

ブレストストロークの挟み込みインスイープにおける推力のシミュレーション

山田悟史¹⁾・竹島良憲

The simulation of thrust in breaststroke kick during the inward portion of the in-sweep
Satoshi YAMADA, Yoshinori TAKESHIMA

Abstract : Kicking like a propeller in breaststroke is nowadays widely used by breaststrokers. Yoshimura (1999) described that the kicking like a propeller was divided into the following five phases, recovery, outswEEP, catch, insweep and lift. Moreover, the insweep is sorted into two phases. These two phases mean the first half of the insweep until the legs have been stretched straightly, and the inward portion of the insweep as a latter part. The inward portion of the insweep is called 'pinching insweep' on this study because it looks like water is pinched with both feet.

Maglischo explained that to get propulsion during the inward portion of the insweep, the feet must remain flexed at the ankles so that the toes are pointing the bottom of the pool and the soles of the feet should be facing in. Though the latter portion of the insweep is less propulsive than the former portion, it is possible to swim world-class times and even set world records without performing the second portion of the insweep.

The following three matters were made the premise to enable thrust analysis due to pinching insweep by this paper. The first one is that the shape was simplified in order to use hydrodynamics because the shape of the leg was complicated. The second one is that slender body theory was used to simplify the movement of pinching insweep. The third one is that the three angles δ_{LT} of the sole face are supposed when pressing water inward with the sole.

The purposes of this study are to simulate with thrust of "Pinching insweep" according to lighthill method.

The conclusion is that the bigger the angle δ_{LT} of the sole surface is within its angle limit, the bigger the swimming velocity becomes.

Key words : swimming, physical education teacher, coaching, breaststroke, kick

I. 緒言

水泳の中でも平泳ぎは一番ベーシックなものだと言える。早くは泳げないが、呼吸もしやすく、長く泳ぐことが可能で、一番はじめに獲得される泳ぎと言って良い。また、救助などに使われる泳ぎや、災害時に「浮いて待つ」ときの動きにも繋がる。重要な泳ぎとも言える。一方で、平泳ぎのキックは、上手に行うのは最も難しい技術の一つでもある。学校の水泳の授業やスイミ

ングスクールなどでも、平泳ぎのキックを行う時に「あおり足」になってしまう生徒の矯正はとても苦勞する。また、平泳ぎは他の3泳法（クロール、バタフライ、背泳ぎ）と比べて、ストローク（腕の掻き）よりもキックへの依存度が高い。つまり、平泳ぎにおいては上手にキックすることは、初級者・上級者関わらず重要ということである。

多くのスイマーが行っているプロペラの

1) 静岡産業大学経営学部
〒438-0043 静岡県磐田市大原1572番地1

1. *Shizuoka sangyou university*
1572-1 Owara, Iwata, Shizuoka

ようなプレストロークのキックは、リカバリー、アウトスイープ、キャッチ、インスイープ及びリフトの5つの動作で構成されている(吉村・高橋)¹⁵⁾。本研究ではインスイープをさらに前段のインスイープ「*Kick Insweep*」と後段の挟み込みするインスイープ「*Pinching Insweep*」とに分けて考える。*Maglischo*³⁾は、*Pinching Insweep*(*the inward portion of the insweep*)について“スイマーは、後段のインスイープにおいて脚が伸びきった後、足首を曲げて、つま先はプールの底に向け、両方の足の裏面が向き合った状態で、両足がそろって水まで水を足の裏面で押すように足を動かし、推力を得ることもある。しかしながら、内側への後段のインスイープは、前段のインスイープと比較すると、推力の発生が少ないため、後段のインスイープをすることなく、ワールドクラスの泳ぎをすることも可能であるし、ワールドレコードを出すこともあり得る。”と解説している。

角川ら⁷⁾は、足背と足底に装着した4個の圧力センサーによる圧力データと、ビデオ解析により、平泳ぎの足部流体力に関する研究を行っている。その結果得られた、*Pinching Insweep*における左右方向成分の大きさは、蹴り出しインスイープほど大きな成分ではないが、推力に寄与することが期待するには十分の大きさであった。

本研究は、平泳ぎのキック動作の中でも*Pinching Insweep*を取り上げ、その動作の違いにより、泳速度にどの程度変化が生じるのか、魚の瞬時推力を計算できる*Lighthill*^{9) 10)}の推進理論(以下「*Lighthill*の理論」)をもとに*Pinching Insweep*の推力を解析し、シミュレーションし、学校の授業やスイミングスクールでの水泳コーチングに活かすことを目的とする。

II. 推力の計算

1. 推力計算のための条件

推力を求めるための脚のモデルは図4-aである。この「脚モデル」は、足部(踝-つま先)、踵部(踵-踝)、下腿部(膝-踝)、大

腿部の4つの部位から構成されるものとし、足部は3次元平板翼、踵部は3次元直方体とし、下腿部は大腿部と踵部で挟まっているため2次元円柱とする。また、各部位は流れによる相互干渉のない、それぞれ独立して存在する形態として考える。

座標系は、泳ぐスイマーに対する流れの方向をx軸、スイマーの進行方向に対し、水平右方向をy軸、鉛直方向をz軸とする右手系のデカルト座標系とする。

“細長い物体”とは飛行船の船体や飛行機胴体のように、進行方向に直角な方向の長さや運動が、それぞれの長さや進行速度に比べて小さく、しかも断面長さに沿って緩やかに変化するような物体である(谷¹²⁾)。プレストロークで*Pinching Insweep*をする脚は、真っ直ぐに伸ばされており、競泳選手では一般的にy軸方向への変位は比較的小さいため、“細長い物体”と見なすことができる。上半身も同様に“細長い物体”と見なすことができるが、y軸方向へ変位しないためここでは考える必要がない。

分析を行うための用語定義やモデル定義を図1~4に示す。

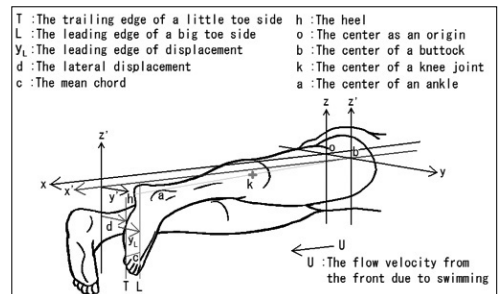


図1. 平泳ぎのキックのPinching Insweepの用語定義

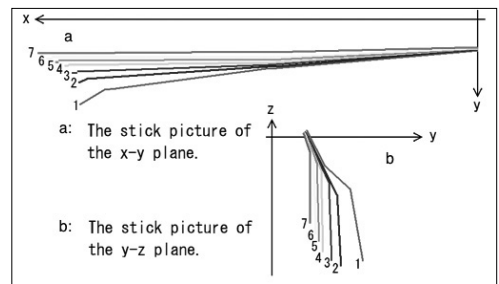


図2. x-y平面とy-z平面のスティックピクチャー

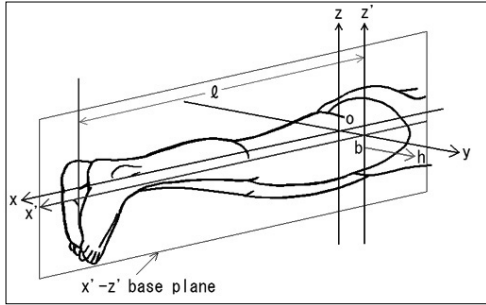


図3. x'-y'平面の基準面

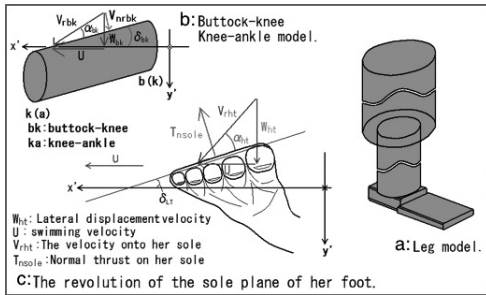


図4. 脚部と足部のモデル

2. 「Lighthillの理論」による推力計算

推力をシミュレートするためのデータとして、挟み込みの変位 d と泳速度 U は、日本水泳連盟監修「ビデオ水泳シリーズ」の中の「平泳ぎ」に出てくる女性スイマー（バルセロナオリンピック金メダリスト）の泳ぎをキャプチャしたものを用い、脚の長さや大きさなどの身体データは前述のスイマーとほぼ同身長の実測値を用いた。これらのデータを合成して作成した、挟み込みインスイープ時の脚のスティックピクチャーを図2に示している。

ここでは、スイマーが静止流体中を推進するのではなく、泳速度と同じ速さの流体が頭部から脚方向へ速度 U で流れていると考える。スイマーの右大転子を b とし、 b を通る x - z 平面として x' - z' 平面を設定する

$$L(x, t) = -\rho(\partial/\partial t + U \partial/\partial x)\{w(x, t)A(x)\} \quad (3)$$

$$E_{both} = 2\rho \int_0^\ell \partial h/\partial t (\partial/\partial t + U \partial/\partial x)w(x, t)A(x) \quad (4)$$

$$E_{both} = \partial/\partial t \left\{ 2\rho \int_0^\ell \partial h/\partial t \{w(x, t)A(x)\} dx - 2 \times \frac{1}{2} \rho \int_0^\ell w(x, t)^2 A(x) dx \right\} + 2\rho U \left| \partial h/\partial t \{w(x, t)A(x)\} \right|_0^\ell \quad (5)$$

(図3)。また、 b から T (Trailing edge) までの x 方向の距離を ℓ とする。「Lighthillの理論」では、 b から T の間にある任意の点 x' にある右脚の y - z 平面の断面が y 軸方向に変位することのみを考える。この変位を h で表すと、 h は x' の他に時間 t の関数であり、右脚の断面は式(1)のように速度 w で y 軸負方向に動くことになる。神部⁸⁾は、 w を“横押し速度”と呼び、式(2)の W を“横変位速度”と呼んでいる。本研究もその呼称に

$$w = \partial h/\partial t + U \partial h/\partial x \quad (1)$$

$$W = \partial/\partial t (h) \quad (2)$$

Lighthill⁸⁾によると“細長い物体”の断面のまわりの流れについて、右脚の任意位置における y - z 断面の流れは、それと同じ位置における同じ断面積の無限長柱体が、式(1)の横押し速度 w で y 軸方向に運動する場合の二次元的流れで近似できる。このような流れを非粘性で非回転と仮定すると、 x' 軸方向の単位の長さについて、 y 軸方向の運動量は $\rho A(x)w(x, t)$ で与えられる(但し、 ρ は水の密度、 $\rho A(x)$ は x 軸方向の単位の長さあたりの付加質量、 $A(x)$ は面積の次元を持ち距離 x' の関数)。断面が半径 a の円柱であれば、流体の付加質量は $\rho \pi a^2$ となる(東)¹⁾。このとき流れの持つ運動量の時間変化の割合は、無限長柱体の x' 軸方向の単位の長さあたりに働く力に等しく、方向が反対であることから、片脚について y 軸方向に式(3)における力 L が働くことになる。両脚の仕事 E_{both} とすると式(4)となる。式(4)の被積分項である $\partial h/\partial t (\partial/\partial t + U \partial/\partial x)w(x, t)A(x)$ に積の微分公式を適用して整理すると式(5)となる。

この (5) において、付加質量を $\rho A(x)$ とおき、式 (1) を用いて式 (5) を変形すると、

$$E_{both} = \frac{\partial}{\partial t} 2 \int_0^{\ell} \left(\frac{1}{2} m w^2 - U m w \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx + 2U [m w W]_{x=\ell} \quad (6)$$

となる。式 (6) の右辺第1項は、*Pinching Insweep* を行う脚の臀部 b から T に至る間における両脚の仕事量で、時間的に変動する。第2項は、 T における推力となる仕事量である。

$$E_{both} = 2UP + 2U \left[\frac{1}{2} m w^2 \right]_{x=\ell} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\ell} \left(\frac{1}{2} m w^2 \right) dx \quad (7)$$

式 (7) において、右辺第1項は、スイマーが、泳速度 U で進んでいるときの推力を P とすると、スイマーが水になす仕事である。第2項は、足の単位長さあたりの水の付加質量による運動エネルギーであり、 T から後流 (*wake*) に放出される。第3項は、臀部 b から T へ

次に、スイマーから充分に遠く離れた所に静止座標系を設定し、その水は静止しているものとする。この静止座標系でスイマーの両脚の仕事量 E_{both} をで表すと式 (7) となる。

の後端 ℓ に至る間の *Pinching Insweep* における両脚の水の付加質量による運動エネルギーであり、時間的に変動する。式 (6) と (7) からスイマーの瞬時推力 P_i を式 (8) として求めることができる。

$$P_i = 2 \left[m w W - \frac{1}{2} m \omega^2 \right]_{x=\ell} - 2 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\ell} \left(m w \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx \quad (8)$$

式 (8) の第1項における $1/2 m \omega^2$ は、運動エネルギーの式となっているが、 x' 軸方向の単位長さで定義されているため、長さで割っていることになり、力の単位を持つことになる。また、式 (8) の右辺第1項の m は、 $x'=\ell$ における付加質量であるため、図4-aに示す脚モデルの足による付加質量を求める。踵一つま先部の長さ $2a$ (z 軸方向) とすれば、踵一つま先部は平板であるため、 $x'-z'$ 面内に存在する無限長平板 (2次元平板) を適用すれば、東¹⁾により足の付加質量 $\rho A(x)$ は、 $\rho \pi a^2$ で与えられる。このため x' 軸方向の無限長円柱と同じ付加質量となるから、踵一つま先部の平板に相当する無限長平板は、 x' 軸方向の無限長円柱と見なせる。

ここで横押し角度 (図4-c) を δ_{LT} とすると、変位 d は、 y_L (*Leading edge of displacement*)、 c (*The mean chord*) を用いて

$$d = y_L + c \sin(\delta_{LT}) \quad (9)$$

と表すことができる。“細長い物体理論”で

は、式 (9) の変位 d を式 (8) の変位 h として使用できる。但し、本研究では角度 δ_{LT} を計測することはできないため、あとの (表1) で示すように三通りのパターンを設定する。

3. *Pinching Insweep* で生じる「*Lighthill* の理論」以外の推力計算

1) 大腿部による推力計算方法

図1に示す大腿部 r_{bk} (*buttock-knee* の長さ) は、*Pinching Insweep* 時に、図2の x - y 平面の *Stick Picture* から分かれるとおおり、 x' - y' 平面を y 軸負方向に動く。このため、大腿部 r_{bk} を円柱 r_{bk} で近似するとき (図4-b)、円柱 r_{bk} が y 軸負方向へ動く変位速度を W_{bk} とすると、図4bのとおり W_{bk} と泳速度 U との合成速度 V_{rbk} は式 (10) となる。なお、式 (11) の a_{bk} は、大腿部 r_{bk} と V_{rbk} とのなす迎角である。 r_{bk} に垂直に入る V_{rbk} の成分を V_{nrbk} とするとき、式 (12) の V_{nrbk} により大腿部 r_{bk} と見なす円柱に抵抗が生じる。この抵抗により推力 T_{bk} が発生する。推力 T_{bk} の x 軸成分 $T_{x,bk}$ は HOERNER¹⁰⁾ により式 (13) と表すことができる。

$$V_{rbk} = \sqrt{W_{bk}^2 + U^2} \quad (10)$$

$$\alpha_{bk} = \arctan(W_{bk}/U) - \delta_{bk} \quad (11)$$

$$V_{nrbk} = V_{rbk} \sin \alpha_{bk} \quad (12)$$

$$T_{xbk} = Cd_{bk} \frac{1}{2} \rho V_{nrbk}^2 S_{bk} \sin(\delta_{bk}) \quad (13)$$

但し、 Cd_{bk} は2次元円柱の抵抗係数(東)²⁾、 ρ は水の密度、 U は泳速度、 S_{bk} は大腿部 r_{bk} の断面積であり、 δ_{bk} は大腿部 r_{bk} と x 軸とのなす角である。式(13)の大腿部に発生する推力 T_{xbk} を算出するにあたり、東²⁾による2次元円柱の抵抗係数 $Cd_{bk}=1.17$ 、 S_{bk} は $0.0521m^2 \approx 0$ 、 $r_{bk}=0.35m$ を用いて、図4-bに示す円柱直径 S_{bk}/r_{bk} は $0.15m$ となる。即ち、 S_{bk} の値は、 $S_{bk}=0.35 \times 0.15=0.053m^2$ と表せる。なお、 δ_{bk} は、図2におけるStick Pictureの座標値から求める。

2) 下腿部による推力計算方法

図4-bにおける下付き文字のbkは、kaと読み替える。なお、kaは、knee-ankleを意味する。膝-踝を示す脛部 r_{ka} は、 x' - y 平面を y 軸方向へ動くため、大腿部 r_{bk} の推力と同様に計算できる。脛部に発生する推力 T_{xka} を算出するにあたっては、 Cd_{bk} と同様に、 $Cd_{ka}=1.17$ 、 $S_{ka}=0.0306m^2$ 、 $r_{ka}=0.34m$ であることから、図4-bの円柱直径は $S_{ka}/r_{ka}=0.09m$ となる。即ち、 S_{bk} と同様に $S_{ka}=0.34 \times 0.09=0.031m^2$ と表せる。なお、 δ_{ka} も S_{bk} と同様に図2におけるStick Pictureの座標値から求める。

3) 足部による推力計算方法

図4-cに示す足を翼と見なしたとき足部に発生する推力は、翼理論から式(2)の横変位速度 W_{ht} と泳速度 U との合成速度である式(14)の V_{rht} が、足に入る流れによって生じ、その迎角 α_{ht} は式(15)と表される。式(16)における $C_{Nstatic}$ は、3次元平板翼に垂直に発生する力 T_{nsole} の係数(normal force coefficient)であり、3次元平板翼の静的失速を表す $C_N-\alpha$ 曲線(Jay M. Brandon)^{5) 6)}を適用する。このとき x 軸方向の足の推力 T_{xht} は、式(17)で表わせる。なお、式(15)及び式(17)における横押し角度 δ_{LT} は、図4-cに示す角度であり、 ρ は水の密度、 U は泳速度、 S_{ht} は翼としての足の面積である。なお、下付き文字のhtは、heel-tiptoeを意味する。

$$V_{rht} = \sqrt{W_{ht}^2 + U^2} \quad (14)$$

$$\alpha_{ht} = \arctan(W_{ht}/U) - \delta_{LT} \quad (15)$$

$$T_{nsole} = C_{Nstatic}(\alpha_{ht}) \frac{1}{2} \rho V_{rht} S_{ht} \quad (16)$$

$$T_{xht} = T_{nsole} \sin(\delta_{LT}) \quad (17)$$

式(17)の足に発生する推力 T_{xht} を算出するにあたって、計測して得た足の面積 S_{ht} は $S_{ht}=0.0143m^2$ としている。表1に記載している δ_{LT} の値を使用して、式(20)から α_{ht} を計算した。また、 $C_N-\alpha$ 曲線から α_{ht} に対応する $C_{Nstatic}$ の値を読み取り、表1に記載している。

表1. 変位dおよびその他のパラメータ

Stick Picture No.	—————	1	2	3	4	5	6	7
d(m) (変位)	—————	0.21	0.17	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09
δ_{LT} (°) (横押し角度)	From 27°	27°	24°	21°	18°	15°	12°	9°
	From 23°	23°	20°	17°	14°	11°	8°	5°
	From 19°	19°	16°	13°	10°	7°	4°	1°
α_{ht} on(25)eq.	—————	23°	23°	24°	24°	23°	23°	16°
$C_{Nstatic}$ on(25)eq.	From 25°	0.675	0.675	0.66	0.66	0.675	0.675	0.775

III. 身体に生じる抵抗

1. けのび姿勢の牽引抵抗の扱い

現時点においては、*Pinching InswEEP*時のスイマーの身体に発生する抵抗を研究したデータは発表されていないが、けのび姿勢の牽引抵抗 (高木ほか)¹²⁾の実験的研究がある。この牽引抵抗値 $R(kgf)$ と牽引速度 $U(m/s)$ との関係は、式 (18) で示されている。

$$R = 2.74U^{1.91} \quad (18)$$

*Pinching InswEEP*をしている間の微小時間には、前に伸ばされた両腕及び上半身には動きがなく、形状抵抗が主要な力として発生していると考えられる。このため前に伸ばされた両腕及び上半身の抵抗は、けのび姿勢の牽引抵抗の一部とみなせる。

2. 踝 (くるぶし) による抵抗の計算方法

*Pinching InswEEP*をしている最中には、図4-cから分かるとおり、式 (14) の合成速度 V_{rht} が踝にも入り、式 (19) の x 軸方向の抵抗 D_{xankle} を発生する。

$$D_{xankle} = Cd_{ankle} \frac{1}{2} \rho (V_{rht} \cos(\alpha_{ht}))^2 S_{ankle} \cos(\delta_{LT}) \quad (19)$$

但し、 Cd_{ankle} は立方体の抵抗係数、 ρ は水の密度、 U は泳速度、 S_{ankle} は踝の断面積であり、抵抗係数は $Cd_{ankle}=1.05$ 、踝の断面積は $S_{ankle}=0.045 \times 0.09=0.0041m^2$ とする。

3. *Pinching InswEEP*による全抵抗の計算

大腿部に発生する抵抗 D_{xbk} 、脛部に発生する抵抗 D_{ska} 、足の抵抗 D_{xht} 及び踝に発生する抵抗 D_{xankle} を総計し、 D_{pinch} として式 (20) と表す。*Pinching InswEEP*をするときの身体に生じる抵抗は、式 (18) の牽引抵抗 R に D_{pinch} を加えた全抵抗 R_{pinch} として表せる (式 (20)、(21))。なお、 D_{pinch} は片脚の抵抗値であるため、2倍して両脚の抵抗値としている。

$$D_{pinch} = D_{xbk} + D_{ska} + D_{xht} + D_{xankle} \quad (20)$$

$$R_{pinch} = R + 2D_{pinch} \quad (21)$$

式 (21) の R_{pinch} は、牽引抵抗 R にも下半身の抵抗値が含まれており、式 (20) の D_{pinch} の抵抗値の一部を重複して計算している場合が

あり、 R_{pinch} は身体抵抗値の上限とみなす。

IV. 泳速度 U_v の決定

*Stick Picture*のNo.1から7に対応する一連の7個の泳速度データ U_x に最小二乗法 (遠藤)⁴⁾を適用し、7個の平滑化泳速度 U_v を求める。この U_v は、時間の関数として3次の多項式で表す。泳加速度 a は、 U_v を時間で微分して求める。ここでスイマーの身体質量 m を、式 (8) のスイマーの瞬時推力 P_i と式 (21) の全抵抗 R_{pinch} からなる運動方程式は式 (22) となる。

$$P_i - R_{pinch} = ma \quad (22)$$

式 (22) の P_i 及び R_{pinch} に含まれる泳速度 U として、各*Stick Picture*の仮定泳速度 U_x を仮定し、これにより求めた U_v により、*Stick Picture* No.毎に、 P_i 、 R_{pinch} 及び ma を計算する。この計算を式 (22) が $P_i - R_{pinch} \approx ma$ と見なせるまで繰り返し U_x を変更し、 U_v を決定して泳速度を確定する。

V. 結果と考察

1. 横押し速度 w と横変位速度 W

式 (1) および式 (2) から求めた横押し速度 w と横変位速度 W の結果を図5および図6に示す。なお、 w 及び W は、瞬時推力 P_i の独立変数であることが式 (8) から分かる。細長い物体理論を適用する魚の推進理論は、三日月形の尾ひれのマグロなどと異なり、谷¹²⁾によるとウナギのように体の全部をたわませる運動をする魚もいるが、だいたいにおいてコダラのように尾ひれを含めた体長さの半部程度たわませる運動をして泳ぐ魚を対象とした理論である。*Lighthill*¹⁰⁾によるとウナギのように体をたわませる運動は、進行波(*travelling wave*)であり、 w と W の間には $w/W < 1$ の関係がある。また、このときT.YAO-TSU WU¹⁴⁾によると式 (1) の $\partial h / \partial t$ と $\partial h / \partial x$ の符号は常に反対である。しかし、本研究における $\partial h / \partial t$ と $\partial h / \partial x$ の符号は同符号であり、*Pinching InswEEP*の動作は進行波ではなく、定在波と考えられるため、 $\partial h / \partial t$ と $\partial h / \partial x$ の値は加え合わされ、図5,6における w/W は、 $w/W > 1$ となるものと考えられる。

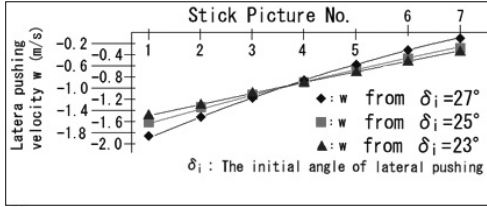


図5. 横押し速度

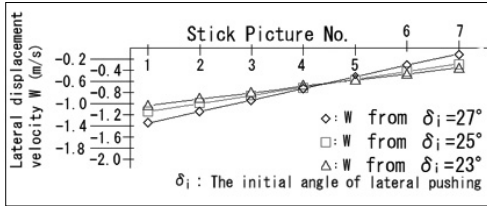


図6. 横変位速度

2. Pinching Insweepによる推力

「Lighthillの理論」を使用して求めたPinching Insweepの瞬時推力 P_i と全抵抗 R_{pinch} の差を図7に示す。 $P_i - R_{pinch}$ は、Pinching Insweep時の合力を示し、ゼロを超えた場合加速、ゼロ未満は減速を表す。

Stick Picture No.1からNo.3まで $P_i - R_{pinch} \geq 0$ となつて正の加速度が発生しており、泳速度は増大しているが、しかしStick Picture No.4からNo.7においては、全抵抗 R_{pinch} が P_i より大きくなり、 $P_i - R_{pinch} \leq 0$ となり、泳速度に対しマイナスの加速度が発生していることを示している。

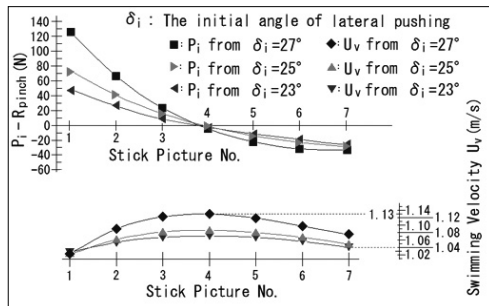


図7. 推力と抵抗の合力と泳速度

3. Pinching Insweepによる抵抗

大腿部に発生する抵抗 D_{xbk} 、下腿部に発生する抵抗 D_{xka} 、足部に発生する抵抗 D_{xht} 、踵部に発生する抵抗 D_{xankle} を δ を 27° 、 23° 、 19° の3パターンを例として計算し、図8に示す。 D_{xbk} 及び D_{xka} については、大腿部 r_{bk} 及

び下腿部 r_{ka} のそれぞれが、y軸となす迎角として定義される。 δ_{bk} 及び δ_{ka} は、図2のStick Pictureからも判断できるとおり、小さな角度であるため、 $0.1N$ 以下の非常に小さな抵抗値になっている。ところが、踵部は、図4-cのように概ね前進方向を向いているため、流れを受けて発生する抵抗 D_{xankle} は、 $0.3N$ から $0.4N$ 程度の値となっている。 D_{xht} について、横押し角度 δ_{LT} がゼロでない限り、抵抗 D_{xht} が発生しているのを図8から確認できるが、 D_{xht} は $0N$ から $0.3N$ の範囲にあり、特に大きなStick Picture No.のとき D_{xht} は小さな抵抗となる。Pinching Insweepによる抵抗 $2D_{pinch}$ 及び、けのび姿勢の牽引抵抗 R を、 $\delta = 25^\circ$ の場合を一例として図9に示す。 $2D_{pinch}$ は、牽引抵抗 R の50%から20%程度の値となっており、無視できない値であり、特に踵部の抵抗 D_{xankle} が特に大きくなっている。

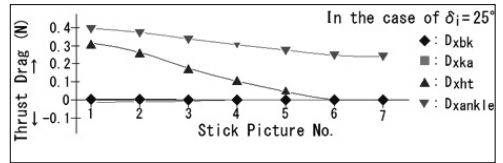


図8. Pinching Insweep中の脚の各部位にかかる抵抗

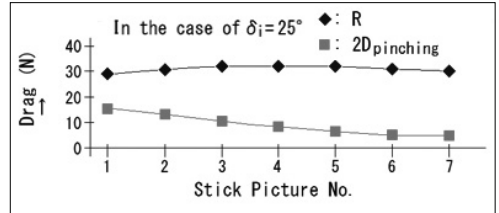


図9. けのび姿勢における抵抗とPinching Insweep中の脚の抵抗

4. Pinching Insweepの推力の考察

Pinching Insweepの瞬時推力 P_i 及び全抵抗 R_{pinch} により、式(22)の運動方程式からシミュレーションして求めた平滑化泳速度 U_v を図7に示す。「横押し角度 δ_{LT} 」が、 $\delta_i = 27^\circ$ から始まる横押し角度 δ_{LT} のとき、 U_v が最も大きいことが図7から分かる。この U_v の大きな理由は、変位 d が、大きな横押し角度 δ_{LT} のときに大きくなるからである。このとき d の変位する時間 t が一定であるため、増大する変位 d により横押し速度 w 及び横変位速度 W の

動く速度が大きくなり、 P_i が大きくなるのだと考えられる。一方、図7の P_i-R_{pinch} を見ると、後半では他の横押し角度 δ_{LT} と比べて、減速が大きくなっている。このことから考えると、*Pinching Insweep*前半では横押し角度 δ_{LT} を大きくし、後半では δ_{LT} を小さくする事が効率的であることが考えられるが、これは短時間で微妙な動きをしなければならないため、上級者が試すべきものだと考えられる。

VI. まとめ

平泳ぎの*Pinching Insweep*は、大きな横押し角度で足を速く動かすと、大きな推力を発生することがシミュレーション結果から明らかになった。つまりキックの最終段階で、親指どうしが当たるまで、両脚を素早く閉じると良いということである。これは動きのめあてが明快かつ具体的であって、このことは水泳指導にとって極めて重要である。初心者であっても「親指を素早くする」ことの意味は理解しやすく、そのため修得も難しくない。これは同時に、指導もしやすいという事である。つまり、特に水泳指導が専門ではない小・中・高の体育の教員が行う水泳の授業では、平泳ぎの指導においてこの*Pinching Insweep*をしっかりと指導する事が平泳ぎの修得および指導に役立つと考えられる。

また、上級者へのコーチングにおいては、横押し角度 δ_{LT} を*Pinching Insweep*の前半では大きくし、後半で小さくすることを試すとよいと思われる。

【参考・引用文献】

- 1) 東昭 (1989) 航空工学(I)－航空流体力学－. 裳華房：東京、pp.27-28,31-32,82-83,136-139.
- 2) 東昭 (1993) 機械系基礎工学3 流体力学. 朝倉書店：東京、pp.87-89,113.
- 3) Ernest W. Maglischo (1993) *Swimming Even Faster*. Mayfield Publishing Company : Mountain View, California, pp.509,512-513.
- 4) 遠藤健児 (1961) 確率と統計解析. 槇書店：東京、pp.169-177.
- 5) Jay M. Brandon and Gautam H. Shah,G.H. (1988) *Effect of Large Amplitude Pitching Motions on the Unsteady Aerodynamics Characteristics of Flat-Plate Wings*. AIAA-88-4331, August : pp.35-45
- 6) Jay M. Brandon. *DYNAMIC STALL EFFECTS AND APPLICATIONS TO HIGH PERFORMANCE AIRCRAFT*. NASA Langley Reserch Center : Hampton, Virginia, Internet.
- 7) 角川隆明、高木英樹、仙石泰雄、椿本昇三 (2012) 平泳ぎパフォーマンスと圧力分布から推定した足部流体力との関係. 体育学研究57 : pp.515-525
- 8) 神部 勉 (1977) 動物の流体力学的運動. 日本航空宇宙学会誌 第25巻 第277号 : pp.53-62
- 9) M.J.LIGHTHILL (1960) Note on the swimming of slender fish. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.9 : pp.305-317
- 10) M.J.LIGHTHILL (1970) Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.44, part 2 : pp.265-301.
- 11) SIGHARD F. HOERNER(1958) *FLUID-DYNAMIC DRAG*. Published by the Author: New Jersey, pp.3-11,3-12.
- 12) 谷一郎 (1964) 魚の抵抗と推進. 科学 Vol.34, No.9 : pp.471-476
- 13) 高木英樹、野村照夫、松井敦典、南隆尚 (1997) 日本人競泳選手の抵抗係数. 体育学研究41 : pp.484-491
- 14) T.YAO-TSU WU(1971) *Hydromechanics of swimming propulsion. Part 1. Swimming of a two-dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid*. *J. Fluid Mech.* Vol. 46, part 2:pp.337-355
- 15) 吉村 豊、高橋雄介 (1999) スイミング. 池田書店：東京、pp.34-35.