手のひらと前腕部から発生する水泳自由形における推進力比率*

伊 藤 慎 一 郎^{*1}Ratio of Propelling Force Generated by a Palm and
by a Forearm in Freestyle SwimmingShinichiro ITO^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, The National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

The propelling force in swimming is mainly generated by hands and arms rather than by legs. However, the ratio of the thrust force by a hand to that by the whole forearm with hand has not been experimented. Replicas of a hand and a forearm with hand were made from an excellent swimmer's. Those characteristic data of the lift-drag forces and the propelling force ratio were taken by wind tunnel tests based on the angle of attack and the sweepback angle. The following results were found. As for the S-shaped pull stroke, the thrust force by the whole forearm with hand was 3 to 4 times larger than that by the hand itself in the catch and the finish phases while about 1.8 times larger in the pull phase. In the drag pull type stroke, the I-shaped pull, the thrust force by the whole forearm with hand was 1.8 times larger than that by the hand itself throughout all the three phases. Furthermore, the fluid characteristic of the whole forearm with the hand showed similar to that of the hand itself.

Key Words: Bio-Fluid Mechanics, Fluid Force, Flow Measurements, Propulsion, Swimming, Freestyle, Optimal Stroke, Forearm, Palm, Polar Curve

1. 緒 言

水泳に関する力学は水泳選手身体とそのまわり水に作用する流体力学であると考えられる。1968年熟練スイマーの水中映像を観察したCounsillman⁽¹⁾は、彼らが腕をS字状に動かすことから、流体力学的に考えて揚力および抗力の合力を推進力として使っているとし、この泳法を提案した。Schleithauf⁽²⁾は手のひらの揚抗力を計測し、Berger⁽³⁾は手のひらを含む前腕部の揚抗力を計測して、それぞれの理論計算によってこの揚抗力理論を支持してきた。現在の自由形の泳法技術は、上記の理論を元に抗力型の泳ぎよりも競泳選手らには揚抗力を利用したS字を描くアームストロークとして広く普及している。しかしながら近年 Sanders⁽⁴⁾は、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、揚抗力を使ったS字泳は懐疑的であると発表している。

実際の泳ぎは推力に影響する造波抵抗、非定常性な

どの算定しにくい要素が含まれるが、Toussaintら⁽⁵⁾は定速状態において、これらを加味した動的抗力を独自の装置を開発することにより計測している。またKolmogorovら⁽⁶⁾は曳引法により自由形の動的抗力係数を算定している。

著者⁽⁷⁾は定常状態においてSchleithaufの計測データを元に手のひらから発生する推進力に関して、Kolmogorovによる動的抗力係数を用い、全身の抵抗とがつりあった状態において解析を行い、最大推進力は抗力型の泳ぎ (I字泳) であることを示した。

Hollanderら⁽⁸⁾により自由形の泳ぎにおいては、腕と腕からの推力比率は10:1~6:1が大半を占めるとしている。かくして腕から発生する推力に関して精査することは自由形泳のフォームに関係する重要な事項であることがわかる。

Bergerら⁽³⁾はSchleithauf⁽²⁾の計測結果と自身の計測結果を比較することで前腕部を含む手のひらの揚抗力特性は手のひらのみのそれが支配的としている。しかしながら、これらはそれぞれの特性を表すだけであって腕と手のひらから発生する推進力の比率についての報告はない。中島⁽⁹⁾は、全

* 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

身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルSWUM (SWimming hUman Model) を開発し、6ビートクロック泳においてバタ足からの推進力の寄与がないことをシミュレーションによって再確認し、泳ぎのフェーズごとに身体各部から得られる力精細に調べ、図示しているが、腕と手のひらの推力配分については述べてはいない。

今回は同一人物の手のひらと前腕部模型をそれぞれ新たに作成し、実際の泳者の手のひらへの流入速度と同程度のレイノルズ数でその揚抗力特性を計測し、前腕部と手のひらの揚抗力特性を比較し、前腕部の特性が手のひら特性で代表できるかを確認することを目的としている。さらに今までなされたことのない手のひらと前腕部の実際の推進力比率を調べ、水中におけるそれぞれの推力を推定することを目的とした。

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
- l : 手のひら長さ
- Re : レイノルズ数 ($=lW/\nu$)
- S : 手のひらの投影面積
- T : 推力
- 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
- 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 $\gamma = \tan^{-1}(L/D)$
- ν : 水の動粘性係数
- ρ : 水の密度
- 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1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

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

Fig. 1 Forces acting on a hand paddle

Fig. 2 Arm replica which measured the fluid dynamic characteristics

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6に示すような揚抗力曲線 (パワーカーブ) で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⁽⁷⁾に従って、パワ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、今回は、著者が発表している推力最大簡易法⁽⁷⁾に従って、原点からポー

(a) rounded section (b) bluff section

Fig. 3 Hand replica with rounded wrist section and the one with bluff wrist section

ラーカーブまでの最遠点を見出し、その長さによって推力係数の大きさとする。

同様の方法で前腕部の流体力学特性も分類した。

3. 実験方法

自由形を専門とする優秀なスイマー(身長 180cm, 100m:54 秒台)から模った図2に示すような前腕部実物大石膏模型と手のひら模型をそれぞれ作成した。それらを用いて、実際の泳ぎの手のひらへの水の流入相対速度(2m/s)にほぼ等価なレイノルズ数(代表長さを腕の長さとして 9.7×10^5 , 手のひら長さを代表長さにすると 5.0×10^5)にて風洞(流速 30m/s)で流体力学特性を計測した。実際の水泳においては手のひら部分の流速とは同じものであり、また腕の長さと手のひらの長さに合わせたレイノルズ数は相応に変化するため、前腕部での流速に関しても同一の速度で計測した。川田工業(株)の協力により測定部幅 2.0m × 高さ 2.5m 最大風速 50m/s, 乱れ強さ 0.3%以内の多目的風洞⁽¹⁾を用いて計測を行った。

模型製作の必要性から手のひらおよび前腕部は実際とは異なり、手首あるいは肘部でカットした状態にある。その切断面近傍の影響が模型の流体力学特性にどの程度影響を及ぼすかを調べるために、予備実験として図3 (a) に示す丸めた手首と図3 (b) に示すようにその手首に厚紙を巻きつけて鋭利な切断面を模擬した手のひらそれぞれの空力特性を調べ、切断面の影響も確認した。

The left hand in this figure is on the water surface. This is modified figure of reference (10).

Fig. 4 Stroke phase of I-Shaped and S-Shaped pull.

Fig. 5 Hand and arm replica used in the experiment and sweepback angle ψ defined by Schleihaufer⁽¹⁾

自由形の泳ぎは従来の S 字プル泳の場合、図4に示すようにキャッチ、プル、フィニッシュの3フェーズに大きく分類できる。それらは図5に示す Schleihaufer⁽³⁾の Sweepback 角 ψ の定義に従うと手のひらを内から体軸方向へ動かす動き ($\psi=135^\circ$, OutswEEP, Catch), 体軸に沿った動き ($\psi=90^\circ$, Pull), 外から体軸へ動かす動き ($\psi=45^\circ$, InswEEP, Finish) に相当する。実験は前腕部と手のひらに関して、これらの $\psi=45^\circ$, 90° , 135° の

3種類で行った。それぞれの Sweepback 角 ψ においてはそれぞれの模型迎角 α を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲において 1° 刻みに変化させて揚抗力を計測した。 C_D , C_L を算出するにあたって供試模型投影面積 S に関しては黒の背景に供試模型と基準となる方形の 25cm^2 に切り抜いた白紙とを一緒にデジタルカメラにて約 7 m の高さより歪のないように望遠レンズで撮影し、その画像を二値化したビットマップ画像に落とし、それぞれのピクセル数を計測することによって投影面積を割り出した。これらを元に風速 W と空気密度 ρ によって揚抗力 L , D を無次元化して揚抗力係数 C_D , C_L を計算した。

4. 結果および考察

模型手首切断面形状の空力影響に関して図 6 に示す。それぞれの曲線は迎角 α を 1° ごとに变化させて得られた値を直線で結んでいる。データの把握を分かりやすくするために 5 度おきにマーカーを示している。●で示す鋭利な切断手首を持つ手のひらにおいては○で示す丸めた手首の手のひらに比べて $\alpha=0^\circ$ において抗力が

Fig. 6 Influence given to the fluid dynamic characteristic of hand palm by the difference on wrist section.

(a) $\psi=135^\circ$: Catch phase

(b) $\psi=90^\circ$: Pull phase

(c) $\psi=45^\circ$: Finish phase

Fig. 7 Polar curves of the hand and that of the arm at different sweepback angles.

(a) $\psi=135^\circ$: Catch phase

(b) $\psi=90^\circ$: Pull phase

(c) $\psi=45^\circ$: Finish phase

Fig. 8 Assumed Drag-Lift curve of the hand and that of the arm at different sweepback angles in a predicted relative velocity.

若干高めに、 $\alpha=50^\circ\sim60^\circ$ あたりで揚力が高めに表れている。微妙な違いは切断面より発生する渦の影響と思われるが、全体の空力特性としては大きな差とならない結果が得られている。よって本実験に用いた丸めた手首形状の手のひらおよび丸めた肘部形状の前腕部実験模型の実験結果を用いて空力特性を論じて問題はないと考えられる。

それぞれの模型の sweepback 角 $\psi=135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ における空力特性を図 7 にポーラーカーブとして示す。実線は前腕部を含むもの、点線は手のひらのみのものを表している。図 7(a) $\psi=135^\circ$ においては緩やかな山なりのカーブを両者は示し、図 7(b) $\psi=90^\circ$ においてはカーブ頭頂部が鋭角状の頂点を持っている様子も共通している。図 7(b) $\psi=45^\circ$ のみ形状は似ているが低い迎角において腕の抗力が大きく現れており他の Sweepback 角とは異なっている。この姿勢は親指が翼面となる手のひら前方に突き出ている点が他の姿勢と異なる点であり、その影響を前腕部も受けていると考えられる。しかしながら著者の主張する最大合力（ポーラーカーブ上で原点からの最遠点）と判断する点においてはその値はほぼ一致している。これらの結果は実験条件も異なり、まったく別の手のひらと腕の特性曲線を比較した Berger ら⁽³⁾の報告と違わず、それらの特性曲線形状は極似しており、揚抗力特性は手のひらのみのそれで代表可能といっても良い。

しかしながら、これらの特性曲線は無次元化されたものであり、実際の手のひらのみあるいは前腕部を含んだ手のひらから発生する力を現したものではない。そこで実験で得られた手のひらおよび腕に作用する揚抗力を実際の一流選手の競泳における手への流入相対速度(2m/s)の時にかかる力[N]に換算したものを図 8(a), (b) および(c)に示す。両者とも図 7 に示すようにほぼ同様のポーラーカーブ形状をしているが前腕部が付加されて、投影面積が増大した影響により揚抗力それぞれが増加している様子がわかる。

同じ迎角時においては抗力、揚力とも前腕部に発生する力は、手のひらのもののほぼ 1.8 倍の大きさがあることがわかる。さらにこれらの力の大きさから前腕部と手のひらから発生するそれぞれの推力の大きさを推定することが可能となる。

迎角 $\alpha=90^\circ$ では、合力すべてが推進力となるが、他の迎角においては、合力の正射影が推進力であり、必ずしも合力が推進力になるとは限らないが、今回得られた手のひらおよび前腕部からの発生する推力（揚抗力の合力：図 8 においては原点からのポーラーカーブまでの距離がそれぞれの迎角における発生しう

Fig. 9 Assumed resultant force of Arm and hand at different sweepback angle ψ

Fig. 10 Arm to hand ratio of resultant force at different sweepback angle ψ

る推進力となる)を Sweepback 角 ψ ごとに整理し、それぞれの迎角における発生最大推力をまとめたものが図 9 である。いずれの Sweepback 角においても前腕部から発生する推力は最大 60N 程度であることを示している。定常速度において推力は抗力と等しく、この値は Toussaint ら⁽⁶⁾による Active Drag 値 60[N]とほぼ同

程度であり本実験結果の妥当性を示している。またこの図から最大合力は迎角 $\alpha=90^\circ$ すなわち抗力泳ぎで得られることを示している。いずれの Sweepback 角においても手のひらだけで最大 35N 程度の推力を発生していることがわかる。

また前腕部の推力の寄与を確認するために、この図より同一迎角時において手のひらから発生しうる推力と前腕部からのそれとの比を表したものが図 8 である。迎角によって前腕部から発生する揚力によって揚抗力合力が異なることを意味している。

図 10 において各 ψ のポーラーカーブにおいて最大揚抗比を示す迎角即ち sculling 動作で用いられる迎角 ($\alpha \leq 20^\circ$) ではプル ($\psi=90^\circ$) 時で約 1.8 倍、キャッチ ($\psi=135^\circ$) およびフィニッシュ ($\psi=45^\circ$) 時で約 3~4 倍程度となり、特にキャッチ、フィニッシュ時には前腕部の寄与が大きいことがわかる。これらは揚力を用いる S 字泳法における前腕部の影響であるが、I 字泳法で用いられる最大合力となる迎角 ($\alpha=90^\circ$) においては、いずれの Sweepback 角において前腕部からの推力は手のひらのその 1.8 倍の大きさとなり、前腕部の影響は無視し得ないものであることがわかる。

以上の結果から積極的に前腕部からの流体力を推力に還元するようなストロークが望ましいことがわかる。

5. 結 論

前腕部を含めた手のひらと手のひらのみの実物大模型の揚抗力特性を計測し、実際の推進力と推進力比率を算定し以下の結果を得た。

- 1) 腕の揚抗力特性は手のひらの揚抗力特性に極めて類似しており、手のひらの揚力特性を調べることで前腕部の揚力特性を代表することができる。
- 2) 手部および前腕部からの発生する推定推進力は身長 180cm 程度の選手の場合、それぞれ 35N, 60N であった。

- 3) 前腕部のその推力に対する寄与を手のひらのみのそれと比較した。関係する合力の大きさは S 字泳法時においてキャッチ、フィニッシュの推定迎角ポイント迎角 $10 \sim 20^\circ$ で比較すると、手のひらのみの場合の約 3~4 倍、プル時においては 1.8 倍程度であった。抗力を主として用いる I 字泳法時においては手のひらのみの場合のほぼ 1.8 倍であった。

文 献

- (1) Counsilman, J.E., *Science of Swimming*, Prentice-Hall (1968).
- (2) Schleihau, R.E., *Swimming III*, University Park Press, Baltimore (1979), pp.70-109.
- (3) 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.
- (4) Sanders, R.H., Lift or Drag? Let's Get Skeptical About Freestyle Propulsion, <http://www.sportsci.org/news/biomech/skeptic.html>
- (5) Toussaint, H.M. et al., *Exercise and Sport Science* (Garrett, W.E.; Kirkendall, D.T., eds), 639-660. Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, 2000.
- (6) Kolmogorov, S., Lyapin, S., Rumyantseva, O. and Vilas-Boas J. P., (2000). Technology for De-creasing Active Drag at Maximum Swimming Velocity, Proc. International Biomechanics in Sports 2000, Edinburgh University Press.
- (7) 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
- (8) 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.
- (9) Nakashima, M., Mechanical Study of Standard Six Beat Front Crawl Swimming by Using Swimming Human Simulation Model, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.705 (2005), 1370-1376.
- (10) E. W. Maglischo: *Swimming Even Faster*, Mayfield Publishing Company, Mountain View, CA (1993), p315.
- (11) Kawada Industries, Facility of research, <http://www.kawada.co.jp/technology/institution/2.html>