

フリッパー泳についての一考察

本稿の構成

はじめに

第1節……フリッパー泳は特殊な泳ぎ

第2節……フリッパーの運動

第3節……水の抗力は味方であり敵である

第4節……物体が水（流体）の中を移動するときのいろいろな指標

- ・レイノルズ数
- ・フルード数
- ・迎え角と揚力

第5節……フリッパー固有の性質

- ・形状から
- ・材質から

第6節……フリッパーに力を伝える身体機能

第7節……フリッパー競泳で成績を上げるには

おわりに

参考資料

はじめに

全日本スポーツダイビング室内選手権大会は、国内唯一のフリッパーレース全国大会で、ダイビング活動の一環として多くのダイバーが大会に参加する。この喜ばしい状況に、本稿はさまざまな視点からフリッパーでの泳ぎを捉えようと試みたものである。

その前提を、

- (1) 一般的にダイビングで用いるフリッパー（ビーフィン）を使い、
- (2) マスク・スノーケル・ウエットスーツを使用したフリッパーでの泳ぎ、

とし、フィンスイミングとの混同を避けるため、以下フリッパーでの泳ぎを、フリッパー泳およびフリッパー競泳と言うことにした。

第1節 フリッパー泳は特殊な泳ぎ

ヒトは泳ぐことに適していないといわれるが、習

えば（教えてもらう、自習する）泳げるようになる。泳げるようになれば、陸棲動物の中で最も優秀な泳者になる。しかし、水棲動物には及ばない。そこで、ミクロ的な生物を除いた代表的な水棲動物の泳ぎ方を示すと、

- (1) ジェット推進の生き物：イカ、蛸、クラゲ、貝など。
- (2) 蛇行運動の生き物：ウミヘビ、ウナギ、ウツボなど。
- (3) 扇ぎ運動の生き物：マグロ、イシダイ、アジなどの魚とクジラなどの水棲哺乳類。
- (4) 羽ばたき運動の生き物：イトマキエイ、ギンザメ、マンボウ。

などがあげられる。

カレーやヒラメを除けば、たいていの魚は尾ヒレを体軸に対して横（水平）方向に、クジラなどは縦（垂直）方向に動かす。そして、双方の共通点は尾ヒレがひとつである。

フリッパー泳は（3）の扇ぎ運動（ファニング運

動)に該当し,

- ・ヒレ (フリッパー) は二枚で,
- ・ヒレの運動は体軸に対して縦方向で,
- ・水泳のように手は使わない.

ここに, フリッパー泳の特殊性を見出す.

第2節 フリッパーの運動

フリッパー泳は, ヒトがフリッパーに力を与えて推進力を得る. フリッパーの運動は, 脚とフリッパーの長さを加えた長さを半径とした円周上の角運動であり, フリッパーの周期運動で直進運動をするということである.

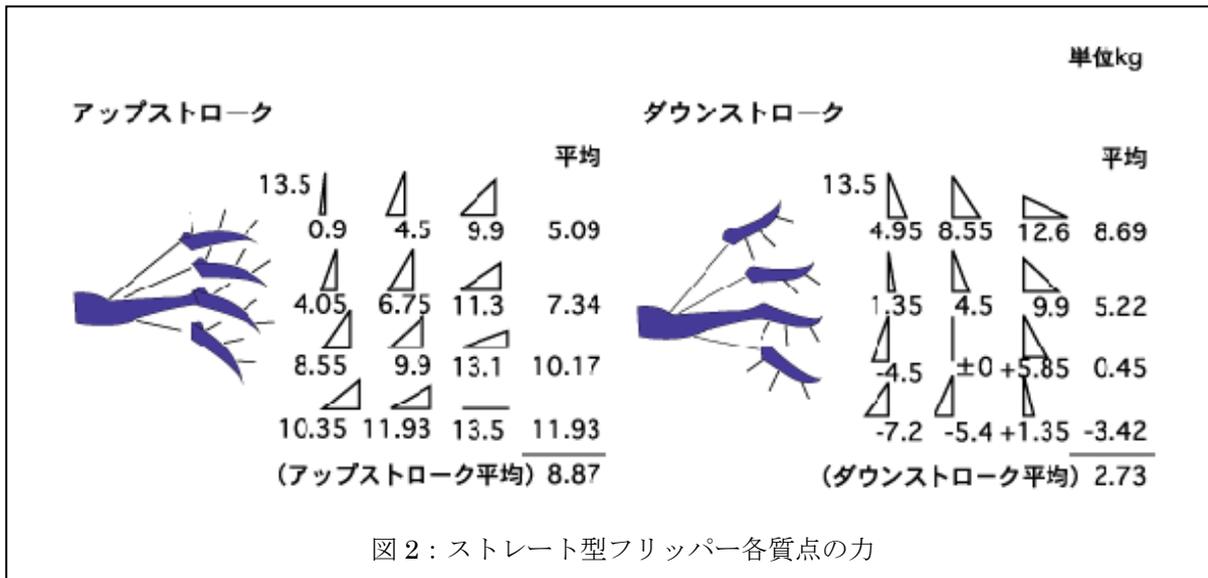
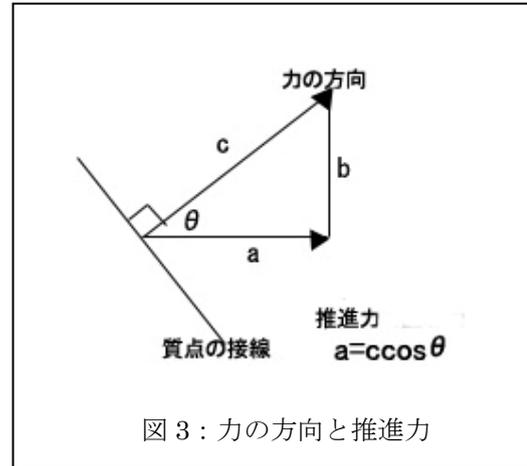


図 2: ストレート型フリッパー各質点の力

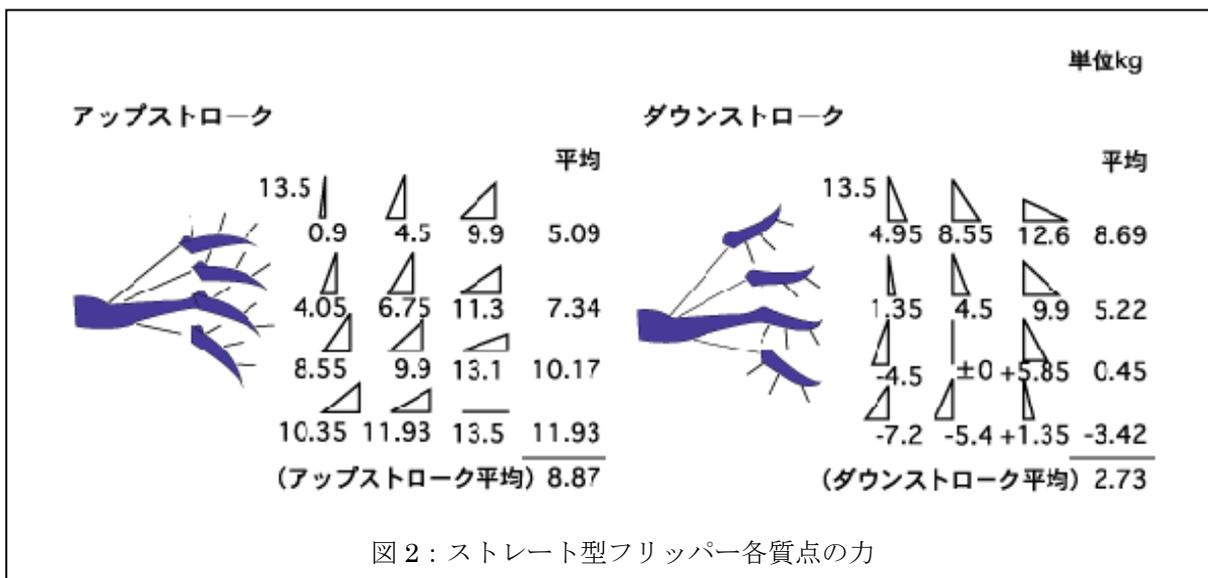


図 2: ストレート型フリッパー各質点の力

(1) 角運動量

運動量は質量と速度の積で, 運動の勢いを表したもので, 角運動量^[1]は慣性モーメントと

角速度の積で, 回転運動の勢いをベクトル^[2]で表す(図 1・2 の三角形). ちなみにこの図は, 50 年位前にフレッド・M・ロバーツという

人が発表したデータで、この数値が、現在のフリッパー解析と一致するかわからないが、少なくともベクトルが示すフリッパーの運動の出力方向は参考になる。尚、推進力はブレード各質点の接線に直角に働く力の分力 $CCOS\theta$ の総和である (図 3)。

ニュートンの運動法則^[3]は、速度は力に比例し質量に反比例すると表現する。回転運動では、回転角速度の変化は力のモーメントに比例し、慣性モーメントに反比例すると表現する。

(2) 慣性モーメント

慣性モーメントは質量に対応し、回転運動の慣性の大きさを表し、質量と回転軸との距離の二乗で表される。平たくいえば慣性モーメントは、フリッパーの動かしにくさ、である。

(3) 角周波数と角速度^[4]

角周波数は角速度ともいう。角速度を速めることで、ストロークの周波数(振動数)も上がる。1 往復する時間を周期といい、フリッパーはアップストロークとダウンストローク(合わせてヒービング運動という)の往復運動で、片足はアップ、もう片方はダウンだから、これを合わせてフリッパーの 1 往復(周期)とし、波の振動数(周波数)とみると、

$$V = f\lambda \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots (1)$$

f (Hz = 回/s) : 振動数 (ビート数)
 λ : 波長
 V (m) : 速度

の関係から、振動数が多ければおおいほど、一つの波の長さが長いほど、波の進む速さは速くなる。振動数を多くして速さを出そうとすればブレード長の短いフリッパーで、波長を長くして速さを出そうとすれば長いフリッパーで、身体的要件もあるが、瞬発力が要求される短距離泳では前者を、持久力が要求される長距離泳では後者が有効ではないか、といえそうである。

第3節 水の抗力(抵抗力)は味方であり敵である

うちわを扇ぐと風(空気が動く)がおきる。だが、手は移動しない。水の中でフリッパーを扇ぐと重たく身体が反対方向へと向かう。この重たく感じるのが水の抗力(抵抗)で、流体の密度や粘性(表 1)による作用である。粘性とは粘っさで粘性係数といい、イメージしにくいのが、空気にも水にも、浮んでいたりするだけでは何の変化もない。扇ぐ動作をすることによって初めて身体が移動し始める。つまり推進力が生じる。

フリッパーに力を与えると、水が後方へと押され、

項目	水		空気
	真水		
密度 ρ (kg/m ³)	真水	1,000	1.225
	海水	1,026	
粘性係数 μ (kg·sec/m ²)	真水	1.16×10^{-4}	1.8×10^{-6}
	海水	1.026×10^{-4}	
動粘性係数 ν (m ² /sec)	真水	1.14×10^{-6}	1.4×10^{-5}
	海水	1.19×10^{-6}	

表 1 : 空気と水の性質 (標準状態 1 気圧 15°C)

その反作用として推進力が発生する(ニュートンの作用反作用の法則)。もちろん浮力の影響もあるが、要は水の抗力がなければ泳ぐことができないことになり、水の抗力は泳ぐものにとって味方といえる。

水の抗力とは、流体(液体や気体)の中を運動する、あるいは流れの中に置かれた物体に働く力のうち、流れの速度方向に平行で逆向きの成分で、次式で与えられる。

$$D = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_d \dots\dots (2)$$

D : 抗力
 ρ : 流体の密度
 S : 代表(投影面積)
 V : 速度
 C_d : 抗力係数

$$\frac{1}{2} \rho V^2 : \text{動圧}^{[5]}$$

(2) 式から、水の抗力は、速度の二乗、代表面積(投影面積)、抗力係数に比例する。特に速度に注目すると、スピードが上がれば上がるほど水の抵抗が増すということで、泳者にとって悩ましいものである。この方面からすれば水の抗力は敵といえる。

泳ぎは、一見二律背反的な作用の上に成り立っている。しかし、泳者はこれらの作用を利用し克服しなければならない。

第4節 物体が水の中を移動するときの指標

水中に置かれた物体あるいは水中を運動する物体には水の抗力が働く。(2) 式の動圧、進行方向から見た物体の代表(投影)面積はイメージしやすいが、抗力係数は、水中の物体に発生するさまざまな抵抗

である。その前に水の抵抗力には、どのようなものがあるかを示す。

(1) 形状抵抗

水中を物体が移動するとき、物体の前面の水を押しながら進む。その反作用として物体にはの抵抗が働く。(2) 式の代表面積 S に当たり進行方向から見た物体の面積 (投影) が広いほど抵抗が大きくなる (図 1)。

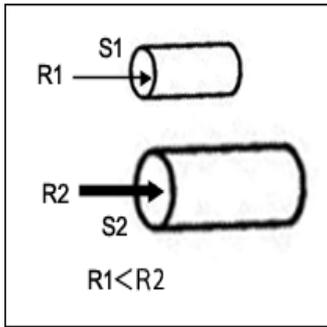


図 1：面積に対する抵抗力

(2) 造波抵抗

水面を移動するとき波がおきる。(2) 式の動圧によるもので、速度の二乗に比例して増す。水面を移動するもの (船や泳者) が受ける抵抗で、最もエネルギーを奪う抵抗となる (図 2)。



図 2：造波抵抗

(3) 粘性摩擦抵抗

物体の表面と水の摩擦によっても後ろ向きの抵抗がおきる (図 3)。この粘性摩擦力が水中に置かれた物体あるいは水中を運動する物体の環境を決める要素である。

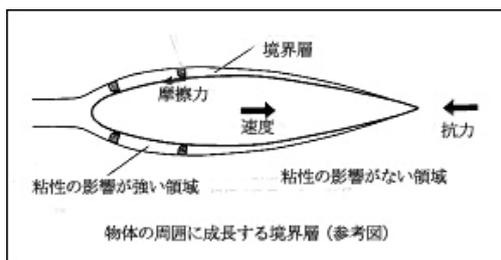


図 3：摩擦抵抗

(4) うず抵抗

水中を物体が移動するとき物体の後方に渦ができる。これは物体の後方に生じる乱流で起こり、水とともに物体を引き戻す現象である (図 4)。フリッパー競泳では、造波による泳者の周囲に現れる波はコースロープによって消されるので、泳者の後方で起きる渦抵抗は、フリッパーの運動によるものだけを考える。

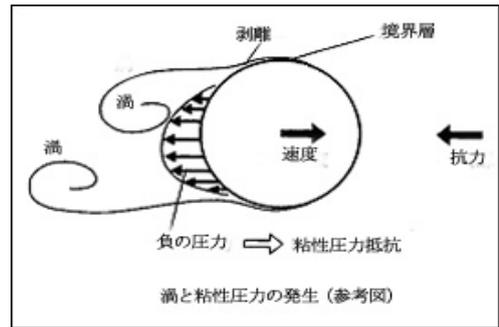


図 4：渦抵抗

以上のように水中を運動する物体にはさまざまな抵抗力が掛かってくる。これらの抵抗力は水の分子が連続していることで、複雑な相を呈するからである。

・レイノルズ数

レイノルズ数 (無次元数)^[7] は流体力学において、粘性をもつ流体の振舞いを特徴づける重要な指標である。レイノルズ数は、流体の慣性力と粘性力の比を表す。粘性係数は水のほうが空気より二桁大きい (表 1)。それを密度で割った動粘性係数^[8] が水より小さい。同じ大きさの物体が、同じ速度で、水中と空中を動く場合、慣性力と粘性力の比を示すレイノルズ数 (速度 × 長さ / 動粘度係数) が水中では空中に対して一桁大きくなり、水中では慣性力に比べて粘性力が少ないことを表している。

つまり、レイノルズ数が「大きい」のときは粘性力を無視してもよく、レイノルズ数が「小さい」のときは慣性力を無視してもいいということ、フリッパーの動きを止めても「惰性」でしばらく進むのは、ヒトの泳ぐ環境が、レイノルズ数が大きいところにあるからで、慣性の法則に従った運動である。

レイノルズ数 = 速度 × 長さ ÷ 動粘度係数 = 慣性力 ÷ 粘性力で、次式で与えられる。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \dots\dots (4)$$

ρ : 水 (流体) の密度

v : 物体の平均速度
 L : 代表長さ
 μ : 水 (流体) の粘度

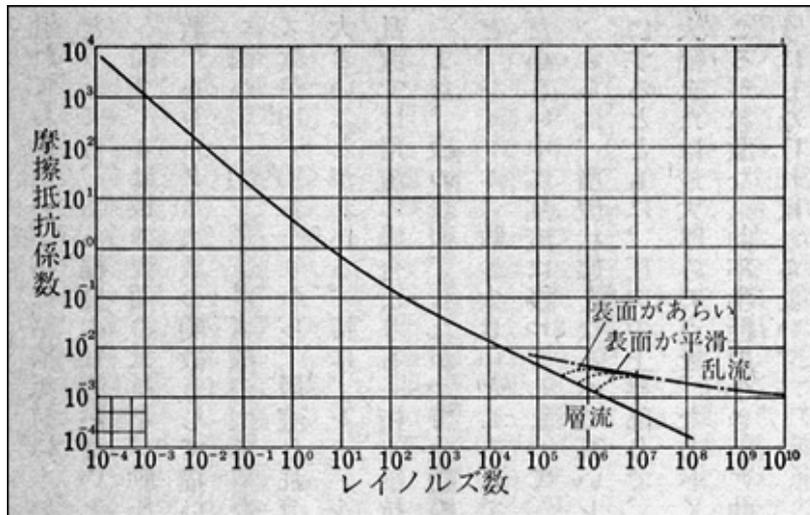


図 5 : 抗力係数とレイノルズ数の関係

(図 5) は、抗力係数 (摩擦抵抗係数) をレイノルズ数の関数として表したもので、以下のことが読みとれる。

- (1) レイノルズ数が大きくなるにつれて摩擦抵抗係数は著しく減少する。
- (2) レイノルズ数が $10^4 \sim 10^5$ あたりから、流れは層流と乱流との二種類の状態にあつて、乱流の抵抗は層流に比べて大きくなる。
- (3) 物体の表面の粗さの程度も影響する。きめが細かいほどレイノルズ数の大きいところまで層流が保持され、表面が粗くなるとレイノルズ数がまだ小さいうちに乱流に移ってしまい抵抗が大きくなってしまう (点線部分)。

参考までにヒトと水棲生物のレイノルズ数を示す (表 2)。

生体運動(速度)	Re(概数)
鯨の遊泳 ($10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10^8
マグロの遊泳 ($10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10^7
イカのジェット推進遊泳 ($5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10^6
ヒトの遊泳 ($2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ~)	10^6

表 2 : 生体のレイノルズ数 Re

・フルード数^[9]

流体中を運動する物体は、高速のときには粘性力を無視することができるが、フリッパー泳は、水面を泳ぐものと、水中に潜って泳ぐ潜泳があり、両者とも動圧による抗力が最も大きいと考えられる。水

面では、泳者の前方に生じる波が「水の壁」のように見える。潜泳では造波は見られないが、たとえば、ジェット機が音速以上で飛ぶとき、前方の空気を圧縮して「音の壁」という抵抗が生じる。ジェット機は「音の壁」という抵抗と戦って飛ぶ。水面泳でも潜泳でも「水の壁」との戦いといえる。

いずれにせよ、この「水の壁」に打ち勝つのは、泳者のエネルギーつまりパワーということになる。それでも、競泳では極力抵抗力を少なくしたい。

造波抵抗を考えるとフルード数という指標がある。(図 5) はフルード数と造波抵抗係数^[10]の関係を示したもので、フルード数が 0.5 までは造波抵抗は大きくなる一方で、0.5 を越えると造波抵抗係数は最後の山を越えてあとは減少し

ていくが、ヒトが泳ぐ環境は、

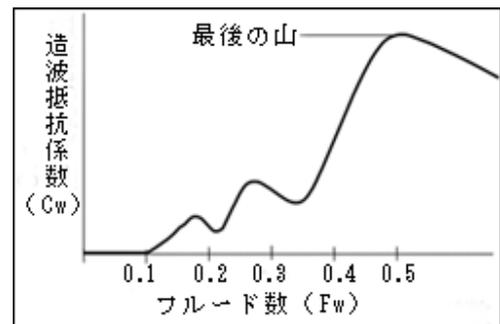


図 5 : 造波抵抗係数とフルード数の関係

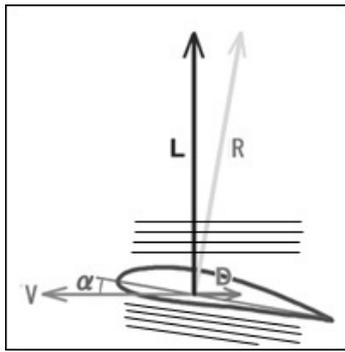
レイノルズ数 ($Re = 2.5 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^6$) の、乱流域で、フルード数 ($Fr = 0.4 \sim 0.5$) から、造波抵抗も増大する場面である。

これらからも、100 分の 1 秒を争う競泳やフリッパー競泳では、少しでも抵抗を少なくする工夫が求められる。禁止になったが、水泳の高速水着はこのような背景から考案された。フリッパー競泳でいえばウエットスーツの表面も充分吟味することも必要となる。

・迎え角と揚力

流体中を運動する物体が進む方向に対して持つ角度を迎え角といい、迎え角を持った進み方をすると物体には垂直方向に揚力^[11]が発生する (図 6)。

フリッパー泳者の側面を見ると、頭からお尻と大腿の境目 (お尻の膨らみが終わるあたり) まだが飛



L:揚力
D:抗力
R:合力
α:迎え角
V:速度

図6: 迎え角と揚力

行機の翼のようなものと考え、むろん、飛行機の翼の断面形状とは違っている。その大腿の境目からフリッパーの先端までが駆動域で、フリッパーに推進力を発生させる。船のエンジンとスクリューの関係とすることができる。さらに水面でのフリッパー競泳は、モーターボートの航走に似ている。モーターボートはスピードが増すと船首部分が大きく上向きになる。これは水と空気の圧力（動圧）の差で起る揚力で浮き上がり、水と空気の抵抗を低減させていると考える。

一方、水面のフリッパー競泳者にも、下方（腹側）と上方（背側）との圧力差で揚力が発生する。迎え角を大きくすれば揚力も大きくなるが、競艇のボートがしばしば空中に舞い上がり失速してしまうのは、迎え角を必要以上に大きくとった結果である。ヒトの力で進むフリッパー泳ではこのようなことはないが、前方の「水の壁」に対する適正な迎え角をとることが肝要で、揚力を充分生かした泳ぎの姿勢が求められる。

第5節 フリッパー固有の性質

フリッパーは、形状・材質から多種多様なものが市販されている。すべてについて言及するのは不可能なので、本稿では、最大公約数的に合成ゴム製の（図7）のフリッパーを題材にしている。フリッパーを製造することがない者が、フリッパーを考えたとき、参考とするのは魚の尾ヒレであろう。設計者、製造者からすれば、誤りや表現違いがあるのも覚悟の上で進める。

・形状から

魚の尾ヒレに関する流体力学からみたパラメータは三つある。それをフリッパーに当ててみる。

(1) アスペクト比

一般には長方形の縦と横の長さの比をいう魚のヒレや鳥の翼やの場合は、ヒレ幅（翼の二

乗をヒレ（翼）面積で割った値である。フリッパーで見れば、（図7）からアスペクト比は

b : ブレード幅 S : ブレード面積

$$A_R = \frac{b^2}{S} \dots\dots (5)$$

といえる。

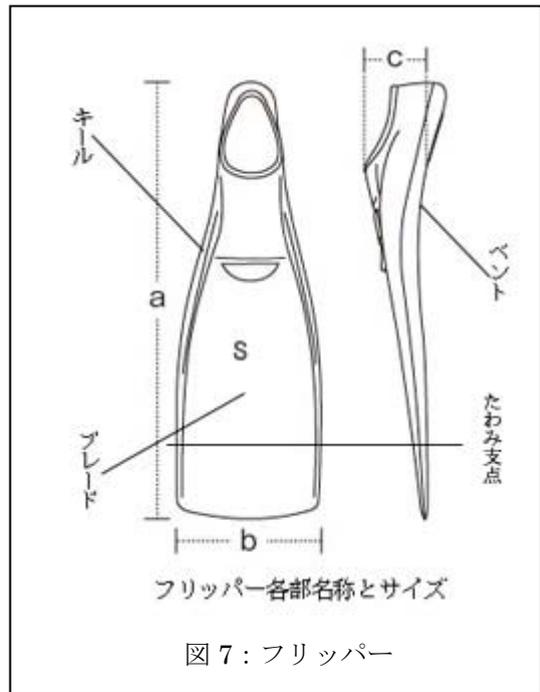


図7: フリッパー

魚は尾ヒレを水流や泳ぎの状況によって、拡げたり縮めたりして、アスペクト比を変えるが、フリッパーは、ブレードに予め面積を与えられることによって、それぞれ固有の性質を持つことになる。

現在は、どう呼んでいるのか不明だが、（図7）のような予めベント（カーブ）を持たしたフリッパーをオフセット型、ベントを持たないものをストレート型のフリッパーといい、いま市販されているフリッパーのほとんどが、オフセット型のフリッパーである。

フリッパーは、片足はアップ、もう片方はダウンだから、これを1周期とみなしてきた。そうすると、フリッパーのアスペクト比は、

$$A_R = \frac{(2b)^2}{2S} \dots\dots (6)$$

となり、例えば（図7）のようなフリッパーだと、

概算で幅が 20 cm, ブレード面積が 792 cm² 位で, このフリッパーのアスペクト比は約 2.0 でメジナ, ボラとほぼ同じで, これらの魚と同程度の推進力傾向にある. ブレードの長いフリッパーでもアスペクト比は 1.0~1.2 位であろう. いずれにせよマグロやアジの高速魚に到底およばない.

以上からアスペクト比が大きければ推進力も大きくなり, 高速魚のマグロのアスペクト比は 8, 低速魚のコイは 1.8 で, クジラはその中間で 4.4 で, 尾ヒレの形から想像できる. そうであればフリッパーも幅を大きくすればいいと思うが, モノフィンと違い両足に履くビーフィンでは互いぶつかり合ってしまうので, おのずとして幅は決まってくる.

(2) 後退角

飛行機の翼は, 胴体に対して翼が垂直でなく翼の先端部が後方へ下がっている. この角度を後退角という. (図 7) のような一般的なフリッパーでは, 後退角は考えなくていいようである. ただし, 魚の泳動には重要なパラメータになっている.

(3) テーパー比

これも飛行機の翼でいうと, 翼の先端部に行くに従って幅が小さくなっている. これをテーパーといい, 翼先端幅を翼付け根幅で割った値をいう. フリッパーは, 先端部にいくほど幅が広くなり飛行機の翼と逆になっている. これはヒトが足に履く使用上のことから, 平面のテーパーは考えない. しかし, 側面はブレード^[12]もキールも先端部に行くに従って, 厚さは薄くなりテーパーになっている. この厚みの比をフリッパーのテーパー比とみれば, フリッパーの性能上見過ごせない要素だと考える.

このテーパーに関連した重要な要素がある. それは, 筆者が勝手に名付けた「たわみ支点」というものである. フリッパーの推進力は, クロールでの腕と手の運動の中で, かきの最後はプッシュという水を押す動作で, フリッパーの運動は, このプッシュを連続的に行なっているのである. (図 1・2) から同様に見て取れる. また (図 7) のフリッパーは先端部よりブレード長の三分の一のところなたわみ支点がある. これが意味するところは, フリッパーはブレード面で水を押して推進力を得るので, ファニング運動で後送される水の付加質量^[13]を増大させ (付加質量効果), これに伴う推進力を上げるようにするために, フリッパー全体のたわみを抑制させている, と考える. このことから, フ

リッパーにはそれほどたわみ性は要求されていない.

さらに, たわみ支点からフリッパー先端部にかけて抗力によるたわみ (曲がり) が生じる. アップからダウンに変わるときに, ダウンからアップに変わるときに, 出力が最も大きくなる. これはフリッパーの弾性による効果, すなわち, たわみ支点からのフリッパー先端までの反発力が加算される. この弾性による返し効果をチップアクションといい, 材質も含めたフリッパーの固有の性質となる. この効果を高めるためには, テクニク的に切り替えしを速くすることで, クロールのバタ足でも, ビート数に関わらず, この切り替えしを速くすることが推奨されている.

たわみ支点がフリッパー先端部より遠いものは腰のないフリッパー, 近いものは腰のあるフリッパーといえるのではないかと思うのである. たわみ支点とキールやブレード面のテーパーとの間には, こんな関係があると考え.

・材質から

材質は, フリッパーを性格づける重要なものである. ブレード面がプラスチック系のものもあるが, ここでは合成ゴム製を題材としている. 単に合成ゴムといっても十数種類 (系) もあって, それらを重合^[14]して作られる. その配合や形状や製法は, 各メーカー独自の方法となり, 設計思想を含めて公表は難しいとしている.

ゴムは力を加えられると変化する. この時の「ひずみ」と「力」の関係を弾性率といい, 力をひずみで割ったもので, フックの法則^[15]により

$$\text{ひずみ} (\varepsilon) = \frac{\text{応力} \sigma}{\text{ヤング率} E} \dots\dots (7)$$

で表される.

ヤング率は, ものを引っ張ったときの伸びと力の関係から求められる定数で弾性率を表す.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots (8)$$

つまり, ヤング率は, 応力を元の長さを伸びで割ったものの積となり, ヤング率が大きいと伸びが小さくなりすなわち伸びにくい材料で, ヤング率が小さいと伸びが大きくなり伸びやすい材料となる. ゴムの硬度という値はヤング率に相当し, 0 から 100

に区切られ、数値が大きいほど硬く反発力が強くなる。フリッパーを観察すると、たわみ支点を境に外力による変形が少ない剛性部と、外力による変形がある柔性部（弾性部）で作られている。この当たりが製造上最も難しいところと推察する。

第6節 フリッパーに力を伝える身体機能

さて、ここからフリッパー泳、フリッパー競泳の本論で、本当は本節と次節で述べることだけで充分と思っているが、その背景には、これまでと述べた諸々の事柄があるので、これを省くことはできないと考えたからである。

「水の抗力は、味方であり敵である」と冒頭で述べた。つまり、泳ぐことは、水の抗力とヒトの運動エネルギーのせめぎ合いで、フリッパー泳では、フリッパーにどれだけの運動エネルギーを与えるかということになる。

水の抗力は、 $D = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_d$ で。

運動エネルギーは、 $W = \frac{1}{2} m V^2$ である。

水の抗力も水が持つエネルギーなので、これを F_d 、

$\frac{1}{2} \rho S C_d$ を m_d に置き換えると、ニュートンの運動

方程式 $F = m a$ から、水の抗力は、

$$F_d = m_d \cdot a \dots\dots (9)$$

と表され、同じように運動エネルギー W を F_w 、

$\frac{1}{2} m$ を m_w に置き換えると、

$$F_w = m_w \cdot a \dots\dots (10)$$

となり、常に $F_d < F_w$ になるように、フリッパーに力を与えなければならない。 $F_d > F_w$ となれば減速していく。フリッパーの力はブレード各質点の力の総和で、フリッパーは $F_d < F_w$ になるように働いているが、ブレードの力が具体的にイメージできないので、ひとつの例として付加質量を採用する。付加質量を m_2 とすると (10) 式は、

$$F_w = (m_w + m_2) a \dots\dots (11)$$

となり、 F_w が F_d より大きくなって、フリッパー

の推進力が得られているのである。

次に、フリッパーに力をあたえる脚の機能を考える。フリッパーを動かす駆動部は脚で、脚には、

- (1) 骨盤と大腿骨を繋ぐ股関節
- (2) 膝関節
- (3) 足首（距腿関節）
- (4) 足の指関節

があり、主な駆動部は股関節と膝関節で、動く部分をヒンジという。魚は胸ヒレや胸ヒレなどを使っても推進力を得るが、フリッパーに対応するところは尾ヒレである。尾ヒレは脊椎を連結し、魚のヒンジは一つだけである。ヒトの主なヒンジは、股関節と膝関節の二つで、ここでは股関節をAヒンジ、膝関節をBヒンジと呼び、フリッパーのたわみ支点も重要なヒンジなのでCヒンジと呼ぶことにする。

脚のヒンジを動かすのは筋肉で、筋肉はたいへん多くあり個々の筋肉について言及するのは無理なので他に譲るが、筋肉を鍛えることは健康の維持やスポーツにとって大切なことである。

まず、一点ヒンジと二点ヒンジを考える。それには、無次元振動数^[16]と位相差^[17]という概念が必要になる。無次元振動数が大きいほど推進力が増すが、パワーが必要になる。うちわを例にとると、うちわを持ち、腕をピンと伸ばし、Aヒンジに当たる腕の付け根だけで動かすと、動かしにくく重い。このときの無次元振動数はおよそ0.4~1.0位の範囲とされる。このとき、うちわでなく木の板だったら、ほとんど風はおこらない。それはたわみがないからで、うちわは自らがたわむことによってヒンジを作りだしているのである。これからもフリッパーのたわみ支点は重要といえるのである。

次にBヒンジに当たる肘関節を使って扇ぐと、苦もなく振幅も大きく楽に動かすことができ風量も増す。もちろんCヒンジも働き、このときの無次元振動数はおよそ0.2~0.3と低い値となるとされている。うちわを扇ぐとき、ヒトは無意識に楽なほうを選んでいくということである。これから見えることは、フリッパー泳では、AヒンジとBヒンジのコンビネーションを上手にとることと、Cヒンジを有効に働かせるのがコツになる。

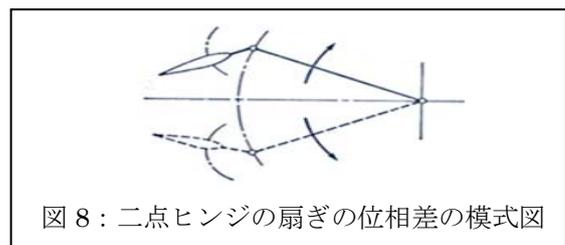


図8: 二点ヒンジの扇ぎの位相差の模式図

第7節 フリッパー競泳で成績を上げるには

第1節から第6節を念頭に、フリッパー競泳で如何に良い成績を上げるかを考える。

(1) 泳ぎの姿勢

水抗力の要素である進行方向への代表面積（投影面積）を狭くし、迎え角を適正にとり揚力効果を上げる。この適正角度は、今のところ推奨できる角度は得られてなく、個人個人が適正と思われる角度で泳いでいる。いずれ流体力学的にもフリッパー泳法的にも、多くの選手やコーチによってオーソライズされる適正な角度が発見されることを期待している。

良くない水中姿勢の例をあげれば、代表面積（投影面積）を狭くしようと、頭の頂点を進行方向に向け、目線が真下に行っている姿勢である。この姿勢だと揚力効果も得られず、アップストローク時の回転モーメントが上方に働きやすく、腰が回転軸となって上体が潜ってしまって、筆者はこれを「かぶり姿勢」と呼んでいる。かぶり姿勢を抑制するには、視線を進行方向に向け、「水の壁」に乗るイメージで泳ぐのがいい、身体的には背筋の強化がいい、と考える。

潜泳では、アップストロークに注意しないと、回転モーメントが働いて、極端に頭が下がり代表面積も大きくなるので効率の悪い泳ぎになってしまう。これを抑制するには、あくまでも姿勢は水面に平行に、の姿勢をイメージしていることである。

泳ぎ姿勢は水面競泳でも潜泳でも、共通する基本中の基本である。

(2) フリッパーの動かし方

まず、常に爪先立ちのように足首を伸ばしていることが肝心で、特にアップストローク時では、立っているときの足首になりやすく注意しなければならないところである。筆者はこれを「足首を逃がす」と表現している。

水泳のバタ足は左右の親指が内側に来るようにして、(図7)のbに相当するようにしているが、フリッパー泳では、進行方向に対してbは直角になるように維持することである。

ファニングは左右のAヒンジが大きく寄与するが、二点ヒンジの効果を得るために、Bヒンジの曲げ方が重要となる。

(図8)に示すように、脚を伸ばしたときの脚の中心線と足裏には生体的な角度がある。脚を伸ばしたままの姿勢だと、Aヒンジによるアップストロークの最終では、踵が水面または水面から出た位置で、フリッパーは水に没したま

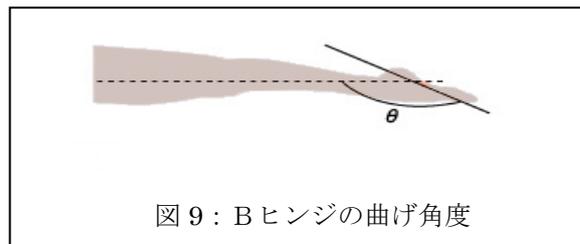


図9：Bヒンジの曲げ角度

まで、ダウンストロークへの切り替えしが素早くできない。これを避けるためには、ブレード面を水面の裏に置くようにすると、自然に膝が曲がり、曲げ角度は(図9)のθに当たり、筆者はこの角度を「膝曲げの限界角度」と名付けた。限界角度を生み出す意識的方法は、フリッパーが水面近くに来たときに、足の親指を使って足裏に巻き込むようにする。自動的に限界角度が得られる。Bヒンジでこの角度をもってダウンストロークに入れば、必然的にCヒンジのチップアクション効果も得られ、ブレード面各質点の位相差による推進力も加算される。前節冒頭のFwを大きくできる。

フリッパー泳では、この角度を任意にとることは避けなければならない。往々にして、限界角度より大きい角度で泳いでいる泳者がいる。これを自転車漕ぎと表現され、この動かし方ではフリッパーを、せん断面に沿って滑らせているだけで有効な推進力が得られない。

ダウンストロークは、限界角度を戻しながら行い、最終点では充分脚が伸びるようにする。この動作によって振幅は必然的にきまり、最大振幅まで脚を動かすことができる。ただし、最大振幅を無理やり大きくとろうとすると、アップストローク時にもダウンストローク時にも、Bヒンジの曲げ角度大きくなり、それに連れて、足首を逃がしてしまい、いわゆる自転車漕ぎになる。留意しなければならないところである。

各ヒンジの使い方も基本中の基本である。

(3) フリッパーを選ぶ

フリッパーを選ぶといっても、種類も多く、すべてを試すわけにはいかない。自分の脚力を考えてといわれるが、計測器があるわけではないので、如何ともしがたい。遅筋型^[18]か、速筋型かを見極め、たわみ具合を見るなり、レース出場選手の泳ぎを見るなりして、種目やフリッパーを決めるのが望ましい。むろんコーチのアドバイスも重要になる。それより大切なことは、自分のフリッパーを使いながら、そのフリッパーの特性を知り、これに沿った自分自身の泳ぎを作りあげることである。ヒトが泳ぐと

いう視点からすれば、ここまで述べてきた事柄は、泳者自身のパラータである。たくさんあって大変だが、これらを踏まえて練習することが肝要だと考える。

以上の基本としフリッパー競泳の成績を上げるには、

- (1) ビート数（振動数）を増やす泳ぎ
短距離水面競泳向き
- (2) 波長を長くする泳ぎ
長距離水面競泳、潜泳向き
- (3) 振幅を大きくする泳ぎ
長距離水面競泳、潜泳向き
- (4) 揚力を得るための適正な迎え角をとる泳ぎ
水面競泳向き
- (5) 慣性力を利用した泳ぎ
長距離水面競泳、特に潜泳向き

と考える。

物体の運動には、等加速直線運動と等速直線運動があり、これからフリッパー競泳をみると、スタートとラストスパートは等加速直線運動、中間は等速直線運動で推移しているようある。むろん 50m 短距離泳などは加速度の大きさはわからないが、最後まで等加速直線運動ではないかと思わせる選手もいる。

等速直線運動を、速度 V_0 、時間 t 、移動したときの距離 S で表すと、

$$S = V_0 \cdot t \dots\dots (12)$$

で、等加速直線運動を、 V 速度、初速 V_0 、加速度 a 、時間 t 、移動したときの距離 S で表すと、速度は a t 増え、式 (13)、(14) になる。

$$V = V_0 + a t \dots\dots (13)$$

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \dots\dots (14)$$

等加速直線運動をから等速直線運動に変わるときの初速は V となる。特に、等速直線運動部分では、第 6 節で述べたようにフリッパーに与える力を維持するようしなければ良い成績は得られない、と考える。

おわりに

フリッパー泳は、長い間経験すれば運動力学や流体力学の法則や定理にマッチングした泳ぎが自然に身につきますが、なるべく時間をかけないで、泳法を身に付けさせるのが、指導者の使命と考えます。

海洋公園時代から今日まで、大会に多くの選手を出場させました。思い起こせば、いい成績の時もあ

れば、悪い成績のときもありましたが、コーチングに役にたったのは、拙い物理的な知識と経験でした。本稿は、それらを整理してまとめたものです。

また本稿が、フリッパー泳やフリッパー競泳の参考になれば幸いこの上ないことと思っています。しかし、フリッパーの設計者や製造者、レースの指導者やダイビングインストラクターやユーザー、あるいは流体力学などの物理の専門家からみて、間違いや表現に不備な点があれば、お許しいただくと共にご指摘いただければ幸甚の至りです。

私が実践するレース展開やトレーニング方法については割愛しました。その理由は、それぞれの選手や指導者の方は、それぞれの方法で、すなわちオリジナリティをもってトレーニングやコーチングに励んでいると思うからです。何時の日か、それらが持ち寄られフリッパー泳やフリッパー競泳の指針ができれば、と期待しているところです。

最後に、大会関係者皆様にお礼があります。本大会で、プリプラグというグラスファイバー製のフリッパーが使用されていますが、このフリッパーはダイビングでは全く使われていません。大会の主旨が「of the Diver by the Diver」であれば、一般フリッパーの部、プリプラグの部というように種目別にできないものか、一考願いたく思っている次第です。

杉内 信夫

2012 年 12 月 30 日

参考・引用文献

- 『生物の泳法』東昭著
- 『物理の研究』金原敏郎著
- 『モノグラフ 公式集』
- 矢野健太郎監修 春日正文編
- 『抵抗と推進の力学 Web 版』
- 田中一朗 永井寛著
- 『Wikipedia 百科事典』
- 『GULL』ホームページ

参考資料

[1] 角運動に関して

$$\text{直進運動 } m a = F \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad F : \text{力の大きさ} \quad m : \text{質量} \quad a : \text{速度}$$

$$\text{回転運動 } I a = N \Rightarrow a = \frac{N}{I} \quad N : \text{力のモーメント} \quad I : \text{慣性モーメント} \quad a : \text{速度}$$

力のモーメント (N) は力の大きさ (F) に、慣性モーメント (I) は質量 (m) に対応する。

$$\text{慣性モーメント } I = m r^2$$

[2] ニュートンの運動法則

第一法則：外力が働かない限り、物体は等速運動を続ける (慣性の法則)。

第二法則：外力が働くと速度は変化し、その変化の大きさは加えられた力に比例する (運動方程式)。

$$\text{外力} = \text{質量} \times \text{加速度} \quad F = ma$$

第三の法則：地からが作用するときには必ず反作用があり、その向きは逆で大きさは等しい (作用・反作用の法則)。

[3] ベクトル

「速度」とか「力」という概念を考えると、物体の速度の大きさ、力の大きさだけでなく、物体がどの方向に向かって進んでいるのか、力の向きはどちらを向いているのか、ということを考える必要がある。このようなときに、ベクトルという量を考える。また、大きさだけを表すのをスカラー量という。

[4] 角周波数と角速度の関係

周波数 (振動数) と周期には、次の関係がある。

$$f = \frac{1}{T} \quad f : \text{周波数 (振動数)} \quad T : \text{周期}$$

また、角速度 (ω) は、

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

から、周波数 (振動数) が多ければ速度は上がる。角度は1回転が360度であるが、国際(SI)単位では、1回転が 2π (rad ラジアン) である。1秒間に回転する角度で表現するのが角速度で単位は (rad/s ラジアン/秒) である。

[5] 動圧

ベルヌーイの定理

$$\frac{\rho v^2}{2} + P = P_1 = \text{一定}$$

各項は、単位体積あたりの流体のエネルギーを表す。

$$\frac{\rho v^2}{2} : \text{動圧 [Pa]}$$

P: 静圧 [Pa]

P_1 : 全圧 [Pa]

[7] 無次元数

レイノルズ数やフルード数は無次元数という。無次元数とは単位のない数をいい、次元のある数を次元のない状態にすることを無次元化という。レイノルズ数Reで確かめる。速度 V [m/s], 長さ L [m], 動粘性係数 ν [m^2/s]

$$Re = \text{速度}(V) \times \text{長さ}(L) \div \text{動粘性係数}(v) = \frac{VL}{v}, \text{単位でみると} \frac{\text{m/s} \times \text{m}}{\text{m}^2/\text{s}} = 1 \text{ (無次元, 単位はなくなる)}$$

レイノルズ数やフルード数には相似則という性質があり、物体の大小にかかわらず同じ形をしていれば、同じ流れ場においてレイノルズ数やフルード数が同じ値を示す。これを利用して船は水槽で飛行機は風洞で模型実験して設計したり性能を知ったりする。フリッパーもこのような実験が繰り返されていると考える。

[8] 動粘性係数

$$v = \frac{\mu}{\rho} \text{ (m}^2/\text{sec)} \quad v: \text{動粘性係数} \quad \mu: \text{粘性係数} \quad \rho: \text{流体の密度}$$

抗力係数 C_d は、あらかじめ決まっている数値でなく、抗力 D を、動圧と代表面積 S の積で割ったものである。物体の形状・水の粘性・レイノルズ数・迎え角によって変化する。

$$C_d = D / \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad D: \text{抗力} \quad \rho: \text{流体の密度} \quad S: \text{代表(投影面積)} \quad V: \text{速度}$$

[9] フルード数

フルード数とは、流体の慣性力と重力の比を表す値で、主に船の造波抵抗の分析のために用いられる。定数ではなく、速度、重力加速度、代表寸法から計算される。フルード数に対して造波抵抗係数は一義的に決まる。

$$Fr = V / \sqrt{Lg} \quad V: \text{特性速度 [m/s]} \quad L: \text{特性長さ [m]} \quad g: \text{重力加速度 [m/s}^2\text{]} \quad (9.8 \text{ [m/s}^2\text{)})$$

[10] 造波抵抗係数

フルード数が0.5を越えると造波抵抗係数は最後の山を越えてあとは減少する。造波抵抗は圧力の次元を持つが、これを無次元化したのが造波抵抗係数 C_w である。

$$C_w = R_w / \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad R_w: \text{造波抵抗} \quad \rho: \text{水の密度} \quad S: \text{物体の浸水表面積} \quad V: \text{速度}$$

[11] 揚力

揚力は、一般的に飛行機の翼で説明される。「翼面に流れる流体は上下非対称となり、翼面の下面より上面の方の圧力が低くなり、上面と下面の圧力差によって揚力が発生する」とされる。図は翼上下の空気の流れと流れが蜜になった状態を表現したものである。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad L: \text{発生する揚力} \quad \rho: \text{流体の密度} \quad V: \text{物体と流体の相対速度} \quad S: \text{物体の代表(投影)面積}$$

C_L : 揚力係数

・揚力係数

水の揚力係数 C_L は、あらかじめ決まっている数値でなく、揚力 L を動圧 $[(1/2) \rho V^2]$ と代表面積 S で無次元化したもので、物体の形状・水の粘性・迎え角・レイノルズ数によって変化する。

$$C_L = D / (1/2) \rho V^2 S$$

D : 抗力

・揚抗比

揚抗比は抗力に対する揚力の比で、物体の迎え角の正接($\tan \alpha$)で、この値が高いほど推力が小さくても大きな揚力を得ることができる。

$$\text{揚抗比} = C_L / D$$

[12] ブレードとキール

断面の形状に関する係数（断面係数）を Z 、曲げモーメント（部材の折れ曲がりに抵抗する力）を M とすると、最大曲げ応力（ σ_{\max} ）は、

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z}$$

ブレードの断面は横に長く、キールの断面は縦に長い、これを長方形（横 b 、高さ h ）と見なし、断面係数 Z は、

$$Z = \frac{bh^2}{6}$$

で、断面の形状が縦長になればなるほど、断面係数は大きくなり、最大曲げ応力は小さくなる。つまり、縦長断面にすればするほど強くなる。ブレードとキールの断面の兼ね合いをとることで、横振れ、ねじれ、たわみ抑制を持たせていると考える。

[13] 付加質量

フリッパーを扇いだとき、まわりの水も加速される。そのため、水を加速させる分だけ大きな力が必要になる。これが見かけ上、フリッパーの質量が大きくなった、とみなすことができる。この見かけ上の質量の増加を付加質量という。ブレード面の大きなフリッパーでは、小さなフリッパーに比べて付加質量がずっと大きくなり動きにくくなる。

[14] 重合

小さい分子が互いに多数結合した巨大な分子（高分子）にするで、重合の結果生成する高分子をポリマーという。

[15] フックの法則

弾性範囲内（この範囲を超えると元に戻らない）で、伸び縮みの長さを x [m]、弾性力の大きさを F [N] とすると、

$$F = kx$$

の関係で、力 F が大きいほど伸び x が大きくなる。

[16] 無次元振動数

振動数に π と長さを掛け、それを速度で割った値。

$$K = \frac{f\pi L}{V} \quad f: \text{振動数} \quad L: \text{長さ} \quad V: \text{速度}$$

無次元振動数の分母と分子を入れ変えた無次元数は、泳動数といって 1 ファニングでどのくらい進むかを表す。

[17] 位相差

位相は、波動などの周期的な現象において、ひとつの周期中の位置を示す無次元量で、通常は角度（単位は「度」または「ラジアン」）で表される。

位相差は、二つの振動または波動の位相の差で、角度に相当する量で示す。一点ヒンジは、ファニング運動とピッチを変えるフェザリング運動は位相差 0 で同期し、二点ヒンジは、(図 8) に示した二本のリンクの長さの比に合わせて周波数で弱ぎやすく望む位相差をとることができる。ただし、フリッパー泳では、最大振幅を超えてはならない。

[18] 遅筋と速筋

筋肉を構成する筋繊維には、縮む速さが遅い遅筋と縮む速さが速い速筋の二つがある。平たく言えば、前者は持久性に富みマラソン向き、後者は瞬発性に優れ短距離向けという性質がある。日本人は、遅筋型の人が多い。