

# 「VerificationとValidation そしてContribution」

- ERCOFTAC SIG15 test caseを例に -

[http://www.ercoftac.org/fileadmin/user\\_upload/bigfiles/sig15/database/index.html](http://www.ercoftac.org/fileadmin/user_upload/bigfiles/sig15/database/index.html)

北風 慎吾

shingo0323northwind@gmail.com

## 第1回OpenFOAM勉強会 for beginner

本勉強会への期待ならびにOpenFOAMに期待すること

\* サンプルモデルの共有／公開  
(swenden Chalmers univ、Prof. Jasak etc)

\* validation & verification

\* ベンチマーク、解析コンテスト

→ 適切なベンチマークサイトを  
探してErcoftacを発見

当初は毎月の勉強会用の  
“ネタ”として取組み始めた

\* C++ & Cプログラミング勉強会？

\* 詳細マニュアルの整備(特に物性値関係)

# ERCOFTAC(European Research Community of Flow, Turbulence and Combustion)

・・・テーマごとにグループ分けされていて、研究活動が行われている(燃焼・混相・粒子法etc)。

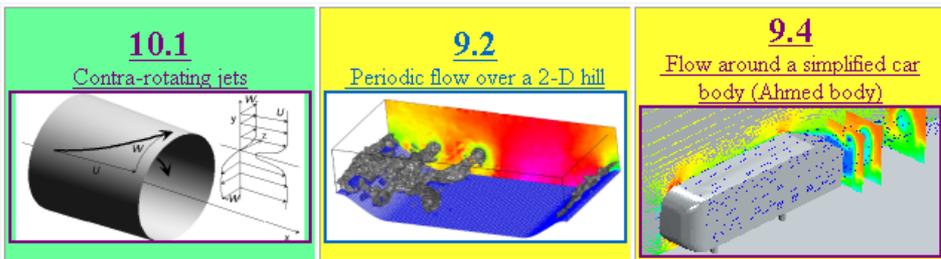
その中の乱流モデリングのグループ(SIG15)が過去に開催したworkshopにおいて実施されたベンチマークのデータベースがある

## Special Interest Groups

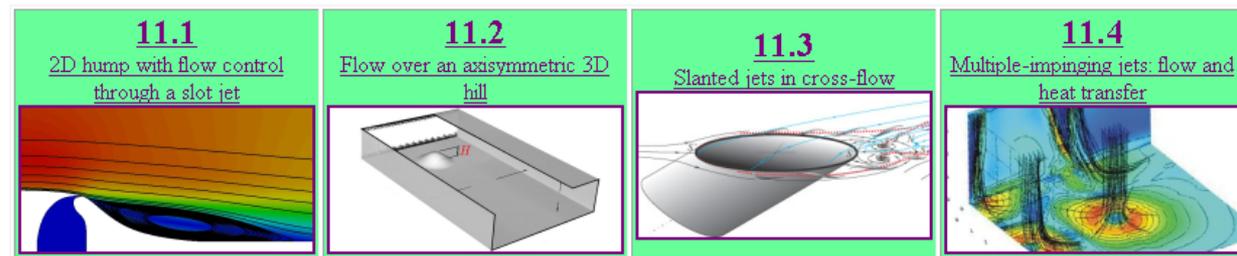
username   
password

Special Interest Groups	Special Interest Groups (SIG)	Latest Forum Posts
<ul style="list-style-type: none"><li>Large Eddy Simulation</li><li>Turbulence in Compressible Flows</li><li>Environmental CFD</li><li>Transition Modelling</li><li>Dispersed Turbulent Two Phase Flow</li><li>Stably Stratified and Rotating Turbulence</li><li>Turbulence Modelling</li><li>Drag Reduction and Flow Control</li><li>Variable Density Turbulent Flows</li><li>Particle Image Velocimetry</li><li>Reactive Flows</li><li>Transition Mechanisms, Prediction and Control</li><li>Design Optimization</li><li>Multipoint Turbulence Structure and Modelling</li><li>Swirling Flows</li><li>Bio-Fluid Mechanics and Heat Transfer</li><li>Microfluidics and Micro Heat Transfer</li><li>Aeroacoustics</li><li>Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)</li><li>Fluid Structure Interaction</li><li>Synthetic Models in Turbulence</li><li>Fibre Suspension Flows</li></ul>	<p><b>Special Interest Groups (SIG)</b></p> <p>ERCOFTAC Special Interest Groups form the second pillar of the Association. SIG are composed of ERCOFTAC members working together on a well defined specific topic on Flow, Turbulence and Combustion.</p> <p>Activities of Special Interest Groups are organising Workshops, Comparison of Codes, Exchange of Research Results, Creation of Experimental and/or Numerical Data Bases, Organisation of Courses, ...</p> <p>ERCOFTAC Special Interest Groups are associated with at least two <u>Pilot Centres</u>, and have an international organising committee.</p> <p><b>SIGs are active on the following topics:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>SIG 1: <a href="#">Large Eddy Simulation</a></li><li>SIG 4: <a href="#">Turbulence in Compressible Flows</a></li><li>SIG 5: <a href="#">Environmental CFD</a></li><li>SIG 10: <a href="#">Transition Modelling</a></li><li>SIG 12: <a href="#">Dispersed Turbulent Two Phase Flow</a></li><li>SIG 14: <a href="#">Stably Stratified and Rotating Turbulence</a></li><li><b>SIG 15: <a href="#">Turbulence Modelling</a></b></li><li>SIG 20: <a href="#">Drag Reduction and Flow Control</a></li><li>SIG 24: <a href="#">Variable Density Turbulent Flows</a></li><li>SIG 28: <a href="#">Reactive Flows</a></li><li>SIG 32: <a href="#">Particle Image Velocimetry</a></li><li>SIG 33: <a href="#">Transition Mechanisms, Prediction and Control</a></li><li>SIG 34: <a href="#">Design Optimization</a></li><li>SIG 35: <a href="#">Multipoint Turbulence Structure and Modelling</a></li><li>SIG 36: <a href="#">Swirling Flows</a></li><li>SIG 37: <a href="#">Bio-Fluid Mechanics and Heat Transfer</a></li><li>SIG 38: <a href="#">Microfluidics and Micro Heat Transfer</a></li><li>SIG 39: <a href="#">Aeroacoustics</a></li><li>SIG 40: <a href="#">Smoothed Particle Hydrodynamics</a></li><li>SIG 41: <a href="#">Fluid Structure Interaction</a></li><li>SIG 42: <a href="#">Synthetic Models in Turbulence</a></li><li>SIG 43: <a href="#">Fibre Suspension Flows</a></li></ul> <p>Missing numbers correspond to SIGs no longer believed to be active. All requests for</p>	<ul style="list-style-type: none"><li> ERCOFTAC's new web-site is now launched. SIG and PC...8 October 2010</li><li> Welcome to ERCOFTAC discussions. Please post here...8 October 2010</li><li> Welcome to ERCOFTAC discussions. Please post here...8 October 2010</li><li> Discussion group for Fibre Suspension Flows...17 December 2009</li><li> Discussion group for Reactive Flows...17 December 2009</li><li> Discussion group for Drag Reduction and Flow Control...17 December 2009</li><li> Welcome to ERCOFTAC discussions. Please post here...16 December 2009</li><li> Welcome to ERCOFTAC discussions. Please post here to...4 December 2009</li><li> ...3 December 2009</li><li> Discuss ERCOFTAC web-site issues...1 October 2009</li></ul>

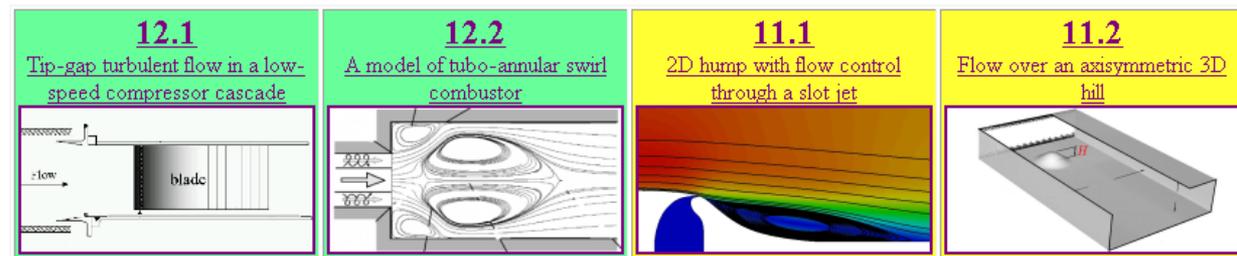
## 10th workshop at University of Poitiers (10-11 October 2002)



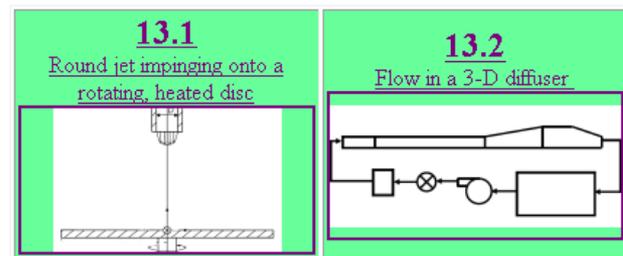
## 11th workshop at Chalmers University of Technology (7-8 April 2005)



## 12th workshop at Technical University of Berlin (12-13 October 2006)



## 13th workshop at Graz University of Technology (25-26 September 2008)



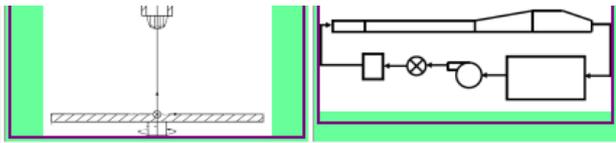
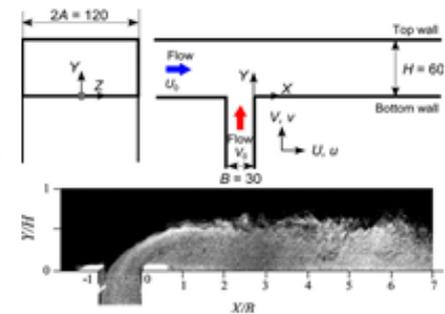
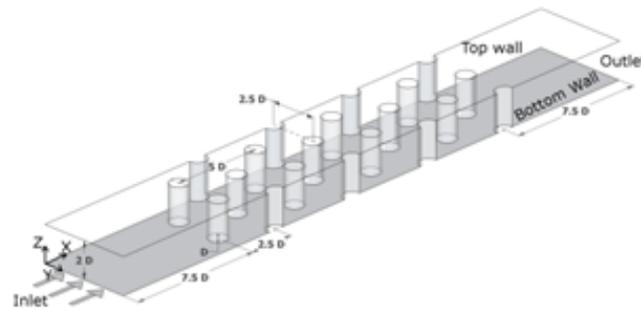
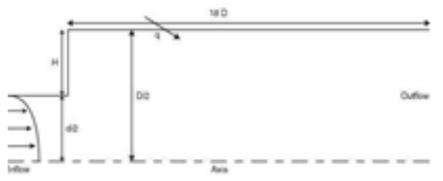


# 15th ERCOFTAC-SIG15/IAHR Workshop on Refined Turbulence Modelling

" Heat transfer in turbulent flows "

Chatou (Paris), France, 17 - 18 October 2011

Jointly organized by EDF and the Institute PPrime (CNRS/University of Poitiers) and co-sponsored by ERCOFTAC-SIG15 and IAHR



# V&Vとは何ぞや？

CFDのような数値解析を行う上で信頼性を定量的に評価しておくことは非常に重要  
「数値流体力学 第2版」 森北出版 Versteeg & Malalasekera原著、松下ら共訳より抜粋

→AIAAやERCOFTACなどからCFDを最善に実施するための指針が出されており、  
以下に示す誤差と不確かさの定義が広く受け入れられている(AIAA 1998)

- 誤差: 知識不足が原因ではなく、CFDのモデルにおいて、認識することができる不備。このように定義される誤差の原因として、以下のことがあげられる
  - (i) 数値誤差: 丸め誤差、反復計算の収束の誤差、離散化誤差
  - (ii) コーディングの間違い: ソフトウェア内の間違いや”バグ”
  - (iii) ユーザの間違い: ソフトウェアを適切に使わないことによるヒューマンエラー
  
- 不確かさ: 知識不足が原因である。CFDのモデル中の潜在的な不備、不確かさの主な原因として、以下があげられる
  - (i) 入力の不確かさ: 限られた情報あるいは形状、境界条件、材料物性などの近似による不確かさ
  - (ii) 物理モデルの不確かさ: 物理あるいは化学過程(例えば乱流、燃焼)の不適切な表現。あるいはモデリング過程の簡略化による現実の流れとCFDの相違

# Validation → 実験との比較

## Case8.2 Flow through an asymmetric plane diffuser

### Diffuser geometry:

The  $x$ - and  $y$ -axes are taken in the streamwise and straight-wall normal directions, respectively. The origin of the  $x$ -axis is located at the intersection axis originates from the bottom wall of the downstream channel. Figure 1 illustrates the configuration.

$U_{in}=20$  m/s  
 $H=0.015$  m  
 $Re=20000$

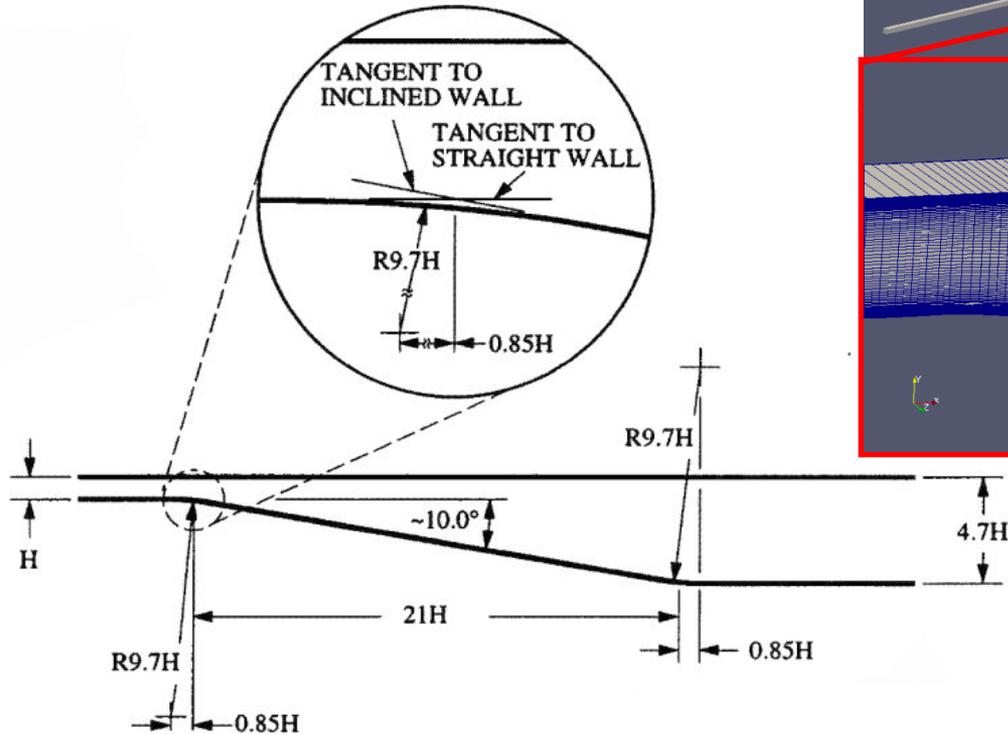
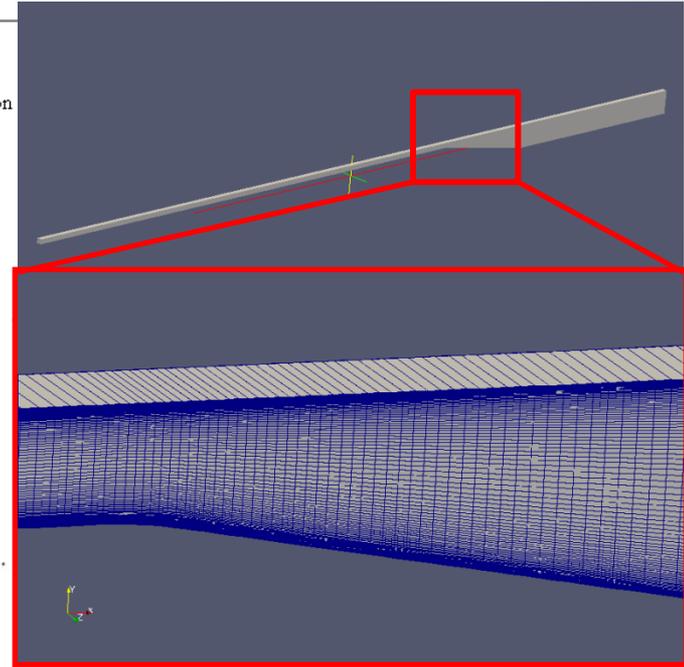


Fig. 1. The geometrical description of the diffuser, from Buice and Eaton.

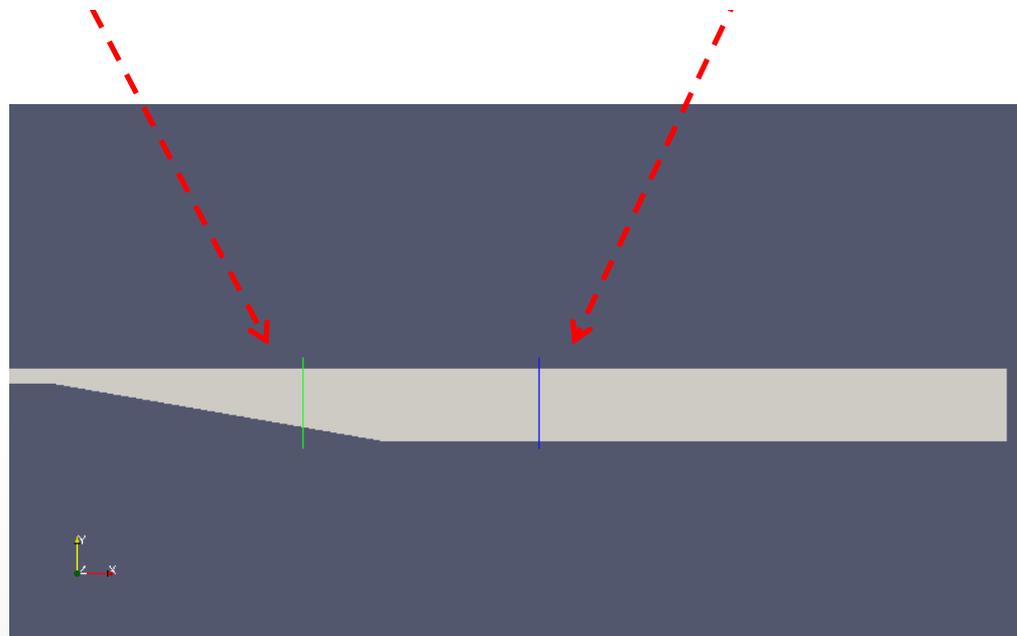
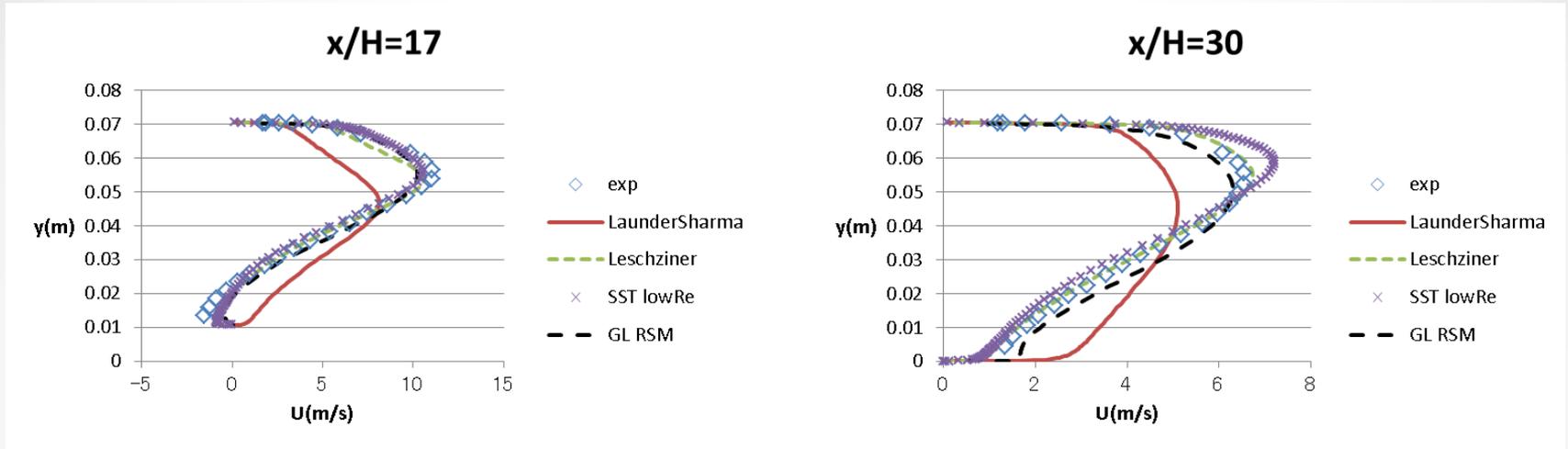


$y^+ \doteq 1$

### Instructions for Computers

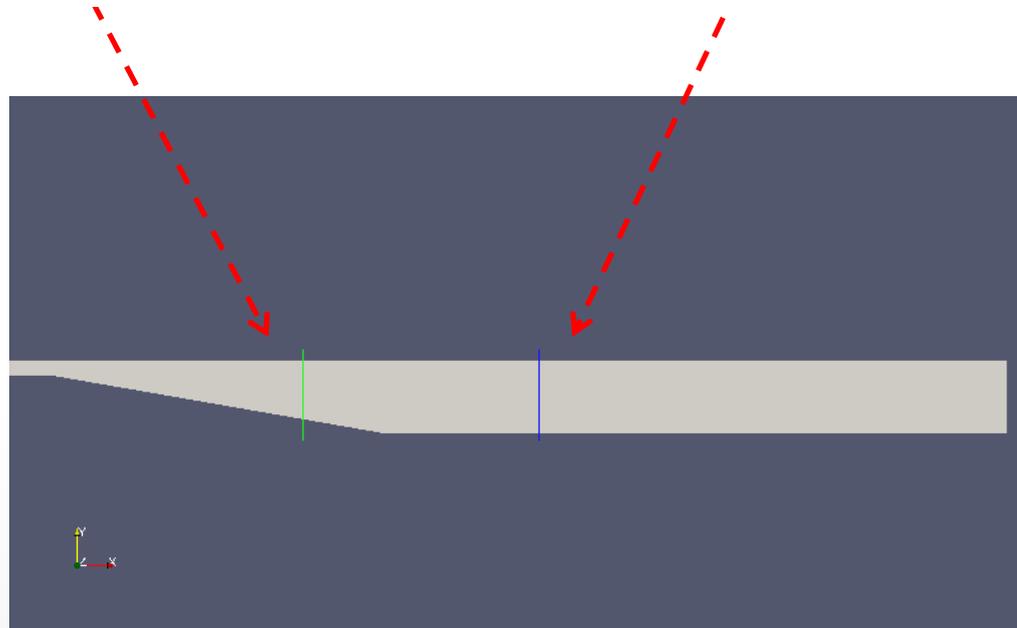
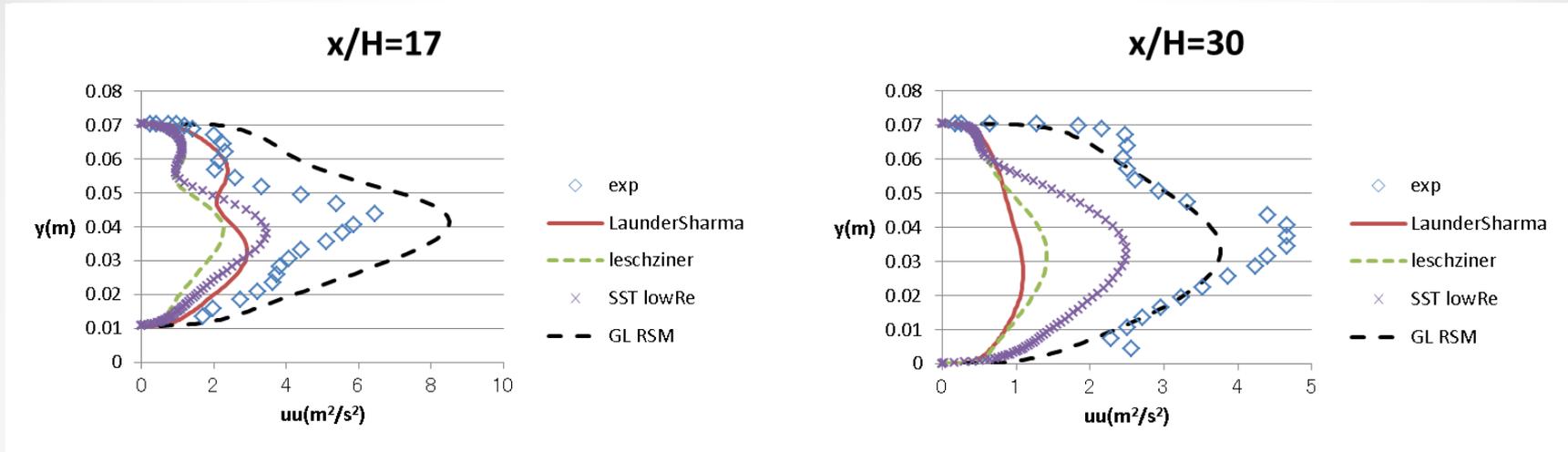
# Validation → 実験との比較

渦粘性モデルと応力方程式モデルによる実験との比較 (OF-1.6\_ext)



# Validation → 実験との比較

渦粘性モデルと応力方程式モデルによる実験との比較 (OF-1.6\_ext)



# Verification → 正しく解いているかの確認

Ex) 非等方Shihモデル 左がコード, 右が原文 (Shih, Zhu, Lumley1993 NASA TM105993)

```

eta_↓
(↓
  k_/bound(epsilon_, epsilonMin_↓
  *sqrt(2.0*magSqr(0.5*(gradU_ + gradU_.T()))))↓
),↓
ksi_↓
(↓
  k_/epsilon_↓
  *sqrt(2.0*magSqr(0.5*(gradU_ - gradU_.T()))))↓
),↓
Cmu_(2.0/(3.0*(A1_ + eta_ + alphaKsi_*ksi_))),↓
fEta_(A2_ + pow(eta_, 3.0)),↓

nut_("nut", Cmu_*sqr(k_)/epsilon_),↓

nonLinearStress_↓
(↓
  "nonLinearStress",↓
  symm↓
  (↓
    pow3(k_)/sqr(epsilon_)↓
    *(↓
      Ctau1_/fEta_↓
      *(↓
        (gradU_ & gradU_)↓
        + (gradU_ & gradU_.T())↓
        )↓
      + Ctau2_/fEta_*(gradU_ & gradU_.T())↓
      + Ctau3_/fEta_*(gradU_.T() & gradU_)↓
    )↓
  )↓
)↓

```

$$\eta = \frac{KS}{\epsilon}, \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} = |U_{1,2}| \quad (42)$$

$$\xi = \frac{K\Omega}{\epsilon}, \quad \Omega = (2\Omega_{ij}^*\Omega_{ij}^*)^{1/2}, \quad \Omega_{ij}^* = (U_{i,j} - U_{j,i})/2 + 4\epsilon_{mji}\omega_m \quad (45)$$

## 2.4 Realizable algebraic equation model

By introducing equation (33)-(37) into equation (22), we obtain

$$\begin{aligned} \overline{u_i u_j} = & \frac{2}{3} K \delta_{ij} - \nu_t (U_{i,j} + U_{j,i}) \\ & + \frac{C_{\tau 1}}{A_2 + \eta^3} \frac{K^3}{\epsilon^2} (U_{i,k} U_{k,j} + U_{j,k} U_{k,i} - \frac{2}{3} \Pi \delta_{ij}) \\ & + \frac{C_{\tau 2}}{A_2 + \eta^3} \frac{K^3}{\epsilon^2} (U_{i,k} U_{j,k} - \frac{1}{3} \tilde{\Pi} \delta_{ij}) \\ & + \frac{C_{\tau 3}}{A_2 + \eta^3} \frac{K^3}{\epsilon^2} (U_{k,i} U_{k,j} - \frac{1}{3} \tilde{\Pi} \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (47)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = \frac{2/3}{A_1 + \eta + \alpha \xi} \quad (50)$$

$$C_{\tau 1} = -4, \quad C_{\tau 2} = 13, \quad C_{\tau 3} = -2, \quad A_1 = 1.25, \quad \alpha = 0.9, \quad A_2 = 1000. \quad (53)$$

# Verification → 正しく解いているかの確認

Ex) 非等方Shihモデル 左がコード, 右が原文(Shih, Zhu, Lumley1993 NASA TM105993)

```

eta_↓
(↓
  k/↓
  *sqr
),↓
ksi_↓
(↓
  k/epsilon_↓
  *sqrt(2.0*magSqr(0.5*(gradU_ - gradU_.T())))↓
),↓
Cmu_(2.0/(3.0*(A1 +
fEta_(A2
nut_("r
no
(↓
*(↓
  Ctau1_/fEta_↓
  *(↓
    (gradU_ & gradU_)↓
    + (gradU_ & gradU_.T())↓
  )↓
  + Ctau2_/fEta_*(gradU_ & gradU_.T())↓
  + Ctau3_/fEta_*(gradU_.T() & gradU_)↓
)↓
)↓
)↓
)↓

```

OpenFOAMの強み . . . 誰でも気軽にソースコードにアクセスできる (42)

OpenFOAMの弱み? . . . 基本的に解析精度は自分自身で担保しなければならない (45)

一般形の表示ではないが、  
原文には忠実  
(歪み速度テンソルと渦度  
テンソルの2次積で表し  
ていることが多い)

## 2.4 Realiza

By introd

$$\begin{aligned}
 \langle u'_i u'_i \rangle = & \frac{2}{3} \delta_{ij} k - 2\nu_t S_{ij} + \alpha_1 \frac{k^3}{\epsilon^2} \left( S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{lk} S_{kl} \right) \\
 & + \alpha_2 \frac{k^3}{\epsilon^2} (S_{ik} \Omega_{kj} + S_{jk} \Omega_{ki}) \\
 & + \alpha_3 \frac{k^3}{\epsilon^2} \left( \Omega_{ik} \Omega_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{lk} \Omega_{kl} \right)
 \end{aligned}$$

西島-吉澤  $C_{\tau 1} = 0.057, C_{\tau 2} = -0.37, C_{\tau 3} = -0.0067$

Shih-Lumley  $C_{\tau 1} = 7, C_{\tau 2} = -23, C_{\tau 3} = -15$

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = \frac{2/3}{A_1 + \eta + \alpha\xi} \quad (50)$$

$$C_{\tau 1} = -4, \quad C_{\tau 2} = 13, \quad C_{\tau 3} = -2, \quad A_1 = 1.25, \quad \alpha = 0.9, \quad A_2 = 1000. \quad (53)$$

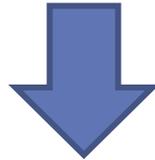
# V&Vの前に・・・経験則（乱流モデルを例に）

乱流モデル	標準k-ε	低Re数型 K-ε	DSM/RSM	DES Hybrid	標準LES	Dynamic LES
1. 単純流れ (チャンネル流、管内流) (局所平衡が成立)	○					
2. 複雑流れ (bluff body周り) 局所非平衡 1) 衝突流 2) 剥離流	× ×	× ×	△~○ △~○	○ △~○	○ △~○	○ ○
3. 遷移流れ(低Re効果) 1) 壁面近傍 2) 壁面近傍以外	× ×	○ ×~△	× ×	△ ×	△~○ ×	○ ○
4. 非等温流れ 1) 弱い成層 2) 強い成層	○ ×~△	○ ×~△	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
5. 非定常流れ 1) 渦放出 2) 広範囲の波数帯 の乱れを含む流れ	△ ×	△ ×	△ ×	○ ○	○ ○	○ ○
6. 噴流 1) 通常の噴流 2) 旋回噴流	○ ×	○ ×	○ △~○	○ ○	○ ○	○ ○
7. 必要な計算時間	数時間~1日	数時間~数日		1~2週間	数週間~数ヶ月	

「CFDによる建築・都市の環境設計工学」村上周三著 表1.10 各種流れ場に対する各乱流モデルの適応性の相対比較を一部加筆  
 ※計算時間は計算機環境と実行モデルサイズに依存、最近多用されるDES/Hybridを追加しましたが、あくまで私見に基づく評価です

# Contribution → できることからコツコツと

- ・OpenFOAMのおかげで、定期的にCFDのコミュニティに参加する機会が出来た  
→自ら使って、理解を深めていける。
- ・Googleグループでのディスカッションは非常に参考になる  
→自分は専ら質問ばかりしていますが・・・
- ・恩恵ばかりを受けているだけでは申し訳ない  
→“タダ”ほど高価なモノは無い！何か恩返しができるれば・・・



## OpenFOAM-VandV-SIG - Revision 73: /ERCOFTAC-SIG15/trunk

- ..
- [case11.1 2Dhump-SlotJet/](#)
- [case11.2 Axisymmetric3DHill/](#)
- [case13.1 rotatingDisc/](#)
- [case4.2 2DsingleHill/](#)
- [case4.5 curvedDuct/](#)
- [case6.3 CubicObstacle/](#)
- [case8.2 2Ddiffuser/](#)
- [case9.1 swirlingFlowCombustor/](#)
- [case9.2 2DperiodicHill/](#)
- [case9.3 periodicBackstep/](#)

<http://www.opencae.jp/wiki/OpenFOAM-VandV-SIG/ERCOFTAC>