20320 クラゲの運動性能

Performance of Jellyfish

○学 市川 誠司 (東洋大)

正 望月 修 (東洋大)

Seiji ICHIKAWA, Toyo University, 2100, Kujirai, Kawagoe, Saitama, Japan

Osamu MOCHIZUKI, Toyo University, 2100, Kujirai, Kawagoe, Saitama, Japan

ABSTRACT

The purpose of this study is to understand a propulsion mechanism of experimentally a jellyfish for applying its mechanism to a soft-matter micro robot. The traveling of a jellyfish is governed by viscous force because of following reasons: the main component of jellyfish is 98% of water, and the Reynolds number is low. We observed the motion of a jellyfish by a motion-capture camera, and measured the vector field of flow around a jellyfish by using a PIV measurement. A jellyfish is principally propelled by a vortex ring ejected at the contracting phase of a jellyfish motion. It is interesting that it never stop traveling even at the expanding phase. A vortex ring observed at the inside of a jellyfish at the expanding phase is found to play an important rule for traveling at the expanding phase. We discuss that getting the propulsion of jellyfish is related with inside vortex ring.

Keywords: propulsion mechanism of a jellyfish, soft-matter micro robot, motion-capture, PIV measurement

1. はじめに

本研究はクラゲの遊泳機能や、運動効率を知りそれを応用した推進機構をもつソフトマターロボットまたは無機物を含まない人体に無害な人工筋肉、人工器官への応用を目的とする。クラゲの体は約98%が水分で、残りがタンパク質で形成されているといわれている⁽¹⁾。そのような生物が水中で推進運動をして遊泳をしている点に着目している。クラゲの体はゼラチン質が発達して傘の形をしている。そのため浮遊に適しているといわれている。クラゲはその体を伸縮させながら水中で「あおり」運動と呼ばれる推進運動をしている⁽²⁾⁻⁽³⁾。クラゲのこのような運動に関する研究⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾はこれまでにいくつかなされているが、クラゲが誘起する流れやそれによる推進力の取得に関しては明らかにはなっていない。本研究ではこの点を解明するために、流れ場計測によりクラゲの運動と流れ場の関連を調べたものである。

クラゲの運動、推進時に周りの流体に与える影響、流れの構造をモーションキャプチャーとPIV法を用いた流れ場計測により求めた。その結果を報告する。

2. 実験装置および方法

本実験では実験試料としてクラゲの中でも体の構成における水分が多く、日本近海で一般的なミズクラゲ (*Aurelia aurita*) を使用した。理由として、ミズクラゲは体全体が半透明であるため撮影する際にクラゲ傘内の流れを見るのに適しているからである。

クラゲを $150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$ のガラス製の水槽に移して撮影した。撮影時には飼育環境を保つために、水温は 20°C に設定した。

撮影には高速度カメラ (REDLAKE MASD) を用い、撮影速度を 60FPS に設定した。カメラは水槽の側面に垂直に向け設置し、その面を正面とした。水槽内は光の干渉、写りこみを防ぐために光源を水槽の下に置き光が水槽の底から水面へ抜けていくように設置した。光源にはメタルハライドランプを使用し、遊泳時の推進運動、その時誘起する流れを見やすくするために、厚さ 1.5 mm のスリット光とした。

遊泳時に誘起する流れを可視化するためにパーティクルとして、クラゲに害を与えない餌でもある微生物のアルテミア

を使用した。アルテミア自体が遊泳しパーティクルとしての役目を果たさなくなるのを防ぐため、すでに死滅し冷凍されたものを解凍して使用した。使用したアルテミアの大きさは約 $200 \mu\text{m}$ である。そのようなアルテミアを水槽に入れると、クラゲは餌と認識し、粘液をだす。粘液が遊泳時のクラゲ周りの流れの観察に障害となるので、丁寧に取除いた後、撮影を開始した。取り込んだ画像の解析には、解析ソフト DIPPMOTION2D を用いた。これにより、撮影した映像からキャリブレーションの後、移動距離、移動速度、加速度などを求めた。

クラゲの体の代表点の運動を調べるために、撮影されたクラゲの傘の先端とスリット光で断面化された傘の縁2点をそれぞれ1画面ずつトラッキングし、各部の運動の軌跡を得た。これらの運動の相互相関から、遊泳時における運動機能を明らかにした。クラゲ遊泳時に発生する流れをPIV計測により求めた。解析には解析ソフト DIPPFLOW を使用した。これより、クラゲの後方に形成される流れ場における速度分布の時間変化を明らかにした。

Fig.1 Definition of symbols and coordinates

3. 実験結果および考察

3.1 記号の定義

Fig.1 はスリット光によりクラゲの断面を撮影した画像である。なお、画像上のクラゲの周りに見える粒子はクラゲが遊泳時に発する流れを可視化するためにパーティクルとして使用したアルテミアである。図に示すように、クラゲの傘の頂点を Top、クラゲの傘の縁で図では右側の先端を Redge、左側の先端を Ledge と称する。遊泳時に開く傘の最大直径を代表直径 D と表す。座標はクラゲの Top を原点とし、進行方向を x 、半径方向を r とする。

3.2 クラゲ本体の運動

クラゲの運動を調べるために、取得した画面上で Top と Redge および Ledge の3点をトレースし、それを Fig.2 に示す。図よりクラゲは傘を開いたり閉じたりして遊泳することがわかる。傘が開いてから閉じて、また開くまでを運動の一周期とする。図に示したものでは一周期に 1.38 秒かかった。このときクラゲは 18mm 移動した。傘の最大直径 D が 46.4mm だったので、最大直径のほぼ 0.4 倍移動したことになる。

Fig.2 Loci of points Top, Redge and Ledge

— Top moving velocity (mm/s) — Edge distance (mm)

Fig.3 Traveling distance of points Top, Redge and Ledge from each starting point

また、その詳細を調べるために運動の二周期分の傘の縁間隔 (Redge と Ledge の間の距離) の時間変化と Top 位置における速度の変化を Fig. 3 に示す。縦軸は縁間隔、横軸は時間を示す。両縁の間隔を狭める時が平均 0.38 秒、開く時が平均 0.94 秒かかることがわかる。したがって、一周期の約 3 割の時間で傘を閉じ、約 7 割の時間をかけて開くことになる。また Top 位置における速度の変化と比較すると、傘の開きが最大に達するまでの間に、本体の速度が増加している。逆に、傘を閉じ始めてから本体の速度が減少する。また、縁間隔が最小となって再び開き初めてからしばらくは最低速度を保ったまま進み、開くフェーズの後半で加速が始まることがわか

る。一般的に考えると、傘を閉じるときに流体を押し出すことによって加速し、傘を開くときに傘が開くために抵抗が増加し減速するものとする。このことをクラゲが作る流れ場との関係から考察する。

傘を開くときの傘の縁を結んだ線上の速度分布を Fig. 4 に示す。また右図は、そのときの流れモデルである。

Fig.4 Velocity distribution at expanding phase

このことより、クラゲは傘を開くときに傘内部に渦を形成する。その時の傘入り口での流れは中央付近で吸い込み流れになっていることがわかる。クラゲはこのときに加速しているので、その推進力の取得として次のことが考えられる。またそれを模式的に示したのが Fig.5 である。クラゲは傘を開くとき傘内部に渦輪を形成する。傘を開くフェーズにおいて、傘が開くと共に、この渦輪の直径は大きくなる。傘を開くエネルギーが傘内部の渦輪直径を増加するのに用いられる。渦輪直径が大きくなるということはその渦輪の循環が増加すると言い換えられる。その結果、開口部中央から傘内部に吹き込む流れの速度が大きくなり、その流れがクラゲを内側から押し進行方向へ推進力を与えていると考えられる。また、その推進力は傘を開くことにより増加するクラゲに対する抗力以上の力を得ていると考えられる。

Fig.5 Inside vortex ring formation

4. 結論

以上の結果よりクラゲの推進機構を考察した。クラゲはほとんど成分が水であることからクラゲの運動における慣性力は無視できる。それにもかかわらず、クラゲが止まることなく推進をつづけ、さらに、傘を開きながら加速を行うのは、クラゲの傘が開くときに傘内部に形成される渦輪から得られる誘起速度によるものであると提案した。

参考文献

- (1) 坂田明, "クラゲの正体," 晶文社, 11 (1994).
- (2) 東昭, "生物の動きの辞典," 朝倉書店, 6 (1997).
- (3) 東昭, "生物の泳法 バクテリアからヒトの泳ぎまで," ブルーバックス.
- (4) Matthew J. McHenry, Jason Jed, "The ontogenetic scaling of hydrodynamics and swimming performance in jellyfish (*Aurelia aurita*)," *J. Exp. Biol.* 206, 4125-4137.
- (5) Dabiri, J.O., Colin, S. P., Costello, J. H. and Gharib, M., "Flow patterns generated by oblate medusan jellyfish: field measurements and laboratory analyses," *J. Exp. Biol.* 208, 1257-1265.
- (6) Sepan P. Colin, John H. Costello, Eric Klos, "In situ swimming and feeding behavior of eight co-occurring hydromedusa," *Mar Ecol Prog Ser.* 253, 305-309, (2003).