240 真核生物の鞭毛の屈曲機構を規範とした水中推進機構のシミュレーション

Simulation of Propulsion Mechanism in Water
Modeled on Eukaryotic Flagellar Bending Mechanism

○学 滝沢 整(信州大院) 正 小林 俊一(信州大)

正 森川 裕久(信州大)

Osamu TAKIZAWA, Shunichi KOBAYASHI, Hirohisa MORIKAWA,
Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano**Key words:** Flagella, Flagellar Motion, Propulsion, Biomimetics

1. 序論

一般に生物の運動は自律的かつ高機能であり、それらを模倣した機構は工学的にも有用であると考えられる。そこで著者らは真核生物の鞭毛に着目し、これを工学的モデルで再現することを目標とした。本報では鞭毛の屈曲機構を規範とした平面屈曲運動をする「鞭毛モデル」について、周囲の流体の粘性とモデルの弾性を連成させたシミュレーションを行い、得られた運動形状と推力、推進速度特性について報告する。

2. 鞭毛の屈曲機構⁽¹⁾

Fig.1 に真核生物の鞭毛の構造を示す。鞭毛内部には内側に2本、外側に9本の微小管(Microtubules)があり、外側の9本の微小管にはダイニン(Dynein)が付いている。ダイニンはATPのエネルギーで滑り力を発生することにより、隣り合う微小管を先端方向に動かす。Fig.2 に示すようにダイニンが力を発生している微小管上の領域を Sliding Region と呼ぶことにする。Sliding Region の他、滑りに抵抗する領域(Fixing Region)と自由に曲げられる領域(Bending Region)が存在することによって鞭毛全体で屈曲が実現される。

3. 鞭毛モデルのシミュレーション解析⁽²⁾

3.1 モデル化条件

鞭毛モデルの基本条件を以下に示す。

- (1) Fig.2 において、鞭毛モデルの屈曲角と屈曲半径はそれぞれ次の式で表される。

$$r_c = a \left(\frac{1}{2} + \frac{l}{l_s} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{l_s}{a} = \frac{M_a}{EI} \left(l - \frac{l_s}{2} \right) \quad (2)$$

ただし、 M_a は滑りにより生じるモーメント、 EI は鞭毛モデルの曲げ剛性である。

- (2) Fig.3 に鞭毛モデルの微小管の配置を示す。鞭毛モデル

は4本の微小管からなる。滑りは微小管ペア1, 2と3, 4の間でのみ生じ、微小管1, 3は微小管2, 4をそれぞれ先端へ滑らせる。

- (3) Sliding Region の数は1つの微小管ペアにつき最大3つである。

3.2 鞭毛モデルに働く力およびモーメントの釣り合い

Fig.4 に鞭毛モデル上の微小要素に働く力およびモーメントの釣り合いを示す。力の釣り合いは次の式で表される。

$$(f_{eN})_n = (f_{eN})_{n+1} + (f_{vN})_n \quad (3)$$

ただし、 f_{eN} , f_{vN} はそれぞれ弾性反力、粘性抵抗の法線方向成分である。また、点 O_n 回りのモーメントの釣り合いは次の式で表される。

$$(M_e)_n + (M_v)_n + (M_a)_n + (M_e)_{n+1} = 0 \quad (4)$$

ただし M_e , M_v はそれぞれ弾性、粘性によるモーメントである。

鞭毛モデルはレイノルズ数が十分に小さいため、抵抗力推進の理論⁽³⁾を適用する。これより微小要素の速度に粘性抵抗係数をかけることで f_{vN} を求めて M_v を算出する。また、鞭毛

Fig.2 Bending mechanism of two microtubules.

Fig.3 Arrangement of microtubules.

Fig.1 Typical structure of a single flagellum.

Fig.4 Balance of the force and moment on the microlength.

モデルの先端において $f_e=0$, $M_e=0$ であるため、任意点での弾性反力 f_e と弾性モーメント M_e は式(3), (4)を用いて先端から順次求めることができる。

3.3 推力および推進速度の算出

推力は鞭毛モデルの基部が移動しないものとして考え、鞭毛モデル上の微小要素に働く粘性抵抗力の x 軸方向成分を全長にわたって積分して算出する。

推進速度は、推力が 0 になるときの鞭毛モデルの速度として計算する。ただし、 x 軸方向の速度のみに注目し、 y 軸方向の速度は常に 0 とした。

3.4 シミュレーション方法

各瞬間ごとに、鞭毛モデルの形状と粘性抵抗力を弾性反力と粘性抵抗力が釣り合うまで繰り返し計算することによりモデルの運動形状を計算した。鞭毛モデルの諸元はウニの鞭毛に倣い全長を $30\mu\text{m}$ 、直径を $0.2\mu\text{m}$ 、周波数を 35Hz とした。流体の粘度は 20°C の水の値を用いた。また、実際の鞭毛のヤング率は数 GPa とである⁽⁴⁾ことから、ヤング率は 0.01GPa ~ 10GPa の間で計算した。

4. シミュレーション結果

4.1 鞭毛モデルの弾性の影響

Fig.5 に鞭毛モデルの基部が移動しないときの運動形状を 1 周期分示す。鞭毛モデルは 1 周期中に図中の 1 から 5 までの運動を 2 度繰り返す。ヤング率が大きい $E=1.00\text{GPa}$ のときは鞭毛モデル全体にわたって振幅にほとんど変化が見られない。一方、ヤング率が小さい $E=0.01\text{GPa}$ の場合は粘性抵抗により鞭毛モデルの後半部の振幅が小さくなっているのがわかる。

Fig.6 に 1 周期の推力変化を示す。1 周期中に 4 回急激に推力が落ちるが、これは基部で Sliding Region が発生し、新たな屈曲が生じる際に鞭毛モデル全体が x 軸の負方向へ大きく動くためと考えられる。Fig.7 にヤング率と平均推力 $F_{x\text{mean}}$ 、推力変動幅 ΔF_x の関係を示す。 $F_{x\text{mean}}$ 、 ΔF_x とともに $E=0.5\text{GPa}$ 周辺から変化しはじめており、これは鞭毛モデルの運動形状が $E=0.5\text{GPa}$ 周辺から変化し始めているためである。

Fig.5 Movement pattern of the flagellar model during one bending cycle. Maximum sliding length $l_{s\text{max}}=0.141\mu\text{m}$. Coefficient of viscosity of liquid $\mu=1.002\times 10^{-4}\text{Ns/m}^2$

4.2 推進速度

Fig.8 に推進速度 V_x の 1 周期の変化を示す。推力の変化と同様の特徴が見られるが、これは抵抗力推進の理論では推力と速度が線形関係にあるためである。しかし、 $V_x=0$ の場合と $V_x \neq 0$ の場合で運動形状が多少変わるため、推力と推進速度の変化の仕方が完全には一致しない。

5. 結果

鞭毛の屈曲機構を規範とした平面運動をする鞭毛モデルについて周囲の流体の粘性とモデルの弾性を連成させたシミュレーションを行い、運動形状と推力、推進速度特性について検討した。今後の課題は滑り力を考慮し、推進効率について評価することである。

参考文献

- (1) 日本機械学会編, 平本幸雄著, 細胞のバイオメカニクス, オーム社, (1991), pp.158-167. (2) Sugino, K. and Naitoh, Y., J. Submicrosc. Cytol., Vol. 15, No.1 (1983), pp.37-42. (3) Gray, J. and Hancock, G. J., J. Exp. Biol., Vol. 32 (1955), pp.802-814. (4) Gittes, F., Mickey, B., Nettleton, J., Howard, J., J. Cell Biology, Vol.120, No.4 (1993), pp.923-934.

Fig.6 Variation of thrust force F_x of the flagellar model during one bending cycle.

Fig.7 Thrust force versus the Young's modulus E .

Fig.8 Variation of thrust speed V_x of the flagellar model during one bending cycle.