

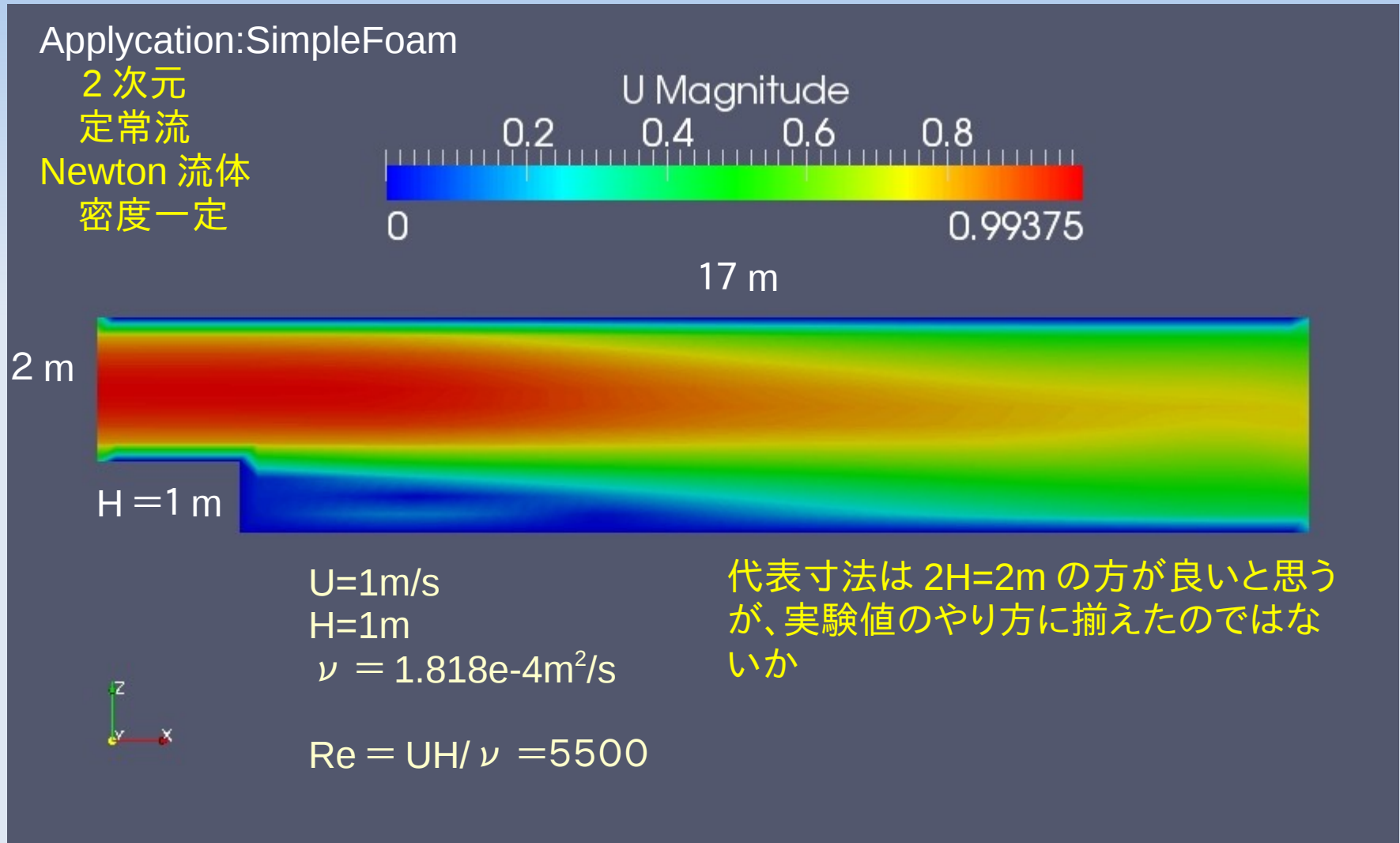
OpenFoam Back-Step-Flow の検討 (RANS モデルの場合)

TM

計算環境

Maker : Toshiba
Product : dynabook TX/64HS
CPU : Core 2 Duo P8400 2.26GHz
Memory : 4GBytes
HD : 320GBytes
OS : Ubuntu10.10
Code : OpenFoam 1.7.1

2次元定常バックステップ流れ



レイノルズ平均 (RANS) 方程式1

$$u(x, y, t) = \bar{u}(x, y, t) + u'(x, y, t)$$

$$v(x, y, t) = \bar{v}(x, y, t) + v'(x, y, t)$$

$$p(x, y, t) = \bar{p}(x, y, t) + p'(x, y, t)$$

流れ場を平均量と変動量に分離

Navier-Stokes(NS) 方程式に代入してアンサンブル平均

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \overline{-u'^2} + 2\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \overline{-u'v'} + \nu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}^2)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \overline{-v'u'} + \nu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \overline{-v'^2} + 2\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\}$$

レイノルズ応力

未知関数 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{p}, \overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'u'}, \overline{v'^2}$ 7つに対して方程式は3つ。

レイノルズ応力4つの方程式がない→乱流モデルが必要

渦粘性モデル

レイノルズ応力

$$\begin{aligned} -\overline{u'^2} &= \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ -\overline{u'v'} = -\overline{v'u'} &= -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ -\overline{v'^2} &= \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{aligned}$$

渦粘性

乱流エネルギー

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad [\text{m}^2/\text{s}^2]$$

乱流渦によって生じるレイノルズ応力を、分子粘性応力との類推から決定する。
→ (レイノルズ応力) \propto 平均速度勾配

レイノルズ平均 (RANS) 方程式2

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}^2)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\}$$

$$\bar{P} = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k$$

渦粘性を決定できれば、方程式が解ける

標準 $k - \varepsilon$ 方程式

渦粘性 [m^2/s]

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

エネルギー散逸率 [m^2/s^3]

$$\varepsilon = \nu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$$

$$P_k = 2\nu \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\}$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92 \leftarrow \text{一様等方乱流データ等から決定}$$

k ε モデル

モデル	特徴	適用先
標準	等方一様性乱流を仮定。最も基本的なモデル。 乱れが一様でないケースでは使えないとされている。	最も工学的に利用されているモデル。 壁への衝突流れ(よどみ点流れ)やターボ機械等の回転流、軸対称噴流、剥離流れで注意が必要
RNG (default)	乱流は色々なスケール渦の集合体。標準モデルではスケールが1つ。 Yakho-Orszag が色々なスケールを考慮した繰り込み群 (Re-Normalisation Group)理論によりモデルを高度化。(1986年) よどみ点流れでは渦粘性モデルでは過大にkが生成。ε 式に付加項を追加しk生成を修正。	○ 大きく曲がる流れで改善 ○ 回転流で改善 ○ 剪断流れで改善 ○ 対流伝熱に改善。 × 軸対称噴流は不十分。
realizable	標準モデルで $\langle u'^2 \rangle$ 、 $\langle v'^2 \rangle$ のレイノルズ応力は負の場合があり、理論的に不整合。この realizable 条件を満たす改良モデル。	○ 軸対称噴流、平面噴流、回転流れ、剥離流れ、大きく曲がる流れに改善。

default メッシュと境界条件

<inlet>

U: 実験データ

p: $dp/dx=0$

k: 実験データ

ε : 実験データ

ν t: 計算値

<Wall & VerticalWall>

U: $U=0$

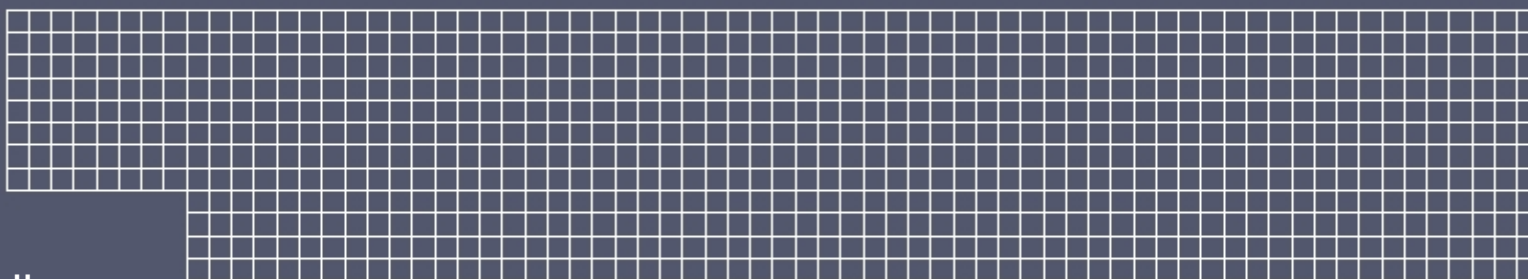
p: $dp/dn=0$

k: kqRWallFunction

E: epsilonWallFunction

ν t: nut WallFunction

784 Cells



<Wall>

<VerticalWall>



front & back :empty

<Wall>

<outlet>

U: $dp/dx=0$

p: =0

k: $dk/dx=0$

ε : $d\varepsilon/dx=0$

ν t: 計算値

U に対しての壁関数の指定がない。nut が分かれば内部セルで計算できるので必要ないのか?

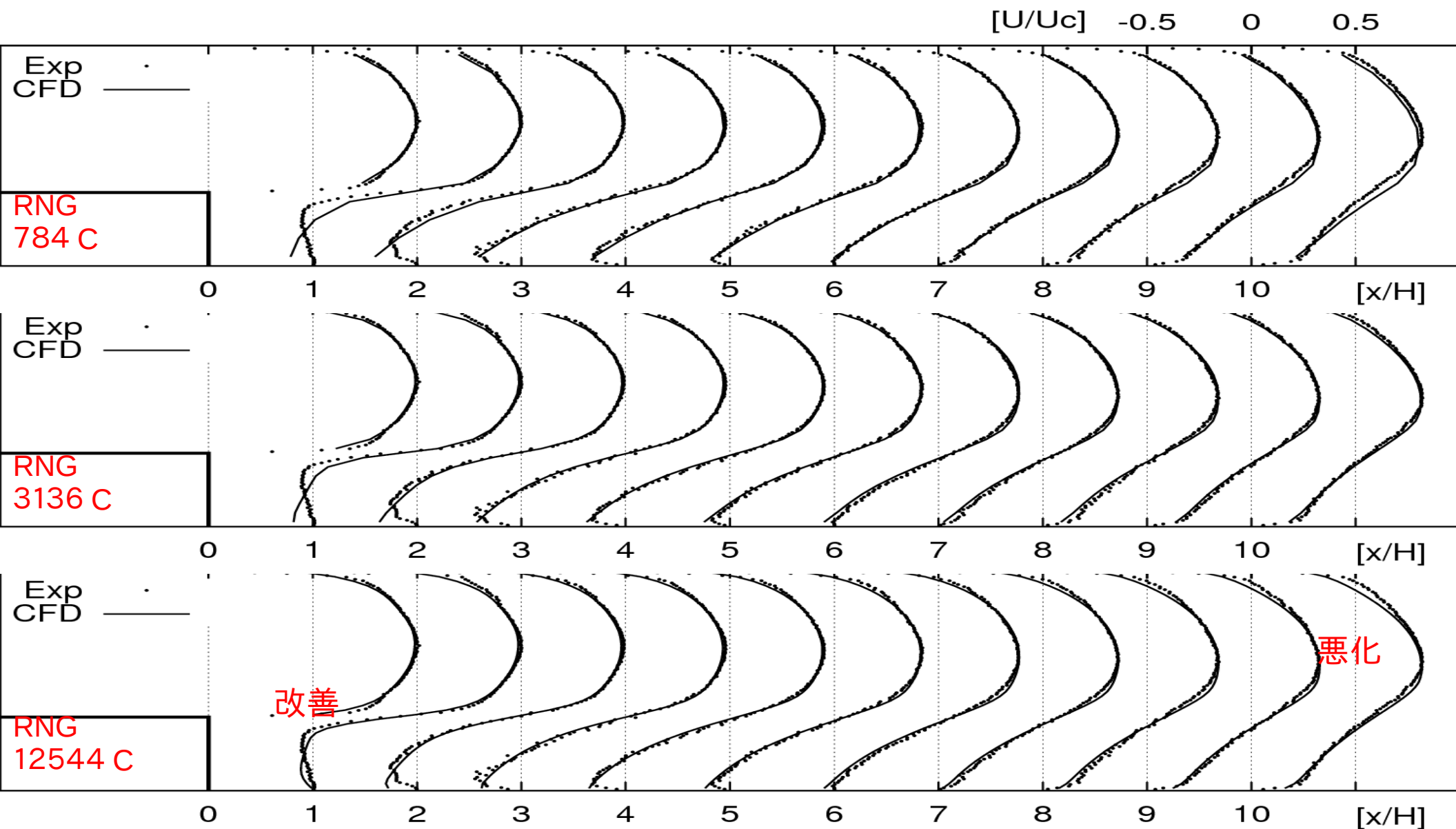
ofwikija のチュートリアル

- TurbulentBackstep のファイルを Download
- setDiscreteFields のファイルも Download
- setDiscreteFields のファイルを解凍し
\$ wmake
- TurbulentBackstep のファイルを解凍し
\$./Allrun

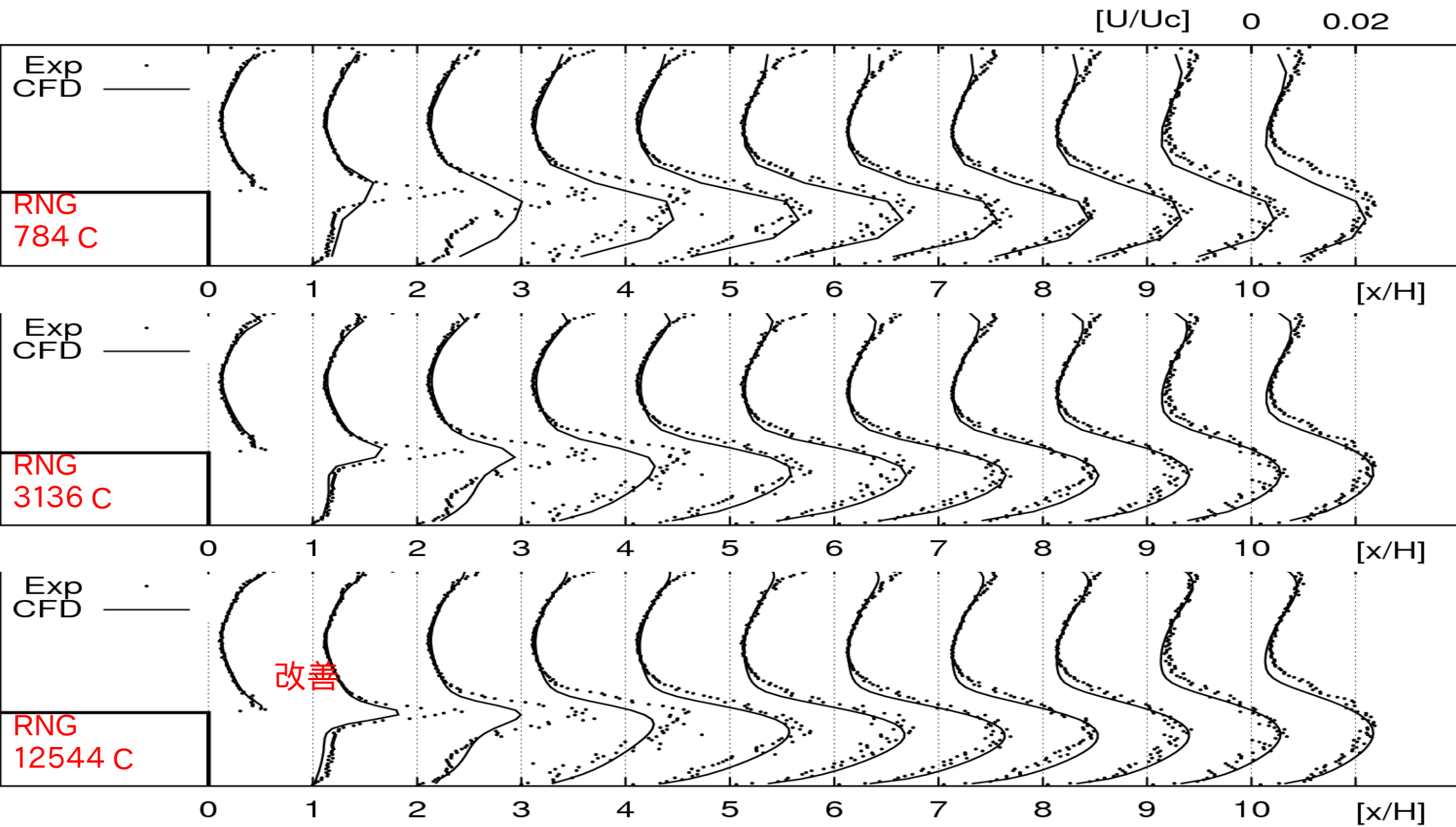
計算ケース (default メッシュ数の影響)

CASE	メッシュ分割	収束判定	最大反復回数
CASE 1 (RNG)	(8 1 8) (60 1 8) (60 1 4) 784cells	convergence 1e-2;	endTime 1000
CASE 2 (RNG)	(16 1 16) (120 1 16) (120 1 8) 3136cells	convergence 1e-5	endTime 1000
CASE 3 (RNG)	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16) 12544cells	convergence 1e-5	endTime 2200

U 速度分布 (default メッシュ数の影響)



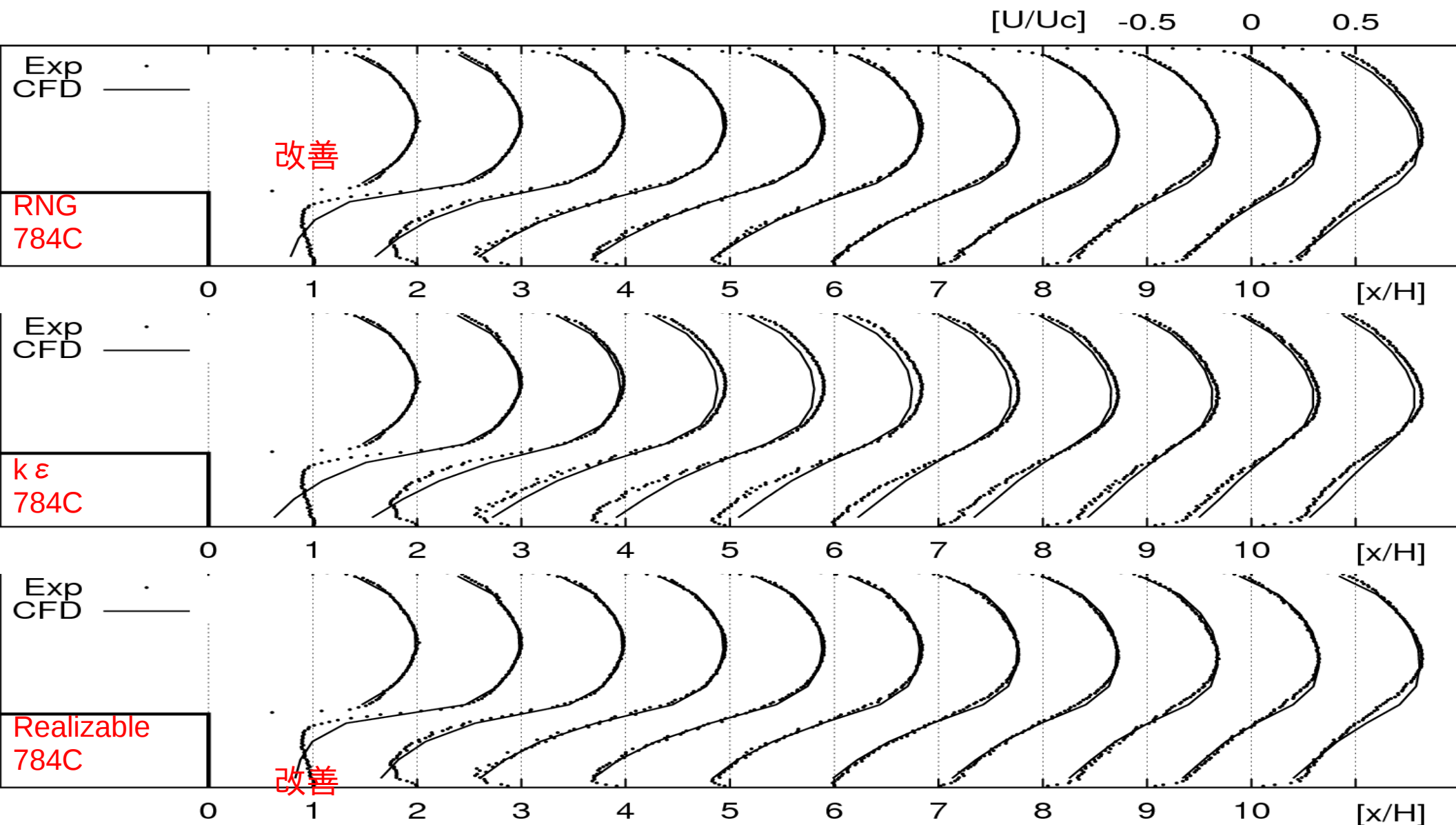
k 乱れ分布 (default メッシュ数の影響)



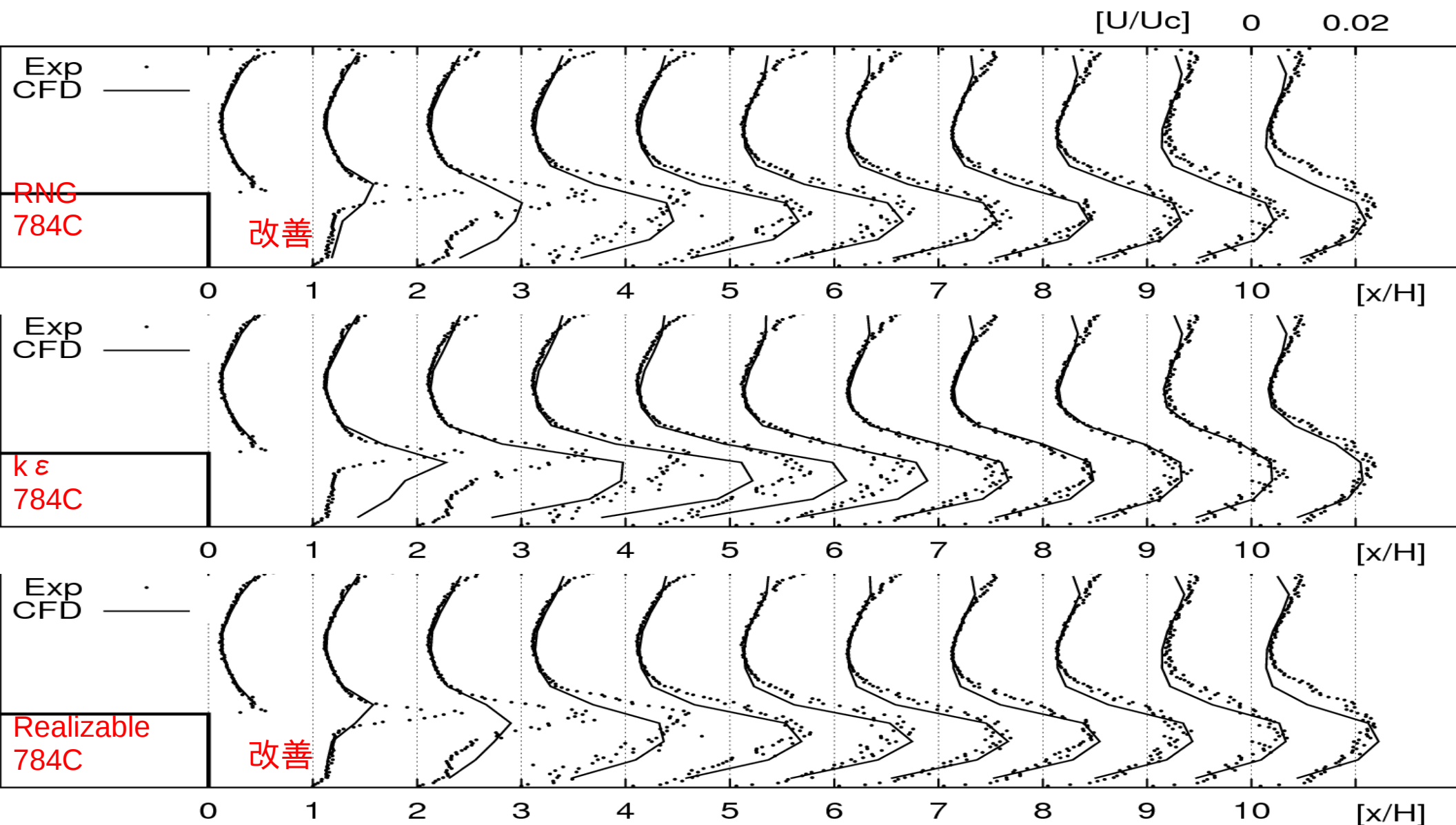
計算ケース (モデルの影響 1: メッシュ少)

CASE	メッシュ分割	収束判定	最大反復回数
CASE 3 -1 <RNG-k ϵ >	(8 1 8) (60 1 8) (60 1 4) 784cells	convergence 1e-2	endTime 1000
CASE3-2 <k ϵ >	(8 1 8) (60 1 8) (60 1 4) 784cells	convergence 1e-2	endTime 1000
CASE3-3 <Realizable>	(8 1 8) (60 1 8) (60 1 4) 784cells	convergence 1e-2	endTime 1000

U 速度分布 (モデル影響1:メッシュ少)



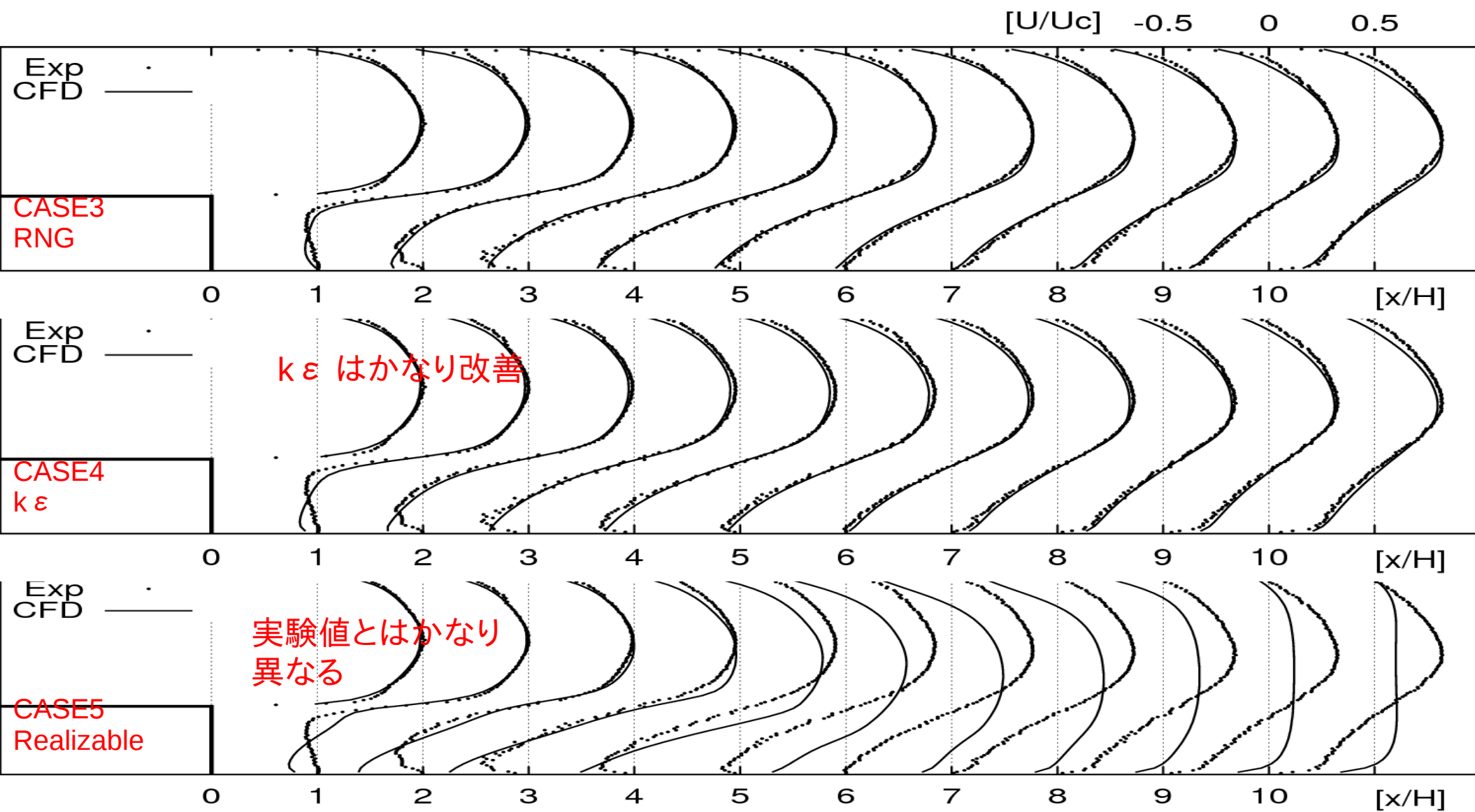
k 乱れ分布 (モデル影響1:メッシュ少)



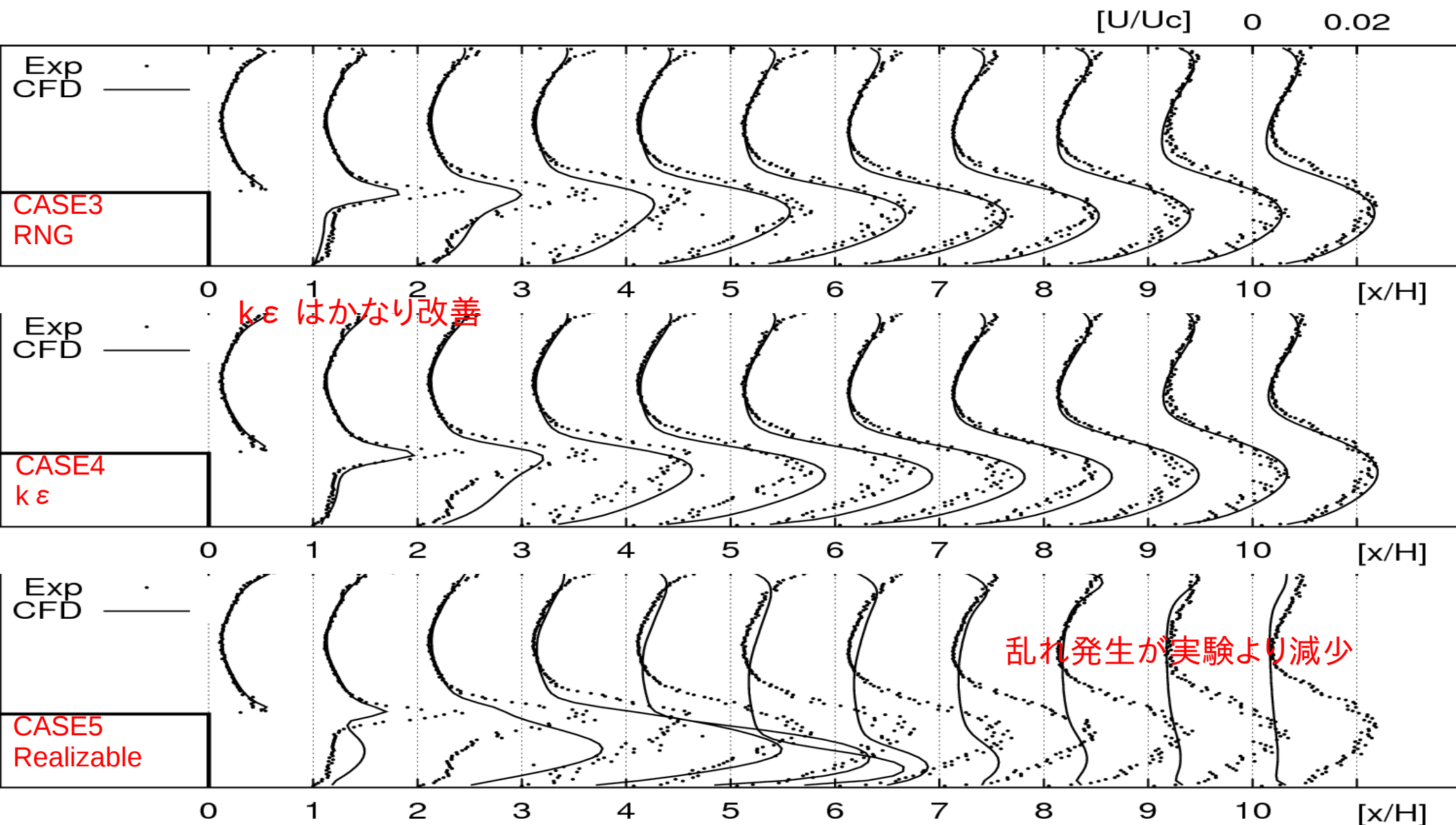
計算ケース(モデルの影響 2:メッシュ多)

CASE	メッシュ分割	収束判定	最大反復回数
CASE 3 <RNG-k ϵ >	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16) 12544cells	convergence 1e-5	endTime 2200
CASE4 <k ϵ >	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16) 12544cells	convergence 1e-5	endTime 2200
CASE5 <Realizable>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16) 12544cells	convergence 1e-5 収束のため Uの緩和係数=0.1 に変更	endTime 2200

U 速度分布 (モデルの影響 2: メッシュ多)



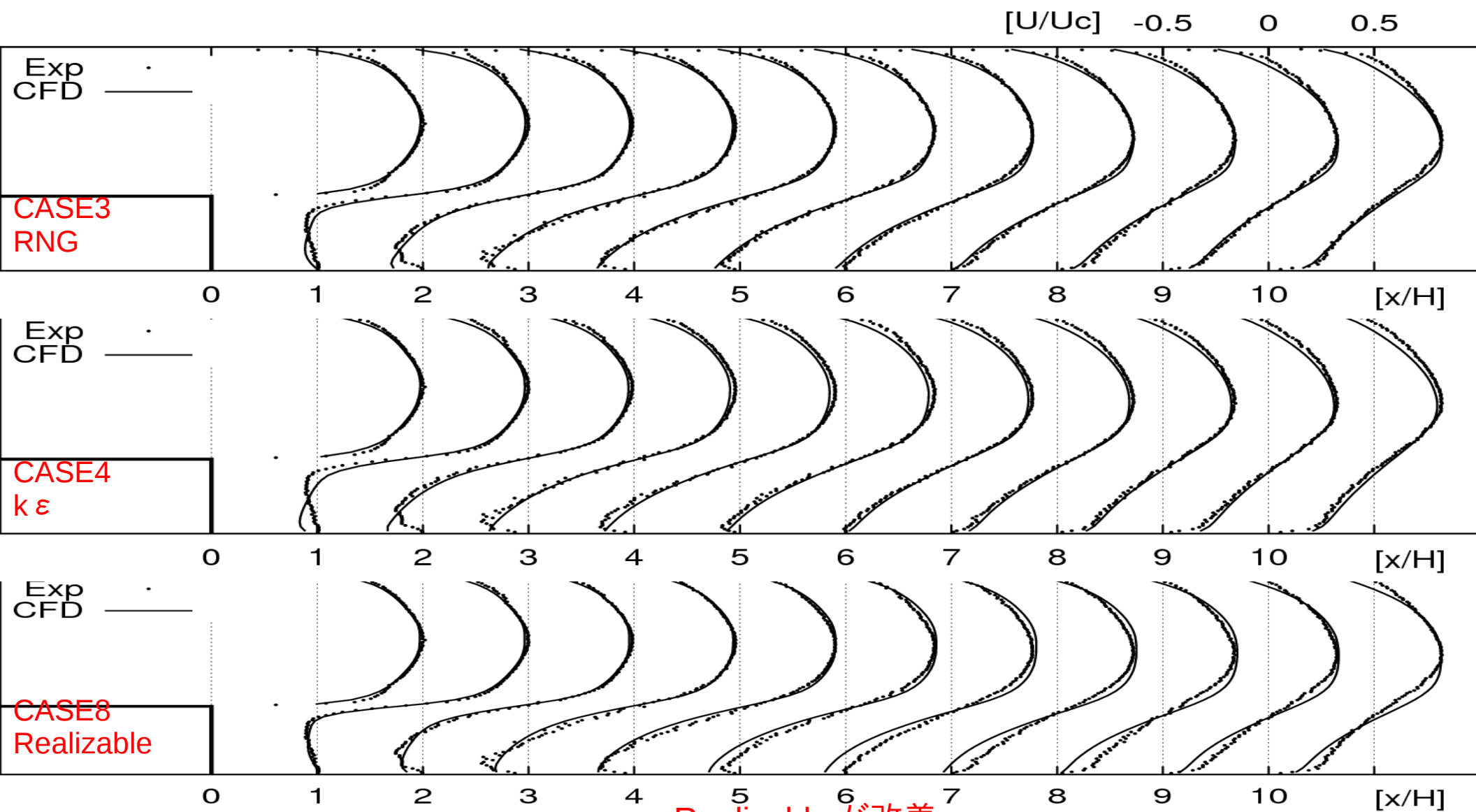
k 乱れ分布 (モデルの影響 2 : メッシュ多)



計算ケース(モデル影響 3 : Realizable 検討)

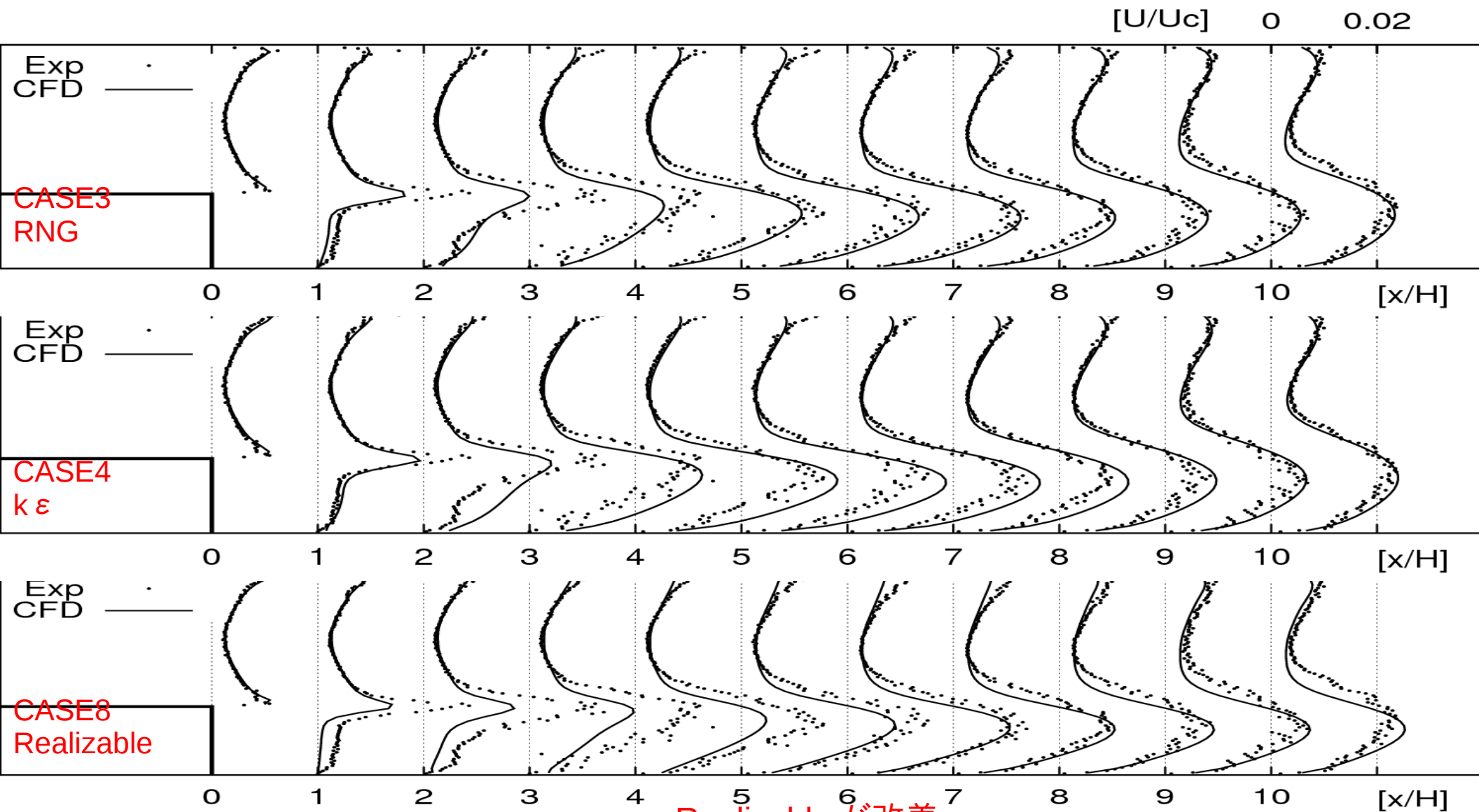
CASE	メッシュ分割	収束判定	k f-scheme
CASE 3 <RNG-ke>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-5	Linear Limited
CASE4 <k ε >	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-5	Linear Limited
CASE 6 <Realizable>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-5	Upwind に変更

U 速度分布 (モデル影響 3 : Realizable 検討)



Realizable が改善

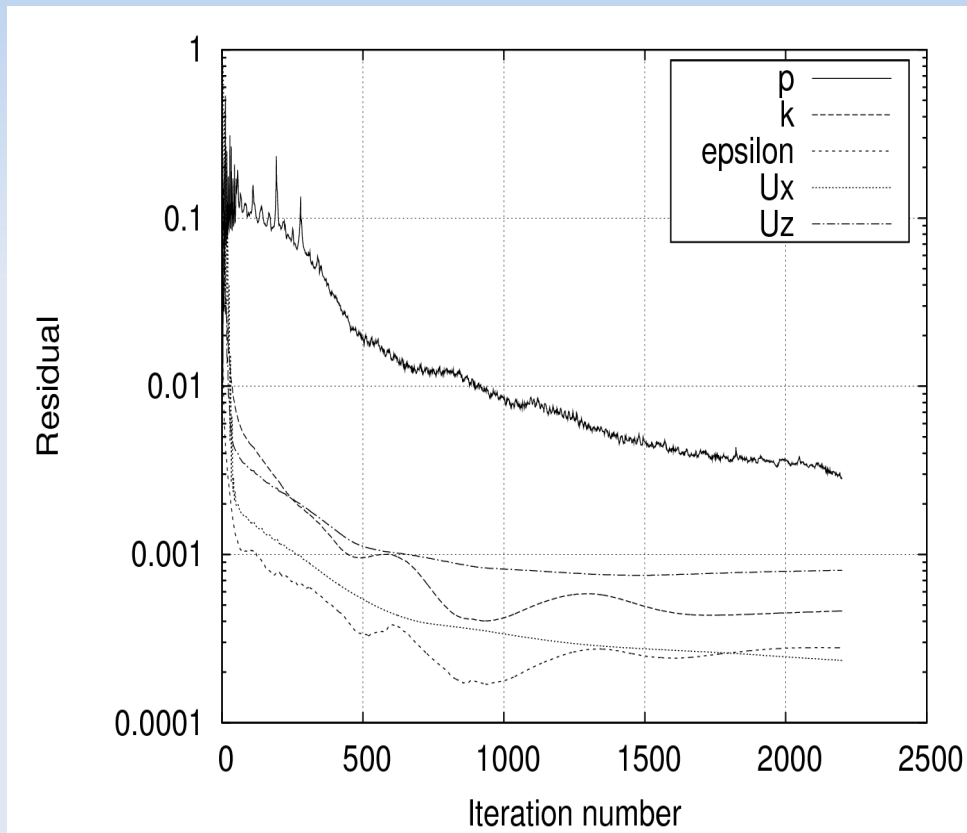
k 乱れ分布 (モデル影響 3 : Realizable 検討)



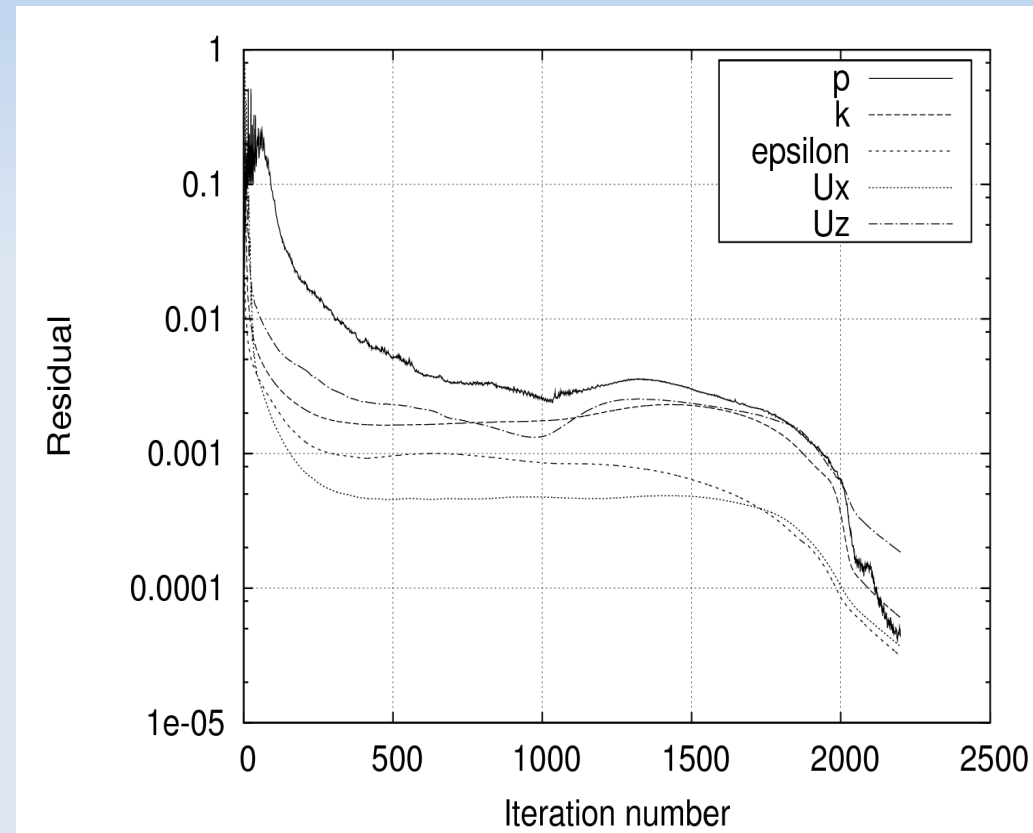
Realizable が改善

Realizable k f-scheme の収束状況

CASE5 linerlmed

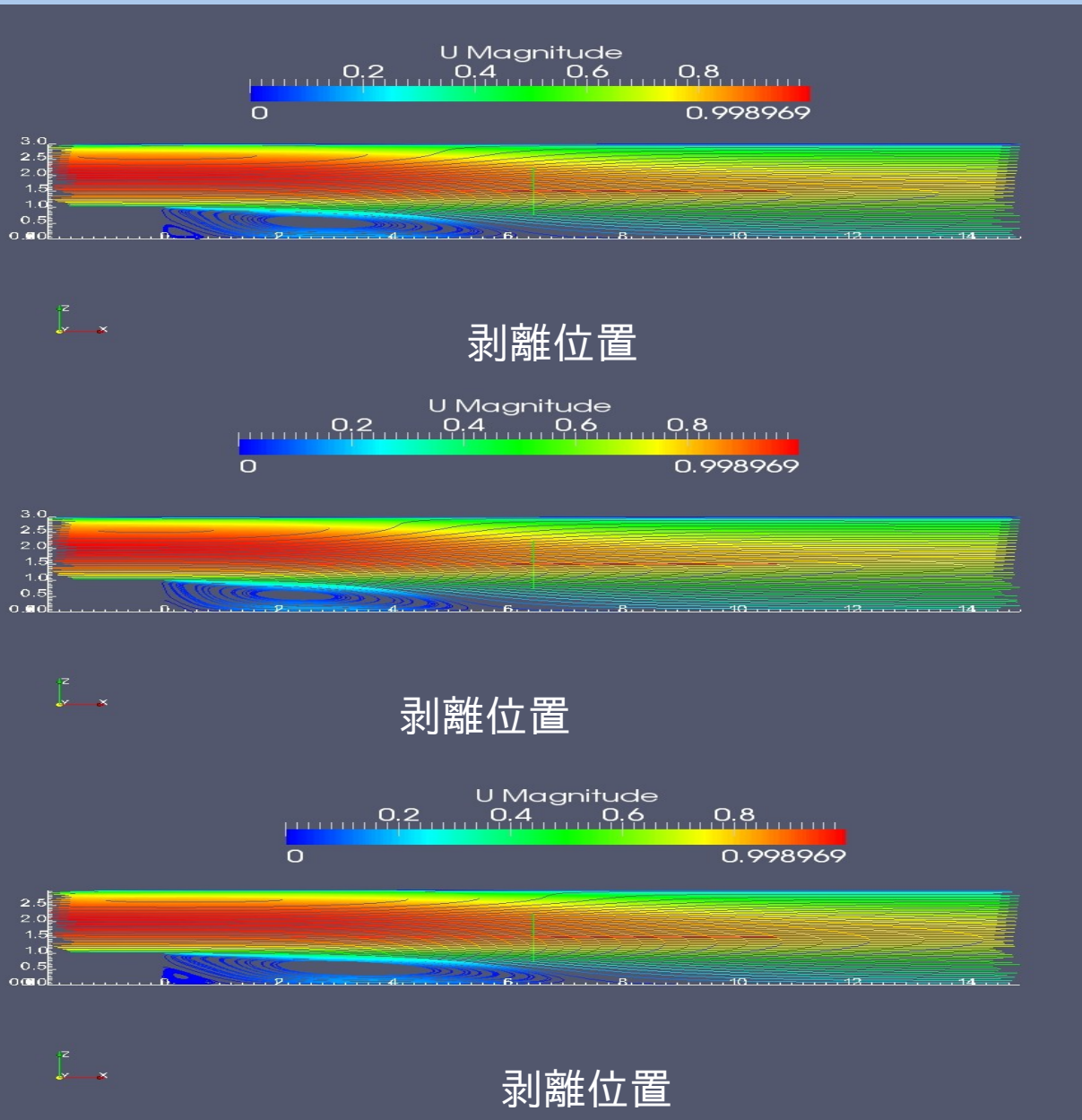


CASE 6 upwind



両者とも収束は OK

剥離位置の比較



RNG $x=6.4$

$k \varepsilon$ $x=5.6$

Realizable $x=7.2$

実験 $x=6.51$

(岐阜)

Spalart-Allmaras (スパラートアルマラス) の検討

渦粘性 ν_t の式

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi := \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

Nutilda の輸送方程式 (この1つの方程式をとけば ν_t が決まる。)

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla \cdot [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + C_{b2} |\nabla \nu|^2 \} - [C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2}] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

変数と定数

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

$$S \equiv \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$$

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}, \quad g = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}$$

$$f_{t1} = C_{t1} g_t \exp \left(-C_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} [d^2 + g_t^2 d_t^2] \right)$$

$$f_{t2} = C_{t3} \exp(-C_{t4} \chi^2)$$

σ	=	2/3
C_{b1}	=	0.1355
C_{b2}	=	0.622
κ	=	0.41
C_{w1}	=	$C_{b1}/\kappa^2 + (1 + C_{b2})/\sigma$
C_{w2}	=	0.3
C_{w3}	=	2
C_{v1}	=	7.1
C_{t1}	=	1
C_{t2}	=	2
C_{t3}	=	1.1
C_{t4}	=	2

< 一方程式モデル > 計算量が少ない。
 但し、剥離流は不得意。
 剥離の少ない翼回り流れで使用。
 航空宇宙分野で発展。

計算ケース (Spalart Allmaras)

- Orig0 → nuTilda ファイル、nut ファイルを追加
- constant/RASProperties → RASModel SpalartAllmaras; に変更
- system/fvSchemes → div(phi,nuTilda) Gauss limitedLinear 1; を追加
- system/fvSolution "(U|k|epsilon|R)" → "(U|k|epsilon|R|nuTilda)" に変更
- system/fvSolution relaxationFactors nuTilda =0.7 → nuTilda 1.0; に変更
↑ 小さくすると発散する

CASE	メッシュ分割	収束条件	nuTilda の流入条件
CASE7-1 <Spalart-Allmaras>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-3	0.001
CASE7-2 <Spalart-Allmaras>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-3	0.01
CASE7-3 <Spalart-Allmaras>	(32 1 32) (240 1 32) (240 1 16)	convergence 1e-3	0.1

Orign0 (nuTilda nut) の追加

```
/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 1.7.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM.com |
| \ / Manipulation |
|-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class volScalarField;
  object nuTilda;
}
// ***** //

dimensions [0 2 -1 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
  inlet
  {
    type fixedValue;
    value uniform 0.001;
  }
  outlet
  {
    type zeroGradient;
  }
  front
  {
    type empty;
  }
  back
  {
    type empty;
  }
  "*"
  {
    type zeroGradient;
  }
}

} 2011/10/15
// ***** //
```

今回の計算パラメータ
0.0だと発散する。

```
/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 1.7.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM.com |
| \ / Manipulation |
|-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class volScalarField;
  location "0";
  object nut;
}
// ***** //

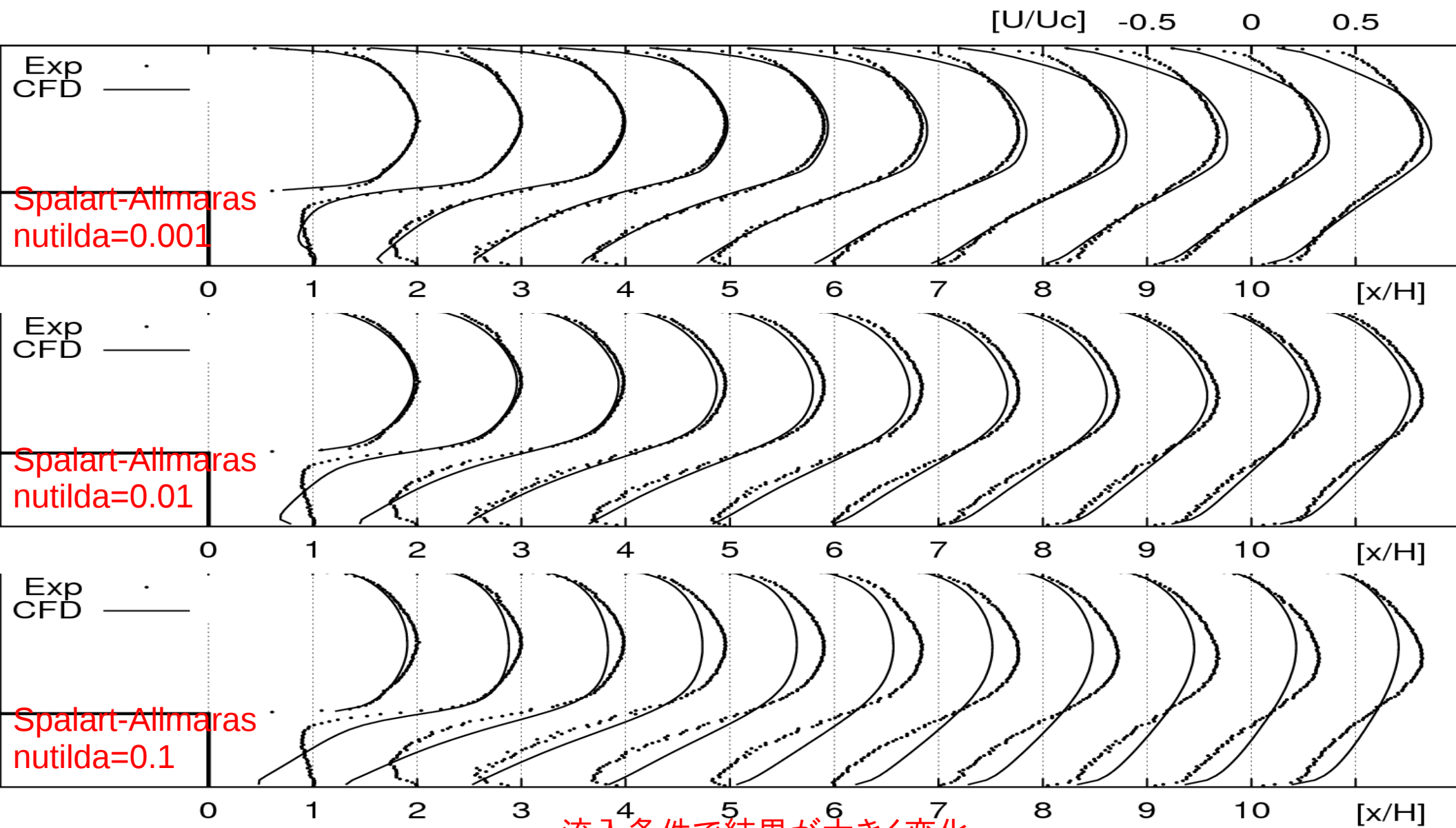
dimensions [0 2 -1 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
  inlet
  {
    type calculated;
    value uniform 0.0;
  }
  outlet
  {
    type calculated;
    value uniform 0;
  }
  front
  {
    type empty;
  }
  back
  {
    type empty;
  }
  "*"
  {
    type nutWallFunction;
    value uniform 0.0;
  }
}
// ***** //
```

nutSpalartAllmarasWallFuncitonに変更しても結果は変わらない。

U 速度分布 (境界条件の影響)



流入条件で結果が大きく変化

Spalart Allmaras の inlet 条件変更

SetDiscreteFieldsDict に nuTilda, nut の実験分布を入力
k、ε の inlet 分布はわかるので nuTilda と nut を計算

$$k = \frac{3}{2} (U l)^2$$

$$\epsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}$$

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{3}{2}} (U l) = (2/3)^{0.5} C_{\mu}^{3/4} k^{2/3} l \epsilon$$

0.09

nuTilda

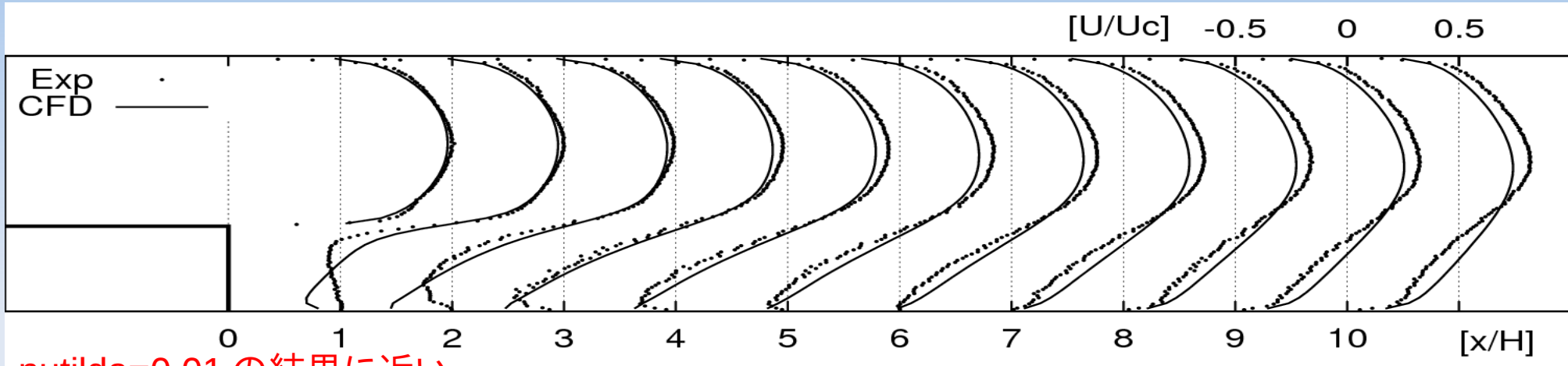
$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{\nu 1}, \quad f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{\nu 1}^3}, \quad \chi := \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

nut

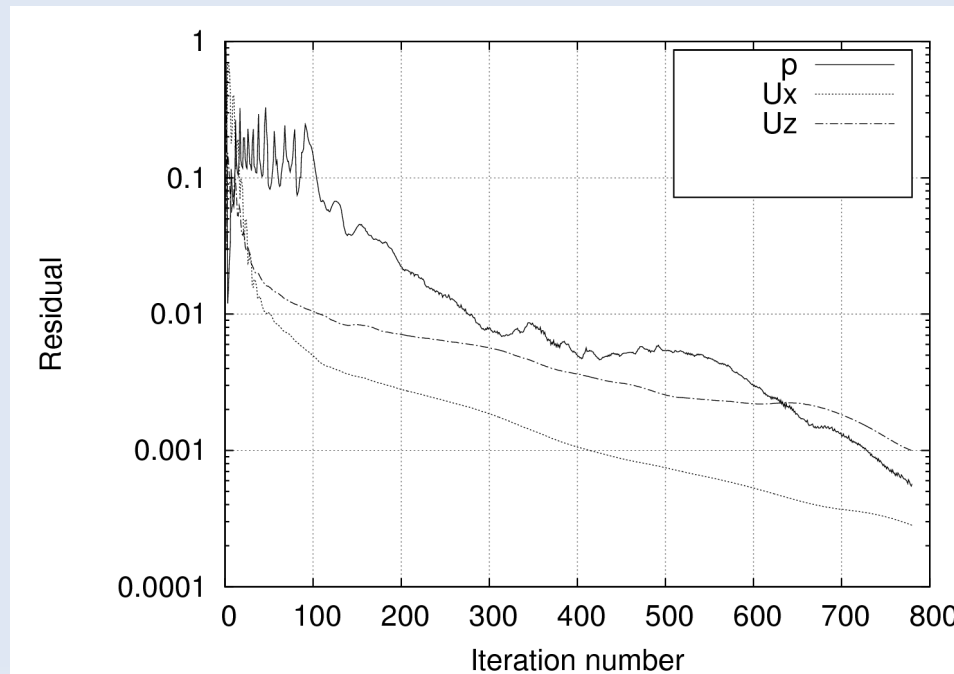
7.1

1.818e-4: 粘性係数

U 速度分布 (Spalart Allmaras)

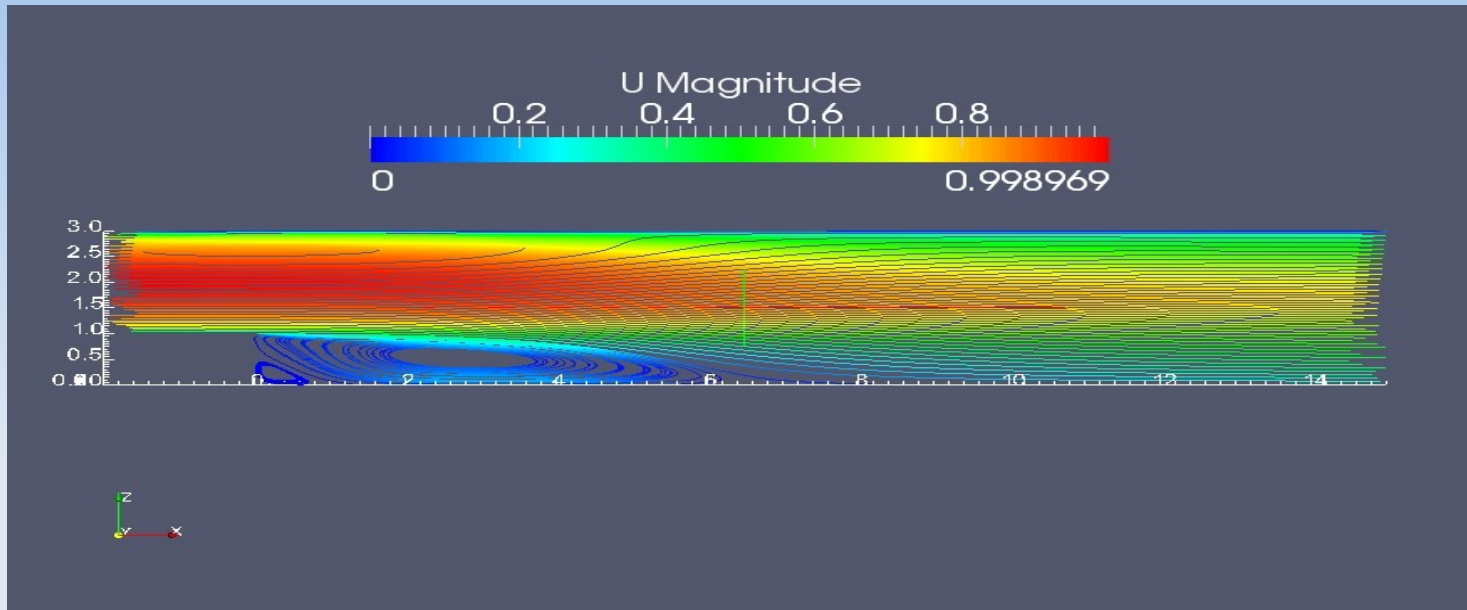


nutilda=0.01 の結果に近い



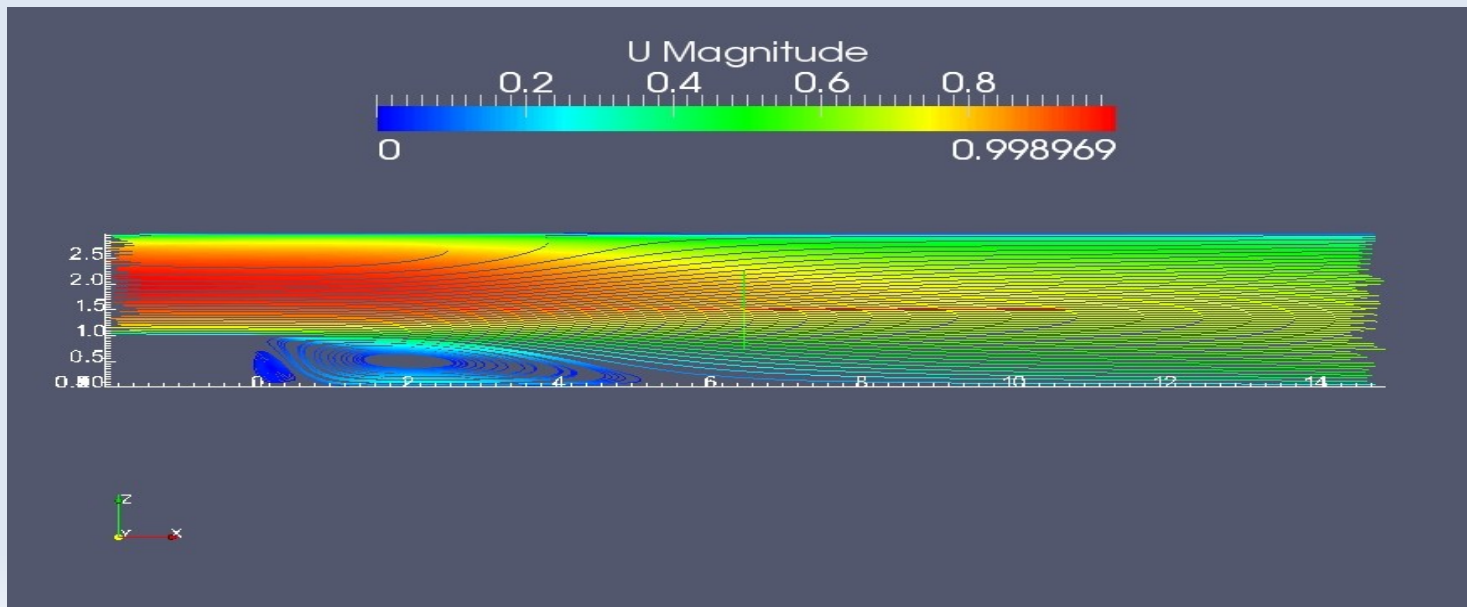
緩和係数
NuTilda=0.7
でも収束.
収束性は改善

剥離位置の比較



RNG

$x=6.4$



Spalart Allmaras

$x=5.4$

k ω -SST(Shear-Stress-Transfort) の検討

nut

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

物体壁近くの境界層(粘性底層を含)と外部流れで計算方法を切替 >> 剥離流れやよどみ点流れでも適用可

k- ω 2方程式 < ω は比エネルギー散逸率 = $\varepsilon / (C_\mu k)$ >

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

定数および補助関係式

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad S \equiv \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{C D_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad C D_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad \alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44 \quad \beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828 \quad \beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

計算ケース (k ω -SST)

- Orig0 → omega ファイルを追加
- constant/ RASProperties → RASModel kOmegaSST; に変更
- system/fvSchemes → div(phi,omega) Gauss limitedLinear 1; を追加
→ laplacian(DomegaEff,omega) Gauss linear corrected を追加
- system/fvSolution "(U|k|epsilon|R)" → "(U|k|epsilon|omega|R)" に変更

inlet の k と ϵ から Inlet の ω を計算

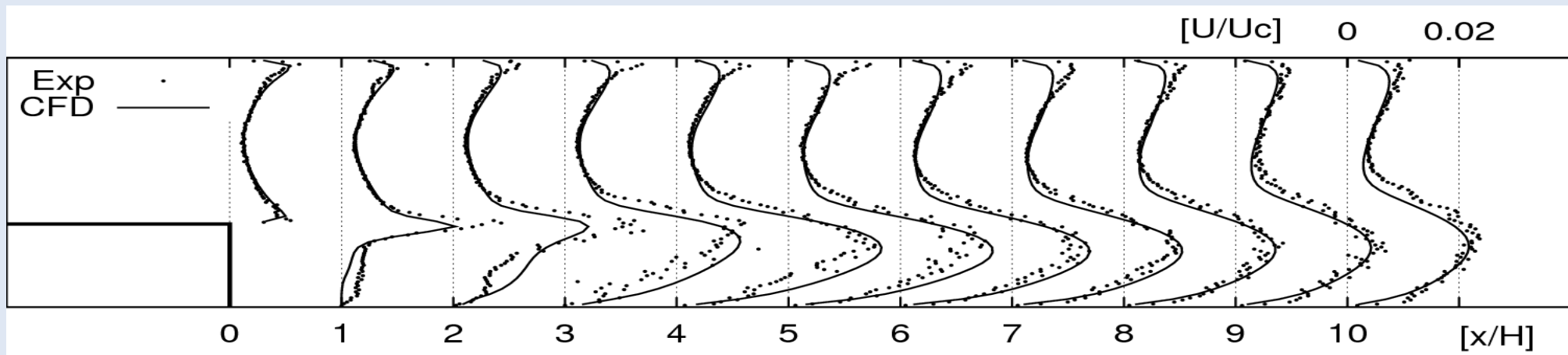
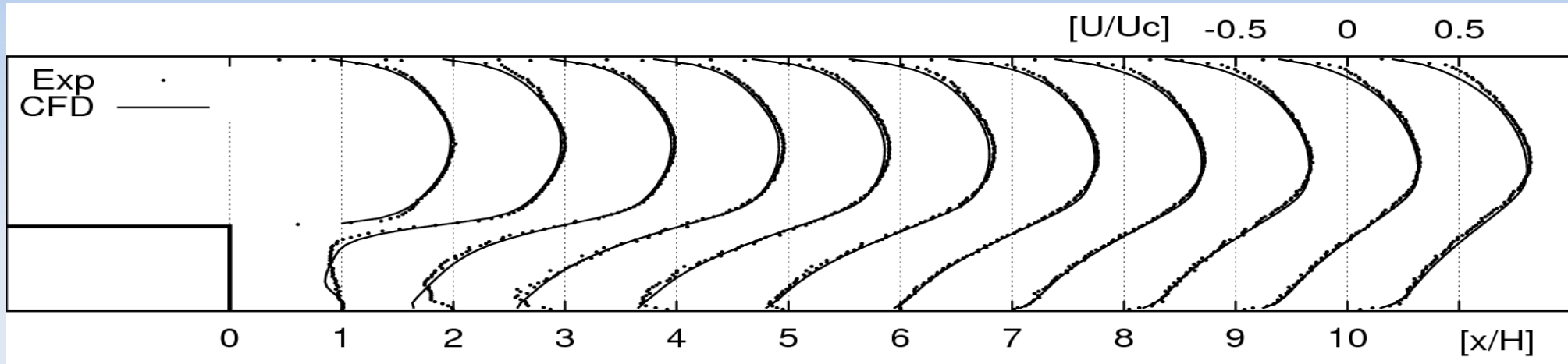
$$\epsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}$$

$$\omega = C_{\mu}^{-\frac{1}{4}} \frac{\sqrt{k}}{l}$$

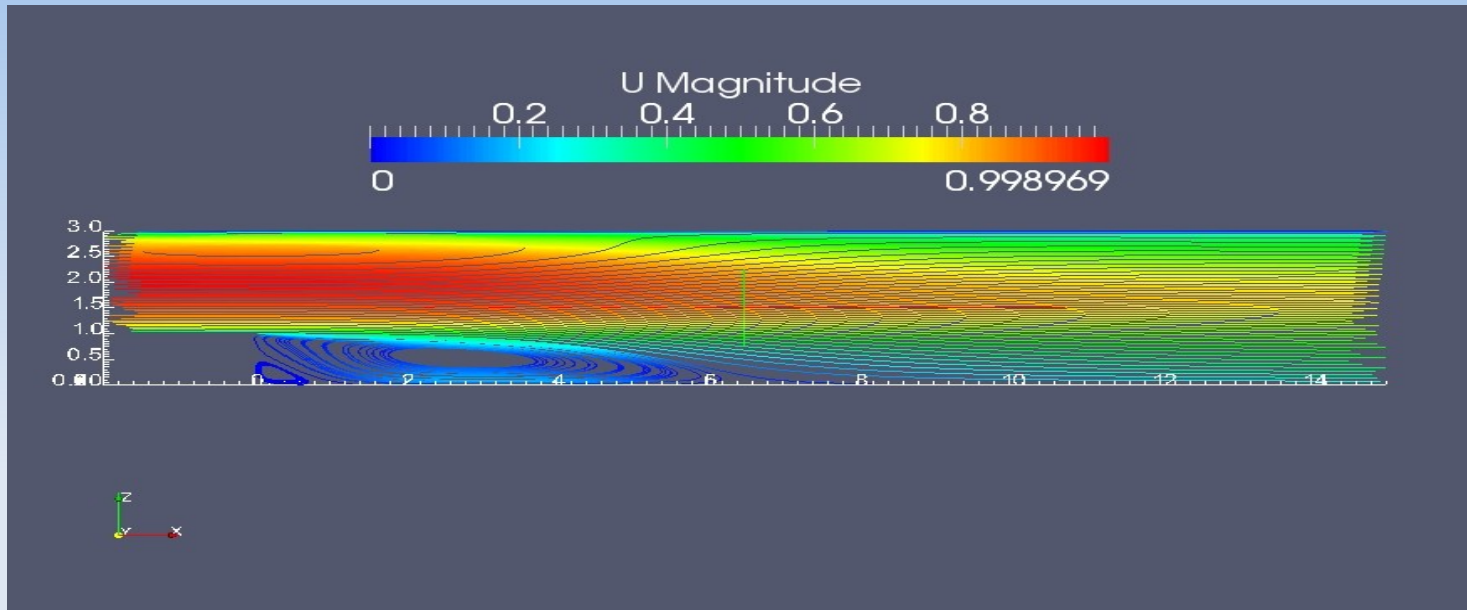
0.09

乱流の長さスケール

k ω -SST の結果

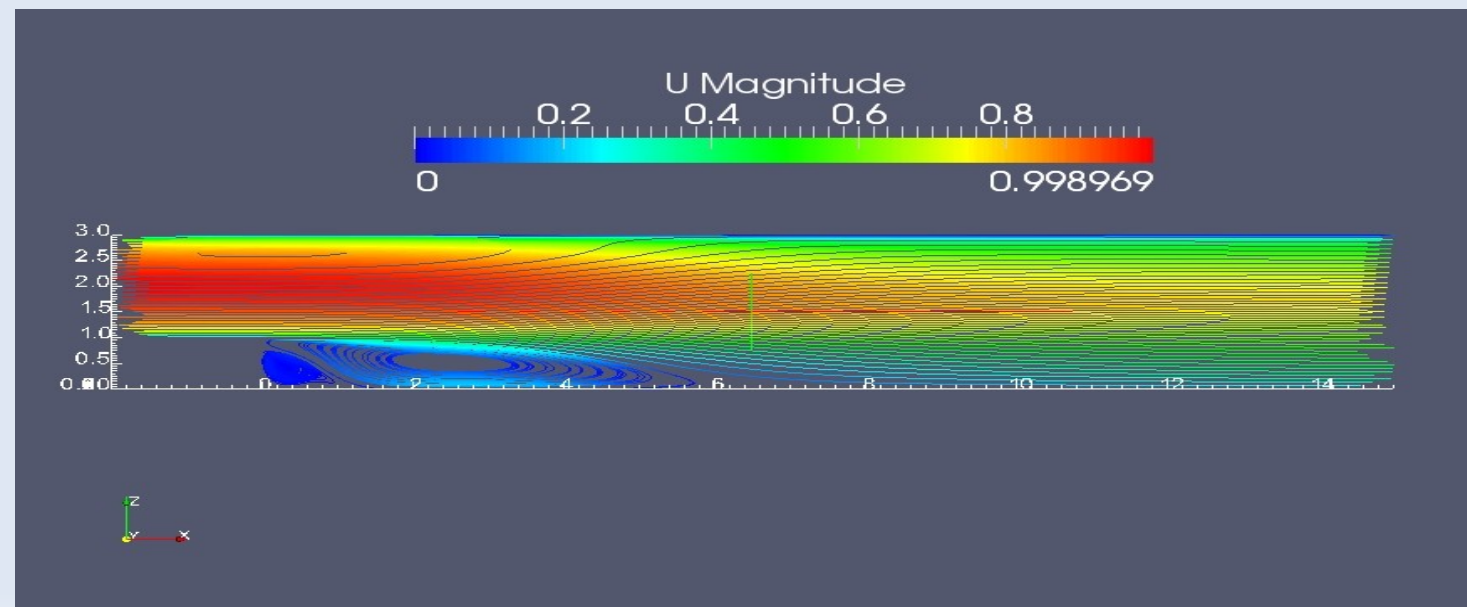


剥離位置の比較



RNG

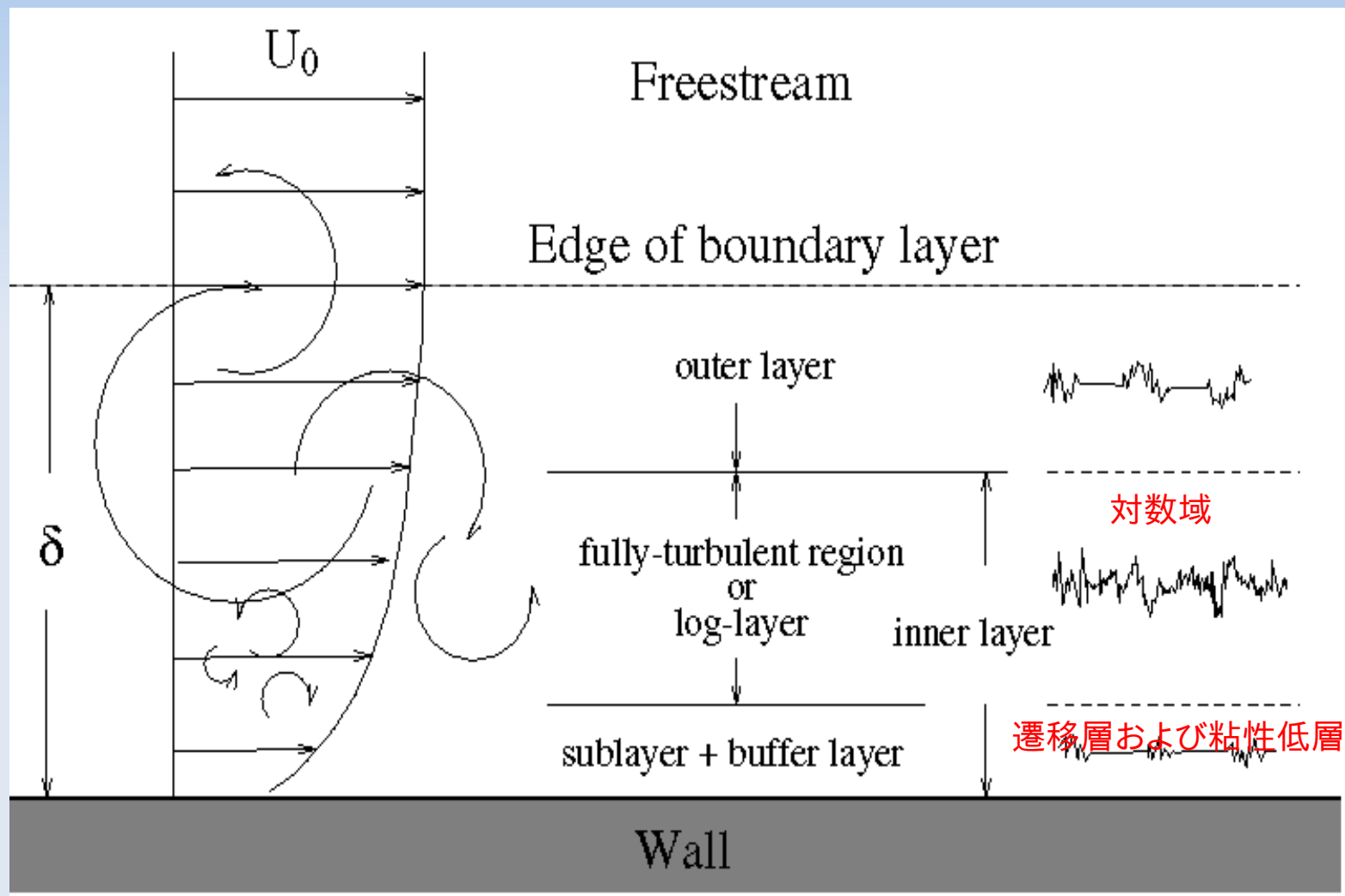
x=6.4



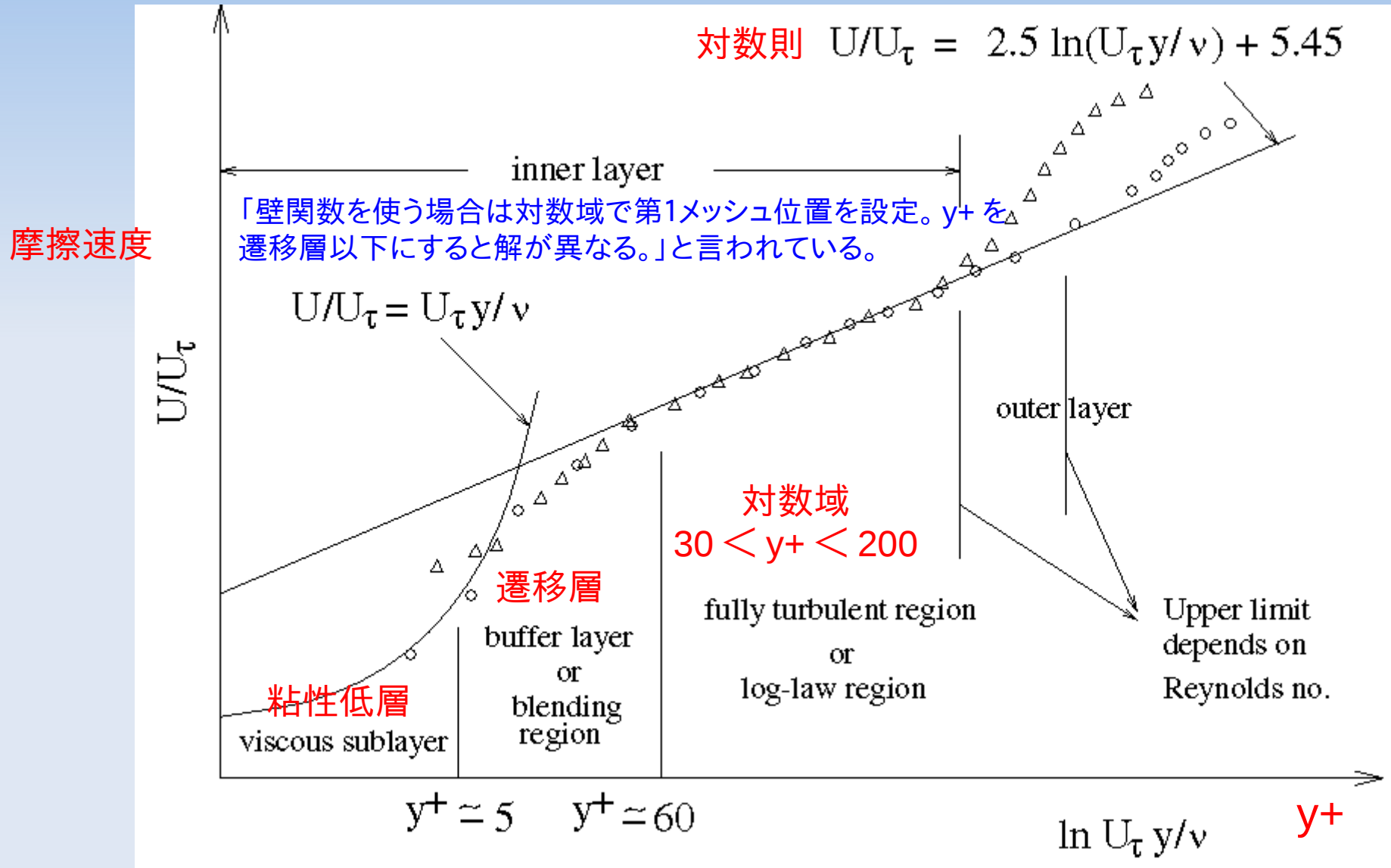
k-omega SST

x=6.4

壁関数検討：壁付近の流れ構造



壁関数検討：壁法則



壁関数検討: y^+ の見積

y^+ を見積りたい。以下の計算ツールをつかう。
→ <http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/>

Viscous Grid Spacing Calculator

This page provides a worksheet for estimating the normal spacing to be used in a viscous CFD grid. Estimates are for a turbulent flat plate in free air and are based on the Sutherland formula for viscosity.

What information do you have?
[Reynolds Number](#)
[Mach. Q. To](#)
[Total conditions](#)

For a given Reynolds number, Mach number and desired y^+ value, this page will estimate the spacing normal to a solid surface required to yield 1 grid point in the laminar sublayer.

INPUT		OUTPUT	
Re	30.0 ($\times 10^6$)	ds=	[] inches (meters)
Ref. Length	100 inches		
y^+	1		

Calculate

For a given Mach number, dynamic pressure, and desired y^+ value, this page will estimate the spacing normal to a solid surface required to yield 1 grid point in the laminar sublayer.

平板上を流れる乱流境界層 (Sutherland の公式)

壁関数検討： y^+ の見積

$Re = 5500$

$L = 1 \text{ m}$

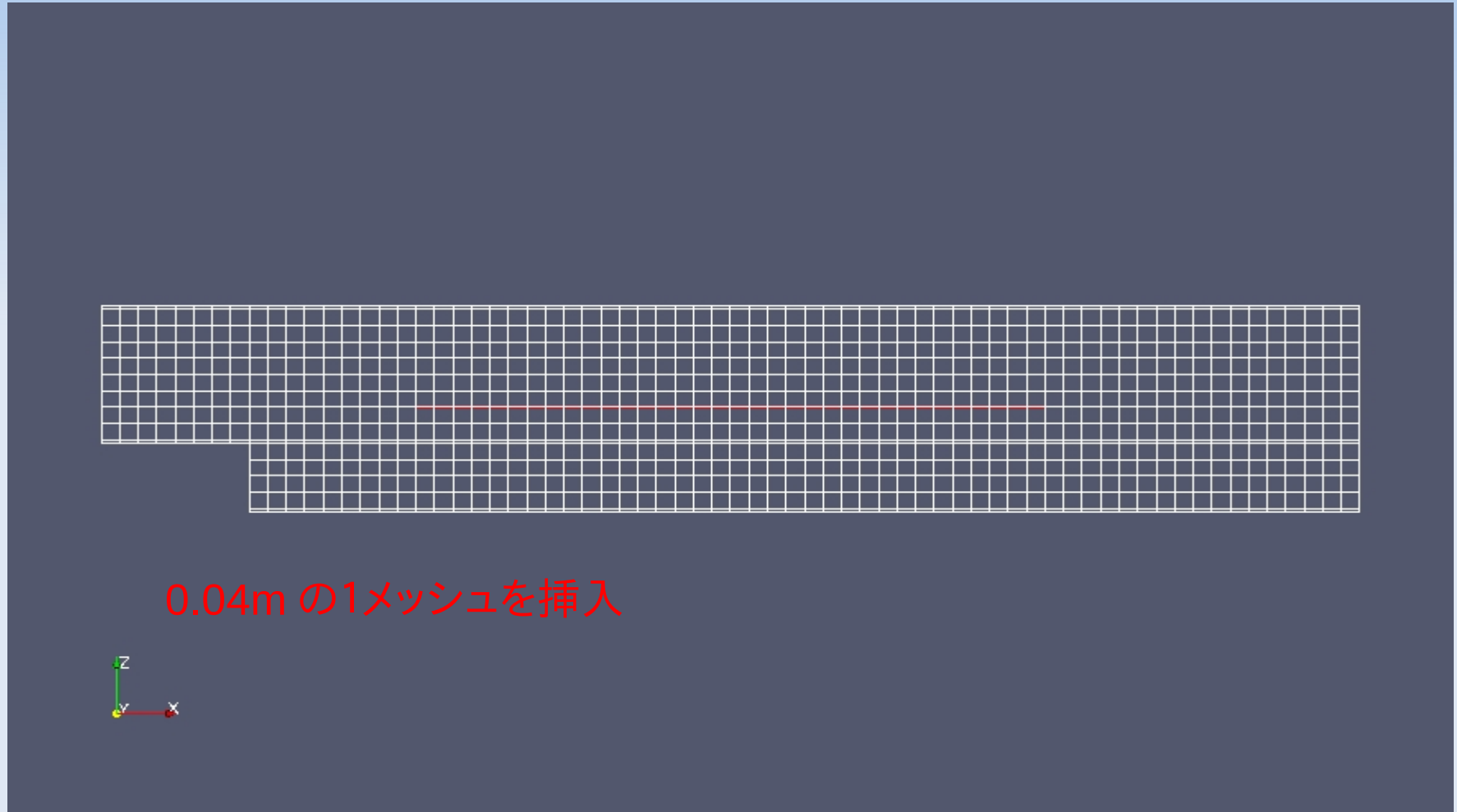
$Y^+ = 115$ (30~200の中心)

→ 第一メッシュと壁との距離 $\sim 0.273 \text{ m}$
デフォルトメッシュ = 0.25 m

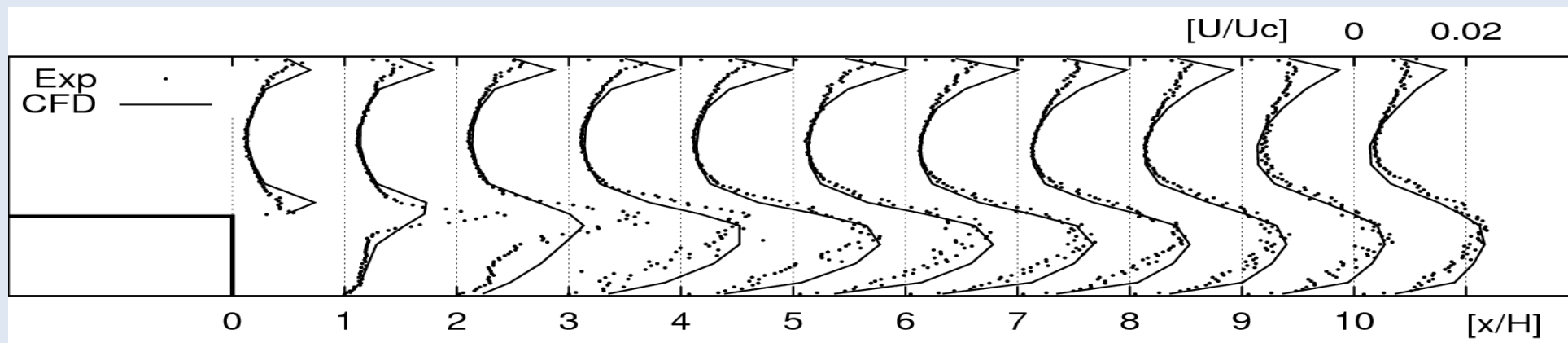
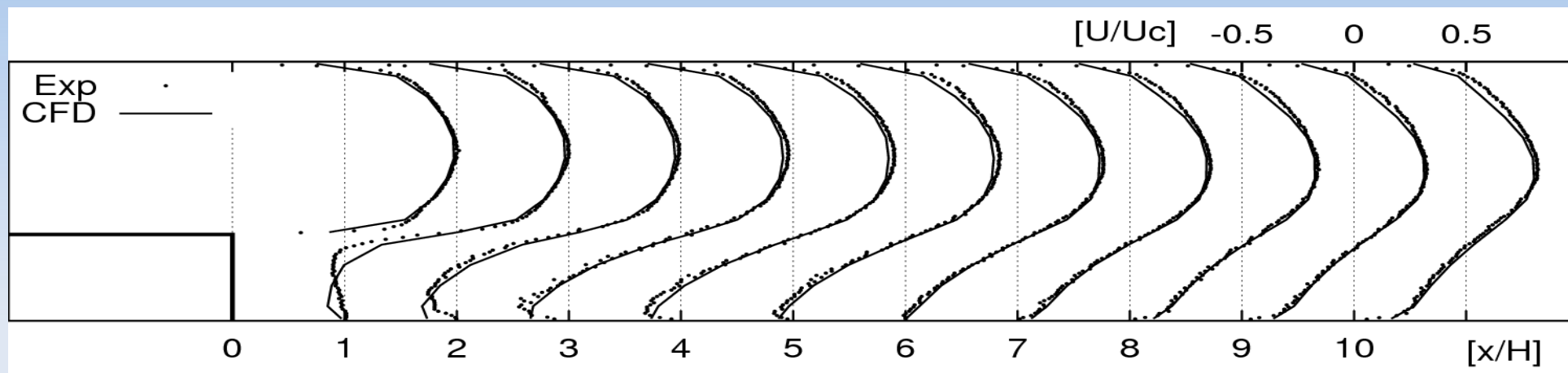
デフォルトメッシュでほぼ良いということになる。
すると、メッシュを細かくした場合の y^+ は対数域にないのに精度が良くなったのはなぜか？

Y^+ が対数域で無い場合は、壁関数を使わないアルゴリズムに切り替えるコードもあるので OpenFOAM もそうなのか。

壁関数検討：第一メッシュ 0.04m の場合



壁関数: $y^+=0.04m$ の場合の計算結果

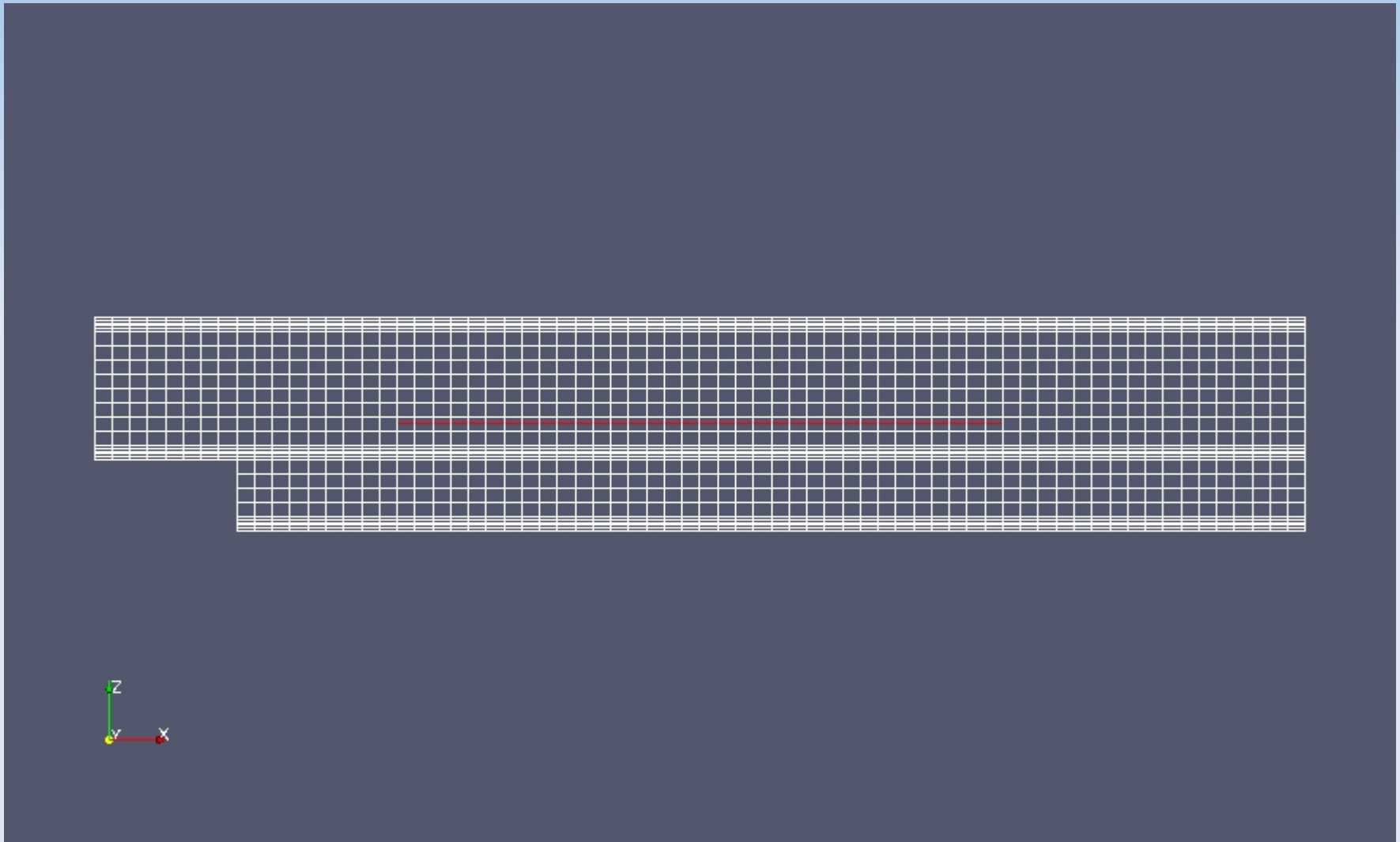


RNG モデル。

壁付近の乱れが過大。

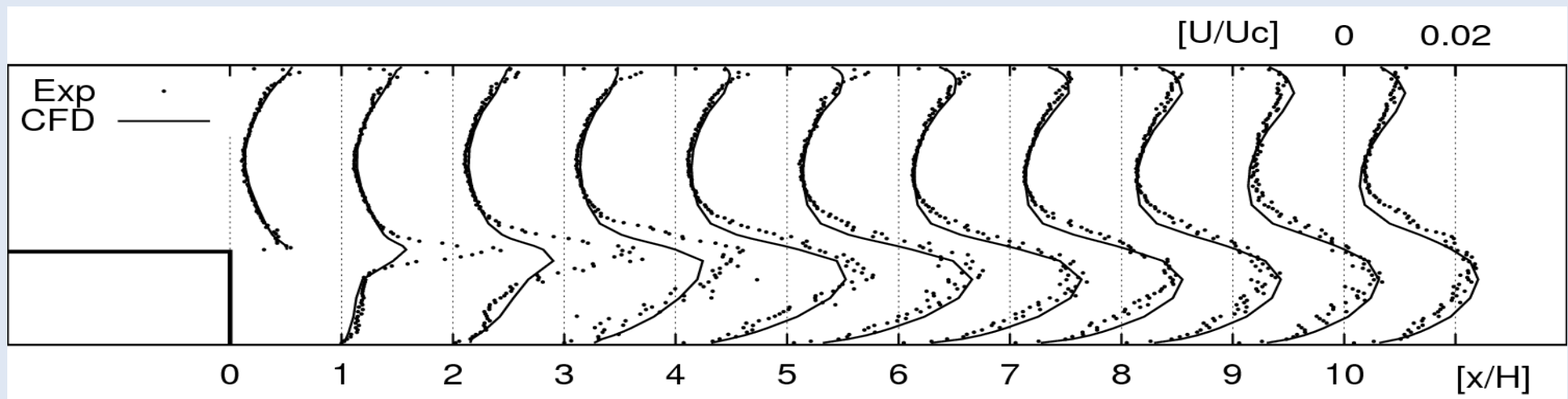
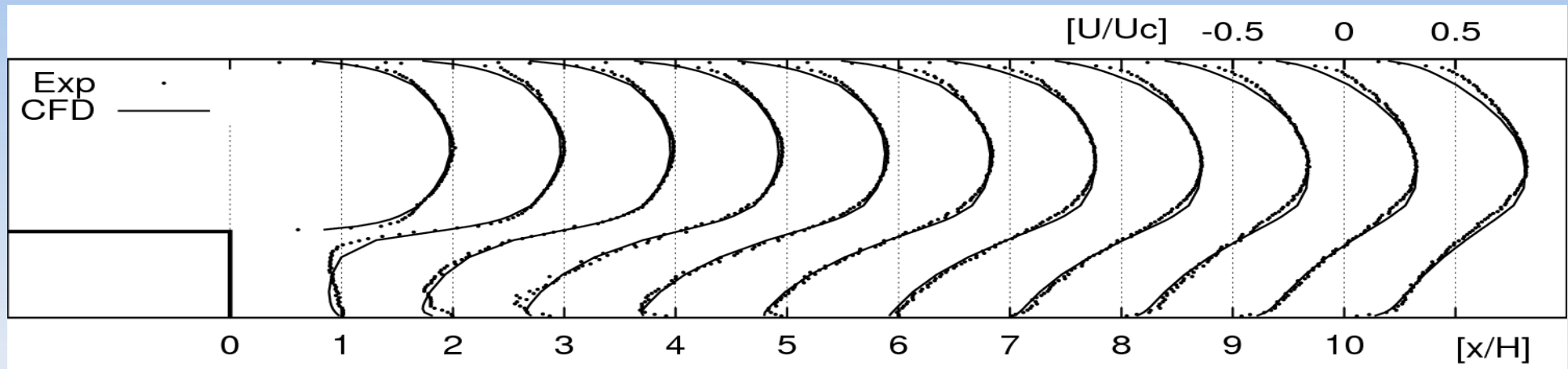
やはり、対数域より小さい位置で y^+ を設定すると解が不自然

壁関数：積層メッシュの場合



壁から第1メッシュは $\Delta Z=0.04\text{m}$ である。しかし、対数域と想定される $\Delta Z=0.2\text{m}$ まで $\Delta Z=0.04$ を5層積み上げた。
1764cells

壁関数:積層メッシュの計算結果



- ・結果は良好。1780 セルで速度分布はかなり改善。
- ・1メッシュの場合 y^+ は対数域にとる必要がある。対数域を含む積層メッシュなら計算は良好となった。

Inlet: 実験データを使わない場合

今回、inlet の U と k 、 ε は実験データを与えて計算している。データがない場合はどうするか？

→

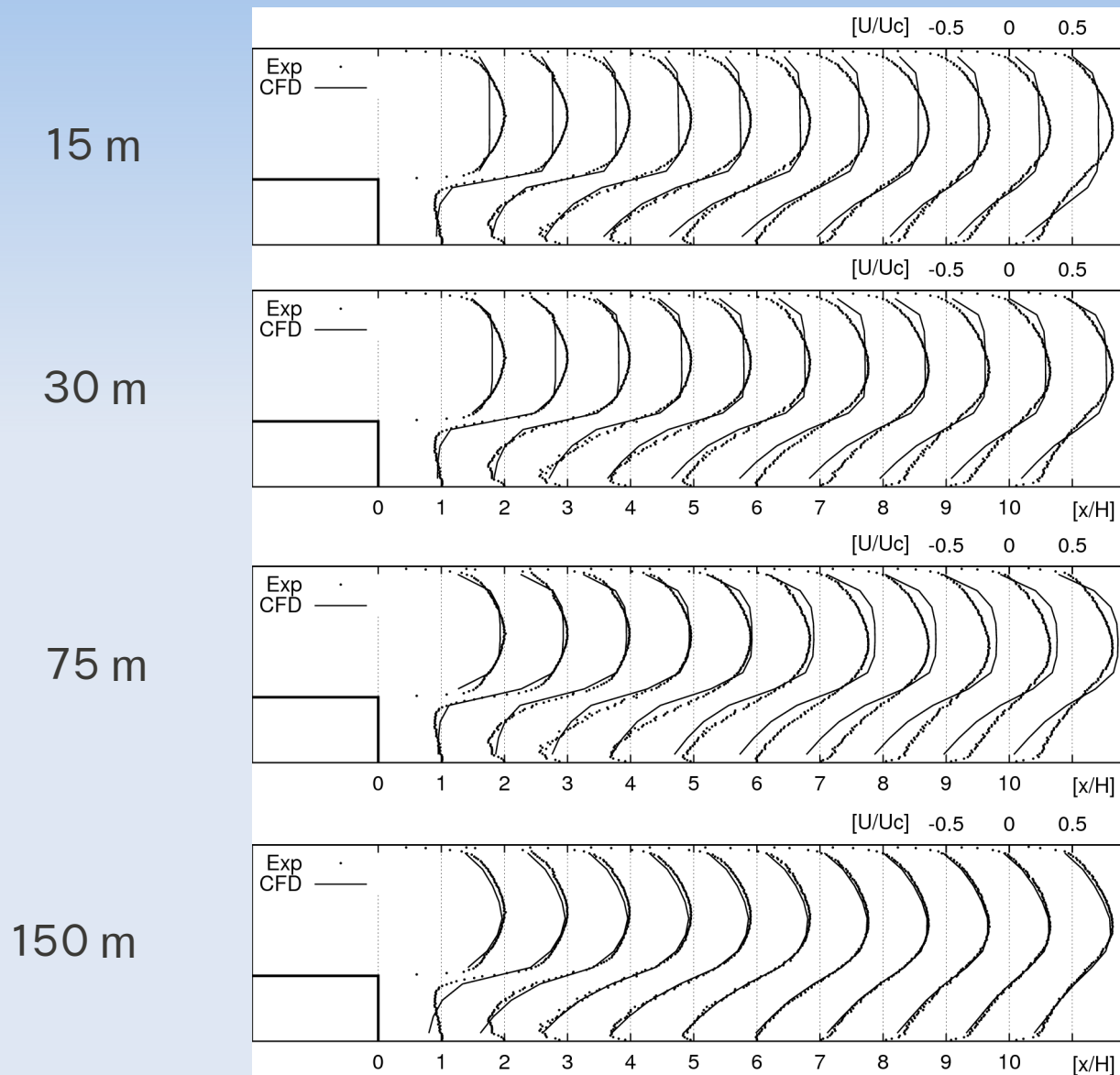
$$U = (\text{平均流速}) = 0.87\text{m/s}$$

$$k = \text{平均流速の1\%の乱れ} = 0.00007(\text{m}^2/\text{s}^2)$$

$$\varepsilon = \text{散逸長は流路幅の10\%} = 0.0037(\text{m}^2/\text{s}^3)$$

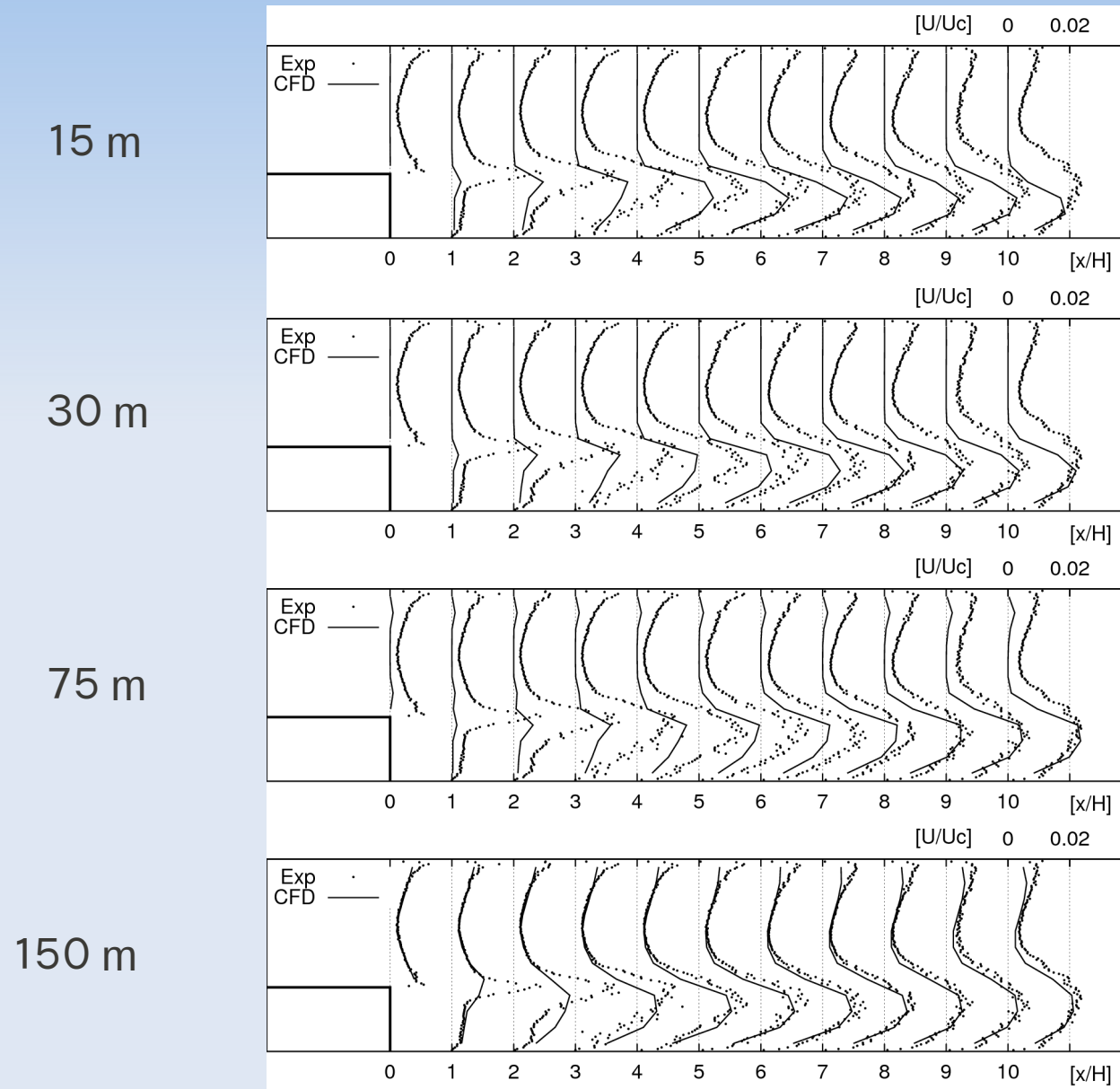
助走区間はパラメータとする

助走区間の影響：U



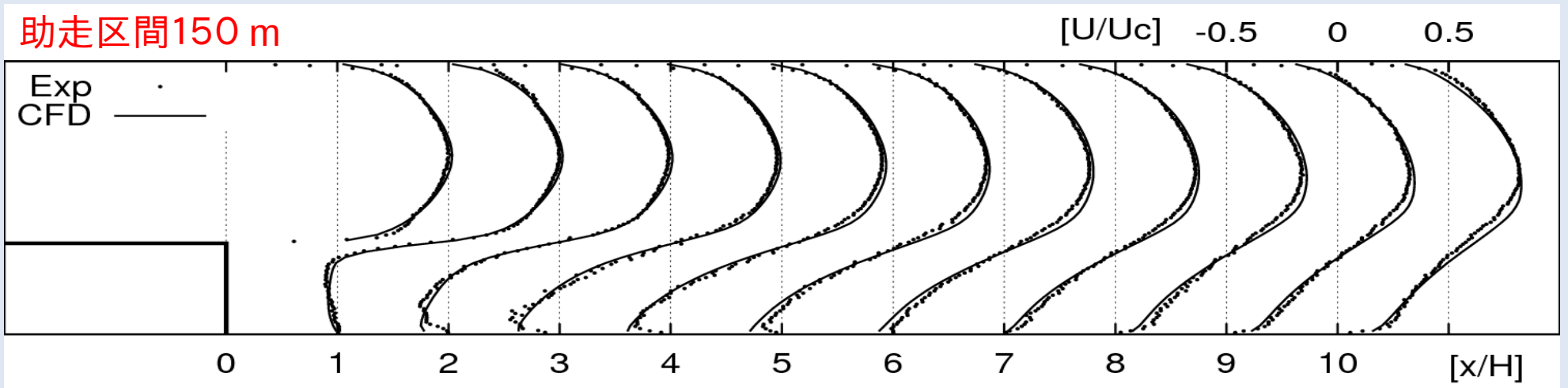
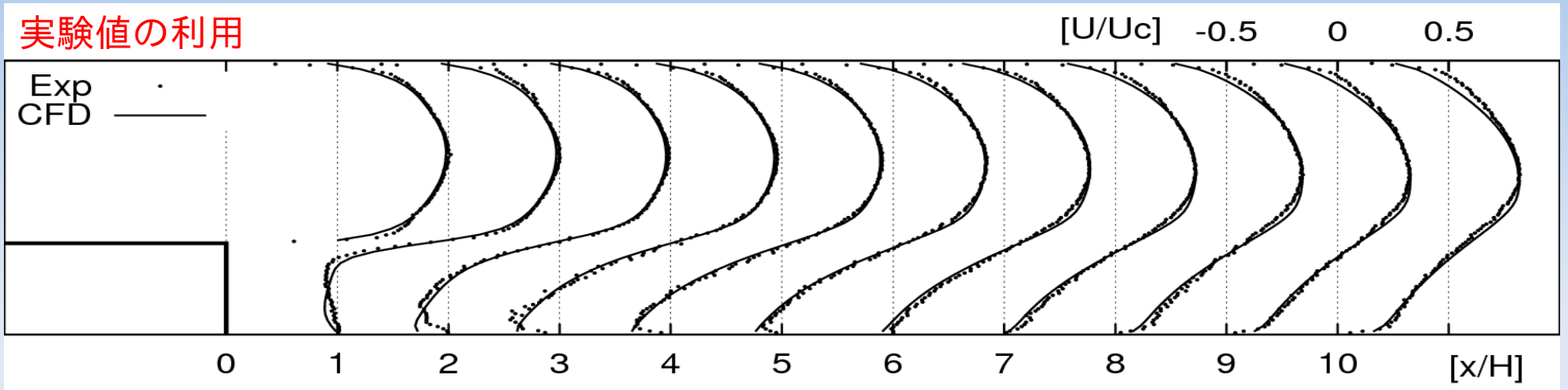
RNG- $k\epsilon$

助走区間の影響：k

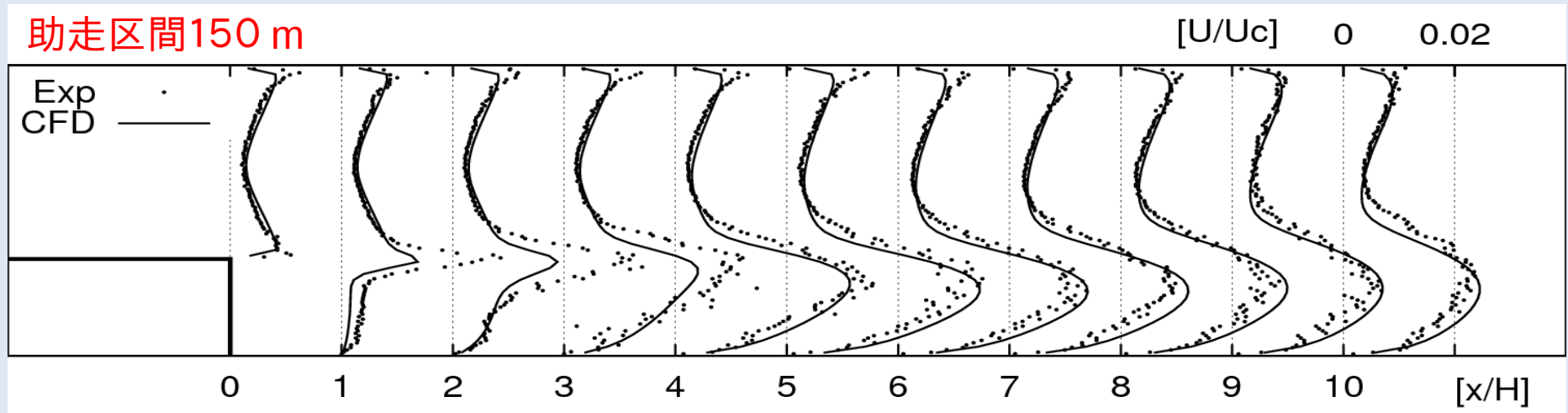
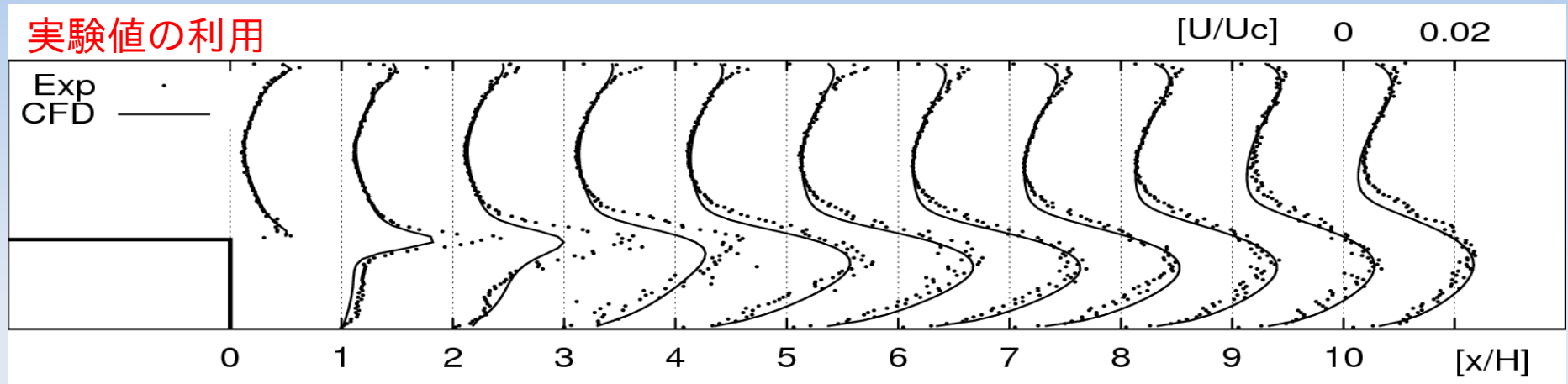


RNG- $k\epsilon$

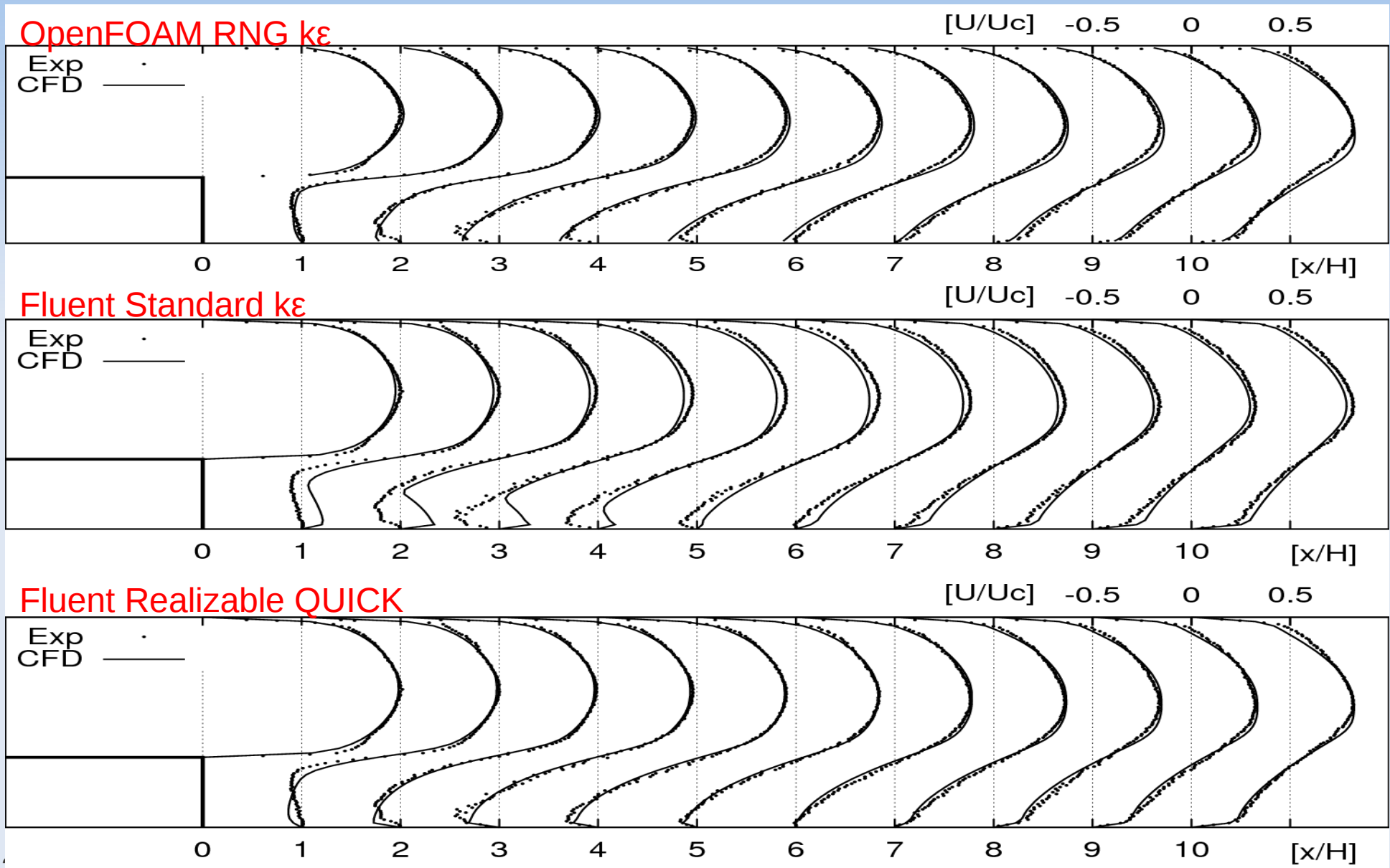
助走区間の影響 (メッシュ多の場合)



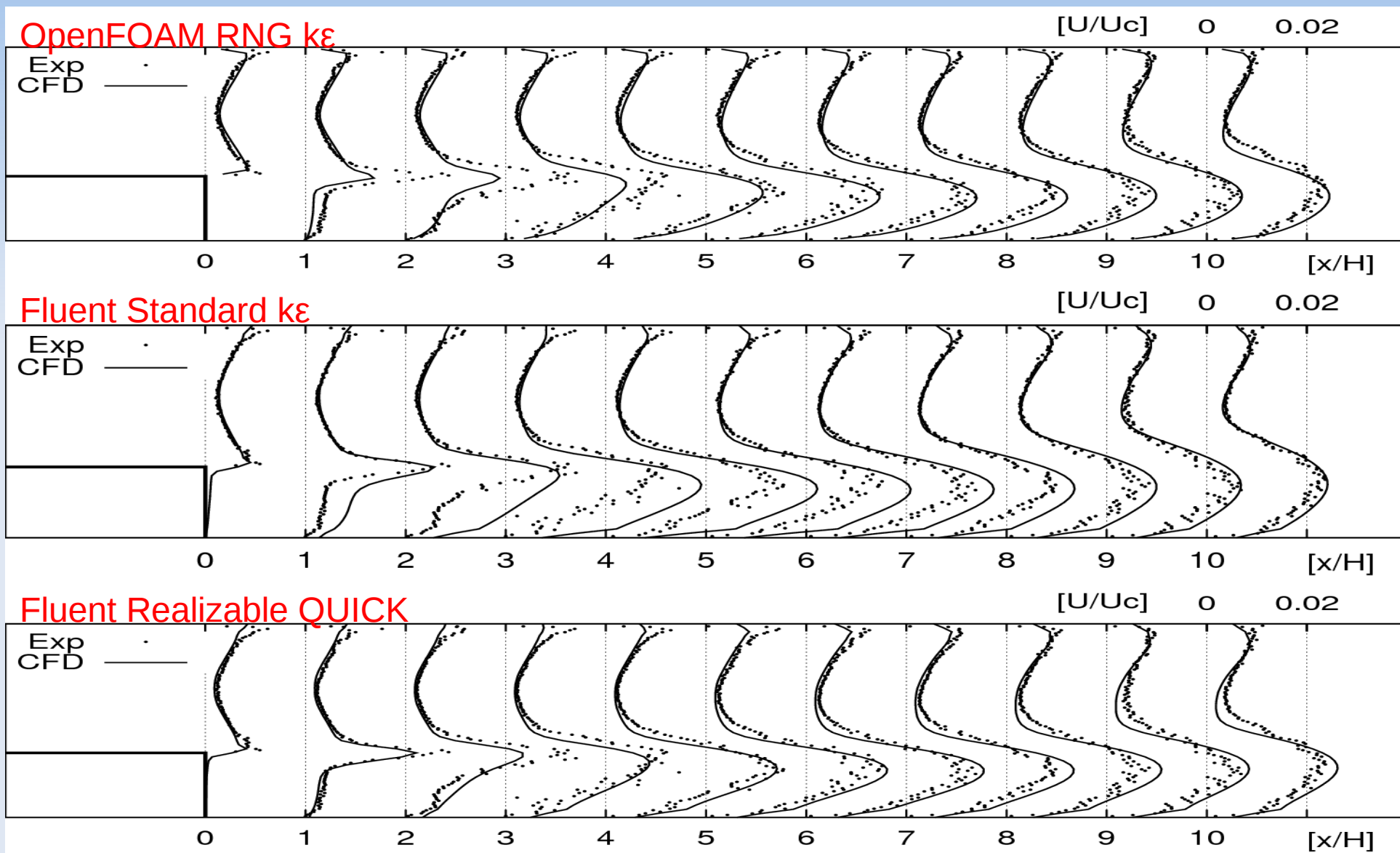
助走区間の影響 (メッシュ多)



Fluent との比較 (助走 150m)



Fluent との比較 (助走 150m)



まとめ

ofwikija の tutorial の 2次元バックステップ流れについて、メッシュ数、モデルの影響について調べた。

- モデルは代表的な2方程式モデルである。RNG $k-\epsilon$ (default), 標準 $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$ についてメッシュ影響等について調べた。
- 標準 $k-\epsilon$ でも適切な解法で U 、 k について上位モデルと同等の精度が得られた。
- 1方程式モデルの Spalart-Allmaras の速度分布はもっとも実験値と相違があった。また、上流の境界条件によって大きく解が変化した。(他モデルも同様かもしれない?)
- $k-\omega$ -SST モデルも U 、 k について良好な結果が得られた。
- 下壁の剥離位置は RNG、 $k-\omega$ -SST が実験値とほぼ一致。
- 壁関数の y^+ は対数域以下に設定すると解が実験値と異なり、乱れ生成が多くなった。しかし、 y^+ が対数域以下でも積層メッシュでは実験値が再現できた。
- 実験データが無い場合、助走区間を長く取り、実験を再現可能
- Fluent では Realizable と QUICK を使って実験値の再現可能

参考文献

1. 梶島岳夫、乱流の数値シミュレーション、養賢堂(1999) 3990 円
2. http://www.cfd-online.com/Wiki/RANS-based_turbulence_models
3. heat.mech.kumamoto-u.ac.jp/htsj_kyushu/ppt/27_3.pdf
FLUENT/CFX による流動・伝熱に関する解析手法および事例のご紹介
アンシスジャパン株式会社大阪営業所 大阪テクニカルグループ 有本 功