泳者の手を模擬した円盤模型に
作用する非定常流体力*小 高 雄 介^{*1}, 長谷川 裕晃^{*2}, 松 内 一 雄^{*3}Unsteady Fluid Forces Acting
on a Disk Simulating a Hand of SwimmerYusuke ODAKA, Hiroaki HASEGAWA^{*4} and Kazuo MATSUUCHI^{**} Department of Mechanical Engineering, Akita University,
1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

In the early 1970s, the issue of whether propulsion in swimming is due primarily to lift or drag appeared. Prior to that time it was believed that the best way to propel the body forward was to pull the hand directly backwards to use drag forces. Furthermore, the actual motion of a hand in swimming is obviously unsteady and the time-dependent fluid forces have to be taken into account. In this study, unsteady fluid forces acting on a disc simulating a human hand were measured in the (sinusoidal) pitching motion. It is confirmed that the pitching motion is available for keeping lift higher after the separation occurs. The delay of stall for the pitching disk is observed and also the value of maximum lift coefficient is greater than the maximum lift coefficient under stationary condition. In addition, the experiments were carried out in the anharmonic periodic pitching motion which has the different pitching rate between the up-stroke and the down-stroke during one cycle. The peaks of the lift and drag curves in the anharmonic pitching motion are shifted against time compared to those in the sinusoidal pitching motion.

Key Words: Unsteady Flow, Separation, Fluid Force, Lift, Drag, Pitching Motion, Swimming

1. 結 言

水中を泳ぐ生物は、その推進機構はさまざまでも、流体に運動量を与えることで推進力を得ているという点は共通している。現在、競技スポーツや生涯スポーツとして幅広く行われている水泳の場合は、腕や足の運動により推進力を得ている。特にこの運動のうち、主な推進力への寄与は手のかきで得られている⁽¹⁾。手の運動の方向は推進方向と逆で、手に働く抵抗の反力に基づいて推進力が得られていると考えられている⁽²⁾。しかし、1970 年代に Counsilman⁽³⁾によって推進における揚力の役割の重要性が指摘された⁽³⁾。その後、Schleithauf⁽⁴⁾や Berger^{(5),(6)}らにより手に働く力が準定常解析を用いて定量的に計算された。しかしながら、その計算結果は、実験による測定値と一致せず小さい値として計算されている。つまり、実際の泳者の手の動きは、明らかに非定常でこの非定常性を考慮しない限り水泳の推進メカニズムは明らかにならない。

水泳において、体力、筋力、泳法、トレーニング方法等の運動力学、運動生理学観点に関する研究は盛んに行われている^{(7),(8)}。一方、流体力学的観点での研究も行われてはいるものの^{(9),(10)}、実際の泳者まわりの流れ場での非定常解析に関する報告はなされていない。それは、運動の非定常性にともなう現象が評価を複雑にしているためである。そこで、水泳の力学において、非定常に運動する手に働く流体力の評価は重要であると考え、水泳の推進メカニズムにおける非定常揚力の役割を明らかにすることを試みる。実際の泳者を使用した測定の場合、被験者の身体的な特徴や動作における癖などの影響を完全に排除することが困難なため、実験条件としての詳細なパラメータ設定ができない。そこで、まず本研究では、泳者の手のサイズを模擬した三次元形状の円盤型の翼模型を用いた風洞試験で、模型に作用する非定常流体力の測定を実施した。風洞試験の場合、流れや模型運動のパラメータを自由に設定できるため、パラメータの違いによる非定常流体力への影響を調べやすい。

一方、これまで非定常揚力に関する二次元翼模型での研究は数多くなされて、翼背面に付着する前縁からの離渦の挙動が翼の高揚力化に影響しているこ

* 原稿受付 2005 年 9 月 5 日。

^{*1} 学生員、筑波大学大学院(☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*2} 正員、秋田大学工学資源学部(☎ 010-8502 秋田市手形学園町 1-1)。^{*3} 正員、筑波大学大学院システム情報工学研究科(☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。

E-mail: hhasegaw@mech.akita-u.ac.jp

とが明らかになっている^{(11),(12)}。しかし、二次元模型での結果であるため、泳者の手のまわりのような三次元渦構造と非定常流体力の関連は不明のままである。また、三次元模型を使用し翼端渦の吹き下ろし成分の流れが、前縁はく離渦の発達に影響している報告がある⁽¹³⁾。しかしながら、測定されたレイノルズ数や運動を特徴付ける無次元振動数の範囲等からも、非定常流体力の発生メカニズムを明らかにするのに十分とは言いがたい。

円盤模型を使用した場合、実際の手と形状、表面粗さなど異なる点はある。しかし、手の状態を模擬した模型を使用した場合、指の開き方、親指の曲がり、手の反り等、結果に影響を及ぼす因子が複雑になる。そのため得られた結果において、これらすべての影響をわけて考察することが困難となる。つまり、結果に影響を及ぼす要因が何かを判断できない可能性が生じる。これは、上述した三次元的な現象が、まだ未解明の部分が多いことにも起因している。さらに、こうした手の状態は、各泳者においても異なってくる。そこで本研究では、まず推進力に寄与する泳者の手の運動を評価する際に重要となる三次元性と非定常性を考慮した流体力特性を調べるために、手のひらの輪郭を模擬した単純な形状である円盤模型を使用することにした。そのため、模型運動についても、基本的な非定常運動であるピッチング運動に限定して、運動パラメータと模型に作用する非定常流体力の関係について調べた。こうした三次元性と非定常性を考慮した流体力と渦の関係が明らかになれば、実際の泳者での測定結果もあわせて検討していくことで、水泳の推進力に及ぼす非定常渦構造との関係を調べるのに役立つ。

2. おもな記号

c	: 翼弦長
C_d	: 抗力係数
C_l	: 揚力係数
C_{lmax}	: 最大揚力係数
f	: ピッチング周波数
k	: 無次元周波数= $2\pi f(a/2)/U_0$
Re	: レイノルズ数= $U_0 d/\nu$
T	: 周期
t	: 時間
t'	: 無次元時間= t/T
U_0	: 主流速度
u	: x 方向速度
v	: y 方向速度
w	: z 方向速度
x	: 主流方向座標

y	: スパン方向座標
z	: 高さ方向座標
α	: 迎え角
α_0	: ピッチング振幅
α_c	: ピッチング中心迎え角
Γ	: 循環
ω_s	: 渦度
ν	: 動粘性係数

3. 水泳における S 字プル

クロールのプル動作において、泳者の手の動きは、S字を描くようにジグザグに水をかいた方が、直線的に水を後方に押すより、大きな推進力が得られるというストローク理論がある⁽¹⁾。図1は、泳者の右手の動きを上から見た場合の S 字プルの軌跡である。図は二次元的に表現してあるが、実際の運動は三次元的である。泳者は、図の下から上方向に進んでいる。つまり、実際の泳者の手の動きは、前進中の身体に固定した座標系で考えると、in-sweep と out-sweep で S 字を描いている。この in-sweep と out-sweep の切り替わる瞬間は、手の迎え角変化に伴い手のまわりの循環の向きが変わる瞬間でもある。この手の運動を、適当な迎え角を持った翼の運動と考えれば、翼は流れの速度と迎え角で決まる循環 Γ を持つことになる。ケルビンの循環定理から任意の時刻において、全体の循環は保存されなければならない。つまり、in-sweep と out-sweep で、全体の循環は保存されていなければならないことになる。そのために、in-sweep での循環 Γ_{in} と out-sweep での循環 Γ_{out} の差、 $-\Gamma_{out}-\Gamma_{in}$ に対応するものが自由渦として存在しなければならない。そして、この渦が手の運動に伴い流れ場に放出される。このため、out-sweep ではこの渦と手のまわりの反対向きの束縛渦が後方へ運動量を与える。こうして S 字プルの場合、手に働く循環の向きが変化する際、自由渦と回転方向の異なる束縛渦が、後方に流体の運動量を輸送するように作用することで、手には推進力が働くことになる。

図2は、実際のクロールにおけるプル動作時の泳者右手の in-sweep から out-sweep へ切り替わる瞬間を PIV 計測したものである。測定時の水槽の主流速 U_0 は 1.5 m/s である。実際の泳者の場合、手のひらの大きさを代表長さとしたレイノルズ数は、 2×10^5 オーダーである。図での座標系は、流れ方向に x 、水槽高さ方向に z 、奥行き方向に y としている。(a)は、対応する手の位置を示している。泳者の右手が測定面であるレーザーシートのほぼ中央付近を通過した際、レー

ザーシート下方から見たものである。親指は図の下側に位置している。(b)は、速度ベクトルと z 軸方向に軸を持つ渦度 ω_z を重ねて示してある。渦度 ω_z は次のように定義した。

$$\omega_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (1)$$

また、渦度図中の○印は正の渦度の中心、+印は負の渦度の中心を表している。被験者は、大学水泳部の競

技選手(被験者-A)である。流れ場に正負の渦対の存在が確認できる。こうした渦の影響で、下流方向への流れが誘起している。この結果を、趣味として水泳を楽しむ一般泳者(被験者-B)と比較すると、被験者-Aでの渦がより強くなっていた。強い渦が存在している影響で、下流方向へはより効果的に運動量が輸送される。被験者-Aの方がより大きい推進力であることを考慮すると、こうした泳者の手のまわりの流れ場の違いが、推進力の違いとなっていることが推測される。

Fig. 1 S-shaped pull in front crawl swimming.

(a) Hand position (Bottom view)

(b) Flow vectors and vorticity contours

Fig. 2 Flow field around a hand for subject-A ($U_0=1.5$ m/s).

4. 実験装置および方法

4.1 実験装置 図3は、手の大きさを模擬した円盤翼を使用した風洞実験の概要図である。測定部は、 500×500 mmの正方形断面である。円盤翼模型は、NACA0015翼型の前縁から最大翼厚までの形状を、最大翼厚を軸(A-A)に1回転させたものである。本研究で使用した円盤模型を図4(a)に、その翼断面形状を

Fig. 3 Experimental set-up in wind tunnel.

(a) Test model

(b) Profile

Fig. 4 Schematic of test model.

図 4(b)に示す。材質はアクリルで、模型表面は滑面である。翼弦長は 0.15 m, 最大翼厚は, 0.0375 m である。模型運動の際のピッチング軸は, 1/2 翼弦長位置とした。模型の運動は, 5 相ステップモータを使用した。模型に作用する流体力は, 2 分力計を製作し測定した。製作した 2 分力計は, 揚力, 抗力ともに良い直線性を示している。ヒステリシスは, 較正時最大荷重 5.9 N に対して 4% 以下であることを確認してある。また, 抗力計測時の揚力出力への影響は, 1.0% 以下。揚力計測時の抗力出力への影響は 1.3% 以下で, 揚力, 抗力を分力して測定可能である。実際の測定時は, このそれぞれの軸間干渉の値を補正することで, 揚力, 抗力を求めている。揚力は, 模型下方のロードセルで, 抗力は模型のピッチング軸にセンサーを取付け測定した(図 3)。

4.2 実験方法 実験では, 水中での手のレイノルズ数領域を考慮し, $Re=1.0 \times 10^5 (U_0=10 \text{ m/s})$, $2.0 \times 10^5 (U_0=20 \text{ m/s})$ とした。模型のピッチング周波数 f は, 0.1~3.8 Hz (無次元周波数 $k=0.0024 \sim 0.18$), ピッチング振幅 α_0 は, 9.0° とした。流体力測定は, 数周期の平均を用いた。測定時の周期数は, あらかじめ予備実験を行い, データの再現性を確認し決めた。ピッチング運動は, 正弦波振動で与え, ピッチング中心迎え角 α_0 , ピッチング周波数 f はプログラム上で変更可能となっている。また, ピッチング運動のアップストローク時とダウンストローク時に要する時間の割合を変更した運動についても実施した。Case-1 から 5 は, 1 周期におけるアップストロークとダウンストロークに要する時間の比が, それぞれ 1:1, 3:1, 2:1, 1:2, 1:3 である。図 5 に各ケースでの迎え角変化を示す。迎え角は, ピッチング軸に接続したポテンショメータの出力から求めている。アップストロークとダウンストロークの比が同じ Case-1 では, 関数 $\alpha_0 \sin(2\pi ft)$ で与えている。Case-1 に比べその他のケースでの

Fig. 5 Trajectory of angle of attack in the pitching motion ($f=0.1 \text{ Hz}$, $\alpha_0=9.0^\circ$).

曲線は, それぞれのケースでの比に対応して, 正弦波曲線の位相が変化した形になっている。これより, 迎え角変化の速度比を変えた場合においても, 関数値は速度比を表現できていることが確認できる。

5. 実験結果および考察

5.1 円盤翼模型の定常流体力特性 図 6 に $Re=1.0 \times 10^5$, 2.0×10^5 での定常状態における翼の揚力係数 C_l , 抗力係数 C_d を示す。図中の実線矢印は迎え角増加のアップストローク, 破線矢印は迎え角減少のダウンストロークを表している。揚力係数は失速角までは迎え角に比例して増加している。揚力曲線には時計回りのヒステリシスループが確認できる。一方, 抗力曲線においては反時計回りのヒステリシスループが存在している。こうした傾向や失速後の特性は, レイノルズ数に依存せずに同様の傾向を示している。各レイノルズ数での失速角および最大揚力係数 $C_{l_{max}}$ は, それぞれ $Re=1.0 \times 10^5$ では約 26° , $C_{l_{max}}=0.74$, $Re=2.0 \times 10^5$ では約 32° , $C_{l_{max}}=1.01$ となった。失速角については, NACA0015 の二次元形状翼の失速角の約 16° ($Re=1.8 \times 10^5$, $C_{l_{max}}=0.82$)⁽¹⁴⁾ に比べ大きい値となった。

Fig. 6 Lift and drag curves under stationary conditions.

これは三次元翼での翼端渦による吹き下ろし成分の流れにより、翼の実質迎え角が減少するためである⁽¹⁵⁾。

5・2 円盤翼模型に作用する非定常流体力 図 7, 8に $Re=1.0 \times 10^5$, $f=1.0$, 2.8 Hz の迎え角 α に対する非定常揚力係数, 非定常抗力係数を示す。図中の破線は定常状態の値を示す。また、実線矢印がアップストローク時、破線矢印がダウンストローク時を示す。

5・2・1 中心迎え角 $\alpha_c=9.0^\circ$ $\alpha_c=9.0^\circ$ の定常状態での失速領域を含まないピッチング運動では、 C_l , C_d はいずれも、定常状態での値に沿って反時計回りに変化している。非定常揚力曲線でのヒステリシスは、 $f=1.0 \text{ Hz}$ 以上で実施した場合に確認された。このヒステリシスループは、翼の角速度によるものである。つまり、アップストローク時では、翼運動で誘起される速度は主流に対して下側に傾く。この影響で実質の翼の迎え角は小さくなる。その結果、 C_l が小さくなっている。一方、ダウンストローク時では主流に対して上向きに速度が誘起される。そのため実質の迎え角が大きくなり、 C_l の値が増加している。 $f=1.0 \text{ Hz}$ より小さい周波数でヒステリシスが確認できなかったのは、翼の角速度により誘起される速度が小さく、実質の翼の迎え角変化に影響を及ぼさなかったためである。このこ

とは、ピッチング周波数が大きくなった場合に、ヒステリシスループの幅が大きくなることから確認できる。非定常抗力曲線でもヒステリシスループは確認できるが、揚力曲線に比べ小さい。これは、この範囲の迎え角変化では、迎え角に対する C_d の値自体の変化が小さいからである。

5・2・2 中心迎え角 $\alpha_c=27.0^\circ$ $\alpha_c=27.0^\circ$ の定常失速角前後のピッチング運動では、アップストローク時に定常失速角を超えて揚力を維持している。ダウンストローク時には、定常状態の失速回復角を下回っても揚力を回復していない。アップストロークでの非定常揚力は、定常状態での失速角前と同様な傾向である。アップストロークからダウンストロークへ変化する点を翼運動の上死点、ダウンストロークからアップストロークへ変化する点を下死点とする。 $f=1.0 \text{ Hz}$ では、 C_l は上死点に到達する前に低下し始めている。それに対して $f=2.8 \text{ Hz}$ の場合、 C_l は上死点まで増加している。つまり、ピッチング周波数を大きくすることで、 C_l の低下を遅らせることが可能である。ダウンストロークでは $f=1.0 \text{ Hz}$ の場合、 C_l はアップストローク時の値より低下したまま、定常失速回復角を下回ってもさらに低下し続ける。その後 C_l は、下死点に到達す

Fig. 7 Hysteresis loop of dynamic lift and drag ($Re=1.0 \times 10^5$, $f=1.0 \text{ Hz}$).

Fig. 8 Hysteresis loop of dynamic lift and drag ($Re=1.0 \times 10^5$, $f=2.8 \text{ Hz}$).

る前に増加し始めている。一方上死点まで失速しない $f=2.8$ Hz の場合、ダウンストローク時の C_l はアップストローク時の値より大きくなっている。これは、上述の定常失速角前でのピッチング運動で見られたヒステリシスループと同様である。 $f=1.0, 2.8$ Hz の場合のいずれにおいても C_d の値が $\alpha=30^\circ$ 付近で急激に増加していることから、この角度で失速状態にあるといえる。この失速状態を超えて揚力係数が増加している。これは、翼のピッチング運動による離れん断層の再付着で乱流境界層となつて、揚力係数の増加がより高い迎え角まで維持されたためである。また、下死点で定常状態の C_l まで値が回復していない。これは、ダウンストローク時に実質の迎え角が大きくなるため、翼背面からは離れが起きたままになっているためである。こうして、翼背面のはく離渦の挙動がピッチング周波数による影響を受けるため、周波数の違いでの C_{lmax} の値やヒステリシスループの向きの違いが生じると推測される。

非定常抗力曲線は、ピッチング周波数が大きくなると、より大きなヒステリシスループを示す。アップストローク時では、揚力が低下し失速するまで、 C_d は翼運動に伴う誘起速度で実質の迎え角が減少するために、定常状態より値は小さくなる。その後翼の失速による離れに伴い、急激に増大する。ダウンストロークでは特に $f=2.8$ Hz の場合、定常状態に比べ高い値を示している。そしてこの傾向は、下死点でほぼ定常状態の値になるまで続いている。

5・2・3 中心迎え角 $\alpha_c=45.0^\circ$ $\alpha_c=45.0^\circ$ の定常失速角後の範囲では、非定常揚力曲線および非定常抗力曲線ともに、ほぼ定常状態での値に沿って変化している。これは、定常失速角前の傾向と同様である。しかしながら、揚力曲線は $\alpha_c=9^\circ$ の場合と異なり時計回りのヒステリシスループとなっている。これは、翼背面に形成された離れ渦によるものである。つまり、失速後の完全離れ領域でのピッチング運動時には、アップストロークによる翼の頭上げにより翼背面にはく離渦が形成される⁽¹¹⁾。このはく離渦の影響で渦揚力が発生し、付加揚力が発生している。一方抗力曲線は、反時計回りのヒステリシスループである。ピッチング周波数が大きくなると、抗力曲線の勾配が急になっている。このことから、翼の相対速度の違いで、抗力係数も変化している。また、ピッチング周波数が大きくなり角速度が速くなると、ダウンストローク時にアップストローク時の軌跡に追いつけなくなることから、大きなヒステリシスがあらわれている。

こうしたピッチング運動による非定常揚力および非

定常抗力の定常状態に対する傾向は、本研究で実施したレイノルズ数の範囲では、レイノルズ数での違いは確認できなかった。

5・3 非調和的ピッチング運動での非定常流体力

ピッチング運動 1 周期で考えた場合、一般的に揚力は迎え角を増加させるアップストロークでは増加し、逆にダウンストロークでは減少する。つまり、周期的な運動をしている限り、揚力が増加する運動時もあれば、減少する運動時も存在することになる。そこで、ダウンストローク時における揚力減少の傾向を変化させることを試みた。ピッチング運動時のアップストロークとダウンストロークに要する時間の割合を変化させた。つまり、ピッチング運動 1 周期にかかる時間は変化させない状態で、アップストロークとダウンストロークにかかる時間の比を変えた。これにより、迎え角変化の速度を変更した非調和的ピッチング運動での模型に作用する流体力の測定を実施した。アップストローク時とダウンストローク時における迎え角変化の速度比は、5 ケース (Case-1~Case-5) である。

図 9 は、 $f=2.8$ Hz の各ケースでの C_l および C_d である。ピッチング中心迎え角 $\alpha_c=25.9^\circ$ である。横軸は、周期 T で無次元化した時間である。Case-2 では、アップストロークでの迎え角変化の速度が速い。一方、ダウンストロークでの迎え角変化の速度は遅くなる。そのため、速度変化がない Case-1 での非定常流体力のグラフの位相が全体的に前進した結果となる。それに対して、Case-5 では、アップストロークでの迎え角変化の速度が遅く、ダウンストロークでの速度が速い。そのため、Case-2 とは反対に Case-1 の非定常流体力の位相が全体的に後退した形になっている。Case-3, 4 においても、前進、後退の程度は異なるものの傾向は同様である。Case-4, 5 の場合、 C_{lmax} は、その他のケースに比べわずかながら小さくなっている。一方 Case-1, 2, 3 を比べた場合、 C_{lmax} はあまり変わらない。しかしながら、アップストロークに比べダウンストロークでの迎え角変化の速度を小さくすることで、揚力低下の傾きを小さくできる。これは、ピッチング中心迎え角 $\alpha_c=25.9^\circ$ のため、アップストロークで失速した後のダウンストロークでの勾配が緩やかになるためである。この結果、高揚力を保つ無次元時間が長くなる。こうしたアップストロークとダウンストロークにおける迎え角変化の速度の違いに伴う非定常流体力の時間推移グラフの変化は、異なる周波数で確認したところ、同様の結果となった。

定常時に対する非定常時の揚力増加の割合を評価するために、定常時の最大揚力係数に対する非定常時の

Fig.9 Histories of lift and drag coefficients ($Re=1.0 \times 10^5$, $f=2.8$ Hz). Fig. 10 Ratio of maximum lift coefficient between dynamic and stationary conditions. Filled and open symbols denote $Re=1.0 \times 10^5$ and 2.0×10^5 , respectively).

最大揚力係数の比を調べた。図 10 に最大揚力係数の定常時と非定常時の比と無次元周波数の関係を示す。縦軸の C_{lmax-S} , C_{lmax-D} は、それぞれ定常時および非定常時における最大揚力係数である。無次元周波数の増加に伴い、定常最大揚力係数に対する非定常最大揚力係数の比が大きくなっている。さらに、 $Re=1.0 \times 10^5$ の場合、Case-1 から 3 では定常最大揚力係数に対する非定常最大揚力係数の比の増加は顕著である。つまり、迎え角の速度変化をつける場合、アップストロークを遅くしない方が、効果的に揚力を得られることになる。しかしながら、こうしたアップストロークとダウンストロークにおける迎え角変化の速度比による影響は、 $Re=2.0 \times 10^5$ の場合には確認できなかった。

6. 結 言

水泳の推進メカニズムにおける非定常揚力の役割を明らかにすることを最終目的とし、泳者の手の大きさを模擬した円盤模型を使用して風洞試験を行い、円盤に作用する非定常流体力の測定を実施した結果は、以下のようにまとめることができる。

(1) 本研究での円盤型翼模型の定常失速角は、同じ翼型を使用した二次元形状翼模型に比べ大きい値となった。

(2) 定常失速角前後のピッチング運動により、定常失速角を越えて揚力を維持することができる。その際、ピッチング周波数を大きくすることで、揚力が減少し始める迎え角を遅らせることが可能となる。こうした失速特性に関しては、従来の二次元翼での動的失速に関する知見と一致する。

(3) ピッチング運動でのアップストロークとダウンストロークにおける迎え角変化の速度を変更させた非調和的ピッチング運動は、速度変化のないピッチ

グ運動における C_p , C_d の最大値とは違いが生じない。

(4) しかしながら、非定常流体力の位相が変化した形になるため、アップストロークに比べダウンストロークでの迎え角変化の速度を小さくすることで、ダウンストロークでの急激な揚力低下を抑え、効果的に揚力を得ることができる。

今後は、非定常流体力と流れ場の三次元渦構造の関連を調べていく予定である。本研究の実施にあたり、模型および力検出部製作に協力していただいた、筑波大学文部科学技官中島孝氏にお礼を申し上げます。また、実際の泳者に関する実験は、筑波大学体育科学系水泳研究室との共同研究で実施された。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(2) (課題番号 15300216) の交付を受けて行われた。

文 献

- (1) Takagi, H., How to Swim Fastest, *IWANANI Library of Science*, (2002), pp. 34-44.
- (2) Rushall, B. S., Spriggins, E. J., Holt, L. E. and Cappaert, J. M., A Re-evaluation of Forces in Swimming, *J. Swimming Research*, 10 (1994), pp. 6-30.
- (3) Counsilman, J. E., The Application of Bernoulli's Principle to Human Propulsion in Water, *First International Symposium on Biomechanics of Swimming, Water Polo and Diving*, (1970), pp. 59-71.
- (4) Schlehauf, R. E. Jr., A Hydrodynamic Analysis of Swimming Propulsion. In *J. Terauds and E.W. Bedingfield (Eds). Swimming III*, Baltimore, Maryland: University Park Press, (1979), pp. 70-109.
- (5) Berger, M. A. M., De Groot, G. and Hollander, A. P., Hydrodynamic Drag and Lift Forces on Human Hand/Arm Models, *J. Biomechanics*, 28-2 (1995), pp. 125-133.
- (6) Berger, M. A. M., Hollander, A. P. and De Groot, G., Determining Propulsive Force in Front Crawl Swimming: A Comparison of Two Methods, *J. Sport Sciences*, 17 (1999), pp. 97-105.
- (7) Yanai, T., Stroke Frequency in Front Crawl: Its Mechanical Link to the Fluid Forces Required in Non-propulsive Directions, *J. Biomechanics*, 36 (2003), pp. 53-62.
- (8) Busso, T., Variable Dose-Response Relationship between Exercise Training and Performance, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35 (7), (2003), pp. 1188-1195.
- (9) Toussaint, H. M., Van Den Berg, C. and Beek, W. J., Pumped-up Propulsion during Front Crawl Swimming, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(2) (2002), pp. 314-319.
- (10) Arellano, R., Vortices and Propulsion, *Proceedings of the 17th International Symposium on Biomechanics in Sports: SWIMMING*, (1999), pp. 53-65.
- (11) Fuchiwaki, M., Tanaka, K. and Tanaka, A., Arrangement and Dynamic Behavior of Vortices from a Pitching Airfoil (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 65, No. 632 (1999), pp. 1271-1276.
- (12) Izumi, K., Study on Fluid Dynamic Forces and Flow Structure around Impulsively Started Bodies, *AIAA Paper* 2003-0230, (2003), pp. 1-11.
- (13) Birch, J. M., Dickson, W. B. and Dickinson, M. H., Force Production and Flow Structure of the Leading Edge Vortex on Flapping Wings at High and Low Reynolds Numbers, *J. Experimental Biology*, 207 (2004), pp. 1063-1072.
- (14) Jumper, E. J., Schreck, S. J. and Dimmick, R. L., Lift-Curve Characteristics for an Airfoil Pitching at Constant Rate, *J. Aircraft*, 24-10, (1987), pp. 680-687.
- (15) Birch, J. M. and Dickinson, M. H., Spanwise Flow and the Attachment of the Leading-Edge Vortex on Insect Wings, *Nature*, 412 (2001), pp. 729-733.