オイラー表記に基づく自由表面単相流・多相流解析モデルの比較検討

Comparison Examination between Eulerian Free-Surface Single-Phase and Multiphase Flow Analysis Models

川崎浩司¹・松野哲弥²・坂谷太基³・有光 剛⁴

Koji KAWASAKI, Tetsuya MATSUNO, Taiki SAKATANI and Tsuyoshi ARIMITSU

In this paper, one free-surface single-phase flow “CADMAS-SURF/3D” and two multiphase flow models “DOLPHIN-3D and OpenFOAM”, which are based on Eulerian description, were compared with the previous two laboratory experiments on collision problems between bore and a structure. The validity of the models was confirmed by the comparison between the numerical and experimental results in terms of water surface elevation and pressure acting on the structure. As a result, the three models used in this study were found to have good accuracy although the difference of the models has an influence on the numerical results. The comparison examination of numerical models is said to provide the useful information contributing to the further development of computational fluid dynamics.

1. 序論

近年、高速演算処理機器の著しい性能向上と高精度な数値スキームの開発により、水理現象を精微に解析することを目的とした多くの数値モデルが提案されている。そして、数値モデルは、水理模型実験で検討が困難な部分を補うなど、複雑な流動場の解明に重要な役割を果たしている。例えば、財団法人沿岸開発技術研究センター（2001）により開発された数値波動水路CADMAS-SURF (SUper Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure) は、実務への適用が多くされている。例えば、川崎ら（2007）、川崎・菊（2012）は現地海域に同モデルを適用し、リーフ上を伝播する波の変形と護岸背後への越波現象を解明し、最適な越波対策工法を提案している。川崎・袴田（2007）は、固相・気相・液相の相互作用を考慮できる3次元数値モデルとして、DOLPHIN-3D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions -3 Dimension version) を開発した。そして、川崎ら（2011）は同モデルを既設の直立護岸の前面に浮体パネルを付加した越波低減護岸に適用し、浮体パネルに作用する波圧特性を明らかにしている。また、オープンソースソフトウェアを使用した研究事例も多くある。OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) は2004年からGPL (GNU General Public License) によって一般に公開されている3次元数

値流体力学ツールであり、技術者自らモデルの改良が容易にできる。今後、モデルの高度化が期待されており、海岸工学分野への適用もされつつある。

数値モデルの実務への適用が普及する一方で、技術者、研究者は、計算結果を単に鵜呑みにするのではなく、使用した数値モデルの精度や適用限界などに十分留意した上で計算結果の有意性を判断し、工学的に総括することが重要である。

本研究では、オイラー型自由表面流解析モデルを対象に、1つの単相流モデル (CADMAS-SURF/3D) と2つの多相流モデル (DOLPHIN-3D, OpenFOAM) を取り上げ、既往の水理模型実験結果との比較から、各数値モデルの精度を検証し、モデル間の特徴に関して比較検討する。

2. 各種モデルの概要

(1) 3次元数値波動水槽CADMAS-SURF/3D

CADMAS-SURF/3Dは単相流モデルであり、基礎方程式は、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式とボラスモデルにより拡張されたNavier-Stokes方程式から構成される。自由表面の解析にはVOF (Volume Of Fluid) 法を採用し、移流方程式の離散化には、ドナー・アクセプタ法を用いる。モデルの詳細については、財団法人沿岸開発技術研究センター（2001）、財団法人沿岸技術研究センター（2010）を参照されたい。

(2) 3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3D

モデルの詳細は川崎ら（2011）に記述されているため、本節では概略のみを説明する。3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの支配方程式は、圧縮性粘性流体の質量保存式、Navier-Stokes方程式、圧力方程式、密度関数の移流方程式、パロトロピー流体に対する状態方程式から構成される。時間分離解法を用いて、Navier-

1 正会員	博(工)	名古屋大学准教授 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
2 学生会員	学(工)	名古屋大学大学院工学研究科社会基盤 工学専攻
3 学生会員	学(工)	名古屋大学大学院工学研究科社会基盤 工学専攻
4 正会員	博(工)	関西電力(株) 電力技術研究所

図-1 実験模型の概要図

表-1 計算条件

計算領域		3.22m×1.00m×1.00m
計算格子間隔		$\Delta x = 0.02\text{m}$ $\Delta y = 0.025\text{m}$ $\Delta z = 0.01\text{m}$
計算格子数		161×40×100
計算時間 間隔	DOLPHIN-3D CADMAS-SURF/3D	0.00005s
	OpenFOAM	0.0002778～0.002s
密度 ρ		1000kg/m ³
境界条件	OpenFOAM	開境界条件（上端） No-slip条件（壁面部）
	DOLPHIN-3D CADMAS-SURF/3D	閉境界条件（上端） No-slip条件（壁面部）

図-2 水柱崩壊に伴う水位変動

図-3 矩形体前面における圧力変動

Stokes方程式，圧力方程式を移流段階，非移流段階に分割して計算を行う．移流段階計算にCIP（Constrained Interpolation Profile）法を適用し，非移流段階計算には，圧縮性・非圧縮性を同時に解析可能な拡張SMAC（Simplified Marker And Cell）法を用いている．

(3) 3次元数値流体力学ツールOpenFOAM

本研究では，川崎ら（2013）と同様に，等温・非圧縮・不混和流体の2相流を対象としたinterFoamソルバを採用した．基礎方程式は連続式とNavier-Stokes方程式である．基礎方程式の離散化には有限体積法を使用し，流速と圧力の計算にはPISO（Pressure Implicit with Splitting of Operators）法を用いている．また，気液界面の追跡には，界面の数値拡散抑制パラメータを導入したVOF法を適用している．

3. 水柱崩壊に伴う水塊と矩形体の衝突問題

各数値モデルの精度を検証するために，図-1に示す水柱崩壊に伴う水塊と矩形体の衝突問題に関する水理模型実験（Kleefsmanら，2005）を対象に比較検討を行った．

(1) 水理模型実験

実験では，ゲートの急開により発生させた段波が水槽底面の矩形体に衝突することで発生する複雑な3次元的水面挙動を撮影するとともに，各地点における水位変動を計測している．また，矩形体に設置された圧力トランスデューサによって矩形体に作用する波圧の時系列変化を測定している．

(2) 計算結果と実験結果の比較

各モデルの計算条件を表-1に示す．OpenFOAMでは計

図-4 段波衝突前後の水面波形

算時間間隔を0.00005sに設定した場合、計算が不安定になったため、OpenFOAMの計算時間間隔はクーラン条件を満足するように可変とした。DOLPHIN-3Dでは、気相部の計算が不安定にならないように、閉境界条件を設定した。CADMAS-SURF/3Dは気相を計算しないため、上端境界条件はDOLPHIN-3Dと同様に閉境界条件とした。

図-2と図-3に、それぞれ水位、矩形体前面に作用する圧力の時系列変化に関する各モデルの計算結果と実験結果の比較を示す。図中の黒色実線はDOLPHIN-3D、青色破線はOpenFOAM、緑色1点鎖線はCADMAS-SURF/3Dの計算値、赤色○印は実験値である。なお、P1、P3は矩形体中央部の底面からそれぞれ0.02m、0.10mの位置である。図-2から、各計算モデルは水位の実験波形のいずれも良好に再現している。図-3をみると、各時刻 $t = 0.40\text{s}$ 付近で発生する衝撃波圧とその後の圧力低下について計算結果に若干の差異はあるものの、再現性は良好である。

段波が矩形体に衝突する前後の時刻 $t = 0.40\text{s}$ 、 0.56s の水面波形を図-4に示す。図は上から順に水理模型実験、DOLPHIN-3D、OpenFOAM、CADMAS-SURF/3Dの結果である。同図から、すべての計算モデルは、水理模型実験と同様に、水柱崩壊に伴う段波の伝播および跳ね上がり表現している。しかし、CADMAS-SURF/3Dでは、

OpenFOAMと同じくVOF法により自由表面を解析しているが、段波衝突直前から衝突後にかけて水面が乱れている。一方、自由表面追跡手法にCIP法を用いたDOLPHIN-3Dは、OpenFOAMと同様に、ある程度滑らかな水面波形となっている。

4. 段波状津波と陸上構造物の衝突問題

前章では、水柱崩壊に伴う水塊と矩形体の衝突問題を取り扱う水理模型実験を対象とした数値解析を行い、各モデルの妥当性を確認した。本章では、貯水部のゲート急開に伴う段波状津波と陸上に設置された構造物の衝突問題に関する水理模型実験に各モデルを適用する。そして、水位変動、波圧、水平方向流速に関して各モデルの計算結果と実験結果を比較することで、それぞれのモデルの特徴について比較検討する。

(1) 水理模型実験

対象とした水理模型実験は有光ら(2012)が実施した実験である。有光らは、図-5に示す矩形水路(長さ18m、幅0.5m、高さ0.5m)を用いて、貯水部のゲート急開に伴う段波状津波と陸上構造物の衝突問題に関する水理模型実験を縮尺1/100で実施した。長さ8m、水位差0.15mの貯水部を有し、ゲートを急開することにより段波状津波

図-5 水理模型実験の概要図

表-2 計算条件 (直立壁)

計算領域	OpenFOAM CADMAS-SURF/3D	12.27m×0.5m×0.5m
	DOLPHIN-3D	12.27m×0.02m×1.71m
計算格子間隔		$\Delta x = 0.01\text{m}$ $\Delta y = 0.02\text{m}$ $\Delta z = 0.01\text{m}$
計算格子数	OpenFOAM CADMAS-SURF/3D	1227×25×50
	DOLPHIN-3D	1227×1×90
計算時間間隔		0.0005s
密度 ρ		1000kg/m ³
境界条件	OpenFOAM	閉境界条件 (上端) No-slip条件 (壁面部)
	DOLPHIN-3D CADMAS-SURF/3D	閉境界条件 (上端) No-slip条件 (壁面部)
構造物		0.07m×0.5m×0.3m

を発生させた。そして、津波は3.2mの海域を模した一様水深部 (0.09m) を伝播し、直立護岸を越流した後に、陸上を遡上し、構造物に到達する。構造物は直立壁 (長さ0.07m, 奥行き0.5m, 高さ0.3m)、矩形体 (長さ0.07m, 奥行き0.1m, 高さ0.3m) と形状を変化させて実験を行っている。そして、段波状津波が陸上を遡上し構造物に衝突することで発生する構造物前面の波圧, 浸水深, 水平方向流速を測定している。

(2) 計算結果と実験結果の比較

構造物に直立壁を設定した場合の計算条件を表-2に示す。直立壁背後への越流は発生しないことを水理実験から確認しており, 計算負荷軽減のために直立壁背後を計算領域から除外して x 方向を12.27mとして計算を実施した。また, DOLPHIN-3Dでは, 前章と同様に上端を閉境界としているが, 計算領域の高さを0.5mとした場合, 津波の直立壁衝突時に上端境界付近で大きな気流が発生することを予備計算から確認した。そこで, 上端境界で反射する気流の影響を減らすために鉛直方向の計算領域を $z = 0.5\text{m} \sim 1.71\text{m}$ まで拡張し, $z = 0.5\text{m}$ より上部において格子間隔を $\Delta z = 0.01\text{m}$ から1.05倍ごとに大きくし, 上端境界付近の気流の影響を低減した。さらに, 直立壁は水路幅分設けられており, 2次元的な現象であることを確認しているため, 計算負荷の大きいDOLPHIN-3Dでは奥行き方向の格子数を1として計算を実施した。

構造物前面における $z = 0.01\text{m}$ 位置での作用波圧, 浸水深, 水平方向流速の各モデルの計算結果と実験結果の時

(a) 作用波圧

(b) 浸水深

(c) 水平方向流速

図-6 直立壁前面の圧力・浸水深・流速の比較

表-3 計算条件 (矩形体)

計算領域		18.0m×0.5m×0.5m
計算格子間隔		$\Delta x = 0.01 \sim 0.05\text{m}$ $\Delta y = 0.02\text{m}$ $\Delta z = 0.01\text{m}$
計算格子数		1419×25×50
計算時間間隔		0.0005s
密度 ρ		1000kg/m ³
境界条件	OpenFOAM	閉境界条件 (上端) No-slip条件 (壁面部)
	DOLPHIN-3D CADMAS-SURF/3D	閉境界条件 (上端) No-slip条件 (壁面部)
構造物		0.07m×0.1m×0.3m

系列変化を図-6に示す。図中の黒色実線はDOLPHIN-3D, 青色破線はOpenFOAM, 緑色1点鎖線はCADMAS-SURF/3Dの計算値, 赤色○印は実験値である。同図 (a), (b) から, OpenFOAMは, 段波が直立壁に衝突する時刻 $t = 0\text{s}$ における構造物前面の浸水深と作用波圧の瞬間的な増加を再現できていないことがわかる。これは, 紙面の制約上, ここでは図示しないが, 川崎ら (2013) が指摘したように, OpenFOAMのVOF法で使用されている界面の数値拡散抑制パラメータの影響であることを確認して

図-7 矩形体前面の圧力・浸水深・流速の比較

いる。図-6 (c) から、多相流モデルの DOLPHIN-3D と OpenFOAM では、気相の影響で逆向きの流速の発生が認められる。

次に、3次元的水理現象を伴う矩形体を設置した場合について比較検討を行う。計算条件を表-3 に示す。矩形体は幅が 0.1m であり、背後へ段波状津波が回り込むため、直立壁の場合とは異なり、実験模型と同等の計算領域をすべてのモデルで設定した。計算格子間隔は矩形体背後の陸上では粗く設定し、矩形体に近づくにつれ $\Delta x = 0.05\text{m}$ から徐々に細かくし、矩形体設置位置から海域にかけては $\Delta x = 0.01\text{m}$ とした。

図-7 は、矩形体前面における $z = 0.01\text{m}$ 位置での作用波圧、浸水深、水平方向流速に関する各モデルの計算結果と実験結果の比較である。図中の黒色実線は DOLPHIN-3D、青色破線は OpenFOAM、緑色点鎖線は CADMAS-SURF/3D の計算値、赤色○印は実験値を示す。同図 (a)、(b) から、直立壁の場合と同様に、OpenFOAM は、矩形体への段波衝突時における構造物前面の浸水深と作用波圧の瞬間的な増加を再現できていない。DOLPHIN-3D、CADMAS-SURF/3D では、衝撃波圧を若干過小評価して

いるものの、実験結果を比較的良好に再現している。図-7 (c) に示す水平方向流速は、各モデルで異なる傾向がみられる。実験値はプロペラ流速計で計測されているため、 x 方向以外の流れの成分も含まれている。このことを考慮すると、津波が衝突した後の矩形体前面では、 x 方向流速はほぼ 0 となることが予想され、その傾向を捉えているのは DOLPHIN-3D であるといえる。

5. 結論

本研究では、オイラー表記に基づく 1 つの自由表面単相流モデル CADMAS-SURF/3D、2 つの多相流モデル DOLPHIN-3D、OpenFOAM を対象とし、水理模型実験との比較検証を行った。その結果、どのモデルも概ね高い再現性を有することを検証した。また、本計算結果においては、単相流モデル CADMAS-SURF/3D で水面形に乱れが少し生じることがわかった。異なる自由表面追跡手法をもつ多相流モデルの DOLPHIN-3D と OpenFOAM の比較から、DOLPHIN-3D の再現性が若干高いものの、両モデルは良好に自由表面を表現できることが確認された。

参考文献

- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012)：平面 2 次元津波計算結果を用いた津波波圧算定方法の提案，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, pp. I_781-I_785.
- 川崎浩司・菊 雅美 (2012)：不規則波越波計算による道路護岸周辺の越波対策工法の選定に関する研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 68, No. 1, pp. 1-11.
- 川崎浩司・菊 雅美・眞栄里和也・米須俊彦・嶋田 宏・五味久昭・芝多哲郎・板橋直樹 (2007)：数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 951-955.
- 川崎浩司・袴田充哉 (2007)：3 次元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.
- 川崎浩司・松浦 翔・坂谷太基 (2013)：3 次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 69, No. 2 (印刷中)。
- 川崎浩司・松野哲弥・Han Dinh Ut・福本 正 (2011)：直立護岸前面に設置された越波低減浮体パネルの作用圧力に関する多相流数値解析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 67, No. 2, pp. I_711-I_715.
- 川崎浩司・Han Dinh Ut・松野哲弥・福本 正 (2011)：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，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 67, No. 4, pp. I_142-I_147.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001)：数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー No. 12, 457p.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2010)：CADMAS-SURF/3D 数値波動水路の研究・開発，沿岸技術ライブラリー No. 39, 235p.
- Kleefsman K.M.T., Fekken G., Veldman A.E.P., Iwanowski B. and Buchner B. (2005)：A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems, Journal of Computational Physics, Vol. 206, pp. 363-393.