



2014年11月14日(金)

Doshisha University Heat Transfer Laboratory

オープンCAEシンポジウム2014

角柱のある平行平板間流れと熱伝達の OpenFOAMによるLES解析

- * 伊熊 克典 (同志社大学)
- 中川 慎二 (富山県立大学)
- 千田 衛 (同志社大学)
- 稲岡 恭二 (同志社大学)



研究背景

近年、化石燃料の枯渇化や地球温暖化といった問題が深刻化している

熱エネルギーの有効活用

熱伝達促進

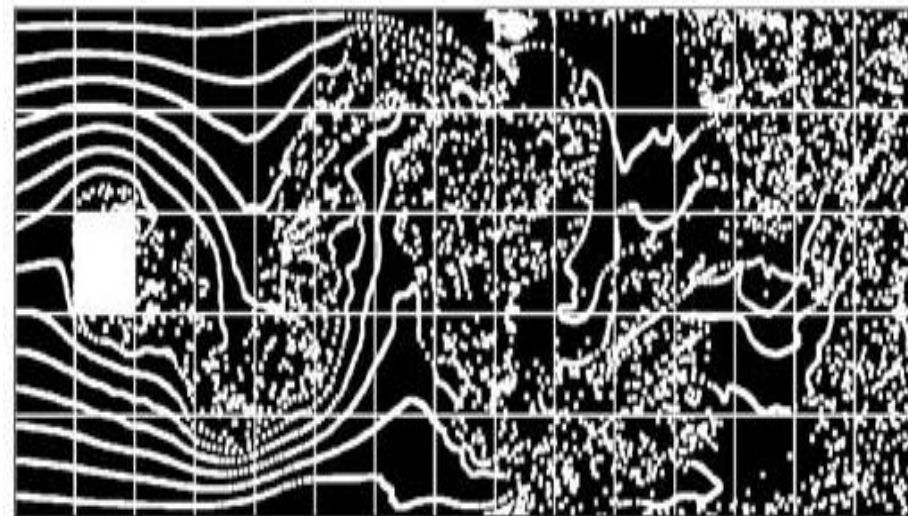
熱伝達を向上させる手段

平行平板間流路に乱れ促進体を設置

乱れ促進体後流で渦が発生

壁面において伝熱促進

熱交換器などへ応用し、伝熱機器の高効率化





研究背景

平行平板間内に設置した促進体による強制対流の研究

- ◎ 中川ら : 乱流場において流れの可視化と壁面熱流束変動の同時計測



- カルマン渦対による熱伝達促進

- ◎ 鈴木ら : 層流場において数値計算



- 壁近傍の小スケール渦(孤立渦)
- 壁近傍の孤立渦による伝熱促進効果

本研究の目的

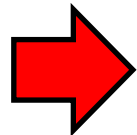
乱流場において角柱後流の流動構造と熱伝達促進の関係について、LESを用いて明らかにする



改良ソルバ

解析ソフトウェア

OpenFOAMのpimpleFoamにエネルギー式を組み込んだ**改良ソルバ**を使用



速度場だけでなく、**温度場**を算出することで**流動構造**と**熱伝達促進**の関係を解明

pimpleFoam_ikuma

```
// --- Pressure-velocity PIMPLE corrector loop
while (pimple.loop())
{
    #include "UEqn.H"

    #include "TEqn.H"

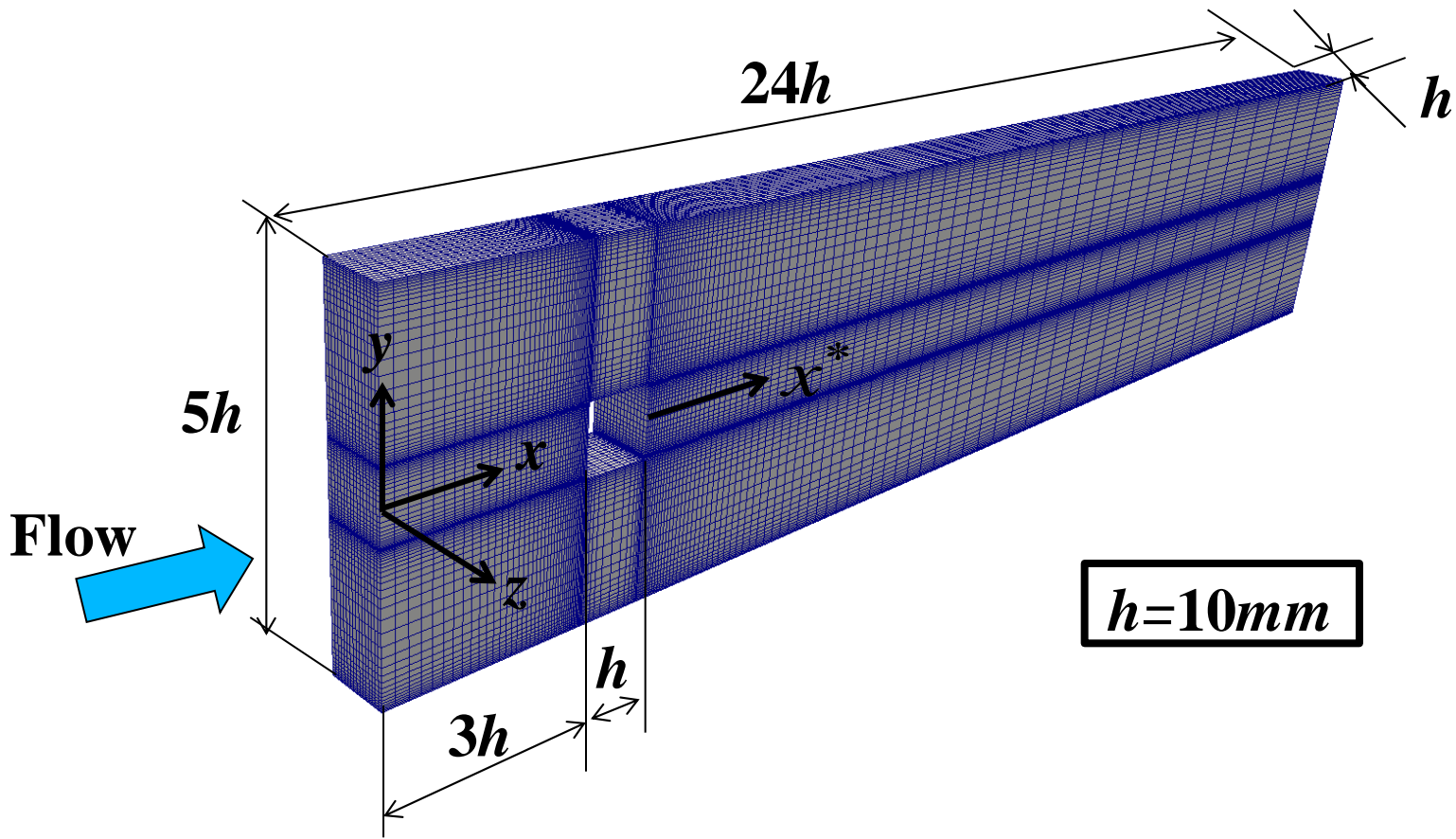
    // --- Pressure corrector loop
    while (pimple.correct())
    {
        #include "pEqn.H"
    }
}
```

TEqn.H

```
{
    kappat = turbulence->nut()/Prt;
    kappat.correctBoundaryConditions();

    volScalarField kappaEff("kappaEff",
    turbulence->nu()/Pr + kappat);

    fvScalarMatrix TEqn
    (
        fvm::ddt(T)
        + fvm::div(phi, T)
        - fvm::laplacian(kappaEff, T)
    );
    TEqn.solve();
}
```



メッシュ

$$(N_x, N_y, N_z) = (123, 90, 16)$$

z 方向 : 等間隔格子

x, y 方向 : 不等間隔格子



解析条件

<LES>

基礎方程式

連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier-Stokes式

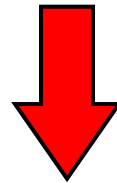
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{d}_{ij})$$

エネルギー式

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} = (\kappa + \kappa_t) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2}$$

SGS応力(Sub Grid Scale)

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$



モデル化

Smagorinskyモデル

$$\tau_{ij} = -2\nu_e \bar{d}_{ij}, \nu_e = (C_S \Delta)^2 |\bar{d}|$$

$$\bar{d}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

ν : 動粘性係数

τ_{ij} : SGS応力

ν_e : 渦粘性係数

\bar{d}_{ij} : ひずみ速度テンソル

C_S : Smagorinsky定数



離散化・境界条件

< 離散化 >

非定常項	2次精度後退差分
対流項	2次精度中心差分
圧力項	2次精度中心差分
拡散項	2次精度中心差分

< 境界条件 >

入口境界条件

流入速度

$$U_m = 4.30 [m/s]$$

流入温度

$$T_f = 300 [K]$$

出口境界条件

移流流出境界条件

上壁境界条件

Non-slip、断熱

下壁境界条件

Non-slip
等熱流束加熱

角柱境界条件

Non-slip、断熱

スパン方向境界条件

周期境界条件

$$Re = 13600$$

$$Pr = 0.717$$

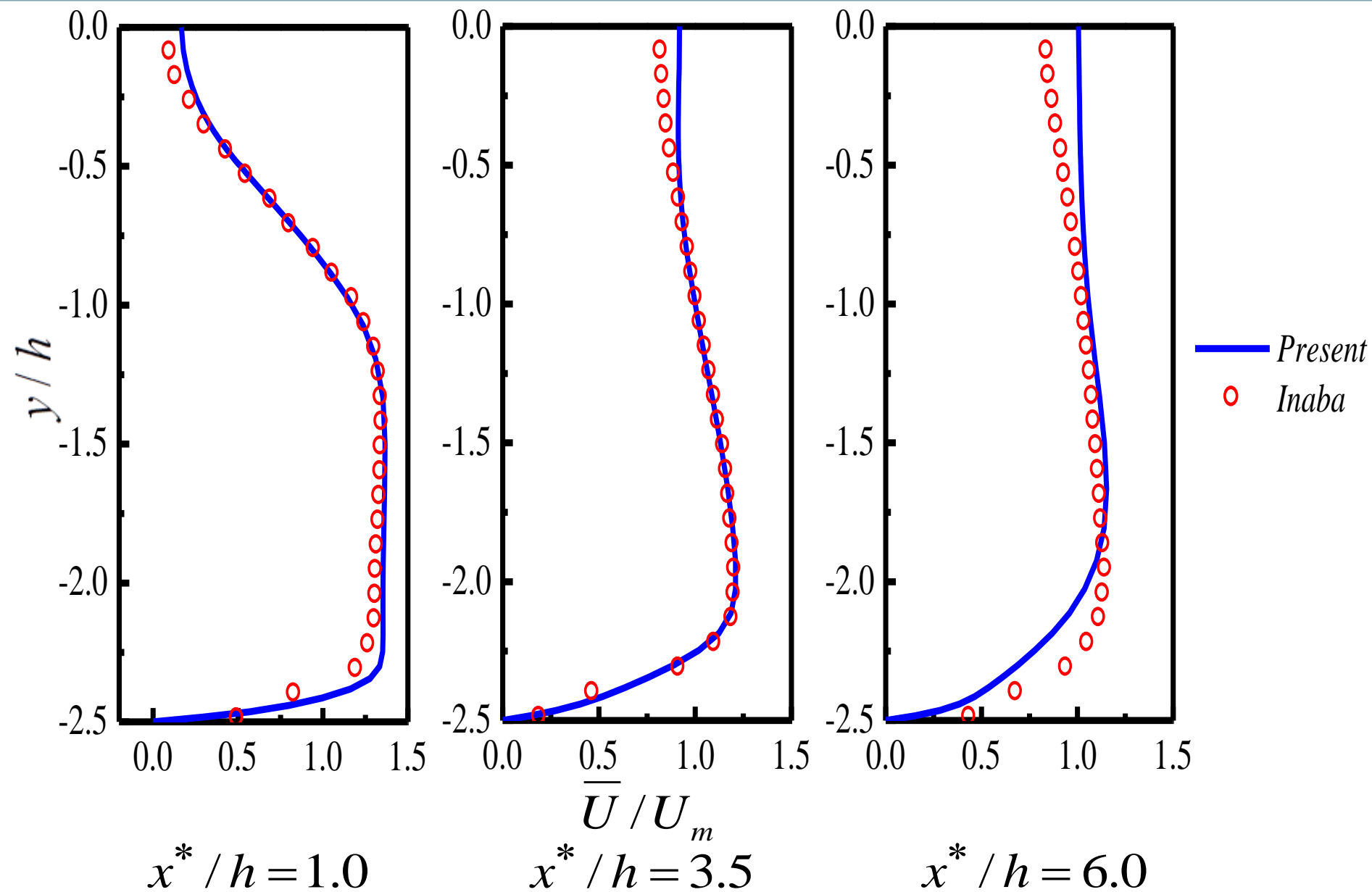
$$Pr_t = 0.85$$



結果

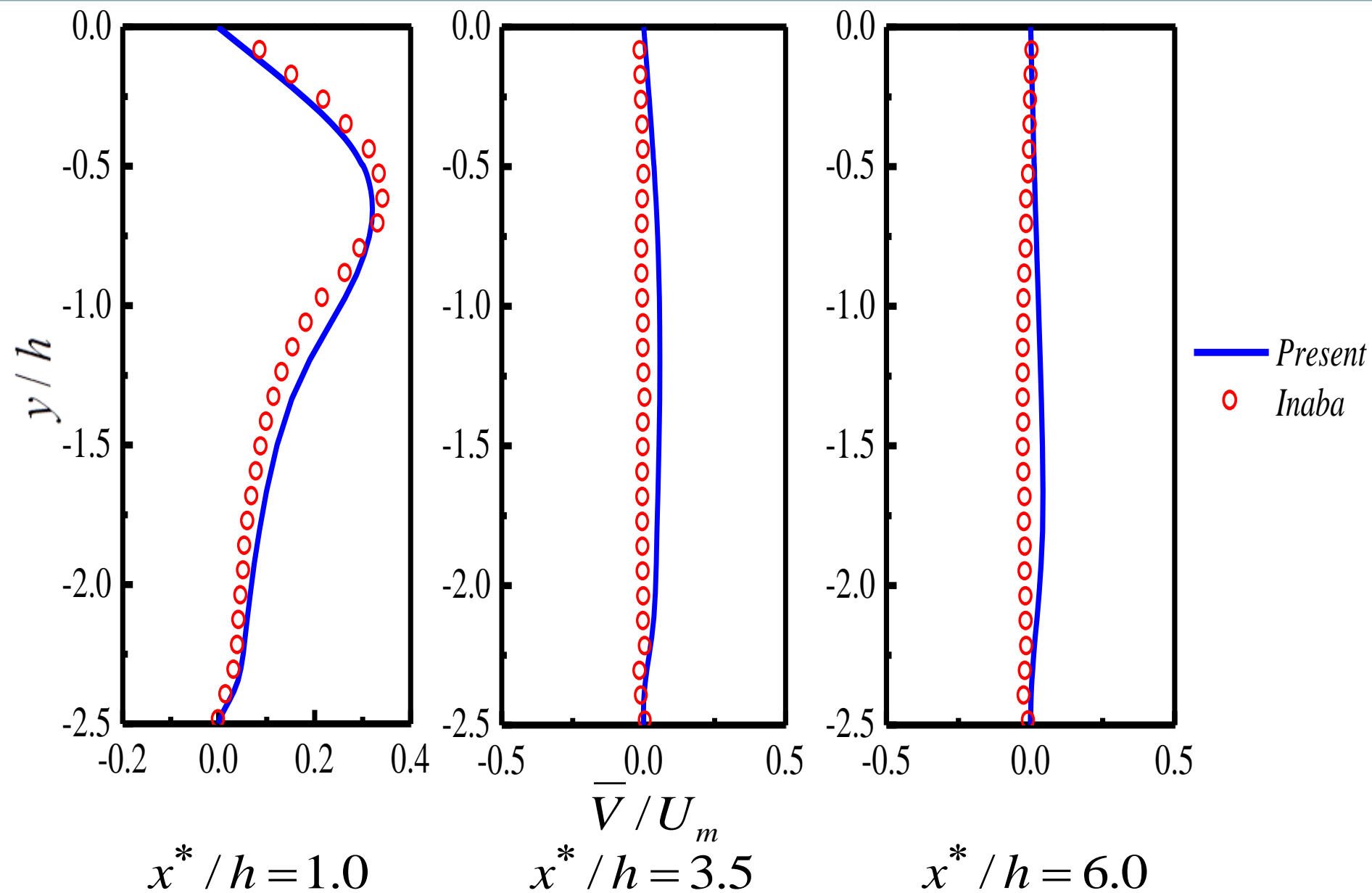


流れ方向時間平均流速



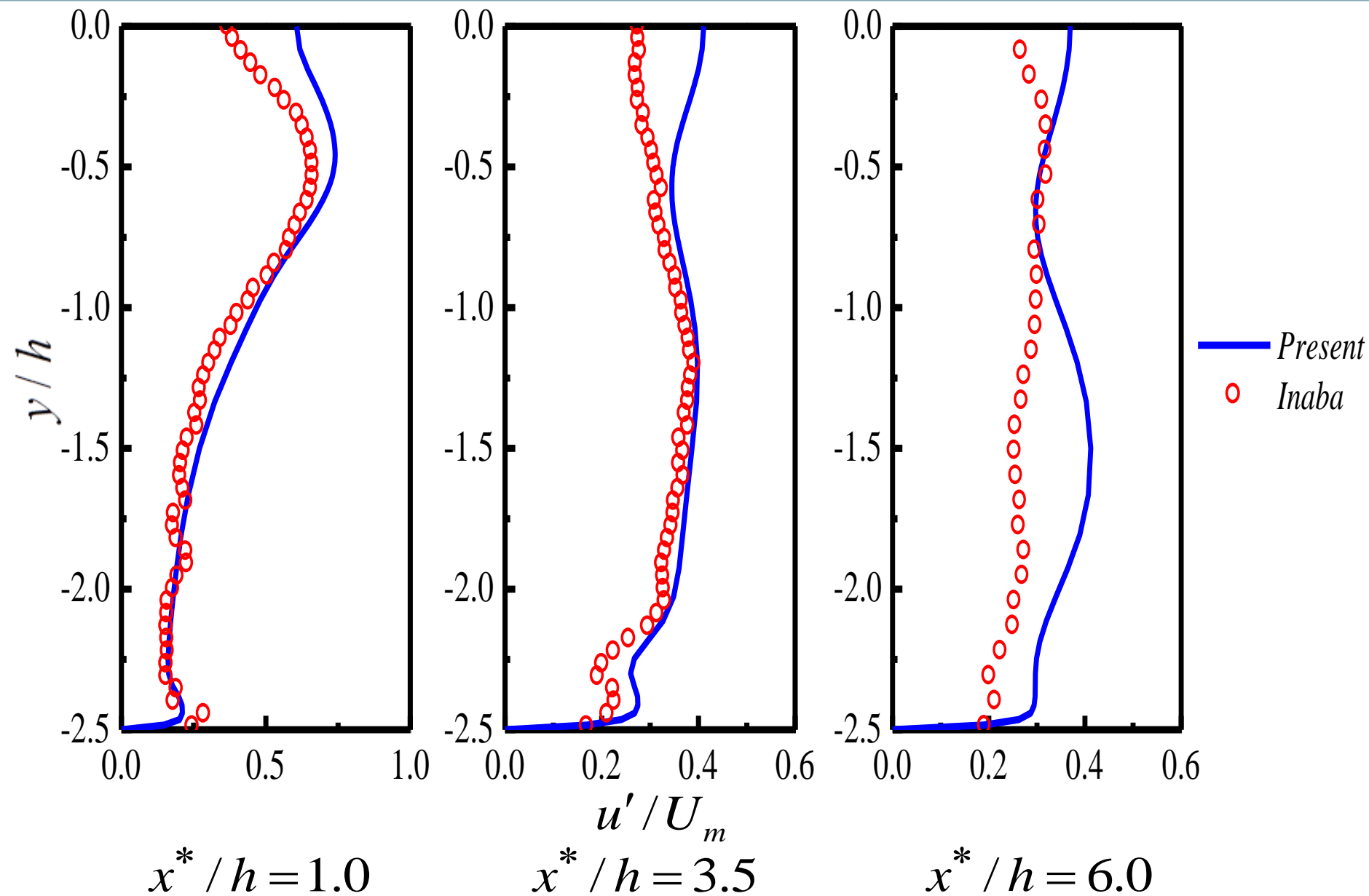


高さ方向時間平均流速



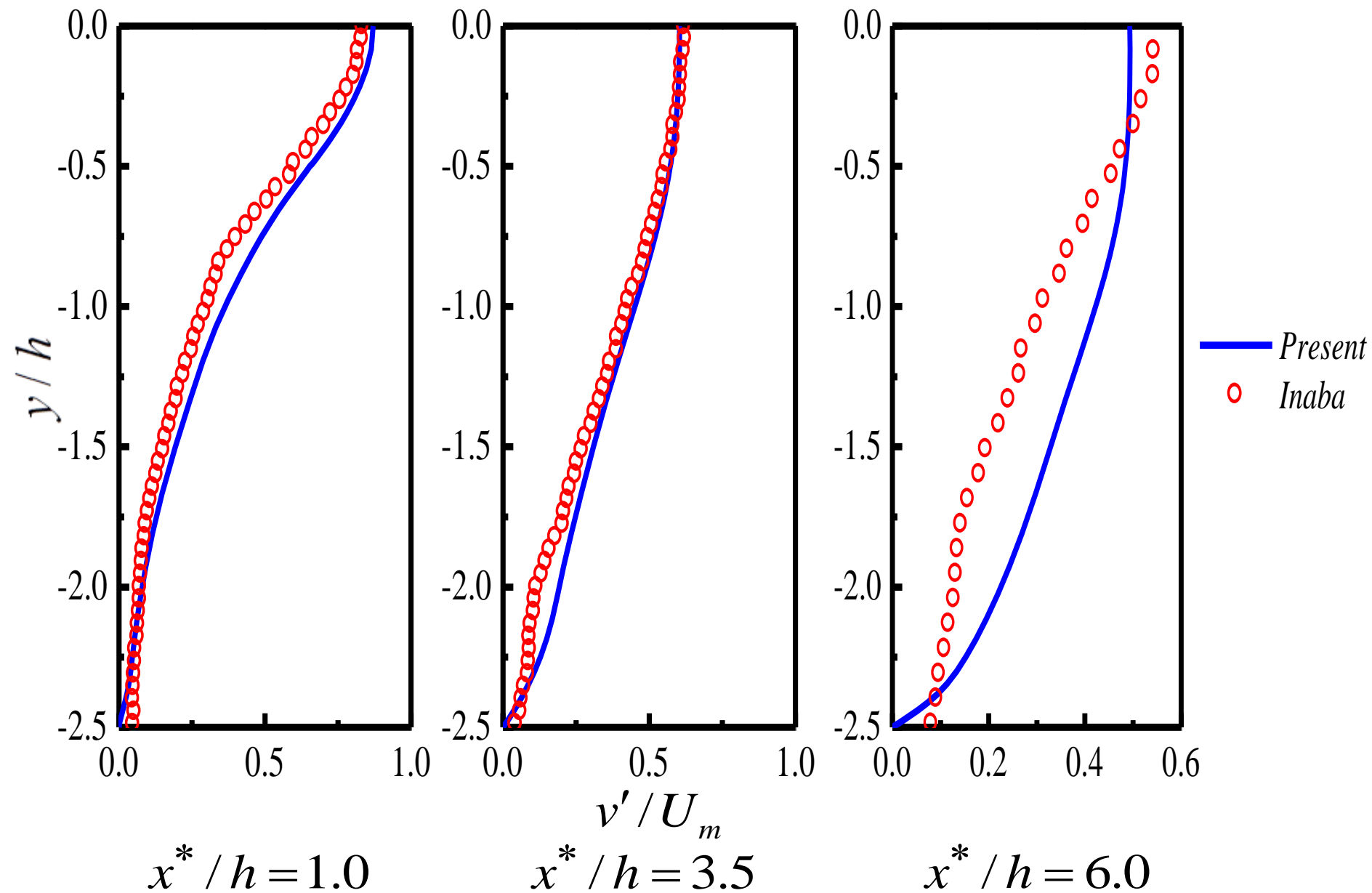


流れ方向時間平均乱れ強さ



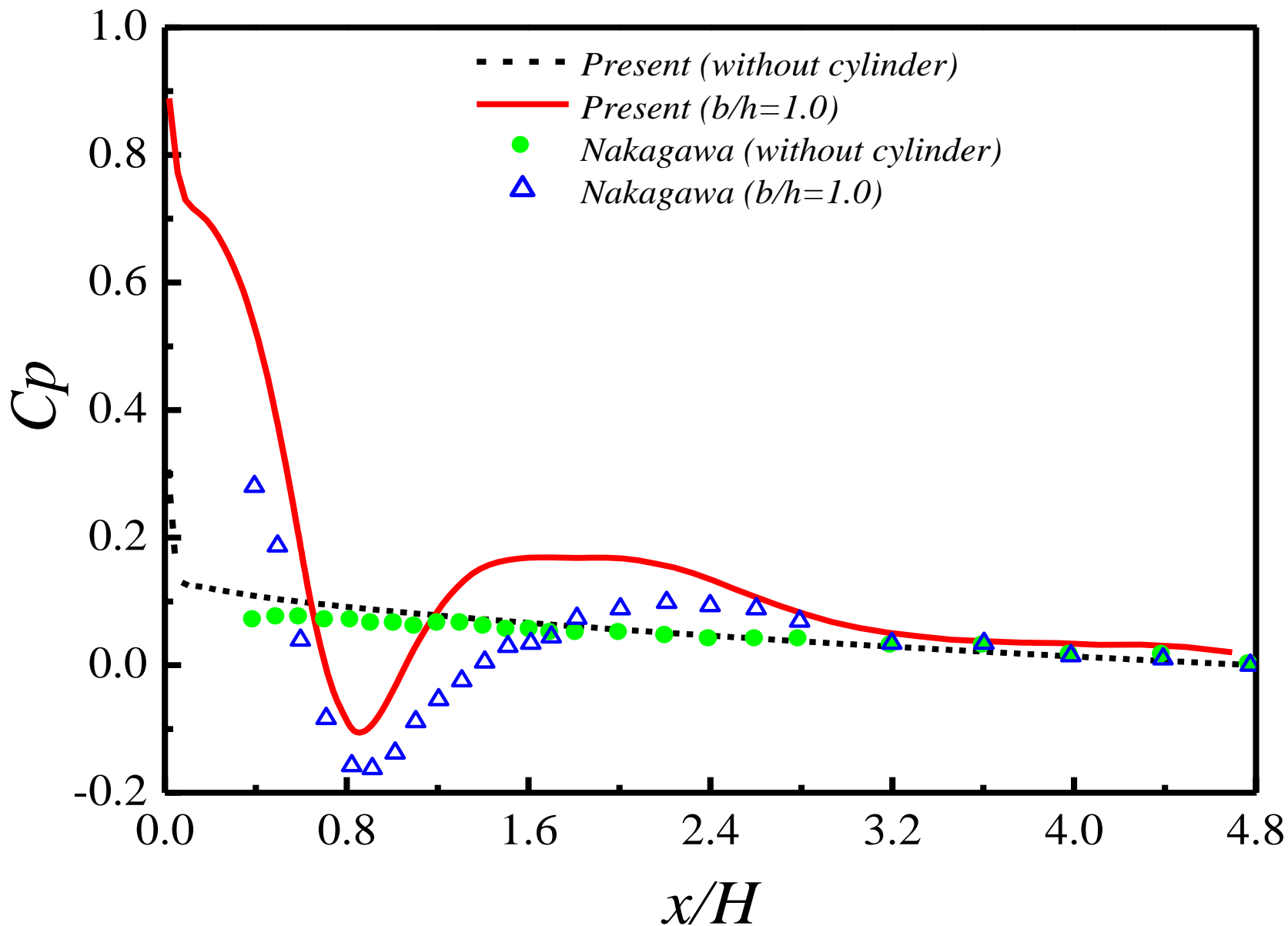


高さ方向時間平均乱れ強さ



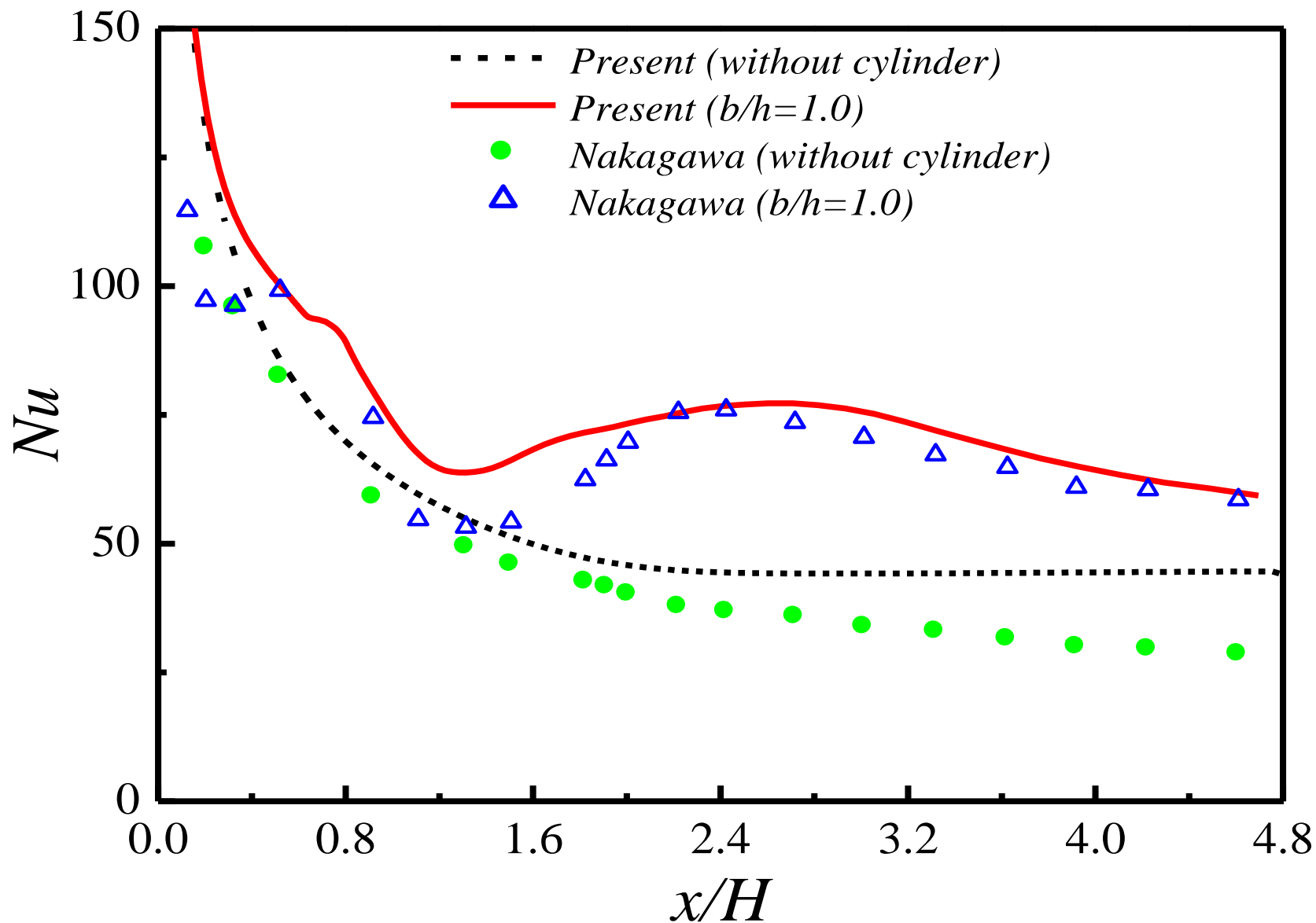


壁面静压系数





時間平均熱伝達特性





速度3成分分解

通常、流れ方向の瞬時の速度成分 u はレイノルズ分解によって以下のような2成分に分解される

$$u = \bar{U} + u_r$$

\bar{U} : 時間平均速度成分
 u_r : 変動成分



しかし、本研究のような角柱後流の流れ場では、角柱から放出される渦による周期的な変動成分が流れ場に大きな影響を与えると考えられる

位相平均処理を行う場合、以下のような3成分に分解した

$$u = \bar{U} + u_p + u_t$$

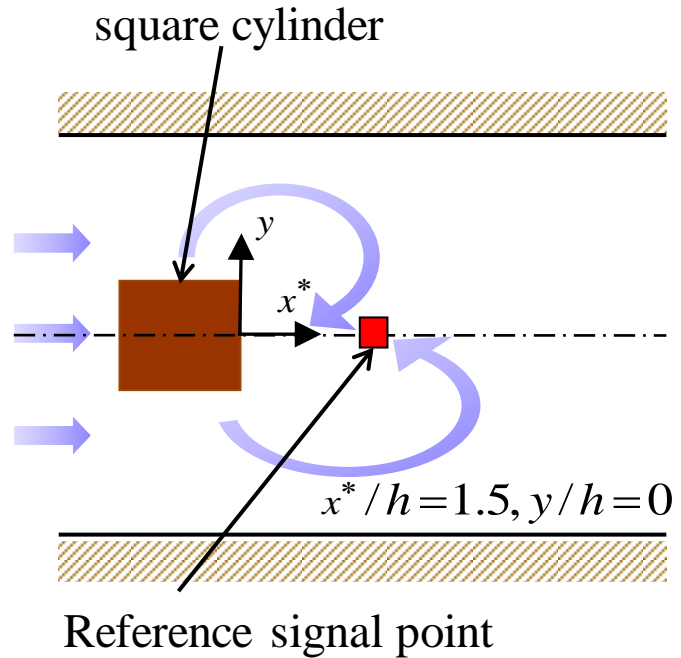
u_p : 周期変動成分
 u_t : 乱流変動成分

u_t は位相平均すると除去されるので位相平均速度 $\langle u \rangle$ は次式のようになる

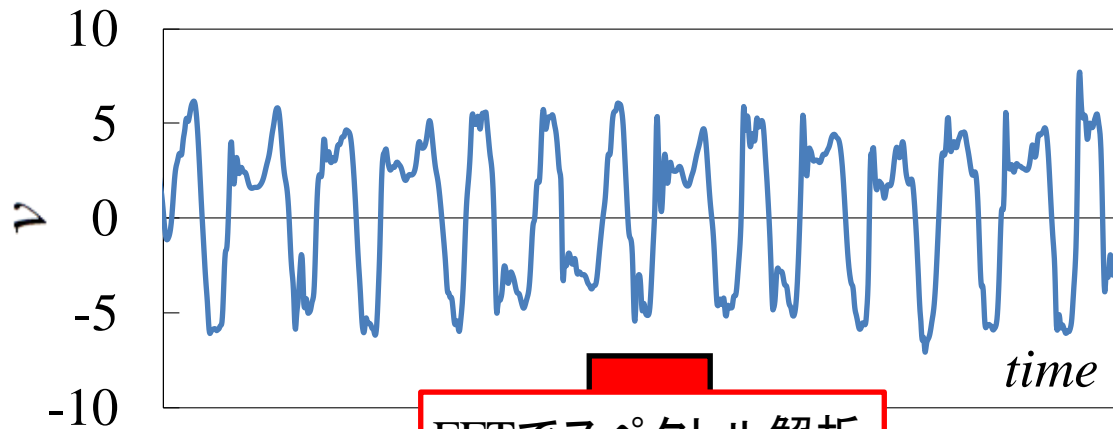
$$\langle u \rangle = \bar{U} + u_p$$



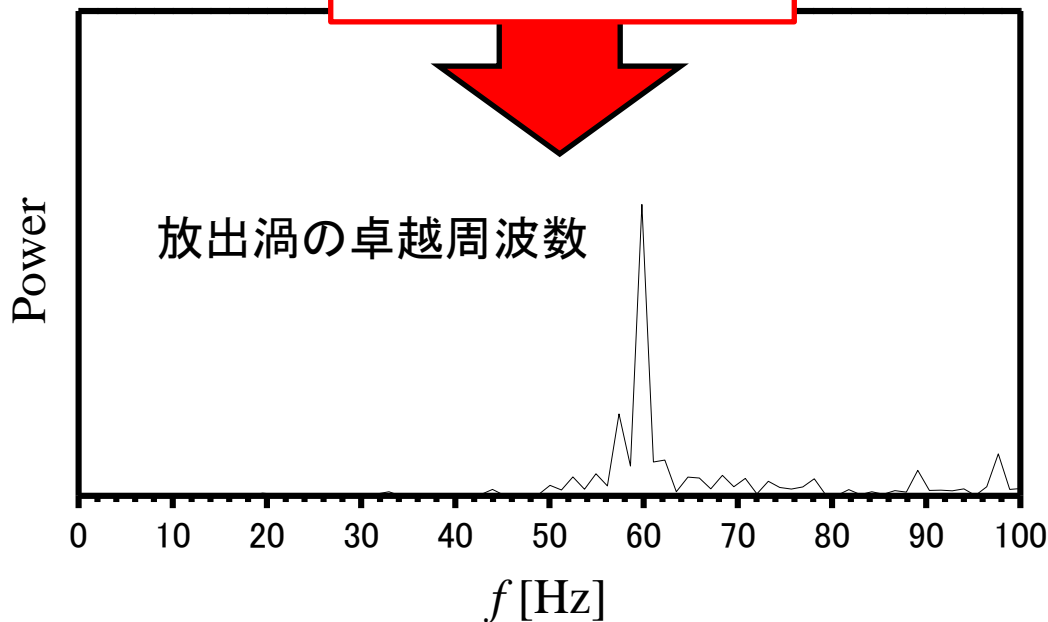
位相平均処理



基準信号とする $x^*/h=1.5, y/h=0$ における y 方向の速度時系列データ



FFTでスペクトル解析



$$St = 0.125$$

中川 $St = 0.13$

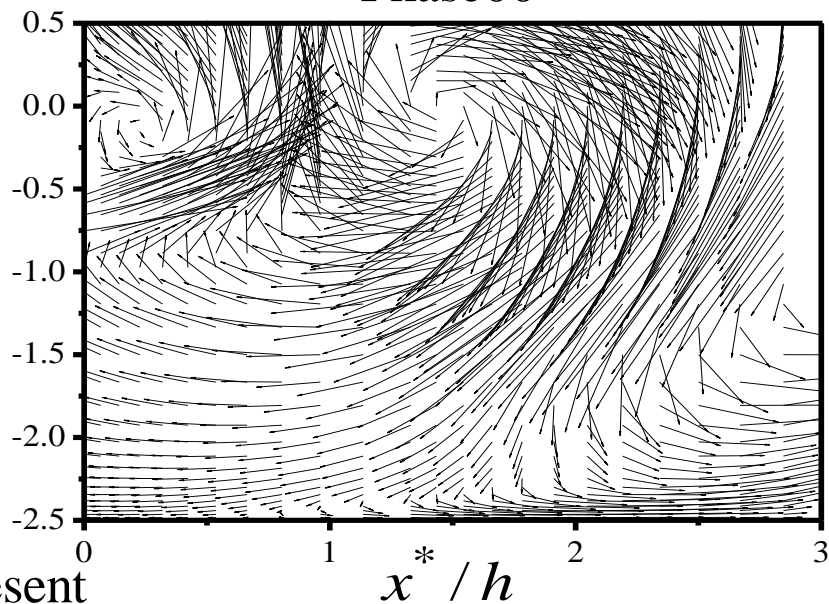
山南 $St = 0.130$

$$St = \frac{f \cdot h}{U_m}$$

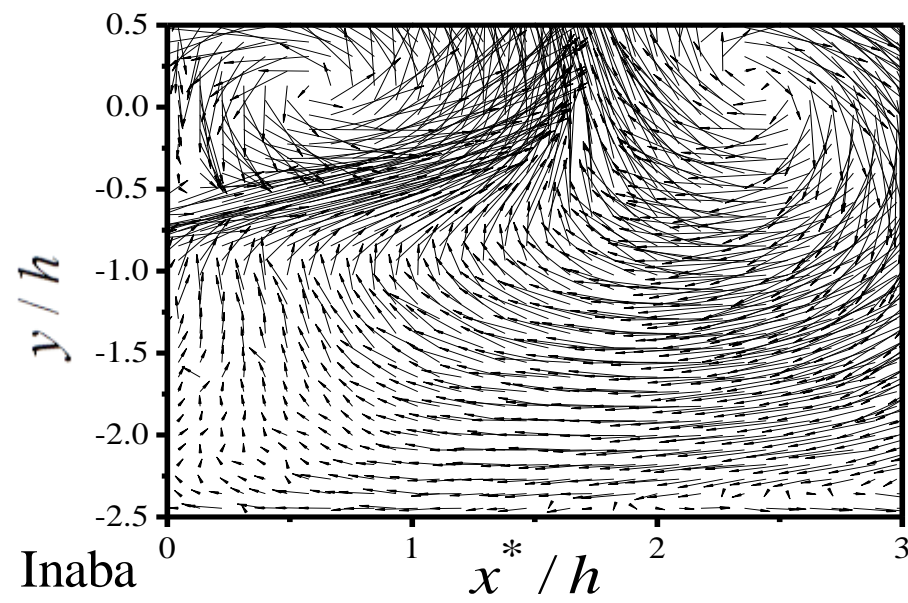
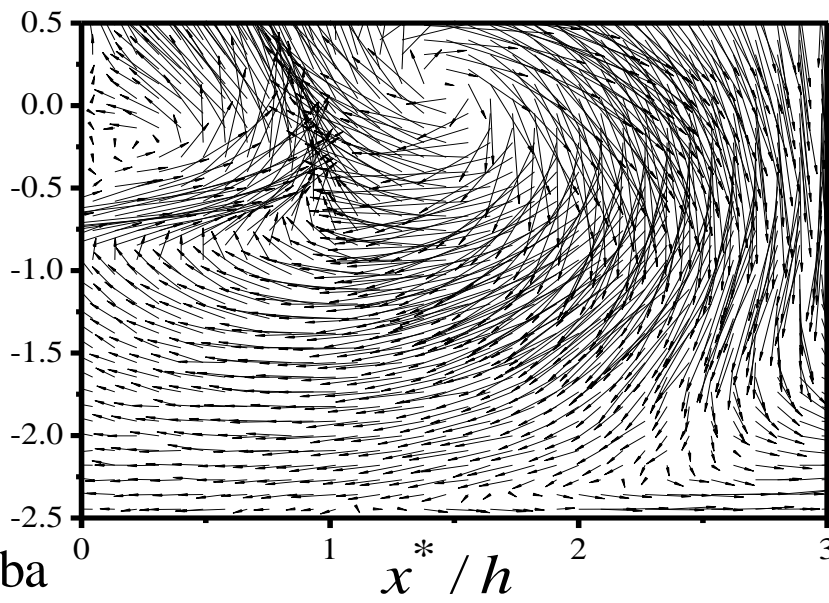
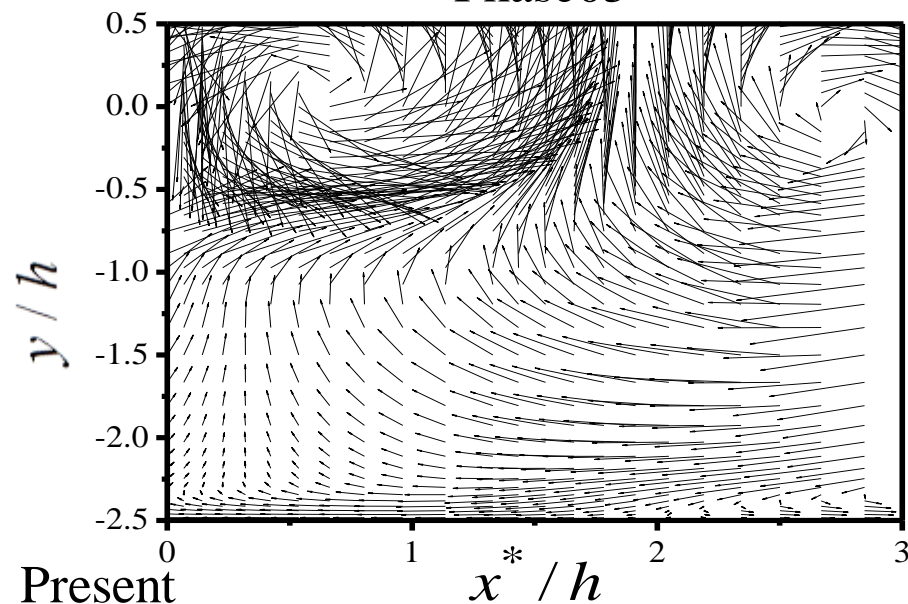


位相平均速度ベクトル $\langle u_p \rangle \cdot \langle v_p \rangle$

Phase00



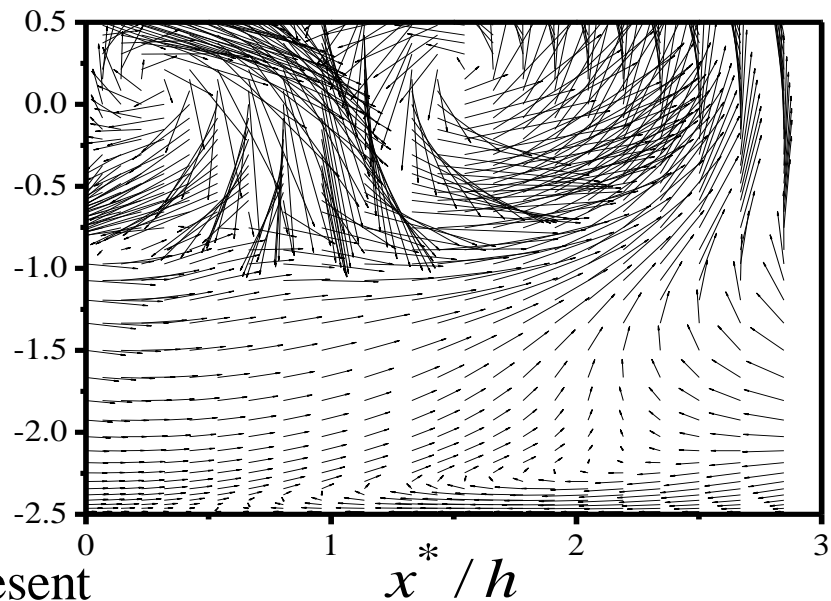
Phase05



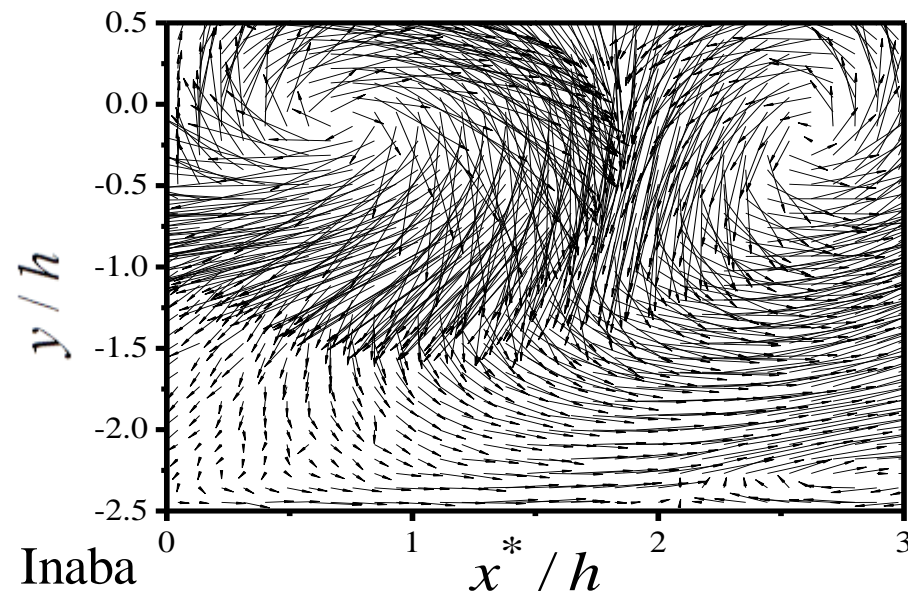
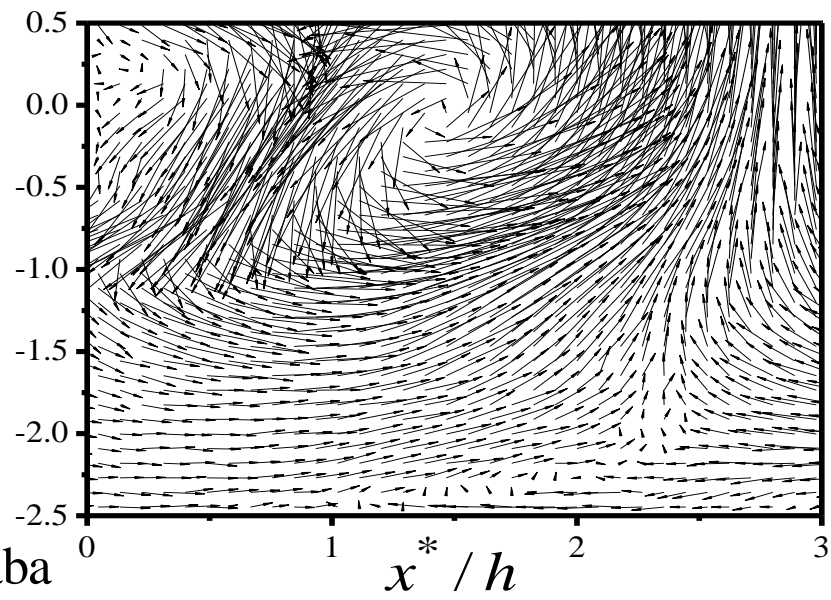
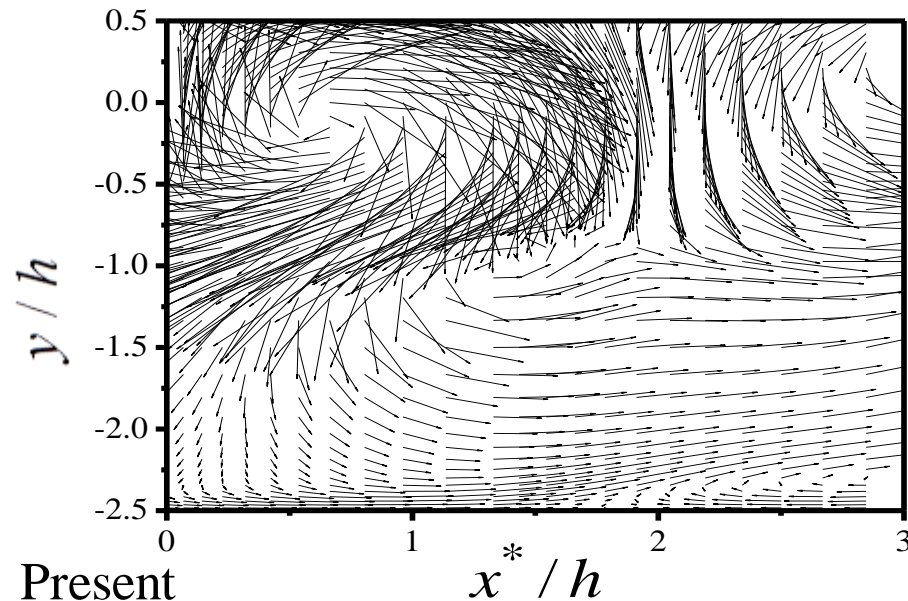


位相平均速度ベクトル $\langle u_p \rangle \cdot \langle v_p \rangle$

Phase10



Phase15





結言

1. 速度場に関して、時間平均流速・時間平均乱れ強さ・位相平均速度ベクトルは角柱近傍で概ね実験と一致する結果が得られた
2. 壁面静圧係数・ヌセルト数分布に関して、本解析は実験とほぼ一致する結果が得られた
3. 角柱挿入により境界層が小さくなる位置で、境界層内の格子数が少なくなり、壁面静圧係数・ヌセルト数が実験より大きくなったことから、格子数を検討する必要がある



Fin