ハマトビムシのロコモーション・メカニズム

Locomotion Mechanism of Beach Flea

〇学 天野 拓也 (秋田県大) 正 須藤 誠一 (秋田県大)
正 白井 敦 (東北大) 正 早瀬 敏幸 (東北大)

Takuya AMANO, Akita Prefectural University, Ebinokuchi 84-4, Yurihonjo, Akita Prefecture 015-0055, Japan
Seiichi SUDO, Akita Prefectural University
Atsushi SHIRAI, Tohoku University
Toshiyuki HAYASE, Tohoku University

Key Words: Biomechanics, Fluid Dynamics, Locomotion, Swimming, Jump, Drag, Beach Flea

1. 緒言

動物は一般に動きまわって生活を維持している。動物の運動は多様であり、力学的な観点からその遊泳や飛行挙動が調べられている⁽¹⁾。最近では、地球外惑星探査ロボットの開発、MEMS の技術における設計、小型飛翔体 (MAV) の開発などへの発想や技術革新を求めて、微小生物や動物の運動に関する活発な研究が進められている⁽²⁾。単細胞生物の遊泳から鳥の飛行まで、生物の移動運動を大きさや移動速度でみると、遊泳、歩行、飛行などの各運動様式において移動速度は一般に体長とともに増大していく。逆に、単位重量あたりの運動のエネルギーコストは、体長とともに減少する⁽³⁾。一般に、レイノルズ数の小さな領域では、流体の粘性抵抗、生物の表面積、および運動速度が現象を支配する。レイノルズ数が大きな領域では、抗力は運動する物体の形状による抗力係数、流体の密度、速度の 2 乗、および正面面積に比例する。端脚目ハマトビムシ科のヒメハマトビムシは体長が 10 mm 前後で、体長の数倍も跳びはねる動物であり、また、水中で遊泳することもできる。空気と水では、密度および粘度も大きく異なり、これら 2 種類の流体中で巧みな運動を行うハマトビムシはバイオメカニクスの観点から極めて興味深い生物である⁽⁴⁾。

そこで本報は、ハマトビムシの水中での遊泳挙動および空気中での跳躍挙動を高速度ビデオカメラシステムを用いて詳細に観察し、力学的な観点からロコモーションのメカニズムを考察したものである。

2. 実験装置および方法

本報で取り扱う試料生物は、節足動物門甲殻綱端脚目ハマトビムシ科に属するヒメハマトビムシである。本実験で使った試料ハマトビムシは、潮間帯に生息するありふれたハマトビムシであり、実験を行う前日あるいは当日、海辺で採集した。試料ハマトビムシの体長はおおよそ 5 mm ~ 10 mm であり、多数匹採集し、比較的活発な個体を選択して実験に使用した。運動解析実験では、ハマトビムシの自由跳躍、自由遊泳、およびテザード遊泳の 3 種類の解析を行った。跳躍実験では、アクリル平板および発泡スチロール平板上にハマトビムシを放つことにより、自由跳躍を行わせ、高速度ビデオカメラによって録画し、録画像を PC 上で解析した。また、遊泳挙動は透明アクリル樹脂で製作した水容器内 (寸法 58 mm × 54 mm × 7 mm) で遊泳を行わせ、高速度ビデオカメラによって録画し、PC 上で解析した。テザード遊泳では、ハマトビムシの胸部背側に針を生きたまま接着固定し、遊泳脚の運動を高速度ビデオ画像を通して解析した。高速度ビデオの撮影フレームレートは実験に応じて変えたが、4000 FPS 以上のコマ数を用いた。また、

Fig.1 Photograph of beach flea

Fig.2 A schematic diagram of experimental apparatus

ハマトビムシのテザード遊泳において、試料生物周りの流れの可視化を行った。可視化におけるトレーサは、試料生物の生息している付近で採集した泥粒子を用い水中に混入し、CW-YAG レーザ (3 W) 光 (波長 $\lambda=532 \mu\text{m}$) を 0.5 W でシート状に対象物周りを照射し、35 mm カメラによって撮影することによって行った。図 1 に本報で実験に用いたハマトビムシの写真を示す。図中にはハマトビムシの体のおもな名称も記入してある。図 2 は本報で構築した実験装置系の一例であり、水容器内での遊泳挙動解析実験の概略図を示している。跳躍実験は、容器部分を平板に換えて実験を行った。実験はいずれも室内常温下で行った。

3. ハマトビムシの運動におけるレイノルズ数

運動は動物にとってエネルギーコストの高い行動の 1 つであり、それを減らすように進化が進んでいる⁽⁵⁾。そのため動物の移動運動において、流体力学的抵抗を減らすような形態や機能が観察される。一般に物体に作用する流体抵抗は流れのレイノルズ数に依存する。そのため、本報でとりあげたハマトビムシの移動運動におけるレイノルズ数を考察しておく。後述するが、本報で取りあげたハマトビムシは陸上で通常は歩行するが、敵からの逃避などの際には、すばやく跳躍する。ハマトビムシの歩行は、およそ 11 mm/s 程度であり、歩行における力は床面と脚の摩擦によるものがほとんどであり、流体抵抗は無視し得る。そこで、跳躍におけるレイノルズ数 Re を考察する。ハマトビムシは跳

躍に際して体を回転しながら空中を移動する。そのため、式(1)の半径 R の球を仮定し、運動における Re を求める。

$$Re = \lambda_B^{\frac{2}{3}} \left(\frac{L}{2} \right) \quad (1)$$

ここで λ_B はハマトビムシの体のアスペクト比、 L は体長である。従って、レイノルズ数 Re は

$$Re = \frac{2RU_j}{\nu_a} = \frac{2 \times 2.05 \times 10^{-3} \times 1.7}{15.1 \times 10^{-6}} \approx 4.61 \times 10^2 \quad (2)$$

となる。ここで、 ν_a は空気動粘度、 U_j は跳躍速度である。本報で試料としたハマトビムシは陸生であるが、水中に入れると巧みに遊泳する。ハマトビムシは遊泳時には頭部を先端として体軸方向にほぼ真直に進む。そのため、代表長さは体幅 β を使用して、遊泳におけるレイノルズ数は

$$Re = \frac{\beta U_{smax}}{\nu_w} = \frac{3.61 \times 10^{-3} \times 0.11}{1.0 \times 10^{-6}} \approx 3.97 \times 10^2 \quad (3)$$

になる。ここで、 ν_w は水の動粘度、 U_{smax} は遊泳速度の最大値である。式(2)と(3)を比較すると、ハマトビムシは気体中および水中においてほぼ同程度の流れ状態の中にあると言える。

4. 実験結果および考察

4.1 ハマトビムシの跳躍 前述したようにハマトビムシは跳躍できる。ハマトビムシの跳躍時の様態を図3に示す。図3から、ハマトビムシは触覚で地面を確認後、曲がっていた腹部で地面を蹴って体を上方に投げ上げるように跳躍している。いま、空気抵抗を無視すると、ハマトビムシの跳躍距離 S は跳躍速度 U_j と軌道角 θ に依存し、

$$S = \frac{2U_j^2 \cos \theta \sin \theta}{g} = \frac{U_j^2 \sin 2\theta}{g} \quad (4)$$

となる。ここで g は重力加速度である。ハマトビムシの筋肉によって生成されるエネルギー E を用いて、跳躍速度 U_j を記述すると

$$U_j = (2E/m)^{1/2} \quad (5)$$

となる。最大跳躍距離は $\theta = \pi/4$ で得られ、 S は式(6)となる。

$$S = 2E/(mg) \quad (6)$$

式(6)を用いて、ハマトビムシの生成するエネルギー E を求めることができ、ここでは、 $E \approx 3.92 \times 10^{-6} \text{ J}$ が得られた。

4.2 ハマトビムシの遊泳 前述したようにハマトビムシを水中に入れると、巧みな遊泳を示した。図4はハマトビムシの自由遊泳時の遊泳速度 U_s の変動を示したものである。この遊泳速度の変動はハマトビムシの遊泳器官の運動と連動している。すなわち、図1に示した遊泳脚(Pleopods)を漕ぐときに速度が高く、元の位置に戻す(リカバリーストローク)ときに低い。すなわちハマトビムシは一定速度での遊泳ではなく周期的に速度が変動する遊泳様式を示す。ハマトビムシの遊泳脚は3対付属し、それぞれ左右が二又し、多数の細毛が生えている。高速度ビデオ観察の結果、遊泳脚の細毛はパワーストローク時には整列して開かれ、リカバリーストローク時には折畳まれて戻されていた。一例としてテザード状態で、細毛を開いて脚を漕いでいる正面写真を図5に示す。ハマトビムシはこの脚漕ぎによって抗力を生成し、流れを後方に送り、推進する。遊泳脚の細毛の長さは $282 \mu\text{m} \sim 614 \mu\text{m}$ であり、細毛間の間隔はおよそ $83 \mu\text{m}$ であった。これらの数値には流体力学的原因があると考えられるが、現在は不明である。

ハマトビムシの脚運動によって誘起される流れの可視化を行った。その結果の一例を図6に示す。図6から、ハマ

Fig.3 Framing camera record of beach flea jump

Fig.4 Variation of swimming speed of beach flea

Fig.5 Minute hairs in the swimming legs

Fig.6 Visualization photograph of flow field

トビムシは遊泳時には跳躍に用いる腹部を真直ぐに伸ばしていることが明らかである。また、後方に形成された流れのパターンにふくらみとくびれが観察される。これらは、3対の遊泳脚の動きに対応して形成されたものと考えられる。比較的速い部分の流速はおよそ 0.6 m/s 程度である。

5. 結 言

陸生の節足動物であるハマトビムシの水中での遊泳挙動および空気中での跳躍挙動を観察し、ロコモーション・メカニズムの解明を試みた。

文 献

- (1) 東 昭, 生物の動きの事典, 朝倉書店, (2000), 1.
- (2) Dickinson, M.H., et al., Science, 288(2000), 100.
- (3) Schmidt-Nielsen, K., Science, 177(1972), 222.
- (4) 須藤・他, 実験力学, 11(2011), 19.
- (5) Gleiss, A.C., et al., Nature Comm., 2:352(2011), DOI:10.1038.