

ディビジョン番号	13
ディビジョン名	高分子

大項目	3. 高分子の機能
中項目	3-6. 高強度・高弾性率
小項目	3-6-1. 高強度

概要（200字以内）

高分子の高強度化の研究は、理想の1次元繊維構造を実現する問題として定式化されている。屈曲柔軟鎖と剛直鎖では、それぞれ独自の紡糸・延伸の工業技術が開発されたが、半剛直鎖に対しては戦略的な取り組みが進行中である。最前線では、カーボンナノチューブを始めとする高強度ナノファイバーの時代が幕を開けた。5年後の半剛直性高分子繊維に対するナノレベルでの高強度化工業技術の実現、10年後の3次元高強度繊維およびCNT 複合材料の研究に期待したい。

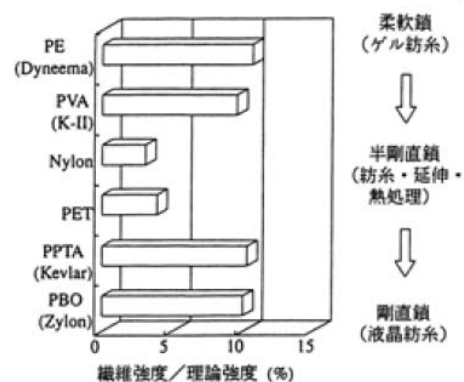


図1 高強度繊維（市販）の強度¹⁾

現状と最前線

1. 現状 — 理想の1次元繊維構造の工業生産化 —

図2に理想の繊維構造を示した。図中の1本の実線は、結晶中と同じコンホメーションを有する高分子の伸びきり鎖を表象している。したがって、繊維の強さと弾性率の理論値は、高分子の結晶強度および結晶弾性率であり、有機材料一般で実現可能な引張強度 σ_0 と引張弾性率 E の極限值を与える。すなわち、カーボンナノチューブ(CNT)の登場以前は、炭素・炭素共有結合を最も有効に用いた材料であるダイヤモンドあるいはグラファイトから見積もられる最大値 $\sigma_{bmax} \sim 100\text{GPa}$ と $E_{max} \sim 1200\text{GPa}$ である。



図2 理想の繊維構造

1・1 屈曲性高分子：屈曲性の超高分子量ポリエチレン(PE)に対して、ゲル紡糸・超延伸法が開発され、繊維引張強度 $T \sim 3\text{GPa}$ が実現した。現在は、乾式紡糸により生産性がさらに向上している。

1・2 剛直性高分子：1970年代初頭のケブラー繊維に始まる溶液液晶高分子では、液晶紡糸法により、ポリ-p-フェニレンテレフタルアミド(PPTA)において、 $T \sim 3.5\text{GPa}$ が達成された。剛直鎖高分子では、さらに、ベンゼン環よりも強い複素芳香環が導入され、ポリ-p-フェニレンベンゾビスオキサゾール(PBO)繊維が $T \sim 5.8\text{GPa}$ を達成し、市販の高強度・高弾性率繊維と

して初めてスチールを超えた。非液晶高分子では、等方性溶液から湿式紡糸した凝固糸を、高温・高延伸して高強度化させた繊維も市販されている（テクノーラ）。また、熔融液晶性を示す全芳香族共重合高分子を、熔融紡糸して高強度化する方法も工業化された（ベクトラン）。

1・3 半剛直性高分子：図1 から分かるように、ポリエステルやナイロンなどの汎用高分子からなる繊維の実用的な高強度技術の開発が、大きく立ち遅れている。ポリエチレンテレフタレート (PET) の理論強度は約24GPa であり、高強度化できる可能性は十分ある。しかし、PET の高強度タイプの市販繊維の強度は、理論強度の5%未満の1GPa 程度である。現在、2GPa の強度を有する繊維を、現行の生産コストの2 倍以下で製造する技術開発に対する戦略的な取り組みが行われている¹⁾。

1・4 炭素繊維：最強の炭素・炭素共有結合の一つであるグラファイト構造を利用した独自の炭素繊維法により、 $T_{max} \sim 7\text{GPa}$ (PAN 系) が達成されている。ただし、 $Y_{max} \sim 950\text{GPa}$ (ピッチ系) と共に、その性能の向上は頭打ちの感がある。

2. 最前線 — ナノファイバーテクノロジー²⁾ —

直径が約0.7nm 長さが約1 μm のCNT は、今もっとも注目されているナノファイバーである。分子が高度に配列しているCNT は、理論弾性率は数千GPa と予測され、測定値も引張強度は数十GPa でヤング率は270~950GPa と報告されている。この測定では、原子間力顕微鏡の二つの探針で固定したCNTの引張試験を走査型電子顕微鏡内で行うという、典型的なナノテクノロジーが駆使されている。

ナノファイバーテクノロジーでは、レーザー照射によるゾーン延伸・熱処理で得られたPET の超極細繊維で、 $Y \sim 1.6\text{GPa}$ が報告されている。他に、エレクトロスピンング、エレクトロスプレーデポジションなどの新しいナノ技術も開発されている。

また、繊維状のメソポーラスシリカのナノ空間を高分子合成の反応および高次構造の制御に利用する芸術的な手法により、伸びきり鎖の多いPE ナノファイバーが見出された。「PE 完全伸びきり鎖結晶」からなる高強度繊維が期待される。

参考文献：1) 鞠谷雄士、「高強度繊維の開発」(機能材料、23, 5, 2003)。2) 谷岡明彦、「ナノファイバー」(高分子、55、125、2006)

将来予測と方向性

・5年後までに解決・実現が望まれる課題：半剛直鎖汎用高分子の工業的高強度化を実現するために、ナノレベルで、① 熔融構造を制御し、② 繊維構造形成過程を解析し、③ 計算科学により評価する。また、高品質のCNT を安価に製造する技術の確立も期待される。

・10年後までに解決・実現が望まれる課題：まず、「ソフトダイヤモンド」状の高強度3次元架橋高分子の合成である。また、高強度CNT 複合材料の実現に向けて、CNT の表面処理や母材樹脂の研究の進展を期待したい。

キーワード

ゲル紡糸・超延伸法、液晶紡糸法、炭素繊維法、カーボンナノチューブ、ナノファイバー

(執筆者：古知 政勝)