クラゲ型泳動跳躍軟体マイクロロボットの研究*

目谷慎太郎** 小泉邦雄*** 木下功士† 佐々木基文† 笹木 亮*** 記州智美††

Study of Medusa Type Swimming and Hopping Molluscos Microrobot

Shintaroh METANI, Kunio KOIZUMI, Kohji KINOSHITA
Motofumi SASAKI, Tohru SASAKI and Tomomi KISYU

This paper proposes the soft structural microrobot which acts at narrow place in the fluid. The robot is operated on swimming, hopping and jumping. The body is made of NB and silicone rubbers. The actuator is a current driving type coiled shape memory alloy (SMA). The SMA expands and contracts by on-off current control for realization of the large and quick motion. The body is 30mm cube and 19mN weight. We obtained the swimming velocity 71.6mm/s, 2.25 times of the natural law and the height of jump 35mm, 1.2 times of the body length. The principle of swimming was realized not only fan motion of the bell but also jet propulsion in quickly repetitive motion. Coefficients of resistance were determined for system identification of the theoretical model by convergent computation. The values take about 2 over the wide range of the duration of power stroke near driving condition of the maximum swimming velocity or hopping height, respectively.

Key words: micromechanism, microrobot, soft machine, swimming, hopping, jumping, shape memory alloy

1. 緒 言

狭隘な場所や危険箇所での微小作業を行うマイクロロボットは広い分野で有用である。特に液中では、パドルやスクリューのようなメカニズムや魚類の尾ビレのような流体慣性力を利用する原理ではうまく泳動しない可能性のあることは、これらを推進原理とする微小生物が存在しないことから領ける。生物は長い進化の中で生息環境に適応し、エネルギーや運動効率に優れた形状と機構を獲得してきた。生物の巧妙な構造や運動を規範とし、その動作原理を解明することは、新たな機構を創成する上で有効な手法であり、従来、泳動型は、パドル¹⁾、水面浮上体に付いた足ヒレ²⁾、軟体アクチュエータ利用³⁴⁾およびヒトデ⁵⁾やエイ⁶⁾のような生物型などが研究されている。本研究では、クラゲを規範として、泳動動作を模した軟体マイクロロボットの実現を目指した。クラゲと異なるのは跳躍用の足を有し、跳躍動作が可能なことである。

製作した機体の動作を理論的に考究し、実験で得られた泳動速度波形を表せる抵抗係数の組を求め、それを用いて理論的に泳動および跳躍運動を得た。抵抗係数からベルの煽り動作は長周期およびジェット吐出は短周期動作でそれぞれ有効なことがわかった。

動作性能を評価した結果、泳動自然則⁷⁾やミズクラゲの泳動と比較して、能力および効率性ともに高い泳動を得ることができた。また同時に、単一および繰り返し跳躍を実現し、跳躍も有効な移動手段になり得ることを示した。

2. 構 造

クラゲはゲル状質でベル形状をしており、ベルを閉じつつ開口端を煽って、ベル内部の液体を後方へ押し出して推進する。したがって、クラゲをモデルとする上で考慮すべき特徴として、

- ①本体がベル形状
- ②ベル開口端での煽り動作による推進
- ③柔軟な材質と機構

* 原稿受付 平成 17 年 3 月 29 日
** 学生会員 富山大学大学院 (富山県富山市五福 3190)
*** 正 会 員 富山大学工学部 (富山県富山市五福 3190)
† 富山大学工学部
†† 富山大学大学院

が挙げられるが、②の動作に加えて、さらにベル内液体の急速吐出によるジェット推進で高速泳動を実現することも含んで、これらを踏まえたロボット機構を実現する。一般的な評価項目と思われる泳動速度が高く、かつ小さな機体構造を主目標とした。

図 1 のように、機体は液体を吐き出して推進力を生む軟体ベル部、跳躍時に液底を蹴る足部および足ヒレで構成される。ベルの内外には重力と釣り合わせる浮力を得る高密度発泡ウレタン ($t = 3\text{mm}$) のフロートを貼り付けた。ベルを開閉させる変位拡大機構はトグルを対向させたパンタグラフ機構を 2 組用い、これを中心軸方向から見ると直交した十字形状として一体化して、一方のパンタグラフ機構の駆動で両方の機構が連動するようにした。駆動するアクチュエータには単線に比べて大変位が得られる通電加熱型コイル状 SMA (トコポーレーション, Bio-metal Helix BMX150, 線径 $150\mu\text{m}$, コイル径 0.65mm , 無負荷たわみ 200%)⁸⁾ を 1 本使用して、一方のパンタグラフ機構の中央に SMA を張り、変位拡大率を大きくした。十字形に組合せたクロスパンタグラフ機構の上半分のリンク部は十字形状に切り抜いたニトリルブタジエンゴム板 (NBR, $t = 0.5\text{mm}$) に補強材としてりん青銅板 ($t = 0.1\text{mm}$) を貼り、十字の間の隙間にシリコンゴム薄膜 ($t = 50\mu\text{m}$) を接着剤で貼ってベル形状とした。機構の関節はゴム板なのでガタが無い、復帰ばねの作用をする。下半分のリンク部に蹴り足と足ヒレを取り付けている。パンタグラフ機構の各リンクの長さ (図 2 で示す⑥、⑤と①～④の距離) は $a = 16\text{mm}$ とした。機体質量は 1.93g である。

図 2 は方向転換を可能とした型で、図 1 の一方向型では十字形

Fig. 1 Structure and constitution of unidirectional type

の下半分のリンクの一方③-⑤-④を2本方向転換用 SMA に置き換えた。十字形状に連結したゴム板リンク関節の復元力だけで、もう一方のリンク①-⑤-②が運動し、ベル全体を開閉できる。

3. 泳 動

3.1 動作原理

推進力を得る推進励起時間 t_1 、元へ戻る復帰時間 t_2 (和が運動時間 T) の駆動電流オンオフ制御によるパルス駆動で SMA を通電加熱すると、SMA が急速に収縮してバンタグラフ機構が伸びてベルが閉じると内部の液体が吐き出されてジェット推進するとともに、図1のように体長が急伸びして頭部を推進方向に押し出し、足ヒレが後方へ蹴って液体をかき、機体の後退を抑えて効果的に推力を得る。通電を遮断するとベルの弾性復元力と液体冷却で SMA は元の長さへクリーピングモーションで戻る。この両ストローク動作速度波形の非対称性で推進する。一般に SMA は冷却時の復帰が遅いために早い繰り返し動作が困難であるが、ミズクラゲの動作が復帰時にベル開口端を開くことに着目し、ベルのゴム板で弾性復元力を得てベル全体を大きく開かせることができた。

図2の方向転換型は、図3に示したように曲がる方向側の SMA2 に回転半径に応じた電流を流すとベルの④側が引張られて片閉じ状態となる。この状態のままで SMA1 をパルス駆動するとリンク①-⑤-②でベルが開閉し、収縮させた側からのジェットの吐出量が減って推進力が不均一となって曲がる。SMA2 と SMA3 の許容連続電流は 2A であり、SMA1 は駆動せずに、このどちらかだけを 1A でパルス駆動するとその場旋回が実現できた。

3.2 泳動実験

図1の足部を除いて図2の②に対応する SMA 端を固定し、水中で SMA を電流 i でステップ駆動したときの SMA の長さの変化をベル開口端のフロート間で測定した結果を図4に示す。動作の拘束を抑えるために導線径を $\phi 0.08$ としており、許容連続電流は 2.6 A である。推進励起ストロークは $i = 2.4$ A 以上で最大 7mm の変位が得られた。このときの整定時間は、推進励起ストロークで約 0.10 s、復帰ストロークで約 0.20 s である。図5のように、折線関数発生器で駆動電圧パルス信号を出力し、電力増幅して SMA を駆動した。駆動電流 i は 1 Ω の純抵抗で検出して A/D 変換の後、高速度カメラ (Max.8000F/s) で撮影した動作画像と同時にパソコンへ取り込んで画像解析した。繰り返し泳動の動作例を図6に示す。全ての実験は水温を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保った。通電起動後3ストロー

ク以降は定常持続運動となる良好な応答性を得た。入力電流を一定の 2.6 A に保ち、推進励起時間 t_1 と復帰時間 t_2 の組合せを変えて画像解析で図7に例示した変位・速度波形を得た。(a)はベルでゆっくり大きく水をかく煽り動作であり、後述の泳動数が大きく(泳動ストローハル数が小さく)なって、ひとかきで大きく進む泳動効率性が最もよい条件である。復帰ストロークの最後であっても泳動速度が0にならず、泳動に停留を生じていない。(b)は小さく早い繰り返し動作の例で、このとき最大泳動速度が得られた。

Fig. 4 Step response at the top of bell

Fig. 5 Constitution of experimental apparatus

(a) Linear swimming of unidirectional type

(b) Turn swimming of turning type

Fig. 6 Trace of swimming

Fig. 2 Constitution and Structure of turning type

Fig. 3 Behavior of turning motion of turning type

Table 1 Comparison of medusa and microrobot

	ℓ (mm)	$\bar{v}$ (mm/s)	b (mm)	f (1/s)	Re
Medusa 1	45.52	44.02	9.90	2.00	1830
Medusa 2	43.27	41.27	11.06	2.25	1631
Microrobot ($t_1=0.05$ s, $t_2=0.12$ s)	30.00	74.06	5.23	7.14	2029
Microrobot ($t_1=0.09$ s, $t_2=0.16$ s)	30.00	73.67	5.90	4.00	2018

Table 2 Swimming performance of medusa and microrobot

	Sw	St	St_{sw}
Medusa 1	0.48	2.07	0.45
Medusa 2	0.42	2.38	0.60
Microrobot ($t_1=0.05$ s, $t_2=0.12$ s)	0.42	2.38	0.42
Microrobot ($t_1=0.09$ s, $t_2=0.16$ s)	0.61	1.63	0.32

(a) Condition of the maximum effective swimming

(b) Condition of the maximum swimming velocity

Fig. 7 Waveforms of swimming velocity, displacement and driving current (Experiment)

推進励起時間 t_1 、復帰時間 t_2 を間隔 10ms で変化させて、速度波形から平均泳動速度を求めた等高線図を図 8 に示す。平均泳動速度は入力電流パルスのデューティ比に依存し、推進励起時間 0.05 s、復帰時間 0.12 s で最大速度 74.1mm/s を得たが、この値に近い高速領域が尾根状に広く分布している。このことに注目して、推進励起時間と復帰時間との関係を太線で示したように大まかには比例しているとみなして次式(1)で近似し、この条件の下で後述の理論的考察をした。推進励起時間に比して復帰時間が 2 倍強に抑えられている。これは単に液中環境による冷却効果だけではなく、SMA はコイル状で素線長さが線状のものに比して非常に長いために放冷表面積が大きいことによる。図 4 や図 7 のように、このことが冷却が速く短い復帰時間を実現し、俊敏かつ大変位の動作を可能として高速泳動を実現した最大の要因である。

$$t_1 \div \frac{2}{3}(t_2 - 0.05) \quad (1)$$

3.3 泳動の能力および効率性の評価

3.3.1 レイノルズ数

生物規範型ロボットの評価のために、類似形態のミズクラゲを採取し、泳動を画像解析して評価値を求めた。結果を表 1 に示す。

自然界では泳動生物の体長 ℓ は $Re \propto \ell^2$ が成り立ち、図 9 のように平均泳動速度 $\bar{v}$ と ℓ には比例関係がある⁷⁾。本機体の体長(代表長さ)は $\ell = 0.03$ m ゆえ、レイノルズ数は 900 となる。実験で得たレイノルズ数は 2.25 倍の 2029 である。定義より、体長と液体の動粘度が一定であれば、速度はレイノルズ数に比例する。平均泳動速度を巨視的に一定速度と見れば、 $\bar{v}$ は Re に比例する。最大平均泳動速度 74.1mm/s は泳動自然則の 2.25 倍になり、生物の標準泳動能力を超えた。表 1 に示すレイノルズ数の比較から、本機体は 2 匹いずれのミズクラゲをも超える泳動能力を実現した。

3.3.2 泳動数および泳動ストローハル数

魚類の泳動観察結果から、尾ビレを振る周波数 f (Hz) と単位時間当たり体長の何倍推進するかを示す対体長比速度 U/ℓ (1/s) は比例すると言われている⁹⁾。この比例定数は泳動数 Sw と称され、式(2)で表されるが、魚類は $Sw=0.6$ でほぼ一定となる⁹⁾。

$$Sw = U / f \ell \quad (2)$$

Sw は直進運動と周期運動の速度比であり、無次元振動数の逆数

でもある。本研究の Sw は、ベルが 1 回開閉する間に何体長分前進するかであり、後述の St_{sw} とともに泳動の効率性を表している。

泳動数の逆数はストローハル数 St であるが、魚類では、尾ビレの振幅 b を代表長さにとった泳動ストローハル数 St_{sw} ⁹⁾ の定義

$$St_{sw} = fb/U \quad (3)$$

があり、本研究ではベル開口端開閉の振幅が代表長さ b に対応するので理に適い、 Sw および St よりも St_{sw} の方がより評価に適すると思われる。実験結果を表 2 に示す。一般に、魚類は $St_{sw}=0.33$ ⁹⁾、 $0.2 \sim 0.3$ ⁹⁾ であり、最大の平均泳動速度を得る条件 ($t_1 = 0.05$ s, $t_2 = 0.12$ s) では、泳動ストローハル数はミズクラゲよりも本研究の機

Fig. 8 Contour map of average swimming velocity (Experiment)

Fig. 9 Natural law on swimming (data based on Hayashi⁷⁾)

体の方が小さくなって、効率性の良い泳動を得たことが示された。

ゆっくりと大きく動作させる条件 ($t_1 = 0.09$ s, $t_2 = 0.16$ s) では, Sw , St , St_{sw} 全てで上回った。これはベルのゴム薄膜が推進励起ストロークで帆のように膨らみ, より多くの液体を含んで吐き出すとともに, クロスパンタグラフ機構の伸縮が大きいのでベルの変形がクラゲよりも大きく, ゆっくりでも大量の吐き出しによるジェット推進効果が加わり, 効率良く泳動するためと思われる。

4. 跳 躍

4.1 動作

実際の環境では様々な場合にに応じた動作が必要となる。SMA で体長を急伸することで, 足で液底を蹴って跳び上がる。状況に応じて泳動と跳躍を使い分ければ, 効果的に移動できると思われる。

空気中の跳躍では, 自重が大きな負荷となり, 着地時の緩衝対策も必要であるが, 液中では, 浮力で自重を相殺して大きな跳躍量が容易に得られ, 流体抵抗で沈降が遅くなるために俊敏な移動はできないが, 着地の衝撃も小さくなる。泳動と同じ駆動方法でよいから, 跳躍と泳動の切り換えが容易である。実験では, 繰り返し跳躍をするため, 浮力を下げて復帰時に適当に沈降するようにフロート量を調節した。また, 繰り返し跳躍を定常持続させるためには, 着地を検出して駆動タイミングを着地に同期させる必要がある。図5のように足と着地面を電気接点として接地時に 50 Ω の抵抗の電圧降下を用いて接地を検出した。

4.2 単一跳躍実験

図4の結果から, 推進励起時間はベルが閉じるのに十分な 0.3 s とし, 画像解析で図10に示した波形を得て跳躍量 h を求めた。

許容入力電流 2.6 A で 35mm の最大跳躍量を得た。0.3 s 以降の復帰ストロークでは, 上昇時に比べて沈降時にはベルが十分に開き, 流体抵抗が増大して着地速度が抑えられている。空中では緩衝対策が必要なソフトランディングが自然に実現されている。

4.3 繰り返し跳躍実験

水底に静かに着地させて静止させた後, 折線関数発生器にトリガを入力してスタートさせる。その後, 着地した瞬間, 着地検出回路で自動的にトリガがかけられて連続的に繰り返し跳躍を行う。図11に示す起動時からの波形のように, 3ストローク以降は定常波形が得られ, 泳動と同様良好な応答性を示した。

図12には推進励起時間による跳躍量 h および跳躍時間 T の影響を示した。推進励起時間が 0.1 s ならば, SMA が十分に収縮するが, それ以上通電してもベルが閉じたままで流体抵抗が減じ, 上昇速度の減少が小さくなって, その分跳躍量は微増した。それとともに跳躍時間も増加すると思われたが, 徐々に減少した。また, 着地速度が概ね -18mm/s となり, 流体抵抗が十分に働いてソフトランディングしていることがわかった。ただし回路および SMA の連続通電許容限界である 0.4 s 以下で実験した。

5. 理論的考察

5.1 直進泳動

泳動する系に働く力は, ベルと足の推進力および流体抵抗力, 重力, 浮力および慣性力が考えられる。浮力はフロート体積を調節して重力のほとんどを打ち消すように設定する。この系に働く主な作用力は, ベル内部流体の吐き出しと吸い込みに伴う力, 足ヒレの蹴りによる推進力および流体抵抗力であり, 互いに複雑に影響し合うが, これらの各要因別に作用力を取り扱う単純な数理モデルを考え, m : 機体質量, v : 機体泳動速度, v_1 : 本体に対する足部の相対速度, U : ベルの吐き出し流体速度, A : ベル投影面積,

A_1 : 足ヒレ投影面積, ρ : 流体密度, C_D : 抵抗係数として, 次の運動方程式で泳動が表わされるとする¹¹⁾。

$$mv' = \pm \rho U^2 A \pm C_{D1} \frac{\rho A_1 v_1^2}{2} - C_{D2} \frac{\rho A v^2}{2} \quad (4)$$

右辺第1項はベルの吐き出し推進力, 第2項は足ヒレの蹴りによる推進力, 第3項はベルの煽り動作に関係する流体抵抗力を表し, 本研究の動作範囲ではレイノルズ数 $Re = 10^3$ のオーダーで, この領域では既知の抵抗係数に及ぼす速度の影響が小さいという事実¹¹⁾から定数とした。復帰ストロークは推進励起ストロークとは逆の動作なので右辺第1・2項が負符号をとる。ベル形状は常に半円球を保つとして, 停止時のベル直径 $\phi 30$ から図4の変位を差し引き, ある瞬間のベル開口端直径を用いて内部流体体積を求めて A と U を算出した。足部相対速度 v_1 は, 体長 (ベル頂点から足ヒレ取り付け位置までの距離) を時間微分して求めた。ベルを SMA で開閉するために, 図2のリンク①-⑤-②と補強されたゴム板の十字部①-⑥-②とで構成するクロスパンタグラフ機構を, 簡単のために全て長さ a の剛体リンクのピン結合構造で近似した。

l_0 と l_x をそれぞれ体長と SMA の自然長, および $\Delta l(t)$ と $\Delta x(t)$ をそれぞれ体長と SMA 長さの変化量とすれば, $\Delta x(t)$ は図4で示した上述のベル開口端部の変位の変化量であり, 図4(a)の立上がり波形の最小自乗近似式を以下の式(5)と式(6)に用いた。以上より, 式(4)は式(5)のように時間関数で表現でき, Runge-Kutta-Gill 法で式(5)を繰り返し解いて, 定常状態の運動を得た。

Fig. 10 Waveforms of jumping (Experiment)

Fig. 11 Transition of hopping waveform (Experiment)

Fig. 12 Height of hopping and duration of motion (Experiment)

$$mv' = \pm \pi \rho \ell^2 \left[\frac{d}{dt} \{ \ell_x - \Delta x(t) \}^2 \right] / \left[36 \{ \ell_x - \Delta x(t) \}^2 \right] \quad (5)$$

$$\pm C_{D,leg} \frac{\rho A}{2} \left[\frac{d}{dt} \{ \ell_0 - \Delta \ell(t) \}^2 \right] - \frac{\pi C_{D\rho} v^2}{8} \{ \ell_x - \Delta x(t) \}^2$$

ただし、機体長さの変化分 $\Delta \ell(t)$ は次式で表される。

$$\Delta \ell(t) = \sqrt{4a^2 - \{ \ell_x - \Delta x(t) \}^2} \quad (6)$$

ここで、推進励起および復帰ストロークでの各2つの抵抗係数 C_D の見積りが問題となる。それぞれを C_D , $C_{D,leg}$, $C_{D,r}$ および $C_{D,r,leg}$ とする。 $C_{D,r,leg}$ を含む復帰時の足ヒレの抵抗項は、ヒレが畳まれて投影面積も小さく、他の3項に比べて抵抗力が小さいので、簡単のために $C_{D,r,leg}$ は半球の値 1.33 と仮定する。残りの3つの C_D は、①平均速度、②最大速度、③最小速度の順に優先順位を付けた目標値として、泳動速度波形に近い理論波形となるように定めた。図13に得られた C_D とそのときの速度波形を例示する。図8の太線を中心とした領域で求めた結果を図14に示す。長い推進励起時間でゆっくりと大きな動作、特に復帰時の動作が緩慢となる条件で、ベルの煽り動作によって液体で押されたゴム膜の動きのために、大きく形状が変化して抵抗係数が大幅に減少し、高泳動速度を得ている。逆に推進励起時間が短い条件で全ての C_D が約2となって抵抗力の非対称性が無く、ベルが細かく早く動くときには、抵抗係数が関係する煽り動作よりもジェットの水出しが有効に推進力になることを示していると思われる。このようにして求めた C_D を用いると図8に近い形の等高線図が得られた。

5.2 跳躍動作

沈降のために浮力 F_b を調整して重力 mg の影響項を以下のように与えた。前述のように 2.6 A 駆動で沈降速度 $v_2 = -18.3 \text{ mm/s}$ であり、浮遊状態とした機体に $m_2 = 64.1 \text{ mg}$ の錘を付加した場合と同じ速度になるので、重力と浮力の合力は次式で表される。

$$F_b - mg = -\pi C_{D\rho} v_2^2 \ell^2 / 8 + m_2 g \quad (7)$$

繰り返し跳躍について、①最大跳躍量 h , ②跳躍時間 T (運動周期) の順に優先順位を付けた目標値で、泳動と同様に実験波形に最も近くなる C_D を求めた。図12のように、実験では推進励起時間が 0.1 s 以上で跳躍量や跳躍時間がほぼ一定となった。ベルの抵抗係数は泳動と同様、ゴム膜の動きで大きく形状が変化して、図15のように抵抗係数が推進励起・復帰時に効果的に変化している。

6. 結 言

- (1) アクチュエータにコイル状 SMA を用いたゴム製機体の軟体マイクロロボットを製作し、水中での泳動・跳躍を実現した。
- (2) ベル開口端での煽り動作による推進に加えて、ベル内部液体の急速吐出によるジェット推進で高速泳動を実現した。
- (3) 条件 (推進励起: $t_1 = 0.05 \text{ s}$, 復帰: $t_2 = 0.12 \text{ s}$) で、泳動自然則の 2.25 倍のレイノルズ数 $Re = 2029$ となる平均泳動速度 74.1 mm/s が得られ、生物の標準泳動能力を超えることが実現できた。
- (4) このとき泳動数 $Sw = 0.42$, 泳動ストローハル数 $St_{Sw} = 0.42$ となり、ミズクラゲを凌ぐ効率性の良い泳動を得た。
- (5) これらの効率性を示す値は長い周期で大きく動作する条件側が一段と良い値を示し、条件 ($t_1 = 0.09 \text{ s}$, $t_2 = 0.16 \text{ s}$) で、 $Sw = 0.61$, $St_{Sw} = 0.32$ となり、ミズクラゲよりも効率的な泳動が実現できた。
- (6) 単一跳躍で、体長の 1.2 倍となる 35 mm の跳躍量を得た。
- (7) 繰り返し跳躍では、条件 ($t_1 = 0.4 \text{ s}$) で最大跳躍量 37 mm , 周期 4.4 s の定常持続運動を得た。

- (8) 泳動・跳躍ともに起動、停止および駆動条件のステップ的変更に対して良い応答性が得られ、速やかに安定持続運動に入った。
- (9) 抵抗係数を同定して、ベルの煽りは長周期動作およびジェットの吐出は短周期動作でそれぞれ有効であることを明らかにした。

謝 辞

試作・実験に協力され、2002 年度精密工学会春季大会「小さな³ ロボットのコンテスト」自慢のマイクロメカニズム部門でデザイン賞を共同受賞した小川高志氏 (現、東京計装(株)) に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 福田, 他: 日本機械学会論文集 C 編, 60, 569 (1994) 204.
- 2) 須藤, 他: 機学 Robomec04 講義集, 04-4 (2004) 1A1-L1-25(1).
- 3) 郭, 他: 第 17 回日本ロボット学会予稿集, 1 (1999) 211.
- 4) 大武, 他: 第 17 回日本ロボット学会予稿集, 2 (1999) 583.
- 5) 大武, 他: 第 18 回日本ロボット学会予稿集, 3 (2000) 1435.
- 6) 東野, 他: 機学北陸信越支部 42 期総会講義集, 047-1(2005) 85.
- 7) 林 輝: 精密工学会誌, 54, 9 (1988) 1646.
- 8) 本間: BioMetalDatabase, <http://www.toki.co.jp/BioMetal/database/>
- 9) 永井: 抵抗と推進の流体力学, シブ・アド・オージ財団 (1996) 27.
- 10) G.Taylor, etc.: Nature, 425 (2003) 707.
- 11) 池森: 水力学, コロナ (1967) 305.

Fig. 13 Comparison of swimming velocity waveform

Fig. 14 Identification of coefficient of resistance in swimming

Fig. 15 Identification of coefficient of resistance in hopping