

毛細管現象例題による OpenFOAM (interFoam 系ソルバ) の検証

稲田翔也¹ 中川慎二^{1†} 西田樹生¹ 清家美帆¹

¹ 富山県立大学

Validation of OpenFOAM (interFoam and its derivative) using a capillary-rise tutorial

Shoya INADA* Shinji NAKAGAWA** Tatsuki NISHIDA* Miho SEIKE*

*Toyama Prefectural University

Abstract

Using the capillary phenomenon simulation which is one of the standard examples of OpenFOAM, we carried out the validation of interFoam type solver. The relatively new solver, interIsoFoam of OpenFOAM v1806, was also tested. Results with interFoam of OpenFOAM 5 and v1806 shows artificial continuous oscillation. OpenFOAM 6 solves this problem and the commit caused this difference has been identified. The oscillation ceases in the result with interIsoFoam.

Keywords: OpenFOAM, interFoam, capillary rise, validation

1. 緒言

OpenFOAM では、気液 2 相流に対応したソルバとして interFoam が提供されている。船舶に関するシミュレーション[1]などに幅広く応用されている。その性能の検証も報告[2]されている。

OpenFOAM6 では、OpenFOAM5 以前のバージョンと解析結果が異なるという報告[3]があった。複数の利用者が同様の結果を得ているが、その原因は明らかとされていない。

そこで本研究では、OpenFOAM 標準例題の中から、表面張力が駆動する流体现象の例題として毛細管現象例題 (capillaryRise) を利用し、OpenFOAM における interFoam 系ソルバの検証を行う。OpenFOAM のバージョンやソルバによる結果の違いを明らかにする。OpenFOAM のソースコード改変履歴をたどり、結果の大きな変化を生み出した要因も明らかにする。

2. 計算方法

Table 1 に、OpenFOAM のバージョンとリリース日をまとめる。本報告では、OpenFOAM5, OpenFOAM6, および、OpenFOAM v1806 を使用する。表中の Foundation は OpenFOAM Foundation により公開されたバージョン、OpenCFD は OpenCFD 社により公開されたバージョンであることを示す。

Table 1 OpenFOAM versions and release date

date	Foundation	OpenCFD
2015/11/04	version-3.0.0	
2016/06/28	version-4.0	
2016/06/30		v1606+ (Foundation code 2016/04/21)
2016/12/23		v1612+ (Foundation code 2016/12/09)
2017/06/30		v1706 (Foundation code 2017/04/26)
2017/07/25	version-5.0	
2017/12/31		v1712
2018/06/29		v1806
2018/07/10	version-6	

[†] E-mail address of corresponding author: opencae.toyama@gmail.com

OpenFOAM に付属する標準例題 `capillaryRise` を実行する．この例題の計算対象を Fig.1 に示す．計算領域の大きさは $1\text{mm} \times 20\text{mm}$ の長方形であり，平行平板間のみが解析対象である．計算領域の底面は，圧力境界条件として大気圧を与えることで，周囲液面の水位と同じ位置になると考えられる．なお，解析は二次元計算で行い，奥行きは考えない．

メッシュサイズは $0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm} \times 1\text{mm}$ で，計算領域全体ですべて同じメッシュサイズとなっている．二次元計算を行う場合，Z 軸方向のメッシュの大きさは，解析結果に影響しないため， 1mm としている．

`interFoam` での計算では，一部の設定を除き初期状態（OpenFOAM に付属した状態）から変更しない．変更した点は，計算終了時刻(0.5 秒から 5 秒)および，ポスト処理のための結果出力である．

ただし，OpenFOAM v1806 の `interIsoFoam` ソルバには `capillaryRise` 例題が存在しないため，`interFoam` 用の `capillaryRise` 例題に，`interIsoFoam` の実行に必要な設定を追加した．

計算領域全体で，初期条件として，速度を 0m/s ，静水圧を含まない圧力を 0pa とした．境界条件は，領域上面では，空気の出入りの条件を与え，領域下面では，水の出入りの条件を与える．領域の左右の面は固体壁とし，その接触角を常に 45° で与える．

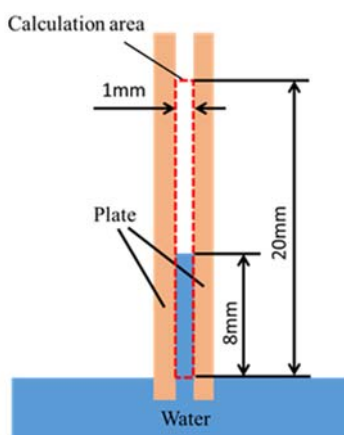


Fig. 1 Simulation object: water between two parallel plates vertically placed in the water bath. Rectangular region marked with a red line is the domain of simulation.

毛細管現象では，液面上昇値を理論的に求めることができる．理論上の液面上昇値は，表面張力を σ ，接触角を θ ，密度を ρ ，重力加速度を g ，平板間距離を d とすると，次式によって求められる．

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1)$$

理論値との比較のため，計算結果から空間平均液面上昇値を算出した．計算領域内の水の体積を積分し，液中に底面積で割ることで，液面上昇値とした．この計算には，OpenFOAM の `function` 機能の 1 つである `volIntegrate` 関数を利用した．

3. 結果と考察

Fig.2 に `interFoam` による解析結果を示す．横軸は時間[s]，縦軸は平行平板間の水位[mm]である．

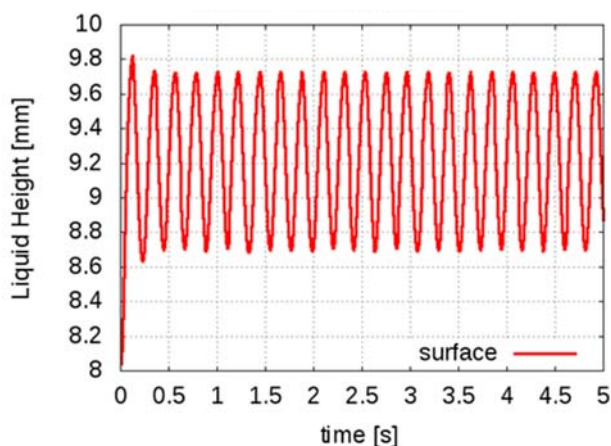
Fig.2(a)の OpenFOAM 5 の場合，時刻 0 秒から 5 秒までの間，振幅 1mm 程度の振動が継続する．なお，平行平板間の水位は計算実行時に液体体積を積分し平均水位とした．時刻 0.3 秒からの水位の最大値と最小値の平均を液面上昇値とすると，液面上昇値は 9.22mm で，理論値に比べ 0.68mm 低い．

Fig.2(b)の OpenFOAM 6 では，初め，液面は振動したが徐々に減衰し，時刻 3.5 秒からは振幅が 0.016mm となり，液面がほとんど動かない状態となった．この振幅はセル 1 辺の長さ 0.05mm より小さい．液面上昇値は 9.07mm で，理論値に比べ 0.83mm 低い．

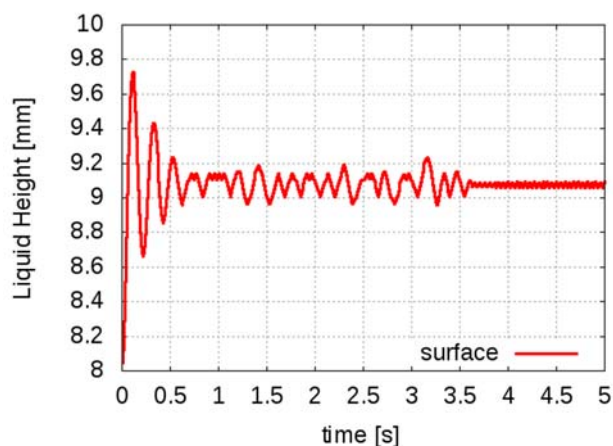
Fig.2(c)の OpenFOAM 1806 の場合，OpenFOAM 5 と近い結果となった．

Fig.3 に OpenFOAM5 による解析で得られた液面付近の気液分布を示す．赤が水，青が空気である．接触角を 45° と設定していることから，液面は下に凸の形状となる．これに近い液面形状を保ったまま，液面の

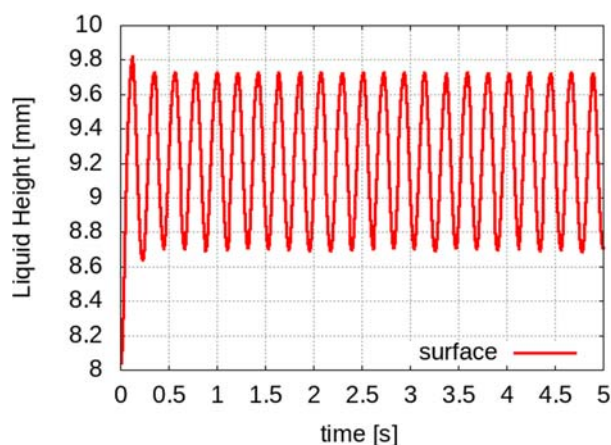
昇と下降をくり返した。



(a) OpenFOAM 5, interFoam



(b) OpenFOAM 6, interFoam



(c) OpenFOAM v1806, interFoam

Fig. 2 History of liquid height in capillary obtained with interFoam

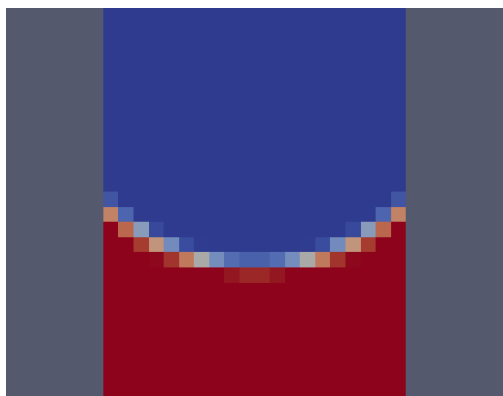


Fig. 3 Liquid-gas distribution on the liquid surface

OpenFOAM5 と OpenFOAM6 の結果の違いを生み出しているソースコードを明らかにするために、開発版 OpenFOAM-dev による解析を行った。Github から OpenFOAM-dev ソースコードを取得した。git log コマンドを実行することで、過去に行なわれたコードの変更（コミット）の履歴を確認した。結果を確認するコミットを決めたあと、その時点でのコードに戻す git checkout コマンドを使用し、ソースコードをコンパイルした。

振動が収まる結果となったソースコードと、その 1 つ前のソースコードを比較し、結果が変わった要因と

なったコミットを調査した。その結果、2018年1月8日8時50分の変更では振動が継続したが、2018年1月8日21時35分の変更では、振動が徐々に減衰した。これより、2018年1月8日21時35分に変更されたソースコードが、結果の変わった要因であると判断した。

Code 1 に、そのコミットのコメントを示す。この変更は、interFoam に施されたものではなく、時間微分項のスキームに対するものである。変更の詳しい意味については、今後の調査が必要である。

Code 1 Comment of the commit related to the change of results.

```

1 commit da787200a6b208cf3fc4dfaa48b4438a3a038c1b
2 Author: Henry Weller <http://openfoam.org>
3 Date: Mon Jan 8 21:35:00 2018 +0000
4
5 ddtScheme::fvCddtPhiCoeff: Improved formulation providing better stability/accuracy balance
6
7 Resolves problem with pressure "staggering" when running with a very Courant
8 number.
```

Table 1 に示したリリース日を見ると、OpenFOAM v1806 は上記のコミットよりも後にリリースされている。しかし、計算結果は OpenFOAM 5 と近い。これは、OpenCFD 社によりリリースされている v1806 には、OpenFOAM Foundation のコード変更が反映されていないためと考えられる。OpenFOAM v1706 より前のバージョンでは、リリース時に foundation コードの反映に関する記述があったが、v1712 以降にはない。両者の間でコードに違いがあると考えられる。

Fig. 4 に OpenFOAM v1806 の interIsoFoam による解析結果を示す。横軸は時間[s]、縦軸は平行平板間の水位[mm]である。interIsoFoam は、界面の予測精度を向上させる isoAdvector 法 [4] を採用したソルバーである。interIsoFoam を利用する事で、液面の振動が抑えられることを確認した。

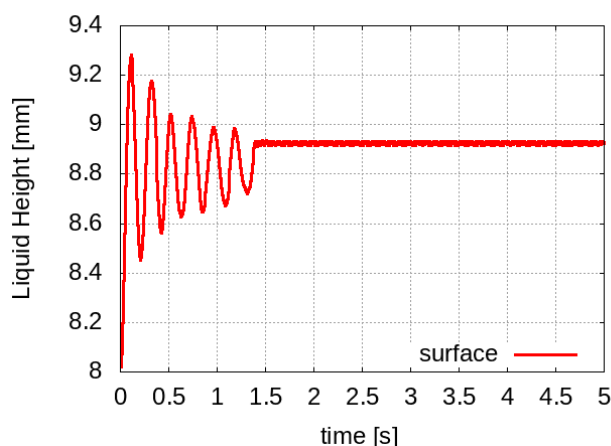


Fig. 4 History of liquid height in capillary obtained with interIsoFoam (OpenFOAM v1806)

4. 結言

気液 2 相流解析の 1 つである毛細管現象例題(capillaryRise)を利用し、OpenFOAM 5, OpenFOAM 6, および OpenFOAM v1806 の予測結果を理論値と比較した。いずれの結果も、理論的に得られる液面上昇値よりも低い値を示すことが明らかとなった。非定常項のスキームに関するコードの修正が原因となり、OpenFOAM 6 では液柱の振動が抑制され、現実的な結果に近づくことが明らかとなった。

OpenFOAM 5 より後に追加されたソースコードの変更は、リリース日が遅い OpenFOAM v1806 に反映されていないことが確認された。

OpenFOAM v1806 では、interIsoFoam ソルバを利用する事で、液柱の振動が抑制された結果を得られた。

参考文献

- [1] Diana S. Hurtado Bustos, Rubén J. Paredes Alvarado, Numerical hull resistance calculation of a catamarán using OpenFOAM, *Ship Science & Technology*, Vol 11, No 21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.25043/19098642.150> (accessed 2018-09-14).
- [2] Suraj S Deshpande, Lakshman Anumolu and Mario F Trujillo, Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam, *Computational Science & Discovery*, 5, 014016 (2012).
- [3] OpenFOAM Issue Tracking, <https://bugs.openfoam.org/view.php?id=3028#c9900> (accessed 2018-11-19).
- [4] Roenby J, Bredmose H, Jasak H., A computational method for sharp interface advection. *R. Soc. open sci.* 3: 160405 (2016). <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160405>