

ヒラムシに見る柔構造と渦構造の相互作用による 効率的な遊泳メカニズム

By

風間 俊哉* 飯間 信** 小林 亮***

Abstract

ヒラムシは、扁形動物門渦虫綱に分類され、プラナリアに近い無脊椎動物である。海産性の自由生活を営む種の多くは、楕円形で扁平、そして循環器系すらない柔らかい構造である。ある種のヒラムシは、こうしたシンプルな構造ながら海中を遊泳し、前進するだけでなく、ホバリングや急旋回をするなど、多様な運動を示すことが知られている。著者等は、このヒラムシの遊泳推進メカニズムの理解に向けて研究を行ってきた。本稿では、まずヒラムシの遊泳運動の特徴について述べた後、この遊泳運動をロボットで再現する事例と、数理モデルからアプローチする事例について紹介し、最後にヒラムシに見る柔構造と渦構造の相互作用による効率的な遊泳メカニズム理解に向けた今後の展望を述べる。

§ 1. はじめに

ヒラムシ [1](Fig. 1) はあまり馴染みのない生き物であるが、世界中に分布しており、ダイバーや漁師にとっては、比較的目にする事が多い生き物のようである。海中をヒラヒラと遊泳する様子は特に印象的で、魔法の絨毯のようである。我々はこの生物の運動推進メカニズムを明かにしたいと思い研究をはじめた。しかしながら、この生き物に関する科学的な知見は、分類学と簡単な記述的研究に留まり、運動と推進メカニズムに関する研究はほとんど見当たらない。そこで先ずは、実際の生き物を観察してみることにした。海産性のヒラムシの種類は多様であるが、本研究では瀬戸内海沿岸で比較的入手し易いオオツノヒラムシ (*Planocera multitentaculata*, Fig.1A) を用いた。オオツノヒラムシは、前後に長い楕円形で平たい。体は柔らかく (Fig.1B)、基質に凹凸がある場合でも体を変

* 広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻, JST CREST (現所属: 統計数理研究所, 〒 190-8562 東京都立川市緑町 10-3)

e-mail: kazama.kblb@gmail.com

** 広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻, 〒 739-8521 東広島市鏡山 1-7-1

e-mail: makoto@fluid.hiroshima-u.ac.jp

*** 広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻, JST CREST, 〒 739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1

e-mail: ryo@math.sci.hiroshima-u.ac.jp

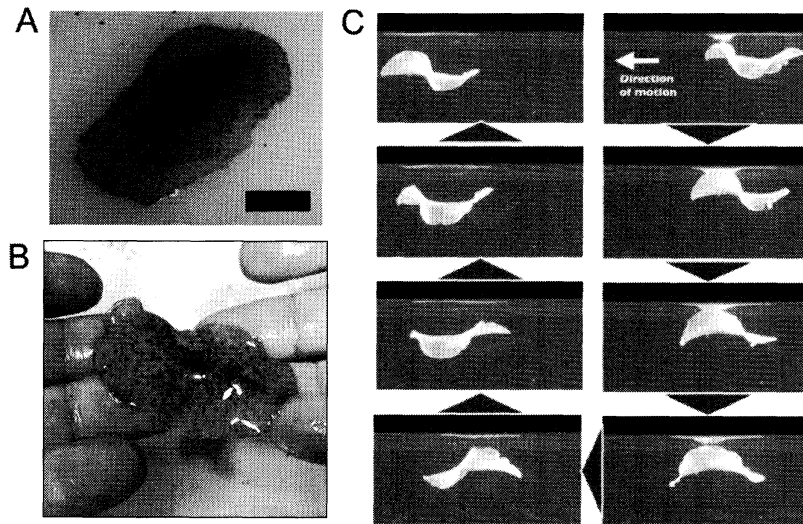


Figure 1. オオツノヒラムシ (*Planocera multitentaculata*) A. 上から見たところ、スケールは1cm. B. 両手で持ったところ. C. 遊泳のスナップショット (横から見たところ).

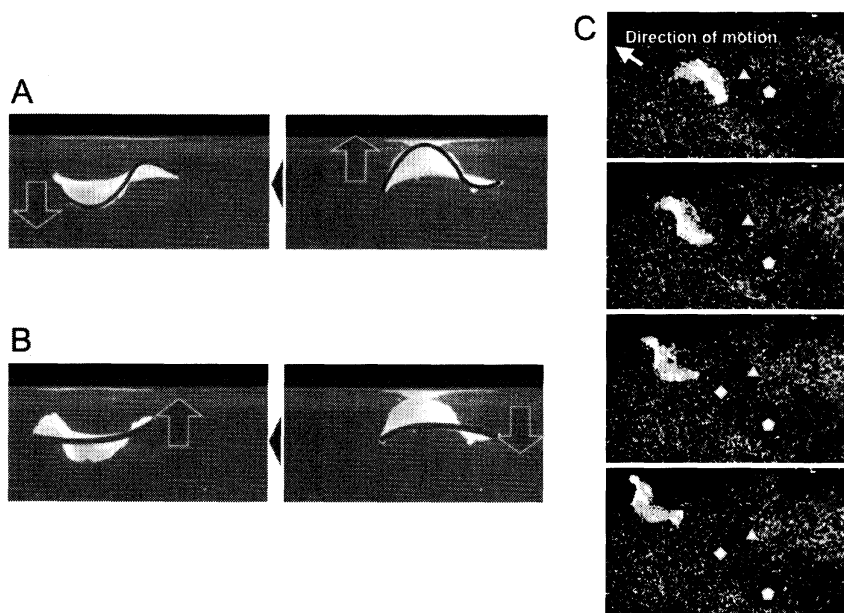


Figure 2. ヒラムシは遊泳時に、身体両サイドを上下運動させる (A). 同時に身体の中心部分は、背腹方向に交互に反り返る運動をしている (B). C. 遊泳時のスナップショット. 流体の動きを可視化することで遊泳時後方に形成される渦を観察する. 後方からスリット光を当てると、海水中のデトリタス (プランクトンの死骸など) が流体可視化粒子の役割を果たす. 渦が形成され、後方に移動している. いくつかの渦の中心を多角形で示した (五角形, 三角形, 四角形).

形させて腹側表面ほぼ全体を基質に貼り付けることができる。一見すると、のっぺりとしていて、どちらかと言えば“気持ち悪い”生き物ではあるが、水中に入れると実に生き生きと優雅に泳ぐのである！Fig.1C はオオツノヒラムシの遊泳を横から撮影した動画のスナップショットである。オオツノヒラムシの遊泳運動は、身体の両サイドを上下交互に動かすはばたき運動 (Fig. 2A) と、身体を中心を背腹方向に交互に反り返す運動 (Fig. 2B) から構成されていることが見てとれる。また、流体の動きを可視化してみると、遊泳時には後方に渦ができていたことが分かった (Fig. 2C)。生物の遊泳や飛翔などにおいては、渦を使った推進メカニズムが近年明らかにされつつある [2]。ヒラムシは、体節や骨格もないシンプルな柔構造で遊泳運動多様性を獲得している。流体の渦構造を上手く使った推進メカニズムを有している可能性がある。

§ 2. ロボット

柔構造をどのように使えば、遊泳運動が効率的になるのか、そこで見られる流体の渦構造の役割を調べるために、“作って理解する”という立場から、ロボットを構築して議論することにした。はばたき運動による遊泳推進を議論するロボットは、すでに多くの素晴らしい結果が報告されている [3, 4]。我々は、以下の3つの点を兼ね備えた新規のはばたき型遊泳ソフトロボットを構築した：1. ロボットの身体を柔らかな部材で構成、2. 小数の自由度ではばたき運動を制御、3. 柔らかな部材と流体との相互作用が推進力を陽に生み出す。上述したように、オオツノヒラムシの動きを観察すると、身体の側部を体幹を回転軸として上下にはばたいている。また体幹も腹側背側に反り返る運動をしている。側部には前方から後方に向かって波送り運動が見られる。こうした身体のやわらかな動きは、筋繊維の収縮弛緩による“能動的運動”と、流体との相互作用による“受動的運動”により構成されているように見える。そこで、我々のロボットでは、能動的運動は主に身体の前方部のはばたきと、体幹部の反り返りのみであると考えて (Fig. 3A)、ここにサーボモータを取り付け能動的に制御できるようにした (Fig. 3B)。また、その他の部分は受動的運動をすることを考えて、やわらかな部材で構成して、能動部分及び流体からの作用で受動的に動くようにした。はばたきの角度は周期的な関数で制御される (Fig. 3B)。

構築したロボットは、側部に波を生じさせながら水中を推進することができた (Fig. 4A)。さらに、振動数や振幅を大きくすると、ほぼ線形的な速度上昇が見られた (Fig. 4BC) [5]。また、位相差を変化させると、前進、ホバリング、そして後退と、様々な遊泳モードを示すことが分かった (Fig. 4D) [6]。

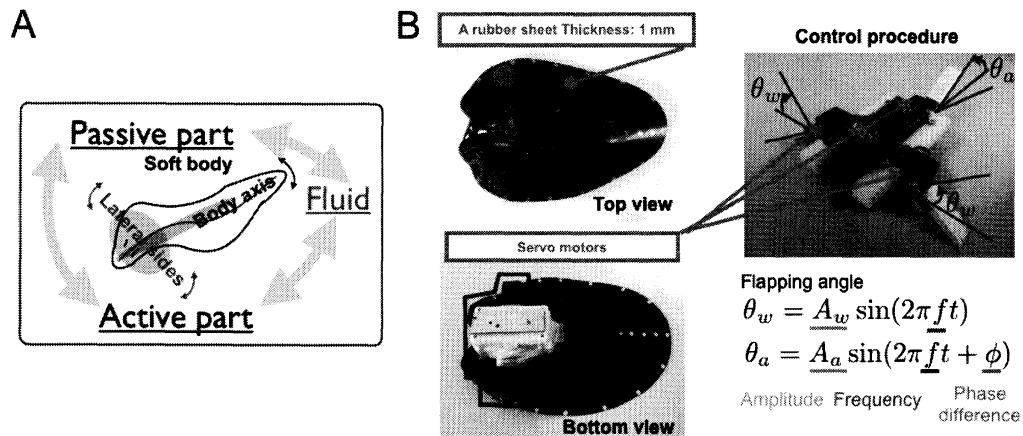


Figure 3. ロボット設計概念図 (A), 構築したロボットの概要 (B)

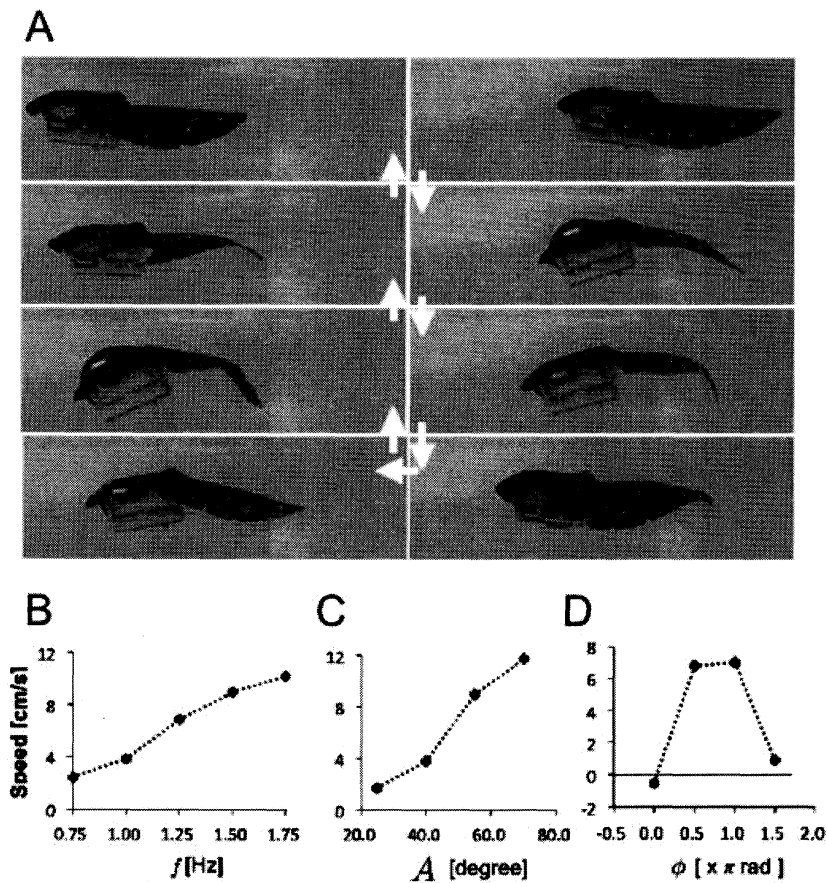


Figure 4. ロボットの遊泳の様子 (A), ロボットの速さの制御パラメータ依存性: 羽ばたき振動数を変えた時 (B), 振幅を変えた時 (C), そして位相差を変えた時 (D).

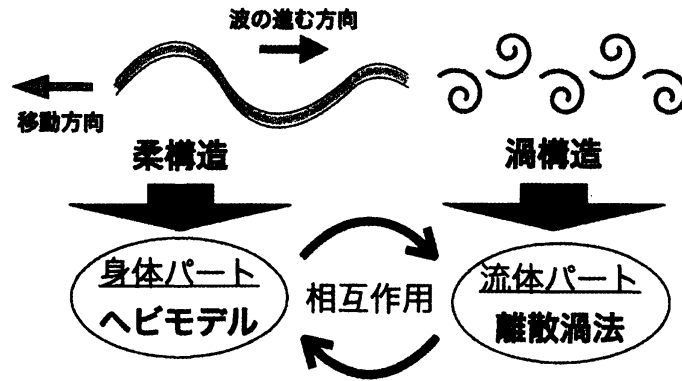


Figure 5. 数理モデルの設計概念図.

§ 3. 数理モデル

以上、実際のヒラムシと、ロボットについて見てきた。ロボットにおいては、振幅や振動数、位相差などのパラメータを変えると、速さが変わることが分かった。このことは、効率的に遊泳するためには、ただ闇雲に身体をはばたかせているのではなくて、適切な運動パラメータの選択が重要であることを示している。実際のヒラムシは、前進、ホバリング、急旋回などの多様な運動を成し遂げるために、身体の動かし方を周囲の流体の動きに応じて適切に変化させているのかもしれない。そこで我々は、こうした仮説をより理論的に検証することを目指し、数理モデル構築した。以下モデルの概略を説明する。

モデルは大きく分けて、2つの部分から構成される (Fig. 5)。1つ目はヒラムシの柔らかく動く身体を表現する部分 (身体パート)、2つ目はヒラムシの身体の動きに併せて時空間的に変化する流体の動きを表現する部分 (流体パート) である。なお、実際のヒラムシは3次的に運動するが、本研究ではこれを思い切って単純化し、波打ち運動をする身体の周縁部のみを表現するような2次元空間で考えた。まず、身体パートについて説明する (Fig. 6A)。Fig. 1C で見たように、ヒラムシの身体の周縁部には、前方から後方に向かって、波送り運動が見られる。この動きは、ちょうどヘビの動きにも似ていることから、小林等のヘビモデルを採用することにした [7]。Fig. 6A に示すように、質点同士を結合バネで結び、各質点上に巻きバネを配する。各質点の運動方程式は、以下のように記述される。

$$(1) \quad m_i \dot{v}_i = F_i$$

$$(2) \quad F_i = F_i^l + F_i^b + F_i^f + F_i^g$$

i は質点のインデックスで、(2) 式第1項目は結合バネからの力、第2項目は巻きバネの力である。双方ともフックの法則に従う。ただし、ヘビのような波送り運動を表現するために、巻きバネの自然角度を周期的に変化させる。より詳細な定式化はヘビモデルの文献

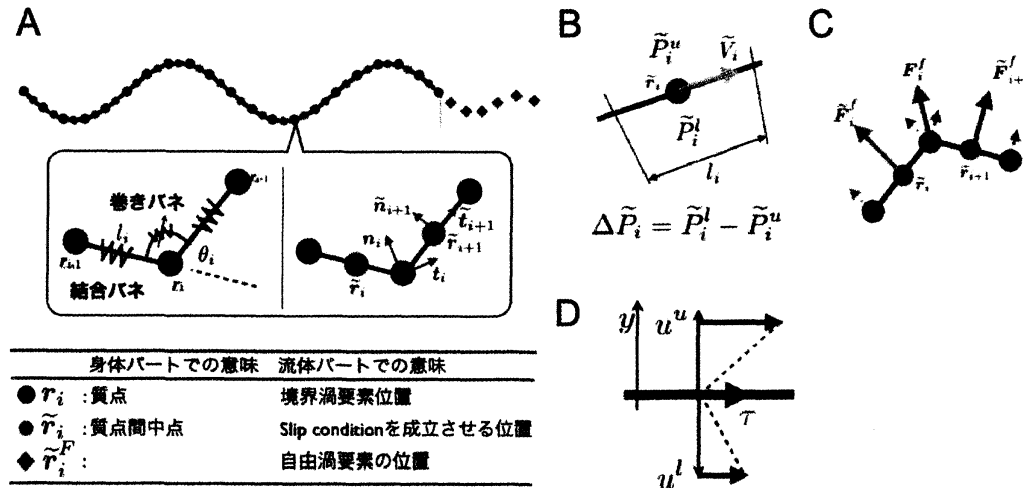


Figure 6. A. 数理モデルの概略図. B. 揚力の計算. 身体の上側と下側の圧力差より算出される (本文 eq. (3)). C. 質点にかかる揚力の計算. D. 摩擦力の計算.

[7]などを参照されたい. 第3項目は揚力である. Fig. 6Bに示すように, 質点間中点での, 身体上側と下側の圧力差 $\Delta \tilde{P}_i$ を用いて以下の式で計算する.

$$(3) \quad \tilde{F}_i^f = \Delta \tilde{P}_i l_i \tilde{n}_i$$

$\Delta \tilde{P}_i$ は, 後述の流体パートで詳しく定式化される. なお, 各質点にはこれらの力が平均的に作用すると考え, $\tilde{F}_i^f = (\tilde{F}_i^f + \tilde{F}_{i+1}^f)/2$ とした (Fig. 6C). 式 (2) の第4項は, 流体から受ける摩擦力である. 本研究では, ヒラムシの身体と流体との間に境界層 [8] を加味し, そこで流体との間に剪断応力が働く と仮定したモデルを導入する. 一般的に, 剪断応力 τ は以下の式で表現される.

$$(4) \quad \tau = \mu \frac{du}{dy}_{y=0}$$

μ は粘性係数, y は剪断面からの距離, $\frac{du}{dy}$ はずり速度である. ここで身体近傍での流体・身体の相対速度 (上側を u^u , 下側を u^l) (Fig. 6D) とすれば, 式 (4) は境界層の幅 δ を用いて, 以下のように近似・変形できる.

$$(5) \quad \tau \approx \mu \frac{u^u + u^l}{\delta} = \frac{\mu}{\delta/2} \frac{(u^u + u^l)}{2} = \frac{2\mu}{\delta} \bar{u}$$

ここで $\bar{u}$ は上側相対速度と下側相対速度の平均である. 身体の微小領域 l_i にこの剪断応力が働くと考えれば, 流体と身体との間に働く摩擦力は,

$$(6) \quad \tilde{F}_i^s = \frac{2\mu}{\delta} (\tilde{V}_i - \tilde{v}_i^t) l_i$$

と表現できる。 $\tilde{V}_i$ は位置 $\tilde{r}_i$ における流体の速度、 $\tilde{v}_i^t$ は同点の身体速度 tangential 方向成分である。なお、揚力の時と同じように、 $F_i^s = (\tilde{F}_i^s + \tilde{F}_{i+1}^s)/2$ と考えた。

次に流体パートについて説明する。このパートでは身体パートの動きに応じて時空間的に変化する流体の挙動を求めるとともに、式 (3) の $\Delta\tilde{P}_i$ を求める。本研究では、流体パートを表現する数理モデルとして、離散渦法を採用した。この方法は非圧縮性完全流体の挙動を解析する手法で、蝶の飛翔における流体力学的効果の検証でも用いられる方法である [9, 10]。この方法の基本的なコンセプトは異なる流れの間で渦層を仮定し、さらにこの渦層を離散的な境界渦要素の集まりと考えるところにある。具体的には、Fig. 6A に示す通り、ヒラムシの身体と、後方から剥離する渦列を渦要素の集まりで表現する。各質点上の渦要素（境界渦要素）及び、剥離した渦要素（自由渦要素）の渦度をそれぞれ Γ_j ($j = 0, \dots, N$)、 Γ_k^F ($k = 1, \dots, K$) とすると、任意の位置 $\mathbf{r}$ における速度は次の式で表現される。

$$(7) \quad \mathbf{V}(\mathbf{r}) = \sum_{j=0}^N \frac{\Gamma_j}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^2} J(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) + \sum_{k=1}^K \frac{\Gamma_k^F}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k^F|^2} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_k^F)$$

すなわち、各地点の速度は全ての渦度の重ね合わせで表現される。ここで、流体の流れは身体の垂直方向には横切らないという条件 (Slip condition)

$$(8) \quad \mathbf{V}(\tilde{\mathbf{r}}_i) \cdot \tilde{\mathbf{n}}_i = \tilde{v}_i^n$$

に、式 (7) を代入して Γ_i について整理し、さらに全渦度の総和は保存されるという条件 (ケルビンの循環定理) を考慮すると、 Γ_i についての連立一次方程式が得られる。これを解くことで Γ_i の具体的な値を求める事ができる。上述した式 (3) の $\Delta\tilde{P}_i$ は、 $\tilde{\Gamma}_i$ を用いると次のように書き表すことができる（詳しくは [11] を参照）。

$$(9) \quad \Delta\tilde{P}_i = \tilde{V}_i^t \frac{\tilde{\Gamma}_i}{l_i} + \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^j \tilde{\Gamma}_k$$

以上がモデルの概略である。まとめると、離散渦法により求められた Γ_i が、式 (9) の $\Delta\tilde{P}_i$ を介して揚力の式 (3) に反映されることで、流体がヘビの動きに影響を与える。一方で、身体パートで作り出されたヘビの動きが、渦要素の位置を変え、式 (7) によって流体に影響を及ぼす、こうして、ヘビのように動く柔構造と、流体の渦構造とが相互作用し合う系を構築することができた。

Fig. 7 にシミュレーションの様子を示す。ヒラムシの周縁部のように、前方から後方に向かって送られる波の動きと、それによって生み出される渦の様子が表現できている。このモデルを用いることで、ヒラムシの身体の柔らかさと遊泳効率の関係などを議論することが可能である。今後はこのモデルを用いて身体の動かし方と流体の挙動の関係について議論していきたい。例えば、効率的な遊泳推進のためには、身体全体に能動的に力を入れればいいのか、それとも能動的に力を出すのは一部分で、あとは受動的に動かすだけでもいいのか、といった疑問に応えていきたい。

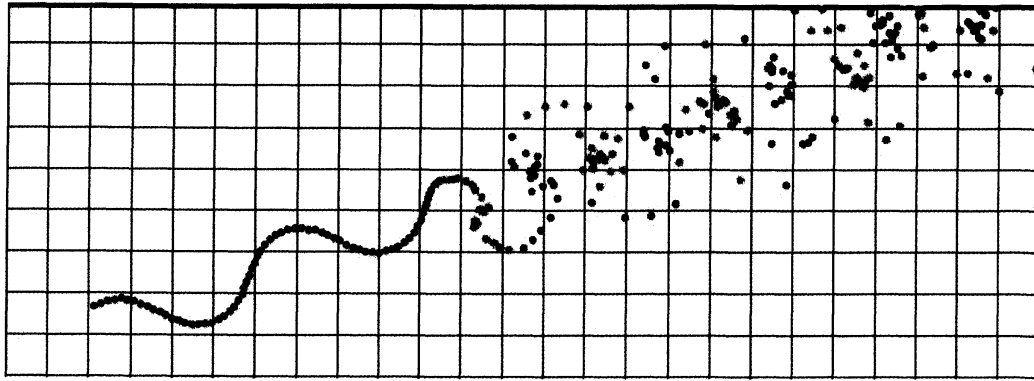


Figure 7. シミュレーションのスナップショット.

References

- [1] Newman, L. and Cannon, L. *Marine Flatworms The World of Polyclads*, CSIRO PUBLISHING (2003).
- [2] Dickinson, M. H., How to walk on water, *Nature*, **424** (2003), pp.621-622.
- [3] Low, K. H., Modeling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots, *Mechanism and Machine Theory*, **44** (2009), pp.615-632.
- [4] Chu, W, *et al.*, Review of biomimetic underwater robots using smart actuators. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **13** (2012), pp.1281-1292.
- [5] Kazama, T, *et al.*, A swimming machine driven by the deformation of sheet-like body inspired by the Polyclad flatworms. *Lecture Note in Artificial Intelligence*, **8064** (2013), pp. 390-392.
- [6] Kazama, T, *et al.*, Locomotion Diversity in an Underwater Soft-Robot Inspired by the Polyclad Flatworm. *Proc.of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2013 (IROS 2013) CD-ROM*, (2013), MoVT14.13.
- [7] 砂田靖志, *et al.*, 視界情報を用いた直感的ヘビロボット操縦システムの構築. 第 25 回自律分散システムシンポジウム予稿集 (2013).
- [8] 日野幹雄, 流体力学. 朝倉書店 (1992).
- [9] 飯間信, 昆虫飛翔と渦一翅相互作用. *ながれ*. **21** (2002), pp. 153-160.
- [10] Iima, M and Yanagita, T, Is a Two-dimensional Butterfly Able to Fly by Symmetric Flapping?. *Journal of the Physical Society of Japan*, **70** (2001), pp. 5-8.
- [11] Katz, J. and Plotkin, A. *Low-Speed Aerodynamics*, Cambridge University Press (2001).