



## 第13回OpenFOAM勉強会

# OpenFOAMを用いた圧縮性流れの検証

鹿児島大学院 理工学研究科

片野田研究室

M1 福元 大地



# 1 自己紹介

鹿児島大学院  
理工学研究科機械工学専攻  
片野田研究室  
福元 大地

\* 昨年度の卒業論文でOpenFOAMの解析結果の妥当性の検証を行う。

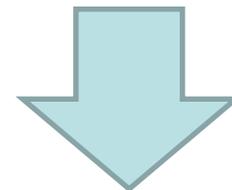
\* CFD初心者

\* 本研究室の主なターゲットは、  
コールドスプレー、HVOF溶射ガン、  
ボルテックスチューブなどの  
超音速ノズル内の解析および実験。

本研究グループでは超音速流れの  
数値シミュレーションを行っている。



3次元解析や化学反応を含む解析  
を行うため、OpenFOAMの  
導入を試みる。



昨年はOpen FOAMの使い方を  
習得するとともに、解析結果の妥当性  
の検証を行った。



## 2 今まで取り組んできたこと

本研究ではOpenFOAMの解析結果の妥当性を検証する.



Euler方程式およびNavier-Stokes方程式の  
粘性項の離散化の確認を行う

- ・ Euler方程式の離散化の確認→衝撃波管の解析
- ・ Navier-Stokes方程式の粘性項の離散化の確認  
→平板流れの解析



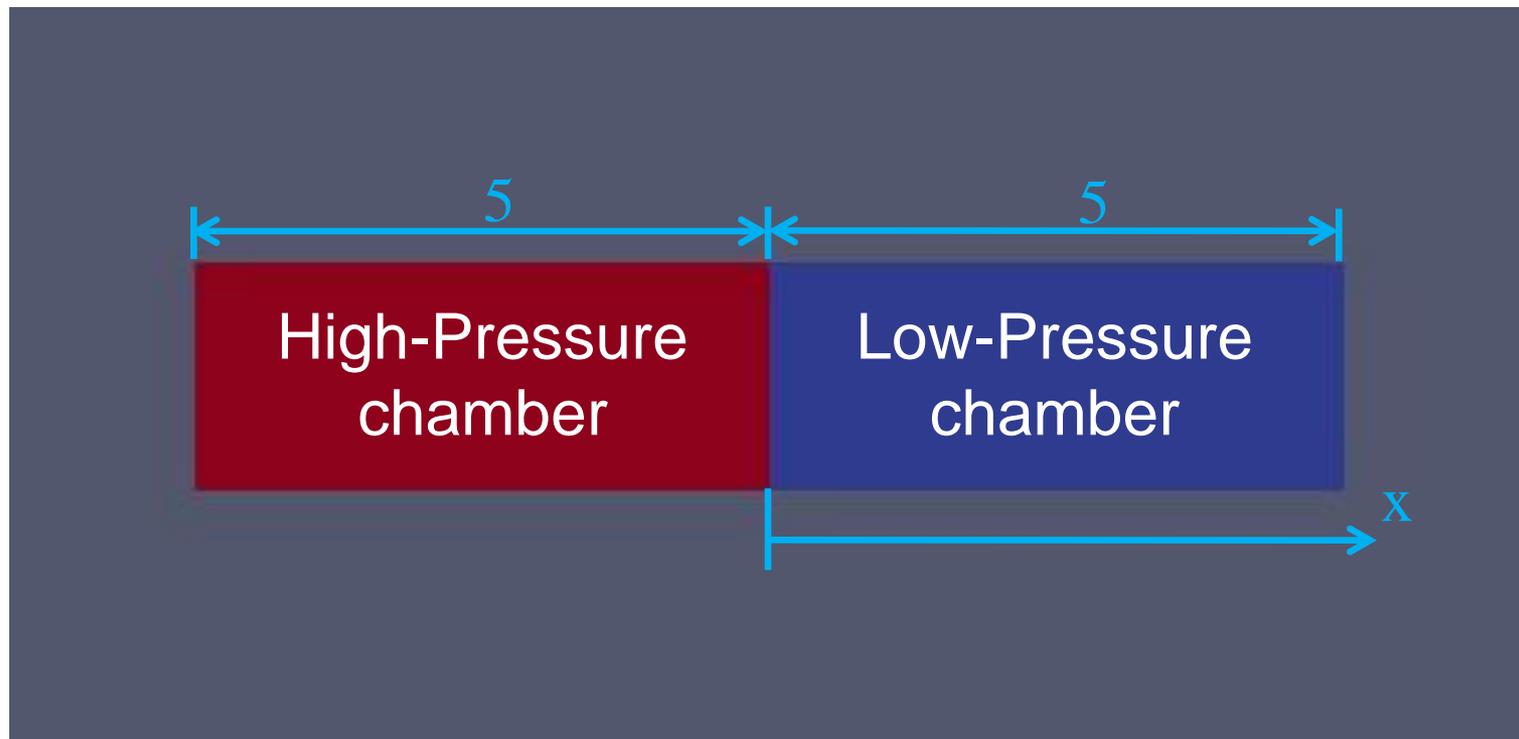
## 2 今まで取り組んできたこと

- 本研究グループでは超音速流れ取り扱うため、**sonicFoam**というソルバーを用いる.

**sonicFoam**は遷音速または、超音速用の層流及び乱流の圧縮性流れの解析に用いることができるソルバーである.



### 3 ショックチューブ



**Fig.1 Computational domain of shock tube(unit : m)**



### 3 ショックチューブ

- 非粘性の1次元流れとする.
- 気体は空気とする.

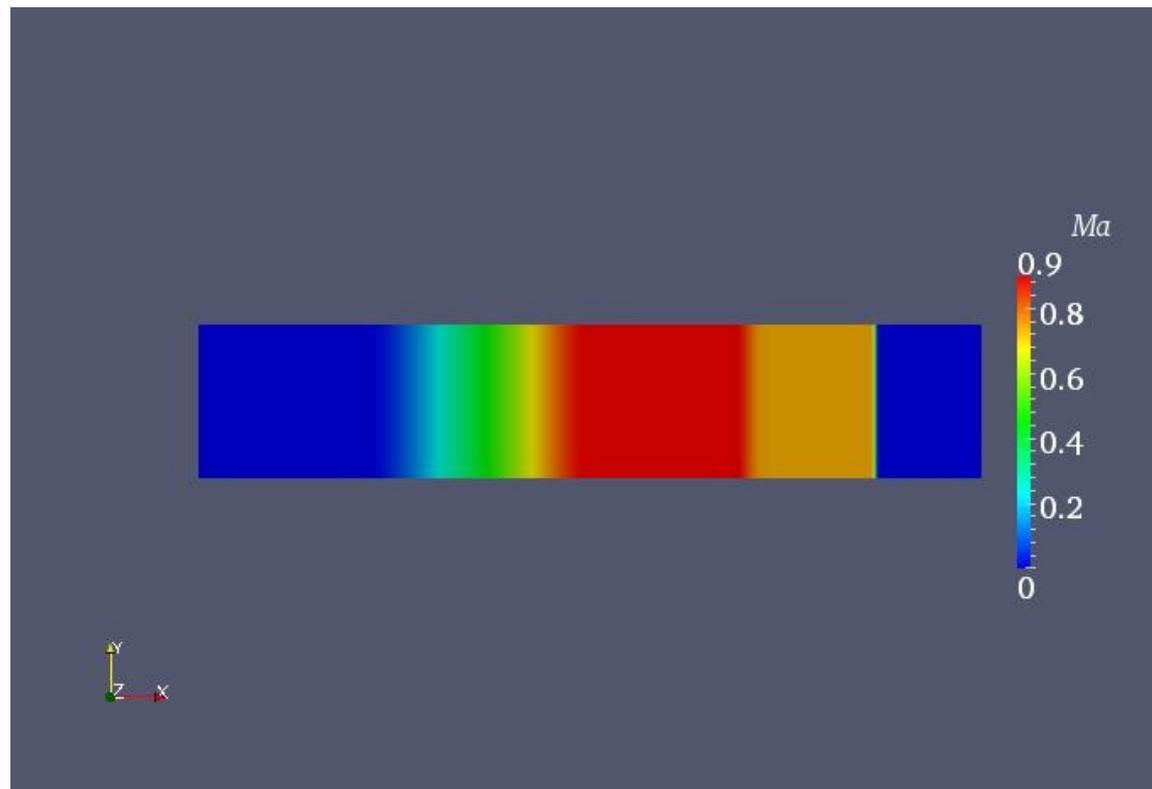
Table 1 Initial conditions of shock tube

	High-Pressure chamber	Low-Pressure chamber
Pressure [kPa]	100	10
Temperature [K]	348.4	278.5

- ・流れ方向両端における境界条件はzeroGradientとした.



### 3 ショックチューブ



**Fig.3 Computational result of Mach number of shock tube**



### 3 ショックチューブ

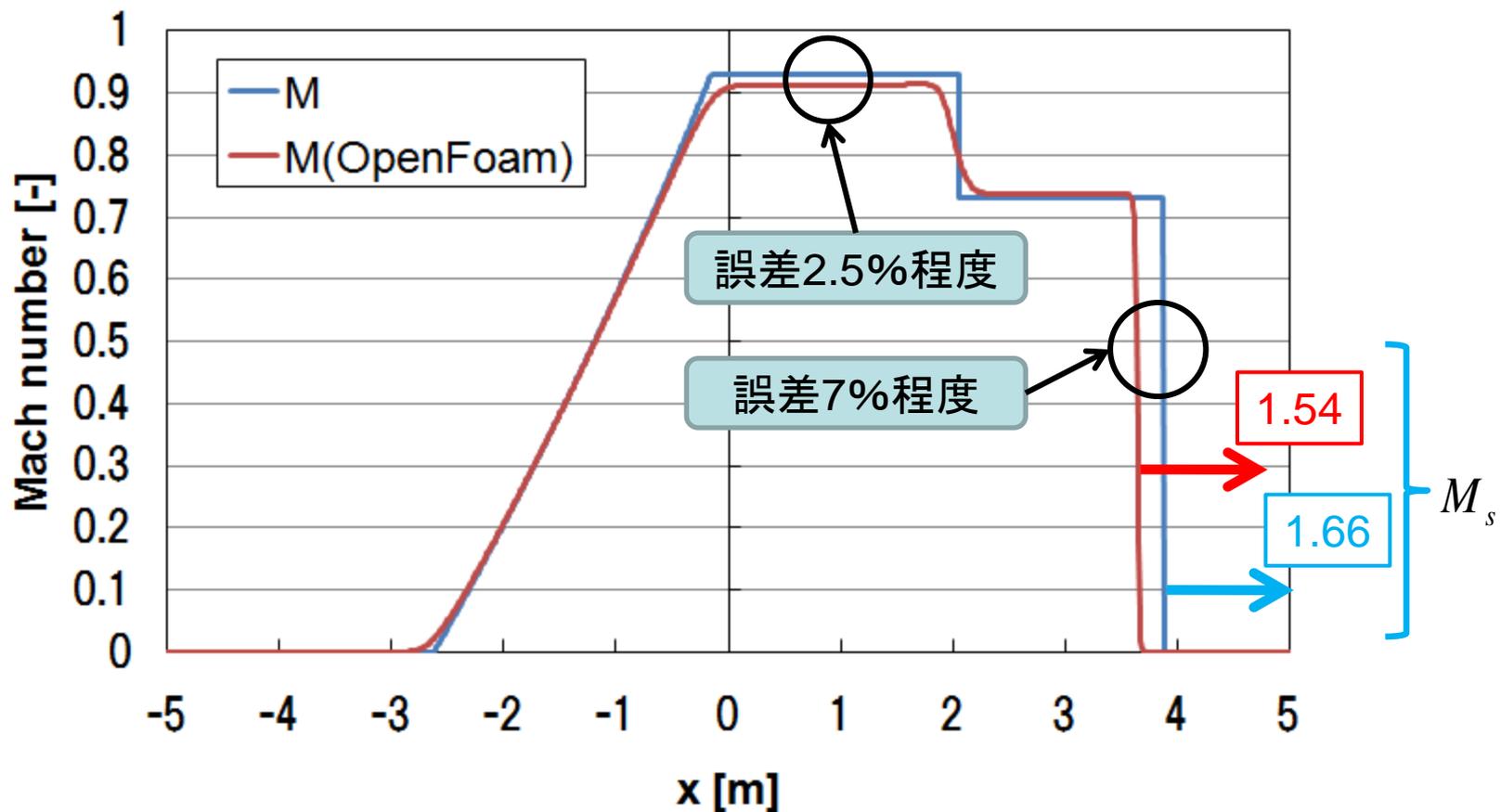


Fig.4 Comparison of Mach number of shock tube



### 3 ショックチューブ

マッハ数の誤差は2.5%と十分小さいが、  
衝撃波の誤差は7%となった。

しかし

本研究グループでは、主に定常問題を取り扱うため、  
時間発展の誤差は定常解に影響しない。

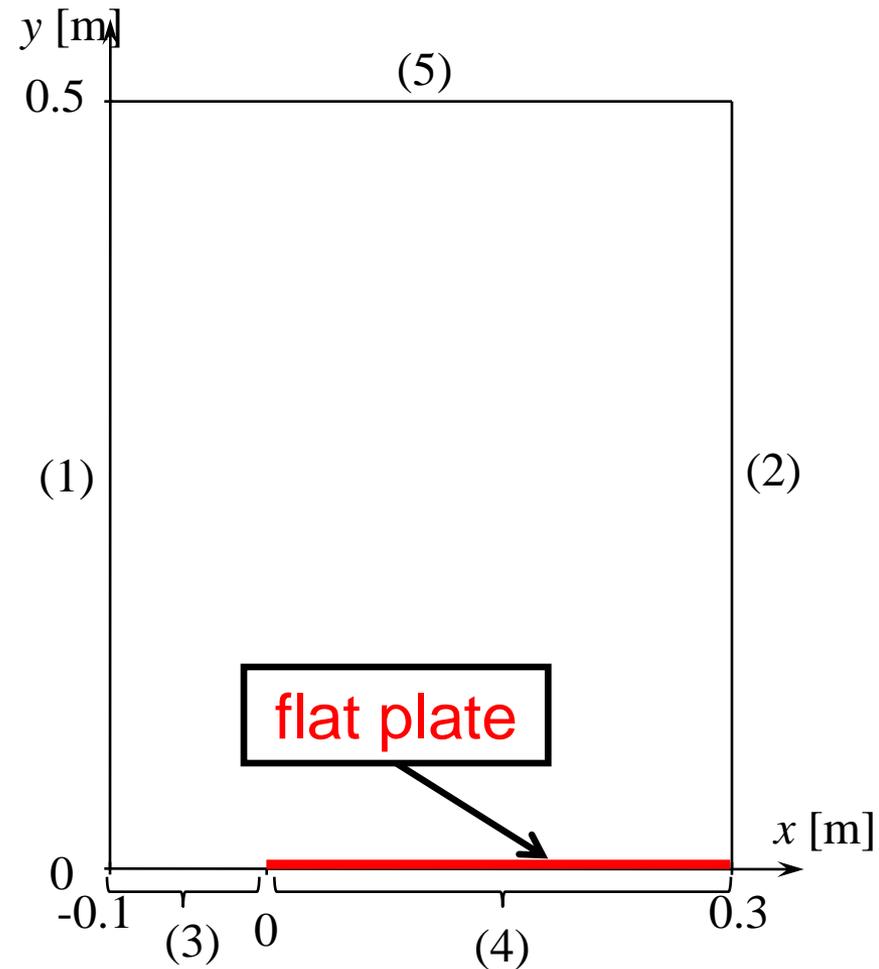
従って、Euler方程式の離散化は  
適切に行われているといえる。



# 4 平板流れ

**Table 2 Boundaries**

	Boundaries
(1)	Inlet
(2)	Outlet
(3)	Symmetry
(4)	Plate
(5)	Top



**Fig.5 Computational domain of flow over flat plate (unit : m)**



# 4 平板流れ

**Table 3 Boundary conditions of flow over flat plate**

Boundaries	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Velocity[m/s]	fixedValue	inletOutlet	Symmetry Plane	fixedValue	zeroGradient
Pressure [kPa]	Zero Gradient	Wave Transmissive	Symmetry Plane	Zero Gradient	Wave Transmissive
Temperature [K]	inletOutlet	inletOutlet	Symmetry Plane	Zero Gradient	zeroGradient



## 4 平板流れ

- マッハ数  $M=0.3$  の一様流を想定し, 気体は空気とする.

**Table 4 Initial conditions of flow over flat plate**

	Initial conditions
Velocity [m/s]	$u=104.25, v=0$
Pressure [Pa]	300
Temperature [K]	300



# 4 平板流れ

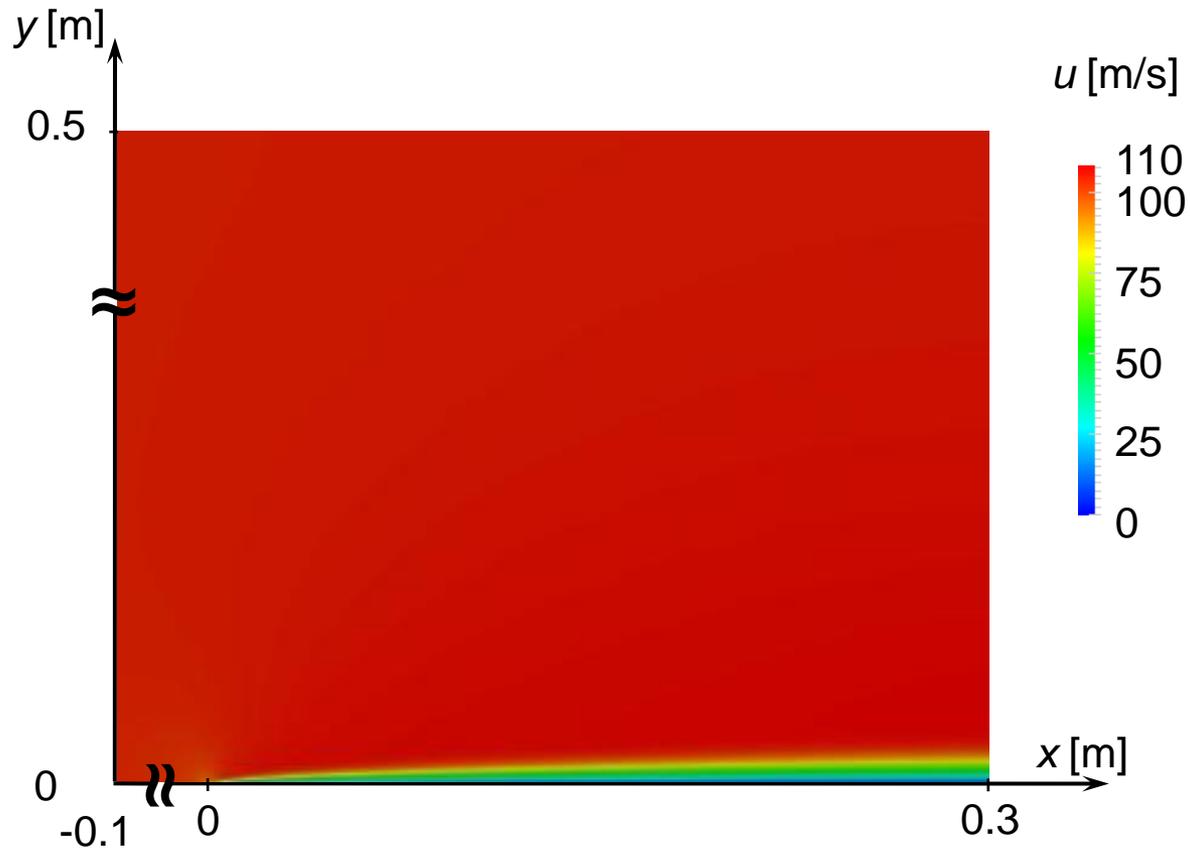


Fig.6 Computational result of velocity of flow over flat plate



# 4 平板流れ

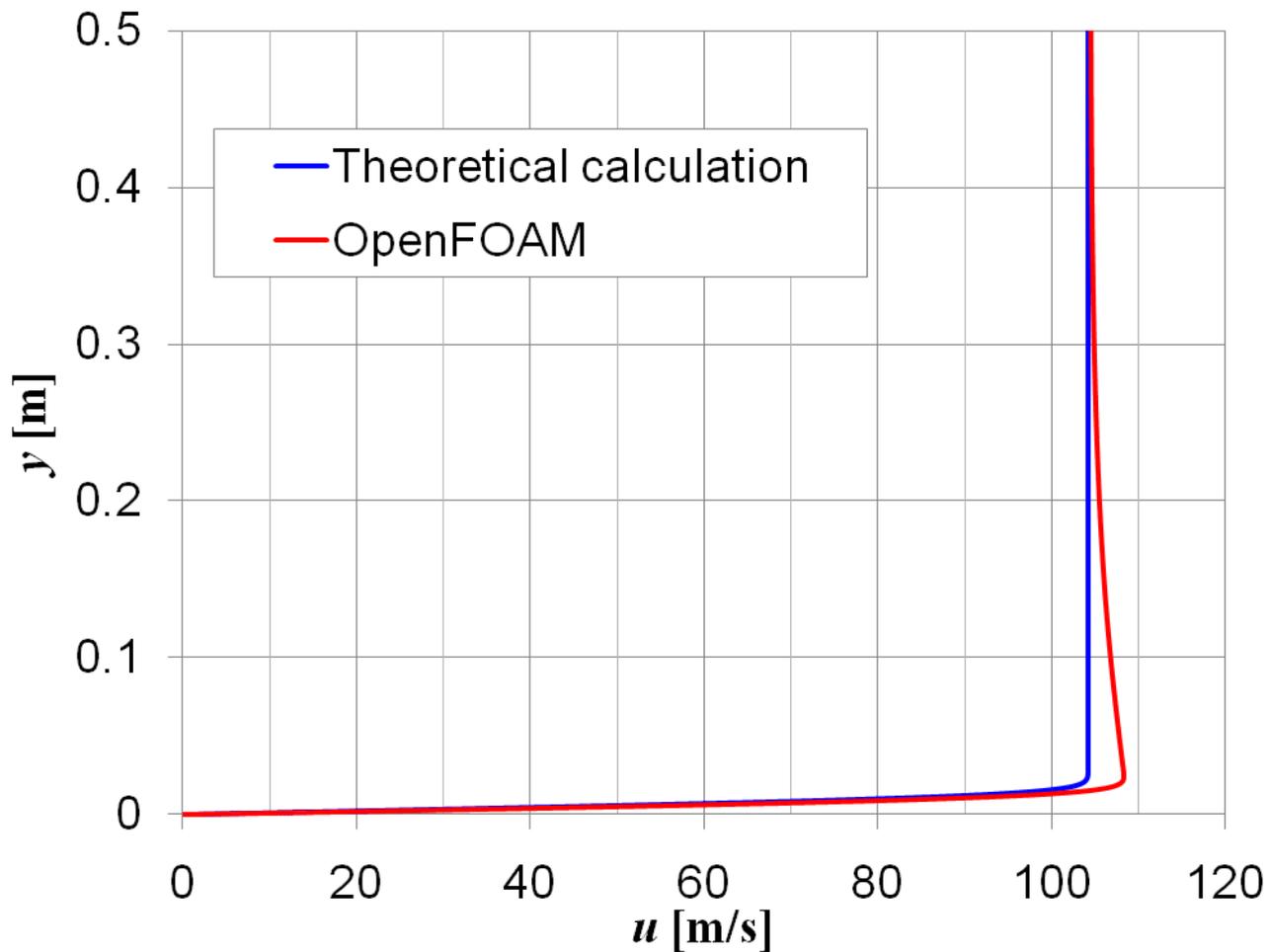
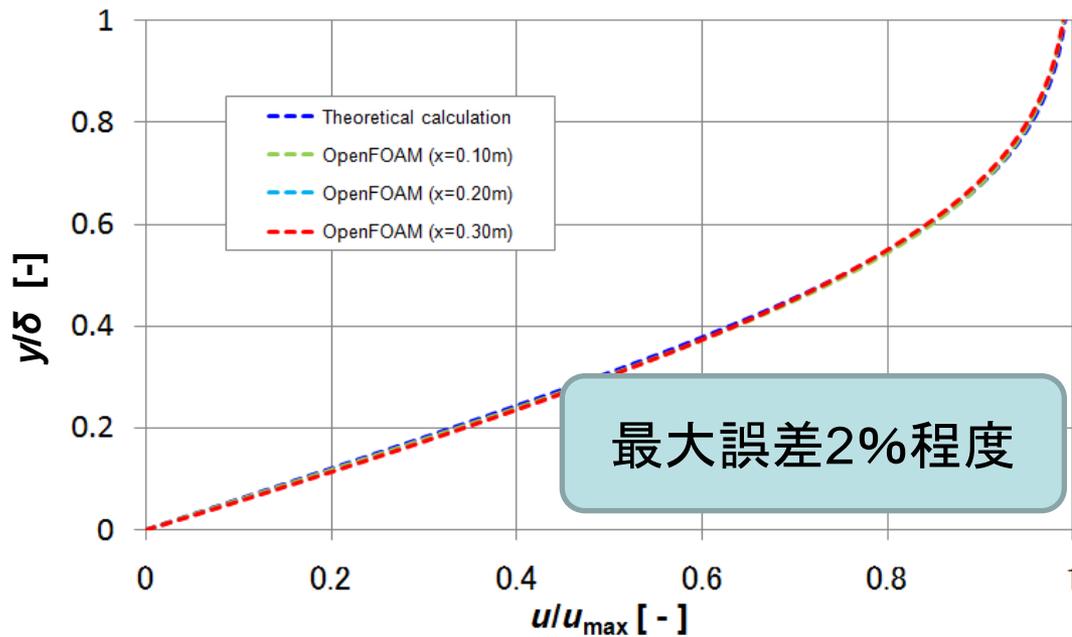


Fig.7  $x=0.3$ m



# 4 平板流れ



最大誤差は2%と十分小さい.

従って, Navier-Stokes方程式  
の粘性項の離散化は適切に  
行われているといえる.

Fig.8 Comparison of normalized number of velocity of flow over flat plate



## 5 結論

- OpenFOAMの解析結果の妥当性を検討するために、衝撃波管の解析と平板流れの解析を行った。また、その解析結果と理論解を比較した結果、以下の結論を得た。

### 1) 衝撃波管の解析結果と理論解の比較

Euler方程式の離散化は適切に行われているといえる。

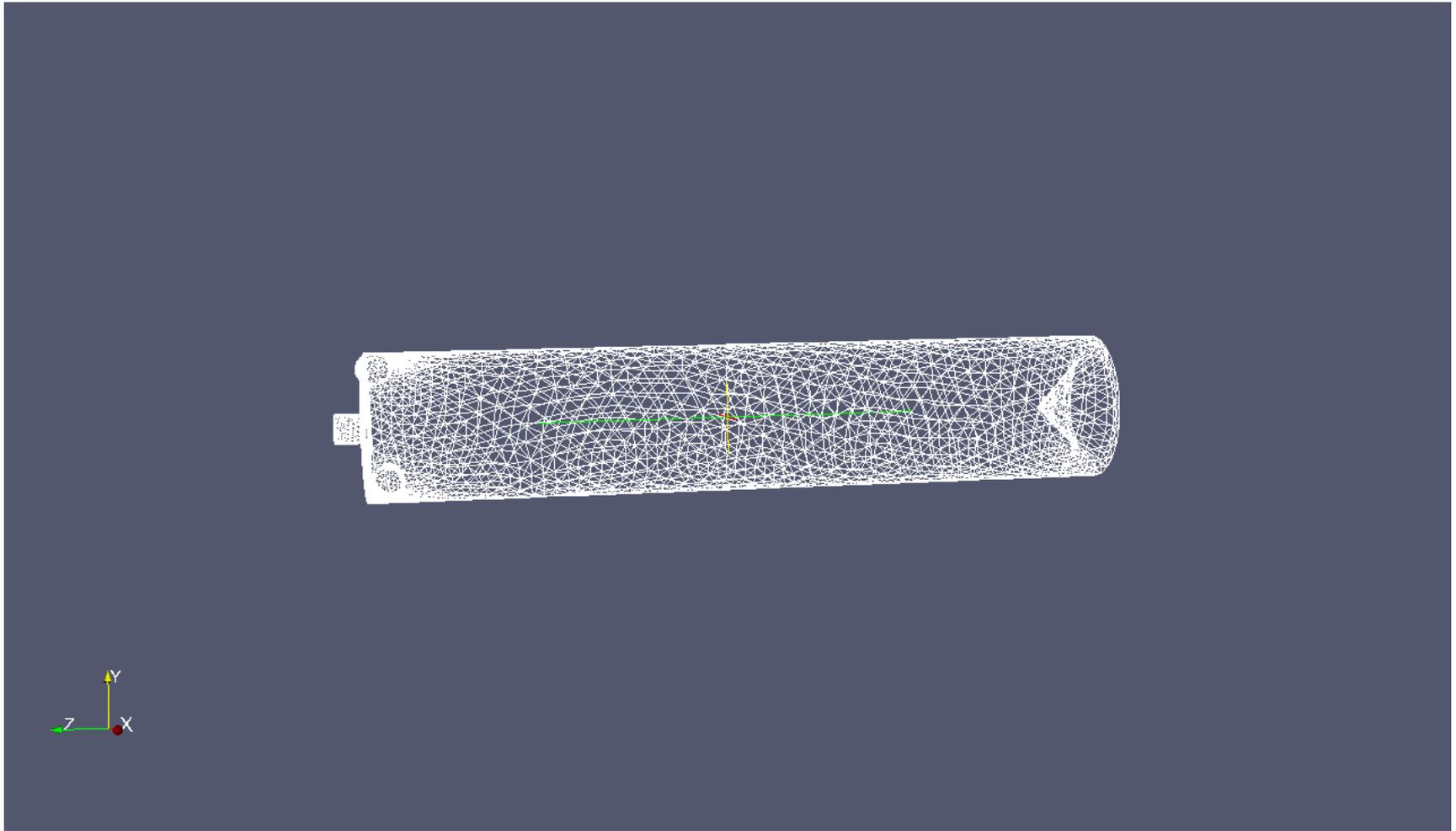
### 2) 平板流れの解析結果と理論解の比較

Navier-Stokes方程式の粘性項の離散化は適切に行われているといえる。

以上の結論よりOpenFOAMの解析結果は妥当であるといえる。



## 4 今後取り組みたいこと





## 4 今後取り組みたいこと

### ■ dieselFoamを用いた燃焼解析

- ・主なターゲットはHVAF溶射ガン
- ・まずはdieselFoamを用いてショックチューブの解析を行い、衝撃波をとらえることができるかを検証する。

### ■ 皆さまへのご質問

- ・Fig.7で示したように、境界層において流速が加速している原因について。
- ・dieselFoamで圧縮性流れの解析を行えるのについて。



## 第13回OpenFOAM勉強会

# OpenFOAMを用いた圧縮性流れの検証

鹿児島大学院 理工学研究科

片野田研究室

M1 福元 大地

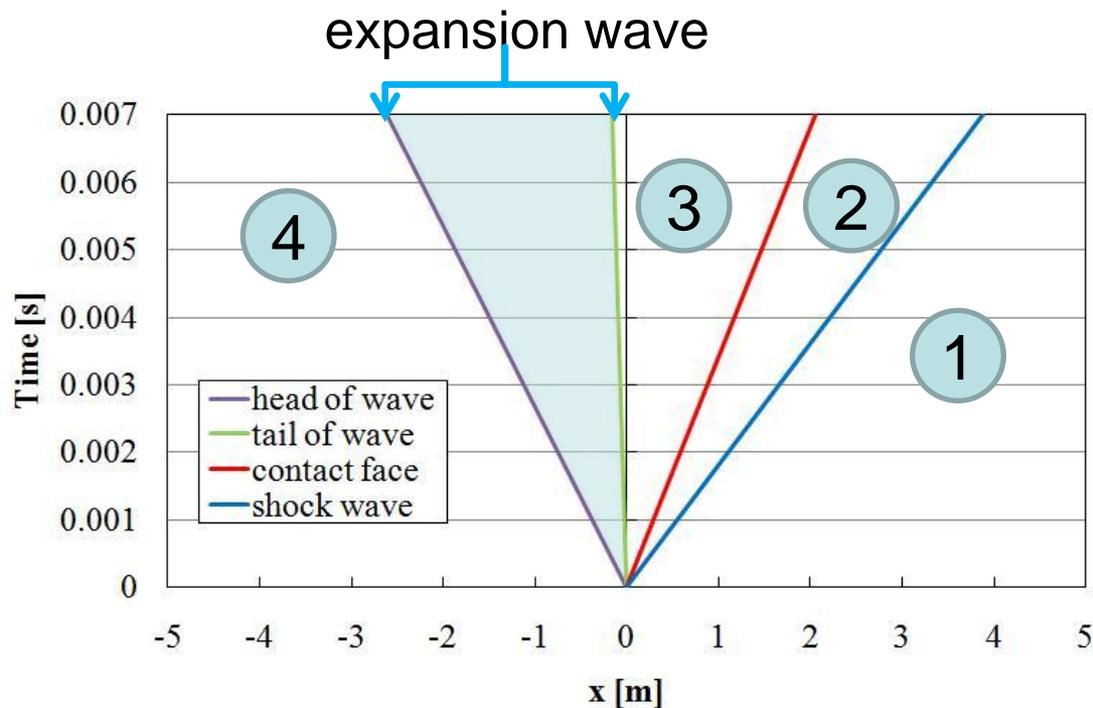


# 予備資料



## 2 今まで取り組んできたこと

- リーマン問題を解く.
- 理論解は一次元等エントロピー流れを仮定することにより求まる.



- 1: 低圧室の初期状態の領域
- 2: 衝撃波の影響を受ける領域
- 3: 膨張波の影響を受ける領域
- 4: 高圧室の初期状態の領域

Fig.2 Shock wave diagram



## 2 今まで取り組んできたこと

理論式の一部を以下に示す.

$$\frac{p_4}{p_2} = \frac{p_4}{p_3} = \left( \frac{a_4}{a_3} \right)^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}} = \left[ 1 - \frac{\gamma_4-1}{\gamma_1+1} \frac{a_1}{a_4} \left( M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}}$$
$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \left[ 1 - \frac{\gamma_4-1}{\gamma_1+1} \frac{a_1}{a_4} \left( M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}}$$

$$p_2 = p_3$$

$p$ : 圧力,  $a$ : 音速,  $\gamma$ : 比熱比,  $M_s$ : 衝撃波マッハ数  
ただし1~4の添え字は各領域の値を示す.



## 2 今まで取り組んできたこと

ブラジウスの解を求めた.

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \quad F(\eta) = \frac{\varphi(x, y)}{\sqrt{\nu x U_\infty}}$$

境界層方程式

$$FF'' + 2F''' = 0$$

境界条件

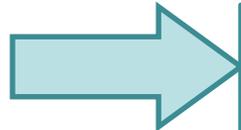
$$\eta = 0 : F = 0, F' = 0 \quad (u = v = 0)$$

$$\eta = \infty : F' = 1 \quad (u = U)$$



# 離散化とは

- 離散化とは，ある連続した情報を非連続の値に分割すること。



連続した値を持った情報を解析することは非常に困難であるが，離散化を行い非連続な数値に置き換えることで，近似的な計算結果を比較的容易に算出することが可能となる。



# 境界条件

**Table Types of boundary conditions**

Type	Description of condition for patch field
fixedValue	Value is specified.
zeroGradient	Normal gradient is zero.
inletOutlet	Switches $U$ and $p$ between fixedValue and zeroGradient depending on direction of $U$ .
waveTransmissive	Boundary conditions to avoid numerical instabilities and to control spurious wave reflections at the computational boundaries.



# 境界条件

```

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField   uniform (104.25 0 0);
boundaryField
{
  inlet
  {
    type
    value
  }
  outlet
  {
    type
  }
}
fixedValue:
uniform (104.25 0 0);
zeroGradient;

```

[kg,m,s,K,mol,A,cd]の順に物理量の単位を表わす. ここではm/sとなる.

(x, y, z)方向の値を入力する.

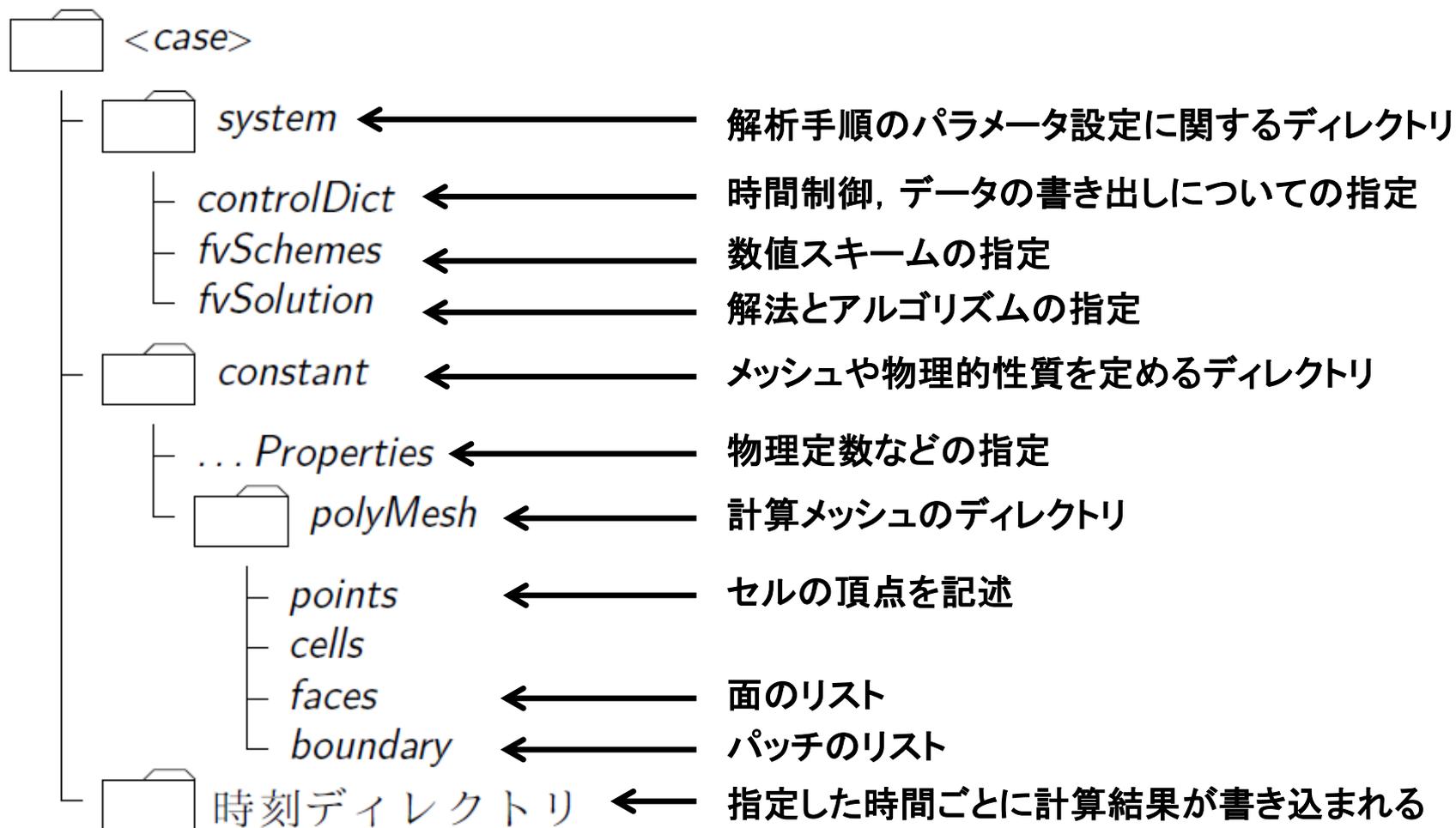
境界

境界条件を入力する.

Fig.4 Field data files



# 解析方法(ケースディレクトリの構造)



Reference:UserGuide Ja-1.6beta.pdf



- ショックチューブの解析は、Euler方程式の離散化が適切に行われているかどうか確認するためにCFDではよく用いられる。

ショックチューブ問題はリーマン問題とも呼ばれ、CFDの根本的な問題としても取り扱われている。

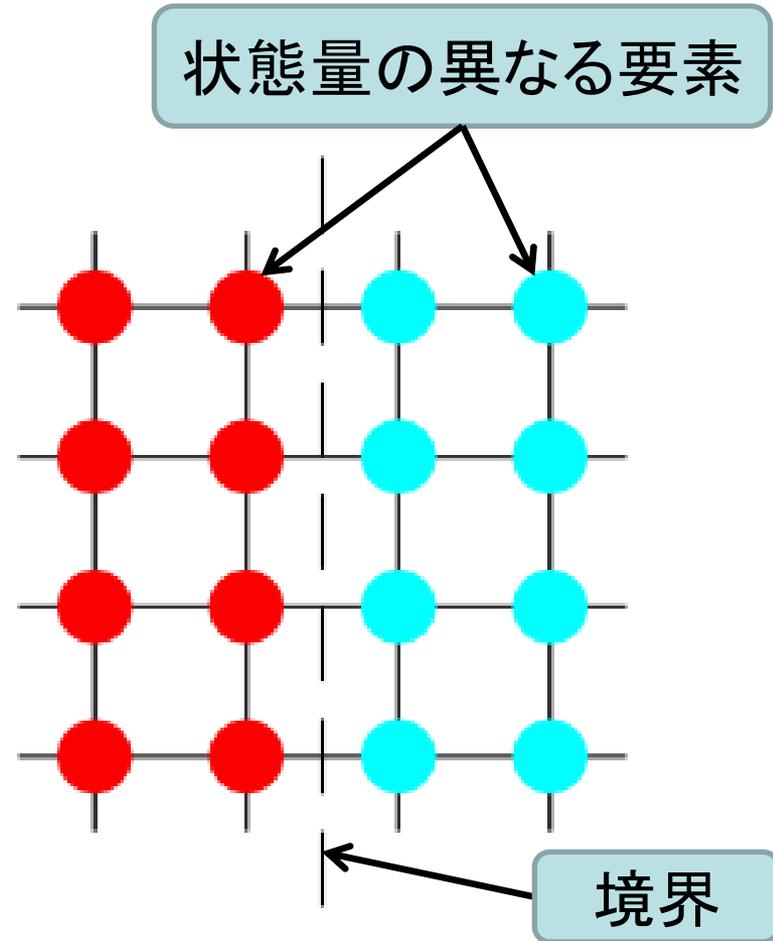


# リーマン問題

- 図に示すような状態量の異なる流体の要素が境界を隔てて存在する場合、境界を取り除いたあと要素がどのように変化するか考察する問題のこと



ショックチューブ問題はリーマン問題の代表例としてよく取り上げられる





# ショックチューブの理論式の一部

ショックチューブの理論式を以下に示す.

$$u_2 = u_3 \dots (1)$$

$$p_2 = p_3 \dots (2)$$

$$u_2 = \frac{2a_1}{\gamma_1 + 1} \left( M_s - \frac{1}{M_s} \right) \dots (3)$$

$$p_2 = \frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} p_1 \dots (4)$$



# 膨張波理論式

膨張波の理論式を以下に示す.

$$\frac{a}{a_4} = \frac{2}{\gamma+1} - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \left( \frac{x}{a_4 t} \right) \dots (5)$$

$$\frac{u}{a_4} = \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{x}{a_4 t} \right) \dots (6)$$

等エントロピー変化であるので

$$\frac{a}{a_4} = \left( \frac{T}{T_4} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{p}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \dots (7)$$



# Navier-Stokes方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial f_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} - \rho F_x &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p) + \frac{\partial f_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau}{\partial x} - \rho F_y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} f_x &= -\frac{2}{3}\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ f_y &= -\frac{2}{3}\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}\right) \\ \tau &= \mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \end{aligned} \right\}$$



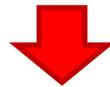
# 平板流れ

- 誤差を無次元量  $y/\delta$ ,  $u/U$  を用いて評価する.

$$y/\delta \propto \eta$$



$\eta - u/U$  関係は  $x$  に関係なく相似



$y/\delta - u/U$  関係も  $x$  に関係なく相似



# 平板流れのレイノルズ数

- 平板に沿う境界層が遷移する $R_e$ 数

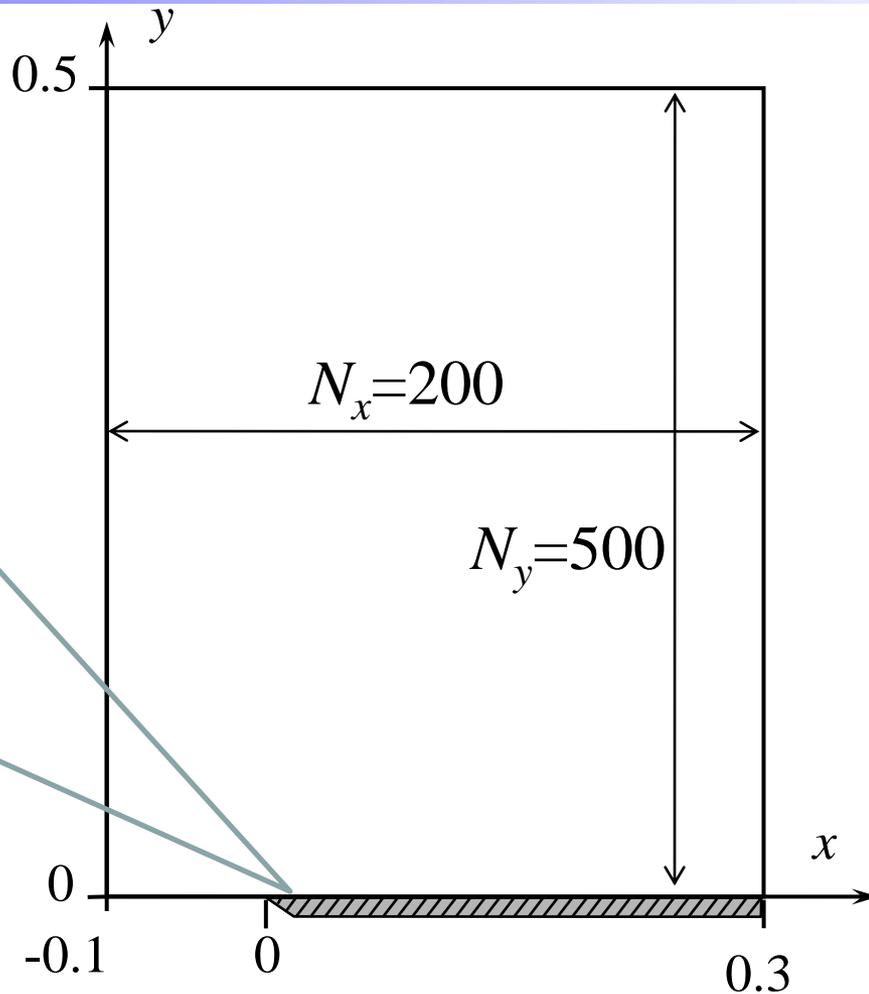
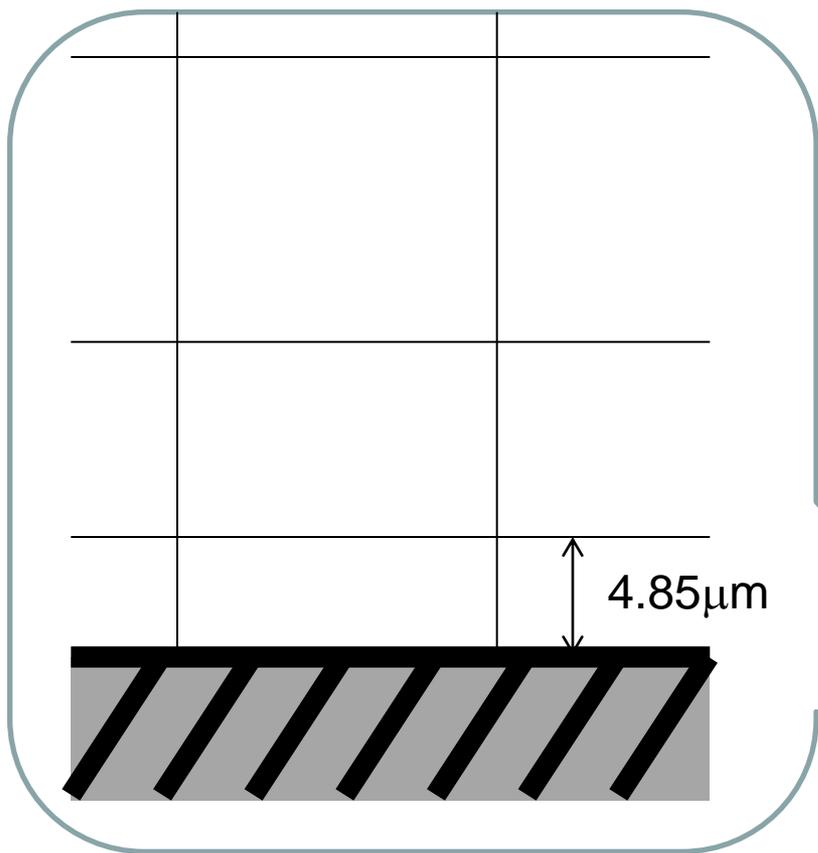
$$R_{ex,tr} = \left( \frac{Ux}{\nu} \right)_{tr} = 3.5 \times 10^5 \sim 10^6$$

$$R_{e,max} = 6135 \quad (x=0.3\text{m})$$

$$x=1.5 \sim 1.8\text{m}$$

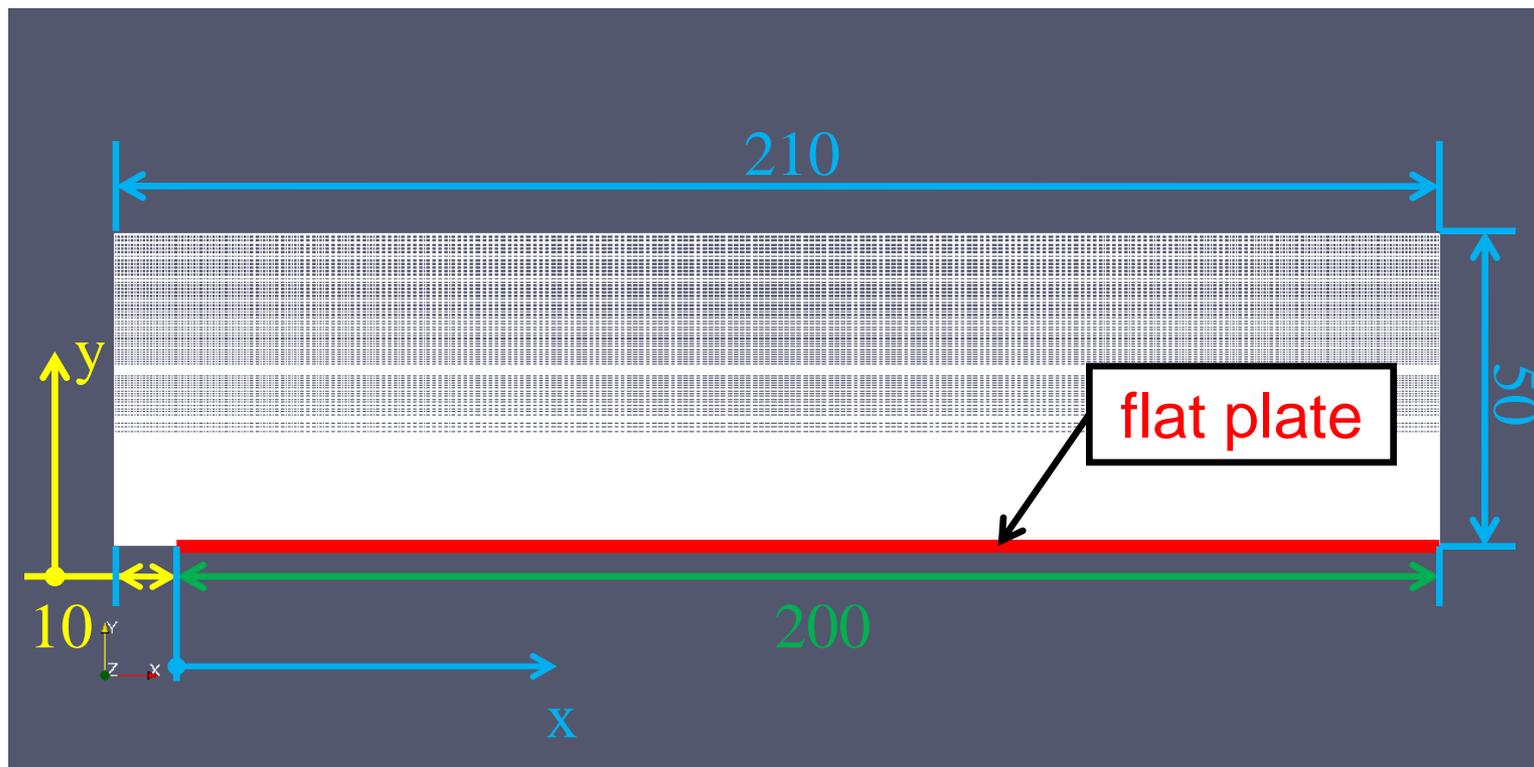


# 平板流れの解析(計算領域)





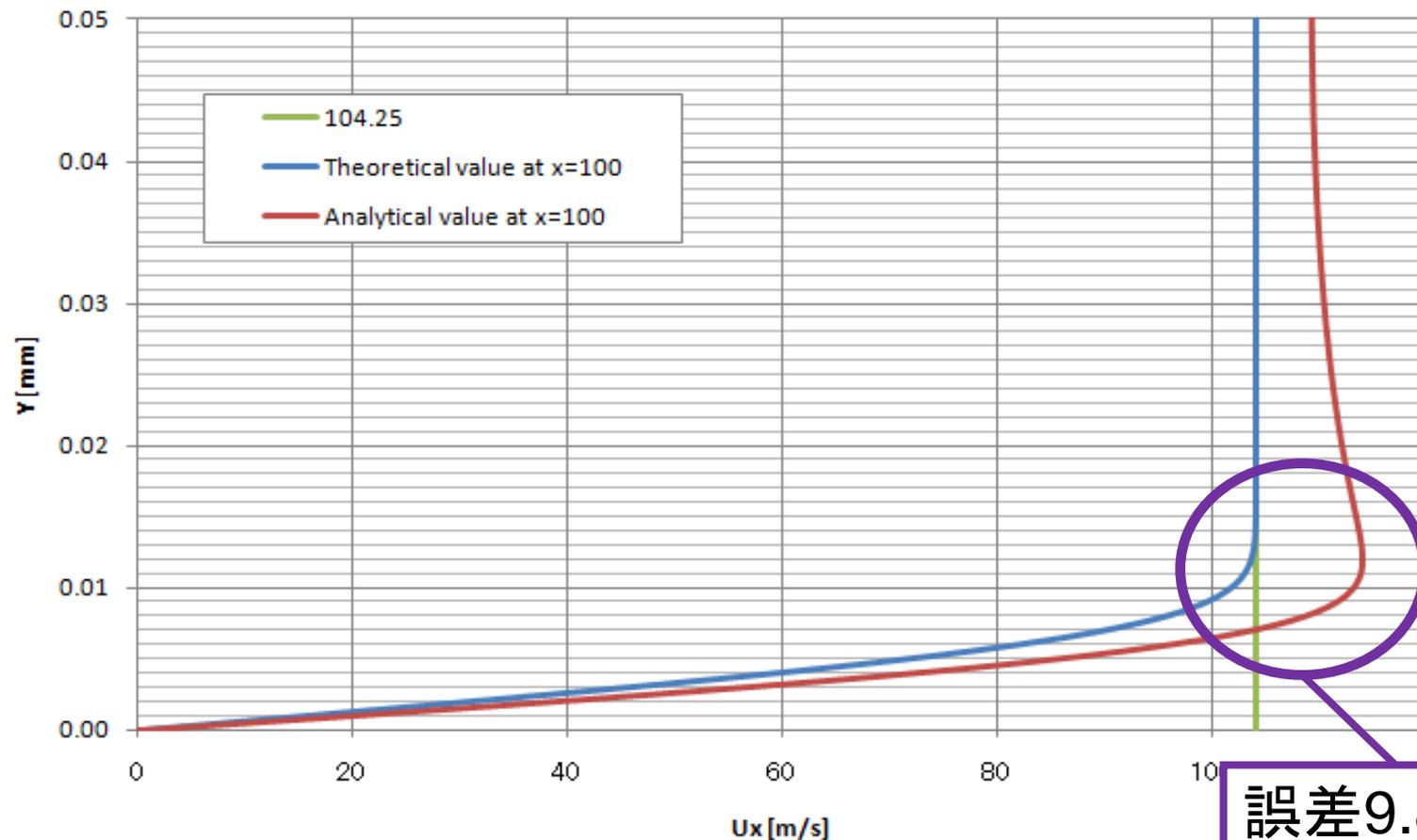
# 平板流れの解析(計算領域)



Computational Domain of flow over Flat Plate (unit : mm)



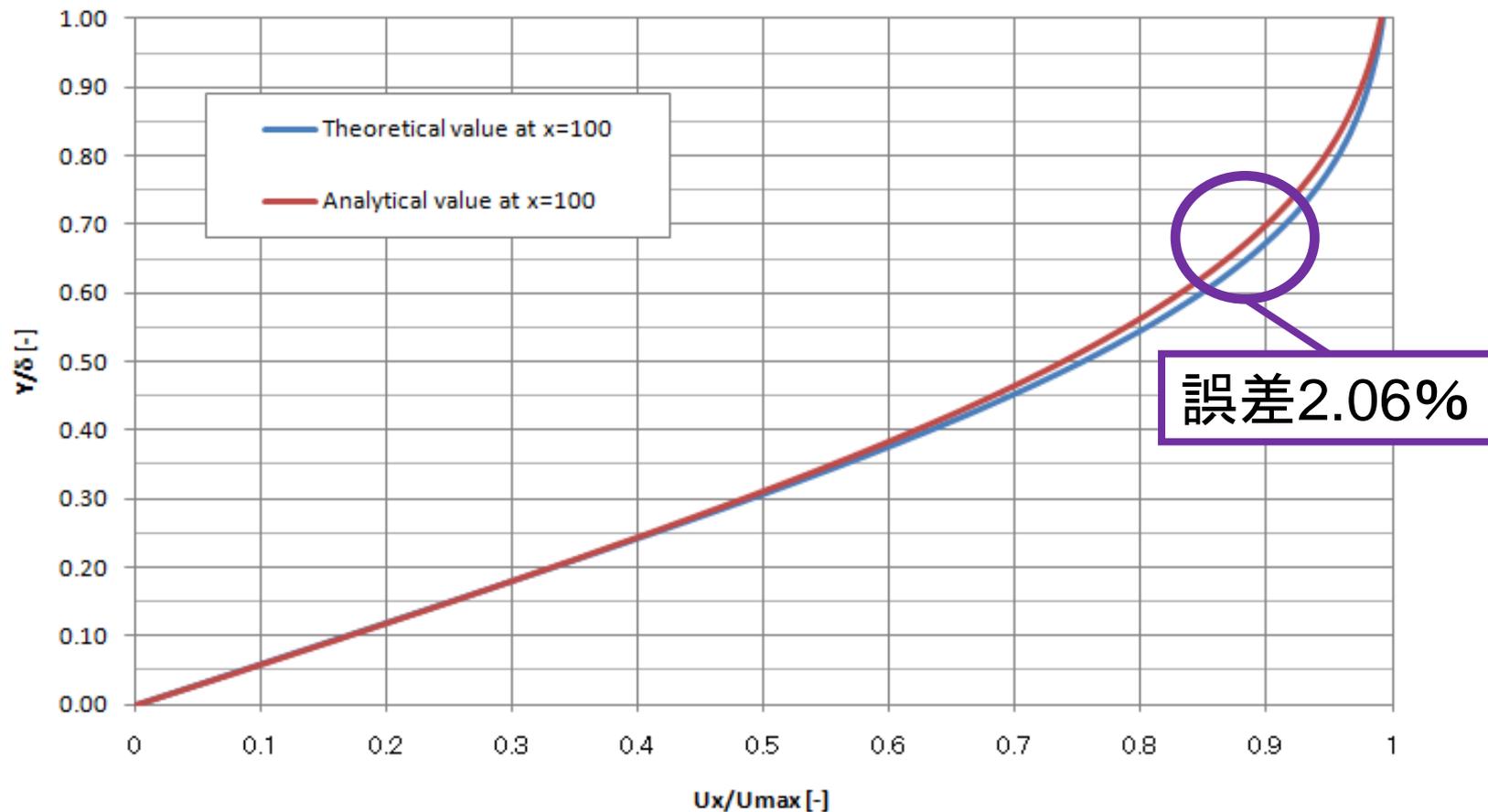
# 平板流れの解析結果



Comparison of velocity (x=100mm)



# 平板流れの解析結果



Comparison of nondimensional number of velocity ( $x=100\text{mm}$ )