

## エレクトロスピンニング法による ナノファイバー膜の高速形成技術

### 紡糸過程の理論解析により、ナノ ファイバー膜の高速形成を実現

エレクトロスピンニング法は、高分子溶液に高電圧を印加し、その電界によって高分子溶液を引き出して紡糸する技術です。これを用いてナノファイバー膜を形成すると、材料そのものが持つ特性を生かしたまま、ナノファイバー膜の構造物としての特徴も付与できるため、各種フィルターや細胞培養基材など多くの分野で、応用が期待できます<sup>(1)</sup>。

今回、東芝は、エレクトロスピンニング法によるナノファイバー膜形成過程の直接観察と理論解析から、紡糸条件や溶液物性が形成過程に与える影響を明らかにし、ナノファイバー膜の高速形成を実現しました。

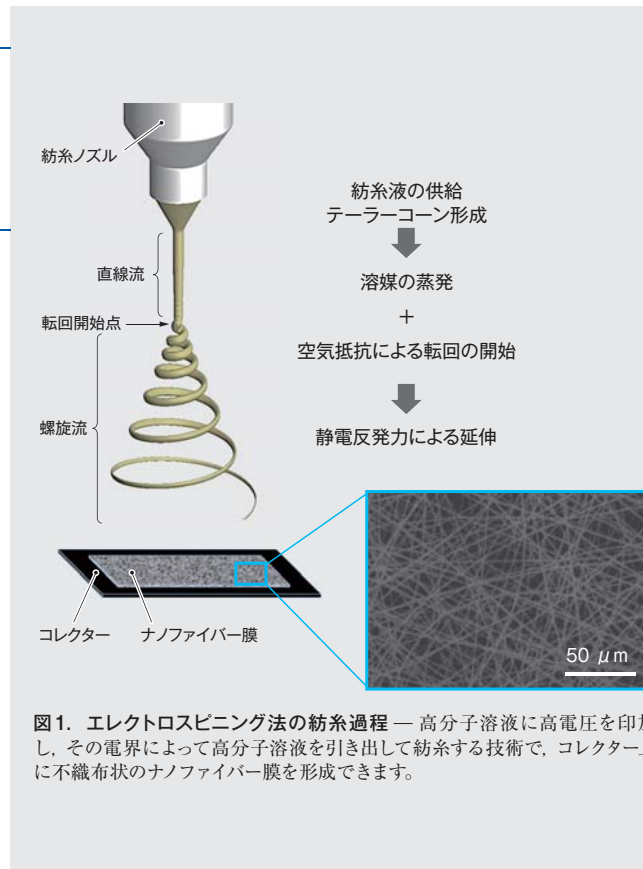


図1. エレクトロスピンニング法の紡糸過程 — 高分子溶液に高電圧を印加し、その電界によって高分子溶液を引き出して紡糸する技術で、コレクター上に不織布状のナノファイバー膜を形成できます。

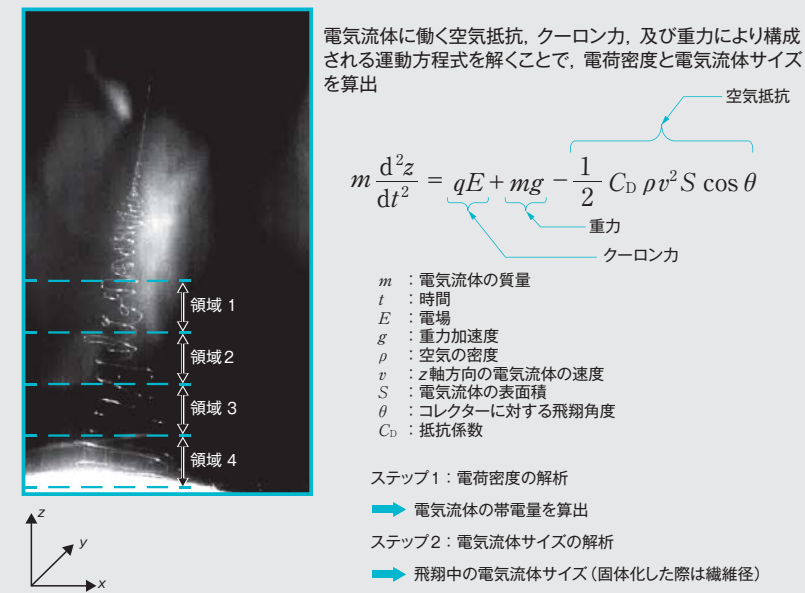


図2. 帯電量と電気流体サイズの解析方法 — ハイスピードカメラを用いてエレクトロスピンニング法における電気流体飛翔過程の動画撮影を行いました。そして、観察結果と静電場解析、更には電気流体の運動方程式を解くことで、飛翔中の電気流体の速度とサイズを定量化しました。

### エレクトロスピンニング法の 原理と特徴

ナノファイバー膜は、フィルター(気体、液体、及び粉塵(ふんじん))や、細胞培養基材、バイオセンサーなどへの応用が期待されており、多くの分野で研究開発が進められています<sup>(1)</sup>。

エレクトロスピンニング法は、数あるナノファイバー膜形成技術の中でも、材料選択の自由度が大きい技術です。図1に示すように、紡糸液である高分子溶液の入った紡糸ノズルに高電圧(10～40 kV)を印加することで、帯電した高分子溶液(電気流体)を引き出して紡糸できます。空気抵抗により電気流体にゆらぎが生じて螺旋(らせん)流となり、分子鎖の絡み合いによる繊維化と、静電反発力による繊維径のナノサイズ化が同時に起こることで、コレクター上に直径50～1,000 nmのナノファイバー

による膜が形成されます。

このエレクトロスピンニング法によるナノファイバー膜形成技術は、材料が持つ潜在的な特性を引き出せる可能性を秘めています。溶液又は分散液にできる材料であれば、常温大気圧の条件下でナノファイバー膜を形成でき、タンパク質やDNA(デオキシリボ核酸)など生体高分子の生理活性を維持した状態でのナノファイバー膜化も可能です。エレクトロスピンニング法を用いることで、材料そのものの特性(耐熱性や、耐圧縮性、絶縁性、生体適合性など)を生かしたまま、ナノファイバー膜の構造物としての特徴(薄膜化や、高空率率化、高比表面積化など)も付与できます。

コレクターと紡糸ノズル間に発生する電界により電気流体を引き出すため、電圧の印加方法やノズル位置の調整によって、複雑な形状の構造体の表面を覆うようにナノファイバー膜を形成でき

ることが、大きな特徴の一つです。

### ナノファイバー膜形成技術の課題

これまでのエレクトロスピンニング法を用いたナノファイバー及びナノファイバー膜形成に関する研究は、多くが印加電圧やノズル-コレクター間距離などのプロセスパラメーター、及び紡糸液物性に対して、コレクター上に捕集されたナノファイバーの繊維径を論じたものでした。実際にナノファイバー膜の高速形成を実現し、平均繊維径だけでなく繊維径分布も含めた高精度な繊維径の制御を実現するには、エレクトロスピンニング法における繊維形成プロセスの理解が不可欠です。

### ナノファイバー膜形成過程の解析

エレクトロスピンニングの過程は、ノズル内での帯電などの過程、電気流体の飛翔(ひしゅう)過程、及びコレクター

による捕集過程の三つに大別されます。

今回、エレクトロスピンニング法における繊維形成プロセスを理解するため、これまで詳細な解析が行われていなかった飛翔過程の螺旋流部分の挙動に焦点を当てました。ハイスピードカメラを用いて電気流体の動画撮影を行い、その観察結果と静電場解析に基づいて、飛翔中の電気流体の速度とサイズの定量化を検討しました。

図2に示すように、紡糸線の螺旋流部分を四つの領域に分割し、電気流体のz軸方向の速度とコレクターに対する飛翔角度を評価しました。また有限要素法を用いた静電場解析を行い、帯電量 $q$ が一定の条件下で電気流体の運動方程式を解くことで、飛翔中の電気流体のサイズを求めました。解析から得られた電気流体サイズは実測値とよく一致し、更に分割した領域間で物質収支が成り立つことも併せて確認し、

解析モデルの妥当性を裏付ける結果を得ました。

この解析モデルを用いて、プロセス因子であるエレクトロスピンニング時の印加電圧と紡糸液の導電率が、螺旋流部分の電気流体の速度、サイズ、及び帯電量に与える影響を定量化しました。

### 量産技術への展開

高速化を左右する因子のうち、螺旋流部分の繊維形成挙動に影響を及ぼすものとして、紡糸ノズル数とノズルへの紡糸液供給速度の二つが挙げられます。

実際の量産プロセスではマルチノズル化が必要になる一方で、ノズル数が増えるほど電場干渉が生じて電位分布が乱れ、螺旋流部分の転回挙動の予測が難しくなります。またノズルへの紡糸液供給速度の増加に伴って、帯電速度に対して紡糸液供給が過多になると、安定したナノファイバー膜形成が難しく

なります。

高速化の実現には、安定したファイバー膜形成が維持できる範囲内で最大の紡糸液供給速度を探索することが必要になります。

今回、多くのプロセスパラメーターについて、飛翔中の電気流体の速度、サイズ、及び帯電量との関係を定量化したことで、市販の小型装置に比べて50～100倍の高速化を実現しました。

### 今後の展望

電場干渉、及びノズル内での紡糸液供給速度と帯電速度のバランスは、飽くまで高速化の因子の一つです。将来的には、微視的なレベルでの電気流体の帯電分布を含む紡糸線挙動解析モデルの確立が必要です。今後、エレクトロスピンニングプロセスにおける紡糸線挙動の全体像を定量的に予測できるモデルの構築を目指します。

### 謝辞

この開発において、貴重なご意見を頂いた東京工業大学 物質理工学院 松本英俊 准教授に深く感謝の意を表します。

### 文献

- (1) 松本英俊, ほか. ナノファイバー技術開発の現状と今後の展望. 成形加工. 2012, 24, 3, p.121-126.

### 植松 育生

生産調達統括部 生産技術センター  
 薄膜プロセス技術研究部  
 博士(工学)