

# オープンCAE勉強会 @ 富山

## 第32回

---

～OpenFOAMの非ニュートンモデルチュートリアルと検証問題の実施～

秋山善克

# OpenFOAMに組み込まれている非ニュートンモデル

Src¥transportModels¥incompressible¥viscosityModels内

5

(

BirdCarreau

CrossPowerLaw

HerschelBulkley

Newtonian

powerLaw

)

BirdCarreau 
$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left\{ 1.0 + (k\dot{\gamma})^2 \right\}^{\frac{n-1.0}{2.0}}$$

CrossPowerLaw 
$$\eta = \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty})}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n} + \eta_{\infty}$$

HerschelBulkley 
$$\eta = \min \left( \eta_0, \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \right)$$

Newtonian 
$$\eta = \eta_0$$

powerLaw 
$$\eta = \max \left( \eta_{\min}, \min \left( \eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1} \right) \right)$$

# transportProperties

Newtonian  $\eta = \eta_0$

```
nu nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1;
```

CrossPowerLaw  $\eta = \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n} + \eta_\infty$

CrossPowerLawCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 10000;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-6;  
  m m [0 0 1 0 0 0 0] 1.0;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 0.6;  
}
```

BirdCarreau  $\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left\{ 1.0 + (k\dot{\gamma})^2 \right\}^{\frac{n-1.0}{2.0}}$

BirdCarreauCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 10000;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;  
  k k [0 0 1 0 0 0 0] 1;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 0.4;  
}
```

HerschelBulkley  $\eta = \min \left( \eta_0, \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \right)$

HerschelBulkleyCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 10000;  
  tau0 tau0 [0 2 -2 0 0 0 0] 10000;  
  k k [0 2 -1 0 0 0 0] 1;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 0.4;  
}
```

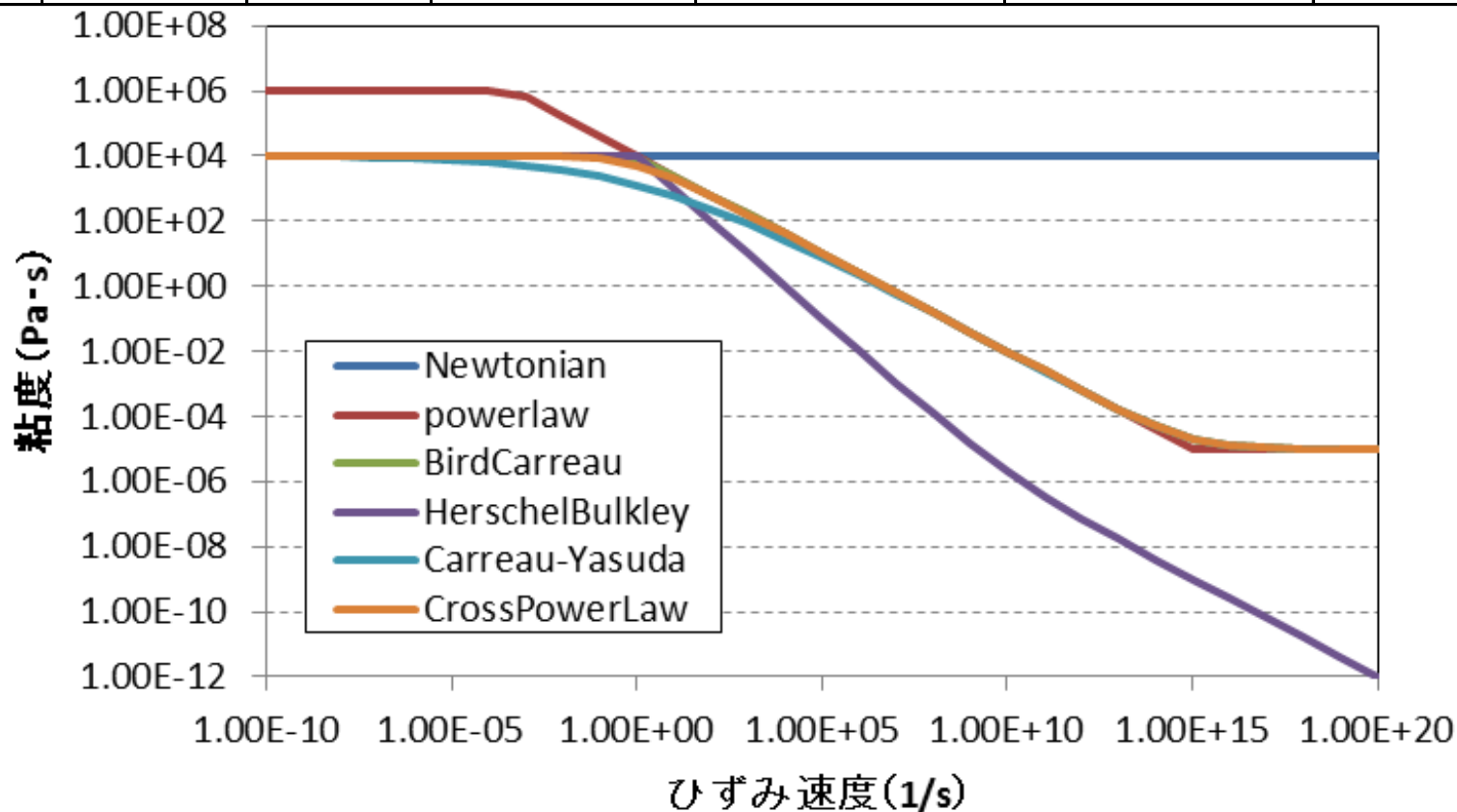
powerLaw  $\eta = \max \left( \eta_{\min}, \min \left( \eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1} \right) \right)$

powerLawCoeffs

```
{  
  k k [0 2 -1 0 0 0 0] 10000;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 0.4;  
  nuMin nuMin [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-08;  
  nuMax nuMax [0 2 -1 0 0 0 0] 1e8;  
}
```

# 非ニュートンモデルの比較

	Newtonian	powerlaw	BirdCarreau	HerschelBulkley	Carreau-Yasuda	CrossPowerLaw
$\eta_0$	1.00E+04	1.00E+06	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04
$\eta_\infty$		1.00E-05	1.00E-05		1.00E-05	1.00E-05
$\tau_0$				1.00E+04		
k		10000	1	1	1	
m						1
n		0.4	0.4	0.4	0.4	0.6
a					0.2	



# nonNewtonianIcoFoam

非定常/非ニュートン流体の層流ソルバー

チュートリアル

~/tutorials/incompressible/nonNewtonianIcoFoam/offsetCylinder

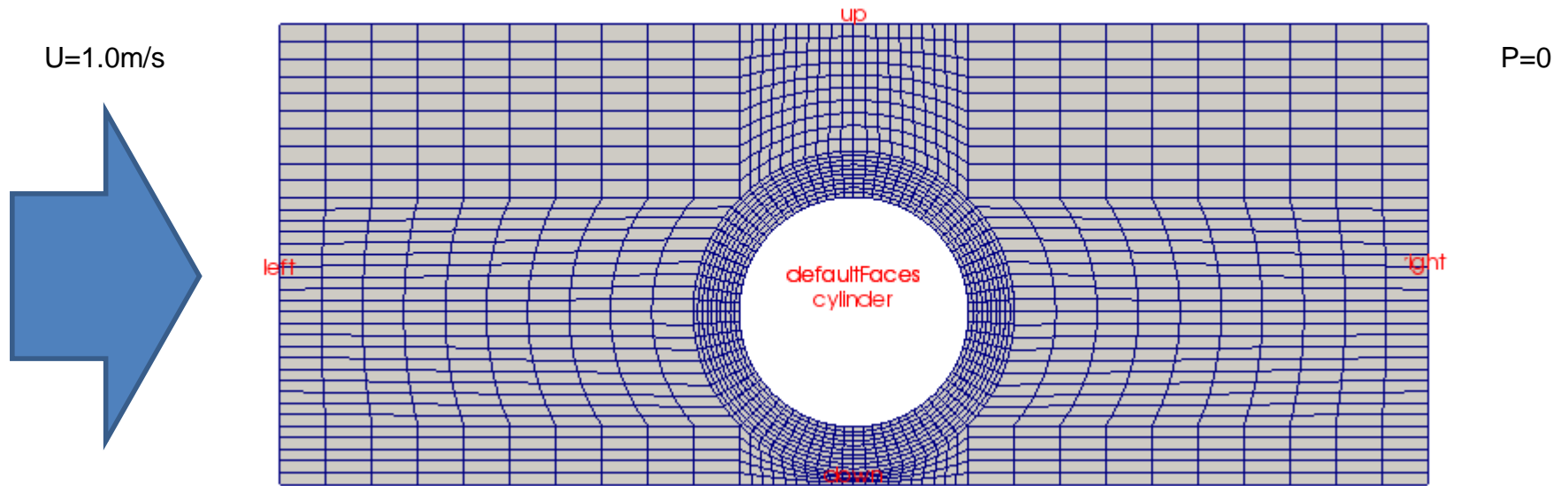
ターミナル入力コマンド

blockMesh

nonNewtonianIcoFoam

paraFoam

# offsetCylinder



# offsetCylinder

## transportProperties

```
transportModel CrossPowerLaw;
```

```
nu nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1;
```

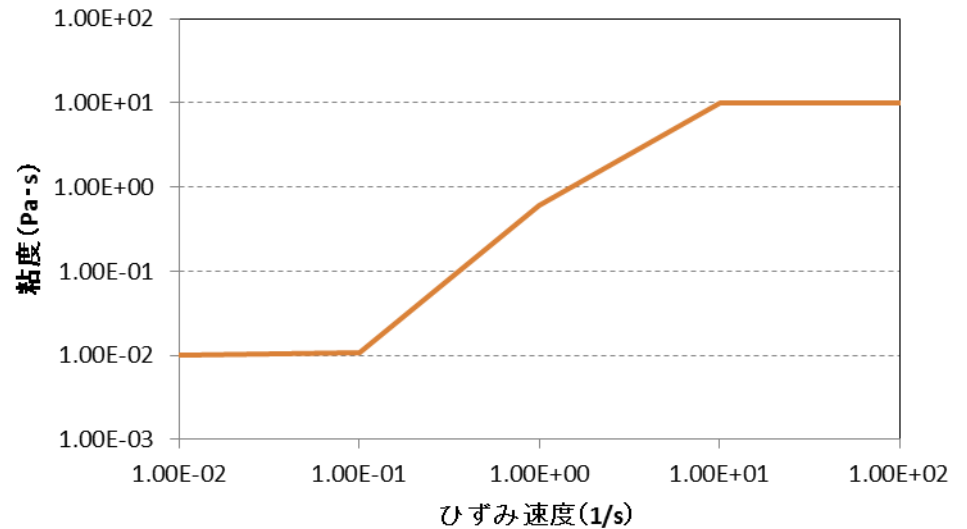
### CrossPowerLawCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 0.01;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 10;  
  m m [0 0 1 0 0 0 0] 0.4;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 3;  
}
```

### BirdCarreauCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;  
  k k [0 0 1 0 0 0 0] 0;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 1;  
}
```

CrossPowerLaw 
$$\eta = \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n} + \eta_\infty$$



# offsetCylinder

## controlDict

```
application    nonNewtonianIcoFoam;

startFrom     startTime;

startTime     0;

stopAt        endTime;

endTime       2;

deltaT        0.0025;

writeControl  runTime;

writeInterval 0.05;

purgeWrite    0;

writeFormat   ascii;

writePrecision 6;

writeCompression off;

timeFormat    general;

timePrecision 6;

runTimeModifiable true;
```

## fvSchemes

```
ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

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

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      corrected;
}

fluxRequired
{
    default      no;
    p            ;
}
```

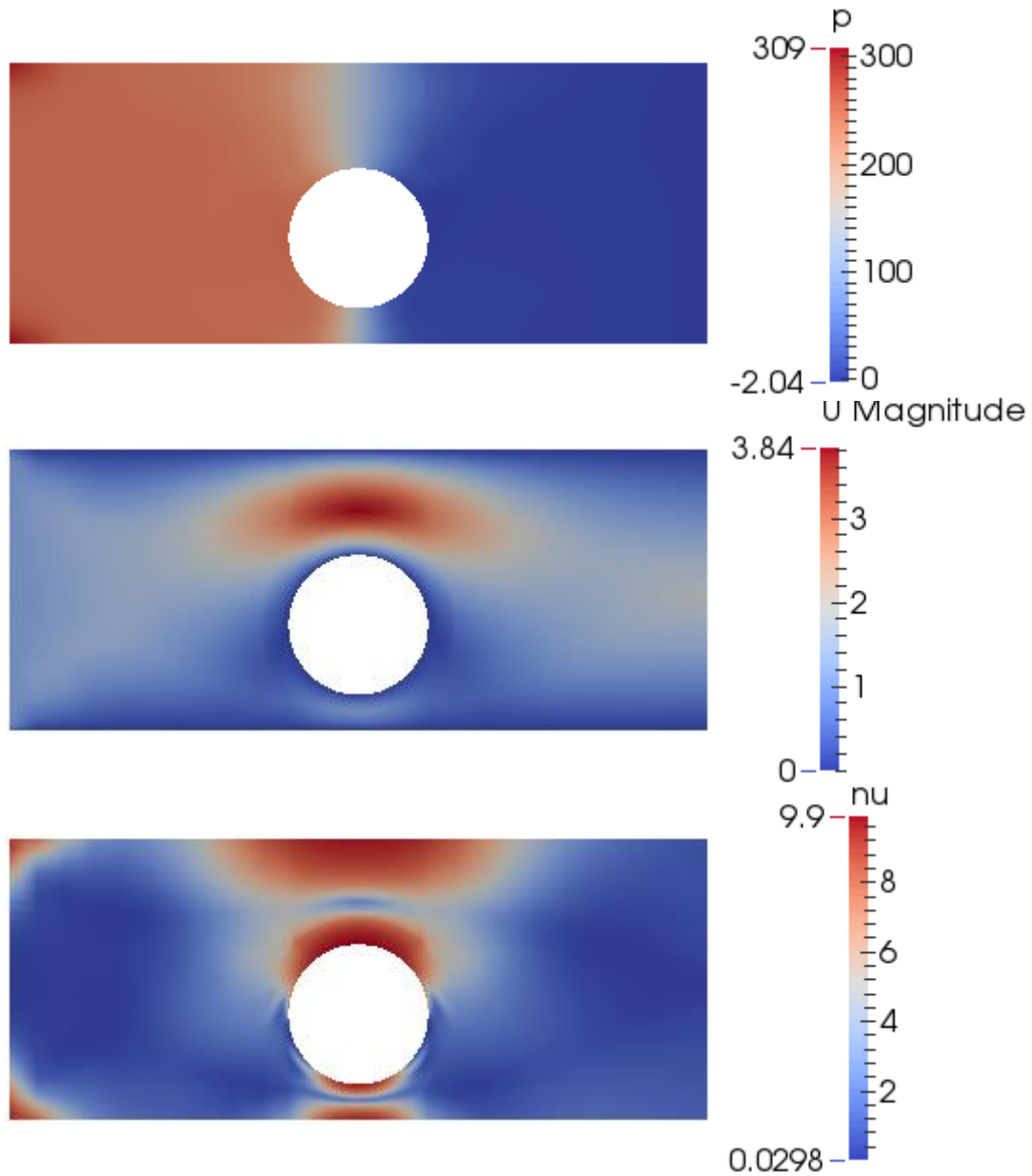
## fvSolution

```
solvers
{
    p
    {
        solver      GAMG;
        tolerance    0;
        relTol      0.1;
        smoother     GaussSeidel;
        nPreSweeps   0;
        nPostSweeps  2;
        cacheAgglomeration true;
        nCellsInCoarsestLevel 10;
        agglomerator  faceAreaPair;
        mergeLevels   1;
    }
    U
    {
        solver      smoothSolver;
        smoother     symGaussSeidel;
        tolerance    1e-05;
        relTol      0;
    }
}

PISO
{
    nCorrectors 4;
    nNonOrthogonalCorrectors 2;
}
```



# offsetCylinder



# offsetCylinder

## transportProperties

```
transportModel BirdCarreau;
```

```
nu nu [0 2 -1 0 0 0 0] 1;
```

### CrossPowerLawCoeffs

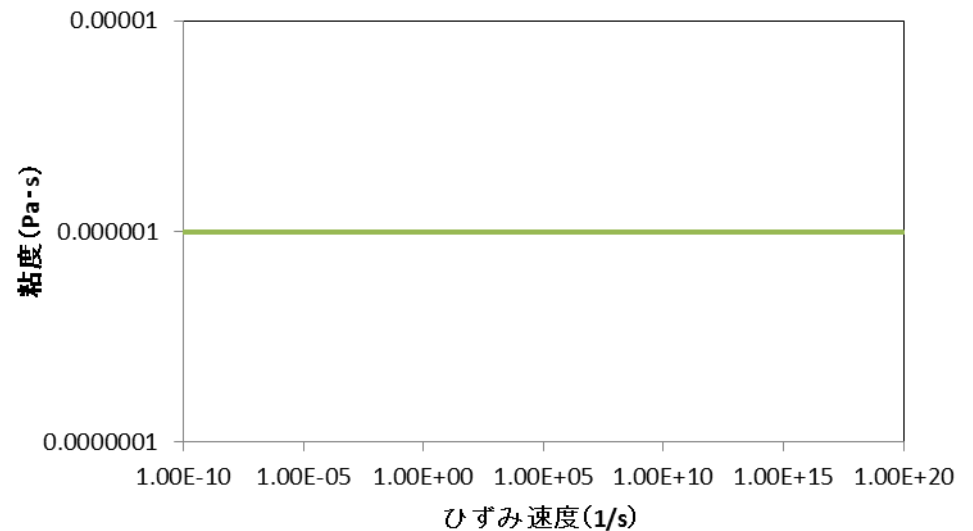
```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 0.01;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 10;  
  m m [0 0 1 0 0 0 0] 0.4;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 3;  
}
```

### BirdCarreauCoeffs

```
{  
  nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;  
  nuInf nuInf [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;  
  k k [0 0 1 0 0 0 0] 0;  
  n n [0 0 0 0 0 0 0] 1;  
}
```

BirdCarreau

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left\{ 1.0 + (k\dot{\gamma})^2 \right\}^{\frac{n-1.0}{2.0}}$$



# offsetCylinder

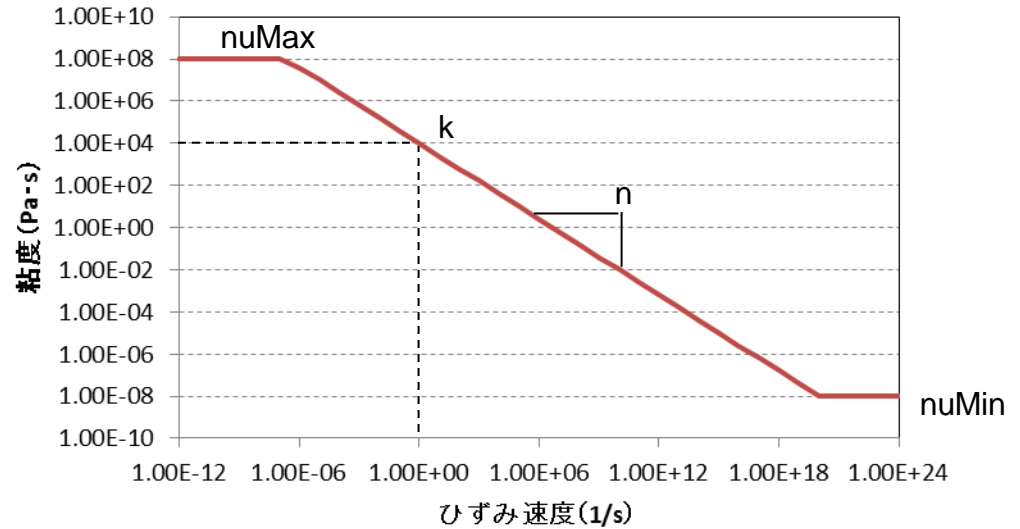
## transportProperties

transportModel powerLaw;

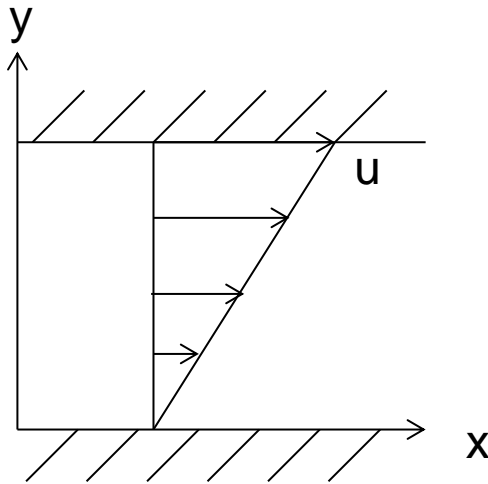
powerLawCoeffs

```
{  
k      k [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 10000;  
n      n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.4;  
nuMin  nuMin [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-08;  
nuMax  nuMax [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e8;  
}
```

$$\text{powerLaw} \quad \eta = \max(\eta_{\min}, \min(\eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1}))$$



## 検証問題(クエット流れ)



2枚の平行な板  
下面は固定  
上面は速度 $u$ で $x$ 方向に動いている

流体の速度は  
 $X=0$ で $U=0$   
 $X=Y$ で $U=u$   
 $Y$ 方向に対して $x$ 方向流速は線形に増加する

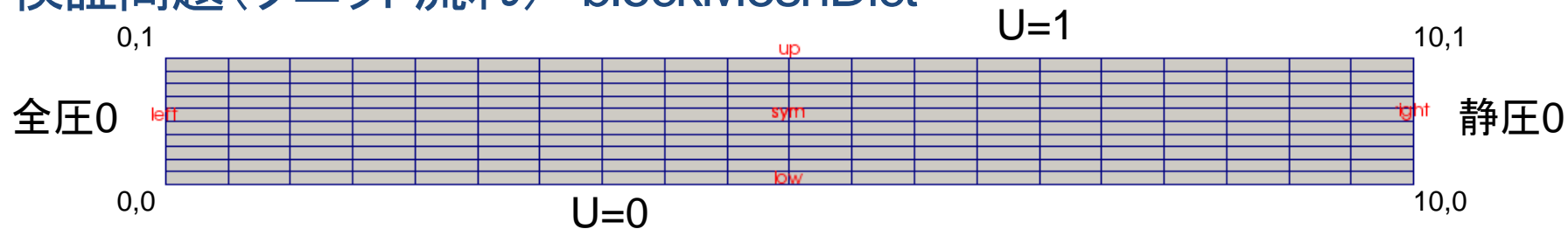
壁面せん断応力

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} = \eta(\dot{\gamma})\left(-\frac{du}{dy}\right)$$

ひずみ速度は $y$ 方向に対する $x$ 方向流速の勾配(変化率)  
→壁面せん断応力が求まる

壁面流速 $u$ を変化させたときの壁面せん断応力を理論値と比較することで組込んだ非ニュートンモデルの妥当性を検証することができる

# 検証問題(クエット流れ) blockMeshDict



```
convertToMeters 1;
```

```
vertices
```

```
(
  (0 0 -0.1)
  (10 0 -0.1)
  (10 1 -0.1)
  (0 1 -0.1)
  (0 0 0.1)
  (10 0 0.1)
  (10 1 0.1)
  (0 1 0.1)
);
```

```
blocks
```

```
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 10 1) simpleGrading (1 1 1)
);
```

```
edges
```

```
(
);
```

```
boundary
```

```
(
  up
  {
    type wall;
    faces
    (
      (3 7 6 2)
    );
  }
  left
  {
    type patch;
    faces
    (
      (0 4 7 3)
    );
  }
  low
  {
    type wall;
    faces
    (
      (1 5 4 0)
    );
  }
  right
  {
    type patch;
    faces
    (
      (2 6 5 1)
    );
  }
  sym
  {
    type empty;
    faces
    (
      (0 3 2 1)
      (4 5 6 7)
    );
  }
);
mergePatchPairs
(
);
```

# 検証問題(クエット流れ) 0/U 0/p

U

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  up
  {
    type    fixedValue;
    value   uniform (1 0 0);
  }
  left
  {
    type    zeroGradient;
  }
  low
  {
    type    fixedValue;
    value   uniform (0 0 0);
  }
  right
  {
    type    zeroGradient;
  }
  sym
  {
    type    empty;
  }
}
```

p

```
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
  up
  {
    type    zeroGradient;
  }
  left
  {
    type    totalPressure;
    p0      uniform 0;
    U       U;
    phi     phi;
    rho     none;
    psi     none;
    gamma   1;
    value   uniform 0;
  }
  low
  {
    type    zeroGradient;
  }
}
```

```
right
{
  type    fixedValue;
  value   uniform 0;
}
sym
{
  type    empty;
}
}
```

# 検証問題(クエット流れ) constant

## RASProperties

```
RASModel    laminar;  
turbulence  off;  
printCoeffs off;
```

## transportProperties

```
transportModel powerLaw;  
  
powerLawCoeffs  
{  
  k      k [ 0 2 -1 0 0 0 ] 10000;  
  n      n [ 0 0 0 0 0 0 ] 0.4;  
  nuMin  nuMin [ 0 2 -1 0 0 0 ] 1e-08;  
  nuMax  nuMax [ 0 2 -1 0 0 0 ] 1e8;  
}
```

# 検証問題(クエット流れ) system

## controlDict

```
application    simpleFoam;
startFrom      startTime;
startTime      0;
stopAt         endTime;
endTime        10000;
deltaT         1;
writeControl   timeStep;
writeInterval  1000;
purgeWrite     0;
writeFormat    ascii;
writePrecision 6;
writeCompression off;
timeFormat     general;
timePrecision  6;
runTimeModifiable true;
```

## fvSchemes

```
ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   bounded Gauss upwind;
    div(phi,k)   bounded Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) bounded Gauss upwind;
    div(phi,R)   bounded Gauss upwind;
    div(R)        Gauss linear;
    div(phi,nuTilda) bounded Gauss upwind;
    div((nuEff*dev(T(grad(U)))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}
```

```
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
```

```
snGradSchemes
{
    default      corrected;
}
```

```
fluxRequired
{
    default      no;
    p            ;
}
```



# 検証問題(クエット流れ) system

## fvSolution

```
solvers
{
  p
  {
    solver      GAMG;
    tolerance    1e-06;
    relTol      0.1;
    smoother     GaussSeidel;
    nPreSweeps   0;
    nPostSweeps  2;
    cacheAgglomeration on;
    agglomerator  faceAreaPair;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    mergeLevels  1;
  }

  "(U|k|epsilon|R|nuTilda)"
  {
    solver      smoothSolver;
    smoother     symGaussSeidel;
    tolerance    1e-05;
    relTol      0.1;
  }
}

SIMPLE
{
  nNonOrthogonalCorrectors 0;

  residualControl
  {
    p          1e-6;
    U          1e-6;
    "(k|epsilon|omega)" 1e-6;
  }

  relaxationFactors
  {
    fields
    {
      p          0.3;
    }
    equations
    {
      U          0.7;
      k          0.7;
      epsilon    0.7;
      R          0.7;
      nuTilda    0.7;
    }
  }
}
```

# 検証問題(クエット流れ)

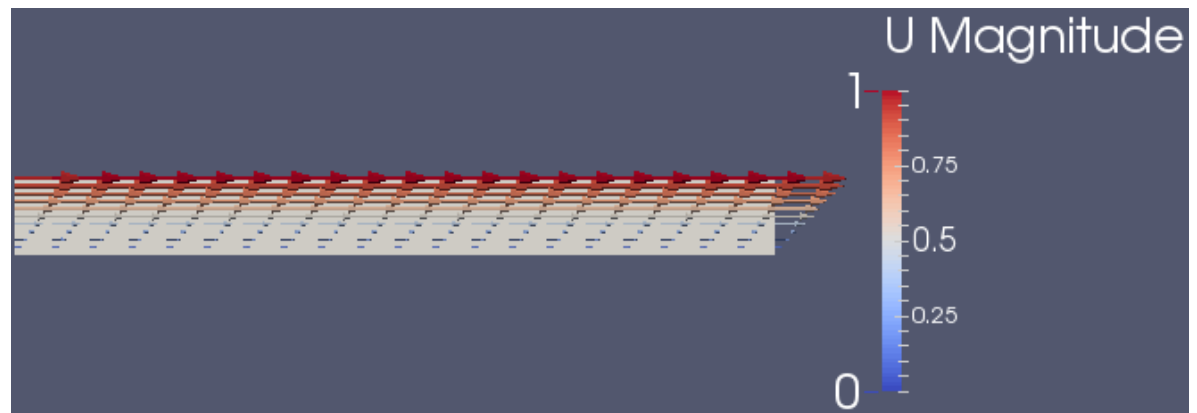
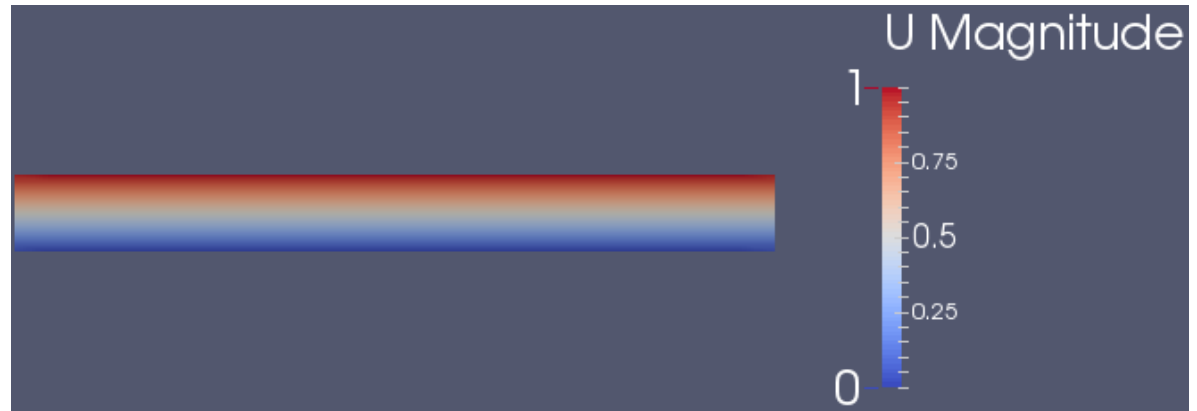
ターミナル入力コマンド

blockMesh

simpleFoam

wallShearStress

paraFoam



# 検証方法

- 組込んだ非ニュートンモデルを用いてひずみ速度を与えて壁面せん断応力を解析から求める

- 領域の高さを1とする
- 粘度の変化点前後のひずみ速度を入力して壁面せん断応力を求める
- ひずみ速度の入力は流速で変化させる  $\dot{\gamma} = \frac{U}{Y}$

- 壁面せん断応力の誤差を小さくするには残差を小さくする(1e-6程度)
- 余裕があればメッシュ感度も確認する

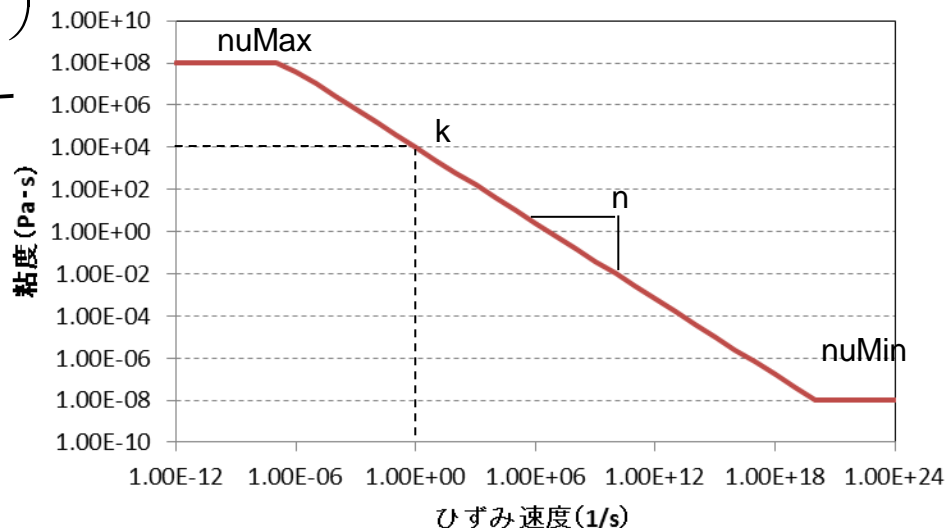
- 非ニュートンモデルにひずみ速度を入力して壁面せん断応力の理論値を算出し、解析結果と比較する

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} = \eta(\dot{\gamma})\left(-\frac{du}{dy}\right)$$

- グラフを作成して各パラメータの値を示す

powerLaw  $\eta = \max\left(\eta_{\min}, \min\left(\eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1}\right)\right)$

- 結果のまとめと解説書を作成する



# スケジュール

- 4月
  - 非ニュートンモデルの解説
- 5月
  - チュートリアル及び検証問題の実施
- 6月
- 7月
  - 非ニュートンモデルの組込 (OpenFOAMカスタマイズ) 解説
- 8月
  - 各自の進捗報告 (非ニュートンモデルの組込)
- 9月
  - 各自の進捗報告 (検証問題の報告)
- 10月
  - まとめ
- 11月
  - CAEシンポジウムにて発表の後公開

## 参考文献

- 流体力学 非圧縮性流体の流れ学, 中山司著, 森北出版
- 非ニュートン流体力学, 中村喜代次著, コロナ出版
- エクセルによる樹脂流動解析, 吉川秀雄著, 東京図書出版
- Polymer Extrusion, Chris Rauwendaal, Hanser Gardner Pubns
- Principles of polymer processing, Zehev Tadmor Costas G. Gogos, Wiley-Interscience
  
- 参考資料
- 下記資料を参考にして組み込みの実施
  - <http://opencae.gifu-nct.ac.jp/pukiwiki/index.php?%C2%E8%A3%B1%A3%B1%B2%F3%CA%D9%B6%AF%B2%F1%A1%A7H240204>
  - [http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS\\_CFD/Naser\\_Hamedi/Documents/Report.pdf#search='NonNewtonian+Models+in+OpenFoam+implementation+of+a+nonNewtonian+model'](http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD/Naser_Hamedi/Documents/Report.pdf#search='NonNewtonian+Models+in+OpenFoam+implementation+of+a+nonNewtonian+model')