

# 高分子ナノファイバー1本の力学特性評価 に関する研究

首都大学東京 田中 学

## 1. 研究背景・目的

ナノファイバーとは直径がナノオーダーの繊維状物質であり、従来のバルク材料には見られない特異な性質を有することが知られている。例えば、電界紡糸(エレクトロスピンニング)法により得られる高分子ナノファイバーは、その作製時に延伸効果により高分子鎖がファイバー軸方向に配向する現象が知られており、力学強度が飛躍的に向上することが予想されている。これまでもナノファイバーマット(不織布)あるいはナノファイバーヤーン(紡績糸)では力学強度が評価されているが、それらナノファイバー集合体ではナノファイバー同士の絡まり合いやナノファイバー間の相互作用が評価結果に大きな影響を与え、材料本来の物性を評価することは困難であった。そのため、高分子ナノファイバーの新しい基本物性評価技術の一つとしてナノファイバー単体の力学特性評価が強く望まれるが、ナノファイバー1本を取り扱うことは容易ではなく、これまで高分子ナノファイバー1本の力学特性はほとんど明らかにされていない。

本研究では、ナノファイバーを一軸方向に配列させる技術および単繊維評価装置の改良により、高分子ナノファイバー1本の力学特性を評価することを目的とした。さらに、高分子の種類やナノファイバー形状、作製条件などが異なる一連の高分子ナノファイバーをエレクトロスピンニング法により作製し、それらの要素がナノファイバー1本の力学特性に与える影響についても検証した。

## 2. 実験

高分子ナノファイバーは、(株)フェューエンス製エレクトロスピンニング装置 ES-1000 あるいは ES-2000S を用いて作製した。ナノファイバー1本の引張試験には、(株)レスカ社製のファイバー力学強度評価試験機 NFR-1000 に一部改良を加えて用いた。引張試験後のナノファイバーの破断面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し断面積を算出する手法を導入し、ナノファイバー1本の弾性率や最大応力を算出した。モデル高分子として優れたファイバー形成能を有する含フッ素ポリイミドを使用したほか、類似繰り返し構造が主鎖および側鎖に存在するグラフト型ポリイミドを合成し、同様に配列ナノファイバーを作製、ナノファイバー1本の力学特性を評価した。ナノファイバー内部の高分子鎖配向性は、偏光全反射赤外吸収(偏光 ATR-FT-IR)測定により検証した。

### 3. 結果および考察

ファイバー形成能に優れる含フッ素ポリイミドおよび類似繰り返し単位を有するグラフト型ポリイミドをそれぞれ合成した(図 1)。力学特性評価に用いる一軸配列高分子ナノファイバーは、独自に作成したコレクター電極を用いてエレクトロスピンニング法により作製した(図 2)。

ナノファイバー1本の力学特性評価より、モデル高分子ナノファイバーのヤング率(弾性率)、最大応力はそれぞれ 3.1 GPa、181 MPa を示し、同一高分子からなる通常の膜形態のヤング率、最大応力よりそれぞれ 3 倍程度高い値を示すことが明らかとなった(表 1)。偏光 ATR-FT-IR 測定より、ナノファイバー内部の高分子鎖の配向が力学特性向上に寄与していることが示唆された。さらに、種々のファイバー径で検証した結果、400 nm 程度を境にナノファイバー径の減少に伴い力学特性が飛躍的に向上することが明らかとなった。一方、グラフト型ポリイミドでは、480 nm 程度の直径においても、膜より顕著に高い力学特性を示した。グラフト型ポリイミドでは、ナノファイバー形成時に主鎖に加え側鎖も延伸することによる影響が考えられる。

上記に加え、他の高分子でも同様の力学特性評価を行い、評価手法の汎用性を確認した。さらに、ナノファイバー作製条件が力学特性に与える影響についても検証した。

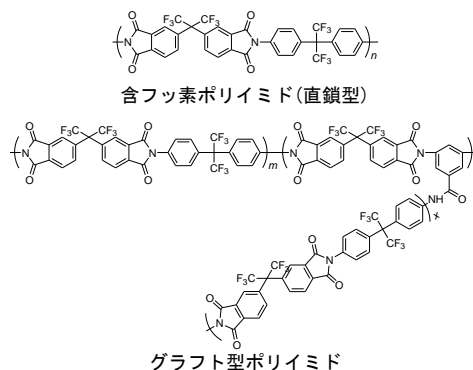


図 1. 直鎖型およびグラフト型ポリイミドの化学構造

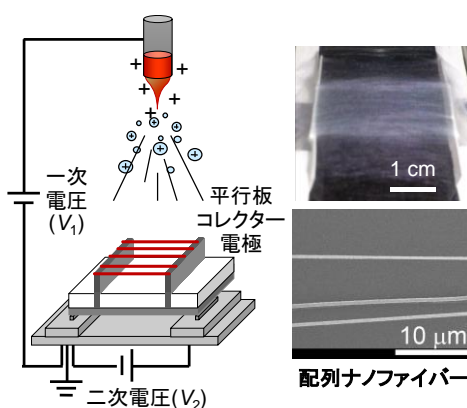


図 2. エレクトロスピンニングの模式図およびモデル高分子からなる配列ナノファイバーの写真、SEM 像(一例)

表 1. 各種高分子ナノファイバーの力学特性

試料	直径 (nm)	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)
直鎖型ポリイミド膜	-	1.0	68
直鎖型ポリイミドナノファイバー	326	3.1	181
	477	1.0	127
グラフト型ポリイミド膜	-	1.7	113
グラフト型ナノファイバー	483	2.9	176

### 4. 結論・今後の課題

ナノファイバー1本の力学特性を評価する方法として、本研究手法の有用性が示された。今後は、各種分析手法と組み合わせた検証に加え、本手法のより多くの高分子ナノファイバーへの適用と、測定方法の改良や測定精度のさらなる改善が必要である。