衣料分野の高機能合成繊維

鈴木 東 義*

1. はじめに

ポリエチレンテレフタレート（PET）を主とするポリエステル繊維は、2004年には世界の合成繊維生産量に占める割合が77%という圧倒的なシェアをもつに至っている。このポリエステル繊維を中心にして、合成繊維のこの10年間の世界動向を展望する時、次の3つの特徴を指摘することができる¹⁾。

- (1) 世界のポリエステル繊維における中国のシェアが約46%に達し、繊維強国「中国」の独り勝ちの構造が一段と鮮明になった。
- (2) 日本のポリエステルメーカーでは依然として優位性がある高付加価値差別化製品や産業用繊維への重点シフトが明らかになった。
- (3) ポリトリメチレンテレフタレート（PTT）繊維やポリ乳酸（PLA）繊維などの新素材開発とPETの原料リサイクルなどの環境・リサイクル問題への取組みが顕著に進展した。

日本にとって次の10年間は中国脅威論から脱却して中国との共生の立場へ転換し、先駆者としての強みである高機能化技術をベースに、ライフサイエンス・エコロジー・情報・新材料などの分野で先端的な技術や製品や市場を世界に向けて発信していくことが強く求められる。

本稿では衣料分野の高機能合成繊維を取上げてポリエステル繊維を中心にレビューする。

2. 高機能繊維の歴史

合成繊維の黎明期から現在に至る高機能化の系譜を表1に示す。合成繊維はその黎明期からシルキー合繊に代表される天然繊維模倣時代、ポリマー化学改質・製糸・後加工の複合化により合繊固有の感性を追及した新合繊時代を経て機能重視の現在に至っている。この表にあげた高機能繊維にはその一つひとつに研究開発者の夢と情熱とセレンディピティを含む開発ドラマと技術的ブレークスルーがあり、日本が依然として優位性をもつ高機能化技術の源泉となっている。

表1 合成繊維の黎明期から現在に至る高機能化の系譜

区分	特徴構造・技術
黎明期の合繊 (1958～)	・ イージーケア性 (W&W 性, 防シワ, 耐久性)
シルキー合繊 (1964～) [天然繊維の模倣]	・ 三角断面糸・アルカリ減量・異収縮混 織糸 ・ ハイカウント糸・Thick&Thin 糸・不 定形断面糸
新合繊 (1988～) [合繊固有の感性]	(1) ニューシルキー(絹を越えたふくらみ) (2) レーヨンドライ(ドライタッチハイ ドレープ) (3) ピーチフェース(桃の産毛タッチ) (4) ニュー梳毛(ウールとは異質のソフ トでドレープ)
新合繊の進化 (1993～) [感性+機能]	・ ニュー新合繊 (麻調, ニュー梳毛(仕立映え), 複合 新感性, フィブリアル) ・ 快適新合繊(吸汗速乾, 軽量保温, ストレッチ)

このような合成繊維の進化を主導するキーコンセプトは「ポリマー化学改質」と「合成繊維のかたち」であると筆者は考えている。以下にこれら二つのコンセプトに基づく視点に立ち、筆者の身近な開発事例を引用しながら高機能合成繊維について解説する。

3. ポリマー化学改質による高機能繊維²⁾

ポリマー化学改質による主要な高機能繊維についてその特性と技術内容をポリエステル繊維を例にして表2に示す。

ポリマー改質技術は共重合型とブレンド型(有機系改質剤、無機系改質剤)の2種類に分けられる。共重合型は改質モノマーがポリマー主鎖に直接結合するため、その機能が半永久的に持続する利点がある反面、結晶性が低下して融点や耐熱性が低下し、またモノマー設計の自由度に制約がある。

一方、ブレンド型は化学反応を必要としないため、改質剤の選択の幅は広いが、改質剤がポリマー主鎖に結合していないため、機能の耐久性が共重合型に比較して劣り、無機系改質剤の場合は紡糸フィルター詰りなどの工程通過性の低下、有機系改質剤の場合は重合・紡糸時の熱履歴による劣化が問題になる。

共重合型のポリマー化学改質の事例として高強力カチオ

* Suzuki, Togi
帝人ファイバー(株) 研究開発センター
新ポリマー研究開発 G
松山市北吉田町 77 (〒791-8530)
2005.3.28 受理

表2 ポリエステル繊維の主要なポリマー化学改質技術

分類	改質ポリエステル繊維	機能・感性	改質剤の具体例
共重	カチオン可染ポリエステル	カチオン染料による鮮明発色効果、分散染料染めのレギュラーポリエステルとの混用による異染効果
	常圧カチオン可染ポリエステル	100℃でカチオン染料染色可能、ウールなどの耐熱性が弱い繊維と混用	
	常圧分散可染ポリエステル	100℃で分散染料染色可能	$\text{HO}(\text{AO})_n\text{H}$ A; アルキレン基
重合	難燃ポリエステル	自己消火性と熔融滴下性促進効果（繊維が火源から除かれる）による難燃性
	高収縮ポリエステル	低収縮ポリエステルとの異収縮混織糸使いにより織編物にふくらみ（嵩高）付与、共重合により非晶性向上
ブレンディング	制電ポリエステル	静電気による衣服着脱時のパチパチやスカートの足へのまつわりつきを防ぐ	ポリアルキレングリコール系重合体+イオン性化合物
	微多孔ポリエステル	深色・鮮明微多孔繊維、吸水性微多孔中空断面繊維、多溝性ドライタッチ繊維	コロイダルシリカなどの無機微粒子
	高機能付与	高比重（ドレープ性）	R-SO ₃ Na R; 芳香族または長鎖脂肪族
		紫外線遮蔽	二酸化チタン
		太陽光蓄熱保温	炭化ジルコニウム
		抗菌	銀ゼオライト
		導電性	カーボンブラック

ン可染ポリエステル繊維がある。共重合型カチオン可染化剤としては従来 DuPont 社が発明したスルホイソフタル酸ナトリウム塩（表2）を凌ぐものはなかった。開発品は新規なカチオン可染化剤としてスルホイソフタル酸第4級ホスホニウム塩を採用することにより、DuPont 型では不可能であったポリマーの低熔融粘度化と高重合度化を可能にし、高強度かつ高発色性のカチオン可染極細繊維（1.0 dtex 以下）を初めて実現した。バルキーなホスホニウム塩の導入によって、ナトリウム塩特有のスルホネート基間の物理架橋が解かれ、ポリマー分子鎖間の相互作用が弱まって熔融時の増粘現象が減少する。図1に開発されたポリマーの分子量と熔融粘度の関係をレギュラー PET および従来のカチオン可染ポリエステルと比較して示す。また、図2に開発品のスポーツ素材としての機能性の到達レベルを示す。

4. 合成繊維のかたちと機能・感性³⁾

高機能繊維は多くの場合にバイオミメティクスがアイデアの宝庫となっている。ここでは「合成繊維のかたちと機能・感性」に焦点を絞って述べる。

4.1 微多孔繊維

代表的合成繊維であるポリエステル繊維はその優れた物理的・化学的性質に基づく多くの長所をもつ反面、①吸水

図1 新規開発カチオン可染ポリエステルの分子量と熔融粘度の関係

性が低く、綿の用途分野における利用はポリエステル/綿混紡糸の他は著しく制限されている、②天然繊維、セルロース系繊維、アクリル繊維などに比較して、染色した際の色の深みや鮮明性に劣る、③ポリエステル繊維表面は平滑で

図2 新規開発カチオン可染ポリエステルの機能性レベル

図3 多孔吸水性ポリエステル繊維の拡大写真

あるため、金属光沢やワキシー感が強く、絹のもつ優雅でマイルドな光沢や絹鳴りのするドライ触感などの感性面で劣るといった欠点があった。微多孔繊維によってこれらの欠点の改良がはかられている。

(1) 多孔吸水性ポリエステル繊維

繊維表面から中空部まで貫通した連通微細孔を多数有する多孔中空断面繊維は、毛細管現象によって優れた吸水性を呈する。図3に繊維製造過程で添加剤のブレンドと溶出を行うことにより微細孔を形成させた繊維の拡大写真を示す。

この繊維は1982年の発表以来、1984年より短繊維で本格展開が開始され、その後1992年からフィラメントもラインに加えられて今日に至っている。卓越した吸汗速乾機能とさらとした独自のドライな風合いが市場に定着し、ロングセラー素材となっている。

多孔吸水性ポリエステル繊維の発想は、化学改質が主流の綿並みの吸湿性をもつ合成繊維の研究開発過程で、多量の液汗をかく環境下では綿は繊維内部まで水分を吸収するため乾燥が遅く、濡れ感が長時間続き、皮膚へのべとつきや冷え感を招き必ずしも良くない点に着目し、多汗環境下ではポリエステルの速い乾燥速度を維持したまま吸水性が付与できれば快適衣料になるのではないかと考えたことが端緒となった。そして繊維形態面から毛細管現象に基づく物理的吸水の極限を追求した結果、この多孔吸水性ポリエ

●吸水速度と抱水率とを最大にする繊維構造のシミュレーション

$$\text{吸水速度 (水平方向)} \\ l^2 = \frac{r\gamma \cos\theta}{2\mu} t$$

貫通孔と中空部での圧力損失

$$\frac{u_1 - l_1}{D_1^2} \leq \frac{u_2 (D_0 - D_1)}{2d^2}$$

連続の式

$$u_1 D_1^2 \leq N u_2 d^2$$

図4 多孔吸水性ポリエステル繊維の吸汗速乾モデル

ステル繊維に到達した。図4に吸汗速乾モデルを示す。

新規に開発された多孔吸水性ポリエステル繊維が創出した吸汗速乾素材の分野は、その後他社も異形断面繊維などで参入し、大きなマーケットを形成するに至っている。

(2) 鮮明・深色性マイクロボイド構造ポリエステル繊維

繊維表面に0.1~0.3 μmの微細凹凸を生じさせると、繊維表面での光の反射が防止され、染色した際に色の深みと鮮明性が向上する。重合段階で内部析出させた微粒子を形成させた繊維を製造し、アルカリ減量処理によってマイクロボイドを形成させた繊維の電子顕微鏡写真を図5に示す。色彩が改善される機構として、光がジグザグな反射を繰り返している間に吸収されるという説や凹部からの反射光と凸部からの反射光が干渉して打ち消し合うとする説が提唱されている。また、微細凹凸の存在によって繊維間の摩擦が減少し、レーヨンを超える高いドレープ性をもち、高級感のあるロマンチックなシルエットが表現できる。婦人衣料を中心に展開されている。

(3) 半練絹調、柞蚕(さくさん)調マイクログループ構造ポリエステル繊維

繊維表面に1 cm 当り数万本のごく微細な縦長の溝(マイクログループ)を有するポリエステル繊維は繊維どうしのきしみに基づき、絹鳴り、衣ずれがし、ドライタッチを呈する。特殊な添加剤を縦筋状に含有する繊維をアルカリ減量して得たマイクログループ構造ポリエステル繊維の拡大写真を図6に示す。絹の中には飼育蚕から吐糸された繊維で、均斉がとれて洗練された家蚕絹と野生の蚕から吐糸された繊維で、粗野な外観、きしみ、ドライタッチを有する野蚕絹があるが、マイクログループ構造ポリエステル繊維は野蚕絹、なかでもその代表的な品種である柞蚕絹、例えばインドシルク(図7)、中国シルクを追求したものであり、婦人衣料素材として展開されている。

4.2 極細繊維

極細繊維の明確な定義はないが、一般的には、絹より細い1 dtex(直径約10 μm)未満の繊維を指す。また超極細繊維とは、0.1 dtex(直径約3 μm)未満の繊維を指す。海鳥型複合繊維(海成分溶出)、分割型複合繊維(分割剥離)、混合紡糸繊維、直接紡糸繊維などの製造技術がある。1980年代には極細繊維使いの新しい人工皮革や新合繊が次々と生み出され世界をリードした。極細繊維は例えばスエード調素材(図8)、人工皮革、家庭ワイパー、防ダニふとんなどに展開されている。

図5 マイクロボイド構造ポリエステル繊維の拡大写真

図6 マイクログルーブ構造ポリエステル繊維の拡大写真

4.3 異形断面繊維

絹を構成するフィブロイン繊維の断面形状が三角形であり、絹様の光沢を発現する重要な要素になっていることから、三角断面形状繊維がシルキー合繊の主流になっているのをはじめ、多種多様な断面形状の合繊が上市されている。代表例として繊維間隙の毛細管現象を利用する各社の吸汗速乾素材を図9に掲げる。また、最近のヒット素材に4つの団子を一列に並べたユニークな四つ山扁平状断面をもつ繊維（図10）がある。このような特殊断面形状にすることによって①防透性・防視認性、②吸汗速乾性、③ソフトでしなやかな風合などの多機能性が発現する。特に、①の防透性については扁平断面を生かすことで今までに解決できなかった淡色での透け感を防ぎ、またカーテンにした場合、本来相反する機能である遮像性（昼夜を問わず、室外から部屋の中の様子が明確にわからない性質、プライバシー保護性）と採光性とを両立させることができる。

4.4 中空繊維

繊維の10倍も熱を伝えにくい空気を繊維内に保持させたポリエステル中空繊維によって、軽量保温の機能が実現

図7 柞蚕絹（インドシルク）の拡大写真

される。図11に示した繊維は中空繊維で最も高いレベルの中空率35～40%を有しており、ポリエステル（比重1.38）が水に浮く中空率27.5%や既存繊維中で比重が最も低いポリプロピレン繊維（比重0.91）と同等の軽さの中空率34.1%を超える軽量を目指して設計されたものである。

また、中空繊維化することの意外な効果として洗濯耐久性向上効果を挙げることができる。トップランクの高い評価を得ている制電性ポリエステル繊維には中空部が設けられているが、この中空部の付与によって初めて耐久制電性にブレイクスルーがはかられた。繊維が含有する制電剤が繊維の熱処理によって中空繊維壁の内表面にブリードアウトして凝集し、洗濯を繰り返しても洗去されないためである（図12、図13）。

4.5 フィブリル繊維

繊維に亀裂が発生して、より細かな繊維に分裂する現象をフィブリル化といい、分裂した繊維をフィブリルという。従来のフィブリル繊維としてはウォームなタッチをもったサンドシルクとドライなタッチをもった精製レーヨン（リヨセル）があり、ともにフィブリル繊維特有の風合いと外観をもつ。また、アラミド繊維のように液晶ポリマーからなる高強度・高弾性率繊維はフィブリル化しやすいことが知られている（図14）。元来フィブリルが出難いポリエステル繊維でこれらと同様のフィブリル形成と繊細な風合い・タッチを初めて実現したのがウォームなタッチをもつフィブリル繊維（図15）とドライなタッチをもつフィブリル繊維である。いずれもポリマー改質、製糸技術、加工技術の垂直連携によって可能になったものであり、生産面において高度な品質管理技術が必要であった。これらの繊維は現在、プロセス革新などにより品質を安定化させた新タイプフィブリル繊維にそれぞれ置換わっている

マイクロファイバーの分割写真

図8 分割型複合繊維から極細繊維を製造する過程

図9 吸汗速乾素材の繊維断面

図10 四つ山扁平繊維

図11 中空率35~40%の中空繊維

(図16, 17). これらの繊維の発明は、布に字を書き減量して染めると字の跡が「白く」なるペンシルマーク現象を偶々発見したことに端を発したものである (図18).

5. 未来型開発事例

新しい潮流としてナノレベルの精密成形加工技術による未来型の開発が始まっている. 具体的な事例に光干渉発色繊維とナノファイバーがある.

5.1 光干渉発色繊維

光干渉発色繊維は、青く輝くモルフォ蝶の翅の発色原理を探求し、その薄膜干渉発色を利用して開発された. モルフォ蝶の翅の鱗粉断面では屈折率1.4~1.5のラメラ層と屈折率1の空気層とが各々0.08 μm , 0.14~0.16 μm の厚みで交互積層されており、薄膜干渉ブルー色を発色する.

図12 中空部を有する制電性繊維

図13 耐久制電性発現のモデル図

図14 アラミド繊維のフィブリル

図15 初期のウォームタッチフィブリル繊維

この光干渉発色繊維は、屈折率が異なるナイロンとポリエステルとを、可視光波長 (紫~赤) に対応して厚さ70~100 nmで61層重ねた繊維であり (図19), 見る角度により色相が変化する. 表3に色と波長と1層厚みの関係を示すが、ナノメートルオーダーの精密な積層構造形成が技術ポイントであり、特殊な精密コンジュゲート口金の設計と光学サイズ厚みに成形制御可能なポリマーの開発によって初めて工業生産が可能になったものである.

5.2 ナノファイバー

ナノファイバーの製造方法としては、①高分子融液を細孔から押し出す際に高压ガスで吹き飛ばす方法 (メルトブロー法), ②高分子を高温・高压でのみ溶解する溶剤に溶かし、減圧室を経て不活性ガス中に噴出させる方法 (フラッシュ紡糸法), ③高分子溶液に高電圧を印加し、静電気反

図 16 新規ウォームタッチフィブリル繊維

図 17 新規ドライタッチフィブリル繊維

図 18 ポリエステルフィブリル繊維の発見

撥力によってスプレーする方法(エレクトロスピンニング法), ④2 種の高分子を微細ブレンドして海島構造繊維を製造した後後加工工程で海成分高分子を溶解除去する方法などがあるが, いずれも不織布としてしか使用できない. 帝人ファイバーでは前記光干渉発色繊維の精密複合紡糸技術, 信州大学で研究を進めている数十倍~数百倍の高倍率延伸が可能なレーザー超延伸技術と組み合わせる共同研究開発を行っている. その結果, 従来の製糸技術では実現不可能であった, 実際の商品開発に供し得るナノファイバーの開発に世界で初めて成功した(図 20).

従来の超極細ポリエステル繊維(直径 $2\mu\text{m}$)の2倍のタフネス(強度 $\times$ 伸度)を持つナノファイバーの製造が可能になり, かつ 200nm まで所定の繊維径にコントロールでき, 均一に揃えることが可能である.

①超軽量の衣料, 薄くても温かい衣料, 高い吸湿速度をもつ快適衣料, ②長寿命なフィルター, ③再生医療分野, ④燃料電池用電解質膜などへの展開が期待される.

5. おわりに

「衣料分野の高機能合成繊維」というテーマで, 先駆者として日本が優位性を維持している高機能化技術について, その強みを主に筆者に身近な帝人ファイバーの開発事例を

図 19 光干渉発色繊維断面の積層構造

表 3 光干渉発色繊維の色と1層厚みの関係

色	波長 (nm)	1 層厚み (μm)
紫	430	0.069
青	480	0.076
緑	520	0.083
赤	630	0.101
近赤外	730	0.117

図 20 ナノファイバーの拡大写真

引いて解説した.

結論として, 日本の合成繊維メーカーのコア・コンピタンスは次の4点にあると考える.

- (1) ポリマー改質・製糸・後加工の複合化による新機能繊維の研究開発力 (SCM(Supply Chain Management)の構築が今後の課題)
- (2) ナノレベルの精密成形加工技術(精密機械加工技術・IT 技術との複合)
- (3) Biomimetics 応用力 (「天然に学ぶ」, 自然との共生)
- (4) 環境・リサイクルに対する高い意識

これらの強みをベースに, 夢と情熱をもって創造的な挑戦を積み重ねることにより, 21 世紀においても日本が「合成繊維の新しさ」を世界に向けて発信する存在であり続けると確信している.

参考文献

- 1) 鈴木東義: 繊維学会誌, **60**, 248 (2004)
- 2) 形舞祥一, 佐藤万紀, 大口正勝: 繊維機械学会誌, **51**, 313 (1998)
- 3) 鈴木東義: 第 35 回繊維学会夏季セミナー要旨集, 6 (2004)