228 纖毛・鞭毛における微小管の滑りを規範としたマイクロマニピュレータ開発の基礎研究 Basic Study for the Development of Novel Micromanipulator Modeled on Sliding Mechanism of Microtubules in Eukaryotic Flagella and Cilia

○ 藤原 和正 (信州大)
正 小林 俊一 (信州大)

東郷 正樹 (信州大院)
正 森川 裕久 (信州大)

Kazumasa FUJIHARA, Masaki TOGO, Shunichi KOBAYASHI, Hirohisa MORIKAWA

Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano

1. はじめに

真核生物の鞭毛や纖毛は、それらの内部にある微小管を能動的に滑らせて連続的な屈曲運動を実現している。著者らはこれまでこの機構を規範とする機構として、水中推進機構の開発を行ってきたが⁽¹⁾、本研究ではマイクロマニピュレータとしての開発を目的としている。本報では、微小管の滑りを圧電素子と摩擦異方性を持つ毛髪を用いて再現した屈曲機構を考案、その開発のための基礎実験結果について述べる。

2. 動作原理と実験装置

2. 1 鞭毛・纖毛の屈曲モデル

Fig. 1 に真核生物の鞭毛および纖毛の内部構造を示す。軸系は9本の周辺小管と2本の中心小管からなり、9+2構造と呼ばれている。この周辺小管にはダイニンというたんぱく質の突起構造があり、ダイニンはATP加水分解の化学的なエネルギーにより、隣の微小管を一定方向に動かす滑り力を発生している⁽²⁾。Fig. 2に屈曲のメカニズムを示す。ある1本の微小管のダイニンが全長にわたって一斉に滑り力を発生させるのではなく、微小管が滑っている領域 (Sliding Region)、滑りに抵抗する領域 (Fixing Region)、力を発せず自由に曲げられる領域 (Bending Region) の存在によって屈曲が発生する。

Fig. 1 Typical structure of eukaryotic flagella and cilia

Fig. 2 Bending mechanism of flagella and cilia

Fig. 3 Principle of hair movement driven by piezoelectric element

Fig. 4 Bending mechanism of two hairs

2. 2 屈曲機構の動作原理

ダイニンの動きを規範としたアクチュエータとしてバイモルフ型圧電素子を用いる。また、微小管は一定方向にのみ滑ることから、キューティクルによって摩擦の異方性を持つ毛髪を用いて、この動作を再現する。

微小管の滑り運動に相当する毛髪の移動原理を Fig. 3 に示す。同図の①→②の変化では毛髪のキューティクルに圧電素子の先端が引っかかるため、圧電素子が左へ屈曲すると共に毛髪も左に移動する。②→③の変化では圧電素子が毛髪のキューティクル上をすべるため圧電素子は右側へ屈曲を起こすが、毛髪は移動しない。③→④では①→②の変化と同様にさらに左へ移動する。この動作を繰り返すことによって毛髪は一定方向に移動することになり、実際のダイニンと微小管の滑り運動に似た運動をすることができる。

Fig. 4 に屈曲のメカニズムを示す。二本の毛髪 A, B の先端を結び、毛髪の間隔を一定に保った状態で毛髪 A を図のように移動させると、先端までの長さの差によって屈曲を形成することができる。

2. 3 実験装置と測定方法

実験装置を Fig. 5 に示す。中心部分の圧電素子はファンクションジェネレータにより矩形波の電圧を印加し屈曲させる（電圧は $20V_{pp}$ ）。なお、圧電素子の枚数 N やその間隔 d を変化できるように圧電素子の支持部には複数の圧電素子支持用のスリットを設けた。圧電素子には有効長さ $l=13.0\text{mm}$ 、幅 $w=3.03\text{mm}$ 、厚さ $t=0.26$ 、ヤング率 $Y_{11}^E=6.2\times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、密度 $\rho=7.5\times 10^3\text{kg/m}^3$ であり、理論共振周波数 f_m は次式⁹⁾により 616Hz である。

$$f_m = \frac{1.875^2}{4\sqrt{3}\pi} \cdot \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}} \quad (1)$$

上部のネジにより圧電素子と毛髪の間隔を調整できるようになっている。また、毛髪の下部には PTFE シートを敷き、底面との摩擦を低くした。毛髪の移動速度は、ビデオカメラによって毛髪の移動を撮影し、その画像の 1 コマあたりの移動量を測定し求めた。

3. 結果および考察

3. 1 移動速度

圧電素子を 1 枚 ($N=1$) とした際の圧電素子に印加する電圧の周波数と毛髪（直径 0.07mm 、長さ 20mm ）の移動速度の関係を Fig. 6 に示す。この結果より、周波数が上がるにしたがって移動速度も大きくなり、 600Hz でピークとなる。これは圧電素子の理論共振周波数が 616Hz であるためであり、それ以上の周波数では変位が小さくなるため、移動速度が小さくなったと考えられる。

3. 2 毛髪動作の安定化の検討

安定した動作をするために圧電素子を 2 枚 ($N=2$) に増やし、間隔 d を変化させた。なお、2 枚の圧電素子の振動の位相差は 0deg とした。その際の移動速度を Fig. 7 に示す。圧電素子に印加する電圧の周波数は 3. 1 の結果より 600Hz とした。これより、圧電素子の間隔 d が 6mm の時が最もバラつきが少なく、移動時間も長かったことから最も安定しているといえる。また、2 枚の圧電素子の振動の位相差を 180deg として検討したが、毛髪の移動は見られなかった。

Fig. 5 Experimental device

Fig. 6 Relationship between movement speed of a hair and applied voltage frequency to a piezoelectric element ($N=1$)

Fig. 7 Movement speed of a hair (600Hz)

Fig. 8 Bending movement of a hair (600Hz, $N=1$)

3. 3 屈曲動作

二本の毛髪（直径 0.07mm 、根元から先端までの長さ 110mm ）を使用した屈曲の様子を Fig. 8 に示す。なお、圧電素子に印加する電圧の周波数を 600Hz 、圧電素子の枚数 N を 1 とした。同図より、2 秒で右方向への屈曲を見ることが出来た。先端の移動距離は 29mm であった。

4. おわりに

真核生物の鞭毛や繊毛の内部にある微小管の滑りによる屈曲運動機構を規範とするマイクロマニピュレータとして、圧電素子と摩擦異方性を持つ毛髪を用いた屈曲機構を考案、すべり速度に相当する毛髪の移動速度を検討した。これより、圧電素子の共振周波数付近において毛髪の移動速度が最大になり、圧電素子を 2 枚使用することで安定した移動が得られた。また、2 本の毛髪による屈曲について検討した。今後の課題として、2 本の毛髪の間隔を一定にした屈曲の定量的な評価を行うこと、左右への連続的な屈曲運動を実現することが挙げられる。最後に、実験装置の作製にあたり指導していただいた、本学技術職員 市川富士人氏にお礼申し上げる。

参考文献

- (1) Kobayashi, S., et al., *JSME International Journal, Series C*, Vol. 44, No. 4, (2001), pp. 946–951.
- (2) 日本機械学会編, 細胞のバイオメカニクス, オーム社, (1990), pp.164–165.
- (3) 株式会社富士セラミックス, 圧電セラミックテクニカルハンドブック, <http://www.fujicera.co.jp/contact/j/index.html>, p.45.