

# 気液混相流れと移動する物体の数値シミュレーション

課題責任者

白崎 実 横浜国立大学 大学院環境情報学府

著者

白崎 実<sup>\*1</sup>, 松下 悠貴<sup>\*1</sup>, 長塚 卓也<sup>\*1</sup>, 白石 紘平<sup>\*1</sup>

\*1 横浜国立大学 大学院環境情報学府

気体と液体のような複数の流体が相互に影響を及ぼしあう混相流れは我々の身のまわりに多く存在し、工学や海洋工学分野においても重要である。しかし未解明の現象も多く、特に混相流れと物体とが相互作用する現象に対しては、メカニズムの解明やそのための数値解析技術において多くの課題が残されている。本課題では、気液混相流れと移動や変形を行う物体との大規模なシミュレーションを実施した。具体的には、魚モデルが変形によって自律推進して水面の影響を受けながら行う遊泳の解析、および拘束された物体と気液自由界面を含む流れの解析を行った。魚モデルの解析については、水中から水面を通り抜けて空中へ跳躍する現象について、モデルの体長や変形速度を変えた3次元解析を行い、体長の大きい魚の場合には、跳躍を含む遊泳は水平遊泳に比べ効率の良い遊泳であるという結果が得られた。拘束された物体と気液自由界面を含む流れの解析では、鎖樋と流水とが相互作用する現象およびプールに設置されたコースロープによる消波現象について解析を行った。鎖樋の振れが極端に小さくなる流水量が存在することや、コースロープ設置時の張力を調整することで消波効果を高めることが可能であるということがわかった。

キーワード：混相流れ, 水面近くでの魚の遊泳, 拘束された物体の運動, 直交格子, Level Set 法, Immersed Boundary 法

## 1. 緒言

気体と液体のような複数の流体が相互に影響を及ぼしあう混相流れは我々の身のまわりに多く存在し、工学あるいは海洋工学分野においても重要であるが、その現象の複雑さのため単相流れに比べて未解明の現象も多い。特に混相流れと物体とが相互作用する現象に対しては、メカニズムの解明やそのための数値解析技術において多くの課題が残されている。本研究では、気液混相流れと移動や変形を行う物体との大規模な数値シミュレーションにより、(1) 水面の影響を受ける浅い位置での魚型モデルの変形による自律推進の解析、および(2) 拘束された物体と気液自由界面を含む流れの解析を実施した。

まず(1)については、水中および自由界面である水面近くで、魚型モデルが自身の形状を変形させることで自律推進を行う際の、効果的な遊泳方法についての知見を得ることを目的とする。スクリュー駆動の船舶に比べて推進効率や旋回性能に優れる魚型ロボットの性能向上への応用がその最終的な目的である。次に(2)では、気液の自由界面を含む流れと一定の可動域を持った物体とが互いにどのように影響を及ぼし合うかについて調べた。解析対象としては、日本古来の樋の一つである鎖樋と流水が相互作用する現象およびプールに設置されたコースロープによる消波現象を取り上げた。

## 2. 計算手法

計算には完全直交格子ベースの有限差分法を用い、Staggered 格子を採用した。自由界面の捕捉には Level Set 法 [1]、移動する任意形状物体の表現には梶島らにより提

案された体積力型 Immersed Boundary 法 [2] を用いて計算を行った。支配方程式として、以下に示す非圧縮性の連続の式と Navier-Stokes 方程式、Level Set 関数の移流方程式を用いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_s}{\rho} + \mathbf{f}_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{v}$  は流速、 $t$  は時間、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\mu$  は粘性係数、 $\mathbf{g}$  は重力加速度、 $\mathbf{F}_s$  は表面張力、 $\mathbf{f}_p$  は体積力型 Immersed Boundary 法における外力項、 $\phi$  は Level Set 関数である。 $\mathbf{D}$  はひずみ速度テンソルを表す。表面張力の表現には CSF (Continuum Surface Force) モデル [3] を用いた。速度と圧力のカップリングアルゴリズムとして Fractional Step 法用い、時間進行法として移流項には3次精度 TVD (Total Variation Diminishing) Runge-Kutta 法、非移流項と物体の運動方程式には Euler の陽解法を用い、空間方向の離散化として、移流項には5次精度 WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 法、粘性項には中心差分を用いた。また、圧力 Poisson 方程式の解法には、収束性向上のために幾何的マルチグリッド前処理付き BiCGStab (BiConjugate Gradient Stabilized) 法を用いた。

### 3. 魚型モデルの変形による自律推進の解析

まず、水平方向への遊泳に限定し、水面付近で魚モデルが自身の体を変形させることによって推進力を得る自律推進の3次元解析を行った。魚モデルの変形は小笠原らが用いた2次元の翼型に対する変形式 [4] を参考に決定した。魚モデルの体長や変形速度や遊泳深さを変えた計算を行い、推進力を得るメカニズムや水面付近を遊泳することで遊泳速度が低下する理由について検討した。次に図1のように、水面を通り抜け空中へ飛び出す跳躍を伴う遊泳の解析を行い水平遊泳との比較を行った。これにより、水面を通り抜け空中へ飛び出す際の速度低下は小さく、また空中で受ける抵抗は水中よりもはるかに小さいため跳躍中の速度低下がほとんどないことがわかった。変形に関する条件は変えずに魚モデルの体長を5cmと15cmとした2つのケースで跳躍を伴う遊泳と水平遊泳の比較を行うと、15cmの魚モデルでは跳躍を伴う遊泳の方が水平遊泳よりも遊泳速度が大きいことがわかった。また、魚が遊泳中に消費するエネルギーに着目すると、跳躍を伴う遊泳は水平遊泳と比べ、一定の距離を遊泳するのに必要なエネルギーが小さくなることを示した。

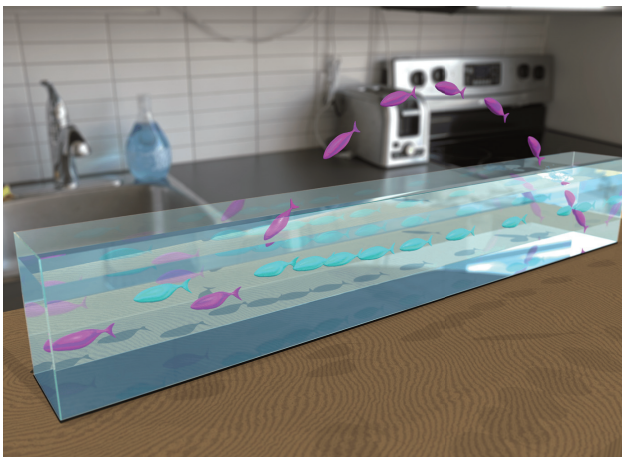


図1 魚の跳躍を伴う遊泳と水平遊泳

### 4. 拘束された物体と気液自由界面を含む流れの解析

#### 4.1 鎖樋の運動と排水に関する解析

図2のように複数のUnitがつながった鎖樋を考え、上部から流れてくる水が鎖樋の運動に与える影響を調べた。Unitの質量、流水量、連結方法(拘束条件)、連結数を変えた3次元解析を行った。その結果、Unitの質量が大きい場合には、流体力の影響よりも拘束力と重力の影響の方が大きくなり、結果として振れがあまり大きくならないということや、鎖樋の振れが極端に小さくなる流水量が存在することがわかった。また、Unitの連結数を2~6まで変えた解析を行い、最上部Unitの振れ角の時間推移を比較した(図3)ところ、Unitの連結数が大きくなって必ずしも振れが小さくなるとは限らないことがわかった。

#### 4.2 コースロープの運動と消波効果に関する解析

図4に示すように、プールのコースロープを構成する

フロートが設置されている状況を考え、発生した波がフロートの存在によりどのような影響を受けるかについての3次元解析を行った。フロートに働く張力は初期位置

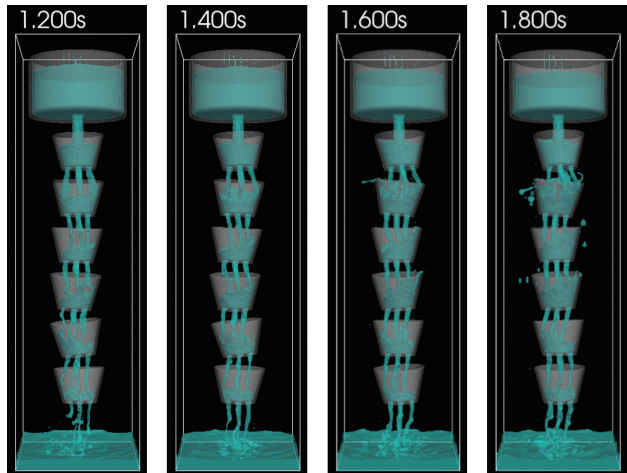


図2 鎖樋の運動 (6 Unit の場合)

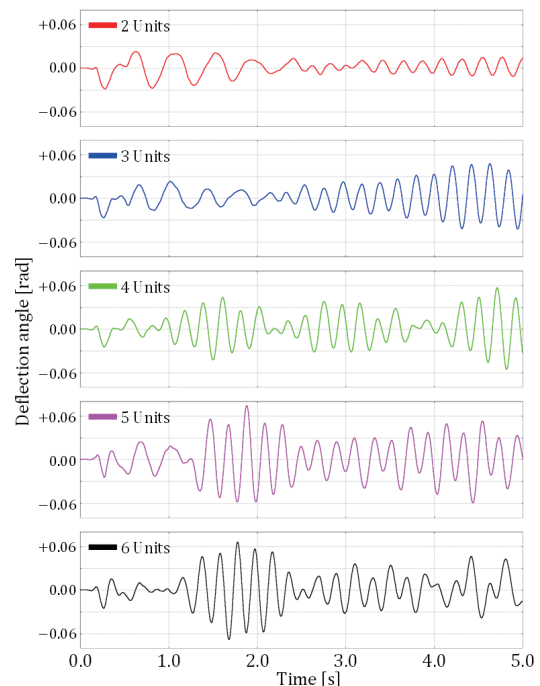


図3 最上部Unitの振れ角の時間履歴

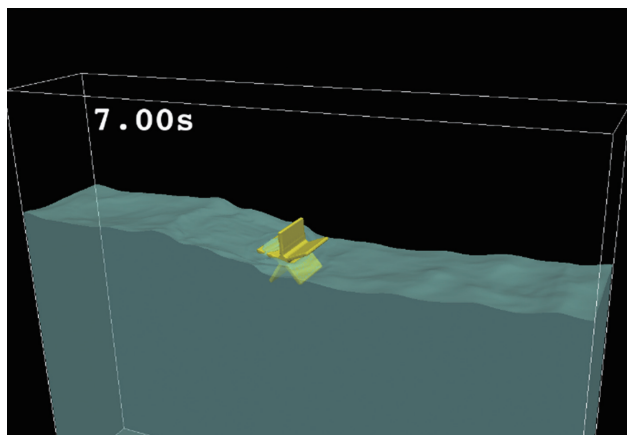


図4 移動するフロートと水面

からの距離に比例する復元力として取り入れ、消波効果の指標として水の運動エネルギーを用いた。図5に、復元力のばね定数を変えた場合の水の運動エネルギーの時間平均値のグラフを示す。図5から、水の運動エネルギーは復元力のばね定数によって変化することがわかる。つまり、コースロープ設置時の張力を調整することで消波効果を高めることが可能であるということが示唆された。

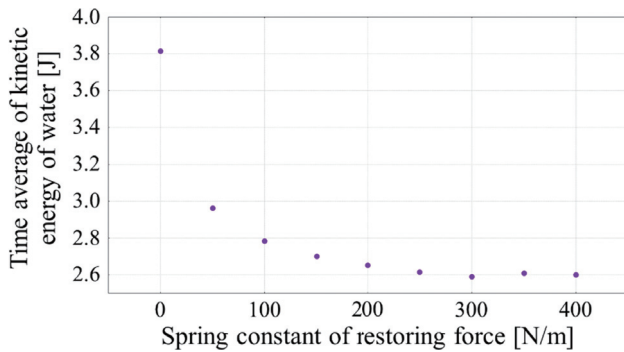


図5 復元力のばね定数と水の運動エネルギーの時間平均値の関係

## 5. 結言

尾ひれのある魚型モデルが変形することで得た流体力によって自律推進し、水面付近を遊泳、水中から水面を通り抜けて空中へ跳躍する現象について3次元解析を行った。その結果、体長の大きい魚では跳躍を伴う遊泳の方が遊泳速度は大きいこと、魚が遊泳中に消費するエネルギーに着目すると跳躍を伴う遊泳は水平遊泳と比べ必要なエネルギーが小さくなることがわかった。また、拘束された物体と自由界面を含む流れの解析として、鎖樋と流水とが相互作用する現象およびプールに設置されたコースロープによる消波現象について解析を行い、鎖樋の振れが極端に小さくなる流水量が存在することや、コースロープ設置時の張力を調整することで消波効果を高めることが可能であるということがわかった。

## 謝辞

本研究の一部は平成29年度地球シミュレータ公募課題およびHPCIシステム利用研究課題 (hp170216) の成果によるものであり、計算には海洋開発研究機構の地球シミュレータおよび東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-ACEを利用した。また、JSPS 科研費 JP17K06148 の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 文献

- [1] M. Sussman, P. Smerka, S. Osher, “A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow,” *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146-159, 1994.
- [2] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki, Y. Miyake, “Turbulence Structure of Particle-Laden Flow in a Vertical Plane Channel Due to Vortex Shedding,” *JSME Int. B*, Vol. 44, pp. 526-535, 2011.
- [3] Brackbill, J., Kothe, D. and Zemach, C., “A Continuum Method for Modeling Surface Tension,” *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354, 1992.
- [4] 小笠原烈, 尾形陽一, “魚体運動を模した変形薄翼推進効率の運動依存性に関する数値的考察,” 日本機械学会第24回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 2011

# Numerical Simulations of Gas–Liquid Multiphase Flow and Moving Body

Project Representative

Minoru Shirazaki Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

Authors

Minoru Shirazaki<sup>\*1</sup>, Yuki Matsushita<sup>\*1</sup>, Takuya Nagatsuka<sup>\*1</sup> and Kohei Shiraishi<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

Phenomena including multiphase flow are important in engineering, particularly in ocean engineering. However, numerous phenomena have not been clarified yet. In particular, many issues with numerical simulations for the interaction between multiphase flow and body still exist. In this study, we performed large-scale numerical simulations of gas–liquid multiphase flow and body motion. Specifically, self-propelled fish swimming by deforming its body, and flow with gas–liquid free surfaces and restricted body are analyzed. For the fish swimming analysis, a model of fish swimming near or through the water surface has been discussed. We demonstrated that swimming with jumping is more efficient than swimming without jumping for large-sized fishes. On the analysis of the restricted body, a three-dimensional analysis of the motion of a Japanese traditional rain chain gutter in multiphase flow and the wave dissipation effect of lane rope was performed. We found that there existed values of water discharge in which chain gutter hardly moved and that it is possible to enhance the wave dissipation effect by adjusting the strength of the tension acting on the lane rope.

**Keywords:** Multiphase flow, Fish swimming near the water surface, Motion of restricted body, Cartesian grid, Level set method, Immersed boundary method

## 1. Introduction

There are many phenomena resulting from multiphase flow (i.e., interaction between multiple fluids, e.g., gas and liquid) that are important in engineering, particularly in ocean engineering. However, there are many unexplained phenomena as compared with single-phase flow because of the complexity. Furthermore, many issues concerning numerical simulations for the interaction between multiphase flow and body still exist. In this study, large-scale numerical simulations of the gas–liquid multiphase flow and moving body were performed. In particular, self-propelled fish swimming by deforming its body, and flow in gas–liquid free surfaces and restricted body were analyzed and described.

## 2. Numerical method

In the following, the incompressible continuity and the Navier–Stokes equation were solved using the finite-difference method based on the staggered Cartesian grid:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_s}{\rho} + \mathbf{f}_p, \quad (2)$$

where  $\mathbf{v}$  is the velocity,  $t$  represents time,  $p$  represents the pressure,  $\rho$  is the density,  $\mu$  is the viscosity,  $\mathbf{g}$  is the gravity,  $\mathbf{F}_s$  is the surface tension (modeled with the continuum surface force

(CSF) model [3]),  $\mathbf{f}_p$  represents body forces obtained using the immersed boundary method, and  $\mathbf{D}$  is the strain rate tensor. The aforementioned equations were solved based on the fractional step method. For time integration schemes, the total variation diminishing (TVD) Runge–Kutta method and the Euler explicit method were used for the advection and non-advection terms, respectively. The fifth-order weighted essentially non-oscillatory (WENO) method and the central difference method were used for the advection and viscous terms, respectively.

The level set method [1] was used to define the interface between two fluids. The level set function  $\phi$  was computed using the following advection equation:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{v}) = 0. \quad (3)$$

The body force-type immersed boundary method [2] was also used for representing the moving body in the Cartesian grid.

## 3. Analysis of a self-propelled fish swimming by deforming its body

Based on the hypothesis that a fish swimming with jumping through the water surface moves forward more efficiently than a fish swimming without jumping, analysis of the two ways of swimming (Fig. 1) was discussed. First, we observed that swimming with jumping was faster than swimming without

jumping performed by a fish with a body length of 15 cm in contrast to swimming performed by a fish with a body length of 5 cm, in which case swimming with jumping was slower than swimming without jumping. Further, we analyzed that the net power consumption required for swimming with jumping was smaller than that required for swimming without jumping. Overall, we observed that for a large-sized fish, swimming with jumping was more efficient than swimming without jumping.

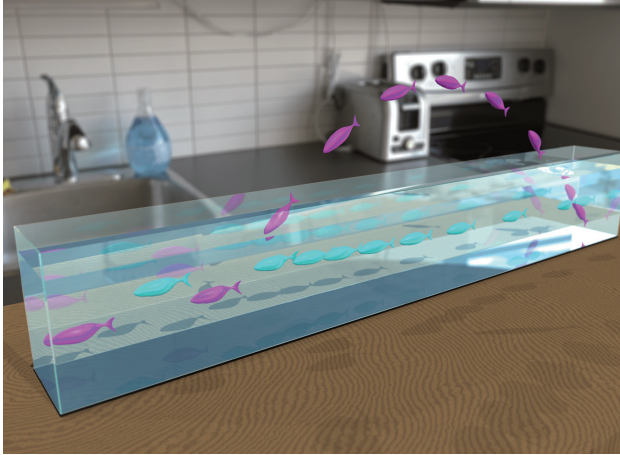


Fig. 1 Fishes swimming with and without jumping.

#### 4. Analysis of the flow with gas–liquid free surfaces and restricted body

##### 4.1 Analysis of the movement and drainage of the chain gutter

Numerical analysis of the motion of a Japanese traditional rain chain gutter in multiphase flow was performed (Fig. 2). This study primarily discussed the relationship between the motion of the chain gutter, mass, water discharge, connecting method (constraint condition), and the number of the connections. It was found that motion properties depended on water discharge, that there existed values of water discharge in which chain gutter hardly moved. The influence of inertia was large when the water discharge was small, and the influence of the fluid force became large when the water discharge was large.

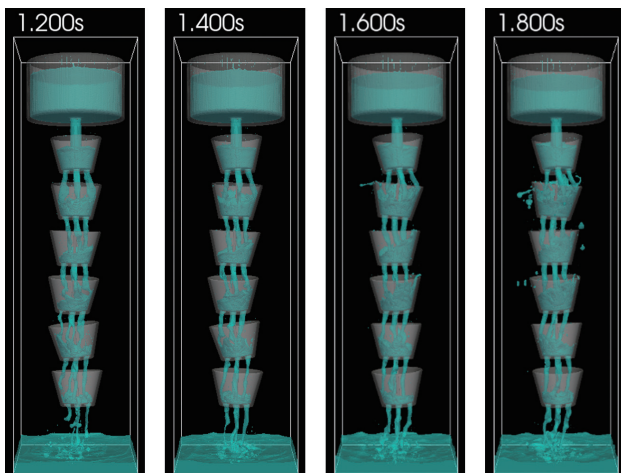


Fig. 2 Motion of the chain gutter (six units).

##### 4.2 Analysis of the movement and the wave dissipation effect of the lane rope

As shown in Fig. 3, a float representing the lane rope is set in the pool. A three-dimensional analysis on how a wave is influenced by the motion of the float was performed. The tension acting on the float was considered as the restoring force that is proportional to the distance from the initial position. The wave dissipation effect was evaluated using the kinetic energy of water. The result showed that the kinetic energy of water changed depending on a constant of the restoring force. In other words, it was possible to enhance the wave dissipation effect by adjusting the tension acting on the lane rope.

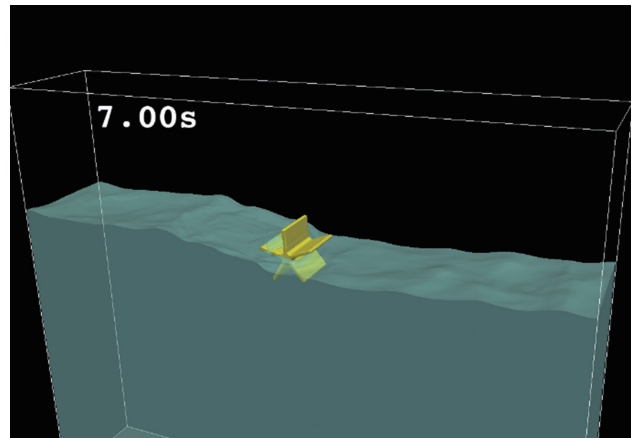


Fig. 3 Schematic showing a moving float and water surface.

#### 5. Conclusions

Large-scale numerical simulations of the gas–liquid multiphase flow and body motion were performed. For the analysis of a self-propelled fish swimming by deforming its body, it was shown that a large-sized fish swimming with jumping was more efficient than a fish swimming without jumping. For the analysis of the flow with gas–liquid free surfaces and restricted body, it was found that motion properties of the chain gutter depended on water discharge, that there existed values of water discharge in which chain gutter hardly moved. It was possible to enhance the wave dissipation effect by adjusting the strength of the tension acting on the lane rope.

#### Acknowledgement

Herein, numerical computations were partially performed using the Earth Simulator of Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology (JAMSTEC) and the supercomputer SX-ACE of the Cyberscience Center, Tohoku University. This work was supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Grant-in Aid for Scientific Research (KAKENHI) Grant Number JP17K0614.

## References

- [1] M. Sussman, P. Smerka, S. Osher, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146-159, 1994.
- [2] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki, Y. Miyake, "Turbulence Structure of Particle-Laden Flow in a Vertical Plane Channel Due to Vertex Shedding," *JSME Int. B*, Vol. 44, pp. 526-535, 2011.
- [3] J. Brackbill, D. Kothe, C. Zemach, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354, 1992.