

# 柔軟な高分子人工筋アクチュエータを用いたソフトロボティクス・メカトロニックデバイスの研究開発

豊橋技術科学大学 機械工学系 教授  
高木 賢太郎

## 1. テーマ設定の背景

高分子アクチュエータ材料は、既存の電磁モータ技術に比べ柔軟・軽量で新しいアクチュエータとして有望視されており、国内外で材料開発の研究が進んでいる。また、それら新しいアクチュエータの実応用に向けた取り組みも大学研究機関のみならず企業でも盛んに始まっている。これまで日本国内における材料研究のレベルは高く、先駆的な研究も多い。一方で、継続的な応用研究や製品化の例が国外と比べてまだ少ない印象がある。高分子アクチュエータの実用化ができるか否かは、材料のシーズ技術と企業のニーズを互いに結びつけられるかにかかっていると思われる。

高分子アクチュエータ開発から応用に至る研究は幅広いスペクトルを持ち、材料開発では高分子化学や材料科学、材料特性の計測では高分子物理学、連続体力学や熱力学、シミュレーションでは計算物理学、また応用に際しては制御工学やロボティクスと多岐にわたっている。筆者の研究はアクチュエータ工学と制御工学をバックグラウンドとし、材料科学者や企業研究者と連携し、高分子アクチュエータの材料開発と基礎研究から応用研究まで一貫して行い、実用化を目指すものである。

## 2. 素形材分野との関連性

本研究<sup>1)</sup>は「異分野と融合する技術・研究」に関連し、ロボティクス・メカトロニクス用の新しいアクチュエータとして有用な技術であると考えられる。近年のロボット分野では、柔軟な体や柔軟なアクチュエータをもつロボットに関する学問、ソフトロボティクス・ソフトメカトロニクスが注目を集めている。人体に取り付ける柔軟装具やヒトと触れ合うような柔軟ロボット(ソフトロ

ボティクス)、生物模倣(バイオミメティクス)に基づく柔軟なロボット、柔軟で無音の新型モータ(ソフトメカトロニクス)などへの展開が期待されている。

## 3. 研究開発の成果

図1はStraight Twisted Polymer Fiber (STPF) アクチュエータとそのねじりトルクを計測するための実験装置である。STPFアクチュエータを用いることで、無音モータを作ることができる<sup>2)</sup>。STPFとは、強加熱した高分子繊維が熱によってねじれる動作をアクチュエータとして利用するものである。STPFをさらに強加熱すると、コイル形状になり、筋肉のように収縮動作をする。これを、Twisted and Coiled Polymer Fiber (TCPF) アクチュエータと呼ぶ。STPFやTCPFは、市販の釣糸から容易に作るができるため、釣糸人工筋アクチュエータとも呼ばれる。釣糸人工筋アクチュエータは2014年にテキサス大のグループが発明した新しい繊維アクチュエータの一種であり<sup>3)</sup>、熱によって動作する。またジュール加熱によって電場で駆動することも可能である。軽量、安価であり、他の種類の高分子アクチュエータと比較しても大きな発生力を発揮できる。

筆者は、このアクチュエータの発生トルクと発生張力を予測できる数理モデルを初めて明らかにした。具体的には、未撚繊維の熱ひずみと繊維の長さ・直径、初期ねじり率 $\Phi_0$ 、繊維の剛性マトリクス $K$ をもとに発生トルク $\Delta\tau_{act}$ と発生張力 $\Delta f_{act}$ を計算、予測でき、アクチュエータを設計することが初めて可能となった<sup>1)</sup>。

$$\begin{bmatrix} \Delta\tau_{act} \\ \Delta f_{act} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_0} \begin{bmatrix} GJ & K_c \\ K_c & AY_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta L \end{bmatrix}$$

ここで、 $\Delta\phi$ と $\Delta L$ はfree deformationの角度と伸びであり、未熱繊維の熱ひずみ ( $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33} = \varepsilon_{22}$ ) ならびに初期ねじり率 $\Phi_0$ によって予測できる<sup>1)</sup>。さらに、実験と数理モデルを用いた解析により、未熱繊維の長手方向の熱収縮 $\varepsilon_1$ ではなく、接線・半径方向の熱膨張 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ が駆動に支配的に寄与することを明らかにした。図2に模式図を示す。これは、アクチュエータのマクロな収縮変形(やねじり変形)は、ミクロには(収縮ではなく)正の熱膨張によって生じることを意味しており、直観に反する驚くべき結果である。このことは、今後の材料設計に関して重要な知見となりうる。

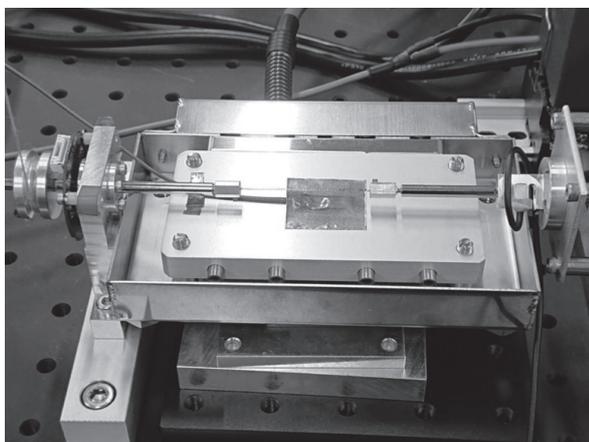


図1 Blocking torque and tension計測装置に取り付けられたSTPFアクチュエータ<sup>1)</sup>。

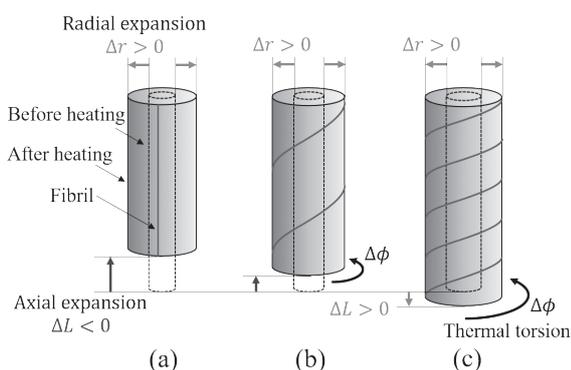


図2 加熱により (a) の未熱繊維は収縮するが、(b) (c) の加熱繊維はねじれて伸長する<sup>1)</sup>。

#### 4. 訴求点

本研究<sup>1)</sup>は、熱駆動高分子人工筋を用いた無音モータを初めて開発するとともに、その発生トルクと発生張力を表す数理モデルを明らかにし

た。実用性・貢献度としては以下の通りである。アクチュエータ開発において、動作原理無しでは系統的な設計を行うことができない。つまり、目標仕様が与えられた際に、サイズ・材料定数・形状を定めることができず、試行錯誤になってしまう。これまで、STPF(ねじり型の高分子繊維アクチュエータ)の自由回転の数理モデルはあったものの、発生力や発生トルクを与える数理モデルは存在していなかった。論文では、STPFアクチュエータの設計論とモデルベース制御に不可欠な物理原理の一部を初めて明らかにした。

将来的に、HEVやEVなど静粛性が必要とされるこれからの自動車用途や、MRIなど高磁場環境など磁性体を用いることができない環境での用途が期待される。さらに、収縮型のTCPFアクチュエータを人工筋肉として用いて、ソフトロボット、サポート装具などのウェアラブルロボティクス、ハプティックデバイス、衣類へアクチュエータを組み込んだアクティブ衣類など、さまざまな用途が期待される。

#### 参考文献

- 1) K. Takagi et al., Modeling and characterization for straight twisted polymer fiber actuators in blocked torsion: effect of radial thermal expansion, *Smart Materials and Structures*, vol.30, no.6, 065023, (2021)
- 2) J. Tanaka et al., Compact and low-noise actuator using highly twisted polymer fiber, 第29回 日本MRS年次大会, (2019)
- 3) C. Haines et al., Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread, *Science*, vol. 343, pp.868-872, (2014)