



2010-11-26 JAXA APG公募型研究報告会

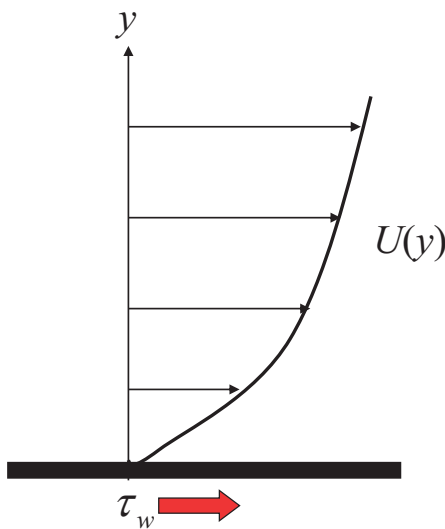
## 高マッハ数壁乱流における摩擦抵抗の低減 に関する基礎的研究

慶應義塾大学理工学部機械工学科  
深淵 康二



### 流体の摩擦抵抗

2/22



- 摩擦抵抗

$$\tau_w = \mu \left. \frac{dU}{dy} \right|_w$$

粘度

- 摩擦抵抗係数

$$C_f = \frac{\tau_w}{(1/2)\rho U^2}$$

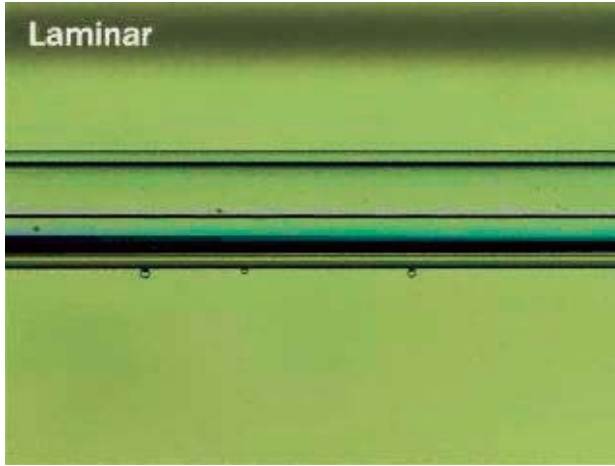
$$f = 4C_f$$



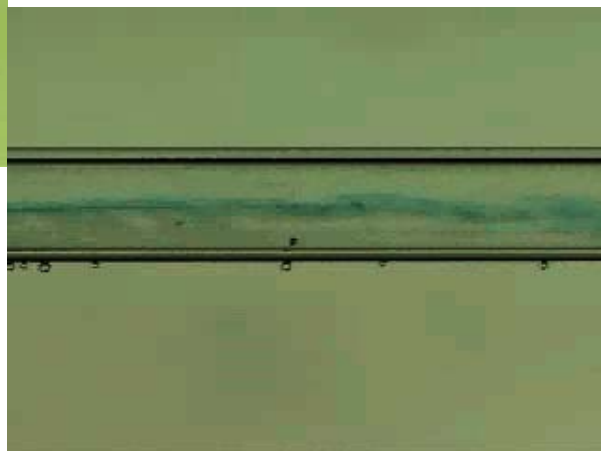
# 層流と乱流



3/22



←層流



乱流→

(Homsy et al., Multimedia Fluid Mechanics)

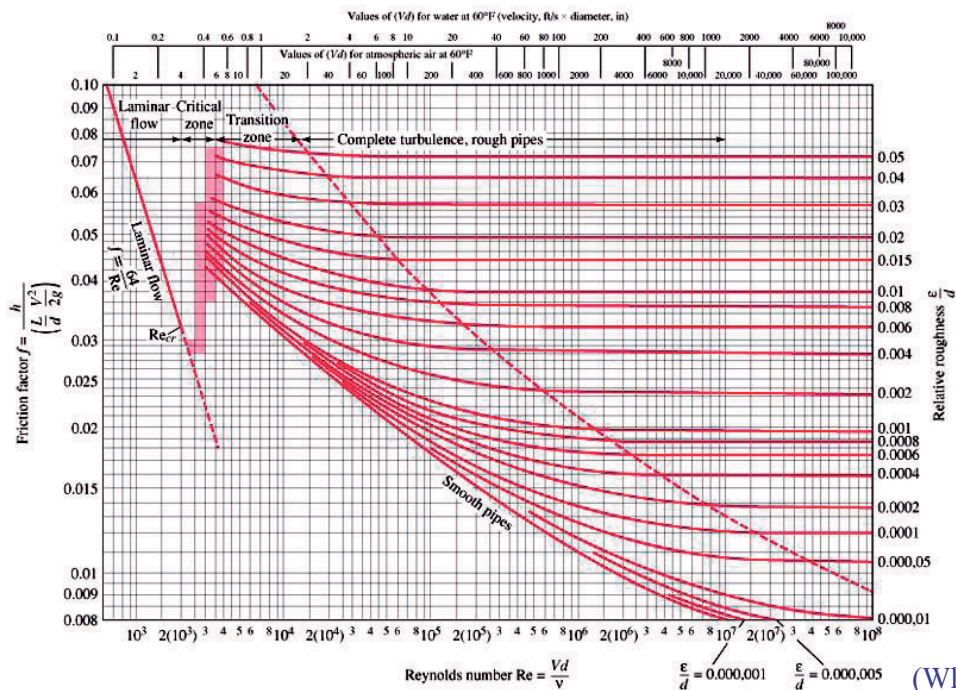


# 層流と乱流の摩擦抵抗



4/22

- 乱流の摩擦抵抗は同じレイノルズ数の層流の摩擦抵抗より格段に大きい！





## 翼に対する摩擦抵抗低減の考え方



5/22

- まず、上流ではできるだけ層流を保つ努力をする
  - 自然層流翼
  - 一様吸込み
  
- 乱流に移ってしまったら乱流の摩擦抵抗を減らす努力をする
  - 乱流摩擦抵抗低減制御

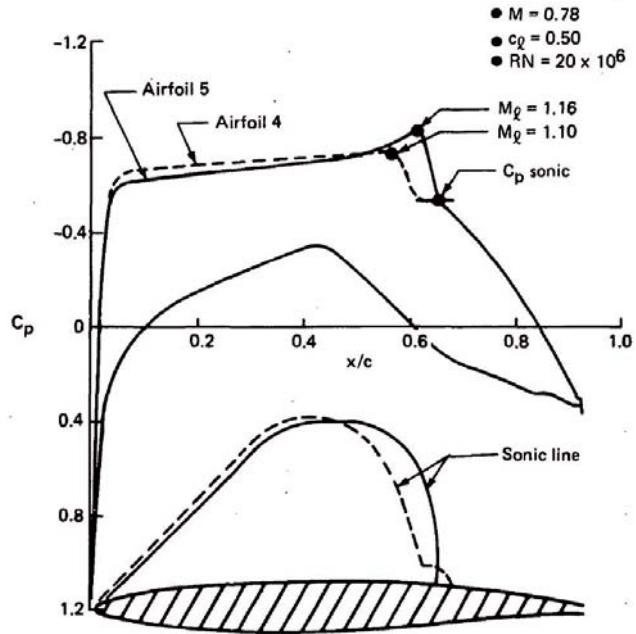


Figure 15. Pressure Distribution Comparison, Airfoils 4 and 5 (NASA Report, 1979)

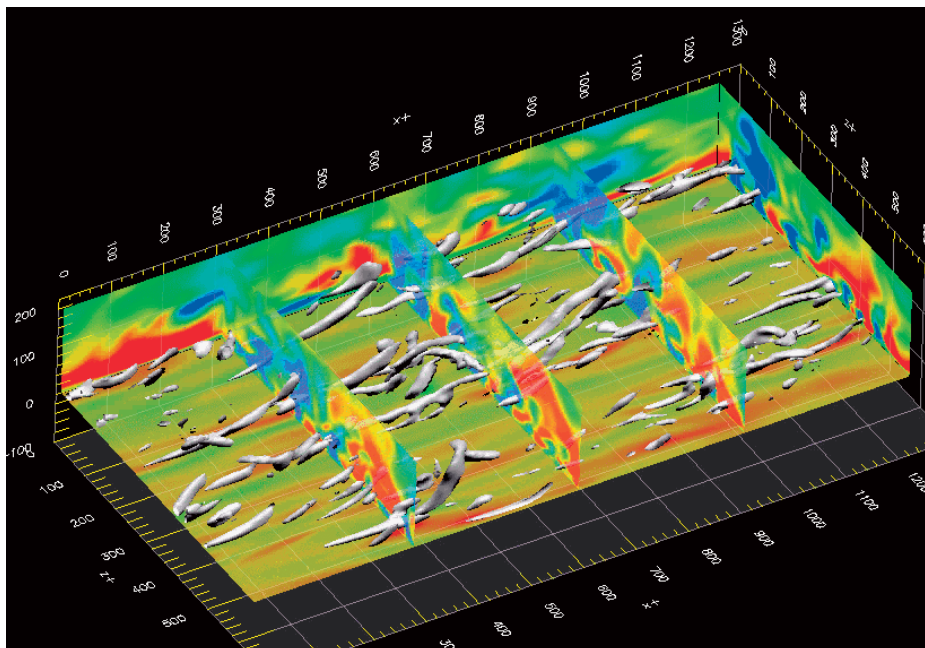


## 乱流摩擦抵抗の原因



6/22

- 無数の縦渦による運動量交換の活発化が原因



(Fukagata et al., 2006)

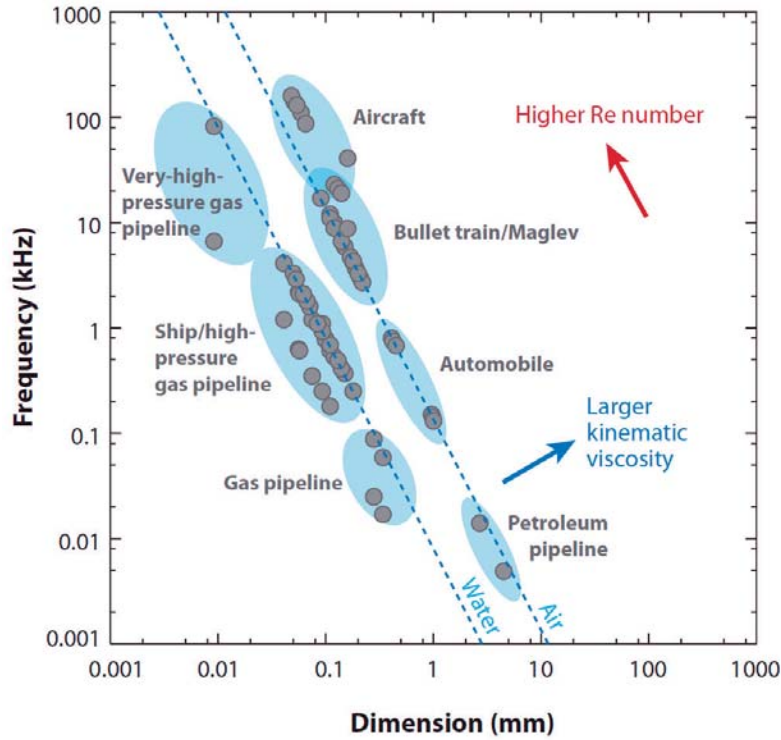


### 縦渦の時空間スケール

(Kasagi, Suzuki, and Fukagata, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **41**, 2009)

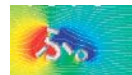


7/22



### 乱流摩擦抵抗の数学的分解: FIK恒等式

(Fukagata, Iwamoto, and Kasagi, *Phys. Fluids* **14**, 2002)



8/22

• **チャネル流**

$$C_f = \underbrace{\frac{12}{Re_b}}_{\text{laminar drag}} + \underbrace{24 \int_0^1 (1-y)(-\overline{u'v'}) dy}_0$$

turbulent contribution (=weighted integral of RSS)

$$Re_b = \frac{2U_b^* \delta^*}{\nu^*}$$

Nondimensionalized by  $2U_b^*$  and  $\delta^*$  (or  $R^*$ )

• **円管流**

$$C_f = \frac{16}{Re_b} + 16 \int_0^1 2r \overline{u_r' u_z'} r dr$$

$$Re_b = \frac{2U_b^* R^*}{\nu^*}$$

• **空間発達境界層**

$$C_f = \frac{4(1-\delta_d)}{Re_\delta} + 4 \int_0^1 (1-y)(-\overline{u'v'}) dy - 2 \int_0^1 (1-y)^2 \left( \frac{\partial \overline{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} \right) dy$$

Nondimensionalized by  $U_\infty^*$  and  $\delta_{99\%}^*$

$$Re_b = \frac{2U_\infty^* \delta_{99\%}^*}{\nu^*}$$

$\delta_d$ : nondimensionalized displacement thickness

Contribution of spatial development



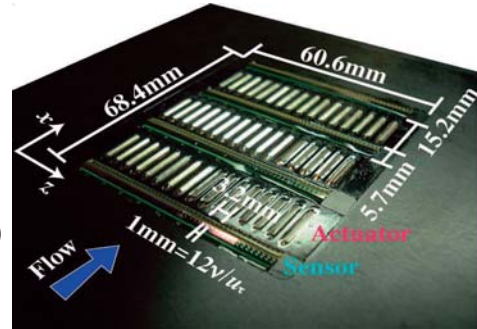


## 乱流のアクティブ制御による摩擦抵抗低減



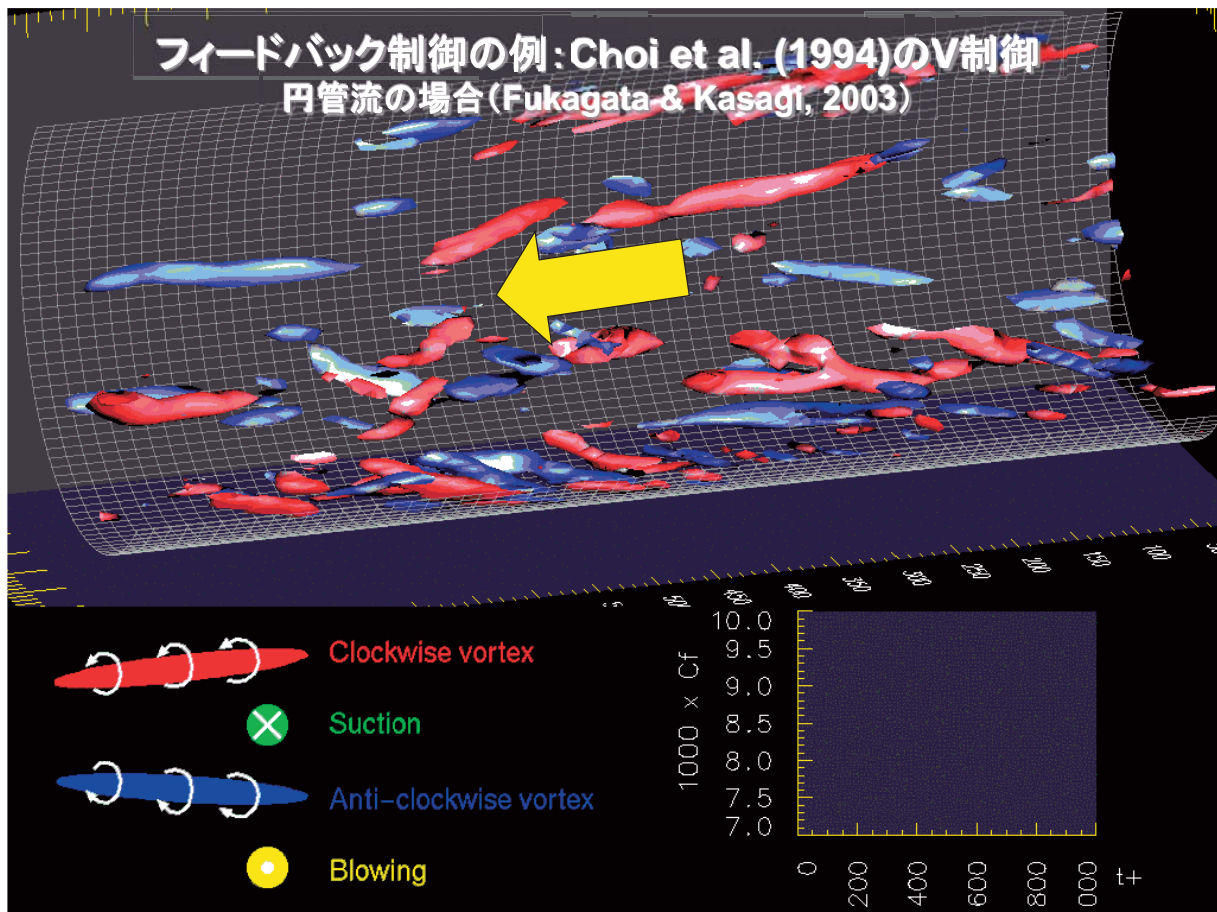
9/22

- 理論／数値シミュレーション
  - フィードバック制御
    - 流れ場の全情報を用いた最適制御では再層流化も(Bewley et al., 2001)
    - 現実的なセンサ情報を用いた制御では12%抵抗低減(Fukagata & Kasagi, 2004)
  - プレデターミンド制御
    - センサを用いず、大きな抵抗低減効果 (Min et al., 2006; Mamori et al., 2010), 再層流化も(Nakanishi et al., 2010)
- 風洞実験
  - フィードバック制御 (吉野ら, 機論, 2006; Yoshino et al., 2008)



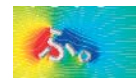
壁乱流のフィードバック制御システム (吉野ら, 機論, 2006) - 約6%抵抗低減

従来の摩擦抵抗低減のアクティブ制御に関する研究は  
非圧縮流れが対象 →高マッハ数での効果は未知

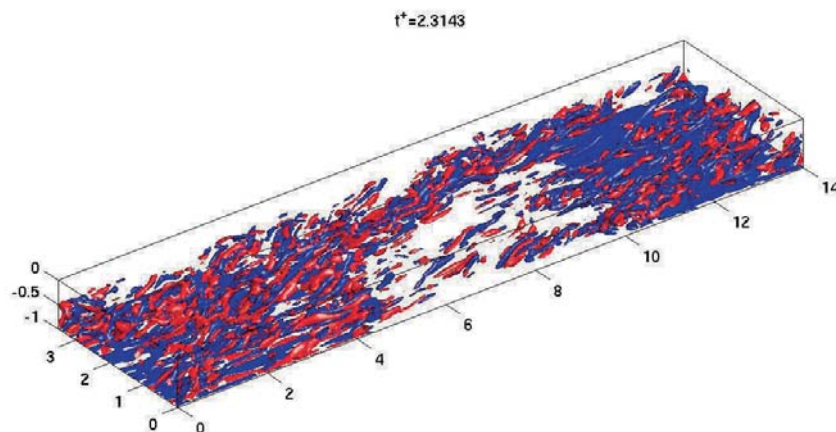




## プレデターミンド制御の例: Min et al. (2006)の進行波制御



11/22



(Mamori, 2009)



## 高マッハ数壁乱流の制御



12/22

- 壁乱流における摩擦抵抗の原因＝壁面近傍のレイノルズせん断応力
  - FIK恒等式(Fukagata et al., 2002) → これを定量的に説明
  - 圧縮性FIK恒等式(Gomez et al., 2009) → マッハ数 $M = 2$ のチャンネル流でも、壁面近傍のレイノルズせん断応力が摩擦抵抗の主因
- 基本的には、非圧縮壁乱流に対して提案された摩擦抵抗低減手法が  $M = 2$ の壁乱流にも適用できそう・・・
- 問題点
  - 実際 $M=2$ の壁乱流に制御を加えた場合に何が起こるか不明
  - 外部流(＝空間発達境界層), さらに逆圧力勾配下での制御効果は非圧縮の場合でも不明
  - 非圧縮壁乱流との違いを利用して、高マッハ数壁乱流により適した制御則を提案できないか？

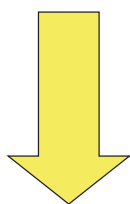


## 研究目的



13/22

- 高マッハ数 ( $M=2$ 程度) の空間発達乱流境界層に対するアクティブ摩擦抵抗低減制御の基盤技術を確立



(JAXA HPより)

- 環境・エネルギー資源に優しい静粛超音速機の実現に寄与



## 研究計画(2010-2012年度)



14/22

### 2010年度

- ① 圧縮性チャンネル流DNS コードの開発および検証
- ② 非圧縮空間発達乱流境界層制御のDNS

### 2011年度

- ① 圧縮性空間発達乱流境界層DNS コードの開発および検証
- ② 非圧縮壁乱流の摩擦抵抗低減のために開発された制御則を適用した  $M=2$  の空間発達乱流境界層のDNSおよび制御効果における相違点の抽出

### 2012年度

高マッハ数壁乱流に適した制御則の開発およびDNSを用いた制御効果の評価



高マッハ数壁乱流における摩擦抵抗低減のための基盤技術の確立へ



## 非圧縮空間発達乱流境界層における一様吹出し ／吸込み制御のDNS

Kametani & Fukagata (EFMC-8, Bad Reichenhall,  
Germany, September 2010)より



### Physical decomposition of skin friction drag



16/22

#### □ FIK identity for spatially developing boundary layer.

FIK identity (Fukagata et al., 2002)

$$c_f = \frac{4(1 - \delta_d^*)}{Re_\delta} + 2 \int_0^1 2(1 - y^*) (-\overline{u^{*'}v^{*'}}) dy^* + 2 \int_0^1 2(1 - y^*) (-U^*V^*) dy^* - \frac{2}{Re_\delta} \int_0^1 (1 - y^*)^2 \left( \frac{\partial U^*U^*}{\partial x^*} + \frac{\partial \overline{u^{*'}u^{*'}}}{\partial x^*} - \frac{1}{Re_\delta} \frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} \right) dy^*$$

$f$ : Spatial average value in z direction

$\delta_d$ : Displacement thickness

\* : Non-dimensionalized by  
99% BL thickness  $\delta_0$  & Streamwise velocity  $U_\infty$





## Direct Numerical Simulation



17/22

### ▶ Governing Equations

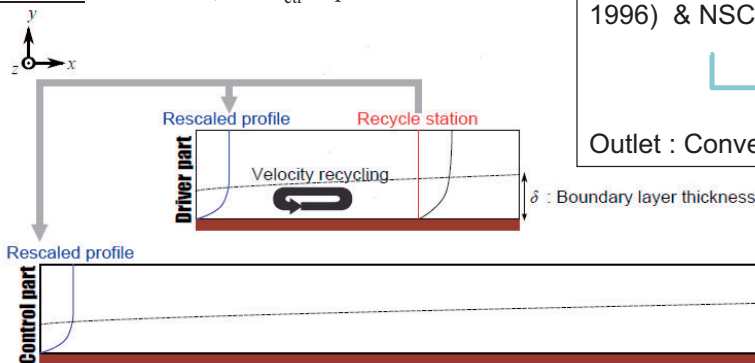
- ▶ Continuity equation & Navier-Stokes equation

### ▶ DNS Code: Based on Fukagata & Kasagi(JCP, 2002), Fukagata et al. (Phys. Fluids, 2006)

- ▶ Creating boundary layer: Rescaling; using Lagrange interpolation (linear), Lund et al. (1996)

B.C. on roof  $u, v, p$  : Neumann &  $w$  : Dirichlet ( $w = 0$ )

B.C. on wall  $u = w = 0, v = V_{ctr}$  &  $p$  : Neumann



for Both parts...

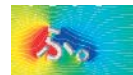
Inlet : Rescaled velocity (Lund et al. 1996) & NSCBC (Miyachi et al., 1994)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + U \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{2Re} \omega_z^2$$

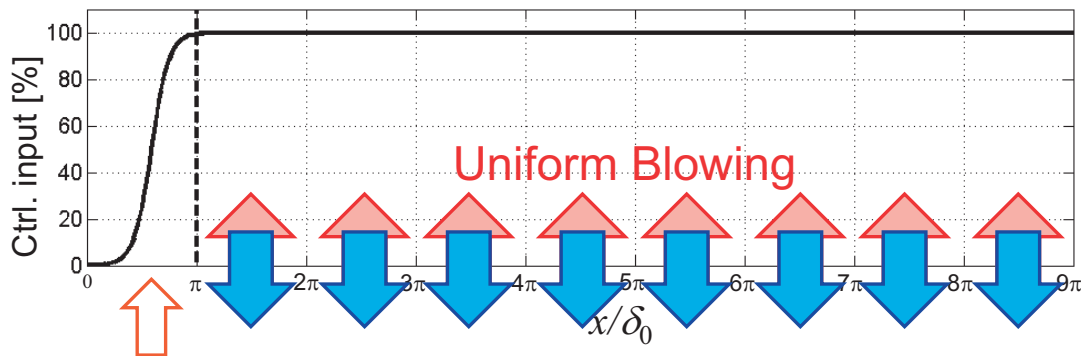
Outlet : Convective outlet & NSCBC



## Uniform blowing & Uniform suction



18/22



Standing zone

### Uniform Suction

#### Parameters

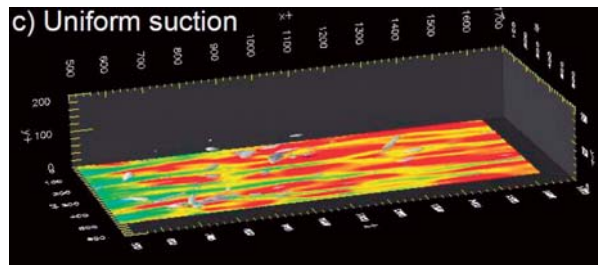
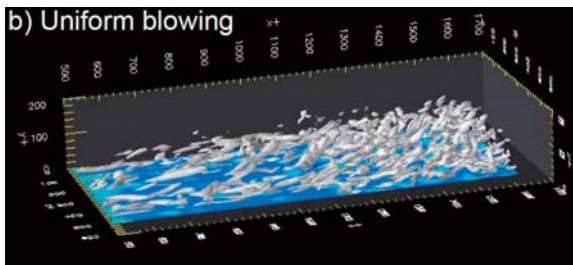
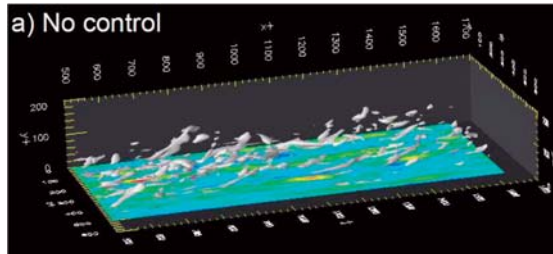
	Uniform blowing	Uniform suction
Amp.	$0.01U_\infty$	$-0.01U_\infty$
	$0.005U_\infty$	$-0.005U_\infty$
	$0.001U_\infty$	$-0.001U_\infty$



# Flow visualization



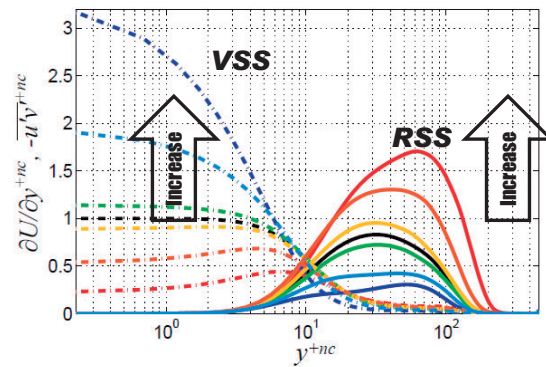
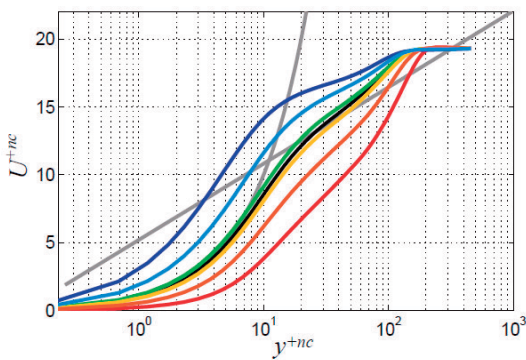
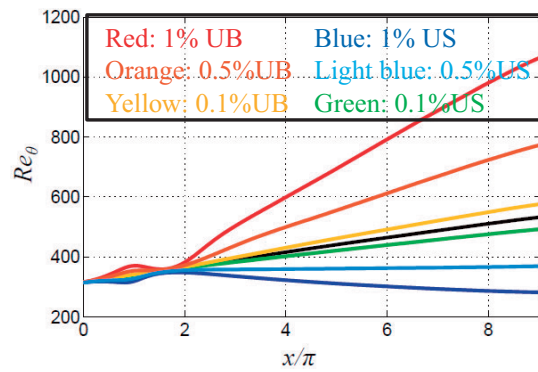
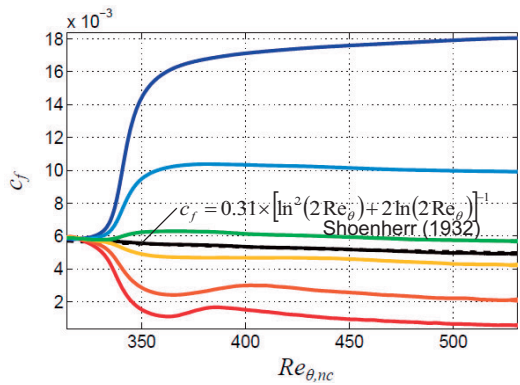
19/22



# Statistics at $Re_{\theta,nc} = 430$



20/22





## Decomposition of $C_f$



21/22

$$\begin{aligned}
 C_f &= \frac{1}{L_{ctr}} \int_0^{L_{ctr}} c_f dx \\
 &= \frac{1}{L_{ctr}} \int_0^{L_{ctr}} c^\delta dx + \frac{1}{L_{ctr}} \int_0^{L_{ctr}} c^T dx + \frac{1}{L_{ctr}} \int_0^{L_{ctr}} c^C dx + \frac{1}{L_{ctr}} \int_0^{L_{ctr}} c^D dx \\
 &= C^\delta + C^T + \underbrace{C^C}_{\text{Mean convection}} + C^D.
 \end{aligned}$$

Uniform blowing

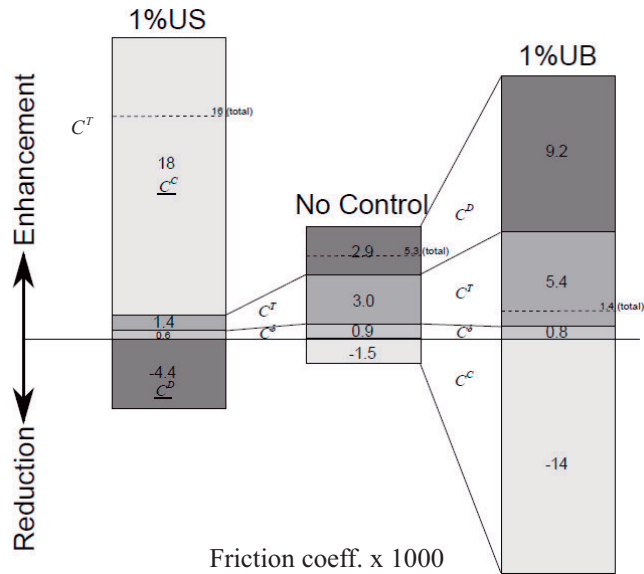
$$C^C < 0$$

Reduction factor

Uniform suction

$$C^C > 0$$

Enhancement factor



## Summary



22/22

□ DNS with uniform blowing (UB) or suction (US) was performed aiming at skin-friction drag reduction.

□ Effect of UB & US on skin friction drag

Control Type	Skin friction drag	Viscous shear stress	Reynolds Shear Stress
Uniform Blowing	↓	↓	↑
Uniform Suction	↑	↑	↓

□ Mechanism of drag reduction or enhancement by using FIK identity.

- Spatial development term,  $c^D$ , and Reynolds shear stress term,  $c^T$  are dominant for skin friction drag. Mean convection term,  $c^C$ , reduces skin friction drag.

- UB: Mean convection term works as larger drag reduction factor.
- US: Mean convection term changes into drag enhancement factor.