

旋回流れ対応型 $k-\omega$ SST モデルの OpenFOAMへの実装

中山 勝之 (オープンCAE勉強会@富山)
中川 慎二 (富山県立大学)

はじめに

OpenFOAMはソースコードが公開されており、ユーザーは自由にコードのカスタマイズを行うことが可能である。OpenFOAMでは既に多くの乱流モデルが実装されているが、実装されていない、または新たに提案されたモデルに関してはユーザーがコードを作成する必要がある。

今回はコードの解読と改造を試みる

Hellsten※により提案された旋回流れに対応した
k- ω SST モデルのOpenFOAMへの実装を行った。

- ・ モデルの概要とOpenFOAMへの実装について述べる。
- ・ 本モデルのデモ計算を行い、実験データや他の乱流モデルを用いた計算結果と比較する。

※ Hellsten, A., “Some Improvements in Menter’s k- ω SST turbulence model”, AIAA Paper, 98-2554 (1998).

OpenFOAM solver

OpenFOAM Version : 4.x

solver : simpleFoam (定常非圧縮性流体解析ソルバー)

turbulence model : k- ω SST model (kOmegaSST)

: modified k- ω SST model (kOmegaSSTRCH)

modified k- ω SST model

OpenFOAMで組み込まれているkOmegaSSTモデルをベース

`/src/TurbulenceModels/turbulenceModels/Base/kOmegaSST/`

k-omegaSST Model (Original)

Menter*により提案されたオリジナルモデル(一部を記述)

k:乱流強度

ω :乱流エネルギー比散逸率

μ_t :乱流動粘性係数

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\tau_{ij} = \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}$$

$$\Omega = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}}$$

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

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$

※ Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605.

k-omegaSST Model (OpenFOAM)

Menterら※によりオリジナルモデルが修正されたモデル(一部を記述)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\tau_{ij} = \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

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

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

渦粘性係数の評価式を変更
(速度の対称テンソルの大きさに変更)

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$$

※ Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003, pp. 625 - 632.

Modified k-omega SST Model (Rotation/Curvature Correction)

Hellstenにより提案されたモデル(一部を記述)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - F_4 \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$$F_4 = \frac{1}{1 + C_{RC} R_i}$$

$$R_i = \frac{W}{S} \left(\frac{W}{S} - 1 \right)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$W = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \quad W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

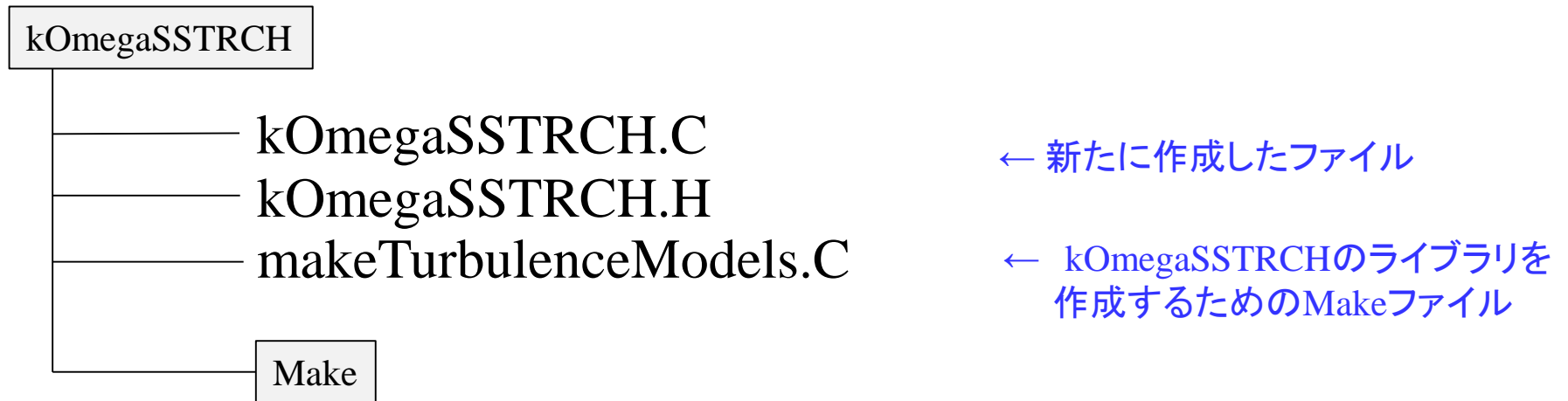
$$C_{RC} = 1.4$$

$$\beta \rho \omega^2 \longrightarrow F_4 \beta \rho \omega^2 \text{ に変更}$$

速度勾配の対称テンソル

速度の回転を表すテンソル
(速度勾配の反対称テンソル)

ファイル構成について(一部省略)



`/src/TurbulenceModels/turbulenceModels/Base/kOmegaSST/`

`kOmegaSSTBase.C`
`kOmegaSSTBase.H`

コードの記述 (kOmegaSST, 一部省略)

```
/src/TurbulenceModels/turbulenceModels/Base/kOmegaSST/kOmegaSSTBase.C
```

```
// Turbulent frequency equation
```

```
tmp<fvScalarMatrix> omegaEqn
```

```
(
```

```
  fvm::ddt(alpha, rho, omega_)
```

```
+ fvm::div(alphaRhoPhi, omega_)
```

```
- fvm::laplacian(alpha*rho*DomegaEff(F1), omega_)
```

```
==
```

```
  alpha*rho*gamma
```

```
*min
```

```
(
```

```
  GbyNu,
```

```
  (c1_/a1_)*betaStar_*omega_*max(a1_*omega_, b1_*F23*sqrt(S2))
```

```
)
```

```
- fvm::SuSp((2.0/3.0)*alpha*rho*gamma*divU, omega_)
```

```
- fvm::Sp(alpha*rho*beta*omega_, omega_)
```

```
- fvm::SuSp
```

```
(
```

```
  alpha*rho*(F1 - scalar(1))*CDkOmega/omega_,
```

```
  omega_
```

```
)
```

```
+ Qsas(S2, gamma, beta)
```

```
+ omegaSource()
```

```
+ fvOptions(alpha, rho, omega_)
```

```
);
```

```
}
```

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

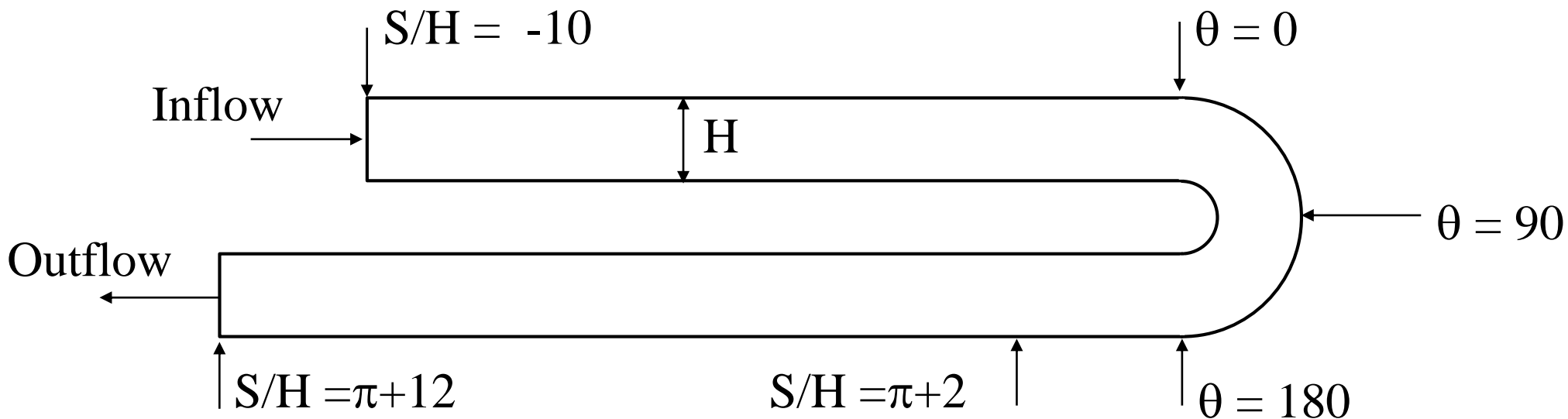
コードの記述 (kOmegaSSTRCH, 一部省略)

/kOmegaSSTRCH.C

```
tmp<fvScalarMatrix> omegaEqn
(
  fvm::ddt(alpha, rho, omega_)
+ fvm::div(alphaRhoPhi, omega_)
- fvm::laplacian(alpha*rho*this->DomegaEff(F1), omega_)
==
  alpha*rho*gamma
  *min
  (
    GbyNu,
    (c1_/a1_)*betaStar_*omega_*max(a1_*omega_, b1_*F23*sqrt(S2))
  )
- fvm::SuSp((2.0/3.0)*alpha*rho*gamma*divU, omega_)
//
- fvm::Sp(alpha*rho*beta*omega_, omega_)
- fvm::Sp(F4*alpha*rho*beta*omega_, omega_)
- fvm::SuSp
  (
    alpha*rho*(F1 - scalar(1))*CDkOmega/omega_,
    omega_
  )
+ this->Qsas(S2, gamma, beta)
+ this->omegaSource()
+ fvOptions(alpha, rho, omega_)
);
```

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - F_4 \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

U-turn Duct



既往研究 (Monsonら※) の条件を使用

Grid size: 289×161 (2D)

Re : 3.28×10^6 を満たすように主流速度を設定: $U_s = 1$ m/s

※ Monson, D. J., Seegmiller, H. L., McConnaughey, P. K. and Chen, Y. S.,
“Comparison of experiment with calculations using curvature-corrected zero and two
equation turbulence models for a two-dimensional U-duct“, AIAA Paper, 90-1484 (1990)

境界条件について

k	nut	omega
<pre> dimensions [0 2 -2 0 0 0 0]; internalField uniform 0.00375; boundaryField { inlet { type fixedValue; value uniform 0.00375; } outlet { type zeroGradient; } } </pre>	<pre> dimensions [0 2 -1 0 0 0 0]; internalField uniform 0; boundaryField { inlet { type calculated; value uniform 0; } outlet { type calculated; value uniform 0; } } </pre>	<pre> dimensions [0 0 -1 0 0 0 0]; internalField uniform 0.6804; boundaryField { inlet { type fixedValue; value \$internalField; } outlet { type zeroGradient; } } </pre>
<pre> outerWall { type kqRWallFunction; value uniform 0.00375; } innerWall { type kqRWallFunction; value uniform 0.00375; } } </pre>	<pre> outerWall { type nutkWallFunction; value uniform 0; } innerWall { type nutkWallFunction; value uniform 0; } } </pre>	<pre> outerWall { type omegaWallFunction; value \$internalField; } innerWall { type omegaWallFunction; value \$internalField; } } </pre>

壁関数を使用

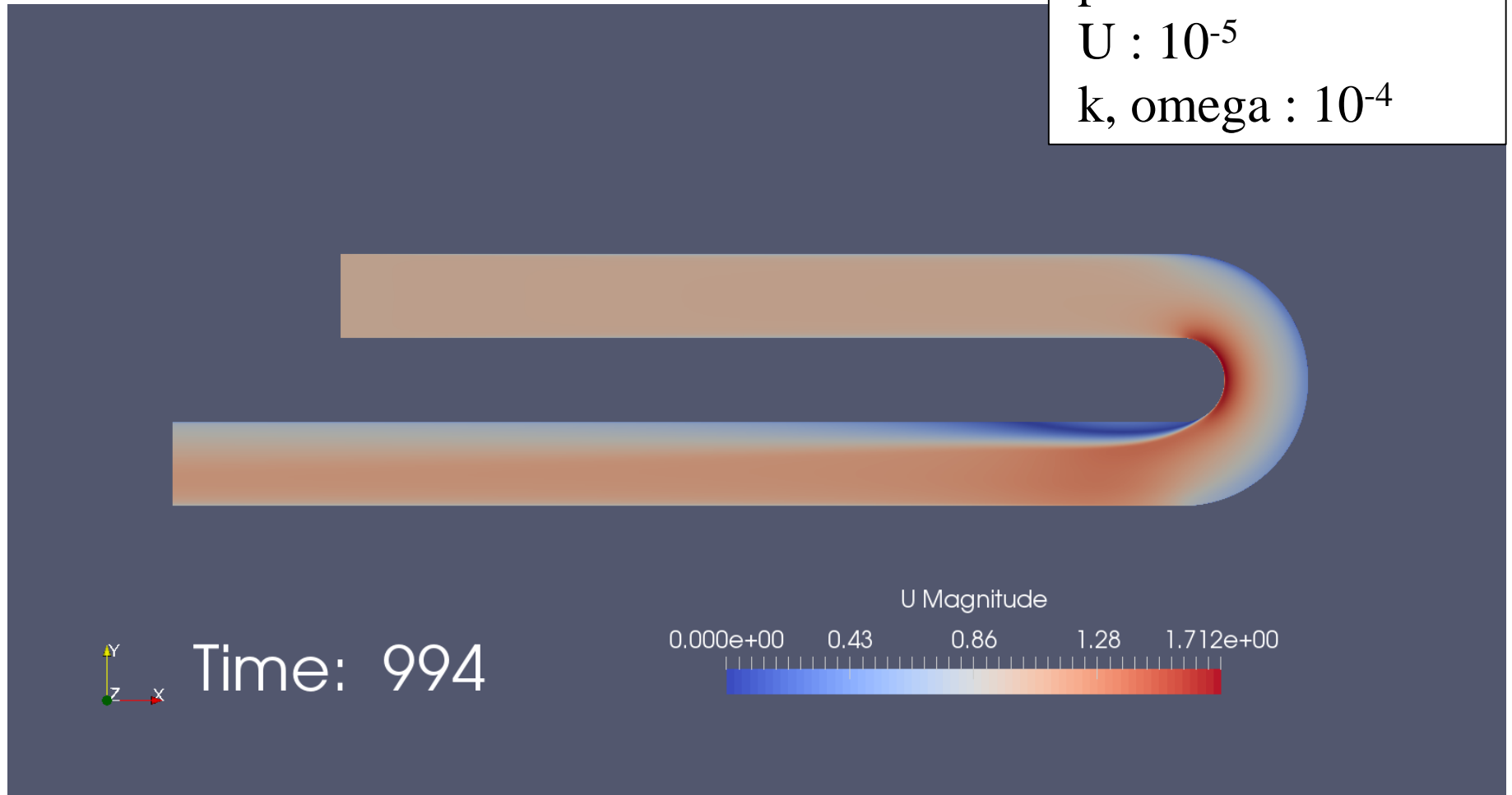
Velocity (Magnitude) surface

解の収束判定閾値

p : 10^{-3}

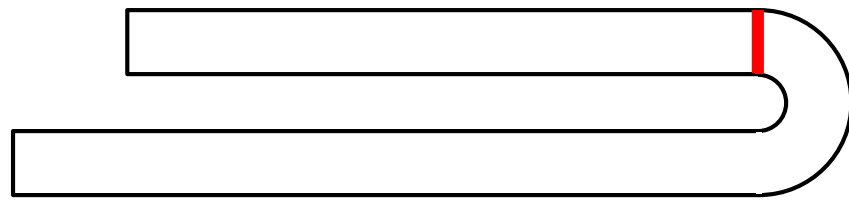
U : 10^{-5}

k, omega : 10^{-4}

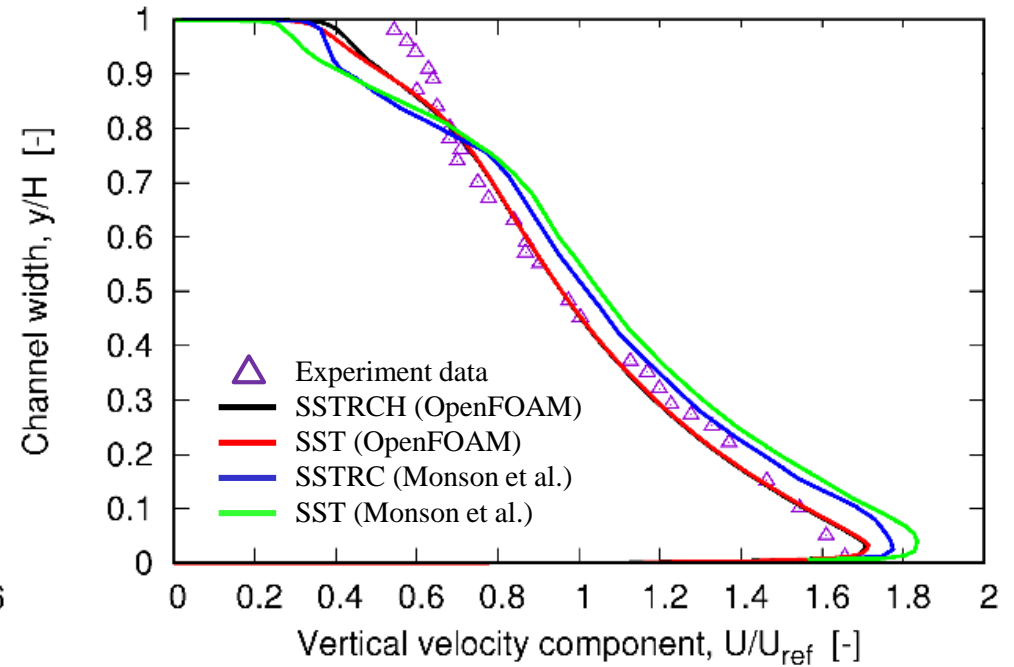
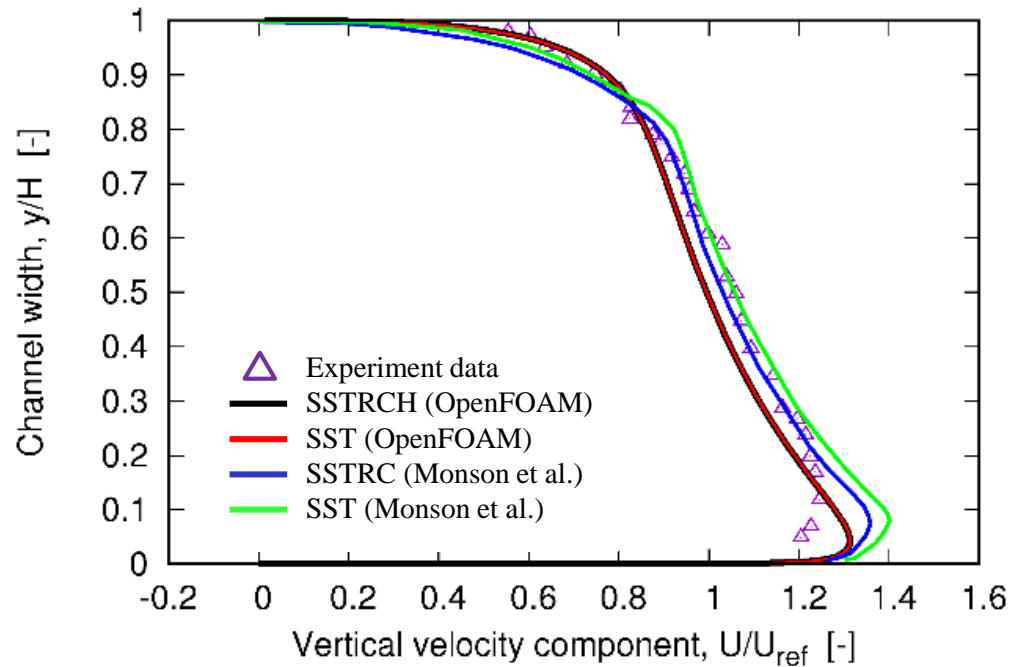


Velocity profile (1)

across the duct at $\theta=0$

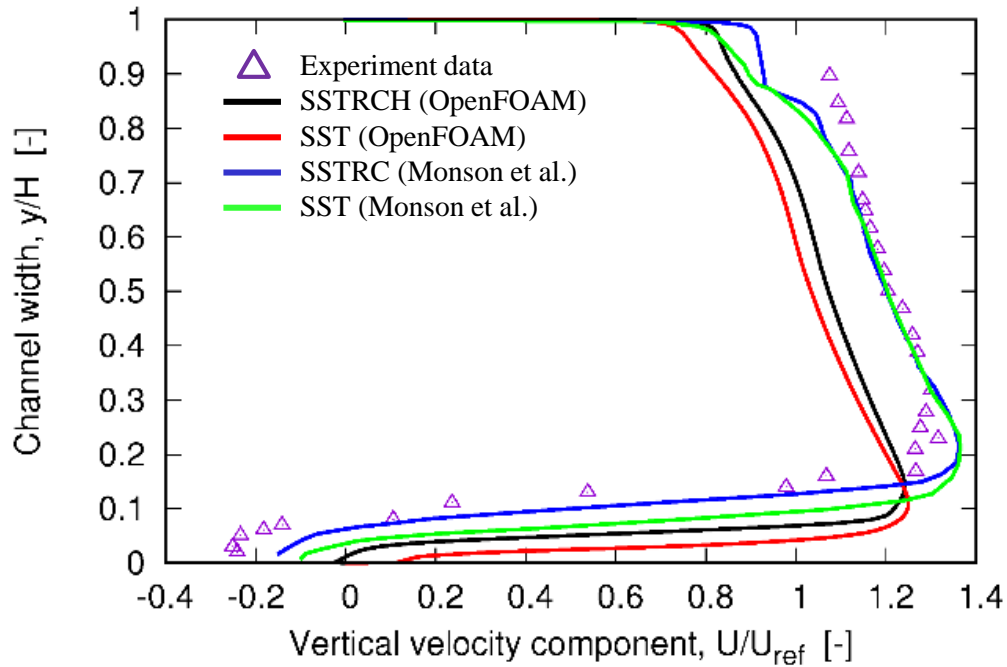
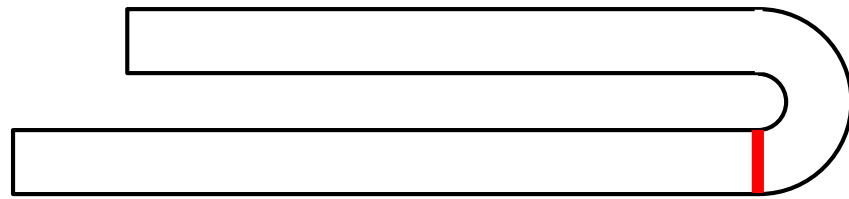


across the duct at $\theta=90$

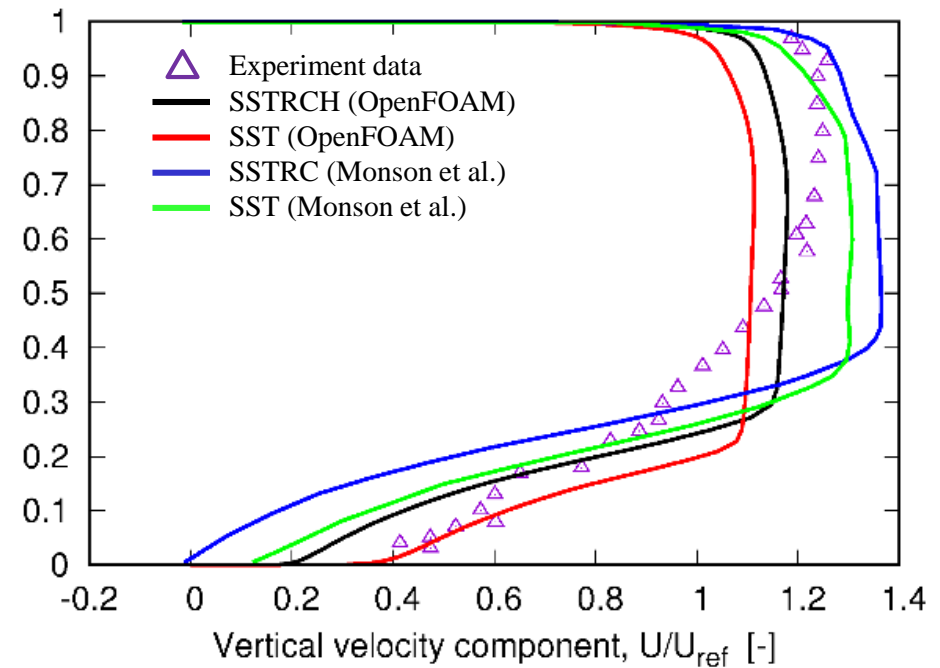
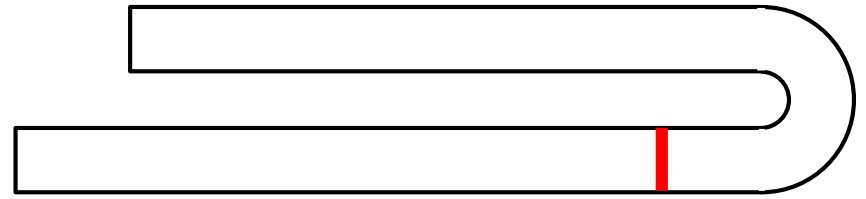


Velocity profile (2)

across the duct at $\theta=180$



across the duct at $S/H=\pi+2$



考察

kOmegaSSTRCHとkOmegaSSTとの結果の比較

$\theta=0$ では両者の結果は一致
旋回が進むにつれて両者の結果に差がでている

kOmegaSSTRCHと実験結果との比較

定性的にみると、実験結果に近づいているかは不明

kOmegaSSTRCHとMonsonらとの計算結果の比較

速度の最大値が異なる

今後検討しようとしている項目

- ・境界条件で使用する壁関数の見直し
- ・オリジナルモデルをOpenFOAMに実装・検証