

OpenFOAM を使ったドロップシャフト内水流可視化の試み

中日本建設コンサルタント(株) ○金井 あゆみ 中根 進

高落差に対応するマンホールにらせん案内路を設けることによって流入水を旋回流として流下させ、安定的な流況で流出口から流出させるドロップシャフトという製品がある。このドロップシャフト内の流況を知るため、流体解析を試みることにした。ドロップシャフトは、落水に伴い空気が流体に混入するため、気液混相流を扱える流体解析ソフトが必要になる。オープンソースの OpenFOAM という有限体積法を使った流体解析ソフトでは気液混相流が扱えるので、本稿では、このソフトを使ってドロップシャフト内の流れを解析し、可視化を試みる。

Key Words : 気液混相流、ドロップシャフト、OpenFOAM、Paraview、旋回流

1. まえがき

マンホール接続する下水道管きよでは、段差が 60 cm 以上になると副管を設け¹⁾、水の流れを安定化させ、作業員の入坑を容易にしている。

しかし、埋設深の深い幹線に浅い幹線が接続する際などには、高落差になることがあり、マンホール内に落差を低減する段差接合や階段接合(0.3 m 以内)など¹⁾ 工夫が求められる。また、合流改善や雨水対策を目的に貯留管、貯留槽などを設けた際、自然流下管からの接続が高落差になることがあり、流入部の工夫が必要となる。

段差など落差のある管路の流体解析では、落水に伴い空気が流体に混入するため、落水部では気液混相流として扱うことが必要になることもある。本稿では、らせん構造をもつマンホール(以下「ドロップシャフト」という)を気液混相流で解析し、ドロップシャフト内の流れの可視化を試みる。

2. ドロップシャフト(マンホール)

高落差を有するマンホールにドロップシャフトという二次製品がある。

この製品は、マンホールを大型化させない簡易な構造で、らせん案内路を設けることによって流入水を旋回流として流下させ、安定的な流況で流出口から流出させる構造となっている。この方式は、一般的に流下に伴う空気連行量を低減させて流出口からの流出速度を低下させるといわれている²⁾。また、流入に際しては、流入管の上流側への背水影響はないとされている³⁾。

過去の下水道展においてブースで直径 500 mm の断面模型が展示されていた(写真-1)。筆者の一人は、これを見て、オープンソース Blender にある Fluid というアドインの流体解析を使ってらせんの流れを図-1 のように示した。しかし、東京都下水道技術センター土木実習室(2)で見学したドロップシャフト内の流れ(写真-2)には空気が混入しており、流水

だけの解析は無意味と考え、ドロップシャフト内の流れの可視化には混相流の解析が必要と考えていた。



写真-1 下水道展 H25 年度東京 積水化学工業(株)ブースにて

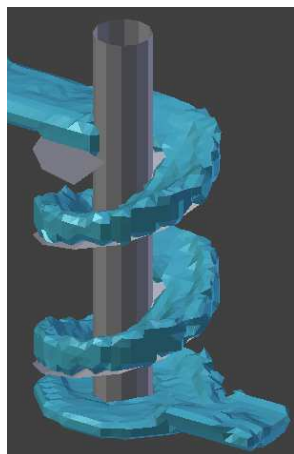


図-1 Blender (Fluid) による流体解析



写真-2 東京都下水道技術センター土木実習室(2)にて

3. 解析ソフト (OpenFOAM)

今回解析に用いる OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation)⁴⁾ は、オープンソースの有限体積法を中心とする偏微分方程式ソルバー開発用のクラスライブラリと、それによって作られたいくつかのソルバーおよびツール群からなり無料で利用できる。利用するには、必要な機能を持つソルバーを標準ソルバーの中から選択する。

標準ソルバーの範囲では、以下のようなことができる。

- ・非圧縮性流体の定常/非定常乱流解析
- ・圧縮性流体の定常/非定常熱対流解析
- ・流体・固体伝熱 (CHT) 解析
- ・混相流解析 (界面追跡法/多流体モデル)

OpenFOAM による解析手順⁴⁾ は、図-2 のフローによる。ソルバーの選択は、図-3 の標準ソルバーから選択する。

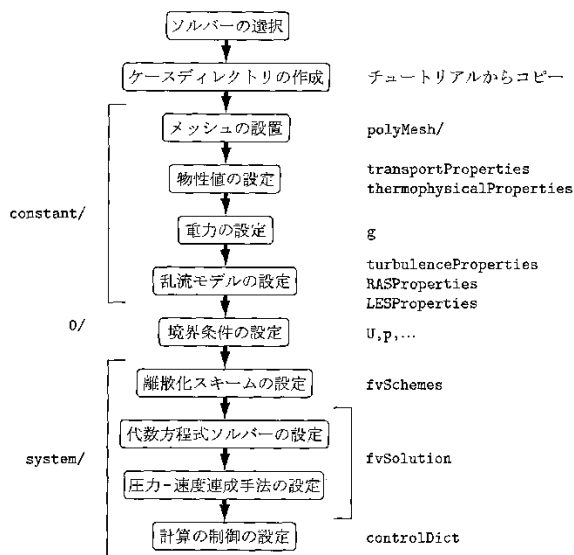


図-2 OpenFOAM による解析手順のフロー⁴⁾

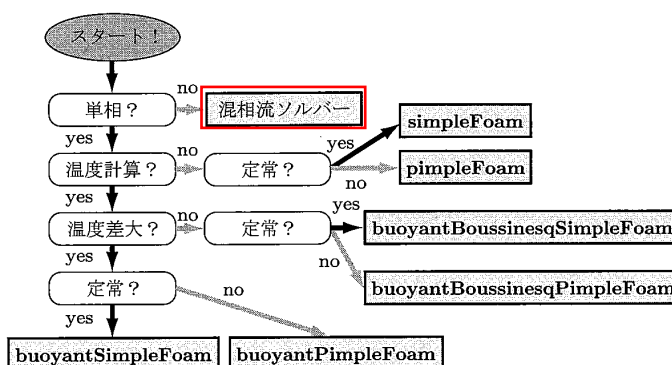


図-3 標準ソルバー選択フロー⁴⁾

4. 等ピッチ式ドロップシャフト

4.1 等ピッチ式ドロップシャフトモデル仕様

ら旋ピッチなどの諸元は、神戸市の標準図⁵⁾を使用し、等ピッチ式ドロップシャフトのモデルを作成した。

流入管径：0.50 m

流入量：0.145 m³/sec

落差：2.515 m

流出管径：0.25 m

流出先：解放

ドロップシャフト径：0.50 m

4.2 解析モデルの作成

本稿では、フリーソフトの FreeCAD を使い流体領域 (3D モデル) を作成し、STL ファイルで出力する。

OpenFOAM で STL ファイルをインポートし、流入口、流出口、ドロップシャフト内の流路表面など境界面を定義し、搭載されている cfMesh でメッシュを切る。下記に示す混相流モデルで解析する。

解析結果はフリーソフトの Paraview Ver. 5.9.1 で可視化し、境界面における流速などを csv ファイルで出力する。

本稿では、OpenFOAM (V2206) を使い、OpenFOAM 付属のチュートリアル⁶⁾にある混相流を解く、interFoam の中で「水路と流出量の計測」にある '\$FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/ras/waterChannel' を利用する。

このモデルは気液ともに非圧縮性として扱い、乱流モデル (RAS) となっている。

メッシュは、基本セルサイズを 300 mm とし、壁面、ら旋部は 150 mm のセルに細分化し、3 層の境界層を設けた。

メッシュはいくつかのサイズで試行計算して、形状が表現できる最小限のセルサイズとして設定した。その結果、メッシュのセル数は 329,514 であり、メッシュの一部を図-5 に示す。

境界条件：

領域 inlet (図-4 の茶色部) から水が流量 0.145 m³/sec で流入し、領域 outlet (図-4 の青色部) から流出する。ドロップシャフト内の流路表面 (領域 walls) はすべり無し条件とし、流路天井 (領域 atmosphere) は開放とする。重力加速度 g は 9.81 m/sec² とする。

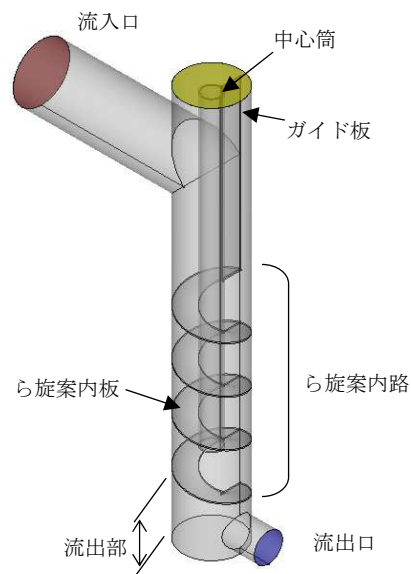


図-4 解析モデルの外観と各部名称

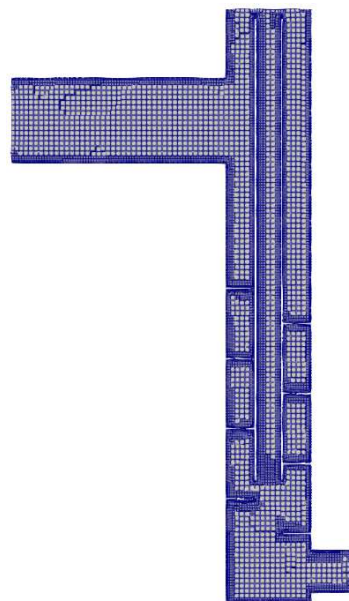


図-5 解析モデルのメッシュ

4.3 解析結果

ドロップシャフト内の気液混相流から水のみを抽出してその水流を図-6 に示す。着色は流速を表す。図-7 に水流を流線で表示し、旋回しながら流下していく様子を見せる。流入口で流速 2.0 m/sec 程度であったものが、ドロップシャフト下流に行くにしたがって速くなり、4.0～5.0 m/sec 程度で旋回し、流出部(流出口の近く)になると 3.0 m/sec と流速を落としている。図-6 に示す流出口の落下部では 8.0 m/sec 程度になっている。

なお、自由落下する物体の速度は、 $v = \sqrt{2gh}$ であり、 $h = 2.515 \text{ m}$ では、7.02 m/sec となる。

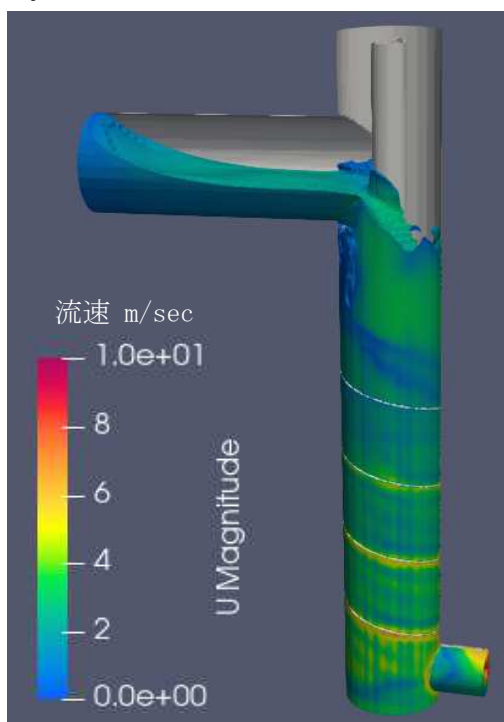


図-6 水流の流速表示 (t = 20 sec)

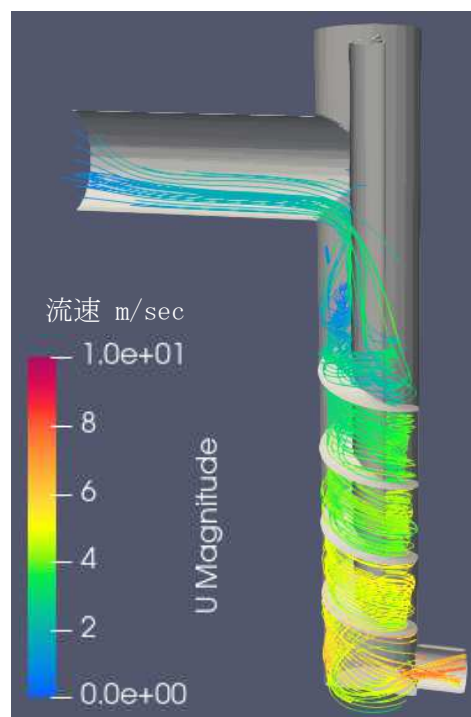


図-7 水流の流線表示 (t = 20 sec)

ドロップシャフト流入口付近の流速ベクトルを図-8 に示す。流速は 1.5 m/sec 程度になっている。

図-7 のシャフト内部の流線を流速ベクトルで表示し図-9 に示す。シャフト内壁面に沿った旋回する流速が速く、中心に向かって遅くなっている。

流速ベクトルの表示には、フリーソフト Graph-R を用いた。

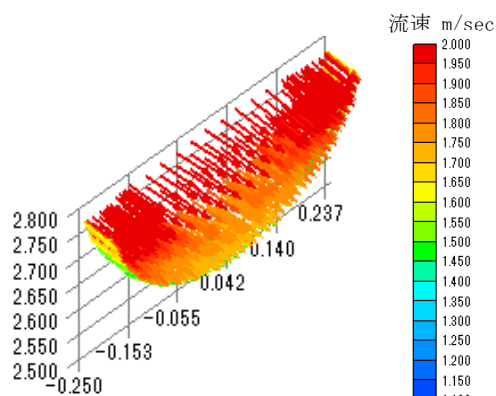
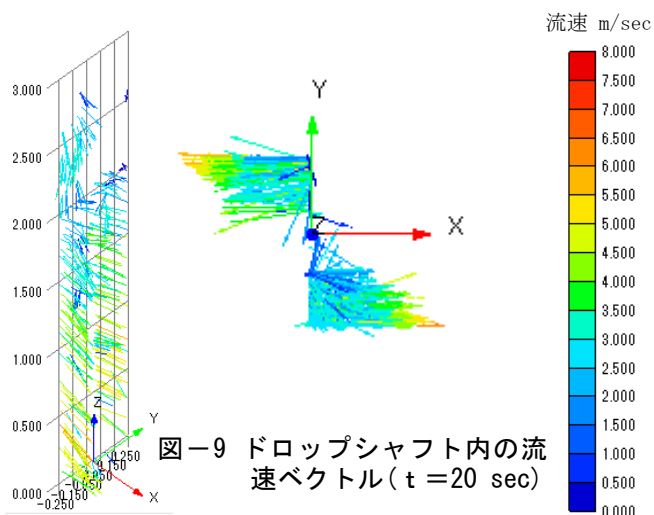
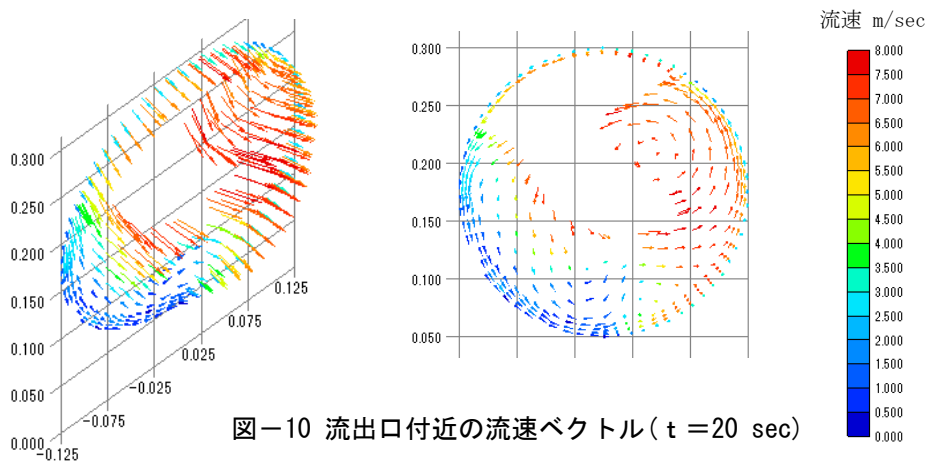


図-8 流入口付近の流速ベクトル表示 (t = 20 sec)



流出口中央部の水流の流速ベクトルを図-10に示す。解析の計算範囲 $t = 20$ sec において流出口では満水にならず、流出口内面の壁面に沿ってのみ水流があり、中心部を含む多くは空気の流れになっている。



シャフト内がどの程度の流速で旋回しているか分布の形で表わし図-11に示す。おおむね 8 m/sec 以下の流速となっている。ただし、流入口や流出口の流速は示していない。

5. その他の解析例

中抜き式といわれる中心筒が一部ない形式のシャフト内の流速を図-12に示す。

流入管径 : 2.0 m

流入量 : 4.665 m³/sec

落差 : 17.35 m

流出管径 : 1.0 m

流出先 : 解放

ドロップシャフト径 : 2.0 m

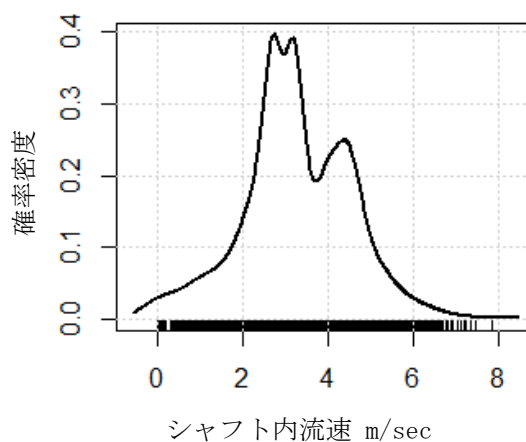


図-11 シャフト内流入と直角の両側面の流速の分布

また、等ピッチ式ドロップシャフトの流速を図-13 に示す。

流入管径 : 0.25 m
 流入量 : 0.025 m³/sec
 落差 : 1.49 m
 流出管径 : 0.25 m
 流出先 : 解放
 ドロップシャフト径 : 0.25 m

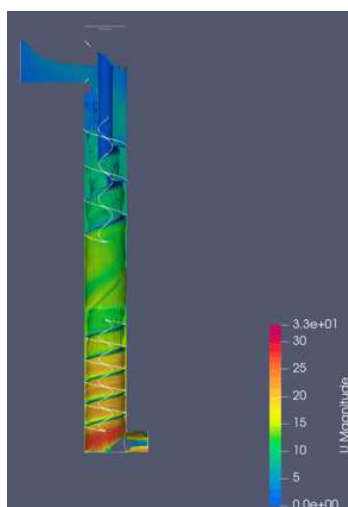


図-12 中抜き式ドロップシャフトの流速表示
 (クーラン数 $C < 1.0$)

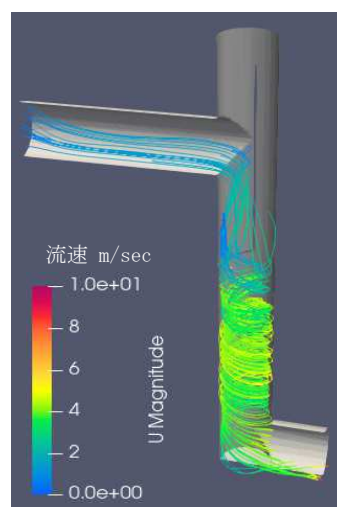


図-13 等ピッチ式ドロップシャフトの流線表示

6. まとめ

ドロップシャフト内の流れを OpenFOAM の interFOAM ソル

バーを使って気液混相流で解析し、流線や流速ベクトルを使って可視化することができた。また、ドロップシャフト内の流水の流速や流線を示すことができた。

ドロップシャフト内の流水や空気の流速と流出部とで速度差が大きく、メッシュサイズ (Δl) は変化しないのでクーラン数 $C (= v \cdot \Delta t / \Delta l)$ が大きく変化してしまうので、精度よく計算できていない懸念がある。

空気の速度と流水の速度とでは空気速度が速く、気液同時に解析していることにより、クーラン数が大きくなる。そのため、速度が上がってくると、ソフト上自動で計算ピッチ (Δt) を小さくすることにより時間が進まなくなる上、計算が停止 (発散) してしまうことがある。図-12 の中抜き式高落差のドロップシャフトはその例である。本稿と同じ interFOAM ソルバーでクーラン数 $C < 1.0$ として解析した。この図に計算時間は示していないが、この時間以上は発散して計算ができなかった。現在の段階では、すべての形状のドロップシャフトや高落差では計算できないことが課題である。

本稿で示した計算は、WEB 上の事例にある実績のクーラン数 $C < 7.0$ として実施し、20sec 間の解析に約 7 時間要した。

<参考文献>

- 1) 日本下水道協会：設計指針と解説 pp. 309-310
- 2) 下水道新技術推進機構：らせん案内路式ドロップシャフト技術マニュアル-2009 年 3 月-p. 10
- 3) 同上-p. 19
- 4) (一社) オープン CAE 学会編：OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析 森北出版 pp. 14-15
- 5) <https://www.city.kobe.lg.jp/documents/9872/huroku.pdf>
- 6) <https://www.xsim.info/articles/OpenFOAM/Tutorials.html>