



2011-12-09 JAXA APG公募型研究報告会

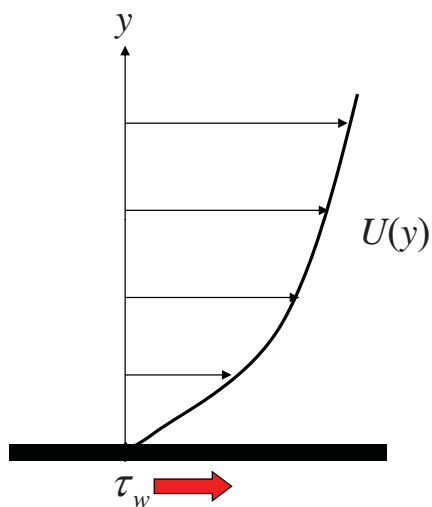
高マッハ数壁乱流における摩擦抵抗の低減 に関する基礎的研究

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

2/20



• 摩擦抵抗

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

粘度

• 摩擦抵抗係数

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

$$f = 4C_f$$

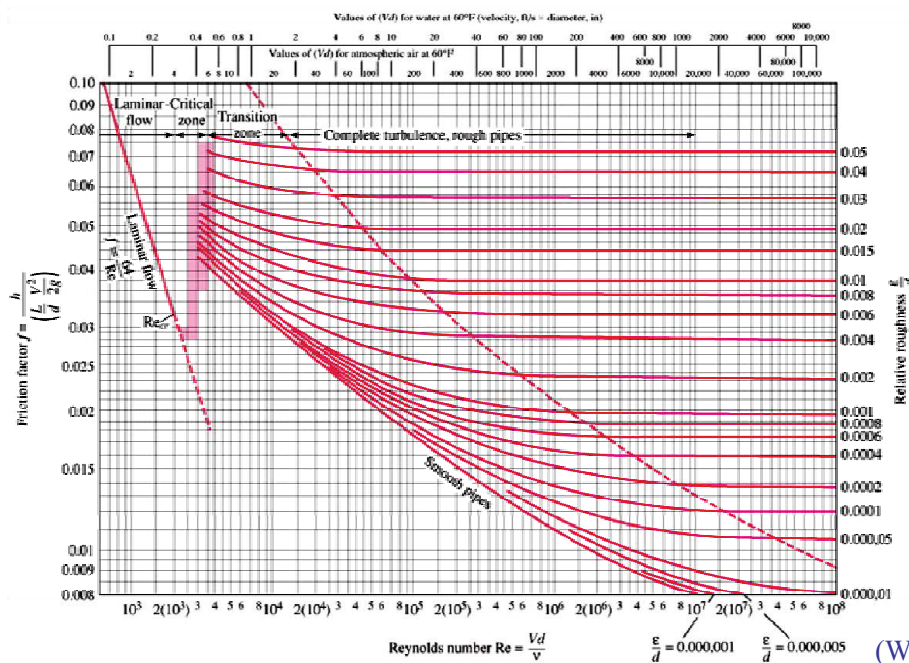


層流と乱流の摩擦抵抗



3/20

- 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！



(White, 2008)

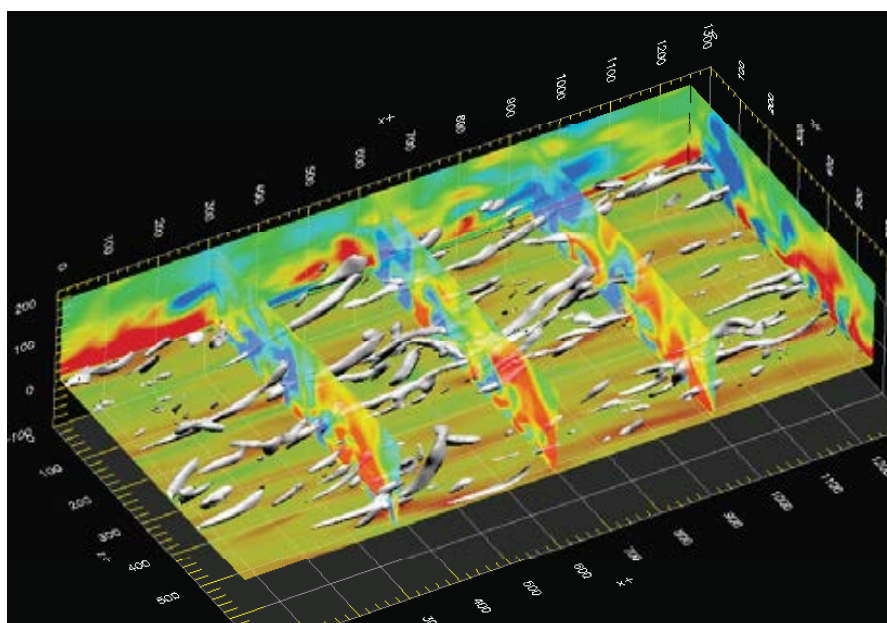


乱流摩擦抵抗の原因



4/20

- 無数の縦渦による運動量交換の活発化が原因



(Fukagata et al., 2006)



翼に対する摩擦抵抗低減の考え方



5/20

- 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
- 乱流に遷移し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

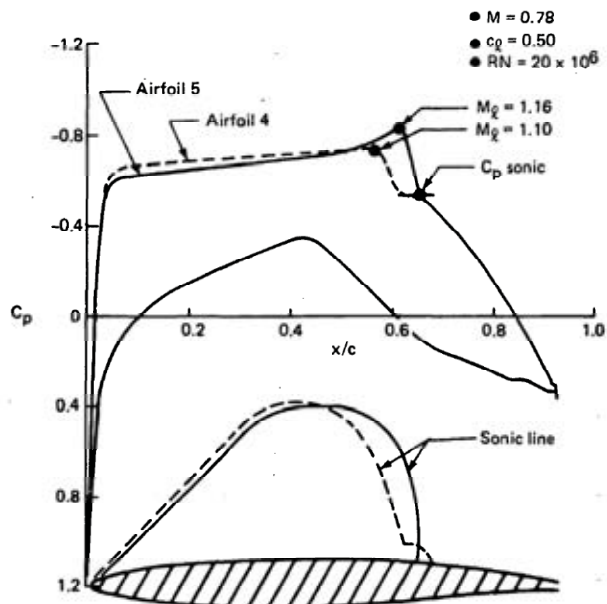


Figure 15. Pressure Distribution Comparison, Airfoils 4 and 5
(NASA Report, 1979)

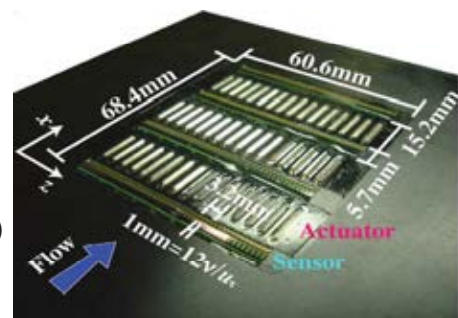


乱流のアクティブ制御による摩擦抵抗低減



6/20

- 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., 2011)
- 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



高マッハ数壁乱流の制御



7/20

- 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 $M = 2$ 程度の壁乱流にも適用できそう・・・

- 問題点
 - 実際、圧縮性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？

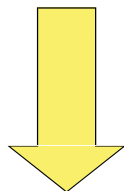


研究目的



8/20

- **高マッハ数**($1 < M < 3$)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)



9/20

2010年度

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

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

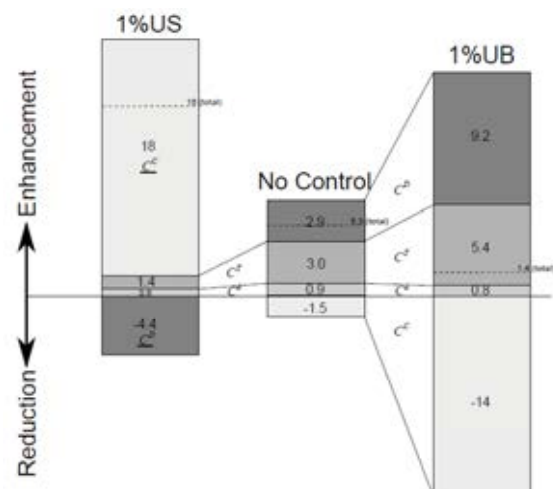
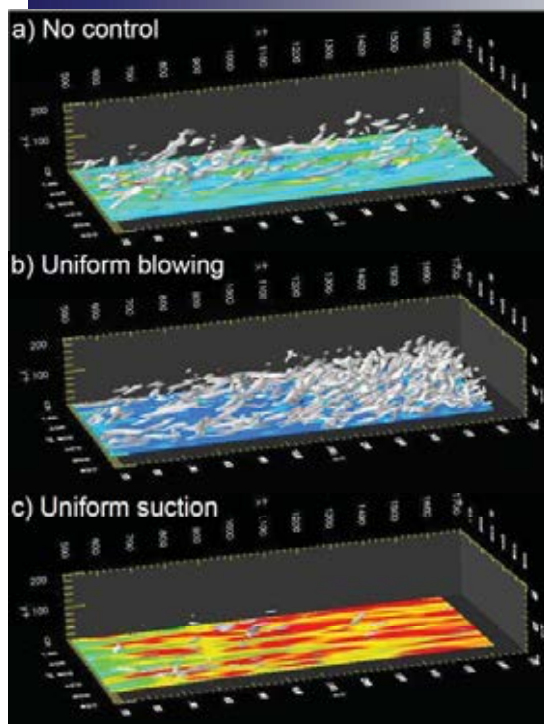


2010年度①非圧縮空間発達乱流境界層制御のDNS

(Kametani & Fukagata, *J. Fluid Mech.* **681** (2011))



10/20



FIK恒等式(Fukagata et al., *Phys. Fluids* **14** (2002))を用いた摩擦抵抗への寄与の分解



2010年度②圧縮性チャネル流DNS コードの開発および検証

(中村・亀谷・深淵, 機械学会年次大会2011)

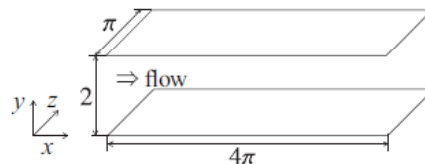


11/20

支配方程式

➤ 連続の式 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}$$



➤ N-S eq. :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = - \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{1}{\gamma Ma^2} \frac{\partial \rho T}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$

➤ Energy eq. : $\frac{\partial \rho T}{\partial t} = - \frac{\partial \rho T u_i}{\partial x_i} - (\gamma - 1) \rho T \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\gamma}{Pr Re} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\gamma(\gamma - 1) Ma^2}{Re} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

➤ 粘性応力 :

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right]$$

➤ 外力項 :

$$f_i = - \frac{[< \tau_{12} >_{x_1-x_3|_{x_2=2}} - < \tau_{12} >_{x_1-x_3|_{x_2=0}}] \delta_{i1}}{2Re}$$



2010年度②圧縮性チャネル流DNS コードの開発および検証

計算条件



12/20

計算領域および無次元パラメータ

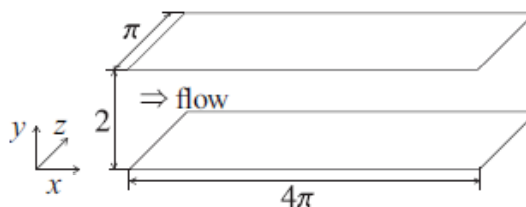
$$Re = \rho_b U_b \delta / \mu_w$$

$$Re_\tau = \rho_w u_\tau \delta / \mu_w$$

$$Ma = U_b / \sqrt{\gamma R T_w}$$

$$Pr = c_p \mu_w / \kappa_w$$

$$N_x \times N_y \times N_z = 256 \times 96 \times 128$$



Ma	Re	Re _τ	Pr	Δx ⁺ , Δy ⁺ _{min} , Δz ⁺
1.5	3000	214	0.72	9.3, 1.1, 5.2
3.0	4480	408	0.72	21, 2.2, 10



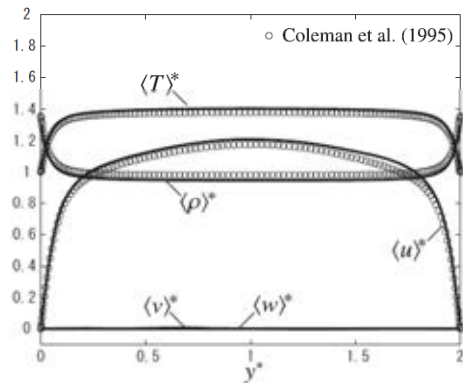
2010年度②圧縮性チャネル流DNSコードの開発および検証

非制御流での検証

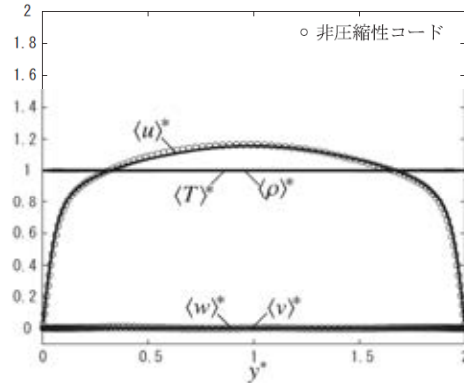


13/20

Ma=1.5

(Coleman et al., *J. Fluid Mech.*, 1995)

Ma=0.3

非圧縮コード(Fukagata et al., *Phys. Fluids*, 2006)

Ma=1.5ではColeman et al. (1995)のDNS結果と一致.

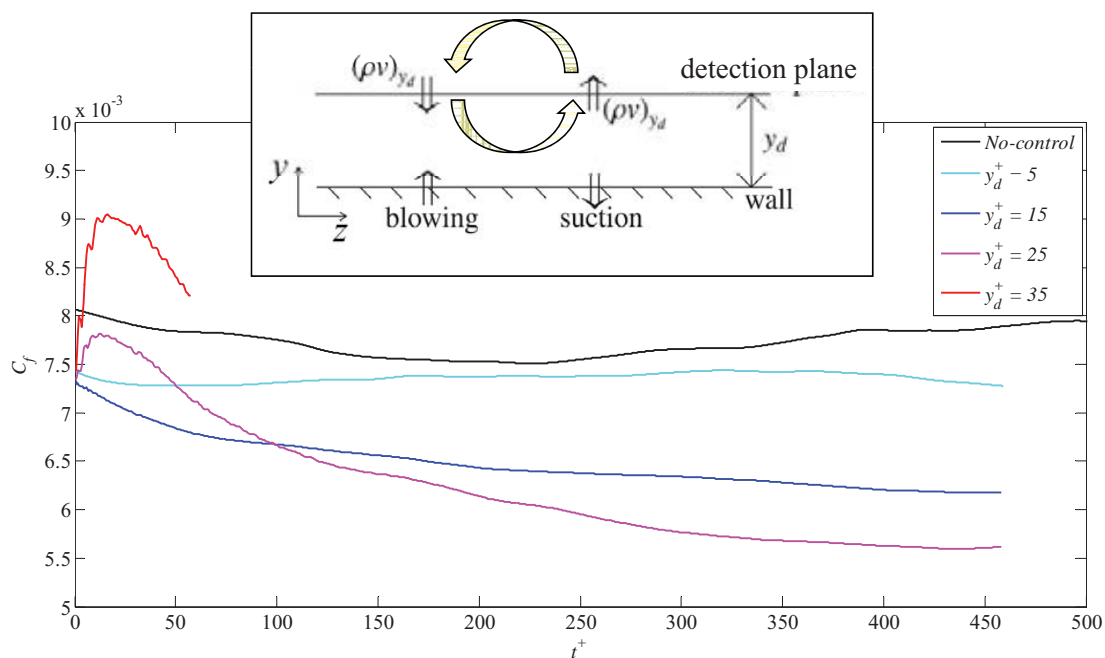
Ma=0.3では非圧縮DNSの結果と一致.



2010年度②圧縮性チャネル流DNSコードの開発および検証

V制御(Choi et al., *J. Fluid Mech.* (1994))の効果

14/20



摩擦抵抗係数の時間変化 (Ma = 1.5)



2010年度②圧縮性チャネル流DNS コードの開発および検証 V制御による摩擦抵抗低減効果の検証



15/20

FIK恒等式 (Fukagata et al., *Phys. Fluids* (2002))

$$C_f = \underbrace{\frac{6}{Re}}_{\text{laminar}} + \underbrace{6 \int_0^1 (1-y^*) (-\overline{u^{*'} v^{*'}}) dy^*}_{\text{turbulent contribution}}$$

圧縮性平行平板間乱流に対するFIK恒等式 (Gomez et al., *Phys. Rev. E* (2009))

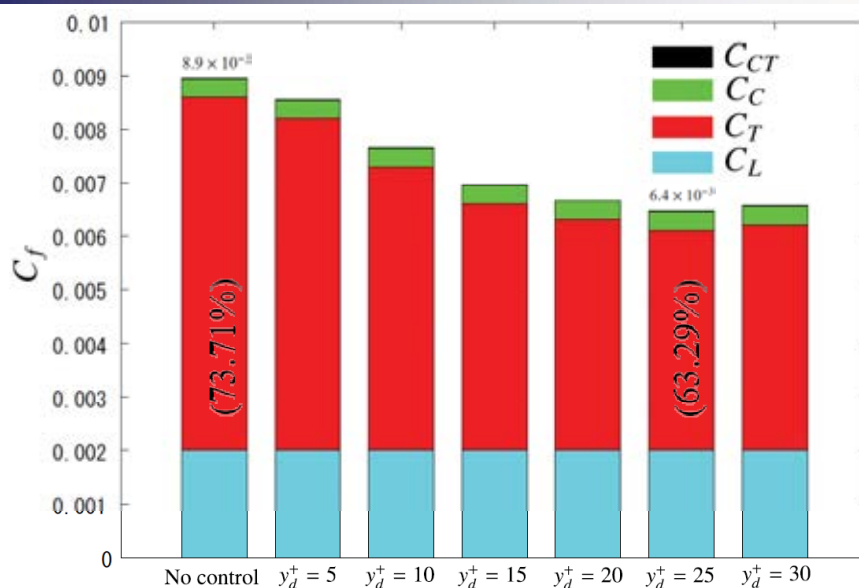
$$C_f = \underbrace{\frac{6}{Re}}_{C_L} + \underbrace{6 \int_0^1 (1-y^*) \langle \rho^* \rangle \{-u^{*''} v^{*''}\} dy^*}_{C_T} + \underbrace{\frac{6}{Re} \int_0^1 (1-y^*) \langle \tilde{\mu}^* \rangle \frac{\partial \langle u^* \rangle}{\partial y^*} dy^*}_{C_C} + \underbrace{\frac{6}{Re} \int_0^1 (1-y^*) \left\langle \mu^{*'} \left(\frac{\partial u^{*'}}{\partial y^*} + \frac{\partial v^{*'}}{\partial x^*} \right) \right\rangle dy^*}_{C_{CT}}$$



2010年度②圧縮性チャネル流DNS コードの開発および検証 FIK恒等式における各項の寄与 (Ma = 1.5)



16/20



C_L : 層流寄与, C_T : 乱流寄与, C_C : 圧縮性寄与, C_{CT} : 乱流・圧縮性相互作用



2010年度②圧縮性チャネル流DNSコードの開発および検証

まとめ



17/20

圧縮性チャネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)コードを開発

✓ 非制御流での検証

- ・ $Ma = 0.3 - 3.0$ で先行DNSと良い一致

✓ V制御(Choi et al. (1994))を加えた場合のDNS

- ・ 非圧縮チャネル乱流と同程度の抵抗低減効果(~30%)
- ・ FIK 恒等式 → 非圧縮の場合と同様、「レイノルズ応力寄与項」の減少が支配的
- ・ 最適検知面位置: $y_d^+ = 15$ (非圧縮)
 $y_d^+ = 25$ ($Ma = 1.5$), $y_d^+ = 35$ ($Ma = 3.0$)
- ・ ...非制御時の乱れのピーク位置の違いによる



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(Kametani & Fukagata, ETMM-9, submitted)



18/20

- ・ 非圧縮性境界層DNSコード(Kametani & Fukagata, *J. Fluid Mech.* (2011))
 + 圧縮性チャネル流DNSコード(中村・亀谷・深淵, 機械学会年次大会 2011)のソルバ → 5次精度WENOに
 + スポンジレイヤー(出口境界による圧力波反射の回避)

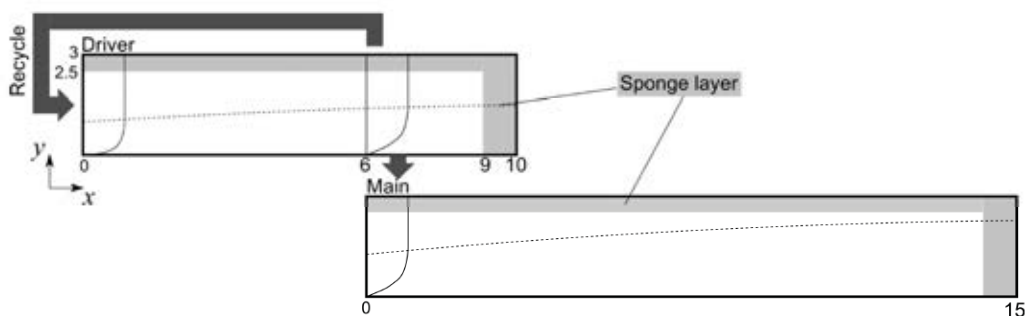


Figure 1. Computational domain



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 非制御流での検証(途中経過)



19/20

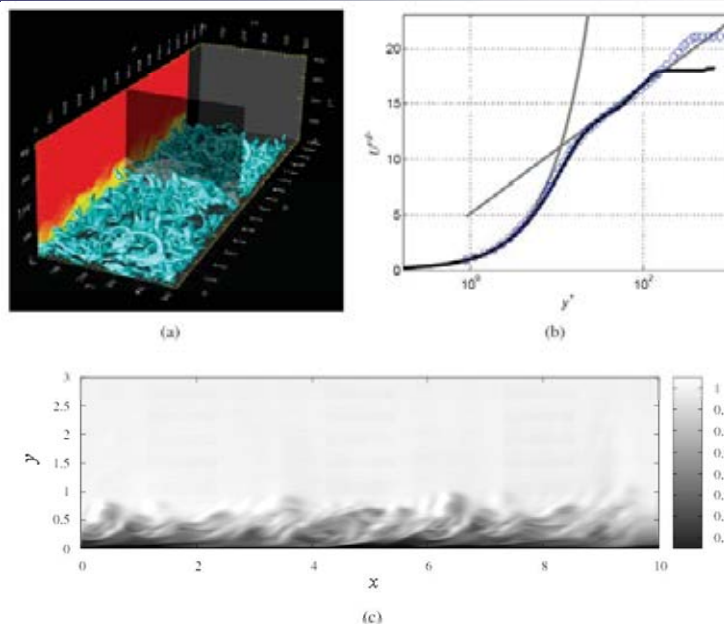


Figure 2. Preliminary results at $M_\infty = 1$. (a) A flow field visualized with eddies, density and streamwise velocity. (b) A mean streamwise velocity: solid black line, the present simulation ($Re_\tau \approx 200$); \circ , Lagha et al.⁶ ($Re_\tau \approx 300$). (c) A distribution of density.



今後の予定



20/20

2011年度

- ①圧縮性空間発達乱流境界層DNSコードの検証(続き)
- 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 $M = 3$ 程度まで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

- ①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
- ②追加:一様吹出しを用いた摩擦抵抗低減の風洞実験による検証(少なくとも非圧縮で)