

北海道大学 工学部 ○秋月博光 下岡聡行 勇田敏夫

要 旨

体を屈曲して遊泳するマイクロマシンを想定し、レイノルズ数が低い場合での運動についての計算を行う力学的シミュレータを開発した。マイクロマシンが変形する際に水から受ける抗力から推進力を計算し、移動速度と重心の軌跡を得た。ウニ精子を参考にしたモデルについてこのシミュレータを使って平均速度を計算したところ、実際のウニ精子の速度とほぼ同等の値が得られた。

1. 緒 言

水中を移動する推進機構の一つとして、水へびや精子などの生物のように体を屈曲させて進行波を後方に送ることで推力を得るものがある。この機構は、スクリュプロペラなどの機構があまり推力を得ることができないといわれる低レイノルズ数の領域で威力を発揮するもので、特にマイクロマシンサイズにおいて有望なものであると考えられる。過去に屈曲遊泳型生物の運動の計算に関する研究が行われているが、これらの研究では正弦波の進行波を形成するものとして直進する場合についての計算しか行われていない^{1,2)}。

そこで本研究では、自律分散協調システムを導入した屈曲遊泳型マイクロマシンを想定し、レイノルズ数が低い場合における動きを2次元的に調べることのできる力学的シミュレータを開発した。

2. マイクロマシンの構成

本研究で想定しているマイクロマシンは、単純に屈曲するだけの円筒のユニットを8個直列に連結して構成されているものとしている。隣り合うユニットが協調して曲率を変化させることで、円弧近似による進行波を形成する自律分散協調システムの形をとっているものとしている。

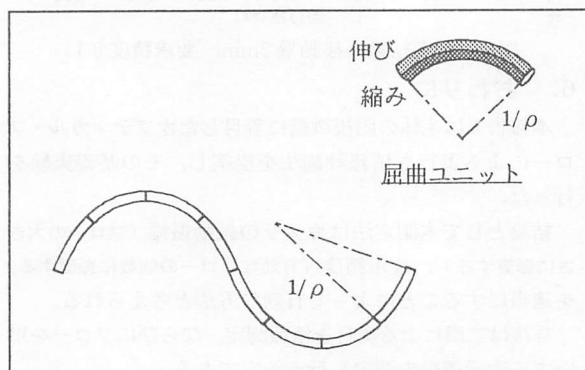


図1 マイクロマシンの構成

3. シミュレーション方法

3.1 マイクロマシンが受ける力の計算

レイノルズ数が低い場合では流体中に置かれた円筒が受ける抗力は流体の速度に比例するということが知られている。Lを円筒の長さ、aを円筒の径、 μ を流体の粘度とすると、円筒の軸方向及び法線方向においてそれぞれ、

$$K_t = 4\pi\mu / (-1 + 2\log(2L/a))$$

$$K_n = 8\pi\mu / (1 + 2\log(2L/a))$$

を比例係数として流体の流速に比例した単位長さの抗力が計算できるということがわかっている³⁾。この計算は線形系であるため、流速に対して斜めに置かれた円筒の抗力は、速度を軸方向と法線方向に分解して力を計算し、それらの合力より得ることができる。この計算から、マイクロマシンを円筒のリンクで近似することでマイクロマシンにかかる力の計算を近似的に得ることができる。

3.2 マイクロマシンの速度計算

マイクロマシンの動きの計算は、重心周りの回転の計算と重心の移動速度の計算に分けて微小時間ごとに計算した。ここでの計算は粘性抵抗のみ考慮に入れ、慣性力を無視できるものとして考えた。

体の回転の計算では、重心周りの回転において向くべき方向を向いているときは体の変形によって流体に対してする仕事が最小になると考えて計算した。図2のように、体の変形と重心周りの回転で円筒が移動したときの抗力と移動距離から仕事を求め、微小時間にする全体の仕事が最小となる向きを探索した。

重心の移動速度の計算では、微小時間に体を移動させたときに働く力と、体が変形したときに生じる推力とが等しくなるような速度を推進速度とした。この計算が線形系であることから、図3のように体を速度 U_x , U_y で移動させたときの抗力 F_{U_x} , F_{U_y} の合力が推力 F と等しくなるように U_x , U_y を設定することで求めた。

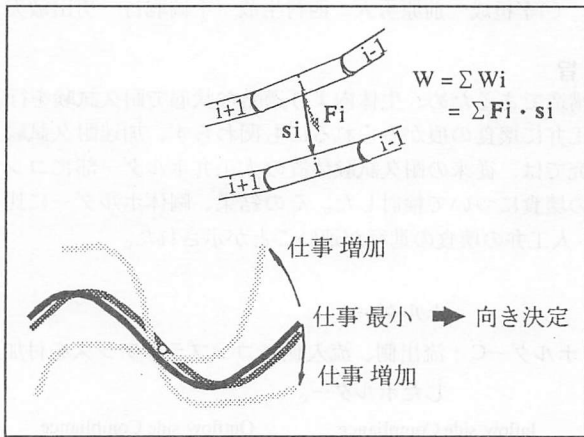


図2 重心周りの向きの決定

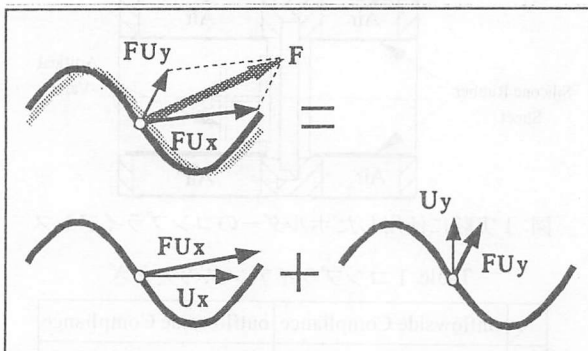


図3 重心の移動速度の計算

4. シミュレーションモデル

ウニ精子は正弦波状の進行波によるほぼ一平面内での運動であり⁴⁾、レイノルズ数が体長に関して 8×10^3 、厚さに関して 4×10^6 と十分に小さな値であるため、本研究のシミュレーションモデルに適している。ウニ精子を参考にしたモデルについて平均速度を求め、実際のウニ精子の推進速度を比較した。モデルの設定値は以下のようにしてシミュレーションを行った。

振幅	4 μm
波長	24 μm
体長	42 μm
鞭毛部径	0.2 μm
頭部径	0.5 μm
頭部長	4.2 μm
波数	1.3
波速	35Hz

《ウニ精子の推進速度：181~209 μm/sec》

シミュレーション計算では、1個のユニットに対して10個の円筒でリンク近似し、全体として80個の円筒リンクで計算した。このモデルにおいては、実際

のウニ精子のデータと比較するために、鞭毛部分だけではなく精子の頭部も計算に含めた。鞭毛部は0.2 μm径の円筒で近似し、頭部は0.5 μm径の円筒をまっすぐに4.2 μmの長さにつなげて構成した。推進速度の計算については、進行波周期の1/100にあたる0.28msecごとに行った。

5. シミュレーション結果

ウニ精子モデルのシミュレーション計算で得られた重心移動の軌跡を図4に示した。重心の軌跡は上下に $\pm 1 \mu\text{m}$ の幅で揺れているが、全体ではx軸の正方向に直進しているのがわかる。モデルの推進方向の平均速度は197 μm/secと求められ、実際のウニ精子の推進速度181~209 μm/secのほぼ中間の値で得られた。

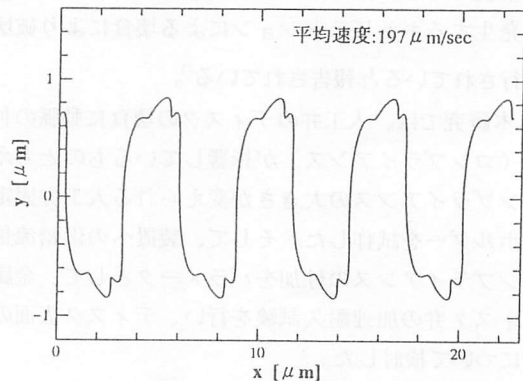


図4 ウニ精子モデルの重心移動軌跡

6. まとめ

本研究で作成したシミュレータでウニ精子のモデルについて計算した結果、低レイノルズ数におけるマイクロマシンの遊泳運動シミュレーションに利用可能であることがわかった。このシミュレータでは、マイクロマシンの進行波の形を崩すことによる直進以外の運動についても知ることができるので、マイクロマシンの遊泳制御などの研究に利用が可能であるといえる。

【参考文献】

- 1) Taylor, S. G., Proc. Roy. Soc. A, 214, 158-83 (1952)
- 2) Gray, J. & Hancock, G. J., J. Exptl. Biol., 32, 802-14 (1955)
- 3) Lighthill, J.L. Mathematical Biofluid Dynamics. SIAM, Philadelphia, 45-63 (1975)
- 4) 毛利秀雄「精子の生物学」東京大学出版会, 37-42 (1991)