

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)

清水幸丸*¹, 高木英樹*², 倉島浩章*³

A Hydrodynamic Study of the Human Hand Model (Measurement of the Pressure Distributions and Flow Visualization around the Hand Model)

Yukimaru SHIMIZU, Hideki TAKAGI*⁴ and Hiroaki KURASHIMA

*⁴ Mie University, Faculty of Education, Kamihama 1515, Tsu, Mie, 514-8507 Japan

The purpose of this study is to clarify hydrodynamic characteristics of a human hand model. Three different models of an adult male's right hand (Model A, thumb only opened; Model B, all fingers spread; Model C, all fingers closed) were made with polyester resin. The magnitudes of pressure acting on holes which were located at the hand model surface, were measured for various pitch angles using a wind tunnel test device. Moreover, the flow visualization of air around the model was conducted using the laser beam. By means of these pressure data, the magnitudes of fluid force were calculated. The experimental results reveal that the way in which the fingers are opened has a large influence on the fluid force over the entire hand. When the thumb side became a leading edge, the Model A, thumb only opened seems to be advantageous for generating lift force. When the little finger leads, the Model C, all fingers closed can produce more lift force than other models.

Key Words: Sports Engineering, Swimming, Pressure Distribution, Hydrodynamic Characteristic, Human Hand Model

1. 緒 言

水泳競技においては、推進力の大部分は上肢のストローク動作によって発揮され、中でも手部の貢献が大きいと考えられている⁽¹⁾。一流泳者の手部動作をよく観察すると、オールやパドルのように水を押す動作に加え、和船の櫓のような動きを交えた非常に複雑な動きをしており、抗力だけではなく揚力も推進力として貢献していると考えられる。よって手部の流体力学的な特性が明らかになれば、水泳の技術向上に大変重要な意義をもつ。そのため Schleihauf⁽²⁾ や Berger ら⁽³⁾ は、一部前腕を含む人体の手腕モデルを作成し、その揚・抗力係数の測定を実施した。しかし両者とも、指の開き方など手部の形態の違いが流体力学的な特性に及ぼす影響について考慮しておらず、翼としての性能について十分に比較検討されていない。また Svec⁽⁴⁾、Loetz ら⁽⁴⁾ や高木・清水⁽⁵⁾ は、実際に泳んでいる水泳選手の手部表面圧力の測定を試み、圧力値から手部が発揮する推進力を推定しようと試みたが、いずれの研

究も手部の表裏1点ずつしか圧力を測定しておらず、手部全体に作用する流体力を議論するに至っていない。一方 Thayer⁽⁶⁾ は、手腕模型を用いてストローク動作中の手部表面の圧力値と手部全体にかかる力を測定し、両者の関係を広範に検討しているものの、膨大なデータが流体力学的に十分には整理されていない。以上のように、人体手部の圧力分布および流体力学的特性は、いまだ十分に明らかにされていない状態といえる。さらに実践的な水泳技術の指導場面においても、どのような手部形態が推進力を増加させるために有利であるかについては、一定の結論を得ていない状態である。

そこで本研究では、人体手部形態の差異を考慮したうえで、人体手部の翼としての性能を評価するために、3種類の模型を製作し、表面の圧力分布の測定および流れの可視化を実施し、流体力学的な特性を明らかにすることを目的とした。本実験結果より、人体手部の翼としての性能、手部形態の差異による流体力学的特性の違いおよび水泳中のストローク技術について具体的な示唆を得ることができた。

2. おもな記号

C: 翼弦長

* 原稿受付 1999年6月28日。

*¹ 正員, 三重大学工学部 (〒514-8507 津市上浜町1515)。

*² 正員, 三重大学教育学部。

*³ 三重大学大学院工学研究科。

E-mail: takagi@edu.mie-u.ac.jp

- C_D : 抗力係数 [式(6)]
- C_L : 揚力係数 [式(5)]
- C_R : 合力係数 [式(7)]
- C_P : 圧力係数 [式(1)]
- D : 抗力 [式(3)] N
- L : 揚力 [式(2)] N
- R : 揚力と抗力の合力 [式(4)] N
- P_{air} : 大気圧 Pa
- P_n : 手部模型表面の各測定点の圧力値 Pa
- S : 各モデルの最大平面積 m^2
- ΔS_n : 圧力測定孔付近の単位面積 m^2
- U : 主流速度 m/s
- θ : 圧力測定孔付近の表面の傾き $^\circ$
- α : 手部の迎え角 $^\circ$
- ϕ : 手部模型に対する主流の流入角 $^\circ$
- ρ_{air} : 空気密度 kg/m^3

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 図1に実験装置の概要を示す。風洞 [図1(a)-①] は、口径350 mmの四方で最大風速16 m/sの開放形である。測定部は、風洞装置の出口に接続したアクリル製ケーシング [図1(a)-②] によって覆われている。手部模型 [図1(a)-③] は、吹出し口より950 mm下流で、測定用ケーシングの中央部に位置するように固定した。ここで固定用装置の

機構を図1(b)~(d)に示す。本実験で用いた手部模型には、尺骨と同方向に固定用心棒が埋め込まれており、その固定用心棒はベアリング機構をもった軸受 [図1(c)-④] に接続されている。手部模型の指先から軸受までの距離は450 mmで、実際の人体における指先からひじ関節までの距離にほぼ等しい。この軸受は、水平軸回り [図1(c)-⑤] に任意に回転させることができ、軸受部に取付けた分度器 [図1(b)(c)-⑥] によって角度を測定できるようになっている。さらにこの軸受は水平面内で、鉛直軸回り [図1(c)-⑦] に角度を0~180°の範囲で変化させることができ、固定用フレームに取付けられた分度器 [図1(d)-⑧] によって同様にその角度を測定できる。

次に本実験で用いた座標系および角度の定義を示す。まず固定用心棒の延長で中指を貫く直線方向にX軸の正をとり、軸受の中心部でX軸と水平回転用の鉛直軸との交点を原点Oとした。また第5~第2指にかけて中手指節関節を貫く直線Y'に平行で、原点OにおいてX軸と直交する直線方向にY軸を設定し、さらにX軸とY軸の双方に直交するようにZを設定した。角度に関しては、主流方向に対してY'軸がなす角を迎え角 α と定義し、さらに主流方向に対して親指側真横から流入する場合の流入角を $\phi=0^\circ$ と定義し、Z軸を回転軸として反時計回りに流入角が増加するように設定した。ただし本固定用装置では流入角 ϕ を $-90\sim 90^\circ$ の範囲でしか変化させられないので、小指側から主流を流入させる場合には、固定用装置全体を風洞の反対側のフレームに固定して測定した。また風速を測定するために、手部模型の風上で流れに影響を与えない位置にピトー管 [図1(a)-⑩] を設置し、マンメータにより風速を測定した。

次に手部模型に作用する圧力および力の測定手順を図2に示す。まず圧力分布を測定するために手部模型の手掌と手背の両面において、各指ごとにそれぞれ溝を掘り(親指のみ2本)、直径3 mmのパイプを埋め込み、ポリエステル樹脂を充当したうえで、表面を研磨し平滑化した。各パイプには、それぞれ指先からとう骨手根関節にかけて7~9個の直径1.2 mmの孔(図2-③)を手部表面に対し垂直に計88個あけた。圧力を測定する際は、各パイプにおいて1箇所の孔だけを開放した状態にし、他の孔はビニールテープ(図2-②)によってふさいだ。各パイプは、スキャニバルブ(図2-⑦)を介して圧力センサ(図2-⑨)に接続され、各パイプにおいて解放された孔のみの圧力が電圧値に変換される。圧力センサから出力される電圧変位はアンプ(図2-⑩)で増幅された後、A-D変換(図2-

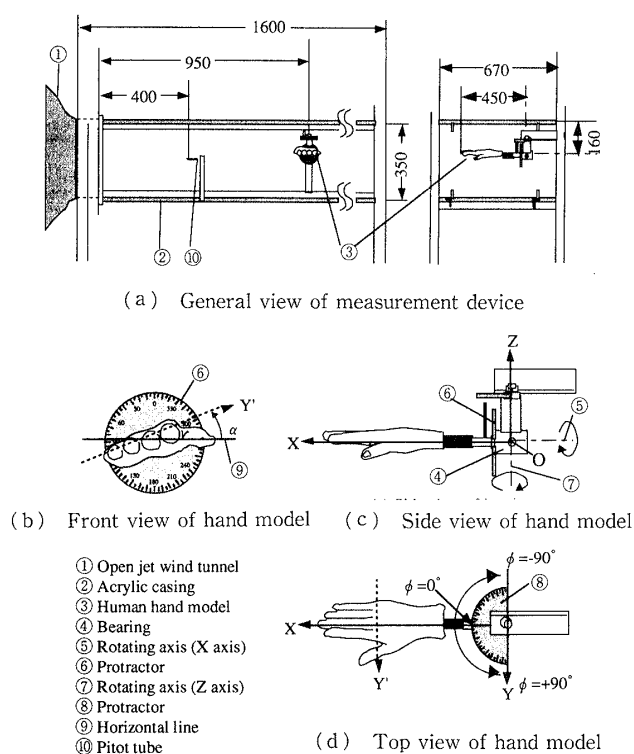


Fig. 1 Experimental apparatus

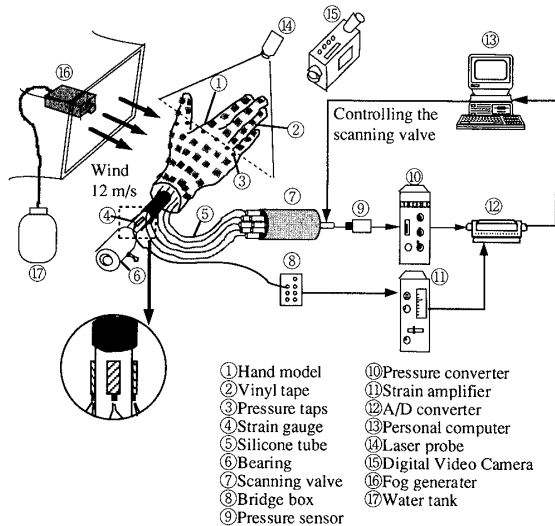


Fig. 2 Schematic view of the data processing system

⑫)してサンプリング周波数 50 Hz で 10 s パーソナルコンピュータ(図 2-⑬)に入力された。またスキャナーバルブは、パーソナルコンピュータによって自動制御され、10 s のデータサンプリングの後、信号がスキャナーバルブコントローラに転送されることによって自動的に測定するパイプを換えるように設定されている。一連の圧力測定が終了した後、ビニールテープによってふさいだ孔の位置を変え、再び同様の方法で圧力を測定し、これをすべての孔の測定が終わるまで繰返した。なお圧力センサは、あらかじめ無風状態の大気圧下で検定を実施した後、使用した。

測定条件については、風速を $U=12$ m/s に設定して実施した。本実験設定におけるレイノルズ数は $Re=2.72 \times 10^5$ に相当し、このレイノルズ数を水中(水温 26°C)に置き換えると、流速が約 0.8 m/s に相当し、一般成人が平泳ぎをするときの手部平均移動速度とほぼ等しい。圧力測定は、流入角を $\phi=0^\circ$ に固定して、迎え角 α を 5° ごとに $\alpha=0 \sim 355^\circ$ まで変化させ全測定孔の動圧を測定した。一連の圧力データを測定した後、流入角 ϕ を 30° ごとに $\phi=-180 \sim 180^\circ$ まで変化させ、同様に迎え角 α を変化させながら動圧を測定した。さらにレイノルズ数の影響を見るために一部の模型のみについて、風速を $U=8$ m/s, $U=10$ m/s に設定し、前述の測定と同様に動圧を測定した。

流れの可視化に関しては、Dantec 社製 Ar イオンビームレーザープローブ(図 2-⑭、最大出力 4 kW)を風洞出口中央部に設置し、風洞吸込口よりフォグジェネレータ(図 2-⑯)より発生させた煙を流入させ、レーザーが照射された断面の流れをデジタルビデオカメラ(図 2-⑮)により撮影した。実験に当たっては、風速 4

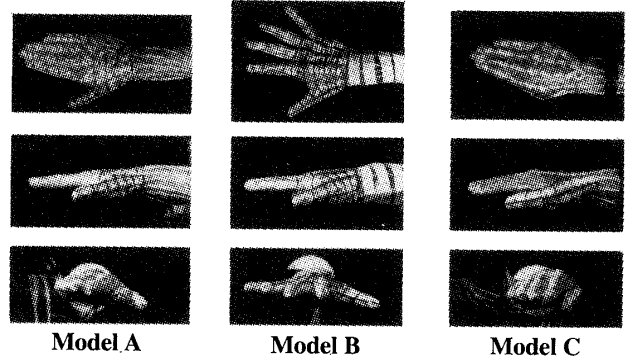


Fig. 3 Three-dimensional view of the human hand model

m/s のもとでつねに主流方向にレーザシートが平行になるようレーザを調節した。流入角、迎え角および可視化断面を変化させながら、手部模型回りの流れをデジタルビデオカメラによって 2 min 程度連続して撮影した。撮影された画像は、コンピュータに取り込み、画像処理ソフト(DV Studio)によって処理した。

2.2 手部模型の構造 図 3 に本実験用に作成した 3 種類の成年男子の右手部モデルを示す。モデル A は親指のみを開いた状態、モデル B は全指を開いた状態、モデル C は全指を閉じた状態である。水泳中一般的には、モデル A のように親指のみを開いた手部形態が用いられる。人体手部の揚・抗力係数を測定した Schleihau⁽²⁾ や Berger⁽³⁾ の先行研究においても、親指のみを開いた形態が採用されている。そこで本研究では、モデル A を基本モデルとして、指の開き方が流体力学的特性に与える影響も検討するために、B, C の 2 種類のモデルを加えた。3 種類のモデル作成に当たっては、手部(一部前腕を含む)を平板上に置き、リラックスさせた状態で石膏を用いて型をとり、この型にポリエステル樹脂素材を流し込んで複製を作成した。なお製作過程で型の中央部には固定用として直径 10 mm の金属製心棒を埋め込んだ。

2.3 手部全体に作用する流体力の算出方法 測定された壁圧値は、式(1)を用いて圧力係数 C_p に変換した。

$$C_p = \frac{P_n - P_{\text{air}}}{0.5 \rho_{\text{air}} U^2} \dots \dots \dots (1)$$

次に手掌面および手背面は、各測定孔ごとに分割して面積 ΔS_n を測定した(図 4)。面積の測定方法は、まず手部模型表面を測定孔ごとにほぼ等しくなるように分割し、それを上下左右から撮影した。その写真映像をスキャナでコンピュータに取り込み、画像処理ソフトを用いて各測定孔付近の分割された面積を算出し

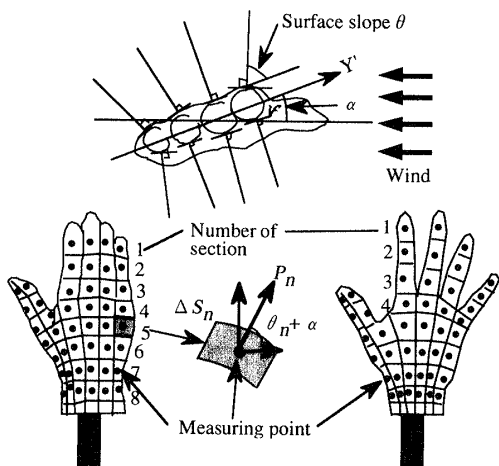


Fig. 4 Procedure of analyzing the pressure data

た。なお指を開いている場合には、上方からの投影面積を基準とし、各指の分割面積を求めた。

各測定ポイントにおける壁圧は、その分割面積の圧力を代表していると仮定する。よってその分割面積に壁圧を乗じた値が、その分割面積当たり働く力を表すことになる。ここで圧力測定孔付近の手部表面が X 軸となす角を θ とすると、揚力成分は力の正弦成分であり、抗力成分は同様に力の余弦成分となる。さらにそれら単位面積当たりの揚力成分と抗力成分をすべての測定ポイントについて積分した値が、手全体に働く揚力および抗力と定義される。よって手モデルに作用する揚力 L および抗力 D は、次の式(2)および式(3)によって表される。

$$L = \sum_{n=1}^{88} \Delta S_n P_n \sin(\theta_n + \alpha) \dots \dots \dots (2)$$

$$D = \sum_{n=1}^{88} \Delta S_n P_n \cos(\theta_n + \alpha) \dots \dots \dots (3)$$

この揚力 L と抗力 D との合力 R は、式(4)によって表される。

$$R = \sqrt{L^2 + D^2} \dots \dots \dots (4)$$

また揚・抗力およびその合力を無次元化した揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D および合力係数 C_R を求める際の基準面積には、各モデルの最大平面積 S を用い、次の式(5)~(7)によって算出した。

$$C_L = \frac{L}{0.5 \rho_{air} S U^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$C_D = \frac{D}{0.5 \rho_{air} S U^2} \dots \dots \dots (6)$$

$$C_R = \frac{R}{0.5 \rho_{air} S U^2} \dots \dots \dots (7)$$

3. 結果および考察

3.1 二次元的に見た人体手部の揚・抗力特性
図1(d)に示す手部の座標系において、 $\phi = 0^\circ$ とな

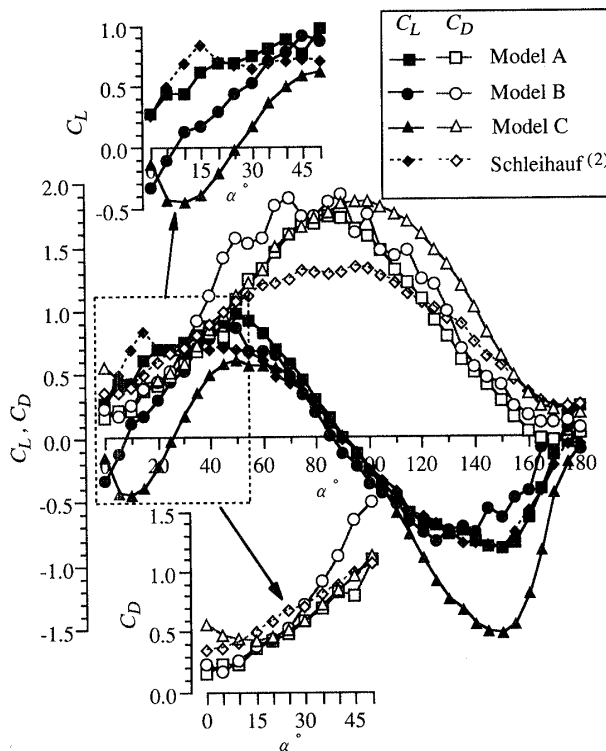


Fig. 5 Comparison of the coefficient of lift and drag of the three models and the previous study

るように流れに対して X 軸を直角に設置した状態で、X 軸回りに手部を回転させて、迎え角 α のみを変化させた場合を二次元と称する。一方、後節(3.3節)で述べる三次元とは、迎え角 α の変化と同時に、流れに対する X 軸の角度 ϕ を変化させた場合の総称である。本節(3.1)では、人体手(以後、手翼と呼ぶ)の揚力および抗力の特性を実験的に検討する。図5には、 $\phi = 0^\circ$ で迎え角 α を 0° から 180° まで変化させた場合の揚力係数 C_L (図5中黒印)および抗力係数 C_D (図5中白抜印)を示す。なお手モデルは図3に示す3種類を用いた。図5には比較のため、他研究者の結果(2)をひし形印破線(-◆-, -◇-)で示してある。

揚力係数 C_L に関しては、本実験条件下での全体的な傾向として、モデルCを除いてモデルA、BおよびSchleihauf(2)の値はよく似た傾向を示す。親指が前縁側に来る $\alpha = 0 \sim 90^\circ$ の範囲では、モデルA~CおよびSchleihaufの結果の中で、 C_L の最大値はモデルAの場合に示され、 $\alpha = 50^\circ$ で $C_L = 0.98$ になる。 $\alpha = 90 \sim 180^\circ$ では、手は裏返しになり小指が前縁に来て、揚力係数が負の値で示される。この範囲において、4つのモデルの最大揚力係数は、モデルCの場合に示され、 $\alpha = 150^\circ$ で $C_L = -1.52$ に達する。この値は、本研究で扱った手翼中で最も高い値である。

次に、抗力係数 C_D (図5中白抜印)に関しては、モ

デル A からモデル C まで少しずつ傾向が異なるが、最大抗力係数は、 $\alpha=75\sim 95^\circ$ の間で得られ、それらの値は $C_D=1.8$ 程度になる。一方、Schleihauf⁽²⁾ の結果は、本実験結果より小さく、最大抗力係数は $C_D=1.3$ 程度である。

手翼の場合、人によって手形が異なるため、揚・抗力係数の絶対値は各個人ごと違うことが予想される。ここでは同一の手形を対象として、指の開き方を変えた場合、揚・抗力係数の傾向がどのように変化するかを検討することが主目的であり、値そのものは人体手部の一つの目安値として評価される。よって Schleihauf⁽²⁾ の結果も最大抗力係数値に関して、本実験結果と異なる値を示したが、一般的な揚・抗力係数の傾向については、大差はないと考えられる。

本実験では、手部表面の圧力測定結果より揚・抗力係数を求めている。そこで、揚・抗力係数について特徴の見られたモデルおよび迎え角を選択し、そのときの圧力分布や手部回りの流れを詳細に検討する。図 6 には、次の 4 条件について、手部断面 3、4、5 (図 4) の翼弦方向の圧力分布を示す。図 6 (a) は、今回の手翼中で最大揚力係数を示すモデル C の $\alpha=150^\circ$ 、図 6 (b) はモデル C の $\alpha=180^\circ$ 、図 6 (c) は $\alpha=0\sim 90^\circ$ の範囲では最も揚力係数が高いモデル A の $\alpha=50^\circ$ 、図 6 (d) はモデル A の $\alpha=0^\circ$ における圧力分布を示

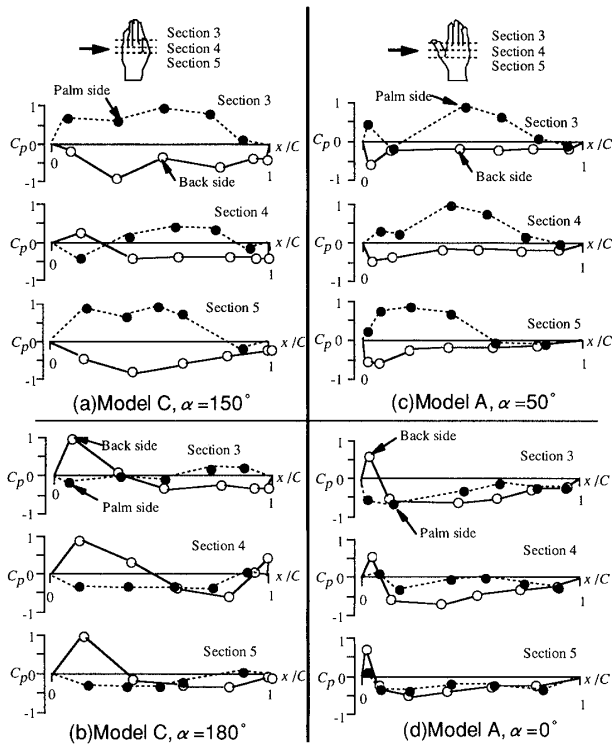


Fig. 6 Pressure distribution of a back side and a palm side of the Model A (thumb leading) and Model C (little finger leading)

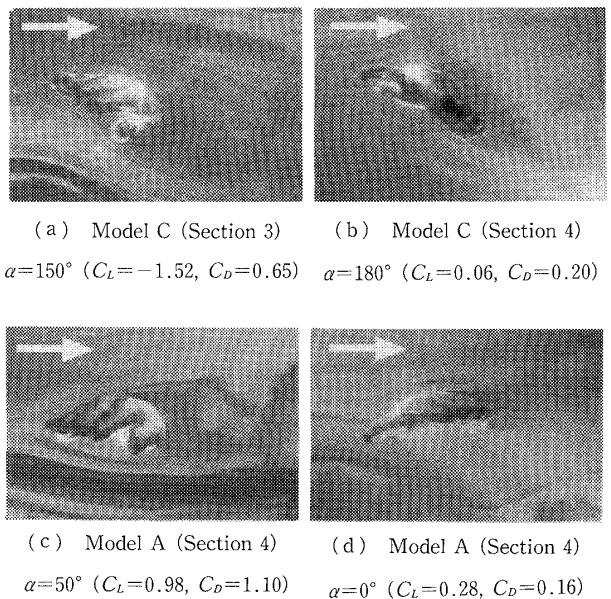
す。各条件における圧力分布の特徴は、表 1 のようにまとめられる。

次に図 7 に、図 6 (a)~(d) に対応する手部回りの流れの可視化写真を示す。撮影した断面位置は、図 6 で示す第 3 および第 4 断面にほぼ一致する。図 7 に示す可視化写真を図 6 における圧力分布結果に対応させて考察すると次のようになる。

図 7 (a)、 $\alpha=150^\circ$ より、モデル C の手背側では流れは前縁から 3/4 翼弦長まで翼面に沿って移行し、流線方向と翼断面がよく一致している。はく離した後も

Table 1 Features of the pressure distribution on the hand model surface

Figure	Side	Features of pressure distribution	Summarize
Fig.6(a) Model C $\alpha=150^\circ$	Back	Keeping negative pressure from the leading edge to the trailing edge except the Section 4	Back : Negative Palm : Positive Difference : Large C_L : Maximum
	Palm	Large increase in pressure at the middle of chord except the Section 4	
Fig.6(b) Model C $\alpha=180^\circ$	Back	Positive pressure near to the leading edge but negative pressure at the middle of chord to the trailing edge	Back : Unsteady Palm : Slight negative Difference : Small C_L : Low
	Palm	Slight negative pressure from the leading edge to the middle of chord except the Section 3	
Fig.6(c) Model A $\alpha=50^\circ$	Back	Slight negative pressure on the whole chord and relatively low at the leading edge	Back : Slight negative Palm : Positive Difference : Medium C_L : High
	Palm	Large increase in pressure at the middle of chord on the Section 3 and Section 4	
Fig.6(d) Model A $\alpha=0^\circ$	Back	Negative pressure on the whole chord except the leading edge	Back : Negative Palm : Negative Difference : Small C_L : Low
	Palm	Negative pressure from the leading edge to the trailing edge	



(a) Model C (Section 3) $\alpha=150^\circ$ ($C_L=-1.52, C_D=0.65$)
 (b) Model C (Section 4) $\alpha=180^\circ$ ($C_L=0.06, C_D=0.20$)
 (c) Model A (Section 4) $\alpha=50^\circ$ ($C_L=0.98, C_D=1.10$)
 (d) Model A (Section 4) $\alpha=0^\circ$ ($C_L=0.28, C_D=0.16$)

Fig. 7 Flow visualization of air around the Model A and the Model C ($\phi=0^\circ, U=4$ m/s)

流れは翼断面に沿うように降下し、これが手背面の圧力低下に貢献していると思われる。また手掌側では、手掌面に当たった流れは凹面でもどみ状態を形成し、モデルから離れた位置の流れは、下方に大きく押し曲げられている。この流れが手掌面の圧力を上昇させていると思われる。このように、手背面での圧力低下と手掌面での圧力上昇が圧力差を増大させ、結果的に本実験条件下で最大の揚力係数を示す結果につながったと考えられる。次に図 7 (b), $\alpha=180^\circ$ を見ると、全体的な流れの様相は、手背側と手掌側でほぼ上下対称をなしている。手背側では小指前縁から流入した流れは、第 3 指付近ではく離しているのがわかる。一方、手掌側では凹形となっているため、モデル近傍の流れは明らかではないが、モデル後方の流れに与える影響はさほど大きくない。モデル C の $\alpha=0^\circ$ の場合、手背面の圧力分布は不安定で、正圧から負圧へと大きく変化している。よって前縁付近と後縁付近に生じる圧力差の作用する方向が逆となって相殺し合うため、結果として手部全体の圧力差は小さい。

図 7 (c), $\alpha=50^\circ$ より、モデル A の手背側の流れは第 3 指付近まではく離せず良好な流れを示す。また手掌側の流れも手掌面に沿って進行し、後縁を離れた後も下方に押し曲げられ、その後下流において大きな渦を形成している。手掌側において大きく下方に押し曲げられる流れが手掌面の圧力を上昇させて、手背面との間に圧力差を生じさせていると思われる。これが揚力成分として作用し、 $\alpha=0\sim 90^\circ$ の範囲で、モデル A が最大揚力係数を示す結果につながったと考えられる。次に図 7 (d), $\alpha=0^\circ$ を見ると、親指前縁から流入した手背側の流れは、前縁部から手背中央部にかけてはく離することなく手背面に沿って流れている。その後第 4 指付近ではく離した流れは、下降することなくそのまま後方へ流れている。一方手掌側では、親指と他の 4 指とのすきまを通して流入した流れは、大きく下方に押し曲げられた後、再び上昇している。 $\alpha=0^\circ$ の場合には、手背、手掌両面において圧力低下が起こり、あまり大きな圧力差を生じないため、揚力係数も小さいと思われる。

以上、二次元的に見た手翼の特徴を総括すると、手部形態の差異は、おもに揚力特性に対して影響が大きく、抗力特性に与える影響は少ない。特に、親指側から流入する場合には、モデル A が揚力発揮特性に優れる一方、小指側から流入する場合には、モデル C が揚力をより多く発揮することが明らかとなった。

3・2 二次元的に見た手部モデルと各種翼形との比較 図 8 には、本研究結果と各種翼形との揚抗曲線

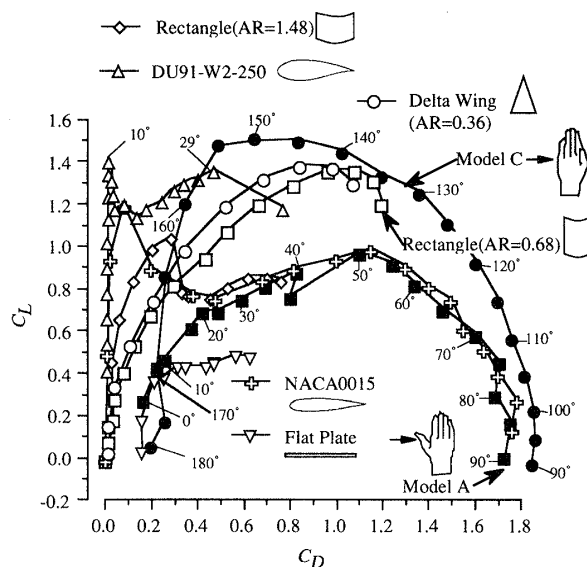


Fig. 8 Comparison of the lift and drag coefficient curves for the Model A (thumb leading), Model C (little finger leading) and various wings
*AR: Aspect Ratio

に関する比較を示す。なおモデル A は、親指が前縁となる場合 ($\alpha=0\sim 90^\circ$)、モデル C は小指が前縁となる場合 ($\alpha=90\sim 180^\circ$) の値を示す。モデル A の揚力係数は、一般的な翼形と比較してそれほど大きくなく、したがって揚抗比も小さい。しかし失速による揚力の減少傾向は緩やかで、抗力係数が大きな迎え角でもある程度の揚力が得られるため、原点からの距離で表される合力係数は、 $\alpha=75^\circ$ で最大値を示す。またモデル C に関しては、 $\alpha=150^\circ$ で最大揚力を示すが、その後失速を起こし、モデル A よりやや急な落ち込みを示す。しかし揚・抗力ともモデル C がモデル A をかなり上回っている。これに対し NACA-0015⁽⁷⁾ ($Re=1.23\times 10^6$) は、低迎え角において手部モデルより明らかに抗力係数が小さく、揚力係数が大きい。しかし $\alpha=12^\circ$ で失速を起こし、揚力係数は大きく減少する。その後、 $\alpha=25^\circ$ から増加に転じ、 $\alpha=50^\circ$ で第 2 最大揚力を示し、その値はモデル A の最大揚力値とほぼ等しい値である。全般的に見ると、低迎え角においてはモデル A と NACA 0015 の間には大きな違いが見られるが、 $\alpha=30^\circ$ 以上の大きな迎え角においては、両者は極めて類似した傾向を示す。

手翼は、第 2 指から第 5 指までを翼弦として考えると厚み比は 25%程度であり、翼形としては、厚翼に分類される。そこで厚み比が手翼とほぼ等しい DU 91-W 2-250⁽⁸⁾ ($Re=1.0\times 10^6$) と比較する。その結果、揚力係数に関しては、すべての測定範囲において DU 91-W 2-250 がモデル A の値を大きく上回っている。さ

らに最大揚力を得た後の失速の程度が小さい点に関しては、共通点が認められるが、翼としての基本性能に関する差は大きい。

次にモデル A のアスペクト比に注目すると、指先から手首までを翼幅とすると、アスペクト比は約 2.0 となり、通常の翼に比べてかなり小さい。そこでアスペクト比が小さなデルタ翼⁽⁹⁾ ($Re=3.2 \times 10^5$, アスペクト比=0.36) や平板翼⁽¹⁰⁾ ($Re=2.35 \times 10^6$, アスペクト比=2.68), そして 2 種類の矩形だこ⁽¹¹⁾ (アスペクト比=0.68, 1.48) のデータと比較する。その結果、デルタ翼と縦長矩形だこ (アスペクト比=0.68) は、ほぼ同様の揚抗力特性を示す。両者とも揚抗比は NACA 0015 や DU 91-W 2-250 と比較すると小さいが、最大揚力係数は約 1.4 に達し、モデル A より大きく、モデル C と同様の値を示す。一方、横長矩形だこ (アスペクト比=1.48) では、縦長だこに比べて小さな迎え角において失速を起し、最大揚力係数もモデル A を若干上回る程度である。最後に平板翼と比較すると、 $\alpha=10^\circ$ 以下の低い迎え角においては、手翼と平板翼は類似した揚・抗力特性を示すが、平板翼の場合、 $\alpha=15^\circ$ 以上の迎え角で揚力係数は頭打ちとなり、最大値でも約 0.5 とモデル A の最大揚力係数の半分程度である。

3.3 三次元的に見た手翼の揚・抗力特性 (流入角 ϕ を変化させた場合) 手部の三次元的動きを考慮に入れて、図 9 にモデル A において流入角 ϕ および迎え角 α を変化させた場合の揚・抗力係数および合力係数の実験結果を示す。

揚力係数に関しては、 $\phi=-30^\circ$ の場合に流入角の影響が顕著に認められる。他の流入角では、 $\phi=0^\circ$ の場合と比較して、絶対値について若干の差が認められたものの、迎え角変化に伴う揚力係数の変化パターンには大きな差はない。しかし $\phi=-30^\circ$ の場合には、 $\alpha=0^\circ$ の時点ですでに揚力係数が 0.79 と、かなり高い値を示し、その後も $\alpha=50^\circ$ 付近まで高い揚力係数を維持している。さらに迎え角が増加し、小指が前縁となる $\alpha=135^\circ$ において揚力係数は -1.40 を示す。この値は、本実験条件下の最大値に近い。一方、抗力係数に関しては、 $\phi=-60, 60, 120^\circ$ において、 $\phi=0^\circ$ の場合と比較して顕著に低い値を示す。しかし $\phi=-30^\circ$ の条件下では、揚力係数と同様に抗力係数も比較的高い値を示し、小指が前縁となる $\alpha=105^\circ$ の場合に本実験条件下での最大値 (2.23) を示す。さらに合力係数についても $\phi=-30^\circ$ の条件が、他の流入角と比較して全般的に高い値を示し、抗力係数が最大値となる $\alpha=105^\circ$ の条件において合力係数も最大値 (2.38)

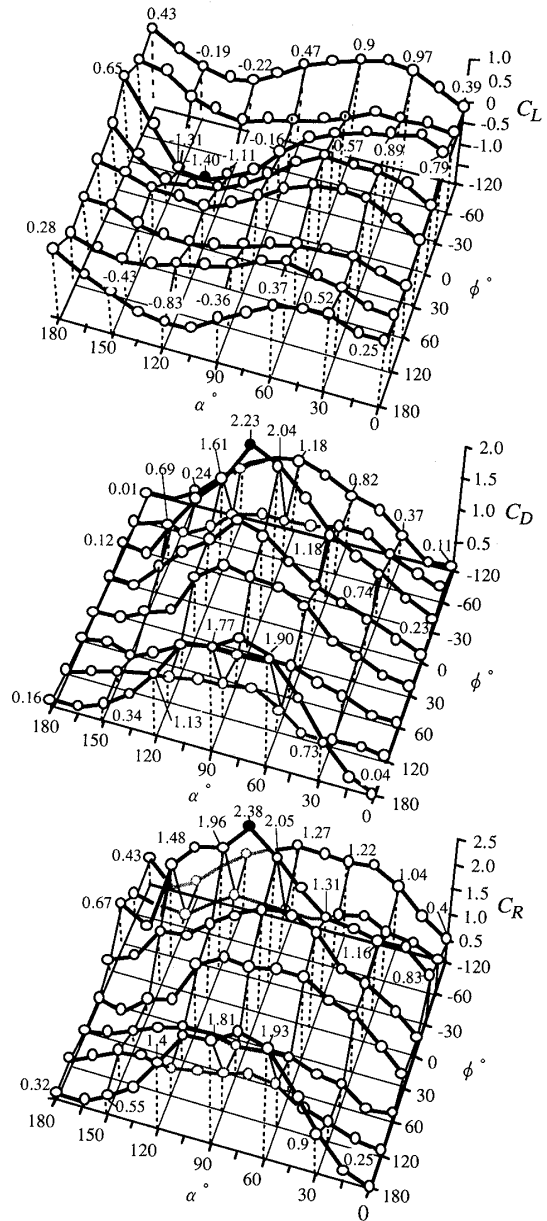


Fig. 9 Coefficient of lift, drag and resultant force depend on the sweep back angle ϕ (Model A)

に達している。

3.4 水泳競技への本研究結果の応用 人体手部の揚・抗力係数を測定し、水泳競技の記録向上に活用しようとする試みは、すでに Schleichauf⁽²⁾, Bergerら⁽³⁾, および高木・清水⁽⁵⁾ によって行われ、一流競泳選手の推進力発揮のメカニズムが検討されている。しかしこれまでの研究においては、一流スイマーの特徴を記述しただけで、より大きな推進力発揮をするためには、どうすべきかという具体的な示唆はされていない。そこで本研究結果を具体的に泳ぎの技術指導に生かす際の要点を以下に示す。

まずアスペクト比に注目すると、手部は 2.0 程度で、

一般的な旅客機の翼などよりかなり小さく、キジ(3.0)、イヌワシ(6.17)やアホウドリ(18.0)などの鳥類やコウモリ(5.93)⁽¹²⁾と比較しても小さい。このようにアスペクト比が小さい手部がより大きな推力を生むためには、ある程度迎え角を大きくして揚力と抗力の双方を利用するほうが効率がよいとされている⁽¹²⁾。水泳中の手部の迎え角を詳細に分析した報告は少ないが、著者ら⁽³⁾の平泳ぎを対象とした研究によれば、水中での手部迎え角は、ほぼ45~135°の範囲であり、実際にはある程度大きな迎え角が用いられている。手部モデルの流入角を変化させた実験では、モデルAの場合、 $\phi = -30^\circ$, $\alpha = 105^\circ$ の条件において合力係数が最大となった。この手部と流れの相対関係を実際の泳ぎに当てはめると、背泳においてストローク後半、体側から腰下にかけてかき下ろす局面に相当すると考えられる。一般的にはこの局面をフィニッシュ動作と呼び、ストローク動作中、最も推進力を発揮する重要な局面と考えられている⁽¹³⁾。これまでの水泳指導では、具体的な手部の流入角や迎え角について指針となるデータはなく、経験に頼っていたが、本実験結果は望ましいストロークテクニックを実現するうえで、大変有効と考えられる。

またクロール泳時の入水動作については、流れに対して逆行するので、一般的には抵抗を発生させると考えられている。しかし本研究結果によれば、親指を開いた形状で親指方向($\phi = -30^\circ$)から入水させた場合、かなりの揚力が得られることが明らかにされた。よって流れに対する手部の迎え角を適切に保つことができれば、入水時に揚力を発揮させ、推進力として貢献させることが可能と考えられる。さらに指の開き方が揚力発揮に与える影響を考慮すれば、クロール泳のストローク中盤、親指側が前縁となる場合には親指を開き、その後フィニッシュ局面において小指側が前縁となる場合には全指を閉じるほうが揚力発生が大きくなり、結果として推進力が増加する可能性がある。シンクロナイズドスイミングにおいても、和船の櫓のような動きをするスカーリングという技術が多用され、揚力発揮が重視されるが、この場合にも手部の形態を変化させたほうが揚力発揮に効果的と考えられる。

以上、本研究結果を実際の水泳技術指導に生かすポイントをあげたが、まだまだ十分とはいえない。今後は本研究結果をもとに、さらに最適なストロークテクニック獲得のための流体力学的知見の収集を継続する必要があると考えられる。

4. 結 論

本研究では、人体手部の流体力学的特性を検討し、以下のような結論を得た。

(1) 人体手부는、揚抗比で見ると航空機に用いられる翼形より劣るが、最大揚力係数は、全指を閉じて小指が前縁となる場合に1.52となり、NACA 0015の最大値を上回る。

(2) 抗力発揮に関しては、指の開き方の違いによる影響は小さい。しかし揚力発揮に関しては、親指側から流入する場合には、親指のみを開いたモデルが優れており、小指側から流入する場合には、全指を閉じたモデルが優れている。

(3) 手部への流入角 ϕ の影響を検討した結果、流入角 ϕ の変化によって揚・抗力係数はかなり変化し、 $\phi = -30^\circ$ の条件下で揚抗力係数とも最大値を示す。

(4) 指の開き方、迎え角、流入角の各条件は、人体手部の流体力学的特性に大きな影響を与える。よってこれらの最適条件を選択することで水泳中の推進効率が向上する可能性が示唆される。

最後に、測定装置作成に当たって懇切丁寧なご指導をいただいた工学部機械工学科の前田太佳夫助教授、鎌田泰成助手および実験データ収集にご尽力をいただいた卒研生平石雅彦君、中川隆之君にこころから謝意を表す。

文 献

- (1) Svec, O. J., *Swim. Tech.*, **19** (1982), 38-46.
- (2) Schleihauf, R. E., *SWIMMING III*, (1979), 70-109, University Park Press.
- (3) Berger, M. A. M., ほか2名, *J. Biomech.*, **28-2** (1995), 125-133.
- (4) Loetz, C., ほか2名, *Swimming Sciesce V*, (1988), 361-367, Human Kinetics Publishers, Inc.
- (5) 高木英樹・清水幸丸, 機講論, No. 930-49 (1993), 398-400.
- (6) Thayer, A. M., Ph. D. dissertation, The University of Iowa (1990).
- (7) Miley, S. J., *A Catalog of Low-Reynolds-Number Airfoil Data for Wind-Turbine Applications*, (1982), 37-38, Texas A & M University.
- (8) Timmer, W. A. and van Rooij, R., *Proc. of ECWEC-Confe.*, Lubeck-Travemunde, (1993), 8-12.
- (9) Kantz, J. and Plotkin, A., *Low-speed aerodynamics from wing theory to panel methods*, (1991), 555-556, McGraw-Hill Inc.
- (10) 清水幸丸・ほか3名, 機講論, No. 930-49 (1993), 395-397.
- (11) 東昭, 模型航空機と風の科学, (1992), 51-62, 電波実験社.
- (12) 東昭, 生物その素晴らしい動き, (1986), 65-88, 共立出版.
- (13) Counsilman, J. E., *Competitive Swimming Manual*, (1977), 221-247, Counsilman Co., Inc.