

令和 6 年 9 月 28 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04257

研究課題名（和文）水面歩行生物の渦推進メカニズムに関する実験研究

研究課題名（英文）Experimental study on vortical propulsion mechanism of biology locomotion on water surface

研究代表者

李鹿 輝（Rinoshika, Akira）

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00253906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、水面歩行生物の渦推進メカニズムを定量的に解明するため、アメンボを対象とする、PIVと三次元トモグラフィックPIVを用いてアメンボの脚が生み出す水面下の三次元渦構造とそのダイナミクスを明らかにする。流体力学の視点から、アメンボの推進力または推進効率と生み出す三次元渦構造との関係を解明し、推進メカニズムを定量的に明らかにした。さらに、アメンボの連続水面歩行とその着水のメカニズムも定量的に解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アメンボなどの渦推進メカニズムの新たな解明は、将来的には極めて広い技術分野において新技術開発、環境負荷軽減、省エネルギーなどに寄与しうる。また、本研究は自然に学んだ基礎サイエンスの知見を活かし、「自然」の機能を「ものづくり」に活用するといえる。

研究成果の概要（英文）：In order to quantitatively elucidate the vortex propulsion mechanism of water-walking organisms, this study aims to clarify the three-dimensional vortex structure and its dynamics under the water surface created by the water strider's legs using PIV and three-dimensional tomographic PIV. reveal. From the perspective of fluid mechanics, we clarified the relationship between the propulsive force or propulsion efficiency of the water strider and the three-dimensional vortex structure it produces, and quantitatively clarified the propulsion mechanism. Furthermore, we quantitatively elucidated the mechanism of the water strider's continuous walking on the water surface and its landing on the water.

研究分野：流体工学

キーワード：生物流体工学 アメンボ 渦

1. 研究開始当初の背景

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。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、ほかの生物たちは自然に備わった能力を進化させてきた。彼らは脚を動かすといった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。彼ら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、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。彼らの多くは、流体に運動量を与えることによって同様の推進力を得ている。

池や川、外洋の水面に生息している水面を移動する昆虫のアメンボはその一種類である。彼の体重は、自由表面が湾曲して生じた表面張力によって支えられており、水をはじく左右の中脚をこぐように動かして進む。従来、アメンボの脚は小さいさざ波(波紋)をつくり出すことで前に進む力を得ている(すなわち、アメンボの脚はオールのようにこいで水面を進む)と考えられてきたが、最近の研究は、どんな大きさのアメンボでも、主としてこぐ動作をする脚が生み出す双極性の渦によって運動量を輸送させることを明らかにしている。しかし、これらの研究は水面の流れとアメンボの動きにだけ注目し、アメンボの推進メカニズムは定量的にまだ解明されていない。これを解決する重要な鍵となるのは、アメンボの脚が生み出す水面下の三次元渦構造とそのダイナミックの解明である。これは本研究の核心をなす学術的「問い」である。これまで、アメンボの脚が生み出す水面の双極性の渦は水面下に三次元半球状と推測されているが、実験的な解明はまた明らかにしていない。

また、アメンボは水面を飛び跳ねる瞬間、表面張力が生まれるギリギリの速度で水を押し下げている。つまり、アメンボは絶妙な速度で脚を動かしており、大きな表面張力が生まれ、かつ脚が沈んでしまわないギリギリのバランスを保っている。アメンボが飛び跳ねるとき(連続水面歩行を含む)生み出す水面下の三次元流れ構造も本研究の学術的「問い」である。

一方、昆虫や魚などの生物が推進に利用している翅やヒレは、日ごろ我々が利用している翼やスクリューとは異なる仕組みで効率の良い飛翔・遊泳を可能にしている。近年、生物の推進機構を活用した小型の飛翔体や海洋ロボットなどの開発が盛んになってきている。特に、世界各国は反テロ偵察軍事、人命救助や自然探査などに応用できる高効率の小型ロボットの注目が益々高まっている。

この十数年間に技術者たちは、さまざまな精緻な工夫を凝らした、「水面を歩くロボット」や「水面を跳ねるロボット」を開発してきた。ほかの水面歩行する機械仕掛と同様に、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に欠けている。このロボットたちの欠点は逆に、水面歩行生物たちの動きが引き起こす水面および水面下の繊細な渦構造の重要性を際立たせている。それらの繊細な渦構造は、微小流体工学(微小な流体の操作)の装置の工夫に必要な情報を提供し、わくわくするような新しい技術的挑戦を提示できる。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。本研究では、自然界の秘められたその繊細な渦構造と動きの謎を三次元空間において究明する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、アメンボの高効率の渦推進メカニズムを解明することである。アメンボなどの水面歩行(連続歩行を含む)による脚が生み出す三次元の流れ場に対して、可視化、2D-PIVおよび三次元 Tomographic PIV 技術を用いて流れの可視化と三次元速度分布の計測を行う。アメンボの脚が生み出す様々なスケールの三次元渦の運動とその動作を抽出する。流体力学の視点から、アメンボの推進力または推進効率と生み出す渦構造との関係を定量的に解明し、渦推進メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

上記の背景をもとに、研究期間内に以下のことを完成する。

- (a) 可視化と PIV 技術を用いてアメンボは生み出す水面の流れ場のデータベースを収集する。アメンボに関する運動学・力学などの総合データベースを構築する。
- (b) 4台ハイスピードビデオカメラを用いた三次元 Tomographic PIV により、アメンボの脚は生み出す三次元流れ場を計測し、様々な三次元渦の運動を抽出する。同時に、ハイスピードビデオカメラによりアメンボの運動を撮影し、その運動動作を再構成することによってアメンボの運動のメカニズムを明らかにする。
- (c) 三次元 Tomographic PIV 計測などの結果に基づいて、アメンボの動きと生み出す三次元渦構造との関係を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

本研究は、水面歩行生物の渦推進メカニズムを定量的に解明するため、アメンボを対象とする、PIV と三次元トモグラフィック PIV を用いてアメンボの脚が生み出す水面下の三次元渦構造とそのダイナミクスを明らかにした。流体力学の視点から、アメンボの推進力または推進効率と生み出す三次元渦構造との関係を解明し、推進メカニズムを定量的に明らかにした。さらに、アメンボの連続水面歩行とその着水のメカニズムも定量的に解明した。主な研究結果は以下の通りです。

(1) PIV 計測結果

アメンボの幼虫と成虫が飛び跳ねる際に、離水時および着水時を撮影し、PIV 解析を行った。アメンボの成虫に関しては離水時に中脚周りに 2 組の渦が、着水時は中脚、後ろ脚周りに計 4 組の渦が確認できた。アメンボの幼虫に関しての実験では、成虫と同様に離水時と着水時にそれぞれ渦が確認できた。離水時の渦に関しては先行研究で、渦が推進力を提供する役割を果たすことが分かっていたが、今回、アメンボ幼虫が着水する際の PIV 解析画像より、着水時に渦がプレーキの役割を果たせることが分かった。

PIV 解析の結果からアメンボ成虫、幼虫ともに推進時は後ろ脚と中脚周りに渦度が生じた。後ろ脚と中脚の渦が形成される時間には差があり、後ろ脚周りの渦の方が短い時間で形成された。また、アメンボ成虫において中脚外側の渦度が推進開始から 35ms 後に拡散し、小さくなることが確認された。これは中脚のストロークの最終段階で中脚先端がメニスカスを突き抜けることに起因していると考えられる。

(2) アメンボの移動速度と流れのエネルギー

離水時にはアメンボが渦を形成し、水面のエネルギーを最大にした後に離水することが分かり、アメンボが渦を最大限利用して飛び跳ねていることが確認できた。着水時には、アメンボが水面に渦を形成することにより、エネルギーは着水後単に下がっていくのではなく、流れのエネルギーが少し上がってから緩やかに低下していくことが分かった。エネルギー算出結果では中脚がメニスカスを突き抜けた後、大きく減少することが確認された。一方で、高速移動時、幼虫の離水時では脚が水面を離れる瞬間に最大エネルギーとなっており、メニスカスの破断は見られなかった。このことから、幼虫の通常移動、成虫の高速移動はメニスカスを破断させないことで渦の力を効率的に使うことで推進していると考えられる。アメンボの着水では成虫、幼虫ともに後ろ脚、前脚、中脚の順番に着水していた。

(3) アメンボの着水と連続推進

本研究では、アメンボの推進、着水、及び連続推進によって水面の流れを撮影し、PIV 解析を行った。成虫は前脚が着水時に沈み込むことによって、水面波を生み出しており、前脚が抵抗を発生させ、プレーキの役割を果たしているといえる。解析結果から着水時、成虫は後ろ脚周りに主要な渦を形成し、幼虫は中脚周りに主要な渦を形成していることが確認された。幼虫が着水する際、成虫よりも流れのエネルギーが最大値を示すまでの時間が短いことが示された。このことから幼虫は体重が軽く、前脚で抵抗を生み出すことができないため、成虫よりも渦の力を利用して停止していると考えられる。

連続推進と、推進及び着水を比較すると、推進のみでは前脚による渦が発生して、着水のみでは後ろ脚による渦が発生していたが、連続推進ではそれらの渦が発生しなかった。これは、着水時に前脚と後ろ脚は水面を変形させるほどの力を加えず、水面を滑るように進むため、前脚と後ろ脚による渦が発生しなかったということがわかった。

アメンボの運動エネルギーに関しては、連続推進では、推進を開始し始めてから運動エネルギーは一度減少してから増加しているが、これは、減少している間のアメンボの中脚の運動による水面にかかる力が推進力を妨げていることがわかった。また、運動エネルギーが最大になってから減少し続けている原因は、アメンボの中脚が離水したことで、中脚の運動による水面からの反力が得られなくなったためであり、アメンボはこの反力を最大限利用して推進していることがわかった。連続推進と推進のみを比較すると、連続推進は、初めの推進による運動エネルギーを活かすことで、推進のみより中脚による水面にかかる力が小さいのにもかかわらず、その後の最大の運動エネルギーは推進のみより大きくなっていることがわかった。

(4) 三次元トモグラフィック PIV 計測

本研究では、4 台ハイスピードビデオカメラを用いた三次元 Tomographic PIV により、アメンボの脚は生み出す三次元流れ場を計測し、様々な三次元渦の運動を抽出した。水面付近で中脚のストロークが発生した三次元ペア渦については、それぞれ独立した三次元円筒渦構造であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zheng Yan, Zhang Dan, Rinoshika Hiroka, Yang Jun, Dong Lin, Rinoshika Akira	4. 巻 237
2. 論文標題 Wake flow modification of vehicle external door mirror with slots	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering	6. 最初と最後の頁 1595 ~ 1609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/09544070221098854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Dong Lin, Wen Guoan, Rinoshika Akira	4. 巻 45
2. 論文標題 Particle image velocimetry measurements of the flow structures induced by the free-falling spin flight of maple seeds	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Measurement and Control	6. 最初と最後の頁 700 ~ 710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/01423312221122609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Li Jiawei, Rinoshika Hiroka, Han Xiaolei, Rinoshika Akira	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of a front inclined hole on multiscale vortical structures around a wall-mounted cube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 075106 ~ 075106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0093240	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Li Jiawei, Han Xiaolei, Rinoshika Hiroka, Li Wenming, Rinoshika Akira	4. 巻 34
2. 論文標題 Flow control of wake around a wall-mounted cube using a horizontal hole of different diameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 035127 ~ 035127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0082878	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dong Lin, Wen Guoan, Rinoshika Akira	4. 巻 45
2. 論文標題 Particle image velocimetry measurements of the flow structures induced by the free-falling spin flight of maple seeds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Measurement and Control	6. 最初と最後の頁 700 ~ 710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/01423312221122609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Jiawei, Han Xiaolei, Rinoshika Hiroka, Li Wenming, Rinoshika Akira	4. 巻 34
2. 論文標題 Flow control of wake around a wall-mounted cube using a horizontal hole of different diameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 035127 ~ 035127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0082878	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Rinoshika Hiroka, Rinoshika Akira, Akamatsu Masato	4. 巻 240
2. 論文標題 Three-dimensional wake structures controlled by the flow issuing from a horizontal hole in a wall-mounted short cylinder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 109938 ~ 109938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2021.109938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rinoshika Hiroka, Rinoshika Akira, Zheng Yan, Akamatsu Masato	4. 巻 59
2. 論文標題 Three-Dimensional Flow Structures Behind a Wall-Mounted Short Cylinder with a Rear Inclined Hole	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3359 ~ 3374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J060113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Rinoshika Hiroka, Rinoshika Akira, Wang Jin-Jun	4. 巻 102
2. 論文標題 Three-dimensional multiscale flow structures behind a wall-mounted short cylinder based on tomographic particle image velocimetry and three-dimensional orthogonal wavelet transform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.033101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Rinoshika Hiroka, Rinoshika Akira, Wang Jin-Jun, Zheng Yan	4. 巻 221
2. 論文標題 3D flow structures behind a wall-mounted short cylinder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 108535 ~ 108535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2020.108535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dong Lin, Rinoshika Akira	4. 巻 235
2. 論文標題 3D orthogonal multi-resolution analysis of flow structures around an improved vehicle external mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering	6. 最初と最後の頁 1617 ~ 1628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/0954407020975360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------