

水泳における自己推進時抵抗に関する流体力学的研究*

高木英樹^{*1}, 清水幸丸^{*2}, 小段範久^{*3}

A Hydrodynamic Study of Active Drag in Swimming

Hideki TAKAGI, Yukimaru SHIMIZU and Norihisa KODAN

The purpose of this study is to measure an active drag in competitive swimming. At first, the active drag of the front crawl is measured by using the original measurement device which is developed for this experiment. The active drag is estimated by means of the relationship between the residual thrust and passive drag. As a result, the experimental equation concerning with the relation between the active drag and Reynolds number was obtained. According to the comparison this study with previous study, good agreement was obtained between the previous results and theoretical prediction.

Key Words: Flow Measurement, Fluid Force, Bio-Fluid Mechanics, Propulsion, Sports-Engineering, Swimming, Human

1. 緒 言

近年, 運動やスポーツを対象とした研究領域において工学的なアプローチによる実証的研究が多く見られるようになってきた。特に用具・施設の開発や合理的な動作の解析等における工学的知見の貢献は大きく, 今後さらに発展することが予想される。このような状況下で, 水泳においても記録向上を目指した低抵抗水着の開発に関する研究等が行われている。しかしながら肝心な人間の泳運動に関する工学的な研究は非常に少ない。特に自己推進中の抵抗に関しては, 流体力学的に論議された研究はごくわずかであり⁽¹⁾⁽²⁾, そのほかに体育学の分野において数例報告されているのみである^{(3)~(6)}。その理由として, 種子田⁽⁷⁾は自己推進時抵抗測定の困難さを指摘している。つまり, 泳者が四肢を動かし, 形状を変えながら推進する場合の抵抗を正確に測定するためには, 運動中の人体全表面の圧力分布および摩擦分布を明らかにする必要がある, それらを泳ぎに影響を与えないで測定することは極めて困

難であるとしている。したがって自己推進時抵抗に関しては, いまだ定量法が確立されておらず, 従来の研究においても測定方法および測定精度にやや疑問が残る。

そこで本研究では, 回流水槽を用いてクロール泳中の抵抗および推進力を計測できる装置の開発を行い, これまで困難とされてきた自己推進時抵抗の定量を試みた。その結果, 従来より精度よく自己推進時抵抗を計測することが可能となり, 実際のレース速度に相当するレイノルズ数の範囲で自己推進時抵抗を推定できる実験式を得た。

2. おもな記号

C_{Da} : 自己推進時抵抗係数 [式(14)]

C_{Dk} : 動的抵抗係数 [式(9)]

C_{Dp} : 受動抵抗係数 [式(2)]

Da : 自己推進時抵抗 N [式(6), (13)]

D_k : 動的抵抗 N [式(8), (12)]

D_p : 受動抵抗 N [式(4)]

Fr : フルード数 [式(10)]

H : 身長 m

Re : レイノルズ数 [式(3)]

A_s : 推定体表面積 m^2 [式(1)]

* 原稿受付 1997年5月21日。

*¹ 正員, 三重大学教育学部(☎514-8507 津市上浜町1515)。

*² 正員, 三重大学工学部。

*³ NKK エンジニアリング研究所(☎514-0301 津市雲出鋼管町1)。

T_r : 自己推進力から抵抗を差引いた余剰推進力
N [式(7)]
 T_0 : 自己推進力($U=0$ のときの余剰推進力) N
 U : 流速 m/s
 U_0 : 達成可能泳速度($T_r=0$ となるとき流速)
m/s
 W : 体重 kg
 ρ : 水の密度 kg/m^3
 ν : 水の動粘性係数 m^2/s
 V : 排水容積 m^3

3. 実験方法および装置

3.1 被験者 水泳歴5年から17年の熟練した男子大学水泳選手4名を対象として測定を実施した。実験に先立ち、被験者に対して形態測定を実施した。おもな指標および測定結果を表1に示す。なお体表面積 A_s は、身長 H と体重 W をパラメータとして、次に示す高比良⁽⁸⁾の推定式を用いて算出した。

$$A_s = \{72.46 \times (H \times 100)^{0.725} \times W^{0.425}\} / 10^4 \dots (1)$$

また排水容積 V は、体重 W を20歳の男子平均体密度 $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で除することによって推定した。

3.2 測定装置

3.2.1 回流水槽 測定は、図1に示す船舶実験用たて型回流水槽を用いて行った。この回流水槽は、流速分布の不均一性、平均水面こう配および定常波発生等の回流水槽固有の問題を解決するために、運転系および計測系をコンピュータによって制御し、静水中

Table 1 Individual data describing age, career, height, weight, body surface area and volume

Subjects	Sex	Age (yrs.)	Height H (m)	Weight W (kg)	Body Surface Area A_s (m^2)	Volume V (m^3)
A	Male	22	1.70	68.00	1.81	0.066
B	Male	21	1.68	60.00	1.70	0.058
C	Male	21	1.72	65.00	1.78	0.063
D	Male	20	1.72	53.00	1.64	0.051
Averaged Value		21.0	1.71	61.50	1.73	0.060
Standard Deviation		0.8	0.02	6.56	0.08	0.006

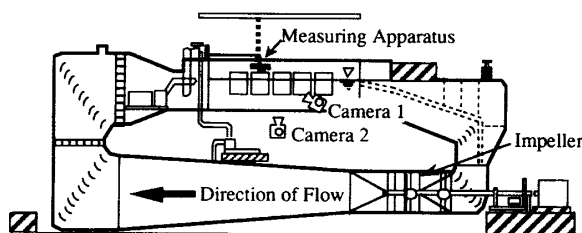
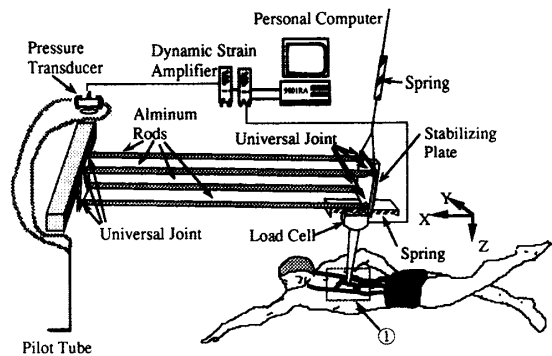


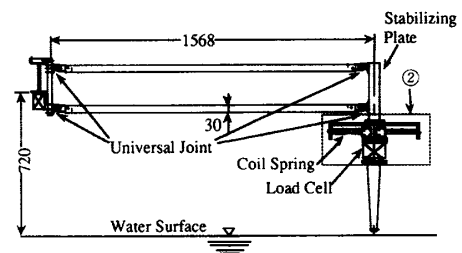
Fig.1 Schematic side view of the circulating water channel

をえい航した場合との誤差をできる限り小さくするような制御システムによって稼働されている⁽⁹⁾。

3.2.2 自己推進時抵抗計測装置 図2(a), (b)に自己推進時抵抗計測装置を示す。装置が泳者のクロール泳運動を妨げないように、上下・左右、すべての動きに対応するよう配慮し、主流方向のみの推進力および抵抗を測定できるよう設計した。4本のロッド部分は、アルミニウムパイプ製(外径30mm、肉厚3mm)で、両端とも2自由度をもつユニバーサルジョイントを介して、一端が検力計支持板(Stabilizing Plate)に、他端が固定用はりに接合されている。4本の平行ロッドは、ユニバーサルジョイントを介して接続されており、泳者の動きに伴う上下左右への動揺に対してもロッドのねじれ変形が起きず、全体として平行四辺形を保ったまま変形するため、検力計支持板は流速方向に対して、つねに垂直を保つことができる。また泳者の横揺れに関しては、装置と泳者の接合部[図2(a)中①]の傾き変形により許容する構造となっている。つまり、計測用ロードセルから伸びるアームとハーネスの接合部に横揺れ方向のみに可動するフックを取付け、泳者の横揺れを妨げないように配慮した。さらにこの検力計支持板の下端には、泳者と装置との相対的な前後運動を許容するばね付きスライド機構[図2(b)中②]にロードセルを設置した。水泳運動の場合1ストローク内で加速局面と減速局面がある



(a) Bird's-eye view



(b) Side view

Fig.2 Measuring apparatus

ため、泳者を完全に固定してしまうと通常の泳運動中と比較して非常に違和感があり、測定に影響を与える。そのためばね付きスライド機構を用い、若干の前後運動を許容しながら力を計測できるようにした。以上の計測装置を図1に示すように回流水槽開口部に設置し、装置の自重が泳者の負荷とならないように、ばねを用いて中立位置で保持するよう天井からつり下げた。

Clarys⁽¹⁰⁾は、回流水槽を用いた泳者の抵抗の計測において、ばね機構などを用いて流速方向のみ泳者の動きを許容する構造を用いているが、左右揺れ、上下揺れ、横揺れなどについては配慮されておらず、自然な泳動作を確保しながら力を測定することが困難であった。本装置はこれらの点を考慮し、泳者の通常の泳動作を損ねないように配慮した計測装置になっている。

3・2・3 泳者用ハーネス 泳者に対しては、計測装置に固定する必要上、特製ハーネスを装着した。図3にハーネスの概要図を示す。このハーネスは、ウェットスーツを改造し、それにナイロン製ベルトを縫いつけた構造である。流速の変化に伴って変動する泳者の推進力および抵抗の両方の力を推進力検出部に伝えるために、身体全体を包むような形状とした。このハーネスは、泳者の体形に合わせて、腰部1箇所および胸部2箇所の計3箇所でサイズを微調整できる。背中側の中央部には、計測装置に固定するための接合部があり、それをロードセルからのびたアームに取付けた。

3・3 測定方法 被験者に対して、図4に示すような2種類の抵抗測定実験を実施した。第1は、図4(a)に示すような伏が位で両腕を挙上した姿勢(けのび姿勢)を保ったまま、被験者を測定装置に固定し、流

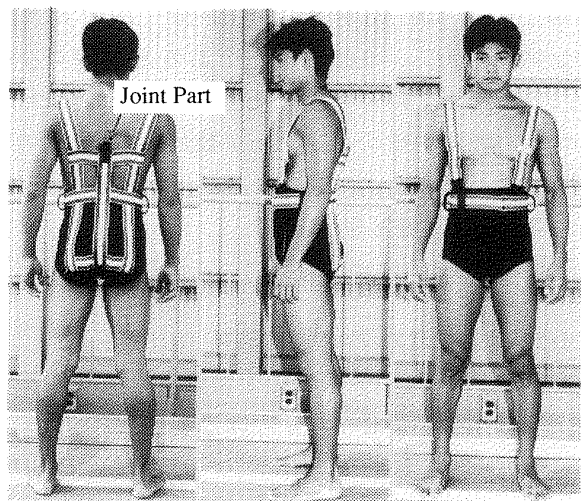
速を0.4~1.6 m/sの範囲で0.2 m/sずつ増加させたときの受動抵抗 D_p を10秒間測定した。

第2は、図4(b)に示すように泳者を測定装置に固定したまま、ある規定されたストローク頻度でクロール泳を行わせ、流速の変化に伴う余剰推進力 T_r を10秒間ずつ測定した。本測定は、通常、船舶において実施されるスクリューの性能試験を参照して実施した。具体的には上肢によるストローク頻度をスクリューの回転数に対応させ、全力泳時の10秒間における腕の回転数(左右の腕のかきをそれぞれ1回と数える)を基準 F_{max} として、そのほぼ3/4に相当する回転数 $F_{3/4}$ 、1/2に相当する回転数 $F_{1/2}$ および1/3に相当する回転数 $F_{1/3}$ の4段階のストローク頻度を設定し、各頻度を維持して泳ぐよう指示した。被験者は指示されたストローク頻度をつねに保った状態で泳ぎ、流速を0 m/sから0.2 m/sずつ増加させた。各設定流速において T_r を計測し、 T_r が流速の増加に伴って減少して、明らかに負の値を示すまで流速を漸増させた。また被験者に対しては、試技間に十分な休息時間を与え疲労が蓄積しないよう配慮した。

以上の2種類の抵抗計測と同時に、上流側で泳ぎに影響を与えない位置にピトー管を設置し、流速を計測した。なお、ロードセルから出力される高周波成分を伴った値は、ローパスフィルタ(5 Hz)を通して平滑化し、A-D変換した後、サンプリング周波数10 Hzにてコンピュータに取り込んだ。

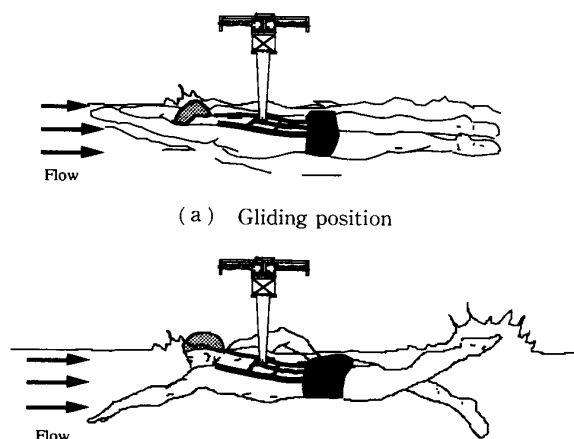
4. 結果および考察

4・1 受動抵抗 D_p の測定結果 図5に被験者Cに対する受動抵抗 D_p の10秒間の出力例を示す。図5より D_p は、計測開始直後大きな変動を示すが、計測開始4秒後付近から安定しはじめ、以後小幅な周期



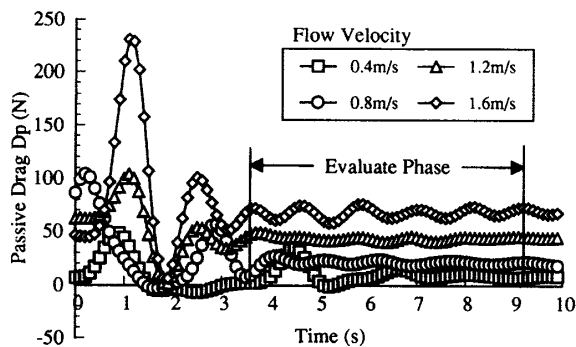
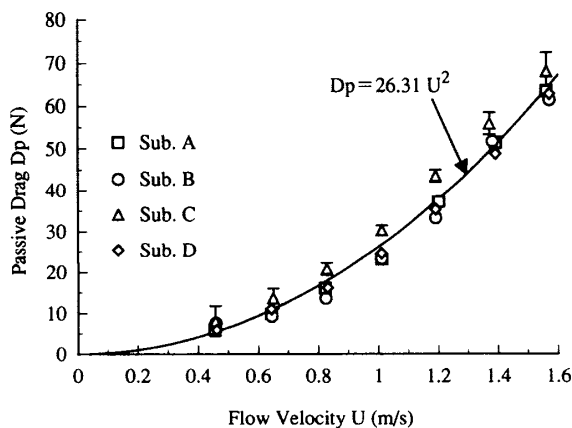
(a) Back view (b) Side view (c) Front view

Fig. 3 Special harness for swimmer



(b) Front crawl stroke

Fig. 4 Two types of experimental swimming position

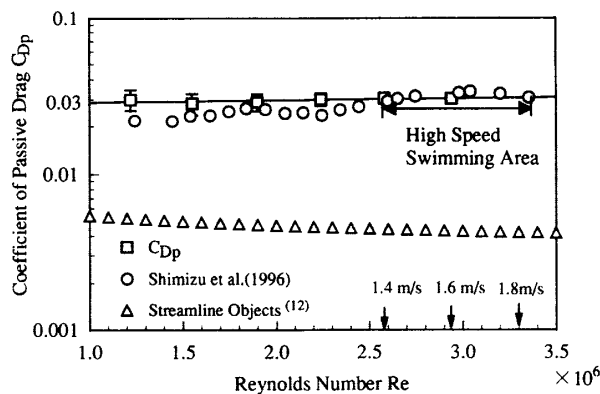
Fig. 5 Example of D_p data in the gliding positionFig. 6 Relationship between U and mean D_p

変動を示す。その周期的変動の振幅は、流速の増加に伴って大きくなる。本研究では、計測開始直後、大きく抵抗値が変動する区間を除いて、比較的安定した区間(Evaluate Phase)を選択し、おのおのの流速に対応する平均受動抵抗値を求めた。

図6には、被験者4人に対する各流速での平均 D_p 値とその回帰曲線を示す。なお被験者Cを代表にとり、データのばらつきを示す誤差範囲を線分で示す。

図6より流速の増加に伴って平均の D_p 値は、ほぼ流速の二乗に比例して増大することがわかる。また D_p 計測中の被験者の姿勢は、後頭部がやや水面上に出る程度でほぼ全身が没水し、没水深度は流速の増加に関係なくほぼ一定であった。さらに水平面に対する身体の迎え角(肩と腰を結んだ線分と水平面がなす角)の平均値は、 $25.4 \pm 3.9^\circ$ であり、被験者間でややばらついたが、個人内では流速の変化に伴う変動は5%以下で、ほぼ安定していた。

次に各被験者の D_p を体表面積 A_s を基準面積として、式(2)によって無次元化した。また流速 U は、ほぼ全身が没水していることから身長 H を代表長さとして式(3)によってレイノルズ数 Re に変換した。

Fig. 7 Relationship between Re and C_{Dp}

$$C_{Dp} = \frac{D_p}{0.5 \rho A_s U^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{HU}{\nu} \quad (3)$$

前式によって求めた受動抵抗係数 C_{Dp} について全被験者の平均値とレイノルズ数 Re との関係を図7に示す。なお図7中には、比較のため清水ら⁽¹¹⁾による実寸大の人体模型を用いた抵抗計測結果および細長比 $l/d=6$ (l :長さ, d :幅)の流線形細長物体の全抵抗係数(理論値)⁽¹²⁾を示す。図7より C_{Dp} の値は、 $Re < 2.5 \times 10^6$ の範囲では、被験者間にややばらつきが見られたものの、全般的にみると4被験者の平均値は $C_{Dp} = 0.03$ でほぼ一定の値を示した。次に人体と細長比がほぼ等しい流線形物体の抵抗係数は、人体の1/5以下と小さいが、 C_{Dp} と同様にレイノルズ数の変化にかかわらずほぼ一定の値を示した。一方、清水らの結果は、 $Re < 2.5 \times 10^6$ の範囲では、レイノルズ数によって変動し、本研究結果よりやや低い値を示した。しかし $2.6 \times 10^6 < Re < 3.4 \times 10^6$ の範囲では変動は比較的小さく、本研究結果とほぼ一致していた。以上の結果から、本実験で取扱った Re の中で、 $2.6 \times 10^6 < Re < 3.4 \times 10^6$ の範囲では、 $C_{Dp} = 0.03$ で一定であると仮定すると、 D_p の値は、式(4)で表すことができる。なお $2.6 \times 10^6 < Re < 3.4 \times 10^6$ のレイノルズ数は、本被験者の泳速度に換算すると、約1.4~1.9 m/sに相当し、ほぼレース中の泳速度と等しい。

$$D_p = \frac{0.03}{2} \rho A_s U^2 = 0.015 \rho A_s U^2 \quad (4)$$

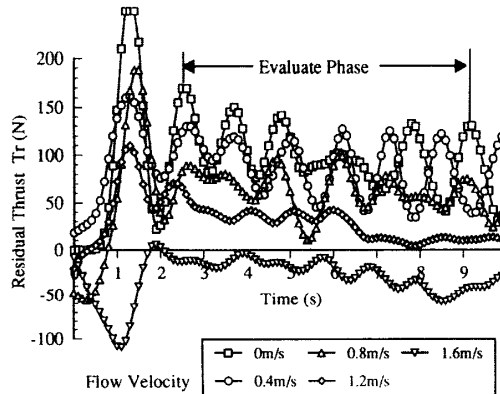
4.2 余剰推進力 T_r の測定結果

4.2.1 ストローク頻度の定常性と迎え角の変化

T_r 測定中、被験者に対してはストローク頻度をつねに一定に保って泳ぐよう指示し、10秒間でのストローク回数に1回以上の誤差が生じた場合には実験をやり直した。さらにストローク頻度の変動を正確に把握す

Table 2 Average and standard deviation of the stroke frequency

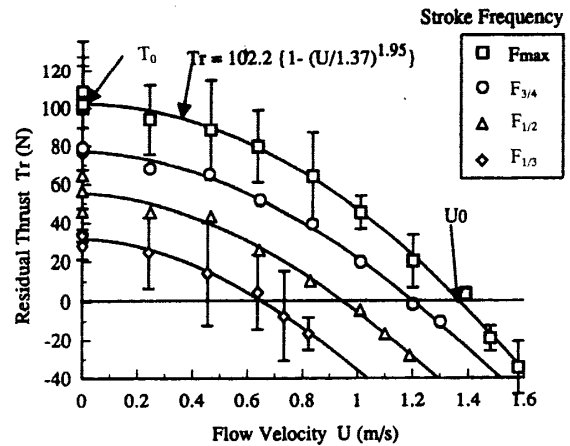
Subjects	Maximum Stroke Frequency (Hz)	3/4 Stroke Frequency (Hz)	1/2 Stroke Frequency (Hz)	1/3 Stroke Frequency (Hz)
A	0.86 ± 0.04	0.61 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.33 ± 0.03
B	0.99 ± 0.03	0.79 ± 0.01	0.52 ± 0.02	0.34 ± 0.01
C	0.98 ± 0.04	0.61 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.32 ± 0.04
D	1.04 ± 0.02	0.71 ± 0.03	0.48 ± 0.02	0.35 ± 0.03
Average	0.97	0.71	0.50	0.35
Standard Deviation	0.07	0.07	0.05	0.03

Fig. 8 Example of the T_r data on each flow velocity in the front crawl (F_{\max})

るために、泳動作の VTR 画像を使って、すべての試技におけるストロークの平均周波数を求めた。表 2 に被験者の各ストローク頻度における平均周波数を示す。表 2 より各被験者とも平均周波数からのばらつきは非常に小さく、ほぼ一定の頻度を保っていることがわかる。また当初の設定どおりに、全力泳時のストローク頻度を基準値としてのその 3/4, 1/2, 1/3 の頻度を達成できた。

次に側方より撮影した VTR 画像を用いて、 T_r 測定時の水平面に対する泳者の迎え角(右手入水時の右肩と右腰を結ぶ線分が水平面となす角)を測定した。その結果、迎え角の平均値は、 $20.5 \pm 3.1^\circ$ であり、 D_p 測定時($25.4 \pm 3.9^\circ$)と比較すると差が見られたが、 D_p 測定時同様、流速変化に伴う迎え角の変動は観察されなかった。

4.2.2 余剰推進力 T_r の測定結果 T_r の分析結果例として、被験者 C が 4 段階のストローク頻度のうち、全力(F_{\max})を維持しながらクロール泳を行い、流速 U を変化させた場合の出力結果を図 8 に示す。測定値は力の作用する方向によって、上流方向を正、下流方向を負とした。図 8 より、泳者の左右の腕のかきに伴って周期的に出力が変動することがわかる。また全力で泳いだ場合には、泳者の疲労に伴い、計測後半

Fig. 9 Typical example of T_r - U relationship on each kinds of stroke frequency

に出力がやや低下する傾向にあった。本研究では、出力の低下率はどの試技においても一定であると仮定し、データ計測開始直後の大きな変動を除いて比較的安定した周期変動を示す区間(Evaluate phase)を選択して平均値を求めた。なおこの出力の低下は、全力時には顕著であったが、3/4, 1/2, 1/3 ストロークでは、比較的安定していた。この作業を、四つのストローク頻度に対して各流速ごとに行い、平均 T_r 値と U との関係求めた。その典型例として、被験者 C のデータを図 9 に示す。

図 9 中に示す回帰曲線は、次式の Komune ら⁽¹⁾ の回帰式を用いて計算した結果をもとに記入してある。

$$T_r = T_0 \left\{ 1 - \left(\frac{U}{U_0} \right)^n \right\} \dots \dots \dots (5)$$

Komune らによれば、 T_0 は被験者があるストローク頻度において発揮している推進力を意味し、 U_0 は $T_r = 0$ となる場合の流速で、泳者が達成可能な泳速度であると考えられる。この回帰式に T_r および U の値を代入し、各ストローク頻度ごとに T_0 , U_0 および係数 n を決定した。なお計算にあたっては、最小二乗法を用い、数式処理ソフト(Mathematica)によって各パラメータを算出した。また図 9 中の F_{\max} および $F_{1/3}$ については、データのばらつきを示す誤差範囲を線で示してある。

図 9 よりすべてのストローク頻度に共通して、 T_r は $U=0$ において最大値を示し、 U が増加するにつれて減少する傾向を示した。このことは、発揮される自己推進力が一定の状態、 U が徐々に増加すると身体全体で受ける抵抗が増加し、推進力と抵抗の差が縮小していることを意味する。さらに U が増加すると、ある U で双方が釣り合い、その後は受ける抵抗が自己推進力を上回り、負の値を示した。他の 3 人の被験

者についても同様の分析を行った結果、同一の傾向が得られた。

4.3 自己推進時抵抗 D_a の推定方法 自己推進時抵抗 D_a は、大別すると次の二つの要素に分けて考えられる。第1は、身体形状に由来する受動抵抗 D_p であり、その内訳⁽¹³⁾は摩擦抵抗や圧力抵抗(各種渦の発生による抵抗は圧力抵抗に含めて考える)、造波抵抗および跳ね水抵抗などを合せたものである。そして第2は、動的抵抗 D_k であり、推進力を生むために四肢を駆動させることによって生じる抵抗と考えられる。以上のような仮定に基づけば、 D_a は式(6)のように表すことができる。

$$D_a = D_p + D_k \quad \dots\dots\dots (6)$$

本実験では、一定の出力発揮をしながら流速を増加させた場合の余剰推進力 T_r を測定した。ここで式(5)によって算出された T_0 を泳者の発揮している推進力であると定義すると、 T_r は推進力 T_0 から自己推進時抵抗 D_a を差引いた値と考えられるので、次式のように表される。

$$T_r = T_0 - D_a = T_0 - (D_p + D_k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

D_p の値は、既に式(4)より与えられているので、 D_a の値を推定するには、 D_k が決定されればよい。そこで式(7)を変形して、式(8)より D_k の値を求めた。

$$D_k = T_0 - T_r - D_p \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)に従って各ストローク頻度ごとにすべての被験者の D_k を求めた。その結果を図10に示す。図10中には、 F_{\max} のデータに関して、データのばらつきを線分で示してある。図10より流速 U が増加するに伴い、動的抵抗 D_k は増加することがわかる。しかし受動抵抗 D_p のように流速の二乗に比例して増加するのではなく、直線的に増加していた。

次に図10に示された D_k の値を式(9)を用いて無次元化した。ただし D_k は、四肢の運動による造波抵

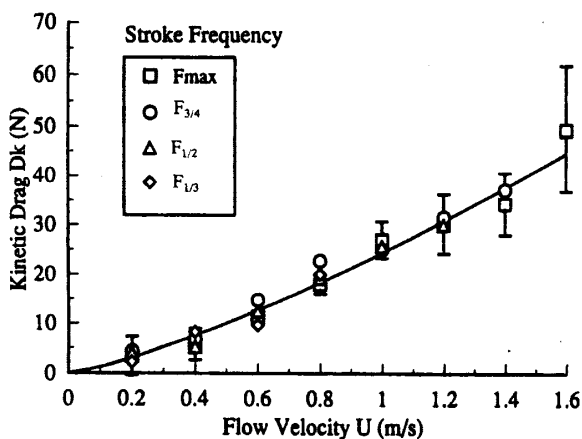


Fig. 10 Relationship between D_k and U

抗成分が多く含まれていると考えられるので、船舶などの造波抵抗係数を求める際と同様に面積の次元として排水容積 V の3分の2乗 $V^{2/3}$ を用いた。また流速も身長 H を代表長さとして式(10)を用いてフルード数 Fr に変換した。

$$C_{Dk} = \frac{D_k}{0.5\rho V^{2/3}U^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

前述の式によって算出した全被験者の平均動的抵抗係数 C_{Dk} とフルード数 Fr の関係を各ストローク頻度ごとに図11に示す。なおフルード数 Fr とともに対応するレイノルズ数 Re も併記した。

受動抵抗係数 C_{Dp} は、 Re の変化にかかわらずほぼ一定であったが、 C_{Dk} はすべてのストローク頻度において Fr の増加に伴って減少した。 C_{Dk} が Fr の増加に伴って減少する理由は、本実験から明らかにすることはできないが、図11より C_{Dk} と Fr の両者の関係は、比較的単純な実験式で表すことが可能である。そこで両変数の回帰分析を行い、式(11)のような実験式を決定した。

$$C_{Dk} = 0.86\{\exp(-3.9Fr)\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(11)により C_{Dk} を Fr の関数として表すことができたので、動的抵抗 D_k は、式(12)によって求められる。

$$D_k = \frac{1}{2}\rho V^{2/3}U^2\{0.86\exp(-3.9Fr)\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(4)によって受動抵抗 D_p が決定し、式(12)によって動的抵抗 D_k が求められたので、式(6)より自己推進時抵抗 D_a は次式によって決定される。

$$D_a = 0.015\rho A_s U^2 + \frac{1}{2}\rho V^{2/3}U^2\{0.86\exp(-3.9Fr)\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

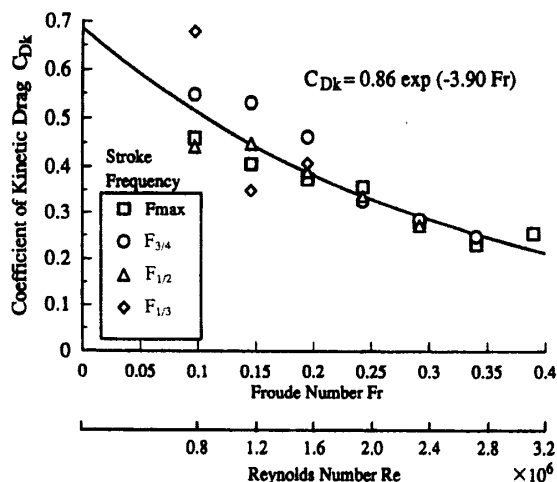


Fig. 11 Relationship between Fr and C_{Dk}

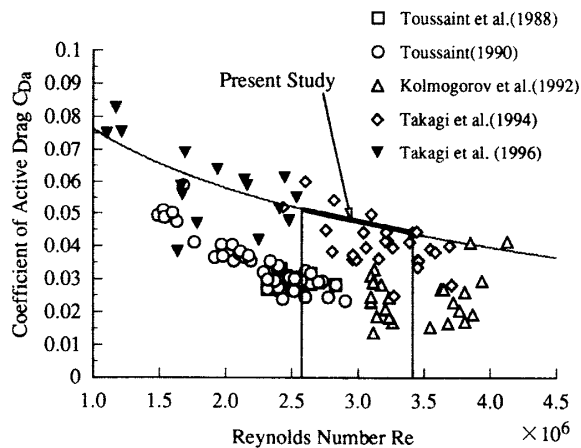


Fig. 12 Comparison with the theoretical values and the previous study

ただし D_p の推定式は、レイノルズ数が $2.6 \times 10^6 < Re < 3.4 \times 10^6$ の範囲にある場合のみ、有効と考えられるので、レイノルズ数が上記の範囲にあるとき、式(13)を用いることによって自己推進時抵抗が推定可能である。

4.4 自己推進時抵抗 C_{Da} について従来の研究との比較 式(13)の D_a 推定式の妥当性を検討するために従来の研究^{(2)~(6)}との比較を行い、その結果を図12に示す。理論値を求める際に、式(13)に代入した値は4人の被験者の平均値を用い、算出された D_a は式(14)を用いて自己推進時抵抗係数 C_{Da} に変換した。

$$C_{Da} = \frac{D_a}{0.5 \rho A_s U^2} \quad \text{..... (14)}$$

次に、従来の研究では測定結果が泳速度および抵抗値のまま記述されているので、比較するためには、本研究と同様に測定値を無次元化する必要がある。そこで泳速度は、式(3)を用いてレイノルズ数に変換し、抵抗値は式(14)を用いて無次元化した。以上の手順を経て算出された係数は、資料ごとに記号を変え、図12中に示す。また理論値を算出する際には、従来の研究において取扱っているレイノルズ数の範囲すべてについて計算してその結果を細線で記入し、本研究で有効なレイノルズ数の範囲のみを太線で示している。

従来の研究結果を無次元値に変換したところ、全体的な傾向として、 C_{Da} はレイノルズ数の増加に伴って減少していた。これに対して、実験式による C_{Da} の推定結果もほぼ同様の傾向を示し、特にレイノルズ数が $2.6 \times 10^6 < Re < 3.4 \times 10^6$ の範囲にある場合(太線)には、高木ら⁽⁶⁾の結果とよく一致し、ほぼ妥当な結果が得られたといえる。さらに、実験式の有効範囲を外れ

るが、 $Re < 2.5 \times 10^6$ の範囲においても、高木ら⁽²⁾の結果とほぼ一致した。

一方 Toussaint ら⁽³⁾⁽⁴⁾の結果は、理論値よりも小さな値を示したが、これは彼らの測定装置の制約上、腕のかきのみによるクロール泳を分析しているためと思われる。その他 Kolmogorov ら⁽⁵⁾の結果は、ばらつきが大きく、他の研究結果とはやや異なる結果を示した。

以上の結果から、式(13)による自己推進時抵抗 D_a の推定結果は、ほぼ妥当であると考えられる。

5. 結 論

本研究では、これまで困難とされてきた水泳における自己推進時抵抗の測定装置の開発および定量に取り組み、以下の結論を得た。

- (1) 泳者の泳ぎを妨げることなく自己推進時抵抗を高精度で定量できる新たな測定装置を開発した。
- (2) 自己推進時抵抗 D_a を受動抵抗 D_p と動的抵抗 D_k に分け、それぞれを定式化することによって、レース速度に相当するレイノルズ数の範囲で自己推進時抵抗 D_a を推定する実験式として次式を得た。

$$D_a = 0.015 \rho A_s U^2 + \frac{1}{2} \rho V^{2.3} U^2 \{0.86 \exp(-3.9 Fr)\}$$

最後に、ご助言いただいたジャパンテクノメイトの小野木裕さん、草川良種さん、また実験データ収集にご尽力をいただいた卒研生齊藤亮君に謝意を表す。

文 献

- (1) Komune, T. and Ogura, M., *Proc. Korea Jpn. Joint Workshop CWC*, (1994), 85-92.
- (2) 高木英樹・ほか4名, 機講論, No. 96-15 (1996-9), 201-202.
- (3) Toussaint, H. M., ほか6名, *J. Appl. Physiol.*, **65**-6 (1988), 2506-2512.
- (4) Toussaint, H. M., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **22**-3 (1990), 09-415.
- (5) Kolmogorov, S. V. and Duplishcheva, O. A., *J. Biomech.*, **25**-3 (1992), 311-318.
- (6) 高木英樹・ほか4名, デサントスポーツ科学, **16** (1995), 149-159.
- (7) 種子田定俊, *Nagare*, **9** (1977), 10-16.
- (8) 松浦義行, 体力測定法, (1989), 159-162, 朝倉書店.
- (9) 石井昭善・ほか5名, 日本鋼管技法, **116** (1987), 83-91.
- (10) Clarys, J. P., *Appl. Ergon.*, **16** (1985), 11-24.
- (11) 清水幸丸・ほか6名, 機講論, No. 96-1 (1996-4), 345-346.
- (12) 東昭, 流体力学, (1993), 74-77, 朝倉書店.
- (13) 田古里哲夫・ほか3名, デサントスポーツ科学, **5** (1984), 173-184.