

研究論文

アクチュエータ繊維の加工技術に関する研究

田中利幸^{*1}、松浦勇^{*1}、加藤良典^{*2}、佐藤嘉洋^{*3}

Processing Technology of Actuator Fiber

Toshiyuki TANAKA^{*1}, Isamu MATSUURA^{*1}, Yoshinori KATO^{*2} and Yoshihiro SATO^{*3}Owari Textile Research Center^{*1*2} Mikawa Textile Research Center^{*3}

LLDPE などのモノフィラメントに強撚を加えてコイル形状に加工した繊維は加熱・冷却による伸縮を示し、アクチュエータとして動作する。伸縮動作を電氣的に制御するため、導電糸を組み合わせたコイル状繊維を撚糸機を用いて連続的に生産する技術を開発し、これを織物へと加工することにも成功した。製造した織物に通電し、そのアクチュエータ特性を評価した結果、100 回の繰り返し後でも性能の低下がなく伸縮動作を示すことを確認した。

1. はじめに

最近、ナイロンなど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、スマートテキスタイルに応用できる素材として注目されている^{1)~3)}。このコイル状繊維は柔軟・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への応用が期待されている。

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、その生産・加工技術は確立されていない。我々はこれまでにコイル状アクチュエータ繊維をテキスタイルへと加工するための技術開発を行い、撚糸機を用いたモノフィラメントのコイル形状への連続加工技術、コイル状繊維の製織技術などについて検討してきた^{4),5)}。本研究では、より実用的な製品の開発を目指し、伸縮動作制御を電氣的に制御するためのコイル状繊維への導電性付与とそのテキスタイルへの加工技術について検討した。

2. 実験方法

2.1 アクチュエータ繊維の製造

2.1.1 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、ナイロンや直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE)が報告されている。LLDPE はナイロンに比べて動作温度が低いという利点があるため、本研究では LLDPE を用いる

こととした。

原料に LLDPE 樹脂((株)東ソー製ニポロン-Z HF250K)を使用し、熔融紡糸機((株)中部マシン製)を用いて 780dtex のモノフィラメントを作製した。

2.1.2 コイル形状への加工

初めに意匠撚糸機((株)オゼキテクノ製トライツイスターON-700NF-III)を用いて LLDPE モノフィラメントをコイル形状に加工した。次に、同じく意匠撚糸機を用いてコイル状繊維へ導電糸のカバリングを行った。導電糸にはステンレス線($\phi 0.05$ 、 $\phi 0.1$)及び銀メッキ糸(ミツフジ(株)製 AGposs[®]、110dtex)を使用した。コイル状に加工した繊維はそのままでは撚り戻りが起こるため、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(株)製ツイストワインダ TW-D 型)を用いて双糸に加工した。

2.2 アクチュエータ繊維の製織

製造したコイル状アクチュエータ繊維の双糸を緯糸として、サンプル織機((株)トヨシマビジネスシステム製 TNY101A-20)による試織を行った。製織の規格を表 1 に示す。

表 1 織物規格

経糸	綿 10/2
織組織	からみ織
経密度(本/inch)	8
緯密度(本/inch)	8

※密度はいずれも機上

*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 素材開発室(現機能加工室) *3 三河繊維技術センター 製品開発室

2.3 アクチュエータ特性の評価

コイル状繊維及びその織物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の測定を行った。約 100mm の試料を一定の負荷荷重下で 90℃の電気炉に出し入れし、90℃及び室温での試料長を目視で測定した。負荷荷重を変えながら測定を行うことで、繰り返し伸縮可能な最大の負荷荷重を決定し、これをアクチュエータとしての発生力とした。また、その時の伸縮量も評価した。

2.4 抵抗発熱による伸縮動作の確認

通電による抵抗発熱を用いた伸縮動作の評価を行った。製織した織物から緯糸方向に試料を切り出し、上下を導電性テープで固定することで、緯糸間を導通させた。一定の負荷荷重下で、直流安定化電源(菊水電子工業(株)製 PCM18-2A)を用いて通電・遮断を繰り返し、その時の変位量をレーザー変位計((株)キーエンス製 LC-2450)で測定した。通電・遮断は2分間隔で行い、変位量の取り込み間隔は1秒とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 アクチュエータ繊維の製造条件の検討

意匠撚糸機を用いて連続的にコイル形状に加工した繊維を図1に示す。中空スピンドルの回転数、引き取り速度、フライヤー形状などを適切に設定することにより、連続的にコイル状に加工することが可能である。



図1 撚糸機を用いて加工したコイル状繊維

加工したコイル状繊維に導電糸のカバリングを行った。導電糸にステンレス線 φ0.05 を用いて、1000T/m でカバリングした試料の外観を図2に示す。コイル化時の撚り方向(S方向)と同方向(S方向)に導電糸をカバリングした場合、単糸の状態では問題なくカバリングすることができるが、双糸へ加工した際に導電糸のたるみが発生した。双糸への加工によってカバリング方向と逆方向の捻りが加わることで、カバリング糸にたるみが発生するも

のと考えられる。そこで、導電糸のカバリングをコイル化時の撚り方向と逆方向(Z方向)としたところ、単糸・双糸ともに安定した構造を得ることができた。

S方向



Z方向



図2 導電糸をカバリングしたコイル状繊維

導電糸の種類、カバリング数を変えながらカバリングを行い、これを双糸に加工した。電気炉を用いた加熱・冷却でアクチュエータ特性を評価した。また、コイル状繊維双糸の抵抗値も測定した。結果を表2に示す。

表2 コイル状繊維のアクチュエータ特性

導電糸	カバリング数(T/m)	伸縮率 (%)	発生力 (cN)	抵抗値 (Ω/10cm)
SUS線 φ0.05	1000	14	245	65
	4000	14	245	184
	8000	11	245	304
SUS線 φ0.1	1000	7	294	17
	4000	7	294	49
銀メッキ糸	4000	8	294	37
カバリングなし		14	245	—

導電糸としてステンレス線 φ0.05 を用いた場合、カバリング数 1000T/m, 4000T/m ではカバリングがない場合と同等の伸縮率・発生力を示したが、8000T/m では伸縮率に低下が見られた。また、ステンレス線 φ0.1 や銀メッキ糸を用いた場合にも、伸縮率に低下が見られた。カバリング数が大きくなったり、カバリング糸が太くなったりした場合には、カバリング糸によって伸縮動作が妨げられるものと考えられる。一方、カバリング数が小

さすぎる場合には、導電糸と LLDPE フィラメントの接触面積が小さくなり、通電による抵抗加熱時にフィラメント側の温度ムラが発生しやすくなると予想される。以上のことから、以後の実験ではステンレス線 $\phi 0.05$ 、カバリング数 4000T/m のものを使用することとした。

作製したコイル状繊維双糸の外観を **図 3** に示す。外観から導電糸をカバリングしたコイル状繊維はカバリングしない場合に比べて、上撚り数が減少していることが分かる。これは導電糸がコイル化方向と逆方向にカバリングされているため、撚り戻りが妨げられたためと考えられる。上撚り数を測定したところ、導電糸がない場合の上撚り数が 240T/m であったのに対し、ステンレス線 $\phi 0.05$ を 4000T/m でカバリングした場合の上撚り数は 160T/m となった。

sus $\phi 0.05$ 、1000T/msus $\phi 0.05$ 、4000T/msus $\phi 0.05$ 、8000T/msus $\phi 0.1$ 、1000T/msus $\phi 0.1$ 、4000T/m

銀メッキ糸、4000T/m



導電糸なし



図 3 導電糸の違いによるコイル状繊維の外観

なお、LLDPE モノフィラメントに対して、先に導電糸をカバリングし、これをコイル形状に加工する方法についても検討したが、バッチ式では加工できるものの、

撚糸機を用いた連続加工を安定させることはできなかった。カバリングによりフィラメントの剛性が高くなりすぎること、カバリングにムラが発生することなどが原因と考えられる。

3.2 アクチュエータ繊維の製織

導電糸をカバリングしたコイル状繊維を緯糸に用いた織物を製織した。これまでの研究から、組織をからみ織とすることで緯糸の伸縮動作が妨げられにくくなり、織物に加工後もアクチュエータ特性の低下を抑えることができることが分かっている。

試織した織物を **図 4** に示す。製織後の織物について、緯糸 50 本分の抵抗値を試料の全幅で測定した。すべての緯糸でほぼ同一の抵抗値を示し、導電糸が断線することなく、織物へと加工できていることを確認した。



図 4 緯糸にコイル状繊維を用いた織物

作製した織物から緯糸方向に幅 2.5cm(緯糸 8 本)で試料を切り出し、糸の場合と同様の方法でアクチュエータ特性を評価した結果、伸縮率は 14%、発生力は 1770cN であった。伸縮率は糸の場合と同等、発生力も約 9 割の値を示し、アクチュエータ特性を損なうことなく、織物へと加工することができた。

3.3 通電による伸縮動作

製織した織物に通電し、抵抗発熱による伸縮動作の評価を行った。

試料の幅は約 2.5cm(緯糸 8 本)、長さ約 100mm とした。このときの抵抗値は 25 Ω であった。負荷荷重は 1770cN、印加電圧は 10V および 11V とし、2 分間隔での通電・遮断を 100 回繰り返した。結果を **図 5** に示す。1 サイクル内では通電・遮断に伴う収縮と伸長が見られ、アクチュエータとして動作することを確認することができた。また、電圧 10V では 100 サイクル後であっても、ほとんど性能が低下することなく、繰り返しの伸縮動作をすることを確認した。印加電圧を 11V とした場合には、徐々に全体の試料長が伸長した。電圧が高くなると、温度が高くなりすぎるために試料が劣化していくものと考えられる。なお、この際でも 1 サイクルあたりの伸縮量についてはほぼ特性を保つことが分かった。

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 意匠撚糸機を用いて LLDPE モノフィラメントをコイル状繊維へ加工するとともに、ここに導電糸をカバリングすることで、導電性を持つコイル状繊維を連続的に生産することができた。
- (2) 導電性のコイル状繊維を緯糸に用いた織物を製織した。ここに通電することで、抵抗発熱によって伸縮し、アクチュエータとして動作することを確認した。また、100 回の繰り返し動作後であってもアクチュエータ特性にほとんど劣化がないことを確認した。

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) 舛屋賢, 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)
- 4) 田中利幸, 松浦勇, 加藤良典, 佐藤嘉洋, 田中俊嗣: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **9**, 92(2020)
- 5) 田中利幸, 松浦勇, 加藤良典, 田中俊嗣, 佐藤嘉洋, 宮本晃吉: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **8**, 76(2019)

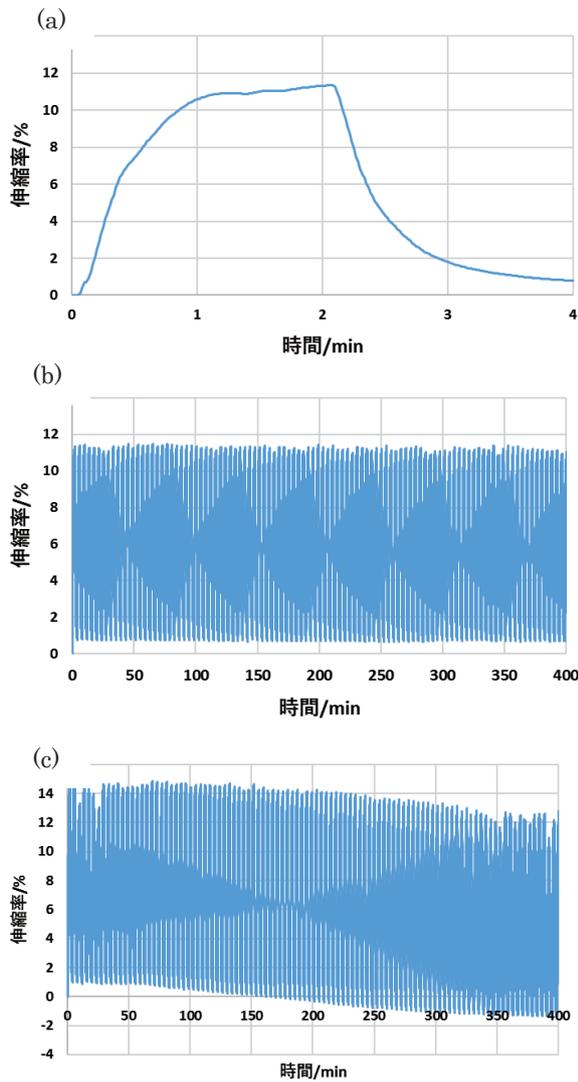


図5 通電による試料長の変化 (a)10V_1 サイクル、(b)10V_100 サイクル、(c)11V_100 サイクル