

## 研究論文

## アクチュエータ繊維の製造技術に関する研究

田中利幸<sup>\*1</sup>、松浦勇<sup>\*1</sup>、宮本晃吉<sup>\*2</sup>、田中俊嗣<sup>\*3</sup>、佐藤嘉洋<sup>\*3</sup>

## Development of Fiber Actuator

Toshiyuki TANAKA<sup>\*1</sup>, Isamu MATSUURA<sup>\*1</sup>, Koukichi MIYAMOTO<sup>\*2</sup>, Toshitsugu TANAKA<sup>\*3</sup> and Yoshihiro SATOU<sup>\*3</sup>Owari Textile Research Center<sup>\*1,2</sup> Mikawa Textile Research Center<sup>\*3</sup>

直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE)のモノフィラメントに強撚を加え、コイル形状に加工した繊維が、加熱・冷却による伸縮を示し、アクチュエータとして動作することを確認した。繊維の延伸倍率・織度・コイル化時に加える荷重などとアクチュエータ特性との関連を調査した。また、中空スピンドルを用いることで、フィラメントのコイル状繊維への連続的な加工ができることを確認した。さらに、リング撚糸機を用いて双糸とすることで形状の安定したアクチュエータ繊維を連続的に生産することができた。

## 1. はじめに

ウェアラブルデバイスは人が身に着けて使用するデバイスであり、センシング、身体動作補助など多様な機能を持つ製品の開発が行われている。繊維製品は衣服に代表されるように日常的に人の身近で使用される製品であり、ウェアラブルデバイスとしての展開が期待される。

最近、ナイロンのフィラメントに強撚を加えてコイル状に加工した繊維が、加熱・冷却による繰り返し伸縮動作を示し、アクチュエータとして利用可能であることが報告された<sup>1)</sup>。柔軟・軽量でありながら、伸縮量、収縮時の発生力ともに人の筋肉に匹敵する数値を示すことから、モーターなどの機械類に代わるウェアラブルデバイスの駆動源に応用できる可能性があり、注目を集めている<sup>2)</sup>。

このコイル状アクチュエータ繊維はまだ研究が始められたばかりであり、繊維特性がアクチュエータ動作に与える影響やコイル化するための加工技術など検討が不十分な要素が多い。特にフィラメントをコイル状に加工する際には、一般的な撚糸加工に加えられる撚り数よりもはるかに多くの撚りを加える必要があるため、撚糸機などを用いて連続的にコイル化した例は報告されていない。繊維としての特徴を生かし、織り・編み・組みなどによる製品化を図るためには、ある程度以上の長さの繊維を連続的に加工する技術の開発は不可欠であると考えられる。

本研究では加熱・冷却により伸縮するコイル状アクチュエータ繊維の基本特性を把握するため、織度や延伸倍率などとアクチュエータ特性との関連性を調査した。

また、撚糸機を用いてコイル状アクチュエータ繊維を連続的に生産する技術の開発を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 試料作製

## 2.1.1 LLDPE モノフィラメントの紡糸

アクチュエータとして動作する繊維素材としては、ナイロンや LLDPE が報告されている。中でも LLDPE は動作温度が低いという利点があるため、本研究では LLDPE を原料として用いることとした。溶融紡糸機(中部マシン社製)を用いて LLDPE(プライムポリマー社製モアテック 0168N)のモノフィラメントを製造した。紡糸は温度 240℃、ノズルφ1.6×4H、エアーギャップ 30mm、延伸温水槽 70℃の条件で行った。試作したモノフィラメントの織度・延伸倍率を表 1 に示す。

表 1 作製した LLDPE モノフィラメント

試料 No.	織度(dtex)	延伸倍率
1	811	4 倍
2	827	6 倍
3	817	8 倍
4	467	8 倍

## 2.1.2 コイル形状への加工

紡糸したモノフィラメントを加撚しコイル状に加工した。加工はバッチ式で行い、約 2m の長さの繊維に一定の張力を加えながら約 3000 回加撚した。

コイル状に加工された繊維はそのままでは撚り戻りが起こるため、形状が安定しない。そこで、2 本のコイ

\*1 尾張繊維技術センター 素材開発室 \*2 尾張繊維技術センター 機能加工室 (現産業技術センター 自動車・機械技術室) \*3 三河繊維技術センター 産業資材開発室 (現三河繊維技術センター 製品開発室)

ル状繊維を逆方向に撚り合わせて、双糸とすることで形状を安定させた。

## 2.2 アクチュエータ特性の評価

コイル状繊維のアクチュエータ特性を評価するため、加熱・冷却による伸縮挙動を調べた。加熱・冷却は約70mmのコイル状繊維を一定の荷重下で90℃の電気炉に出し入れすることで行い、90℃及び室温での試料長を目視で読み取った。

## 2.3 アクチュエータ繊維の連続生産

コイル状になるまで加熱するには、数千回/mの撚り数が必要となるため、リング撚糸機などでは対応が難しい。そこで、この撚り回数に対応できる中空スピンドル撚糸機を用いた連続加熱を検討した。

試料には No.2 の繊維を用いた。コイル形状への加工には、中空スピンドル撚糸機(オゼキテクノ社製ツイスターON-700NF-III)を用いた。また、2本のコイル状繊維をリング撚糸機(カキノキインターナショナル社製ツイストワインダ TW-D 型)を用いて双糸に加工した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 コイル状アクチュエータ繊維の製造

紡糸したモノフィラメントを加熱してコイル状に加工した。ある程度の撚りを加えたところでキンクが発生し、さらに撚りを加えるとキンクを起点としてコイルが形成された(図1)。この時、糸にかかる張力が小さすぎる場

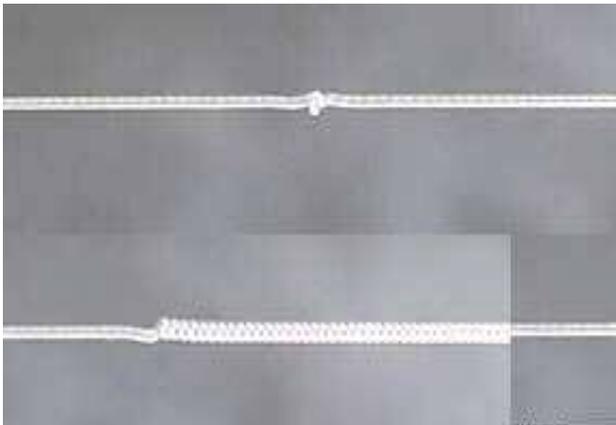


図1 加熱によるキンクの発生(上)とコイル化(下)

合は、スナールが発生する。一方で、張力が大きすぎる場合には、繊維が切断するため、適度な張力をかけながら加熱する必要があった。また、約2mのモノフィラメントからできるコイル状繊維は約70cmであった。

作製したコイル状繊維は解撚トルクを利用して2本を撚り合せ、双糸とすることで形状を安定させることができた(図2)。以後の実験はすべて双糸としたコイル状繊維を用いて行った。なお、双糸となったコイル状繊維の上撚り数を測定したところ、約200回/mであった。

図2 双糸に加工したコイル状繊維

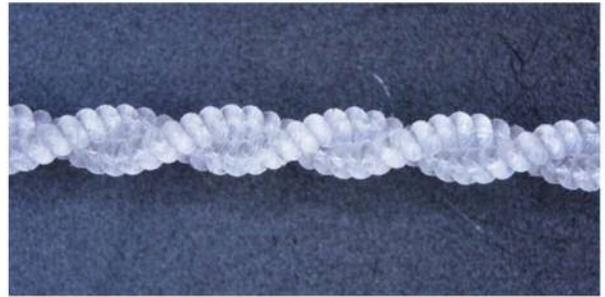


図2 双糸に加工したコイル状繊維

### 3.2 アクチュエータ特性の評価

No.3の繊維を98cNの張力下でコイル化したものを試料とし、加熱・冷却による試料長の変化を測定した。加熱・冷却は試料に147cN、196cNの負荷荷重をかけながら行った。試料長の変化を図3に示す。初めに荷重をかけた状態で90℃まで加熱した際には、一度繊維が伸長した(a)。これを室温まで冷却すると、繊維はさらに伸長した(b)。再度90℃まで加熱することで、(a)とほぼ同じ長さまで繊維の収縮が発生した(c)。以降は室温-90℃間で同程度の長さの繰り返し伸縮が観察された。初期の試料の伸長(a)が発生する原因は明らかとなっていないが、すべての試料で同様の現象が観測された。以降の実験では(a)の過程までを試料調整とし、繰り返し動作の基準となる(b)の状態を初期試料長とみなして伸縮率を評価した。

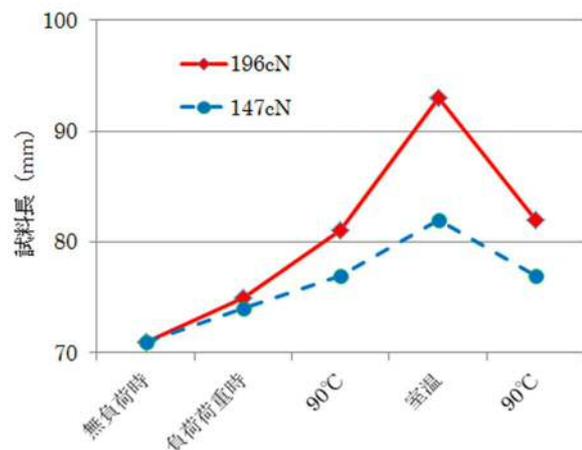


図3 加熱・冷却に伴う試料長の変化

加熱・冷却時の負荷荷重を147cNと196cNの場合を比較すると、147cNの場合の伸縮率は6%、196cNの場合の伸縮率は11%となり、196cNの方が大きな伸縮率を示した。荷重を245cNまで増加させると、加熱時にコイルが破壊されて伸縮が発生しなくなった。以上のこ

とから、コイル状繊維のアクチュエータ特性を最大限に発揮させるためには、適切な荷重下で動作させることが必要であると考えられる。

次に延伸倍率、織度及びコイル化時の張力の異なるコイル状繊維を作製し、それぞれに対して、最大の伸縮率を示す荷重を調査した。荷重は 49cN ずつ変化させた。結果を表 2 に示す。最大の伸縮率を示す荷重は延伸倍率・織度・コイル化時の荷重それぞれが大きくなるにつれて増加すると推測され、アクチュエータ特性を制御可能であることが示唆された。一方で、伸縮率については No.1 の試料がやや小さな値を示したものの、そのほかの条件では大きな差は見られなかったことから、延伸倍率や織度の影響は受けにくいもの原材料の影響と推測される。

表 2 コイル状繊維の特性評価

試料	コイル作製時の張力(cN)	最大の伸縮率(%)	最大伸縮時の荷重(cN)
No.1	196	7	147
No.2	196	12	196
No.3	196	11	245
No.3	98	12	196
No.3	294	10	294
No.4	196	10	196

### 3.3 撚糸機を用いた連続的なコイル化手法の検討

前記のように、コイル化により繊維の長さは約 3 分の 1 まで減少した。このことから、バッチ式で大サイズのコイル状繊維を作製することは困難であり、将来的に連続的な生産技術が必要になると考えられる。

使用した中空スピンドルを図 4 に示す。通常、中空スピンドルはカバリング糸の作製などに使用される。カバリングではボビンに巻かれた繊維は中空スピンドル内を通る別の繊維に巻き付く形となるが、芯となる繊維を用いないことで、中空スピンドルのボビンに巻かれた繊維自身を加撚することができる。カバリング機は撚糸機に比べて撚り数を大きくすることができるため、コイル化に十分な撚りを加えることが可能となる。

No.2 の繊維を用いて、加工条件の検討を行った。撚り数が少ない場合にはコイル部と直線部が断続的に現れた。また、スピンドル回転数が多すぎる場合にはスナールや繊維の切断が発生した。スピンドル回転数 8000rpm、巻き取り速度 2.1m/min で繊維を加撚した結果を図 5 に示す。最適な条件の設定により、連続的なコイル状への加工が可能となることが分かった。作製したコイル状の連続繊維にリング撚糸機を用いて、200 回

/m の撚りを加え、双糸に加工した。作製した双糸のアクチュエータ特性を評価ところ、荷重 147cN 下で伸縮量 10%のアクチュエータとして動作することを確認した。



図 4 中空スピンドル

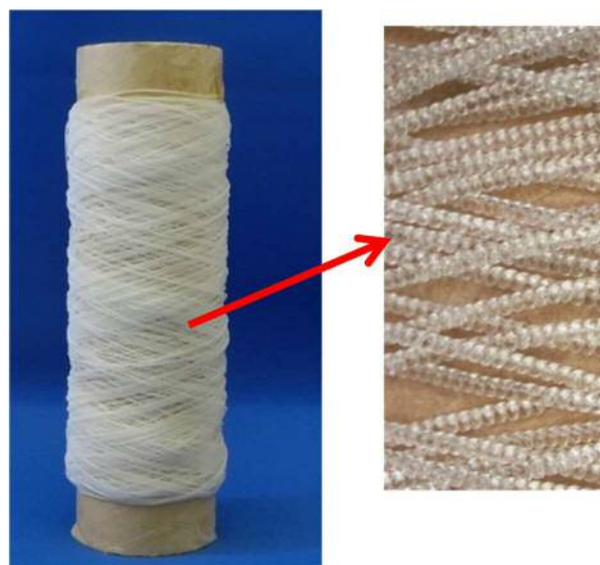


図 5 中空スピンドルを用いて加工したコイル状繊維

## 4. 結び

- (1) LLDPE モノフィラメントに強撚を加えてコイル状繊維を作製し、そのアクチュエータ特性を評価した。繊維の延伸倍率・織度・コイル化時に加える荷重などによって、アクチュエータ特性が変化することを明らかとした。
- (2) 中空スピンドルを用いることで、コイル状繊維への連続的な加工ができることを確認した。さらに、リング撚糸機を用いて双糸とすることで形状の安定し

たアクチュエータ繊維を連続的に生産することができた。

今後は連続的に生産したコイル状アクチュエータ繊維を用いた製織技術について検討する。また、カーボンなどの練り込みや繊維へのメッキ加工などにより繊維に導電性を付与し、電流によって抵抗発熱させることで、加熱・冷却を電氣的に制御する技術についても検討する。

### 謝辞

燃糸機を用いたコイル状繊維の作製にあたっては、伴野燃糸株式会社様にご協力いただきました。感謝申し上げます。

### 文献

- 1) Carter S. Haines, Márcio D. Lima, Na Li, Geoffrey M. Spinks, Javad Foroughi, John D. W. Madden, Shi Hyeong Kim, Shaoli Fang, Mônica Jung de Andrade, Fatma Göktepe, Özer Göktepe, Seyed M. Mirvakili, Sina Naficy, Xavier Lepró, Jiyoung Oh, Mikhail E. Kozlov, Seon Jeong Kim, Xiuru Xu, Benjamin J. Swedlove, Gordon G. Wallace, Ray H. Baughman: *Science*, **343**, 868(2014)
- 2) 平岡牧, 金子由利子, 中村邦彦, 林直毅, 田頭健司, 荒瀬秀和: パナソニック技報, **1(63)**, 95(2017)
- 3) 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二: 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, **2A1-A02**(2017)