

コースロープの形状が消波効果に与える影響についての 3 次元数値解析

Three dimensional numerical analysis of the effect of the shape of lane rope floats on wave dissipation

- 白石 紘平, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, shiraishi-kohei-bz@ynu.jp
 白崎 実, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, shirazak@ynu.ac.jp
 Kohei SHIRAISHI, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama
 Minoru SHIRAZAKI, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama

This paper presents a three-dimensional numerical analysis for the wave dissipation of lane rope which is used in large swimming pool as a means to divide the pool. We sought to better understand the relationship between wave dissipation and rotation of lane rope connected with multiple floats. From the result of analysis comparing with floats without rotation, it is suggested that performance of wave dissipation is higher if floats are more likely to rotate. And we performed analysis with changing the shape of floats, but no improvement in performance of wave dissipation was seen on a new float model because of difficulty to rotate.

1. 緒言

競泳競技は 100 分の 1 秒を競う種目であり、わずかな流れの変化も記録に大きな影響を及ぼす可能性がある。選手の記録を伸ばすため、水の抵抗の少ない水着や波を反射させにくいプールの開発などが行われてきた。コースロープもその一つであり、コースロープには単なるコース分けだけではなく、選手が泳ぐことにより発生した波を消すという、消波効果の役割も期待されている。コースロープの消波性能に着目した研究として、異なる形状のコースロープについて消波効果の違いを調査したもの⁽¹⁾⁽²⁾などがあるが、これらはいずれも実験的研究であり、種々の条件を変えた比較を行い、消波効果についての詳細を調べる上では CFD による解析が有効であると考えられる。本研究では波と移動するコースロープとが相互作用する現象を気液自由界面と移動する物体を取り扱うことによりモデル化し、CFD 解析を行うことでコースロープの形状や設置条件が消波効果に及ぼす影響を定量的に評価することを目的としている。

著者らはこれまでに、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た CFD 解析を行ってきた。フロートが単一の場合の解析⁽³⁾では、フロートが確かに消波の役割を果たしていることや、設置時の張力を調整することで消波効果が高められる可能性があることを報告した。また、フロートを複数連結させた解析⁽⁴⁾では、単位長さあたりの連結数が多いほど消波効果が高くなる可能性があることなどを報告した。しかしながら、フロートの回転運動と消波効果に関する議論は単一フロートの場合に限られていた。そこで本稿では、フロートが複数連結したコースロープについて、より現実に近いフロートのモデルを用いた解析を行い、フロートの回転運動と消波効果の関連について調査した。

2. 計算手法・計算モデル

等間隔直交格子での有限差分法を用いて解析を行った。支配方程式には非圧縮性流れに対する連続の式と Navier-Stokes 方程式を用い、Fractional Step 法により計算を行った。自由表面の捕獲および物体表面の表現には Level Set⁽⁵⁾法を用いた。計算手法の詳細については既報⁽⁴⁾を参照されたい。

Fig.1 に示すような、プールにコースロープが設置されていることを想定した計算モデルに対する 3 次元解析を行った。フロート間の間隔は 1.5 cm としている。本稿では、泳者が泳ぐことで生じる波を、領域左の平板を水面に突入させることにより模擬し、その波がコースロープによって隔てられた右側の領域に与える影響について調査した。Fig.2 は今回使用したフロートのモデルであり、

中心部の円柱に 5 枚の羽根が等間隔で取り付けられた構造となっている。Fig.2 (a)をフロート A, Fig.2 (b)をフロート B とし、フロート B は現実のフロートの形状を参考に、奥行方向長さを半分にしたフロート A を 0.4π 、つまり羽根と羽根のなす角の半分の角度だけずらして 2 つ繋げたものである。また本稿ではフロートの並進運動は xz 平面内運動のみ、フロートの回転運動は y 軸まわり回転のみに制限している。

コースロープ全体に作用する張力と連結されたフロート間に作用する拘束力は、フロートに働く 2 種類の復元力としてモデル化した。これについても、詳細については既報⁽⁴⁾を参照されたい。

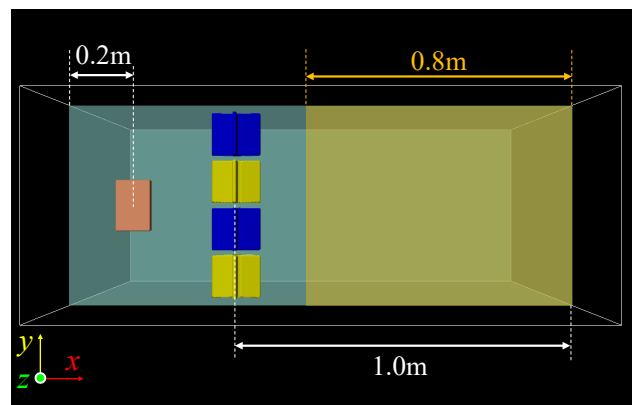
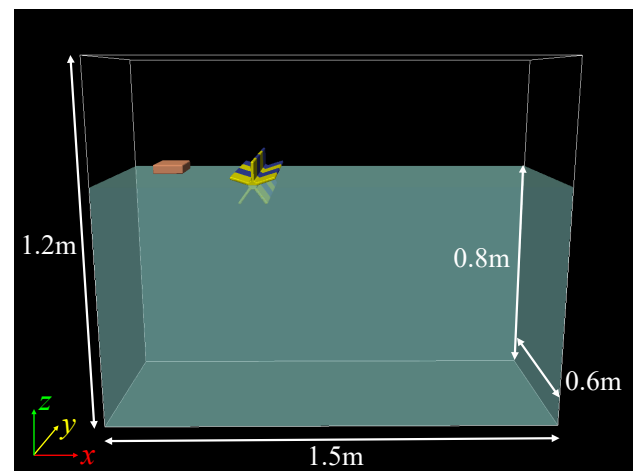


Fig. 1 Computational model

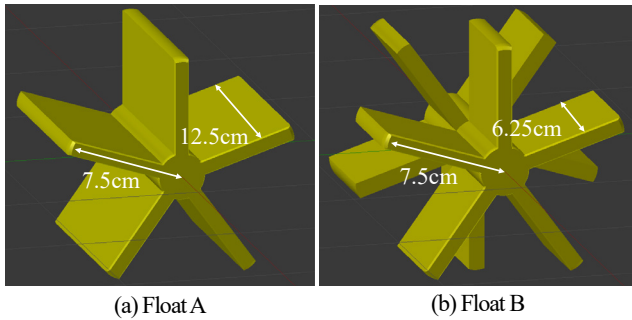


Fig. 2 Float models

3. 計算条件

計算領域は 1.5 m × 0.6 m × 1.2 m とし、格子数は 500 × 200 × 400 とした ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3.0 \times 10^{-3}$ m)。またプールの水深は 0.8 m とした。時間刻み幅は $\Delta t = 4.0 \times 10^{-5}$ m とした。壁に対する圧力の境界条件として底面には初期時刻における静水圧値を、その他の壁面には法線方向勾配ゼロを課し、流速の境界条件として non-slip 条件を課した。

気相、液相はそれぞれ空気と水を想定し、密度はそれぞれ 1.205 kg/m³, 998.2 kg/m³, 粘性係数はそれぞれ 1.822×10^{-5} Pa · s, 1.002×10^{-3} Pa · s とした。また表面張力係数は 7.275×10^{-2} N/m, 重力加速度は 9.807 m/s², フロートの密度は 460.0 kg/m³, 張力のばね定数は $k = 200$ N/m, 拘束力のばね定数は $k_r = 100$ N/m とした。波源となる平板のサイズは 10 cm × 15 cm × 3 cm とし、水面への突入速度は鉛直下向きに 1.0 m/s とした。

4. 計算結果

まず、フロート A について、フロートの連結数と連結方向長さを変えた計算を行った。フロートが 4 つの場合については Fig. 2 のモデルをそのまま用い、3 つ、2 つの場合はそれぞれ連結方向長さを 4/3 倍、2 倍にしたものを使用している (Fig. 3)。また、フロート間及びフロートと壁との隙間の合計は、10 cm で統一しており、フロートと壁との隙間はフロートが 4 つの場合は 2.75 cm, 3 つの場合は 3.5 cm, 2 つの場合は 4.25 cm となっている。

コースロープの消波効果については領域右側 0.8 m の測定領域 (Fig. 1 参照) での水の運動エネルギーを算出することで評価した。ここで使用した水の運動エネルギー K は

$$K = \int_V \frac{1}{2} \rho |\mathbf{v}|^2 dV \quad (1)$$

で表される。ここで、 ρ は水の密度、 \mathbf{v} は流速、 V は測定領域における水が占めている領域である。

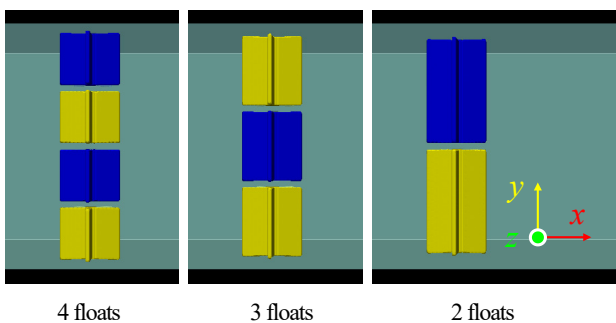


Fig. 3 Position and length of lane rope floats

Fig. 4 は、フロートの連結数が 4 つ、3 つ、2 つの場合の測定領域での水の運動エネルギーの時間履歴を示したグラフである。いずれの場合も、領域左で発生した波が領域右へと伝わるのと同時に水の運動エネルギーが増加し、その後は時間の経過とともに徐々に減衰していく様子が見られる。

また、フロートの連結数が多いほど、水の運動エネルギーが抑えられているという結果を得た。このようになった理由について、フロートの連結方向長さが異なることによる回転運動の違いによるものではないかと考え、フロートの回転が消波効果に与える影響を調査するため、Fig. 1 上図の初期状態からフロートが全く回転しないものとの比較を行った。Fig. 5 は、フロート A を 4 つ連結した場合の水の運動エネルギーの時間履歴を、回転の有無で比較したものである。Fig. 5 から、回転を行う場合の方が、水の運動エネルギーが抑えられていることがわかる。また、グラフの掲載は割愛するが、フロートの連結数が 3 つ、2 つの場合も同様の傾向となり、フロートが回転することが消波に寄与している可能性が示唆された。

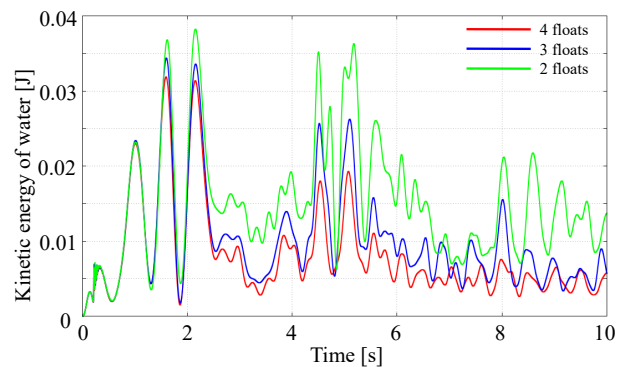


Fig. 4 Time history of kinetic energy of water (float A)

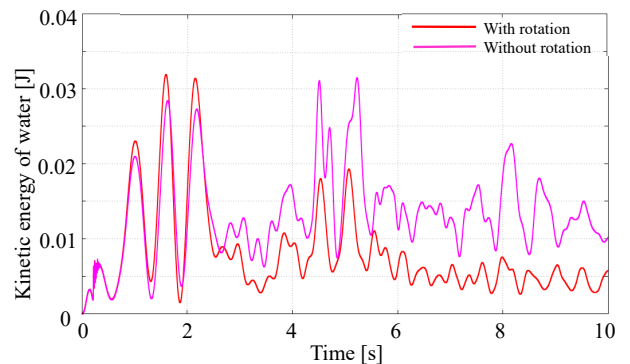


Fig. 5 Time history of kinetic energy of water (float A, 4 floats)

Fig. 6 は、フロートが 4 つ、3 つ、2 つの場合のそれぞれのフロートの回転エネルギーの総和を取った値の時間履歴を示したグラフである。発生した波によるフロートの回転運動が、時間の経過とともに落ち着いていくのがわかる。Table 1 に、それぞれの回転エネルギーの時間平均値を示す。これを見ると、フロートの連結数が多いほどフロート全体の回転エネルギーが大きくなる。このことからフロートの回転がコースロープの消波に寄与している可能性が考えられる。

次に、フロート形状の違いが消波効果に与える影響について調査するため、フロートの形状を変えた計算を行った。フロートを 4 つ連結した場合について、水の運動エネルギーの時間履歴をフロート A とフロート B で比較したグラフが Fig. 7 である。Fig. 7 よ

り、 $t=2.0$ s 付近まではフロート A よりもフロート B の方が水の運動エネルギーの値が小さくなっているが、それ以降の時刻では、全体的にフロート A よりもフロート B の方がわずかではあるが水の運動エネルギーの値が大きくなっていることがわかる。つまり、フロート B はフロート A と比較して消波効果は向上していないことがわかる。

Fig. 8 に、 y 軸方向一番手前のフロートの回転角の時間履歴のグラフを示す。ただし、初期状態の角度を 0 としている。Fig. 8 より、フロート A、B はそれぞれ初期状態の角度から逆方向に回転した後、 0.1π 、 -0.1π 回転した角度を中心として往復するような回転運動を繰り返していることがわかる。この角度は、フロートの羽根の 1 枚が、ちょうど水平となる角度であり (Fig. 9)、羽根の 1 枚が水面に接することにより、一方方向に回転するのではなく、往復するような回転になっていると考えられる。フロートの羽根の 1 枚が水平となる角度 (0.1π もしくは -0.1π) を中心とした往復の振幅はフロート A よりもフロート B の方が小さいことがわかる。また、グラフの掲載は割愛するが、4 つのフロートすべてで同じ傾向が得られていることを付記しておく。よって、フロート B はフロート A に比べて回転運動を行いにくく、その分消波に寄与できなかったと考えられる。

ただし、これらの議論は平板が水面に突入することによって発生した波にも依存すると考えられる。より詳しくは講演で報告する予定である。

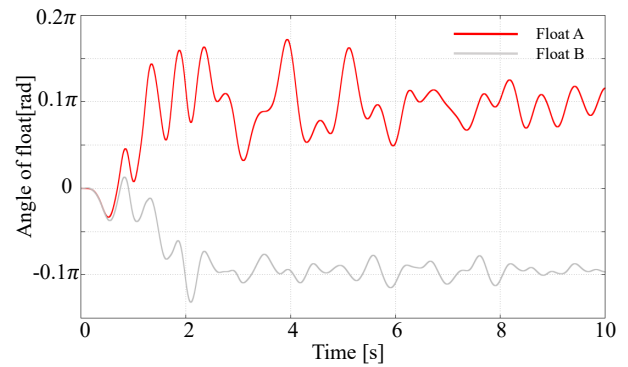


Fig. 8 Time history of rotation angle of float set-up in the front of lane rope

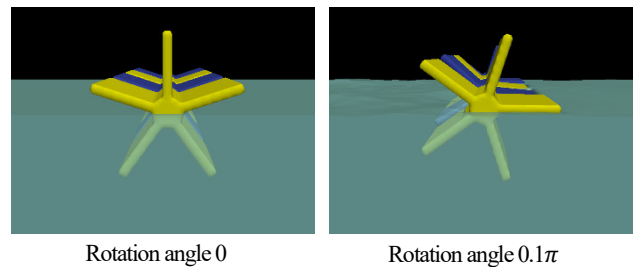


Fig. 9 Angle of floats (float A)

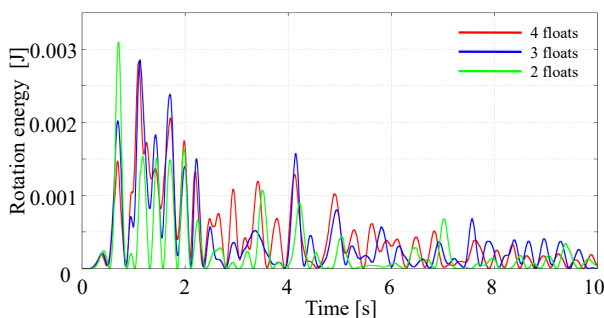


Fig. 6 Time history of total rotation energy of floats

Table 1 Average of total rotation energy of floats

	$\bar{K}[10^{-4}J]$
4 floats	4.308
3 floats	3.888
2 floats	2.442

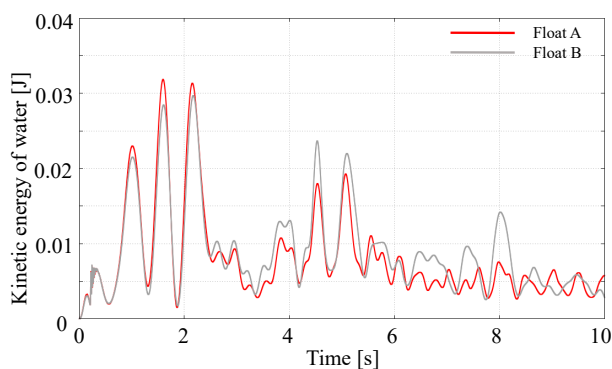


Fig. 7 Time history of kinetic energy of water (4 floats)

5. 結言

複数のフロートが連結されたコースロープと消波効果の関連について調査するため 3 次元 CFD 解析を行った。フロートの連結数及び連結方向長さを変えた計算から、今回の計算条件では、回転運動を行う場合の方が消波効果は高くなる可能性が示唆された。また、フロートの形状を現実のフロートに近いものにした計算を行ったところ、消波効果の向上が見られなかった。これは、フロート形状の変化により、回転運動を行いにくくなってしまったことが原因だと考えられる。これらの振る舞いは、発生する波にも依存すると考えられるが、より詳しくは講演で報告する予定である。

謝辞

本研究の一部は HPCI システム利用研究課題および平成 29 年度、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、計算には京都大学学術情報メディアセンターのシステム E CRAY XC30 with MIC (HPCI 課題番号:hp160175)、東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-ACE (HPCI 課題番号:hp160175, hp170216)、海洋開発研究機構の地球シミュレータ (HPCI 課題番号:hp160175 および平成 29 年度、30 年度地球シミュレータ公募課題) 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。

参考文献

- (1) 佐藤ほか, “コースロープの消波性能,” 生産研究 Vol. 49(7), (1997), pp. 318-321.
- (2) 富樫, 野村, “コースロープの消波効果,” 日本体育学会第 36 回大会, 093310, (1985).
- (3) 白石, 白崎, “コースロープの回転運動が消波効果に及ぼす影響についての CFD 解析,” 第 31 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, (2017).
- (4) 白石, 白崎, “複数のフロートが連結したコースロープの消波性能についての 3 次元数値解析,” 日本流体力学学会年会 2018,

- (2018).
- (5) Sussman M. *et al.*, “A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow,” *J. Comput. Phys*, Vol. 114, (1994), pp. 146-159.