

名古屋大学工学部 ○田川哲哉 谷口正典
宮田隆司

1. 緒言

現在、炭素繊維(以降C.F.と呼ぶ)は複合材料の強化材として広く利用されているが、繊維自体の強度、破壊特性に関する研究は少ない。基本的な特性値である引張強度についてはストラット^{*)}(繊維束)で評価される場合がほとんどであり、C.F.が脆性材料であることを考えると、ストラットによる評価が何を意味するのか必ずしも明らかでない。一方、炭素繊維強化複合材料は圧縮に対して非常に弱いとされている。これは強化構造上、当然のことであるが、繊維自体の圧縮強度も非常に低いとの報告¹⁾もある。しかし、C.F.の圧縮強度評価試験は繊維が非常に細いため困難であり、その試験方法すら模索されているのが現状である。

本研究ではポリアクリロニトリル系(PAN系)、メソフェーズ系(MP系)のC.F.に対し、C.F.単体の引張試験を繰り返し行い、強度のゲージ長(G.L.)依存性などの確率的特性について検討を行った。また、圧縮強度に関しては、現在最も有効とされているTensile Recoil試験²⁾及びKnot試験を行い、それらから得られる圧縮強度の意味について検討を行うとともに、圧縮強度の支配因子の解明を試みた。

2. 供試材と試験方法

供試材は5種類のMP系C.F.及び2種類のPAN系C.F.で、その特性データをTable.1に示す。MP-A15からMP-A60は同一メーカーのもので、焼成温度により弾性率を系統的に変えてあり、主に圧縮強度評価に用いた。C.F.の機械的性質はC.F.の結晶構造に大きく依存するため、試験に先立ち、

Table.1 Mechanical properties of materials tested.

C.F. code	Precursor	平均直径 d _{av} (μm)	弾性率 E (GPa)	引張強度 σ _t (MPa)	半値幅 B(002) (rad)
MP-A15	MP	8.3	157	2540	0.077
MP-A30	MP	8.3	275	3315	0.027
MP-A50	MP	9.5	490	3040	0.012
MP-A60	MP	7.0	597	3226	0.017
MP-B50	MP	9.5	504	4021	0.011
PAN-A25	PAN	6.5	235	3825	0.026
PAN-B40	PAN	5.9	412	3168	0.029

Tensile recoil test (S.R.Allen,1987)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad a^2 = E/\rho$$

Assumption
1.Linear elastic material.
2.Rigid clamp at each end.
3.Zero initial velocity.
4.Uniform stress along fiber.

- σ_{pre-tension} = σ_{compression}

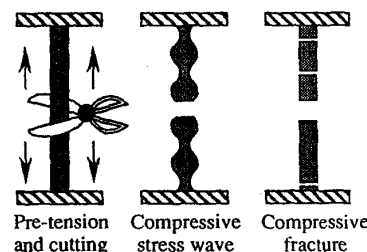


Fig.1 Tensile Recoil 試験

各供試材に対してX線回折を行い、結晶化度、結晶配向性を調べた。Table.1にはX線回折により得られた(002)面の半値幅も示している。

引張試験は、1本のC.F.の強度を測定するために容量100gの定速変位試験機を自作し、G.L.=6mm,15mm,25mmの3種類についてそれぞれ40本繰り返し試験を行い、引張強度のWeibull統計解析を行った。C.F.の直径は、同一供試材でもかなり分布を示すため、試験前にSEMにより直径の測定を行った。圧縮試験は現在提案されている試験法の内、最も繊維自体の現象を評価していると考えられるTensile Recoil試験、Knot試験を行った。Tensile Recoil試験は上述の引張試験機を用い、Fig.1に示すように引張予荷重を付与した後、試験片中央を鋭利な挟みで注意深く切断し、切断時に発生した圧縮弾性波で切断試験片を更に破断させるというものである。限界以下の引張予荷重の下では繊維は破壊せず、予荷重を変化させて試験片がこなごなに破壊する数値を求めた。理想的な境界条件の下では圧縮荷重と引張予荷重は等しくなる。一方、Knot試験はC.F.に結び目をつくり、破断する寸前まで輪を小さく絞っていき、SEM観察によりC.F.表面に変化が観察された時点の直径、及び最も小さくなったと思われる破断直前の時点での直径をSEMで測定し、弾性体とした場合の表面曲げ応力により評価した。

3. 試験結果

3.1引張試験 Fig.2にG.L.=15mmにおけるMP-A50,PAN-A25の引張試験結果をWeibull分布の形で示す。いずれの結果もほぼWeibull分布に従っており、最弱リンク概念に従った挙動を示す。また、いずれのC.F.におい

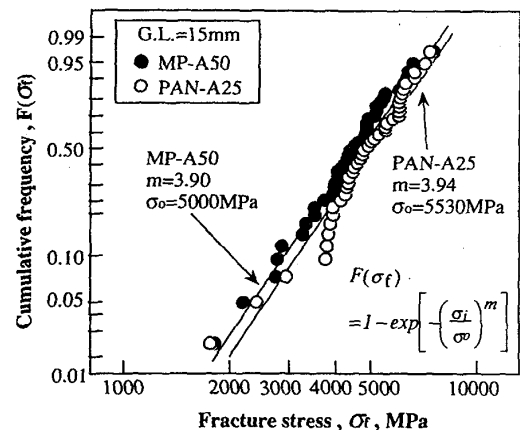


Fig.2 引張強度のWeibull分布

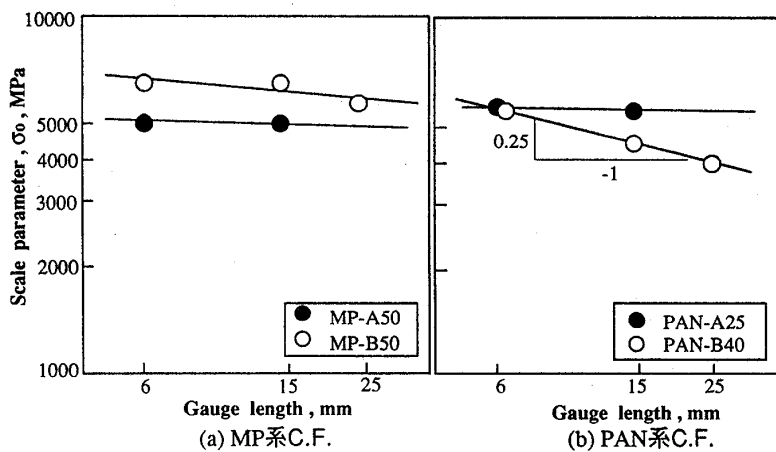


Fig.3 引張強度のゲージ長依存性

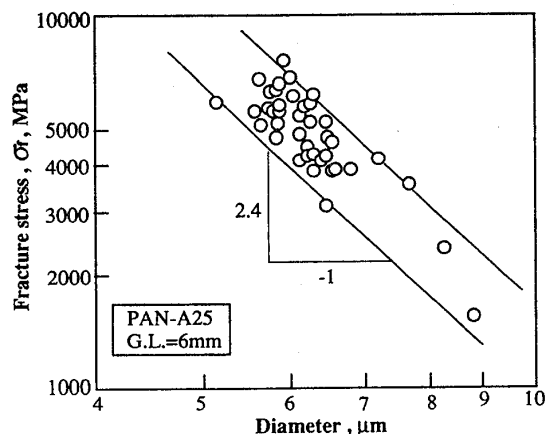


Fig.4 引張強度の直径依存性

でも引張強度のばらつきを示すWeibull形状母数 m は4前後で、かなり強度にばらつきの大きい材料であるといえる。Fig.2のようにWeibull統計解析を行った場合、尺度母数 σ_0 が強度の代表値となるが、各供試材の尺度母数のゲージ長依存性をFig.3(a)(b)に示す。いずれのC.F.もゲージ長が長くなるに従い強度が低下しており、最弱リンク特有の寸法効果を示す。また、強度のゲージ長依存性は、MPやPANといったプレカーに依存している傾向は見られず、C.F.ごとに特有であるようである。このような引張強度の寸法効果は繊維長さばかりでなく、Fig.4に示すように太さに関しても見られる。また、この場合の傾きはFig.3に比較して大きく、引張強度の寸法依存性は軸方向に比較して直径方向の方が大きいことを示している。一般にC.F.は結晶が軸方向に配向しており、そのため飛躍的に高い強度を示すといわれているが、強度の確率分布が等方性である材料に比較して、C.F.は細くした場合の強度の増加分が大きい材料であるといえる。

3.2 圧縮試験 Tensile Recoil試験結果をFig.5に示す。図では引張予荷重(応力)に対して、C.F.が破壊するか否かを2種類のG.L.について示してある。引張予荷重を増加させると、ある荷重以上では繊維は破壊し、敷居値を

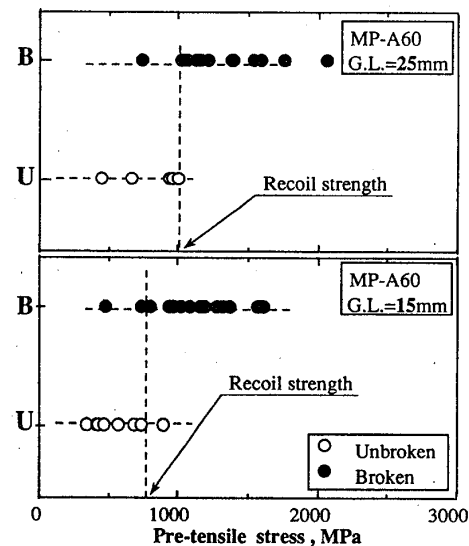


Fig.5 Tensile Recoil 試験結果

示すことがわかる。この敷居値をRecoil強度とし、圧縮強度の指標とすることにする。G.L.が増加するとRecoil強度は上昇する傾向を示すが、これは圧縮弾性波の減衰によるものと思われる。Fig.6に各C.F.のRecoil強度と弾性率の関係を示す。C.F.の直径はG.L.に比較して著しく小さいため、理想的な軸圧縮状態を本試験で評価しているとは思えない。しかし、単なる座屈強度を評価しているとする、Recoil強度はFig.6とは逆の弾性率依存性を示すはずであり、またFig.5のG.L.依存性も逆傾向となるはずである。従って、少なくともこのRecoil強度は圧縮強度に関係した値を示しているものと考えられる。一般にC.F.の弾性率はグラファイト化率やその結晶配向性に依存していることが知られており、ここで評価した圧縮強度もFig.7に示すように結晶構造に依存する。図では結晶化率を示す(002)面の半値幅の逆数で示している。Fig.6,7からわかるように、C.F.の圧縮強度はPAN,MPといったプレカーの種類によらずグラファイト化率に依存しており、結晶化の進んだ弾性率の高いC.F.ほど圧縮強度が低い傾向を示すようである。

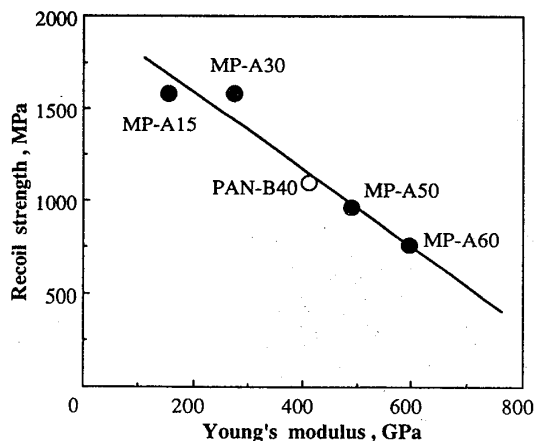


Fig.6 Recoil 強度と弾性率の関係

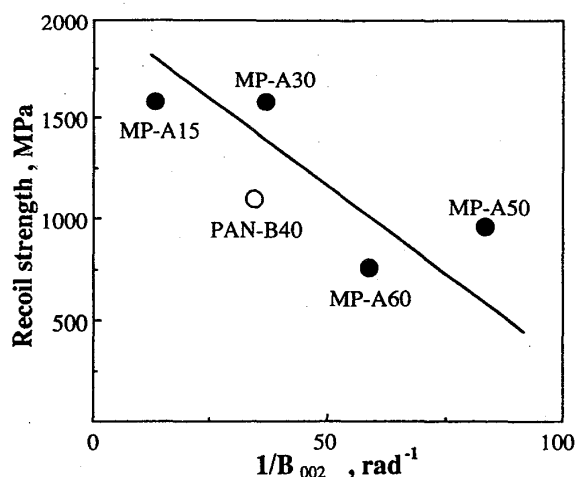


Fig.7 Recoil 強度に及ぼす結晶化の影響

Knot試験では、試験に先立ち、最終破断前の繊維の状態をSEMにより観察した。Photo.1はMP-A50の観察結果である。写真より明かに繊維の圧縮側表面に圧縮せん断により生成されたとと思われるせん断き裂が観察される。MP系繊維ではいずれも最終破断以前にこのようなき裂が観察された。C.F.が完全弾性体であるとして、脆性材料でありながら引張強度に比較して圧縮強度が低い材料であるといえる。このことはTensile Recoil試験が可能である事実と一致する。Knot直径を20種類程度変化させたものをSEM観察し、圧縮側表面のき裂の有無を表面圧縮応力で整理した結果をFig.8に示す。図よりある応力以

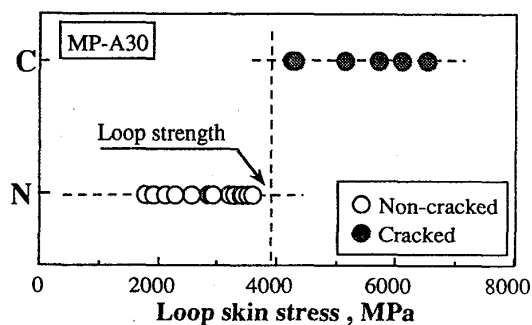


Fig.8 Knot 試験結果

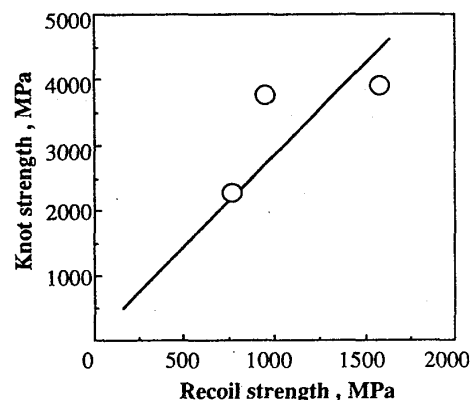


Fig.9 Recoil 強度と Knot 強度の関係

上になるとき裂が観察されており、明かに数値が存在していることがわかる。き裂発生形態からみてFig.8の数値が圧縮強度そのものを示すとは考えにくい、少なくとも圧縮強度になんらかに関連した値であるものと考えられ、ここではKnot強度とする。

2種類の圧縮試験で得られた圧縮強度の関係をFig.9に示す。両試験とも、厳密な意味での圧縮強度を評価しているわけではないので、値そのものは一致しておらず、ややKnot強度の方がRecoil強度に比較して大きな値を示す。しかし、両試験で評価した圧縮強度の大小関係は一致しており、いずれの試験でも圧縮強度に関連した値を評価しているものと考えられる。

4. 結言 省略

参考文献

- 1) D.J. Johnson, Carbon Fibers Filaments and Composite, Kluwer Academic Publishers, 119 (1990).
- 2) S.R. Allen, J. Mater. Sci., 22, 853 (1987).

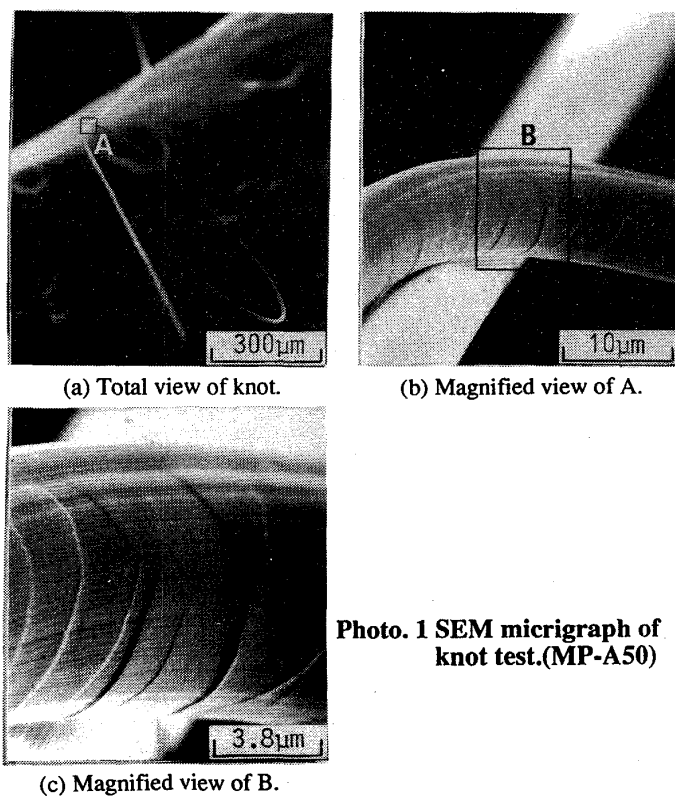


Photo. 1 SEM micrograph of knot test.(MP-A50)