

# 物理の眼で見る 生き物の世界

—バイオミメティクス皆伝—

工学博士 望月 修 著

コロナ社

## はじめに

「なんのために数学や物理を習っているのだろう」と、だれしも疑問に思ったことはあるでしょう。日常生活の中では、買い物のかきの勘定ができればよいし、ものを持ち上げたり走ったりするに物理を考えることはないし、料理をするに熱量計算をするわけではないし、動物は運動力学なんて知らずに勝手に走っているし、太陽の光は暑いだけだし、欲しいものはお金を出せばなんでも買えるし、などとネガティブシンキングをするものです。でも、この本を手にしたあなたは、目的もわからずに数学や物理を習うのはつらいという状況から、なにか光を見出したいと少しでも前向きな気持ちを持っている人なのだと思います。本書を開くと、身近にあるものが数学という道具で輝き出したり、物理という道具で動き出したりするイリュージョンに引き込まれるはずです。世の中がいままでとはまるで違って見えるようになります。

本書では、生物は生物学、物理は物理学といったようにそれぞれを別物とせずに、例えば、物理学を使って生物を見るとどのように見えるのかといったことを体験していきます。このいわば物理メガネを通じて物事を見ると、いままでつまらなくみえていたものが意味のあるものにみえたり、一つの使い方だけしかわからなかったものが別な使い方でもできることがわかったりします。また、世の中の仕組みまでもみえるようになります。いままで学習してきた学問をこんなところに使ってみようかという気持ちがわいてきたら、しめたものです。本書を手に取ったあなたはポジティブシンキング人間になれるでしょう。

水族館で鼻先をおつけてけがをしている魚を見ることがあります。一方、家庭の水槽で飼っている小さな熱帯魚では鼻先をおつけたものを見たことはありません。どちらも透明な入れ物に入っているの、ぶつかるのは壁が透明で見えなかったというのが理由ではないかもしれません。これらの違いからぶつか

らない方法を見出せたら、車の衝突回避に使えるかもしれないといったように、身の周りのちょっとしたことにヒントを見出し、工学に応用できる考え方をすること、それが本書のバイオミメティクスです。

生物がどのように地球環境と共生してきたのか、どのようにうまい方法で移動するのかといった、生き残り戦略を真摯に彼らから学ぼうというのです。本書では、工学的観点から生物運動および機能を見直し、それをどのように解釈し、どのように応用できるのかといったものの考え方をそれぞれの項目ごとに示しています。生き物は、われわれを取り巻く空気や水をうまいやり方で利用しています。

本書は大きく三つに分類されています。第一部では機械的運動（1章：泳ぐ、2章：飛ぶ、3章：走る）、第二部では機能と形体（4章：植物、5章：環境変化と形）、第三部では擬態・視覚効果（6章：擬態、7章：表現）です。さらに、8章では人類が進む方向性に関して物理学的に考えてみます。全体を通じてバイオミメティクスの具体的な応用例を学び、動・植物の運動にかかわる物理学から応用方法を学び、人類が生き延びる方法を考えます。

また、各章はそれぞれ ① なにがしたいのかという目的を明確にし、② 生物のなにをどのように観察し、③ それをどのような簡単なモデルで表現し、④ 工学的に考えてみるという視点で構成されています。自分の興味のある章から読んでみてください。生物の運動・機能が工学で学ぶどの学問に対応しているのかを知ることで、これから将来直面する問題にいかに対応できるかという応用力を身につけられるはずです。モデル化して物を考えるスキルを身につけることが本書の目的です。

本書の刊行に関しては、コロナ社に多大なご協力を頂きました。また、イラストは、東洋大学理工学部生体医工学科4年の村上優依さんが描いたものです。本書の内容のほとんどは研究室の研究によるものです。かかわった多くの方々の協力に感謝の意を表します。

2016年1月

望月 修

# も く じ

気づくことのたのしさ ————— 1

<b>1</b> 章 	<b>水の粘っこさをどうするか</b>	
	1.1	水を蹴って泳ぐカエル ————— 4
	1.2	魚の尾ひれが生み出す力 ————— 8
	1.3	魚の表面—ぬるぬるとざらざら— ————— 12
	1.4	高速で泳ぎ続けるマグロ ————— 16
	1.5	波を立てない形—イルカとカワセミ— ————— 20

<b>より上手により遠くへ飛ぶ</b>		<b>2</b> 章 
2.1	風に乗るタンポポ、風に舞う木の葉 ————— 26	
2.2	ムササビのグライダー ————— 30	
2.3	空を飛ぶための翼・羽 ————— 34	
2.4	推進力を生む羽ばたき ————— 38	
2.5	飛び続ける渡り鳥 ————— 42	

<b>3</b> 章 	<b>地上を上手に駆けまわる</b>	
	3.1	チーターのダッシュ ————— 48
	3.2	ダチョウの走りとマラソン ————— 52
	3.3	垂直な壁に張り付くヤモリ ————— 56
	3.4	地面を足でつかむ ————— 60
	3.5	カレーライスでどのくらい走れるのか? ————— 64

<h1>4</h1> 章	<b>植物が生き延びてきた術</b>	
	4.1 植物の水の吸い上げ	70
	4.2 植物がしている運動	74
	4.3 熱を発するザゼンソウ	78
	4.4 棘でくつつくオナモミ	82
	4.5 水を弾く葉っぱと花びら	86

<b>形は環境がつくっている</b>		<h1>5</h1> 章
5.1 水中で暮らすとどうなるのか	92	
5.2 自然にみられる綺麗な形	96	
5.3 自然な形「フラクタル」	100	
5.4 ウイルス・微生物にみる多面体	104	
5.5 生き物のアピール力「内在力」	108	

<h1>6</h1> 章	<b>似ている？ 似せている？</b>	
	6.1 擬態の方法	114
	6.2 タコとイカの変身技	118
	6.3 スズメバチの模様	122
	6.4 花や葉っぱになりすます	126
	6.5 昆虫に化ける植物「ラン」	130

<b>みえるもの、みせたいもの</b>		<h1>7</h1> 章
7.1 見えていること	136	
7.2 魚の色、昆虫の色、鳥の色	140	
7.3 美しい形の秘密	144	
7.4 美しくみえる化粧	148	
7.5 求愛ダンス	152	

# 8章



## これまでとこれから

8.1	ティラノサウルスは立って歩けたのか？	158
8.2	絶滅に追いやるエネルギー 現状から這い上がるエネルギー	162
8.3	未来を予測する—繁栄か絶滅か—	166
8.4	進む方向「未来予測」	170

あとがき 176

索引 177

## 気づくことのたのしさ

私たちが普段歩いたり走ったりするときに物理がどうのこうのなどと考えることはありません。しかし、もっと速く走りたいとか、楽に移動できる乗り物を作ろうとなった途端に、この坂道を滑らないで登るにはどうしたらよいのか、鳥のように空を飛ぶにはどうしたらよいのか、魚のようにすいすいと水中を移動するにはどうしたらよいのか等を考える必要が出てきます。

身の周りの乗り物は人工物で人が動かすものですが、その運動は自然の法則に従います。どのような力がどのようにそのものにかかっているのかを知ることが運動を知ることです。これを応用するためにはエネルギー、環境、化学、制御、センシング、ネットワークなども考えなければなりません。

生体に適用するものであれば、生体との適合性や生体機能のことも考えなければなりません。特にこれからの時代、健康・医療にかかわる工学の果たす役割が重要となります。しかし、これらの知識がばらばらに存在しているようでは役に立たないので、実際に活動している生物の適用方法を通じてこれらをどのように使えるのかを学び応用（バイオミメティクス）しようというのです。バイオミメティクスの方法とは、目的に応じた対象生物をよく観察し、本質をうまく表せるモデル化を行い、物理・工学的に考え、実現することです。

このページに続く各章には、生き物はこうやって動いていたのか、こんな巧みな技を使っていたのか、こんな仕組みで生きてきたのか、といった驚きにあふれたことが紹介されています。また、こうやって見てみるとこんなふうに見えるのかとか、数学で表すことがこういう意味があったのかといった発見があります。生物と物理が織りなすファンタジーの世界を楽しんで下さい。

# 1



## 水の粘っこさをどうするか

◆素材：カエル、マス、サメ、マグロ、イルカ、カワセミ

◆道具：流体力学、幾何学

### □ 魚のおよぐ速さは

マスやスズキくらいの大きさの魚であれば、普通に泳ぐと  $0.5 \sim 1 \text{ m/s}$  くらいの速度です。マグロ（図 1.1）くらいの大きさの魚では  $2 \text{ m/s}$  くらいです。イルカやクジラも含めて、遊泳する生物の速度はおおよそ 1 秒間に体長分進む速度だといえます。人間でも、現在のトップスイマーは  $100 \text{ m}$  を約  $50$  秒で泳ぎ、 $2 \text{ m/s}$  ですから、やはりほぼ身長分を 1 秒間で進む速度です。ただ、魚との違いは、人間はめいっぱい頑張った結果の速度です。水の中を自由に泳ぐ魚の遊泳方法の秘密を本章では明らかにしていきます。

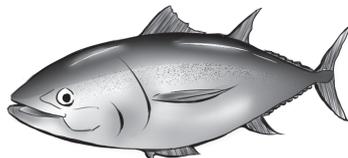


図 1.1 マグロ

### □ 慣性力の世界で泳ぐのか、粘性力の世界で泳ぐのか

マグロの尾ひれは三日月型で断面は翼型をしているのに対し、マスのような川を力強く遡るような魚の尾ひれは三角形の板状のものです。このように、泳ぐ生物の大きさや遊泳速度等の違いによって、身体つきや遊泳方法に違いがあります。

普通、泳ぐときの周囲流体是水です。水の密度  $\rho$ 、粘度  $\mu$ 、動粘度  $\nu (= \mu / \rho)$  を、空気と比較して表 1.1 に示します。水は空気に比べて粘度が高く、粘っこいといえます。また、粘度を密度で割って得られる動粘度は、粘性力に相当し、流体が流れているとき、もしくは流体中を物体が移動しているときに作用する摩擦抵抗力を表しています。流体の動きやすさや動きにくさを表す慣

表 1.1 水と空気の物性値 (1 気圧, 20℃)

	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	粘度 $\mu$ [Pa·s]	動粘度 $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]
水	998.2	$1.002 \times 10^{-3}$	$1.003 \times 10^{-6}$
空気	1.204	$1.822 \times 10^{-5}$	$1.513 \times 10^{-5}$

性力と流体の摩擦抵抗力の比をレイノルズ数といい、流れの性質を表す指標となります。

例えば、体長  $L=1$  m の魚が  $U=1$  m/s の速度で、摩擦抵抗力（動粘度） $\nu=1.003 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s の水中を泳ぐとき、レイノルズ数  $Re$  は、 $Re=UL/\nu=1 \times 1/1.003 \times 10^{-6}=9.970 \times 10^5$  と求められます。この場合、慣性力は摩擦抵抗力に比べ約 100 万倍大きく、摩擦抵抗力の影響は考えなくてもよい大きさといえます。一方で、小さい生物の代表であるプランクトンなどでは、体長  $L=1$  mm、速度  $U=1$  mm/s とすると  $Re$  は約 1 となり、慣性力と粘性力が釣り合っている状態となります。これより小さい生物では、 $Re$  はさらに小さくなり、摩擦抵抗力の影響が出てくるということを意味します。このため、体の大きさに適した遊泳方法をとる必要が出てくるのです。

本章では、水中でいかに推進力を得るのか、抵抗をいかに小さくするのかを解き明かします。

- 1.1 水を蹴って泳ぐカエル** 水かきを薄い板のモデルとして扱い、いかに水を捕らえるかについてみていきます。
- 1.2 魚の尾ひれが生み出す力** 尾ひれを振ったときに描かれる軌跡から、尾ひれが生み出す力について考えます。
- 1.3 魚の表面—ぬるぬるとざらざら—** 魚の表面のぬるぬるやざらざらとした鱗はどのような働きがあるのかみていきます。
- 1.4 高速で泳ぎ続けるマグロ** マグロは遠洋を高速で泳ぎ続けます。マグロの体のしくみから省エネの方法をみていきます。
- 1.5 波を立てない形—イルカとカワセミ—** イルカの頭の先やカワセミの水面への飛び込みでは波が立たない理由について考えます。

# 1.1

## 水を蹴って泳ぐカエル



### □ カエルの泳ぎ

両生類は約3.6億年前に陸上生活できるようになったものの、いまでも水辺という環境が必用です。カエルの幼生期であるオタマジャクシは尻尾を振って泳ぎますが、成体になると水中だけでなく陸上でも移動します。このため、水陸両用の移動手段として水かきのついた足を持っています。水中では、前脚を体側につけたまま、後ろの両脚を同時にキックして泳ぎます。水泳の平泳ぎと違う点です。人間には水かきがついていないので、手と足を使わないと十分な推進力が得られません。ここではカエルを例に、水をキックして推進力を得る方法について考えてみましょう。

### □ 水をキックする

カエルが水をキックすることを、面積  $A$  の円板を使って水を押すことに置き換えて考えてみましょう。円板に一定の力  $F$  [N] をかけ、1秒後にその速度が速度0（静止）から  $u$  [m/s] になったとします。円板の加速度  $a$  は  $a = (u - 0) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / 1 \text{ s} = u$  [m/s<sup>2</sup>] となり、移動距離  $x$  は  $x = (1/2)at^2 = (1/2)u \times 1^2 = (1/2)u$  です。

しかし、このような計算では水中や空気中といった周囲の流体のことは考慮に入れていません。じつは、**図 1.2** に示すように、板が動く先にある水を押しきれないと進むことはできないのです。また、動いた板の後ろには、空洞ができないように、押しのけた水の量と同じ量の水が入ります。したがって、全体として動く水の量は、板を  $x$  の距離だけ動かすときに押しのけた水の体積  $V = xA$  の2倍であり、 $2V$  となります。水の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] とすると、全体として動く水の

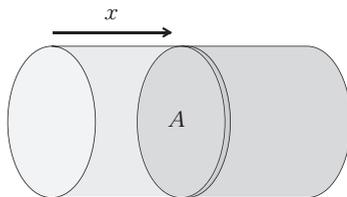


図 1.2 押しのける水の量

質量  $m$  は  $m=2\rho V$  で表されます。水の質量に比べて板の質量は無視できるものとする、板を動かすということは、水を動かすということにほかなりません。

さらに、加速度を  $du/dt$  と書くと、力  $F$  が作用して運動する物体の運動方程式は  $m (du/dt) = F$  と表されます。先の設定で板の移動距離は  $x = (1/2)u$  ですから、動かす水の体積は  $2V=2 \times (1/2)uA = uA$  です。これを運動方程式に代入すると、 $\rho A u (du/dt) = F$  となり、1秒間で積分すると

$$\rho A \frac{1}{2} u^2 = F \quad (1.1)$$

が得られます。この式から、同じように板を動かすためには、密度  $998.2 \text{ kg/m}^3$  の水中では、密度  $1.204 \text{ kg/m}^3$  の空気中にくらべて1000倍大きな力が必要だということがわかります。

### □ 水から力をもろう

さて、脚で水に力  $F$  を与えると、作用反作用の関係から、蹴った脚に水から  $F$  の力が返ってきます。これが体を動かす推進力になります。脚を縮めて伸ばす動作によって体を距離  $x_a$  だけ前に進ませます。その関係を図 1.3 に示します。縮めた脚の長さを  $L_c$ 、伸ばしたときの長さを  $L_s$  とします。また、蹴った脚によって水が  $x$  だけ移動したとします。これらの間には次式の関係が成り立ちます。

$$x_a = L_s - L_c - x \quad (1.2)$$

もし、水が壁のように動かなければ  $x = 0$  ですから、 $x_a = L_s - L_c = x_{a \text{ MAX}}$  移動します。逆に体が移動しなければ  $x_a = 0$  ですから、水が  $x_{\text{MAX}} = L_s - L_c$  移動することになります。

力  $F$  を出して体を元の位置から  $x_a$  だけ前に進める仕事  $W$  [J] は、力  $\times$  距離

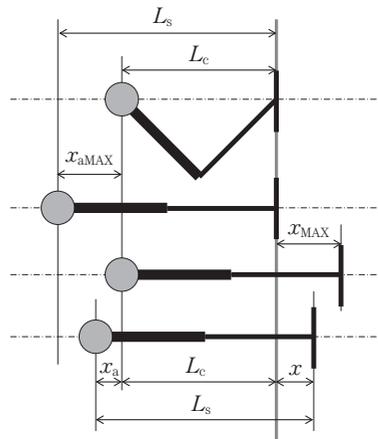


図 1.3 脚を伸ばして水を蹴る

で表されるため、 $W = Fx_a$  です。筋肉の能力、いわば入力エネルギーは、力  $F$  で脚を  $(L_s - L_c)$  だけ伸ばす仕事  $W_L = F(L_s - L_c)$  ですから、この運動の効率  $\eta$  は次式のように表されます。

$$\eta = \frac{W}{W_L} = \frac{Fx_a}{F(L_s - L_c)} = \frac{F(L_s - L_c) - Fx}{F(L_s - L_c)} = 1 - \frac{x}{L_s - L_c} \quad (1.3)$$

もし、脚で水を蹴っても水が動かなければ、水の移動距離は  $x=0$  となるため、体を動かすのに蹴った力を 100% 推進力に使えることになります。実際には水は動くので、その分だけ効率が落ちることになります。逆に効率 0% というのは体が動かないとき、つまり、 $x_a=0$  のときだということになります。この場合はいわゆるのれんに腕押し状態となり、水を動かすことだけに脚の屈伸を使ったことになります。

## □ より大きな力をもらうためには

運動の効率を表す式 (1.3) から、より大きな推進力を得る方法として、つぎのことがいえます。① キックする水を動かさないこと、② 脚の屈伸差  $(L_s - L_c)$  を大きくすること、③ キックの時間を短くすることです。以下にこれらの具体策を解説します。

まず、① のキックする水を動かさないようにするにはどうすればよいか考えてみましょう。もともとの運動方程式  $m (du/dt) = F$  に戻ってみると、水が動かないということは速度が  $u \rightarrow 0$  ということですから、式が釣り合うためには動かす水の質量を  $m \rightarrow \infty$  とする必要があります。つまり、なるべく大量の水を捕まえるということです。このためには、板の面積  $A$  を大きくします。カエルの足には水かきがついているので、膜の部分を加えると指だけの面積よりは広がっています。

つづいて、② の方法として、脚を大きく縮め、伸ばしたときと縮めたときの差を大きくします。これによって、式 (1.3) の第二項が小さくなって効率が上がるというわけです。脚の長さが長いほうが有利ということになります。

最後に、③ の方法であるキックの時間を短くすると、力積の関係から大き

## あ　と　が　き

ある日、女郎蜘蛛のネットに蛾がかかった瞬間に出くわしました。蜘蛛がバタバタと暴れる蛾にさっと近寄り、繰り出す糸で手早くグルグル巻きにしました。そのときの蜘蛛の手際のよさと素早さに、自然界における生き残りの術に対して畏敬の念すら覚えました。

これに対して、蛾の立場に立ってみると、一旦ネットにかかるとなすすべなく蜘蛛の餌食となってしまう哀れさを感じ、これぞ弱肉強食の世界、自然界の厳しさを人間も思い返さなくては、と涙が目にあふれました（最近著者はなみだもろい）。……とその途端に、蛾がグルグル巻きにされたミイラのような姿から、なんと抜け出し飛び去りました。一体何が起こったんだと私が驚いていると、蜘蛛もやはり驚いたらしく、あれ？ って感じの顔をして、呆然としていました。ところがすぐ次の瞬間、蜘蛛はこんなことに慣れているらしく、さっと諦めなんとグルグル巻きに使った糸を食べ始めたではありませんか。見ている私は、えっ？ 糸を食べて再利用するんだ、と思い、またある種の感動と小さな生き物の知恵に感動しました。蛾の方もいつもやられるわけではないぞということを実践で示してくれ、人間が思うほどか弱いものでもないらしいのです。この瞬間、先ほどとは逆に、せっかくの餌を取り逃がした蜘蛛が後始末をしている姿に憐れみを感じ、うまく逃げ出した蛾の術に生き抜くすごさに感動を覚えました。

それと同時に蜘蛛の糸の粘り気と蛾のくっつき具合、蛾の羽の力強さ、蜘蛛の糸の成分、再生の仕方、蜘蛛の獲物獲得成功率、などを考えた自分は工学者だなと思いました。皆さんも身の周りの小さな自然に目を向け、いろいろな感動とともに科学的興味が湧いて、解明してみようというときに、本書が役立てられればこの上ない喜びです。

# 索 引

<b>【あ行】</b>	サ メ 14	羽ばたき 38
足 裏 60	仕 事 64, 164	バ ラ 87
アスベクト比 33, 44	深海魚 94	は り 159
イ カ 120	新幹線 23	バルバス・バウ 20
イ モ 86	人 口 166	光 137
イルカ 20	スズメバチ 122	ピサの斜塔 109
色 123, 136, 140	正多角形 104	微 分 168, 171
隕石衝突 162	生物模倣材料 88	ファンデルワールス力 58
ウイルス 104	<b>【た行】</b>	フィボナッチ数列 146
美しさ 144	タイヤ 62	フィレット 34
運動方程式 5, 28, 31, 49	タ コ 118	風 船 27
栄養ドリンク 165	ダチョウ 52	フック 82
エネルギー 64, 164	多面体 106	フラクタル 100
オイラー数 146	ダンス 152	ベルヌーイの式 71
黄金比 144, 150	タンポポ 26	放散虫 107
オナモミ 82	断面二次モーメント 36, 83	星型多角形 105
尾ひれ 8	チーター 48	<b>【ま行, や行】</b>
<b>【か行】</b>	翼 34	マグロ 16
カエル 4	ティラノサウルス 158	摩 擦 12, 17, 57
カオス 167	天気予報 169	マ ス 10
カマキリ 126	テントウムシ 58	マナティー 92
カレーライス 64	テンポ 152	マラソン 52
カロリー 42, 66	毒 108	未 来 170
カワセミ 22	<b>【な行】</b>	ムササビ 30
環 境 92	内在力 108	面ファスナー 85
慣性モーメント 11, 153	虹 色 141	ヤモリ 56
擬 態 114	ぬめり 12	揚 力 31
気のう 44	粘 度 2	予 測 166, 170
吸 水 70	<b>【は行】</b>	<b>【ら行, わ行】</b>
空気抵抗 43, 52	ハ ス 87	螺 旋 102
クジラ 92	ハチの巣 96	ラ ン 130
化 粧 148	撥 水 86	リズム 152
原形質流動 74	発 熱 78	リブレット構造 15
航空機 34	葉っぱ 86	レイノルズ数 2, 27, 71
木の葉 29	花びら 87	ロータス効果 87
<b>【さ行】</b>	羽 34	六角形 96
ザゼンソウ 78	翅 36	ロマネスコ 101
サッカーボール 106	バ ネ 49	渡り鳥 42

— 著者略歴 —

1977年 北海道大学工学部機械工学科卒業  
1982年 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了（機械工学第二専攻）  
工学博士  
1982年 名古屋大学助手  
1985年 北海道大学講師  
1987年 北海道大学助教授  
1990年 メルボルン大学および南カリフォルニア大学研究員  
2002年 東洋大学教授  
現在に至る

物理の眼で見る生き物の世界

— バイオミメティクス皆伝 —

Wonder World of Living Things in Physical Points of View

—Biomimetics—

© Osamu Mochizuki 2016

2016年3月25日 初版第1刷発行



検印省略

著者 もちづき 望月 修  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06751-4 (鈴木) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします





