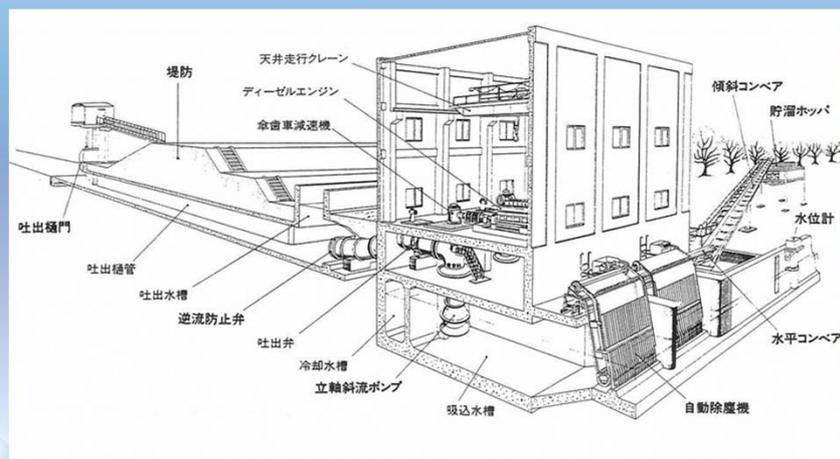


# オープンソースによる ポンプ吸込水槽の流れ解析

(株)電業社機械製作所 生産本部  
技術研究所 研究グループ  
富松 重行

## 排水ポンプ場



## オープンソースを利用した解析

市販ソフトは並列ライセンス料が高価なため、大規模解析の実施が難しい場合が多い。

⇒オープンソースCFDを利用して市販ソフトの解析結果の妥当性をチェックできないか。



オープンソースCFDを利用するメリット

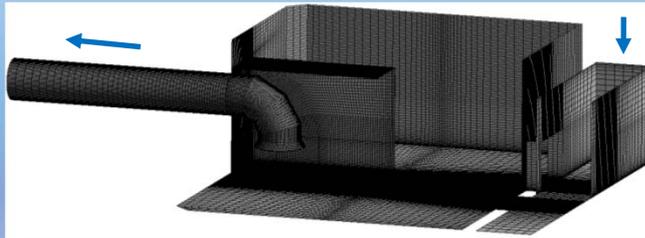
並列ライセンス料がフリー

⇒ハードがあれば大規模非定常解析が比較的容易に行える。

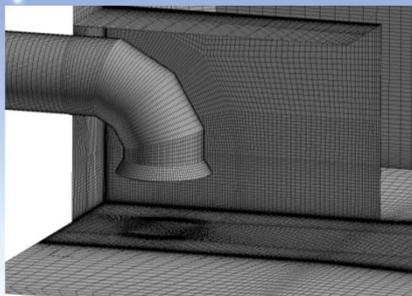


市販ソフトの並列ライセンス料は高価なため、大規模非定常解析の実施は困難を伴う。

## メッシュモデル



- ・メッシュ作成ソフト:  
Gridgen
- ・六面体要素
- ・節点数: 約130万



水中渦(1/10スケールモデル試験)

## FrontFlow/Blueの解析条件

### ・LES

乱流モデル: ダイナミックスマゴリンスキーモデル

圧力方程式解法: Fractional-Step法

運動方程式解法:

クランク・ニコルソン法 + Balancing Tensor Diffusivity (BTD) 項

BTD項係数: 0.1

・時間刻み幅:  $1.0 \times 10^{-3}$  [s]

### ・境界条件等

流体: 水 (25°C) 圧力: 大気圧 (1013 [hPa])

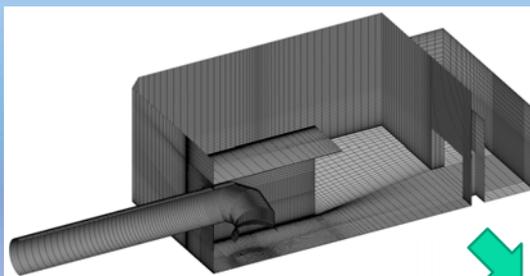
入口境界条件:  $1.02 \times 10^4$  [m<sup>3</sup>/h]

流出条件: 自由流出

壁面: 滑りなし、水面: 滑りあり

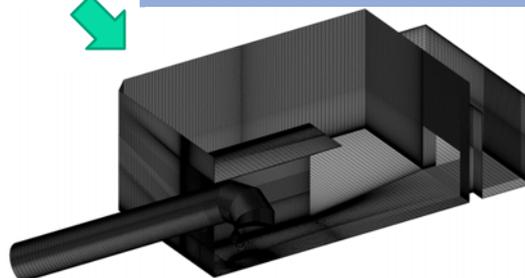
※ターボ機械協会HPCプロジェクトのクラスタを利用

## メッシュのリファイン



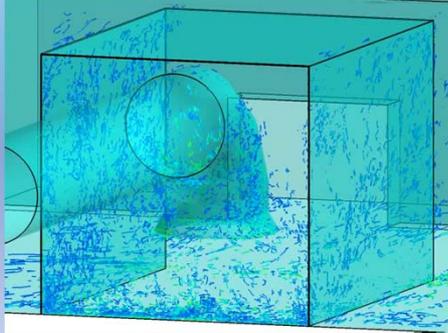
オリジナル

メッシュ数は8倍に

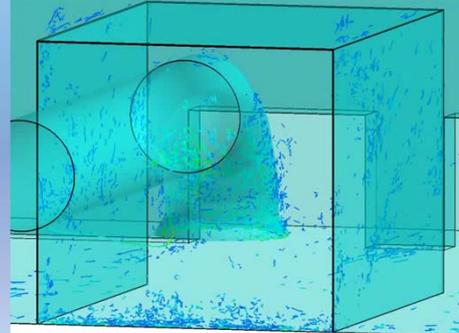


リファイン1回

## 渦中心線による可視化



オリジナル



リファイン1回

※渦中心線はFieldViewの「Vortex Core: Vorticity Alignment」機能により作成



## ここまでのまとめ

・試験では水槽床面から水中渦が発生したのに対して、解析では側壁からの水中渦の発生が予測された。この違いは、試験装置の側壁が木製、床面が鉄板に塗料を塗ったものであるため摩擦係数が違うこと、また試験装置の大きさが約2 m × 3 mと大きく、試験装置の水平が精度よく出ていないことなどが原因であると考えられる。

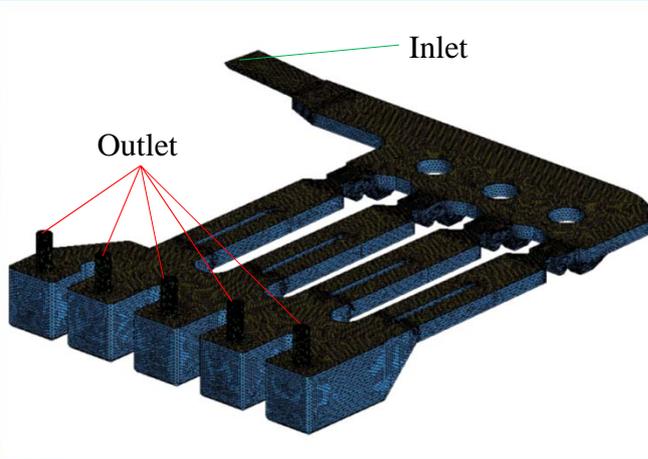
・現在のコンピュータパフォーマンスであれば、LESによる解析でも実業務に対応できる時間内で計算できる。

### 課題

解析担当者がオープンソースに精通しているとは限らない。

⇒市販ソフトに比べてオープンソースの場合はソフトの使い方だけでも教えることが多く、人材育成が難しい。

# 解析モデル



ICEMで作成

手早く解析を実施する場合は、ヘキサよりテトラ+プリズムで作成したメッシュモデルを使用したい。

OpenFOAM、FFRはRANSモデルが豊富にある。

要素数: 5,069,504      節点数: 1,321,041  
作動流体: 水

# ANSYS CFXによる解析

```

~~~~~
| Timescale Information |
|-----|
| Equation | Type | Timescale |
|-----|
| U-Mom | Auto Timescale | 7.22923E-01 |
| V-Mom | Auto Timescale | 7.22923E-01 |
| W-Mom | Auto Timescale | 7.22923E-01 |
|-----|
| K-TurbKE | Auto Timescale | 7.22923E-01 |
| E-Diss.K | Auto Timescale | 7.22923E-01 |
|-----|
OUTER LOOP ITERATION = 106      CPU SECONDS = 3.030E+04
|-----|
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
|-----|
| U-Mom | 0.95 | 1.1E-03 | 7.5E-02 | 4.4E-02 OK |
| V-Mom | 0.90 | 8.8E-04 | 9.8E-02 | 4.7E-02 OK |
| W-Mom | 0.93 | 1.8E-03 | 1.3E-01 | 1.1E-01 ok |
| P-Mass | 0.89 | 1.1E-04 | 1.9E-02 | 14.1 9.4E-02 OK |
|-----|
| K-TurbKE | 0.35 | 4.3E-03 | 4.9E-01 | 5.9 3.7E-02 OK |
| E-Diss.K | 0.15 | 1.5E-03 | 1.0E+00 | 7.7 9.6E-04 OK |
|-----|
~~~~~
    
```

← Timescaleの値が大きい。

CFXは連成AMGソルバー (Coupled Algebraic Multi-Grid Solver)。

RANSの定常解析は速い。



FFR、OpenFOAMでは発散するような値。

# OpenFOAMによる解析

```

Time = 0.069

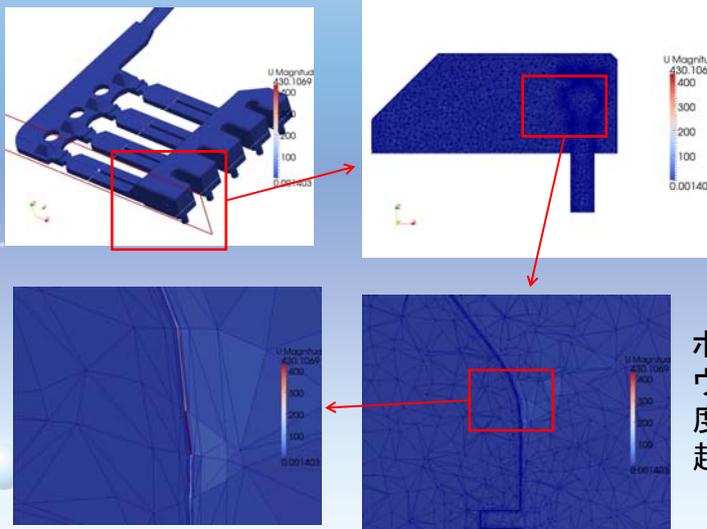
DILUPBiCG: Solving for Ux, Initial residual = 0.524448, Final residual = 0.00285803, No Iterations 1
DILUPBiCG: Solving for Uy, Initial residual = 0.446705, Final residual = 0.00453069, No Iterations 3
DILUPBiCG: Solving for Uz, Initial residual = 0.241567, Final residual = 0.0103922, No Iterations 1
DICPCG: Solving for p, Initial residual = 0.94902, Final residual = 0.140841, No Iterations 1001
time step continuity errors : sum local = 4.75942e+06, global = -956.517, cumulative = -958.532
DILUPBiCG: Solving for epsilon, Initial residual = 0.68205, Final residual = 0.0227382, No Iterations 6
bounding epsilon, min: -5.46812e+12 max: 4.12496e+28 average: 1.51356e+23
DILUPBiCG: Solving for k, Initial residual = 0.705153, Final residual = 0.0108126, No Iterations 2
bounding k, min: -2.24824e+07 max: 1.42355e+20 average: 4.90236e+14
ExecutionTime = 808.82 s ClockTime = 815 s

Time = 0.07

DILUPBiCG: Solving for Ux, Initial residual = 0.585523, Final residual = 0.00030071, No Iterations 1
DILUPBiCG: Solving for Uy, Initial residual = 0.470695, Final residual = 0.000282141, No Iterations 1
DILUPBiCG: Solving for Uz, Initial residual = 0.511521, Final residual = 0.00257326, No Iterations 1
DICPCG: Solving for p, Initial residual = nan, Final residual = nan, No Iterations 1001
time step continuity errors : sum local = nan, global = nan, cumulative = nan
DILUPBiCG: Solving for epsilon, Initial residual = nan, Final residual = nan, No Iterations 1001
DILUPBiCG: Solving for k, Initial residual = nan, Final residual = nan, No Iterations 1001
[5]
[5]
[5] --> FOAM FATAL IO ERROR:
[5] wrong token type - expected Scalar, found on line 0 the word 'nan'
    
```

← 発散  
↓  
laminarでも発散

# OpenFOAMによる解析の発散場所



ポンプベルマウス周りで、速度が400 m/sを超えている。

# メッシュ品質

OpenFOAMの“checkMesh -constant”コマンドより、

```

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-23.6896 -18.6143 -5.38446) (17.5355 23.873 2.25106)
Mesh (non-empty, non-wedge) directions (1 1 1)
Mesh (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (2.07541e-18 -6.37981e-18 8.82733e-16) OK.
Max cell openness = 5.31904e-15 OK.
Max aspect ratio = 230.304 CK.
Minimum face area = 1.3863e-08. Maximum face area = 0.0623246. Face area magnitudes OK.
Min volume = 1.30148e-11. Max volume = 0.00518811. Total volume = 1844.06. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 83.8694 average: 19.2696
*Number of severely non-orthogonal faces: 6274.
Non-orthogonality check OK.
<<Writing 6274 non-orthogonal faces to set nonOrthoFaces
Face pyramids OK.
Max skewness = 3.74969 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

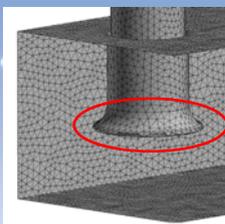
End
    
```

“OK”となっているが  
赤矢印の項目があ  
やしい。



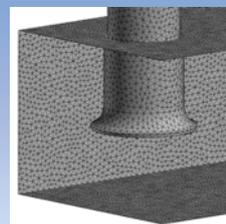
特に最大非直交性。  
(具体的に調べたわけではなく、経験論  
ですが、) OpenFOAMは70度程度に  
なるようにメッシュモデルを作らないと  
計算できない模様。

# ICEMとPointwiseによるメッシング



ベルマウス周りの形状  
が崩れている。

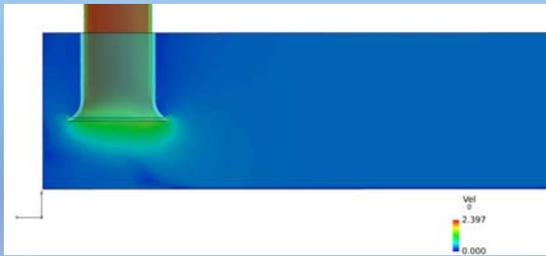
メッシュを作成をする際  
に、担当者の習熟度に  
依存するような作業はな  
るべく行わなかった。



ICEM  
要素数: 約284万  
節点数: 約73万

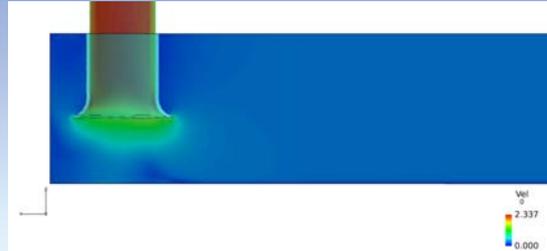
Pointwise (Delaunay)  
要素数: 約258万  
節点数: 約84万

# NuFD FFRの解析結果(速度分布)



乱流モデル:SST  
設定はデフォルトのまま

Pointwise (Delaunay)



ICEM

# メッシュ品質 (Pointwise)

OpenFOAMの“checkMesh -constant”コマンドより、

```

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-0.16 -2.89 0) (0.14 0.11 1.1)
Mesh (non-empty, non-wedge) directions (1 1 1)
Mesh (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (1.33507e-18 2.86084e-17 1.46609e-15) OK.
Max cell openness = 1.03253e-15 OK.
Max aspect ratio = 100.078 CK.
Minimum face area = 1.52232e-07. Maximum face area = 0.000168559. Face area magnitudes OK.
Min volume = 1.56003e-10. Max volume = 6.97181e-07. Total volume = 0.213574. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 87.5525 average: 15.4572
*Number of severely non-orthogonal faces: 651.
Non-orthogonality check OK.
<<Writing 651 non-orthogonal faces to set nonOrthoFaces
Face pyramids OK.
Max skewness = 2.69833 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.
    
```

青矢印の項目が出たらNGということ？

Mesh OK.

End

OpenFOAMによる解析は発散。  
非直交性が問題か？

# メッシュ品質 (ICEM)

OpenFOAMの“checkMesh -constant”コマンドより、

```
~~~~~  
Checking geometry...  
Overall domain bounding box (-0.16 -2.89 0) (0.14 0.11 1.1)  
Mesh (non-empty, non-wedge) directions (1 1 1)  
Mesh (non-empty) directions (1 1 1)  
Boundary openness (-1.4423e-16 2.31411e-17 -9.49614e-16) OK.  
Max cell openness = 6.8875e-16 OK  
Max aspect ratio = 17.367 OK  
Minimum face area = 6.93899e-07 Maximum face area = 0.000129595. Face area magnitudes OK.  
Min volume = 6.82811e-10. Max volume = 4.00101e-07. Total volume ≈ 0.213558. Cell volumes OK.  
Mesh non-orthogonality Max: 66.4472 average: 11.8022  
Non-orthogonality check OK.  
Face pyramids OK.  
Max skewness = 2.53067 OK  
Coupled point location match (average 0) OK.
```

Mesh OK.

End

OpenFOAMによる解析は収束。

# まとめ

- ・ロバスト性はオープンソースCFDよりも市販CFDソフトのほうが上だが、計算を安定させるための処理がどの程度行われているのかが疑問(常に、結果に影響を与えない程度なのか?)。
- ・オープンソースCFDといっても、ソフトによってメッシュモデルとの相性、ロバスト性は異なる。
- ・オープンソースCFDには安定した計算と信頼性のため、形状の再現性とメッシュの粗密などコントロール性の高いメッシャーが必要である。