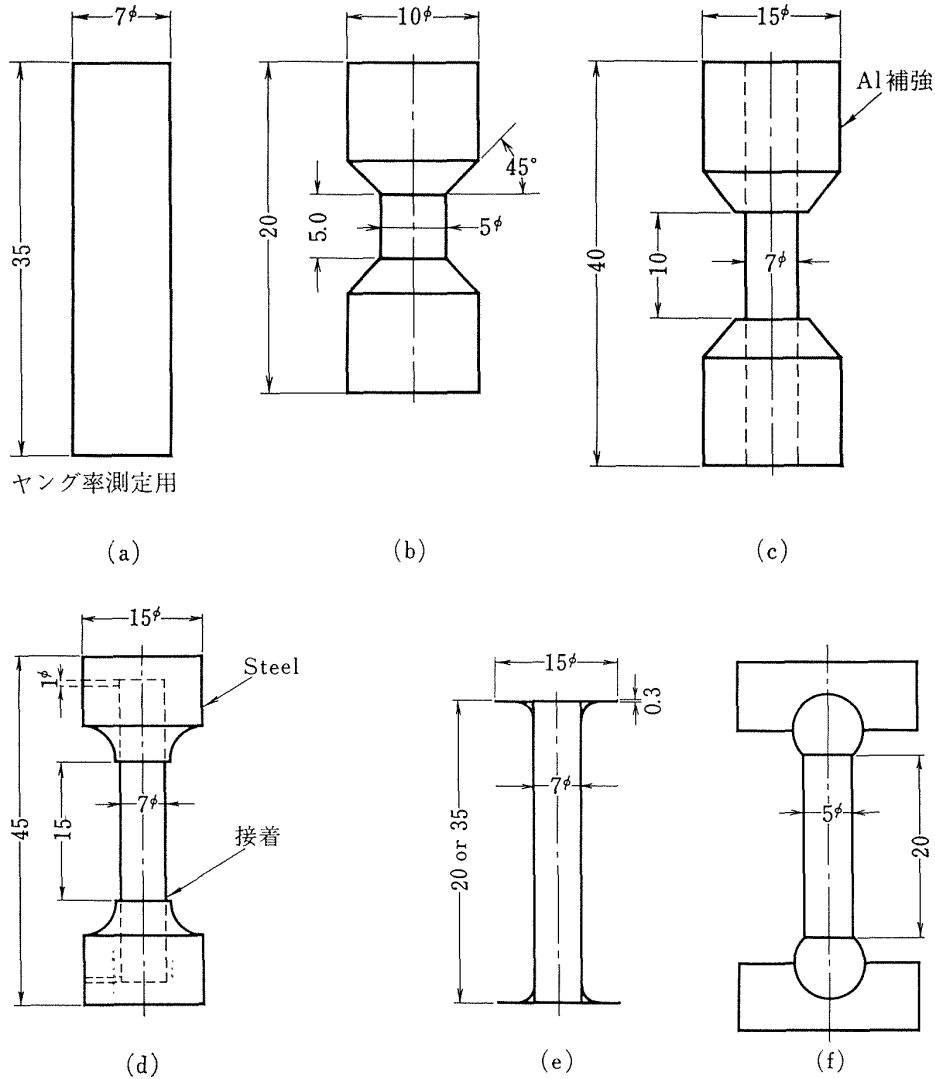


図 29 各種圧縮試験片

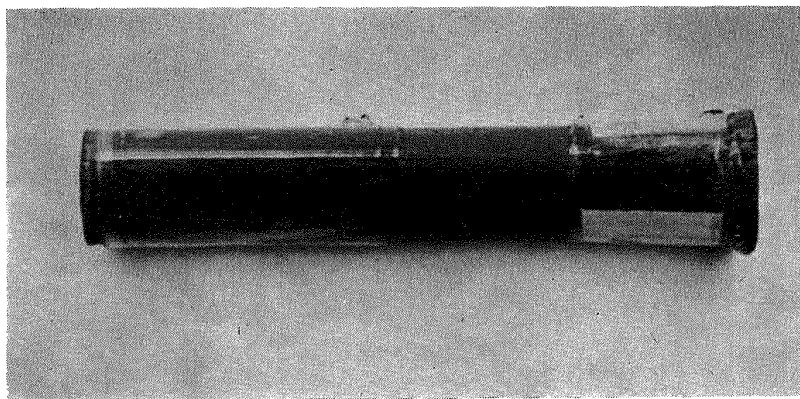


写真 16 Brooming 現象

え荷重とひずみの関係を求め、縦弾性率は次式から求めた。

$$E_c = \frac{W}{A \cdot \epsilon} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (11)$$

ここで、 E_c : 縦弾性率 (kg/mm^2)、 W : 荷重 (kg)、 A : 断面積 (mm^2)、 ϵ : ひずみ ($\times 10^{-6}$) である。

b) 圧縮強度の測定

強度測定用試験片は長さ 20 mm と 35 mm について行なった。試料が一方方向強化材であるため丸棒の短柱をそのまま圧縮していくと端部で brooming 現象 (ほうき状になること) を生じて局部破壊を起こし、正しい強度がえられない (写真 16 参照), したがっ

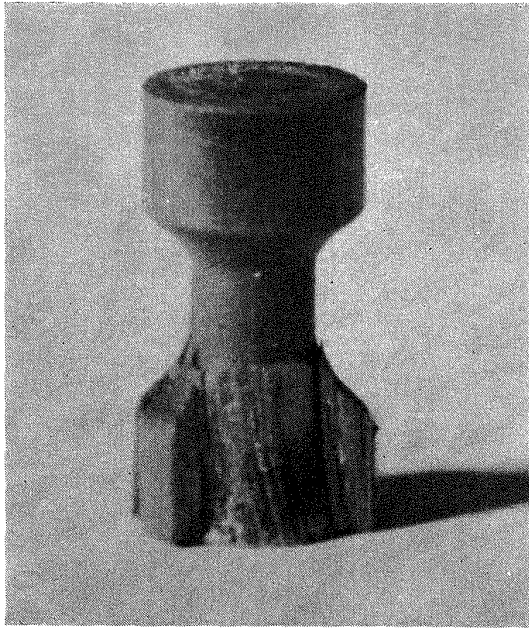


写真 17 モルガナイト法 (破断)

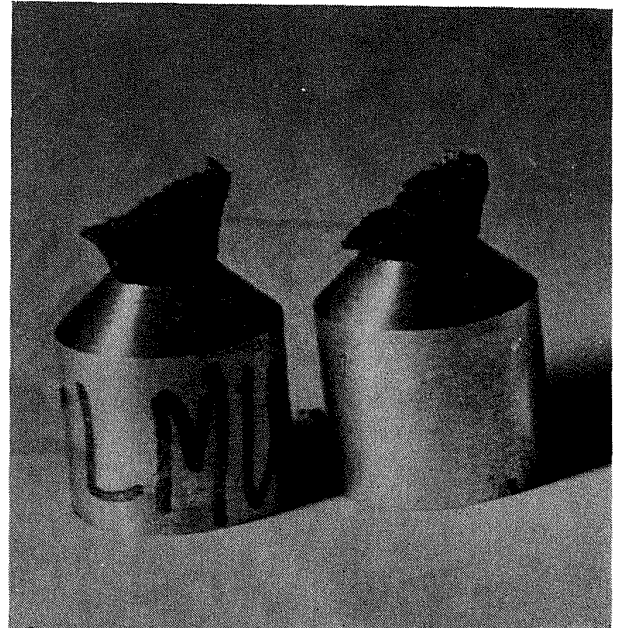


写真 18 低弾性カーボン複合材の破断

て端部の補強が必要となる。そこで図 29 (b) に示すように旋盤で中央部を切削して圧縮試験を行なった。(この試片形状はモルガナイト法による)。同方法では圧縮荷重を加えていくとまず補強部で縦割れを生じ良い結果はえられなかった、試験後の試験片を写真 17 に示す。

つぎに図 29 (c) に示すような上下両端をアルミニウム合金製の円筒状金具により補強した。両端の底面は旋盤により加工ができ、軸方向との直角が簡単にだせる特長がある。この方法では、低弾性カーボン複合材の場合には良い結果がえられたが、高強度カーボン複合材の場合には強度が高いため複合材が破断する前にアルミニウム合金の補強部との間における接着部で破壊を生じて比較的低い値で破断する欠点がある。低弾性カーボン複合材の破断状況を写真 18 に示す。

そこでアルミニウム合金製の補強筒を曲線的にテーパをつけた底付きキャップにし、材質もアルミニウム合金より鋼とした林の方法³⁾による試験を行なった。この方法での試験片形状を図 29 (d) に示す。しかしながらカーボン複合材のポアソン比が 0.3 程度であるため破断前に横方向に膨張して図 30 のようにキャップ付根より 45 度位の角度でクラックが入り破断した。実験中の状況を写真 19 に、破断後の試験片を写真 20 に示す。

つぎにこのような横膨張による影響を少なくするため図 29 (e) のように上下両端面に 15 mmφ で厚さ 0.3 mm の鋼板を接着した。接着法は直角に取り付ける治具によって、まずシアノアクリレート系接着剤で

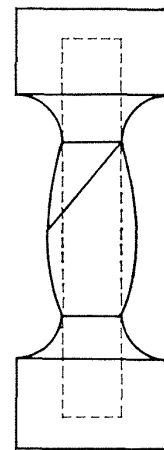


図 30 圧縮破断

鋼板を接着し、その後エポキシ樹脂 (エピコート 828/ トリス・ジメチルアミノメチル・フェノール) により端部の補強を行なった。試験片長さは 20 mm と 35 mm の 2 種類行なった。この場合にも brooming 現象を起して鋼板がはがれるものがあった。この試験片を写真 21 に示す。中央部分において破断した試験片を写真 22 に示す。はがれの原因は、接着不良の場合と、鋼板が薄かったため荷重を加えて行くと鋼板の変形によりはくりが起こると思われる。

つぎに比較的良好な試験結果をえている東レ (株) の方法 (UCC) を紹介する。図 29 (f) に示すように鋼球の一部を削り、その面に試験片を接着する。この試験片に曲率付きの治具を使って荷重を加える。この方法は理想的といえるが、軸中心を合わせるために特殊な試験治具を必要とする、しかも相当手間のかかる方

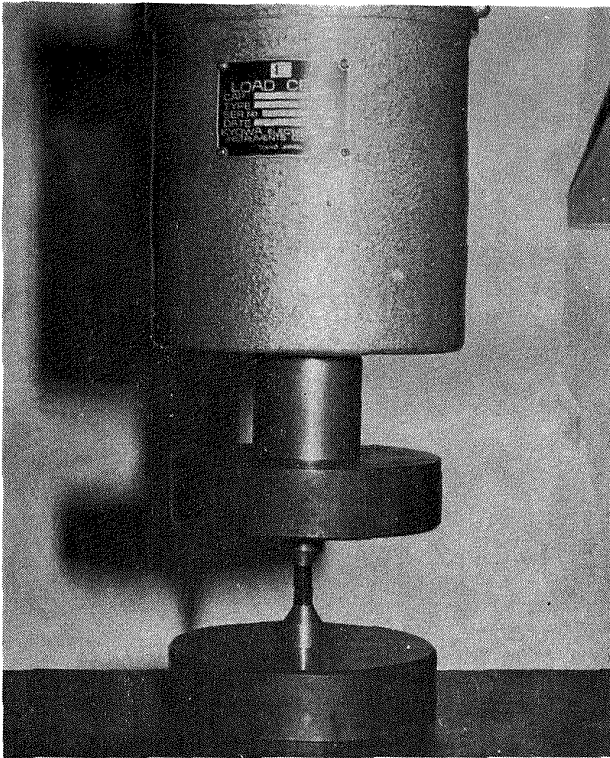


写真 19 圧縮試験

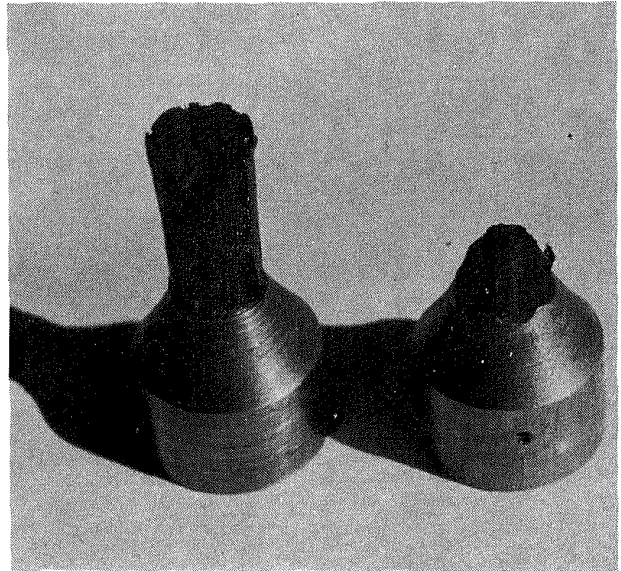


写真 20 圧縮破断

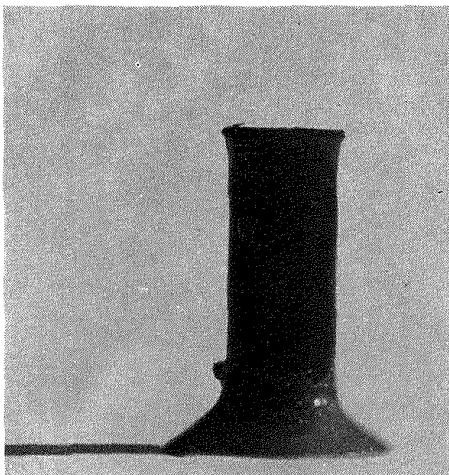


写真 21 圧縮破断 (Brooming)

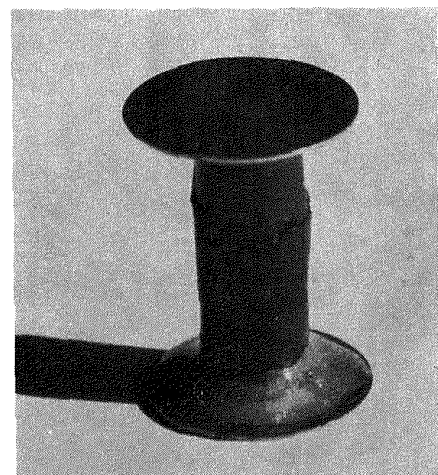


写真 22 圧縮破断

表 9 試験片形状および繊維含有率

トレカ T 300A		$\rho_f=1.77$			
試料番号	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	W_f (%)	V_f (%)	
40	1	6.88	37.18	44.57	35.0
	2	6.88	37.18		
	3	6.88	37.18		
	4	6.88	37.18		
	5	6.87	37.07		
	6	6.87	37.07		
60	1	7.00	38.49	61.15	51.5
	2	7.00	38.49		
	3	7.00	38.49		
	4	7.00	38.49		
	5	6.98	38.27		
	6	6.98	38.27		
70	1	6.93	37.72	75.30	66.5
	2	6.93	37.72		
	3	6.93	37.72		
	4	6.93	37.72		
	5	6.93	37.72		
	6	6.93	37.72		

No. 1, 2: $l=35$ mm, 縦弾性率の測定

No. 3, 4: $l=20$ mm, 端部をエポキシ樹脂補強による強度測定

No. 5, 6: $l=35$ mm, 端部を鋼製キャップ補強による強度測定

ρ_f : カーボン繊維の比重, W_f : 重量含有率, V_f : 体積含有率

法と思われる。なお参考のために同方法での結果も併記しておく。

圧縮強度の試験はすべてオートグラフにより、クロスヘッド速度 0.25 mm/min の一定速度で行なった。

断面積を A 、最大荷重を P とすれば圧縮強度 (σ_c) は、

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (12)$$

により求まる。

試験片の形状および繊維含有率を表 9、表 10 に示す。

c) 試験結果および考察

3 種類のカーボン繊維 (トレカ T 300A, カーボロン Z-2-1, カーボロン Z-2-2) について繊維含有率を 35~70% 内にて変えた丸棒試料を引抜き法により成形した。この方法は繊維の配向性が良く、繊維含有率を変えるには、ガラス管内に引き入れる繊維量を

変えれば良く簡単に一方向強化の複合材がえられる。ただし、カーボン繊維含有率の高い場合は良いが、カーボン繊維量が少ない場合には繊維が均一に分布せずかたよったものがえられやすい欠点がある。燃焼法によってエポキシ樹脂を取り除いたカーボン繊維だけの分布状況を写真 23 に示す。左側がカーボン繊維含有率の高い場合で右側が低い場合である。

縦弾性率の測定における荷重と縦ひずみの関係を図 31~図 33 に示し、縦弾性率の測定結果を表 11 に示す。この表の値を線図化したのが図 34~図 36 である。ここで理論値とは複合則による値で、式は次の通りである。

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

上式に用いた繊維の圧縮弾性率 E_f の値は実測困難な値であるため引張弾性率を使用した。

トレカ T 300A による試験結果は理論値との対応が良かったが、カーボロン Z-2-1 では約 10% 程度

表 10 試験片形状および繊維含有率

カーボン Z-2-1

$\rho_f=1.75$

試料番号	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	W_f (%)	V_f (%)
50	1	6.91	52.94	42.6
	2	6.89		
	3	6.88		
	4	6.87		
	5	6.88		
	6	6.88		
60	1	6.93	64.57	55.4
	2	6.88		
	3	6.93		
	4	6.90		
	5	6.90		
	6	6.89		
70	1	6.93	69.44	60.1
	2	6.90		
	3	6.93		
	4	6.96		
	5	6.90		
	6	6.91		

カーボン Z-2-2

$\rho_f=1.75$

50	1	6.93	52.50	42.8
	2	6.81		
	3	6.80		
	4	6.83		
	5	6.80		
	6	6.82		
60	1	6.86	61.01	50.8
	2	6.85		
	3	6.91		
	4	6.89		
	5	6.87		
	6	6.85		
70	1	6.93	69.68	59.4
	2	6.91		
	3	6.95		
	4	6.96		
	5	6.88		
	6	6.93		

No. 1, 2: $l=35$ mm, 縦弾性率の測定

No. 3, 4: $l=20$ mm, 端部をエポキシ樹脂補強による強度測定

No. 5, 6: $l=35$ mm, 端部を鋼製キャップ補強による強度測定

ρ_f : カーボン繊維の比重, W_f : 重量含有率, V_f : 体積含有率

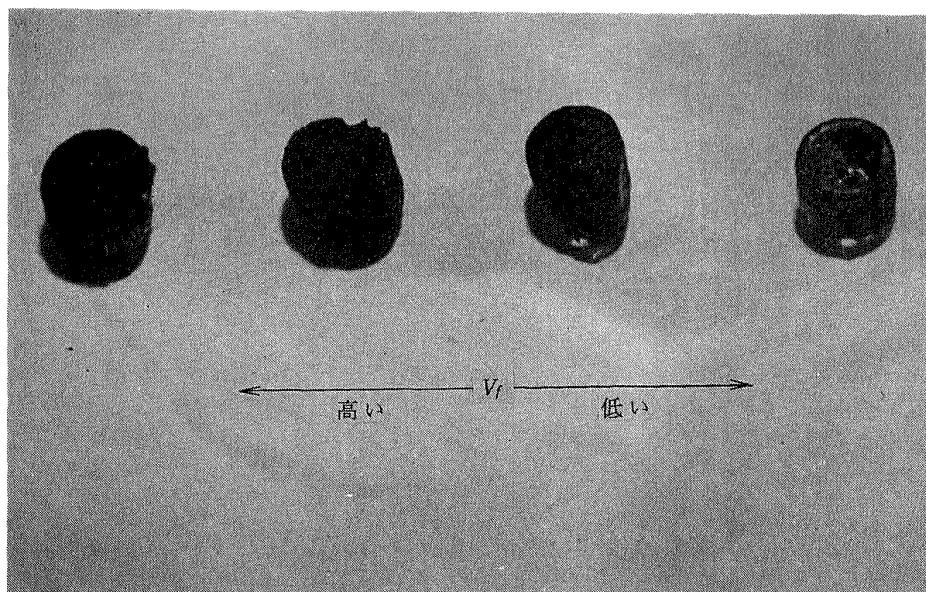


写真 23 カーボン繊維の分布

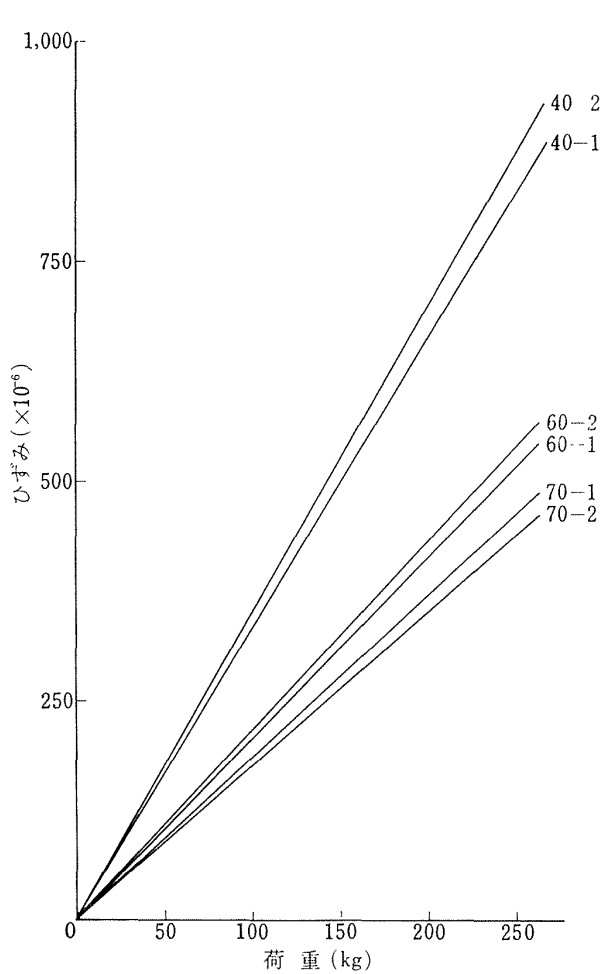


図 31 縦弾性率測定における荷重とひずみ (トレカ・T 300A)

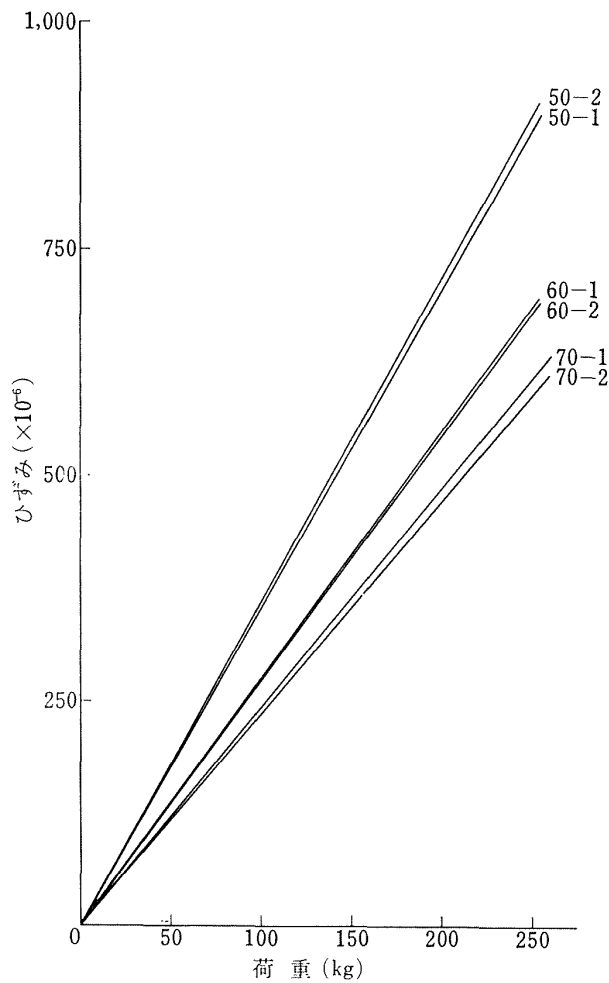


図 32 縦弾性率測定における荷重とひずみ (カーボン・Z-2-1)

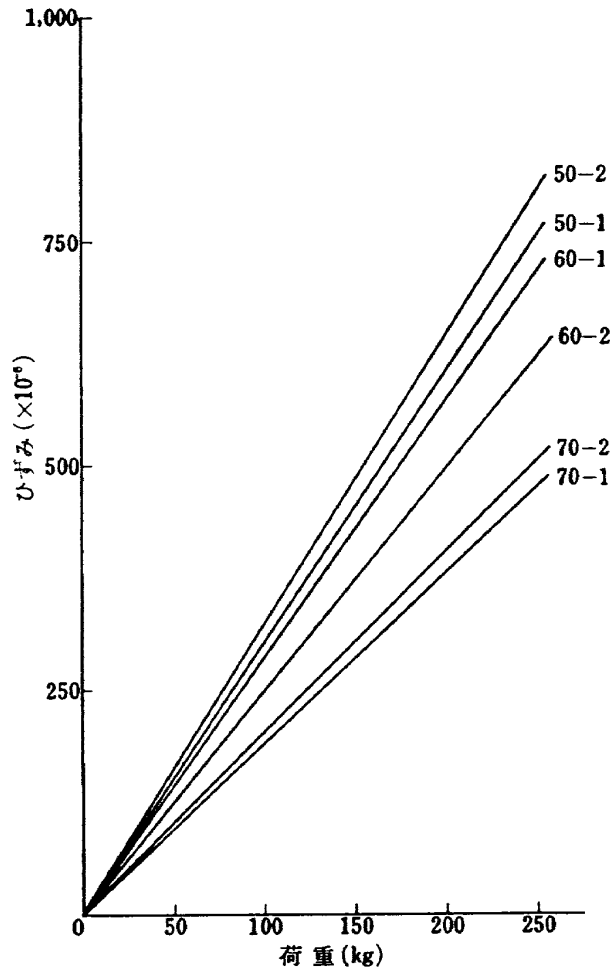


図 33 縦弾性率測定における荷重とひずみ
(カーボン・Z-2-2)

表 11 縦弾性率の測定

試料	繊維含有率 (V_f %)	E_c (kg/mm ²)	理論値 (kg/mm ²)
トレカ T 300A	35.0	{7642 7865}	7930
	51.5	{12373 11919}	11470
	66.5	{14182 14925}	14720
カーボン Z-2-1	42.6	{7510 7486}	10900
	55.4	{9555 9680}	12870
	60.1	{10992 11184}	14990
カーボン Z-2-2	42.8	{8742 8350}	10900
	50.8	{9436 10779}	12870
	59.4	{13495 13079}	14990

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

試料 No. 1, 2

ひずみゲージ (共和電業, KFC-1-C₁)

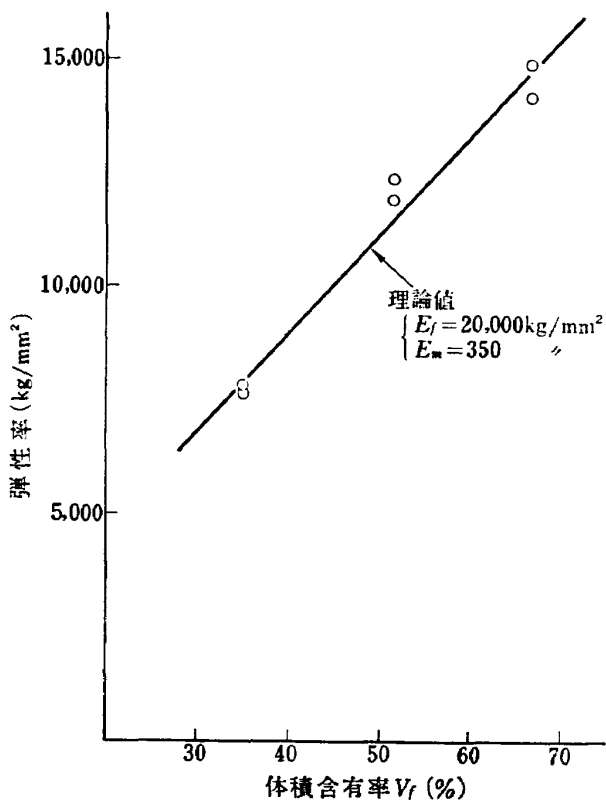


図 34 弾性率と繊維含有率 (トレカ・T 300A)

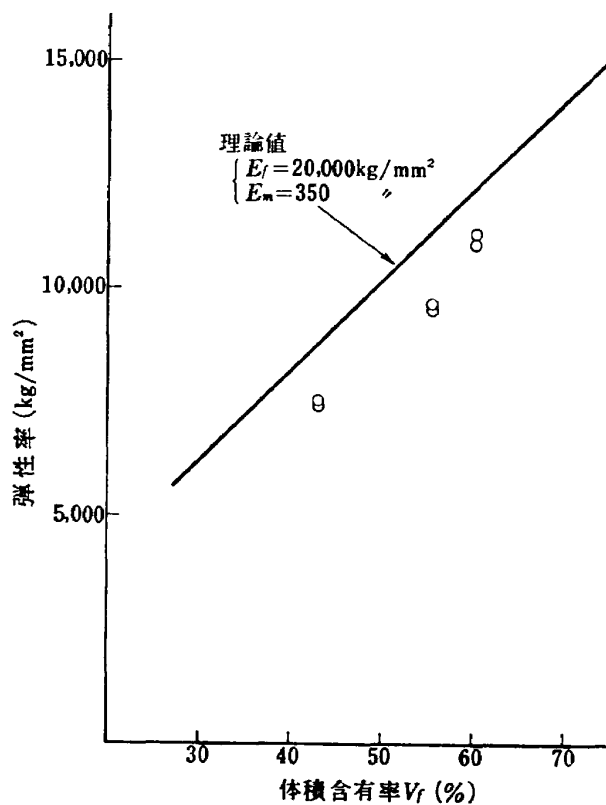


図 35 弾性率と繊維含有率 (カーボン・Z-2-1)

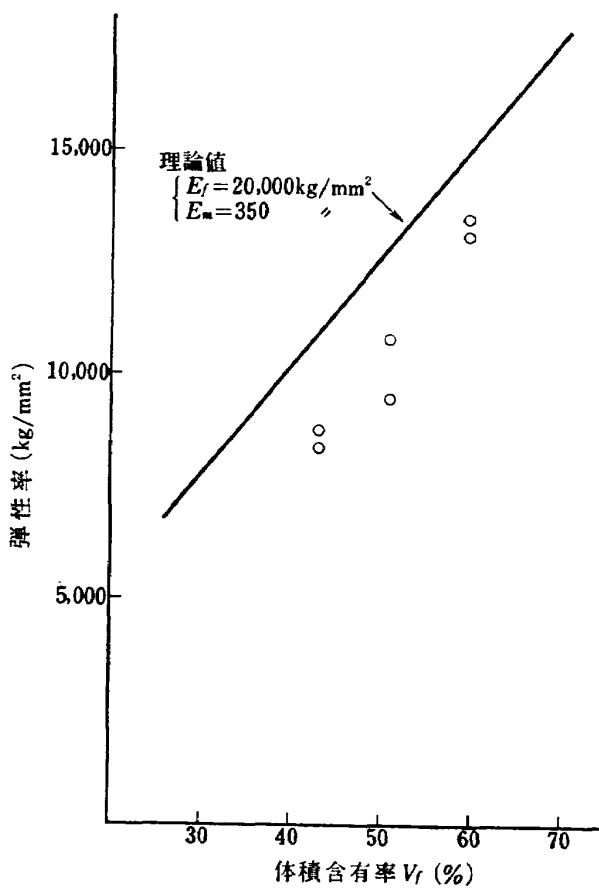


図 36 弾性率と繊維含有率 (カーボン・Z-2-2)

表 12 圧縮強度

試料	V_f (%)	* σ_c (kg/mm ²)	** σ_c (kg/mm ²)
トレカ T 300A	35.0	{68.1 59.7}	{55.8 65.8}
	51.5	{67.0 79.5}	{90.9 84.9}
	66.5	{82.7 80.4}	{103.9 110.3}
カーボン Z-2-1	42.6	{55.7 59.9}	{56.2 54.1}
	55.4	{54.1 62.1}	{59.4 59.5}
	60.1	{62.8 65.0}	{63.6 51.7}
カーボン Z-2-2	42.8	{38.0 47.2}	{66.1 64.6}
	50.8	{61.1 51.2}	{62.6 65.7}
	59.4	{64.6 64.7}	{66.4 88.3}

* No. 3, 4: $l=20$ mm, エポキシ樹脂補強

** No. 5, 6: $l=35$ mm, 鋼製キャップ
Crosshead Speed 0.25 mm/min

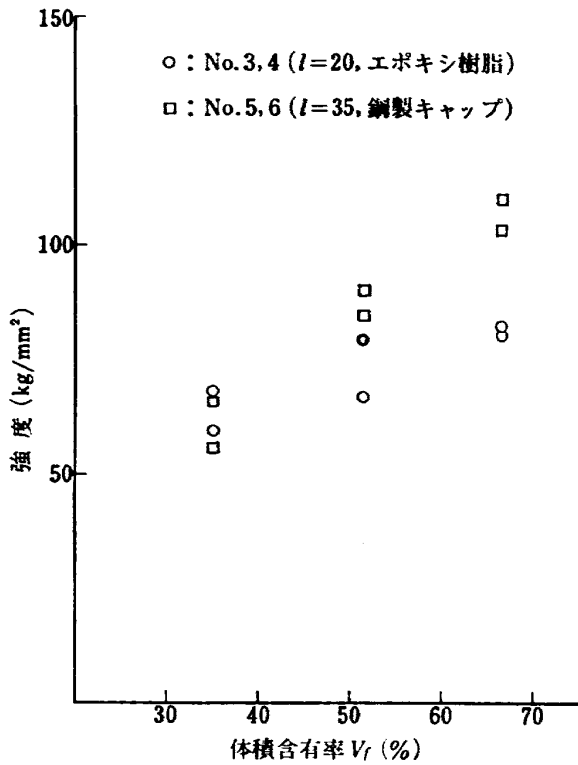


図 37 圧縮強度と繊維含有率 (トレカ・T 300A)

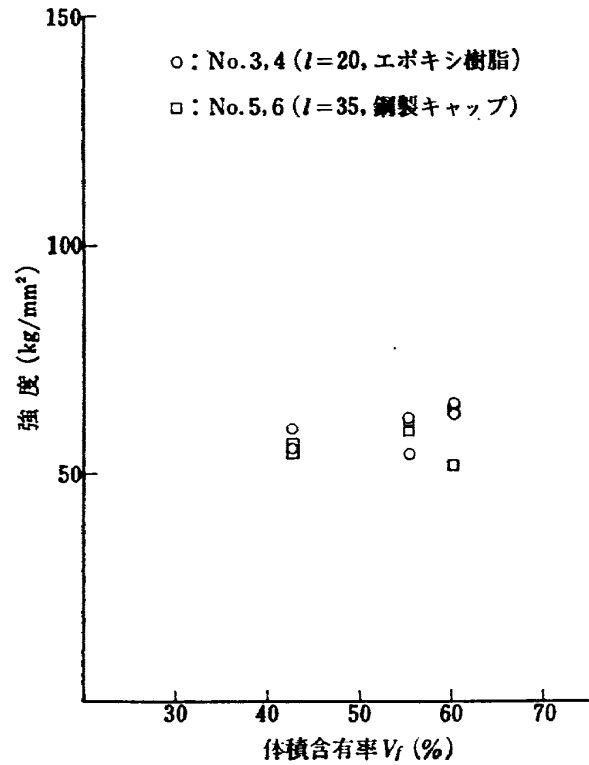


図 38 圧縮強度と繊維含有率 (カーボン・Z-2-1)

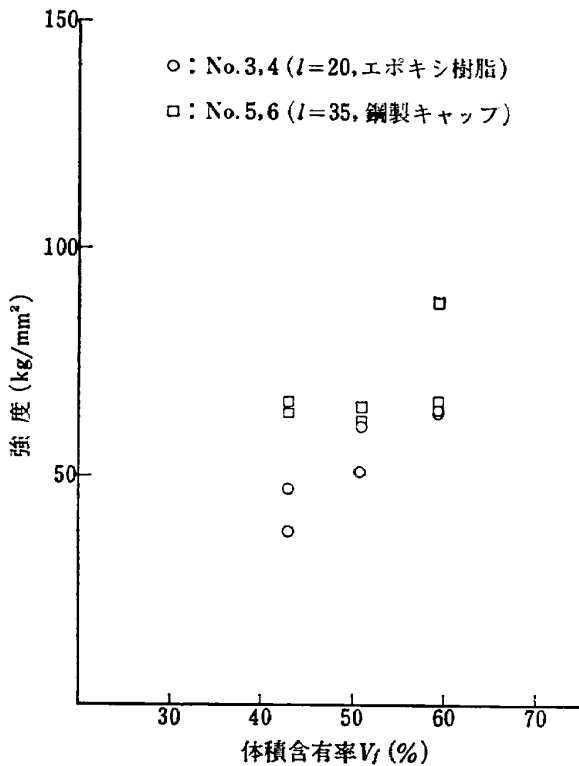


図 39 圧縮強度と繊維含有率
(カーボン・Z-2-2)

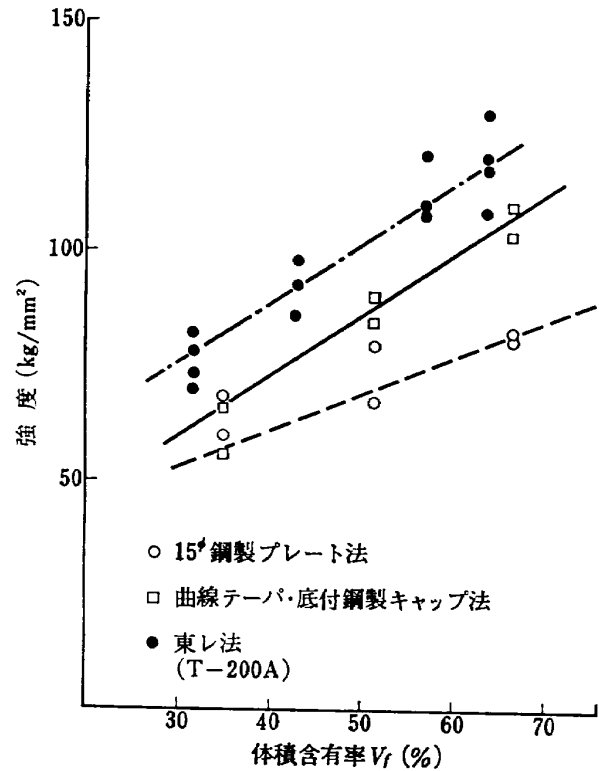


図 40 圧縮強度と繊維含有率
(トレカ・T 300 A)

低く、カーボン Z-2-2 による試験結果では 15~20% 程低い値となった。

圧縮強度の測定結果を表 12 に示し、それを線図化したのが図 37~図 39 である。

トレカ T 300A についてはカーボン繊維含有率の増加とともにその強度が増大していく傾向が良くわかるが、カーボン Z-2-1 およびカーボン Z-2-2 ではその傾向があまり出ていない。

つぎにトレカ T 300A とトレカ T 200A により、各種試験方法による測定結果を示したのが図 40 である。ただしトレカ T 200A については東レ(株)より提供してもらったデータである。

この結果によると 15mmφ 鋼製プレート法より曲線テープ加工の底付鋼製キャップ法の方が強度は高目にでていて、さらに東レ(株)法の方が強度が高い。これはカーボン繊維の違いによる影響および試験法による差がでていられると思われる。原理的には鋼製プレート法でも材質、厚さなどを改良すればよい結果がえられるものと思う。

圧縮による破断状況は、ある荷重に達すると大きな音とともに突然破壊する。各種試験片形状による破断までの応力とクロスヘッド移動量の関係を図 41~図 46 に示す。

4.4 層間せん断試験

複合材のせん断方式には数種類あり、一般には図 47 に示すように繊維の方向に対して横方向の横せん断 (transverse shear)、面内せん断 (in-plane shear)、層間せん断 (inter-laminar shear) などがある。

一方向強化材では前 2 者は比較的強くあまり問題はないが、後者の層間せん断強度は非常に低く、複合材として重要な性質であるため、もっぱらこの層間せん断試験が行なわれる。

とくにカーボン複合材はガラス複合材に比較してこの値が低いので、カーボン繊維に表面処理 (treated) や、けば立ち防止処理 (finishing) をしたり、または特殊な処理としてカーボン繊維の表面にホイスカ (Whisker) を発生させたりする方法など、層間せん断強度を上げる努力が多くなされている。

カーボン複合材は現在のところ非常に高価な材料である。従ってその試験片も比較的小さく、しかもあまり複雑な加工を要しないショートビーム法が現在広く行なわれている。

その原理図を図 48 に示す。短いビーム 2 枚をかさねたものの 3 点曲げ試験を行なうと、合わせ面が中立軸 nn になる。いま圧縮と引張りの特性が等しい材料では同図のように、上側の板には矢印のように圧縮力

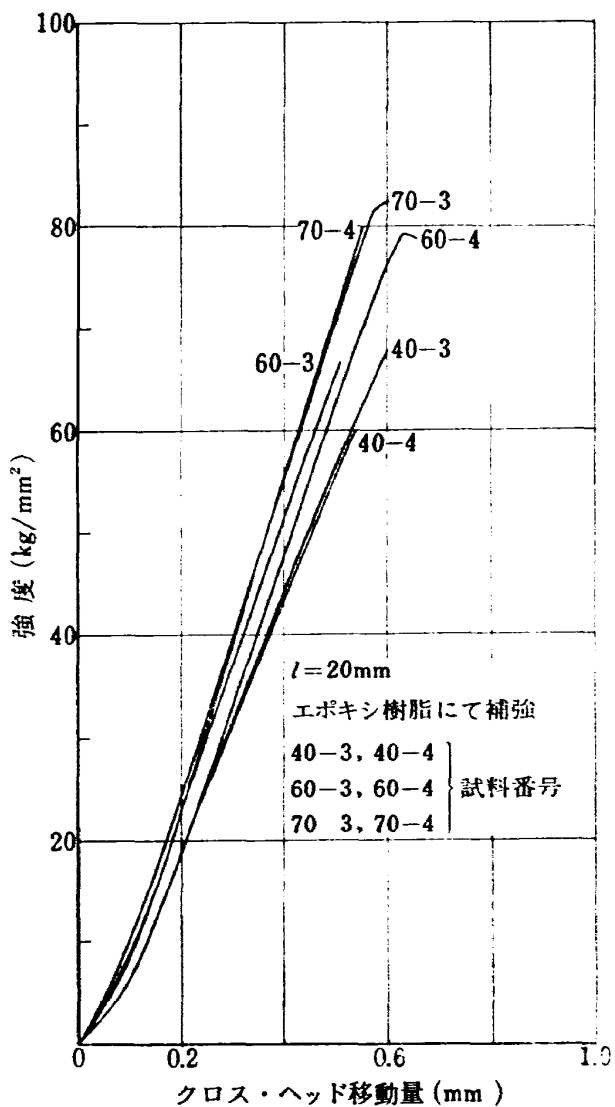


図 41 圧縮強度と変位 (トレカ・T300A)

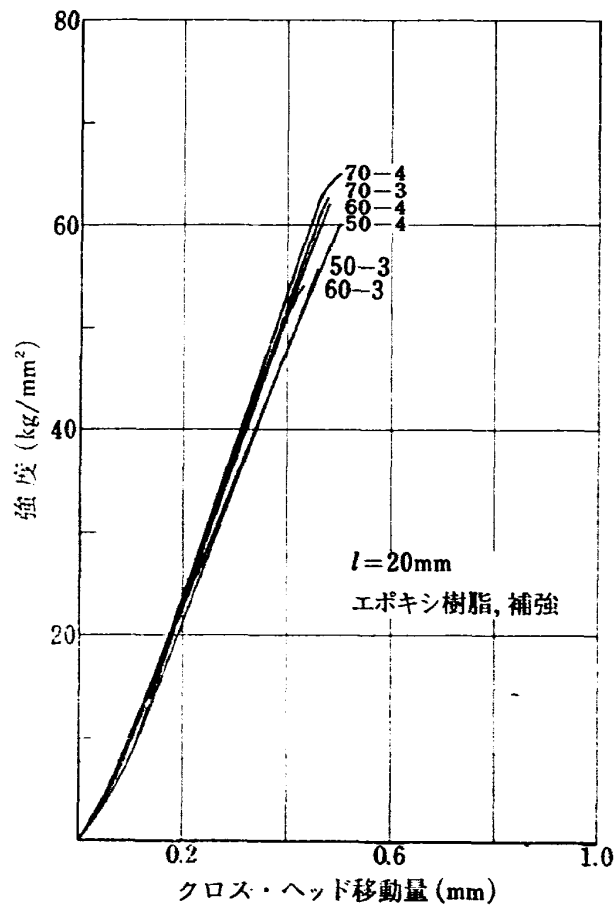


図 42 圧縮強度と変位 (カーボン・Z-2-1)

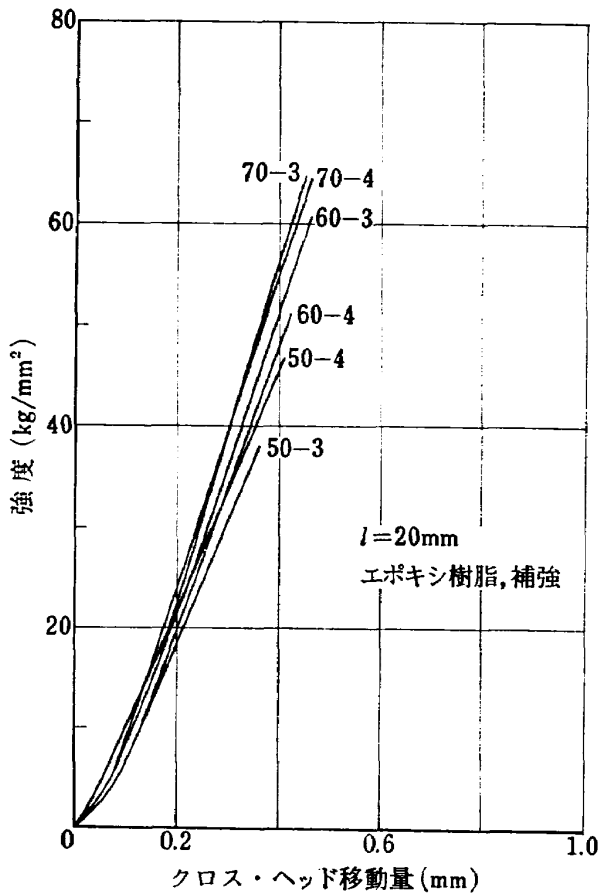


図 43 圧縮強度と変位 (カーボン・Z-2-2)

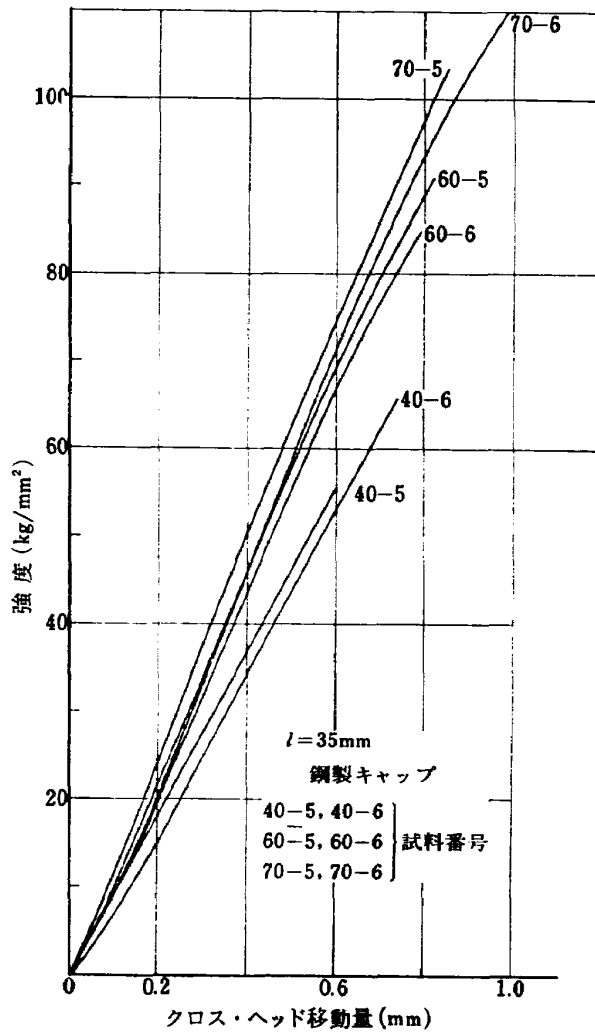


図 44 圧縮強度と変位 (トレカ・T 300 A)

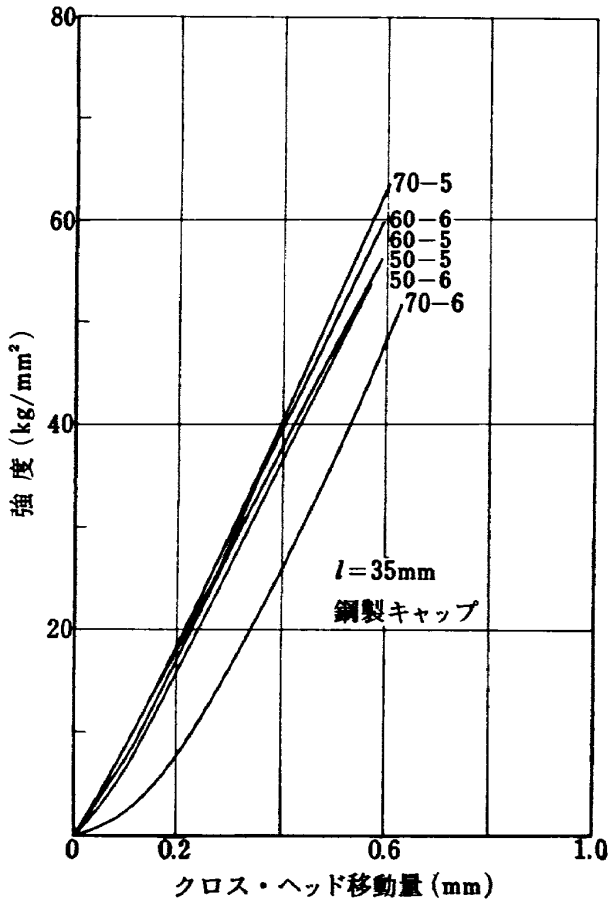


図 45 圧縮強度と変位 (カーボン・Z-2-1)

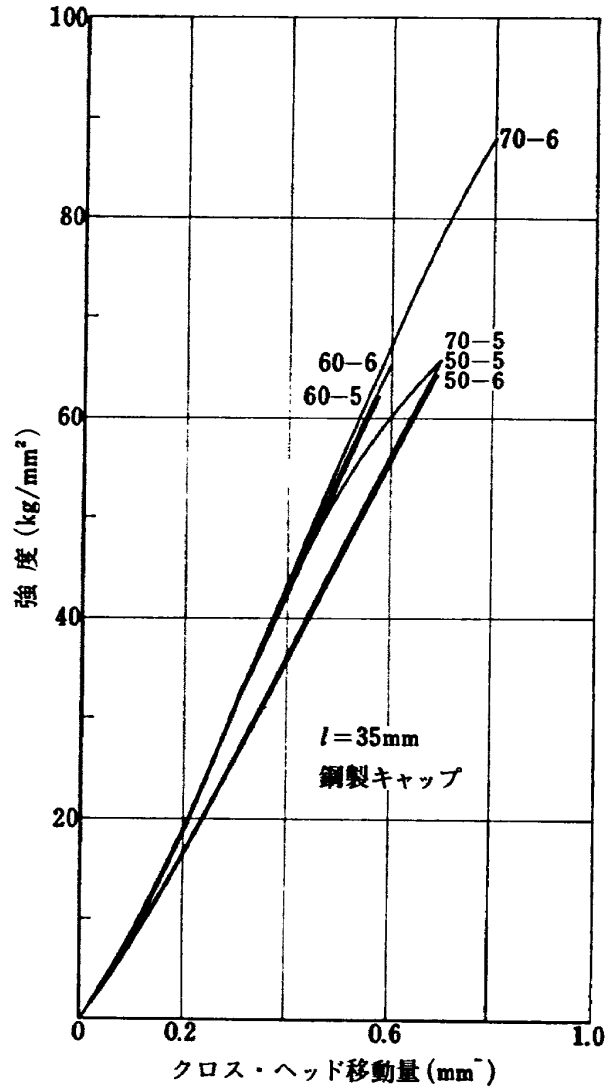


図 46 圧縮強度と変位 (カーボン・Z-2-2)

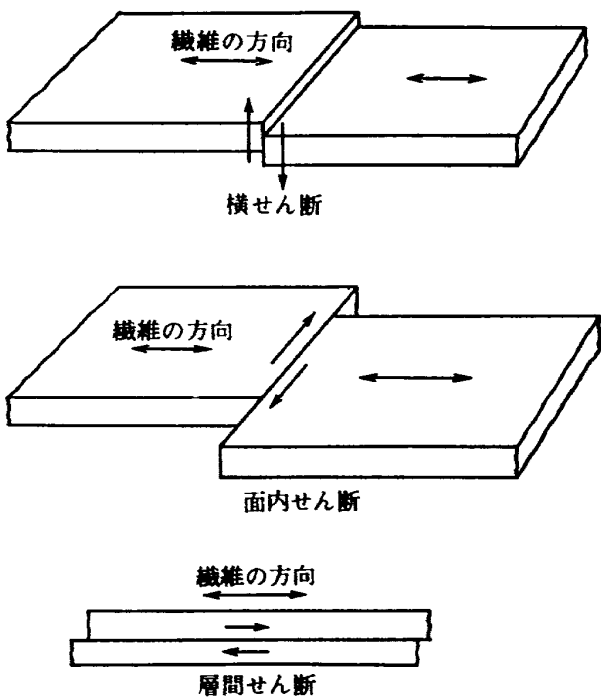


図 47 各種せん断模様

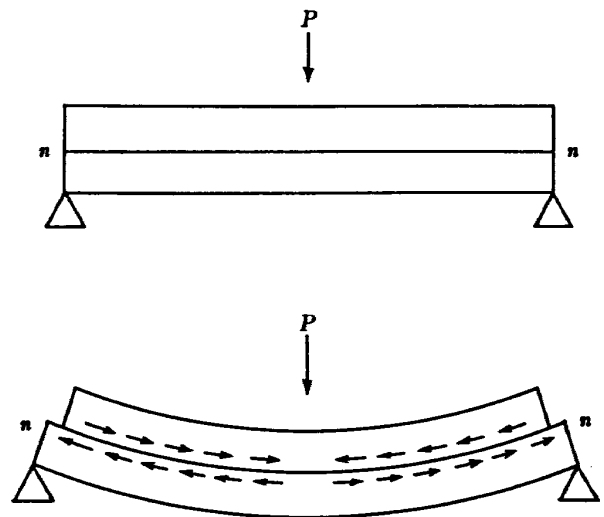


図 48 層間せん断の原理図

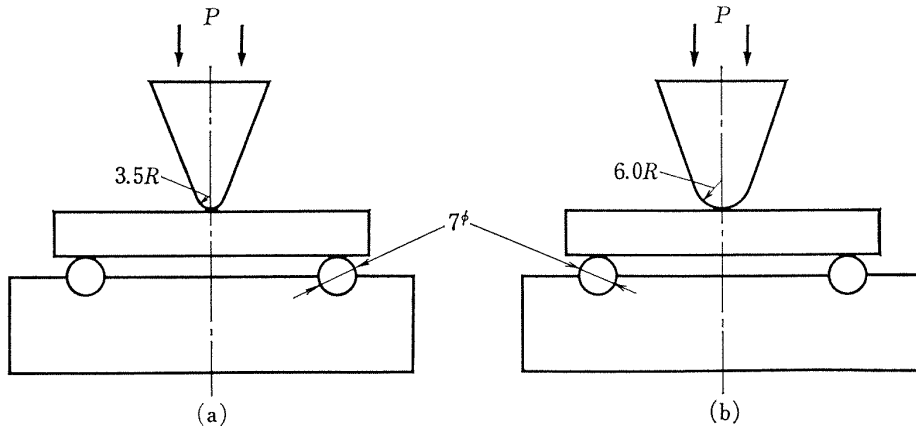


図 49 層間せん断試験装置

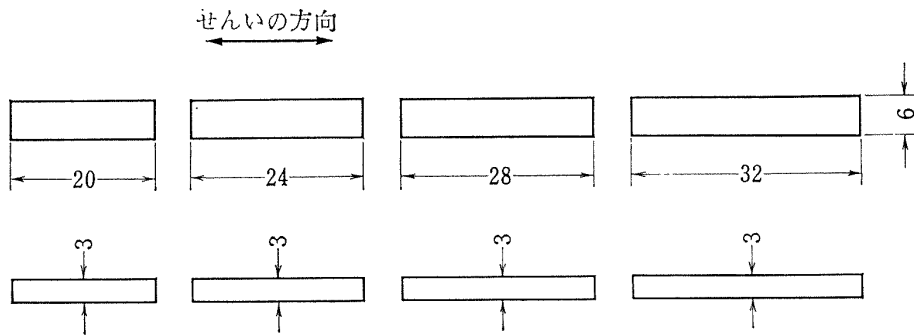


図 50 層間せん断試験片

が働き、下側の板には反対に矢印の方向に引張り力が働く、したがって2枚の板を一体として曲げた場合には中立面で抵抗する力、すなわち層間せん断力 τ が働く、ショートビーム法での3点曲げにおいて中立軸に働く最大せん断応力 τ はつぎのように定義される。

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{P}{bh} = \frac{3}{4} \frac{P}{A} \quad (13)$$

ここで b , h , A はそれぞれ試験片の幅、厚さ、断面積である。

図 49 は層間せん断試験装置で、(a) は中央支点部の曲率半径が 3.5 mm で、(b) は曲率半径が 6.0 mm である。曲率半径により層間せん断強度が変わることがわかった。図 50 にその試験片を示し、写真 24 には実験中のところを示す。

今までに発表された層間せん断強度 τ と l/h の関係を図 51 に示す。 l は支点間の長さである。やはり試験片が長くなると曲げの影響を受け、見かけの層間せん断強度はかなり低下する。したがってショートビーム法では一定の l/h の値を決めるべきである。イギリスでは RAE が中心となって $l/h=5$ としている

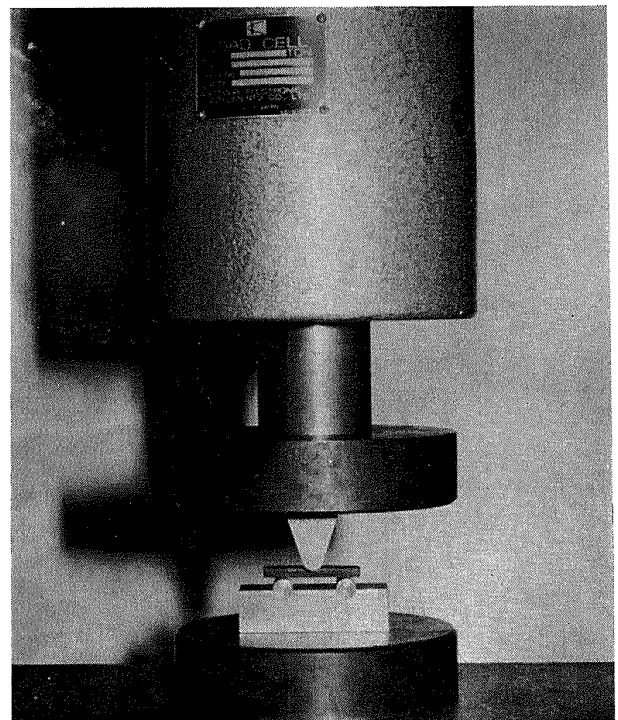


写真 24 せん断試験

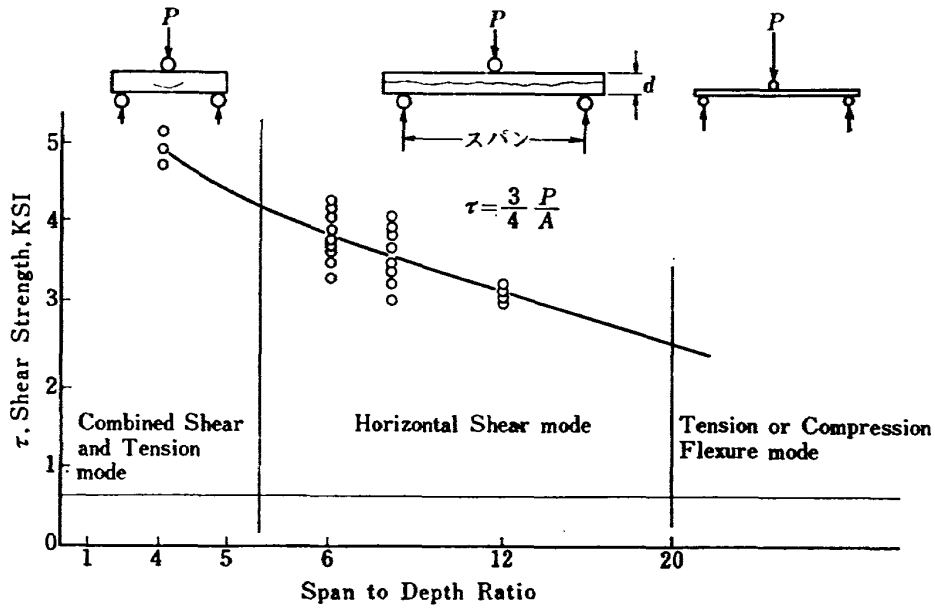


図 51 せん断強度とスパン比

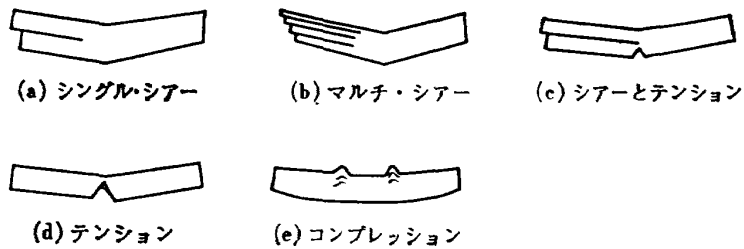


図 52 各種せん断破壊

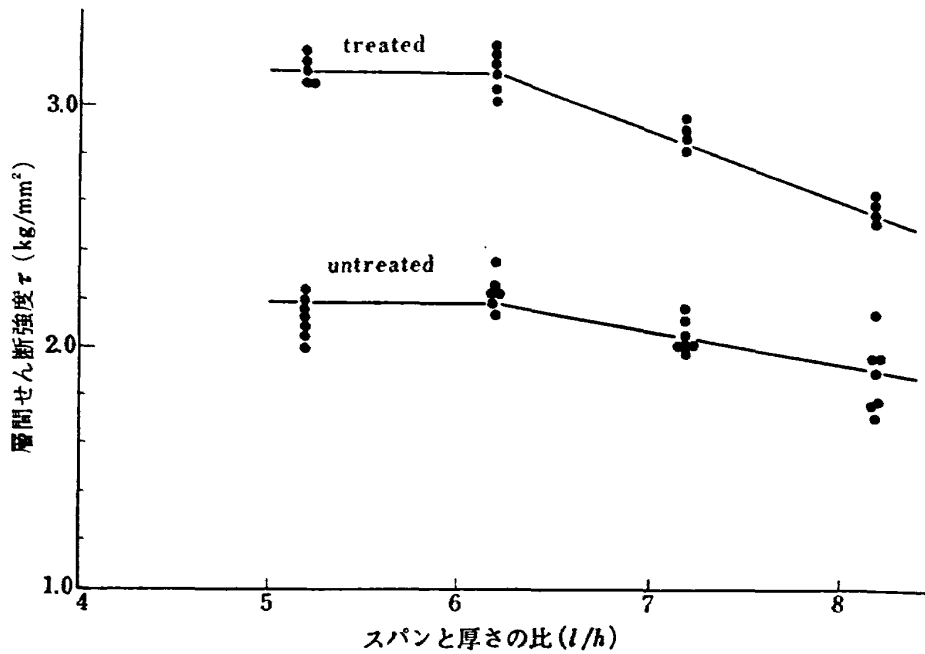


図 53 低弾性複合材のせん断試験

が、われわれの実験でもこの値は適当と思われる。

つぎにショートビーム法における試験片破断の様相を図 52 に示す。カーボン繊維の種類により異なった破断の様相を示している。すなわち低弾性カーボンの場合は同図の (b)、(e) の場合が多く、高弾性カーボ

ンでは (c) または (d) の場合が多い。ただし (d) の場合は曲げ破断であるため実験値から除いた。高強度カーボンの場合は殆んど (a) のように破断した。

カーボンの低弾性カーボン複合材の l/h を変えたときの層間せん断強度の実験結果を図 53 に示す。

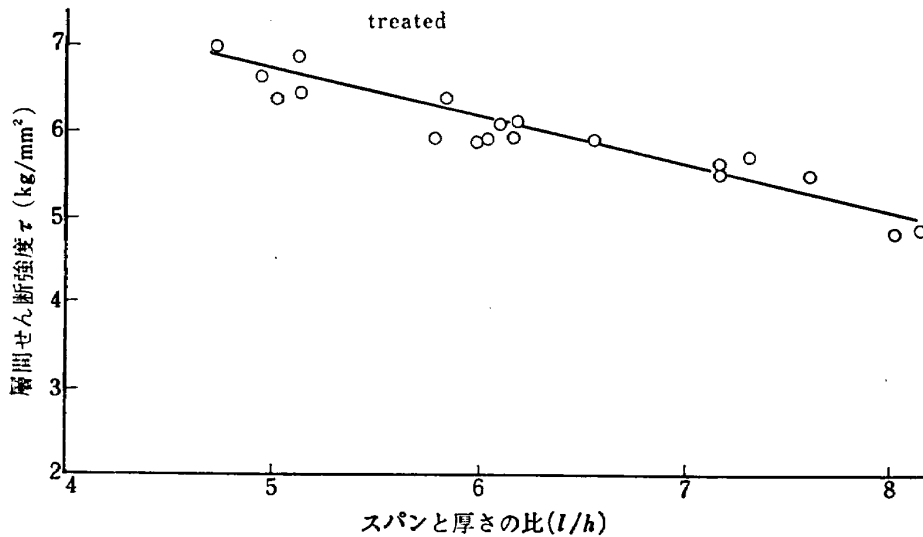


図 54 高強度複合材のせん断試験

この時点ではカーボン繊維が出はじめたばかりであったので、繊維の表面処理法もまだ確立されておらず、従ってその値も非常に低い値となっている。ここで表面処理をしてあるものを treated, 未処理品を untreated といっている。このときの中央の支点部曲率半径は 3.5 mm である。

つぎにカーボンの高強度カーボン複合材の l/h を変えたときの層間せん断強度の実験結果を図 54 に示す。このときにはカーボン繊維の表面処理技術はかなり進んでいた。中央支点部の曲率半径はやはり 3.5 mm とした。

以上の実験結果より l/h の値を 5 とする RAE の提案は妥当と思われる。

最近になりカーボン繊維の製造技術および表面処理技術が進み、層間せん断強度もかなり向上してきた。ただしこの値はカーボン繊維の含有率によってもかなり変わり、繊維含有率が 70% 以上においては急激に低下する。すなわちカーボン繊維があまり多くなると繊維相互の接着力が低下するためと思われる。

l/h を 5 として、中央支点部の曲率半径を 3.5 mm と 6.0 mm の場合における荷重と変位の関係を示したのが図 55 である。6.0 mm の方がやや高い値を示している。

表 13 には繊維含有率 (V_f) と層間せん断強度 (τ) の関係を示す。繊維含有率を 73.7% としたものは 60% のものに比較して層間せん断強度の値は約半分の値となっていることがわかる。

つぎに高強度カーボン複合材についてショートビーム法の中央支点部の曲率半径を 3.5 mm と、6.0 mm の 2 種類について比較実験を行なった。表 14 がトレ

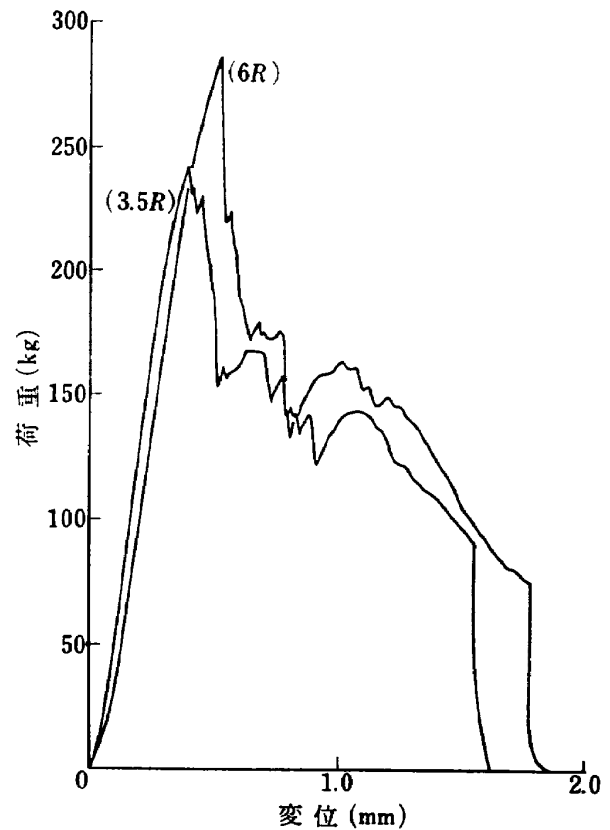


図 55 せん断試験の荷重-変位線図

カ T 300A のデータで、表 15 がカーボン Z-2-1 のデータである。いずれも 6.0 mm の方が層間せん断強度は僅か向上している。

以上の実験結果より、カーボン複合材の繊維含有率 (V_f) は 60~65% 程度が最適と思われる、かつ中央支点部の曲率半径は 6.0 mm の方がよい。また l/h の値は 5 の方がよく、それ以下にすると取扱いにくく、かえって誤差を生じやすい。

表 13 繊維含有率 (V_f) と層間せん断強度

支点は $6.0R$ を使用

種 類	τ (kg/mm ²)	$\bar{\tau}$ (kg/mm ²)	V_f (%)
トレカ T 300 A	4.83 4.38 3.64 4.64 4.61	4.42	73.7
トレカ T 300 A No. 1	8.33 8.11 8.13	8.36	60~63
トレカ T 300 A No. 2	9.00 9.08 8.95 8.84	8.97	60~63

表 14 曲率半径と層間せん断強 (トレカ T 300 A)

$V_f=60\sim62\%$

種 類	τ (kg/mm ²)	$\bar{\tau}$ (kg/mm ²)	中央支点
トレカ T 300 A No. 1	7.48 7.76 6.90	7.48	3.5 R
トレカ T 300 A No. 1	8.33 8.11 8.13	8.36	6.0 R
トレカ T 300 A No. 2	8.61 8.63 8.46 8.23	8.48	3.5 R
トレカ T 300 A No. 2	9.00 9.08 8.95 8.84	8.97	6.0 R

表 15 曲率半径と層間せん断強度 (カーボン)

 $V_f=59.5\%$

種 類	τ (kg/mm ²)	τ (kg/mm ²)	中央支点
カーボン Z-2-1	5.94	5.47	3.5 R
	6.14		
	5.36		
	5.06		
	4.86		
カーボン Z-2-1	6.91	6.64	6.0 R
	7.05		
	6.71		
	6.51		
	6.02		

5. 繊維含有率の測定

カーボン複合材の弾性率、強度などを検討する場合にはまず複合材の体積含有率を求めなければならない。したがってここでは各種試験の終了毎にその試片の一部を切り取り測定を行なった。

この測定法には熱重量分析装置を使用する方法、不活性ガス中において電熱などにより樹脂だけを焼却する不活性ガス法、硫酸で煮沸し、過酸化水素水で反応させてカーボン繊維だけを取り出す硫酸煮沸法、あるいは都市ガスまたはプロパンガスの火炎中で短時間に樹脂だけを燃焼させ、カーボン繊維をとりだす燃焼法などがある。前2者は設備などに経費が相当かかるので余り一般的な方法とはいえない。ここではあとの2者の硫酸煮沸法と燃焼法について実験を行なった。

比重測定

1. 試験片より約 0.3~0.5 gr の試料を切りだす。
2. 試料の全面をサンドペーパーで磨き、バリがないようにする。
3. アセトンでよく拭き、空気中での重量をはかる。
4. 水中での重量を測定する。(水温も測定しておく)

$$\text{比重} = \frac{\text{空気中での重量}}{\text{空気中での重量} - \text{水中での重量}} \times \frac{1}{\text{水の温度に対する比重}}$$

a) 硫酸煮沸法

1) 使用器具

デシケータ、乾燥炉、電熱器、精密化学天秤、吸引

瓶、トルビーカー、ガラスフィルター

2) 使用薬品

濃硫酸、過酸化水素水 (30% または 50% 液)、エチルアルコール、精製水

3) 実験方法

トルビーカーに濃硫酸 (20~30 cc) を入れ、その中に充分乾燥した試料を入れ、時計皿でふたをする。電熱器に石綿金網をおきその上に上記のビーカーをのせて加熱する。10 分位で沸騰が始まり樹脂との反応が見られる。さらに5分位煮沸すると樹脂が分解し始める。その後カーボン繊維が浮上り真黒な液になる。1 時間後に加熱を中止して 2~3 分おいてから、過酸化水素水を一滴ずつゆっくりとビーカーの壁を伝わらせて加えていく。反応が進むにつれて添加速度を早める (白煙がでる)。カーボン繊維が表面に浮き、液が無色透明になったらさらに5分位加熱をし、その後放冷する。あらかじめ秤量しておいたガラスフィルターで吸引ろ過する。ガラスフィルターに残ったカーボン繊維を精製水で洗い、硫酸類の除去を行なう。その後エチルアルコールで水分の除去を行なう。カーボン繊維の入ったままのガラスフィルターを乾燥炉に入れ、150~200°C で 1~2 時間加熱した後、デシケータ内で冷却し、ガラスフィルターごと秤量する。

カーボン複合材の繊維重量含有率 (Wt %) は次式により求められる。

$$\text{重量含有率} = \frac{\text{(ガラスフィルター+カーボン繊維)} - \text{ガラスフィルター}}{\text{複合材の重量}} \times 100\%$$

つぎに体積含有率 (Vol %) は次式から求められる。



写真 25 45 分加熱後

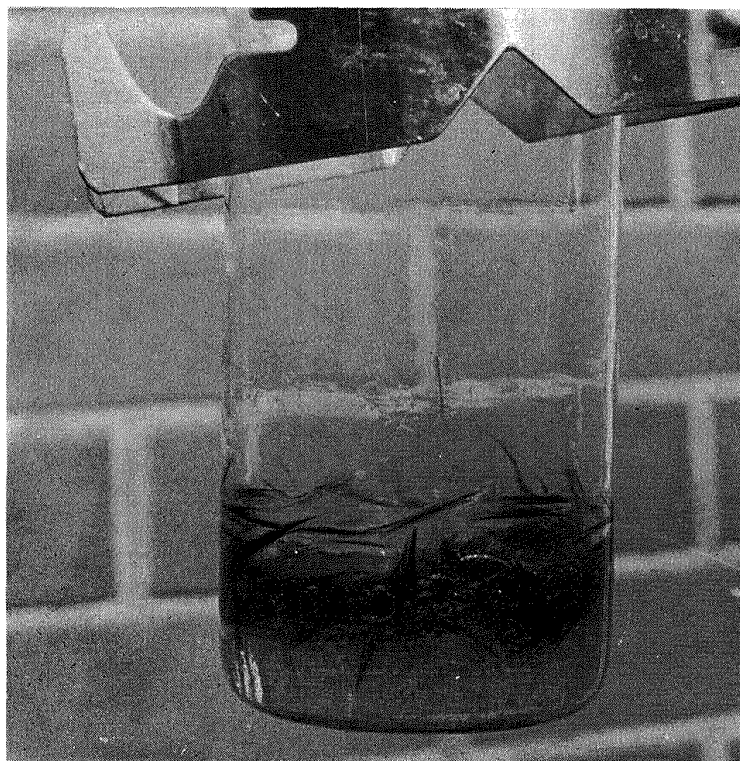


写真 26 過酸化水素を入れた後



写真 27 吸引びんでろ過中

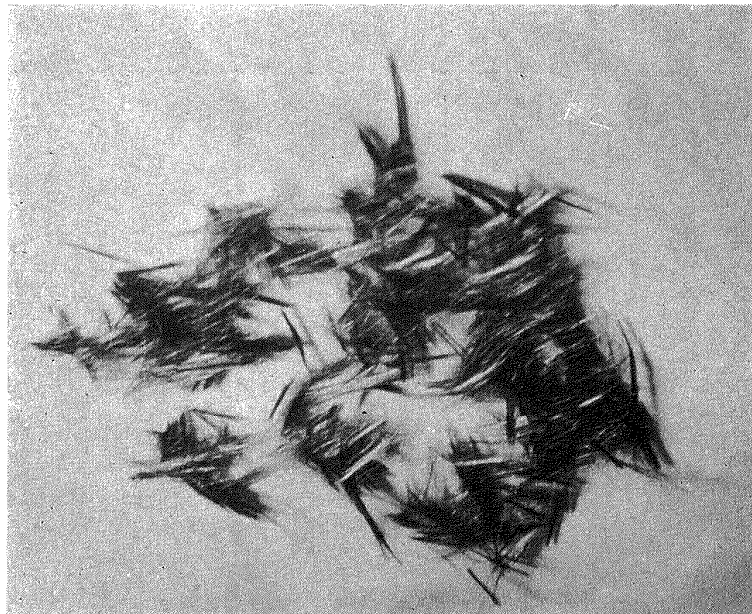


写真 28 残されたカーボン繊維

体積含有率

$$= \frac{\text{カーボン繊維重量/カーボン繊維の比重}}{\text{カーボン複合材重量/カーボン複合材の比重}} \times 100\%$$

ここでカーボン繊維の比重は各社カタログに掲載されている値を用い、その他の値は前述の方法で実測した。写真 25 は煮沸 45 分後の状況を示す。白煙がたちこめ、樹脂とカーボン繊維は完全に分離し真黒な液となっている。写真 26 は 50% 過酸化水素水 (H_2O_2)

を加え無色透明になり、カーボン繊維がはっきりわかる。写真 27 は吸引瓶を使ってガラスフィルター付ロートに流し込み中のところである。なお過酸化水素水は直接手や皮膚などにふれないように注意しなければならない。写真 28 は乾燥後のカーボン繊維で、樹脂はきれいに流れおちばらばらになっている。

b) 燃焼法

あらかじめ比重測定しておいた試料をニクロム線で巻き（燃焼後カーボン繊維がくずれないように）、ガ

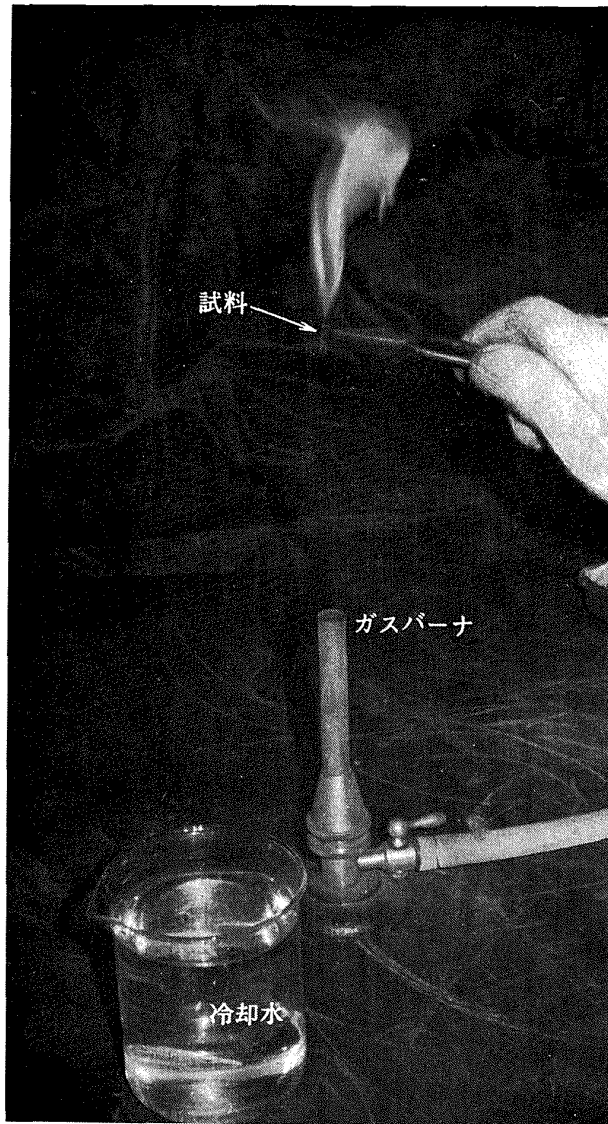


写真 29 燃 焼 法

表 16 圧縮試験片の体積含有率測定結果 (丸棒)

試験片 No.	W_c (gr)	ρ_c (gr)	W_f (gr)	ρ_f (gr)	Wt (%)	Vol (%)
Z-2-1 50	0.3745	1.4211	0.1966	1.75	52.94	42.62
60	0.3884	1.5023	0.2508	1.75	64.57	55.44
70	0.4031	1.5142	0.2799	1.75	69.44	60.07
Z-2-2 50	0.3146	1.4154	0.1675	1.75	52.50	42.82
60	0.2806	1.4582	0.1712	1.75	61.01	50.83
70	0.3756	1.4937	0.2617	1.75	69.68	59.44
T300A 40	0.2990	1.4497	0.1667	1.77	55.75	45.66
50	0.3588	1.4386	0.1778	1.77	49.55	40.28
60	0.3597	1.4639	0.2209	1.77	61.41	50.79
70	0.4180	1.5204	0.3005	1.77	71.89	61.75

W_c : 複合材の重量 (空気中の重さ)

W_f : カーボン繊維の重量

ρ_c : 複合材の比重

ρ_f : カーボン繊維の比重 (カタログ値を使用)

$Wt(\%)$: 重量含有率

$Vol(\%)$: 体積含有率

表 17 平板試験片の繊維含有率測定結果

試験片	試験種	W_c (gr)	ρ_c (gr)	W_f (gr)	ρ_f (gr)	W_t (%)	Vol (%)
T 300 A	引	{0.2395 0.3131}	{1.6277 1.6373}	{0.1879 0.2499}	1.77	{78.46 77.82}	{72.15 73.84}
	曲, 層	{0.4062 0.4097}	{1.6062 1.6112}	{0.3308 0.3310}	1.77	{81.44 80.79}	{73.90 73.54}
	圧 40	0.3924	1.3880	0.1749	1.77	44.57	34.95
	60	0.3671	1.4341	0.2245	1.77	61.15	51.48
	70	0.3048	1.5630	0.2295	1.77	75.30	66.49
Z-2-0	引	0.3058	1.4647	0.2002	1.75	65.47	54.80
	曲	0.2922	1.4639	0.1947	1.75	66.63	55.71
Z-2-1	引, 曲	0.3749	1.5376	0.2341	1.75	62.44	54.24
	層	0.3911	1.4830	0.2725	1.75	69.68	59.04
	圧 50	0.3745	1.4211	0.1966	1.75	52.94	42.62
	60	0.3884	1.5023	0.2508	1.75	64.57	55.44
	70	0.4031	1.5142	0.2799	1.75	69.44	60.07
Z-2-2	曲	{0.5329 0.4979}	{1.4472 1.4591}	{0.3508 0.3443}	1.75	{65.83 68.87}	{54.45 57.41}
	圧 50	0.3164	1.4154	0.1675	1.75	52.50	42.83
	60	0.2806	1.4582	0.1712	1.75	61.01	50.83
	70	0.3756	1.4937	0.2617	1.75	69.68	59.44

W_t (%): 重量含有率

Vol (%): 体積含有率

引: 引張

曲: 3点, 4点曲げ

層: 層間剪断

圧: 圧縮

40)

60)

70)

: 試験片ロッドナンバー

スパーナの還元炎中で 2~3 分間加熱し樹脂を燃焼させてから水の中で急冷する。残ったカーボン繊維の重量を測定し、前の式から体積含有率を算出する。

この方法は非常に簡単にでき、測定精度もよい。すなわちカーボン複合材は 2~3 分間の加熱では樹脂だけが燃焼し、カーボン繊維は殆んど消耗しないことがわかった。硫酸煮沸法と比較したが、ほとんど差のないことがわかった。そこでこの報告における体積含有率の測定は初期のうちは硫酸煮沸法を採用したが、殆んどは燃焼法を用いた。写真 29 に燃焼法の実験中の状況を示す。表 16 には圧縮試験片の体積含有率の測定結果を、表 17 には平板試験片の体積含有率の測定結果を示す。

6. 熱膨張率の測定

カーボン複合材の熱膨張率は非常に小さく、金属材

料に比較して約一桁程小さい値であり、熱安定性が良いという利点がある反面、これらを他の材料と組み合わせて使用する場合には欠点となる。

熱膨張率が非常に小さいため従来の示差式熱膨張計では測定不可能なことがわかったので、東芝総合研究所の森田幹郎氏に依頼し、同社が試作した光干渉膨張計⁴⁾により測定して戴いた。表 18 にカーボン複合材の繊維方向の熱膨張率の実測値を示す。

結果の考察

Turner⁵⁾ によると複合体の熱膨張率 α_c は

$$\alpha_c = \frac{\sum \alpha_i K_i V_i}{\sum K_i V_i} \quad (14)$$

ここで

α_i : 熱膨張率

$$K_i: \text{体積弾性率} \left(= \frac{E_i}{3(1-2\nu_i)} \right) \quad (15)$$

表 18 CFRP の熱膨張率 (繊維方向)

	$\alpha_c (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	温度範囲
(トレカ T 300 A)		
$V_f, 33\%$	2.70	20~130°C
54	1.16	20~130°C
65	2.11	20~130°C
(カーボロン Z-2)		
$V_f, 33\%$	1.71	20~100°C
41	0.96	20~100°C
52	1.25	20~100°C
62	1.25	20~100°C

注) 東芝総研での測定結果⁴⁾

E_f : 縦弾性率

ν_f : ポアソン比

V_f : 体積含有率

により表わされる。

カーボン繊維とエポキシ樹脂による複合材に適用すれば式 (14) は

$$\alpha_c = \frac{\alpha_f K_f V_f + \alpha_m K_m V_m}{K_f V_f + K_m V_m} \quad (16)$$

ここで添字 f は繊維, m は樹脂とする。

カーボン繊維のポアソン比 (ν_f) は実測が困難なため, 繊維と樹脂のポアソン比が等しいとすれば ($\nu_f = \nu_m$) 式 (16) は

$$\alpha_c = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (17)$$

となる。そこでエポキシ樹脂の物性値は、

$$E_m = 350 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_m = 0.35$$

$$\alpha_m = 50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

であるから式 (17) により, トレカ T 300A カーボン複合材の場合はカーボン繊維の熱膨張率を $1.12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし, カーボロン Z-2 の場合は $0.23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ としての計算値を図 56 に示す。実測点は表 16 の値をプロットしたものである計算値と実測値とは比較的良く合っていることがわかる。

以上のことからカーボン複合材の繊維含有率を測定しておけば, 熱膨張率は式 (17) より近似的に求めることができる。またカーボン繊維の熱膨張率は $0.23 \sim 1.12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の値であることもわかった。

カーボン繊維含有率の低いところでは実測値と理論値とややはなれているが, これは複合材中の繊維分布が均一ではなく, 写真 23 に示したように成形法が余

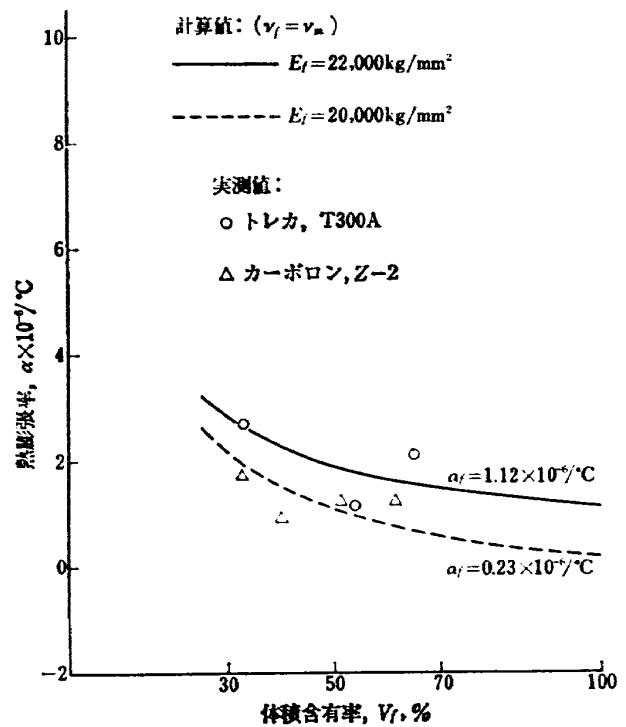


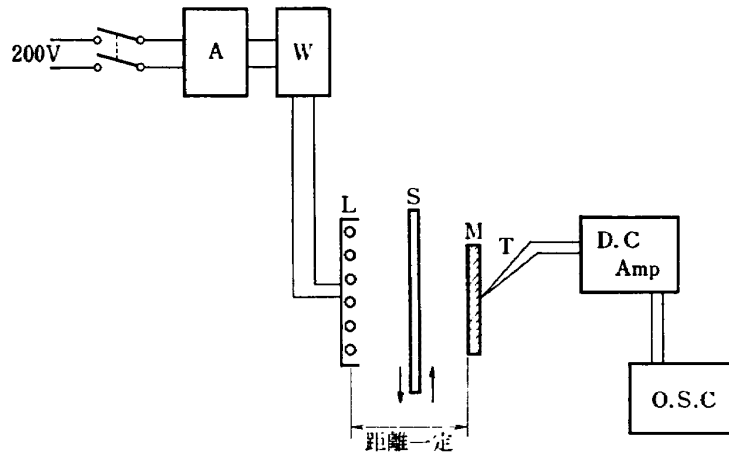
図 56 カーボン・エポキシ複合材の繊維方向における熱膨張率

りよくなく, 繊維がかたよったためと思われる。なおこの試料は圧縮試験に使用した丸棒試片よりとり出したものである。

7. 熱的物性値の測定

熱的物性値の測定は一般に簡単ではなく, また時間を要するし, 測定装置はかなり高価なものが多い。ここで紹介する方法は実験室的に簡単な装置で求めることができる小川の方法⁶⁾を使用した。実験装置の概略図を図 57 に示す。その実験方法を要約すると以下の様になる。

試料平板の片側表面を試料よりある一定距離はなれた位置におかれた赤外線ランプの様な輻射熱量 q ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$) で裏面温度の過渡状態が終り, 準定常態になるまで t^* 時間加熱する。このとき裏面は断熱と仮定すると裏面温度は図 58 に示すように時間 t^* に相当する温度 T_0 まで上昇する。 t^* 時間後に急激に加熱を中止したときの試料内部の温度分布は厚さ方向の二次関数となっていて, 加熱面が高く, 裏面が低い温度である。したがって加熱中止後も表面, 裏面を断熱と仮定するならば, 試料内部の厚さ方向温度分布が一樣になるまで裏面温度は上昇し, 図に示すように時間とともに平衡温度 T_M に近づく, 図のような測定結果より加熱中止後に到達する平衡温度 T_M と加熱



A:スライダック W:電力計 L:加熱器
 S:シャッター M:試料 T:熱電計
 D.C Amp:直流増幅器 O.S.C:電磁オシログラフ

図 57 熱的物性値実験装置

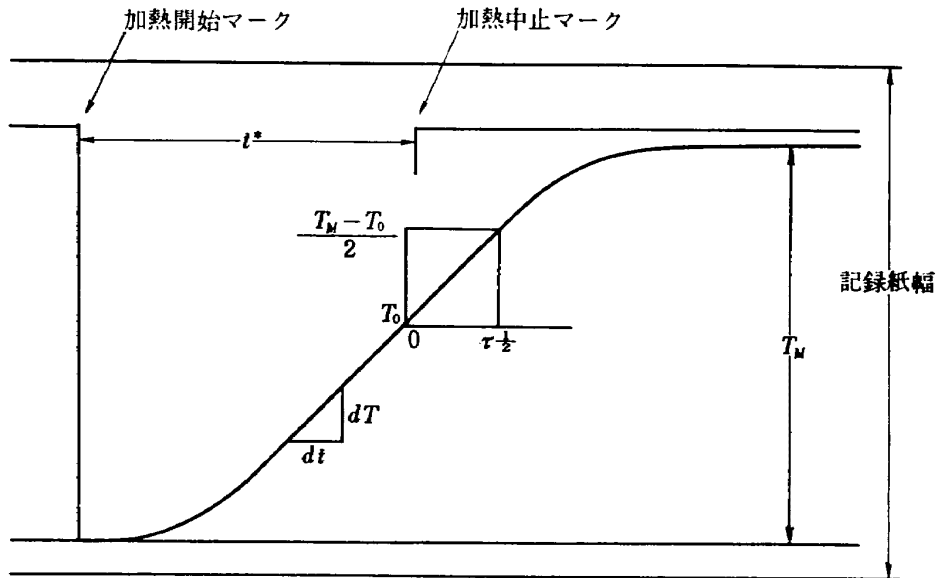


図 58 加熱曲線

表 19 CFRP 繊維方向における熱的物性値

繊維含有率 V_f (%)	比重量 ρ (g/cm ³)	比熱 c (cal/g·°C)	熱容量 $\rho \cdot c$ (cal/cm ³ ·°C)	熱伝導率 k (cal/cm·sec·°C)	温度伝導率 α (cm ² /sec)
(トレカ T 300 A)					
40	1.40	0.150	0.21	4.7×10^{-3}	2.3×10^{-2}
51	1.44	0.146	0.21	3.3	2.1
57	1.46	0.144	0.21	3.7	2.0
(カーボン Z-2-1)					
31	1.35	0.148	0.20	5.0×10^{-3}	2.4×10^{-2}
52	1.49	0.134	0.20	5.4	2.7
59	1.52	0.132	0.20	5.5	2.9

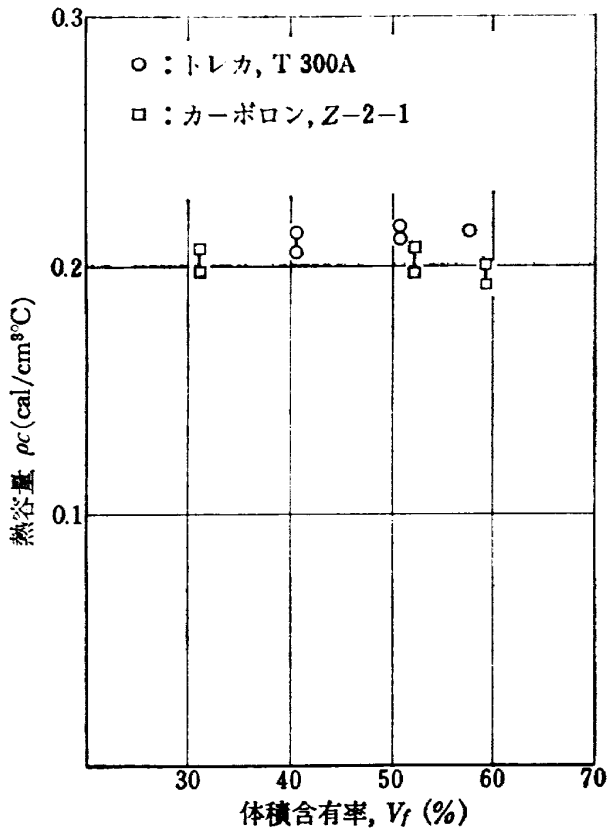


図 59 CFRP 繊維方向における熱容量

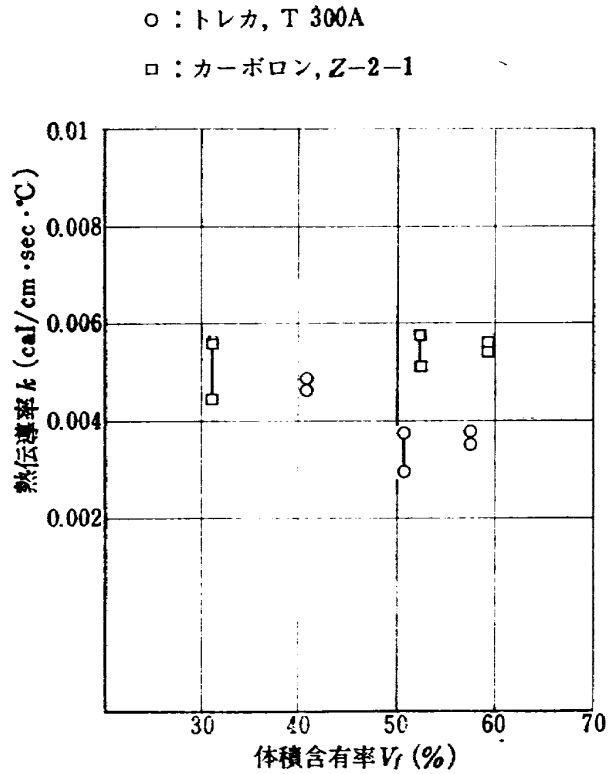


図 60 CFRP 繊維方向における熱伝導率

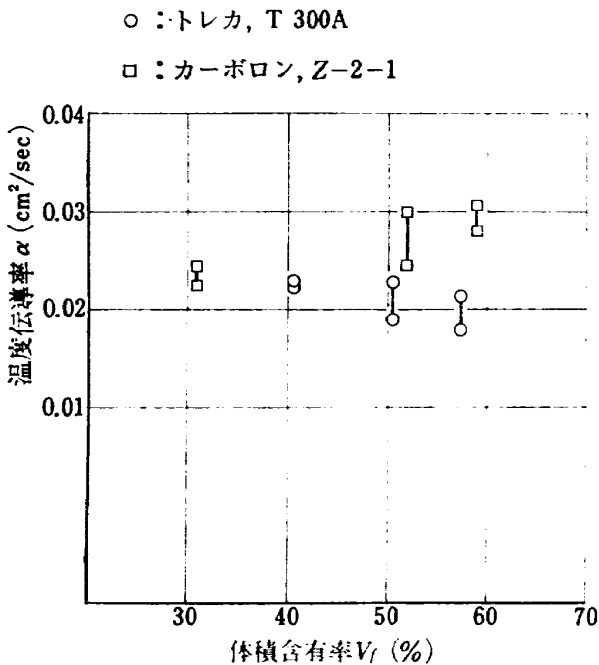


図 61 CFRP 繊維方向における温度伝導率

表 19 にはカーボン複合材の繊維方向における熱的物性値の測定結果を示す。図 59 には繊維方向における熱容量とカーボンの体積含有率 V_f との関係を示し、図 60 には繊維方向における熱伝導率と V_f との関係を示し、さらに図 61 には繊維方向における温度伝導率 V_f との関係を示す。

8. あとがき

この報告書は過去3年間におけるカーボン複合材の研究結果のとりまとめである。はじめの年はカーボン繊維がようやく国産化されたばかりの頃であり、取扱いにくく、しかも価格は 30 万円/kg と非常に高く、かつその成形法の技術は全くなく、またカーボン複合材としての試験法も国内では見当らず非常に苦勞した。しかし新しい試験装置を考案したり、試験法の確立につとめ、強度特性を把握できた。最近になりカーボン繊維の価格も 5~6 万円/kg と安くなり、しかも今後さらに安く供給される可能性のある材料である。また成形技術も向上して、比剛性、比強度の高いこれらの複合材料は航空、宇宙をはじめ一般構造物にも使用されだしている。

今迄の積み重ねた技術を生かし、今後は複合材の疲勞強度の研究、構造要素の研究に進みたいと思う。

を中止した瞬間の温度 T_0 の差の半分、すなわち $(T_M - T_0)/2$ まで裏面温度が上昇するに要する時間 $\tau_{\frac{1}{2}}$ (sec) とすると温度伝導率 α は $\tau_{\frac{1}{2}}$ と試料の板厚 δ (cm) を用いて求められる。詳細は文献 6) を参照されたい。

最後にこの研究を行なうに当り、成形については大日本ガラス（株）研究開発課の嵯峨根康生課長，西本敬氏および住友電工（株）の鈴木典男，野口迪宏両課長，神前貞勇技師に大変御世話になり，またカーボン繊維については日本カーボン（株），東レ（株）の方々にいろいろと御便宜をはかって載いたことを感謝致します。

参考文献

1) H.D. Blakelock 外： Mechanical Property

Measurement on MODMOR Carbon Fiber Resin Composite (モルガナイト社カタログ)

- 2) A.C. Ham: Technical Report, RAE, 1971
- 3) 林毅：圧縮試験片の端末補強部の応力解析，日科技連複合材料研究会報告，昭和47年
- 4) 東芝光干渉膨張計販売技術資料 YB-9030，昭和48年1月
- 5) P.S. Turner: Thermal Expansion Stress in Reinforced Plastics, J. Research Not. Bur. Stads. Vol. 37, RP 1745, 1946
- 6) 小川鉦一：輻射加熱による固体の熱的物性値の測定法，航技研報告 TR-128，昭和42年3月

TM-241 正誤表

頁・列・行	誤	正
14 (6)式	$E_b = \frac{WL_1L_2}{8I\delta} = \frac{3}{2} \frac{WL_1L_2}{bh^3\delta},$	$E_b = \frac{WL_1L_2^2}{8I\delta} = \frac{3}{2} \frac{WL_1L_2^2}{bh^3\delta}$
27 下	ひずみゲージ (.....)	ひずみゲージ (.....)
28 図 34	$\begin{cases} E_f = 20,000 \text{ kg/mm}^2 \\ E_m = 350 \quad \text{''} \end{cases}$	$\begin{cases} E_f = 22,000 \text{ kg/mm}^2 \\ E_m = 350 \quad \text{''} \end{cases}$
28 図 36	$\begin{cases} E_f = 20,000 \text{ kg/mm}^2 \\ E_m = 350 \quad \text{''} \end{cases}$	$\begin{cases} E_f = 25,000 \text{ kg/mm}^2 \\ E_m = 350 \quad \text{''} \end{cases}$
37	表 14 曲率半径と層間せん断強 (トレカ T 300 A)	表 14 曲率半径と層間せん断強度 (トレカ T 300 A)
46 左 6 行目	御便宜をはかって載いた	御便宜をはかって戴いた

TM-232	フライングテストベッド電気系統試験	1972年9月	甲斐忠夫, 十河弘
TM-233	フライングテストベッド空気タービン試験	1972年11月	宮本義人, 中村公昭 川崎純男, 東海林秀幸
TM-234	スピン燃焼試験設備による燃焼実験	1972年10月	石井進一, 岡部祐二郎 山田晃, 新岡嵩 三谷徹
TM-235	推進エンジン用空気取入口の予備実験 (統報)	1972年10月	近藤博, 長谷川聰
TM-236	大型低速風洞動的量データ処理設備	1972年10月	桑野尚明
TM-237	大型低速風洞壁面効果補正要領	1972年11月	佐藤淳造
TM-238	圧力測定の時遅れにおよぼす圧力孔の影響	1972年11月	曾我 国男, 小野寺信幸
TM-239	突風風洞の気流測定について	1973年4月	高橋 侔
TM-240	突風風洞での突風応答予備実験	1973年5月	松下 洸, 西村博史

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料241号

昭和48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
