

# 自由形競泳の最適アームストロークに関する理論的考察

## Theoretical consideration of optimal arm-stroke for competitive swimming of freestyle

伊藤 慎一郎 (Shinichiro ITO) 防衛大学校システム工学群機械工学科

### 【要 旨】

The mode of propelling force in swimming action can be divided into two optimal kinds: the maximal mode of propelling force and the maximal mode of efficiency. Driving angles and tilt angles of hand were calculated in a balanced state of propelling forces of hand and drag forces of the whole body by utilizing with published data of hand on a quasi-steady state.

As a result, the followings were obtained: The hand plane almost perpendicular to the direction of motion generates optimal propelling force in each mode. Concerning the maximal mode of propelling force, such as in a competitive swimming, the hand should be driven along the body axis to the advancing direction for drag forces to be used entirely. However, for the minimal energy consumption in swimming, sculling action of hand is important to utilize not only drag force but also lift force.

◆キーワード：自由形、揚力、抗力、最適モード、S字プル泳法、抗力泳法

### 1. 緒 言

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。泳者の速度が一定の状態は推進力と推進抵抗のつりあった状態である。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の向上のみならず、泳法技術の向上が考えられ、推進抵抗に関しては表面抵抗、形状抵抗の軽減が考えられる。前者は鯨肌水着等の開発<sup>1)</sup>が、後者としては抵抗の少ないフォームすなわち泳者の遊泳技術向上があげられる。

自由形の泳法技術に関して1969年熟練スイマーの水中映像を観察したJames Counsilman<sup>2)</sup>は、彼らが腕をS字状に動かすことから、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せば、押した反対方向に同じ大きさで作用する力）の合力を推進力として使っていると、この泳法を提案した。彼の提唱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であった。それ以降はBarthels and Adrian<sup>3)</sup>、Schleihauf et al.<sup>4,5,6)</sup>、Reischle<sup>7)</sup>、Toussaint<sup>8)</sup>ら多くの研究者支持もあり、自由形の泳法技術としては、競泳選手らには抗力型泳ぎよりも、揚力を利用したS字を描くアームストロークが広く普及している。

しかしながら近年 Sanders<sup>9,10,11)</sup>は、実験的研究および観察によって、抗力型の泳ぎの方がより大きな推進力を得られ、揚力理論のS字泳ぎは懐疑的であると発表している。

Hollander and van Ingen Schenau<sup>12)</sup>、Adrian et al.<sup>13)</sup>は自由形の泳ぎにおいては腕と足の推進力比率は10:1~6:1であり、腕からの推力が大半を占めることが報告している。また、腕と手のひらから発生する推進力に関してはBerger et al.<sup>14)</sup>によって腕からの揚力特性は手のひらのそれと大差がないとの報告がある。

手のひらの流体力学特性は形状によって変化する。Shleihauf<sup>15)</sup>は模型の手のひらを使って、揚力および抗力特性を実験的に得ている。Shimizu et al.<sup>16)</sup>は親指の開閉による手のひら形状の変化を回内、回外運動での迎角の変化で流体力を調べ親指影響について報告している。

一方、著者ら<sup>17)</sup>は亀とスッポンの泳ぎを観察し、亀の泳ぎには2つの最適モード(a)最大推進力モード（最速モード）、および(b)最大効率（あるいは最小エネルギー）モードがあることを見出し、それを定式化し、それが観察結果とよく一致することを報告している。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。

本論文では冗長にはなりがちであるが、理解しやすいように極力、数式表現を避けて記述する。

## 2. 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 ( $L$ ) と抗力 ( $D$ ) (抵抗力) についての説明を行う。

図1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と物体進行方向あるいは流れに抗する方向成分の抗力とに分解される。また流速あるいは物体の流れに対する角度 (迎角) 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2(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  $V$  と手のひらを移動することによって静水に生じる流入速度ベクトル  $U$  とから速度三角形が描かれて、手のひらに対する相対流入速度ベクトル  $W$  は適度な迎角  $\alpha$  を持つことになる。この迎角  $\alpha$  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2(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  $\sqrt{L^2 + D^2}$  なる合力が手の甲側に発生し、身体の前進行方向に対するこの成分が推進力  $T$  となる。手のひらを動かすためのパワー  $P$  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の成分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と相対流入速度  $W$  によっては図2(c)に示すように抗力と揚力の合力すべてが推進力となる場合もありうる。

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。

手のひらの揚力と抗力に関しては手のかき方によってその特性が変化する。それを Shleihaufl<sup>15)</sup> は模型の手のひらを使って、図3に示す水平駆動角 (sweepback角)  $\psi$  を中心として手のひらを流れに対して傾けて迎角  $\alpha$  の違いによる揚力および抗力特性を実験的に得ている。本研究においては通常の自由形の泳ぎにみられる、体軸に対し手のひらを内向き、平行、外向きにかく動作に絞ってその動作に相当する水平駆動角  $\psi = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  に関する彼のデータに着目した。

彼は揚力と抗力を別々に考慮して解析したが、今回は横軸を抗力係数  $C_D$ 、縦軸を揚力係数  $C_L$  にとり、迎角  $\alpha$  をパラメータとして図4に示すようなひとつの揚抗力曲線 (ポラーカーブ) に変換して解析を行った。図5は一般的な

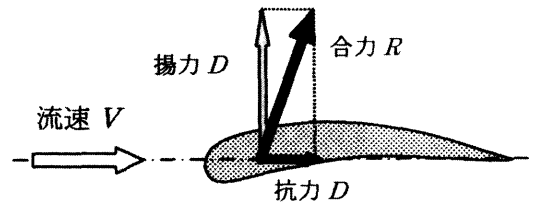


図1 流れに置かれた物体に作用する力  
流入速度に直角に揚力  $L$ 、平行に抗力  $D$  が発生する。水泳の手のひらからにもこのような力が発生している。

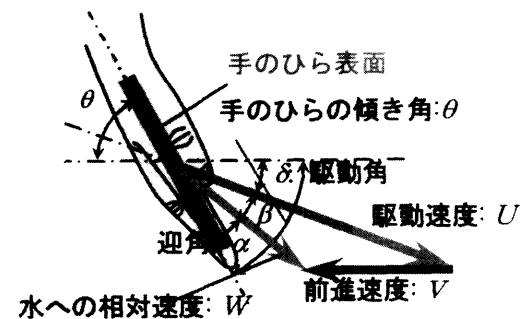


図2(a) 手のひら周りの速度三角形

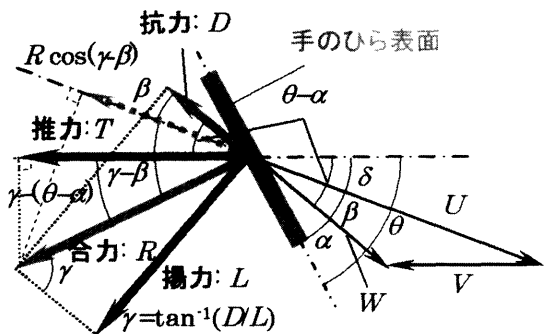


図2(b) 流入相対速度  $W$  より派生する  
手のひらに作用する力

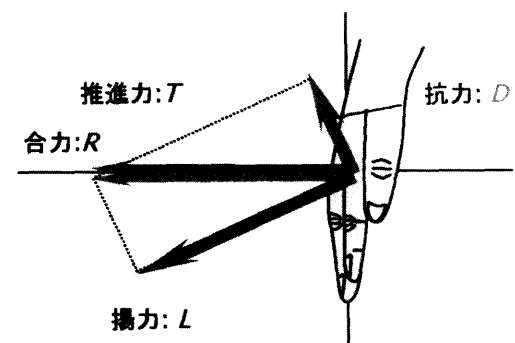


図2(c) 合力すべてが推力成分となる特殊な場合  
手のひらの角度、相対流入速度  $W$  によってはこのような場合もありうる。

ポーラーカーブであり、この見方について述べる。そもそもポーラーカーブは航空機の翼特性を把握するのに用いられる。例えば図6に示すように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、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、これはすなわち原点からポーラーカーブに対する接線の傾きに等しくなる。また、推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を立てられる。

図2(a), (b)から得られる各変数の関係を方程式に置き換え、Shleihauf<sup>15)</sup>の実験データを最整理した結果とKolmogorov et al.<sup>18)</sup>による動的全身派生抗力 $D_{DP}$ を元に、これらの方程式を解いた。

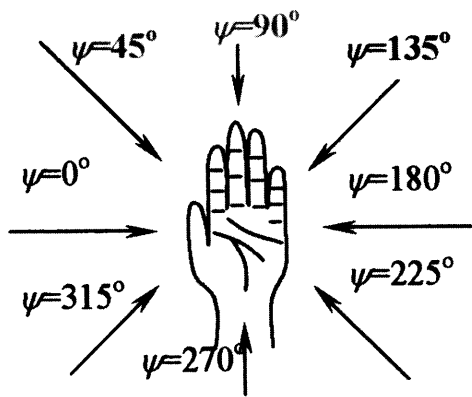


図3 水平駆動 (Sweepback) 角の定義

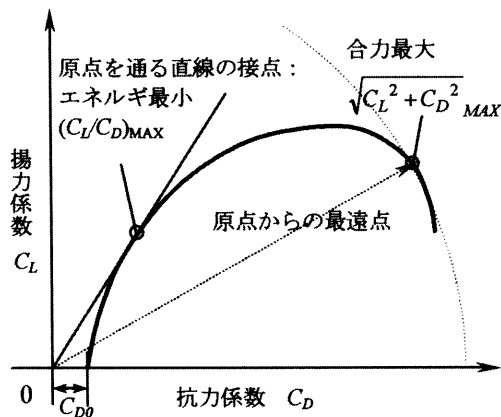


図5 翼にみられる一般的な揚抗力曲線と最大推力および最小エネルギーを生じさせる点

### 3. 解析結果および考察

図4に示す水平駆動角  $\psi=135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$  におけるポーラーカーブを元に推進効率と推力係数（推力の大きさ）を計算した。これらの水平駆動角はそれぞれ、手のひらを外から内側へ (Catch)、真っ直ぐ (Straight pull)、内から外へ (Finish) 動かすかき方に相当する。水平駆動角  $\psi=90^\circ$  におけるそれらの結果をプロットしたものが図7(a), (b)である。それぞれの縦軸は推進効率  $\eta$ 、推力を無次元化した推力係数  $C_T$  を表し、横軸はいずれも図2(a)に示す (垂直) 駆動角度  $\delta$ 、手のひらの傾き角  $\theta$  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  $\delta$ 、手のひらの傾き角  $\theta$ ) =  $(42.3^\circ, 85^\circ)$ 、 $(0.0^\circ, 90^\circ)$  が得られた。このときの手のひらへの迎角 (流入角)  $\alpha$  はそれぞれ  $26^\circ, 90^\circ$  であった。具体的には体軸に沿って真っ直ぐかく場合 ( $\psi=90^\circ$ ) において、最大効率の泳ぎで

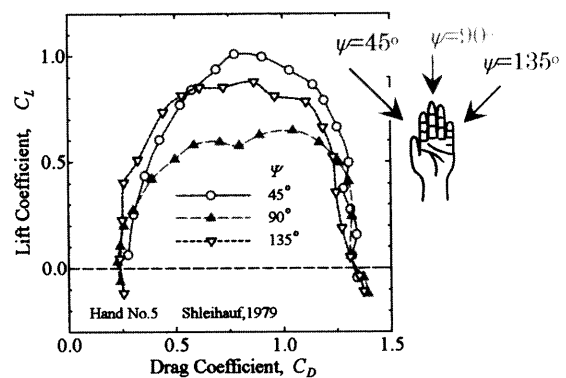


図4 Shleihaufの行った手のひら模型の流体力学特性を再整理した水平駆動角  $\psi=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  のポーラーカーブ

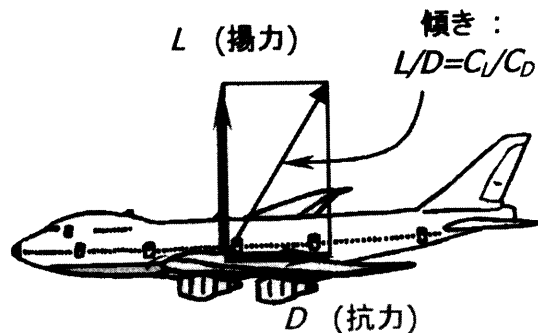


図6 航空機に作用する揚抗力、省エネ飛行には揚抗比最大が望ましい。

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 ( $\delta=42.3^\circ$ )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 ( $\delta=0^\circ$ )に動かすということが得られた。他の水平駆動角  $\psi=45^\circ, 135^\circ$ においても同様の形状のグラフが得られ、いずれもひとつのピークを持っていた。これら計算結果による最大効率点における手のひらの姿勢角で表すと、(水平駆動角  $\psi$ , 駆動角度  $\delta$ , 傾き角  $\theta$ ) =  $(135^\circ, 38.4^\circ, 85^\circ)$ ,  $(90^\circ, 42.3^\circ, 85^\circ)$ ,  $(45^\circ, 39.5^\circ, 85^\circ)$ となった。すなわち手のひらは進行方向に対して  $85^\circ$ に傾けて、水平駆動角  $\psi$ と駆動角度  $\delta$ は手のひらを Scullするようにかく移動姿勢であり、S字プルを再現している。逆にS字プル泳法は最大効率の泳ぎ、無駄のない泳ぎにということになる。

一方最大推力点では(水平駆動角  $\psi$ , 駆動角度  $\delta$ , 傾き角  $\theta$ ) =  $(135^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ ,  $(90^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ ,  $(45^\circ, 20.5^\circ, 85^\circ)$ となった。手のひらへの迎角(流入角)  $\alpha$ はそれぞれ  $90^\circ$ ,  $90^\circ, 51^\circ$ であった。 $\alpha=90^\circ$ で手のひらへ水が流入することは手のひらの正面で水を捉えることを意味する。これら一連の角度の意味するものは Catch、Straight pull 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し、抗力泳ぎを、Finish時は斜めに Scullingするということを意味している。言い換えると最大推力で泳ぐすなわち最速の泳ぎを行うには遊泳動作後半以外は抗力泳ぎを行うということである。

そもそも Counsilman は熟練泳者の泳ぎを水中映像に撮り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。しかしながら熟練者の泳ぎ=競泳者の泳ぎとの発想から現在の競泳の泳ぎ方の主流になっていると思われる。

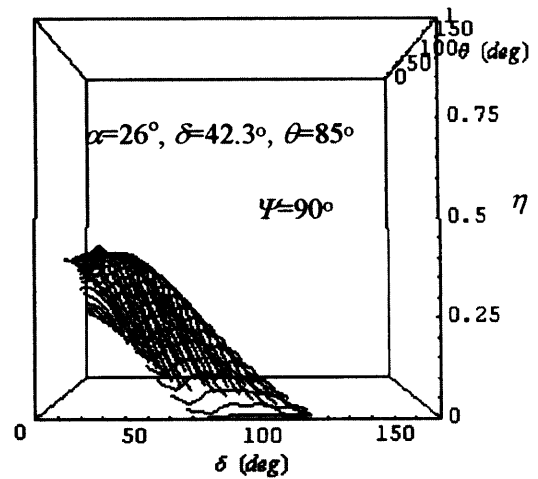


図7(a) 水平駆動角  $\psi=90^\circ$  における垂直駆動角  $\delta$ と傾き角  $\theta$ をパラメータとした推進効率  $\eta$

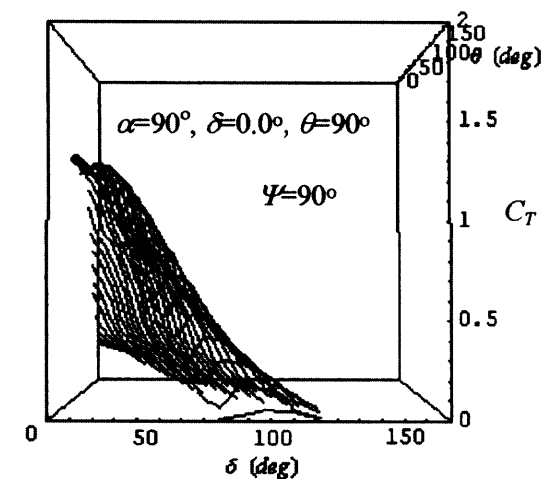


図7(b) 水平駆動角  $\psi=90^\circ$  における垂直駆動角  $\delta$ と傾き角  $\theta$ をパラメータとした推力係数  $C_T$

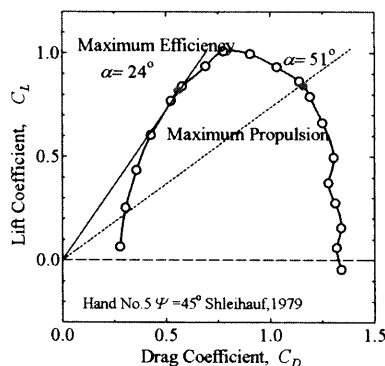


図8(a).  $\psi=45^\circ$

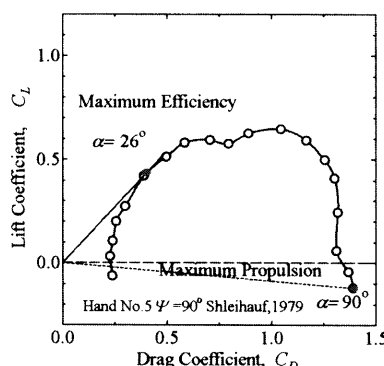


図8(b).  $\psi=90^\circ$

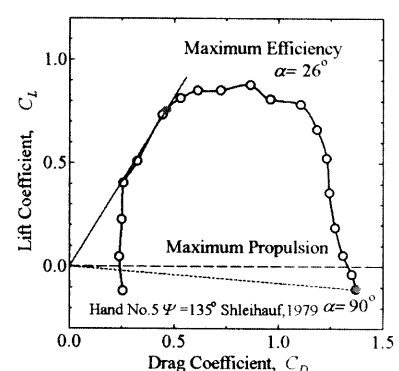


図8(c).  $\psi=135^\circ$

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

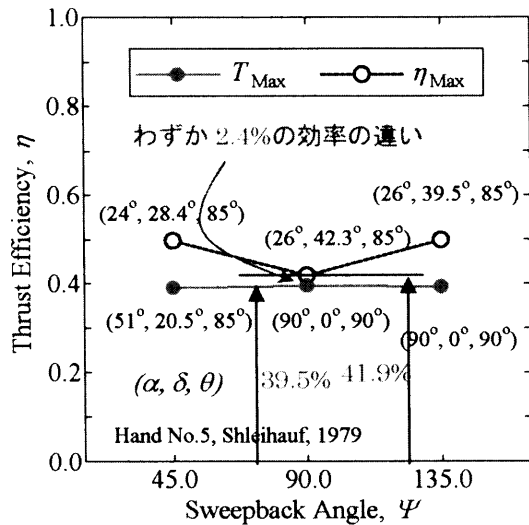


図9(a) 異なる水平駆動角  $\psi$  における効率の比較  
(最大効率と最大推力時の効率)

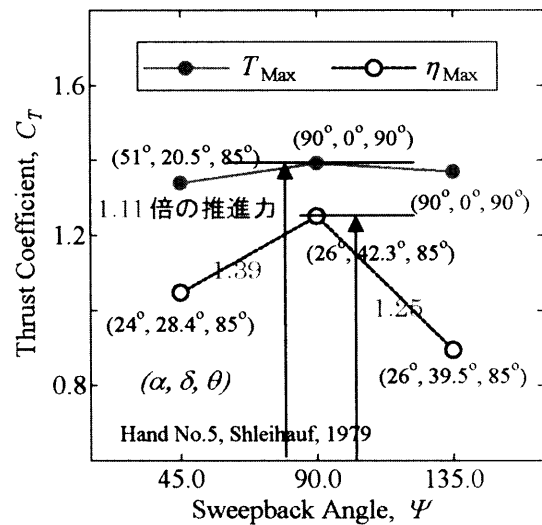


図9(b) 異なる水平駆動角  $\psi$  における推力の比較  
(最大推力と最大効率時の推力)

これらの得られた最大効率点、最大推力点をそれぞれの水平駆動角  $\psi$  におけるポラーカーブ上にプロットしたものが図8(a)、(b)、(c)であり、前節での推測どおり、いずれもそれぞれ原点からの接線の接点、最遠点となった。

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、効率面で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9(a)である。横軸は水平駆動角  $\psi$ 、縦軸が推力係数  $C_T$  である。実線が最大推力点をプロットしたものであり、点線は最大効率点における推力係数の大きさをプロットしてある。ここで最も推力の値が高い水平駆動角  $\psi=90^\circ$  において、その値を比較してみると最大効率  $\eta=41.9\%$  と最大推力時の効率  $\eta=39.5\%$  とわずか2.4%の差しかない。図9(b)は推力係数  $C_T$  に関する最大推力時と最大効率時の比較を行っている。同様の水平駆動角  $\psi=90^\circ$  にて比較すると、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。

よってこの程度の効率の差を考えると、競泳のように推進力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推測される。

#### 4. 結論

人が本能で泳いだ場合を仮定して、2つの最適モード (a) 最大推力 (最速) モード、(b) 最大効率 (最小エネルギー) モードがどのようなものになるのかを手のひらの揚抗力特性を中心に計算した。

その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 手のひらはいずれのモードでも進行方向に対してほぼ直角にする。
- 2) 最大効率モードの泳ぎはS字プル泳法である。
- 3) 最大推力モードの泳ぎはFinish以外は抗力泳法を中心に行う。
- 4) 最大推力モード時の効率は最大効率時の効率とはそれほど違いがない。

#### 付 記

S字プル泳法におけるストロークを船舶のプロペラの回転に例えると、スピードを増すためにはプロペラが回転数を増やすと同様に、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。世界のトップスイマーであるIan Thorpe選手は今回提案した抗力泳法を行っていることを水中映像から著者は確認している。2001年福岡世界水泳の一流選手の泳ぎを解析したOkuno et al.<sup>19)</sup>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。

#### 謝 辞

研究に当たっては、早稲田大学人間科学部奥野景介先生から多くの知識、様々なアドバイスを受けた。心より感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) Toussaint, H. M., Truijens, M., Elzinga, M., van de Ven, A., de Best, H., Snabel, B. and Gert de Groot., (2002) Effect of a Fast-Skin™ 2 Body<sup>2</sup> Suit on Drag during Front Crawl Swimming, *J. Sports Biomechanics*, Vol.1-1, Edinburgh University Press.
- 2) Counsilman, J.E. (1968). *Science of Swimming*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- 3) Barthels, K., & Adrian, M.J. (1974). Three-dimensional spatial hand patterns of skilled butterfly swimmers. In J. Clarys and L. Lewille (Eds.), *Swimming II* (pp. 154-160). Baltimore, Maryland: University Park Press.
- 4) Schleihauf, R.E. (1974). A biomechanical analysis of freestyle. *Swimming Technique*, 11, 89-96.
- 5) Schleihauf, R.E., Gray, L. and DeRose, J. (1983). Three-dimensional analysis of swimming propulsion in the sprint front crawl stroke. In A.P. Hollander et al. (Eds). *Biomechanics and Medicine in Swimming* (pp.173-184). Champaign, Illinois: Human Kinetics. University Park Press.
- 6) Schleihauf, R.E., Higgins, J.R., Hinrichs, R., Luedtke, D., Maglischo, C., Maglischo, E.W. and Thayer, A (1988). Propulsive techniques: front crawl stroke, butterfly, backstroke, and breaststroke. In B.E. Ungerechts, K. Wilke, & K. Reischle (Eds.), *Swimming Science V* (pp. 53-59). Human Kinetics Books, Champaign, Ill.
- 7) Reischle, K. (1979). A kinematic investigation of movement patterns in swimming with photo-optical methods. In J. Terauds and E.W. Bedingfield (Eds). *Swimming III* (pp.127-136). Baltimore, Maryland: University Park Press.
- 8) Toussaint, H. M., (2000). An Alternative Fluid Dynamic Explanation for Propulsion in Front Crawl Swimming, *Proc. International Biomechanics in Sports 2000*, Edinburgh University Press.
- 9) Sanders, R.H. (1997a). Extending the "Schleihauf" model for estimating forces produced by a swimmers hand. In B.O. Eriksson and L. Gullstrand *Proceedings of the XII FINA World Congress on Sports Medicine*. Goteborg, Sweden 12-15 April 1997, pp.421-428.
- 10) Sanders, R.H. (1997b). Hydrodynamic characteristics of a swimmers hand with adducted thumb: Implications for technique. In B.O. Eriksson and L. Gullstrand *Proceedings of the XII FINA World Congress on Sports Medicine* (pp.429-434). Goteborg, Sweden 12-15 April 1997.
- 11) Sanders, R.H. (1998). Lift or Drag? Let's Get Skeptical About Freestyle Propulsion, <http://www.sportsci.org/news/biomech/skeptic.html>, SPORTSCIENCE, Nov-Dec.
- 12) Hollander, A. P., de and van Ingen Schenau, G. J., (1987) Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming, *Swimming Science V*, pp.17-29. Human Kinetics Publishers, Champaign, IL.
- 13) Adrian, M.J., Singh, M. and Karpovichi, P. V.,(1966). Energy cost of leg kick, arm stroke, and the whole crawl stroke, *J. appl. Physiol.* 21, 1763-1766.
- 14) Berger, M.A.M., Groot, G. de & Hollander, A.P. (1995). Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. *Journal of Biomechanics*, 28, 125-133.
- 15) Schleihauf, R.E., (1979). A hydrodynamic analysis of swimming propulsion, *Swimming III*, pp70-109. University Park Press, Balti  
more.
- 16) Shimizu, Y., Takagi, H., Kurashima, H., A hydrodynamic study of the human hand model (Measurement of the pressure distributions and flow visualization), *Trans.JSME(B)*, 66(646), pp.1112-1119,2000.
- 17) Ito, S and A. Azuma, (2001). Analysis of Thrust Performance for Paddling Locomotion, *Proceedings of the 50th Japan National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Science Council of Japan, 271-280.
- 18) Kolmogorov, S., Lyapin, S., Rumyantseva, O. and Vilas-Boas J. P., (2000).Technology for Decreasing Active Drag at Maximum Swimming Velocity, *Proc. International Biomechanics in Sports 2000*, Edinburgh University Press.
- 19) Okuno K., Ikuta Y., Wakayoshi K., Nomura T., Takagi H., Ito S., Ogita F., Ohgi Y., Tachi M., Miyashita M., Stroke characteristics of world class male swimmers in free style events of the 9th Fina world swimming championships 2001 Fukuoka, *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, pp.157-162., Publications de l'Université de Saint-Étienne.