

# イノベ 見て歩き

連載：第5回

## 融かして伸ばしてポリマーを繊維に 環境負荷・コスト低く高強度実現

攪上 将規

Kakiage Masaki

群馬大学 大学院理工学府 分子科学部門 助教

2020年～23年 A-STEP 研究責任者

社会実装につながる研究開発現場を紹介するイノベ見て歩き。第5回は、超高分子量ポリマーを原料に「熔融紡糸」と「熔融延伸」の2つの技術を組み合わせ、環境低負荷かつ低コストな手法で高強度繊維を作製した群馬大学大学院理工学府分子科学部門の攪上将規助教を訪ねた。

### 織都・桐生で高分子材料研究 脱「ゲル紡糸法」の確立へ始動

「西の西陣、東の桐生」と伝えられるように、奈良時代から絹織物の産地として栄えた群馬県桐生市。歴史と伝統に育まれた「織都」で、群馬大学大学院理工学府分子科学部門の攪上将規助教は生まれ、学生時代から高分子材料の研究に取り組んできた。「当時も今と同じ研究室で高分子変形過程の構造形成メカニズムについて研究していました。2015年に信州大学先鋭領域融合研究群国際ファイバー工学研究所に移り、そこから繊維の研究を本格的に始めました」。

攪上さんの現在の研究テーマは、高強度繊維の1つである超高分子量

ポリエチレン(UHMW-PE)繊維の作製だ。通常のポリエチレンは、分子量が数万～数十万であるのに対し、UHMW-PEは分子量が100万以上で、分子鎖が非常に長い。繊維の強度を高めるには、その分子鎖を一方方向に規則的に並べ、より長くする必要がある。分子鎖が長いほど繊維内の切れ目が減り、高強度になる(図1)。

しかし、細く長い高分子鎖は、互いに絡み合ってしまう。これをほどこ一般的には、デカリンやキシレン、パラフィンなどの有機溶媒に溶かし、ほどいて並べる「ゲル紡糸法」だが、この従来手法は材料となるポリマーの重量に対し、10～100倍の有機溶媒を使うため、環境負荷が大きい。加えて、複雑な工程で大規模な設備も必要なので、多くの製造コストがかかっていた。

「環境面だけでなく、生産者にも消費者にも負担となるこの作製方法を変えることができれば、製品の低価格化にもつながります。繊維の街で生まれ育ち、

学んだ身としても、研究を通じて地場産業を盛り上げたいと思っていました」と攪上さんは研究の経緯を語る。20年にはJSTのA-STEP「革新的グリーンプロセッシングによる高強度・機能性繊維作製システムの確立」の採択を受け、プロジェクトがスタートした。

### 超高分子量ポリエチレン 「熔融プロセス」で繊維化

有機溶媒を使わずに高強度繊維を作製するため、攪上さんは「熔融紡糸」と「熔融延伸」の2つの技術を組み合わせた「熔融プロセス」という方法を提案した。熔融紡糸は、高分子材料を加熱して溶かし、紡糸口金から空気・窒素などの不活性冷却媒体中へ押し出し、冷却固化させて繊維にする紡糸法だ。主にナイロンなどの繊維化に用いられているが、UHMW-PEへ適用するのは困難だった。UHMW-PEは分子鎖の長さゆえに熔融粘度が高く、従来の熔融紡糸では繊維化が困難である上に、絡まりを完全にほどこくことができないからだ。

UHMW-PEを熔融しても分子鎖が絡まったまま流動せず、熔融紡糸繊維はでこぼことした見た目になってしまう。すると細い箇所が切れ目になりやすくなる。また、絡まりがほ

図1 繊維の高強度化に必要な要素技術

繊維中の分子鎖を一方方向に規則的に並べる  
(高配向化・高結晶化)

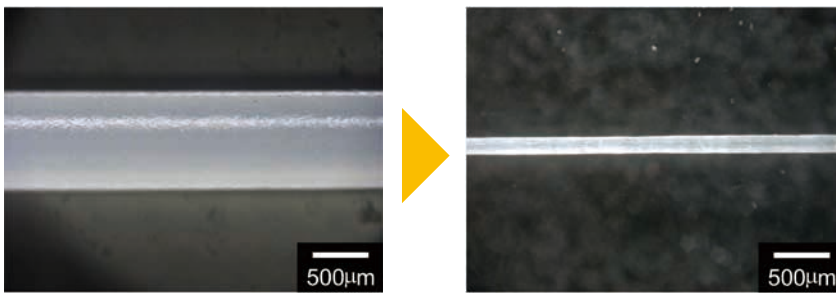


分子鎖の長さを長くする(超高分子量)



繊維の高強度化のためには、繊維中の分子鎖を一方方向へ規則的に並べる必要がある。また、分子鎖が長ければ長いほど繊維内の切れ目が減り、高強度になる。

図2 熔融プロセスによるUHMW-PE繊維の作製



熔融流動特性を制御した「熔融紡糸」(左)と、熔融状態で分子鎖の絡み合いを解きほぐしながら引き延ばす「熔融延伸」により、高強度かつ細いUHMW-PE繊維作製を実現した(右)。

どげなければ分子鎖がきれいに並ばず、強度も上がらない。「熔融紡糸でどのようにUHMW-PEを繊維状にするか、いかに分子鎖の絡まりをほどき、強度を増していくかが大きな課題でした」と撈上さんは振り返る。

カギとなったのが熔融延伸だ。これは分子鎖の絡み合いを解きほぐしながら引き延ばす手法で、高分子フィルムの延伸に用いられている。「熔融紡糸だけで分子鎖をきれいに並べることは非常に困難です。高分子材料の熔融延伸過程のインプロセス構造解析をした経験から、組み合わせるならば熔融延伸しかないと思いました」。学生時代から熔融延伸を扱っていた撈上さんにとっては、自然に浮かんだ解決策だったという。

研究ではまず、UHMW-PE向けの熔融紡糸法の確立に取り組んだ。熔融には材料の融点以上の温度が求められるが、高温にしすぎると分子鎖が切断してしまう。また、ゲル紡糸法が定着していたため、参考になる熔融紡糸の事例はほとんどなかった。「繊維化の適正温度を見つけるために、ひたすらトライ＆エラーを繰り返しました」と撈上さんは語る。度重なる実験を経て、UHMW-PEの熔融流動特性を制御すること

で、延伸可能なUHMW-PE繊維を作る熔融紡糸法を開発した(図2左)。

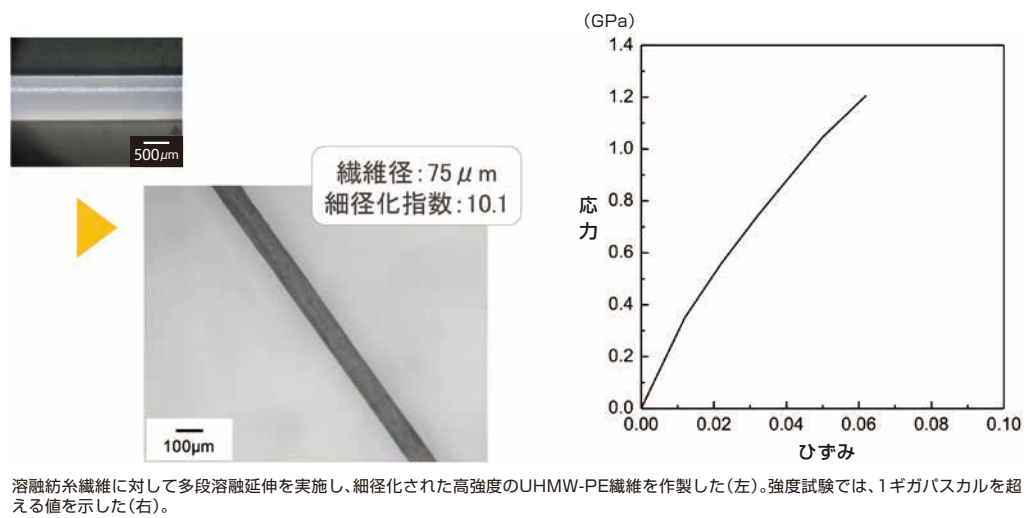
さらに、UHMW-PEを熔融させると分子鎖の絡み合いが多く発生する点に着目し、応力の伝達点として利用することで、より高強度化する熔融延伸法を考えた。「これを実証するためには、なぜ強い繊維ができるのかという科学的な根拠が不可欠です。高分子フィルムの作製で行っていた延伸過程のインプロセス計測などを活用しながら、繊維の高強度化に適した条件を見いだしていきました」。熔融紡糸と熔融延伸を組み合わせた結果、有機溶媒を一切使用せず、繊維径が約150マイクロ(100万分の1)メートルで、1ギガ(10億)パスカル超の破断強度を持つUHMW-PE熔融紡糸繊維の作製に成功した(図2右)。

## 細径化で衣料など応用期待 研究通じ地元産業を元気に

撈上さんは、UHMW-PE繊維のさらなる細径化にも取り組んでいる。やみくもに繊維を延伸しても、途中で切れてしまったり、強度が落ちたりしてしまう。そこで、繊維を細くする、強くするという目的ごとに延伸の段階を分けた「多段熔融延伸」を実施した(図3)。「分子鎖をほどいて細くする延伸と、繊維を引っ張って強くする延伸ごとに条件を最適化することで、繊維の細さと強度を実現しました」。将来的には、高強度と柔軟性を兼ね備えた衣料・アウトドア用品や、耐摩耗性に優れた安全用品・遊具、衛生面に優れた医療品などへの応用が見込まれるという。

A-STEPでは、撈上さんの繊維研究の出発点となった信州大学と、群馬県繊維工業試験場との共同研究体制を築いた。「開発した熔融プロセスは大規模な工場や設備のない中小企業でも参入しやすく、少量生産や繊維製品の付加価値化が見込めます。自分の研究で地元の産業が元気になるれば、うれしいですね」と撈上さんは展望を語る。さらなる産学連携や共同研究を通して、繊維の機能性向上や工業化に向けた取り組みも検討しており、今後の展開が注目される。(TEXT:横井まなみ、PHOTO:石原秀樹)

図3 多段熔融延伸による細径化



熔融紡糸繊維に対して多段熔融延伸を実施し、細径化された高強度のUHMW-PE繊維を作製した(左)。強度試験では、1ギガパスカルを超える値を示した(右)。