越波低減浮体パネルの動的挙動に関する 多相流数値シミュレーション

MULTIPHASE FLOW SIMULATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF FLOATING PANEL FOR WAVE OVERTOPPING REDUCTION

川崎浩司¹・Han Dinh Ut²・松野哲弥³・福本 正⁴
Koji KAWASAKI, Han Dinh Ut, Tetsuya MATSUNO and Tadashi FUKUMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²修(工) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴西松建設(株)技術研究所 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

In this study, the dynamic behavior of a floating panel, which is installed in front of an upright seawall for wave overtopping reduction, was numerically investigated by utilizing a multiphase flow model 'DOLPHIN-3D' with solid-gas-liquid phase interaction. The validity of the model was confirmed through the comparison between the numerical results and experimental ones in terms of the water surface elevation in front of the seawall and the floating panel motion. A good agreement between the numerical results and experimental ones revealed that the model is capable of reproducing the interaction of waves and a floating body with high accuracy. A POV-Ray interface system was also developed as a three-dimensional computer graphics system which makes it easy to understand wave-structure interaction phenomena.

Key Words : *Multiphase flow simulation, Wave overtopping, Floating panel, Dynamic behavior*

1. 序論

近年、地球温暖化に伴う海面上昇、台風勢力の増大が懸念され、高潮、高波による越波災害へのさらなる対策が求められている。しかしながら、越波被害を完全に防ぐためには、護岸の新設、天端高の嵩上げなどの大規模な対策が必要となり、全ての沿岸域で実施することは財政的に困難である。そこで、川崎・笹田¹⁾は既設護岸に直角二等辺三角形形状の越波対策工を付加する工法を提案し、護岸の新設を必要としない工法により建設コストの削減が試みられている。一方で、沿岸整備では、沿岸防災を最優先したことにより、沿岸域の環境は悪化し、次第に環境面の改善が叫ばれるようになった。そして、天端高を低く抑えることで、沿岸域の景観、親水性を損なわない護岸の提案もされている。このように、防災面だけでなく、海岸環境の整備と保全、公衆の海岸の適正な利用などの複合的視点による沿岸防災構造物の整備が進められている。

上記の背景を鑑み、著者ら²⁾は、既設直立護岸の前面に浮体パネルを設置する越波対策工法を提案した。これは、高潮、高波襲来時に、浮体パネルが自然外力である浮力により水面変動に追従することで、護岸背後へ水塊が流入するのを防ぐ護岸形式である。天端高嵩上げと同等の効果が期待され、天端高を嵩

上げた場合に比べ、景観をあまり阻害しない。また、既設護岸に浮体パネルとそれを囲むフレームを付加するだけでよいと、維持管理が容易な構造物であり、陸域の改変、埋め立ての必要がなく環境への影響が少ない。また、水理模型実験を実施することにより、浮体パネルは高い越波低減効果を有することを明示した。一方、移動する浮体パネルの作用波圧を明らかにすることは移動物体の設計面で重要であるが、水理模型実験では測定が困難であり、数値解析による検討が有効である。著者ら^{3),4)}は、沿岸域の複雑な現象を解明するために、3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions-3 Dimension version)を開発した。しかしながら、本モデルは水理模型実験への適用例が少ない上、水理模型実験で測定が困難な浮体パネルの作用圧力に関する検討を行うには、まず浮体パネルの動的挙動を高精度に再現可能であることを確認する必要がある。

本研究では、浮体パネルの動的挙動を精微に再現できるように多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の剛体解析法を改良するとともに、数値計算と水理模型実験の比較から、DOLPHIN-3D の妥当性・有用性を検証することを目的としている。

2. 多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D

(1) 基礎方程式

本研究で使用する3次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-3Dの支配方程式は、圧縮性粘性流体に対する質量保存式(1)、Navier-Stokes方程式(2)、圧力方程式(3)、密度関数の移流方程式(4)、バロトロピー流体に対する状態方程式(5)から構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \rho)}{\partial x_j} = \rho q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \frac{f_{si}}{\rho} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\tau_{ij} + 2 \frac{\mu}{\rho} S_{ij} \right) - D_i u_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} = -\rho C_{ls}^2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi_I}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho = f(p) \quad (5)$$

$$q = \begin{cases} 0 & (x \neq x_s) \\ q^* & (x = x_s) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 t は時間、 u_i は各方向の速度ベクトル、 x_i は座標ベクトル、 q は造波ソースのわき出し強さであり、式(6)に示されるように造波側線 $x=x_s$ で q^* の値をもつ。 p は圧力、 g_i は重力加速度ベクトル、 f_{si} はBrackbill et al.⁵⁾が考案したCSF (Continuum Surface Force) モデルによる表面張力、 τ_{ij} はSalveti and Banerjee⁶⁾が開発したdynamic二変数混合モデルDTM (Dynamic Two-parameter Mixed model) に基づくLES (Large Eddy Simulation) モデルによるSGS (Sub Grid Scale) 応力、 μ は粘性係数、 S_{ij} はひずみ速度テンソル、 D_i はエネルギー減衰領域における係数、 C_{ls} は局所音速を示す。また、 ϕ_I ($I=1\sim3$; ϕ_1 : 固相, ϕ_2 : 液相, ϕ_3 : 気相) はある計算格子における密度関数であり、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_I \leq 1$) の関係を満たす。

(2) 計算アルゴリズム

本モデルは、時間分離解法により、前述したNavier-Stokes方程式、圧力方程式を移流段階、非移流段階に分割することで高精度に解析可能である。計算フローチャートを図-1に示す。はじめに初期条件・境界条件の設定を行う。ついで、波高・周期の入力条件から造波ソースを設定した位置におけるソースのわき出し強さを計算する。その後、流体の流速 u_i 、圧力 p の移流段階計算に、CIP (Constrained Interpolation Profile) 法^{7,8)}を適用する。そして、算定された移流段階後の各物理量を用いて、圧縮性・

非圧縮性流体を同時に解析可能な拡張SMAC (Simplified Marker And Cell) 法により非移流段階計算を実施する。なお、気液界面に生じる表面張力の影響はCSFモデルにより算定し、乱流量についてはLESモデルにより評価する。非移流段階計算後、更新された流速を使用し、密度 ρ を保存保証型CIP法であるCIP-CSL2 (Constrained Interpolation Profile Conservative Semi-Lagrangian of second-order)⁹⁾により計算する。前述した流動解析を固気液全相に対して行った後、固相内部の圧力を使用して複数剛体の運動解析を実施する。その後、全相の密度関数 ϕ_I の移流計算を、剛体速度の流体場への影響を考慮した流速を用いてCIP法により実施する。密度関数 ϕ_I の移流計算後、最終的に各物理量を更新し、次の時間ステップへ移行する。上述した計算を時間ステップごとに繰り返し行うことで、本モデルでは複数剛体の動的挙動を含む固気液多相乱流場を精微に数値解析することができる。

図-1 計算フローチャート

(3) 剛体解析法

本モデルで使用する剛体解析法では、剛体の運動をXiao et al.¹⁰⁾と同様に取り扱っている。固相群は

剛体であり、その運動形態は並進運動と回転の両方から構成されるという仮定の下で、固相を高粘性流体とみなして流動解析を行う。水理模型実験では、フレームにより、浮体パネルの運動を鉛直方向のみに規定している。そのため、数値計算では、浮体パネルの鉛直方向の運動方程式だけを解くこととし、回転運動はないものとする。また、水理模型実験では、フレームと浮体パネルの間には若干の隙間があり、水平方向の微小な挙動により、浮体パネルとフレーム間の衝突、摩擦が発生している。しかしながら、現在のモデルでは、物体間の衝突力を扱うことができない。そこで、簡易的な方法として、衝突の影響を運動方程式に抵抗として導入する。水理模型実験において、浮体パネルの速度が大きいほど衝突は顕著にみられたため、速度に比例する抵抗を導入することで浮体パネルの動的挙動の高精度化を図る。

速度抵抗を導入した剛体の並進運動計算を以下に示す。流動解析を行い、得られた固相内部の圧力を用いて、Newtonの第2法則より、剛体内部の加速度を求める。ついで、剛体の重心位置での加速度を算定し、剛体に作用する力を従来の剛体並進運動の計算で求める。そして、式(7)に示す速度抵抗を考慮した運動方程式を新たに用いる。

$$M_l \frac{dw_l^{n+1}}{dt} + bw_l^{n+1} = F^* \quad (7)$$

ここで、 M_l は計算領域における剛体 l の総質量、 b は速度抵抗、 w_l は剛体 l の重心における速度、 F は剛体に作用する外力である。また $n+1$ 、 $*$ は時間ステップであり、 $*$ は n 、 $n+1$ の間の時間ステップである。また、 w_l^{n+1} の値は未知であるため、式(8)に示す陰解法の時間差分スキームであるクランク・ニコルソン法を用いる。

$$w_l^{n+1} = w_l^n + \left(\frac{dw_l^n}{dt} + \frac{dw_l^{n+1}}{dt} \right) \frac{\Delta t}{2} \quad (8)$$

ここで、 Δt は計算間隔である。

ついで、式(7)に式(8)を代入し、速度に関する $n+1$ の時間ステップの項を消去する。そして、式を変形することで、加速度は式(9)から求められる。

$$\frac{dw_l^{n+1}}{dt} = \frac{-b \left(w_l^n + \frac{dw_l^n}{dt} \frac{\Delta t}{2} \right) + F^*}{M_l + b \frac{\Delta t}{2}} \quad (9)$$

(4) POV-Rayによる可視化

現在、数値解析は、海岸工学分野で海象現象の解明に大きな役割を担うようになってきた。さらに、計算結果を沿岸域の防災に役立てるためには、海岸工学を専門としない人にも沿岸域の現象が容易にイ

メージできるような図示が必要である。そこで、本研究では、計算結果をリアリティのある映像とするために、POV-Ray (Persistence Of Vision Raytracer) による可視化を行う。POV-Rayとは、3次元グラフィックを描くレイトレーシングソフトウェアであり、光の屈折、反射を現実に近い形で表現が可能である。本研究では、DOLPHIN-3Dによる計算結果を簡易に図示できるように、POV-Ray用のインターフェースの構築を行った。

POV-Ray用のインターフェースによる描画手順を以下に示す。まず、計算格子数、変数の数を設定したファイルを読み込み、図-2に示すインターフェースプログラムを起動する。入力ファイルに、描画する数値計算結果のデータを入力する。ついで、変数設定で読み込んだ変数の材質を定義する。ここで、液相の材質は、waterで定義され、海の色合いを表現するために、水深ごとに色を変化させた。その後、カメラの位置をプレビューにより確認を行い、決定する。カメラ位置と注視点を変化させることで様々な角度から現象が確認でき、より効果的に画像を見せることが可能である。そして、画像サイズ、出力形式を決め、描画を行う。

図-2 POV-Ray用インターフェース

3. 水理模型実験

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻が所有する断面2次元造波水路（長さ30m、幅0.7m、高さ0.9m）を用いて水理模型実験を行った。実験模型の縮尺を1/20とし、浮体パネルを直立護岸前面

に設置した。浮体パネルはアクリル製の直方体で、高さ0.20m、厚さ0.03m、幅0.66m、密度500kg/m³、喫水は0.10mである。また、図-3に示す高さ0.25mのアルミ製フレームによって、浮体パネルの挙動は鉛直方向のみに規定した。

波浪条件は、周期を2.24sに固定し、波高を0.04m、0.10mと2種類に変化させた。波高0.04mでは、浮体パネルの挙動に着目した水理模型実験であり、非越波条件である。一方で、波高0.10mは越波条件である。波浪条件はそれぞれ現地換算すると、周期は10s、波高は0.8m、2.0mに相当する。なお、越波低減浮体パネルが設置される場所は直立護岸前面であることから、実用化された際、主に内湾部での施工が予想され、波高は2.0mほどに設定した。

図-3 浮体パネル設置状況

4. 浮体パネルの動的挙動に関する数値解析

(1) 計算条件

本研究では、3次元モデルDOLPHIN-3Dを用いるが、水理模型実験ではほぼ鉛直2次元的现象であることを確認しているため、奥行き方向の計算格子数を1、格子幅を0.04mとして、2次元的に数値計算を実施した。

波浪条件は、上述した2種類である。図-4に示すように、波高ごとに計算領域を設定した。静水深は0.425mであり、浮体パネル前面W2にて水面変動を計測した。開境界処理として、沖側に約2.25波長分の減衰領域を配置し、波高0.10mの条件では、護岸

(a) 波高0.04mの条件における計算領域

(b) 波高0.10mの条件における計算領域

図-4 計算領域

背後で発生する渦による気相の過剰な流速を抑えるために、護岸背後にも減衰領域を配置した。各波浪条件の計算条件を表-1に示す。x、z方向の格子幅は、境界付近での流速の発生を抑えるために、領域の上端、減衰領域内の端に近づくにつれて1.05倍ずつ大きくした。また、浮体パネル周辺では、水理現象を精微に解析するため、格子幅を5mmと細かく設定した。

速度抵抗bの値を、波高0.04m、0.10mに対してそれぞれ0.7、1.0と設定した。速度抵抗bの値の決定方法を以下に示す。まず、波高ごとに入射波周期を変化させた数値計算を実施した。その結果、入射波周期が短くなるにつれ、水理模型実験と浮体パネルの挙動に大きな差が生じた。そこで、周期の短い条件でbの値を変化させ、高い再現性を有する値を各波高における速度抵抗の値として決定した。

表-1 計算条件

	波高 0.04m	波高 0.10m
計算領域	21.58×2.431m	23.91×2.581m
格子数	482×141	510×192
格子幅	$\Delta x=0.005\sim0.506\text{m}$ $\Delta z=0.005\sim0.093\text{m}$	$\Delta x=0.005\sim0.506\text{m}$ $\Delta z=0.005\sim0.093\text{m}$
計算間隔	0.0001s	0.0001s

(2) 再現計算

越波低減浮体パネルの動的挙動に関する数値解析を実施した。波高0.04m、0.10mの条件におけるW2の水面変動 η 、浮体パネルの挙動zの時系列変化について、水理模型実験との比較をそれぞれ図-5、図-6に示す。なお、実線が計算結果、丸印が実験結果である。図-5(a)をみると、護岸からの反射波の影響により重複波が生じ、入射波高0.04mに対して護岸前面波高が約2倍になっていることがわかる。また、計算結果は、水理模型実験における水面変動を精度よく再現しているといえる。図-5(b)から、本モデルは浮体パネルの上下運動を概ね再現している。また、両図より、水面変動と浮体パネルの挙動の時系列変化を比較すると、浮体パネルは水面変動をよく追従していることが実験波形と計算波形の両方から認められる。一方、図-6(a)より、計算結果、実験結果ともに、有限振幅波の特徴である波峰が尖り、谷が平坦になる上下非対称な波であることが確認できる。また、入射波高0.04mの場合と同様に、入射波高0.10mに対して護岸前面波高が約2倍になっている。また、入射波高0.10mにおける浮体パネルの挙動を示す図-6(b)から、浮体パネルの挙動は、水面変動と同様に上下非対称な波形となっていることがわかる。計算結果は、実験結果を概ね再現できているものの、浮体パネル下降時点での挙動に若干の差異がみられた。この挙動の差異は、浮体パネルとフレームの衝突によるものと考えられる。数値計算では、衝突を速度抵抗として考慮したため、水理模型実験における浮体パネル下降時の挙動を再現できなかった可能性がある。図-6(a)、(b)の波形の時系

(a) 浮体パネル前面における水面変動

(b) 浮体パネルの動的挙動

図-5 波高0.04mにおける実験と計算結果の比較

(a) 浮体パネル前面における水面変動

(b) 浮体パネルの動的挙動

図-6 波高0.10mにおける実験と計算結果の比較

(a) 計算結果

(b) 実験結果

図-7 浮体パネルの動的挙動

列変化を比較すると、浮体パネルは、水面変動と同位相で上下運動していることがわかる。したがって、本条件の範囲内では、浮体パネルは水面変動に対して高い追随性をもつため、水面変動に近い波形となり、図-5と図-6で波高による浮体パネルの挙動の違いが生じたと考えられる。

波高0.10mの条件について、浮体パネルの挙動を可視化した結果を図-7に示す。なお、図-7(a)は0.25sの間隔で可視化した計算結果であり、図-7(b)は実験結果における動画のスナップショットである。図-7(a), (b)の比較から、計算結果は、水理模型実験における浮体パネルの上下運動を表現できているといえる。図-6(b)に示す浮体パネルの挙動の時系列変化のように、計算結果と実験結果における浮体

パネルの上下運動は、浮体パネル上昇停止時より下降停止時の方が長いことが図-7からも確認できる。時刻 $t=14.350s$ では、浮体パネルが上昇することで、護岸背後への水塊の進入を防御していることがわかる。一方で、浮体パネルと護岸の隙間から僅かな越流がみられる。水理模型実験においても、同様の越流が確認されており、浮体パネルの挙動に影響を与えずに隙間を塞ぐなどの対策が必要である。また、計算結果から、波と移動物体と気相の相互作用が良好に解析されていると判断される。

以上の結果から、速度抵抗を導入した3次元多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dは浮体パネルの動的挙動、護岸前面の水面変動を高精度に再現可能であるといえる。

図-8 POV-Rayによる3次元描画

(3) POV-Rayによる3次元描画

図-8は、波高0.10mにおける浮体パネルの上下運動の様子をPOV-Rayによって3次元的に描画したものである。水面による光の反射、現実に近い水の色合い、光の屈折により浮体パネルが水中と空気中で色が異なることがわかる。また、浮体パネルと背後の護岸の色を変えることにより、浮体パネルが設置されている状況がイメージしやすくなっている。さらに、浮体パネルが越波を防ぐ様子が視覚的に理解できる。

以上より、POV-Ray用インターフェースは、沿岸域の現象に関するリアリティのある描画が可能であり、浮体パネル周辺の物理現象の把握・視覚的な理解に役立つと考えられる。

5. 結論

本研究では、浮体パネルの動的挙動の再現性を向上させる手段として、剛体の運動方程式に速度抵抗の導入を行った。水理模型実験との比較から、浮体パネルの動的挙動、護岸前面の水面変動を高精度に再現可能であるとともに、越波低減効果を確認した。以上から、3次元多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの妥当性を示した。さらに、本モデルによる計算結果を3次元グラフィックで描画するPOV-Ray用インターフェースシステムを構築した。インターフェースシステムは、計算結果の高度な可視化が可能であり、護岸周辺における水理現象の理解に役立つといえる。そして、ソフト面の防災対策への適用が期待される。

今後、様々な入射波条件で計算を行い、浮体パネルの応答特性に関して考察するとともに、不規則波作用下における浮体パネルの動的挙動についても検討する必要がある。また、浮体パネルとフレームの衝突力を考慮できるようにモデルを改良し、浮体パネルの動的挙動のさらなる再現性向上を図るとともに、移動物体の耐波設計に役立てるため、浮体パネ

ルに作用する圧力に関しても検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A)（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046）であることをここに付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川崎浩司, 笹田泰雄: 直立護岸に設置した越波対策工の越波低減効果と作用波圧特性, 海岸工学論文集, 第65巻, pp.766-770, 2009.
- 2) 川崎浩司, 舟橋 徹, 福本 正: 浮体パネルによる越波低減護岸の有効性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-66, No.1, pp.741-745, 2010.
- 3) 川崎浩司, 中辻啓二: 3次元固気液多相乱流数値モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.56-60, 2002.
- 4) 川崎浩司, 袴田充哉: 3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.31-35, 2007.
- 5) Brackbill J.U., Kothe D.B., and C.Zemach: A continuum method for modeling surface tension, *J. Computational Physics*, Vol.100, pp.335-354, 1992.
- 6) Salvetti M.V., Banerjee S.: A priori tests of a new dynamic subgrid-scale model for finite-difference large-eddy simulations, *Phys.Fluid*, Vol.7, No.11, pp.2831-2847, 1995.
- 7) Yabe T, and Aoki T: Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation One-dimensional solver, *Computer Physics Communications*, Vol.66, pp.219-232, 1991.
- 8) Yabe T: Unified Solver CIP for Solid, Liquid and Gas, *Computational Fluid Dynamics Review* 1997, 1997.
- 9) Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T., and Takizawa, K.: Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *J. Computational Physics*, Vol.174, pp.171-207, 2001.
- 10) Xiao F, Yabe T, Ito T, and Tajima M: An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow, *Computer Physics Communications*, Vol.102, pp.147-160, 1997.