416 水泳人体シミュレーションモデルSWUMによる 6ビートクロール泳の推進効率の算出

Estimation of Propulsive Efficiency for Six Beat Front Crawl by Swimming Human Simulation Model SWUM

○ 中島 求 (東工大)

Motomu Nakashima, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo**Key Words:** Bio-fluid Mechanics, Biomechanics, Bio-Motion, Swimming, Simulation,
Propulsive Efficiency

1. 緒 言

著者らはすでに、水泳運動における身体全体のダイナミクスを考慮できる水泳人体シミュレーションモデルSWUMを開発し流体力係数の同定を行い、実際の泳映像との比較により本シミュレーションモデルの妥当性を確認している(1)~(4)。ここで船舶や水中ロボットなどの水中推進機構においては、入力した全パワーに対する推進に有効に用いられたパワーの比である推進効率は、重要な性能評価指標の一つであるが、全身運動である人間の水泳における推進効率の算出をシミュレーションにより試みた例は無い。そこで本報告ではSWUMを用いて6ビートクロール泳の推進効率の算出を行う。

2. シミュレーションモデルSWUM

図1に本シミュレーションモデルの概念図を示す。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浮力のほかに、流体の付加質量による慣性力、接線・法線方向抵抗力を考慮し、流れ場は解かず、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。図2にこの流体力のモデル図を示す。付加質量力および接線・法線方向抵抗力については、図2(a)に示すように、身体をモデル化した楕円錐台を長手方向に分割した各楕円板に働く流体力を計算する。浮力については図2(b)に示すように、静止流体に働く重力による圧力を楕円板表面についてさらに分割して積分することにより求める。これらの流体力モデルにおける諸係数については、既報(2)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

Fig. 1 Analytical model of swimming human

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(3)(4)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やや低めなものの、定性的には現象を表現できることがわかって

いる。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は、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(5)の模範泳の映像を参考に各関節の運動を決定した。

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。ストローク周期は実際の映像と同じ1.96 sとした。また身体形状については、図3に示すように、日本人20代男子平均の体型とし、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。

(a) Fluid forces except buoyancy

(b) Buoyancy is calculated by integrating pressure force on divided quadrangles

Fig. 2 Analytical models for fluid force

Fig. 3 Body geometry (Male of 20 to 29 years)

3. 解析結果

本シミュレーションにおいては数周期経過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ので、以降の議論ではこの定常状態のみを扱う。まず図 4 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。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 4 における奥行き方向) を y とする。

次に表 1 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 $a \sim c$ 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、

Fig. 4 Simulation results of swimming motion for half cycle from side view

Table 1 Calculated results of averaged power and propulsive efficiency

Averaged power	
x direction, tangential drag	0.0212 (1)
- trunk	0.0088 (1a)
- upper limb	0.0033 (1b)
- lower limb	0.0092 (1c)
x direction, normal drag	0.0327 (2)
- trunk	0.0018 (2a)
- upper limb	0.0276 (2b)
- lower limb	0.0034 (2c)
x direction, added mass	-0.0044 (3)
y direction, tangential drag	0.0004 (4)
y direction, normal drag	0.0063 (5)
y direction, added mass	0.0005 (6)
z direction, tangential drag	0.0014 (7)
z direction, normal drag	0.0488 (8)
- trunk	0.0002 (8a)
- upper limb	0.0217 (8b)
- lower limb	0.0269 (8c)
z 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

表 1 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 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、いずれにしろ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ンプロペラの推進効率 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 1 の (8) の成分) が大きいことが挙げられる。しかしバタ足は下半身を持ち上げる効果を發揮していると考えられるため、バタ足を行わないわけにはいかないので、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

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おける推進効率を算出した。今後、泳法、泳フォームの違いによる推進効率の変化等の解析を行いたいと考えている。

文 献

- (1) 中島, 機講論, 02-35, (2003), 317-318.
- (2) 佐藤・中島, 機講論, 04-1, (2004), 165-166.
- (3) 中島, 機講論, 04-1, (2004), 167-168.
- (4) Motomu Nakashima et al., The Engineering of Sport 5, Vol.1, (2004), 594-600.
- (5) CEC・IPA, 教育用画像素材集 (水泳), (<http://www2.jyosei.pref.okayama.jp/cec/suiei/>).