解 説

アメンボ型水面移動ロボット

Water Walking Robots Inspired by Water Striders

鈴木 健 司* *工学院大学

Kenji Suzuki* *Kogakuin University

1. は じ め に

昆虫は、羽ばたきによる飛翔、垂直面での歩行など、サイズが小さいことを利用した優れた移動方法を実現している。アメンボなどに見られる水面移動も、小さい昆虫ならではの移動方法の一つといえる。アメンボは、人間が浮力により水に浮くのと異なり、おもに表面張力を利用して水面上に立ち、水の膜を破ることなく水面上を移動することができる。アメンボの脚からはワックスのような撥水性の物質が分泌されており、脚の表面を撥水化している。しかし、一般に材料の性質だけでは、強い撥水性を得ることはできない。アメンボの脚を拡大すると、図1に示すように多数の細かい毛が存在し、さらに毛の表面にはナノメートルオーダーの溝が見られる。このような階層的な微細構造によって、撥水性が強化され、接触角が 167° 程度の超撥水性が実現されており[1]、これが効率の良い水面移動を可能にしている。

近年は、水面を移動する生物の荷重支持と推進のメカニズムが多く研究者により研究されるようになった。また、アメンボを模倣し、表面張力を利用して水面上を移動するロボットも多数報告されている。Suter ら[2]はハシリグモ (fishing spider) の水面移動の原理を詳細に調べている。Hu ら[3]~[5]は、水面移動の運動量の変換機構を解明し、弾性体に蓄えられたエネルギーにより推進するロボットを開発している。Sitti らのグループ[6]~[8]は、水面での荷重支持と推進のメカニズムを解明し、DC モーターとバッテリーを搭載して水面上を自立的に直進、旋回可能なロボットを開発している。また、Pan らのグループは[9][10]、表面を化学的に処理した超撥水の脚を用いて、水面上を移動するロボットと跳躍するロボットを開発している。

本稿では、アメンボの水面上での荷重支持と推進の原理に関する理論と実験による解析結果を示し、筆者らが開発した2種類の水面移動ロボットについて紹介する[11]~[13]。

図1 アメンボの脚の表面

図2 支持脚のモデル

2. 支持力と引き離し力

水面上に静止している物体に働く鉛直方向の支持力 F は、浮力成分 F_B と表面張力成分 F_S の和として表される。

$$F = F_B + F_S \quad (1)$$

図2は、水面上でのアメンボの脚を円柱としてモデル化したものであり、円形断面に働く力を示している。単位長さの脚に働く浮力成分 F_B は、固体と液体の界面に働く液体の圧力 p の鉛直成分を積分したものであり、脚の上部の空間 (S_1 部分) から排除された水の重量に等しい。

$$F_B = \int_{-\phi_0}^{\phi_0} p \cos \phi r d\phi = \rho g S_1 \quad (2)$$

一方、表面張力成分 F_S は、固体・液体・気体の境界である「3重線」に沿って、水面の接線方向に働く表面張力 γ の鉛直成分となる。

$$F_S = 2\gamma \sin \theta_0 \quad (3)$$

20°C の水では $\gamma = 72.75 \text{ [mN/m]}$ である。浮力と表面張

原稿受付 2014 年 10 月 15 日

キーワード: Biomimetics, Surface Tension, Microstructure

〒192-0015 八王子市中野町 2665-1

*Hachioji-shi, Tokyo

力の比はボンド数という無次元数で表され、物体の幅を w 、深さを h とすれば、 $Bo = \rho gh w / \gamma$ と定義される。アメンボの脚では $Bo = 10^{-2} \sim 10^{-4}$ となり、表面張力が支配的となる。

また、水の圧力 p は深さに比例し、かつ水面の曲率に比例する。このことから水面は「曲率が深さに比例する曲線」となり、曲線の式 $z = f(x)$ は、式 (4) を満たす。

$$p = -\rho g z = -\frac{\gamma f''(x)}{(1 + f'(x)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

図 2 のように 1 本の脚のみが水面上にあるときには、水面形状は式 (4) を $f(x_0) = z_0$ 、 $f(\infty) = 0$ の境界条件で解くことにより得られる。式 (4) を $x = x_0$ から ∞ まで積分し、 $f'(x_0) = \tan \theta_0$ を代入すると次式が得られる。

$$\rho g S_2 = \frac{\gamma f'(x_0)}{\sqrt{1 + f'(x_0)^2}} = \gamma \sin \theta_0 \quad (5)$$

式 (1)～式 (5) より、支持力は次のように表される。

$$F = F_B + F_S = \rho g (S_1 + 2S_2) \quad (6)$$

式 (6) は、「水面上の物体に働く支持力は、物体によって排除された水の重量に等しい」というアルキメデスの原理が、表面張力成分を含めても成り立つことを示している。

なお、水面の曲線の方程式は、 x を z の関数として解析的に表すことができる (C は積分定数)。

$$x = l_c \cosh^{-1} \left(\frac{2l_c}{|z|} \right) - \sqrt{4l_c^2 - z^2} + C \quad (7)$$

ここで $l_c = \sqrt{\gamma / (\rho g)}$ は毛管長と呼ばれており、20°C の水では 2.72 [mm] の値を取る。 $w/l_c \cong \sqrt{Bo}$ の関係があり、物体の幅 w が l_c より十分小さくなれば浮力に対して表面張力が支配的になる。水面形状の計算結果を図 3 に示す。

脚に荷重を加えて水面から沈めていくと、図 4(a) のように水面の傾き角が $\theta_0 = 90^\circ$ のときに単位長さ当たりの表面張力成分 F_S は最大値 2γ となる。この時の 3 重線の深さは $\sqrt{2}l_c = 3.85$ [mm] (20°C) である。脚の接触角 θ_c が 90° より大きい場合には、表面張力成分は最大値 2γ を

図 3 水面曲線

取り得るため、表面張力によって荷重を支持するためには、接触角をそれほど高くする必要はないことが分かる。3 重線の深さが $\sqrt{2}l_c$ を超えると F_S は減少し、図 4(b) のように水面はオーバーハングの形状となって水没する。

一方、脚を水面から引き上げる際には、図 5(a) のように水面が脚に引っ張られて上昇し、上昇した部分の水の重量に相当する「引き離し力」が発生する。脚が水面から完全に離れるときの水面形状は図 5(b) のようになり、理論上の引き離し力は $F = 2\gamma \sin \theta_c$ と表され、脚表面の接触角が大きいほど引き離し力が小さくなる。

以上の理論を検証するため、図 6 に示す装置を用いて、

図 4 表面張力最大と深さ最大の状態

図 5 引き離し力

図 6 支持力、引き離し力の測定

(a) experiment

(b) simulation

図7 支持力と引き離し力

支持力、引き離し力の測定を行った。直径 0.5 [mm]、長さ 30 [mm] の真ちゅう線の表面に接触角の異なる 3 種類の撥水剤を塗布した人工の支持脚を製作し、平行板ばねの先端に固定した。水面を電動ステージでゆっくり上下に移動させ、支持脚にかかる支持力、引き離し力を板ばねの変位から計測した。図 7(a) に測定結果、(b) に計算結果を示す。横軸は水面からの高さ、縦軸は支持力 (+ 側) と引き離し力 (- 側) である。支持力は実験値と理論値がよく一致しており、支持力が最大値に達したあと若干減少してから深さ約 5 [mm] で水没している。脚表面の接触角による支持力の差はほとんどなく、撥水剤の厚みによる浮力成分の差がわずかに現れている。一方、引き離し力は実験、理論ともに接触角が大きい (撥水性が高い) ほど小さくなっているが、実験値は理論値よりも小さくなった。これは水が脚から離れる瞬間に、理論では水が脚全体で線接触すると仮定しているのに対し、実験では脚の端点で点接触になったためと考えられる。

以上の結果より、脚が超撥水性であることは、荷重支持よりも脚を水から離すときに有利に働くと考えられる。

3. 推進力

アメンボの脚は 6 本あり、前脚、後脚は水面で体重を支持し、中脚は水面をかくことによって推進力を得ている。移動方式には、水面との接触を保つすべり移動と、水面から

図8 抗力の測定

図9 抗力の測定結果

離れる跳ね移動がある。いずれの場合にも駆動脚が水面を破ることはなく、撥水性の脚により水面に窪みをつくり、窪みの壁を後方に蹴ることによる水の抵抗が推進力として働く。また、支持脚では推進によって水の抵抗を受けるため、正味の推進力は、駆動脚の推進力から支持脚の抵抗を引いたものになる。

アメンボの推進に関与する力として、(1) 圧力抵抗、(2) 粘性抵抗、(3) 前後非対称な表面張力による抵抗、(4) 付加質量による慣性力、(5) 表面張力の勾配によるマランゴニ力、(6) キャピラリー波の発生による抵抗などが考えられる。このうち、(5) は、一部の水生昆虫で後方に界面活性剤を分泌して表面張力の勾配を作っている例があるが [4]、アメンボの場合は無視できる。(6) は移動速度がキャピラリー波の最低速度である 230 [mm/s] より大きい場合のみ発生する。本章では、撥水性の脚を水面に沿って一定速度で移動させた際に発生する水の抗力の測定結果を示す。

実験には図 8 の装置を用い、表面を撥水处理した 2 種類の真ちゅう線 A, B (接触角 125° と 146°) と、撥水处理をしていない真ちゅう線 (接触角 80°) を水面に押し付けた状態でリニアガイドにより水面に平行に移動させ、水から受ける力を平行板ばねの変位から測定した。測定結果を図 9 に示す。

図 9 の二つのグラフから、速度、深さの増加とともに抗力が増加するが、いずれも比例関係にはないこと、撥水性の脚 A, B では抗力の差が少ないが、真ちゅう線では水没しやすく、水没すると抗力が大幅に減少することが確認された。また、脚を移動させる際には、図 10 のように水面の窪みと隆起がみられた。以上の結果を抗力の式 $F_D = 1/2 C_D \rho A U^2$

図 10 水面形状

図 11 抗力と速度、投影面積の関係

と比較するため、速度の2乗 U^2 、投影面積 A と抗力 F_D の関係を調べた結果を図 11 に示す。抗力は速度の2乗にほぼ比例していることが分かる。また、投影面積 A は、図 10 に示すように、水面の窪みの深さ d と水面の隆起の高さ h を考慮して $A = l(d + h)$ として算出したところ、抗力が A に比例した。抗力係数は $C_D = 0.125$ となった。なお、一般に撥水性の高い物体では水中において水の流動抵抗が減少することが報告されている [14] が、本実験の条件では、撥水性による抗力の減少はみられなかった。

4. 水面移動ロボット

4.1 共振を利用したロボット [11] [12]

表面にマイクロ構造を有する撥水性の高い支持脚を用いて、表面張力により水面を移動する自立型ロボットの製作を行った。図 12 にその写真を示す。ロボットの駆動方法として、偏心したおもりを持つ振動モータを用い、支持脚を共振させることによって推進力を得ることとした。3.7 [V] のリチウムポリマー電池を搭載し、PIC (Peripheral Interface Controller) を用いて回転数を PWM 制御することにより振動数を制御した。ロボットの質量は 7.85 [g] である。ロボットは放射状の 12 本の支持脚を持ち、その全長を 1 [m] として、ロボットの重量の約 2 倍の 160 [mN] (16.3 [gf]) の荷重を支持できるように設計した。支持脚には、直径 1 [mm] の真ちゅう線の表面にフォトリソグラフィとエッチングにより凹凸を加工し、撥水剤を塗布したものを用いた。表面の接触角は約 123° である。図 13 に示すように、振動モータの回転軸はロボットの進行方向に対して垂直に配置されており、モータを回転させると、脚はおもりの回転に同期して円軌道を描いて共振し、水面を蹴ることによって推進力が得られる。12 本の脚は、荷重支持 (4 本)、直進移動

図 12 共振を利用したロボットと撥水脚 (inset)

図 13 ロボットの脚の配置と共振周波数

(4 本)、右旋回 (2 本)、左旋回 (2 本) の役割が与えられており、それぞれの脚の長さが異なっている。脚の長さの違いにより固有振動数も変化するため、モータの回転数を制御することで共振する脚が変わり、一つのモータで直進、右旋回、左旋回の 3 種類の運動を実現することができる。

開発したロボットを用いて、屋外の池で水面移動実験を行ったところ、風や波などの外乱が加わっても水面を破ることなく水面上を移動した。プログラムによりモータの回転数を順次切り替えることにより、自立的に直進と左右の旋回移動を行うことができた。移動速度は直進移動が約 70 [mm/s]、旋回移動は約 50 [mm/s]、旋回半径は左旋回が約 700 [mm]、右旋回が約 800 [mm] となった。

4.2 チェビシェフリンク機構を用いた 6 脚ロボット [13]

次に、アメンボと同様に 6 本の脚を持ち、前・後脚を支持脚、中脚を駆動脚とする水面移動ロボットの開発を行っ

図 14 水面移動ロボット（6脚型）と撥水性の脚

図 15 中脚の駆動機構と脚先端の軌跡

た、ロボットの脚は、直径 0.5 [mm] の真ちゅう線の表面に、フェムト秒レーザ加工機を用いて、溝加工を行い、撥水剤 FS-1010 を塗布することによって、高撥水性の脚を製作した。真ちゅう線を直線状に伸ばしてステッピングモータの回転軸上に固定し、溝の間隔が $25\text{ [}\mu\text{m]}$ になるようにステッピングモータを回転させながら、フェムト秒レーザを用いて真ちゅう線の軸方向に溝を加工した。図 14 に、ロボットの写真と、撥水の脚に水滴を付着させた様子を示す。水の接触角は約 155° となった。中脚は、チェビシェフリンク機構を一部改良した機構を用いて駆動した。チェビシェフリンク機構は、リンクの先端が D 字形の軌道を描き、直線部が低速、曲線部が高速で動くという特徴を持つ。この性質を利用して、脚を水没させずに水深 3.5 [mm] の位置で高速でかき、水面より上を低速で戻すようにリンクの長さを調整した。図 15 に中脚の機構と脚先端の軌跡を示す。機体のフレームは、厚さ 0.5 [mm] のカーボン板を用い、フェムト秒レーザで加工することにより軽量化を行った。DC モータとバッテリーを搭載し、自立移動が可能であり、質量は 4.39 [g] である。水面移動実験を行い、表面張力で水面に浮き、平均 60 [mm/s] の速度で移動することを確認した。

5. おわりに

表面張力を利用した水面移動について、荷重支持と推進の原理を示し、2 種類の水面移動ロボットを紹介した。これらのロボットは、将来的には水質検査や環境モニタリング、教育、エンタテインメント等への応用が期待されてお

り、今後、ロバスト性の向上、水没時の復帰、長時間駆動などの課題を解決していく必要がある。

参考文献

- [1] Xuefeng Gao and Lei Jiang: "Water-repellent legs of water striders," *Nature*, vol.432, p.36, 2004.
- [2] R.B. Suter and H. Wildman: "Locomotion on the Water Surface: Propulsive Mechanisms of the Fisher Spider DOLOMES TRITON," *The Journal of Experimental Biology*, vol.200, pp.2523–2538, 1997.
- [3] D.L. Hu, B. Chan and J.W.M. Bush: "The hydrodynamics of water strider locomotion," *Nature*, vol.424, pp.663–666, 2003.
- [4] J.W.M. Bush and D.L. Hu: "Walking on Water: Biocomotion at the Interface," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol.38, pp.339–369, 2006.
- [5] D.L. Hu, M. Prakash, B. Chan and J.W.M. Bush: "Water-walking devices," *Exp. Fluids*, vol.43, pp.769–778, 2007.
- [6] Y.S. Song and M. Sitti: "Surface-Tension-Driven Biologically Inspired Water Strider Robots: Theory and Experiments," *IEEE Transactions on Robotics*, vol.23, no.3, pp.578–589, 2007.
- [7] Y.S. Song and M. Sitti: "STRIDE: A Highly Maneuverable and Non-Tethered Water Strider Robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.980–984, 2007.
- [8] O. Ozcan, H. Wang, J.D. Taylor and M. Sitti: "Surface tension Driven Water Strider Robot using Circular Footpads," *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3799–3804, 2010.
- [9] X. Zhang, J. Zhao, Q. Zhu, N. Chen, M. Zhang and Q. Pan: "Bioinspired Aquatic Microrobot Capable of Walking on Water Surface Like a Water Strider," *Applied Materials and Interface*, vol.3, pp.2630–2636, 2011.
- [10] J. Zhao, X. Zhang, N. Chen and Q. Pan: "Why Superhydrophobicity Is Crucial for a Water-Jumping Microrobot? Experimental and Theoretical Investigations," *Applied Materials and Interface*, vol.4, pp.3706–3711, 2012.
- [11] 鈴木、小池、高信、三浦: "表面張力を利用した水面移動ロボットの研究", *日本機械学会論文集 (C 編)*, vol.75, no.751, pp.656–665, 2009.
- [12] K. Suzuki, H. Takanobu, K. Noya, H. Koie and H. Miura: "Water Strider Robots with Microfabricated Hydrophobic Legs," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.590–595, 2007.
- [13] M. Tsukakoshi, K. Suzuki, H. Seki, H. Takanobu and H. Miura: "Water Strider Robot with Microfabricated Hydrophobic Legs," *ASME/JSME Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment*, pp.306–308, 2012.
- [14] 金子、長谷川、松本、尾崎、成合、牧、矢部: "超微細凹凸面による流動抵抗低減に関する研究", *日本機械学会論文集 (B 編)*, vol.66, no.644, pp.1085–1090, 2000.

鈴木健司 (Kenji Suzuki)

1993 年東京大学大学院博士課程修了。1993 年東京大学助手、1995 年講師、2004 年工学院大学助教授、2009 年教授、現在に至る。昆虫規範型ロボティクス、MEMS、機能性表面などの研究に従事、2011 年機械学会賞（論文）受賞、日本機械学会、電気学会、日本トライボロジー学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）