

物理科学雑誌

parity

第26巻第7号  
2011年7月1日発行  
毎月1回1日発行  
ISSN 0911-4815

PHYSICS TODAY 提携

# パリティ

2011  
07

第一原理からみた磁力線再結合 | 量子生物学の展開

地球物理学における時間反転法 | 水上を歩く

量子気体を顕微鏡でみる | 地球大気で発生する高エネルギーガンマ線



物理の雑誌

MARUZEN

ジョン・ブッシュ, デイビッド・フー

昆虫やクモが水上を渡り歩く巧妙な方法は、微視的な物理を応用している。この方法は、もっと大きなものが水上を歩くには役立たないが、微小流体工学の研究者たちは大きな関心を寄せている。

人類は長い間、水の上を歩く方法を探し求めてきた——それは神の如き妙技であり、人が恐怖に打ち勝つことの象徴でもあった。私たち人類は水に浮くための簡単な装置をつくってそれを実現しようとしてきたが、ほかの動物たち(大型動物であれ小型動物であれ)は自然に備わった能力を進化させてきた。大型動物の場合、その妙技は人類にはとても獲得できそうにない強い力と技能を必要とする。この記事で紹介する小型動物の方法は、脚を動かすといった動物自身のスケールから、脚と水の表面との相互作用というマイクロメートル以下のスケールのダイナミクスにまでわたる、幅広いスケールでの過程にもとづく巧妙な技である。この問題は、生物学者や流体力学の研究者、材料学者をとり込む、たいへん学際的な対象なのである。

## 辻井 薫 訳

### Walking on water

John W. M. Bush and David L. Hu

John W. M. Bush is a professor of applied mathematics at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. David L. Hu is an assistant professor of mechanical engineering and biology at the Georgia Institute of Technology in Atlanta.

Physics Today Vol. 63 No. 6  
© 2010 American Institute of Physics

動物は、外界に力を加えることによって運動する。つまり、逆向きで大きな等しい反作用の力を受けることによって、動物は前に進む。陸上の動物たちは、地面に対して力を加える。そのとき反作用として、けん引力とよばれる推進力を得る。魚は、自らを前進させる流体力学的な力を発生させて、身体を進める。そのとき、彼らは水を後方に押しやっているのだ。同様に、鳥は空気を下方へ押しやって空中に浮かぶ。それで得られる推進力が、鳥の体重とつり合っている。水上を歩く動物たちの多くは、同様の推進力を、流体に運動量を与えることによって得ている。しかも彼らは、空気と水の界面で、その推進力を得ているのである。

水上を歩く昆虫やクモの世界は、表面張力に支配されている。空気-水界面の性質である表面張力は、トランボリンのようなふるまいをする。表面張力とは単位長さあたりの張力で、表面の接線方向に働く。この力のおかげで、水より比重の大きい小さな物体を表面で支えることができる。書類クリップ、水上を歩くクモ(図1a)、昆虫(図2a)などがその例である。水表面に化学物質の濃度差があると、表面張力に勾配が発生し、それが原因で流れが生じる。緊急時には、ある種の昆虫は後ろに化学物質を放出して表面張力を下げる。その結果、その昆虫は前方に進むことになる(図1b)。

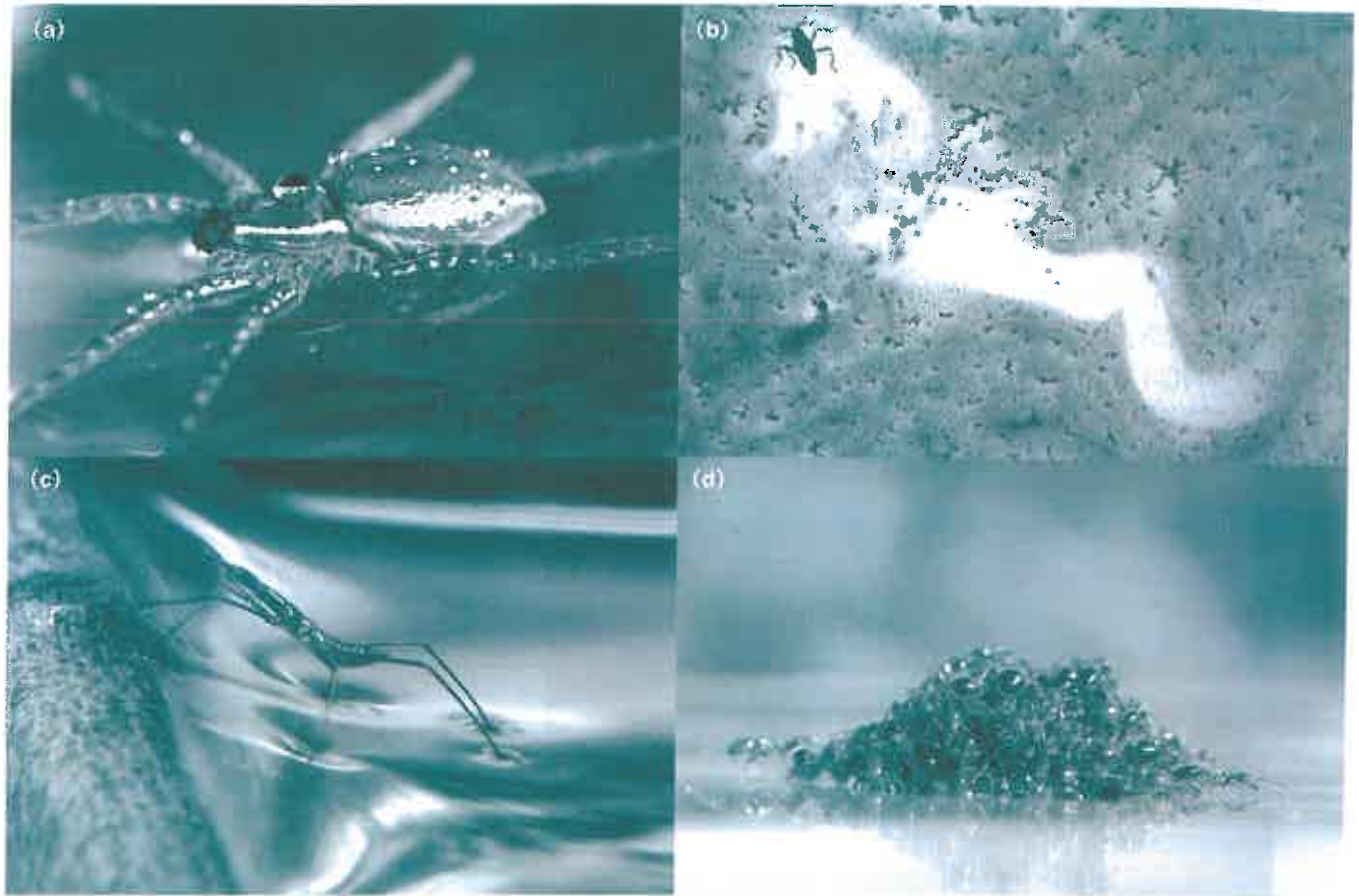
空気-水界面の表面張力 $\sigma$ は、だいたい70 dynes/cmである。1 dyneの力はカの重さくらいだから、表面張力は人のスケールでみればとるに足りない大きさである。それでも、毛管長<sup>†</sup>( $l_c = \sqrt{\sigma/\rho g} \approx 2.6$  mm,  $\rho$ は水の密度,  $g$ は重力加速度)よりも小さなスケ-

ルでは、表面張力は重力を凌駕する。かくして、世界でもとくに小さな生き物たち、とくに水面に棲むものたちには、表面張力はたいへん大きな影響がある。昆虫やクモは、表面張力を上手に使いこなす無数の方法を開発した。たとえば、彼らは水面から下に沈むのを防ぐために、はっ水性(water-repellent)の外被を進化させた。さらに、多くのものは、水面に沿って水面を捕まえて、あるいは水面を横切って進むことができるような適応力を身につけた。

### 粗い表面にすること

昆虫は、地球上でもっとも数も種類も多い生き物である。昆虫学者は、100万種を超える昆虫を列挙している。そのうち、約90%は飛ぶことができ、3%は泳ぐことができる。だが、水面を歩く能力を身につけたのは、たったの1200種(約0.1%)だけだ。この惑星の70%が水で覆われていることを考えれば、特筆に値する事実である。アリをはじめ大部分の地上の昆虫は、水上で動くことにたいへん難儀する。彼らははっ水性の外被をもたないので、液体表面にくっつき、そこで捕まってしまう。もし彼らがはっ水性の外被を身につけていたなら、もっとも小さな部類の昆虫たちは、地上と同じように水面を歩けるだろう。彼らは、はっ水性外被と水面との間の微視的な相互作用を利用して、けん引力を得ることだろう。もっとも効率的に水上を歩く昆虫たちは、歩行方法と脚の表面構造をもにたいへん特殊に発達させて、空気-水界面で生活するまでに適応した。

固体表面を濡らすのに必要なエネルギーは、その固体が親水性(hydro-



〈図1〉水上歩行を可能にする微視的な物理

(a)表面張力は、ハシリグモ (*fishing spider*) のような小さな水上歩行動物の体重を支える、トランポリンのような働きをする。クモのはっ水性外被上にある数珠状の水滴に注意。(b)カタビロアメンボ (*Microvelia*) は後方に脂質を放出して表面張力の差をつくり、その力で前方に進む。(c)(カラー写真は表紙を参照。)イトアメンボ (*Hydrometra*) のようなある種の昆虫は、前の親水性の爪と後脚でメニスカスをつかみ、登ることができる。(d)あたりが冠水している間、ハリアリははっ水性のいかだをつくって水面に浮かぶために集まる。

philic)であるか疎水性(hydrophobic)であるかによって大きく違ってくる。表面を粗くすると、実表面積が増加し、濡れが強調される。たとえばハスの葉のワックスに覆われた粗い表面は、はっ水表面(water-repellent surface)開発を刺激し、そのきっかけをつくった。そのはっ水表面はいまや、腐食防止、水の摩擦抵抗低減、自己洗浄(self-cleaning)効果などに広く使われている。表面のワックスは葉を疎水

性にし、粗い凸凹構造ははっ水性を与える。水滴が衝突したとき、葉の表面への付着力は無視できる程度で、水滴は容易に転がり落ちる。同様に、水上を歩く昆虫やクモは、ワックスに覆われた、密集した毛によって水をはじく。そのおかげで彼らは雨滴の衝撃による沈没から免れ、生き残る。密集した毛のマットはまた、呼吸孔に水が浸入するの防いでいる。そのため、ある種の昆虫は水中でもかなりの長時間

呼吸することができるし、無期限にそれが可能なものもある。

アメンボはもっともよく知られた、そして高度に適応をとげた水上歩行昆虫の1つである。推進力を得るために、アメンボはオールで漕ぐように、真ん中の1対の脚で水の表面を蹴る。駆動脚に生えているしなやかで溝のある毛は、そろって脚先に向いている(図2b)。チョウの翅の表面にある似たような微細構造は、雨滴を翅の先端方向



にのみ転がらせる。アメンボの脚の微視的な構造は、動かしているときの推進力の発生と、滑っているときの付着力の低減の両方に寄与している。アメンボは、脚の毛の先端だけを水中に差し込み、まるでオールのように脚を使って漕ぐ(図2c)。見た目には、足で漕いでいる様子は後方に伝わる波紋だけでしか確認できない。しかしながら、流れを可視化すると、これらの波は運動量を後方に移すための1対の渦

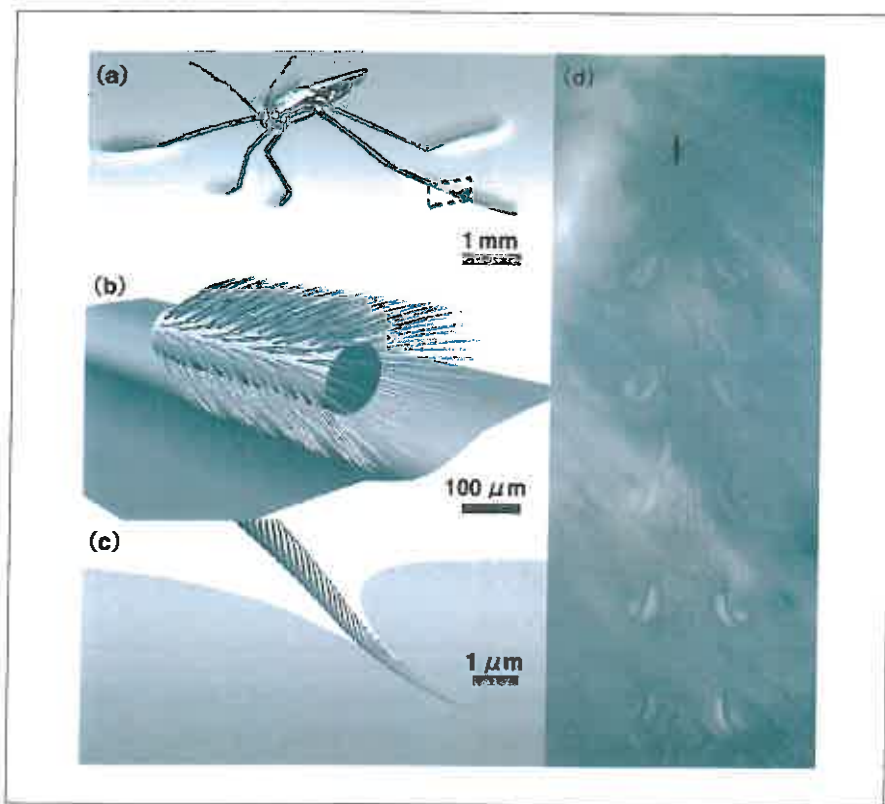
をともなっていることがわかる(図2d)。アメンボは、体重を支えるのに表面張力を使い、推進力獲得のために水面下の運動量移動を利用する、典型的な小型水上歩行昆虫である。

筋肉を動かさずに、水の表面に沿って進む一群の昆虫がある。人のスケールではよどんだ池の表面が平らに見えても、陸や水面に出ている草木に隣接する部分には、高さが毛管長 $l_c$ の曲がったメニスカス(接触面)が存在す

る。比較的大きな昆虫なら、メニスカスを越えて手を伸ばすか跳び超えることができるが、もっと小さな生き物ではそうはいかない。彼らは、メニスカスの坂を滑って上がらなければならない。それには、彼の最大初速度は臨界値(約23 cm/s)を超える必要がある。いくつかの種は、浮遊する小さな物体間に働く横方向の力<sup>\*1</sup>を利用するという、独創的なメニスカス登坂技術を開発した。彼らは水の表面をつかんで上方に引き上げるために、自由に出し入れできる親水性の爪を使う。それによって、自分をメニスカスの上まで引き上げる横方向の力を発生させるのである(図1c)。

ある種の生き物は集合体を形成することにより、水の表面をうまく進むことができる。ハリアリ(fire ants)は数万匹のコロニーをつくる。個々のアリは水上を上手に歩くことができないが、コロニーになってみんなで冠水を生き延びるための賢い方法を心得ている。アリは自分たちの脚をつなぎ合わせていかだをつくる。そのいかだの表面は、からみ合った脚のために粗い凸凹構造になっており、はっ水性を示す(図1d)。アリのいかだの平均密度は水の15%なので、乾いた状態であることができ、もしいったん沈んでもすばやく水面に浮上する。これは自然の自己組織化はっ水体(self-assembling water-repellent body)の例であり、アリは新しい住み家が見つかるまで、何か月もコロニーを維持したまま漂流することができる。

この10年間に技術者たちは、さまざまな精緻な工夫を凝らした、水上を歩く小さなロボットを開発してきた。ほかの水上歩行する機械じかけと同様



〈図2〉アメンボの巧妙な機能

(a)アメンボの表面には、ワックスに覆われた多数の毛が生えていて、それがはっ水性を与え、水中に沈むことを防いでいる。個々の脚先の水の表面が、体重を支えるために凹んでいることに注意してほしい。(b)アメンボの表面の毛には方向性があり、それが効率的な推進力に寄与している。この毛の生えた脚の図は、(a)の四角で囲んだ部分を拡大したものである。(c)脚先の個々の毛は、表面から水中に差し込まれている。毛が水中に差し込まれても、ナノメートル大の溝に空気が残っているので、毛が完全に濡れることはない。(d)アメンボが脚をひとかきすると、1対の渦が発生する——1本の脚が1つの渦を発生させるのである。

に、このロボットたちも、自然界の生き物と比べるとエレガントさと耐久性に欠けている。このロボットたちの欠点は逆に、水上歩行動物たちの身体の繊細な構造の重要性を際立たせている。それらの繊細な構造は、微小流体工学の装置の工夫に必要な情報を提供し、着想を刺激する。微小流体工学と

は、微小な流体の操作、とくに“チップ上の研究室”(lab-on-a-chip)<sup>†</sup>とよばれる技術に関係する、いま新しく芽吹きつつある分野である。多くの微小流体工学の問題は、わくわくするような新しい技術的挑戦を提示している。しかし、それらははるか昔に、すでに自然界が解いていた問題なのである。

#### 参考文献

- 1) P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré: *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*, A. Reisinger, trans., Springer, New York (2004). (奥村剛訳: 『表面張力の物理学』吉岡書店(2004).)
- 2) Y. Pomeau, E. Villermaux: "Two Hundred Years of Capillarity Research", *Physics Today*, March 2006, p. 39.
- 3) D. L. Hu, J. W. M. Bush: "The Hydrodynamics of Water-Walking Arthropods", *J. Fluid Mech.* **644**, 5(2010).

# ピーターソン 活動銀河核

巨大ブラックホールが引き起こすAGN現象のすべて

Bradley M. Peterson 著

和田桂一・栗木久光・亀野誠二・谷口義明・寺島雄一・長尾 透 共訳

● A5・328頁 定価6,300円(税込) ISBN978-4-621-08249-2

● 本書「ピーターソン 活動銀河核」では、AGN現象の観測的性質の  
● 基本から、AGNを理解する上で必要となる基本的な物理、AGNを用い  
● た宇宙の進化の探査方法などを丁寧に解説し、超巨大ブラックホールと銀  
● 河との相関、宇宙の構造形成、進化の実像に迫ります。

● また、日本語版では、豊富な訳注、引用文献および補遺を付し、原著の  
● 出版(1997年)以降の研究進展について読者が辿れるようにしています。  
● 「ピーターソンの教科書」と呼ばれるほど、本書はいまなお重要な文献とし  
● て位置づけられ、AGNは今や必須知識であり、本書はその必読書。



◎ MARUZEN 丸善出版株式会社

〒140-0002 東京都品川区東品川 4-13-14 グラスキューブ品川 営業部 TEL(03)6367-6038 FAX(03)6367-6158  
<http://pub.maruzen.co.jp/>