



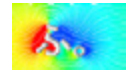
2012-12-07 JAXA APG公募型研究報告会

## 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

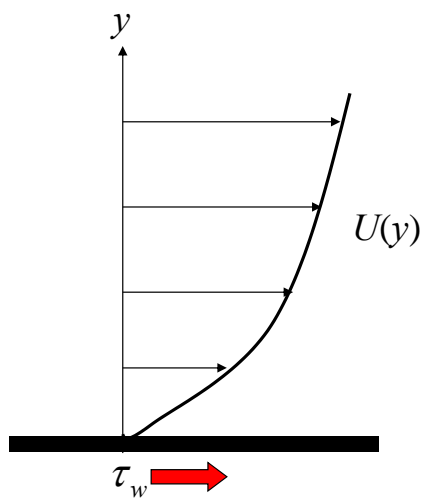
慶應義塾大学理工学部機械工学科  
○深淵 康二, 亀谷 幸憲



### 流体の摩擦抵抗



2/14



- 摩擦抵抗

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

粘度

- 摩擦抵抗係数

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

$$f = 4C_f$$

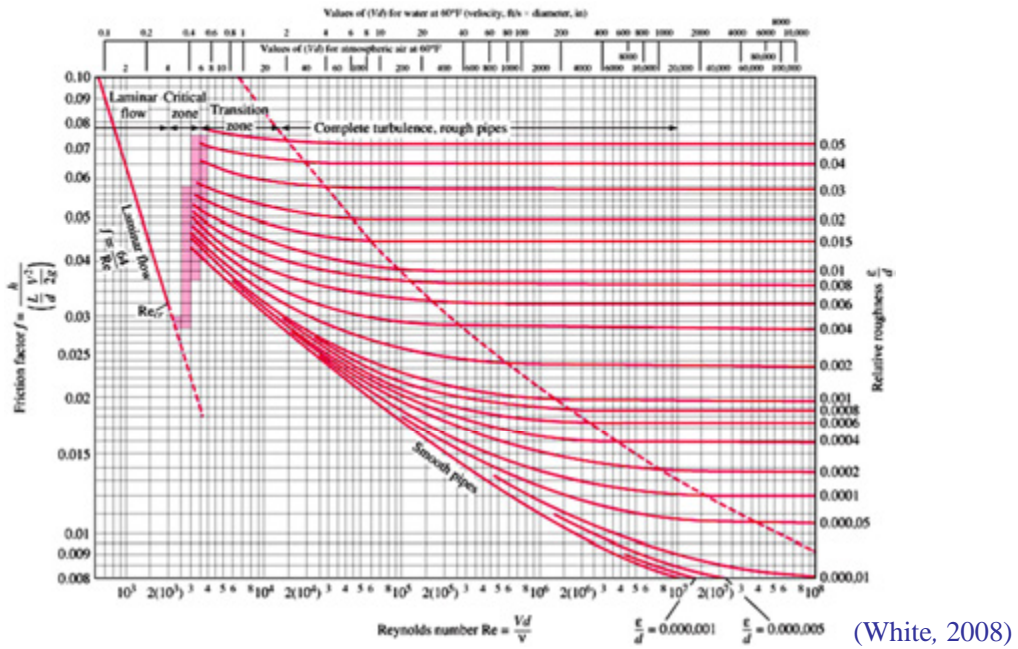


## 層流と乱流の摩擦抵抗

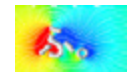


3/14

- 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！

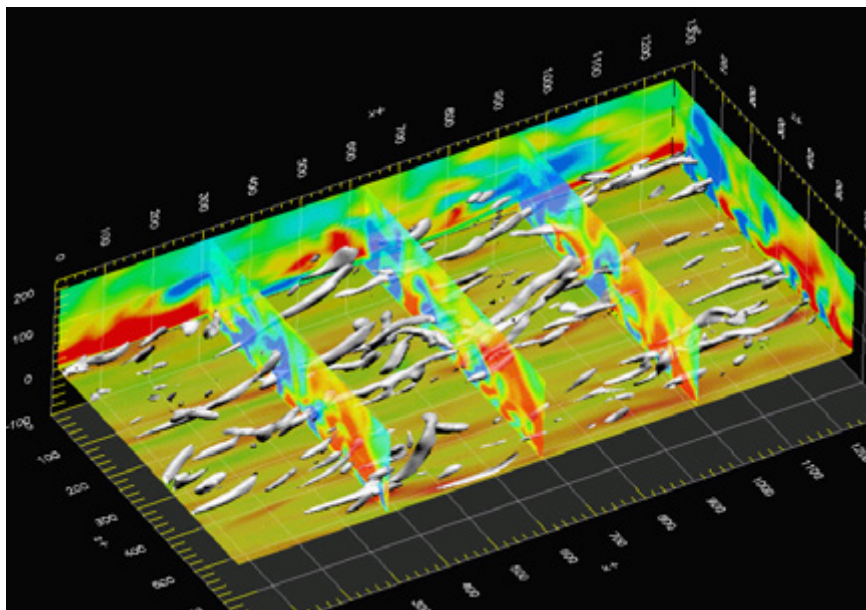


## 乱流摩擦抵抗の原因



4/14

- 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



5/14

- 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  
(非圧縮性壁乱流では比較的よく研究されているが、圧縮性壁乱流での効果は不明)

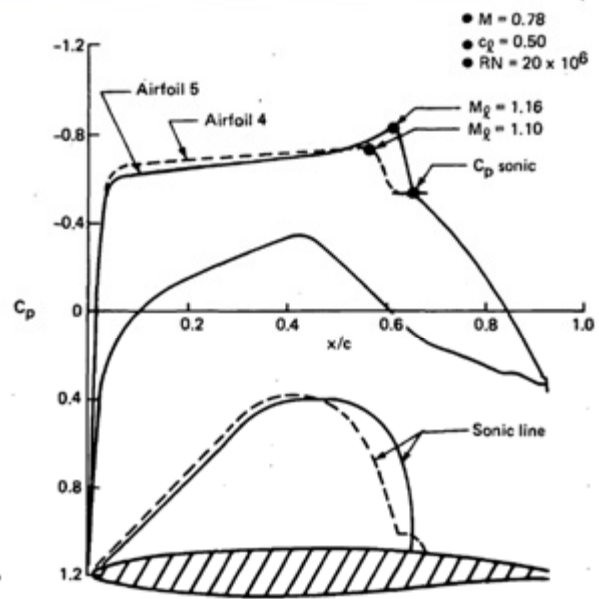
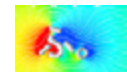


Figure 15. Pressure Distribution Comparison, Airfoils 4 and 5  
(NASA Report, 1979)

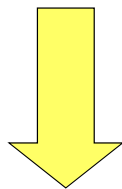


## 研究目的



6/14

- **高マッハ数 ( $M \approx 1.5$ ) 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)



7/14

### 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  $M = 1.5$  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

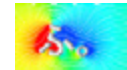
高マッハ数壁乱流に適した制御則の開発およびDNSを用いた制御効果の評価



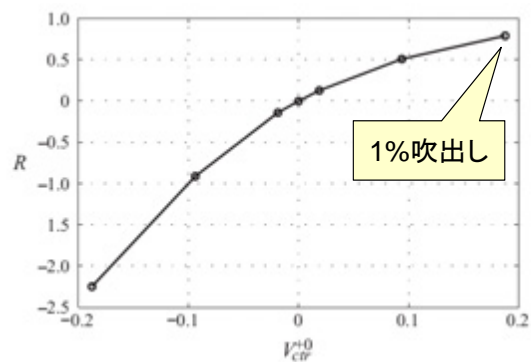
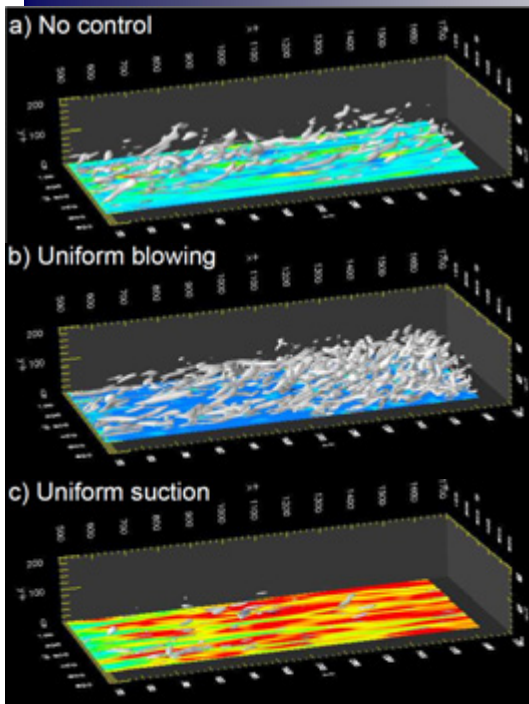
高マッハ数壁乱流における摩擦抵抗低減のための基盤技術の確立へ



## 一様吹出し/吸込みを用いた非圧縮空間発達乱流境界層制御のDNS (Kametani & Fukagata, *J. Fluid Mech.* 681 (2011))



8/14



- 主流の1%の一様吹出しにより摩擦抵抗約75%低減
- 理想的に給気できれば正味の必要動力も約75%低減

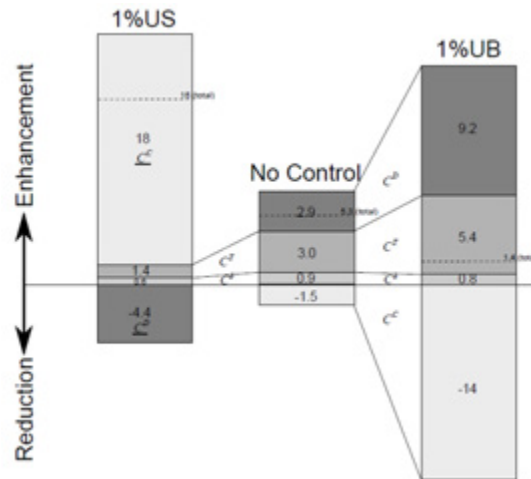


一様吹出し／吸込みを用いた**非圧縮**空間発達乱流境界層制御  
のDNS (Kametani & Fukagata, *J. Fluid Mech.* **681** (2011))

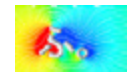


9/14

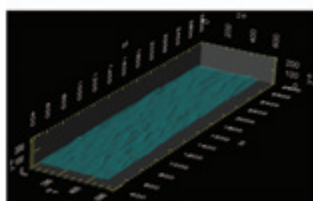
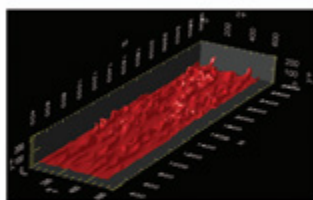
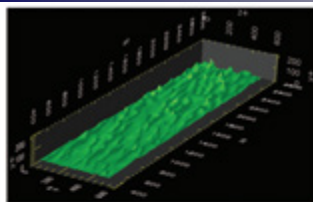
- **FIK恒等式**(Fukagata et al., *Phys. Fluids* **14** (2002))を用いた摩擦抵抗への寄与の分解
  - 一様吹出しの場合
    - 乱れの寄与は増加
    - 空間発達の寄与も増加
    - 一様吹出しによる垂直方向平均移流の寄与(負の寄与)の増加分が卓越
- 結果として摩擦が減少



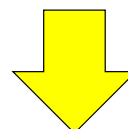
一様加熱／冷却を用いた**非圧縮**空間発達乱流境界層制御DNS  
(Kametani & Fukagata, *J. Turbulence* **13** (2012))



10/14



- 一様吹出しの代わりに一様加熱／冷却(=浮力)が使えないか？
- $Ri = -0.1$ の一様冷却により,
  - 摩擦抵抗約**70%**低減
  - ただし正味の必要動力は**激増**！



一様吹出し: ○  
一様冷却: ×

Figure 4. Iso-surfaces of temperature  $\theta = 0.7$ : (a) no control, (b)  $Ri = 0.1$ , (c)  $Ri = -0.1$ .

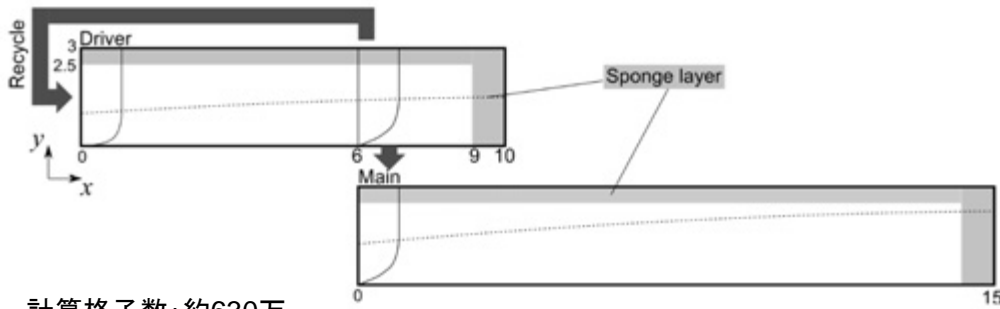


## 圧縮性空間発達乱流境界層DNSコードの開発 (Kametani & Fukagata, Proc. ETMM-9 (2012))



11/14

- 非圧縮性境界層DNSコード(Kametani & Fukagata, *J. Fluid Mech.* (2011))  
+ 圧縮性チャンネル流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)

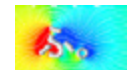


計算格子数: 約630万

Figure 1. Computational domain

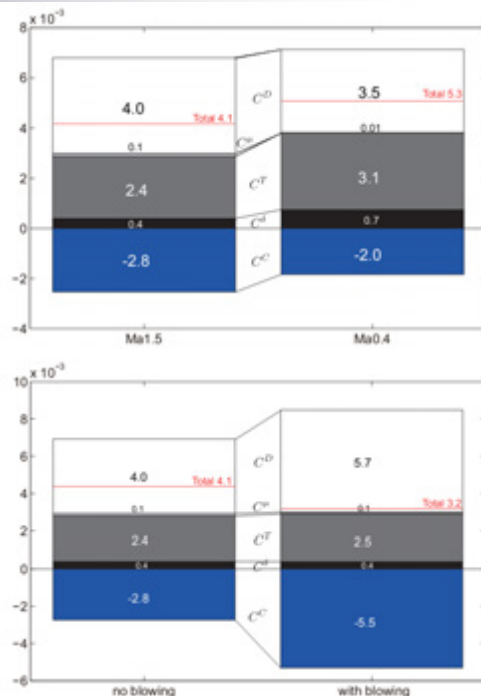


## 一様吹出し/吸込みを用いた圧縮性空間発達乱流境界層制御のDNS (Kametani & Fukagata, Proc. ETMM-9 (2012))



12/14

- 非制御(固体壁)時
  - FIK恒等式を用いた摩擦に対する寄与の分解によると、**圧縮性の効果は比較的小さい**
- 一様吹出しを施した場合
  - 主流の0.1%の吹出しで約**20%の摩擦抵抗低減**(非圧縮の場合と同程度)
  - 摩擦抵抗低減の機構も非圧縮の場合と同様(+壁面近傍密度変化の効果)





## 予備風洞実験(非圧縮)@JAXA低乱風洞

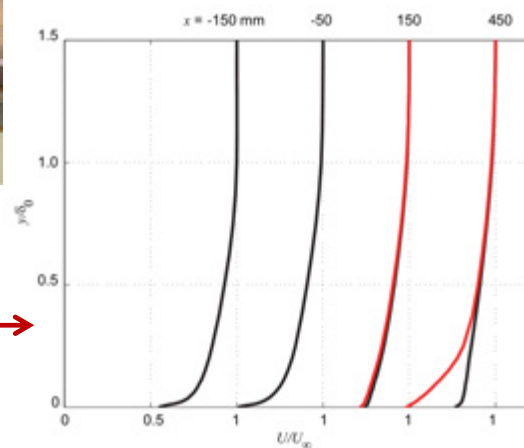


13/14

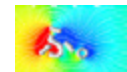


- 主流9 m/s,  $Re_\delta = 24,000$
- 主流の2%で一様吹出し
- X型熱線で計測

- 吹出しによる壁面速度勾配の大幅減少を確認
- 定量的評価は今後の課題



## まとめ



14/14

### 空間発達乱流境界層に一様吹出しを適用することによる摩擦抵抗低減の試み

- 直接数値シミュレーション(DNS)
  - 非圧縮性 ( $Re_\delta = 3,000$ )
    - 主流の0.1%の吹出しで約15%の摩擦抵抗低減
    - 主流の1%の吹出しだと約75%の摩擦抵抗低減
    - FIK恒等式を用いた抵抗低減メカニズムの詳細な分析
  - 圧縮性 ( $Ma = 1.5$ ,  $Re_\delta = 3,000$ )
    - 主流の0.1%の吹出しで約20%の摩擦抵抗低減
    - メカニズム: 基本的には非圧縮の場合と同様 + 壁面近傍の密度変化による効果
- 予備風洞実験(非圧縮,  $Re_\delta = 24,000$ )
  - 定性的にDNSと同様の効果を確認