

高分子アクチュエータ (3)

Column 33 及び 34 ではフィルム状の導電性高分子を用いた高分子アクチュエータの例を紹介したが、本コラムではファイバー状ポリアニリン (PANI) を用いた電解液フリーのアクチュエータについて紹介する¹。このアクチュエータの作用機構は流す電流のジュール熱による伸長であるが、大きな特徴は磁場存在下での高速応答 (1 分間に 9,000 サイクル) 及び良好な耐久性 (100 万回以上のサイクル寿命) にある。

1. ファイバー状 PANI の製造

ファイバー状の導電性高分子は PPy や PEDOT:PSS でも知られているが、機械的強度があつて製造が容易なことより PANI を選択している。PANI は一般的に界面活性剤を用いた水系エマルジョン系で合成されるが、ここでは界面活性剤を用いない self-stabilized polymerization (SDP) 法を採用している²。この方法で得られる PANI は高分子量で機械的強度がありかつ、金属的な高い電気伝導度を示す。SDP 法で重合して得られた nm サイズの PANI 粉末を樟脳スルホン酸 (CSA) と混合して乳鉢で粉碎し次いで、m-cresol を添加してホモジナイザーで混合攪拌する。このようにして得た CSA がドーブした PANI ゲルを、シリンジより EtOH 中に押し出すことにより 5-200 μm の径を持った、柔軟性を有する 1 m 以上の長さのファイバー状 PANI を製造した。ファイバー状 PANI のヤング率及び引張強度はそれぞれ ~ 280 及び ~ 35 MPa で、電気伝導度は ~ 270 S/cm であった。

2. アクチュエータの基本性能

径が 64 μm で長さが 2.2 mm のファイバー状 PANI を図 1a のように Ag 電極を両端に付けて固定し、所定の電圧を印加して直流電流を流すと下方に湾曲し、電流を切ると元の位置に戻る。ファイバー状 PANI の中心点の元の位置からの変化量を Distance と表現する。Distance の最大値は、3V の電圧を印加した時の 65 μm であった。また、交流電流 (0.5 Hz) によりファイバー状 PANI は上下振動を繰り返す (図 1b)。周波数を .5 Hz から 10 Hz に変化させると Distance は低下するものの振動周波数は増大することより、PANI アクチュエータの応答速度は 1 秒以下と推定している。3.2 V の sin 波で上下振動の繰り返し試験を空気中で行った場合、1,000 回経過後も Distance に大きな変化はなく、耐久性が良好なことを確認している (図 1c)。また、印加する電圧の増大に伴い、電流は増加し、ファイバー状 PANI の表面温度は上昇する (図 1d)。ファイバー状 PANI の表面温度の測定には種々の工夫がなされているがここでは触れないので、詳細は原報を参照されたい。

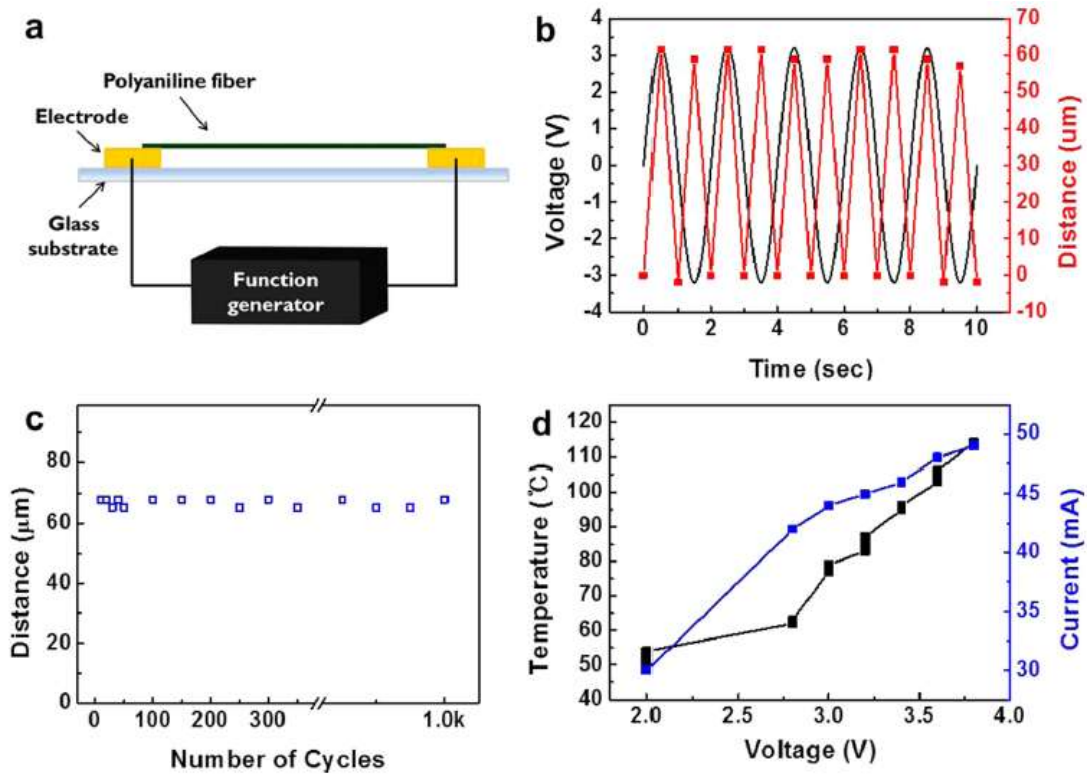


図 1. (a) Schematic of the experimental setup. (b) Actuation distance of a PANI fiber with a 0.5 Hz sine wave alternating voltage of 3.2 V. (c) Actuating distance as a function of cycle numbers for a 2.2 mm long PANI fiber (diameter: 64 μm , applied voltage: 3.2 V). (d) Surface temperature of a PANI fiber as a function of input voltage.

3. 磁場存在下での羽根状アクチュエータの特性

図 2a に示す羽根状のアクチュエータを製造し、磁場存在下で上下に振動することを確認している。なお、この上下振動は原報では“flapping”（日本語で“羽ばたき”）と表現されている。上下振動はフレミングの左手の法則による電磁力に基づく（左図）。この際、アクチュエータは磁場強度の最も高いディスク状磁石の端に近い位置の上部に置く。この位置の磁場強度は ~ 400 mT で、健康器具として使用される磁気ネックレスと同じレベルである（図 2a）。外部磁場が 250 mT までは、Distance は磁場の大きさに直線的に比例して増加する（図 2d）。また、印加電圧と共に Distance は増加し、約 10V 付近で最大の 11mm となる（図 2b）。上下振動の応答速度は非常に速く（9,000 swing/min）、昆虫の羽根の速度（1,000 –



15,000) と同レベルであり, 100 万回上下振動を繰り返しても劣化が起こらない (図 2c)。但し, 繰り返しの耐久性試験時の印加電圧は Distance からは約 2 V と考えられる。

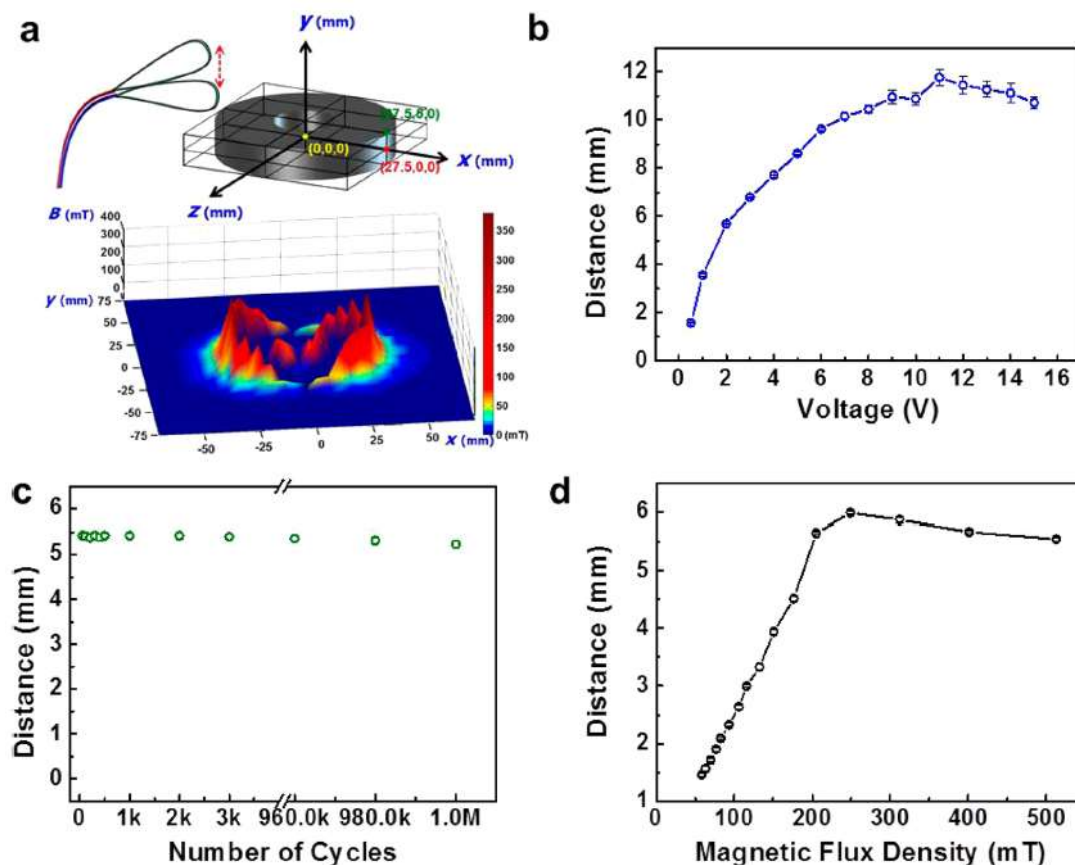


図 2. (a) Schematic of a PANI actuator that shows flapping motions in the presence of a magnetic field. The measured three-dimensional magnetic field map is also provided. (b) Displacement as a function of input voltage. (c) Cycle life of the flapping wing motion actuator. (d) Displacement as a function of magnetic flux density. The flapping distance reaches the maximum value upon exposure to 250 mT of magnetic field.

羽根の数を 4 枚にし, それぞれに独立に交流電流を流すことにより, 外側の 2 枚の羽根と内側の 2 枚の羽根それぞれを反対方向に高速で上下振動させることも可能である (図 3)。この場合, アクチュエータは 2 つのディスク状磁石の上に A4 の紙を挟んで配置されている。上下振動の速度は電流の大きさにより制御することが出来るが, ± 3 V の電圧印加時に

は肉眼で観測できないほど速い。この4枚羽根アクチュエータは1枚羽根のものと同様に耐久性に優れ、空気中で300回/分の速度で3日間連続して上下振動を繰り返しても（100万回）劣化は認められない。

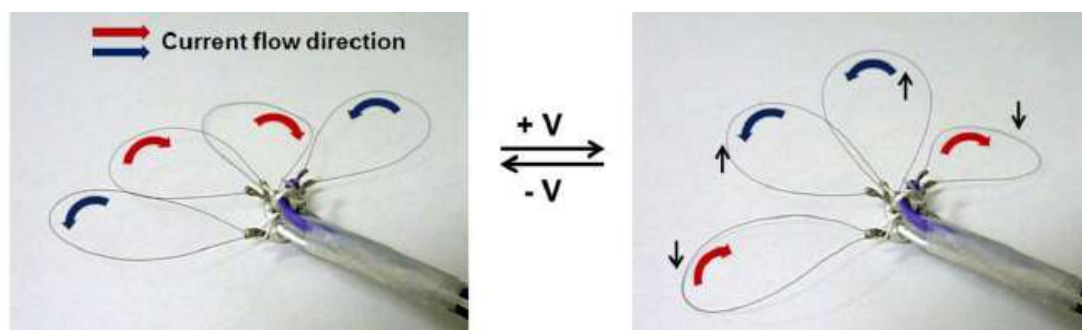


図3 Photograph of a PANI fiber-based four-wing flapping motion actuator. Different current flow directions result in the opposite flapping motions between the paired actuators upon electrostimulation. The flapping speed and distance can be manipulated by changing the input current value. Two disk-shape magnets (diameter: 54 mm, thickness: 10 mm) are placed under the actuator.

以上、ファイバー状 PANI を用いた 2 種類のアクチュエータを紹介したが、その駆動源は異なり、最初に紹介した湾曲するものはジュール熱に基づく PANI の伸びで、羽根状アクチュエータは電磁気力である。しかし、両者はアクチュエータとして次の共通した特性を有している。

- (1) 低い駆動電圧：3 V（湾曲）～0.5 V（上下振動）
- (2) 昆虫と同レベルの速い動作速度
- (3) 100 万回を超す繰り返しが可能な良好な耐久性
- (4) ファイバー状 PANI のみからなる単純な構成

参考文献

- ¹ K. Uh, B. Yoon, C. W. Lee, and J.-M. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 1289
- ² S.-H. Lee, D.-H. Lee, K. Lee, and C.-W. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **2005**, 15, 1495