

単鞭毛型アクチュエータにおける流速特性の考察

山本 吉範* 池内 雄大**

Considerations of Flow Characteristic relative to Simple Flagella-Shaped Actuator

Yoshinori YAMAMOTO and Yuta IKEUTI

In recent years, bio-mimetic fields are attended to various field scientists from the usefulness. The purpose of this study is considering a flow characteristic producing from regular vibrating motions of a flagella model. It is showed that flows to be produced almost don't depend on vibrating frequency, however, depend on inclination of flagella tip.

Key words: Bio-mimetic, Flow characteristic, Flagella motion, Actuator

1. 結 言

約 30 年前，生物の優れた特性を人工的に取り入れ，より優れた機能や性質を有するシステムや物質を研究するバイオミメティクスと呼ばれている分野が出来上がった¹⁾．近年は，この分野がさらに発展し生物の形状や生体内のプロセスにまで対象を広げてきている²⁾．本研究もこの考えに基づくものであり，微小な生物の鞭毛に着目した．

マイクロ・ナノロボットは小さな場所や危険な環境での活躍が期待されている．特に，その小ささを利用して生物の体内を探索するといった応用に注目されている．しかし，マイクロ・ナノロボットの開発には多くの課題が存在している．例えば，サイズが極小であるため非常に限られた電源での動きを強要され，大掛かりな駆動系を搭載することも出来ない．従って，マイクロ・ナノロボットの実用化において，小型で高効率な推進機関の開発は重要なテーマの一つである．そこで本研究では，マイクロ・ナノロボットに適用可能な駆動系（アクチュエータ）の提案とその性能評価を行う．

前述したバイオミミクリーの概念から，極小生物の持つ運動器官のなかでも比較的ポピュラーな真核生物の鞭毛に着目し，マイクロ・ナノロボットの駆動系に用いることを提案する．小林等は，ダイニン

の動きを電磁石を用いて再現した人口アクチュエータを開発し，高粘度液体中でも屈曲が可能になるように改良を行った³⁾．これらは真核生物鞭毛の構造を忠実に再現したものであり意義深い．しかしながら，真核生物鞭毛における流速や推進力の発生メカニズムを重点的に取り扱った研究は多くない．そこで本研究では小型化および簡素化を念頭において，1本の細い鋼線を左右に振動させて，その往復運動の駆動はステッピングモーターで行うアクチュエータを提案し，このモデルを用いて発生流速の考察を行なったので報告する．

2. 水槽実験

2. 1. 実験装置

鞭毛の振れ運動を再現する上で，振れ角度や角速度を制御し易い事もあり，ステッピングモーターを使用する．振れ運動はモーターの正転、逆転を切り替えることで実現する．また，振れ角度や角速度を任意に設定・変更することが出来るため，必要な多数の実験データを得ることが可能となり，本実験用としてステッピングモーターは適切であると考えられる．

著者等は真核生物であるマウスの精子について，液体窒素で冷凍保存されたものを手に入れ，それを解凍・蘇生させ，HTF 溶液中で運動している様子を位相差顕微鏡で観察した．その観察で，精子の移動速度を求め，ストークスの低抗則から近似的に推進力を求めた⁴⁾．また，同時にレイノルズ数とフルー

原稿受付 平成 23 年 8 月 31 日

* 津山工業高等専門学校電子制御工学科

** 平成 22 年度津山高専機械・制御システム工学専攻修了，萩原工業（株）会社勤務

ド数も求めた⁵⁾。これらの観察結果をもとに作成したモーター実験装置は水槽に取り付け、水中での振動実験を行えるようにする。図1は水槽に取り付けられたモーター実験装置の概略を示す。

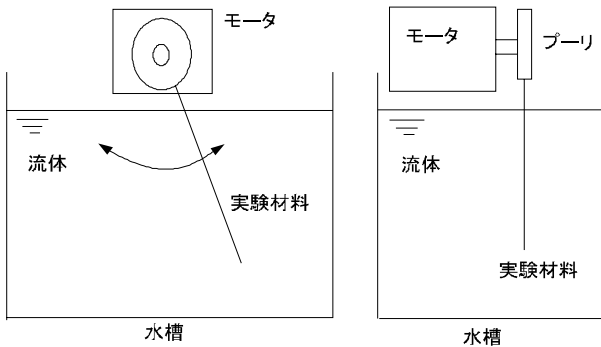


図1 実験装置概略

2. 2. 鞭毛用実験材料

実験には鞭毛部に相当する、振動させるための細い棒状の材料を用意する。モーターの振動により鞭毛運動を再現するため、材料は弾性を持っていることが必要になる。そのため実験材料はいくつかの弾性材を用いて行うこととする。対象はいくらでも選定できるが、今回は解析結果との比較を考慮して以下の5種類の材料を使用する。

①ベリリウム銅 ②ばね用ステンレス線 ③ばね鋼鋼線 ④ピアノ線 ⑤硬鋼線

上記の材料を細い棒状に加工したものを実験で使用する。太さは直径1mmとし、長さは前述のフルード数から390mmとした。

2. 3. 実験方法と測定結果

実験では材料ごとにモーターで反復振動を行い、振れ運動の周波数を変化させた際の発生する流速を計測し推力を計算により見積もる。

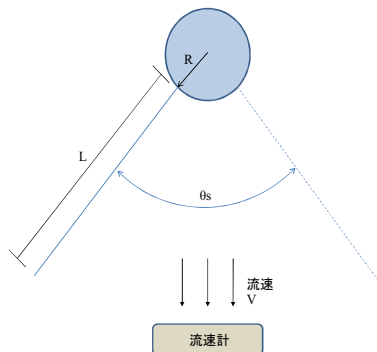


図2 再現実験の流速測定

上記の図2のように流体中で長さLの実験材料を振り子のように反復振動させ、そのときに発生する流速Vを流体中に置いた流速計にて測定する。このときの実験材料が振れる角度を振れ角 θ_s とする。Rはモーターに取り付けているプーリの半径を示し、50mmである。また、厚さは10mmとした。角度 θ_s は30degとして周波数は1~10Hzまで変化させて測定する。同様に60deg, 90degと測定を行う。振れ角 θ_s が30deg時の各材料における振動数に対する流速値を図3に示す。

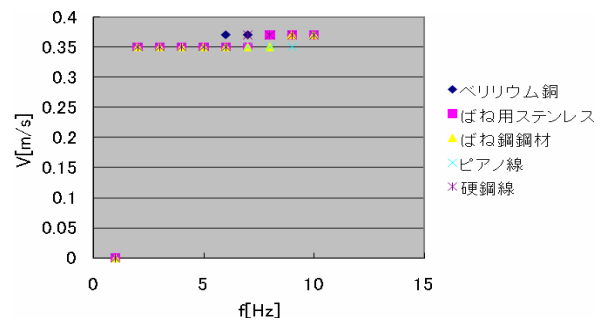


図3 各材料における流速値

図3に示す流速の測定結果より、流速は振れの振動数にあまり依存しない。

なお、推力を F_s として運動量理論から以下の式を用いて算出する。

$$F_s = \rho Q V \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 Q は発生流量、 V は発生流速である。

発生流量 Q は実験材料の振れ面積 A に発生流速 V との積で求める。

$$Q = AV \quad (2)$$

振れ角 θ_s が30deg時の各材料ごとの推力 F_s の計測結果を図4に示す。

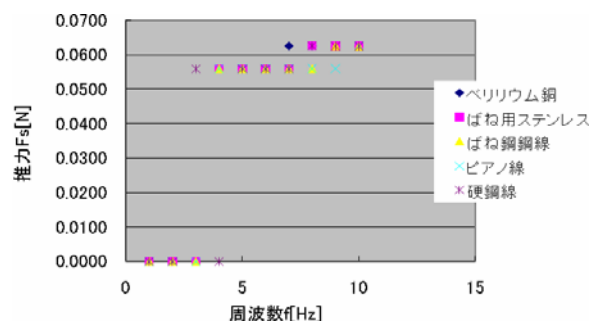


図4 各材料における周波数と推力

図 4 から推力についても振れの周波数にはほとんど依存しない．また，1～3Hz 間は推力が発生していない．これは流速が測定できなかったためであるが，実際には極微小な流速が発生していると思われる．この確認は流れの可視化を行うことで可能となる．

ここに示す流速値は振れの周波数にほとんど依存しないことが分かったが，鞭毛の先端におけるしなり角（曲がり角）に依存することが考えられる．従って，次に先端のしなり角と流速との関係について考察する．

3. 先端のしなり角

前述の結果より材料ごとに発生推力にいくらかの差異があることが分かる．予測として材料の弾性力によるしなりが影響がしているのではないかと考えられる．以下にその測定と考察を行う．

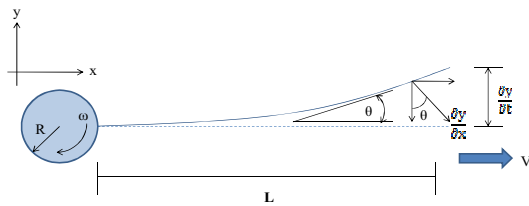


図 5 しなりの影響

図 5 において，横軸を x ，縦軸を y ，時間を t と取る．今，モーターの各周波数における角速度を ω とし，鞭毛としている実験材料が全振れ角 θ_0 のちょうど中間（鞭毛の固定位置が x 軸上にある）に来た時，即ち，流速計と直線で結ばれる地点に来た時，長さ L の鞭毛材料には角 θ のしなりが発生している．この時，先端部の傾きは

$$\tan \theta = \partial y / \partial x \quad (3)$$

で表され，先端部の表面付近における x 方向流速を V ， y 方向流速を $\partial y / \partial t$ と仮定すると表面付近の流速は鞭毛の接線方向に垂直な方向を向くと考えられる．従って，式 (3) を考慮して

$$\partial y / \partial x = \tan \theta = V / (\partial y / \partial t) \quad (4)$$

と表すことができる．この関係より表面から離れた x 方向の流速 V は修正係数を k として

$$V = k (\partial y / \partial t) (\partial y / \partial x) \quad (5)$$

と表すことができる．ここで $\partial y / \partial t$ について考えると

$$\partial y / \partial t = \omega (L + R) \quad (6)$$

である．図 3 で示した結果より，流速値は周波数にほとんど依存しないことから式 (6) の $\partial y / \partial t$ を一定値と仮定して修正係数 k の中に含めると式 (5) から流速は

$$V = k (\partial y / \partial x) \quad (7)$$

と表すことができる．ここで k は m/s の次元を持つある定数と考え，その値は測定値から決める．

3. 1. しなり角の測定

式 (7) で示される関係を調べるため振れ運動実験時の各実験材料のしなり角 θ を測定する．水槽に取り付けたモータ実験装置に高速度カメラを設置し，前述の振れ実験と同様 1～10Hz の振れ周波数で実験装置を動作させる．その際の実験材料の軌道を高速度カメラで撮影し，その画像を記録・保存する．

図 6 に撮影した高速写真の一例を示す．図のように写真に 2 点を打ち，2 点間の角度を測定する．撮影を行った際，図 6 のように被写体が傾いている．正しいデータを求めるため計測を行うときは，実験材料が右曲がり，左曲がりの写真からそれぞれ 10 枚ほど選出し角度を計測する．その後，平均値を求めることで傾きの影響を無くし正確なデータに近づけた．

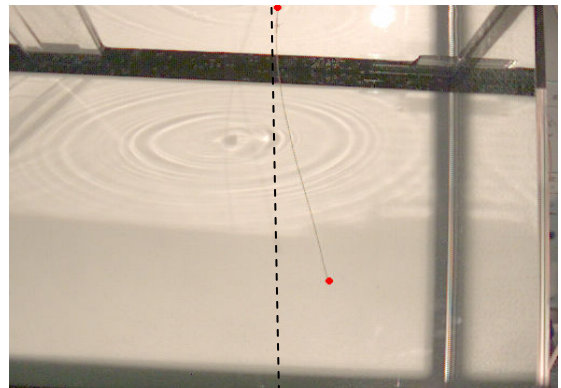


図 6 撮影した高速写真の一例

測定した角度を各材料と周波数ごとにまとめ、表1に測定結果を示す。

表1 しなり角 θ の測定結果

f [Hz]	θ [deg]				
	ベリリウム銅	ばね用ステンレス	ばね鋼鋼材	ピアノ線	硬鋼線
1	6.68	6.56	4.12	0.04	2.64
2	9.78	8.31	6.61	7.98	4.97
3	9.78	8.57	6.86	7.96	5.22
4	11.11	10.75	8.64	9.72	7.45
5	12.51	12.10	10.35	11.46	8.41
6	12.58	11.46	10.46	11.77	8.47
7	13.36	12.22	11.03	11.75	9.26
8	13.39	11.97	11.17	11.64	9.23
9	13.25	12.26	11.80	9.75	9.82
10	13.24	12.36	11.83	10.61	10.14

表1の結果をもとに式(3)より傾きを求め、周波数と傾きを各材料において計算した結果を図7に示す。

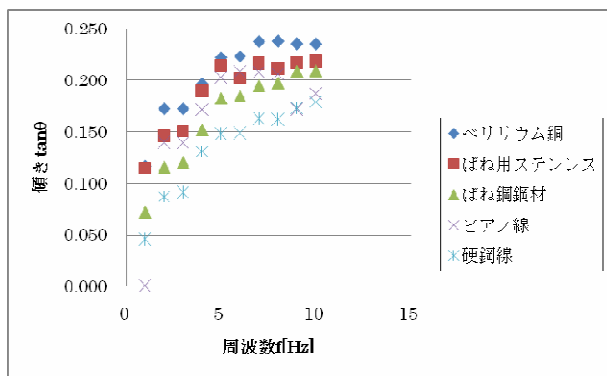


図7 周波数と傾きの関係

3. 2. 流速測定結果の考察

次に、流速測定結果(図3)と傾き(図7)との関係を考察する。式(7)における修正係数 k を適当に与えることにより、図3に示す測定結果との対応をとってみる。例えば $k=1.7\text{m/s}$ に設定した結果を以下に示す。

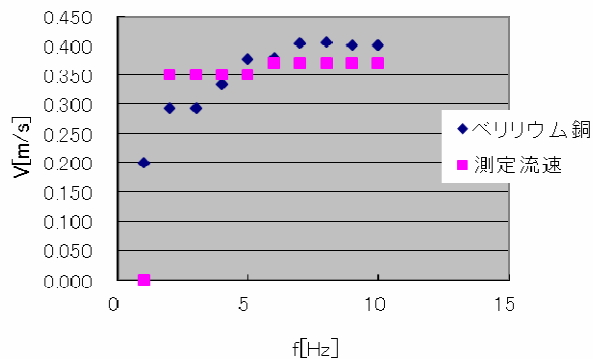


図8 ベリリウム銅と測定値

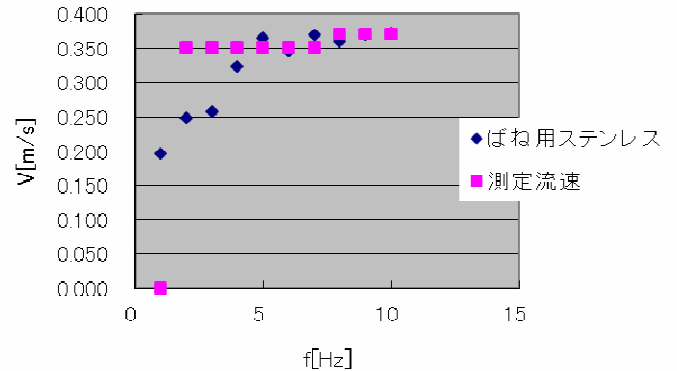


図9 ばね用ステンレスと測定値

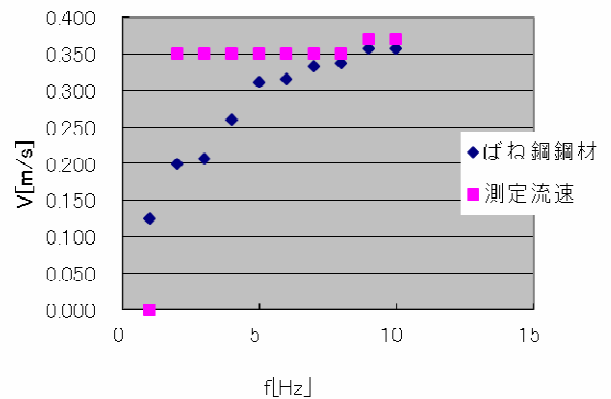


図10 ばね鋼鋼材と測定値

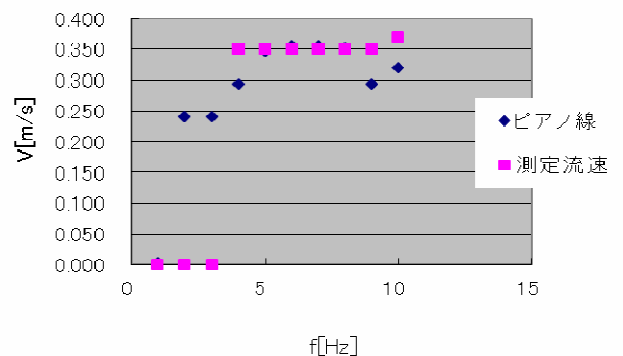


図11 ピアノ線と測定値

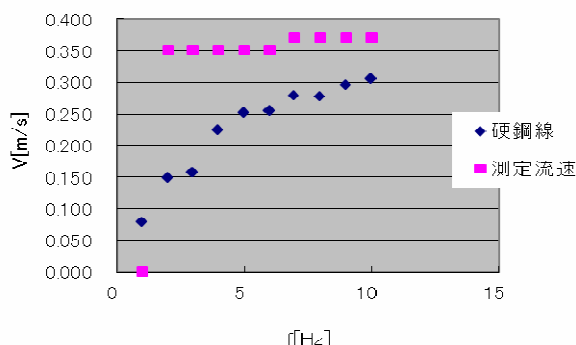


図 12 硬鋼線と測定値

以上 5 つの例を上げてみた．ベリリウム銅，ばね用ステンレス，ばね鋼鋼材，ピアノ線については振動数が 5Hz 以上の範囲で比較的良好一致しているが，硬鋼線についてはあまり一致していない．硬鋼線については修正係数 k の値が 1.7m/s では一致しなく，もう少し大きい値になることが予想できる．

5Hz 以下の領域では流速計の測定値が不連続化していることから分解能（精度）に問題があると考えられる．

4. ま と め

一本の鞭毛を取り付けた振子運動方式のアクチュエータを構成し，水槽内で鞭毛を振らせることにより発生する全振れ角 θ_s の中央方向における円板の半径方向の流速を流速計で測定した．流速は円板の振れの周波数を変化させたときの値を測ると共に鞭毛の先端の曲がり角について高速度カメラを用いて測定した．

アクチュエータは半径 50mm の円板と直径 1mm で長さが 390mm の弾性鞭毛により構成した．また，水槽内の液体は水を用いた．これらの条件で流速値の測定を行った結果，図 3 に示す測定値が得られた．これから流速値は振れの振動数にあまり依存しない．また，低周波数領域で値に不連続性が見られることから使用したプロペラ方式の流速計の精度（分解能）が使用流体（水）に対してやや低いことが考えられる．硬鋼線を除いて 2Hz 以上からはほぼ一定値になっており，25Hz くらいまでは一定値を維持するこ

とも確認できたことから得られた流速値の信頼性は高いと考えられる．

以上の流速測定値に対して定量的な考察を試みた．その結果は式 (5) に示す．ここでは前進に必要な推力に關係する流速ベクトルが重要であることから全振れ角 θ_s の中央方向の流速を問題としている．この方向の流体の運動について，鞭毛の先端の周速度は上記の方向に対してほぼ垂直になるために問題としている流速にはあまり関与しないことが予想される．そこで式 (6) で示される鞭毛先端の周速度を定数と考えて修正係数に含め，当該流速値を式 (7) と表す．ここで k を新たな修正（流速）係数とした．定量化した速度（式 (7)）を検証する目的で，先端の傾き角 θ について高速度カメラを用いて測定した．修正係数 $k=1.7\text{m/s}$ として各材料における式 (7) の値と流速測定値を図 8～図 12 に示した．この結果から振れの周波数が比較的大きい領域では硬鋼線を除き，傾向がよく一致していることが理解できる．低周波数領域ではほとんど一致が見られない．これは流速計の精度（分解能）が低いことや流体の粘度および渦の影響などが関与していることが考えられる．これらの影響を調べるためには流体運動の可視化が不可欠であり，今後の課題である．

謝 辞

本研究は科研費（課題番号 21651065）の助成を受けて実施している．ここにお礼を申し上げます．

参考文献

- 1) Bejan, A. : Heat Transfer, John Wiley and Sons, (1993)
- 2) Benyus, J. M. 山本監訳：自然と生体に学ぶバイオミクリー，オーム社，(2006)
- 3) 小林俊一等：纖毛，鞭毛を規範としたアクチュエータの開発，文科省 21 世紀 COE プログラム「先進ファイバー工学研究教育拠点」研究成果報告書 13：(2007) 135-136
- 4) 高野泰斉：水棲生物の推進の研究，バイオエンジニアリング部門報，No. 27，日本機械学会バイオエンジニア部門(1999)
<http://www.jsme.or.jp/bio/news/27/27-2-1.html>
- 5) 国清行夫，木本知男，長尾建：最新機械工学シリーズ 6 水力学 改訂・SI 版，p273，森北出版(1971)