

6

毎月1回1日発行・2004年6月1日発行(通算862号)・1948年11月24日第3種郵便物認可・ISSN0022-7825

Science Journal K A G A K U

科学

V O L . 7 4 N O . 6 J U N . 2 0 0 4

特集 メダルに挑むスポーツ科学



ナックルボールの飛翔のストロボ映像(30分の1秒毎)

【巻頭言】スポーツの現代的意義とスポーツ科学 浅見俊雄

「最速の走法」は存在するか 伊藤 章

カール・ルイスはなぜ速いか 阿江通良

42.195kmの戦略 杉田正明

最速走法養成マシン 小林寛道

走幅跳 —より遠くへ跳ぶために 飯干 明

ハンマー投げを科学する

—室伏広治選手が世界記録に挑む 桜井伸二

手のひらの推進力と身体の抵抗からみた最速の泳法

—イアン・ソープのスピードの謎を解く 伊藤慎一郎

魔球の流体力学 —硬式野球ボールの変化球のなぞ解き 溝田武人

ワールドクラスサッカーの戦術と技術 浅井 武・河野銀子

高地トレーニングはなぜ効くか 小林寛道

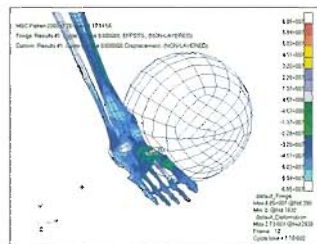
ダイナミックな身体運動を支える筋腱複合体 深代干之・長野明紀

アンチ・ドーピング活動の動向 河野一郎

スポーツ選手としての食事 小清水孝子

武術とスポーツの身体操法の違い

—身体運動に対する新たな視座を 甲野善紀



有限要素下腿骨格モデルを用いたインフロントカーブキック・シミュレーションにおける応力分布図例。ボールを骨モデルがスピンをかけて蹴っている解析結果。



身体運動の3次元シミュレーション。文献(12)より引用。下腿骨格モデルに関節可動域を指定する受動トルクを入力。それぞれの筋に力-長さ関係(FL)・力-速度関係(FV)の特性を与え、更に腱の弾性も考慮に入れた。筋を活動させ(刺激ダイナミクス)、最適化を行うことで歩行あるいは垂直跳をシミュレートする。(a)歩行。(b)垂直跳。

大型回転ドアの安全性とは何か 神田 順

環境汚染地域の子どもたち(最終回)

「人間と地球の運命」を考え行動する女性科学者の群像 綿貫礼子・吉田由布子



六本木ヒルズの回転ドア。

岩 波 書 店

特集

メダルに挑むスポーツ科学

手のひらの推進力と身体の抵抗からみた最速の泳法

イアン・ソープのスピードの謎を解く

伊藤 慎一郎

いとう しんいちろう

動物の移動に関する動きは、緊急避難あるいは捕食行動のための最大速度(推進力)の動きと、通常の動きである最大効率(最小エネルギー)の動きに大別することができる。動物は本能でそれを行うが、人間は理性によって最大速度本来の動きを行うことを変えてしまいがちである。最速の泳ぎを目指す競泳においては、最大推進力の動作が望ましい。最速泳法のクロールに対して、本能に基づく最大推進力の泳ぎを計算によって再現してみた。すると従来クロール泳法で言われていたS字プル泳法は最大効率の泳ぎであり、最大推進力の泳ぎは4つの世界記録を持つイアン・ソープの泳ぎになることがわかった。

防衛大学校システム工学群機械工学科(流体力学, スポーツ工学, 生物流体力学), E-mail: ito@nda.ac.jp

水泳各種競技の世界記録, 日本記録は年々ほぼ着実に伸びてきている。水泳を物理的に見ると泳者の速度が一定の状態は推進力と推進抵抗の釣り合った状態であり, 泳者の身体まわりの水と泳者に作用する流体力学であると考えられる。タイムレコードが伸びるということは推進力が増したかあるいは抵抗が軽減したということになる。推進力の増大という点では泳者の体力と泳法技術の向上が, 推進抵抗の軽減に関しては鮫肌水着等の開発⁽¹⁾と抵抗の少ないフォームが関係する。

James Counsilman⁽²⁾は現在のクロール泳法の基礎を作った人物である。彼は熟練スイマー達の水中映像を観察した結果としてS字プル泳法を1968年に発表した。それは彼らが図1に示すように身体に対して手のひらをS字状に動かしていたことから, 手のひらから発生する推進力は揚力(流れに直角に作用する力, 航空機が飛ぶ原理に関係)および抗力(作用反作用の法則で水を押し、押しした反対方向に同じ大きさで作用する力)の合力を使っているとしたものであった。彼がS字プル泳法を提唱する以前の泳ぎ方は手のひらで水をまっすぐに押す抗力型の泳ぎ(ストレートプル泳法)であったが, 多くの研究者の支持を得たこともあり, 現在ではクロール泳法の主流としてS字プル泳法が広く普及している。

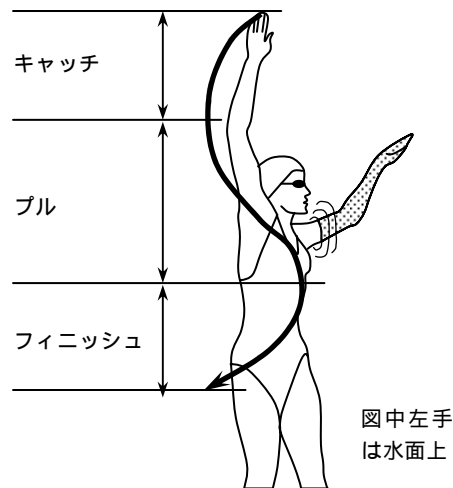


図1 クロールにおける一般的な手のひらのかき方文献(3)を改変。息継ぎ過程の人を腹側から見ている状態。手のひらは身体から見るとS字を描いているため、S字プルと呼ばれ、その過程は大きくキャッチ、プル、フィニッシュの3フェーズに分けることができる。

自由形の泳ぎにおいては腕: 足の推進力比率は10:1~6:1と腕からの推力が大半を占めることがHollanderら⁽⁴⁾から報告されている。また, 腕と手のひらから発生する推進力に関してはBergerら⁽⁵⁾によって腕からの揚抗力特性は手のひらのそれと大差がないとの報告がある。よって手のひらの推進力特性が, 泳ぎで発生する推進力を代表する

ものと考えることができる。

一方、動物の泳ぎは2つの最適モードに大別することができる。それは敵に襲われたときの緊急避難時あるいは捕食時の(a)最大推進力(最速)モードと通常生活の移動時の(b)最大効率(あるいは最小エネルギー)モードである。東昭と筆者は、クサ亀とスッポンの泳ぎに関して前後肢の動きに注目し上記のモードに分類して、それらの動きを定式化し、その解析結果が観察結果とよく一致することを報告した⁽⁶⁾。これらの動きは本能に基づくものであり、コーチングを受けた選手の理性的な泳ぎとは異なるものである。今回紹介するものは上記で得られた方程式を人間に当てはめ、人が本能に基づいた最速の泳ぎをすると手のひらのかき方(プル動作)はどのようなものになるかを計算によって算出したもの⁽⁷⁾を解説する。

手のひらに作用する流れと揚抗力

流れを記述する前に、揚力と抗力(抵抗力)についての説明を行う。

図2に示すように物体が気体あるいは液体中を進むとき(これを物体固定で考えると物体まわりに流れが存在するとき)、物体にはひとつの力が作用する。この力は流れに直角な成分である揚力 L と物体進行方向あるいは流れに抗する方向成分の抗力 D とに分解される。また流速あるいは物体の流れに対する角度(迎角 α)が変化するとこれら揚力、抗力の大きさが変化する。

さて、手のひらに作用する流入する流れを考慮すると図3(a)に示すようになる。手のひらには身体進行方向の速度ベクトル V と手のひらを駆動角 δ 、速度 U で移動することによって静水に生じる速度ベクトル U とから速度三角形の一辺、手のひらに対する相対流入速度ベクトル W が描かれて、手のひらは流入速度 W に対して迎角 α を持つことになる。この迎角 α の変化が以下に述べる揚力と抗力の大きさ(揚抗力特性)を決める。

手のひらを翼と考えると図3(b)に示すように、流入速度ベクトル W に対して直角に揚力 L が、それに直角に抗力 D が発生する。手のひらに作用する力は $\sqrt{L^2 + D^2}$ なる合力 R が手の甲側に発生し、

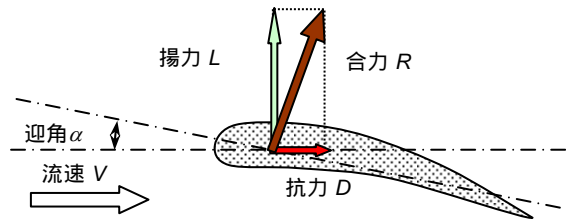


図2. 流れに置かれた物体に作用する力
流入速度に直角に揚力 L 、平行に抗力 D が発生する。水泳時の手のひらにもこのような力が発生している。

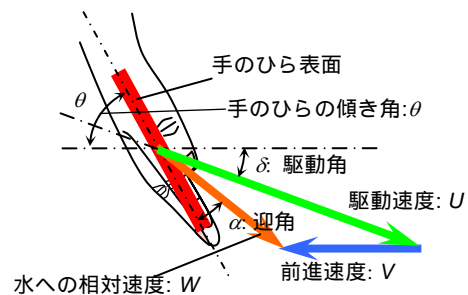


図3(a). 手のひら周りの速度三角形。

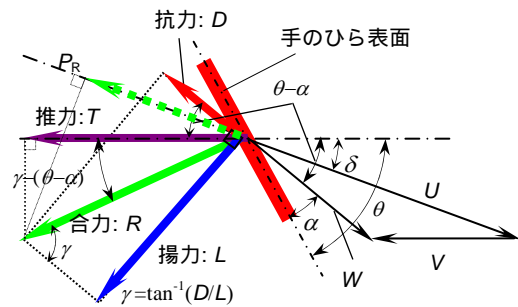


図3(b). 流入相対速度 W より派生する手のひらに作用する力。

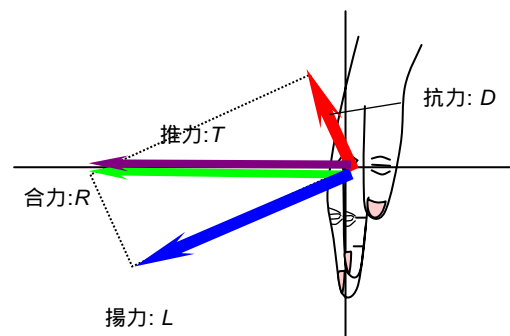


図3(c). 合力すべてが推力成分となる特殊な場合
手のひらの角度 θ 、相対流入速度 W によっては合力 R すべてが推力 T になることもありうる。

図3. 手のひら周りの速度と作用する力の関係。

身体の進行方向に対する射影成分が推力 T となる。手のひらを動かすためのパワー P (効率 η に関係) は先に述べた抗力 D の手のひらの相対進行方向に対する射影成分 P_R と相対流入速度ベクトル W との積となる。

特に手のひらの傾き θ と相対流入速度 W によって図 3(c) に示すように抗力と揚力の合力すべてが推力となる場合もありうる。

手のひらの揚力と抗力に関しては図 1 に示した手の動きのキャッチ、プル、フィニッシュの 3 フェーズ、すなわち手のひらへの平面的な駆動角 (sweepback 角) ψ によってその特性が変化する。上記の角度定義として Schleihauf⁽⁸⁾ に従ったものを図 4 に示す。キャッチ、プル、フィニッシュはだまかに平面駆動角 $\psi=135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ に相当する。

Schleihauf は揚力と抗力を別々に考慮して解析したが、私は航空機の翼特性を把握するのに用いられる図 5 に示す揚抗力曲線 (ポラーカーブ)

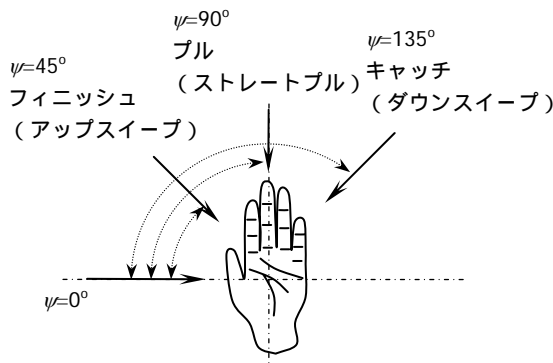


図 4. 手のひら平面駆動 (sweepback) 角 ψ の定義
流れが手のひらに親指側から流入する場合を $\psi=0^\circ$ 、中指側から流入する場合を $\psi=90^\circ$ としている。これらの流入角度 ψ をベースに手のひらに迎角 α を与え、図 7 が得られる。

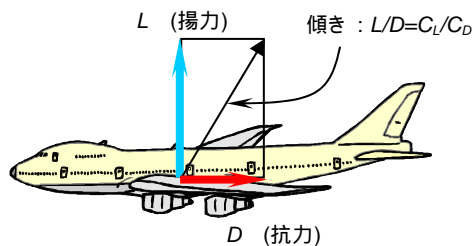


図 6. 航空機に作用する揚抗力
水平巡航状態では揚抗比 L/D 最大すなわち最大効率時を用いて飛行する。

に変換して解析を行った。この曲線は横軸を抗力係数 C_D 、縦軸を揚力係数 C_L にとり、迎角 α をパラメータとして揚抗力特性をプロットしたものである。この見方について述べてみよう。航空機が消費エネルギーをセーブしながら水平飛行する場合、図 6 に示すように進行方向に抗する力：抗力 D は小さければ小さいほど良く、反面、揚力 L は大きければ大きいほど良い。よって効率が最大になるのは揚抗比 (L/D) 最大の時で、これはポラーカーブに対する原点を通る接線の傾きに等しくなる。さらに、推進力は前述したように揚力と抗力の合力の大きさに関係するため、この合力 (揚力と抗力から作られる直角三角形の斜辺) が最大になる点は原点から最遠点であるとの予想が立てられる。図 7 は Schleihauf が行った水槽実験⁽⁷⁾ による手のひら模型の揚抗力係数を私が再構築したポラーカーブである。3 本のカーブはそれぞれキャッチ、プル、フィニッシュに相当する平面駆動

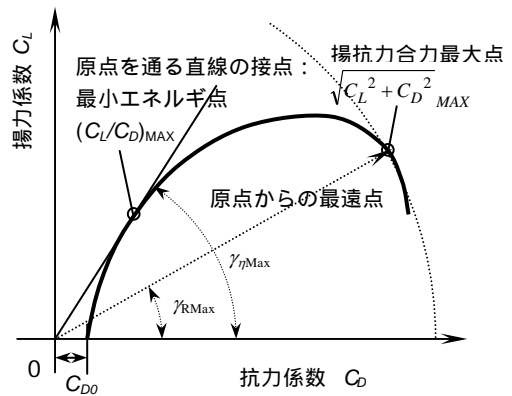


図 5 翼にみられる一般的な揚抗力曲線 (ポラーカーブ) と最大合力 (推力) および最大効率を生じさせる点。

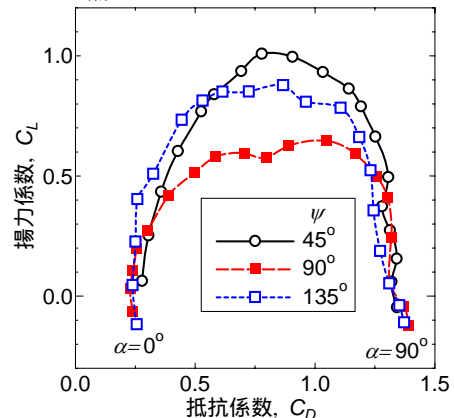


図 7 Schleihauf 実験値⁽⁸⁾ による手のひら模型の流体力学特性、平面駆動角 $\psi=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ のポラーカーブ。

角 $\psi=135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ におけるそれである。

遊泳速度一定の状態においては推進力 T と動的全身派生抵抗 D_{DP} は等しいとの仮定が成り立つ。図 3(a), (b) から得られる各変数の関係を方程式に置き換え、図 7 に示す手のひらの揚抗力特性と Kolmogorov et al.⁽⁹⁾ による動的全身派生抗力 D_{DP} を元に、準定常状態でこれらの方程式を解いた。

解析結果および考察

平面駆動角 (Sweepback 角) $\psi=135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ はそれぞれ手のひらのキャッチ, プル, フィニッシュのかき方に相当する。平面駆動角 $\psi=90^\circ$ における解析結果をプロットしたものが図 8(a), (b) である。それぞれの縦軸は推進効率 η , 推力を無次元化した推力係数 C_T を表し, 2 つの横軸はいずれも図 3(a) に示す (垂直) 駆動角度 δ , 手のひらの傾き角 θ をパラメータにとっている。いずれのグラフもひとつの頂点を持つことがわかり, 最大効率点, 最大推力点をもつことがわかる。このときの手のひらの姿勢角はそれぞれ (駆動角度 δ , 手のひらの傾き角 θ) = (42.3°, 85°), (0.0°, 90°) が得られた。このときの手のひらへの迎角 (流入角) α はそれぞれ 26°, 90° であった。これらの数値を具体化すると体軸に沿って真っ直ぐかく場合 ($\psi=90^\circ$), 最大効率の泳ぎでは手のひらを進行方向に対してほぼ直角 ($\theta=85^\circ$) に, 斜めに沈めるような動き ($\delta=42.3^\circ$) すなわち揚力を用いる sculling (こぐ) の動きをし, 最大推力の泳ぎでは手のひらを進行方向に対して直角 ($\theta=90^\circ$) に, かつ, 体軸に沿ってそのまま平行 ($\delta=0^\circ$) に動かすという結果が得られた。他の平面駆動角 $\psi=45^\circ, 135^\circ$ においても同様に最大効率点, 最大推力点における手のひらの姿勢 θ と駆動角 δ が得られた。これら計算結果をまとめると sculling を用いる S 字プル泳法は最大効率の泳ぎすなわち無駄のない泳ぎにということになった。一方最大推力泳法 (最速泳法) はキャッチ, プルまでは手のひらは進行方向に対して直角に, 体軸に沿ってそのまま平行に動かす抗力泳ぎを, フィニッシュ時は斜めに sculling するのが良いという結果が得られた。言い換えると最速の泳ぎを行うには遊泳動作後半以外は抗力泳ぎ

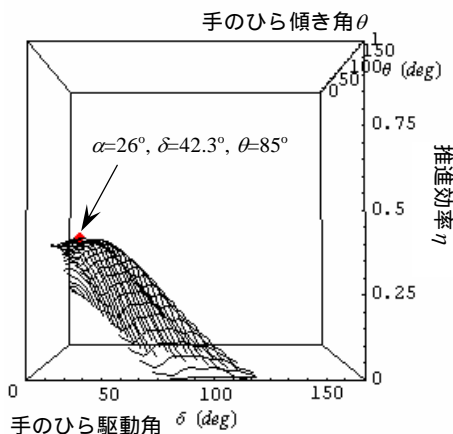


図 8(a) 平面駆動角 $\psi=90^\circ$ における垂直駆動角 δ と傾き角 θ をパラメータとした推進効率 η 得られた推進効率最大時の手のひらは深さ方向に斜めにかくことを示している。

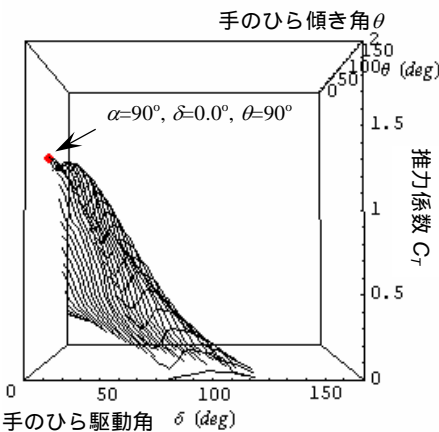


図 8(b). 平面駆動角 $\psi=90^\circ$ における垂直駆動角 δ と傾き角 θ をパラメータとした推力係数 C_T 最大推力時の手のひらは進行方向に直角に傾け平行に動かすことを示している。

図 8. 手のひらの姿勢と推進効率, 推力係数の関係。図中の α, δ, θ はそれぞれの計算結果の図の頂点における手のひらの状態を表す。(図 3(a) 参照)。

を行うということになる。

具体的に最速泳法を図示すると図 9 のようになる。身体に対しての手のひらは体軸に沿ってまっすぐに移動し, その軸を中心に身体はロール (体軸を中心の回転運動) する。手のひらと前腕部で推力を発生させる。手のひらのかき方はフィニッシュ部分以外は sculling ではなく抗力泳ぎであるため腕の姿勢が大きく異なる。

またこれらの得られた最大効率点, 最大推力点

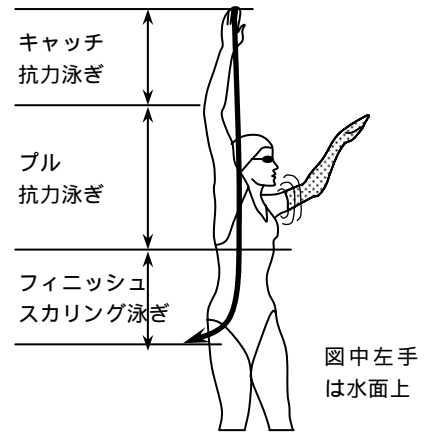
をそれぞれの平面駆動角 ψ におけるポーラーカーブ上にプロットすると図 5 での推測どおり、いずれもそれぞれ原点からの接線の接点、最遠点となっていた。

そもそも Counsilman は熟練泳者の泳ぎを水中映像から解析したものであり、「熟練泳者」から無駄のない泳ぎ S 字プル泳法を提案した。熟練者の泳ぎ 無駄のない泳ぎ 競泳者の泳ぎとの誤った発想から現在の競泳の泳ぎ方の主流 S 字プル泳法が生まれたと思われる。

さて、抗力型の泳ぎが最大推力すなわち最速の泳ぎとなることを示したが、推力においてその泳ぎと最大効率との泳ぎとの間にどの程度の差があるかを調べたものが図 10(a) である。横軸は平面駆動角 ψ 、縦軸が推力係数 C_T (推進力の大きさ) である。実線が最大推力点をプロットしたものであり、点線は最大効率泳ぎをした時における推力係数である。ここで最も推力の値が高い平面駆動角 $\psi=90^\circ$ において、その値を比較してみると最大の推力係数 $C_T=1.39$ と最大効率時の $C_T=1.25$ に対して 1.11 倍の推力が得られている。それではそのときの効率の差はどの程度であろうか。図 10(b) は推進効率 η に関する最大推力時と最大効率時の比較を行ったものである。上述の場合、最大推力時の効率 $\eta=39.5\%$ 、最大効率 $\eta=41.9\%$ とわずか 2.4% の差しかないことがわかる。よってこの程度の効率の差を考えると、競泳のように推力、あるいは速度を重視するような種目においては抗力型の腕のかき方で泳ぐべきであると結論付けられる。

実行可能な泳法なのか

それではこの抗力型の泳ぎは机上の空論であろうか？ 答えは否である。実際にこの泳ぎで世界記録を数多く叩き出している人物がいる。それは自由形競技において 4 つの個人世界記録を持つオーストラリアのスイマー、若干 22 歳のイアン・ソープである。彼の泳ぎは従来のストローク回数重視のピッチ泳法とは異なり、「ゆったりした泳ぎ」が特徴である。従来の S 字プル泳法におけるストローク数は船舶のプロペラの回転に例えることができる。プロペラ回転数を増せばスピードが増すの



図中左手は水面上

図 9 最速泳法のかき方。文献(3)を改変。推力発生中心の手のひらは進行方向軸に沿って、まっすぐに移動させ、また手のひらは直角に動かす。手のひらは身体から見ると直線を描く。フィニッシュ以外は手のひらと一体の前腕部は進行方向に対して直角に駆動する抗力泳ぎを行い、フィニッシュはスカリングによって水から腕を抜く動きをする。

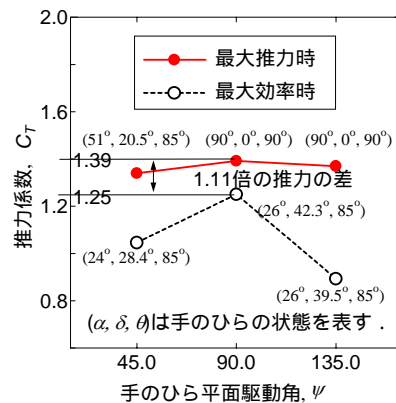


図 10(a) 推力係数 C_T (推力の大きさ) の比較

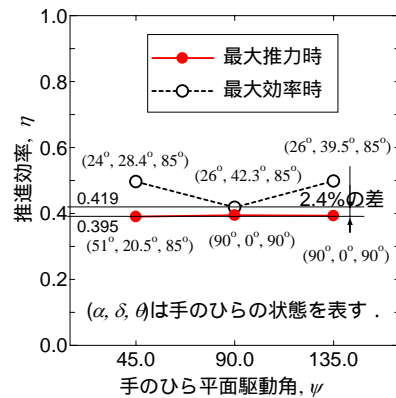


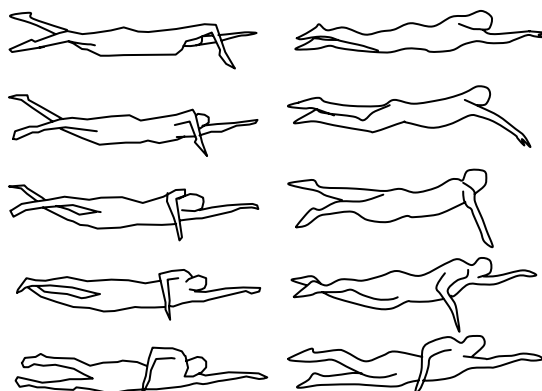
図 10(b) 推進効率 η の比較

図 10. 抗力泳法 (実線) と S 字プル泳法における推力係数 C_T (推力の大きさ) (点線) と推進効率 η の比較

と同様に、ストローク回数を増せばスピードが増す。しかしながら特に肩筋肉に負荷のかかる抗力泳法は負荷の少ないS字プル泳法に比べてストローク数が少なくなる。実際に奥野景介⁽¹⁰⁾によると彼のストローク数は他の競技者に比べて低く、ストローク当たりの遊泳距離が長いとの報告がある。彼の泳ぎと一般の競技者のフォームを図11に比較して見ると、(a)図のイアン・ソープは入水直後に肘を曲げて手のひらは体軸に対して直角のまま直線的に後方へ腕を動かし、フィニッシュでscullingを行い腕を水から抜いている。これは理論で得られた動きそのものである。(b)図に示す従来のS字プル泳法の競技者においては入水直後の肘は伸びたままであり、水に対して腕を斜めに動かしscullingを行なっている様子がわかる。抗力泳ぎはイアン・ソープの記録を見ればわかるとおり、中距離で威力を発揮する。すなわち短距離と長距離には弱い。ソープは100m自由形でほぼ世界記録に匹敵するタイムを出しているが、負荷のかかる泳ぎのためストローク数を稼ぐことができずに短距離ではS字プルのピッチ泳法で回転数の多い泳ぎに負けてしまう。さらに長距離では効率面の面でS字プル泳ぎより劣るため、疲労がたまり、速度が低下するという欠点がある。しかしながら、体力面で負荷に耐える身体作りを行なえば、この抗力泳ぎこそが競泳用の最速泳法であると確信する。

平泳ぎ北島の泳法

終わりに、種目は異なるが、世界記録を持つ北島康介の平泳ぎの泳法について簡単に述べる。平泳ぎは足をひきつける動作を伴うため、抵抗の大きな姿勢を取る瞬間が存在する。速力を落とさないためにはできるだけ低い抵抗姿勢を取ることが肝要である。北島の泳ぎは「けのび」時間の長いのびやかな大きな泳ぎが特徴であり、ピッチ泳法とは逆のストローク数の少なさがソープと共通している。腕のみならず彼の強いキック力に支えられる推力と抵抗の少ない姿勢によって記録を叩き出している。今後の彼の活躍に期待したい。



(a) 抗力泳ぎ (b) S字プル泳ぎ

図11. 抗力泳ぎとS字プル泳ぎの分解映像

(a)はイアン・ソープの分解映像である。腕入水直後の瞬時の肘曲げ後、そのまま後方へ動かす抗力泳ぎを行っている様子が見える。(b)は2000年全日本選手権1500m決勝参加者の泳ぎである。S字プル泳ぎはキャッチ部分において肘が伸びていることがわかる。

文献

- (1) Toussaint, H. M et al., J. Sports Biomechanics, Vol.1-1, Edinburgh University Press(2002).
- (2) Counsilman, J.E., Science of Swimming. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J(1968).
- (3) E. W. Maglisco: Swimming Even Faster, Mayfield Publishing Company, Mountain View, CA (1993), p315.
- (4) Hollander, A. P. et al., Swimming Science V, pp.17-29. Human Kinetics Publishers, Champaign, IL(1987).
- (5) Berger, M.A.M. et al., Journal of Biomechanics, 28, pp.125-133(1995).
- (6) Ito, S and A. Azuma, Proc. 50th Japan National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Science Council of Japan, 271-280 (2001).
- (7) Ito, S. and Okuno, K., Biomechanics and Medicine in Swimming IX, pp.39-44, Pub. de l'univ. de Saint-Etienne(2003).
- (8) Schleihauf, R.E., Swimming III, pp70-109. University Park Press, Baltimore, MD (1979).
- (9) Kolmogorov, S. et al., Proc. International Biomechanics in Sports, Edinburgh University Press (2000).
- (10) Okuno K., et al., Biomechanics and Medicine in Swimming IX, pp. 157-162, Pub. de l'univ. de Saint-Etienne(2003).