

糸によって曳こうされる物体周りの流れと運動特性解析

Analysis on Flow Around the Object Pulled by Thread and Its Motion Characteristics

- 新行内 翔太, 北大院, 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail:shingyozi@eis.hokudai.ac.jp
黒田 明慈, 北大院, 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail:kuroda@eng.hokudai.ac.jp
- Shota SHINGYOJI, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628
Akiyoshi KURODA, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628

In this study, we conducted three-dimensional transient analysis to investigate the flow around the object pulled by thread and its motion characteristics, especially for sphere and fishing lure. It is found that the drag coefficient of the moving sphere is larger than that of static sphere when $Re > 3000$. The sphere stays at fixed point when Reynolds number (Re) = 100, 200, and shows a linear motion in transverse directions when $Re = 1000, 3000, 4000, 5000$. The sphere shows periodic rotational motion when $Re = 10000, 15302$. In case of the fishing lure, we confirmed that it moves in 8 character type motion which was observed by the previous experimental study. The mechanism of the motion is discussed.

1. 緒言

流水中に置かれた物体は、流体の挙動によって流体力を受けて様々な振動、運動を示す。流体力による励振は構造物の破壊や飛翔体の飛行不安定性等を引き起こし、その特性を把握し制御することは、より安全で効率的なエネルギーの利用にも繋がるため工学上重要な課題の一つであると考えられる。諸問題に対し様々な解析がなされているが、ここでの解析対象として流水中に糸で曳行される物体周りの流れと運動を取り扱う。

流体励振を制御し、また利用しているものとして魚釣りに用いられるミノーというルアーが挙げられる。リップと呼ばれる潜行板を設けたルアーにおいては $Re > 1.39 \times 10^4$ で図 1 のように 8 の字型の運動を示すことが先行研究で確認されている⁽¹⁾⁽²⁾。

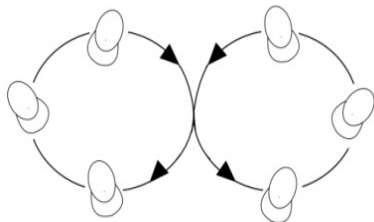


Fig. 1 Lure motion pattern (front view, $Re > 1.39 \times 10^4$)

しかしルアーがなぜこのような運動を行うのかはわかっていない。これらを把握するためには物体周りの流れ、表面に働く圧力やせん断応力といった流体力を測定する必要があると考えられるが、 Re 数や糸の長さ、質量などを調整したうえで自由に運動するルアー表面圧力などの諸量を詳細に把握することは難しい。

そこで、本研究では数値解析によって糸に繋がれて曳行される物体表面の圧力やせん断応力を捉えることによって、まずはより簡単な形状の球の運動、そして次にルアーの運動の仕組みについて説明付けることを試みた。

2. 計算手法

計算対象は、静止流体中を一定速度で糸によって曳こうされる物体の運動と物体周りの流れである。本研究ではこれを図 2 に示すような計算領域を設定し、糸の先端を固定して、流れが一樣流として流入する糸として取り扱う。物体周りの流れと、流体力と糸からの張力を受ける物体の運動の連成問題として解析する。

解析は有限体積法による CFD オープンソースソフトウェアの OpenFOAM を用いた⁽³⁾。また物体の位置が大きく変化するため、流体中を移動する物体周りに固定した移動格子と、計算領域全体を

カバーする背景格子の 2 つを用意し、それらを重ね合わせて相互補間することによって解析をおこなう重合格子法を用いた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

非圧縮ナビエーストークス方程式を解く数値解法アルゴリズムには、SIMPLE 法と PISO 法とを組み合わせた PIMPLE 法を用いた非定常 3 次元解析を行った⁽⁶⁾。

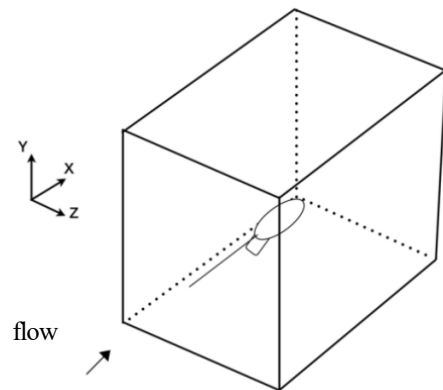


Fig. 2 Computational domain.

3. 計算条件

計算領域は図 3 のように $0.42 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ の背景格子を、その中にさらに物体に固定した $0.15 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ の移動格子を配置する。物体としては球とルアーを取り扱う。球は直径を 0.02 m 、糸の長さを 0.1 m とし、入り口一様流入速度を $6.535 \times 10^{-3} \sim 1.0 \text{ m/s}$ へと変化させた。球の直径と一様流速で定義したレイノルズ数 Re は $100 \sim 15302$ である。また $Re = 1000$ 以上では乱流モデルとして LES を用いる⁽⁷⁾。

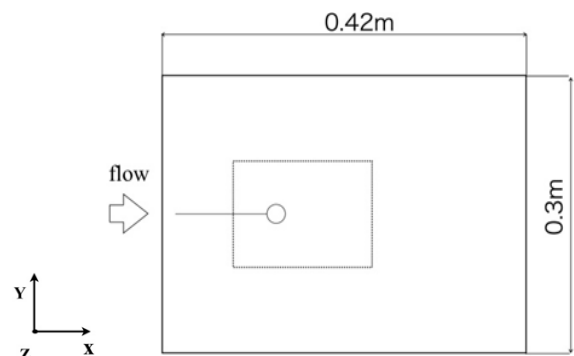


Fig. 3 Computational domain and grid system.

球は素材を PLA 樹脂と想定し、内径が 0.0058 m の中空球で、比重が 1、質量が 4.18 g、重心周りの慣性モーメントが 1.943×10^{-7} kg/m² とした。

動きや形状の参考として用いたルアーは 8 の字型運動が生じることを確認済みのハンドメイドルアーである。図 5 に今回用いたルアー形状を示す。実物は胴体部分がバルサ材、おもりとしてタングステンを用いた構成となっているが、計算上では質量が実物のルアーの質量 6.49 g と等しくなるような密度一様の材料とした。そのため比重が 1 より大きくなり本来重力の影響を受けるが、本計算では重力は考慮に入れない。ルアー全長は 0.063 m で、全高 0.022 m と一様流速で定義した Re は 16832 となる。

本解析では糸は直線の線形バネとし、物体に対する糸の取り付け点とアンカーの位置関係から張力を求め、物体附着点に作用するようにした。素材は釣り糸に比較的好く用いられるナイロンを想定し、バネ定数 3316N/m のバネとした。

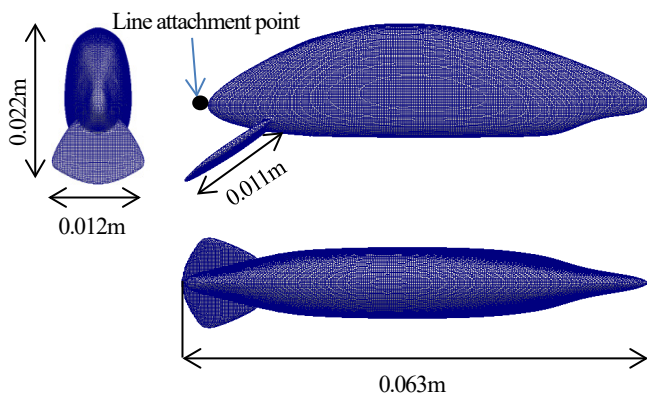


Fig. 4 Fishing lure geometry

4. 球の計算結果

静止球と曳行球、そして静止球の抗力係数に関する Morrison の相関式⁽⁹⁾の抗力係数(以下 Cd)の比較を図 5 に示す。 Cds は静止球、 Cdm は糸付き球の Cd を表す。

$Re=100 \sim 1000$ までは静止球と曳行球、Morrison の Cd はよく一致しているが、 $Re=3000$ 以上では糸付き球の Cd が静止球よりも大きくなる。 $Re=3000 \sim 15302$ では静止球の Cd がほぼ一定であるのに対し、糸付き球の Cd は静止球の場合と比べて $Re=3000$ で 13%、 $Re=4000 \sim 10000$ では 30%、 $Re=15302$ では 40%程度大きくなった。

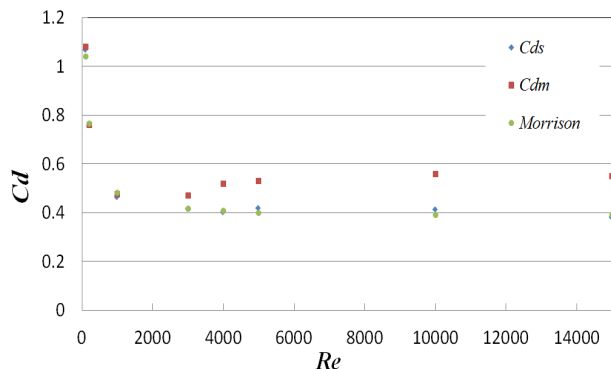


Fig. 5 Drag coefficient

図 6, 7 は $Re=5000$, $t=2.2s$ 時の静止球と曳行球表面の瞬間の圧力を球前面、背面、左右から見たものとなっている。曳行球では、静止球と比較して球背面の負圧が大きくなっていることが観察された。なお、せん断応力による力は、圧力差によって生じる

力の 10 分の 1 程度と小さかった。よってここでは、物体の運動はせん断応力ではなく圧力の影響が多くを占めるとして、以降の分析では球、ルアーともに圧力に着目することとした。

図 8 は原点を圧力最大となるよどみ点にとり、そこから球断面の円周上、 $t=2.2s$ での瞬間の圧力分布を取り出したものである。これを見ると、よどみ点の圧力は静止球、曳行球で差は小さいが、曳行球背面での負圧が静止球の 2 倍程度となっていることがわかる。また、球背面の左右で圧力の偏りがみられ、この圧力差によって曳行球には横断方向の加速度が生じていることがわかる。

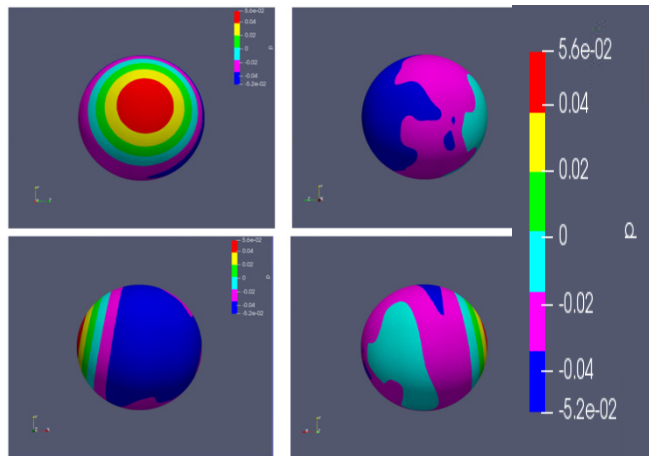


Fig. 6 Pressure distribution of the moving sphere surface: $Re=5000$, $t=2.2s$

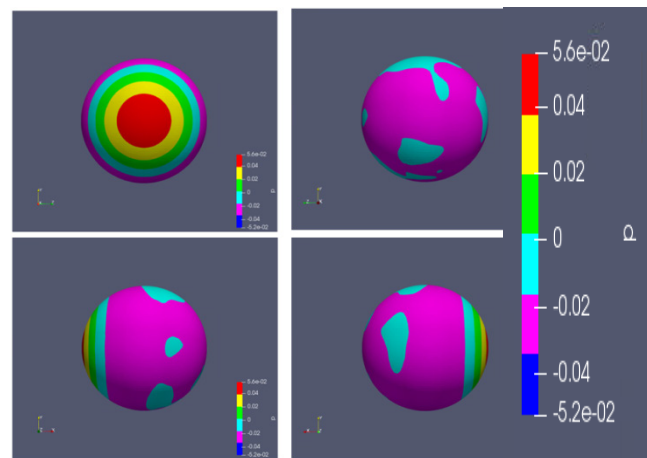


Fig. 7 Pressure distribution of the static sphere surface: $Re=5000$, $t=2.2s$

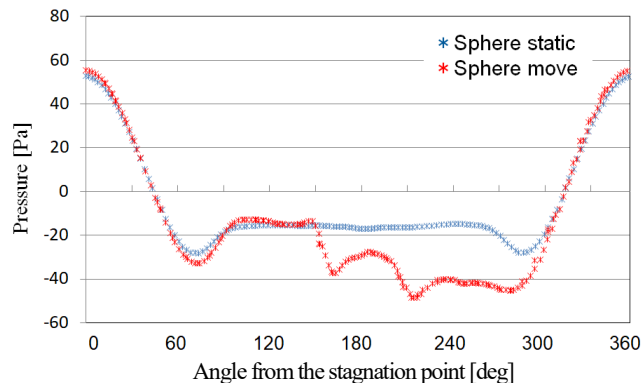


Fig. 8 Pressure distribution of the sphere surface: $Re=5000$, $t=2.2s$

図 9 ~14 は初期位置からの球の変位と座標を示す。 $Re=100$, 200 (図は省略) では動きはあるものの変位は $1 \times 10^{-5} \text{m}$ 程度と小さい。

図 9, 10 の $Re=1000$ では最大変位が 0.02m ほどで球は 0.02m/s 程度の速度で緩やかに動いており, y, z 方向変位に位相差の小さい直線的な往復運動を示す。 $Re=1000$ では, この傾向は LES を用いない場合でも同様である。 $Re=3000, 4000$ でも $Re=1000$ と同様な往復運動を示す。 $Re=5000$ においても図 11, 12 のように, はじめの 2s 程度までは回転運動のような動きを見せたが, それ以降は直線的な往復運動となった。

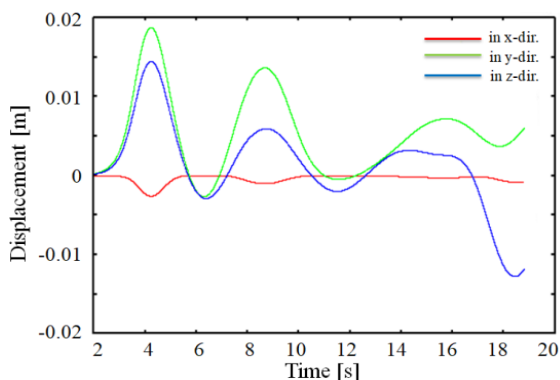


Fig.9 Displacement from initial position : $Re=1000$

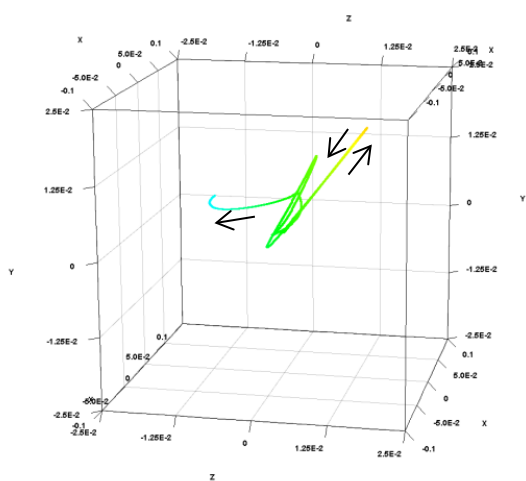


Fig.10 Location of the sphere : $Re=1000$

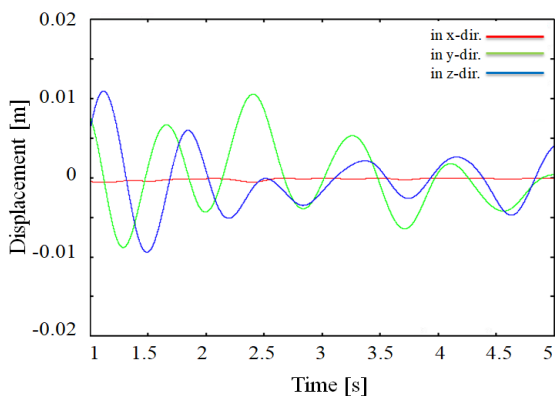


Fig.11 Displacement from initial position : $Re=5000$

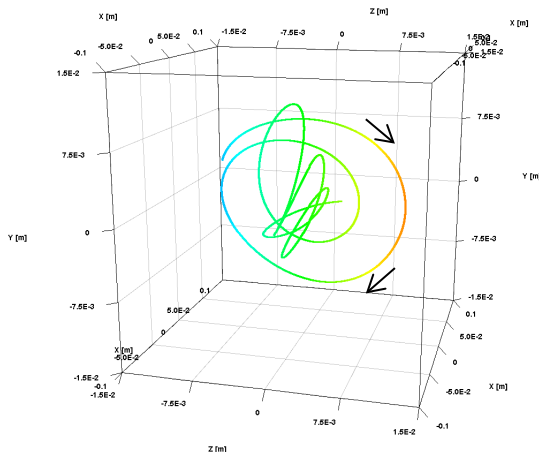


Fig.12 Location of the sphere : $Re=5000$

$Re=10000$ では, 図 13 のように y, z 方向変位に 90° の位相差が常にみられるが, これは図 14 のように x 軸を中心とする円錐振り子運動に対応する。球は糸による張力と流体力により, 回転中心方向に常に加速度を生じている。この運動は $Re=15302$ でも同様であり, $Re=10000$ では周期は 0.5s , $Re=15302$ では周期が 0.25s となっており, Re の増加とともに回転周期が短くなっている。

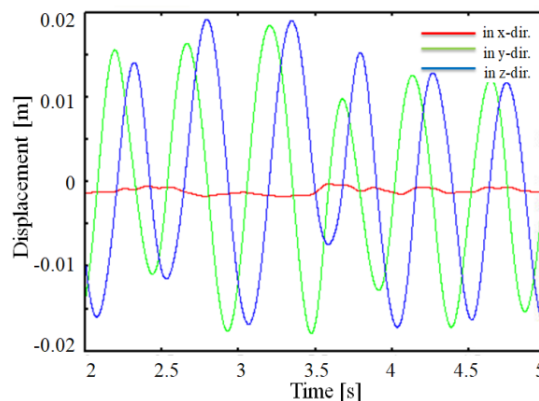


Fig.13 Displacement from initial position : $Re=10000$

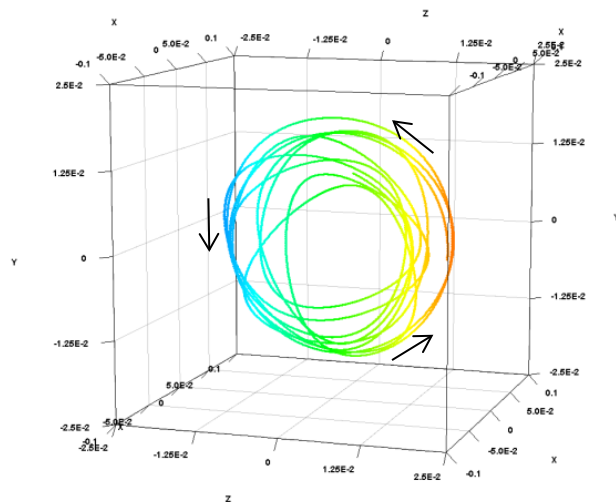


Fig.14 Location of the sphere : $Re=10000$

5. ルアーの計算結果

図 15 に流れ方向から見たルアーの糸付着点の座標推移を示す。また以後、図 16 のようにそれぞれの軸周りのルアーの回転をローリング、ヨーイング、ピッチングと呼ぶこととする。

糸付着点座標の推移を見ると、図のグラフ中央、初期の静止位置 A から、ルアーにはリップとルアー頭部に受ける圧力、リップ裏側の負圧による圧力差によって、下向きにピッチングしながら y 方向に B まで運動している。その後ルアー胴体下部、リップ根本での渦放出によりルアーは大きくヨーイングを行う。上下左右に大きく運動したのちに C まで上昇し、その後初期状態から約 0.6s 後にルアーは 8 の字型運動に移行している。

図 15 の C 以降では糸付着点は横長の 8 の字型運動を行っていることがわかる。ヨーイングの振動数は 5Hz 程度であり、それにピッチングに 2 倍の振動数が生じた 8 の字型運動となっている。先行研究の実験⁹⁾ ($Re=1.67 \times 10^4$ 、ただし全長は今回の 2 倍程度) で確認されたヨーイングの振動数は約 6Hz であり、今回の結果はこれに近い。

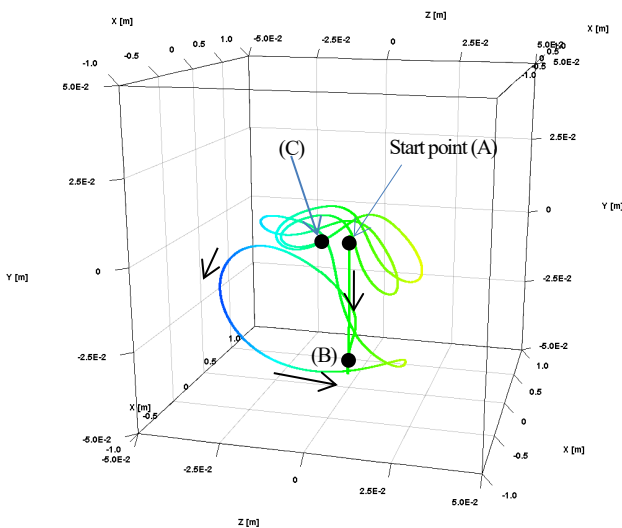


Fig.15 Location of attachment point

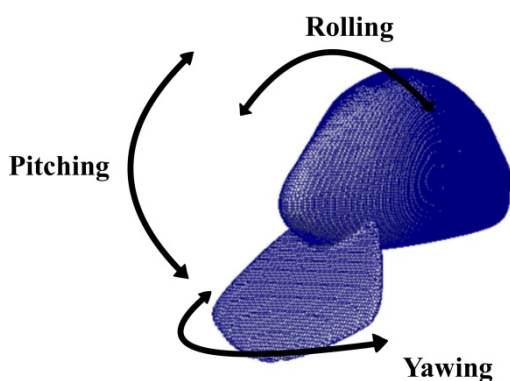


Fig.16 Fishing lure angles

今回の計算結果は $t=1s$ までであるが、ルアーは初期の静止状態からリップに生じる強い力によって大きく運動したため、これら初期の大きな運動の影響によって、このいびつな 8 の字型運動が引き起こされている可能性がある。そのため、継続計算を行うことでより安定した 8 の字型運動に移行する可能性がある。現在の糸付着点の運動を見ても周期を重ねることによってより y 軸対称に近づいていく傾向が見てとれる。

図 17 は、8 の字運動に移行した 0.6s 以後のルアーに生じる流

体力と張力を足し合わせた力の時間推移を x, y, z 方向別に表している。これを見ると、z 方向の力の変化周期は 0.22s 程度 (振動数約 5Hz) で、x 方向と y 方向は半分の周期 0.11s 程度の周期性を示していることがわかる。

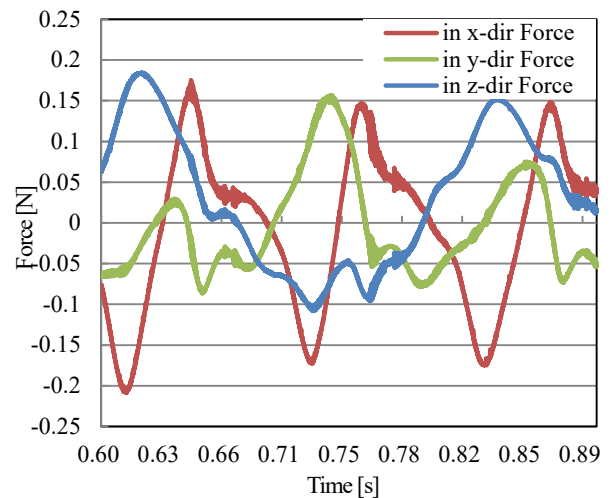


Fig.17 The force applied to the fishing lure

左右対称の 8 の字型運動のため、半周期分の運動の仕組みについて説明する。ルアーに作用する流体力と糸からの張力は、流れ方向では同程度であるが、y 軸と z 軸方向においては張力と比較して流体力の方が 3~50 倍程度大きかったため、ここでは 8 の字型運動に移行した後のルアー表面に生じる流体力、特に圧力差によって生じる力に着目して運動の説明付けを行う。

図 18 は 8 の字型運動をしている $t=0.75 \sim 0.885s$ 間を、流れ方向正面から見たルアーとその表面圧力分布を時系列順に表示している。 $t=0.75 \sim 0.766$ の間では、ルアーが z 軸方向に向き、ヨーイング角が ± 30 度より大きくなるとローリング角が変化し始め、これに伴ってリップに作用する流体力の向きが大きく変化していることがわかった。

図 19 は $t=0.75s$ 時のルアーを流れ方向+x 方向と、+y 方向、-y 方向から見た表面圧力分布を示したものである。z 方向に振れたルアーは、流れ方向投影面積に占める胴体部分の割合が大きくなる。また流れ方向に対して迎角を持っているため、胴体背面側には剥離による負圧が生じる。これにより +y 方向に力がかかる。ルアー重心は胴体底部に位置しており、胴体部分に生じるこの力によってローリング運動を行う。このローリング運動によってリップに作用する力の向きは 0.75s では-z 方向、次に 0.78s では-y 方向、そして 0.825s では+z 方向に向きを変えて図 18 の 0.87s に至る。またこの間に、ルアーが横に寝た状態の胴体部分には迎角によって、図 18 の①、③では+y 方向の正の揚力が、②では-y 方向の負の揚力が生じることが、図 17 と対応させて見るとわかる。このようにルアー胴体部では正負の揚力が切り替わり y 軸方向の振動が生じる。

このことからルアーの 8 の字型運動は、以上の動きを繰り返すことによって行われると考えられる。

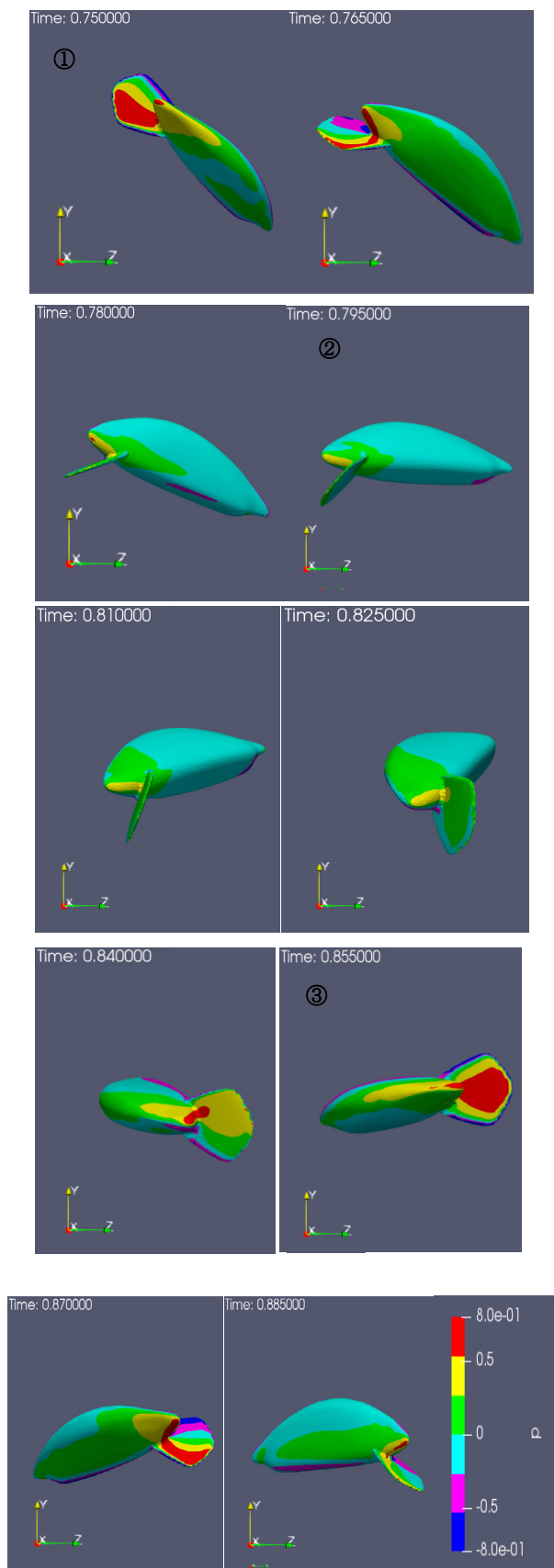


Fig.18 Pressure distribution of the fishing lure surface

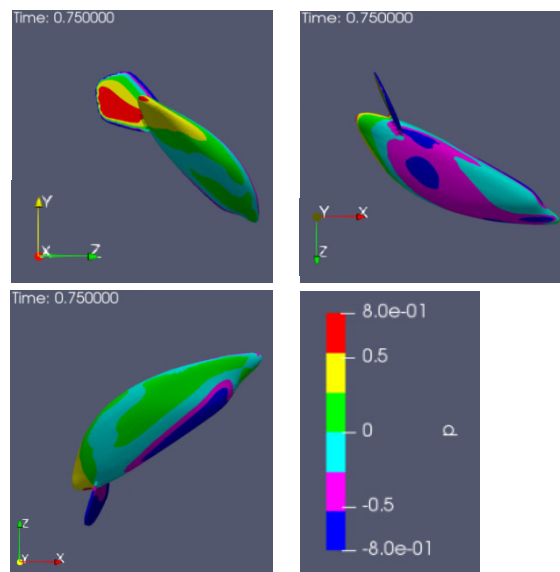


Fig.19 Pressure distribution of the fishing lure surface: $t=0.75$

6. 結言

本稿では流体力を受けて運動する球周りの流れについて3次元非定常解析を行った。 $Re=100, 200$ では球の運動は見られず、 $Re=1000\sim 5000$ の間では球は直線的な往復運動を示すようになり、また $Re=3000$ から静止球と比較して糸付き球の Cd が大きくなった。 $Re=10000, 15302$ では回転運動に遷移することを確認した。

$Re=16832$ のルアーの計算を行い、8の字運動が再現されることを確認した。この8の字運動とリップ部、胴体部に作用する流体力の関係を説明した。

参考文献

- (1)野田 茂徳, 姫野 龍太郎, 高橋 直也, 新井 一矢, 関 優介, "ルアーにはたらく力の計測とその運動," 数理解析研究所講究録, 第1940巻90-94, 2015.
- (2)江幡 恵吾" 曳縄漁具潜航板の振り回り運動に関する研究," 日本水産学会, Vol. 45 No. 3, pp. 179-185, 2009.
- (3)Maric, T. et al."The OpenFOAM Technology Primer," sourceflux. 柳瀬 眞一郎ら(訳), 2017. OpenFOAMプログラミング 森北出版.
- (4)Javier L. Lara, et al., "Wave and current interaction with moored floating bodies using overset method," The 13th OpenFOAM Workshop, Shanghai, China, 2018.
- (5)Jasak H, et al., "Dynamic mesh handling in OpenFOAM applied to fluid structure interaction simulations," En Proceedings of the V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS, 2010.
- (6)春日 悠, 今野 雅, "OpenFOAMによる熱移動と流れの数値解析," 一般社団法人オープンCAE学会編, 2016.
- (7)Kim, WW. Menon, S., "A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations," In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, 1995.
- (8)A. Morrison, "Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere," <http://www.chem.mtu.edu/%7Efmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>. 10.November 2016. 12,9,2018 確認.
- (9)野田 茂徳ら, "回流水槽を用いたルアーの計測," 数理解析研究所講究録, 第1900巻105-109, 2014.