

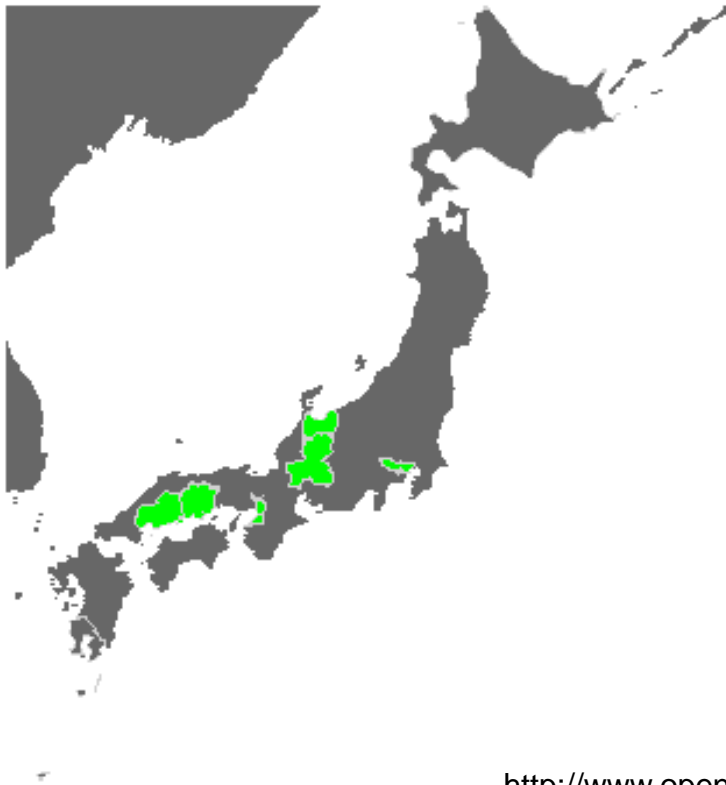
勉強会の活動を通じた非ニュートン流体 モデルカスタマイズの取組 ～オープンCAE勉強会@富山の取組紹介～

○秋山善克 オープンCAE勉強会@富山
中川慎二 富山県立大学

全国のオープンCAE勉強会

現在の所、関東と関西以外の発表資料は各勉強会のWEBページに置いてあります。

- [👉 関東 \(流体など\)](#) (旧OpenFOAM勉強会 for beginner) ([発表資料や過去のUstream動画](#))
- [👉 関東 \(構造など\)](#)
- [👉 関西](#)
- [👉 岐阜](#)
- [👉 富山](#)
- [👉 広島](#)
- [👉 岡山](#)



オープンCAE勉強会@富山

- 幹事: 富山県立大中川先生
- 開催場所: 富山県立大学 小杉駅から徒歩約20分
- 参加費: 無料
- 2012年5月から始まり現在までに38回開催
- 参加者
 - 学生、大学関係、企業が5:3:2くらいの割合
- 内容
 - 時間の半分でミニ講習会を実施 (OpenFOAM、Salome-Meca、FreeCAD)
 - 事例発表はOpenFOAMが中心
 - その中でも比較的プリポスト関連 (メッシュ、可視化) のTipsが充実している
- 特徴
 - 学生の研究発表の場 (進捗と相談)
 - 年間を通じて一連の解析の基礎的な学習が可能
 - 年間通して参加すると一通り解析が実施できるようになる
 - 最近では、勉強会後の交流会でますの寿司食べ比べを実施



これまでの実施とこれからの予定

第1回	2012年5月19日(土)	第21回	2014年5月10日(土)
第2回	2012年6月23日(土)	第22回	2014年5月31日(土)
第3回	2012年7月8日(土)	第23回	2014年7月26日(土)
第4回	2012年9月29日(土)	第24回	2014年8月23日(土)
第5回	2012年10月27日(土)	第25回	2014年9月27日(土)
第6回	2012年12月1日(土)	第26回	2014年10月18日(土)
第7回	2013年1月12日(土)	第27回	2014年11月29日(土)
第8回	2013年3月23日(土)	第28回	2014年12月13日(土)
第9回	2013年4月16日(土)	第29回	2015年1月31日(土)
第10回	2013年5月25日(土)	第30回	2015年3月14日(土)
第11回	2013年6月8日(土)	第31回	2015年4月18日(土)
第12回	2013年7月27日(土)	第32回	2015年5月16日(土)
第13回	2013年8月31日(土)	第33回	2015年6月13日(土)
第14回	2013年9月21日(土)	第34回	2015年7月25日(土)
第15回	2013年10月26日(土)	第35回	2015年8月22日(土)
第16回	2013年11月17日(土)	第36回	2015年9月12日(土)
第17回	2014年1月25日(土)	第37回	2015年10月10日(土)
第18回	2014年2月8日(土)	第38回	2015年11月7日(土)
第19回	2014年3月23日(土)	第39回	2015年12月26日(土)予定
第20回	2014年4月12日(土)	第40回	2016年1月23日(土)予定

年間のミニ講習会スケジュールと勉強会内容(2014年度実績)

- 4月 FreeCAD
 - 5月 OpenFOAM (Mesh)
 - 6月 Salome-Meca (CAD)
 - 7月 Salome-Meca (Mesh)
 - 8月 OpenFOAM (cfMesh)
 - 9月 OpenFOAM (カスタマイズ)
 - 10月 Salome-Meca (構造解析)
 - 11月 Salome-Meca (構造解析)
 - 12月 OpenFOAM (カスタマイズ)
 - 1月 Salome-Meca (熱解析)
 - 2月
 - 3月 発表会
- 3次元CAD、メッシュ作成方法
- ソルバー、カスタマイズ

1年を通して参加することで構造解析、流体解析のモデリングから解析、結果評価までを学ぶことができる

悩みと工夫

- 悩み～
- 地元企業の参加者が少ない
- ディープな議論が少ない
- 話題提供者が固定化されている
- 遠方からの参加者には富山からのアクセスが悪い

- 工夫～
- 一言自己紹介をする
- Facebookで公開
- 資料を中川先生のHPで公開
- 年間を通したミニ講習会の実施(2年目)

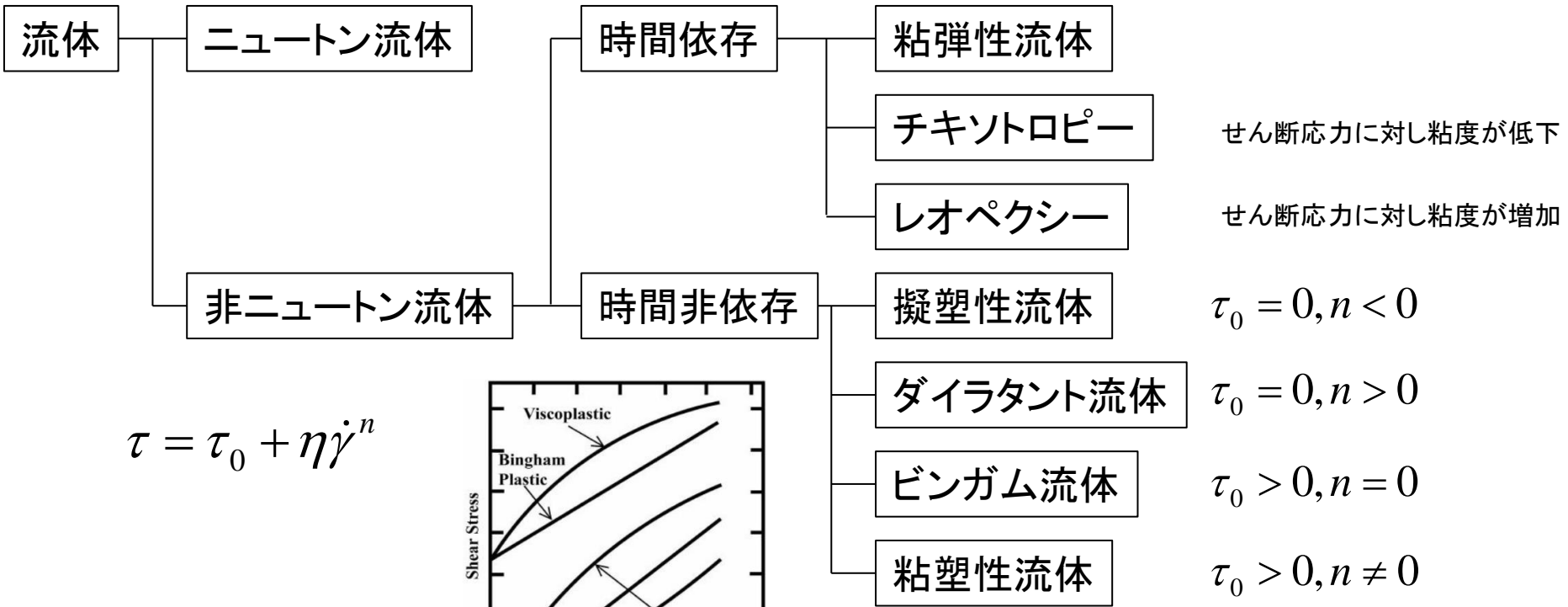
- 参加者を巻き込む勉強の実施



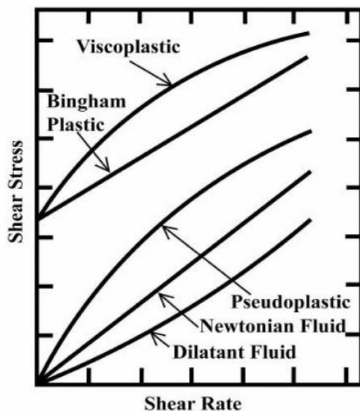
非ニュートンモデルカスタマイズの実施

- 個人としては～
- 自分の勉強の場としての活用

非ニュートン流体とは

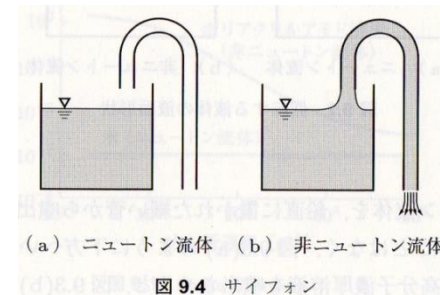
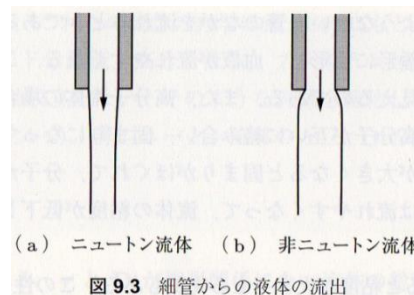
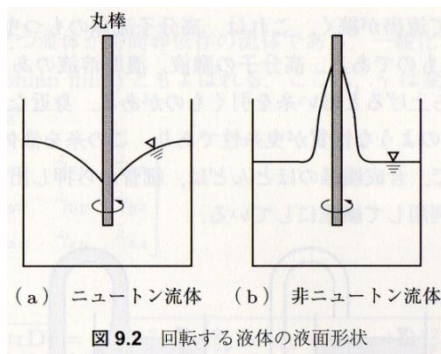


$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}^n$$



http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD/Naser_Hamedi/Documents/presentation.pdf#search=NonNewtonian+Models+in+OpenFOAM%2C+Implementation+a+nonNewtonian+model

- せん断速度依存粘度
- ワイゼンベルグ効果
- バラス効果
- サイフォン現象
- 二次流れ
- 急縮小流路部の流れ
- 線状体の自由落下



非ニュートンモデル

- 流れの基礎方程式中の粘性が一定でないモデル
- せん断応力がせん断速度と線形関係にない
- 粘度がせん断速度の関数としてあらわされる

$$\tau = 2\mu\mathbf{D} \quad \text{ニュートン流体}$$

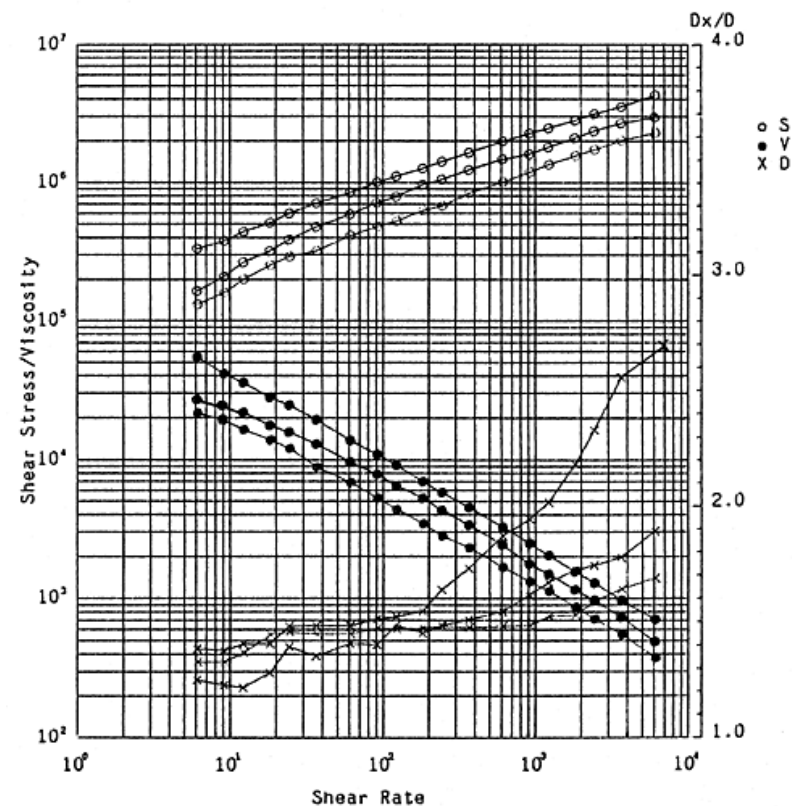
$$\tau = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad \text{非ニュートン流体}$$

- この関数が各種提案されている

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2tr\mathbf{D}^2}$$

SAMPLE NAME	L(mm)	D(mm)	B(mm)	T(°C)	NC	DATE
PP	10.00	1.00	9.55	200	0.00	86/12/05
PP	10.00	1.00	9.55	230	0.00	86/10/13
PP	10.00	1.00	9.55	280	0.00	86/11/29



流動試験(キャピログラフ)による測定

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	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left\{ 1.0 + (k\dot{\gamma})^2 \right\}^{\frac{n-1.0}{2.0}}$
(
BirdCarreau		
CrossPowerLaw	CrossPowerLaw	$\eta = \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty})}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n} + \eta_{\infty}$
HerschelBulkley		
Newtonian		
powerLaw	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;
}
```

a **a [0 0 0 0 0 0 0] 2.0** デフォルト
aを任意に指定することで
Carreau-Yasudaモデルになる

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;
}
```

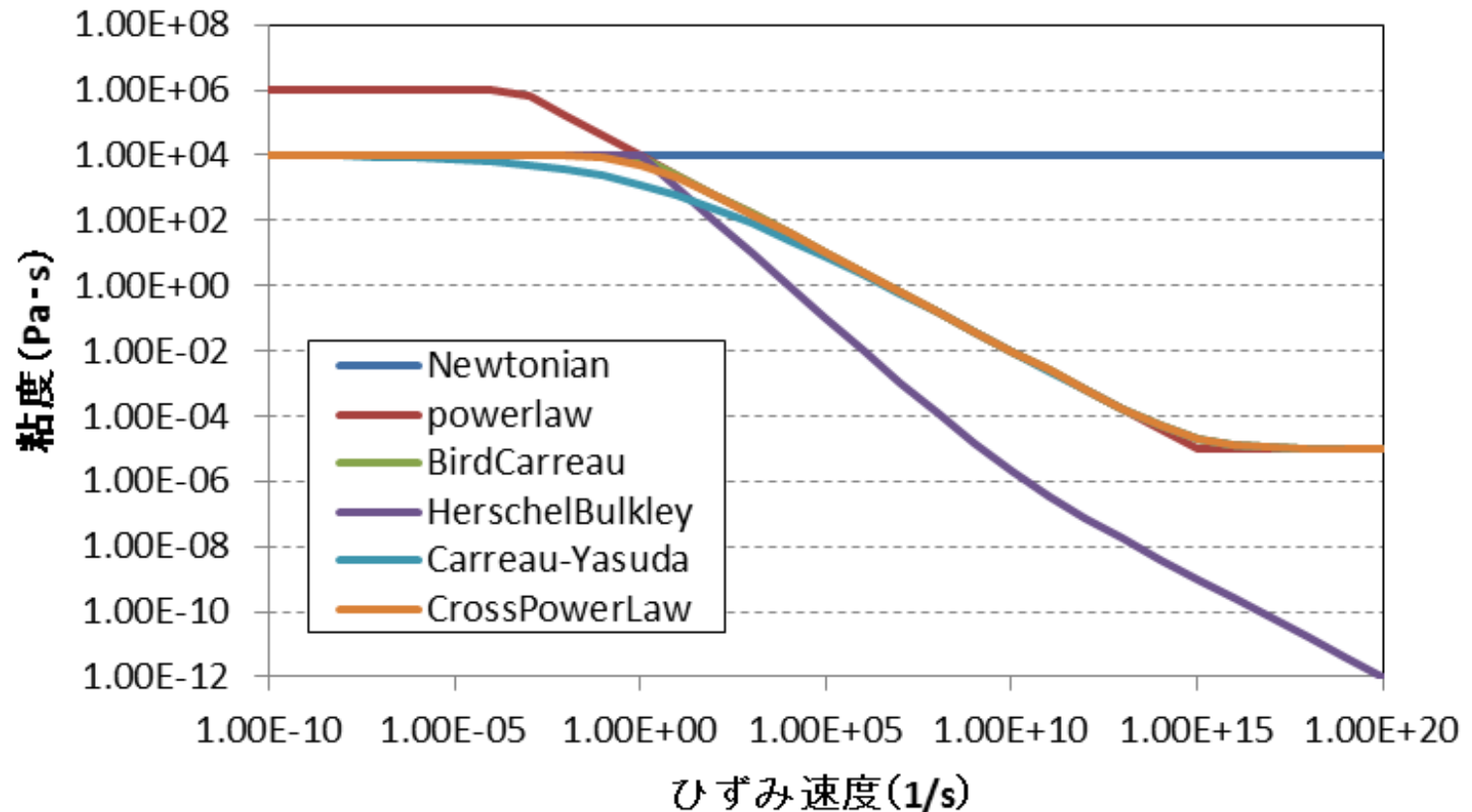
powerLaw $\eta = \max(\eta_{\min}, \min(\eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1}))$

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

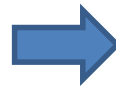
	Newtonian	powerlaw	BirdCarreau	HerschelBulkley	Carreau-Yasuda	CrossPowerLaw
η_0	1.00E+04	1.00E+06	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04
η_∞		1.00E-05	1.00E-05		1.00E-05	1.00E-05
τ_0				1.00E+04		
k		10000	1	1	1	
m						1
n		0.4	0.4	0.4	0.4	0.6
a					0.2	



組込む非ニュートンモデル一覧

Cross model

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



ミニ講習会で組込実施

Powell-Eyring model (PowellEyring)

$$\eta = \eta_0 + k\tau_0 \frac{\sinh^{-1} k\dot{\gamma}}{k\dot{\gamma}}$$

Fluent HerschelBulkley
(FluentHerschelBulkley)

$$\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c : \eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + k \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1}$$

Sisko model
(Sisko)

$$\eta = \eta_\infty + \eta_0 |\dot{\gamma}|^{n-1}$$

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c : \eta = \tau_0 \frac{\left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)}{\dot{\gamma}_c} + k \left[(2-n) + (n-1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right]$$

Casson model
(Casson)

$$\sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}} + \sqrt{m}$$

CFX HerschelBulkley
(CFXHerschelBulkley)

$$\eta = \frac{\tau_y}{\lambda\dot{\gamma}} + k(\lambda\dot{\gamma})^{n-1}$$

Bingham model
(Bingham)

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_0$$

CFX Ostwald de Waele
(CFXpowerLaw)

$$\eta = k(\lambda\dot{\gamma})^{n-1}$$

非ニュートンモデル組込担当者

	名前	所属
Powell-Eyring model	中山勝之	フリーランス
Sisko model	福江高志	岩手大学
	塩原裕規	富山県立大学
	畠山潤平	岩手大学 Heat Think Lab.
	小林野明	岩手大学 Heat Think Lab.
Casson model	水谷光二郎	富山県立大学
	清水貴昭	富山県立大学
	広瀬良平	富山県立大学
Bingham model	大嶋元啓	富山県立大学
	水谷風舞輝	富山県立大学
	高橋尚己	富山県立大学
Fluent HerschelBulkley	福江高志	岩手大学
	小幡一真	岩手大学
	平塚わかな	岩手大学 Heat Think Lab.
CFX HerschelBulkley	中川慎二	富山県立大学
CFX Ostwald de Waele	寺澤弘泰	富山県立大学
Cross model	秋山善克	

ひずみ速度の出力

applications¥solvers¥incompressible¥simpleFoam内

createFields.H内に下記を追加

```
volScalarField strRatio
(
    IOobject
    (
        "strRatio",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::NO_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh,
    dimensionedScalar("strRatio", dimensionSet(0,0,-1,0,0,0,0),
    scalar(0.0))
);
```

simpleFoam.C内に下記を追加


```
strRatio = Foam::sqrt(2.0)*mag(symm(fvc::grad(U)));
runTime.write();
```

※runTime.write()の直前に追加する

商用ソフトではデフォルトで出力可能

CrossLawの作成

OpenFOAMのデフォルト CrossPowerLaw $\eta = \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n} + \eta_\infty$



今回の組込 CrossLaw $\eta = \frac{(\eta_0)}{1.0 + (m\dot{\gamma})^n}$ η_∞ の差

CrossPowerLawから η_∞ をソースから削除する

ソース

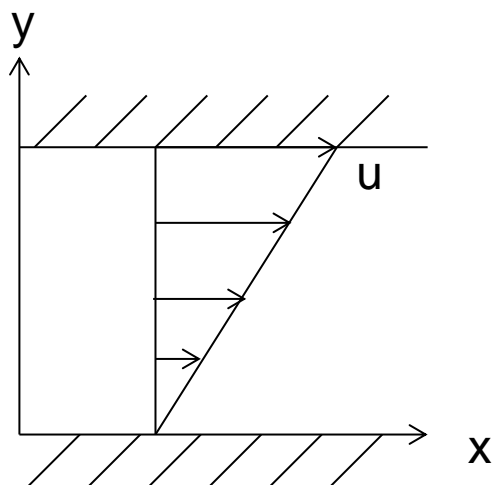
Src¥transportModels¥incompressible¥viscosityModels

CrossPowerLaw return (nu0_ - nuInf_)/(scalar(1) + pow(m_*strainRate(), n_)) + nuInf_;



CrossLaw return (nu0_)/(scalar(1) + pow(m_*strainRate(), n_));

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

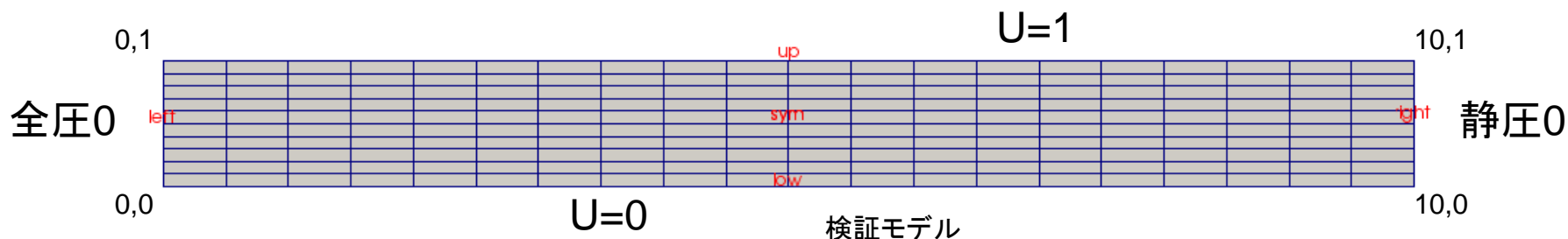
せん断速度は y 方向に対する x 方向流速の勾配(変化率)
 →壁面せん断応力が求まる

壁面せん断応力

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

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

与えたせん断速度から粘度、壁面せん断応力を理論値と解析値で比較する



CrossLaw検証結果

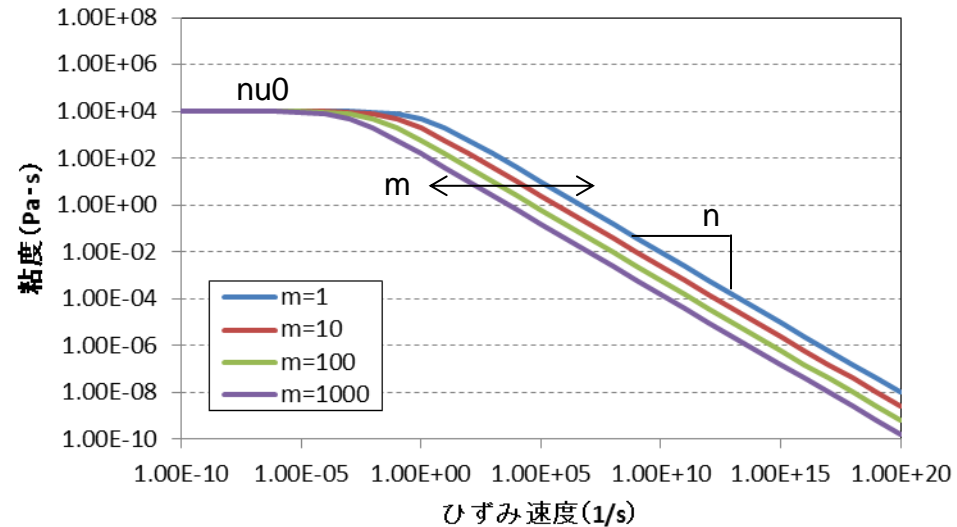
transportModel CrossLaw;

CrossLawCoeffs

```
{
  nu0      nu0 [0 2 -1 0 0 0] 1e4;
  m        m [0 0 1 0 0 0] 1;
  n        n [0 0 0 0 0 0] 0.6;
}
```

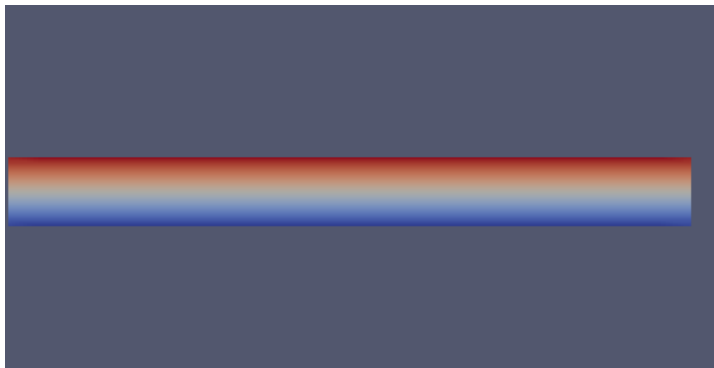
CrossLaw

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

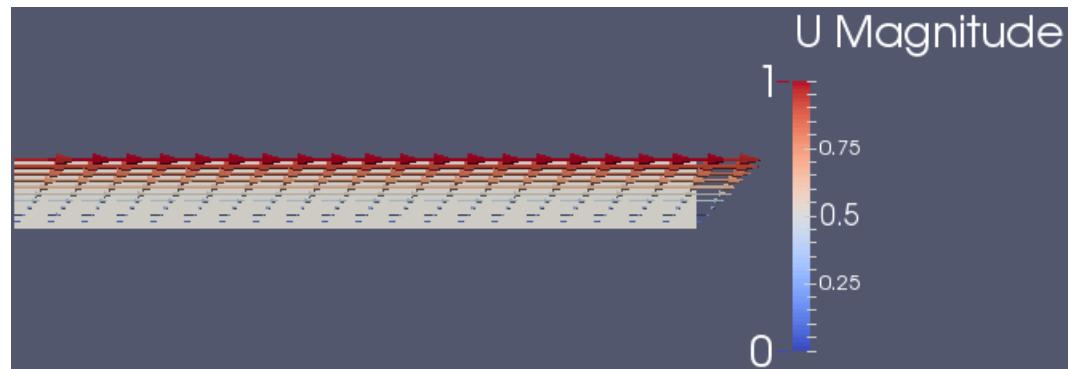


各変数の意味

ひずみ速度(流速)		粘度		壁面せん断応力	
入力	解析結果	解析結果	理論値	解析結果	理論値
1.00E-06	1.00E-06	9997.49	9997.489	0.009997	0.009997
1.00E-02	0.01	9406.49	9406.491	94.0649	94.06491
1	1	5000	5000	5000	5000
1.00E+02	100.3	592.506	592.5068	59428.4	59428.43
1.00E+06	1.94E+07	0.423717	0.423717	8227190	8227195



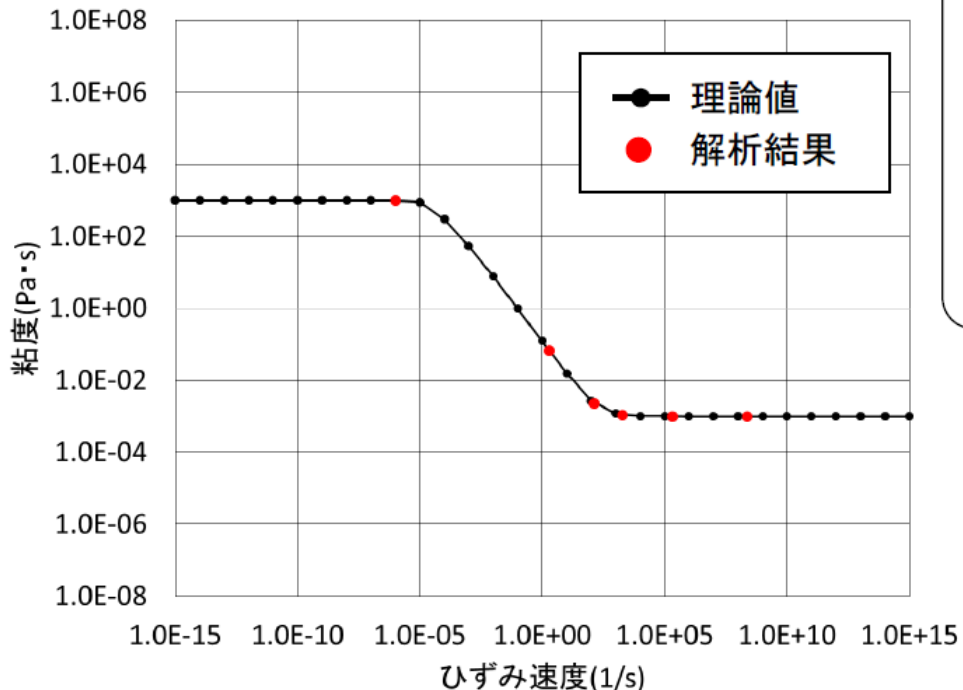
流速分布



流速ベクトル

Powell-Eyring model

Powell-Eyring model 検証結果



- Point
- 理論値と良好な一致
(誤差は最大で10⁻³%程度)
 - ひずみ速度の入力値Uを大きくすると出力値strRatioとの差が大きくなる
 - 計算条件によっては解が収束しない場合があった
(その場合は100,000 Stepの結果を用いた: 表内青色の数値)

$$\eta = \eta_0 + k\tau_0 \frac{\sinh^{-1} k\dot{\gamma}}{k\dot{\gamma}}$$

$$\eta_0 = 10^{-3}$$

$$k = 10^5$$

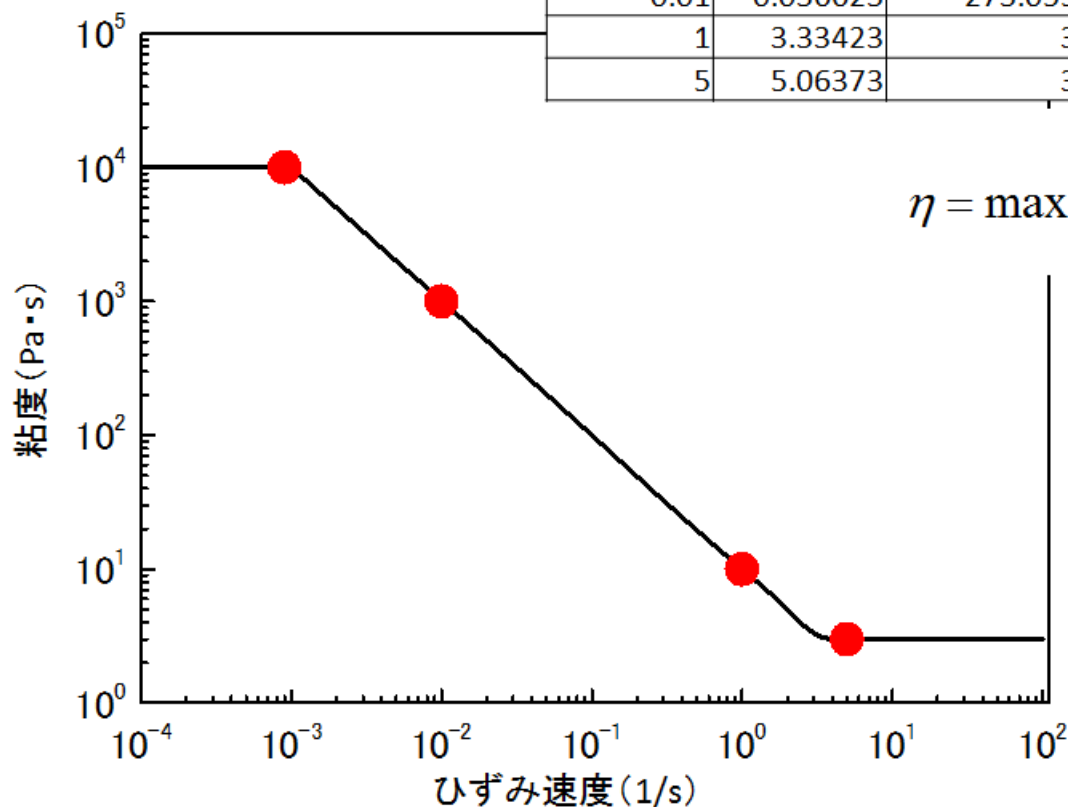
$$\tau_0 = 10^{-2}$$

ひずみ速度		粘度		壁面せん断応力	
入力値(U)	出力値(strRatio)	解析結果	理論値	解析結果	理論値
1.00E-06	1.00E-06	998.342	998.342	9.9834E-04	9.9834E-04
1	1.88446	0.0691393	0.0691347	1.3029E-01	1.3028E-01
10	130.274	0.00231086	0.00231075	3.0104E-01	3.0103E-01
100	1787.27	0.00111019	0.00111019	1.9842E+00	1.9842E+00
10000	199317	0.00100122	0.00100122	1.9956E+02	1.9956E+02
1000000	2.22E+08	0.001	0.001000001	2.2157E+05	2.2157E+05

Bingham model

Bingham Modelの検証地点と検証結果

ひずみ速度		粘度		壁面せん断応力	
入力	解析結果	解析結果	理論値	解析結果	理論値
0.0009	0.0009	10000	10000	9	9
0.01	0.036623	273.055	273.0554	10	2.730554
1	3.33423	3	3	10.0028	3
5	5.06373	3	3	15.1914	15



$$\eta = \max \left(\eta_{\min}, \min \left(\eta_{\max}, \frac{\tau}{\dot{\gamma}} + \eta_0 \right) \right)$$

$$\tau = 10$$

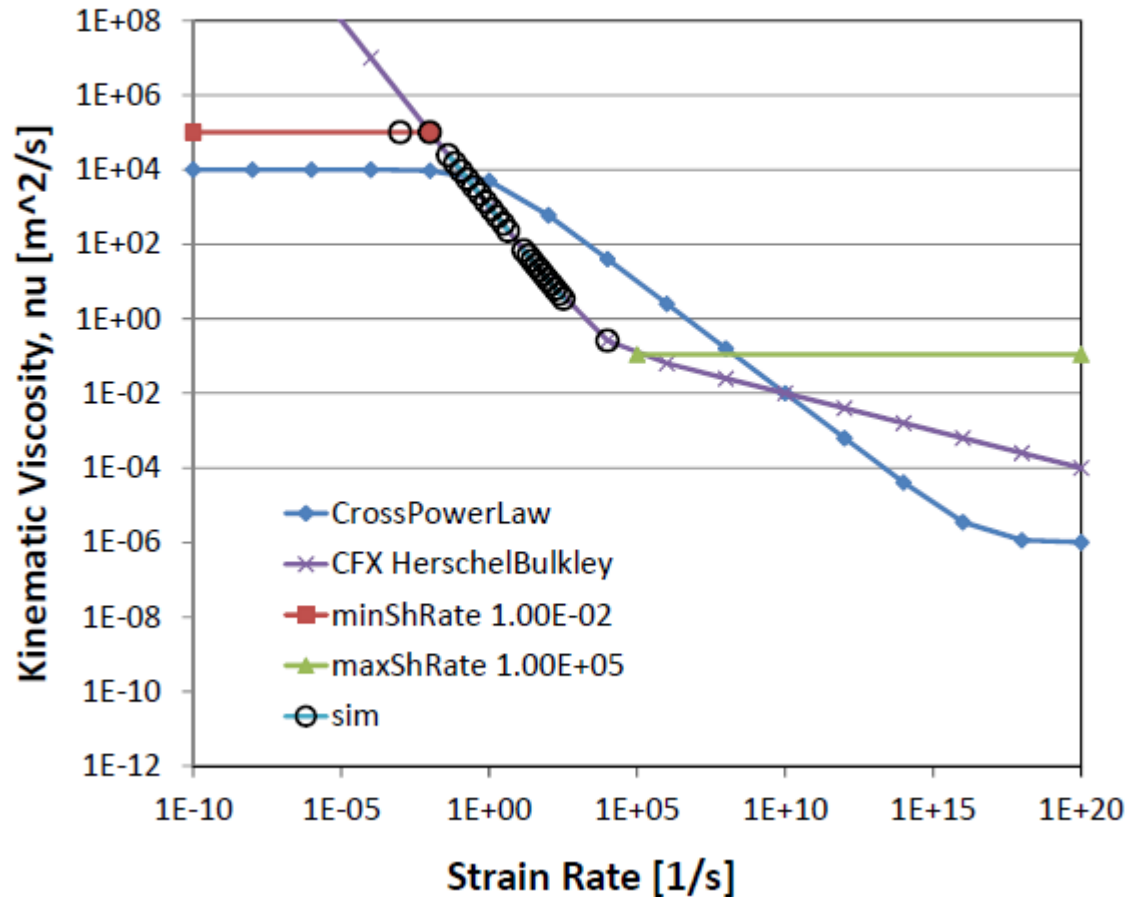
$$\eta_0 = 0.00001$$

$$\eta_{\min} = 3.0$$

$$\eta_{\max} = 1.0 \times 10^4$$

CFX HerschelBulkley model $\eta = \frac{\tau_y}{\lambda \dot{\gamma}} + k(\lambda \dot{\gamma})^{n-1}$

Comparison with sim. result



スケジュール(実施と計画)

- 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
- 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
 - 各自の進捗報告 (検証問題の報告)
- 11月
 - 各自の進捗報告 (検証問題の報告)
- 12月
 - 各自の進捗報告 (まとめ)
- 3月までにデータを整理し公開予定

取組による効果

- OpenFOAMのカスタマイズ方法を学ぶ
- 勉強会で議論することで参加者相互の理解が促進される
- 実際に自分が手を動かして作成することで理解が深まる

今後の取組

- 温度依存性の組込

$$\eta = f(\dot{\gamma})\alpha_T$$

$$\alpha_T = \frac{T_0}{T}$$

$$\alpha_T = \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)$$

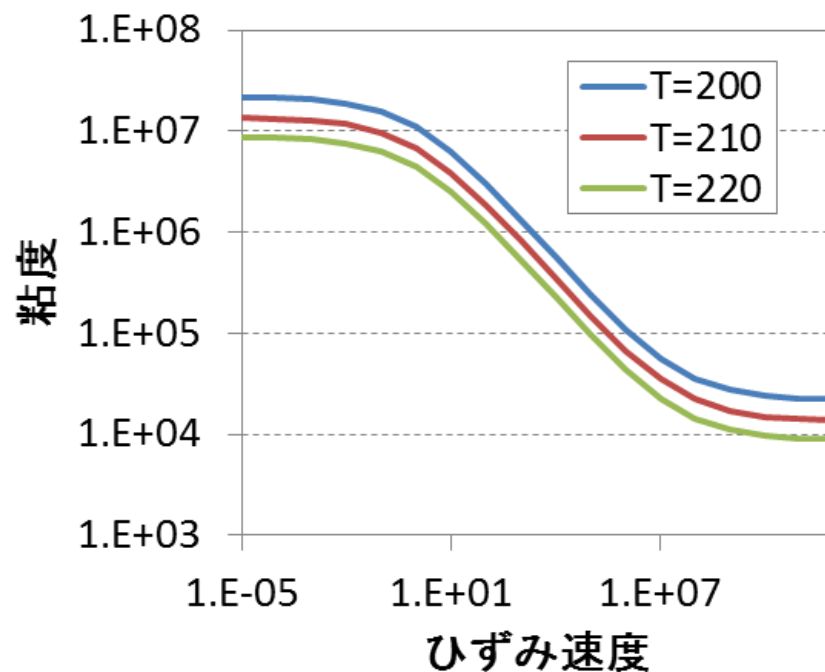
アレニウス式

$$\alpha_T = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T-T_0} - \frac{1}{T_\alpha-T_0}\right)\right]$$

<http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node340.htm>

WLF式

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)}$$



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
- FLUENT
- http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_ug/flu_ug_sec_viscosity_non_newtonian.html
- <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node340.htm>
- CFX
- http://www.arc.vt.edu/ansys_help/cfx_mod/i1299063.html
- 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'