

## 発表内容

1. OpenFOAMによる拡散計算のためのソルバー変更
2. 煙突ダウンウォッシュへの適用

## OpenFOAMによる大気拡散計算

電力中央研究所

瀧本 浩史

NEE研究会

2015/1/27

R 電力中央研究所

## スカラー輸送方程式の導入(1)

(バージョン2.1.1に対して)

1. ベースとなるソルバを選択  
(simpleFoam, pimpleFoam, buoyantBoussinesqPimpleFoamなど)  
→以降はpimpleFoamをベースに話をすすめる。
2. pimpleFoamの構成ファイルは以下の通り。  
\$FOAM\_SOLVERS/incompressible/pimpleFoamにおいて  
./pimpleFoam.C ... メインルーチン  
./UEqn.H ... 運動方程式  
./pEqn.H ... 圧力方程式  
./createFields.H ... 変数設定、基準点圧力の読み込みなど  
./Make/options ... 必要なヘッダファイルの場所、ライブラリへのリンクを指定  
./Make/files ... コンパイルするファイルとソルバ名の指定

その他のファイルはビルド時に作成される。

## OPENFOAMによる拡散計算

## スカラー輸送方程式の導入(2)

新しいソルバを作成するため、ベースとなるソルバをディレクトリごとコピーし、別の名前をつける。

```
$ cd $FOAM_SOLVERS/incompressible
$ cp -r pimpleFoam pimpleFoamC
```

メインルーチンのファイル名を変更。

```
$ cd pimpleFoamC
$ mv pimpleFoam.C pimpleFoamC.C
```

./Make/filesのソルバ名を書き換え。

```
pimpleFoam.C
EXE = $(FOAM_APPBIN)/pimpleFoam
↓
pimpleFoamC.C
EXE = $(FOAM_USER_APPBIN)/pimpleFoamC
```

## スカラー輸送方程式の導入(3)

スカラー輸送方程式を解くCEqn.Hを作成。

```
volScalarField kappact("kappact", turbulence->nut()/Sc); //渦拡散係数、Scの設定は後述
kappact.correctBoundaryConditions();

volScalarField kappacEff("kappacEff", turbulence->nu()/Sc + kappact); //拡散係数+渦拡散係数

fvScalarMatrix CEqn
(
    fvm::ddt(C)
    + fvm::div(phi, C)
    - fvm::laplacian(kappacEff, C)
);
```

$$\leftarrow \frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) = 0$$

```
CEqn.relax(); //緩和係数の設定
CEqn.solve();
```

## スカラー輸送方程式の導入(4)

pimpleFoam.Cから読み込む。

```
while (pimple.loop())
{
    #include "UEqn.H"

    // --- Pressure corrector loop
    while (pimple.correct())
    {
        #include "pEqn.H"
    }

    if (pimple.turbCorr())
    {
        turbulence->correct();
    }
    #include "CEqn.H"
}
```

## スカラー輸送方程式の導入(5)

createFields.Hに以下を追加。

```
Info<< "Reading field C\n" << endl;
volScalarField C
(
    IOobject
    (
        "C",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
...

singlePhaseTransportModel laminarTransport(U, phi);
#include "readTransportProperties.H" //ケースディレクトリのconstant/transportPropertiesの読み込み
```

## スカラー輸送方程式の導入(6)

readTransportProperties.Hを作成

```
// Laminar Schmidt number
dimensionedScalar Sc(laminarTransport.lookup("Sc"));

// Turbulent Schmidt number
dimensionedScalar Sct(laminarTransport.lookup("Sct"));
```

```
ビルド
$ wmake
```

## ケースの設定

1. ケース/constant/transportPropertiesにシユミット数を追加

```
Sc Sc [0 0 0 0 0 0 0] 0.9
Sct Sct [0 0 0 0 0 0 0] 0.7
```

2. ケース/0ディレクトリ内にCの初期条件、境界条件設定ファイルを作成。

3. ケース/system/fvSchemesで、スカラー輸送方程式の離散化スキームを設定。

4. ケース/system/fvSolutionsで、スカラー輸送に対する代数方程式の解法を設定。

## その他

・煙突からの放出を考える場合は、煙突の吐出面を固定端境界として濃度を与えればよい。(濃度 × 流速 × 面積が放出量となる)

・空中放出の場合、以下を参考にソース項を実装する必要がある。

今野先生の「輸送方程式のソース項の実装」を参照。

[https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.opencae.jp%2Fraw-attachment%2Fwiki%2FOpenCAE-User-Group-archive%2F20120421OFBeginner.pdf&ei=OWG\\_VPL3Ko738QW2gYHYCw&usg=AFQjCNEfKFpQO8OBHS8POjxHw339NGHYUg&sig2=dpVxgJZDRpNVfdAaQ8sitQ](https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.opencae.jp%2Fraw-attachment%2Fwiki%2FOpenCAE-User-Group-archive%2F20120421OFBeginner.pdf&ei=OWG_VPL3Ko738QW2gYHYCw&usg=AFQjCNEfKFpQO8OBHS8POjxHw339NGHYUg&sig2=dpVxgJZDRpNVfdAaQ8sitQ)

## 煙突ダウンウォッシュ問題への適用

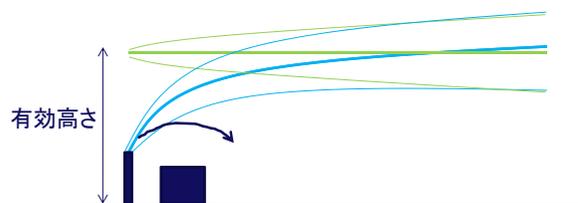
## 背景

### 発電所からの排ガス拡散の実験・計算

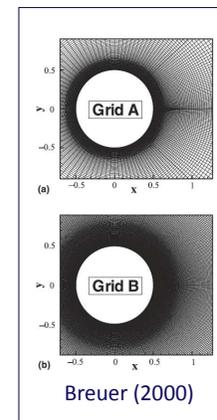
煙突を配置せず水平放出  
or  
煙突を配置し上昇過程を再現

→これまでの主流

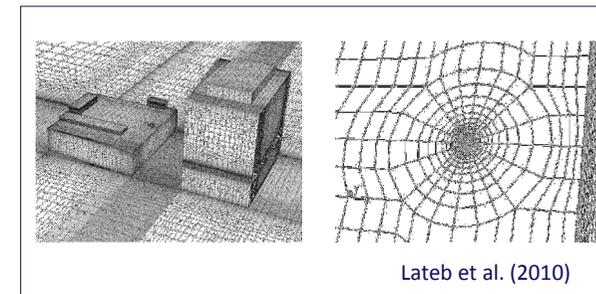
→上昇過程が複雑地形や建物影響を受けるときには、上昇過程を再現する必要がある。火力発電所の低煙突化や山間地に建設される地熱発電所など。



## 問題点



Breuer (2000)



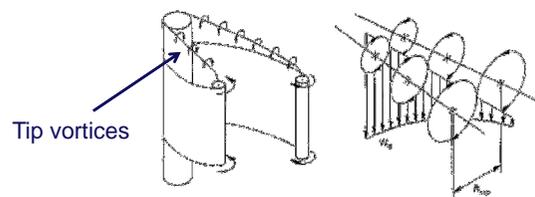
Lateb et al. (2010)

・煙突(円筒)周りを真面目に解くのは難しい  
・発電所の場合、煙突の径が~10mであるのに対して、計算領域は~10km、粘性底層は~1mm

→総格子数、タイムステップの制約から煙突をあまり細かく解像できない。

## 煙突ダウンウォッシュ

煙突後背部の低圧部に排ガスが巻き込まれる現象



Johnston and Wilson (1996)

- レイノルズ数依存(臨界レイノルズ数 $2 \times 10^5$ )
- 実スケールではあまり問題にならないが、風洞実験では重要(風洞実験結果を使ったCFDモデルの精度検証も)
- $W_s/U_s < 1.5$  のときに顕著な影響(亜臨界のレイノルズ数において)  
 $W_s$ : 排ガス速度,  $U_s$ : 煙突高さの水平風速

## 目的

現状では、煙突周囲の格子サイズ、格子タイプに関する指標はない。

→円筒形の煙突を対象に、複数の異なる格子タイプ、格子解像度を用いて煙突付近の流れ場の再現精度が拡散予測に与える影響を把握する。

## 実験による上昇過程の再現

話は変わりますが...

風洞実験においても、発電所周囲の排ガス拡散予測については、有効高さを予め計算し、水平方向に放出する方法が用いられることが多い。

→ 主にレイノルズ数とフルード数による制約のため。

(排煙レイノルズ数, 円筒レイノルズ数)

円筒レイノルズ数が臨界レイノルズ数 ( $2 \times 10^5$ ) を超えると、剥離域は小さくなり、煙突ダウンウォッシュは緩和される。

排ガスに浮力が入るとフルード数の相似が必要。ただし、排ガスの運動量の相似も満たさなければいけないので、密度を変化させることができず、実験風速をかなり遅くする必要がある。

## 計算概要

Park and Lee (2002)の実験を参考に設定。  
(実験では吐出速度0)

乱流モデル: LES (OpenFOAM v2.1.1)

SGSモデル: 1方程式モデル

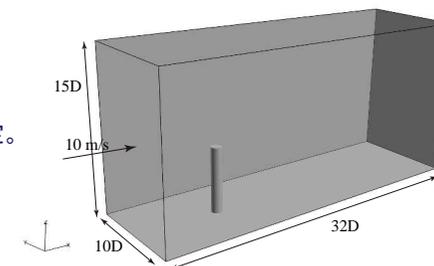
壁関数: Spalding則

時間項: 2次精度の後退差分

対流項: 線形補間(2次精度)

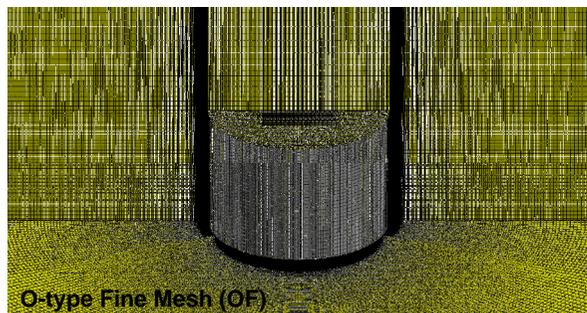
(濃度の対流項のみTVDスキームを使用)

床面と円筒はno-slip、側面と天井はslip条件



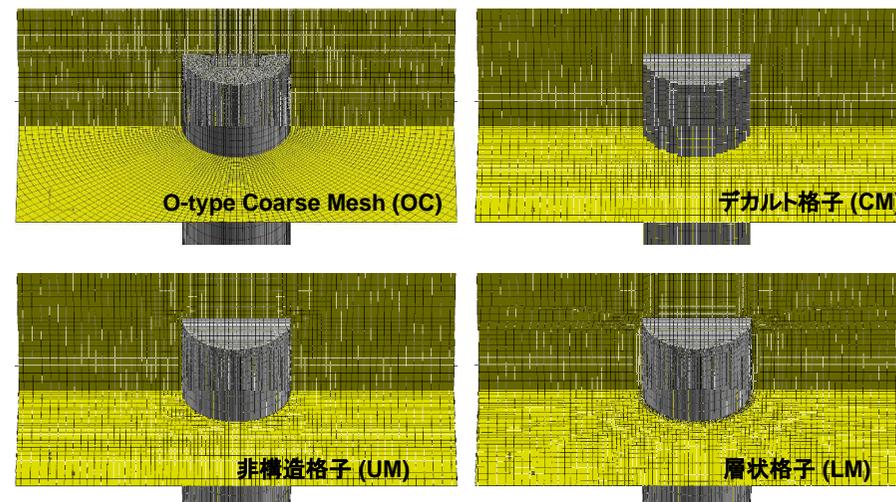
煙突径:  $D=30\text{mm}$   
 煙突高さ:  $H_s=180\text{mm}$   
 水平風速  $U: 10\text{m/s}$   
 排ガス吐出速度  $W_g: 0\text{m/s}$  or  $10\text{m/s}$   
 吐出速度比  $W_g/U_s: 1$   
 レイノルズ数  $(UD/\nu): 2 \times 10^4$   
 排ガスの浮力なし

## 格子タイプ

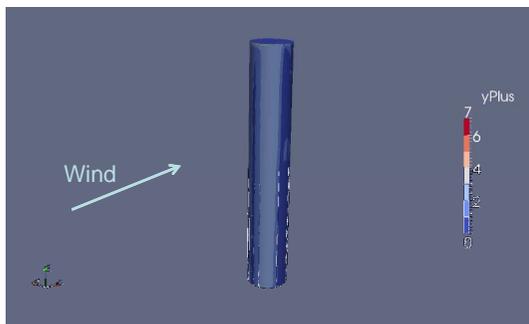


→ 基準ケース  
セル数は1600万

## 格子タイプ



$y^+$



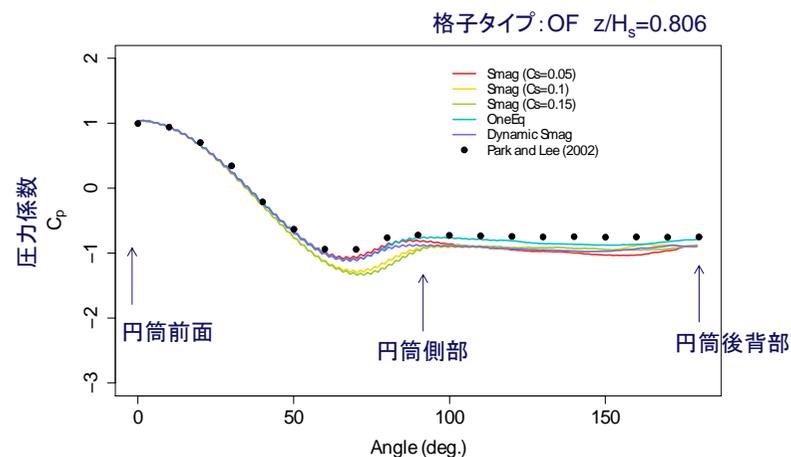
格子タイプ	$y^+$
OF	~3
OC	~40
CM	~40
UM	~40
LM	~15

OFのみ粘性底層まで解像。

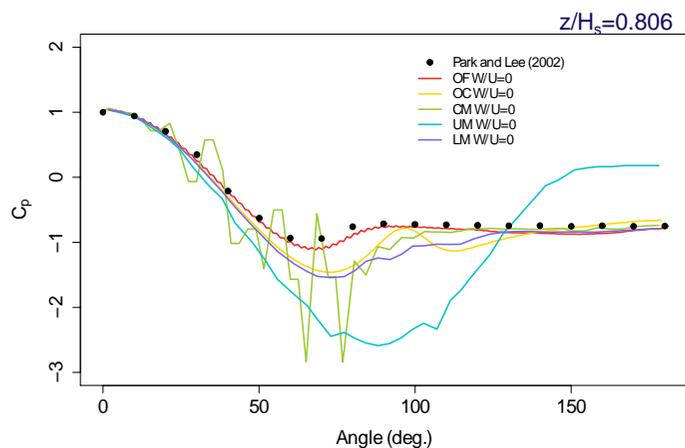
```
yPlus.boundaryField()[patchi] = d[patchi]
*sqrt(nuEff.boundaryField()[patchi]*mag(U.boundaryField()[patchi].snGrad()))
/ nuLam.boundaryField()[patchi]
dは壁面からの距離。
```

→LESでvanDriest型の壁面減衰関数を使用する場合、毎ステップ $y^+$ を計算し、 $\Delta$ を修正するので、時間が非常にかかる。  
→LESPropertiesでcalcIntervalを設定することが可能。

## 圧力分布 (sgsモデル)

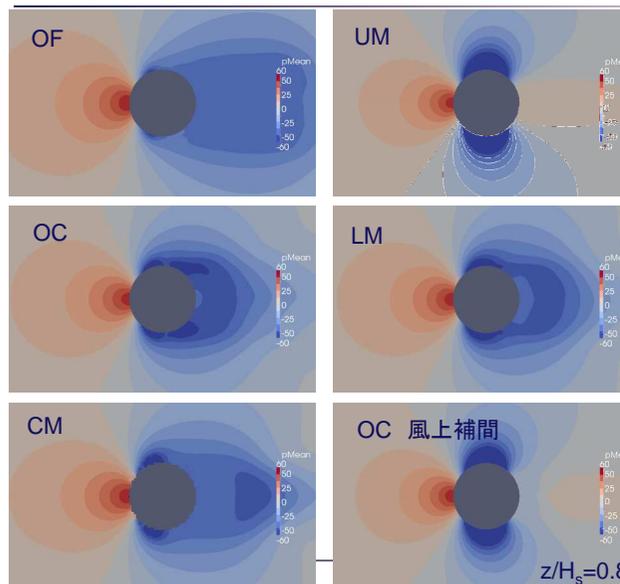


## 圧力分布 (格子タイプ)



OF以外は円筒側面で低圧(高風速)に。  
特にUMは、円筒後背部での圧力回復が大きい。  
剥離位置も格子タイプによって異なる。

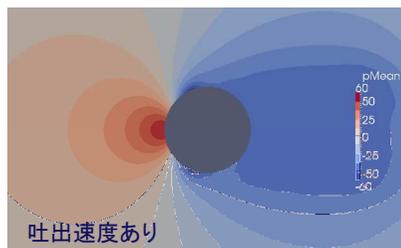
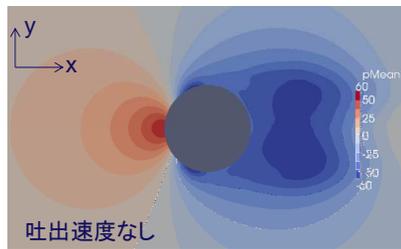
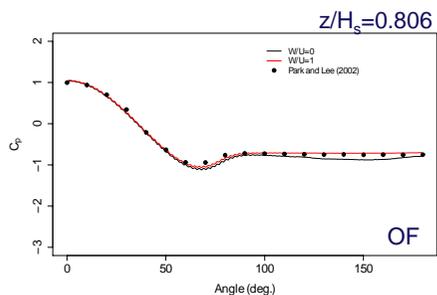
## 圧力分布



UMのケースはほとんど剥離していない。  
→OCの風上補間を使ったケースに類似。

全ての格子タイプで剥離領域の大きさはOFと異なる。

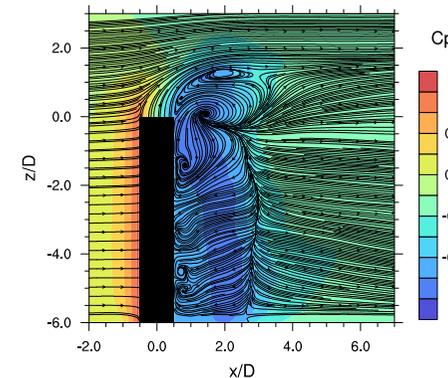
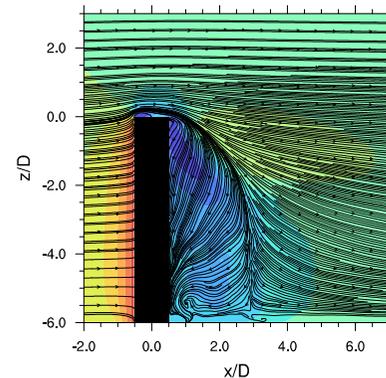
## 圧力分布(吐出速度)



$z/H_s=0.8$

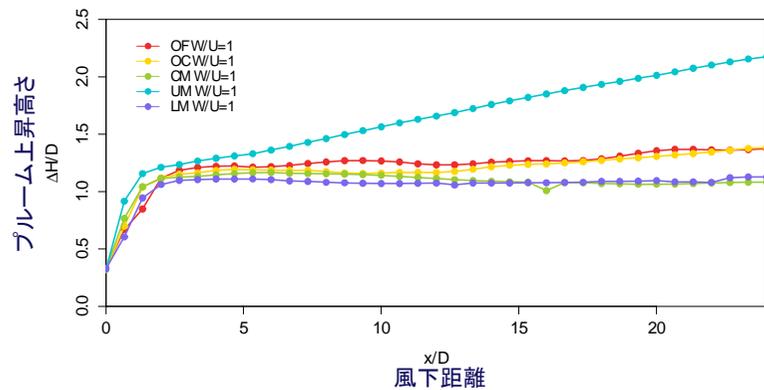
## 吐出速度の影響

煙突中心断面の流線



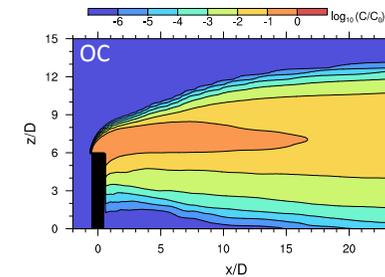
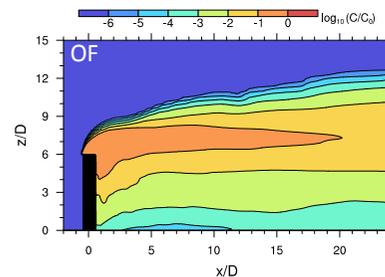
Tip vorticesとJet wakeの相互作用?

## 煙軸上昇軌跡



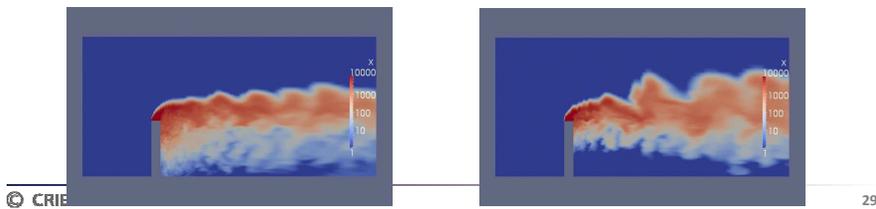
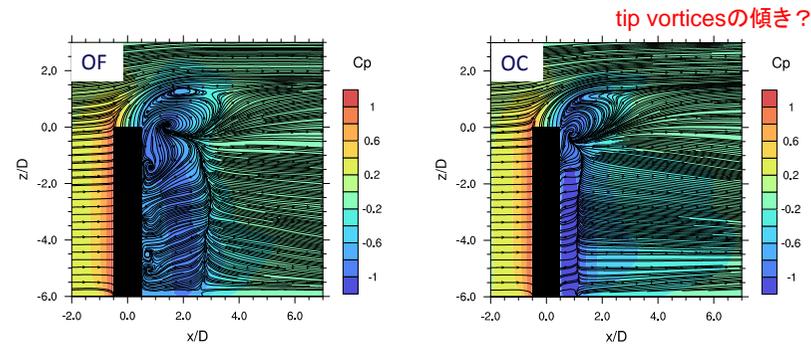
煙軸上昇軌跡はUMのみ大きく異なる。

## 濃度分布



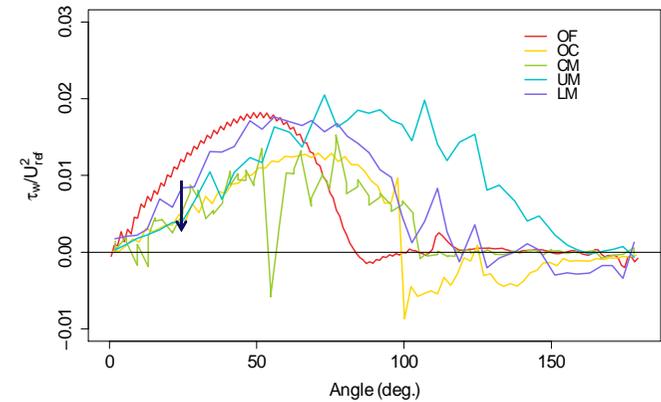
地表濃度分布は高解像度格子の方が高くなる。

# 解像度の影響



# 剥離域の過小評価の要因(1)

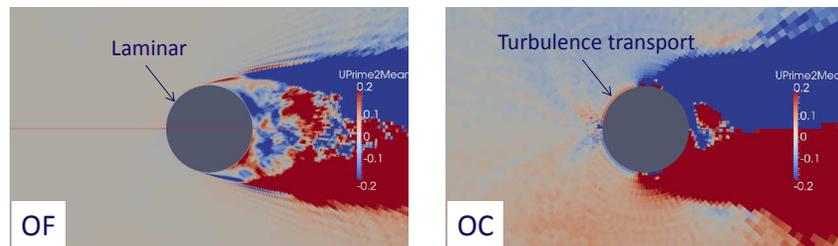
## 1. 壁面せん断応力の過小評価



壁関数による制約(壁面近傍の速度勾配を正確に再現できない)

# 剥離域の過小評価の要因(2)

## 2. 数値振動

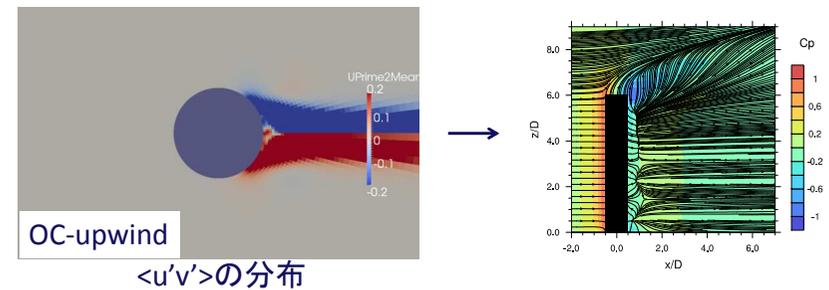


<u'v'>の分布

数値振動による擾乱により運動量の乱流輸送?

# 剥離域の過小評価の要因(3)

## 3. 数値粘性



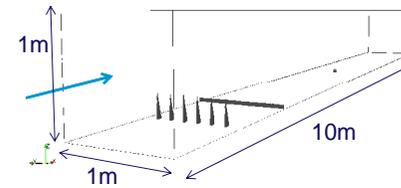
<u'v'>の分布

数値粘性により壁面の速度勾配が過小評価。せん断応力が小さくなり剥離が起こりにくくなる。

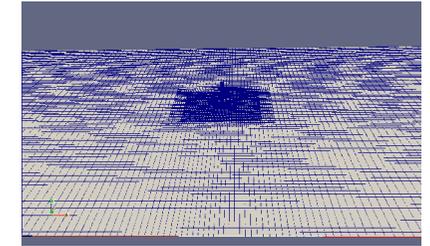
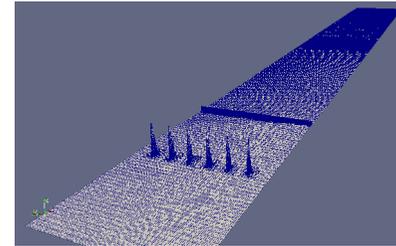
## 改善策

1. 壁面応力モデルを使用する。
2. 高次の離散化スキームを使用する。  
→非構造格子には難しい。
3. レイノルズ数に応じて所定の位置で強制的に剥離させる。

## 風洞実験との比較

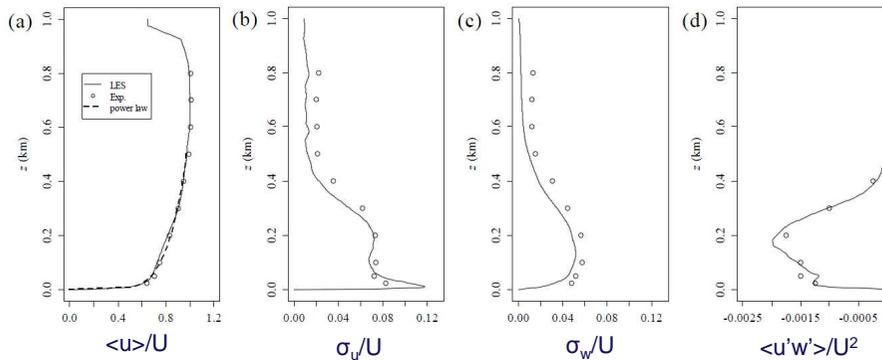


境界層中の拡散  
 煙突内径:6mm  
 煙突外径:8mm  
 煙突高さ:60mm  
 吐出速度:1.43m/s  
 煙突高さ水平風速:1.43m/s

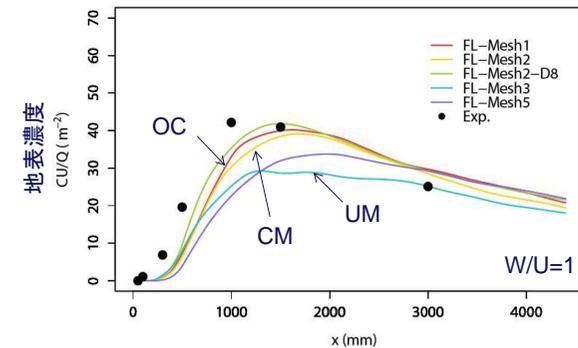


## 気流場(平地実験との比較)

煙源位置において



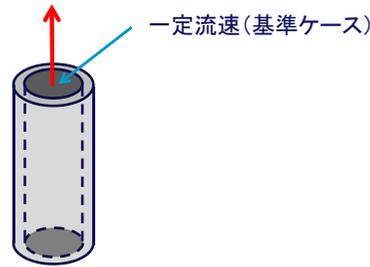
## 地表濃度



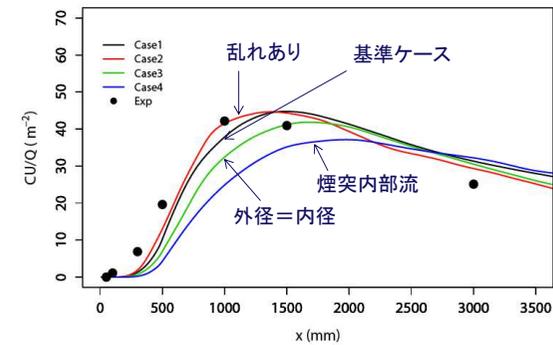
OFは計算コストの観点から適用できず。  
 UMの場合最大着地濃度が30%超の過小評価

## その他の煙源の設定

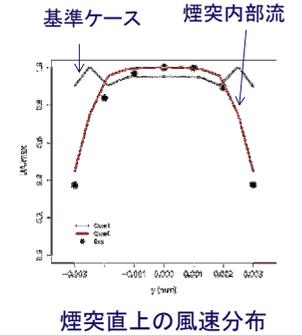
- Case1: 基準ケース
- Case2: 排ガスの乱れあり(乱流強度10%)
- Case3: 外径考慮せず
- Case4: 煙突内の流れ再現



## 煙源の設定の影響



ケース	基準ケースとの比 (最大着地濃度)
Case1	1.00
Case2	1.00
Case3	0.93
Case4	0.83



## まとめ

1. 煙突周囲の格子タイプや格子解像度により、剥離位置や後流の大きさは大きく変化する。  
剥離位置に影響を与える要因は、粗い格子による壁面せん断応力の過小評価、数値粘性による運動量の拡散、数値振動による運動量の乱流輸送である。
2. 煙突後方の剥離を正確に再現できなければ、地表濃度を精度よく求めることができない。対策として、壁面応力モデルなど高精度の壁面モデルの利用が考えられる。
3. 煙源の設定によって、最大着地濃度に10%~20%程度の差が生じ得る。ただし、濃度を過大評価する要因と過小評価する要因があり、それらが打ち消し合われている。