

チュートリアルの基本構造と粒子 流追跡ソルバを用いた地吹雪シ ミュレーションへの応用

柴田貴裕

2010/7/24

Contents

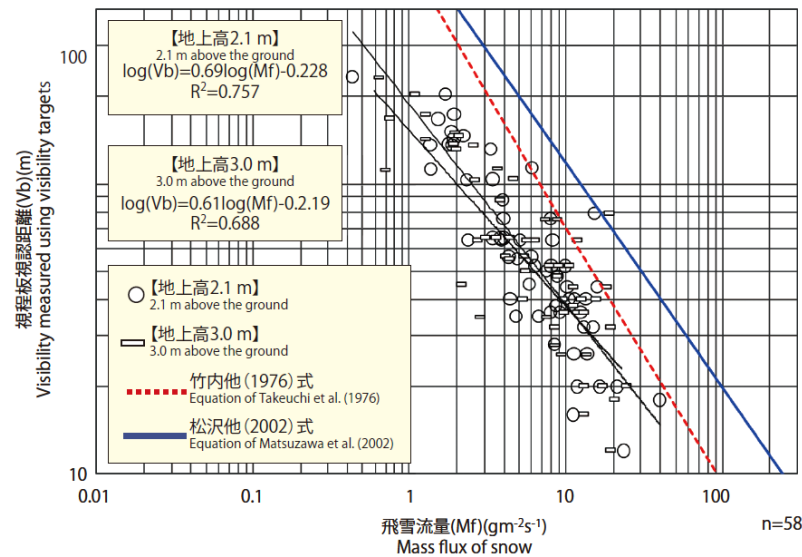
2

- 1 Introduction
- 2 **解析対象のモデル化**
- 3 **チュートリアルの基本構造**
- 4 **類似チュートリアルとその応用**
- 5 **計算実行**
- 6 **今後の課題**

1 Introduction

3

地吹雪下での視程の経験式

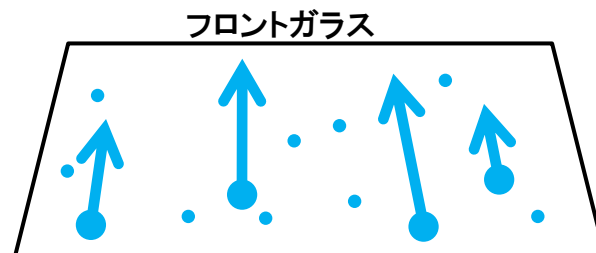
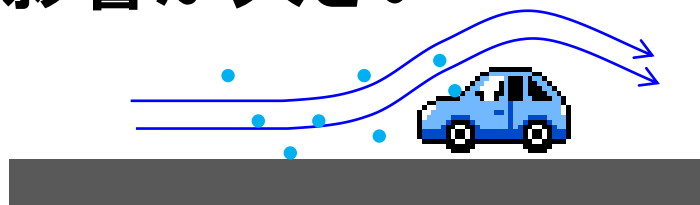


(2009寒地土木研究所パンフレットより)

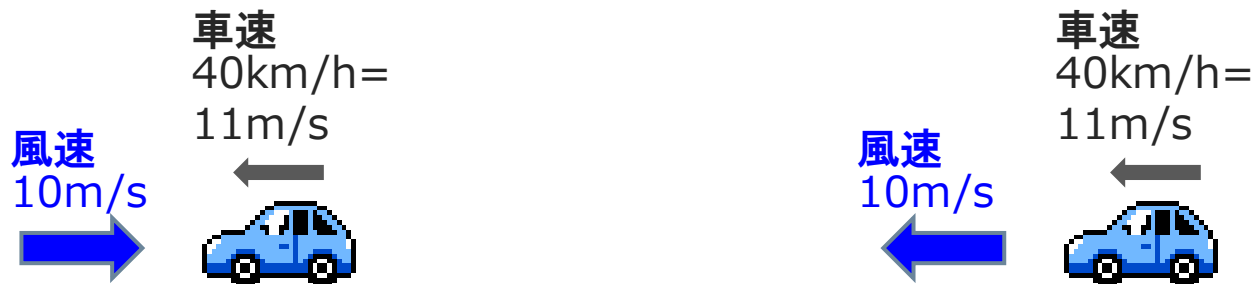
視程[m]は飛雪濃度[g/m^3]と風速[m/s]とで見積もられる

前頁の経験式では観測者は静止

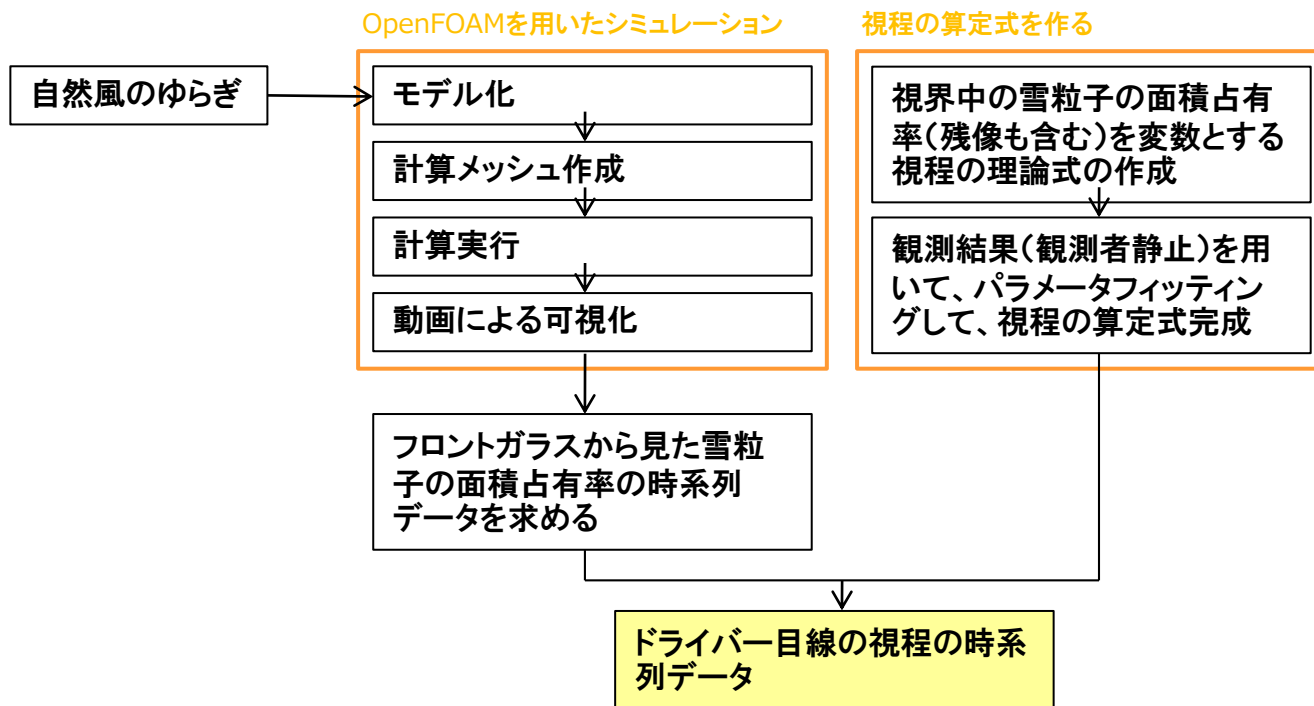
車のドライバーの場合、フロントガラスを横切る雪による影響が大きい



また同じ風速でも車の移動方向と風向の関係で視程が違ってくる



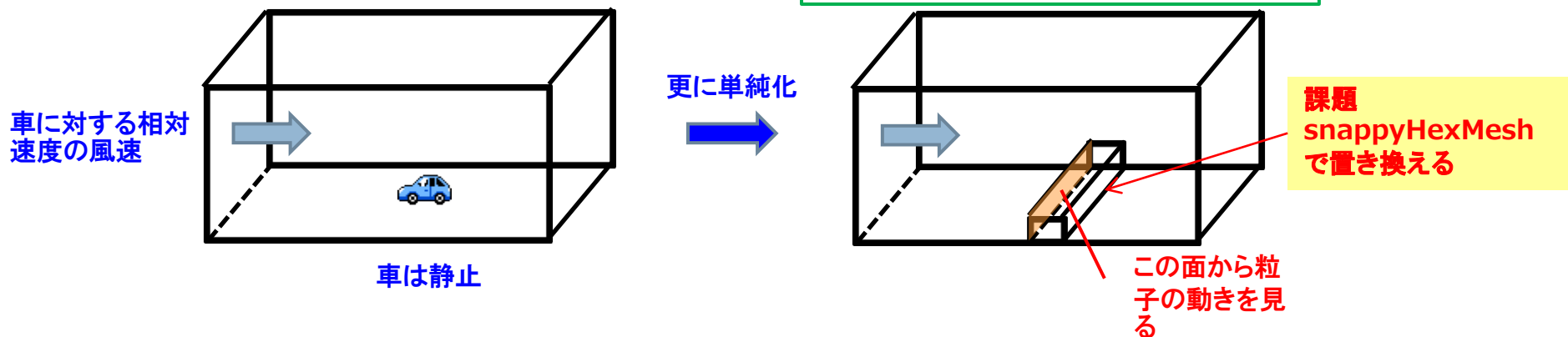
目標: ①ドライバー目線で地吹雪下での視程を計算する
②風のゆらぎも入れて視程のゆらぎを再現する



2 解析対象のモデル化

6

□ 空間領域



□ 計算スキーム

乱流の遷移過程



風はLESを使う

雪粒子は風と重力の両方を
受けながら運動



雪粒子はlagrangianソ
ルバを使う

チュートリアル
incompressible/pisoFoam
/les/pitzDailyを応用

課題



3 チュートリアルの基本構造

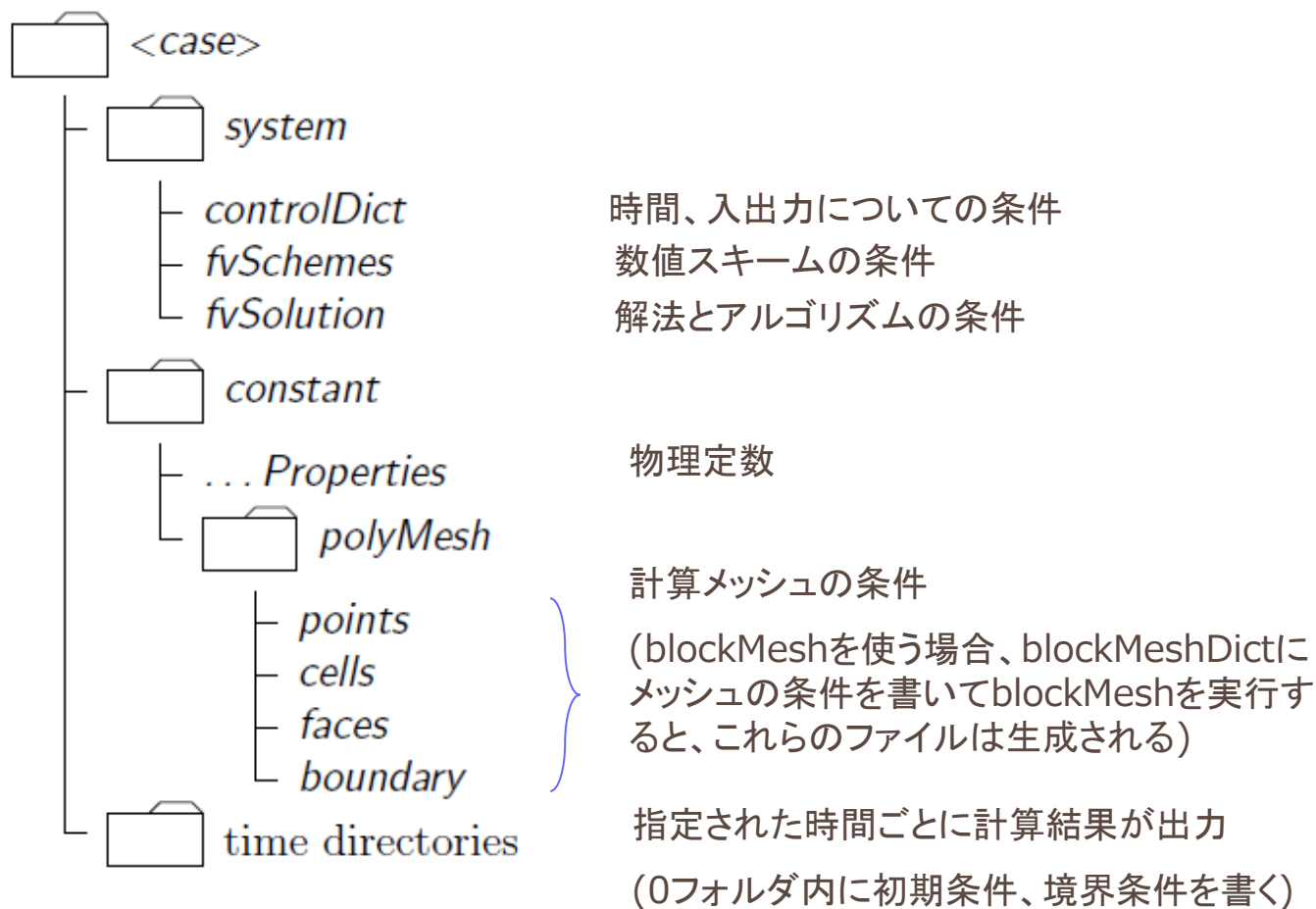
OpenFOAMには次のようなソルバがあり、それらを用いた応用例としてチュートリアルが用意されている

基礎的な CFD コード

laplacianFoam potentialFoam	固体の熱拡散のような単純なラプラス方程式を解く シンプルなポテンシャル流のコード、完全ナビエ・ストークスコードを解く際の保存された初期値の生成にも使用できる
scalarTransportFoam	パッシブスカラーの輸送方程式を解く
非圧縮性流れ boundaryFoam	1 次元の乱流用の定常状態ソルバで、通常、解析では流入口で境界層条件を発生させます。 チャンネル内流れ用の非圧縮 LES
channelFoam icoFoam nonNewtonianIcoFoam pimpleDyMFoam	非圧縮性、層流の速度-圧力ソルバ、非ニュートン流体も可 非ニュートン流体の非圧縮性、層流の非定常ソルバ ダイナミックメッシュをもつニュートン流体の非圧縮性・乱流の PIMPLE (SIMPLE と PISO の融合) アルゴリズムによる非定常ソルバ
pimpleFoam	PIMPLE (SIMPLE と PISO の融合) アルゴリズムによる非圧縮性・乱流の、大きな時間ステップの非定常ソルバ
pisoFoam shallowWaterFoam simpleFoam	非圧縮性流れの非定常ソルバ 回転を伴う非粘性浅水方程式の非定常ソルバ 非圧縮性、乱流の定常状態ソルバ
圧縮性流れ rhoCentralFoam	Kurganov と Tadmor の中央風上スキームに基づいた密度ベースの圧縮性ソルバ
rhoPimpleFoam	冷暖房やそれに似た問題のための圧縮性の層流および乱流用の非定常ソルバ
rhoPisoFoam rhoPorousSimpleFoam	圧縮性の層流および乱流用の非定常 PISO ソルバ RANS 乱流モデルと、多孔性を陰的または陽的に扱う、圧縮性流体のための非定常乱流ソルバ
rhoPsonicFoam rhoSimpleFoam	圧力・密度ベースの圧縮性ソルバ 層流および RANS による乱流の圧縮性流体用定常状態 SIMPLE ソルバ
rhoSonicFoam sonicDyMFoam	密度ベースの圧縮性ソルバ 移動メッシュを伴う、遷音速または超音速用の、層流および乱流の圧縮性気体用ソルバ
sonicFoam sonicLiquidFoam	遷音速または超音速用の、層流および乱流の圧縮性気体ソルバ 遷音速または超音速用の、層流圧縮性液体ソルバ
多層流 bubbleFoam cavitatingFoam	液体の中の気泡のように非圧縮分散性 2 相 2 流体ソルバ パトロロビック (順圧) 状態方程式に基づく非定常のキャピテーション用コード
compressibleInterDyMFoam	VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の圧縮性・等温 2 相流ソルバ、移動メッシュや、アダプティブ再メッシングも含めたメッシュトポロジの変化にも対応
compressibleInterFoam	VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の圧縮性・等温 2 相流ソルバ
interDyMFoam	VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性・等温 2 相流ソルバ、移動メッシュや、アダプティブ再メッシングも含めたメッシュトポロジの変化にも対応
interFoam	VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性・等温 2 相流ソルバ
interPhaseChangeFoam	相変化 (キャピテーションなど) を伴う、不混和流体の非圧縮性・等温 2 相流ソルバ、VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法を用いる。

multiphaseInterFoam	界面捕獲と、それぞれの相での接触角効果を考慮した非圧縮性 n 相流ソルバ
settlingFoam twoLiquidMixingFoam twoPhaseEulerFoam	分散相の設定シミュレーション用の非圧縮 2 相流コード 2 層の非圧縮性流れを混合したソルバ 液体の中の気体の泡のように分散した状態の 2 層の非圧縮性流れのシステム
直接数値シミュレーション (DNS) dnsFoam	直方体中の等方性乱流のための直接数値解法 (DNS) コード
燃焼 coldEngineFoam dieselEngineFoam dieselFoam engineFoam PDRFoam reactingFoam rhoReactingFoam	内燃機関のクールダウンのソルバ ディーゼルエンジン用噴射・燃焼用ソルバ ディーゼル噴射・燃焼用ソルバ エンジン内部の燃焼用ソルバ 乱流モデルを伴う圧縮性予混合または部分予混合燃焼用ソルバ 化学反応を伴う燃焼用ソルバ 密度ベースの熱力学パッケージによる化学反応を伴う燃焼用ソルバ
XiFoam	乱流モデルを伴う圧縮性予混合または部分予混合燃焼用コード
熱輸送と浮力駆動流れ buoyantBoussinesqPisoFoam buoyantBoussinesqSimpleFoam buoyantPisoFoam buoyantSimpleFoam buoyantSimpleRadiationFoam	浮力を伴う非圧縮性乱流用非定常ソルバ 浮力を伴う非圧縮性乱流用定常状態ソルバ 換気・熱輸送のための、浮力を伴う圧縮性乱流用非定常ソルバ 浮力を伴う圧縮性乱流用定常状態ソルバ 放射を考慮した、換気・熱輸送のための、浮力を伴う圧縮性乱流用定常状態ソルバ
chtMultiRegionFoam	個体領域と流体領域の間の熱輸送を連成するため、heatConductionFoam と buoyantFoam を融合させたもの
粒子追跡流 coalChemistryFoam porousExplicitSourceReactingParcelFoam reactingParcelFoam uncoupledKinematicParcelFoam	石炭・石灰石パーセルの噴射を伴う圧縮性乱流用非定常ソルバ 陽的なソースを含む、多孔質媒体のラグランジュ型パーセルの反応を伴う圧縮性層流・乱流用非定常 PISO ソルバ ラグランジュ型パーセルの反応を伴う圧縮性層流・乱流用非定常 PISO ソルバ 単一の運動学的粒子雲の受動的輸送用の非定常ソルバ
分子動力学法 mdEquilibrationFoam mdFoam	分子動力学系の平衡化や前処理を行う 流体力学のための分子動力学ソルバ
直接シミュレーション・モンテ・カルロ法 dsmcFoam	直接シミュレーション・モンテ・カルロ (DSMC) 法
電磁流体 electrostaticFoam mhdFoam	静電方程式ソルバ 磁場の影響によって誘発される非圧縮性層流の電磁流体 (MHD) 用ソルバ
固体力学解析 solidDisplacementFoam solidEquilibriumDisplacementFoam	選択が自由な熱拡散と熱応力をもった線形弾性や固体の微小ひずみの非定常分離有限体積ソルバ 固体の線形弾性や微小ひずみの定常状態分離有限体積ソルバ、熱拡散と熱応力も扱える。
金融工学 financialFoam	物価に対する Black-Scholes 方程式を解く

ケースフォルダの基本構造

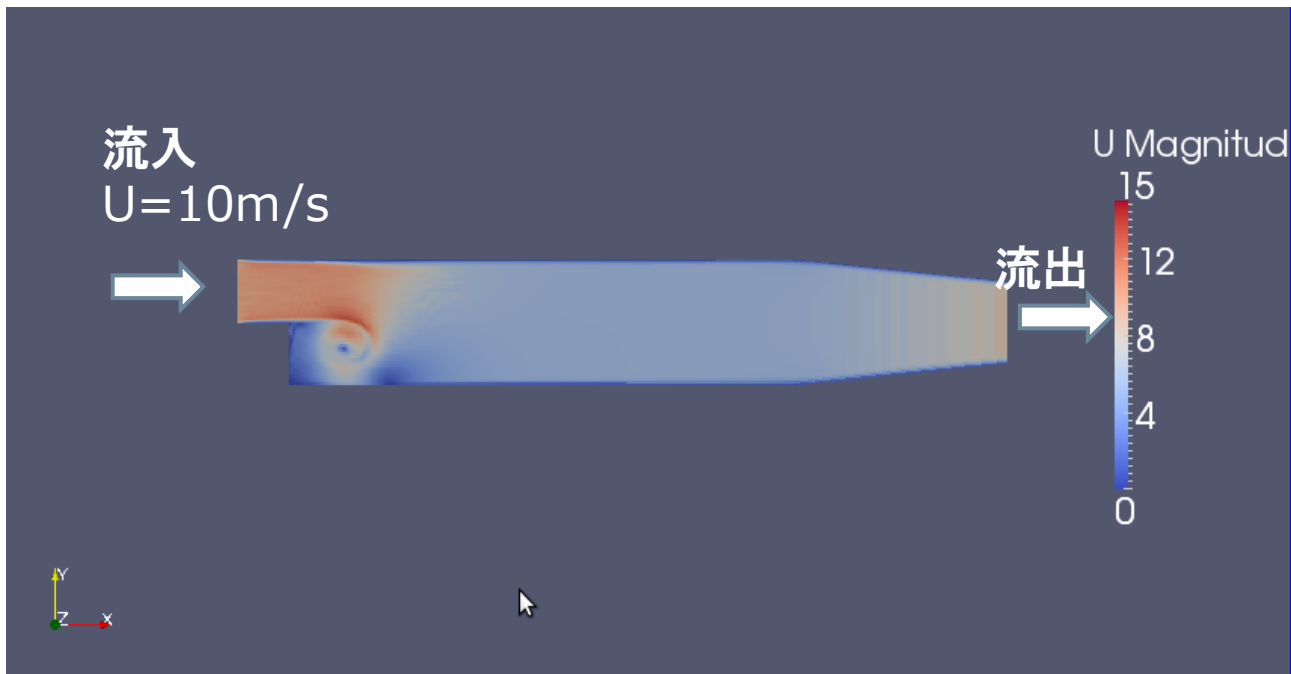


4 類似チュートリアルとその応用

9

□ pitzDaily

LESを用いた2次元非定常シミュレーション



① 計算メッシュに関する条件 -blockMeshDict

```

*-----* C++ *-----*
%%
%%      F ield      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
%%      O peration  Version: 1.7.0
%%      A nd        Web: www.OpenFOAM.com
%%      M anipulation
*-----*

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       blockMeshDict;
}

// ***** //

convertToMeters 0.001;

vertices
(
  0 (-20.6 0 -0.5)
  1 (-20.6 3 -0.5)
  2 (-20.6 12.7 -0.5)
  3 (-20.6 25.4 -0.5)
  4 (0 -25.4 -0.5)
  5 (0 -5 -0.5)
  6 (0 0 -0.5)
  7 (0 3 -0.5)
  8 (0 12.7 -0.5)
  9 (0 25.4 -0.5)
  10 (206 -25.4 -0.5)
  11 (206 -8.5 -0.5)
  12 (206 0 -0.5)
  13 (206 6.5 -0.5)
  14 (206 17 -0.5)
  15 (206 25.4 -0.5)
  16 (290 -16.6 -0.5)
  17 (290 -6.3 -0.5)
  18 (290 0 -0.5)
  19 (290 4.5 -0.5)
  20 (290 11 -0.5)
  21 (290 16.6 -0.5)

```

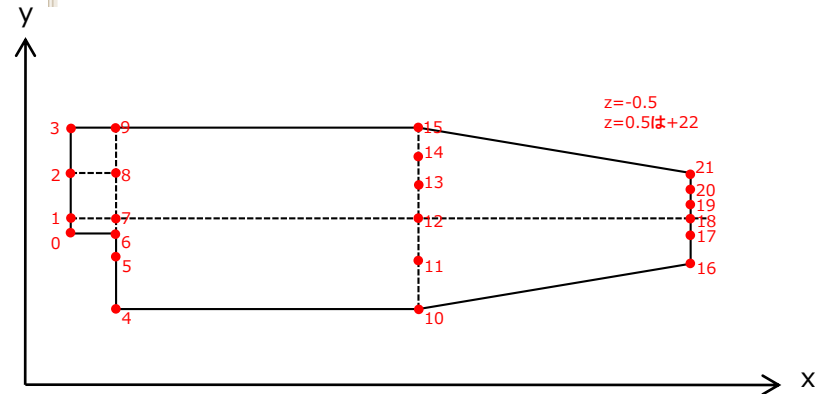
実スケールと座標の比

ポイントの定義

```

  22 (-20.6 0 0.5)
  23 (-20.6 3 0.5)
  24 (-20.6 12.7 0.5)
  25 (-20.6 25.4 0.5)
  26 (0 -25.4 0.5)
  27 (0 -5 0.5)
  28 (0 0 0.5)
  29 (0 3 0.5)
  30 (0 12.7 0.5)
  31 (0 25.4 0.5)
  32 (206 -25.4 0.5)
  33 (206 -8.5 0.5)
  34 (206 0 0.5)
  35 (206 6.5 0.5)
  36 (206 17 0.5)
  37 (206 25.4 0.5)
  38 (290 -16.6 0.5)
  39 (290 -6.3 0.5)
  40 (290 0 0.5)
  41 (290 4.5 0.5)
  42 (290 11 0.5)
  43 (290 16.6 0.5)
);

```



計算領域を直方体に分割

```

blocks
(
  hex (0 6 7 1 22 28 29 23) (18 7 1) simpleGrading (0.5 1.8 1)
  hex (1 7 8 2 23 29 30 24) (18 10 1) simpleGrading (0.5 4 1)
  hex (2 8 9 3 24 30 31 25) (18 13 1) simpleGrading (0.5 0.25 1)
  hex (4 10 11 5 26 32 33 27) (180 18 1) simpleGrading (4 1 1)
  hex (5 11 12 6 27 33 34 28) (180 9 1) edgeGrading (4 4 4 4 0.5 1 1 0.5 1 1 1 1)
  hex (6 12 13 7 28 34 35 29) (180 7 1) edgeGrading (4 4 4 4 1.8 1 1 1.8 1 1 1 1)
  hex (7 13 14 8 29 35 36 30) (180 10 1) edgeGrading (4 4 4 4 4 1 1 4 1 1 1 1)
  hex (8 14 15 9 30 36 37 31) (180 13 1) simpleGrading (4 0.25 1)
  hex (10 16 17 11 32 38 39 33) (25 18 1) simpleGrading (2.5 1 1)
  hex (11 17 18 12 33 39 40 34) (25 9 1) simpleGrading (2.5 1 1)
  hex (12 18 19 13 34 40 41 35) (25 7 1) simpleGrading (2.5 1 1)
  hex (13 19 20 14 35 41 42 36) (25 10 1) simpleGrading (2.5 1 1)
  hex (14 20 21 15 36 42 43 37) (25 13 1) simpleGrading (2.5 0.25 1)
);

```

```

edges
(
);

patches
(
  patch inlet      流入口
  (
    (0 22 23 1)
    (1 23 24 2)
    (2 24 25 3)
  )
  patch outlet     流出口
  (
    (16 17 39 38)
    (17 18 40 39)
    (18 19 41 40)
    (19 20 42 41)
    (20 21 43 42)
  )
  wall upperWall   上壁
  (
    (3 25 31 9)
    (9 31 37 15)
    (15 37 43 21)
  )
  wall lowerWall   下壁
  (
    (0 6 28 22)
    (6 5 27 28)
    (5 4 26 27)
    (4 10 32 26)
    (10 16 38 32)
  )
);

```

内側から見て時計回りに並べる

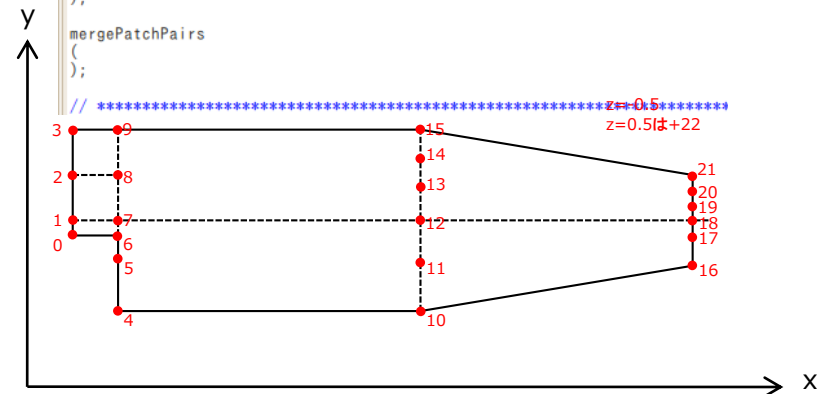
```

empty frontAndBack
(
  (22 28 29 23)
  (23 29 30 24)
  (24 30 31 25)
  (26 32 33 27)
  (27 33 34 28)
  (28 34 35 29)
  (29 35 36 30)
  (30 36 37 31)
  (32 38 39 33)
  (33 39 40 34)
  (34 40 41 35)
  (35 41 42 36)
  (36 42 43 37)
  (0 1 7 6)
  (1 2 8 7)
  (2 3 9 8)
  (4 5 11 10)
  (5 6 12 11)
  (6 7 13 12)
  (7 8 14 13)
  (8 9 15 14)
  (10 11 17 16)
  (11 12 18 17)
  (12 13 19 18)
  (13 14 20 19)
  (14 15 21 20)
);

mergePatchPairs
(
);

```

z軸に鉛直な境界領域(3次元計算の場合には、壁など定義をする)



② 時間・入出力の条件 -controlDict

```

/*----- C++ -----*/
%%      F ield      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
%%      O peration  Version: 1.7.0
%%      A nd        Web: www.OpenFOAM.com
%%      M anipulation
*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// *****

application  pisoFoam;   用いるソルバ
startFrom    startTime;
startTime    0;
stopAt       endTime;
endTime      0.01;
deltaT       1e-05;
writeControl timeStep;
writeInterval 100;
purgeWrite   0;
writeFormat  ascii;
writePrecision 6;
writeCompression uncompressed;
timeFormat   general;
writeFormat  ascii;
writePrecision 6;
writeCompression uncompressed;
timeFormat   general;
timePrecision 6;
runTimeModifiable yes;

```

```

functions
{
  probes
  {
    type          probes;
    functionObjectLibs ("libsampling.so");
    enabled        true;
    outputControl  timeStep;
    outputInterval 1;
    probeLocations
    (
      ( 0.0254 0.0253 0 )
      ( 0.0508 0.0253 0 )
      ( 0.0762 0.0253 0 )
      ( 0.1016 0.0253 0 )
      ( 0.127 0.0253 0 )
      ( 0.1524 0.0253 0 )
      ( 0.1778 0.0253 0 )
    );
  }
  fields
  {
    p
  }
  fieldAverage1
  {
    type          fieldAverage;
    functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");
    enabled        true;
    outputControl  outputTime;
    fields
    (
      U
      {
        mean          on;
        prime2Mean    on;
        base           time;
      }
      p
      {
        mean          on;
        prime2Mean    on;
        base           time;
      }
    );
  }
}
// *****

```

③ 数値スキームの条件 -fvSchemes

```

/*-----* C++ */
%%      Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
%%      Operation  Version: 1.7.0
%%      And        Web: www.OpenFOAM.com
%%      Manipulation
*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
  default      backward;
}

gradSchemes
{
  default      Gauss linear;
  grad(p)      Gauss linear;
  grad(U)      Gauss linear;
}

divSchemes
{
  default      none;
  div(phi,U)   Gauss linear;
  div(phi,k)   Gauss limitedLinear 1;
  div(phi,B)   Gauss limitedLinear 1;
  div(phi,nuTilda) Gauss limitedLinear 1;
  div(B)       Gauss linear;
  div((nuEff*dev(grad(U).T()))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
  default      none;
  laplacian(nuEff,U) Gauss linear corrected;
  laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
  laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
  laplacian(DBEff,B) Gauss linear corrected;
  laplacian(DnuTildaEff,nuTilda) Gauss linear corrected;
}

```

```

interpolationSchemes
{
  default      linear;
  interpolate(U) linear;
}

snGradSchemes
{
  default      corrected;
}

fluxRequired
{
  default      no;
  p            ;
}
// *****

```

④ 解法とアルゴリズムの条件 -fvSolution

```

===== C++ =====
%% Field Operation      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
%% / And                 Version: 1.7.0
%% \ Manipulation       Web: www.OpenFOAM.com
%%

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSolution;
}

// ***** //

solvers
{
  p
  {
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-06;
    relTol      0.05;
  }

  pFinal
  {
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-06;
    relTol      0;
  }

  U
  {
    solver      PBiCG;
    preconditioner DILU;
    tolerance   1e-05;
    relTol      0;
  }

  k
  {
    solver      PBiCG;
    preconditioner DILU;
    tolerance   1e-05;
    relTol      0;
  }
}

```

```

U
{
  solver      PBiCG;
  preconditioner DILU;
  tolerance   1e-05;
  relTol      0;
}

k
{
  solver      PBiCG;
  preconditioner DILU;
  tolerance   1e-05;
  relTol      0;
}

B
{
  solver      PBiCG;
  preconditioner DILU;
  tolerance   1e-05;
  relTol      0;
}

nuTilda
{
  solver      PBiCG;
  preconditioner DILU;
  tolerance   1e-05;
  relTol      0;
}

}

PISO
{
  nCorrectors 2;
  nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

// ***** //

```

⑤ 初期条件・境界条件 -0フォルダ

```

=====
¥¥ / F i e l d           OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
¥¥ / O p e r a t i o n   Version: 1.7.0
¥¥ / A n d                Web: www.OpenFOAM.com
¥¥ / M a n i p u l a t i o n
=====
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        voVectorField;
  object       U;
}
// *****

dimensions     [0 1 -1 0 0 0];
internalField  uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  inlet
  {
    type          turbulentInlet;
    referenceField uniform (10 0 0);
    fluctuationScale (0.02 0.01 0.01);
    value         uniform (10 0 0);
  }

  outlet
  {
    type          inletOutlet;
    inletValue    uniform (0 0 0);
    value         uniform (0 0 0);
  }

  upperWall
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }

  lowerWall
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }
}

```

すべての変数に対して用意する

流入速度

```

frontAndBack
{
  type          empty;
}
// *****

```

□ 応用

計算メッシュ(blockMeshDict)と初期条件・境界条件(0フォルダ)を変更

計算メッシュ

```

=====
Field Operation
And Manipulation
OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Version: 1.7.0
Web: www.OpenFOAM.com
-----
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       blockMeshDict;
}
// *****

convertToMeters 0.00|;

vertices
(
  0 (0 0 0)
  1 (30 0 0)
  2 (32 0 0)
  3 (50 0 0)
  4 (0 1 0)
  5 (30 1 0)
  6 (32 1 0)
  7 (50 1 0)
  8 (0 10 0)
  9 (30 10 0)
  10 (32 10 0)
  11 (50 10 0)
  12 (0 0 10)
  13 (30 0 10)
  14 (32 0 10)
  15 (50 0 10)
  16 (0 1 10)
  17 (30 1 10)
  18 (32 1 10)
  19 (50 1 10)
  20 (0 10 10)
  21 (30 10 10)
  22 (32 10 10)
  23 (50 10 10)
);

blocks
(
  hex (0 1 5 4 12 13 17 16) (30 2 10) simpleGrading (1 1 1)
  hex (2 3 7 6 14 15 19 18) (18 2 10) simpleGrading (1 1 1)
  hex (4 5 9 8 16 17 21 20) (30 18 10) simpleGrading (1 1 1)
  hex (5 6 10 9 17 18 22 21) (2 18 10) simpleGrading (1 1 1)
  hex (6 7 11 10 18 19 23 22) (18 18 10) simpleGrading (1 1 1)
);

```

```

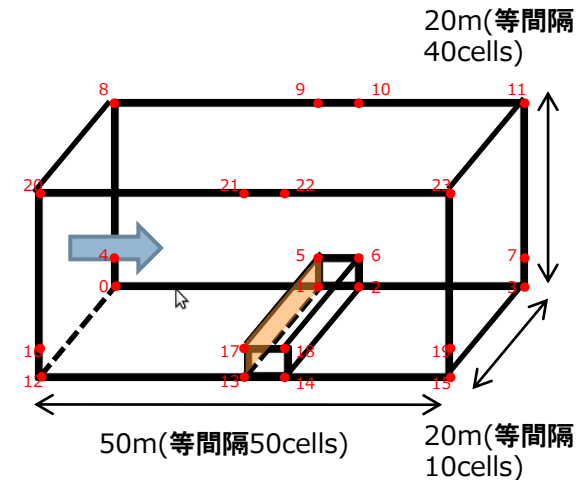
edges
(
);

patches
(
  patch inlet
  (
    (0 12 16 4)
    (4 16 20 8)
  )
  patch outlet
  (
    (3 7 19 15)
    (7 11 23 19)
  )
  patch outlet
  (
    (3 7 19 15)
    (7 11 23 19)
  )
  wall lowerWall
  (
    (0 1 13 12)
    (5 6 18 17)
    (2 14 18 6)
    (2 3 15 14)
  )
  wall upperWall
  (
    (8 20 21 9)
    (9 21 22 10)
    (10 22 23 11)
  )
  wall sideWall
  (
    (0 4 5 1)
    (2 6 7 3)
    (4 8 9 5)
    (5 9 10 6)
    (6 10 11 7)
    (12 16 17 13)
    (14 18 19 15)
    (16 20 21 17)
    (17 21 22 18)
    (18 22 23 19)
  )
  wall window
  (
    (1 5 17 13)
  )
);

mergePatchPairs
(
);

// *****

```



初期条件・境界条件

```

/*====*- C++ -*====
%%      F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
%%      O p e r a t i o n | Version: 1.7.0
%%      A n d           | Web: www.OpenFOAM.com
%%      M a n i p u l a t i o n
*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type            turbulentInlet;
        referenceField   uniform (10 0 0);
        fluctuationScale (0.02 0.01 0.01);
        value            uniform (10 0 0);
    }

    outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform (0 0 0);
        value           uniform (0 0 0);
    }

    upperWall
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }

    lowerWall
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
}

```

```

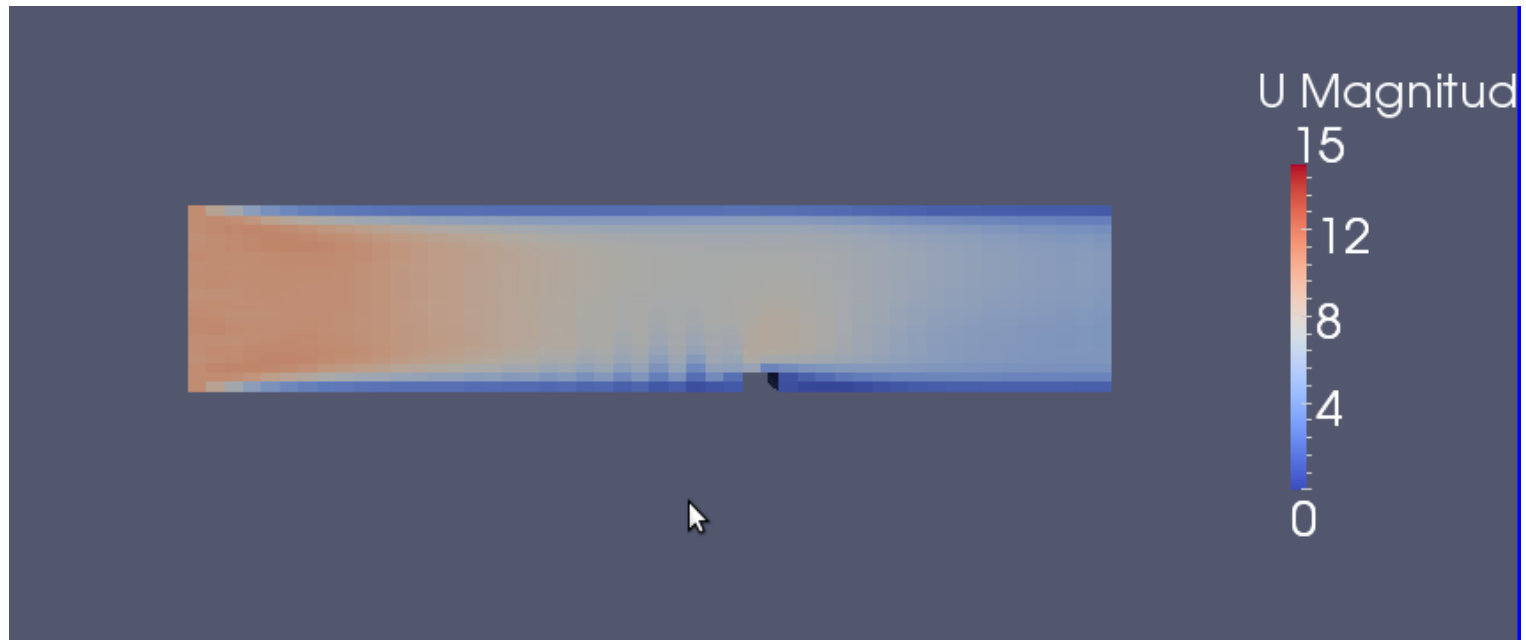
    sideWall
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
    window
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0);
    }
}
// ..... //

```

5 計算実行

18

$\Delta t=0.01[s]$ で $t=10[s]$ の速度分布



課題
結果に対する検証が必要

6 今後の課題

19

- ① 計算メッシュの工夫
- ② 車をsnappyHexMeshで作る
- ③ 動画の視点の調整
- ④ Lagrangianソルバを使う