ポリエステル繊維の紡糸技術

岡島 邦彦, 白瀧 浩伸

ポリエステル繊維の紡糸技術として、標準ポリマーに対する一般的な溶融紡糸法を概説し、各紡糸技術間に固有の延伸過程での繊維形成の特徴を述べる。

ポリエステル繊維の紡糸技術として、標準ポリマーに対する一般的な溶融紡糸法を概説し、各紡糸技術間に固有の延伸過程での繊維形成（特に、延伸性）の特徴を述べる。また、いわゆる高速紡糸法の発展とともに、溶融紡糸シミュレーションに繋ぐため工夫されてきた spin-line 上での糸径、糸表面温度、複屈折率、結晶性の on-line 測定法を紹介する。また、繊維構造形成過程を理解するために従来法の延伸技術での無定型領域の構造変化の一例を示す。

1. 各種溶融紡糸法

本質的には、いかにポリマーメルトに配向を与え所望の繊維としての特性（主に強伸度特性）を与えるかという技術である。歴史的には、1935年 Dupont 社に依るナイロン66の溶融紡糸に始まる。当時は紡速も数百 m/min 以下であるが、特筆すべきは、開発当初は後で述べる SDTU 方式であったが¹⁾、多分、ナイロン特有の水分誘起結晶化などにより巻き姿が悪く、CV 方式に切り替えた経緯が知られている。ポリエステル繊維はナイロン開発の10年程度後に開発され、その当初の紡糸技術もナイロンの CV 法に依拠したように思われる。ナイロンとポリエステルの構造、結晶化特性を考えると後者では、もともと、SDTU での開発でもよかったように思われる。よくいわれるように紡糸技術は紡糸速度とコストとの戦いでもあった。紡糸技術には原理的

に3つの方法がある。CV法 (Conventional Method: 図1a) は、吐出メルトを細化、固化後、一旦、1000~1500 m/min 程度以下で UDY (Undrawn Yarn) として巻き取り、これを、一定条件で Conditioning した後、別の延伸機 (Twister or Low Draw Twister) で機械的に熱延伸して再度 FDY (Fully Oriented Yarn) として巻き取る方式である。この方式はコスト、手間ともに他に比してかかるため、主流の座からは後退しているが、物性的に捨て難いとするユーザーもある。現在、一般的に利用される方法は1950年代に開発された SDTU (Spin-Draw Take-UP Method) 法 (図1b) で上記 UDY 糸を連続的に熱ローラー (または熱板) 間で1.5~2.5倍に延伸し4500m/min 程度で巻き取る方式である。これから得た繊維を FDY または FOY (Fully Drawn Yarn or Fully Oriented Yarn) と呼ぶ。この方式では、機械的延伸に先立つ急速な糸条加熱技術が必要であり、糸条交絡のための Interlace Jets 装置も付随する。一方、更なる高速紡糸を目指して2500m/min 以上の高速でそのまま巻き取る方式 (Spin-Take-Up Method (STU 法): 図1c) が実用化され、例えば、旭化成の TEC²⁾ で8000 m/min、AKZO Nobel ではテスト機で12500m/min を達成している³⁾。この方式で5500m/min 程度以下で紡糸された糸を POY (Partly Oriented Yarn)、MOY (Moderately Oriented Yarn) と呼

Development in Melt Spinning Techniques of Polyester Fiber, OKAJIMA Kunihiko SHIRATAKI Hironobu, 旭化成工業(株) 基礎研究所, Central Research Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd.

図1 各溶融紡糸工程のフローチャート

ぶこともある。POYは更なる構造安定のために別途延伸される場合もあるが、Draw Twist Texturingの原糸として、延伸/仮撚機に掛けられる⁴⁾。STUの中でもレギュラー、太デニール用には、ゴデットを用いない方式、特に、細デニール用（もちろん、レギュラー、太デニールにも対応）にはゴデットを用いる方式がある⁵⁾。また、STUとSDTUの両者の長所を求めた紡糸法として、基本的にはSTUであるが、固化糸条を非接触で熱処理ゾーンに導入し、延伸を行い、そのまま巻き取る方法がある（Spinline-Heating Spinning Method (SHS))。これら紡糸法は前述のごとく吐出ポリマーメルトの配向と緩和の与え方が異なり、最終繊維の物性、構造に違いを与える（後述）。ところが、工業的見地からみた紡糸では、得られる繊維の品質保証の他に、紡糸収率の安定化が必要であり、紡糸機本体に付随する付帯装置も重要になる。溶融ポリマーの粘度の変動が少ないこと（特にポリマー中の水分調節⁶⁾）、溶融ポリマー輸送中での熱分解を最小にする配管設計（滞留時間設定）、溶融ポリマーの均一性を保証するエクストルーダー設計（均一混合）、吐出直前のポリマーメルトの滞留防止、適切河過構成を持つSpin Headに至るSpin Pack構造⁷⁾、吐出メルトを細化、固化するための均一で乱流の少ない冷却空気の紡糸筒内への供給、排気法など紡糸装置（吐出-細化-

固化-延伸-巻取）など実質的に重要なものも少なくない。紡口1つ1つの形状にしても、広いポリマーメルト貯めから急激に細いキャピラーに導入されるため発生する粘弾性的過剰エネルギーをいかに散逸させるかという視点も必要となる。また、通常実施される一面方向からの冷風の給排気では、紡口数が増えれば増えるほど、各糸条が受ける温度変動を均一にするのは不可能に近い。さらに、マルチフィラメントの場合は巻き取り前に撚りをかける装置も必要で上記の他の各点の制御も当然、困難になり、統計的にいかに各種変動をミニマイズするかという点に帰する。また、いずれの場合にも、ポリエステルに限らずポリマーメルトの紡糸ではneck延伸の挙動（Ziabicki⁸⁾）によれば、慣性項を無視したマックスウェル流体の非等温紡糸では、ひずみ速度が流体の緩和時間を十分上回ったとき、発生、慣性項を考慮したニュートニアン流体の非等温紡糸の場合、低速紡糸（慣性項が小さい）では、物理的にありえない局所的粘度減少がneck発生の条件となり、高速紡糸の場合は高い慣性力に基づく張力勾配があるときneckが発生）が付随するため、最終糸の品質安定のためにはNeck延伸点のSpin line上または延伸ロール間（上）での変動も抑制する必要がある。

紡速4500m/min近傍でそれぞれSTU、SDTU、

表 1 各紡糸方法によって作られた PET 繊維の構造と物性

	Ten.	Elong.	Mod.	Heat Shrinkage		Δn	X-Ray Structure	
				Air	Water		Long Period	T α
Sample	g/d	%	g/d	%	%	$\times 10^{-3}$	A	°C
STU	3.5	54	61	3.3	3	93	319	103
SHS	4.5	40	84	6.9	5.3	130	137	130.7
SDTU	5.1	29	94	9.8	4.7	155	127	143.2

表 2 STU および SDTU 法によって作られた PET 繊維の物性

	Ten.	Elong.	Mod.	Heat Shrinkage	
				Air	Water
Sample	g/d	%	g/d	%	%
STU	4.2	35	—	—	2-2.5
SDTU	5	30	—	—	5-8

SHS 法で紡糸した $[\eta]=0.60$ のポリエステル繊維の物性、構造の特徴は、安田等⁹⁾によると表 1 の通りである。また、紡糸ポリマーの素性は不明だが W. Peschke ら³⁾ による 7500m/min での STU と 4500m/min での SDTU での比較は表 2 の通りである。

いずれにしても、高速紡糸 (STU ; 7500m/min) 繊維は低速 SDTU 糸に比べても強度が低く、伸度を残したものとなり、相対的に沸水収縮率は低い傾向を示す。同一紡速 (4500m/min) ではこの傾向が一層強まり、特に、配向は低く、長周期構造は発達する。SHS は STU と SDTU との中間的物性を示す。

2. 構造パラメーターのオンライン測定技術

溶融紡糸のシミュレーションの研究は加瀬、松尾^{10,11)}を始め多くの研究者により行われている¹²⁾。基本的に定常均一メルトに対する単孔系の理論が多く、吐出条件、冷却条件、巻取条件などを与えて、紡口出口からの距離を関数として、糸径、表面温度、複屈折率、結晶化度、巻取張力などを予測する点で紡糸の体系を理解する有効な手段で、条件変更でどこが変化するかを知る重要な手段である。しかし、紡糸現場では、ほとんどがマルチフィラメントであり、各種条件と紡口配列ディメンションによる、各 1 本 1 本のいわゆる糸むらの程度を知ることの方がむしろ、現場的には重要となる。こうしたプロセス上の必要から、モノフィラメントによる手法を糸条位置による温度むらを考慮して多孔系に拡張して応用し、物性むらをシミュレートしている例もある¹³⁾。また、ポリマーの基本構造を無配向非晶、配向非晶、結晶核、無配向結晶および配向結晶の 5 種類の構造

よりなると仮定し、これらの構造は応力および温度によって可逆的に変化するとして、紡糸過程での構造変化を定量的に計算する試みもなされている¹⁴⁾。このシミュレーションでは結晶化速度の計算においてアブラミの式にホフマンの理論を代入したものを使用している。本講ではシミュレーションは課題ではないので、詳しくは上記文献や単行本¹⁵⁾を参照して頂きたい。

PET の高速紡糸における構造形成ではシミュレーションとともに紡糸過程における on line 測定も数多く報告されている。on line 測定はシミュレーションによる計算結果を実証するためというより、むしろ on line 測定の結果にあわせるようにシミュレーションの方法を検討するという傾向の方が強い。これは高速紡糸では配向結晶化やネック状変形のような、単純な物質収支や熱伝導の式からは導かれない複雑な現象が発現するためである。PET の高速紡糸において、巻取速度が 4000m/min を越えると、ある位置において糸径がくびれるように細化するいわゆるネック状変形が起こることは、on line 測定が試みられると同時に報告されている^{16, 17, 18, 19)}。ネック状変形は通常の冷延伸によるネック変形と同様な性質を示す。すなわち、ネック点では糸の変形速度が急激に増加するとともに直径が細化し、それは最終繊維の直径にほぼ等しい。また、ネック点では配向結晶化に伴う発熱も観察されており、冷延伸でのネック変形にみられるネック振動²⁰⁾が高速紡糸においても観察されている。ネック変形は高速紡糸に特徴的な変形であるとともに、この発現が高速紡糸による繊維の物性を大きく支配しており、ネック変形を示す巻取速度以上で得られた繊維はスキンコア構造を示し、伸度も低下する。また後で述べるように急激な変形により内部に空孔が生成し、染色性を向上させることも知られている。

以降では我々が試作した on line 測走装置概要 (図 2) と、この装置を使用して解析した結果の例をポリアミドの場合について模式的に示す²¹⁾。結果の概要はほぼ PET の場合と同じ傾向である。測定項

図2 溶融紡糸過程の on line 測定システム

図3 紡口から距離に対する糸径変化の概略図

目は分子配向挙動（複屈折率，広角 X 線回折），糸径，歪み速度，糸温度，紡糸張力および結晶成長挙動とし，これらを紡口からの距離を変えて測定した。糸条はゴデットロールを通した後エアサッカーで引き取り，引き取りはゴデットロールの速度によりコントロールした。

図3は糸径の紡口からの距離による変化を，引取速度についてプロットしたものである。引取速度がある一定速度を越えると糸径の細化が不連続になされるネック状変形挙動が紡口からLの位置で観測され，細化の程度は引取速度の増加とともに大きくなる。これは清水⁷⁾らにより報告されたナイロン66による配向結晶化の開始する紡糸速度と対応する。図4は物質収支より計算される歪み速度の紡口からの距離についての値を同じ引取速度で求めた結果を示す。図3で糸径の細化が不連続になされ始めた引取速度において，特異的に歪み速度が増加している。これは図3によって示されたネック状変形の発現位置に対応しており，ここで急激な細化が起っていることがわかる。

図5は低速引取および高速引取の場合の糸の表面

図4 紡口からの距離に対する糸条の歪み速度の変化の概略図

図5 紡口からの距離に対する糸温度の変化の概略図

図6 紡口からの距離に対する糸条の複屈折率の変化の概略図

温度の紡口からの距離についての変化を赤外線輻射温度計で測定した結果である。ネック状変形を示さない低速引取の場合では糸温度は紡口から遠ざかるにつれて単調に減少しているが，高速引取の場合はネック状変形が見られる位置の手前から発熱によるものと考えられる，温度変化プロファイルの不連続点が観察される。これも PET の高速紡糸の場合と同様，ネック状変形において分子鎖の急激な配向とそれに伴う配向結晶化が発現していることを示している。

図6は複屈折率の紡口からの距離についての変化

を示す。複屈折率は糸条を2枚の直交した偏光フィルターの上に置き、クロスニコルの対角位として、その透過光の強度より求めた。この図よりネック状変形の直後で複屈折率が急激に増加し、その程度はネック状変形の度合いが顕著なほど、すなわち引取速度が大きいほど、細化点での複屈折率の増加が顕著となっている。

これらのポリアミドについての on line 測定の結果は報告されている PET の on line 測定²²⁾の傾向と一致しており、高速紡糸におけるネック状変形が結晶性高分子の溶融紡糸に一般的な現象であることが改めて確認できる。

ポリアミドの場合、物性変動、染色むらなどの回避のため、従来は、いろいろな条件で巻き取った後で、種々の構造パラメーターを測定する場合、巻取後の構造の変化が避けられないため、誤った解決法に導く場合があったが、on line で実測されれば、かかる問題も避けられる。当然、ポリエステルにも当てはまる。このようなオンライン測定装置では残念ながら、ポリマーの無定型領域 ($\tan\delta$ -温度曲線など)の解析ができない欠点がある。

ポリエステルの高速紡糸においては4000m/minを越える巻取速度においてネック状変形が発現することは周知のことであるが、その発現温度は on line 測定により130℃から100℃までの範囲で観測されている²²⁾。これは通常の冷延伸の場合にネック変形が発現する温度、すなわちガラス転移点以下の温度領域に比べると高温である。このことから、ネック状変形の変現は温度と延伸速度の組み合わせによって決定され、高速紡糸から明らかなように、高速延伸ではガラス転移点より十分高温でも発現することを意味する。このネック状変形発現の温度と延伸速度の関係を冷延伸の場合について、延伸速度が1000mm/minまでの範囲で調べた結果を図7に示す²³⁾。

図7においてネック状変形は明確にくびれた変形点が1か所のみ発現する Single-Neck とならぬかなネック形状を示す変形点が複数発現する Multi-Neck の2種類に分類され、これにならぬネック状変形を示さない均一な変形である Homogeneous 変形を加えた全部で3種類の変形様式に分類し、延伸を行った温度および延伸速度についてどのような変形様式を示したかを、様式により異なる記号で記した。この図よりネック状変形の変現は明らかに温度と延伸速度に依存し、Homogeneous 変形と

図7 温度および変形速度に対する、均一変形およびネック変形発現を示す相図

Multi-Neck 変形の境界線は温度と延伸速度の対数に対してリニアな関係があることが示される。図からこの関係は以下の式によって表される。

$$T = 5.65 \log(v) + 66.16$$

ここで、 T は℃単位での温度、 $\log$ は自然対数、 v は mm/min で表した延伸速度である。上式より延伸速度が5000m/minの場合ネック状変形の変現温度は104℃と計算され、これは実際に on line 測定により得られた温度とほぼ等しい。このように冷延伸実験から導かれたネック状変形の変現条件が高速紡糸にも適用できることから、冷延伸および高速紡糸で観察されるネック状変形は基本的に同じ現象であることが示唆される。

3. 延伸過程における構造変化

ここでは、STU 紡糸過程の結果と CV または SDTU 紡糸を想定したモデルの延伸による構造変化を説明する。

高速紡糸過程における溶融紡糸繊維の構造形成については清水、奥居、鞠谷^{15,19)}らによる詳細な研究が報告されている。それによると、紡糸による配向結晶化は紡速4000m/min以上で顕著となり、結晶化度も紡糸速度に応じて増加する。しかし、繊維全体の複屈折率によって表現される配向度は約6000m/minで最大となり、それ以上では低下する傾向を示し、強度および伸度も6000m/minをピークに低下する。この一見奇妙に見える現象は、繊維の構造を結晶部分と非晶部分とに分けて考えることにより容

易に理解される。すなわち、紡糸速度の増加に応じて、結晶化度並びに結晶配向度は増加するが、非晶配向度は紡速5000m/minをピークに逆に減少を始め、9000m/minでは1000m/minのときとほぼ同じ値にまで低下することによっている。これは6000m/minを越える紡速では、延伸により繊維外層部分に応力が集中して、高配向、高結晶化度となるのに対し、内装部分はほとんど応力がかからず配向結晶化および延伸がなされないためである。また、紡速7000m/min以上では紡糸張力上昇に伴うボイドが外層部に発生し、繊維の密度も低下する。清水らはこのボイド発生が高速紡糸エステル繊維の染色性向上の理由であると考えた。

高速紡糸繊維の高染色性の理由として、上出ら²⁴による無定形領域の充填密度分布による考え方もある。無定形領域の充填密度分布は真鍋ら²⁵により提案されたものであり、これは $\tan\delta$ の温度分散曲線を解析することにより得られる。それによると、高速紡糸繊維の充填密度分布は紡速5000m/minまでは増加するが、それを越えると減少する。すなわち、無定形領域の分子鎖は5000m/minまでは密に詰まるように構造形成されるが、それ以上の紡糸速度では強い応力が働くために無走形領域の分子鎖は粗く充填されるようになる。上出らによると染色吸尽率と紡糸速度の関係もこの充填密度分布と同様な傾向を示し、紡速5000m/minまでは単調に減少してここで最小となり、さらに紡速が上昇すると染色吸尽率は増加する。このことは染色吸尽率の増加が無定形領域の分子鎖の充填度の低下によるものであることを示唆している。

このようにSTU法による高速紡糸では、CV法やSDTU法にみられない延伸による構造形成が行われる。CV、SDTU法による延伸と高速紡糸による延伸との大きな違いは前者が均一な変形であるのに対し、後者は5000m/min以上の紡速では冷延伸においてみられるネック変形に類似した、ある点において繊維の直径が不連続的に小さくなるネック状変形を示すことにあると考えられる。従って、紡糸過程における構造変化を知るためには、ネック変形も含めた延伸過程とそれによる構造形成とその物性との相関を調べる必要がある。

延伸、構造形成およびその物性についての研究として、Ward²⁶は複屈折率の異なるポリエステル繊維を冷延伸すると、複屈折率が高いほど延伸時の初期応力および降伏点応力が強く、また、ネック変形

前後の断面積比、すなわち自然延伸比率が減少することを報告している。これらの結果および結晶化度が降伏挙動に及ぼす影響が比較的小さいことから、Wardは配向度はポリエステル繊維の延伸挙動について最も支配的な因子であると結論した。Guptaら²⁷は熱処理による物性変化の研究により、初期弾性率、降伏点応力、降伏点伸度および破断強度は非晶配向度におおまかに比例することを示している。また、RimとNelson²⁸の構造—物性相関についての研究からは初期応力、破断強度および熱収縮は非晶配向度が高いほど、高くなることが示されている。これらの報告は延伸とそれによって生じる構造変化がポリエステル繊維の物性を分子配向に基づく法則性を持って決定していることを示唆しているが、明確な理解のためには延伸、分子配向および結晶化が物性に及ぼす効果をそれぞれ独立に検討する必要がある。

延伸がポリエステル繊維の構造および物性に及ぼす効果を調べるために、無配向非晶繊維を温度を変えて冷延伸して得られたサンプルの解析結果を表3に示す²⁹。表で、 Δn は複屈折率、 x_c (%)は結晶化度、 E (GPa)は初期断面積から求めた見かけの破断応力、 TE (%)は破断伸度、 TS (g/d)は破断強度、 σ_{stress} (GPa)は真の破断応力である。

ここで初期サンプルとしては紡速450m/minの低速紡糸で得られた無配向非晶繊維($\Delta n=0.001$)を用い、これを表中に示した温度で初期長7cmから1.2mm/minの低速で4倍の28cmにまで延伸した。また、延伸が等温的になされるように試料全体を温度コントロールした水浴につけて延伸している。すべてのサンプルについて延伸後も広角X線回折では明確な結晶パターンを示さず、低速で延伸した場合には高配向度の非晶状態が得られる。この表から以下のような傾向を読み取ることができる。

- (1) 延伸後の試料の複屈折率は同じ延伸倍率であっても延伸温度が高温になるほど低い。
- (2) 初期弾性率は延伸温度が高いほど、すなわち、複屈折率が低いほど、小さな値となる。
- (3) 複屈折率が高いほど破断伸度は低く、破断強度は高い。
- (4) 破断時の真の応力は複屈折率への依存性が小さく、ほぼ0.85GPa前後の値となる。

ここで、破断時の真の応力は、延伸による体積変化が無視できるものとして、破断強度および破断伸度から算出した。これらの結果は、結晶を含まず、非

表 3 配向非晶 PET 繊維の物性 (Series I)

Water temp./°C	$\Delta n \times 10^{-3}$	$\chi_c(\%)$	E (GPa)	TE(%)	TS(g/d)	$\sigma_{\text{stress}}(\text{GPa})$
Original	1	-	1.56	1115.00	0.79	0.98
20	162.2	-	5.58	300.00	3.10	0.75
40	139.5	-	5.82	315.00	3.13	0.82
55	111.4	-	5.03	325.00	3.21	0.88
58	95.2	-	4.44	337.50	3.10	0.90
60	75.9	-	4.03	355.00	3.08	0.96
61	66.0	-	3.74	382.50	2.77	0.95
62	54.8	-	2.98	392.50	2.61	0.93
64	37.9	-	2.66	432.50	2.16	0.88
66	11.4	-	2.24	545.00	1.46	0.79
70	3.5	-	1.88	725.00	1.11	0.84

表 4 無配向結晶化 PET 繊維の物性 (Series II)

Anneal temp./°C	$\Delta n \times 10^{-3}$	$\chi_c(\%)$	E (GPa)	TE(%)	TS(g/d)	$\sigma_{\text{stress}}(\text{GPa})$
No treat	1	-	1.56	1115.00	0.79	0.98
105	0.3	6.8	1.44	1206.00	0.74	1.00
113	0.4	25.4	1.74	1160.00	0.73	0.95
115	0.4	35.8	1.71	1095.00	0.69	0.83
119	0.1	45.7	1.94	985.00	0.70	0.75
150	0.5	53.8	1.99	976.00	0.66	0.70
200	0.8	68.1	1.78	718.00	0.54	0.41

表 5 配向結晶化 PET 繊維の物性 (Series III)

Anneal temp./°C	$\Delta n \times 10^{-3}$	$\chi_c(\%)$	E (GPa)	TE(%)	TS(g/d)	$\sigma_{\text{stress}}(\text{GPa})$
No treat	166.4	-	5.33	333.00	3.55	1.01
80	164.1	19	5.66	297.50	2.90	0.70
110	161.5	25.5	4.97	291.00	2.98	0.69
130	162.8	34.4	4.95	320.00	3.31	0.89
150	163.4	45.6	4.63	292.50	3.30	0.77
200	168.4	67.9	4.33	295.20	3.35	0.80

晶成分のみよりなる繊維が分子配向した場合の物性を表しており、この傾向は前述したすでに報告されているものと基本的に矛盾はない。しかし、工業的なプロセスでの延伸工程では、STU、CV および SDTU によらず、延伸による結晶化、すなわち配向結晶化は避けることができない。従って、結晶成分の有無、並びに結晶配向が物性にどのような影響を及ぼすかについても検討する必要がある。

この目的のために、上記の水浴中での冷延伸によって得られた、無配向非晶繊維サンプルおよび高配向非晶繊維サンプルを、長さを固定して温度を変えてアニーリングすることにより、全体的な分子配向を保存したままで結晶化度のみが異なるサンプル、すなわち無配向結晶サンプルおよび高配向結晶サンプルを作成し、この物性を評価した。その結果をそれぞれ表 4、5 に示す。表 4 は複屈折率 $\Delta n=0.001$ のオリジナルの末延伸糸を105℃から200℃の温度範

囲でシリコン浴中で熱処理したもの、表 5 は冷延伸により得られた $\Delta n=0.16$ の高配向非晶サンプルを同じくシリコン浴中で80℃から200℃の温度範囲で熱処理して得られたサンプルについての測定結果である。表 4、5 から無配向および高配向非晶サンプルとも熱処理によっても全体の配向度を保存したままで、結晶化度を68%までの値で任意に制御した結晶化繊維が得られている。ここで結晶化度は Statton 法³⁰⁾により評価した。これらの結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 初期弾性率は結晶化度に大きく依存せず、ほぼ処理前の値を示す。
- (2) 破断伸度も結晶化度には大きく依存しない。無配向で高結晶化度のサンプルについては破断伸度が低下する傾向があるが、これは結晶化により生じた構造的欠陥が原因であろう。
- (3) 破断時の真の応力も、結晶化度によらず配向非

品サンプル同様0.85Gpa程度の値となる。

表3から5の結果から、延伸ポリエステル繊維の物性は延伸による非晶配向度の増加によって最も支配的に決定されることが示される。また、高速紡糸において紡速6000m/minを越えると非晶配向度が低いにもかかわらず強度、伸度ともに紡速とともに低下していく傾向が、ボイドあるいは粗な末定形領域の生成によるものであることも示唆している。

4. 結 言

以上、PETの紡糸技術という題の下にon lineシミュレーションの重要性や紡糸技術イコール延伸技術という視点に立って解説してきたが、本論にもふれたとおり紡糸現場では糸切れの低減、広い意味での糸品質の均一性を向上させたり、コストをいかに低減するかが紡糸技術であり、統計的に各糸条個々に与えられる“ゆらぎ”をいかにミニマイズするかが重要である。この観点に立てば、紡糸パックの構造、紡口形状や材質、ロールやガイドの形状、材質の選択、冷風の与え方とその温度条件等も大きな要素となる。また、これ以外にも油剤類の選択も重要であり、その変質を防止するのも紡糸技術の一要素である。つまり、真の紡糸技術というのはこれらの多数の因子の組み合わせの上に成立している極めて高度な技術（ひとつの科学的視点では解決不可能な技術）であることを理解しておくことが重要であることを強調しておきたい。本編の解説はこれらを認知した上で、本来的な糸特性の発現に視点が置かれているものである。その意味で本編に示したシミュレーションを含めた構造発現機構は0次元近似的な紡糸技術へのアプローチであり、今後、上述した種々の要素を取り入れた型に発展する余地が残されていると考えられる。

参考文献

- 1) W. H. Carithers and R. J. Hill; J. Am. Chem. Soc., **54**, 1579 (1932)
- 2) 繊維学会編、最新の紡糸技術、P. 66, 高分子刊行会
- 3) W. Peschke; CFI Vol. 45, p. 470-473, Dec. 1995
- 4) 例えば、J. Hagewood; IFJ/June, 5 (1991)
- 5) W. Stibal, U. Kemp and S. Thiel; CFI **46**, p. 295/296 (1996)
- 6) 例えば、The Fiber Spinning Group, Clemson Univ., IFJ/April, 924 (1994)
- 7) 例えば、K. Meier; Chemical Fibers International (CFI), **45**, p-52, Feb., 1995
- 8) A. Ziabicki; 繊維学会誌, **51**, P. 127 (1995)
- 9) K. Hayashi, K. Tani, H. Ishihara and Yasuda; 繊維学会

誌, **148**, 541 (1992)

- 10) S. Kase, T. Matuo; J. Polym. Sci., **A3**, 2541 (1965)
- 11) S. Kase, T. Matuo; J. Polym. Sci., **A11**, 251 (1967)
- 12) 例えば、最近では J. S. Denton, J. A. Cuculo, P. A. Tucker; J. Appl. polym. Sci., **57**, 939 (1995); K. Hayashi, K. Tani, H. Ishihara, H. Yasuda; 繊維学会誌, **48**, T541 (1992)
- 13) H. Yasuda, H. Sugiyama, K. Hayasi; 繊維学会誌, **40**, T 488 (1984)
- 14) 谷口; 未発表結果
- 15) A. Ziabicki and H. Kawai eds.; "High-Speed Fiber Spinning", John Wiley & Sons (1985)
- 16) G. Perez, C. Leclise; 18th "International Man-Made Fiber Conference" in Dornbirn
- 17) 清水; 繊維機械学会誌, **38**, P243 (1985)
- 18) 松井; 繊維学会誌, **37**, P508 (1982)
- 19) 清水; 繊維学会誌, **38**, P499 (1982)
- 20) A. Toba; Polymer, **34**, 2306 (1993)
- 21) 友清; 長岡, 未発表結果
- 22) 松井; 繊維学会誌, **38**, 508 (1982)
- 23) 白瀧; 未発表結果
- 24) 栗木, 上出, 真鍋, 岩田; 繊維機械学会誌, **38**, T93 (1985)
- 25) 真鍋, 梶田, 上出; 繊維機械学会誌, **34**, T98 (1981)
- 26) I. M Ward; J. Macromol. Sci., Phys., **B, 1** (4), 667 (1967)
- 27) V. B. Gupta and S. Kumar; J. Appl. Polym. Sci., **26**, 1897 (1981)
- 28) P. B. Rim and C. J. Nelson; J. Appl. Polym. Sci., **42**, 1897 (1991)
- 29) H. Shirtaki et al.; J. Appl. Polym. Sci., **64**, 2631 (1997)
- 30) W. O. Statton; J. Appl. Polym. Sci., **7**, 724 (1984)

岡島邦彦 (おかじまくにひこ)

昭和45年北海道大学理学部高分子学科卒、同年旭化成工業㈱入社、同50年から2年間ウブサラ大学物理化学研究所に留学、同56年北海道大学理学博士取得、現在、基礎研究所参与(副所長)。(旭化成工業㈱研究開発本部基礎研究所、〒416-8501 富士市鮫島2-1, TEL. 0545-62-3112, FAX. 0545-62-3039)

白瀧浩伸 (しらたきひろのぶ)

北海道大学理学部物理学科卒、金沢大学理学研究科物理学専攻、理学博士、1994-1995英国 Leeds 大学に留学。現在、旭化成工業㈱基礎研究所、主任研究員、(6月より電子応用研究所に転動)。ポリマーブレンドの相平衡、固体高分子の構造と物性相関が主な業務。(旭化成工業㈱基礎研究所、〒569-0096 高槻市八丁畷町11-7, TEL. 0726-85-4567, FAX. 0726-85-4574)