

延伸倍率の連続変化に対する繊維直径の応答性

的場 兵和^{*1}・伊藤 章喜^{*1}・伊香賀 敏文^{*1}・大越 豊^{*1,#}

Response of Fiber Diameter with the Continuously Changing of Draw Ratio

*Munekazu Matoba^{*1}, Akiyoshi Ito^{*1}, Toshifumi Ikaga^{*1}, and Yutaka Ohkoshi^{*1,#}*

^{*1}Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Abstract : The fiber with gradually changing diameter was fabricated by changing the draw ratio continuously, that is, by changing the take-up speed of melt spinning, laser drawing, and heater drawing processes. The diameter profiles of resultant fibers were monitored and compared each other. As the results, the laser drawing shows the best diameter responsiveness among the three. For the case, the diameter changing rate increased with the increase of fiber acceleration rate up to 6.0 m/s². Moreover, it can make the fiber whose diameter gradually changed about 40% within 8 cm range for the minimum case. The diameter profile was determined by not only the draw ratio profile but also the start/end draw ratios. The lower drawing stress change tends to improve the responsiveness, and the minimum response length for laser drawing was obtained for the draw ratio decreasing case.

(Received 14 March, 2014 ; Accepted 13 June, 2014)

1. 緒 言

合成繊維は、一般的に紡糸工程で高分子材料を細くて長い繊維形状に成形し、延伸・熱処理工程において外力と熱を与えることで分子鎖を引きそろえ、実用に耐えうる物性を発現させている。合成繊維の性能は、原料高分子の特性に大きく依存する一方で、その高次構造によっても著しく変化することが知られている。また、繊維の形態を変化させることで、さまざまな特徴を有する繊維が開発されている。このうち、繊維断面形状を制御したものとしては、繊維直径を極端に細くした極細繊維[1-6]や、繊維の断面形状を異形化[7-9]・中空化[10,11]・多孔質化[12-14]・複合化[1,15-17]した繊維などが報告されている。一方で、繊維直径を変化させることで、繊維に新たな機能を付与することができ、利用用途の拡大を見込める。このため、これまでにも意図的に繊維直径プロフィールを変化させた事例がいくつか報告されている[18-21]。

合成繊維の製造においては、自然延伸倍率以下の倍率で連続的に延伸することで延伸される部分とされない部分を作り、シックアンドシン繊維として用いられている[18]。また、配向した合成繊維に緊張化で赤外線レーザーを間歇的に照射することで、繊維軸方向に複屈折率変化

と太細を有する繊維を作製し、染色時に染めムラをほどこす技術が提案されている[19]。また、処理刃を用いて繊維を局部的に曲げつつ繊維軸方向に引き伸ばすことで、繊維の周期的なクレージングを生じさせ、繊維直径に太細を持たせる技術も報告されている[20]。この方法では、比較的周期性が高く、1周期あたりの長さが200 μ m程度の繊維も得られているが、処理刃によって傷をつけるため、得られた繊維にも傷が残ること、製造速度がごく遅いことが難点である。また延伸工程中の繊維にレーザー光を間歇的に照射したり、振動を加えたり[21]することによって直径に周期的な変動を与える研究も報告されている。これらの方法は、いずれもネック変形点位置の制御であるため、繊維直径程度の区間でステップ的に直径を変化させた繊維を得るには適しているが、繊維直径に対して十分長い区間内で連続的に直径を変化させる用途には向かない。

そこで本研究では、延伸倍率を連続的に変化させることによって、Fig. 1に示すように繊維直径に対して十分長い区間内で繊維直径を連続的に変化させた繊維の作製を試みた。この際、特にレーザー延伸を用いた繊維直径制御に注目した。レーザー延伸とは、加熱源に炭酸ガスレーザーを用いた延伸方法であり、熱放射によりレーザー光が吸収された点で繊維が加熱されるため、ヒーター延伸のように繊維表面を介した熱伝達と繊維内部での熱伝導による加熱と比較して、短い時間で繊維内部の温度を均一に加熱できる。このため、ネック変形の起こる位置(以

corresponding author

^{*1} 信州大学

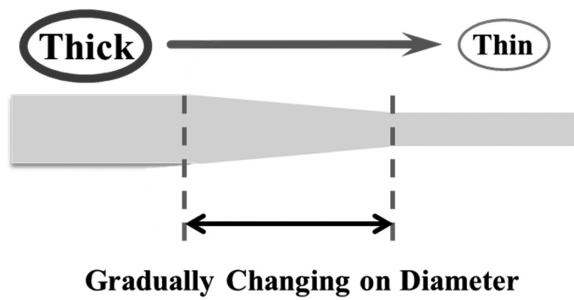


Fig. 1 Concept of diameter gradient fiber.

下、『延伸点』とする)をレーザー光の照射範囲内に精度よく固定でき、直径ムラの発生を抑制できることが報告されている[22]。したがって延伸倍率を連続的に変化させた場合も、より応答性の良い繊維直径変化が期待できる。そこで本研究では、レーザー延伸した場合の繊維直径の応答性を、ヒーター延伸および熔融紡糸の応答性と比較した。比較対象としてこの2つを選択した理由は、ヒーター延伸は上記の様にレーザー延伸とは熱伝達機構が異なり、現在最も一般的な延伸方法であるためであり、また熔融紡糸は熔融延伸倍率の制御範囲が広いという実生産上のメリットを持つためである。いずれについても、繊維直径や延伸応力を決めているのは延伸倍率である。そこで本研究では、変化前後の倍率と、倍率変化時の加速度に注目し、倍率変化に対する応答性を比較した。

2. 実験

2.1 熔融紡糸

日本ポリプロ株式会社製 PP 樹脂(MFR 10 g/10min)を熔融紡糸して as-spun 繊維を作製した。すなわち、株式会社プラスチック工学研究所製短軸押出機 GT-25-30-L を用いて 215℃ で直径 0.7mm、L/D=3 のノズルから吐出量 3.65 g/min(吐出速度 10m/min)で押し出した樹脂を、ノズル面から水面までの距離が 150mm となる位置に設置した冷却ユニット(有効水深 300mm)を通して十分に固化させた後、株式会社神津製作所製巻取機 ET68S 特殊型で巻き取った。延伸実験には、30m/min(熔融延伸倍率 3.0 倍)で巻き取った直径 412μm の繊維を用いた。

2.2 延伸

本研究で用いた延伸装置の概略図を Fig. 2 に示す。繊維は Feed roller から送り出され、Take-up roller で巻き取られる。Feed roller から Take-up roller までの距離は 2.9m である。繊維の加熱に用いた炭酸ガスレーザーまたは接触式ヒーターは Fig. 2 の Heating Unit の位置に設置した。レーザー延伸の場合はレーザーパワーを 20W、ヒーター延伸ではヒーター温度を 140℃ に固定した。炭酸ガスレーザー発振装置には鬼塚硝子社製の PIN-20S 型を使用した。レーザー波長は 10.6mm、公称出力は 20W であり、ビーム直径は公称 5mm、ビームの広がり角は 1.0mrad、偏光状態はランダムである。ビーム直径はレーザー強度が光軸で

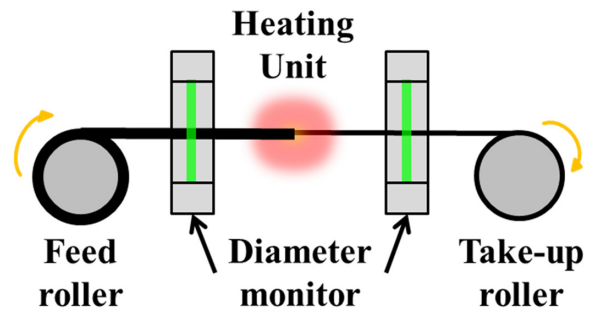


Fig. 2 Schematic diagram of drawing system.

の強度の $1/e^2$ になる位置の直径を意味する。繊維軸方向と垂直な同一平面内でそれぞれ 120° の角度をなす 3 方向からレーザー光を照射することで、繊維内部の温度ムラができないようにした[23]。

2.3 繊維直径変化

熔融紡糸による応答性評価では、吐出速度を 10m/min に固定し、巻取速度を変化させることによって熔融延伸倍率(ドラフト比)を 2.0 倍から 4.0 倍の間で変化させた。一方、延伸工程では、いずれの加熱方法についても繊維の送出速度は 5.0m/min に固定し、延伸倍率を 2.0 倍から 8.0 倍の間で変化させた。巻取速度変化時の加速度は、熔融紡糸の場合 $0.050\text{-}6.0\text{m/s}^2$ 、延伸の場合 $0.10\text{-}6.0\text{m/s}^2$ とした。

延伸工程での繊維直径変化は、延伸装置にセットした直径モニター(KEYENCE 株式会社製デジタル寸法測定器 LS-7000 および LS-7010)でオンライン測定した。一方、熔融紡糸工程で得られた繊維の直径変化は、いったん巻き取った後に同じ装置でオフライン測定した。いずれの実験も 16 回繰り返して、平均繊維直径プロフィールを求めた。

2.4 延伸応力

一定倍率での定常延伸している状態で延伸張力を測定し、延伸後の繊維断面積で割ることで延伸応力を求めた。延伸張力の測定にはエイコー測器株式会社製の定格 1000gf の張力センサーを用い、600 秒間測定して平均した。

3. 結果と考察

3.1 延伸工程における直径応答性

巻取速度変化時の加速度を 6.0m/s^2 にした際に得られた直径プロフィールを Fig. 3 に示す。いずれの加熱方法においても、設定した 1 回分の時間から算出した繊維長で直径プロフィールを区切ることで、直径プロフィールが良く重なっている。したがって、本研究で用いた実験装置では、繊維の滑り等は無視でき、繊維は設定した速度で供給/巻取れているとみなせる。また、直径プロフィール自体も、延伸倍率 2 倍の部分以外では良い再現性を示している。延伸倍率 2 倍では、図 6 に示すように延伸応力

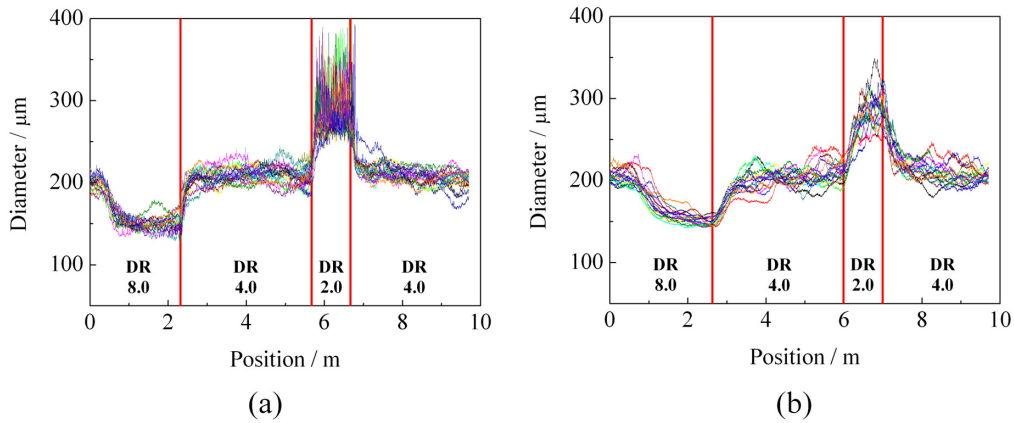


Fig. 3 16 cycles of diameter profiles obtained for (a) laser drawing and (b) heater drawing. The draw ratio changing 4.0 → 8.0 → 4.0 → 2.0 → 4.0 with the take-up speed acceleration rate of 6.0 m/s².

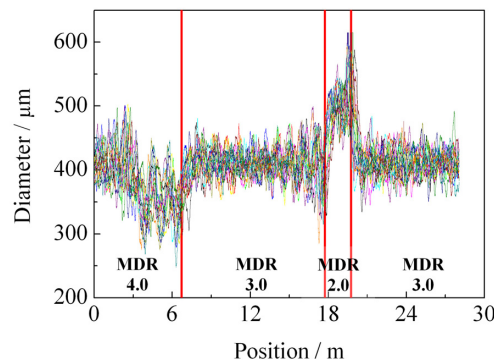


Fig. 4 16 cycles of diameter profiles obtained for melt spinning. The melt draw ratio changing 3.0 → 4.0 → 3.0 → 2.0 → 3.0 with the take-up speed acceleration rate of 6.0 m/s².

が小さく、延伸点自体も不明確だった。変形区間が長い
ため、延伸が不安定になり、直径変動が大きくなったと
考えている。

いずれの倍率変化でも、直径プロフィールは変化後の
延伸倍率に対応する直径に漸近しており、次の倍率変化
前にはほぼ一定になっている。したがって、各倍率変化
直前ではいずれも繊維はほぼ定常的に延伸されていると
みなせる。そこで以後では、注目する倍率変化に先立つ
倍率変化の影響はないものと考えた。

得られた平均繊維直径プロフィールの一部を Fig. 5(a),
(b)に示す。いずれも、巻取速度変化時の加速度が大きい
ほど、より短い距離で繊維直径が変化している。また、
加速度 0.20m/s² 以下ではいずれの加熱方法でも繊維直径
がほぼ同様に变化するが、0.80m/s² 以上ではレーザー延
伸の方が明瞭に短い距離で変化している。したがって、
レーザー延伸の方が、より高速の延伸倍率変化にも追随
できる様である。

3.2 熔融紡糸工程における直径応答性

加速度 6.0m/s² で得られた直径プロフィールを Fig. 4に
示す。また、得られた平均繊維直径プロフィールの一部
を Fig. 5(c)に示す。3.1と同様、各倍率変化の直前には一
定の直径に漸近する傾向がみえることから、各倍率変化
直前ではほぼ定常状態になっているとみなせる。ただし、

延伸の場合(Fig. 3)と比較すると、熔融紡糸(Fig. 4)では全
体的に直径の変動が大きく、16回平均したプロフィール
(Fig. 5(c))でも周期的な直径変動が大きく残っている。本
研究では、延伸実験の結果と比較するため、水冷によっ
て紡糸線長を短縮し、熔融延伸倍率をなるべく小さくし
ている。延伸条件と同様、2.0倍から8.0倍の間での倍率
変化も試みたが、紡糸線が不安定になり、再現性の有る
データが得られなかった。したがって延伸工程との直接
比較は困難であるが、延伸工程と比較すると、短い距離
で精度よく直径を変化させるのは難しそうである。

3.3 各工程における応答性の比較

本研究では、直径変化の応答性を定量的に評価するた
め、実験で得られた繊維直径プロフィールと延伸前後の
繊維直径の計算値から、以下のように定義した『応答距
離』を読み取り、比較・検討した。すなわち応答距離を
倍率が変化し始めてからの応答遅れ距離と考え、測定さ
れた繊維直径と延伸後の繊維直径との差が、延伸前後の
直径変化幅の 37%(1/e)まで減少する繊維長と定義した。

各延伸条件および熔融紡糸条件について読み取った応
答距離を、それぞれ Table1 および Table2 に示す。

応答距離はいずれも加速度が大きくなるにつれて短く
なるが、ヒーター延伸はレーザー延伸に比べ全体的に長
い。また熔融紡糸では、いずれの倍率変化でも、加速度

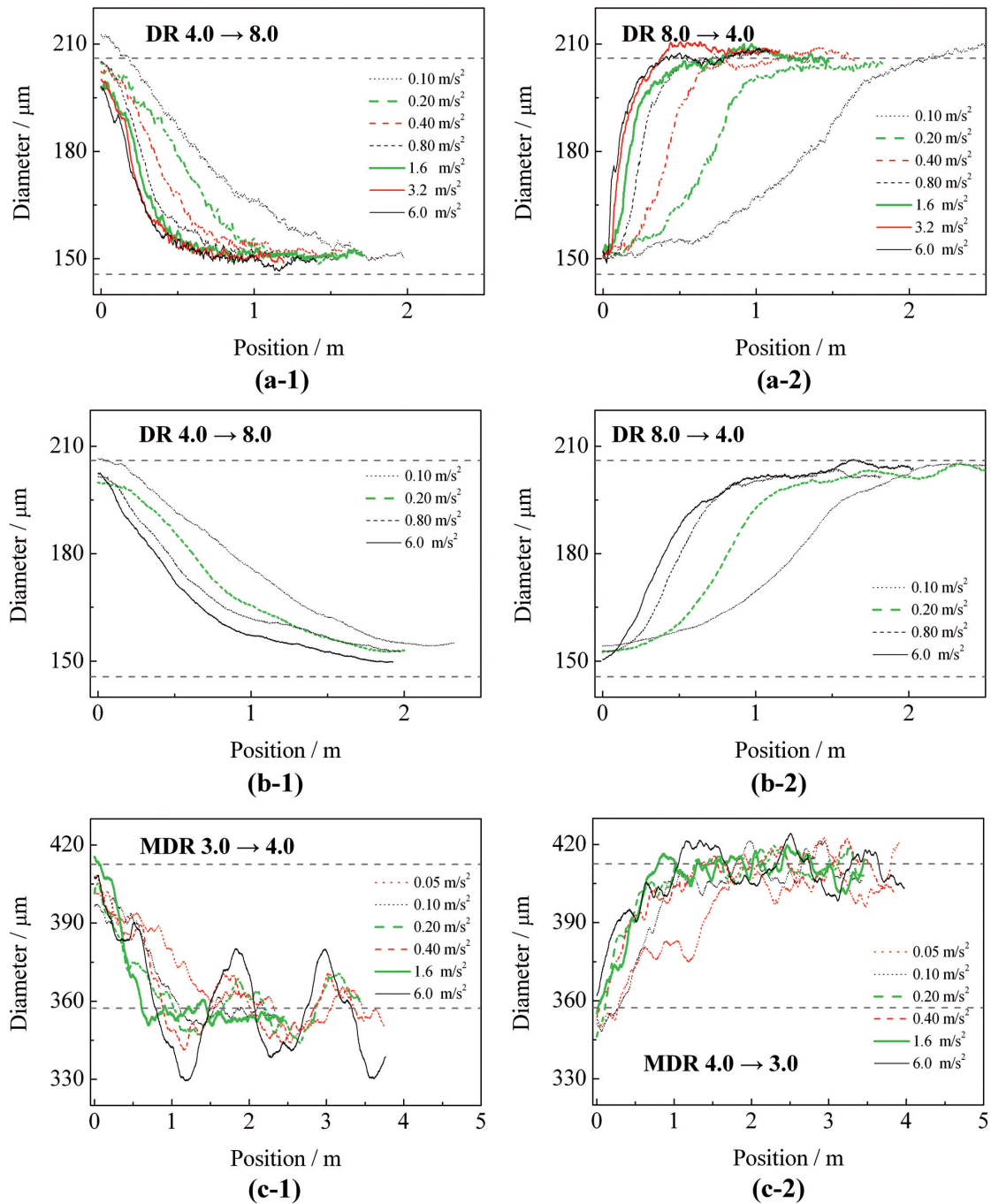


Fig. 5 Averaged diameter profile obtained for (a) laser drawing, (b) heater drawing and (c) melt spinning processes. The start / end (melt) draw ratios and the take-up speed acceleration rates are noted in the figures.

0.10 m/s² 以下では加速度が増すほど短くなっているが、加速度 0.20 m/s² 以上では 40-50 cm で飽和する傾向がみられた。Fig. 5 を見てわかる様に、熔融紡糸の場合、直径変化の変動が大きいため、応答距離も大きくバラつき、速い巻取速度変化には追従できていない。延伸の場合には、繊維直径と同程度の区間で直径が急激に変化するのに対し、熔融紡糸では変形区間が長いいため、不安定になりやすいのだろう。また本研究の紡糸条件に対する樹脂の滞留時間は 0.4-0.6 s。応答距離が飽和する加速度 0.20 m/s² を超えると、加速に要する時間(加速度 0.20 m/s² に対して 0.83 s)が滞留時間を下回る様になる。以上のことより、熔融紡糸によって短い距離で繊維直径を精密に制御するた

めには、滞留時間を短縮する必要がある。

レーザー延伸時とヒーター延伸時の応答距離を比較すると、いずれの倍率変化においても、最も小さい加速度 0.10 m/s² ですら、ヒーター延伸の応答距離はレーザー延伸よりも長い。この差は加速度が増しても無くならず、応答距離の比はむしろ大きくなる。例えば繊維直径が 40% 変化する 4.0 倍→2.0 倍に注目すると、加速度 0.10 m/s² および 6.0 m/s² に対する応答距離は、ヒーター延伸では 65 cm から 34 cm とほぼ半分になるのに対し、レーザー延伸では 36 cm から 8 cm と 1/4 以下にまで縮まる。以上のことから、ヒーター延伸と比較して、レーザー延伸の方が明瞭に優れた応答性を示すことがわかった。ヒーター延伸

Table 1 Response lengths for laser and heater drawings.

Draw ratio	Acceleration / ms ⁻²	Response length / cm	
		Laser drawing	Heater drawing
2.0→4.0 / 4.0→2.0	0.10	22 / 36	44 / 65
	0.20	15 / 22	36 / 51
	0.40	16 / 18	— / —
	0.80	12 / 12	29 / 43
	1.6	13 / 11	— / —
	3.2	11 / 8	— / —
	6.0	11 / 8	27 / 34
4.0→8.0 / 8.0→4.0	0.10	87 / 145	125 / 172
	0.20	67 / 75	89 / 86
	0.40	52 / 44	— / —
	0.80	35 / 26	71 / 57
	1.6	30 / 20	— / —
	3.2	26 / 13	— / —
	6.0	26 / 11	58 / 46

Table 2 Response lengths for melt spinning.

Melt Draw ratio	Acceleration / ms ⁻²	Response length / cm
2.0→3.0 / 3.0→2.0	0.050	54 / 83
	0.10	57 / 69
	0.20	37 / 44
	0.40	46 / 50
	1.6	41 / 43
	6.0	47 / 43
3.0→4.0 / 4.0→3.0	0.050	102 / 142
	0.10	74 / 79
	0.20	39 / 46
	0.40	70 / 47
	1.6	40 / 53
	6.0	65 / 32

で応答性が劣る原因として、延伸点位置の変動しやすさが考えられる。延伸点が移動すると、延伸点に繊維が流入または流出する速度が変わり、結果として延伸倍率変化が遅れる。すなわちレーザー延伸では、レーザー光照射によって繊維を急速かつ均一に加熱できるために延伸点が移動し難いのに対し、ヒーター延伸では繊維の加熱

速度が遅いため延伸点が移動しやすく、巻取速度変化に伴う延伸倍率変化を打ち消す方向に延伸点が移動する結果、レーザー延伸に比べて直径変化が遅れるのだろう。

最短の応答距離に注目すると、溶融紡糸工程では32cmなのに対し、ヒーター延伸では27cm、レーザー延伸では8cmと短くなる。特にレーザー延伸の応答性は明瞭に優

れており、数 cm 程度の区間で直径を精度よく制御した繊維の作製も可能と思われる。

3.4 変化前後の延伸倍率の影響

レーザー延伸とヒーター延伸について、変化前と変化後の延伸倍率に注目する。例えば延伸倍率 2.0 倍–4.0 倍間と 4.0 倍–8.0 倍間の倍率変化に対する繊維直径の変化率はともに 40% であるが、応答距離は加熱方法によらず 4.0 倍–8.0 倍間よりも 2.0 倍–4.0 倍間の方が短い。ただし前者では加速度 3.2m/s^2 まで減少し続けるが、後者では加速度 0.80m/s^2 以上で飽和傾向がみられた。例えば加速度 6.0m/s^2 で延伸倍率を上げる場合の応答距離は、レーザー延伸では 11cm と 26cm、ヒーター延伸では 27cm と 58cm である。これらの条件では、巻取速度が変化する間に巻き取られる繊維の長さは、2.0 倍→4.0 倍で 0.7cm、4.0 倍→8.0 倍で 2.7cm であり、前者の方が短いのは確かだが、いずれも実測された応答距離より 1 桁以上も短い。したがってこれが直接応答距離に影響しているとは考え難く、むしろ以下に示す弾性変形量の影響の方が大きい様に見える。

Fig. 6 に定常的にレーザー延伸した際の延伸応力を示す。延伸倍率の増加に伴って延伸応力は増加し、特に上記で注目した 4.0 倍以上での増加が著しい。すなわち延伸倍率を 2.0 倍→4.0 倍に変化させた場合、延伸応力は 7MPa から 35MPa に増加し、4.0 倍→8.0 倍では 35MPa から 168MPa に増加する。いずれも延伸倍率が 2 倍になるのに対して延伸応力はほぼ 5 倍になる。すなわち延伸応力の比はほぼ同じであるが、延伸応力変化に伴う繊維の伸縮量は 4.0 倍→8.0 倍の方が 5 倍程度大きい。延伸応力が変化すれば繊維の弾性変形量も変化し、延伸点前後の繊維が伸縮するため、繊維が延伸点に流入および流出する速度が変化し、実質的な延伸倍率も変化する。すなわち設定延伸倍率の変化に対して実質的な延伸倍率の変化が遅れる結果、直径変化も遅れるのではないかと考えている。

また、延伸倍率を上げる場合と下げる場合でも応答距離が異なり、加速度の大小によって傾向が逆転する。特に 4.0 倍→8.0 倍では、延伸倍率を下げた 8.0 倍→4.0 倍の

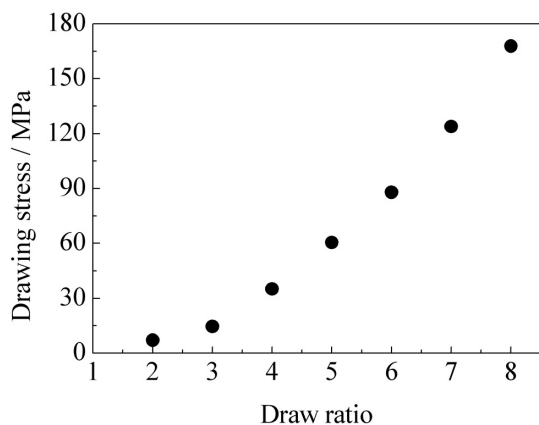


Fig. 6 Drawing stress measured for the steady state laser drawing.

方が高加速度域で明瞭に応答距離が短く、逆に 2.0 倍→4.0 倍では、加速度が小さい場合に 4.0 倍→2.0 倍よりも明瞭に長くなる。延伸倍率および延伸応力の変化幅が同じであるにも関わらず、加速度によって応答距離の大小が逆転するのは、加減速時に巻き取られる繊維長の違いと、倍率変化の遅れで説明できる。すなわち同じ範囲の倍率変化なら、減速し始める時点の糸速度は、加速し始める時点の糸速度よりも速い。このため、例えば延伸倍率を 2 倍の範囲で変化させた場合、減速時の応答距離は、全く遅れが無ければ加速時の 1.91 倍になる。一方で、加速度が大きい場合、特に延伸応力の変化が大きい 4.0 倍⇔8.0 倍では、延伸倍率変化の遅れの方が大きい。したがって上記の結果は、延伸倍率を上げる場合の遅れが、下げる場合よりも大きいことを意味する。この異方向性は、上記の弾性変形では説明できない。おそらく倍率変化に伴う延伸点位置の移動を考える必要が有るだろう。すなわち、延伸倍率を上げる場合の方が下げる場合よりも、相対的に倍率変化初期での延伸応力変化が大きいため、特に大きな加速度で変化させた場合に延伸点が移動しやすく、より大きな遅れを生じたのだと考えている。

4. 結論

本研究では、レーザー延伸・ヒーター延伸・溶融紡糸の各工程で繊維を連続的に引き伸ばす際、(溶融)延伸倍率の連続変化に対する繊維直径の応答性を評価した。倍率を変化させ始めてからの応答遅れ距離(応答距離)を定義して応答性を比較すると、延伸応力の変化が小さい条件の方が良い応答性を示した。また、加速度が大きい場合には、延伸倍率を下げる方が、上げる場合よりも短い距離で応答した。最短の応答距離はレーザー延伸で 8cm、ヒーター延伸で 27cm、溶融紡糸で 32cm であり、レーザー延伸が最も良い応答性を示した。

文献

1. H. Watanabe, H. Iijima, *Sen-i Gakkaishi*, **54**, 124 (1998).
2. Van A. WENTE, *Industrial Engineering Chemistry*, **48**, 1342 (1956).
3. K. Itoh, *Sen-i Gakkaishi*, **49**, 50 (1993).
4. S. Zeng, H. Noguchi, *Preprints of Seikei-Kakou Annual Meeting 2012*, 181 (2012).
5. A. Suzuki, K. Arino, *Polymer*, **51**, 1830 (2010).
6. A. Formhals, US Patent, 1975504 (1934).
7. T. Kikutani, *Sen-i Gakkaishi*, **54**, 37 (1998).
8. S. Yoshida, S. Kishi, R. Itoh, *Japanese Patent Publication*, 2008-303524.
9. A. Shikawatari, Y. Kobayashi, J. Hanaoka, *Japanese Patent Publication* 2010-084270.
10. A. De Rovere, B. P. Grady, R. L. Shambaugh, *Journal of*

- Applied Polymer Science*, **83**, 1759 (2002).
11. A. Suzuki, H. Ohnishi, *Journal of Applied Polymer Science*, **102**, 2600 (2006).
 12. Li-Qiang Shen, Zhi-Kang Xu, You-Yi Xu, *Journal of Applied Polymer Science*, **84**, 203 (2002).
 13. Jea-Jin Kim, Jeong Rim Hwang, Un Young Kim, Sung Soo Kim, *Journal of Membrane Science*, **108**, 25 (1995).
 14. H. Matsuyama, H. Okafuji, T. Maki, M. Teramoto, N. Kubota, *Journal of Membrane Science*, **223**, 119 (2003).
 15. Tae Hwan Oh, *Journal of Applied Polymer Science*, **101**, 1362 (2006).
 16. Stephanie Houis, Manfred Schmid, Jorn Lubben, *Journal of Applied Polymer Science*, **106**, 1767 (2007).
 17. K. Nakata, K. Fujii, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, M. Numata, M. Kamiyama, *Macromol. Rapid Commun.*, **28**, 792 (2007).
 18. The society of fiber science and technology, Japan, "Sen-I Binran" 2 nd Ed. 313 (1995).
 19. .H. Isoda, H. Yasuda, *Japanese Patent Publication*, S59-157310.
 20. A. Takeno, T. Ozeki, H. Miwa, T. Yokoi, *Sen-i Gakkaishi*, **63**, 173 (2007).
 21. H.Ito, S.Yamagata, T.Kikutani ; Proceedings of the Polymer Processing Society 20th annual meeting, #79 (2004).
 22. T. Ikaga, M. Endo, K. Kuroda, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, *Sen-i Gakkaishi*, **64**, 181 (2008).
 23. Y. A. Kang, K. H. Kim, S. Ikehata, Y. Ohkoshi, Y. Gotoh, M. Nagura, H. Urakawa, *Polymer*, **52**, 2044 (2011).