

UDC 620.17

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-133

フィラメント・ワインディング円筒の 強度特性に関する研究

竹中幸彦・斉藤浩一・古田敏康
川島矩郎・三本木茂夫・小川鉦一
越出慎一・朝田洋雄
熊倉郁夫・大竹邦彦

1968年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	池谷光栄, 畑山茂樹
TM-88	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (I)	1966年9月	犬丸矩夫, 岡部祐二郎 北村清美, 川幡長勝 木村友昭
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	川井忠彦, 泉日出夫
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-91	高速タービン翼列二次元試験	1966年10月	近藤博, 蓑田光弘 山崎紀雄
TM-92	リフトジェットエンジン試験設備 (I) 一台上運転設備一	1966年10月	大山耕一, 吉田晃昇 中山晋, 菅原昇 五味光男
TM-94	J-3ジェットエンジン用タービン動翼の固有振動特性	1966年11月	武内澄夫, 宮地敏雄 星谷昌二
TM-95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年11月	武内澄夫, 宮地敏雄 星谷昌二
TM-96	2024-T4および7075-T6有孔平板の曲げ疲労試験と2025-T4平滑丸棒の軸荷重疲労試験	1966年11月	佐野政明, 菰岡一洋
TM-97	高マッハ数風洞について (II)	1967年1月	吉永崇, 井上建二 広田正行, 楯篤志
TM-98	40kWプラズマ発生装置の諸特性	1967年1月	野村茂昭, 相原康彦
TM-99	搭載機器用環境試験装置の特性	1967年2月	大月正男, 鈴木孝雄 田畑浄治, 円居繁治
TM-100	二連型リフトエンジンの吸込み抵抗	1967年3月	近藤博, 大城章一郎
TM-101	低圧環境下における固体ロケットモータの性能	1967年3月	望月昌, 斎藤信弥 五代富文, 伊藤克弥 湯沢克宜
TM-102	弾性支持片持板の振動	1967年3月	塙武敏, 築地恒夫 越出慎一, 林洋一
TM-103	給合梁の振動について	1967年3月	築地恒夫, 林洋一
TM-104	平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年4月	中井暎一, 森田甫之
TM-105	非定常境界層方程式を含む放物型微積分方程式の数値解法	1967年4月	関口清子
TM-106	動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年5月	高島一明, 柳原盛三 原亘利, 北出大三 金正好
TM-107	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (II)	1967年6月	犬丸矩夫, 岡部祐二郎 北村清美, 川幡長勝 高橋俣, 木村友昭
TM-108	インダクタンス型小型圧力変換器の試作とその応用	1967年7月	長洲秀夫, 柳沢三憲
TM-109	ロケットの飛しょう径路計算のためのプログラム	1967年7月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-110	二次元スラットおよびスロットドフラップの実験的研究 (I)	1967年8月	犬丸矩夫, 北村清美 川幡長勝
TM-111	リフトジェット VTOL 機の離陸径路に関する近似解	1967年8月	西村博史
TM-112	極超音速風洞用ペブル加熱器の特性	1967年8月	橋爪宏, 橋本登
TM-113	リフトジェットエンジン試験設備 (II)	1967年9月	森田光男, 岩部柱相 関根静雄, 武田克己
TM-114	五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年9月	藤井昭一, 松木正勝 五味光男
TM-115	燃料蒸発管に関する研究 (I)	1967年9月	大塚貞吉, 鈴木邦男 田丸卓, 乙幡安雄

フィラメントワインディング円筒の 強度特性に関する研究*

竹中 幸彦**・斉藤 浩一***・古田 敏康**

川島 矩郎**・三本木 茂夫***・小川 勉一**

越出 慎一***・朝田 洋雄**

熊倉 郁夫**・大竹 邦彦**

ガラスフィラメントとプラスチックを用いたフィラメント・ワインディング円筒の各種荷重条件に対する強度特性を実験的に求めた。実験は円筒試験片を用い、軸となす角度を $0^\circ \sim 90^\circ$ まで数種類変化させたものと、 0° と 90° とを交互に配列したものについて各々引張、圧縮、曲げ、捩り、内圧の各荷重によって行なった。その結果、従来、内圧に対しては 55° 巻のものが Netting Analysis では強度的に最適であるとされていたが、 0° と 90° の層を交互に配列したものが内圧強度、剛性共に優れていることがわかった。

1. ま え が き

比強度の高い構造物として開発されたフィラメント・ワインディング製チャンバ類がロケット、圧力容器等に、現在、広く用いられているが、一般の金属材料と異なって製作技術により強度特性が左右され、バラツキも大きい。また、この種類の材料は巻角度によって異方性の度合が大きく変化するので、種々の巻角度の材料に対する強度特性を明らかにしておくことが、これらの材料を使用する構造物の設計に際して重要である。今回はその基礎的な研究として、各種巻き角度の円筒試験片を引張、圧縮、曲げ、捩り、内圧の各荷重により試験を行ない、剛性および破壊強度を調べた。

2. 試 験 片

2.1 試験片の種類

図1に示すような円筒形試験片をウェット方式により成形した。フィラメントにはEガラス（旭ファイバークラス社製、R-123 ロービング）、樹脂にはエポン828（シェルケミカル社製）を使用し、次の三通りのワインディングのものを製作した。

(a) 単一卷

0° , 15° , 35° , 45° , 55° , 65° , 75° , 90° の各巻角度のヘリカル・ワインディング（図2(a)）

(b) クロス(A)

布状に織られたガラス繊維を糸の方向が円筒の軸方向および周方向になるように積層したものと、 90° （周方向）のワインディングとを交互に行なって、ガラス繊維の含有量が、軸方向と周方向とで約1:2となるように成形したもの。（図2(b)）

(c) クロス(B)

ガラス布のかわりに、 $\theta=0^\circ$ （軸方向）にグラスロービングを配列した層と、 $\theta=90^\circ$ （周方向）のワインディングの層を交互に作って軸方向と周方向の繊維の含有量が1:2となるように成形したもの。（図2(c)）

$\theta=0^\circ$ の円筒形試験片は引張強度が大で、試験機の容量により破壊試験が行なえないので、NOL (Naval Ordnance Laboratory) リング試験、および平板試験によって代行した。

NOL リング試験片

内径100 mm、肉厚3 mmの 90° ワインディングの円筒から切削加工し、幅が10, 15, 20 mmの3種類の試験片を各2個製作した。

平板試験片

グラスロービングを一方向に配列して平板状に成形した素材から図3に示すような形状で、繊維方向およ

* 昭和43年3月26日受付

** 機体第一部

*** 機体第二部

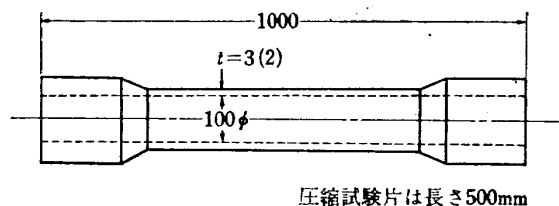


図 1 試験片概略図

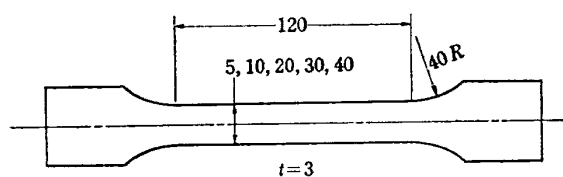


図 3 平板試験片

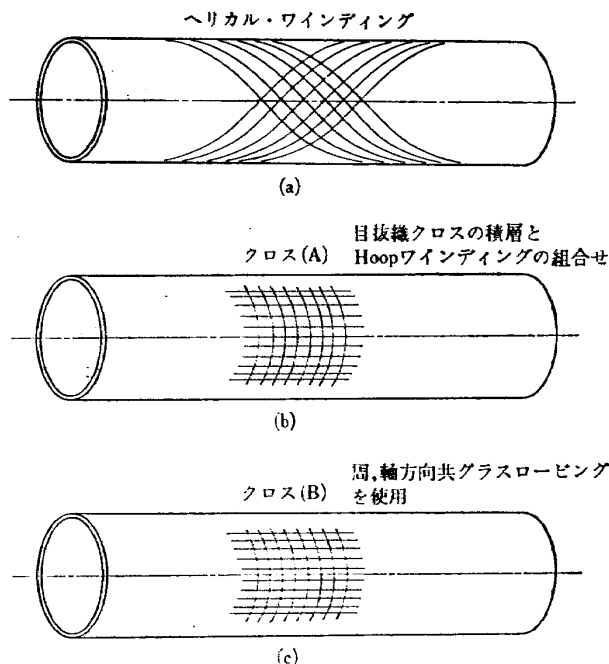


図 2 試験片の成形方式

表 1 製作試験片個数内訳 ()内は肉厚 2 mm, 他は 3 mm

種 類 用 途		へリカル・ワインディング								クロス (A)	クロス (B)
		0°	15°	35°	45°	55°	65°	75°	90°		
引	張	1	1	2	2	2	2	2	2	2	(2)
圧	縮	—	—	2	2	2	2	2	2	2	(2)
曲	げ	—	—	2	2	2	2	2	2	2	(2)
捩	り	—	—	2	3	3	3	3	3	2	—
内	圧	—	—	2	3 (2)	3 (2)	3	3	3	2	(2)

び直角方向の 2 種類の試験片を切り出し、板幅が 5, 10, 20, 30 mm の 4 種類製作した。

2.2 試験片負荷部分の補強状態

引張、圧縮、曲げ、捩り、内圧の各荷重による試験において、荷重をかける部分および固定部分から、なるべく離れた箇所破壊を生じさせるために、それぞれの荷重条件に応じて異なった端部補強方式を採用した。

(1) 引 張

巻角度が 0° (軸方向) に近いものは数 10 ton の破壊強度が予想されるので、図 4 に示すように、円筒の外部に 15mm 厚でワインディングを行ない、テーパ

部で二つ割のリングを介して荷重を伝えるようにした。

また、内側にも肉厚 5 mm の鋼管を接着して補強した。

結果的には 43 ton までしか耐えられず、 θ が 35° の試験片ではこの部分で破壊が生じた。

(2) 圧 縮

挫屈が生じないように、他の試験片より短かくし、端部も肉盛を行なった(図 5)。試験機への取付けは上、下端共球形座を介して行ない、荷重の偏心を防止した。

(3) 曲 げ

純曲げを生じさせるために 4 点曲げとし、端部は内、外面共鋼管をはめ込んで補強した。(図 6)

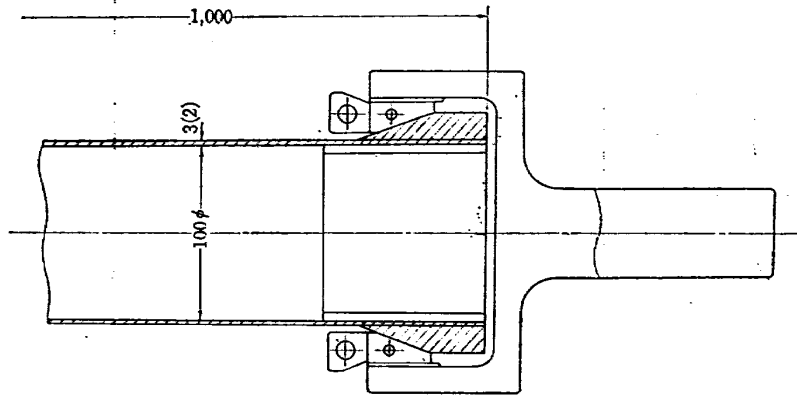


図4 引張試験片

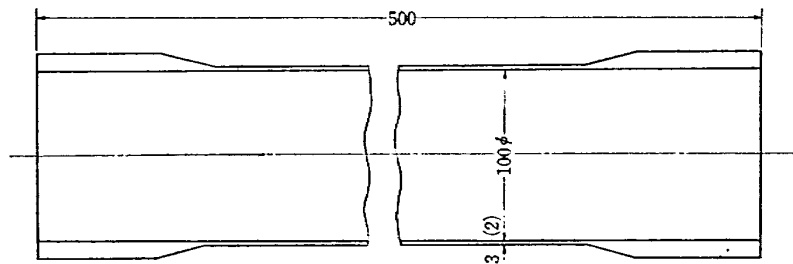


図5 圧縮試験片

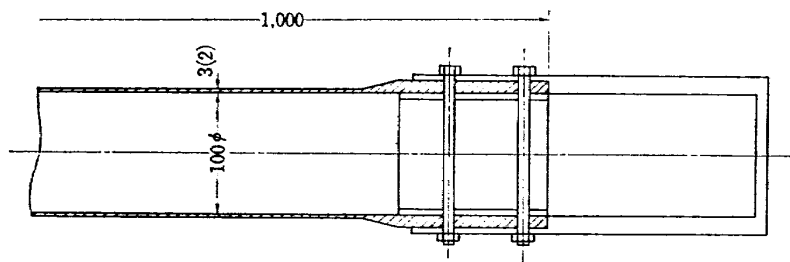


図6 曲げ試験片

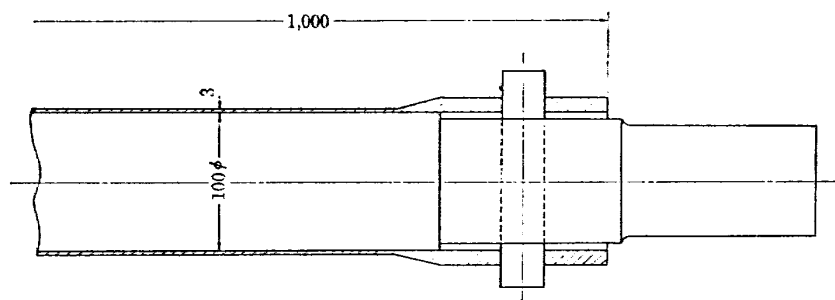


図7 捩り試験片

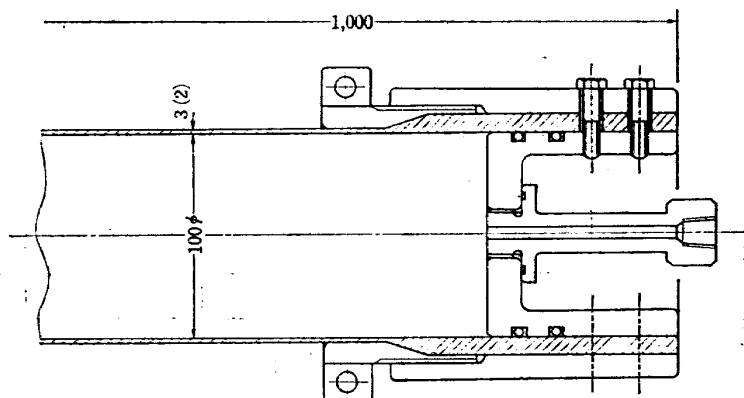


図8 内圧試験片

(4) 捩り

端部の内側に鋼管をはめ込み、丸棒をピンで固定してトルクを与えるようにした。なお、この寸法では捩り挫屈を起すので、円筒の内部に鋼管を挿入した試験片を用いた。(図7)

(5) 内圧

初期の実験ではボルトで固定しただけの構造を採用したところ、内圧強度の高い試験片では円筒部でなく端部で破断する現象が見受けられた。そこで、種々検討の結果、最終的な端部補強構造として、内側に給油口の付いた金具を挿入し、外側にも鋼管をかぶせて、ボルトで締め付け、さらに内盛のテーパ部にも金具を当てて、軸力に対してはボルトおよびテーパ部の両方で荷重を受け持つようにした。(図8)

3. 実験

本試験に先だち、すべての試験片について、弾性域(文献¹⁾により歪が約500 μ 以下)で引張試験を行ない、ヤング率、ポアソン比を測定した。

引張、圧縮、曲げの各試験は、アムスラ型万能試験機を使用し、捩り試験は島津 RET-2500 捩り試験機を使用した。

内圧試験は油圧ポンプにより、最高油量2 l/minにより行なった。試験片からの油漏れを防止するために試験片内面にはポリサルファイド(商品名チオコール)を塗布した。試験状況の写真を図9～14に示す。

4. 実験結果

4.1 弾性特性

(1) 応力-歪特性

図15～図18に引張、圧縮、曲げ、捩りの各試験によ

る応力-歪特性を示す。また、図19～図27には内圧試験による応力-歪特性を示す。

破壊強度の低いものについては破断直前まで歪を計測したが、破壊までの歪が大きいものについては、途中で省略した。

これらの図から、文献¹⁾に述べられていたように歪が500 μ 以下の範囲では弾性域とみなすことができる。

引張試験によるものと圧縮試験によるものとは、 $\theta=35^\circ$ を除いて歪が小さい範囲では、だいたい似た傾向を示しているが、曲げ試験によるものはどの種類の試験片でも、引張または圧縮試験によるものよりも歪が小さく、見掛け上のヤング率が高目に出てくる。これは応力の計算に当って断面の変形を無視した梁理論を用いたことに原因があると思われる。

また、 $\theta=45^\circ, 55^\circ$ の試験片では引張、圧縮、曲げのいずれにおいても曲線が急激に変化している。

内圧試験の場合には、試験片の種類によりかなり異なった挙動を表わしている。

$\theta=55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 、クロス(A)、クロス(B)では、すべて圧力の増加に従って歪は軸方向、周方向共に正の値で増加するが、 $\theta=15^\circ, 35^\circ$ では軸方向の歪が負で周方向の歪が正に変化している。また、 $\theta=45^\circ$ では軸方向の歪が小さい間は正の値で増加するが、次第に減少して途中から負の値となって増大する。周方向の歪は初めから正の値で単調に増加している。

Netting Analysis³⁾の考えで、樹脂の影響を無視してフィラメントの釣合だけを考えると、 $\theta \neq 55^\circ$ ではフィラメント方向の力だけでバランスするが、それ以外の角度の場合には釣り合わず、 $\theta \neq 55^\circ$ の方向へ傾こうとする傾向がある。したがって $\theta < 55^\circ$ の場合には軸方向に縮み、 $\theta > 55^\circ$ の場合には軸方向に伸びる。

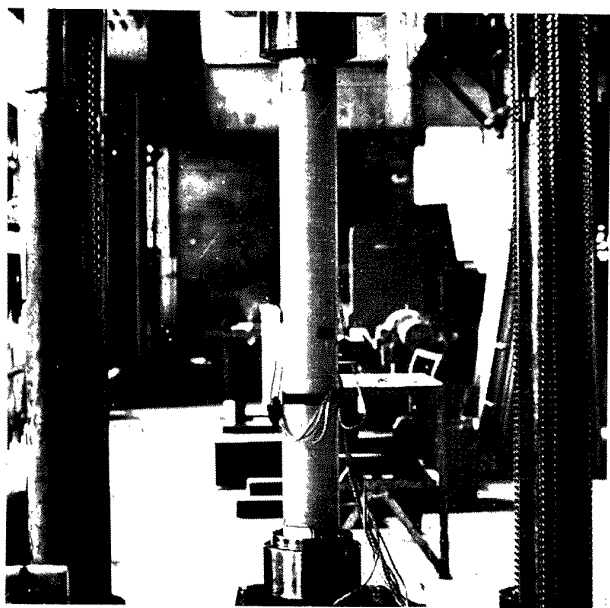


図 9 引 張 試 験

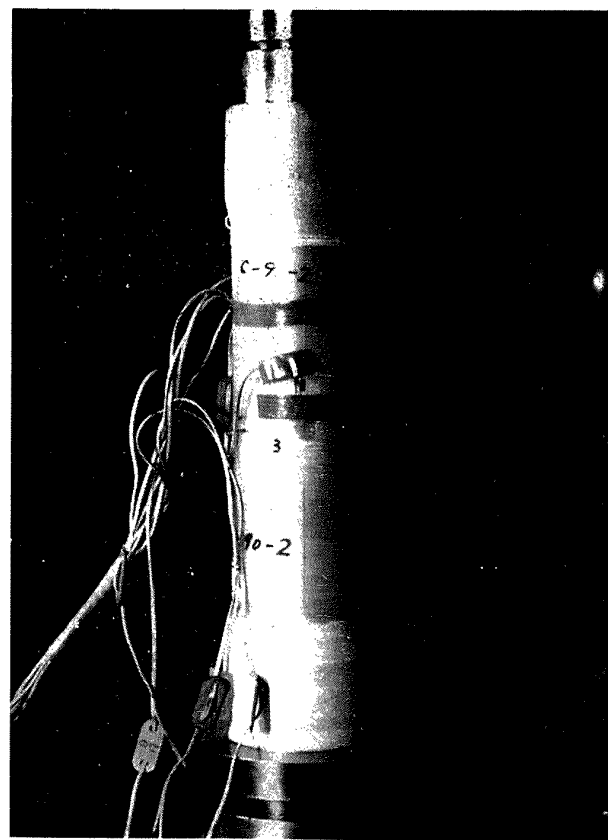


図 10 圧 縮 試 験

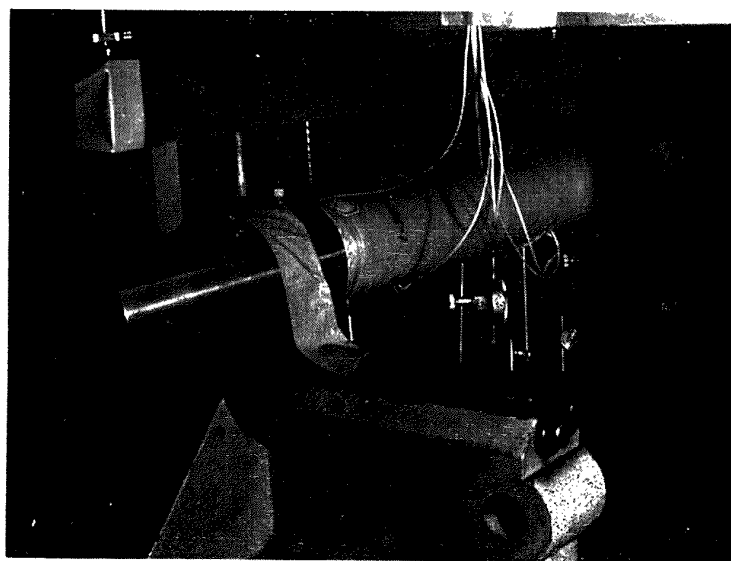


図 11 曲 げ 試 験

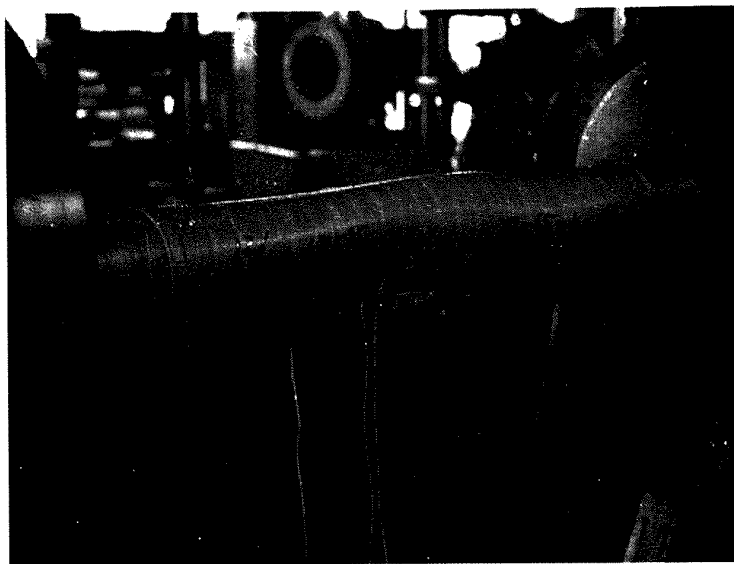


図 12 振 り 試 験

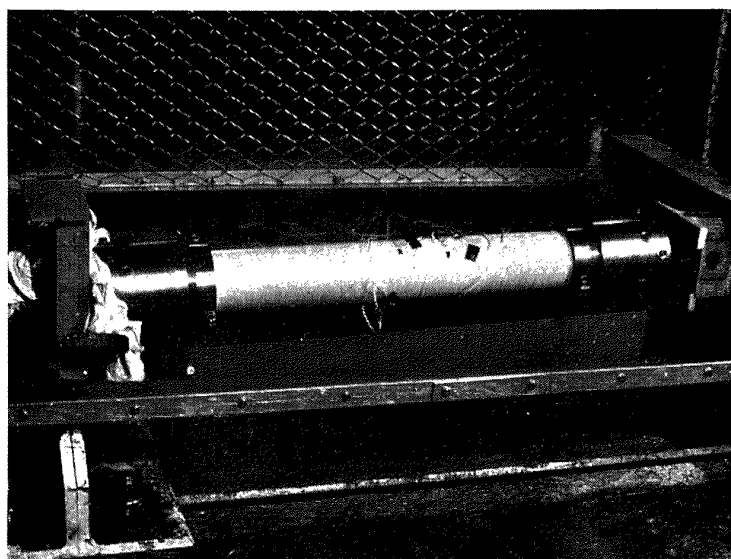


図 13 内 圧 試 験

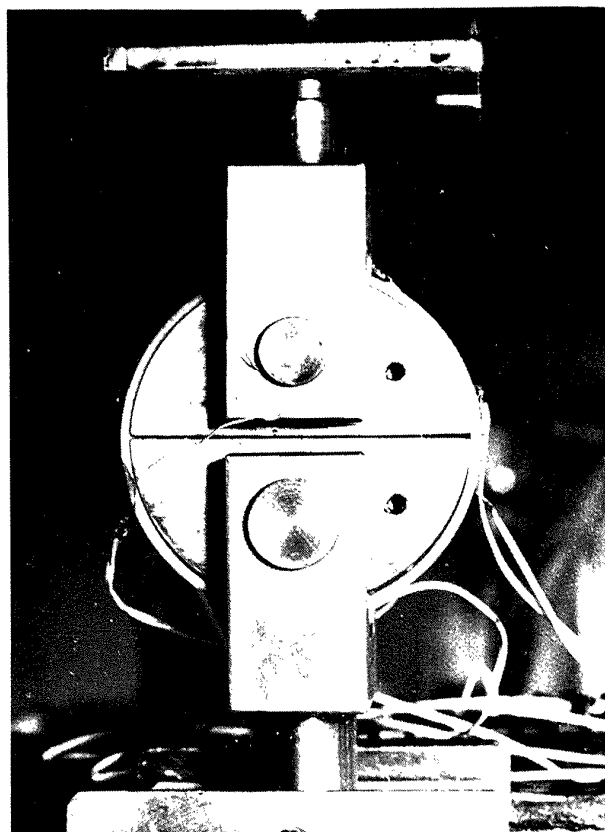


図 14 NOL リン グ 試 験

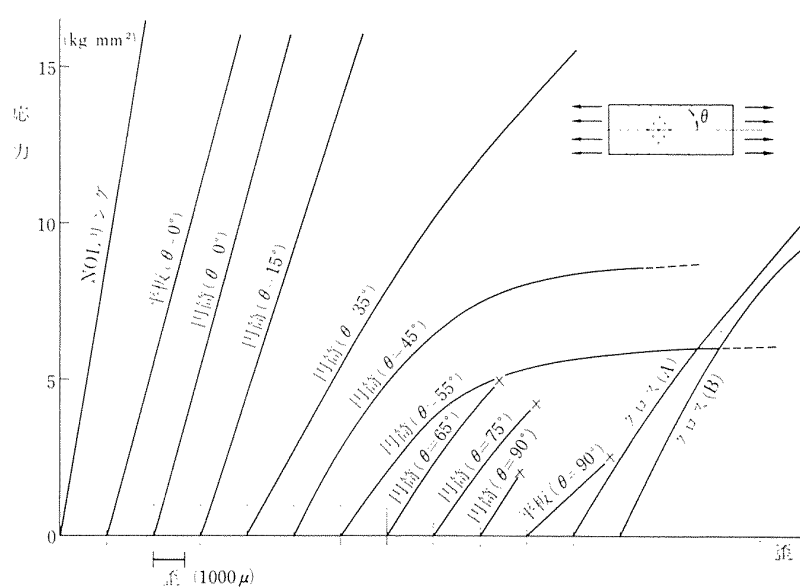


図 15 引張による応力 - 歪特性

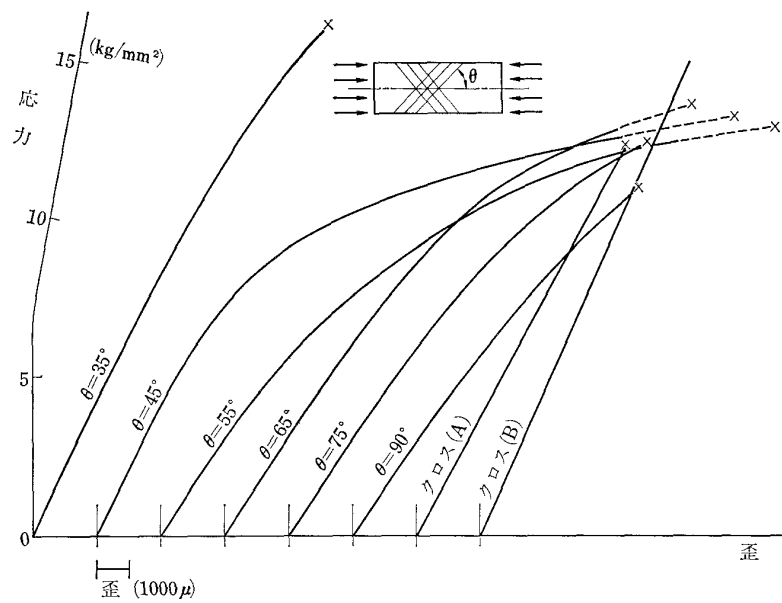


図 16 圧縮による応力 - 歪特性

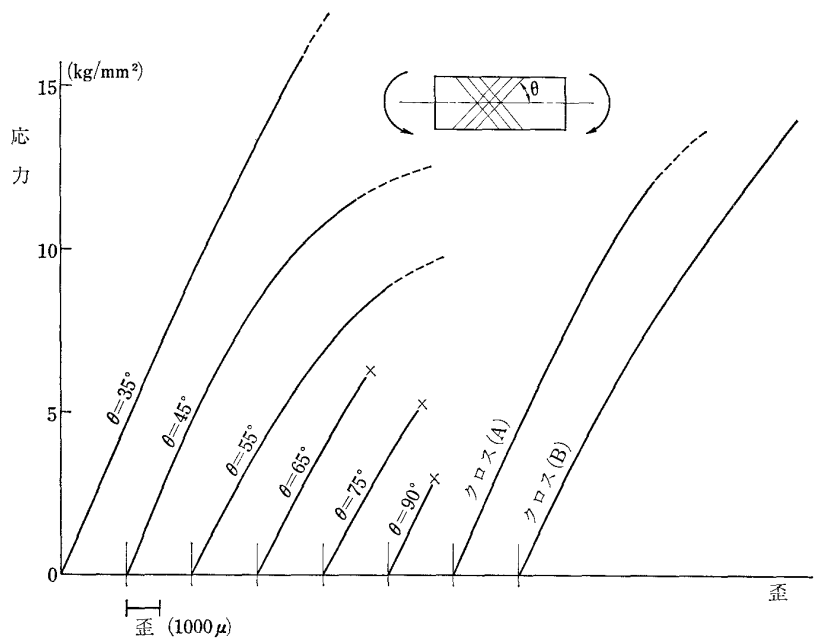


図 17 曲げによる応力 - 歪特性

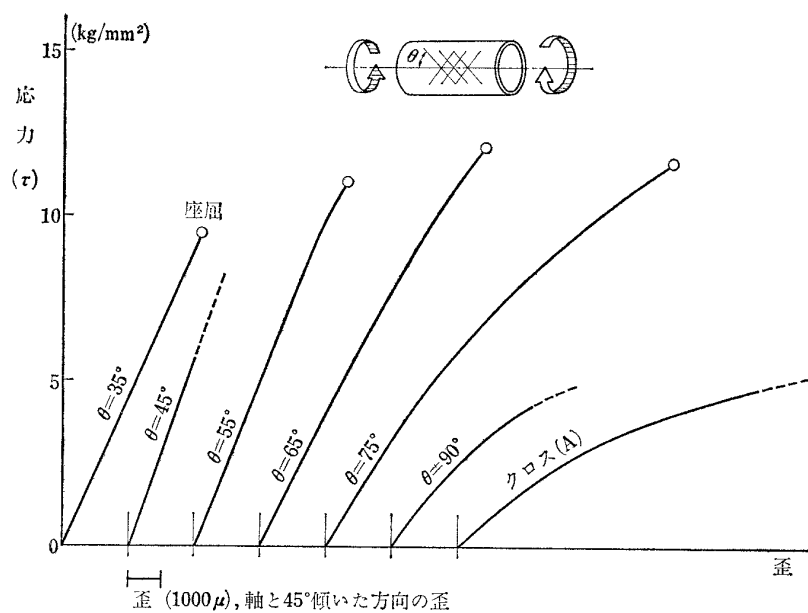
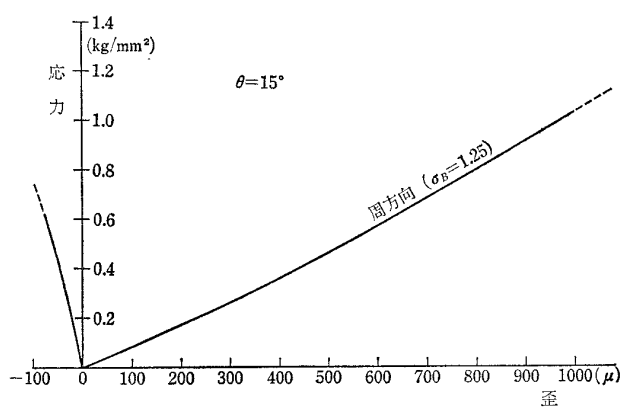
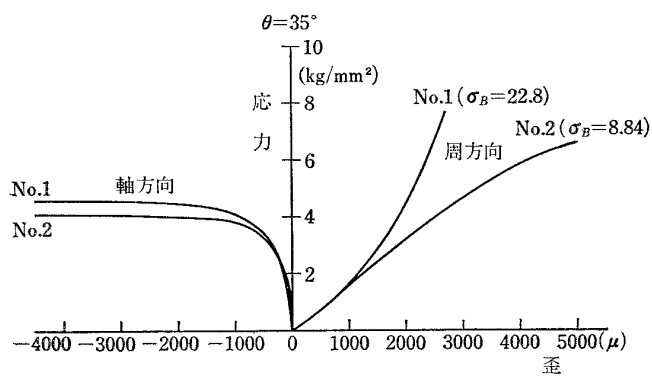
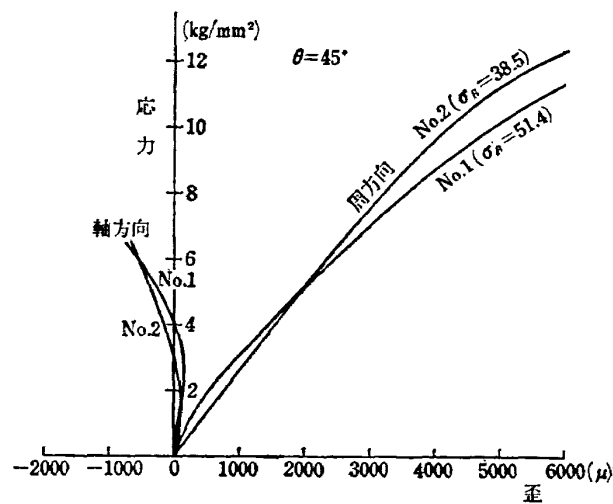
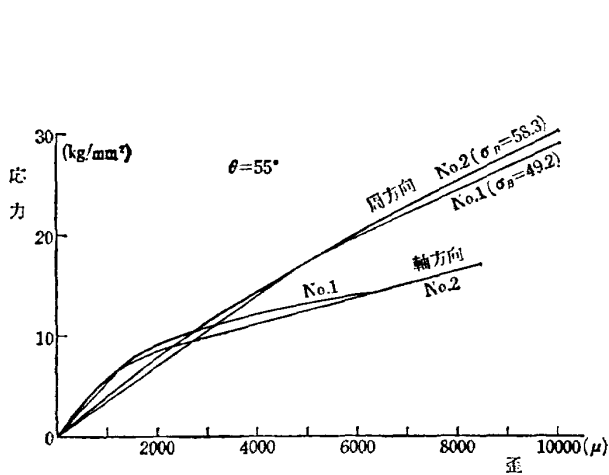
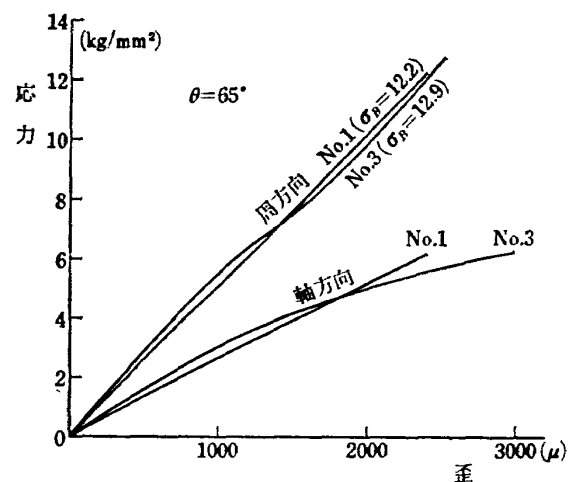
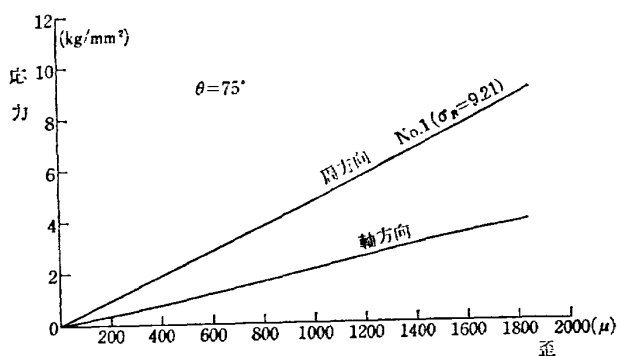
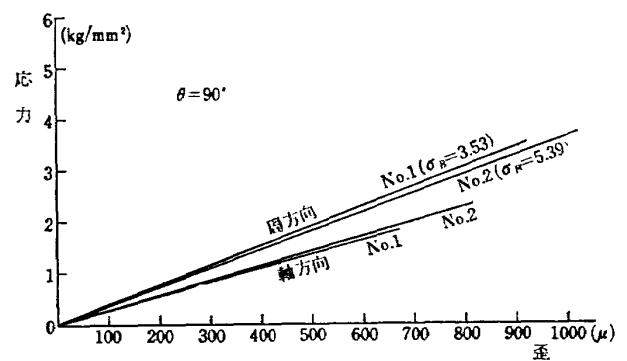


図 18 捩りによる応力-歪特性


 図 19 内圧による応力-歪特性 ($\theta = 15^\circ$)

 図 20 内圧による応力-歪特性 ($\theta = 35^\circ$)

図 21 内圧による応力 - 歪特性 ($\theta = 45^\circ$)図 22 内圧による応力 - 歪特性 ($\theta = 55^\circ$)図 23 内圧による応力 - 歪特性 ($\theta = 65^\circ$)図 24 内圧による応力 - 歪特性 ($\theta = 75^\circ$)図 25 内圧による応力 - 歪特性 ($\theta = 90^\circ$)

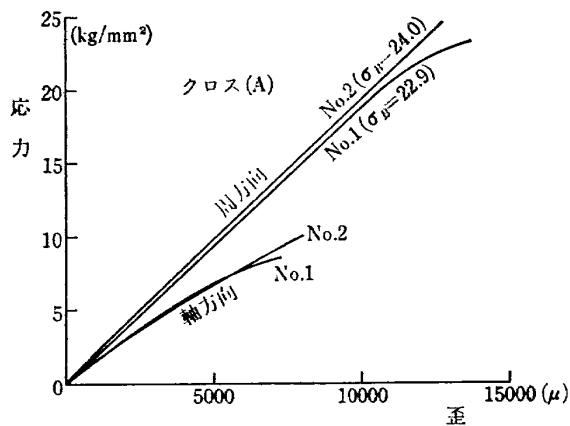


図 26 内圧による応力-歪特性(クロス(A))

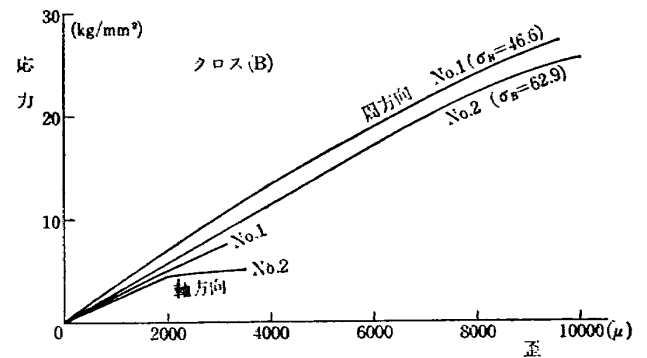


図27内圧による応力-歪特性(クロス(B))

しかしながら実際にはフィラメントが樹脂によってある程度拘束されているので、樹脂の強度との関係により単純な傾向にはならない。実験結果をみると、 $\theta = 35^\circ$ 、 45° では共に応力が $2 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ のところで軸方向の歪が急変しており、また、 $\theta = 90^\circ$ の破壊強度(ほぼ樹脂の破壊強度に等しい)が、引張で 2 kg/mm^2 、捩りによるせん断で約 5.6 kg/mm^2 であることから考えて、 $\theta = 45^\circ$ では圧力が小さい間はフィラメントが 55° 方向に傾こうとする力に樹脂が耐えているが、圧力が増加するに従って樹脂の拘束力が弱まる、応力が 4 kg/mm^2 以上ではフィラメントの力が優勢になって、軸方向に縮むことになるとと思われる。

(2) 弾性係数

図28および図29にはヤング率 E 、横弾性係数 G 、ポアソン比 ν を示す。ヤング率 E およびポアソン比 ν は全試験片について測定したもので、 G は捩り試験片だけで測定したものである。

いずれの場合も測定値の上限、下限および平均値を示してある。また、付録に載せてある文献¹⁾の方法による計算結果も合せて示した。

今回の実験はガラス含有率が試験片の種類によって異なるので、あまり一般性がないがどの角度の円筒も同一のガラス含有率で作ることは、加工技術の点で非常にむずかしく実際の構造物を作る場合でも相対的には今回の試験片のガラス含有率の分布に似たものになると思う。

また、 $\theta = 0^\circ$ に対応して平板および NOL リングの結果を共に示したが、NOL リング試験では荷重の増加に従って、リング内に挿入した二つ割円板の割れ目の間隔が開いてリングに曲げモーメントが生じ、正確

な測定ができなかった。

4.2 破壊強度

図30～図35に破壊強度の実験結果を、図36～図40に破壊状況の写真をそれぞれ示す。以下に各荷重に対する破壊状況を説明する。

(1) 引張

試験片は各種類共2本であるが、破壊強度のバラツキは小さい。前にも述べたように $\theta = 35^\circ$ の試験片では、負荷部分の補強が弱かったために2本共補強の肉盛部分がせん断によって円筒部からはがれてしまい、本来の円筒の破壊試験とはいえないものである。

$\theta = 90^\circ$ 、クロス(A)では軸に垂直な面で輪切状に破断した。

$\theta = 55^\circ$ 、 65° 、 75° 、ではフィラメントと樹脂との剥離により、らせん状の亀裂で破壊、 $\theta = 45^\circ$ 、クロス(B)では瞬間的なネッキングによって破壊した。

(2) 圧縮

この場合も引張と同様にバラツキが小さい。

$\theta = 75^\circ$ 、 90° 、クロス(A)、クロス(B)では円周に沿って帯状に破断、 $\theta = 35^\circ$ 、 45° ではフィラメントに沿った亀裂による破壊、 $\theta = 55^\circ$ 、 65° では上記の二つの状態が混合された破壊状況を示した。

(3) 曲げ

$\theta = 90^\circ$ 、クロス(A)、クロス(B)では軸に垂直な面で破断、 $\theta = 45^\circ$ では弾性捩屈を伴う大変形を起し破壊にいたらなかった。 θ が 35° 、 55° 、 65° 、 75° のものは、引張側から生じた亀裂が巻角方向へ発展して破断した。

(4) 捩り

しん金を入れたものと $\theta = 90^\circ$ 、 75° のものを除き、すべて弾性捩屈の後に破断した。 $\theta = 90^\circ$ では軸に垂直な

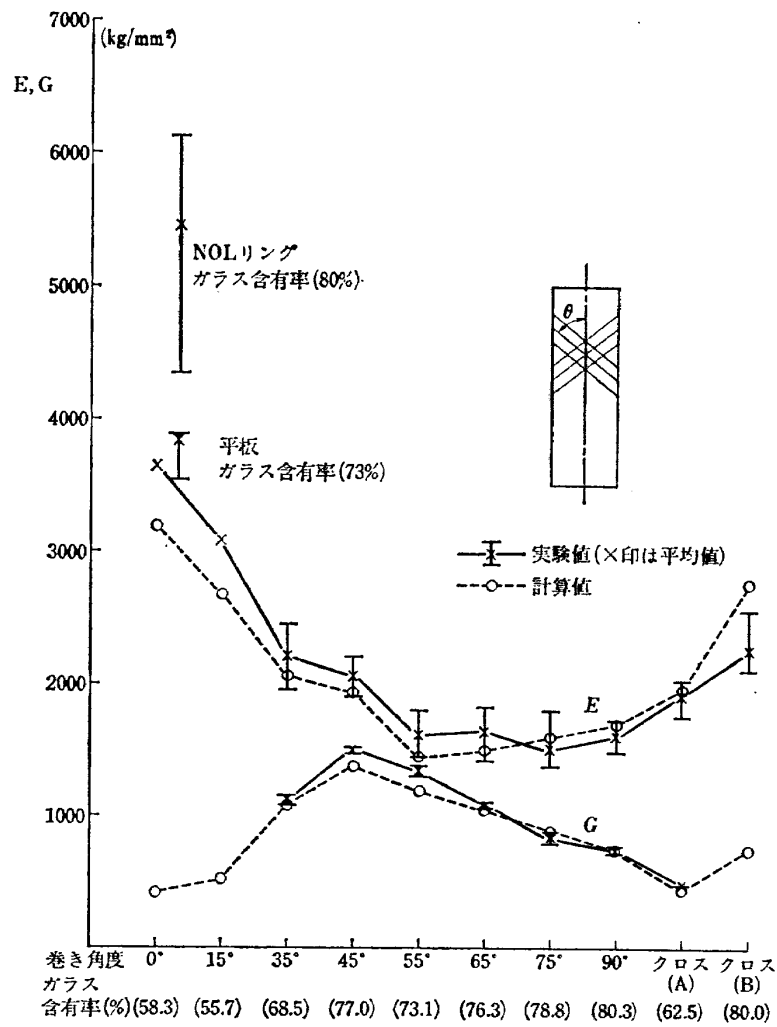


図 28 弾 性 係 数

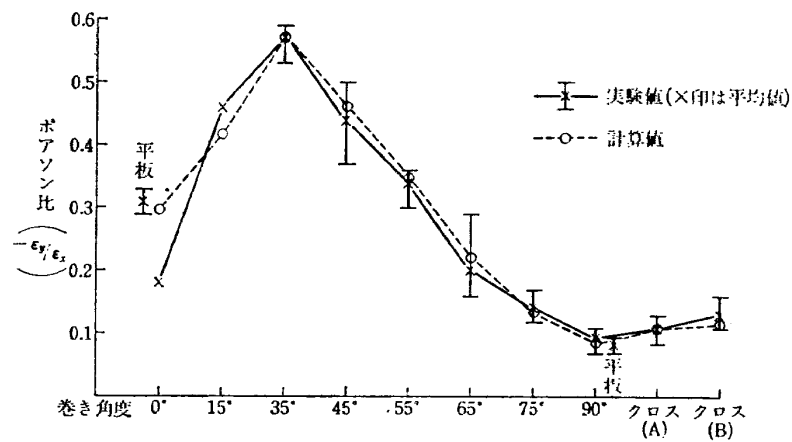


図 29 ポ ア ソ ン 比

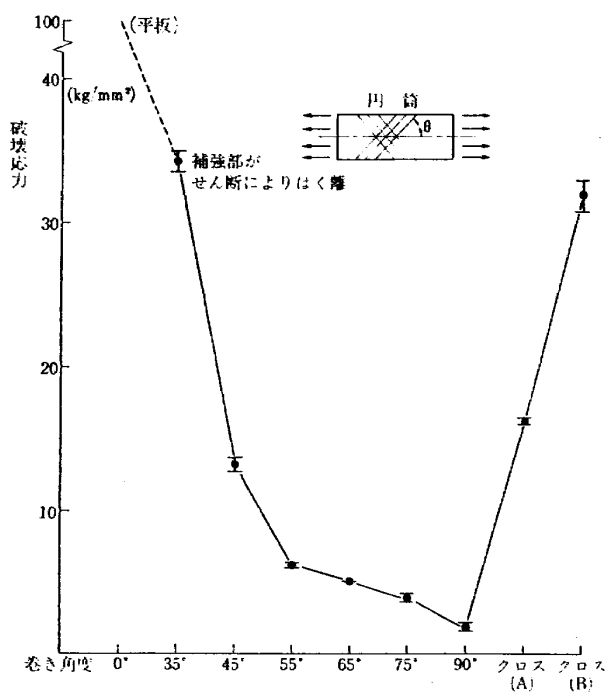


図 30 引張強度

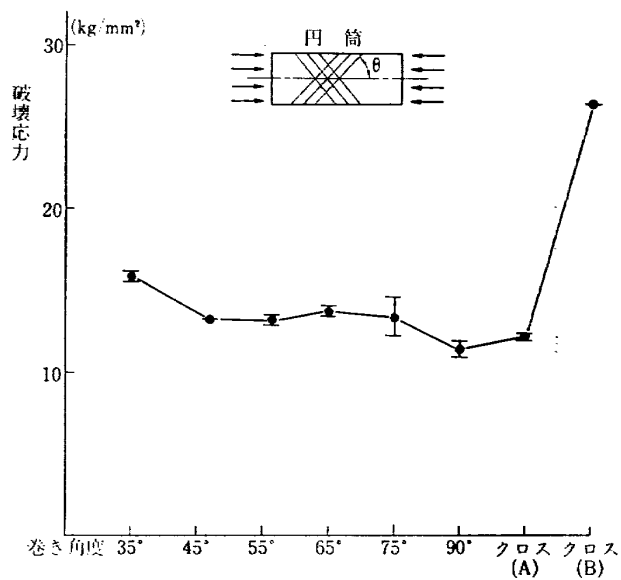


図 31 圧縮強度

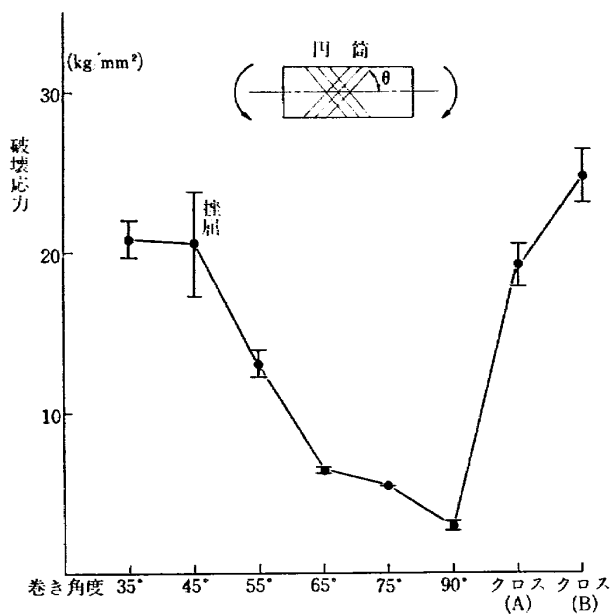


図 32 曲げ強度

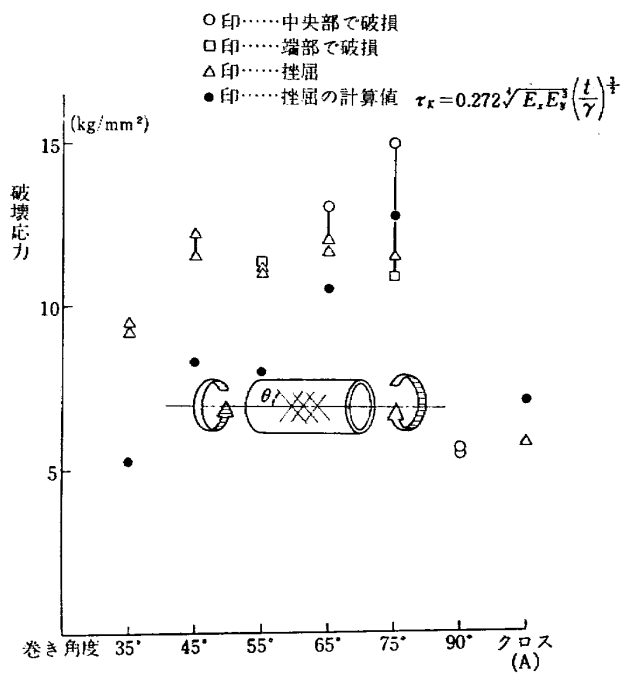


図 33 捩り強度

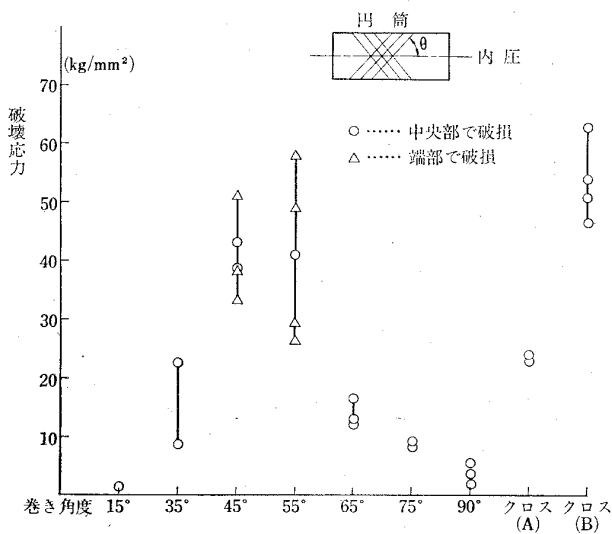


図 34 内 圧 強 度

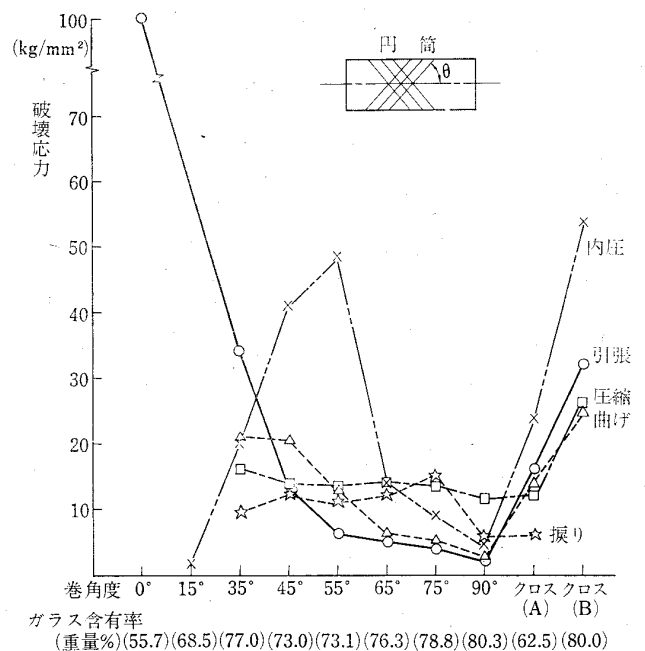


図 35 強度特性(平均値)

面で破断，クロス(A)は軸に垂直とそれに45°方向の破断が混合した二種類， $\theta=35\sim75^\circ$ のものは心金の有無，挫屈の有無にかかわらず，いずれもフィラメント方向で破壊した。

また，振り挫屈については文献²⁾の式によって計算を行ない，図33に実験値と共に示した。ただし，振り試験片については E_y を測定していないので他の試験片の平均値を用いた。

(5) 内 圧

$\theta=90^\circ$ ，クロス(A)，クロス(B)は，すべて軸に垂直な面で破断， $\theta=45^\circ\sim75^\circ$ のものは，いずれもフィラメント方向の亀裂によって破壊した。初期の試験片では端部の補強が十分でなかったため， $\theta=45^\circ, 55^\circ$ のものは中央部で破壊せずに端部の締付ボルト附近で破断したものが多かった。クロス(B)の試験片はすべて端部を改良したもので行なったので破壊強度が高い割にすべて中央部で破断した。

5. む す び

一般にフィラメント・ワインディング材は金属材料に比べ，製作技術等によって強度特性が左右され，そのバラツキも大きい。したがって，数少ない試験から断定的な結論を導き出すことは危険であるが，今回の試験によって巻き角度と強度特性との定性的な関連は得られたと思われる。

実際の構造物においては，荷重条件を考慮し，数種類のワインディングを組合せて最適なものを作るのが常道であるが，その場合に今回の結果が参考になると思われる。しかし，破壊強度は多数の要素の複雑な合成によって決定されるものであり，単に各要素を重ね合せた結果とはならないので，その解明は今後の課題としてさらに研究する必要がある。

最後に，今回の実験に使用した試験片の製作を担当された大日本ガラス工業株式会社ならびに振り試験に協力された島津製作所に感謝の意を表する。

文 献

- 1) Stephen W. Tsai; Structural Behavior of Composite Materials, NASA CR-71, 1964
- 2) 長柱研究委員会編，弾性安定要覧 p. 540
- 3) D. V. Rosato, C. S. Grove, Jr. Filament Winding Interscience Publishers (John Wiley & Sons, Inc.)

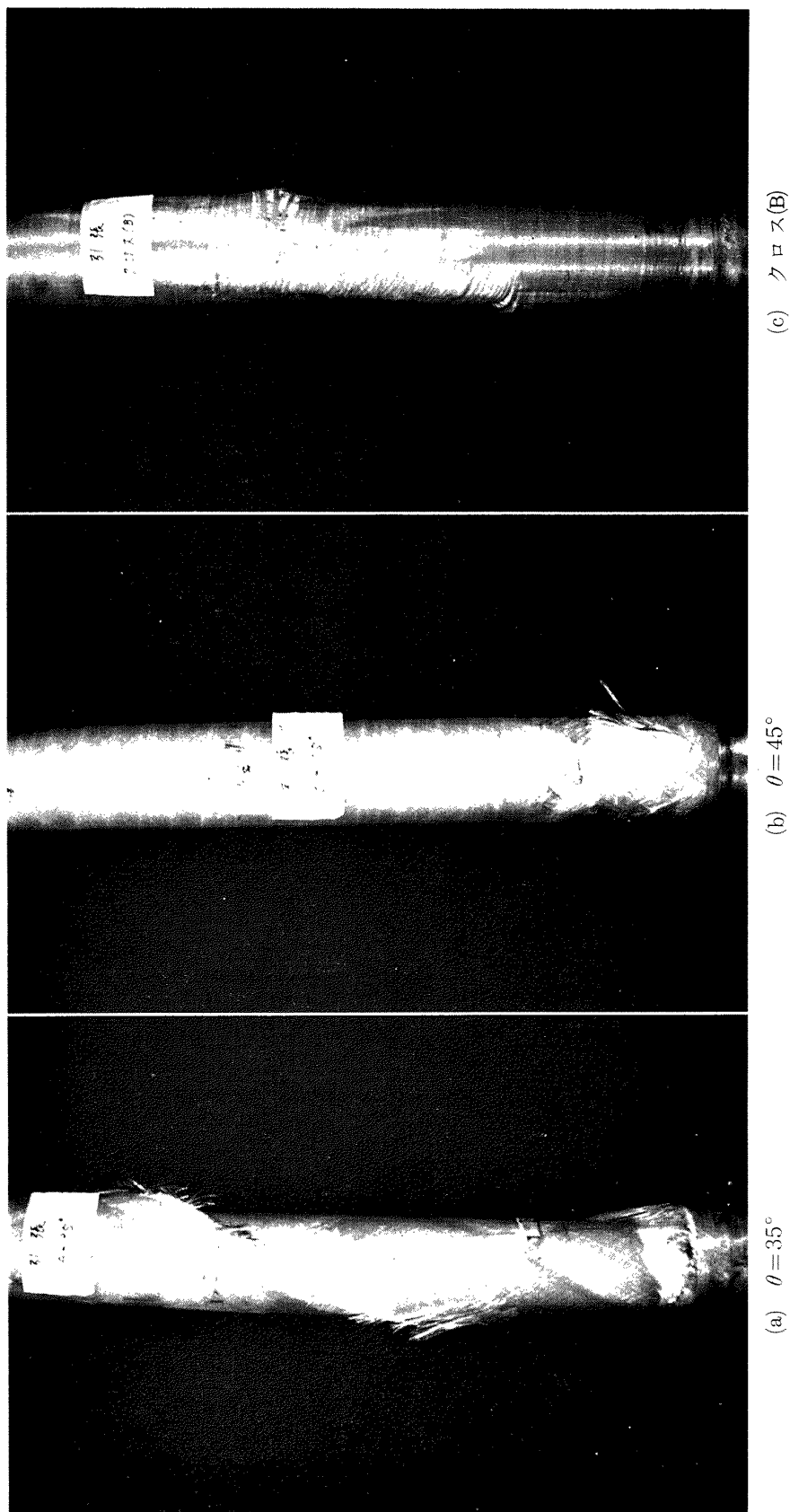
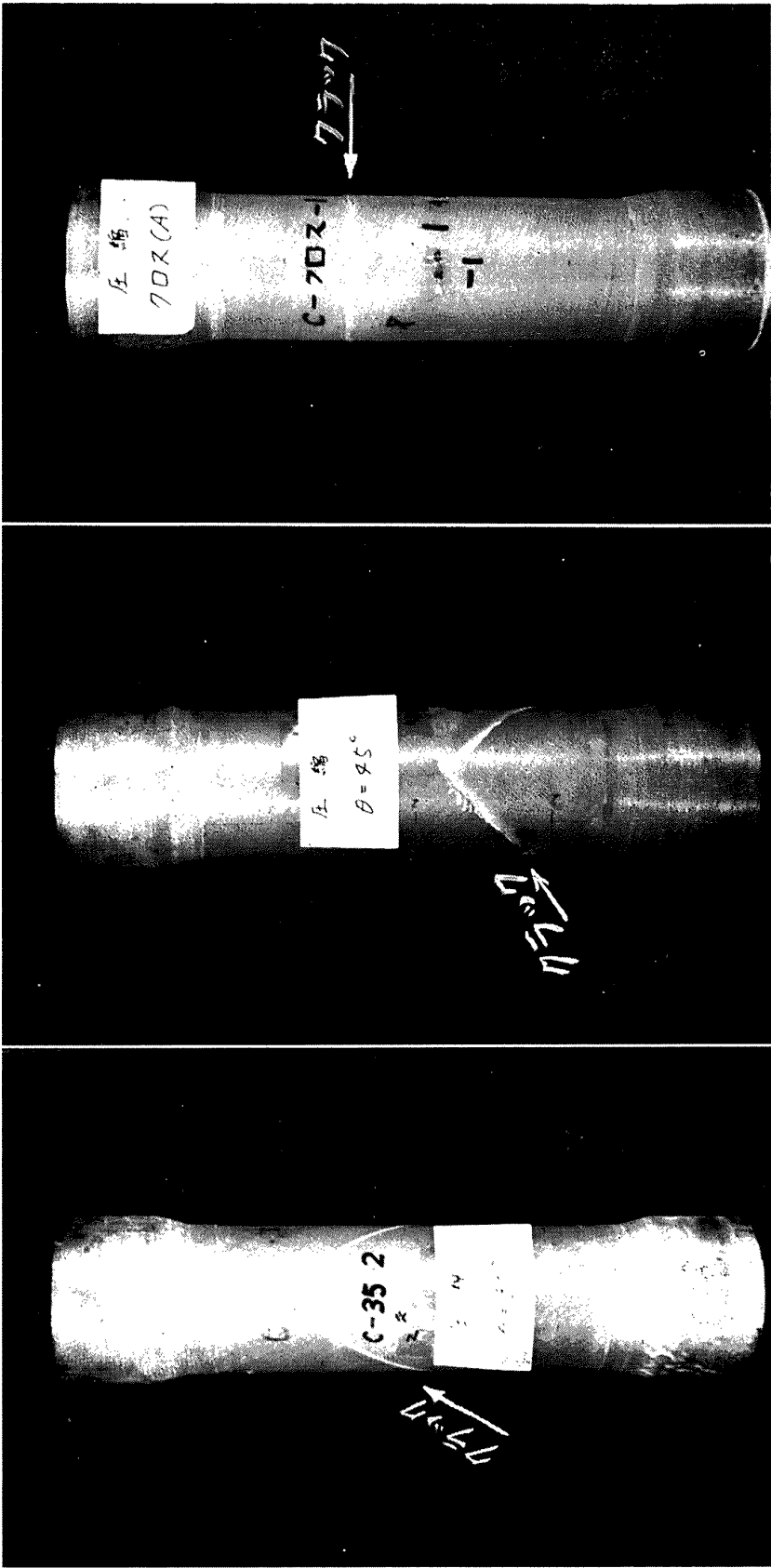


図 36 引張による破壊状況



(c) クロス(A)

(b) $\theta = 45^\circ$

(a) $\theta = 35^\circ$

図 37 圧縮による破壊状況

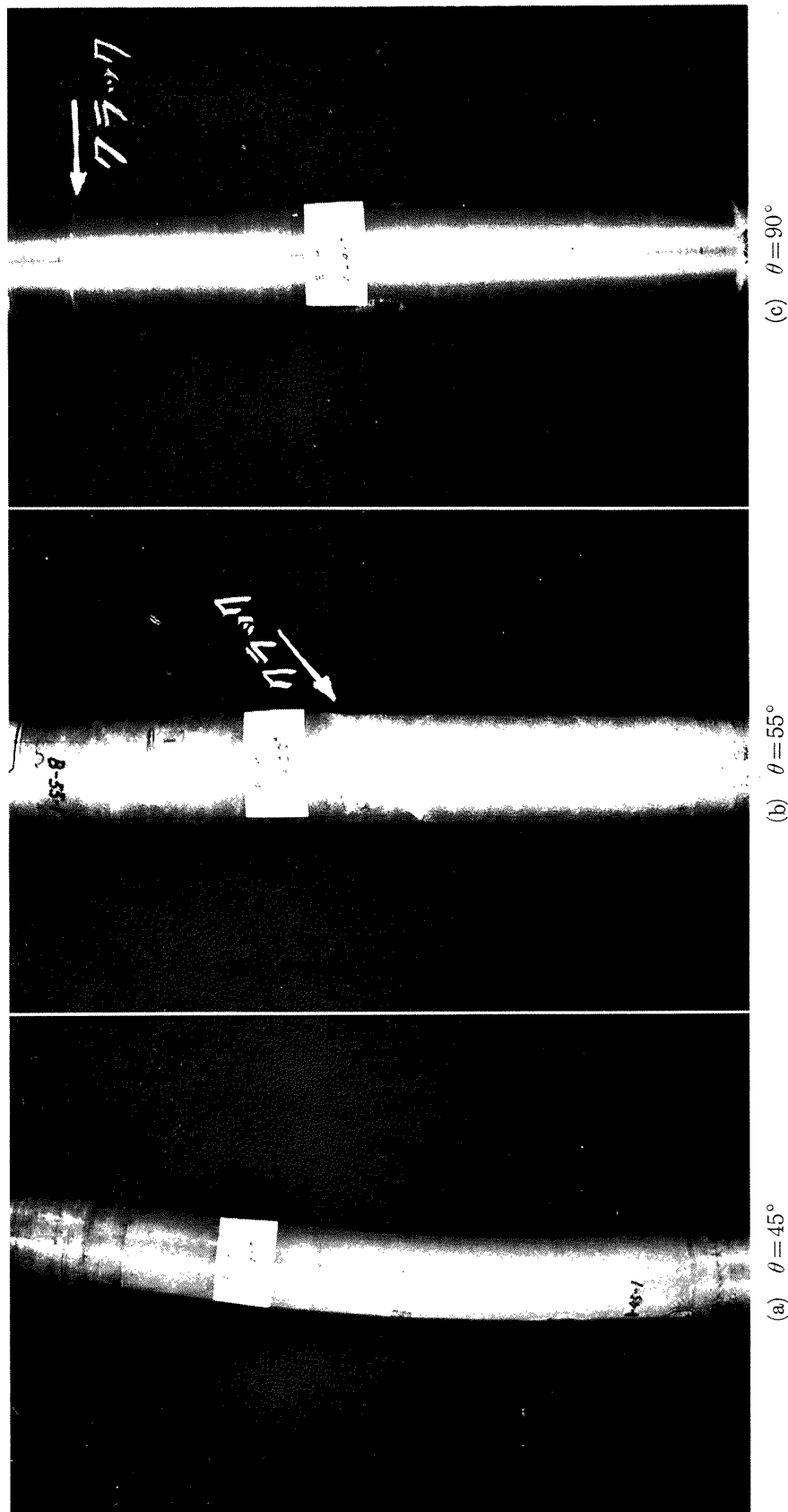


図 38 曲げによる破壊状況

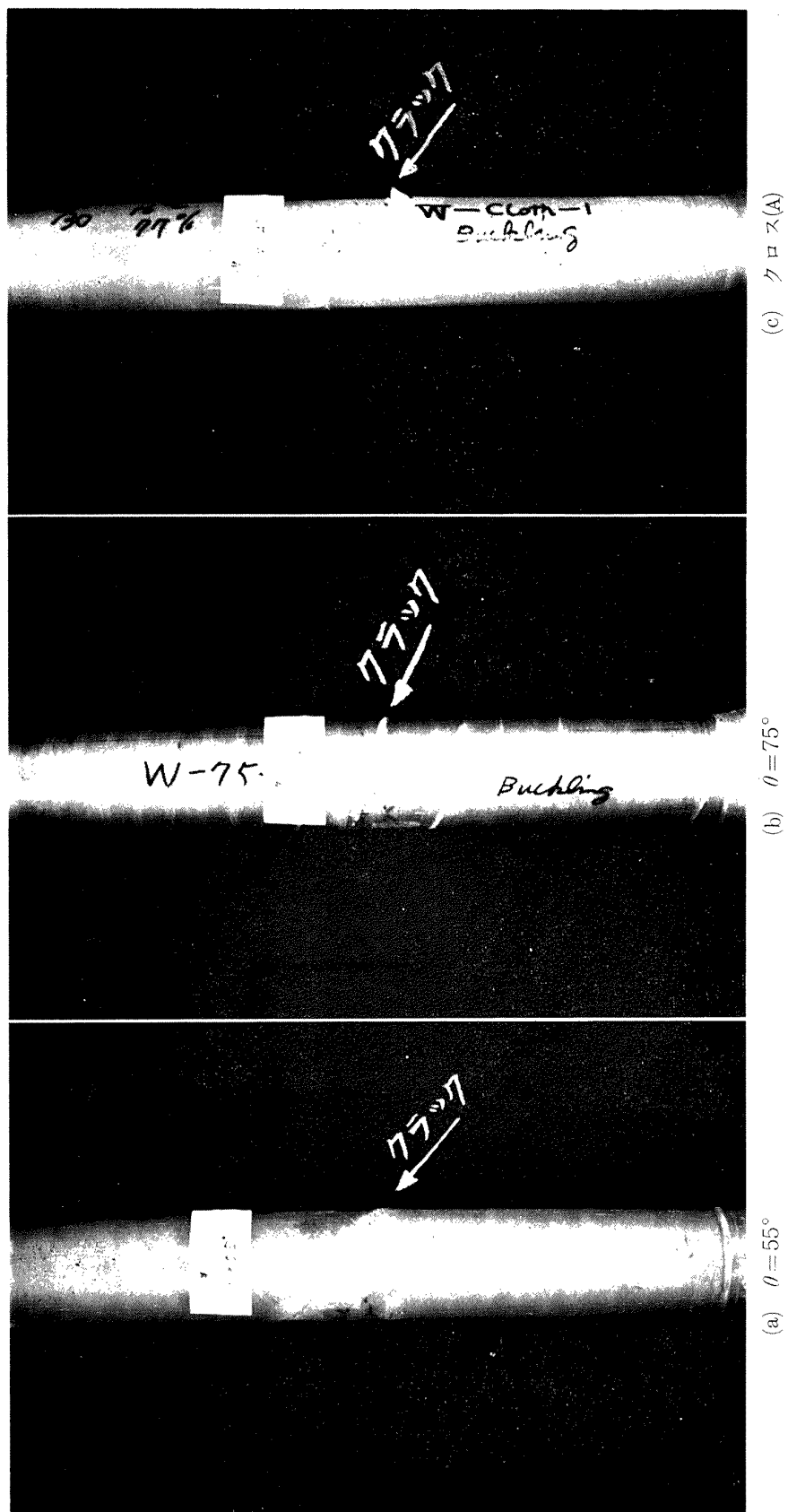


図 39 捩りによる破壊状況

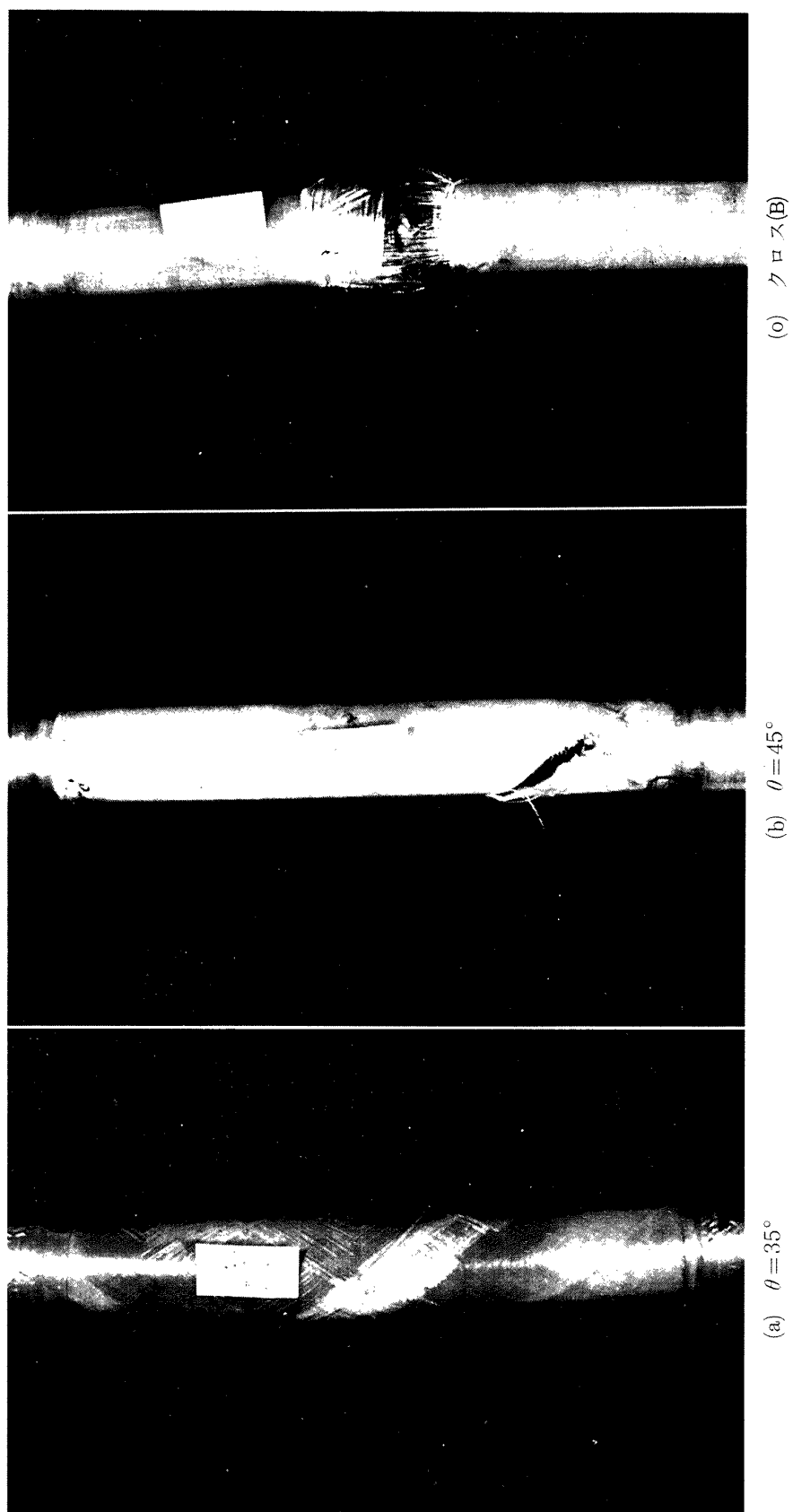


図 40 内圧による破壊状況

付 録

文献¹⁾により複合材料の弾性係数は、樹脂の中にフィラメントが均一に規則的に配列されていると仮定すると

$$E_{11} = E_f - (E_f - E_m)\chi$$

$$E_{22} = 2 \left[1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m)\chi \right] \times \left[\frac{K_f(2K_m + G_m) - G_m(K_f - K_m)\chi}{(2K_m + G_m) + 2(K_f - K_m)\chi} \right]$$

$$G = G_m \left[\frac{2G_f - (G_f - G_m)\chi}{2G_m + (G_f - G_m)\chi} \right]$$

$$\nu_{12} =$$

$$\frac{K_f \cdot \nu_f (2K_m + G_m) (1 - \chi) + K_m \cdot \nu_m (2K_f + G_m) \chi}{K_f (2K_m + G_m) - G_m (K_f - K_m) \chi}$$

ここで

$$K_f = E_f / 2(1 - \nu_f)$$

$$K_m = E_m / 2(1 - \nu_m)$$

$$G_f = E_f / 2(1 + \nu_f)$$

$$G_m = E_m / 2(1 + \nu_m)$$

$$\chi = \frac{\gamma_f / \gamma_m}{(100/R) - (\gamma_f / \gamma_m) - 1}$$

E_f : フィラメントのヤング率

ν_f : フィラメントのポアソン比

γ_f : フィラメントの比重

E_m : 樹脂のヤング率

ν_m : 樹脂のポアソン比

γ_m : 樹脂の比重

R : 樹脂の含有量 (重量%)

E_{11} : 複合材のフィラメント方向のヤング率

E_{12} : 複合材のフィラメントに垂直な方向のヤング率

G : 複合材の横弾性係数

ν_{12} : 複合材のポアソン比

(1) ヘリカル・ワインディング材の弾性係数

図41において、フィラメント方向の座標系での弾性係数を E_{11} , E_{22} , G , ν_{12} , ν_{21} とすると、 x - y 座標系への変換により

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [S][C^\circ][S]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \equiv [C] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

ここで

$$[S] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} m = \cos \theta \\ n = \sin \theta \end{matrix}$$

$$C_{11}^\circ = E_{11} / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})$$

$$C_{22}^\circ = E_{22} / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})$$

$$C_{12}^\circ = C_{21}^\circ = \nu_{12} \cdot C_{22}^\circ$$

$$C_{33}^\circ = G$$

$$C_{13}^\circ = C_{23}^\circ = C_{31}^\circ = C_{32}^\circ = 0$$

+ θ 層と- θ 層とが交互に同じ原さで巻いてあるとすれば

$$[C] = \frac{1}{2} \{ [S^+][C^\circ][S^+]^T + [S^-][C^\circ][S^-]^T \}$$

ここで S^* は $\pm \theta$ に対応するものである。

したがって、 x - y 座標系での弾性係数は

$$E_x = (C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2) / C_{22}$$

$$E_y = (C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2) / C_{11}$$

$$\nu_{xy} = C_{12} / C_{22}$$

$$\nu_{yx} = C_{12} / C_{11}$$

$$G_{xy} = C_{33}$$

(2) クロス材の弾性係数

x 方向, y 方向のフィラメント含有量が1対2の場合には

$$C_{11} = \frac{2}{3} (0.5 + E_{22}/E_{11}) [E_{11} / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})]$$

$$C_{22} = (1 + E_{22}/2E_{11}) \cdot C_{11} / (0.5 + E_{22}/E_{11})$$

$$C_{12} = \nu_{12} \cdot E_{22} / (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})$$

$$C_{33} = G$$

として、ヘリカル・ワインディングの場合と同様にして E_x , E_y , ν_{xy} , ν_{yx} , G_{xy} が計算できる。

今回の実験ではフィラメントの弾性係数の測定は行なわなかったため、カタログに示されている一般的な値を用いて計算を行なった。

$$E_f = 7400 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_f = 0.02$$

$$\gamma_f = 2.55$$

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

$$\nu_m = 0.35$$

$$\gamma_m = 1.15$$

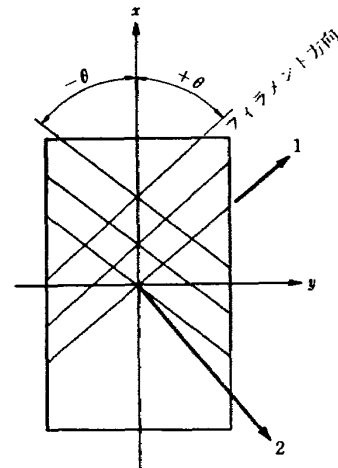


図 41

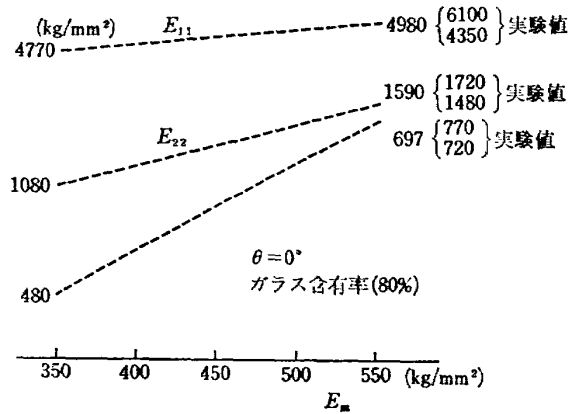


図 42

しかしながら上記の値で計算すると図42に示すように、全般にわたって実験値より低い値になり、特に G は低い値に計算された。

文献¹⁾にも示されているように、上記の各材料定数の中で G に大きく影響するものは E_m だけなので、 E_m を種々変化させて計算してみると図 42 のように $E_m \doteq 550 \text{ kg/mm}^2$ で E_{11} , E_{22} , G 等が実験値に近い値となるので、他の弾性係数もすべてこの E_m を用いて求めた。

しかしながら、樹脂だけの試験片で E_m を測定してみると $E_m = 360 \text{ kg/mm}^2$ となり、550 という値は大きすぎる。このくいちがいは、平板と円筒の差および理論式の本質的な仮定に原因していると思われるのでさらに検討を要する問題である。

TM-116 高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(I)	1967年9月	鈴木邦男, 相波哲朗
TM-117 ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化	1967年9月	新田慶治, 松崎良継
TM-118 操縦桿レート信号によるアイアンバー ド制御の安定効果とパイロットのモ デルについて	1967年9月	村上 力, 真柳光美
TM-119 ベーン型気流方向検出器の特性	1967年11月	田畑浄治, 松島弘一 成田健一, 塚本憲男
TM-120 円錐管レンズの設計とその応用	1967年11月	山中竜夫, 奥唄澄男
TM-121 大きなマトリクスの逆行列計算および 連立一次方程式の計算のためのプロ グラミング技術	1967年11月	戸川隼人, 戸川保子
TM-122 NAL-7-P ロケットの強度および燃焼 試験結果	1967年11月	竹中幸彦, 古田敏康 小川鉦一, 朝田洋雄 豊原恒彦, 五代富文 湯沢克宜, 伊藤藤克 西村久男
TM-123 “NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケットの振動試験	1967年11月	中井暎一, 古関昌次 田寺木一, 高木俊朗 安藤泰勝, 森田甫之 峯岸正勝, 菊地孝男 太田幹雄
TM-124 吹出式超音速風洞の集合胴圧力制御に ついて	1967年12月	外立政隆, 近藤洋史 原 亘利
TM-125 航技研 1m×1m吹出式超音速風洞にお けるハーフモデル試験について	1968年2月	石原久蔵, 原 亘利 榑原盛三, 関根英夫
TM-127 2024-T3アルミニウム合金の3-bay 有 孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1968年4月	飯田宗四郎, 猿本光明 斉藤信一郎
TM-130 リフトエンジンの自然吸込みについて	1968年4月	近藤 博, 大城章一郎
TM-131 遷音速タービン翼列二次元試験(Ⅲ)	1968年5月	近藤 博, 蓑田光弘 山崎紀雄, 古川 昇
TM-132 行列の最小固有値の一計算法	1968年5月	戸川隼人, 戸川保子

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133号

昭和43年5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)44-9171(代表)

印刷所 一誠社綜合印刷株式会社
東京都武蔵野市御殿山1-6-10
