競泳における最適な手のひら形状について*

伊 藤 慎 一 郎^{*1}

Optimal Shape of Hands on Competitive Swimming

Shinichiro ITO^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, The National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

Competitive swimming requires thrust force much greater than recreational swimming. Four configurations of hand paddles are investigated to obtain an optimal form of a hand in freestyle swimming scientifically. These configurations are a cup-shaped hand with fingers spaced apart, a flat one with fingers spaced apart and those with fingers closed. Aerodynamic forces and flow-induced vibration acting on these hand replicas are experimented with a 3 component load cell. The angle of attack into a hand paddle is related to its thrust efficiency and thrust force. The angle of attack for maximal thrust force is affected by the hand forms, especially with the existence of spacing between the fingers in this study. With these facts, the optimal hand forms are different according to a method of swimming such as S-shaped-pull pattern swimming and drag swimming. Moreover, magnitude of fluid-induced vibration acting on a driving hand varies according to the spacing of fingers and the hand forms.

Key Words: Flow Measurements, Fluid Force, Propulsion, Wake, Vibration of Moving Body, Freestyle Swimming, Hand paddle, Configuration, Maximal Thrust Force, Polar Curve

1. 結 言

1969 年熟練スイマーの水中映像を観察した Counsilman⁽¹⁾は、彼らが腕をS字状に動かすことから、揚力および抗力の合力を推進力として使っているとし、手のひらのストローク軌跡は図1点線に示すようなS字プル泳法を提案した。これは Catch-Pull-Finish の一連動作が Sculling と呼ばれる水を切るような動作であり、手のひらを翼と考えると手のひらから発生する揚力と抗力の合力で推進力を与える方法である。Schleithauf⁽²⁾を始めとして多くの研究者がこの揚抗力理論を支持してきた。Hollander ら⁽³⁾は自由形の泳ぎにおいては腕からの推力が大半を占めることを報告し、Berger ら⁽⁴⁾は腕と手のひらから発生する推進力に関しては手のひらからのそれが大半を占めることが述べている。かくして手のひらの流体力学特性は自由形における発生推力に関係し、競泳の記録向上にも関係する重要なキーポイントと考えても良い。

The left hand in this figure is on the water surface. This is modified figure of reference (5).

Fig. 1 Stroke motion of I-Shaped and S-Shaped pull by human co-ordinate view

* 原稿受付 2006 年 11 月 6 日.

^{*1} 正員, 防衛大学校システム工学群機械工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20).

E-mail: ito@nda.ac.jp

著者⁽⁶⁾は自由形の泳ぎに関して手のひらの流体力学特性を基に、推進効率および推進力を計算し、図1

点線に示すような現在主流のS字泳法（人間からみた手のひらのS字の動き）は最大効率であり、最大推力の泳ぎは図1実線に示すような直線的な抗力型の泳ぎ（1字プル泳法と命名、水を作用反作用の原理で手のひらによって駆動し推進力に用いる泳法）であることを示した。これは Sanders⁷⁾の実験的研究によって、抗力型の泳ぎの方がより大きな推進力を得られるとの報告に一致している。

手のひらの流体力学特性は形状によって変化する。手のひら形状の推進力に関しては Takagi ら⁸⁾が親指の開閉による形状の変化を回内、回外運動による迎角の変化で流体力を調べ親指の影響について報告しているが、最大推力を生み出す最適な手のひら形状に関する報告はなく、現状では競泳における手のひら形状は選手、コーチの個々の経験に基づくものであつて、決定的なものはない。

本研究においては、競泳に最適な手のひら形状を見出すことを目的として、競泳スイマーのインタビューにより得られた4種類の手のひら形状モデルを作成し、それらに関する揚抗力特性を調べた。すなわち同一人物の手のひらから、できるだけ大きな推力を発生させる形状を実験的に見出した。さらに流体力振動は基本的に渦の放出周波数と物体の固有振動数の相対関係および減衰等の物体の振動特性に支配されるが、水泳において、手のストローク軌道においてはこのような振動はできるだけ避けたいものである。本研究では手のひらの形状および指間の開きがこれに影響を及ぼすと考え、手のひら形状による流体力による振動に関して風洞実験を行った。本研究は形状の変化に伴う揚抗力特性とあわせて競泳用の手のひらの最適形状を提案するものである。

記号の説明

C_L	: 揚力係数 ($=2D/(\rho W^2 S)$)
C_D	: 抗力係数 ($=2L/(\rho W^2 S)$)
C_R	: 揚力と抗力の合力係数 ($=\sqrt{C_L^2 + C_D^2}$)
D	: 抗力
L	: 揚力
R	: カップ型手のひらの曲率半径
Re	: レイノルズ数 ($=lW/\nu$)
S	: 手のひらの投影面積
St	: ストローハル数 ($=f l_w/W$)
T	: 推進力
U	: 手のひらの駆動速度ベクトル
V	: 身体の前進速度ベクトル
W	: 手のひらへの相対流入速度ベクトル

Driving velocity:	U	Advancing velocity:	V
Relative velocity:	W	Tilt Angle of hand:	θ
Angle of attack:	α	Driving angle:	δ

Fig. 2 Forces acting on a hand paddle

f	: 振動数 (Hz)
l, l_w	: 手のひら長さ, 幅 (図3参照)
α	: 手のひらへの流入迎角
β	: スリップ角
γ	: 揚抗力の傾き角 $\gamma = \tan^{-1}(L/D)$
δ	: 手のひらの駆動角
η	: 推進効率
ν	: 空気の動粘性係数
ρ	: 空気の密度
θ	: 手のひらの傾き角
ψ	: 手のひらへ平面駆動角 (Sweepback 角)

2. 手のひらに作用する流れと揚抗力

手のひらに作用する流入する流れを考慮すると図2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ベクトル U によって描かれる速度三角形によって、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 α を持つことになる。

手のひらを翼と考えると流入速度ベクトル 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この大きさ $\sqrt{L^2 + D^2}$ を持つ合力が手の甲側に発生し、この進行方向に対する成分が推進力 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なる。手のひらから発生する揚抗力に関しては、 C_D , C_L に無次元化し、迎角 α をパラメータとして、それぞ

れを x 軸, y 軸に割り当ててプロットする. それが, 図 5 に示すような揚抗力曲線 (ポーラーカーブ) であり, 手のひらの流体力学特性を表す. この表示では原点からの距離が無次元化した揚抗力の合力 $C_R (= \sqrt{C_L^2 + C_D^2})$ の大きさを表すことになる. 詳しくは著者の文献(5)に従って, ポーラーカーブから計算して競泳用に最適な最大推力点を確認する必要があるが, 原点からポーラーカーブまでの最遠点が推力最大点と一致した事実⁽⁵⁾に従って (α - C_R カーブにおける C_R 最大点) より推力最大点を見出し, その長さ C_R によって最大推力係数の大きさ C_{TMAX} とする.

3. 実験方法

自由形を専門とする優秀なスイマー (100m54 秒) の手のひらを基に図 3 に示す 4 種類の石膏模型を作成した. これらの手のひら形状は実際にスイマー達が経験的に行っている形状である. 手のひら形状はフラットで親指を開き, 各指先はコイン一枚ほど空けたもの (Hand A) とフラットで全ての指先を閉じたもの (Hand C) の 2 種類, さらに立体形状として手の甲を凸にした緩やかなお椀状にして指先を開けたもの (Hand B) と閉じたもの (Hand D) の 2 種類の組み合わせ計 4 種類である. 指間の隙間があるモデルは熟練泳者に見られるものでありボイド率 (= 全隙間面積/隙間を含む手のひらの面積) で隙間比を数値化したところ Hand A, B それぞれのボイド率は 0.027 および 0.033 とほぼ同程度であった. 図 3 に示す手のひら模型の概寸法を表 1 に示す. また模型手のひらの曲げ, すなわち, お椀形状に関してはスイマーからのインタビューを元に作成したが, 手のひらを円弧とすると, その弦長 220mm に対して約半分の曲率半径 $R=110[\text{mm}]$ であった. これらの手のひら模型を $380\text{mm} \times 380\text{mm}$ の矩形断面を有する風洞に設置し, 実際の競泳時の手のひらに対する相対速度により構成されるレイノルズ数に等しい $Re(=Wl/\nu) = 3.4 \times 10^5$ すなわち風速 20m/s で $\pm 2\text{kgf}$ レンジの三分力計にて揚抗力を計測した. 手のひらのアスペクト比変化に相当する Sweepback 角 ψ は Schleihau⁽²⁾ の定義に基づき図 4 に示すように中指が主流方向に向いた角度を 90° として $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の 3 種類で行った. それぞれの Sweepback 角 ψ は自由形において手のひらを体軸方向から外へ動かす動き ($\psi=135^\circ$, OutswEEP, Catch), 体軸に

Fig 3. Variation of hand shape: combination of flat and humped shape with fingers closed/ spread

Table 1 Length and width of each hand replica.

Unit: mm

Sort	l_w	l
Hand A	102	246
Hand B	101	245
Hand C	99.0	242
Hand D	99.5	242

Fig 4. Sweepback angle ψ defined by Schleihau⁽²⁾

沿った動き ($\psi=90^\circ$, Pull), 外から体軸へ動かす動き ($\psi=45^\circ$, InswEEP, Finish) に相当する. 手のひらの迎角 α を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲において 1° 刻みに PC 駆動の 3 分力計によって変化させて揚抗力を計測した. 手のひらの投影面積 S に関しては基準となる方形の升目と手のひらを一緒にデジタルカメラにて撮影し, それぞれのピクセル数を計測すること

Fig. 5(a) Hand A

Fig. 5(b) Hand B

Fig. 5(c) Hand C

Fig. 5(d) Hand D

Fig. 5 Polar curves of 4 hand models at different sweepback angle, $\psi=45^\circ$, 90° and 135° .

によって投影面積を割り出した。歪をなくすために手のひら上方 20l より撮影した。これらを元に風速 W と空気密度によって揚抗力を無次元化して揚抗力係数 C_D , C_L を計算した。

さらに主な推進力を発揮するブル部分の $\psi=90^\circ$ において、最大推力が得られる迎角 $\alpha=90^\circ$ の状態で、 $Re=3.4 \times 10^5$ すなわち風速 20m/s において揚抗力の振動特性を計測すると共に、後流における振動を熱線流速計で計測した。得られた揚抗力、後流の主流方向速度に関して周波数解析(FFT 処理)を行い、主たる振動周波数を算出した。

4. 結果および考察

4.1 推力に関して 図 5 はそれぞれの手のひらにおいて前述の三種類の Sweepback 角に関して、迎角 $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$ の変化に対応する抗力係数 C_D

と揚力係数 C_L の変化を示したポーラーカーブである。それぞれ 1° ごとのデータを直線で結び、迎角 $\alpha=0^\circ$ から 5° 刻みにマーカーを示している。比較基準としてほぼ最大の推進力となる⁽⁵⁾ $\psi=90^\circ$, $\alpha=90^\circ$ における無次元揚抗力合力 C_R の円弧を描いてある。図 5(a)および 5(b)はいずれも指間の開いた場合である。前者は手のひらがフラットな場合で、後者は手の甲が凸な場合である。いずれの Sweepback 角においても山なりのカーブをしていることがわかる。原点からの最遠点はほぼ $\alpha=90^\circ$ を示している。すなわち手のひらは進行方向に対して直角に押すように動かすことを示している。Hand B の $\psi=90^\circ$ において $\alpha=87^\circ$ で最大点を示しているが迎角は $\alpha=90^\circ$ といってもよく、最大推進力が抗力型の泳ぎから得られることを意味しており、

速力が得られる競泳に望ましいことを示している。図 5(c)(d)はいずれも指間の閉じた場合で、それぞれの立体形状は上記と同じである。揚抗力曲線形状は異なり、 $\alpha=45^\circ$ 前後にこぶ状の段差が曲線にみられ、この近傍では $\alpha=90^\circ$ のほかにも最大推力点に相当する推力が得られることを示している。

Sweepback 角 ψ に注目すると $\psi=135^\circ$ の Catch 時には $\alpha=45^\circ$ となるように手のひらを動かす際に最大推力が得られることを意味している。それはすなわち S 字ブル泳法の入水時に相当する動きであり、S 字ブル泳法においては指先を閉じた方が推進力が得られることを示している。上記の関係を迎角 α と無次元合力 C_R にてそれぞれの手のひらごとに Sweepback 角 ψ で分類したものが図 6 である。迎角 $\alpha=90^\circ$ 付近にて最大値を示す抗力系の手のひらは指間を開けた Hand A および Hand B であり、指間を閉じた Hand C および Hand D は $\alpha=40^\circ\sim 50^\circ$ 付近で最大値を示し揚力系動き (S-Shaped pull) には適している手のひらであることが容易に把握できる。この形状の手のひらでも迎角 $\alpha=90^\circ$ の C_R 値と比較して大きな違いはないので、抗力系の動き (I-Shaped pull) にも適していることがわかる。

それぞれの手のひら形状での最大 C_R と Hand A とそれぞれの手のひら最大 C_R との比を表 2 にまとめた。Hand A の最大推力を基準値としたのは競泳競技者に最も一般的な形状であるからである。これからそれぞれの形状を考慮すると推力は「お椀型>フラット、指間閉じ>指間開き」の傾向が見られた。すなわち、最も推力が発生する手のひら形状はお椀型、指閉じの Hand D である。

4.2 流体励起振動に関して 図 7 は各模型から発生した後流の速度変動と手のひらの親指—小指方向 (手のひらの横断方向) にかかる横力の変動を周波数解析した結果である。後流速度変動のパワースペクトル密度は横力変動値との比較のために、50 倍に拡大して同一のグラフに示している。模型の手のひらにかかる力は模型と支持装置全体の固有振動数のほかに流体励起振動が作用する。前者は主流速度を変化させても変化しないが、後者は同じレベルのレイノルズ数ではストローハル数 $St (=f/\nu)$ 一定となるように変化する。図 7(a)~(d)点線に示す横力変動周波数のピークを見ると、速度変動によらない大きな周波数ピークが 12.7Hz に存在した。予備実験として風速 10m/s, 15m/s の同様の実験も行ったが、このピークは主流速度を

Fig. 6 Relation between α and C_R in different sweepback angle, $\psi=45^\circ$, 90° and 135° .

Table 2 Ratio of Maximum Thrust among the hands compared with Hand A.

	Hand A	Hand B	Hand C	Hand D
C_{RMax}	0.876	0.924	0.907	0.942
Ratio	1.00	1.05	1.03	1.07

変化させた場合でも変化せず実験装置系の固有振動数であることがわかった。

その固有振動数を除くと、それぞれの手のひら模型において後流速度変動周波数と横力周波数が一致するピークが存在する。すなわち、手のひらの横力変動は流体力励起による振動であることがわかる。これら横力振動ピーク値を手のひら形状で比較したものが図 8 である。形状による顕著な特徴傾向は見られなかったが、Hand B が他の手の

Fig. 7(a) Hand A

Fig. 7(b) Hand B

Fig. 7(c) Hand C

Fig. 7(d) Hand D

Fig. 7 Spectrum analyses of the wake behind each 4 hand models
and that of side force fluctuation at sweepback angle, $\psi=90^\circ$.

形に比べて約 $1/8 \sim 1/6$ も横力の振動が少ないことを示している。手のひらの幅 l_w を代表長さにとるとこれらピーク値のストローハル数は表 3 に示すように $0.108 \sim 0.119$ である。競泳時の手のひらを駆動する水中での速度における周波数に換算すると、 $1.2 \sim 1.3 \text{ Hz}$ となる。自由形競泳の片腕の 1 ストローク動作は $1.3 \sim 1.7 \text{ Hz}$ に相当しており、流体励起振動による周波数は抗力型で泳ぐ場合の 1 ストローク中に現れうる現象と考えられる。

揚力泳 (S 字プル) に関しては、基本的に剥離のない迎角での動作であるため、流体励起振動は今回の実験よりもはるかに小さなものとなると思われるが、今後の実験を行う必要がある。

総じてこれらの励起振動横力の大きさと推進力の大きさとから、抗力泳 (I 字プル) においては指

Fig. 8 Difference of peak power of flow induced force among the model hands.

Table 3 Flow induced frequency and Strouhal number, St on each hand.

	Hand A	Hand B	Hand C	Hand D
Freq.(Hz)	17.66	19.43	19.23	19.53
St	0.108	0.119	0.117	0.119

間に隙間がありお椀型の Hand B が、揚力泳 (S 字プル) における迎角 α において流体励起振動は検証されていないが、隙間のないお椀型の Hand D が競泳に適した手のひら形状であると言える。

5. 結 言

推力を重視する競泳において最適な手のひら形状を検討した。ここでの最適とは最大の推力を生み出し、かつその軌道が安定していることを意味する。形状の異なる 4 つ手のひらの流体力学特性実験と流体励起振動実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 最大推力に関しては「お椀型>フラット、指間閉じ>指間開き」の傾向があり、最大推力を生み出す手のひらの形状はお椀型で指を閉じたものである。
- 2) 手のひらには流体励起振動がみられた。流体励起力の最も小さい手のひら形状はお椀型で指間に隙間のあるものであった。
- 3) 励起振動横力の大きさと推進力の大きさことから、抗力泳 (I 字プル) においては指間に隙間がありお椀型の Hand B が、揚力泳 (S 字プル) においては隙間のないお椀型の Hand D

が競泳に適した手のひら形状であると言える。

文 献

- (1) Counsilman, J.E., *Science of Swimming*, Prentice-Hall (1968).
- (2) Schleihauf, R.E., *Swimming III*, University Park Press, Baltimore (1979), pp.70-109.
- (3) Hollander, A. P., de Groot, G. and van Ingen Schenau, G. J., Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming, *Swimming Science V*, Human Kinetics Publishers, Champaign, IL (1987), pp.17-29.
- (4) Berger, M.A.M., de Groot, G. and Hollander, A.P. Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. *Journal of Biomechanics*, 28, (1995), pp.125-133.
- (5) E. W. Maglischo: *Swimming Even Faster*, Mayfield Publishing Company, Mountain View, CA (1993), p315.
- (6) Ito, S., Okuno, K., A fluid dynamical consideration for armstroke in swimming, *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, Pub. de l'univ. de Saint-Etienne (2003), pp.39-44
- (7) Sanders, R.H., Lift or Drag? Let's Get Skeptical About Freestyle Propulsion, <http://www.sportsci.org/news/biomech/skeptic.html>
- (8) Hideki Takagi, Yukimaru Shimizu and Noriyuki Kodan, A Hydrodynamic study of active drag in swimming, *JSME International Journal Series B*, 42(2), 1999, pp.171-177