水中ロボットアームを用いた水泳時の四肢に働く非定常流体力の解明* (水中ロボットアームの開発と流体力測定実験)

高橋 明 美^{*1}, 中 島 求^{*2}

Clarification of Unsteady Fluid Force Acting on Limbs in Swimming Using an Underwater Robot Arm (Development of an Underwater Robot Arm and Measurement of Fluid Force)

Akemi TAKAHASHI and Motomu NAKASHIMA^{*3}

^{*3} Department of Mechanical and Environmental Informatics, Graduate School of Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

The objective of this study was to clarify the unsteady characteristics of the fluid force acting on limbs during swimming. For this objective, an underwater robot arm was developed in this paper. The robot arm has five degrees-of-freedom in order to perform the various complicated limb motions during swimming. In addition, by changing the hand model into the foot one, the robot also can perform the lower limb motions. The joint torques and the resultant thrust can be measured by the force sensors attached to the robot. In a circulating water tank, an experiment to measure the fluid force was conducted for four swimming strokes of the upper and lower limbs. From the experiment, it was found that even the slight difference of the fluid forces between slightly different swimming motions can be quantified by the developed experimental system. In addition, it was suggested that 'nipping' the water by both lower limbs during the kick of the breaststroke almost does not affect the thrust generation. The developed experimental system with the robot arm is useful not only for measuring the unsteady fluid force, but also for the flow visualization in the future studies.

Key Words: Bio-Fluid Mechanics, Fluid Force, Swimming, Underwater Robot Arm

1. 結 言

水泳においては四肢に働く流体力により発生する推力が重要であるが、その特性はいまだ十分明らかではない。これは、人間の四肢の形状が複雑であることに加え、その運動が非定常であり、発生する流体力も非定常性が強いことが理由として挙げられる。例えばクロールにおける手の動作軌跡は、絶対空間において泳者を横から見た場合、歪んだ楕円状の軌道を描いており⁽¹⁾、手が一定の深さでまっすぐかいているわけではない。このような理由から、近年では水泳において四肢に働く非定常の流体力を定量化する試みが多く行われている。その方法として第一に、泳者に何らかの計測装置を直接装着して遊泳時の計測を行う方法が挙げ

られる。例えば Takagi ら⁽²⁾は、泳者の手に圧力センサを装着し、あらかじめ風洞実験により得られた流体力と圧力との関係から、泳動作中の手に働く流体力を推定している。これは優れたアイデアであるが、圧力センサと流体力の関連付けが定常流の風洞実験で行われているため、水泳の非定常性が強い泳動作中においても、その関連付けが有効であるかには議論が残ると考えられる。また、泳者に牽引装置などを装着して推力を測定する方法についても、何かを牽引した時点で自由泳の状態とは異なってしまふことが問題となる。またロードセルなどの力センサを泳者の身体に埋め込むことは技術的にも倫理的にも不可能である。よって、実際の泳者を用いて、四肢に働く非定常流体力を直接測定することには困難を伴うのが現状である。

次に二番目の方法として、CFD (Computational Fluid Dynamics) によるアプローチが挙げられる。Bixler ら⁽³⁾、Rouboa ら⁽⁴⁾、および Sato ら⁽⁵⁾は、コンピュータ上に手や前腕のモデルを構築し、CFD により流体力を算出している。また Keys ら⁽⁶⁾は全身のモデルを構築し、ドル

* 原稿受付 2008 年 8 月 1 日。

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

^{*2} 正員、東京工業大学大学院情報理工学研究科。

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

フィンキックの解析を行っている。CFD の場合、泳者まわりの流れを解いているので、流れ場全体が把握できるという大きなメリットがあり、流体力発生メカニズム解明には非常に有効な手段であると考えられる。しかしあくまでシミュレーションに過ぎないため、得られた非定常流の流体力を何らかの方法で実験的に検証することが依然として必要となる。

三番目の方法として、泳者のかわりに模型を用いた測定実験が挙げられる。一般に、模型には外部、内部を問わずセンサ類を自由に取り付けることが可能であり、ロボットのように機械的に駆動すれば同じ動作を繰り返し行わせることも容易である。従来の研究では、Pai⁽⁷⁾は円柱に、Kudo ら⁽⁸⁾は手と前腕を模擬した模型に、それぞれ 1 自由度の回転運動を行わせ、作用する非定常流体力を測定している。著者ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾も水泳人体シミュレーションモデル SWUM の提案を行い、この中で流体力モデルに含まれる各流体力係数を決定するため、四肢模型に 1 自由度の揺動運動を行なわせ非定常流体力の測定を行っている。Sidelnik ら⁽¹¹⁾は近年、モータ駆動により 2 自由度運動が可能な腕部模型を作製し、非定常状態における流体力測定実験を行っている。このようにすでに模型を用いた測定実験は多く行われているが、その模型の運動自由度は、ほとんどが 1 自由度、Sidelnik の実験でも 2 自由度に過ぎなかった。しかし実際の人間の泳動作においては、例えば上肢の場合には肩甲骨の動きと比較的動作範囲が狭い手首関節の自由度を除いても、肩に 3 自由度、肘に 2 自由度の計 5 自由度を有しており、これまでの模型実験では、四肢に働く流体力を明らかにするのに十分とは言い難かった。

以上の状況に鑑み、本研究では 5 個の関節自由度を有し、従来の研究より大幅に人間の泳動作に近い動作が可能な水中ロボットアームを用いて実験を行い、水泳時の四肢に働く非定常流体力特性を解明することを目的とする。本報ではその第 1 段階として、水中ロボットアームを開発して非定常流体力測定実験を行い、上肢および下肢のさまざまな泳動作に対して有意な測定結果を得ることを目的とする。

2. 水中ロボットアーム

2.1 機構仕様 本水中ロボットアームは著者らと(株)三井造船昭島研究所により共同開発された。図 1 にロボットアームの模式図および写真を示す。本ロボットアームは胴体部・肩部・上腕部・前腕部・手首によって構成される(本ロボットアームは上肢・下肢両方の動作が可能であるが、ここでは上肢として説明する)。肩部は胴体部に固定された A 軸まわりの回転(Flapping)を行

(a) Schematic view

(b) Photograph

Fig. 1 Developed robot arm

い、上腕部は肩部に固定された B 軸まわりの回転(Rowing)と回旋(Feathering)の 2 自由度動作を行う。以上の 3 自由度は胴体部に内蔵された 3 個のモータ(出力 50W)により駆動される。前腕部は肘の屈曲/伸展、回内/回外を行う。屈曲/伸展・回内/回外はそれぞれ、上腕部・前腕部に内蔵されたモータ(出力 20W・出力 9W)により駆動される。以上の 5 自由度の組み合わせによって泳動作を再現する。なお現在は手首/足首における関節自由度は有していない。これは、本関節自由度の影響は他の関節自由度に比べれば小さいと考えられるためと、構造上の制約の問題のためである。上腕部、前腕部、手首それぞれの付け根部分にはひずみゲージを用いた 3 軸モーメントセンサが取り付けられ、人体の肩、肘、手首に相当する箇所のモーメントを計測する。胴体部上面には分力計が取り付けられ、ロボットアーム全体に作用する荷重を計測する。

各部の寸法は日本人標準体型⁽¹²⁾をもとに決定した。上腕部および前腕部の長さの比率は、上肢と下肢の両方の特徴を模擬するため、日本人標準体型における上腕と前腕の比率および上腿と下腿の比率の中間となるようにした。表 1 に上腕部、前腕部の寸法および重量を示す。また下肢の動作を行う際には、上腿に相当する上腕部の径と下腿に相当する前腕部の径の比率が日本人標準体型と同等になるよう、上腕部に上腿を模擬する発泡ウレタン製のアタッチメントを取り付けた。図 2 に上腿を模擬するアタッチメントの外観を示す。

上腕・前腕・上腿についてはアタッチメントを取り付けていないが、上腿の径の変化率が 0.091 であるのに対して下腿は 0.070, 上腕は 0.014, 前腕は 0.035 となっており、上腕・前腕・下腿は径の変化率が上腿と比較して小さい。そのためアタッチメントを取り付けずに円柱として表現しても問題は少ないと考えられる。ここで、径の変化率とは各部位の最大径と最小径の差を長さで除したものである。手部は着脱可能な構造とし、上肢の動作を行う際には手部模型を、下肢の動作を行う際には足部模型を取り付けた。図 3 に各模型の写真を、表 2 に各模型の寸法を示す。各模型の寸法も上腕部および前腕部の寸法と同様に日本人標準体型における上腕、前腕、手の比率と上腿、下腿、足の比率と同等になるよう決定した。手部模型としてクロール、平泳ぎ、バタフライ用の右手と背泳ぎ用の左手、足部模型としてクロール、背泳ぎ、バタフライ用の足先を伸ばした底屈状態と平泳ぎ用の足先を立てた背屈状態

Table 1 Size and weight of the robot arm

	Length [mm]	Diameter [mm]	Weight [kg]
Upper arm	370	75	1.95
Forearm	325	70	1.30

Fig. 2 Attachment to simulate thigh

Fig. 3 Photograph of replica

Table 2 Size of hand/foot replicas

	Length [mm]	Width [mm]	Weight [kg]
Right hand	201	100	0.24
Left hand	185	99.1	0.23
Plantarflexed foot	221	86.5	0.24
Dorsiflexed foot	221	86.5	0.22

の合計 4 種類を作製した。模型材料としては、表面部に比重 1.04 のポリウレタン樹脂、内部に発泡率 20 倍の硬質発泡ウレタンを使用した。

2.2 計測制御システム 図 4 に計測制御システムの構成を示す。サンプリング周波数は計測・制御ともに 200Hz である。泳動作はコンピュータ制御により任意に設定可能である。泳動作の入力データとして各関節の関節角 1 周期分を csv 形式で与えれば、システムが自動的に起動時および停止時用の運動データ作成とサンプリング周波数に合わせた時間補間を行い、制御用の角度指令データを作成する。動作時には角度指令データを DA 変換した後、サーボモータに inputs する。動作データとして各関節の角度 5ch, 荷重データとして各関節の 3 軸まわりモーメント 8ch とロボットアーム全体に働く力 3ch の合計 16ch を計測した。そしてこれらのデータを AD 変換した後 csv 形式で出力する。なお手首部の回旋方向のモーメントは微小と考えられるため測定しなかった。

3. 非定常流体力測定実験

3.1 実験装置 実験は(株)三井造船昭島研究所の船舶実験用垂直循環型回流水槽を用いて行われた。測定部は長さ 5.5m, 幅 2.0m, 水深 1.2m であり、流速は 0.2m/s ~ 2.5m/s に設定可能である。水槽上部の台車から分力計およびロボットアームを吊り下げて計測を行った。分力計は、水平面内で流れに対して平行な成分と垂直な成分の荷重、および鉛直軸まわりのモーメントを計測した。図 5 にロボットアームの取り付け方法を示す。台車と分力計はシャフトで接続されるため、テンションベルトによりシャフトを固定用ブロックに押し付け、無駄な振動がなるべく発生しないようにした。また分力計については、ロボットアーム胴体部上面に直接取り付けするため防水型を用いた。図 6 に上肢・下肢の場合のロボットアーム取り付け向きをそれぞれ示す。上肢の動作時には腕部を前に、下肢の動作時には腕部(脚

Fig. 4 Measurement and control system

Fig. 5 Fixing method of the robot arm

Fig. 6 Two direction settings

部)を後ろにするよう取り付けた。

3.2 試技内容 本実験では上肢および下肢の動作としてそれぞれクロール、平泳ぎ、バタフライ、背泳ぎの4泳法を行った。クロール上肢では手を顕著にS字状にかくS字ストローク、比較的まっすぐかくI字ストロークの2種類を実施した。また平泳ぎ下肢の場合には、キック時に両脚が流体を挟み込むことが推力に及ぼす影響を調べるために、図7(a)に示す通常の状態と、図7(b)に示す身体矢状面に十分な大きさの板を設置した状態の2種類を実施した。後者では、理想流体における鏡像効果の理論に基づき、板の反対側にも脚部が

あり流れが対称な状態を模擬することを意図した。各試技の実験条件として、1周期分の関節角、周期、ロボットアーム取り付け高さ、流速を与えた。各試技における周期および流速を表3に示す。1周期の関節角は、教育用画像素材として公開されている日本水泳連盟監修の模範泳映像⁽¹³⁾に基づき、著者らが開発した水泳人体シミュレーションソフトウェア Swumsuit⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を使用して決定した。ロボットアーム取り付け高さは、入出水のタイミングが模範泳となるべく合うように目視で調整し決定した。各試技の開始前に腕部を水平面内で流れに対して平行にした状態で荷重およびモーメントの計測を行い、これを各試技の計測結果から差し引くことによりゼロ点とした。流速は、水泳時の推進方向速度がストローク中ほぼ一定であるとみなして、1周期で身長は何倍前進したかを表す無次元ストローク長が泳映像となるべく一致するように決定した。なお本研究でロボットに行わせた泳動作速度、およびそれに対応する流速は実際の映像に比べて3~5倍、さらに今回用いた映像は競技時の全力泳ではないので、全力泳と比べると4~7倍遅い。これはロボットの出力パワーおよび機構部剛性の制限のためである。一般に水中

Fig. 7 Two settings for breaststroke (lower limb)

Table 3 Experimental conditions

		Cycle [s]	Flow speed
			[m/s]
Upper limbs	Crawl S	5.7	0.5
	Crawl I	5.7	0.5
	Butterfly	5.5	0.4
	Breaststroke	7.1	0.25
	Backstroke	6.0	0.4
Lower limbs	Crawl	6.7	0.3
	Backstroke	6.7	0.3
	Butterfly	5.5	0.3
	Breaststroke	6.4	0.2

においては、この速度の違いはレイノルズ数 Re の違いとして、流体力特性に影響を及ぼす。しかし本実験では $Re \approx 2 \sim 5 \times 10^4$ であり、全力泳の場合では $Re \approx 1.4 \sim 2 \times 10^5$ である。この Re の変化の範囲では、人体の四肢に近い形状である円柱や平板などの、後方に大きな剥離領域が生じる物体周りの流れ場は、 Re が変化しても大きく変化せず、そのため物体に働く流体力の特性もほとんど変化しないことが知られている⁽¹⁶⁾。よって本実験で得られた流体力特性は、全力泳の高速な状態に適用しても問題は少ないと考えられる。

3.3 実験結果および考察 まず図 8 に各モータの角度の一例として S 字ストロークのクロール 1 周期分を示す。縦軸に角度、横軸に 1 周期を 1 とする無次元時間 t をとり、実線が指令角、破線が計測角を示す。肘の屈曲/伸展において最大約 10 度の差が生じているものの、全般的に良く追従して動作していることがわかる。他の試技においても同様の結果が見られ、本ロボットアームおよび制御システムにより所望の多自由度運動が実現されていることが確認された。

図 9, 10 に水槽の斜め上方から撮影した S 字ストロークのクロール 1 周期分の様子と、I 字ストロークのクロール 1 周期のうち手が水中をかくている間の様子をそれぞれ示す。S 字ストローク、I 字ストロークともに $t = 0.8 \sim 0.9$ にかけて腕を水槽底面に向かって動かし、 $t = 0.9$ 付近で手の水深が最も深くなり、 $t = 0.9 \sim 1.0$ にかけて腕を水面付近まで引き上げている。すなわち、 $t = 0.8 \sim 0.9$ において水をかきよせるプル動作、 $t = 0.9 \sim$

1.0 において水を押すプッシュ動作を行っていることがわかる。次に、荷重およびモーメントの計測結果を示す。図 11 に分力計の座標系を、図 12 に各モーメントセンサの座標系を、図 13 に S 字および I 字ストロークのクロール 1 周期分の計測結果を示す。以降示す結果は全て、5 周期分のデータを平均した 1 周期分のデータにカットオフ周波数 8Hz でローパスフィルタをかけている。図 13(a)に分力計、図 13(b)に肩のモーメントセンサ、図 13(c)に肘のモーメントセンサ、図 13(d)に手首のモーメントセンサの結果をそれぞれ示す。プル・プッシュ動作時にあたる $t = 0.8 \sim 1.0$ に注目すると、図 13(a)(i)より、S 字ストロークでは最大約 50N、I 字ストロークでは最大約 30N の推力を発生していることがわかる。これらの値は Takagi らの実験により得られたクロール泳における推力と同程度であり、測定結果の有意性および妥当性が確認できる。また各モーメントの計測結果を見ると、S 字ストロークと I 字ストロークでは特にプル・プッシュ動作時において特性が異なっており、本実験システムによって泳動作の違いによるモーメントの違いが測定可能であることがわかる。

次に図 14, 15 に平泳ぎ上肢における動作の様子の一部と分力計 F_x の 1 周期分の結果をそれぞれ示す。 $t = 0.3 \sim 0.4$ のプル動作により推力が発生し、 $t = 0.4 \sim 0.6$ のリカバリで負の推力が発生していることがわかる。特に $t = 0.4$ 付近のプル動作からリカバリ動作への転換時に最も大きな負の推力が発生している。これはロボットアームの関節可動範囲の制限からリカバリ動作が不

Fig. 8 Command and measured angle

Fig. 9 Movement of robot arm in crawl-S upper limb

自然になったためであるが、水中で水をかき推力を得る動作を研究対象とする分には問題は少ないと考えられる。

図 16, 17 には背泳ぎ上肢における水槽の横から撮影した動作の様子の一部と分力計 F_x の 1 周期分の結果をそれぞれ示す。 $t = 0.2 \sim 0.3$ のプル動作, $t = 0.3 \sim 0.4$ のプッシュ動作によって最大 15~20N の推力が発生していることがわかる。

図 18, 19 にクロールの下肢 (バタ足) における動作の様子の一部と分力計 F_x および股関節 (上肢の場合の肩) の M_y の結果 1 周期分をそれぞれ示す。 1 周期に両脚が 6 回キックする 6 ビートクロールであるので、片脚では 1 周期に 3 回キックする。 F_x を見るとキックによる推力はほとんど発生していないが、股関節の M_y を見ると、 $t = 0.2 \sim 0.5$ では上向きにキックしている $t = 0.3$ 付近と下向きにキックしている $t = 0.4$ 付近でそれぞれ負

Fig. 10 Movement of robot arm in crawl-I upper limb

Fig. 11 Local co-ordinate system on dynamometer

Fig. 12 Local co-ordinate system on moment sensors

と正の大きなモーメントが発生していることがわかる。ここで、実際の水泳におけるバタ足は推力を発生しており、本実験において推力が発生しなかった原因としては、本ロボットアームの足首関節には運動自由度がないため、バタ足における足首の底屈/背屈を再現できていないためと考えられる。今後バタ足による推力をより詳細に検討するためには、ロボットアームの足首に運動自由度を追加する必要があると考えられる。 F_x と M_y において高周波成分の周波数が異なっているが、 F_x の高周波成分は脚の動作が下向きから上向きに切り替わる $t = 0.2$ および $t = 0.5$ 付近と、上向きから下向きに切り替わる $t = 0.3$ および $t = 0.6$ 付近で振幅が大きくなっており、このとき脚を駆動するモータの負荷が高くなっていることから、高周波成分の発生源は機械的な振動である可能性が高いと考えられる。一方 M_y の高周波成分については、モータ制御系の固有振動数によるものと考えられ、制御方法に改善の余地があると考

Fig. 13 Measured forces and moments (crawl-S and crawl-I)

えられる。

最後に、平泳ぎ下肢の結果を示す。図 20 に通常の試技における動作の様子の一部を、図 21 に通常の試技と板を設置した試技における分力計 F_x の結果 1 周期分をそれぞれ示す。脚の引き付けを行う $t = 0.6 \sim 0.7$ で負の

推力が、蹴り出しを行う $t = 0.7 \sim 0.8$ で正の推力が発生していることがわかる。また、通常の試技と板を設置した試技で推力に有意な差は見られない。よって平泳ぎの下肢においては、両脚による水の挟みこみは推力にはほとんど影響しないことが本結果より示唆される。

Fig. 14 Movement of robot arm in breaststroke upper limb

Fig. 16 Movement of robot arm in backstroke upper limb

Fig. 18 Movement of robot arm in crawl lower limb

Fig. 19 Measured result in crawl lower limb

Fig.20 Movement of robot arm in breaststroke lower limb

Fig. 21 F_x in breaststroke lower limb

4. 結 言

本研究では、水泳時の四肢に働く非定常流体力を解明するため、5 自由度を有し、人間の泳動作に近い動作が可能な水中ロボットアームを開発した。そして開発したロボットアームを用いて流体力測定実験を行い、4 泳法の上肢・下肢の測定結果を示し、測定結果の有意性を確認した。また平泳ぎの下肢においては、両脚による水の挟み込みは推力にほとんど影響しないことを実験的に明らかにした。

本ロボットアームは、本論文で示した 4 泳法以外にも、スカリングや水中ウォーキングなど、その他のさまざまな水中運動における流体力の測定に用いることが可能と考えられる。また人間による実験と異なり、同じ動作を正確に繰り返す、わずかに所望の関節角度だけ変化させるなどの、ロボットにのみ可能な利点を有しており、流体力の測定だけでなく、流れの可視化実験など幅広い応用が可能であると考えられる。

なお本研究の実験の遂行に関しては、(株)三井造船昭島研究所に全面的に御協力頂いた。また手足模型の作製に関しては、防衛大学校機械工学科講師伊藤慎一郎氏から貴重な御助言を頂いた。また本研究は科研費

No.17680045 の支援を受けた。記して深く謝意を表する。

文 献

- (1) Maglischo, E.W., *Swimming Fastest*, (2003), p97, Human Kinetics.
- (2) Takagi, H. and Sanders, R., Measurement of propulsion by the hand during competitive swimming, *The Engineering of Sport 4* (Eds. Ujihashi, S and Haake, S.J.), (2002), pp.631-637, Blackwell Publishing.
- (3) Bixler, B.S. and Riewald, S., Analysis of Swimmer's Hand and Arm in Steady Flow Conditions Using Computational Fluid Dynamics, *Journal of Biomechanics*, Vol.35 (2002), pp.713-717.
- (4) Rouboa, A., Silva, A., Leal, L., Rocha, J. and Alves, F., The Effect of Swimmer's Hand/Forearm Acceleration on Propulsive Forces Generation Using Computational Fluid Dynamics, *Journal of Biomechanics*, Vol.39 (2006), pp.1239-1248.
- (5) Sato, Y. and Hino, T., Estimation of Thrust of Swimmer's Hand Using CFD, Proceedings of the Second International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2003), (2003), P2-07 (CDROM).
- (6) Keys, M. and Lytle, A., Computational Fluid Dynamics – a Tool for Future Swimming Technique Prescription, *The Impact of Technology on Sport II* (Eds. Fuss, F.K., Subic, A. and Ujihashi, S.), (2007), pp.587-592, Taylor & Francis.
- (7) Pai, Y., A Hydrodynamic Study of the Oscillation Motion in Swimming, *Unpublished PhD thesis*, (1987), The University of Iowa.
- (8) Kudo, S., Wilson, B., and Takagi, H., The Error of a Quasi-Static Approach in Predicting Fluid Forces on the Hand in Unsteady Conditions, *Japanese Journal of Sciences in Swimming and Water Exercise*, Vol. 10, No. 1 (2007), pp.1-11.
- (9) Nakashima, M., Satou, K., and Miura, Y., Development of Swimming Human Simulation Model Considering Rigid Body Dynamics and Unsteady Fluid Force for Whole Body, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.705 (2005), pp.1361-1369.
- (10) Nakashima, M., Mechanical Study of Standard Six Beat Front Crawl Swimming by Using Swimming Human Simulation Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.705 (2005), pp.1370-1376.
- (11) Sidelnik, N.O. and Young, B.W., Optimising The Freestyle Swimming Stroke: The Effect of Finger Spread, *Sports Engineering*, Vol.9 (2006), pp.129-135.
- (12) AIST, *Measurement Database of Japanese Body Size Data (in Japanese) 1991-92*
<http://www.dh.aist.go.jp/AIST91DB/91-92/>
- (13) CEC・IPA, *Educational image material collection (swimming)*,
<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/h1swim/>

- (14) Nakashima, M., Development of the Swimming Human Simulation Software "Swumsuit", *Journal of The Japan Society For Simulation Technology*, Vol.26, No.1 (2007), pp.58-66.
- (15) <http://www.swum.org/swumsuit/>
- (16) Hoerner, S.F., *Fluid-Dynamic Drag*, (1965), Chapter 3, pp.1-28, Hoerner Fluid Dynamics.
-