

OpenFOAM を用いたダムブレイク解析とその精度検証

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○松浦 翔
 名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 森 貴寛
 名古屋大学工学部 学生会員 坂谷 太基
 名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 川崎 浩司

1. はじめに

数値流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) は工学において重要な分野の一つであり、現在、様々な用途や数値スキームに対応した CFD 解析コードが開発されている。OpenFOAM^(※) (Open source Field Operation And Manipulation) は有限体積法を用いた CFD 解析コードであり、商用での開発・販売を経て 2004 年にオープンソース化された。解析にあたり、ユーザーは多相流や燃焼、電磁流体などの用途に応じてソルバを選択することができる。前処理および後処理のためのアプリケーションも充実しており、並列計算にも対応している。OpenFOAM のコードは C++ で記述されたオブジェクト群で構成されており、ユーザーが容易にソルバやアプリケーションを改良できるのが特徴である。コード全体の構造も含めた完成度や拡張性の高さから、近年、注目を集めており、海外ではユーザーによる拡張版の開発も行われている。

本稿では、OpenFOAM によるダムブレイク解析を行い、その計算精度を検証する。さらに、乱流モデルの違いが及ぼす計算結果への影響と並列計算による計算効率についても検討する。

本稿では、OpenFOAM によるダムブレイク解析を行い、その計算精度を検証する。さらに、乱流モデルの違いが及ぼす計算結果への影響と並列計算による計算効率についても検討する。

2. ダムブレイク解析の概要

Kleefsman et al. (2005) および Issa・Violeau (2006) が実施したダムブレイクの数理模型実験を対象に再現計算を行った。計算領域を図-1 に示す。実験では、ゲートを急開して段波を発生させ、水塊をボックス部に衝突させている。このとき、図-1 の H2, H4 で水位を、図-2 の P1, P3 で圧力を測定している。本研究では、OpenFOAM 内の標準ソルバの一つである interFoam を用いて解析した。interFoam は非圧縮・不混和流体の 2 相流を対象としたソルバであり、VOF (Volume Of Fluid) 法によって自由表面の位置を追跡している。乱流モデルは既存のライブラリから選択することができる。今回は、laminar (乱流モデルを使用しない設定)、 $k-\epsilon$ モデル、Smagorinsky モデル、dynamic Smagorinsky モデルの 4 つを用いた。Smagorinsky モデルに関しては並列計算を行い、並列なしと 4 並列で計算時間を比較した。計算条件を

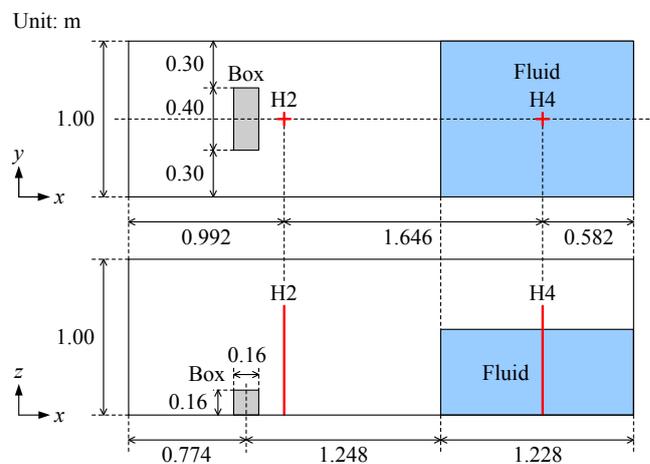


図-1 計算領域

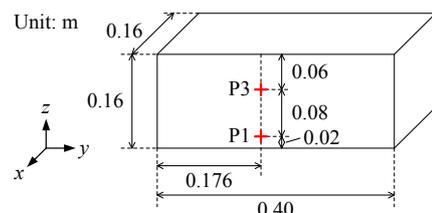


図-2 ボックス部の拡大図

表-1 計算条件

ソルバ	interFoam
計算格子間隔	x 方向 : 0.01~0.02 m y 方向 : 0.025m z 方向 : 0.01 m
総メッシュ数	671,904
計算時間間隔	0.001 s (初期設定値. この値は計算中に自動調整される)
計算時間	3.0 s
出力間隔	0.01 s
乱流モデル	laminar (乱流モデル不使用) $k-\epsilon$ モデル Smagorinsky モデル dynamic Smagorinsky モデル
並列計算	並列なし, 4 並列 (Smagorinsky モデルのみ)

表-1 にまとめて示す。

3. 計算結果とその考察

ダムブレイクの計算結果のスナップショットを図-3 に示す。同図は、OpenFOAM に付属のオープンソース可視化ソフト ParaView を用いて描画したものである。このように、ユーザーは全行程を OpenFOAM のパッケージ内で行うことができる。同図より、ボックス衝突時の水しぶき、壁面への跳ね上がりを表現できていることがわかる。

図-4 に、P1 地点における圧力の時間変化を示す。時刻 $t = 0.4s$ 付近における圧力ピークに注目すると、立ちあがりの時刻はどの乱流モデルでもほぼ一致している。ピークの値については、 $k-\epsilon$ モデルと dynamic Smagorinsky モデルが実験結果をよく再現できており、他の 2 モデルは過小評価している。特に Smagorinsky モデルは実験値の 6 割程度である。これは、同モデルの渦粘性に関するモデル係数が一定値であり、流れの状態が時空間的に大きく遷移する現象に適さないためと考えられる。

図-5 に、H2 地点での水位の時間変化を示す。同図より、立ちあがりの時刻は Smagorinsky モデルを除いてほぼ一致していることが確認できる。 $t = 1.5s$ 以降をみると、多少のばらつきはあるものの、乱流モデルを用いることで実験結果に近づいている。P3, H4 地点の結果については紙面の都合上割愛するが、上記と同様の傾向を確認している。

表-2 に、並列計算に要した時間を示す。並列化を行うことにより、計算時間が 2 割ほど短縮されている。しかし、並列計算ではデータを再構築する必要があり、この時間は計算規模と出力ステップ数に依存する。本計算では 300 ステップ（計算時間 3.0s / 出力間隔 0.01s）であり、再構築に 30 分程度かかっている。このように、並列計算を行う際には、再構築も含めた総合的な計算効率を考慮する必要がある。

4. おわりに

本稿では、オープンソース CFD 解析コード OpenFOAM を使用し、ダムブレイク解析を行った。その結果、同モデルの妥当性と実用性を示した。また、時空間的に大きく変化する自由表面流においては、適切な乱流モデルを選択する必要があることを確認した。さらに、並列化による計算効率についても検討した。今後は、OpenFOAM を他の事例に適用するとともに、ソルバの改良や他のモデルとの結合を行う予定である。

参考文献

[1] K.M.T. Kleefsman, G. Fekken, A.E.P. Veldman, B. Iwanowski, B. Buchner (2005) : Journal of Computational Physics, Vol. 206, pp. 363–393. [2] R. Issa, D.Violeau (2006) : Test-case 2, ERCOFTAC, SPH European Research Interest Community SIG, EDF, Laboratoire National d'hydraulique et Environnement.

※OpenFOAM は Silicon Graphics International Corp. の登録商標である。



図-3 解析結果のスナップショット (dynamic Smagorinsky モデル, $t = 0.80s$)

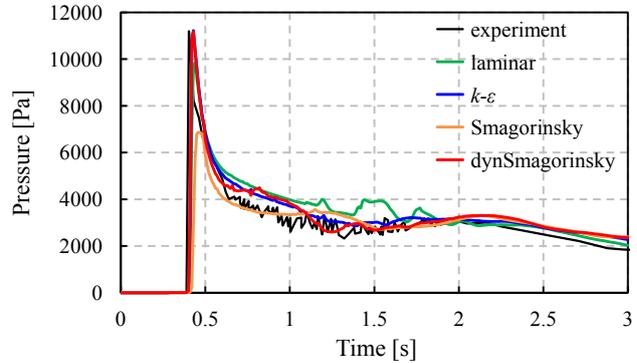


図-4 P1 地点における圧力の時間変化

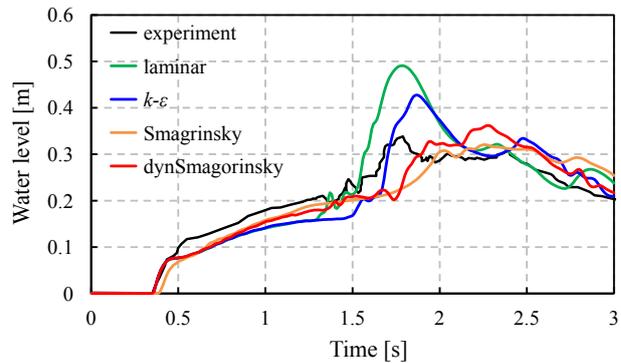


図-5 H2 地点における水位の時間変化

表-2 並列数による計算時間の比較 (Smagorinsky モデル)

並列数	計算時間 [hour]
1 (並列なし)	6.1
4	4.7 (+0.5)

※Intel Core i7-2600CPU (3.40GHz) ×4 を使用。
※カッコ内は並列データの再構築に要した時間。

※OpenFOAM は Silicon Graphics International Corp. の登録商標である。