

移動する物体と混相流れのシミュレーション

課題責任者

白崎 実 横浜国立大学大学院環境情報研究院

著者

白崎 実*1、白石 紘平*2、菌部 凪*2、花田 桂太郎*2、平松 晴喜*2

*1 横浜国立大学 大学院環境情報研究院、*2 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する。このような混相流れは、工学分野、特に海洋工学分野において重要でありながら未解明の現象も多い。特に混相流れと物体との力学的な連成現象に対しては、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対象とし、具体的には、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3次元解析を行った。この解析では、フロートの有無、羽根枚数、および回転運動の有無に関する比較を行った。フロート形状の違いによる比較では消波に効果的な形状があること、フロートの回転運動の有無の比較によりフロートの回転運動が消波に大きく影響を及ぼすことが示唆された。その他の取組みとして、背骨を考慮した変形を行う魚モデルの跳躍・方向転換に関するシミュレーションを行った。

キーワード: 混相流れ、水面近くにおける魚の遊泳、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、工学分野、特に海洋工学分野において重要なものである。しかしながら、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。これは、理論や実験を補完すべきシミュレーションにおいても同様の状況であり、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を行う物体との大規模な数値シミュレーションにより、「拘束された物体と気液自由界面を含む流れの解析」を中心に取り組んだ。

拘束された物体と気液自由界面を含む流れとしては、競技用プールに設置されたコースロープを想定し、コースロープを構成する浮き（以下、フロート）の消波効果に着目し、フロートが複数連結されたコースロープを想定したモデルについて解析を行った。フロートの回転運動の挙動を調べることで、フロートの回転運動が消波効果に与える影響についての議論を行った。その他の取組みとして、背骨を考慮した変形を行う魚モデルによる跳躍や逃避行動の再現の試みを行った。

2. 計算手法

計算には等間隔直交格子ベースの有限差分法を用い、Staggered 格子を採用した。自由表面の捕獲には Level Set 法[1]、移動する物体の表現には体積力型 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流れにおける連続の式と Navier-Stokes 方程式を用い、気液各相を区別するために

Level Set 関数とその移流方程式を用いた。

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

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

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

ここで \mathbf{v} は流速、 t は時間、 p は圧力、 ρ は密度、 μ 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、 ϕ は Level Set 関数、 \mathbf{D} はひずみ速度テンソルである。表面張力の表現には CSF (Continuum Surface Force) モデル[3]を用いた。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、時間進行法には Euler 陽解法を用いた。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 (Bi-Conjugate Gradient Stabilized) 法を用いた。

3. 連結されたフロートの運動とその消波効果の解析

連結されたフロートから成るコースロープがプールに設置されていることを想定した図 1 に示すような計算モデルに対する 3 次元解析を行った。解析領域の左側に設置した平板（以下、波源）を水面に突入させることにより、泳者によって生じる波を模擬し、その波が連結されたフロートにより隔てられた右側の領域（以下、測定領域）に与える影響について調べた。今回計算に用いたフロートの形状については図 2 を参照されたい。

フロートは波によって移動、回転するが、羽根が水面に接することにより往復するような回転を行う。ここでは、図3のように羽根の一枚が水面に接する角度を「安定角」と呼ぶこととする。また波源の大小を変えることによって波の大きさによる比較を行い、波源の奥行き方向長さが15cm、30cm、50cmのものをそれぞれ波源小、波源中、波源大と呼ぶこととする。

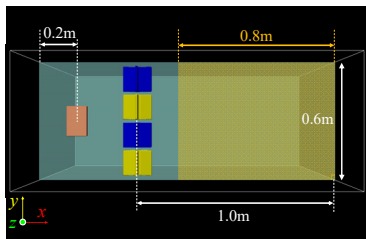
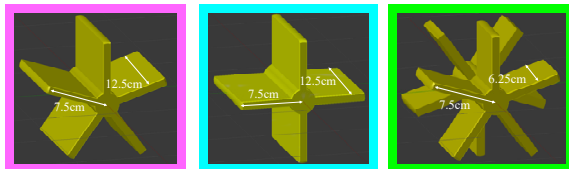


図1 上から見た計算モデル
橙：波源、青と黄：フロート、薄黄：測定領域



フロート 5 フロート 4 フロート 5'
図2 フロートの形状

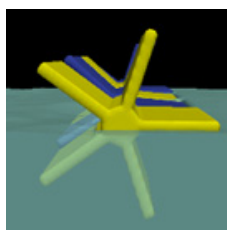


図3 フロート 5 の安定角

まず、フロートの有無による影響を調べるため、フロート 5 を設置したものと設置しないものの比較を行った。図4は、波源小でフロート 5 を設置した場合の、フロートと水面の様子および速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q ($Q > 10$) を可視化したものである。領域左側で発生した波が連結されたフロートへ到達し、領域右側へと伝播していく様子が確認できる。

フロートの有無による測定領域における水の運動エネルギーの違いを比較すると、フロート 5 を設置した場合の方が設置しない場合に比べて水の運動エネルギーが小さくなっていることを確認した。このことから、フロートの設置が消波効果をもつことが分かった。このことは、波源小、波源中、波源大、いずれにおいても確認された。

次に、フロートの羽根枚数がフロートの回転運動に与える影響、そして回転運動と水の運動エネルギーの関係

について考察を行う。図5から、フロート 5、フロート 4、フロート 5'では、それぞれ異なる安定角を中心に往復するような回転運動を行っているが、フロート 5 は他の二つに比べて往復の振幅は小さくならず、回転しやすいことがわかる。次に図6から、時刻 2 s 前後ではフロート 5 の場合の水の運動エネルギーが大きいものの、時刻 10 s 頃には他の場合よりも水の運動エネルギーが減少していることがわかる。このことから、波源小の場合には、フロート 5 は他のフロートに比べて回転しやすく消波効果が高いということがわかる。

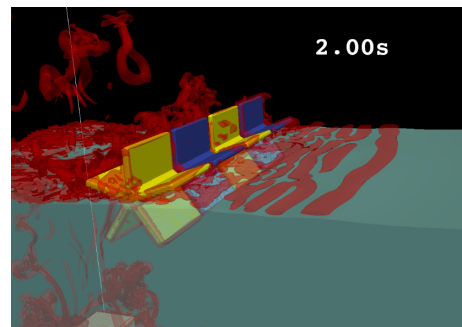


図4 波とフロート間の相互作用と渦 (時刻 2.00s)

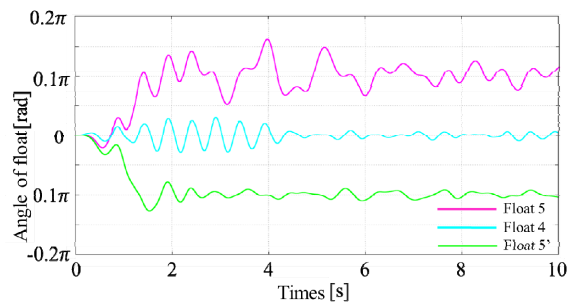


図5 波源小の場合の各フロート形状の違いによる回転角の時間変化の比較

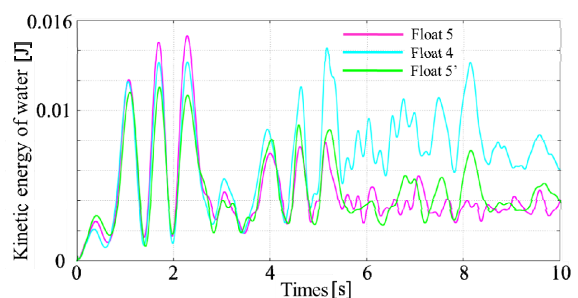


図6 波源小の場合の各フロート形状における水の運動エネルギーの時間履歴

最後に、フロートの回転運動が消波効果に与える影響について調べるために、フロート 5 が回転する場合と回転しない場合について比較を行った。図7は波源小で

の水の運動エネルギーの時間推移を回転運動の有無で比較したグラフである。波源小では回転運動を行う方が水の運動エネルギーは小さくなっており、消波効果が高いことがわかる。このことから、フロートの回転運動が消波効果に寄与することが示唆された。

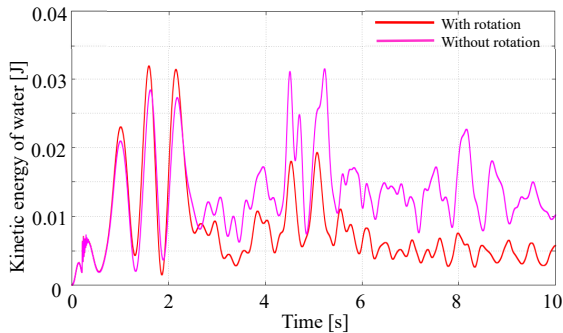


図7 波源小の場合のフロート回転の有無における水の運動エネルギーの時間履歴

4. 魚の遊泳に関する取り組み

背骨を考慮した変形を行う魚モデルを考え、推進時の進行波状に変形する動作に加えて、方向転換時の体を曲げる動作（以下、曲げ動作）を可能にした。これを用いて水平遊泳からの跳躍と逃避行動の再現を行った。

図8は跳躍の再現に関して、時刻0.32sにおける魚モデルまわりの渦度およびその前後0.06s毎における魚モデルの動きの様子を示したものである。方向転換時の曲げ動作がみられており、後方に渦を放出するとともに加速していることがわかる。

逃避行動の再現に関して時刻0.325sから0.825sにおける魚モデルの動きの様子のうち、特徴的な部分を抜き出した図9から、曲げ動作によりほぼ反転する遊泳が可能になったことがわかる。

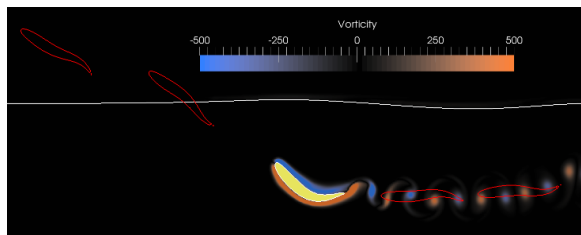


図8 跳躍の再現における魚モデルの動きと渦度 (黄色：時刻0.32s、赤線：0.06s毎の魚モデル)

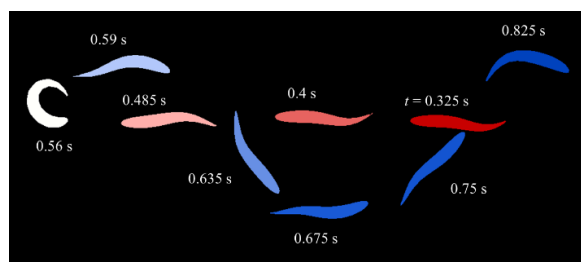


図9 逃避行動の再現における魚モデルの動き

5. 結言

気液混相流れと移動する物体との大規模な3次元数値解析を行い、連結された複数のフロートから成るコースロープと消波効果の関連について調べた。フロートの有無の比較により、フロートが消波に寄与していることを確認した。フロートの形状（羽根枚数）がフロートの回転運動に与える影響についての比較を行い、今回の波源の条件においては、フロートの形状によって回転しやすく消波効果が高いものがあり、フロートの回転運動が消波に大きく影響を及ぼすことが示唆された。

その他の取り組みとして、背骨を考慮した変形を行う魚モデルにおいて曲げ動作を可能にし、水平遊泳からの跳躍と逃避行動の再現を行った。

謝辞

本研究の一部は平成30年度地球シミュレータ公募課題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, and 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, and 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, and C. Zemach, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," J. Comput. Phys., Vol. 100, pp. 335-354, (1992)

Numerical Simulations of Moving Body and Gas–Liquid Multiphase Flow

Project Representative

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

Authors

Minoru Shirazaki, Kohei Shiraishi, Nagi Sonobe, Keitaro Hanada and Haruki Hiramatsu
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 associated with numerical simulations for the interaction between multiphase flow and bodies still exist. In this study, we performed large-scale numerical simulations of gas–liquid multiphase flow and body motions. In a three-dimensional numerical analysis, we study the wave dissipation of lane ropes (connected floats), which divide the lanes of a large swimming pool. We compared the behaviors of various shapes of the connected floats, and of the same-shaped connected float in the absence and presence of rotation. The connected floats were found to contribute to the wave dissipation, and rotation was suggested to play a major role. We also numerically simulated the jumping and turning of a fish model in which the fish propels by spinal deformations.

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

1. Introduction

Multiphase flow (i.e., interactions between multiple fluids such as gases and liquids) is important in engineering, particularly in ocean engineering. However, many more phenomena are unexplained in multiphase flow than in single-phase flow, because multiphase flow is very complex. Furthermore, numerical simulations of the interactions between multiphase flow and bodies still face many difficulties. This report presents large-scale numerical simulations of gas–liquid multiphase flow and motion of moving bodies. In particular, it analyzes the interaction between the flow with gas–liquid free surfaces and the motions of floats connected as a lane rope in a swimming pool. It also analyzes the self-propelled motions of fish, which swim by deforming their bodies.

2. Numerical method

The incompressible continuity and the Navier–Stokes equation, given by Eqs. (1) and (2), respectively, were solved by the finite-difference method on the staggered Cartesian grid:

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

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

Here, \mathbf{v} is the fluid velocity, t represents time, and p , ρ , and μ denote the pressure, density, and viscosity of the fluid, respectively. \mathbf{g} is the gravitational acceleration, \mathbf{F}_s is the

surface tension (modeled by the CSF (Continuum Surface Force) model [1]), \mathbf{f}_p represents the body forces obtained by the immersed boundary method, and \mathbf{D} is the strain rate tensor. The aforementioned equations were solved by the fractional step method, and the time integration was performed by the Euler explicit method. The fifth-order WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) method and the central difference method were applied to the advection and viscous terms, respectively. The interface between the two fluids was defined by the level set method [2]. The level set function ϕ was computed by the following advection equation:

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

The moving body in the Cartesian grid was modeled by the body force-type immersed boundary method [3].

3. Analysis of relation between connected floats and wave dissipation

As shown in Fig. 1, a lane rope formed from the connected floats was set in the pool. How the wave was influenced by the motion of the connected floats was investigated in a three-dimensional analysis. The waves were generated by a flat plate (hereafter referred to as the wave source) immersed in the pool.

The shapes of the float were varied as shown in Fig. 2. The floats were shifted and rotated by the waves. During the rotation, the blade reciprocated at each contact with the water surface. The angle at which one blade contacted the water surface (i.e., the stable angle) is shown in Fig. 3. We also

varied the size of the wave by selecting three sizes of wave sources. Hereafter, the wave sources with depth lengths of 15, 30, and 50 cm are called the small, medium-sized, and large wave sources, respectively.

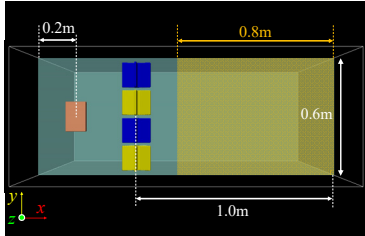
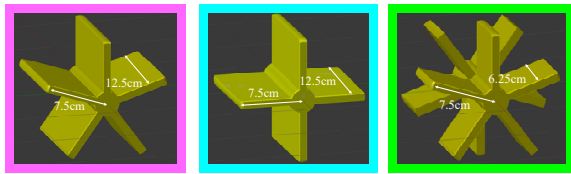


Fig. 1 Top view of the computational model (orange: wave source, blue and yellow: connected floats, pale yellow: measurement area)



Float 5 Float 4 Float 5'
Fig. 2 Float models

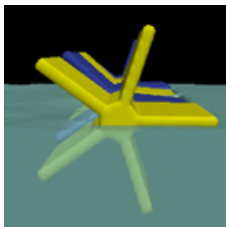


Fig. 3 Stable angle of Float 5

First, the water motions were compared in the presence and absence of the connected floats. Fig. 4 shows the state of the float, the water surface, and the second invariant of the velocity gradient tensor Q ($Q > 10$) in the system with the small wave source and connections of Float 5. Observe that the wave generated at the left side of the region reached the connected floats and was propagated to the right side of the region.

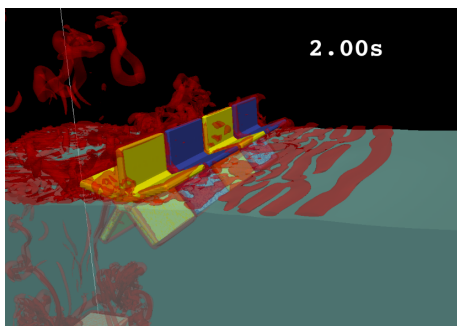


Fig. 4 Vortex structure and interaction between the waves and moving floats (time: 2.00 s)

The kinetic energy of the water in the measurement areas was smaller in the system with the connected floats than in the system without the floats. It was found that the connected floats, regardless of their size, contributed to the wave dissipation.

We next examined the effect of the number of float blades on the rotational motion, and the relation between the rotational motion and the kinetic energy of water. The results are presented in Figs. 5 and 6, respectively.

Fig. 5 shows the time histories of the rotation angles of the first float in the chains of Float 5, Float 4, and Float 5'. Here the waves were generated by the small wave source. The three floats rotated around different stable angles, and Float 5 rotated more easily than the other floats. As shown in Fig. 6, the kinetic energy of the water at 10 s was lower in the case of Float 5 than in the other cases. Thus, for the small wave source, Float 5 rotated more easily than the other floats, and exerted the highest wave-dissipation effect.

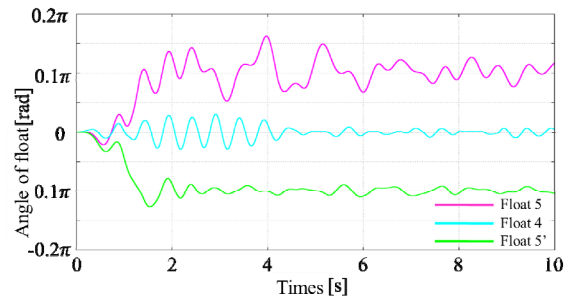


Fig. 5 Time histories of the float angles under the effect of the small wave source

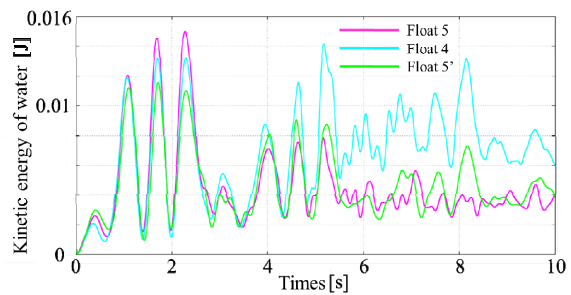


Fig. 6 Time histories of kinetic energy of water under the effect of the small wave source

Finally, to investigate the effect of the float's rotation on the wave dissipation, we compared the behaviors of the rotating and non-rotating Float 5. Fig. 7 shows the time histories of the kinetic energy of water in the measurement area, when the waves were generated by the small wave source. In the small wave case, rotating the float reduced the kinetic energy of the water (relative to that of the water around the non-rotating float), and enhanced the wave dissipation. It was suggested that the float's rotation largely affects the wave dissipation.

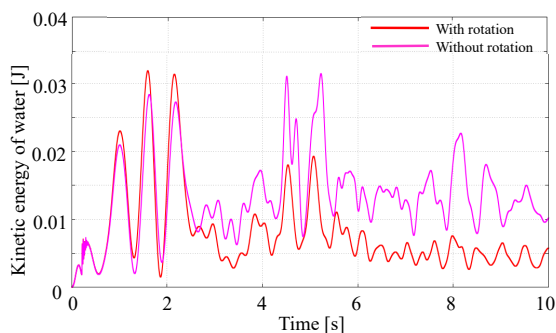


Fig.7 Time histories of kinetic energy of water for the rotating and non-rotating Float 5 under the effect of the small wave source

4. Simulation of swimming fish model

This section investigates a fish model with a deformed spine. During propulsion, the spinal deformation takes the form of a traveling wave, and during turning, the body performs a bending operation (hereafter called a bending motion). This model simulates the jumping and escape from horizontal swimming by the fish body.

Fig. 8 shows the vorticity around the fish model at 0.32 s, and the movements of the fish model at 0.06-s intervals before and after the vorticity at 0.32 s in the jumping simulation. At the time of the direction change, a bending motion occurred and the vortex was emitted backward and accelerated.

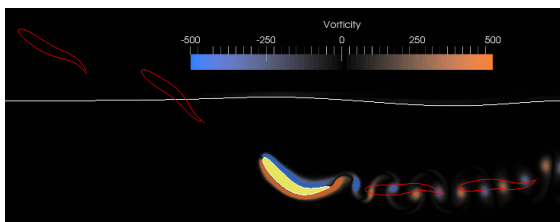


Fig. 8 Motions and vorticity in the jumping fish model (yellow: $t = 0.32$ s, red lines: motions at 0.06-s intervals)

5. Conclusions

In a three-dimensional analysis of the gas-liquid multiphase flow in a system with moving bodies, we investigated the relationship between a lane rope composed of connected floats and the wave dissipation in the system. Various comparisons revealed that the connected floats contributed to the wave dissipation, and suggested that the float's rotation largely affects the wave dissipation.

We also performed numerical simulations of jumping and turning of a fish model in which the fish propels by spinal deformation.

Acknowledgement

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

References

- [1] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354, (1992).
- [2] M. Sussman, P. Smerka, and S. Osher, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146-159, (1994).
- [3] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki, and 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).