

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、藺部 凪*2、花田 桂太郎*2、平松 晴喜*2、埴 直己*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対象として、プールに設置されたコースロープによる消波効果についての解析、背骨と筋力を模した連結物体によって構成された魚モデルの遊泳のシミュレーション、流水と鎖樋との連成現象の解析を行った。

キーワード: 混相流れ、魚の遊泳、連結された物体、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、連結された物体と気液自由界面を含む流れの解析に取り組んだ。

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。また、背骨と筋力を模した連結物体によって構成される魚モデルの遊泳の解析、そして流水と鎖樋との連成現象の解析も行った。

2. 数値計算法

支配方程式として、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。等間隔直交格子上で有限差分法を用い、計算格子配置としては 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。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

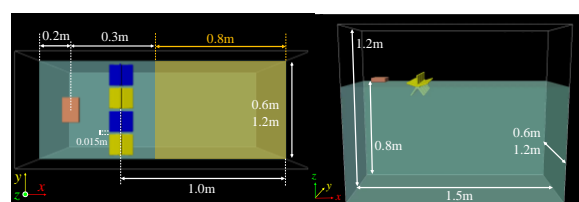
Gradient Stabilized) 法を用いた。表面張力の表現には CSF (Continuum Surface Force) モデル[3]を用いた。

3. 連結されたフロートの運動とその消波効果

前年度に引き続き、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に与える影響について調べた。

前年度までに取り組んだ図 2 (a)~(c)のフロート形状に加え、図 2 (d)~(g)ようなフロート形状に対する解析を行った。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（図 3 参照）により、この「安定角」を往復するような回転を行う。

対象とした条件においては、偶数枚羽根のフロートに比べて奇数枚羽根のフロートの方が波源からの波を受けて回転運動を行いやすいことがわかった。フロートの回転は消波効果に影響を及ぼす[1]が、奇数枚羽根のフロートと偶数枚羽根のフロートでは、回転が消波効果に及ぼす影響に大きな差異があることが示された。また、9 連結されたフロートに対する大規模なシミュレーションも実施した。



(a) 上から見たもの
(橙: 波源、青と黄: フロート、薄黄: 測定領域)

図 1 計算モデル

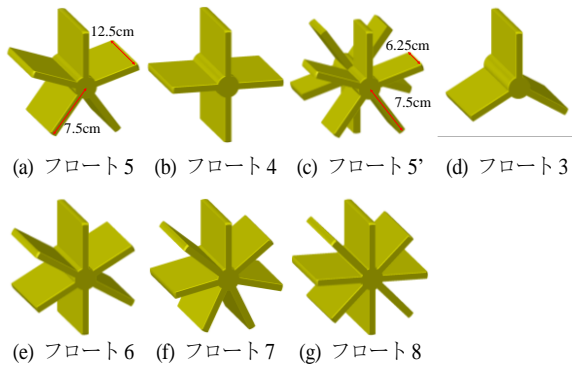


図2 フロートの形状

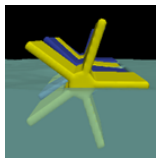


図3 フロート 5 の安定角

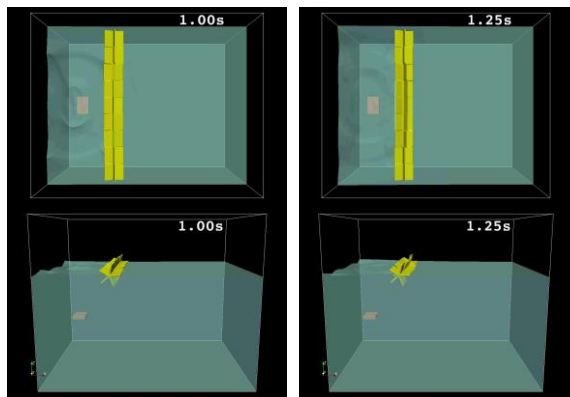


図4 9連結されたフロート5と波の動き

4. 背骨と筋力を考慮した魚モデルの遊泳

背骨および筋力を模した連結物体によって構成される魚モデルの遊泳に関する解析を行った。モデルの形状は図7のように平板状の剛体 (Unit) を連結させたものを使用した。各関節において作用する筋力として、図8に示すような魚の頭側、中央、尾側のそれぞれに重みを

置いた3種類のトルク分布を与えた場合について比較を行った。それぞれのトルク分布に対する魚モデルの動きと渦度の様子を図9に示す。遊泳速度は頭側に重みを置いたトルク分布を与えた場合が最も大きく、次に中央に重みを置いたトルク分布の場合が大きくなった。尾側に重みを置いたトルク分布の場合には、頭側に重みを置いたトルク分布と中央に重みを置いたトルク分布の場合と比べて著しく低い遊泳速度しか得られないことが明らかとなった。

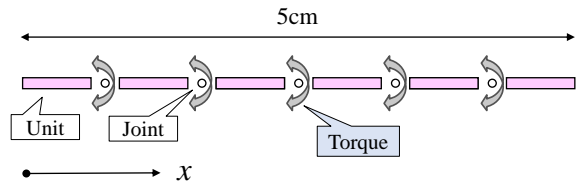


図5 連結物体のモデル

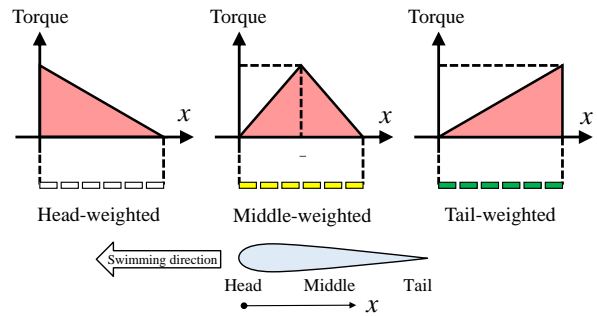


図6 筋力を模した3つのトルク分布

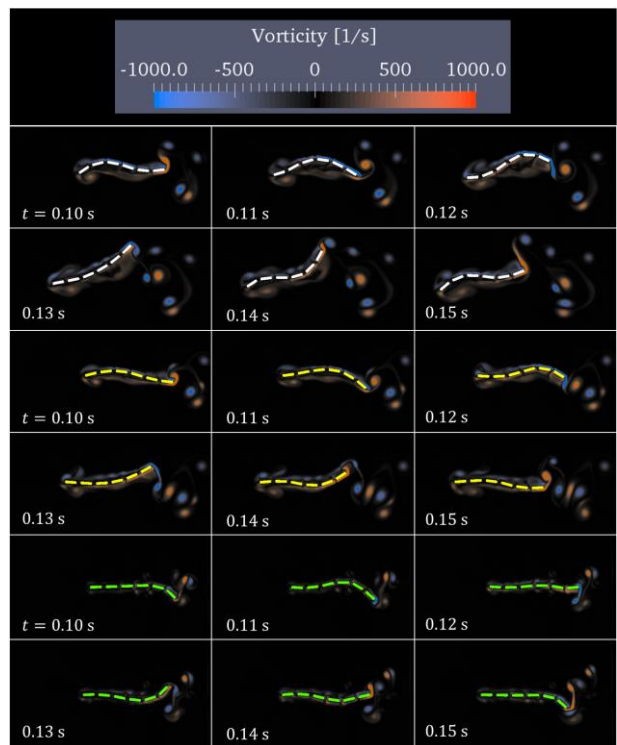


図7 魚モデルの動きと渦度の分布 (白色は頭側、黄色は中央、緑色は尾側に重みを置いたトルク分布)

5. 鎖樋の運動と排水

日本古来の雨樋の一つである鎖樋と流水とが相互作用する現象の解析を行った。図 8 に示すように複数の「カップ」が連結された鎖樋を考え、上部からの流水がカップから構成される鎖樋の運動に与える影響について解析を行った。図 8 は 10 連結された鎖樋の運動を時刻 2.0 s から 4.5 s まで 0.5 s ごとに可視化したものである。時間の経過とともに動きが大きくなり、鎖樋全体がねじれるように動くことが確認された。

6. 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、コースロープを模した連結された複数のフロートと消波効果の関連について、フロートの羽根の枚数を変えた解析を行い、奇数枚羽根のフロートと偶数枚羽根のフロートでは、回転が消波効果に及ぼす影響に大きな差異があることを示した。そして、背骨と筋力を考慮した変形を行う魚モデルの遊泳シミュレーション、および鎖樋と流水とが相互作用する現象の解析への取り組みについて報告した。

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および HPCI システム利用研究課題 (hp190135) の成果によるものであり、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 17K06148、19H05613 の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文献

- [1] M. Shirazaki, K. Shiraiishi, N. Sonobe, K. Hanada and H. Hiramatsu, “Numerical Simulations of Moving Body and Gas-Liquid Multiphase Flow,” Annual Report of the Earth Simulator April 2018-March 2019 (2020)
- [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)

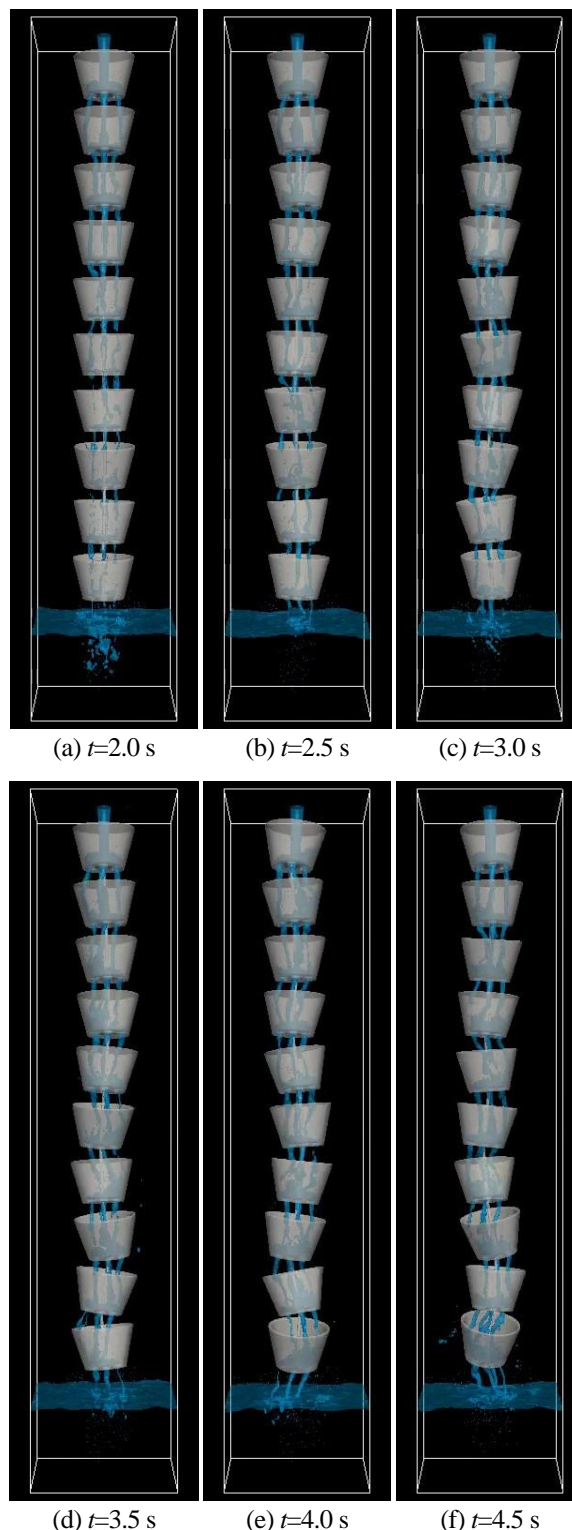


図 8 流水による 10 連結の鎖樋の動き

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, Nagi Sonobe, Keitaro Hanada, Haruki Hiramatsu and Naoki Hanawa
Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

Multiphase flow phenomena are important in engineering, especially in marine field. However, numerous phenomena have yet to be clarified. In particular, there remain many issues associated with numerical simulations of the interaction between multiphase flow and bodies. In this study, we performed large-scale numerical simulations of gas–liquid multiphase flow and body motions. We analyzed the wave dissipation of lane ropes (connected floats) that divided the lanes in a large swimming pool. We also numerically-simulated a swimming fish with consideration to spine and muscular force and analyzed the motion of a traditional Japanese rain chain in multiphase flow.

Keywords: Multiphase flow, Swimming fish, Motion of connected bodies, Cartesian grids, Level set method, Immersed boundary method

1. Introduction

Multiphase flow (i.e., interactions between multiple fluids, such as gases and liquids) is important in various fields of engineering, especially marine engineering. Many more phenomena remain unexplained, however, in multiphase flow than in single-phase flow, due to the fact that multiphase flow is highly complex. Moreover, numerical simulations of the interactions between multiphase flow and bodies continue to face numerous difficulties. We have previously performed large-scale numerical simulations of gas–liquid multiphase flow and the motion of moving bodies [1]. This study presents an analysis of the relationship between connected floats and wave dissipation, a simulation of a swimming fish, and an analysis of the movement and drainage of a rain chain.

2. Numerical method

The incompressible continuity and the Navier–Stokes equation were solved by means of the finite–difference method on a staggered Cartesian grid. The velocity–pressure coupling was solved using the fractional step method, whereas the time integration was carried out using the Euler explicit method. The fifth-order weighted essentially non-oscillatory (WENO) and central difference methods were applied, respectively, to the advection and the viscous terms. The interface between the two fluids was defined by means of the level set method [2]. The level set function was then computed via the advection equation.

In the Cartesian grid, the moving body was modeled using the body force-type immersed boundary method [3]. A multigrid preconditioned bi-conjugate gradient stabilized (BiCGSTAB) method was employed to solve the pressure

Poisson equation. In turn, the surface tension was modeled by the continuum surface force (CSF) model [4].

3. Relationship between connected floats and wave dissipation

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

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

We found that floats with an odd number of blades (Fig. 2 (a), (d), and (f)) were rotated more easily by the generated wave than those with an even number of blades (Fig. 2 (b), (e), and (g)). We examined the effect of the number of float blades on the rotational motion, and the relationship between the rotational motion and kinetic energy of the water within the measurement area. It was suggested in a previous report that the float’s rotation had a substantial effect on wave dissipation [1]. The numerical results revealed that there was a significant difference in the contribution of the float’s rotation to wave dissipation between floats with an odd number of blades and those with an even number. Moreover, a large-scale numerical simulation of the interaction between nine connected floats (Float 5) and the generated wave was carried out as shown in Fig. 4.

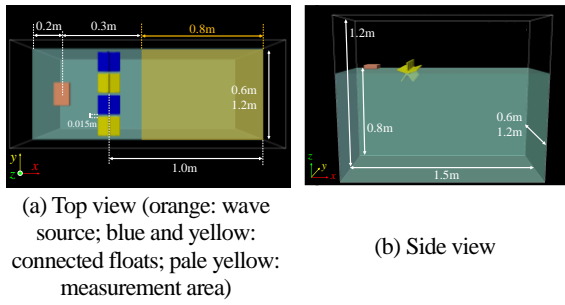


Fig. 1 Computational model

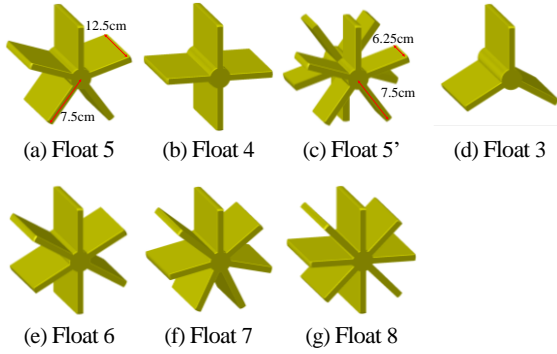


Fig. 2 Float models

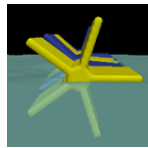


Fig. 3 Stable angle of Float 5

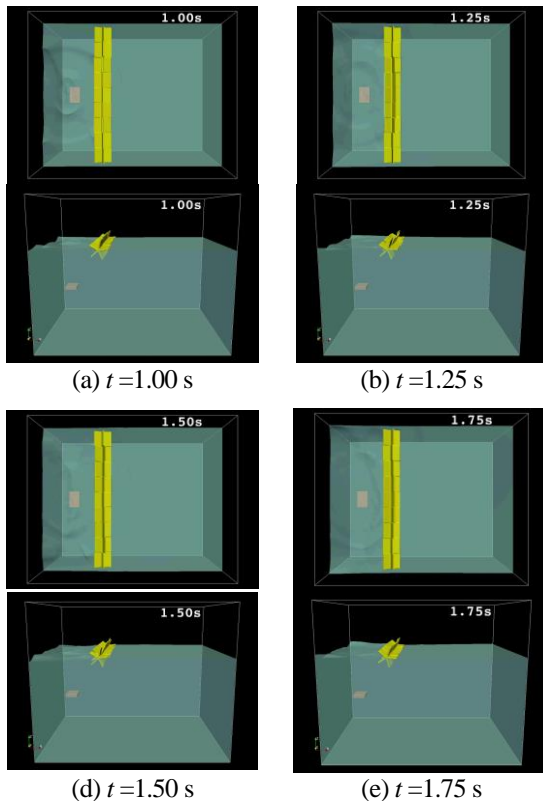


Fig. 4 Motions of nine connected floats (Float 5) and the wave

4. Motion of a swimming fish considering spine and muscular force

This section describes a numerical simulation that was performed of a swimming fish with spine and muscular force taken into account. The fish was modeled using connected bodies, as is shown in Fig. 5. Three cases of the torque distribution as muscular force are shown in Fig. 6. The vorticity around the fish model and its motions are shown in Fig. 7. It was found that the fish model with the head-weighted distribution of torque could swim faster than the one with the middle-weighted distribution. The swimming speed of the fish model with the tail-weighted distribution of torque was also much lower than the fish models with the head- and middle-weighted distributions.

5. Interaction between running water and rain chain

A numerical analysis of the motion of a traditional Japanese rain chain in multiphase flow was also performed. A rain chain was modeled using connected cups, as is shown in Fig. 8. This study discussed the relationship between the motion of the rain chain and the flow of running water from the top of the chain. Figure 8 shows the motions of the rain chain and flow of the running water in the case of a rain chain that comprised 10 cups. The displacement of the motion gradually increased and twisting motion was observed.

6. Conclusions

In this study, we performed a three-dimensional analysis of gas-liquid multiphase flow in a system with moving bodies, and report on: (1) the relationship between a pool lane rope composed of connected floats and the wave dissipation profile in the system; (2) a numerical simulation of a swimming fish considering spine and muscular force; and (3) an analysis of the interaction between running water and a rain chain.

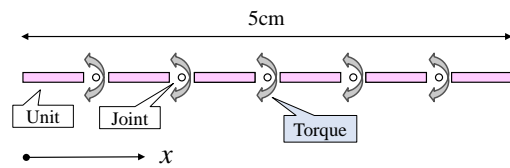


Fig. 5 Model of connected bodies

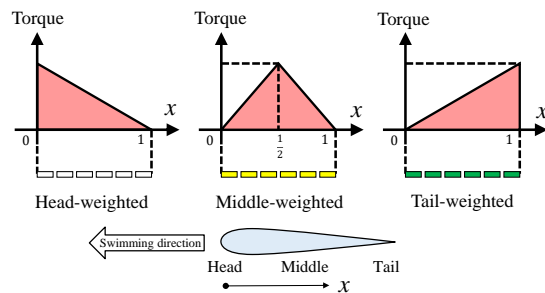


Fig. 6. Three cases of torque distribution

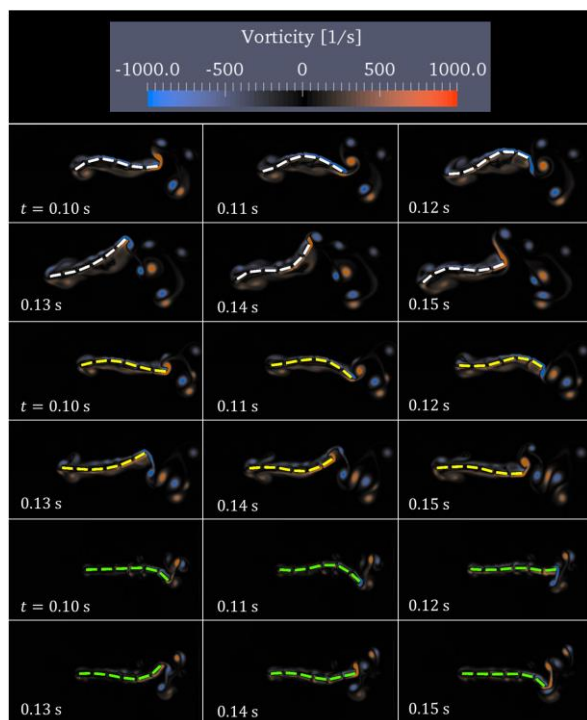


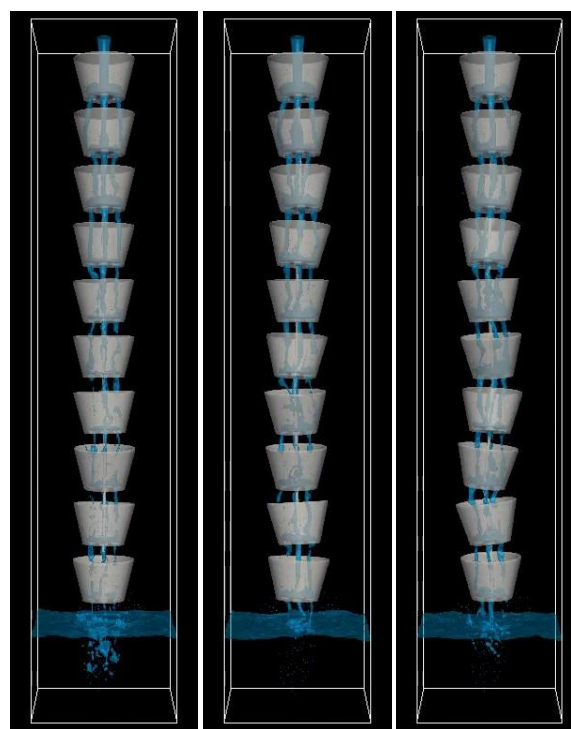
Fig. 7. Motions of the connected bodies and vorticity distributions (white: the head-weighted distribution of torque; yellow: the middle-weighted distribution; green: the tail-weighted distribution)

Acknowledgments

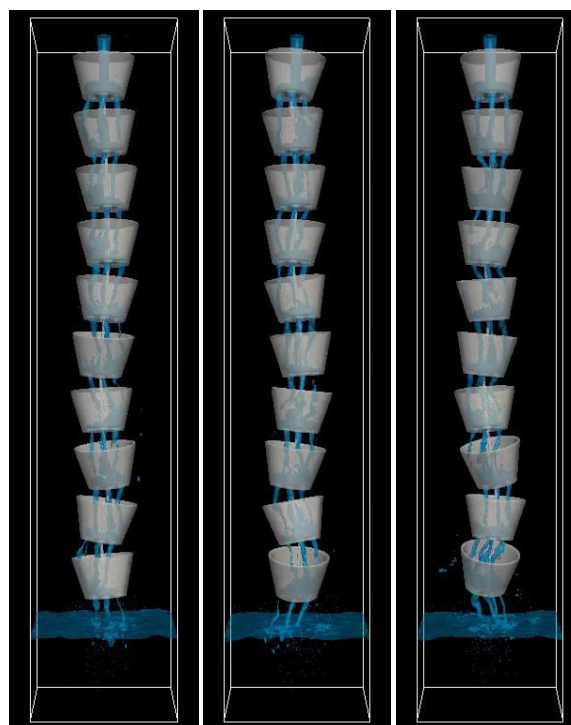
Some of the numerical computations herein were performed using the supercomputer system, “the Earth Simulator,” of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology and the supercomputer system SX-ACE of the Cyberscience Center, Tohoku University. This work was supported by the Japan Society for the Promotion of Science, Grant-in Aid for Scientific Research (17K0614 and 19H05613).

References

- [1] M. Shirazaki, K. Shiraishi, N. Sonobe, K. Hanada, and H. Hiramatsu, “Numerical Simulations of Moving Body and Gas-Liquid Multiphase Flow,” Annual Report of the Earth Simulator April 2018-March 2019 (2020)
- [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).
- [4] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach, “A Continuum Method for Modeling Surface Tension,” J. Comput. Phys., Vol. 100, pp. 335-354, (1992).



(a) $t=2.0$ s (b) $t=2.5$ s (c) $t=3.0$ s



(d) $t=3.5$ s (e) $t=4.0$ s (f) $t=4.5$ s

Fig. 8 Motions of rain chain (10 cups)