

2024年7月19日
第34回技術研究発表会

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式会社
水環境技術本部
金井 あゆみ・中根 進

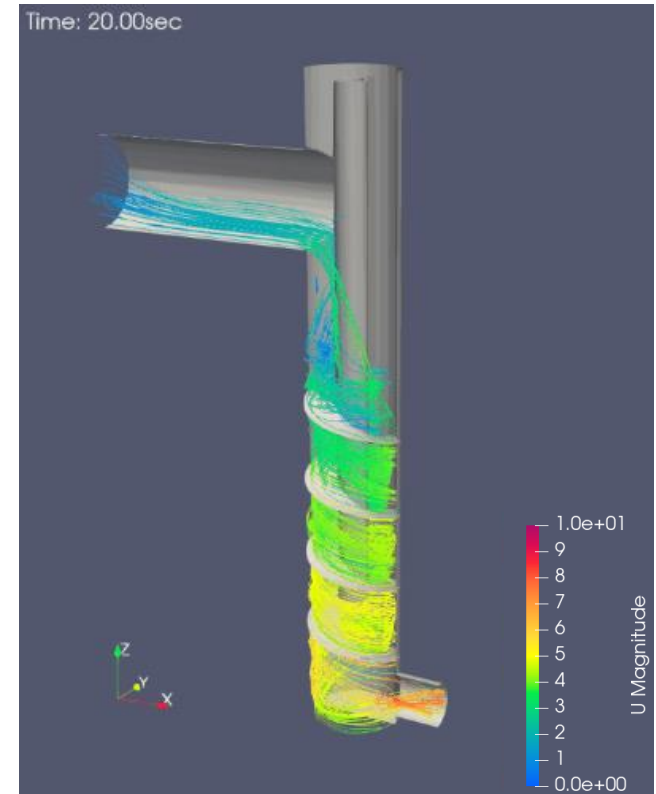


人・街・自然・いきいき

中日本建設コンサルタント株式会社

目次

1. 背景・目的
2. ドロップシャフト（マンホール）
3. 解析ソフトウェア
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析
 - ▶ 解析の流れと使用ソフトウェア
 - ▶ モデル作成
 - ▶ 境界条件設定
 - ▶ メッシュ作成
 - ▶ 解析
 - ▶ 解析結果の可視化
5. その他の解析例
 - ▶ 中抜き式ドロップシャフトの解析
6. まとめ



1. 背景・目的

- ▶ 下水道管きよのマンホール接続では、段差が60 cm以上になると副管を設けて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（30cm以内）などの工夫が求められる。

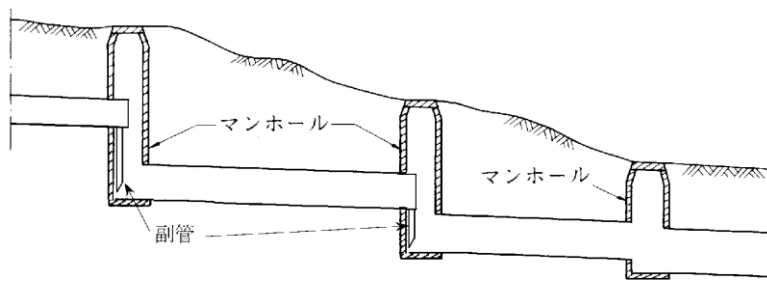


図4.2.18 段差接合の例

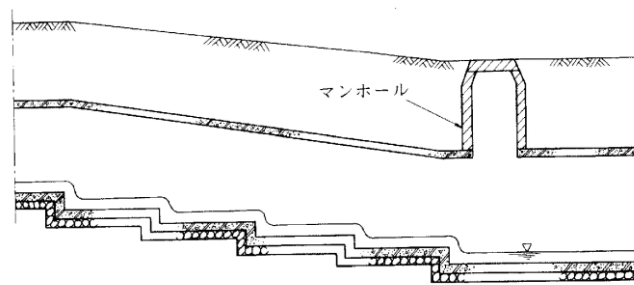


図4.2.19 階段接合の例

(出典) 日本下水道協会 下水道施設計画・設計指針と解説 ―2019年版― (P309)

1. 背景・目的

- ▶ 合流改善や雨水対策を目的として、貯留管や貯留槽などを設けた際には、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。

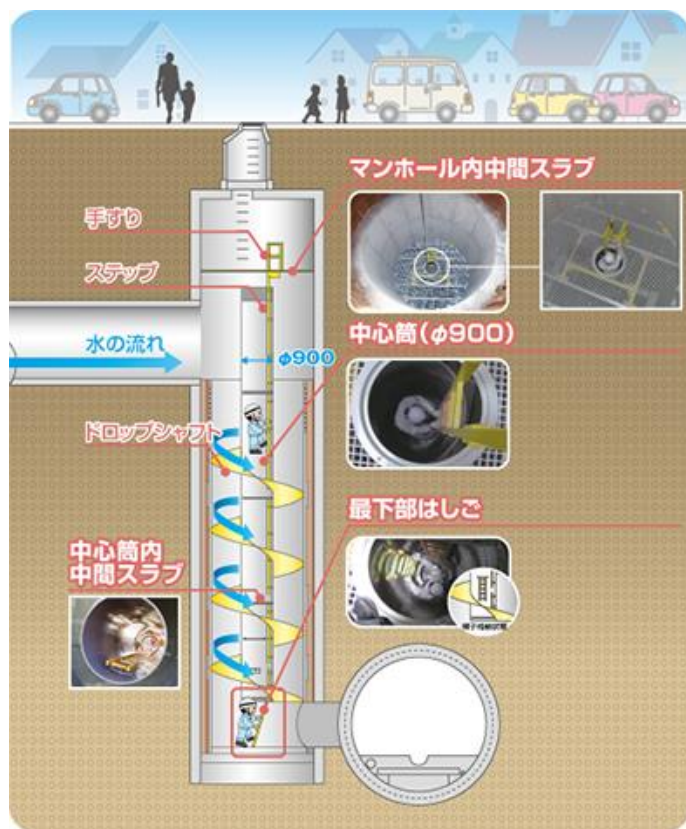


- ▶ 落差のある管路の流体解析では、落水に伴い空気が流体に混入するため、落水部では気液二相流として扱うことが必要になる場合もある。
- ▶ 今回、らせん構造をもつマンホール（以下「ドロップシャフト」という）を気液二相流で解析し、ドロップシャフト内の水流の可視化を試みる。

（出典）積水アクアシステム株式会社
<https://www.sekisuia.co.jp/plant/drop-shaft/>

2. ドロップシャフト（マンホール）

▶ 高落差マンホールの垂直管路資材である「ドロップシャフト」



ドロップシャフトの構造

- ▶ 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

ドロップシャフトの特長

- ▶ 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。※1
- ▶ 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。※2

※1： 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－（P10）

※2： 同上（P19）

（出典）積水アクアシステム株式会社
<https://www.sekisuia.co.jp/plant/drop-shaft/>

2. ドロップシャフト（マンホール）

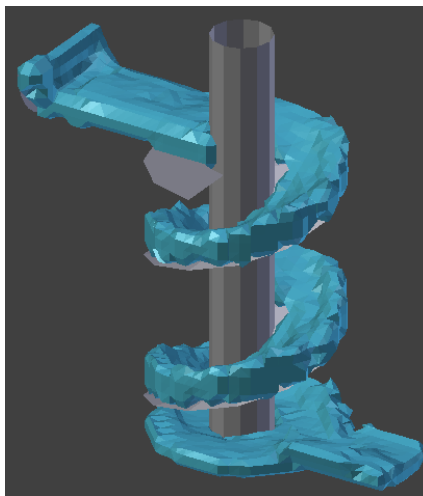
▶ ドロップシャフト内の水流の可視化には気液二相流の解析が必要

過去の下水道展において、ドロップシャフトの断面模型が展示されていた。



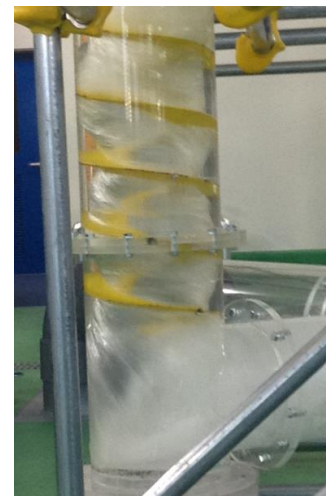
ドロップシャフトの断面模型
下水道展H25年度東京
積水化学工業(株)ブースにて

筆者の一人は、模型を見た後、Blenderの流体解析を使ってらせんの流れを示した。



Blender(Fluid)による流体解析

しかし、実際に見学したドロップシャフト内の流れには空気が混入していた。



ドロップシャフト模型の水流
東京都下水道技術センター
土木実習室(2)にて

実際の流れと解析結果に相違があることから、流水だけの解析は無意味と考え、ドロップシャフト内の水流の可視化には気液二相流の解析が必要と考えていた。

3. 解析ソフトウェア

- ▶ 解析にはOpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) を使用した。

OpenFOAMとは

- ▶ C++で書かれたLinuxベースのオープンソース数値流体解析ツール
- ▶ メッシュ作成から流体、熱、分子動力学、電磁流体、固体応力解析などのソルバー群、結果処理や可視化まで、多岐にわたる機能を備えている

ソルバーの選択

- ▶ InterFoam (気液二相流)
- ▶ チュートリアルケース「waterChannel」を利用

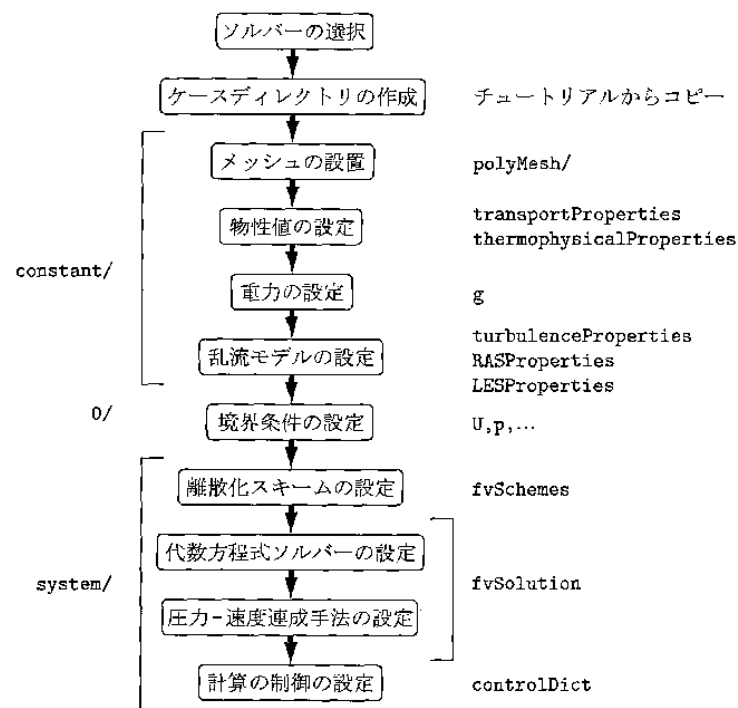
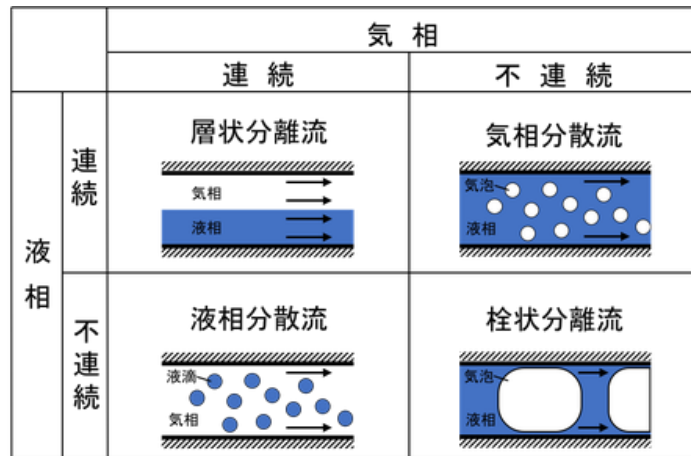


図 2.3 計算条件の設定手順[†]

(出典) (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

3. 解析ソフトウェア

- ▶ 気液二相流は、気相と液相の界面が様々な幾何学的形状を呈し、それが時間的に変化するために流動様式は複雑である。
- ▶ OpenFOAMの「interFoam」ソルバーでは、界面捕獲法（VOF法）を用いて、自由境界の計算を行っている。



気液二相流の流動様式

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0
0	0	0.5	0.7	1	1	0.7	0.5	0	0
0	0.5	0.7	1	1	1	1	0.6	0.5	0.5
0.5	0.6	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

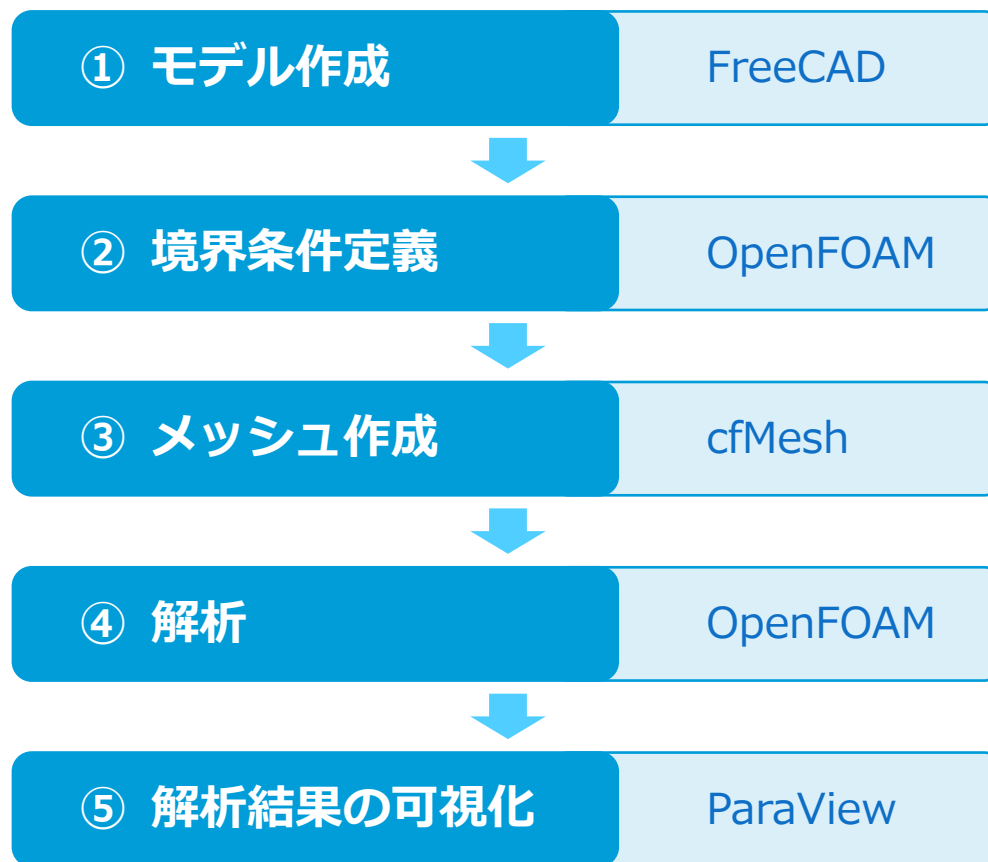
格子内のVOF関数値

(出典) MATSUO CFD Laboratory
<https://matsuo.mech.keio.ac.jp/日本語/研究/混相流/>

VOF法では、各格子内で2種類の流体の体積割合をVOF関数値として計算する。
 格子内のVOF関数値が $0 < \alpha < 1$ の場合、そのセルに界面が存在すると考える。

4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ 解析の流れと使用ソフトウェアを以下に示す。



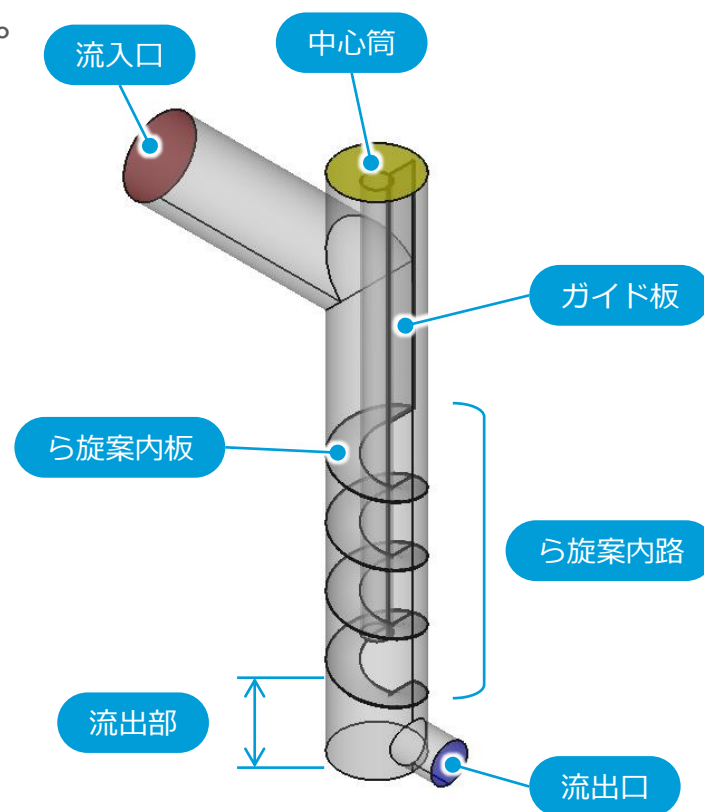
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ①モデル作成 (FreeCAD)

- ▶ 流体領域のモデル化を行い、境界ごとにSTLファイルに出力した。
- ▶ ら旋ピッチなどの諸元は、神戸市の標準図 ※3を参考に、等ピッチ式ドロップシャフトのモデルを作成した。

モデル仕様	
● 流入管径	0.50m
● 流入量	0.145m ³ /s
● 落差	2.515m
● 流出管径	0.25m
● 流出先	開放
● ドロップシャフト径	0.50m

※3 : <https://www.city.kobe.lg.jp/documents/9872/huroku.pdf>

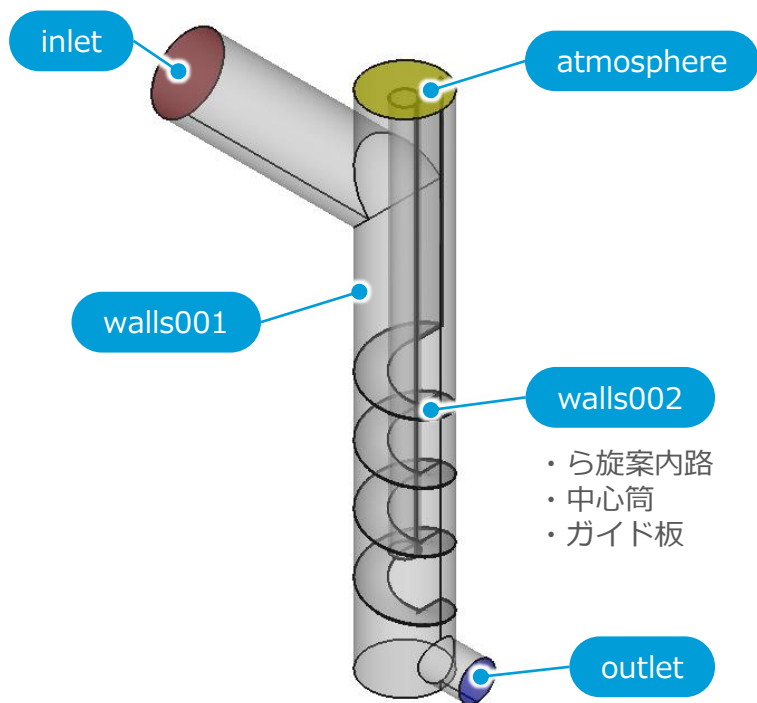


4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ②境界条件定義 (OpenFOAM)

- ▶ 各境界ごとに解析に必要な境界条件を定義した。一例を以下に示す。

【境界名】



【境界条件】 (例：速度 U)

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform (1 0 0);
boundaryField
{
    atmosphere
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }
    inlet
    {
        type      flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate constant 0.145;
    }
    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform (0 0 0);
        value      $internalField;
    }
    walls001
    {
        type      noSlip;
    }
    walls002
    {
        type      noSlip;
    }
}
```

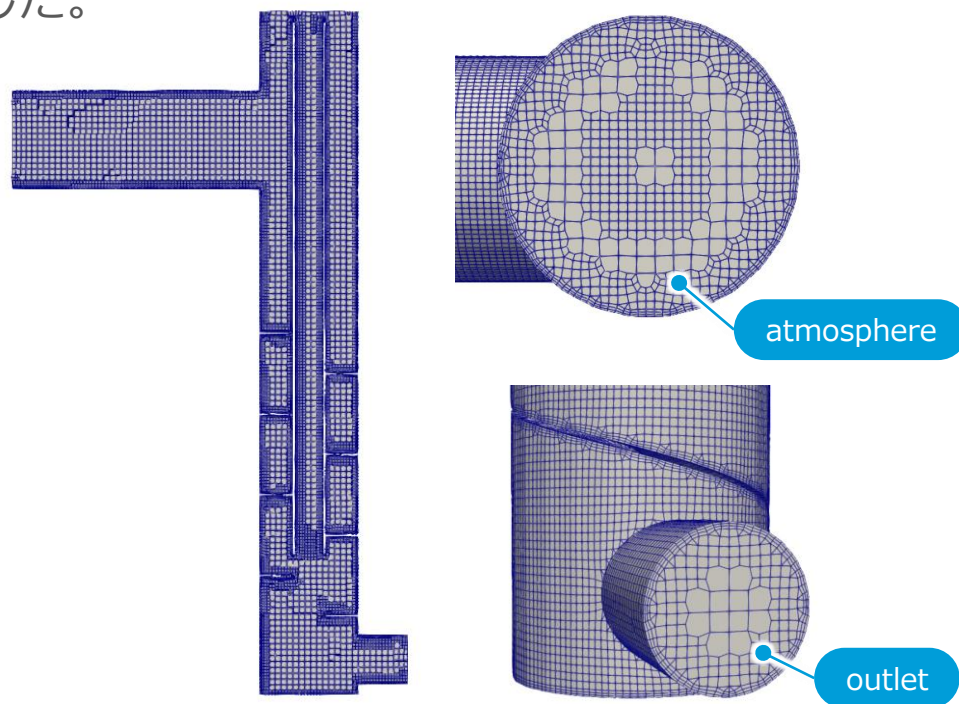
流入口[inlet]の条件は
標準図より最大流量である
体積流量 $0.145\text{m}^3/\text{s}$ を定義

4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ③メッシュ作成 (cfMesh)

- ▶ 下表の条件で、解析メッシュを作成した。
- ▶ メッシュは、基本セルサイズや境界層の設定など、いくつかのサイズで試行計算を行い、ドロップシャフトの形状が表現できる最小限のセル数のメッシュを採用した。

メッシュ作成条件	
● 基本セルサイズ	300mm
● 壁面（細分化）	150mm 境界層：3層
メッシュの総セル数	
329,514	



4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ④解析 (OpenFOAM) (1/2)

- ▶ 気液二相流を解くソルバー「interFoam」のチュートリアルケース「waterChannel」を利用して解析を行った。
- ▶ 気液ともに非圧縮性として扱い、乱流モデルとなっている。

重力加速度の定義

/constant/g

```
dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];  
value           (0 0 -9.81);
```

Z軸の負方向に9.81m/s²と定義

乱流モデルの定義

/constant/turbulenceProperties

```
simulationType    RAS;
```

乱流モデル RAS(Reynolds-Averaged Simulation)を定義

解析時間、時間刻み、クーラン数の定義

/system/controlDict

```
stopAt           endTime;
```

```
endTime          20;
```

} 解析時間を
20秒間に定義

```
adjustTimeStep   yes;
```

```
maxCo            6;
```

```
maxAlphaCo       6;
```

```
maxDeltaT        1;
```

} 時間刻みの自動調整を有効とし、
最大クーラン数
(maxCo) 以下で
時間刻み (Δt) を
調整すると定義

4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ④解析 (OpenFOAM) (2/2)

- ▶ 今回の解析は、クーラン数<7.0で計算を実施した。
- ▶ クーラン数が小さくなるほど、計算時間が増加するため、今回は使用するOpenFOAMのチュートリアルケースで設定されているクーラン数を採用とした。

クーラン数とは

- 非定常計算において、1サイクルで流れが要素いくつ分進むかを示したもの
- 現象を精度よく予測するためには、クーラン数 ≤ 1 を満たすことが理想的

$$C = \frac{v\Delta t}{\Delta l}$$

C : クーラン数
v : 流速
 Δt : 時間刻み
 Δl : 要素幅

クーラン数が1のとき → 流れは要素1個分移動する



クーラン数が10のとき → 流れは要素10個分移動する



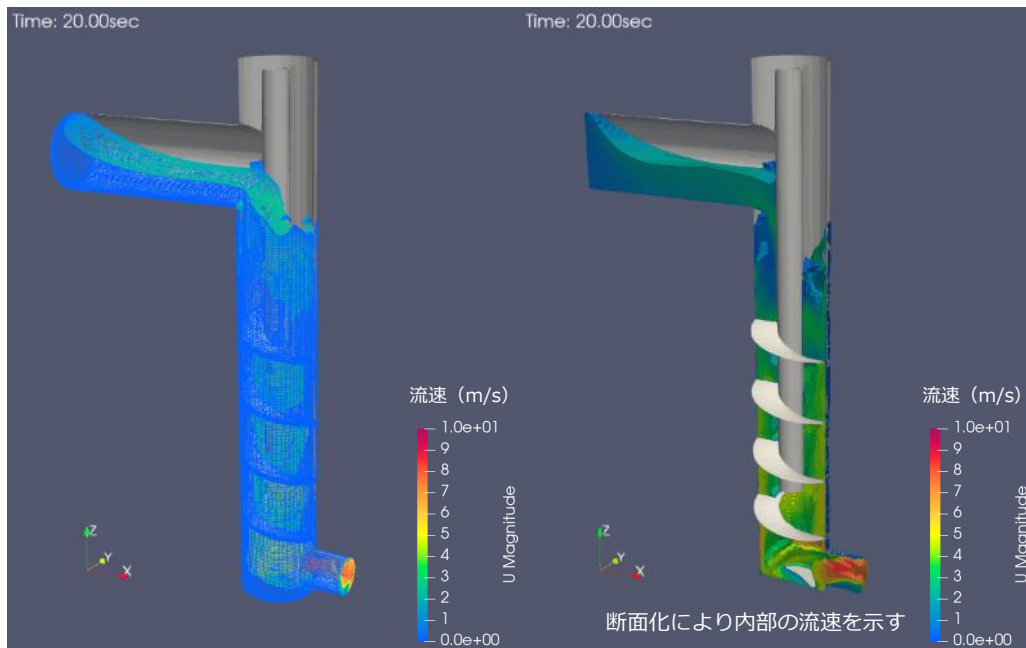
(出典) ソフトウェアクレイドル

<https://www.cradle.co.jp/calculation/01cn.html>

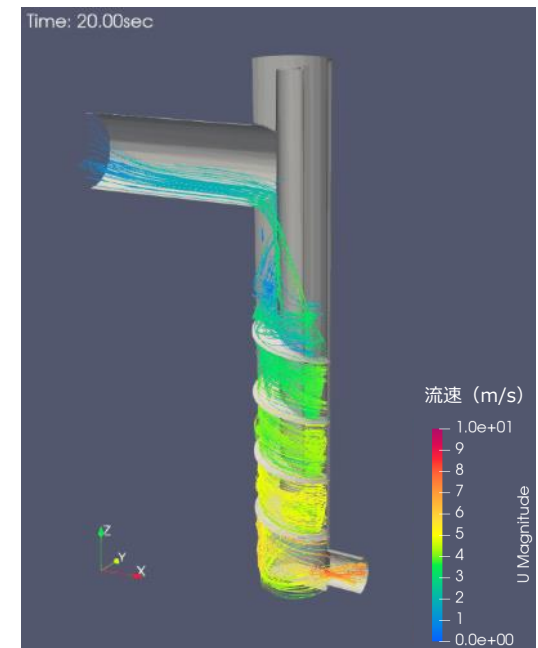
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ⑤解析結果の可視化 (ParaView) (1/4)

- ▶ ドロップシャフト内の気液二相流から、水のみを抽出した水流を以下（左図）に示す。着色は流速を表している。
- ▶ 同様に、水のみを抽出した水流を流線で表示し、旋回しながら流下していく様子を以下（右図）に示す。



水流の流速表示 (t=20sec)

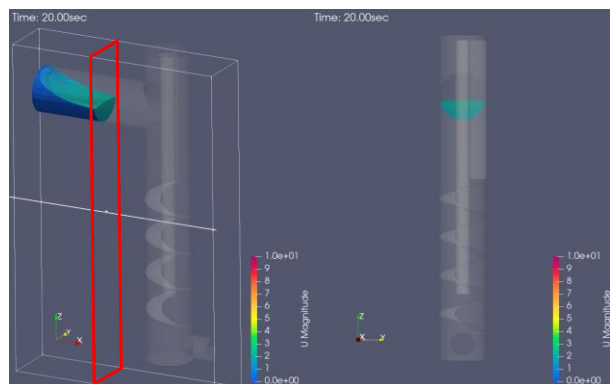


水流の流線表示 (t=20sec)

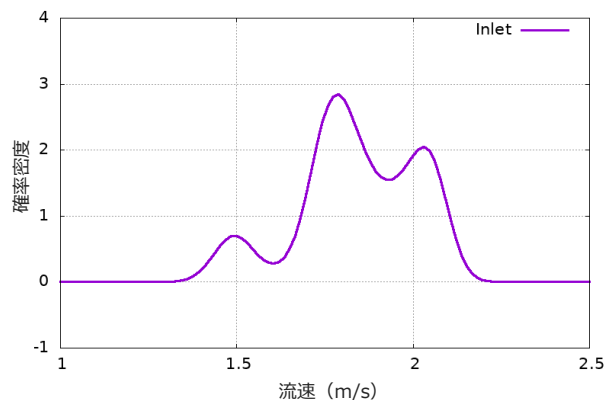
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ⑤解析結果の可視化 (ParaView) (2/4)

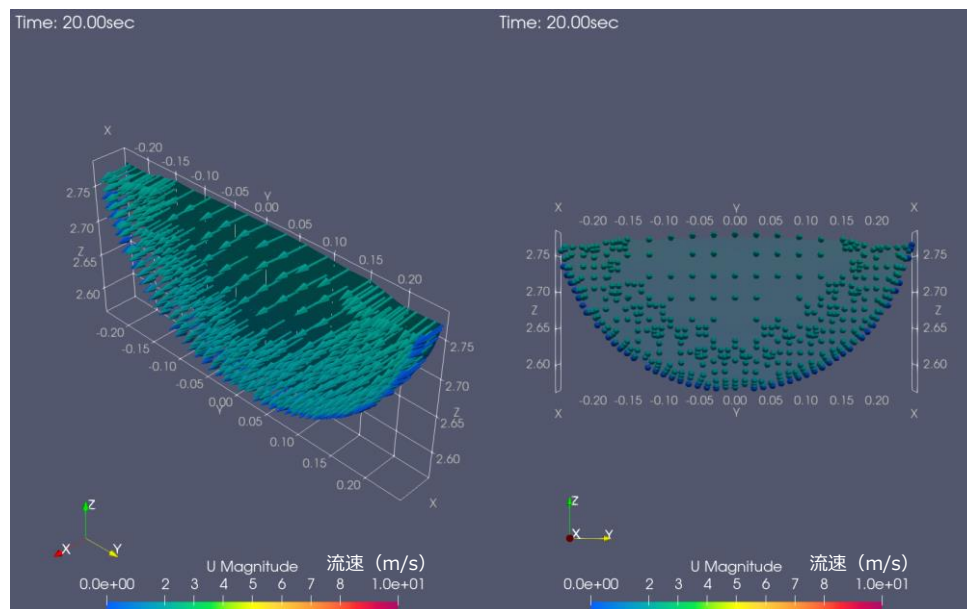
▶ 流入口付近の流速ベクトルおよび流速分布を以下に示す。



断面位置 (t=20sec)



流入口付近の流速分布 (t=20sec)



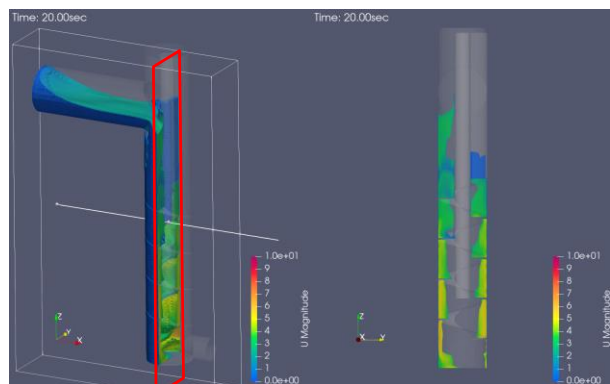
流入口付近の流速ベクトル表示 (t=20sec)

平均流速 : 1.8m/s ※水のみ

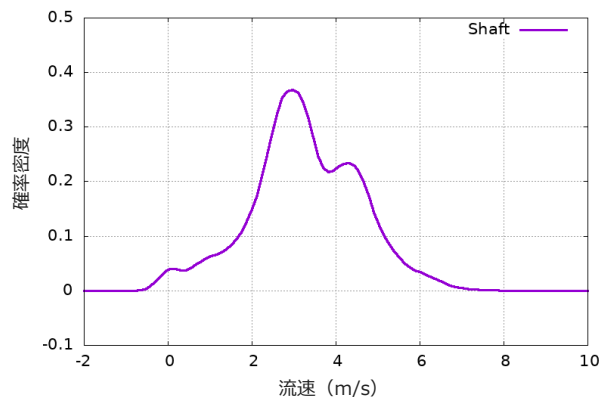
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ⑤解析結果の可視化 (ParaView) (3/4)

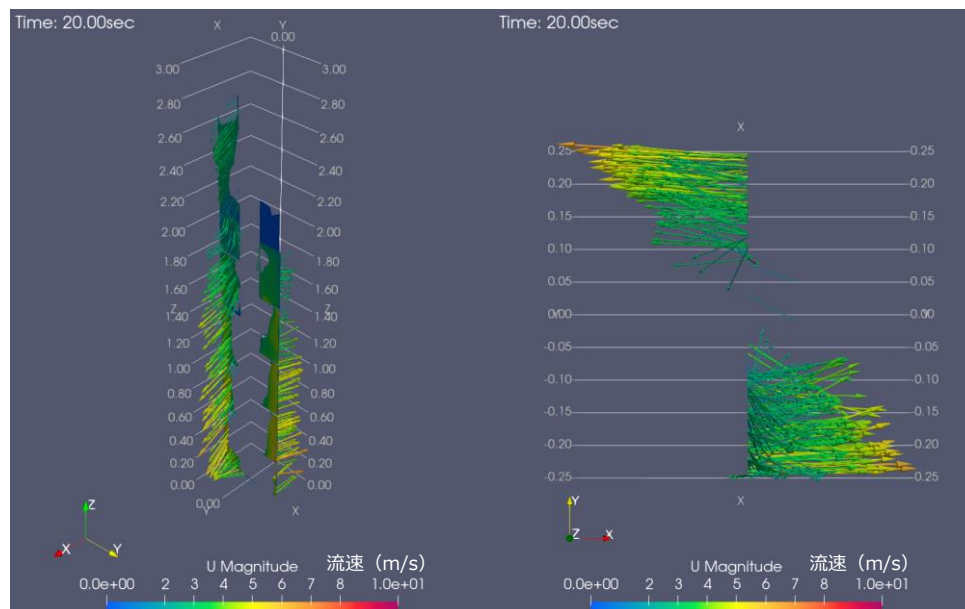
▶ シャフト内部の流速ベクトルおよび流速分布を以下に示す。



断面位置 (t=20sec)



シャフト内部の流速分布 (t=20sec)



シャフト内部の流速ベクトル表示 (t=20sec)

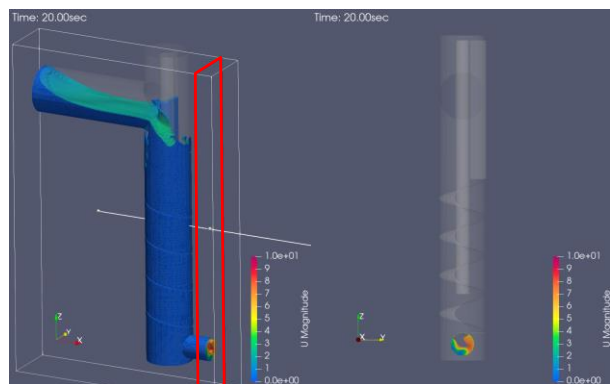
平均流速：3.2m/s 最大流速：7.8m/s ※水のみ

シャフト内壁面に沿って旋回する流速が速く、中心に向かって遅くなっている。

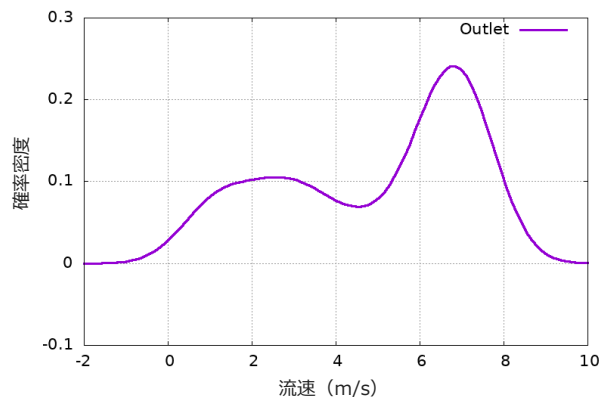
4. 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

▶ ⑤解析結果の可視化（ParaView）（4/4）

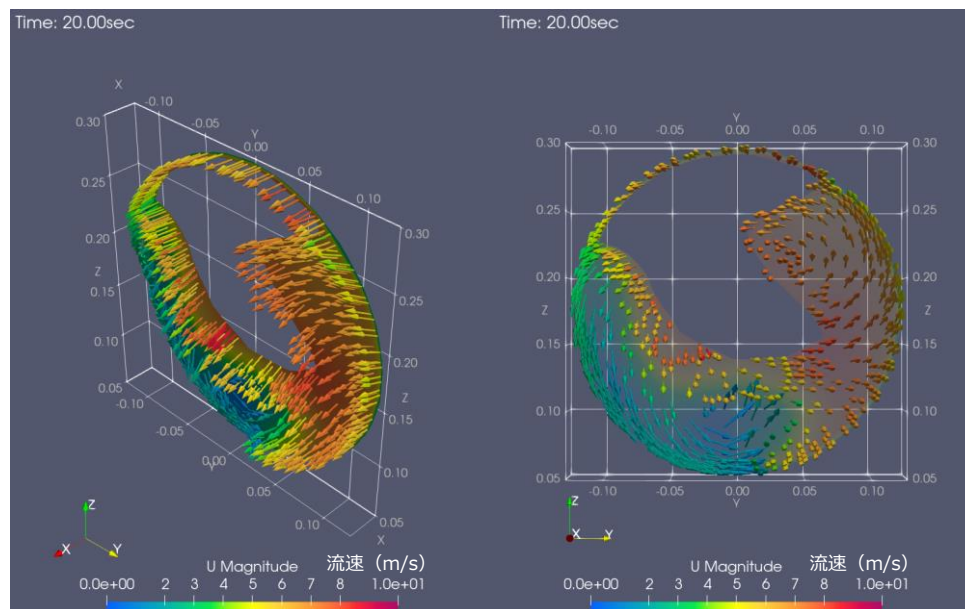
▶ 流出口付近の流速ベクトルおよび流速分布を以下に示す。



断面位置 (t=20sec)



流出口付近の流速分布 (t=20sec)



流出口付近の流速ベクトル表示 (t=20sec)

平均流速：4.9m/s 最大流速：8.0m/s ※水のみ

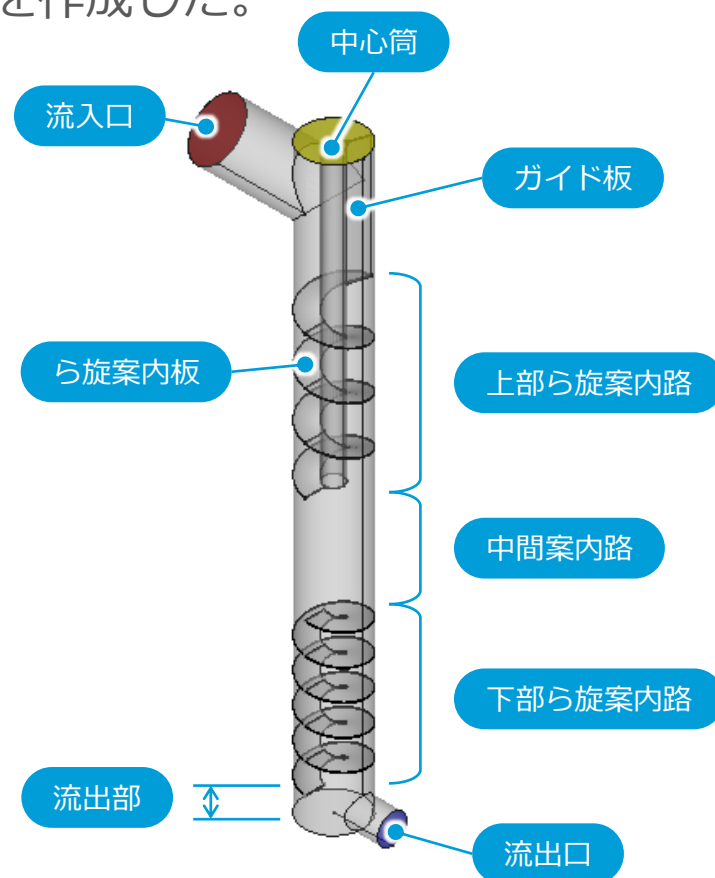
流出口では満水にならず、流出口内面の壁面に沿ってのみ水流があり、中心部を含む多くは空気の流れになっている。

5. その他の解析例

▶ 中抜き式ドロップシャフト (Φ2000)

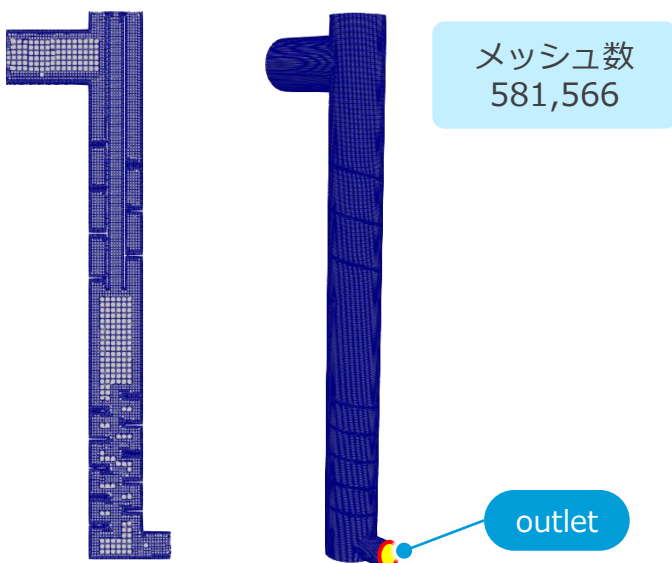
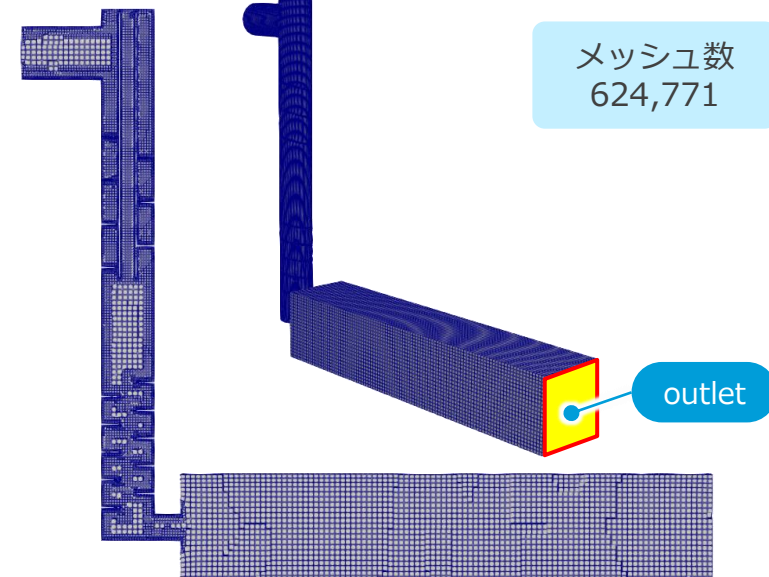
- ▶ ら旋ピッチなどの諸元は、前述の神戸市の標準図を参考に、中抜き式ドロップシャフトのモデルを作成した。

モデル仕様	
● 流入管径	2.0m
● 流入量	4.665m ³ /s
● 落差	17.35m
● 流出管径	1.0m
● 流出先	開放
● ドロップシャフト径	2.0m



5. その他の解析例

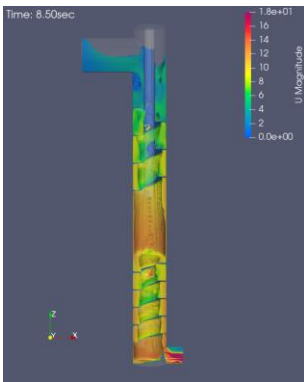
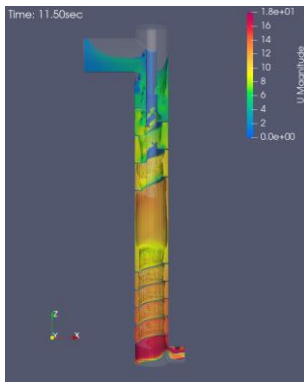
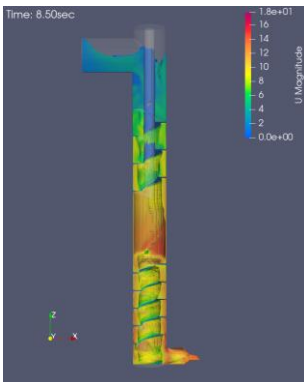
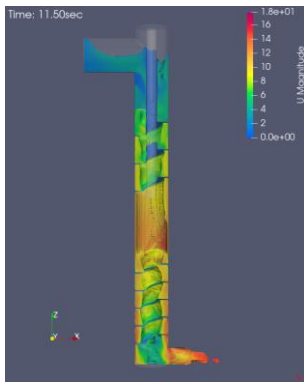
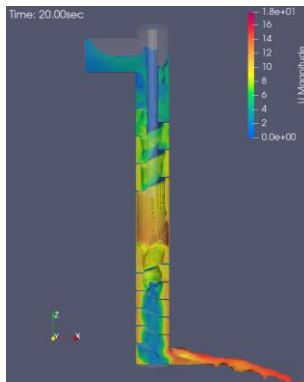
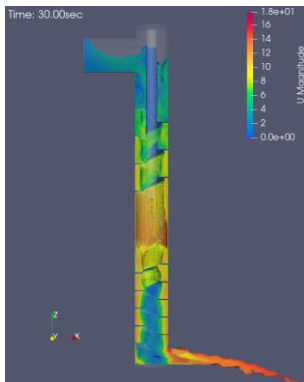
- ▶ 中抜き式ドロップシャフトの解析ケース
 - ▶ 流出口付近の形状を変えて、2ケースの比較を実施した。

Case1 : 解析メッシュ	Case2 : 解析メッシュ
 <p>メッシュ数 581,566</p> <p>outlet</p>	 <p>メッシュ数 624,771</p> <p>outlet</p>
流出口端部をoutletとして定義する	流出口の先に20mの上部開放水路を 設け、水路端部をoutletとして定義する

5. その他の解析例

▶ 中抜き式ドロップシャフトの解析結果（1/3）

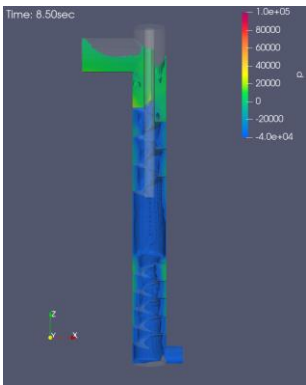
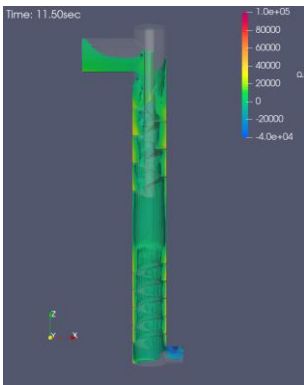
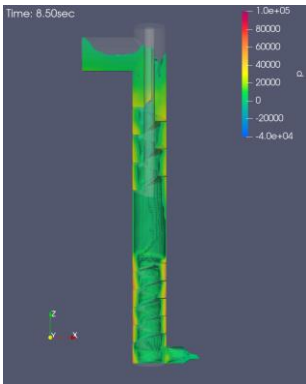
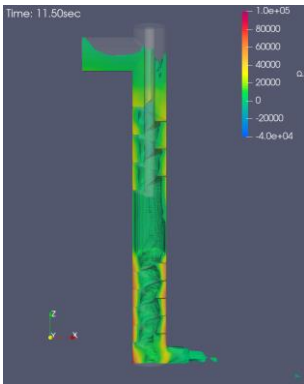
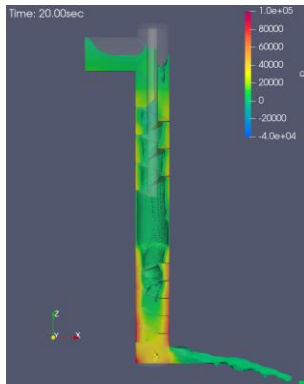
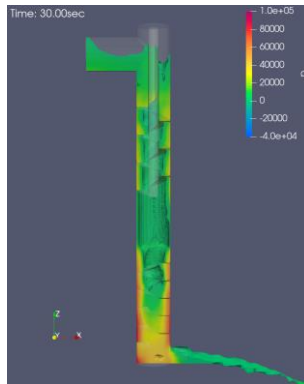
水流の流速表示

	t=8.5sec	t=11.5sec	t=20.0sec	t=30.0sec
Case1			<p>計算停止</p> <p>(Δtが限りなく0に近い数字となり、 計算が進まなくなったため)</p>	
Case2				

5. その他の解析例

▶ 中抜き式ドロップシャフトの解析結果 (2/3)

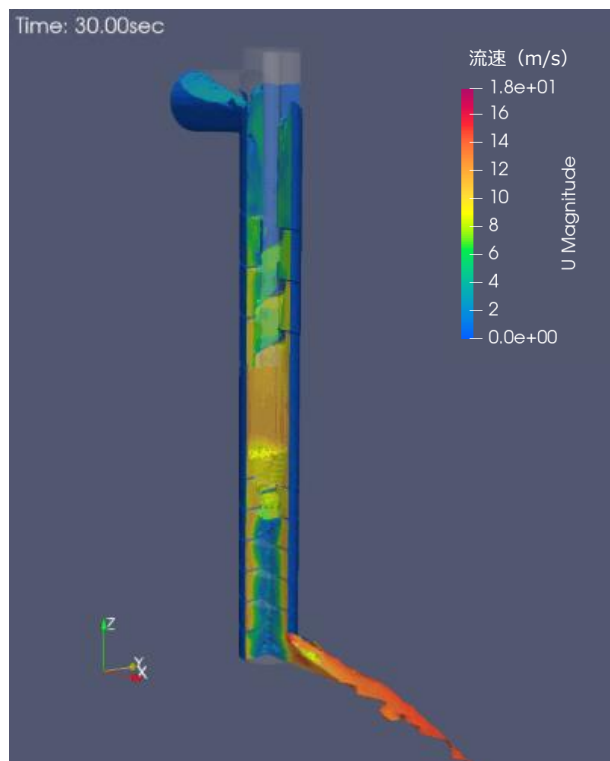
水流の圧力表示

	t=8.5sec	t=11.5sec	t=20.0sec	t=30.0sec
Case1			<p>計算停止</p> <p>(Δtが限りなく0に近い数字となり、 計算が進まなくなったため)</p>	
Case2				

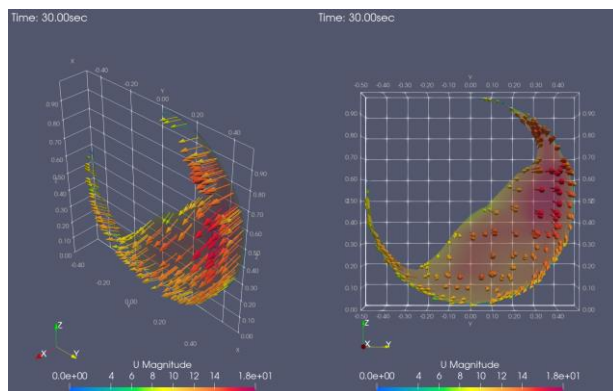
5. その他の解析例

▶ 中抜き式ドロップシャフトの解析結果（3/3）

- ▶ Case2について、水のみを抽出した水流を以下（左図）に示す。
- ▶ 流出口付近の流速ベクトルおよび流速分布を以下（右図）に示す。

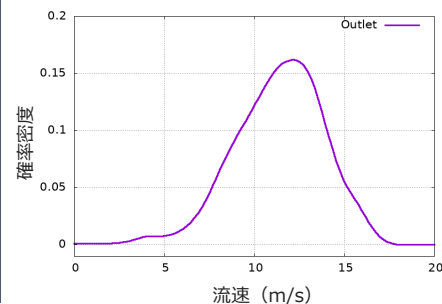


[Case2] 水流の流速表示 (t=30sec)



[Case2] 流出口付近の
流速ベクトル表示 (t=30sec)

平均流速 : 11.3m/s



[Case2] 流出口付近の
流速分布 (t=30sec)

解析メッシュの違いにより、同じ条件の解析でも計算が異常終了する場合がある。

メッシュ数が多くなるほど計算時間は増加するが、うまく解析を行うためには、適切な解析領域の範囲を設定する必要がある。

6. まとめ

▶ 背景・目的

- ▶ 高落差マンホールの垂直管路資材である「ドロップシャフト」について、気液二相流の解析を用いて、水流の可視化を試みた。

▶ 等ピッチ式ドロップシャフトの解析

- ▶ $\Phi 500$ の等ピッチ式ドロップシャフトについて、OpenFOAMのinterFoamソルバーを用いて解析を実施し、水流の流速や流線を示すことができた。
- ▶ 今回はクーラン数 < 7.0 で解析を実施し、計算に約7時間要した。
- ▶ 現象を精度よく予測するためには、クーラン数 ≤ 1 を満たすことが理想であり、今回のケースは精度よく計算できていない懸念がある。

▶ その他の解析例

- ▶ $\Phi 2000$ の中抜き式ドロップシャフトについて、解析メッシュを二種類用意し、OpenFOAMのinterFoamソルバーを用いて解析を実施し、流速や圧力の比較を示した。
- ▶ メッシュの違いにより結果が異なったことから、うまく解析を行うためには、適切な解析領域の範囲に留意する必要があることがわかった。

ご清聴ありがとうございました。



人・街・自然・いきいき

中日本建設コンサルタント株式会社