

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

川崎 浩司¹・松浦 翔²・坂谷 太基³

¹正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: kawasaki@nagoya-u.jp

²学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: matsuura.sho@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: taiki_sakatani@yahoo.co.jp

OpenFOAMはオープンソースの3次元数値流体力学ツールとして注目を集めている。しかし、海岸・海洋工学分野におけるOpenFOAMの妥当性・有用性については十分に吟味されていない。そこで、本研究では、同モデルを水柱崩壊問題と段波一構造物衝突問題に適用し、精度検証を行った。既往の実験結果との比較より、同モデルが高い再現性を有していることが確認された。加えて、OpenFOAMで用いられているVOF法に基づく自由表面解析手法の妥当性について検討した。その結果、自由表面が時空間的に大きく変化する水理現象では、界面の数値拡散抑制を目的としたパラメータである c_α が計算結果に大きな影響を与えることがわかり、 c_α の設定には十分な留意が必要であることを明示した。

Key Words : OpenFOAM, VOF method, free surface analysis method, open source software

1. はじめに

数値流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) は数値スキームの高精度化と計算機の性能向上とともに発展し、現在では工学において重要な研究分野の一つになっている。近年では、オープンソースソフトウェアの台頭が著しく、商用ソフトウェアに匹敵する機能・品質を備えたものもある。オープンソースソフトウェアは、ソースコードが公開されており、ライセンス料が不要であるのが特徴である。また、常にプログラムの中身を確認できるため、利用にあたって不確実な要素を低減でき、必要に応じてコードを書き換えることができる。

OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) は、2004年からGPL (GNU General Public License) のもとでソースコードが公開されている流体解析モデルである¹⁾。多相流や燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有しており、前処理や後処理のためのアプリケーションも充実している。コードはC++で記述されたオブジェクト群で構成されており、一定の知識と技術を有した者であれば容易にコードを変更できる。並列計算にも対応しており、その完成度と拡張性の高さから注目を集めている。近年、OpenFOAMは海岸・海洋工学分野の諸問題に適用

されつつある。特に、ファムら²⁾による大規模3次元津波解析や、野中ら³⁾による津波一橋梁衝突解析など、津波解析に適用する研究が増えている。OpenFOAMの特徴として、多相流解析における自由表面解析手法の取り扱い方が挙げられる。しかし、同手法については、適切な設定方法が示されておらず、計算結果に及ぼす影響についてもほとんど議論されていない。

そこで、本研究では、水柱崩壊問題と段波一構造物衝突問題にOpenFOAMを適用し、同モデルの精度検証を行うとともに、OpenFOAMにおける自由表面解析手法の妥当性を検討する。

2. OpenFOAMの概要

本研究では、OpenFOAMのうち、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、以下に示す連続式(1)と非圧縮性流体のNavier-Stokes方程式(2)である。

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

ここで、 ∇ は3次元領域におけるベクトル微分演算子、 U は流速ベクトル、 ρ は密度、 p^* は疑似動圧、 τ は粘性応力テンソル、 g は重力加速度ベクトル、 f_s は表面張力に相当する体積力である。

同ソルバでは、上式を有限体積法によって離散化し、PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 法を用いて流速と圧力を計算している。気液界面の追跡には、VOF (Volume Of Fluid) 法を用いている。一般的なVOF法の移流方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U_{\text{water}} \alpha = 0 \quad (3)$$

ここで、 α は流体の体積率を表すVOF値 ($0 \leq \alpha \leq 1$)、 U_{water} は液相の流速である。

多くの流体解析モデルでは、式(3)を解く際に、 $U_{\text{water}} = U$ (気液相の平均流速) と仮定している。しかし、これにより数値拡散が生じ、気液界面が不鮮明になる問題が起こる可能性がある。そこで、Rusche⁴⁾とWeller⁵⁾は、流速 U 、気液の相対流速 U_c をそれぞれ $U = \alpha U_{\text{water}} + (1 - \alpha) U_{\text{air}}$ 、 $U_c = U_{\text{water}} - U_{\text{air}}$ (U_{air} は気相の流速) と定義し、式(3)から式(4)を導いた。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha + \nabla \cdot U_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (4)$$

ただし、 U_c は直接求められないため、平均流速を用いた式(5)で定義されている。

$$|U_c| = \min[c_\alpha |U|, \max(|U|)] \quad (5)$$

ここで、 c_α はユーザーが設定する変数である。

式(4)では、気液界面において左辺第3項が修正項として作用し、VOF値の移流量を制御している。 $c_\alpha = 0$ の場合、式(4)は式(3)と同じ形になり、従来のVOF法と同様の取り扱いになる。OpenFOAMでは、VOFの移流方程式として式(4)を採用しており、デフォルト値として $c_\alpha = 1.0$ が与えられている。しかし、計算結果に及ぼす c_α の影響についてはこれまでほとんど議論されていない。

3. 計算条件

(1) 水柱崩壊問題

図-1に、2次元水柱崩壊問題の計算領域を示す。計算領域の左側に貯水部 (長さ1.50m, 高さ3.00m) を設け、計算開始と同時に貯水部を開放する。

計算条件は表-1に示すとおりである。計算時間間隔はステップごとに更新され、クーラン数が0.5を超えないように自動調整される。本研究では、式(5)における c_α の値として、0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0の5種類を用いて数値解析を行い、比較検討した。

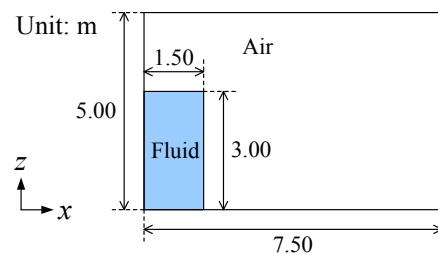


図-1 2次元水柱崩壊問題の計算領域

表-1 2次元水柱崩壊問題の計算条件

計算格子間隔	$\Delta x = \Delta z = 0.02 \text{ m}$	
総格子数	93,750	
計算時間間隔	自動調整 (最大クーラン数 0.5)	
動粘性係数 ν	空気	$1.59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
	水	$1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
密度 ρ	空気	1 kg/m^3
	水	1000 kg/m^3
乱流モデル	使用しない	
境界条件	壁面	no-slip 条件
	上面	開放条件
計算ケース	$c_\alpha = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$ (5 ケース)	

(2) 段波一構造物衝突問題

図-2に、Kleefsman et al.⁶⁾およびIssa・Violeau⁷⁾による3次元段波一構造物衝突実験の模式図を示す。図(a)に示す矩形水槽 (長さ3.22m, 幅1.00m, 高さ1.00m) の右端から1.228mの位置にゲートが設置してあり、高さ0.55mの貯水部を設けている。実験では、ゲートを急開することで段波を発生させている。貯水部の左側には、図(b)に示す構造物 (長さ0.16m, 幅0.40m, 高さ0.16m) が固定してあり、前面に圧力計 (P1~P4) が設置してある。また、水槽内には水位計 (H1~H4) を設けている。同図には、本研究で数値計算との比較に用いたP1, P3, H2, H4地点のみを示す。

その他の計算条件は、表-2に示すとおりである。乱流モデルは、OpenFOAMに備わっているライブラリから選択可能であり、本計算では動的Smagorinskyモデルを用いた。 c_α の値については、水柱崩壊問題と同じく、 $c_\alpha = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$ の5種類と変化させた。

4. 計算結果および考察

(1) 水柱崩壊問題

図-3に、2次元水柱崩壊に伴う液相先端位置の時間変化を示す。なお、右壁に衝突する前までの時間とし、図中には、Martin・Moyce⁸⁾による実験結果も示している。同図より、計算値は実験値をやや過大評価しているが、

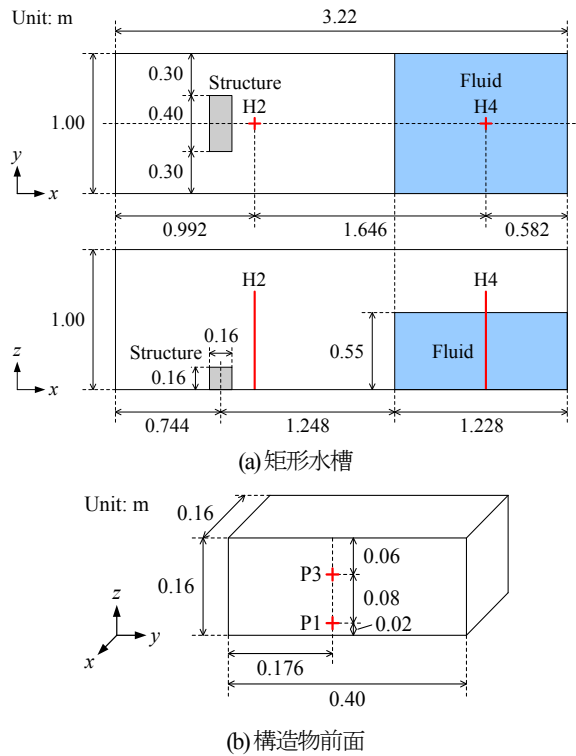


図-2 3次元段波一構造物衝突問題の模式図

表-2 3次元段波一構造物衝突問題の計算条件

計算格子間隔	$\Delta x = 0.02 \text{ m}$ $\Delta y = 0.025 \text{ m}$ $\Delta z = 0.01 \text{ m}$
総格子数	641,952
計算時間間隔	自動調整 (最大クーラン数 0.5)
動粘性係数 ν	表-1 に同じ
密度 ρ	表-1 に同じ
乱流モデル	動的 Smagorinsky モデル
境界条件	表-1 に同じ
計算ケース	$c_\alpha = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$ (5 ケース)

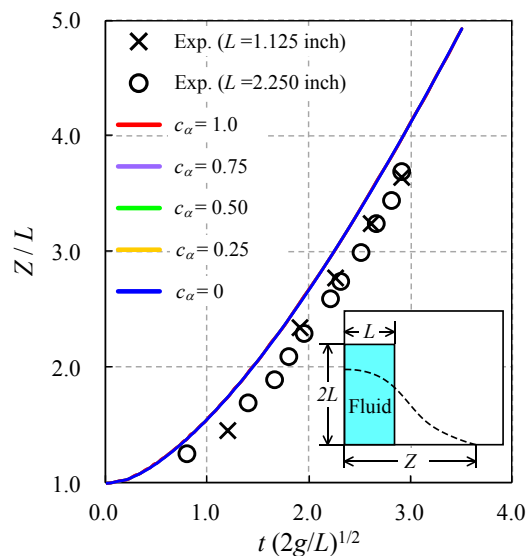


図-3 水柱崩壊による液相先端位置の時間変化

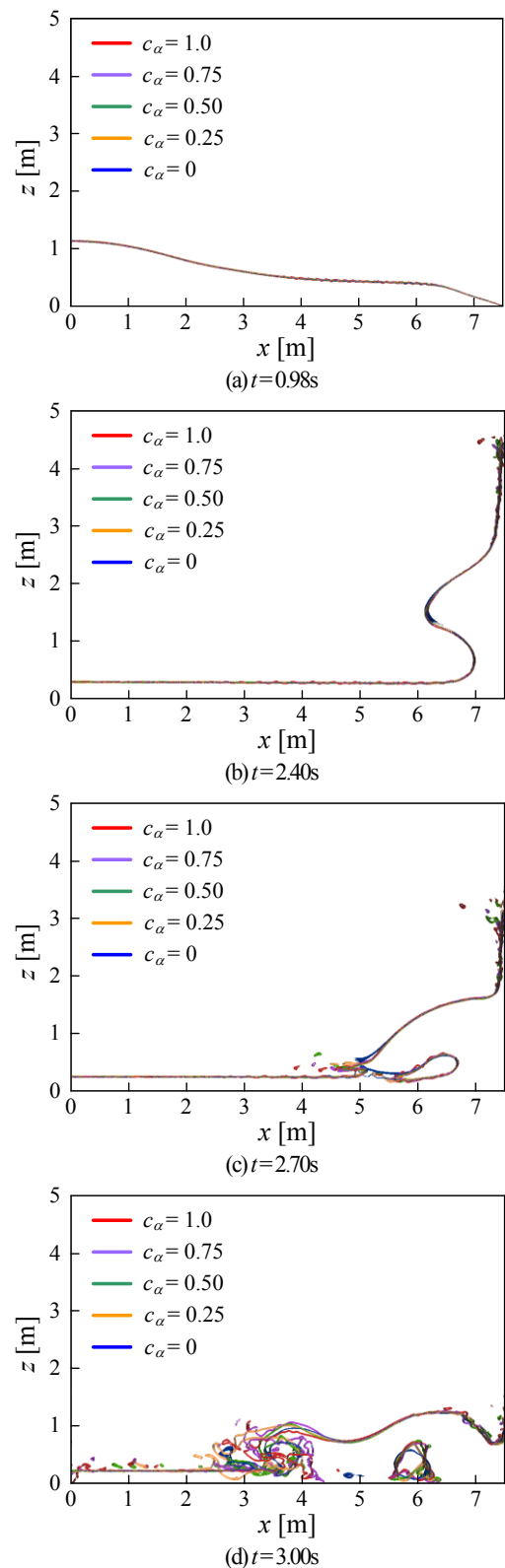
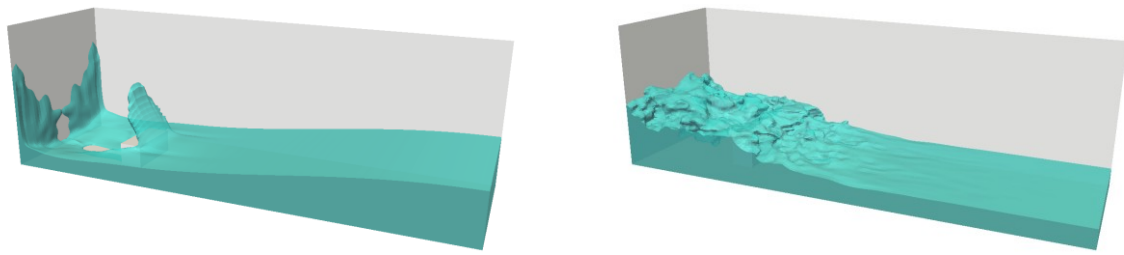


図-4 水柱崩壊による自由水面の動的挙動

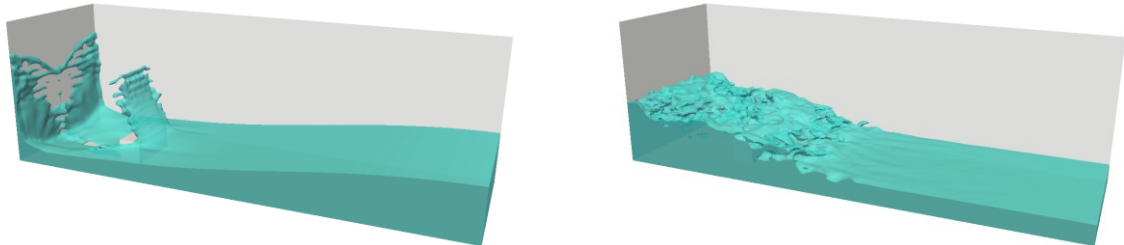
全体の傾向を概ね良好に再現している。この場合においては、 c_α の値による違いはほとんどみられない。

図-4に、水柱崩壊した水塊が右壁に衝突した以降の自由表面 ($\alpha = 0.5$) の動的挙動を示す。水塊が衝突した直後の図(a)では、 c_α による水面形状に大きな違いはみられない。ただし、 $c_\alpha=1$ の場合では水塊先端付近の水面に小



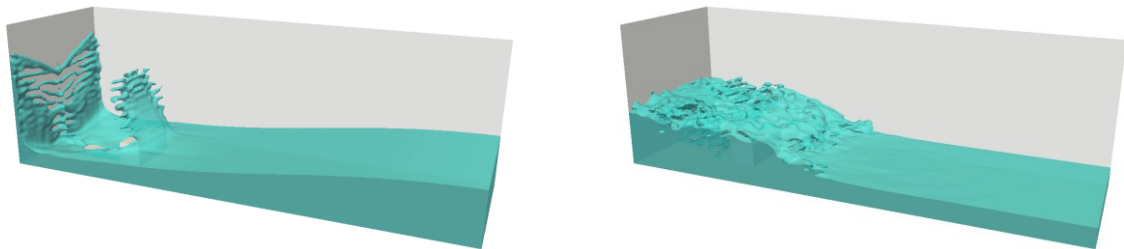
(a) $t=0.85s$ (b) $t=2.00s$

図-5 3次元段波—構造物衝突問題の計算結果 ($c_\alpha=0$)



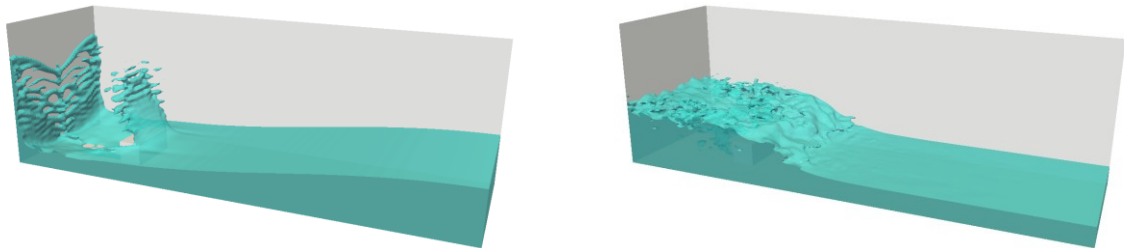
(a) $t=0.85s$ (b) $t=2.00s$

図-6 3次元段波—構造物衝突問題の計算結果 ($c_\alpha=0.25$)



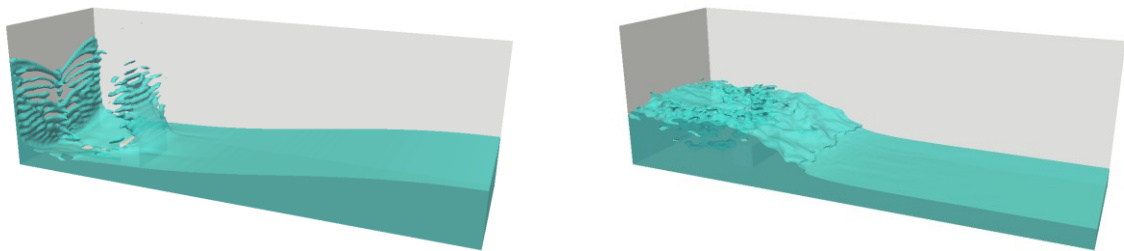
(a) $t=0.85s$ (b) $t=2.00s$

図-7 3次元段波—構造物衝突問題の計算結果 ($c_\alpha=0.50$)



(a) $t=0.85s$ (b) $t=2.00s$

図-8 3次元段波—構造物衝突問題の計算結果 ($c_\alpha=0.75$)

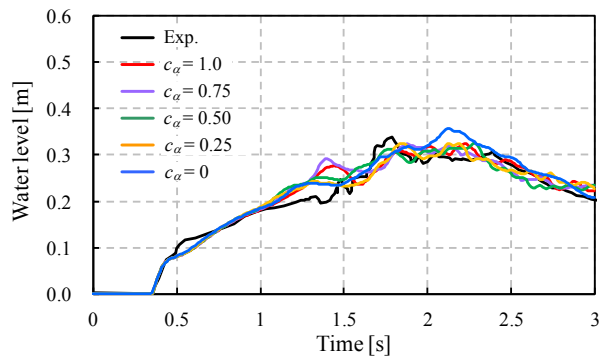


(a) $t=0.85s$ (b) $t=2.00s$

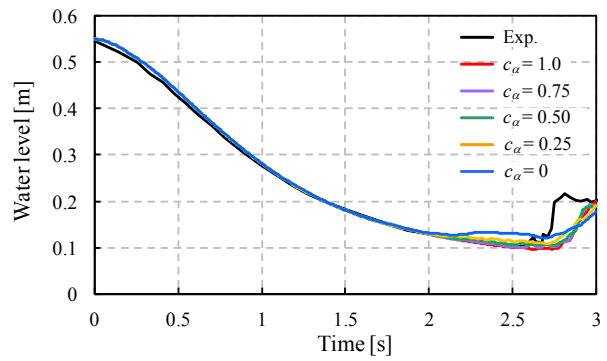
図-9 3次元段波—構造物衝突問題の計算結果 ($c_\alpha=1.0$)

さな凹凸が生じている。水塊が右壁に衝突して跳ね上がった後の同図(b)では、上端部で飛沫が生じ、 c_α の値によって水面の乱れ方が異なっている。同図(c)では、跳ね上がった水が落下し、下の水面に衝突した部分($x=5m$ 付近)で違いが顕著である。特に、 $c_\alpha=0$ では他の場合と

異なり、表面の凹凸や飛沫はほとんどみられない。同図(d)では、落下した水塊の先端部分($x=3\sim 4m$ 付近)が渦を巻きながら大きく乱れており、 c_α の値によって水面形状が大きく異なっている。水面の凹凸や飛沫も多くみられ、 $c_\alpha=1$ の場合では水位の変動が左壁付近でもみられる。

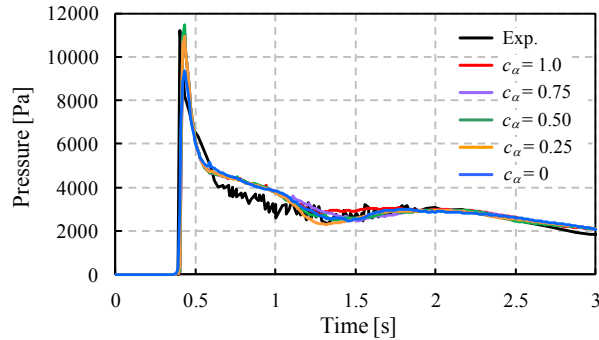


(a) H2 地点

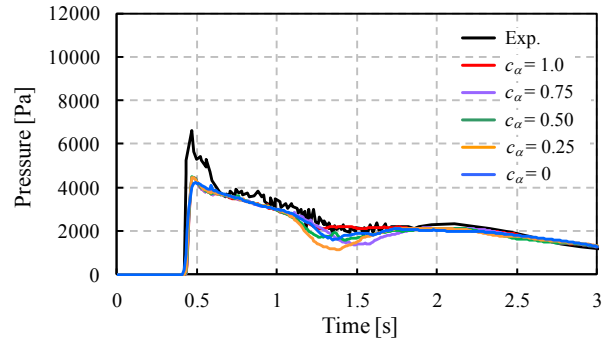


(b) H4 地点

図-10 矩形水槽内における水位の時間変化



(a) P1 地点



(b) P3 地点

図-11 構造物前面における圧力の時間変化

(2) 段波一構造物衝突問題

図-5～図-9に、3次元段波一構造物衝突問題の計算結果を c_α の値別に示す。同図から、図-4と同様に、 c_α の値によって水面形状が異なっていることがわかる。特に、図-5(a)～図-9(a)では、構造物衝突後に発生する飛沫や壁への遡上で大きな違いがみられる。図-5(a)に示す $c_\alpha=0$ では、水面形状が全体的に滑らかであるのに対して、図-6(a)～図-9(a)では、飛沫や遡上する水塊に縞模様がみられる。また、 c_α の値が大きくなるにつれて、縞模様が鮮明になっていることが確認される。跳ね上がった水が落下した後の図-5(b)～図-9(b)では、図-4(d)と同様に、水面が大きく乱れており、 c_α の値によって水面形状に違いがみられる。

図-10に、H2、H4地点における水位の時間変化を示す。H2地点では、 $t=0.4$ s付近の立ち上がり時刻は実験結果とよく一致していることがわかる。その後、 $t=1.0$ s付近まではどの場合も実験結果を良好に再現している。衝突した水塊が跳ね返る $t=1.0$ s以降では、どの場合も水位が乱れており、 c_α の値による差がみられるが、全体的な傾向は一致している。H4地点では、計算開始から貯水部の水位が徐々に低下していく様子を良好に再現している。 $t=2.5$ s以降で乱れが大きくなっているのは、左壁と構造物に衝突した水塊が反射してきたためである。この部分では、計算結果が実験結果を過小評価しているが、 c_α の値による差は比較的少ない。また、 $c_\alpha=0$ では反射

してくる水塊の到達が他の場合よりも若干早くなっているのがわかる。

図-11に、構造物前面のP1、P3地点における圧力の時間変化を示す。P1地点では、図-10(a)と同様に、立ち上がり時刻は実験結果とよく一致している。しかし、ピークの値については、 $c_\alpha=0$ の場合の計算値が実験値を過小評価している。他の場合については、ピークの値もほぼ一致している。その後は、 $t=1.0\sim 1.5$ s付近で c_α の値による差はあるものの、全体的な傾向として計算結果は実験結果を良好に再現している。P3地点では、立ち上がり時刻は一致しているが、どの場合も実験結果のピーク値を3割ほど過小評価している。その後は、P1地点と同様に、 $t=1.0\sim 1.5$ s付近で変動があるが、実験結果と同様の傾向が確認できる。

以上より、OpenFOAMは複雑な3次元水理現象に対して良好な再現性を有しているといえる。ただし、段波が壁面に衝突したり、跳ね返った水塊が落下するような状況では、 c_α の値によって水面挙動や構造物への作用波圧に違いが生じている。本研究で用いたinterFoamソルバでは、式(4)を解く際、修正項に用いられる U_c は式(5)から各ステップごとに計算される。したがって、流速が時空間的に大きく変化する場においては、式(4)の左辺第3項も大きく変動することになる。その結果、気液界面でのVOF値の移流量に影響を及ぼすと考えられる。修正項の影響が大きい $c_\alpha=1$ の場合では、水面に小さな凹凸がみら

れる一方で、修正項を用いない $c_\alpha=0$ の場合では、水面形状が滑らかとなることから、 c_α が水面挙動に与える影響は大きいと判断される。本研究で対象とした水理問題に対しては、図-3～図-11の計算結果から、 c_α の値は $0 < c_\alpha < 0.5$ の範囲が妥当であると考えられる。しかしながら、本検討は限られた水理現象に対するOpenFOAMの妥当性を検証したに過ぎないため、今後は、多くの諸問題にOpenFOAMを適用することにより、その有用性についてさらに検証する必要がある。

5. おわりに

本研究では、3次元数値流体力学ツールOpenFOAMを2次元水柱崩壊問題と3次元段波－構造物衝突問題に適用し、同モデルの精度検証を行った。さらに、同モデルが使用しているVOF法に基づく自由表面解析手法の妥当性について検討した。その結果、得られた主要な結論を以下にまとめて示す。

- (1) OpenFOAM は複雑な水理現象に対して高い再現性を有しており、段波－構造物衝突問題のような海岸・海洋工学分野の問題に対しても適用可能であることを確認した。
- (2) OpenFOAM で用いられている VOF 法に基づく自由表面解析手法の妥当性を、既往の水理模型実験との比較から検証した。流れが時空間的に大きく変化する場においては、界面の数値拡散の抑制を目的としたパラメータである c_α の値によって自由表面の挙動や構造物への作用波圧に違いが生じることが判明した。本研究で対象とした水理問題に対しては、 $0 < c_\alpha < 0.5$ の範囲が妥当であると考えられる。
- (3) OpenFOAM を用いる際には、 c_α の設定値に十分に留意する必要があることを明示した。

今後、数値スキームや乱流モデルの違いによる影響も含めて、OpenFOAM の妥当性・有効性を検証するとともに、海岸・海洋工学分野における諸問題に対するOpenFOAMの適用性について検討する予定である。

参考文献

- 1) OpenFOAM Foundation : OpenFOAM User Guide, <http://www.openfoam.org/docs/user/>, 参照 2013-03-18.
- 2) ファムパンブック, 長谷部雅伸, 高橋郁夫: VOF法を用いた3次元津波解析に関する研究, 土木学会論文誌B2(海岸工学), Vol. 68, pp.71-75, 2012.
- 3) 野中哲也, 本橋英樹, 原田隆典, 坂本佳子, 菅付絃一, 宇佐美勉: 津波波源から橋梁までの全体系津波再現解析, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.25-32, 2012.
- 4) Rusche, H. : Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, PHD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2002.
- 5) Weller, H. G. : Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations, *Technical Report TR/HGW/02*, Nabla Ltd., 2002.
- 6) Kleefsman, K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B. and Buchner, B. : A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems, *Journal of Computational Physics*, Vol.206, Issue 1, pp.363-393, 2005.
- 7) Issa, R. and Violeau, D. : Test-case 2, 3D dam breaking, Release 1.1, ERCOFTAC, SPH European Research Interest Community SIG, EDF, Laboratoire National d'hydraulique et Environnement, 2006.
- 8) Martin, J. C. and Moyce, W. J. : An experimental study of the collapse of a liquid column on a rigid horizontal plane, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol.244, No.882, pp.312-324, 1952.

VALIDATION OF FREE SURFACE ANALYSIS METHOD IN THREE-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TOOL “OpenFOAM”

Koji KAWASAKI, Sho MATSUURA and Taiki SAKATANI

In this study, the numerical simulations on two-dimensional dam break and three-dimensional collision between bore and a structure were conducted using OpenFOAM, which is one of the three-dimensional computational fluid dynamics tools. The validity of OpenFOAM was verified by comparing the numerical and experimental results. Furthermore, the validity of free surface analysis method based on the VOF method was examined in terms of the dynamic behavior of free surface. The numerical results revealed that OpenFOAM has good calculation accuracy for some hydraulic phenomena related to coastal and ocean engineering. It was also found that the parameter c_α , which indicates the control parameter on numerical diffusion, influences the dynamic behavior of free surface when the flow field largely changes.