

第12回 泳のバイオメカニクス

教科書 金子公宥、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院 第8章

参考書 宮下充正監修、小林寛道編著、走る科学、大修館書店

参考書 Maglischo, E., W., Swimming Fastest, Human Kinetics, 2003

参考書 Counsilman, J.E., Competitive Swimming Manual for Swimmers and Coaches

12.1 泳ぎの歴史

興味深いことに、歴史を紐解いてみると日本を除いては水泳は過去千年間の間廃れてしまっていたと言ってもよい。

古くはギリシア時代、オリンポスの丘には水泳用のプールがあったことが知られているが古代オリンピックには水泳競技はなかった。理由は不明だがギリシアが海国であることからあまりにも当たり前の運動であったのではないかととも言われている。ローマ時代にはカラカラ浴場に代表されるような巨大な浴場ができておりそこでは、水泳が行われていたと考えられている。しかし十字軍遠征後の兵士の休息のために使われていた浴場が次第に、性産業の温床となり、さらには性病がはびこる温床になったことからローマ時代後期にはたびたび浴場禁止令が出された。またキリスト教の普及により素肌をさらすことが、非難の目を浴びるようになっていくため、その後ルネサンス以降まで長く1000年近く水泳は日の目を見ない。それどころか中世においては水泳をしているところを見られた者は火あぶりになったこともあると言われている。

これとは対照的に日本においては水泳は古くから親しまれてきた。日本書紀には「水泳」という記述がみられるが、これは「みくくる」と読むのではないかとされている。鎌倉時代に描かれた一遍上人図絵にも水術を教える様子が描かれているため、このころにはすでに武士のたしなみとしての水術が教えられていたこともわかる。中世以降の武士の鍛錬科目である武芸十八般の一つには水術(水練術)というものがあり、武士にとっては重要な鍛錬であった。現在日本水泳連盟日本泳法委員会では十二の流派を認定している。

12.1.1 フォームの変遷

水泳のフォームの変遷は、特に19世紀後半から20世紀になり速さを追求するようになってきた。現在、近代四泳法と呼ばれるのは、

1. 自由形 (ほとんどの人はクロールで泳ぐ)
2. 平泳ぎ
3. 背泳ぎ
4. バタフライ

表 12.1: 現存する日本泳法流派 (日本水泳連盟より)

流派名	発祥地	主な分布地区
神統流	鹿児島	鹿児島
小堀流踏水術	熊本	熊本、長崎、京都、東京
山内流	豊後臼杵	臼杵
神伝流	伊予大洲、松山	大洲、津山、東京、広島、岡山、全国
水任流	讃岐高松	高松
岩倉流	和歌山	和歌山
能島流	和歌山	近畿
小池流	和歌山	東海、近畿
観海流	伊勢	津 伊勢、関西一円
向井流	江戸	東京、会津、北海道
水府流水術	水戸	水戸、東京
水府流太田派	江戸	東京、全国

の四種目である。歴史的にみると最も古い泳ぎ方は平泳ぎであり、平泳ぎから様々な他の泳ぎが発達してきた。先に述べたように日本では古来から様々な流派による多彩な泳法が存在してきたので、ここでは西洋の泳ぎのフォームの変遷に目を向けると、19世紀に至るまでほとんどは平泳ぎが泳がれていたようである。続いて、サイドストローク、オーバーアームサイドストローク、と徐々に変貌をとげてきている。19世紀後半には英国人のジョン・トラジオンが南米の原住民の泳ぎをまねたトラジオンストロークという泳ぎを発明している。

現在最速の泳ぎである自由形はルール上何でもよいので自由形 (Frestyle) と呼ばれるが、実際には皆ほとんどがクロール泳で泳ぐ。このクロール泳は19世紀後半に、オーストラリアのシドニーに住む水泳一家の末弟 Dick Cavill (本名 Cavill, Richmond Theophilus (Dick) (1884 - 1938)) は、1899年の州大会において世界で初めてクロール泳で優勝し、これが世界初めてのクロールとされている。その後、背泳ぎが競技種目に加えられて、さらには1954年6月に日本人の長沢二郎によってドルフィンキックをつかったバタフライが発明されて、1956年のメルボルン五輪から正式種目として独立した。

12.1.2 100m 自由形世界記録の変遷

Dick Cavill が 100yard 自由形で 58 秒 (平均泳速度 1.57m/s, 100m に換算すると 1 分 3 秒 4 程度) で泳いだのは約 120 年前のことである。それから自由形 (クロール) は目覚ましい進歩を遂げてきた。2007 年 12 月現在の世界記録は、オランダの Pieter van den Hoogenband の 47 秒 84 (平均泳速度 2.090m/s) である。表 12.2 は近代五輪における 100m 自由形世界記録の変遷である。

12.2 泳運動のバイオメカニクス研究

水泳におけるバイオメカニクス研究は主として 3 つの手法にわけられる。

- ストローク動作のキネマティクス研究 (さらにはキネティクス研究)
- 回流水槽や風洞を用いた模型による流体力の測定 (キネティクス研究)
- CFD による流体力の計算機シミュレーション

表 12.2: 自由形 100m 自由形の記録変遷 (五輪)

No	Name	Nationality	Record	Year	City	Country
1	Zoltan HALMAY	HUN	01:05.8	1905	Vienna	AUT
2	Charles DANIELS	USA	01:05.6	1908	London	ENG
3	Charles DANIELS	USA	01:02.8	1910	New York	USA
4	Kurt BRETTING	GER	01:02.4	1912	Brussels	BEL
5	Duke KAHANAMOKU	USA	01:01.6	1912	Hamburg	GER
6	Duke KAHANAMOKU	USA	01:01.4	1918	New York	USA
7	Duke KAHANAMOKU	USA	01:00.4	1920	Antwerp	BEL
8	Johnny WEISSMULLER	USA	58.6	1922	Alameda	USA
9	Johnny WEISSMULLER	USA	57.4	1924	Miami	USA
10	Peter FICK	USA	56.8	1934	New Haven	USA
11	Peter FICK	USA	56.6	1935	New Haven	USA
12	Peter FICK	USA	56.4	1936	New Haven	USA
13	Alan FORD	USA	55.9	1944	New Haven	USA
14	Alex JANY	FRA	55.8	1947	Menton	FRA
15	Alan FORD	USA	55.4	1948	New Haven	USA
16	Dick CLEVELAND	USA	54.8	1954	New Haven	USA
17	Jon HENRICKS	AUS	55.4	1956	Melbourne	AUS
18	John DEVITT	AUS	55.2	1957	Sydney	AUS
19	John DEVITT	AUS	54.6	1957	Brisbane	AUS
20	Steve CLARK	USA	54.4	1961	Los Angeles	USA
21	Manuel DOS SANTOS	BRA	53.6	1961	Rio de Janeiro	BRA
22	Alain GOTTVALLS	FRA	52.9	1964	Budapest	HUN
23	Ken WALSH	USA	52.6	1967	Winnipeg	CAN
24	Mike WENDEN	AUS	52.2	1968	Mexico City	MEX
25	Mark SPITZ	USA	51.94	1970	Los Angeles	USA
26	Mark SPITZ	USA	51.47	1972	Chicago	USA
27	Mark SPITZ	USA	51.22	1972	Munich	FRG
28	Jim MONTGOMERY	USA	51.12	1975	Long Beach	USA
29	Andy COAN	USA	51.11	1975	Fort Lauderdale	USA
30	Jim MONTGOMERY	USA	50.59	1975	Kansas City	USA
31	Jim MONTGOMERY	USA	50.39	1976	Montreal	CAN
32	Jim MONTGOMERY	USA	49.99	1976	Montreal	CAN
33	Jonty SKINNER	USA	49.44	1976	Philadelphia	USA
34	Rowdy GAINES	USA	49.36	1981	Austin	USA
35	Matt BIONDI	USA	49.24	1985	Mission Viejo	USA
36	Matt BIONDI	USA	48.95	1985	Mission Viejo	USA
37	Matt BIONDI	USA	48.74	1986	Orlando	USA
38	Matt BIONDI	USA	48.42	1988	Austin	USA
39	Alexander POPOV	RUS	48.21	1994	Monte Carlo	MON
40	Michael KLIM	AUS	48.18	2000	Sydney	AUS
41	Pieter VAN DEN HOOGENBAND	NED	47.84	2000	Sydney	AUS

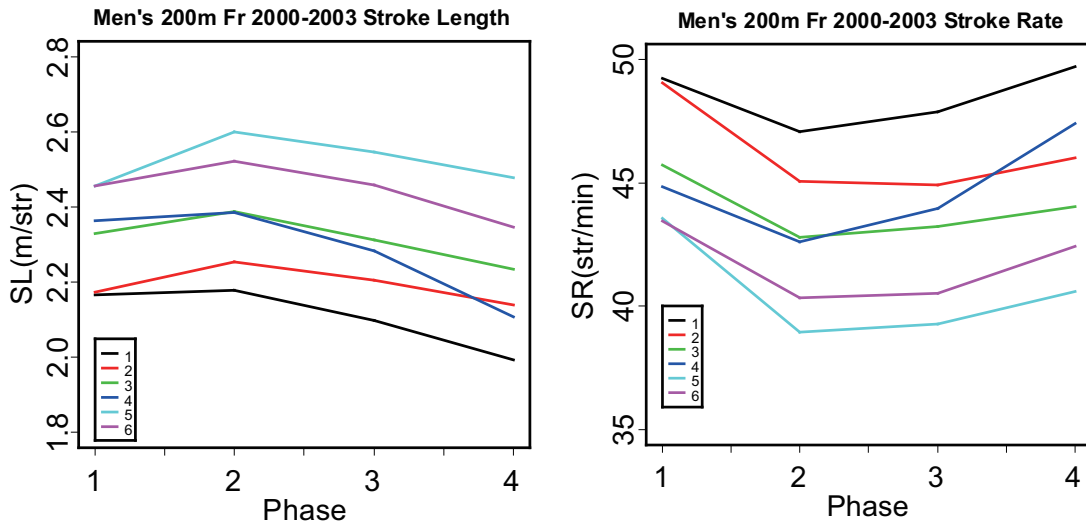


図 12.1: 200m 自由形におけるストローク長

図 12.2: 200m 自由形におけるストローク頻度

ここでは、まず水泳のなかでも競泳に限って話を進めるが、競泳のレースがどのようなものであるのかを紹介した後に、広く行われてきたストローク動作の映像解析から概観していくことにする。

12.2.1 レース分析：ストローク頻度とストローク長

日本水泳連盟医・科学委員会では、競泳日本選手権や国内で開催されてきた国際大会において、競泳レース分析を行ってきた。競泳レース分析は観客席に設置した複数台 (5 台程度) のカメラによって 50m プールを泳ぐ泳者全員を撮影し、スタート局面 (スタート 0m~15m 地点)、ストローク局面 (15m 地点から 45m 地点)、ターン局面 (45m 地点から 57.5m 地点)、フィニッシュ局面 (ラスト 5m) と、全局面を 4 つの局面にわけて、各局面における泳速度、ストローク数 (1 かきですすむ距離)、ストローク頻度 (1 分間あたりのストローク数) をビデオ解析によって求める試みである。

図 12.1 から図 12.4 は 2002 年から 2003 年に行われた日本選手権における男子自由形 200m のレース分析結果である。それぞれのグラフに 6 本のラインがあるのは、全レースをクラスター分析によって検討したところ、レースパターンにはこの被験者群の場合、6 つのパターンを見出すことができたため、これら 6 群の平均値を表示してある。特に図 12.3 は選手・コーチが最も興味をもって眺めるデータである。図中にしめされている曲線はある速度を維持するのに必要とされる SR (ストローク頻度) と SL (ストローク長) の組み合わせである。各個別の選手のデータをこのグラフに描きなおしてみると、どの局面でどのようなペース配分で泳いだのか (あるいは泳ごうとしていたのか?) が明らかになる。言ってみれば競泳におけるスコアブックのような位置づけである。

12.2.2 泳者に作用する力

競泳の泳ぎを分析するには、泳者に作用する力をまず知っておくことが必要であろう。泳いでいる泳者には次のような力が作用している。

- 重力
- 浮力
- 形状抵抗

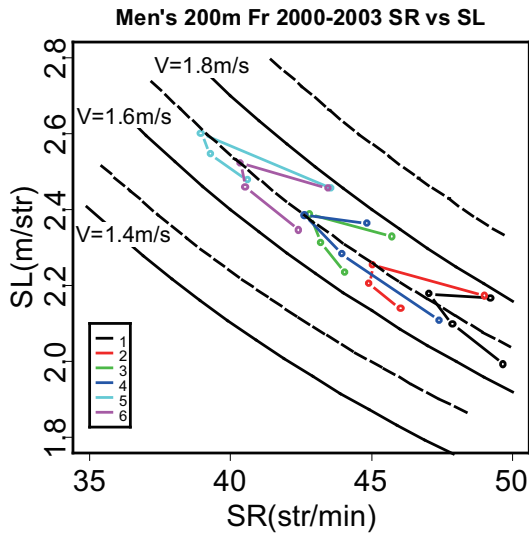


図 12.3: ストローク長とストローク頻度

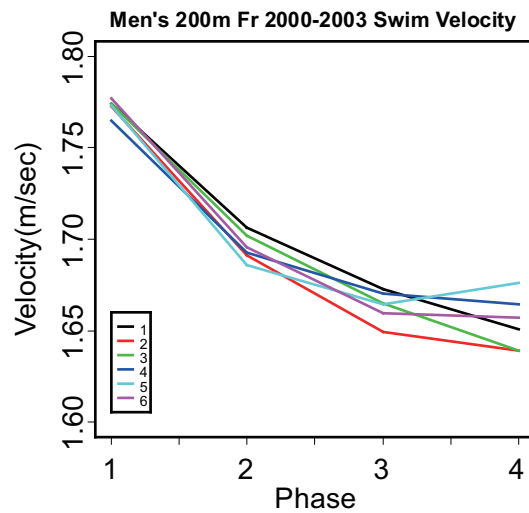


図 12.4: 200m 自由形における速度

- 摩擦抵抗
- 造波抵抗

泳ぎの改善には、そもそも泳者にはたらく流体力をしておかなければならない。図 12.5 には略図ではあるが泳いでいるヒトの様子を示しているが、下の図では脚部が沈んでいるために前から流れてくる水とぶつかる面積 (前方投影面積) が大きいため受ける抵抗が大きくなる。身体後方には波ができるが、生み出した波は後方に残るが揺れ続ける波のもつ運動エネルギーは泳者が生み出すわけであり、波を大きくたてて泳ぐ選手ほど造波抵抗が大きい。魚や海鳥やペンギンなどのように流線型をしていないヒトが泳ぐには大きな労力を必要とする。

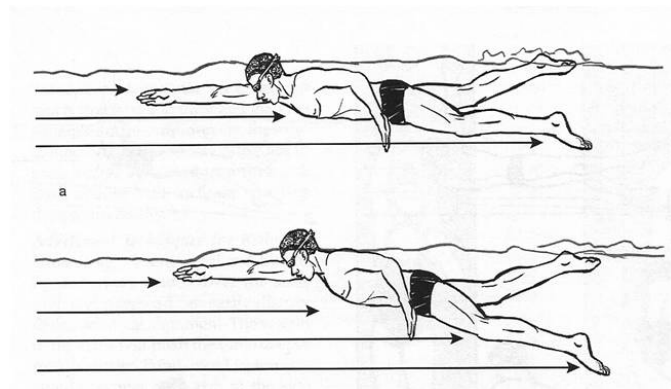


図 12.5: ヒトの泳動作中に作用する力

12.2.3 重力と浮力

重力は地球上のあらゆるものに作用していることは知っているであろう。浮力は流れがあろうとなかろうと水を含めた流体中で発生する。アルキメデスの原理で知られる法則がそこに働く。ここでは簡便のために水によって説明をすることにする。アルキメデスの原理 (Archimedes' principle)

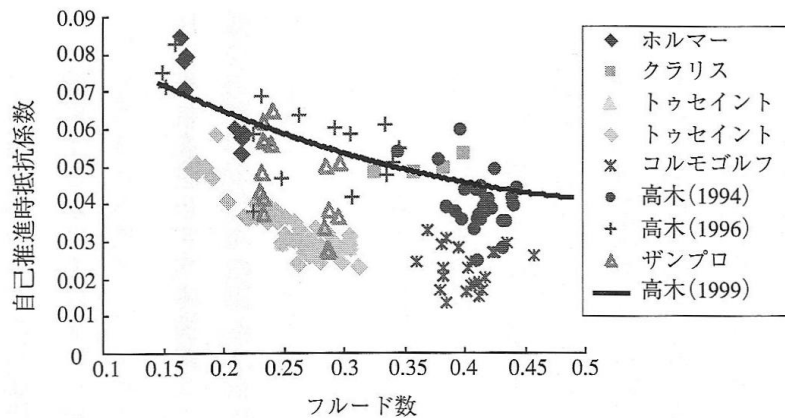


図 28 フルード数と自己推進時抵抗係数の関係

図 12.6: アクティブドラッグの計測

は「押しのけた体積の水の重量に等しい大きさの鉛直上向きの力、浮力 (buoyancy) をうける」というものである。

水中においては重力と浮力は「ほぼ」釣り合っている状態である。やや深いプールで足がつかない深さにおいて、まっすぐに立ってみると通常は、額や眉、場合によっては唇あたりまでが水中に没し、頭の頂点は沈むことなく浮かぶことが多い。この状態から呼吸をすると頭の高さが上下動することから、浮力を実感することができる。

推進中でなくとも作用する重力と浮力は水中において身体の姿勢制御に主として関わっている。重心の位置と浮力中心位置 (浮心、すなわち体積中心位置) は直立姿勢では同じ直線状に存在するが、伏し浮き、あるいは背浮き、と呼ばれる姿勢では浮心がより胸に近い所にあり、重心はへその付近にあるために、身体には回転モーメントが生じる、これが初心者の脚が沈む原因の一つである。したがってこの重心と浮心位置を一致させると身体は沈むことなく長時間浮いていることが可能である。

12.2.4 推進中の抵抗：アクティブドラッグ

ヒトに限る話ではないが、水中を自己推進している物体が時々刻々と受けている流体力、すなわち推進中の抵抗力を厳密に計測するのは困難である。特に生物の場合にはその身体形状が変化し続ける。ヒトの場合、魚や一部の鳥類のようにどの個体でも同じように変形するか、といえば個人個人のフォームはかなり異なっており、その形状変化を抵抗の変化として定量的に観察するのは容易ではない。もしもこの泳者が泳いでいる最中の抵抗、これをアクティブドラッグと呼んでいるが、を調べようとすれば泳者の周りの全摩擦抵抗成分と圧力分布を同時に計測する必要があるからである。

これまでに多くの研究者らが、このアクティブドラッグの計測に挑戦してきたがなかなか成功したといえるものがないのが現状である。高木らは、フルード数とアクティブドラッグとの関係式を求める独自の手法でこれまでの実験結果をまとめている [23]。

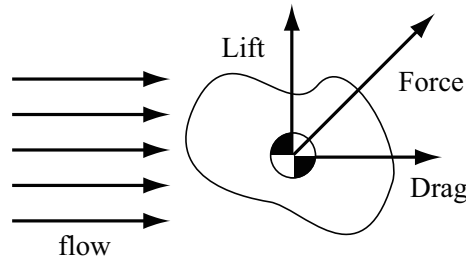


図 12.7: 抗力 (Drag) と揚力 (Lift)

12.2.5 抗力と揚力

流れのなかにおかれた物体は流れから力をうける。プールで泳ぐときに手を後ろにかくと手が動いている方向とは逆の前方向に手がおされる手ごたえを感じることは誰もが知っているだろう。同じようなことだが、ボートのオールを漕ぐとき進んでいるボートと同じ速度でオールを動かしても手ごたえを感じない。すなわち流れのなかにおかれた物体と流体との相対速度がある場合にこの手ごたえ(力)を受ける。

図 12.7 に示したように流れとは平行な方向に対して抗力 (drag)、流れとは直角方向に揚力 (lift) が作用する。

抗力と揚力は以下の式であらわされる大きさで物体に作用する。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S \quad (12.1)$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 S \quad (12.2)$$

上の式中、 C_D, C_L はそれぞれ抗力係数、揚力係数とよばれ物体の形状・寸法・表面粗さ・流体と物体との相対速度・流体の粘性・密度・乱れ具合によって影響を受ける。 S は物体の面積であるがこれは流れに垂直な断面の面積 (前方投影面積ともいう) で代表される。抗力はその発生要因に、(1) 摩擦抗力 (friction drag), (2) 形状抗力 (form drag) または圧力抗力 (pressure drag), (3) 誘導抗力 (induced drag), (4) 造波抗力 (wave drag), (5) 干渉抗力 (interference drag) の 5 つにわけられる。

12.2.6 ストロークとキックの推力比

観客席最上段から小さく映った選手の映像の移動軌跡をビデオ分析によってとらえる競泳レース分析はひとつの映像解析手法であるが、泳ぎで重要なのは無論水中をどのようにかくのか?あるいは蹴るのか?ということである。

では水泳では上肢と下肢のどちらが推進力をかせいでいるのだろうか?古くからこれは研究対象にされてきた。

Adrial ら [2], Hollander ら [10] の研究によればクロールではだいたい腕 vs 脚の比が、1:9 から 1:6 ということになっている。平泳ぎでは、脚の推進力の方が勝っていてストロークよりもキックで進む泳ぎであると考えられている。平泳ぎの例外はあるものの、水泳研究の多くはストロークの分析に多くの注目が注がれてきた。

12.2.7 風車のごとく、からストレートブルへ

FUJIYAMA のトビウオというのを聞いたことがあるだろうか?戦後日本は進駐軍に支配されスポーツでは国際大会への出場が禁止されてきた時代があった。その暗澹たる戦後において古橋廣乃

進は競泳長距離 (400m,1500m) において数多くの世界記録を塗り替えて国民の心に刻まれた。彼が活躍したのは 1947 年から 1952 年までの期間であるが、この当時クロール泳は「ぐるぐると」風車のように腕を回すのがよしとされていた。その後、風車 (あるいは外輪船) のような回し方だと水に手が入った直後と出ていく直前は手の動きは下方向と上方向であって、推進力を得るために不十分であることに誰もが気がついた。そこで水中に入れた手をまっすぐ後方にかくストレートプルと呼ばれる泳法が流行した。これが 1960 年代のことである。

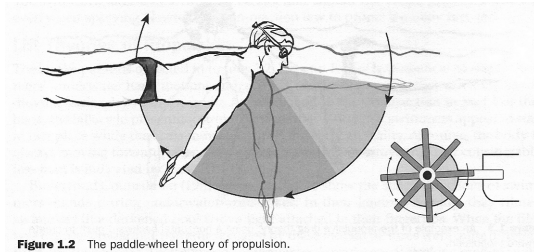


Figure 1.2 The paddle-wheel theory of propulsion.

図 12.8: 風車型ストローク (1950 年代)

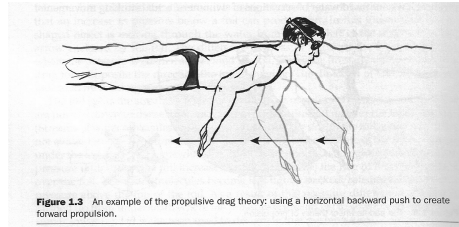


Figure 1.3 An example of the propulsive drag theory: using a horizontal backward push to create forward propulsion.

図 12.9: 直線型ストローク (1960 年代)

1970 年代初頭に水泳界に偉大な指導者が現れた。Dr. Counsilman である。彼はインディアナ大学水泳部コーチとして、そして全米水泳チームのコーチとして、マーク・スピッツをはじめとした多くの世界的な水泳選手を育てた名コーチである。彼は 1970 年代に入り、得た予算で大学プールに水中窓を設け、16mm シネフィルムによって選手の水中映像を世界で初めて撮影した。また暗闇で選手の指先に豆電球をつけて撮影することでその手先軌道を定量化することに成功した。当時としては画期的なことである。

その結果、彼は教科書ではまっすぐにかくことが正しいとされているにも関わらず、彼の優秀な教え子たちはそのように水中では手をかいておらず、3 次元的に複雑に軌道を描いてストロークを行っていることを発見した [4]。

彼は単なる観察にとどまらずこの理由を考えた。そこでヒトの手のひら (手掌部) に注目するとそれは、航空機の翼を側面から見た形状とよく似ていることに気がついた。翼に似ているのであれば、水を斜めに切るように動かす (英語では sweep) ことで揚力が得られる、これが推進力に貢献していると断定した。S 字プル (彼は当初 zigzag pull と呼んでいる) の始まりである。

12.2.8 S 字泳法 (ジグザグプル泳法)

S 字プルパターンでは、選手の手先軌道は三次元的に動いているが、進行方向に対して逆方向ではなく、時折斜め方向に動く (Sweep と呼ばれる) ことがある。Counsilman はこの動作によって、手のひら (手掌部) が飛行機の羽のような働きをして、揚力を生み出していると考えた。

Schleihaupt[17][18][19] は、この考えを証明するために手掌部の石膏モデルを用いた抵抗測定実験を行い、流れに対する手掌面の傾き (迎え角 (angle of attack)) と手掌に流入する流れの角度 (流入角 (sweep back angle)) を変化させた際の抗力および揚力の計測を行った。その結果、競泳選手が泳いでいる際に Sweep 動作によってみせる迎え角が揚力を生み出し、それが進行方向成分をもつ、すなわち推進力として作用していることを示した。図 12.13 は、Schleihaupt、および清水らによる手掌部の実験データから得られた抗力係数 (C_D)、揚力係数 (C_L) を表している。清水らは、親指だけを開いた形状 (モデル a)、全部の指を開いたパターン (モデル b)、全部の指を閉じたパターン (モデル c) に関して実験を行っているが、指を開いた場合には、迎え角の小さな領域において負の揚力係数が得られていることが興味深い。すなわち通常とは逆方向に力がむくということである。

高木は清水の実験データにおいて観測された圧力計測位置に圧力センサーを貼り付け、手掌部の表面圧力計測を行っている [22]。

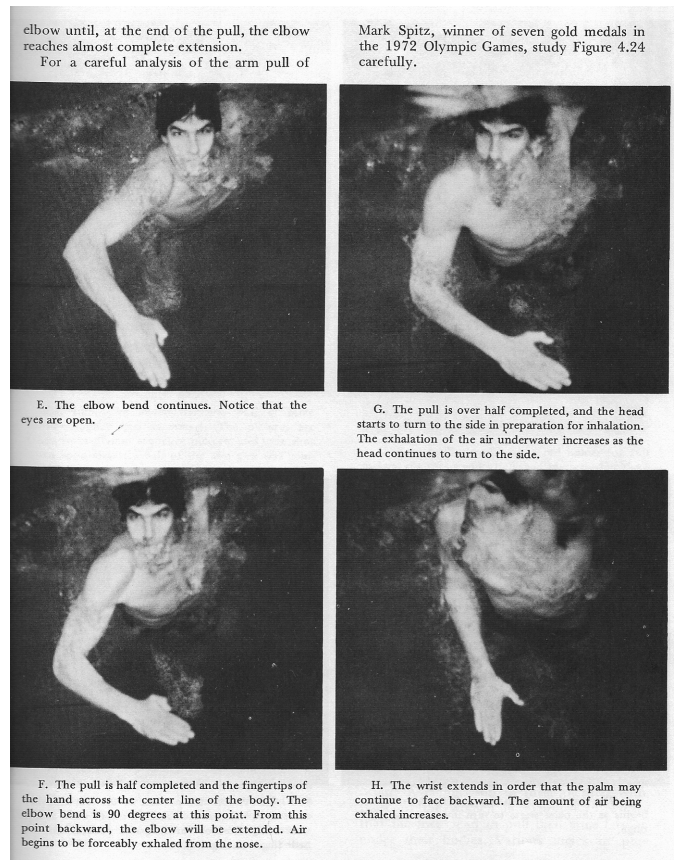


図 12.10: ミュンヘン五輪七冠、マーク・スピッツ

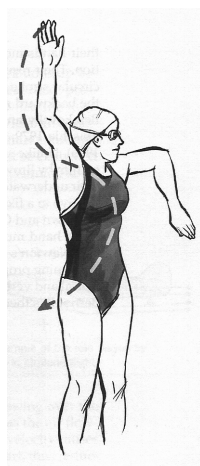


図 12.11: S 字プルパターンの発見

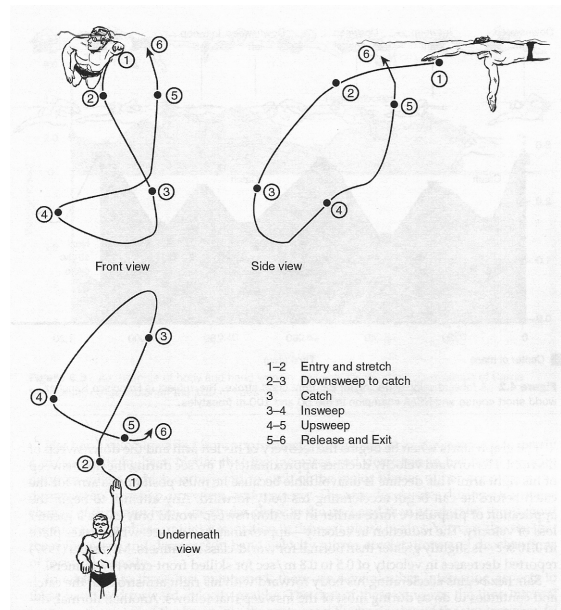


図 12.12: S 字プルパターンの三次元軌跡

12.2.9 I 字ストローク

防衛大学の伊藤は、Counsilman, Schleihauflらの研究結果を精査し、揚抗力比をポーラーカーブによって求め、これまでに S 字プルパターンが最速泳法であると考えられてきたことを覆す説を提唱した。伊藤は Schleihaufl の手掌部のモデル化とともに実験データを詳細に検討しなおし、ヒトの手掌部形状において最大推力を発揮するための推進方法はジグザグにかく S 字ではなく、手掌面(手のひら)を後方に向けてまっすぐにかく、I 字プルであることを理論的に証明した [11]。

この説によれば実験データからわかる揚抗力比からはそれほどヒトの手の形状においては揚力が大きくなく、抗力を中心としたプルパターンが最大推力を生み出す。これを証明するかのごとく当時世界記録を連発していたオーストラリアのイアンソープ選手は、クロール泳でまっすぐに手のひらを後方に動かす I 字プルパターンを示していた。これが現在では主流の学説になっており世界中のスイマーたちが今はまっすぐにかくパターンを採用し始めている。I 字プルパターンは現在世界的な広がりを見せている泳ぎ方ではあるが、上肢は体幹のローリング動作によってその近位端が動かされることから上肢遠位端である手掌部を絶対座標系においてまっすぐな軌道を描くことはむしろ難しい、と仰木は考えている。

12.2.10 かき動作の単純化

水泳はきわめて複雑な流体现象であるが、問題の本質を見極めるために運動をうんと単純化して考えてみることにする [24]。ヒトが泳ぐ際には水を後ろに押しやってその反作用の力で進む、という考え方がこれにあたる。陸上で走る場合には地面を後ろに蹴ってその反作用で地面から押されることで前への推進力を得る。この場合地球の質量は無限大なので蹴った力はすべて推進に活かすことができる。ところが水中ではそうはいかない。水は「暖簾に腕押し」なのである。すなわち後ろにかいた水は後方に向かって運動をするわけであるが、この運動エネルギーはもととはいえば泳者から水に伝達されたものである。したがって泳者の運動のうち、いくらかは自分を前に押しやるエネルギーではなく、水を後ろに押しやるためのエネルギーとなって消費されていく。

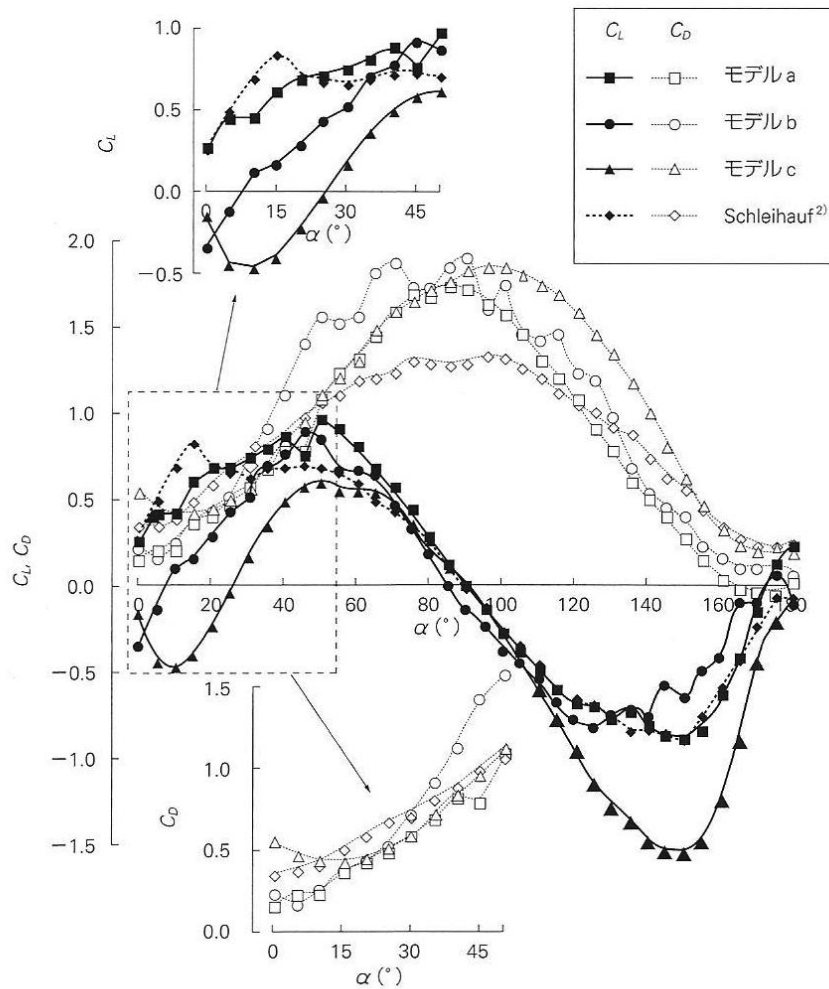


図 14-10 人体手部モデルの揚・抗力係数

モデル a：親指のみを開いたモデル，モデル b：全指を開いたモデル，モデル c：全指を閉じたモデル．迎え角 α とは，主流方向に対する手掌面の角度を示し， $0 \sim 90^\circ$ までは親指が前縁， $90 \sim 180^\circ$ までは小指が前縁となる．また，揚力係数は主流方向に対して鉛直上向きを正としている．

(清水幸丸ほか：人体手部の流体力学的特性に関する考察（手部回りの圧力分布測定および流れの可視化）．日本機学会論文集（B 編），66：1112-1119，2000）

図 12.13: Schleihauf、清水による手掌部抗力・揚力定数実験データ

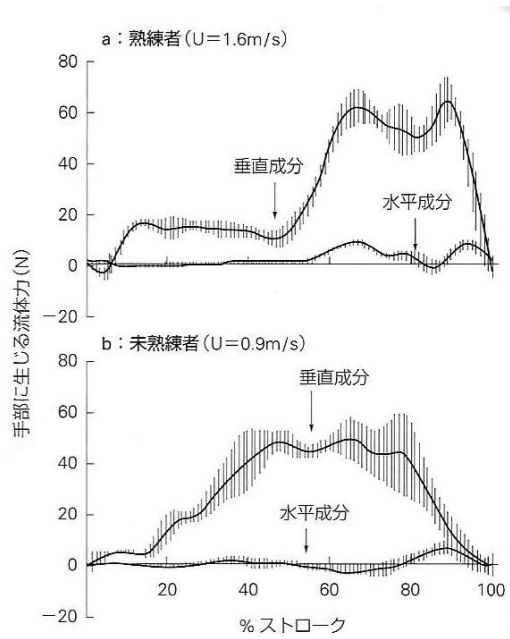


図 14-11 クロール中に手部で発揮される流体力
 X軸は、1 ストロークに要する時間を 100% として経過時間を百分率で表している。流体力は、手掌面に対して作用する方向別に分けて 5 回分のストロークの平均値を示している。
 (高木英樹：泳者手部の表面圧力分布計測による推進力の定量
 体育の科学, 51 : 603-608, 2001)

図 12.14: クロール中に手部で発揮される流体力

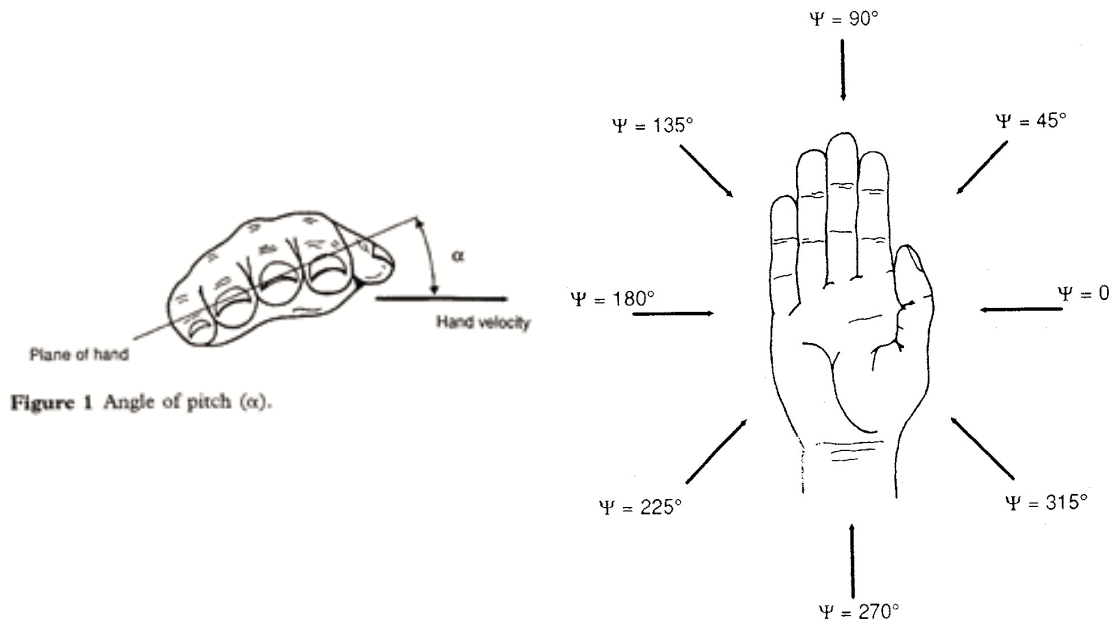


図 12.15: 迎え角 (Angle of attack) と流入角 (Sweep back angle)

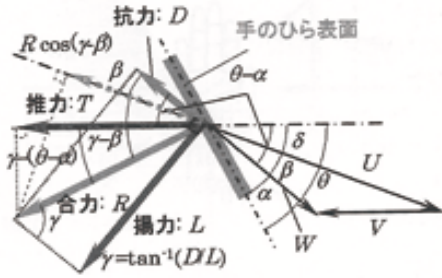


図2(b) 流入相対速度Wより派生する手のひらに作用する力

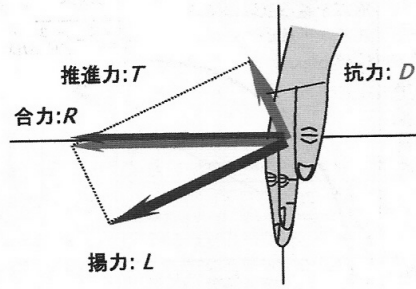


図2(c) 合力すべてが推力成分となる特殊な場合手のひらの角度、相対流入速度Wによってはこのような場合もありうる。

図 12.16: 伊藤による手のモデル化

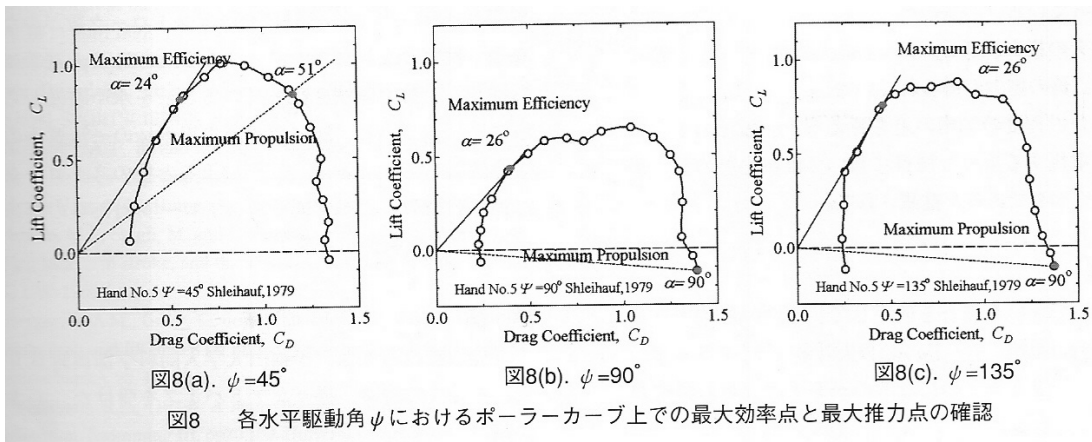


図8 各水平駆動角psiにおけるポラーカーブ上での最大効率点と最大推力点の確認

図 12.17: Schleihauf のデータの再検討 (伊藤によるポラーカーブ)

仮に有効質量 m_w の水を一定の力 f (平均の力) で、一定の時間 Δt 秒間の間押したと考える。すると水が得た運動量はこの力 f の力積、 $f\Delta t$ であるので、速度の増加分 $v_w = \frac{f}{m_w} \Delta t$ となる。ここで水に与えられた運動エネルギーを計算してみると

$$T_w = \frac{1}{2} m_w v_w^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{f \Delta t}{m_w} \right)^2 = \frac{(f \Delta t)^2}{2 m_w} \quad (12.3)$$

式からわかるように、水が得るエネルギーは水の質量に反比例している。すなわち小さな水の塊を押すとそれだけ多くのエネルギーを水に奪われるわけである。したがって水泳では (ボートやカヌーでも)、できるだけ大きな水の塊を後ろに押し出す方が望ましい。そこで多くの水泳選手はハイエルボウ (high elbow) という技術をもちいて「かき」にはいるときには掌と前腕をたてかきの方向の面積を増やそうと努力する。

参考文献

- [1] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [2] M.J. Adrian, M. Singh, and P.V. Karpovich. Energy cost of leg kick, arm stroke and the whole crawl stroke. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 21, pp. 1763–1766, 1966.
- [3] Kingston Bernard, 足立和隆訳. よくわかる筋の機能解剖. メディカルサイエンス・インターナショナル, 2000.
- [4] James E. Counsilman. *Competitive swimming manual for coaches and swimmers*. Counsilman Co. Inc., 1977.
- [5] Robertson D., Gordon E., Caldwell Graham, E., Hamill Joseph, Kamen Gary, and Whittlesey Saunders, N. *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2004.
- [6] Thompson Floyd, 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 (Manual of Structural Kinesiology). 医道の日本社, 1997.
- [7] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, Vol. 12, pp. 403–425, 1993.
- [8] H.M. Karara G.T. Marzan. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [9] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, Vol. 21, No. 7, pp. 533–538, 1988.
- [10] A. Peter Hollander, Gert de Groot, Garit Jan van Ingen Schenau, Roel Kahman, and Huub M. Toussaint. Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. In *Swimming Science V*, pp. 39–43. 1987.
- [11] S. Ito. A fluid dynamical consideration for armstroke in swimming. In *Book of abstract IXth World Symposium Biomechanics and Medicine in Swimming*, p. 93. 2002.
- [12] Perry Jacqueline. ペリー歩行分析、正常歩行と異常歩行. 医歯薬出版, 2007. 武田功監訳.
- [13] Watkins James. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. Elsevier, 2007.
- [14] Rose Jessica and Gamble James, G. *Human Walking*. Lipricott Williams & Wilkins, 2006.
- [15] 金谷健一. 画像理解 - 3次元認識の数理 -. 森北出版, 1990.

- [16] 金子公宥, 福永哲夫 (編). バイオメカニクス, 身体運動の科学的基礎. 杏林書院, 2004.
- [17] R.E. Schleihauf. A hydrodynamic analysis of breaststroke pulling efficiency. *Swimming Technique*, Vol. 12, pp. 100–105, 1976.
- [18] R.E. Schleihauf. A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In J. Terauds and E. W. Bedingfield, editors, *Swimming III*, pp. 70–109. 1979.
- [19] Robert E. Schleihauf. A biomechanical analysis of freestyle. *Swimming Technique*, Vol. 11, pp. 88–96, 1974.
- [20] Dawson T., J. and Taylor C., R. Energetics cost of locomotion in kangaroo. *Nature*, Vol. 243, pp. 313–314, 1973.
- [21] Martin T., P. and Stull G., A. Effects of various knee angle and foot spacing combinations on performance in the vertical jum. *Res. Quart.*, Vol. 40, No. 2, pp. 324–331, 1969.
- [22] 高木英樹. 泳者周部の表面圧力分布計測による推進力の定量. 体育の科学, No. 51, 2001.
- [23] 高木英樹. 人はどこまで速く泳げるのか, 岩波科学ライブラリー, 第 89 巻. 岩波書店, 2002.
- [24] 吉福康郎. ボートの力学. 別冊数理科学 「力とはなにか」, 1995. サイエンス社.
- [25] 江原義弘, 山本澄子. ボディダイナミクス入門、歩き始めと歩行の分析. 医歯薬出版, 2002.
- [26] 佐伯由香, 黒澤美枝子, 細谷安彦, 高橋研一編訳 (編). トートラ 人体解剖生理学 原書 6 版. 丸善, 2004.