

水泳人体シミュレーションモデルによる 標準的6ビートクロール泳の力学的考察*

中島 求^{*1}

Mechanical Study of Standard Six Beat Front Crawl Swimming by Using Swimming Human Simulation Model

Motomu NAKASHIMA^{*2}

^{*2} Graduate School of Tokyo Institute of Technology, Department of Mechanical and Environmental Informatics,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

There are many dynamical problems in the front crawl swimming which have not been fully investigated by analytical approach. Therefore, in this paper, standard six beat front crawl swimming is analyzed by the swimming human simulation model SWUM, which has been developed by the authors. First, the outline of the simulation model, the joint motion for one stroke cycle, and the specification of calculation are respectively described. Next, contribution of each fluid force component and of each body part to the thrust, effect of the flutter kick, estimation of the active drag, roll motion, and the propulsive efficiency are respectively discussed. The following results were theoretically obtained: The thrust is produced at the upper limb by the normal drag force component. The flutter kick plays a role in lifting the lower half of the body. The active drag coefficient in the simulation becomes 0.082. The buoyancy determines the primal wave of the roll motion fluctuation. The propulsive efficiency in the simulation becomes 0.2.

Key Words : Bio-fluid Mechanics, Biomechanics, Bio-Motion, Swimming, Simulation, Front Crawl

1. 緒 言

著者らは既報⁽¹⁾において、人間の水泳における汎用解析ツールとなることを目指した、全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)を開発した。そして解析例として6ビートクロール泳の解析を行い、実際とシミュレーションでの泳速度を比較することにより、本シミュレーションモデルの妥当性を確認した。

ここで、6ビートクロール泳は最も一般的な泳法であるため、多くの力学的研究がこれまで行われている。まず各流体力および身体各部の推力への寄与については、クロール泳における推力はおおまかにいって7割から8割が上肢によると言われている⁽²⁾。また流体力成分としては、相対流れに垂直な方向で定常的な成分である法線方向抵抗力成分が支配的ではないかと従来考えられているが、非定常成分である付加質量力の影響の度合は理論的には明らかになっていない。

次にバタ足の効果については、一般にクロール泳に

おけるバタ足は上肢に比べて推力への寄与は少なく、おもに下半身を持ち上げ身体の水平を保つためとされているが⁽²⁾、これを理論的に議論した例は無い。

また水泳の力学的研究においては、泳いでいる状態で身体が受ける動的な抵抗とされている、自己推進時抵抗という概念が一般的である。高木ら⁽³⁾や Toussaintら⁽⁴⁾は実際の泳者を用いて自己推進時抵抗を実験的に定量化しようとしている。しかし自己推進時抵抗をシミュレーションにより理論的に考察した例は無い。

またクロール泳においては、手のかきと同期した、体幹のロール運動が特徴的である。ロール運動自体は推進を妨げるものではなく、むしろ適切な振幅でロールすることが推進の助けになると言われている。またロール運動は体幹部自身の回旋によるものではなく、上肢のストロークにより体幹全体がロールすることが知られている。この問題に対し Yanai⁽⁵⁾は近年、人間の泳者の実験により、上肢の浮力がロール運動の主な発生源であると主張しているが、本問題についてもシミュレーションにより理論的に検討した例は無い。

また水泳運動における推進効率については、泳法の評価指標として重要な物理量であると考えられるが、算出の困難さからこれまで理論的に扱った研究は行われていない。

* 原稿受付 2004 年 月 日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院情報理工学研究所 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

E-mail : motomu@mei.titech.ac.jp

以上の状況に鑑み、本報告では標準的な6ビートクロール泳における上記の各々の問題について、開発したシミュレーションモデルを用いて理論的に検討し、力学的な考察を加えたので以下に報告する。

2. 解析方法

2.1 シミュレーションモデル概要 本シミュレーションモデルは、人間の身体の相対運動を関節角として与え、一つの剛体としての全身の6自由度の絶対運動を、身体についての剛体の運動方程式により求めるものである。よって、泳速度、身体の浮き具合、さらには身体全体のロール・ピッチ・ヨーの回転運動などが計算結果として求まる。また身体に働く外力としては、浮力を含む非定常流体力および重力を考慮する。非定常流体力については、流れ場は解かずに、身体各部位の運動状態(位置、速度、加速度、向き、角速度、角加速度)から流体力が求まると仮定する。この流体力モデルにおける諸係数については、既報⁽¹⁾において、四肢模型を用いた著者らの実験と、実際の泳者のけのび姿勢における抵抗測定の結果を用いて同定した。その結果、流体力モデルに関しては、実験に対して10%程度の誤差を有するものの、定性的傾向は十分捉えることができることがわかった。また既報⁽¹⁾における6ビートクロールの解析例では、シミュレーション結果の泳速度は実際より7.5%程度低めなもの、定性的には現象を表現できることがわかった。本モデルおよび上記の結果の詳細については既報⁽¹⁾を参照されたい。

2.2 関節の運動 シミュレーションモデルへの入力となる、関節の運動について述べる。本報告では標準的な6ビートクロールの泳動作として、インターネットで公開されている日本水泳連盟監修の教育用画像素材⁽⁶⁾の模範泳の映像を参考に各関節の運動を決定した。本映像を参考に選んだ理由は、本映像において泳者が撮影のために泳いでおり、泳者自身が全力泳に見られがちな個人の癖をなるべく出さずに模範的なフォームで泳ぐことを意識していると見受けられ、標準的なフォームとして妥当と考えられたためと、入手の容易さから今後の検証のためのプラットフォームとして適していると考えられたためである。なお本クロール泳動作は既報⁽¹⁾の解析例における泳動作と同一であるため、関節角の具体的な値などの詳細は割愛する。

2.3 計算条件 シミュレーションにおいては、すべての物理量は時間、長さ、および密度について無次元化された系で計算される。それぞれ基準量は、ス

トローク周期、身長、水の密度である。表1に計算条件を示す。ストローク周期は実際の映像と同じ1.96sとした。また身体形状は日本人20代男子平均とし、身体を21個の楕円錐台に分割し、さらに各楕円錐台の長手方向分割数は10、円周方向分割数は36、時間刻みは0.002(1ストローク周期を500分割)とした。また身体の重心の初期速度はすべての方向に関して0とした。

3. 解析結果と考察

3.1 運動の様子 既報⁽¹⁾にて示したように、本シミュレーションにおいては4周期程度後には運動は定常状態となり、一定方向に人体が推進する。以降の議論ではこの定常状態のみを扱う。

まず図1に半周期分の運動の様子を示す。定常状態に達した後の1周期で無次元時間 $t^* = 0 \sim 1$ を定義する。なお図1は既報⁽¹⁾においてもすでに示しているが、 t^* に対応する身体姿勢を示すため再掲する。

また定常状態における絶対座標O-xyzの定義として、推進方向を $-x$ 、重力方向を $-z$ 、それらと直交する方向(図1における奥行き方向)を y とする。

3.2 各流体力および身体各部の推力への寄与 図2は定常状態の1周期における各流体力の推力への寄与、すなわち $-x$ 方向の流体力成分を示す。破線は付加質量力、一点鎖線は法線方向抵抗力、点線は接線方向抵抗力、細い実線は浮力、太い実線は合計を表す。 $t^* = 0.4 \sim 0.5$ および $t^* = 0.9 \sim 1$ 付近で大きなピークを持っており、その成分のほとんどは法線方向抵抗力であることがわかる。また浮力は全く推進には貢献しておらず、受動抵抗をモデル化した接線方向抵抗力は常に負となっている。さらに各流体力の部位ごとの寄与を調べるため、体幹、上肢、下肢の各成分を取り出した結果を図3に示す。図3(a)は上肢・下肢以外の体幹(頭部、頸部を含む)のみに働く流体力の推力成分であり、体幹部には接線方向抵抗力が負の値とし

Table 1 Specification of calculation

Stroke cycle	1.96 s
Body geometry	20-29 years Japanese male
Number of truncated elliptic cone	21
Number of division of each truncated elliptic cone	
- for longitudinal direction	10
- for circumferential direction	36
Time step	0.002
Initial velocity of whole body	0

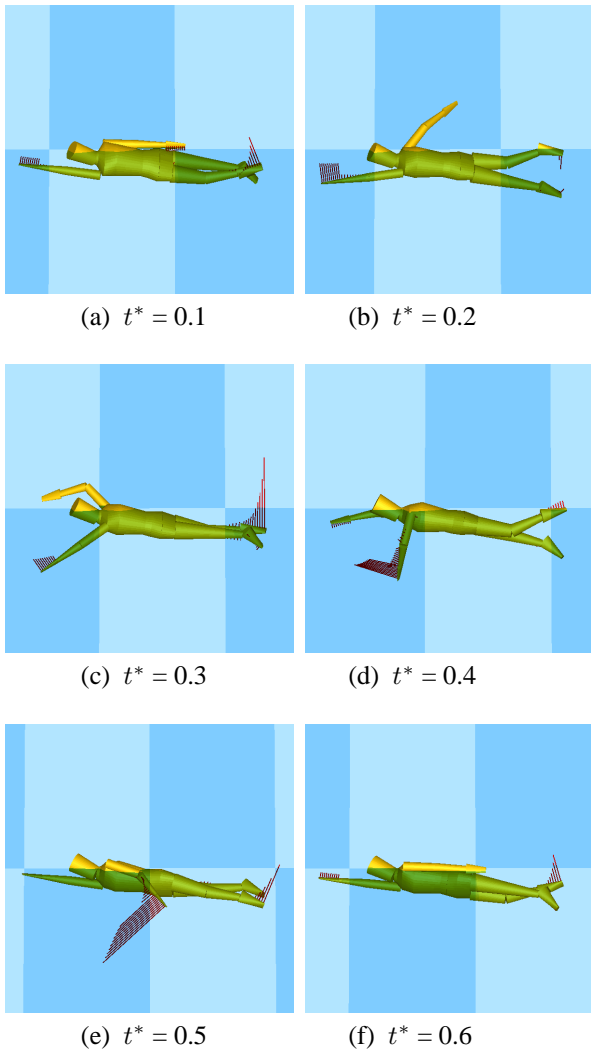


Fig. 1 Simulation results of swimming motion for half cycle from side view

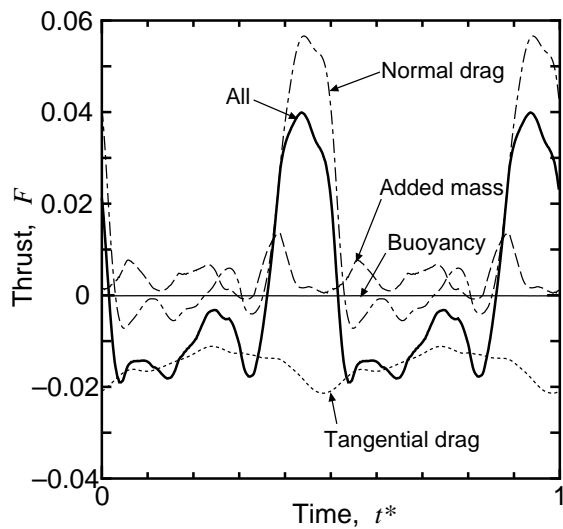
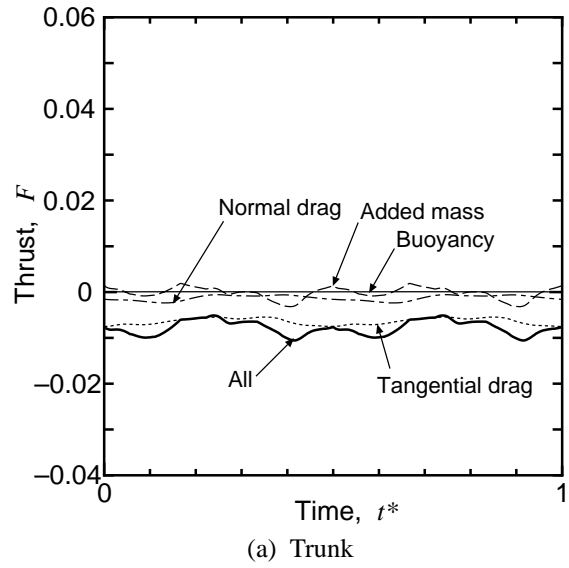
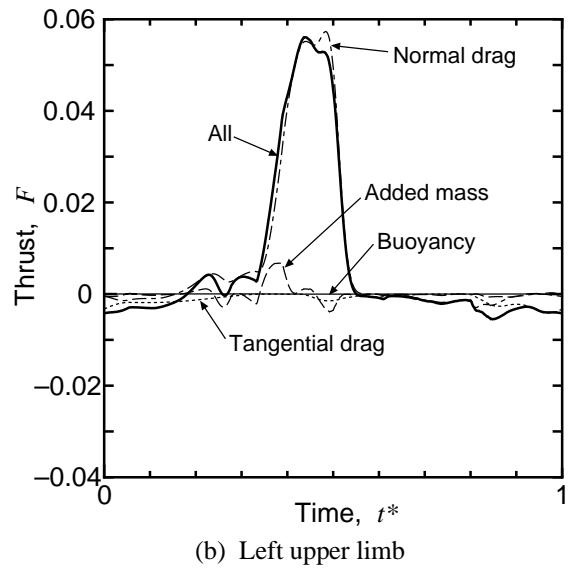


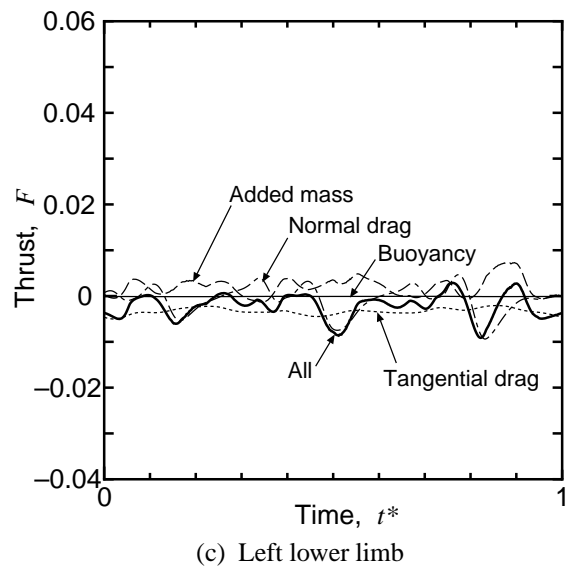
Fig. 2 Contribution of each fluid force to thrust for one cycle



(a) Trunk



(b) Left upper limb



(c) Left lower limb

Fig. 3 Contribution of each fluid force to thrust for one cycle

て働くが、その他の成分は小さいことがわかる。図3 (b) は左上肢(上腕, 前腕, 手部)に働く流体力の推力成分を示したものであり、これより図2の $t^* = 0.4 \sim 0.5$ および $t^* = 0.9 \sim 1$ 付近のピークは上肢によるものであることがわかる。また、上肢による推力のうち主要な成分は法線方向抵抗力であり、付加質量力の寄与は小さいことがわかる。図3 (c) は左下肢(腿, 脛, 足部)についての結果であり、付加質量力成分はいくらか正の推力を発生しているものの、全体としてはほとんど推力発生には寄与していないことがわかる。

3.3 バタ足の効果 前節において、下肢によるバタ足が推力発生に寄与していない結果となったが、これは必ずしもバタ足は無くても良いことは意味しないと考えられる。まず第一に、図3 (c)において付加質量力は正の推力を発生しているため、バタ足自体は推力を出そうとしているが、手のかきによって得られる推力が大きく泳速度が速くなり接線方向抵抗力が大きくなってしまい、バタ足による推力が見かけ上現れなくなっていることが考えられる。第二に、バタ足は下半身を持ち上げる効果を発揮していると考えられる。クロール動作は基本的に身体の下側で手をかくため、手のかきにより身体全体を起し下半身を沈めるモーメントが発生する。それをバタ足により打ち消しているものと考えられる。そこでバタ足の振幅を変化させ、泳ぎに与える影響を検討した。結果を図4に示す。図4は図1 (e)の $t^* = 0.5$ と同じ瞬間の様子であり、パラメータ r_{fk} はバタ足の関節角振幅の大きさの比を表す。 $r_{fk} = 1.0$ のときが通常の大きさの場合であり、 $r_{fk} = 0$ のときが全くバタ足をしない、足のみがけのび状態の場合に相当する。図4 (b)の $r_{fk} = 0.5$ の場合には、明らかに下半身が沈んでしまっていることがわかる。また r_{fk} が0.8および0.5それぞれの場合のストローク長は1.31, 1.19となり、既報⁽¹⁾で示した r_{fk} が1.0の場合のストローク長1.36と比較すると小さくなっており、バタ足の大きさが小さくなると、泳速度も低下することが確認された。なお $r_{fk} = 0.4$

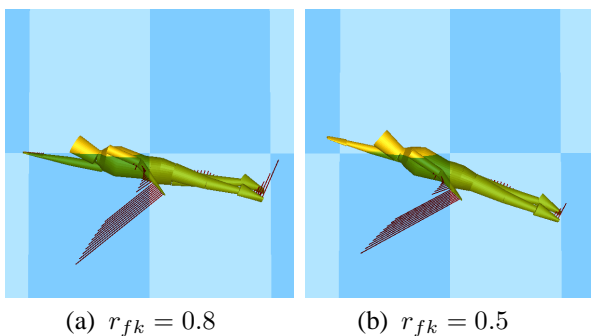


Fig. 4 Effect of flutter kick

以下では、安定に遊泳せず定常状態とならなかった。

3.4 自己推進時抵抗の算出 水泳における力学的研究においては従来、自己推進時抵抗 (active drag) が重要なパラメータとされている。自己推進時抵抗とは、泳者が自分で推進している際の動的な抵抗と考えられ、 D_a と表記すると D_a は高木ら⁽³⁾によれば次式で定義される。

$$D_a = T_0 - T_r \quad (1)$$

ここで T_r, T_0 は、高木らの実験に即して言えば、回流水槽中で泳者にハーネスを取り付けて一定のストローク頻度で泳動作を行わせ、水槽流速を変化させたときに人体からハーネスに作用する余剰推進力であり、 T_r は流速がある所望の値の場合、 T_0 は流速が0の場合である。よって、流速と泳者の泳速度が釣り合っている場合、すなわちハーネスなどが無い自由な泳運動の場合には $T_r = 0$ となるので、結局

$$D_a = T_0 \quad (2)$$

となり、ある泳動作に対して、同じ泳動作のまま流速(泳速度)が0になった場合の余剰推進力と等しい。そこで本シミュレーションにおいて、同じ泳動作として、身体の相對運動(関節角)および身体の絶対運動が同じ状態のままで、仮想的に泳速度が0の推進しない状態を設定し、余剰推進力を求めた。まず余剰推進力の時間変動の結果を図5に示す。実線は推進している場合であり、図2の太い実線と同一である。破線が推進しない場合の余剰推進力の時間変動であり、最大値では推進する場合より3倍程度大きくなっていることがわかる。この余剰推進力の時間平均 T_0 を求めると $T_0 (= D_a) = 0.038$ を得た。さらに身体表面積と泳速度から係数の形で表すと、自己推進時抵

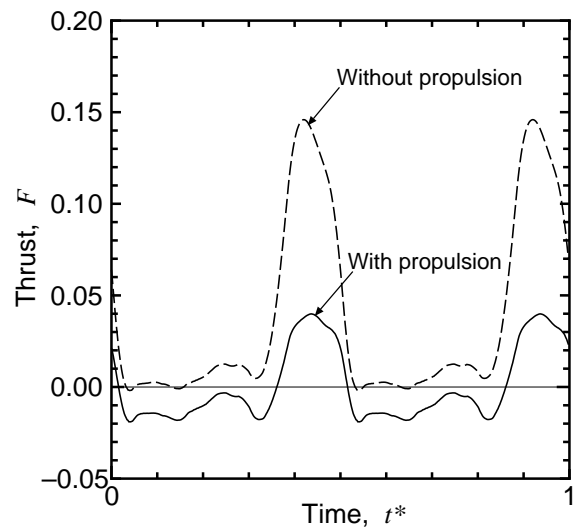


Fig. 5 Time history of residual thrust

抗係数 $C_{Da} = 0.082$ を得た．ここで，泳速度を重力加速度と基準長さ（身長）の積の平方根で割ったものであるフルード数 F_r を本泳動作について求めると， $F_r = 0.29 \approx 0.3$ を得る． $F_r = 0.3$ における C_{Da} は従来の何種類かの測定実験によれば， $0.03 \sim 0.06$ 程度⁽²⁾ と報告されており，本シミュレーションでの値 0.082 はそれと比較すると大きめである．この誤差の原因としては，本シミュレーションにおける計算精度の問題もあると考えられるが，従来の研究における測定実験の問題もあると考えられる．すなわち図 5 に示したように，全く同じ泳動作で，推進する場合と推進しない場合では，手のかきによる推力が 3 倍も異なる．よって従来の自己推進時抵抗測定実験の際に，水槽流速が小さい場合には同じストローク頻度であっても人間が力負けし，その結果余剰推進力が小さくなっている可能性があるのではないかと考えられる．

また，そもそも遊泳時の抵抗として従来の定義による自己推進時抵抗を用いることの妥当性についても，議論の余地があると考えられる．式 (2) の自己推進時抵抗が余剰推進力と等しいという意味は，人間が出す推力は一定のまま，流速が 0 になれば抵抗は 0 になるから，遊泳時の抵抗と釣り合う推力は流速を 0 にすれば求まる，との考え方に基づいている．しかし実際は本シミュレーションで図 5 で示したように，自己推進時抵抗として測定している量は，むしろ流速の有無による手のかきの推力の変動分に大きく影響されてしまうと考えられる．本問題についてはさらなる検討が必要であろう．

3.5 ロール運動 クロール泳においては体幹のロール運動が特徴的である．そこで体幹のロール角変動および各流体力によるロールモーメントへの寄与の解析を行った．まず図 6 に 1 周期分の体幹のロール角変動の解析結果を示す．体幹は三次元運動するため一般にロール角の定義は単純ではないが，剛体としての人体の三本の慣性主軸のうち一つは，体幹長手軸と常にほぼ平行であったので，この慣性主軸について角速度を積分して求めたもの，すなわち力学的なロール角を実線で示す．進行方向に向かって右ねじの方向を正とする． $t^* = 0.15$ および $t^* = 0.65$ 付近でピークとなることがわかる．一方破線は体幹長手軸まわりの体幹の傾きを幾何学的に求めたものであり，体幹のロール角として実際に観測される値に相当する．こちらは $t^* = 0$ および $t^* = 0.5$ 付近でピークとなることわかる．この二種類のロール角の差は，四肢，特に上肢が体幹に対して運動するため，体幹長手軸にほぼ垂直な二本の慣性主軸の向きが変化することによる．

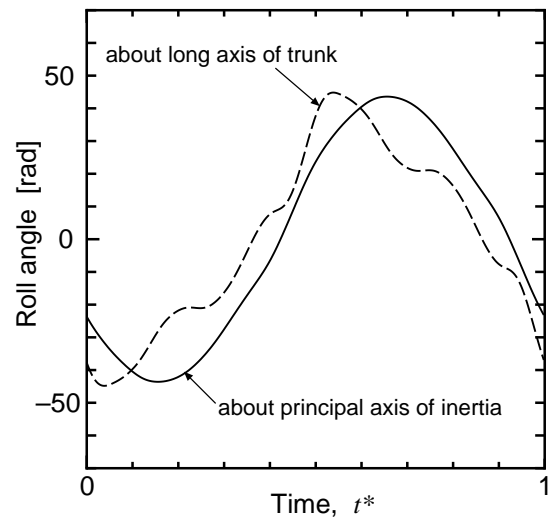


Fig. 6 Body roll angle for one cycle

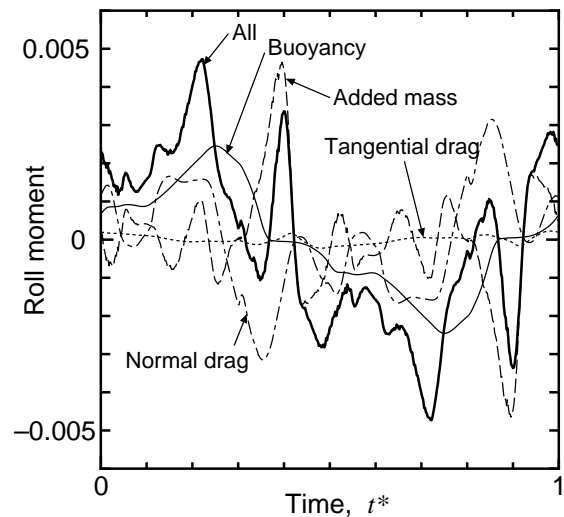
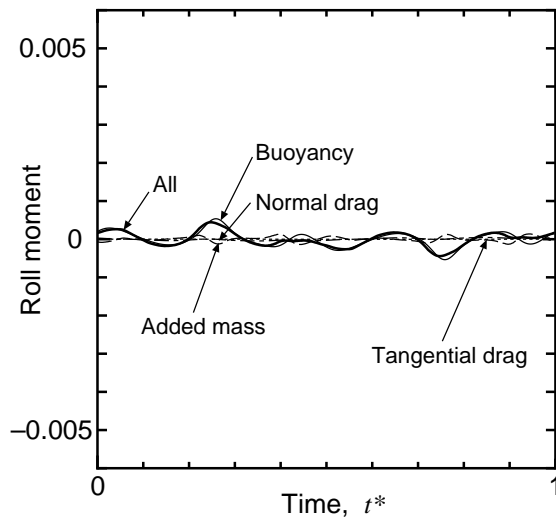


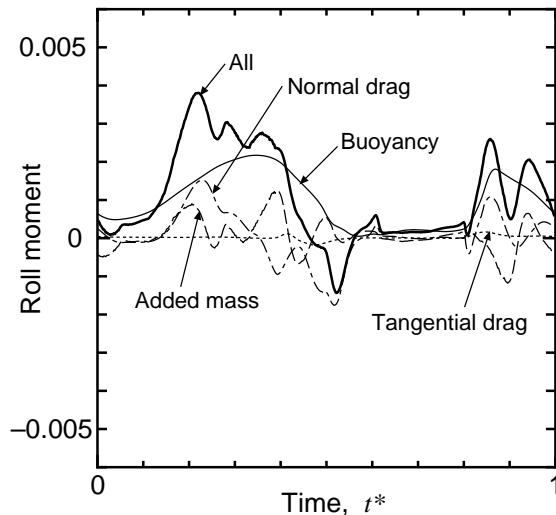
Fig. 7 Contribution of each fluid force to roll moment for one cycle

図 7 は，図 6 の実線の慣性主軸まわりのロール運動への，各流体力によるロールモーメントへの寄与の解析結果である．付加質量力，法線方向抵抗力，浮力が絡み合った複雑な傾向を示しているが，基本波の位相は浮力とほぼ同位相のように見受けられ，浮力がロールモーメントの基本波を決定付ける主要素であることがわかる．これは Yanai⁽⁵⁾ が最近，人間の泳者の実験により得た結論と一致するものとなった．

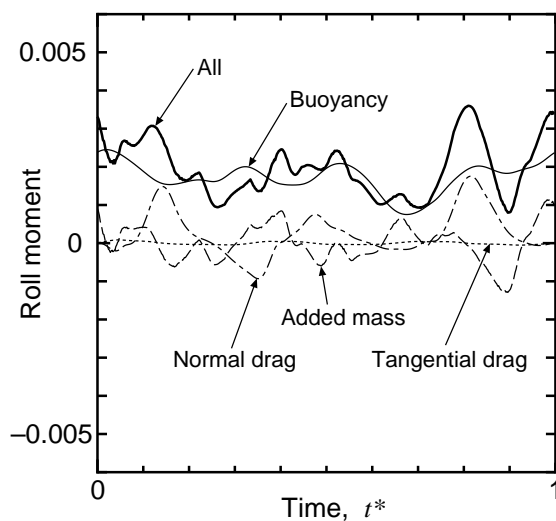
ただし浮力以外の流体力成分により，ロールモーメントはいくつかのピークを持っている． $t^* = 0, 0.2, 0.4$ 付近には正のピークがあり， $t^* = 0.5, 0.7, 0.9$ 付近には負のピークがある．そこで図 8 に示すように，体幹，左上肢，左下肢のそれぞれの寄与を求めた．図 8 (a) の体幹については，ロールモーメントはほとんど発生していないことがわかる．図 8 (b) の左上肢につ



(a) Trunk



(b) Left upper limb



(c) Left lower limb

Fig. 8 Contribution of each fluid force to roll moment for one cycle

いては、 $t^* = 0.2$ 付近のいわゆるキャッチの局面において法線方向抵抗力，付加質量力および浮力により，正のロールモーメント，すなわち身体を進行方向に向かって右ねじの方向にロール変位させるモーメントが生じていることがわかる．そして $t^* = 0.5$ 付近のプッシュ局面では，逆方向のモーメントが生じている．よって，図 7 における $t^* = 0, 0.2, 0.5, 0.7$ 付近での，正，正，負，負のピークはそれぞれ，右手のプッシュ，左手のキャッチ，左手のプッシュ，右手のキャッチに対応することがわかる．また図 8 (c) の左下肢の結果については，変動が大きいものの常に正の値となっており，浮力が寄与していることがわかる．しかし左下肢の浮力の成分は右下肢によって打ち消される．

また図 7 の $t^* = 0.4$ における正のピークについては，左手のプル時，右手のエントリー時 (図 8(b) の $t^* = 0.9$ 付近での極小点が右手の場合 $t^* = 0.4$ 付近の正のピークとなる)，および右足のキック (図 8(c) の $t^* = 0.9$ 付近での極小点) が重なり合うことで発生していると考えられるが，本ピークの大きさは泳フォームにも依存するものと考えられる．

3.6 推進効率 本節ではクロール泳における推進効率，すなわち力学的なエネルギー効率を考える．表 2 に，定常状態における 1 周期の消費パワーの時間平均値の算出結果を各方向成分および流体力成分別に (1)~(9) として示す．消費パワーの算出方法としては，人体体節をモデル化した楕円錐台をさらに分割した楕円板一つ一つについて，流体力のベクトルと絶対速度ベクトルの内積を取り全身について合計することで行った．(1)~(9) の絶対値を比較すると，(1) の接線方向抵抗力の x 成分，(2) の法線方向抵抗力の x 成分，(8) の法線方向抵抗力の z 成分の三つが主要成分であることがわかる．そこでそれぞれについてさらに体幹 (頭部・頸部を含む)，上肢，下肢の部位別に a~c として求めた．まず (1) の接線方向抵抗の x 成分は受動抵抗に対応しており，部位別に見ると体幹と下肢が大きい．次に (2) の法線方向抵抗の x 成分に関しては，上肢の寄与が支配的であり，これは手のかきによる推力発生に対応する．また (8) の法線方向抵抗力の z 成分に関しては，下肢の寄与が最も大きく，これはバタ足による上下方向の流体力の発生によるものと考えられる．そして (1)~(9) を合計した (10) を分母とし，分子として (1) の x 方向接線抵抗力成分をとって算出した場合には，表 2 に示すように推進効率は 0.2 となった．また分子として，クロール泳中の接線方向抵抗力によるパワーをとるのではなく，けのび姿勢で同じ速度で推進しているときの抵抗によるパワーの算出結果 0.0226 をとった場合にも，推進効率は 0.212

Table 2 Calculated results of averaged power and propulsive efficiency

Averaged power	
<i>x</i> direction, tangential drag	0.0212 (1)
- trunk	0.0088 (1a)
- upper limb	0.0033 (1b)
- lower limb	0.0092 (1c)
<i>x</i> direction, normal drag	0.0327 (2)
- trunk	0.0018 (2a)
- upper limb	0.0276 (2b)
- lower limb	0.0034 (2c)
<i>x</i> direction, added mass	-0.0044 (3)
<i>y</i> direction, tangential drag	0.0004 (4)
<i>y</i> direction, normal drag	0.0063 (5)
<i>y</i> direction, added mass	0.0005 (6)
<i>z</i> direction, tangential drag	0.0014 (7)
<i>z</i> direction, normal drag	0.0488 (8)
- trunk	0.0002 (8a)
- upper limb	0.0217 (8b)
- lower limb	0.0269 (8c)
<i>z</i> direction, added mass	-0.0007 (9)
Total of (1) ~ (9)	0.1062 (10)
Power in gliding case	0.0226 (11)
Propulsive efficiency (defined as (1)/(10))	0.200
Propulsive efficiency (defined as (11)/(10))	0.212

と約 0.2 となった。分子としてどちらをとるかは推進効率の考え方によるが、いずれにしる本シミュレーションでは推進効率は約 0.2 との結果を得た。これは一般的なスクリーブローラの推進効率 0.4~0.65 に比べて小さいが、その一因としてはバタ足などによる *z* 方向のエネルギーロス(表 2 の (8) の成分) が大きいことが挙げられる。しかし 3・3 節で検討したように、バタ足は下半身を持ち上げる効果を発揮しており、バタ足を行わないわけにはいかないの、これは人間のクロール泳特有の問題であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、著者らが開発した水泳人体シミュレーションモデル SWUM を用いて 6 ビートクロール泳についての解析を行い、水泳における力学的問題に対して理論的な検討を行い、力学的な考察を加えた。得ら

れた主な結論を以下に示す。

(1) 推力はほとんど手のかきによる法線方向抵抗成分により発生している。

(2) バタ足はほとんど推力を発生していないが、下半身を持ち上げる効果を発揮している。

(3) 本シミュレーションにおける自己推進時抵抗係数は 0.082 と、従来の実験値と比較してやや大きめとなった。

(4) ロール運動を決定付けているのは浮力であるが、その他の流体力成分も局所的なピークを発生させている。

(5) クロール泳の推進効率約 0.2 を得た。

なお本報告で行った解析はあくまで一つの泳動作についての一例に過ぎない。本報告で得られた結論の定量性については、今後より厳密な泳動作の計測や、より多くの泳動作の解析を重ねることなどにより、さらに検討する必要があると考えている。

なお本シミュレーションモデルに関する情報は web site (<http://www.swum.org/>) にて入手可能である。

文 献

- (1) 中島 求・佐藤 憲・三浦康郁, 全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の開発, 機論, (2004).
- (2) 高木英樹, 人はどこまで速く泳げるのか, (2002), 87-90, 岩波書店.
- (3) 高木英樹・清水幸丸・小段範久, 水泳における自己推進時抵抗に関する流体力学的研究, 機論, 64-618, B(1998), 79-85.
- (4) Toussaint, H.M., et al., de Groot, G., Savelberg, H.H.C.M., Vervoorn, K., Hollander, A.P. and van Ingen Schenau, G.J., Active drag related to velocity in male and female swimmers, *Journal of Biomechanics*, 21 (1988), 435-438.
- (5) Yanai, T., Buoyancy is the primal source of generating bodyroll in front-crawl swimming, *Journal of Biomechanics*, 37 (2004), 605-612.
- (6) CEC・IPA, 教育用画像素材集(水泳), <http://www2.jyose.pref.okayama.jp/cec/suiei/>.
- (7) Counsilman, E.J., *The Science of Swimming*, (1968), 19-66, Prentice-Hall.
- (8) Maglischo, E.W., *Swimming Even Faster*, (1993), 361-412, Mayfield.