424 繊維方向に直径変化を伴う炭素繊維の機械的性質の推定，第一報：引張強度

立命大　正　田中道七　　大産大　正　中山英明
明石高専　正　境田彰芳　　立命大[院]　学　○堀川教世

1. 緒言

炭素繊維は比強度，比弾性に優れた材料であり，軽量構造材の強化材として盛んに実用化が進められている．しかしながら，炭素繊維単体としての研究はまだ少なく，繊維長さ方向や繊維直径方向の寸法効果を考慮した引張強度の検討は十分には行われていない．このため，本研究では炭素繊維単体の引張試験を行い，他の研究報告[1]と同様に有効体積の考えにより引張強度の整理を試みたが，ゲージ長さが長くなるとこの考えでは十分に整理できないことが分かった．一方で，本実験で用いた炭素繊維の繊維長さ方向に沿う直径変化を調べた結果，それは予想以上に大きいことが分かった．引張強度を評価した他の研究報告ではこの点について厳密さを欠く場合が多いことから，本研究では直径の違いによる寸法効果と繊維長さ方向の直径変化の両因子を考慮した炭素繊維の引張強度分布の推定式を誘導し，これを用いて長さ 2～100mm の単一炭素繊維について統一的にあてはめ得る引張強度の分布特性を導いた．

2. 実験方法

実験に用いた材料はフィラメント数 6000 本の繊維束の連続長繊維から取り出したピッチ系炭素繊維であり，ゲージ間の両端と中央の 3 点の直径を測定した後，JISR7601 に準じてゲージ長さ 2～100mm の範囲で引張試験を行った．また，長さ 100mm の炭素繊維を繊維束より任意に一本取り出し，繊維長さ方向に対して 0.1mm の間隔で直径を測定した．

3. 実験結果および考察

3.1 有効体積を考慮した炭素繊維の引張強度のワイブル解析と引張強度のゲージ長さ依存性　図 1 は各ゲージ長さにおいて引張強度に及ぼす繊維直径の寸法効果の分離を行った後，ワイブル解析を行い，尺度母数 σ_b とゲージ長さ l を両対数紙上にプロットしたものである．図中の直線は回帰線を示しており，プロットに付した数字は各ゲージ長さにおける形状母数 a を示している．有効体積を考慮した整理があてはまる場合には，図の直線の勾配は各ゲージ長さにおける形状母数 a の逆数(1/a)と等しくなる．実際に，他の研究報告ではこの関係が成り立つことが報告されているが[1]，本実験結果についてみると，図中に示す直線の勾配から求まる形状母数 a は 10.9 となり，プロットに付した形状母数 a の値の範囲からかなりはずれている．このことは本実験で用いたように，ゲージ長さ l が 2mm から 100mm と広範囲にわたるような場合には単純な有効体積の考え方では十分に繊維強度を整理できないことを示している．

3.2 単一炭素繊維中の繊維方向に沿う直径変化と各ゲージ長さにおける最小直径の分布　図 2 は一例として 0～20mm の範囲における繊維長さ方向に沿う直径変化を示したものである．図より単一の炭素繊維の繊維方向に沿った直径は一定ではなく，図中の範囲では最大直径と最小直径との差は約 2μm に達していることが分かる．また，断面積に換算すると最大直径部と最小直径部では 2 倍以上異なっている．このような場合では引張試験時における炭素繊維の破断はゲージ間の最小断面部において優先的に生じると考えられるため，引張強度を求める際の直径はゲージ間の最小直径を用いるのが望ましいが，本実験においては実際に引張試験を行った個々の炭素繊維についてゲージ間の最小直径の測定を行っていないため，本節では，まず，図 2 の直径変化に関する測定結果を用いて，ゲージ長さを決めたときの 3 点の直径の最小値 d_3 とそのゲージ長さ間の最小直径 d_0 の間の関係を統計的に求めた．具体的には，図 2 の横軸（実際は 0～100mm）をゲージ長さに区分し，その間の両端部と中央部の 3 点の最小直径 d_3 と同ゲージ間の最小直径 d_0 の値を逐次読みとった．図 3 は一例としてゲージ長さ 2mm の場合の測定結果を示したもので，図中の横軸はゲージ間の両端部と中央部の 3 点の直径の最小値 d_3 であり，縦軸は同ゲージ間の最小直径 d_0 である．さて，ここでは解析を簡便に行うために，図中の回帰線 R を長軸として，d_3 と d_0 は楕円状に 2 次元正規分布をなすと仮定し，その分布形を誘導する．この場合 R 軸は水平に対して θ の傾きを持つため，d_3 と d_0 は統計的に独立ではない．そこで，まず，図中に示す分布の中心 C を通る R 軸と，それに直交する R′ 軸をとり，それぞれの軸に沿う変数 D_3，D_0 の周辺分布を求めた．こうして求めた D_3，D_0 の分布を $f_{D3}(D_3)$，$f_{D0}(D_0)$ とすると，これらは独立と考えてよいから，D_3 と D_0 の 2 元分布 $f_1(D_3, D_0)$ は $f_1(D_3, D_0)=f_{D3}(D_3)f_{D0}(D_0)$ で与えられる．ここで，$f_{D3}(D_3)$，$f_{D0}(D_0)$ は正規分布をなすとし，その標準偏差をそれぞれ S_3，S_0 とすると，2 元分布 $f_1(D_3, D_0)$ が求まり，もとの d_3 と d_0 の 2 元分布 $f(d_3, d_0)$ は D_3，D_0 と d_3，d_0 の変数変換により次式で表される．

$$f(d_3, d_0)=\frac{\sqrt{m_3 m_0}}{2\pi}\exp\left\langle -\frac{1}{2}\left[m_3\left\{\left(d_3-\overline{d_3}\right)\cos\theta+\left(d_0-\overline{d_0}\right)\sin\theta\right\}^2 + m_0\left\{-\left(d_3-\overline{d_3}\right)\sin\theta+\left(d_0-\overline{d_0}\right)\cos\theta\right\}^2\right]\right\rangle \quad (1)$$

但し，$m_3=1/S_3^2$，$m_0=1/S_0^2$

3·3 繊維直径方向の寸法効果を考慮した単一炭素繊維の引張強度分布の誘導　前節でも述べたが，実験で使用した炭素繊維は，繊維方向に沿う直径変化が無視できないほど大きいことから，引張強度を求める際の繊維直径はゲージ間の最小断面部における直径を基準として採用し，本実験で得られたゲージ間の3点の直径の最小値 d_3 より得た引張強度 σ_3 の分布から，ゲージ間の最小断面部の直径 d_0 を繊維直径とした引張強度 σ_0 の分布を推定する．図4は一例として，ゲージ長さ2mmの引張試験で得られた引張強度 σ_3 と繊維直径 d_3 の関係を示したものである．図より，引張強度 σ_3 は回帰線 R_1 で示されるように，直径が小さくなるに従い大きくなっており，実験点はほぼ P_i=5，95%の2つの直線で挟まれた範囲内に帯状に分布していることが分かる．このことから σ_3 は回帰線の上下に直径 d_3 に無関係に等しい標準偏差で正規分布をなすと仮定し，その分布形を次のように求めた．

$$f_{\sigma 3}(\sigma_3) = \sqrt{\frac{m_{\sigma 3}}{2\pi}} \exp\left[-\frac{m_{\sigma 3}}{2}\{\sigma_3 - C_\sigma - a_3(d_3 - C_d)\}^2\right] \quad (2)$$

しかし，これはゲージ間の両端部と中央部の3点の直径の最小値を繊維直径 d_3 とした場合の式であり，実際のゲージ間における最小直径を繊維直径 d_0 としたものではない．そこで，次にゲージ間の最小直径部での引張強度 σ_0 の分布を表す式を導く．まず，ゲージ間の最小直径 d_0 より求めた引張強度 σ_0 と同ゲージ間の両端部と中央部の3点の直径の最小値 d_3 から求めた引張強度 σ_3 との間には $\sigma_3=\sigma_0(d_0/d_3)^2$ の関係があることから，引張強度 σ_0 と σ_3 のなす分布をそれぞれ $f_{\sigma 0}(\sigma_0)$，$f_{\sigma 3}(\sigma_3)$ とすると，$f_{\sigma 0}(\sigma_0)= f_{\sigma 3}(\sigma_3)(d_0/d_3)^2$ の関係があるため，式(2)を用いて $f_{\sigma 0}(\sigma_0)$ は次のように表すことができる．

$$f_{\sigma 0}(\sigma_0) \equiv f_{\sigma 0}(\sigma_0; d_3, d_0) = \sqrt{\frac{m_{\sigma 3}}{2\pi}}\left(\frac{d_0}{d_3}\right)^2 \exp\left\langle -\frac{m_{\sigma 3}}{2}\left(\frac{d_0}{d_3}\right)^4 \times\left[\sigma_0 - \left(\frac{d_3}{d_0}\right)^2\{C_\sigma + a_3(d_3 - C_d)\}\right]^2\right\rangle \quad (3)$$

式中にはゲージ間において測定された両端と中央の直径の3点の最小直径 d_3 と同ゲージ間における最小直径 d_0 の両変数が含まれているが，d_3 と d_0 の2元分布は式(1)で与えられているから，これを用いて引張強度 σ_0 のみの分布は次式で求めることができる．

$$f(\sigma_0) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f_{\sigma 0}(\sigma_0; d_3, d_0) f(d_3, d_0)\,\delta d_3\, \delta d_0 \quad (4)$$

3·4 最小直径部における引張強度分布　図5は式(4)を数値積分して得られた引張強度 σ_0 の分布を正規確率紙上に示したものである．図中の各点は各累積確率に対する σ_0 の数値計算結果である．図より，上のようにして導かれた σ_0 の分布は，ゲージ長に関係なくほぼ同一の分布を与え，図中の直線で示すように，一つの正規分布で表されることが分かる．

4. 結言　(省略)

参考文献

1) 田川哲哉，谷口正典，宮田隆司：材料，42, 955 (1993).

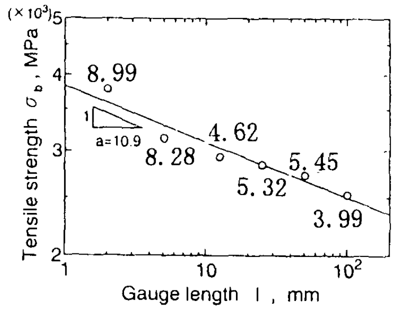

Fig.1 Tensile strength (scale parameter σ_b) versus gauge length.

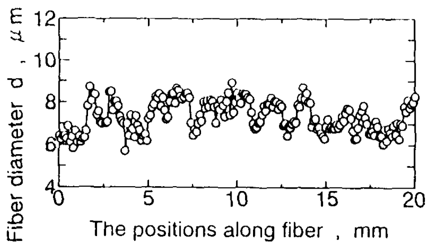

Fig.2 Variation of the diameter along longitudinal direction on a single carbon fiber.

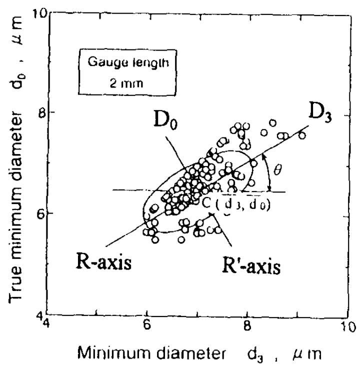

Fig.3 Correlations between the minimum diameter d_0 within the gauge length and the minimum value d_3 of three measured diameters along the gauge length.

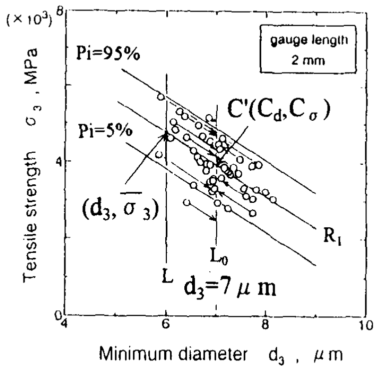

Fig.4 Influence of diameter d_3 on the fiber strength σ_3

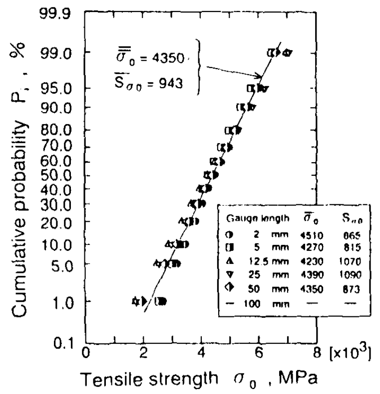

Fig.5 Distributions of the tensile strength σ_0 calculated by Eqs.(3) and (4) for each gauge length.