

# 乱流の世界最大規模直接数値計算と モデリングによる応用計算 (乱流コンソーシアム)

- LESを利用した応用研究： 荒川(東京大学)
- DNSによる基礎研究： 金田(名古屋大学)  
河村(東京理科大学)
- 日本流体力学会の研究会として活動を開始

# 乱流コンソーシアム(応用班)

## 研究の目的

- 地球環境の話題性の高い風車研究への応用
- 応用計算で使用できるレベルの高精度大規模流体・圧縮性・騒音数値シミュレーション
- 翼端付近で発生する騒音の物理現象を明確にし、騒音の低減に向けた設計方法を提案
- 地球シミュレータを用いた世界最大規模の風車全体のLES (Large-Eddy Simulation) ・騒音直接計算
- 環境問題に関連深い現象のシミュレーションへ応用

荒川らの提言などによって実現した東京臨海風力発電所  
(J-POWER提供)



# 風車の空力騒音



## 高周波数騒音

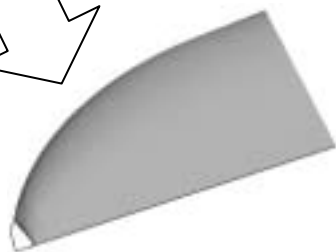
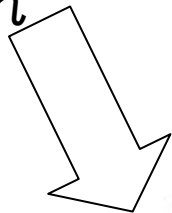
後縁の騒音  
翼端渦騒音



## 低周波数騒音

ブレードとタワーとの干渉

流れ

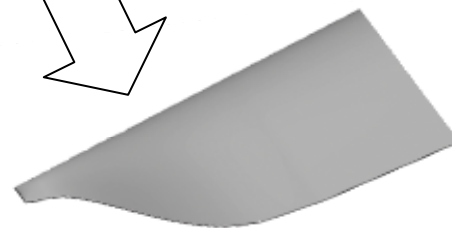
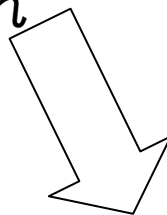


現在の翼端 Actual

WINDMELIII  
(提供:産業技術総合研究所)

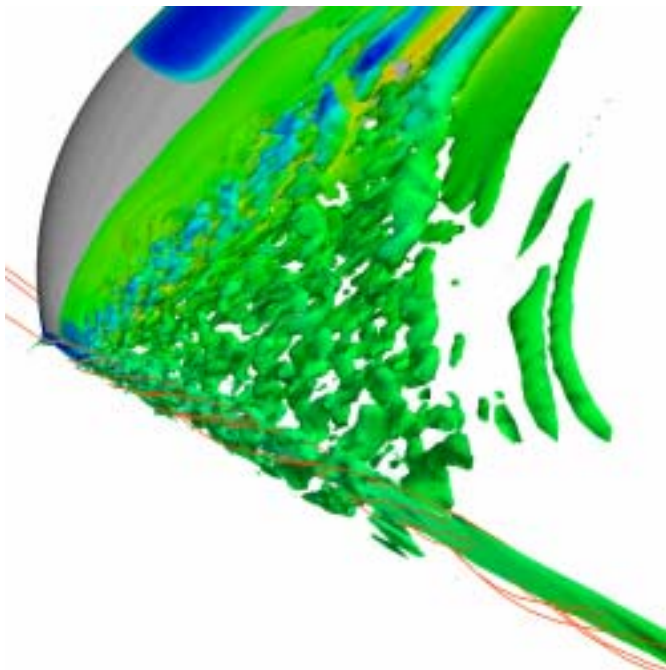
風車の翼端形状

流れ

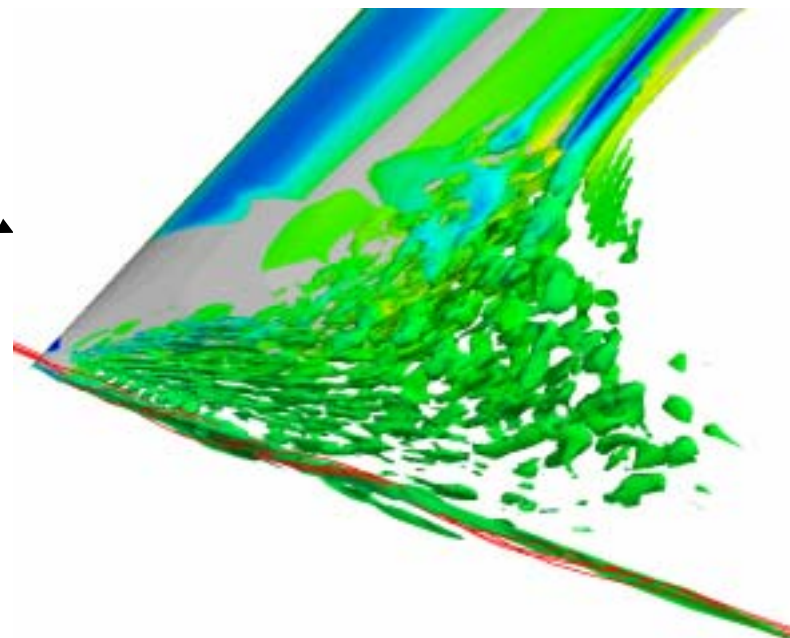


Ogee (S型) 翼端

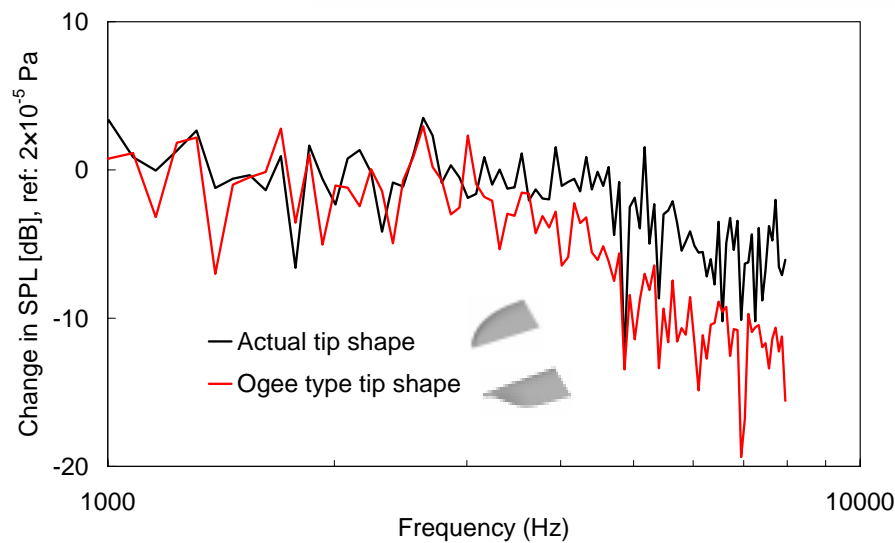
Actual



Ogee (S型) 翼端

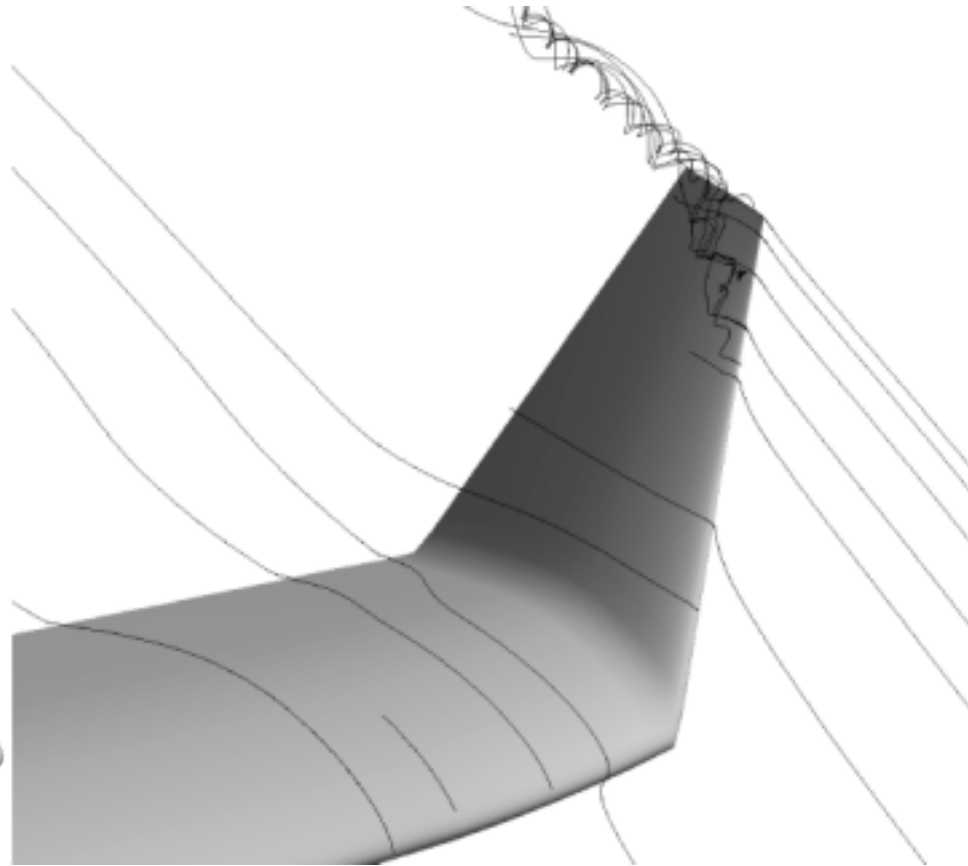
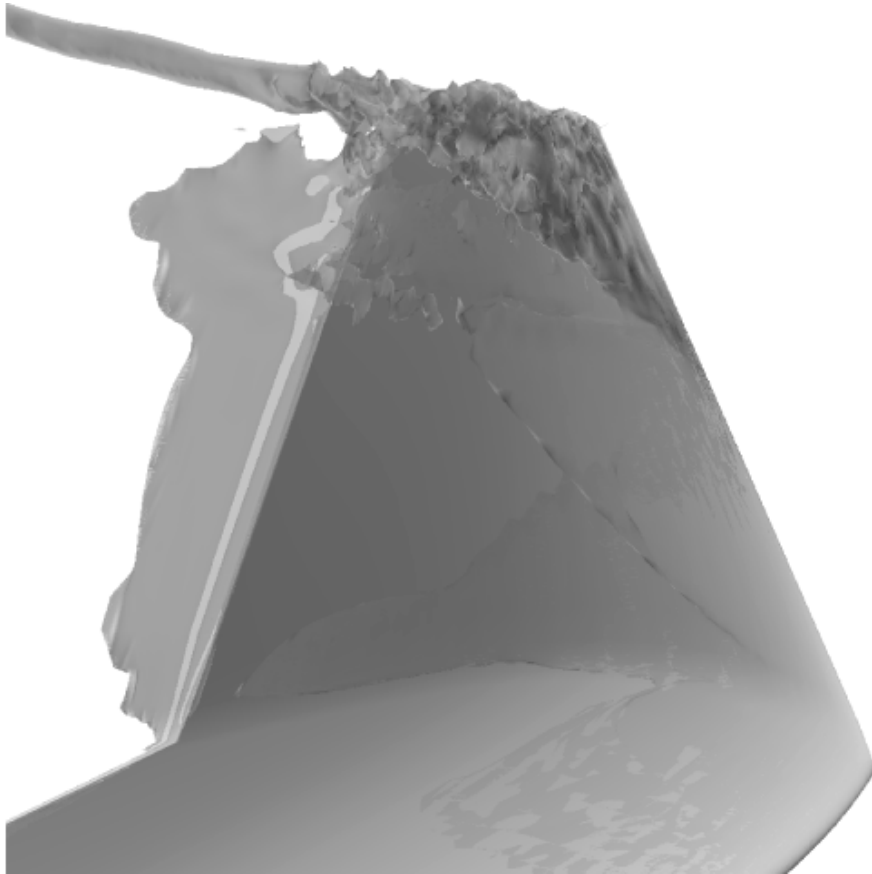


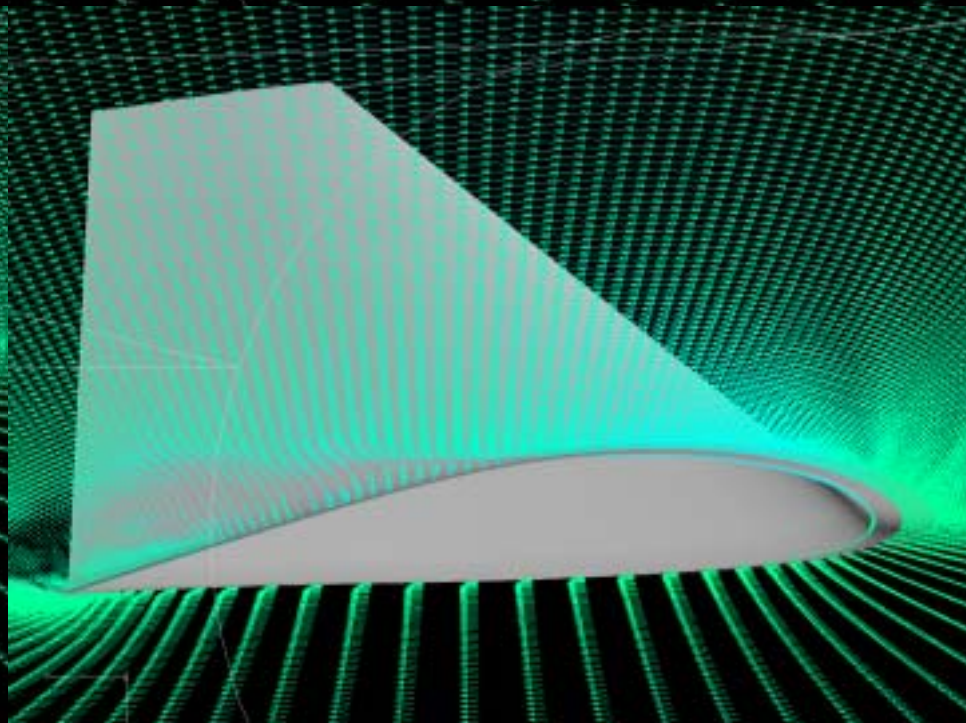
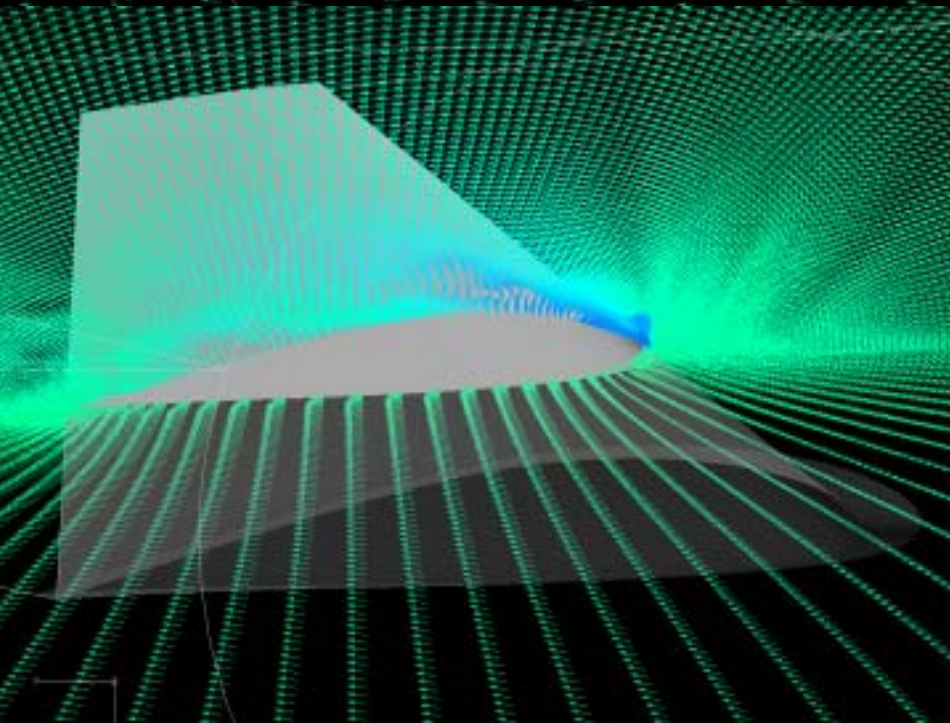
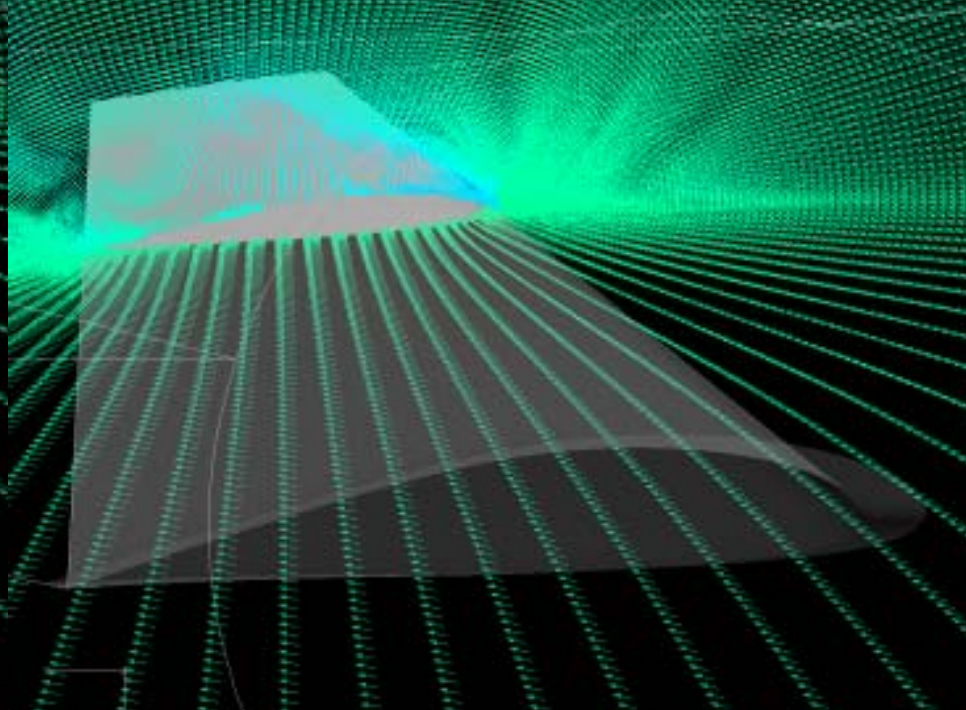
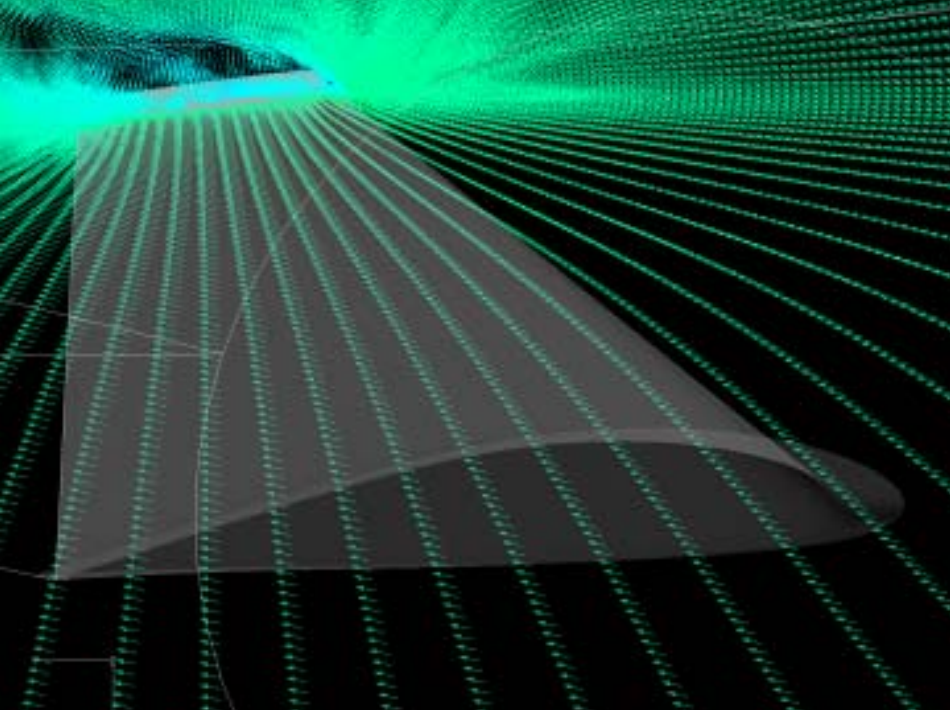
# 計算結果



# さらなる新しい翼端への挑戦

## Winglet simulations





# お台場・潮風公園への挑戦

研究室院生・末廣氏の作品



東京に続いて企画された  
ロンドンの風車

Wind Power Monthly より



**Eye catcher:** *A fully operational Vestas 225 kW wind turbine has been installed in central London on the south bank of the River Thames, just down river from the Houses of Parliament. It is part of a four month public relations display mounted by Shell in front of its London headquarters*

荒川の提言とは直接的な関係はありません。都市環境において企画された風車として紹介します。

# 世界最大の 超大型風車

- 出力 4.5MW
- 直径 114m
- 高さ 120m
- 回転数 8.3rpm
- カットイン 2.5m
- カットアウト 28-34m

(ENERCON HP より)



# 大型風車を利用した洋上ウィンドファームの時代へ加速



Middelgrunden

2MW x 20

Vestas HPより



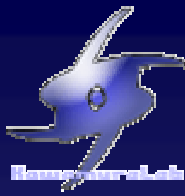
Horns Reef

2MW x 80

# 今後の課題(乱流の応用研究)

- ◆ 低騒音風車ブレードの確立      ウィンドファーム、  
都市風車
- ◆ 超大型風車の開発研究      洋上風車
- ◆ 風況予測を含む風車の統合シミュレーション
- ◆ 環境に関連するエネルギー機械への応用

# エクマン乱流境界層のDNS



## 研究目的

エクマン乱流境界層の3次元の特長(平均流, 乱流構造 etc.)の把握, 解明.

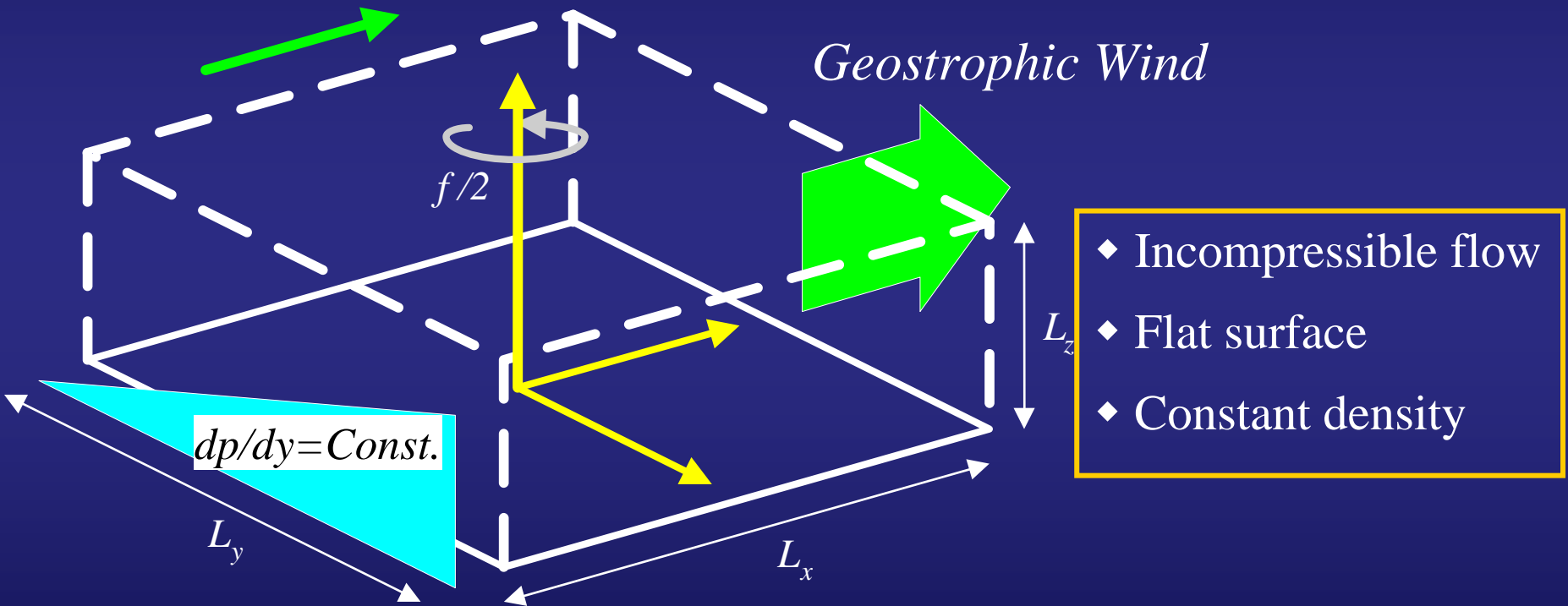
## 既存の研究

エクマン乱流境界層のDNSによる研究: 実験, DNSともに少ない  
観測: 地表粗度の影響大

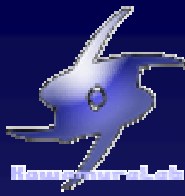
*Coleman* ら(1999)が最大レイノルズ数のDNSを実施  
新谷, 河村 (2004, JoT)は, 最大計算領域の計算を実施

今回の目的: 平滑面上のエクマン乱流境界層について,  
レイノルズ数, 計算領域ともに最大のカノニカルなDNSを  
実施し, データベースを構築する

# Configuration



# Computational conditions



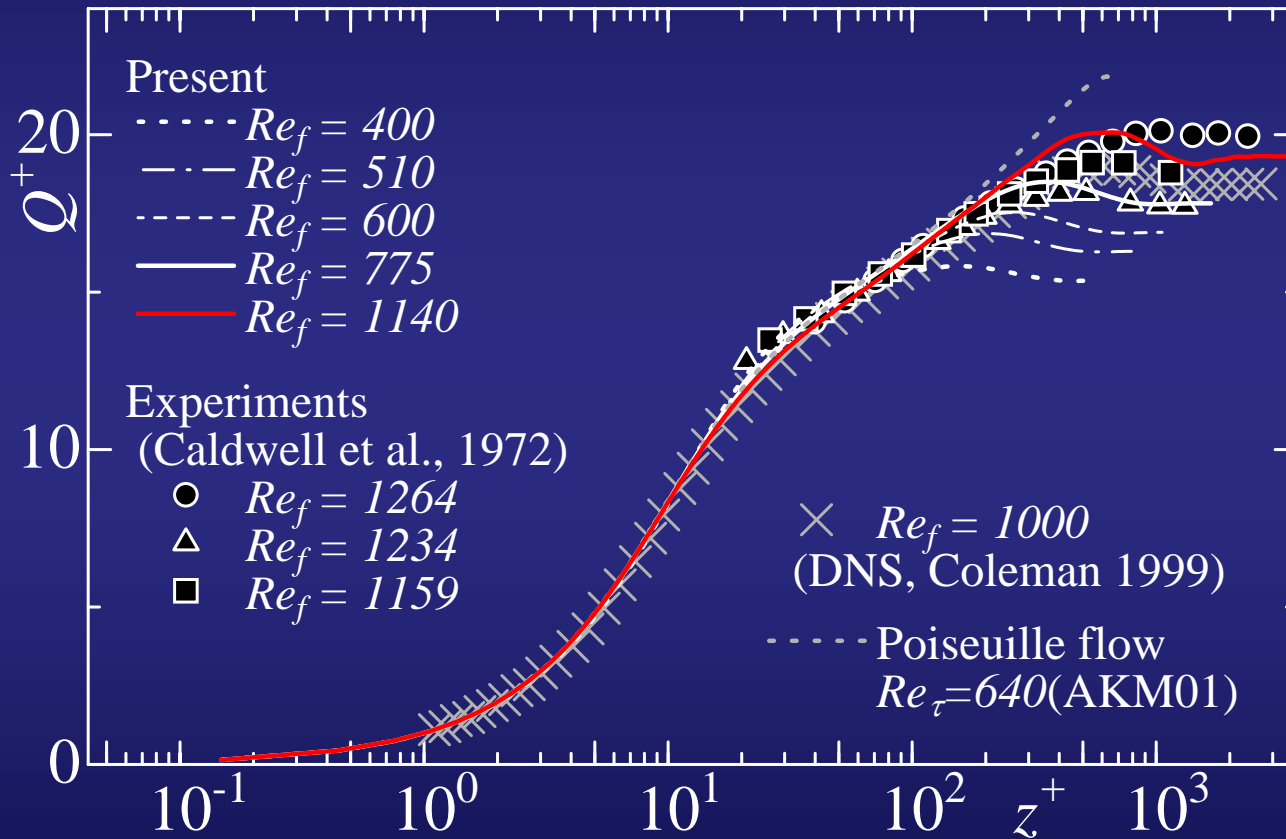
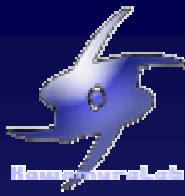
	Coleman et al.	Shingai, Kawamura	Present
$Re_f$	1000	775	1140
$Re$	-	30000	65,000
$Ro$	-	10	10
$L_x^+, L_y^+$	672	6,390	3,384
$L_z^+$		1,680	3,384
Grid	384 × 85 × 384	1024×256×1024	512 × 512 × 512
$\Delta x^+, \Delta y^+$	7.0	6.24	6.60
$\Delta z^+$	-	0.147 - 18.3	0.147 - 18.4

+ : Normalization by  $u_\tau$  and  $\nu$

$$Re_f = \frac{G}{\sqrt{(\nu f)/2}}, \quad \delta_\tau = \frac{u_\tau}{f} : \text{Turbulent depth}$$

今後さらに領域、レイノルズ数ともに大きな計算を実施

# Mean velocity distribution

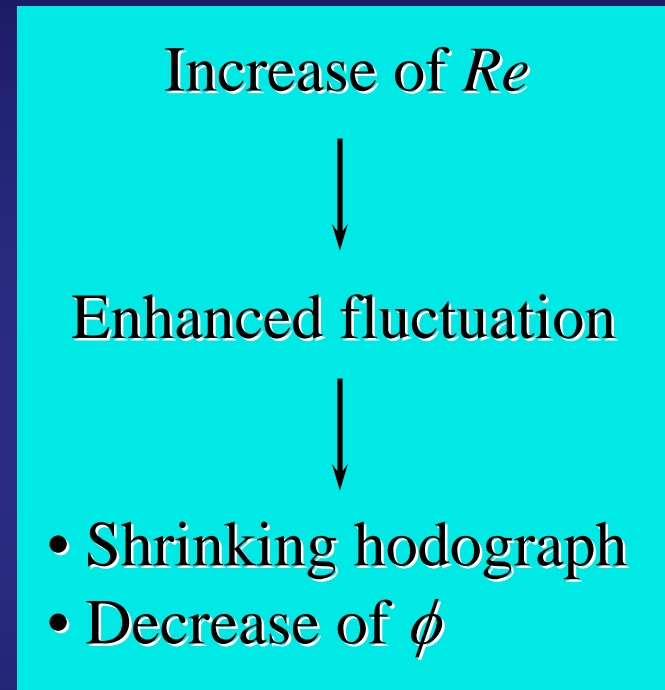
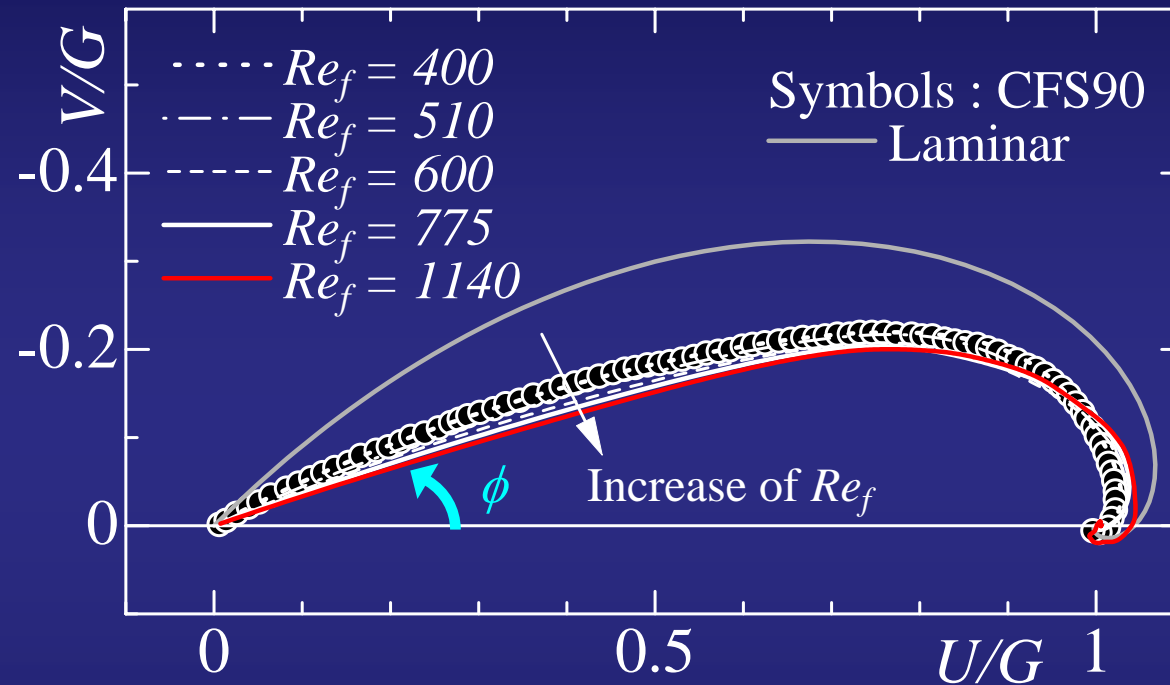


$$Q = \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$Re_L = \frac{G}{\sqrt{\nu \Omega_L}}$$

$\Omega_L$  : the angular velocity  
of the plate rotation

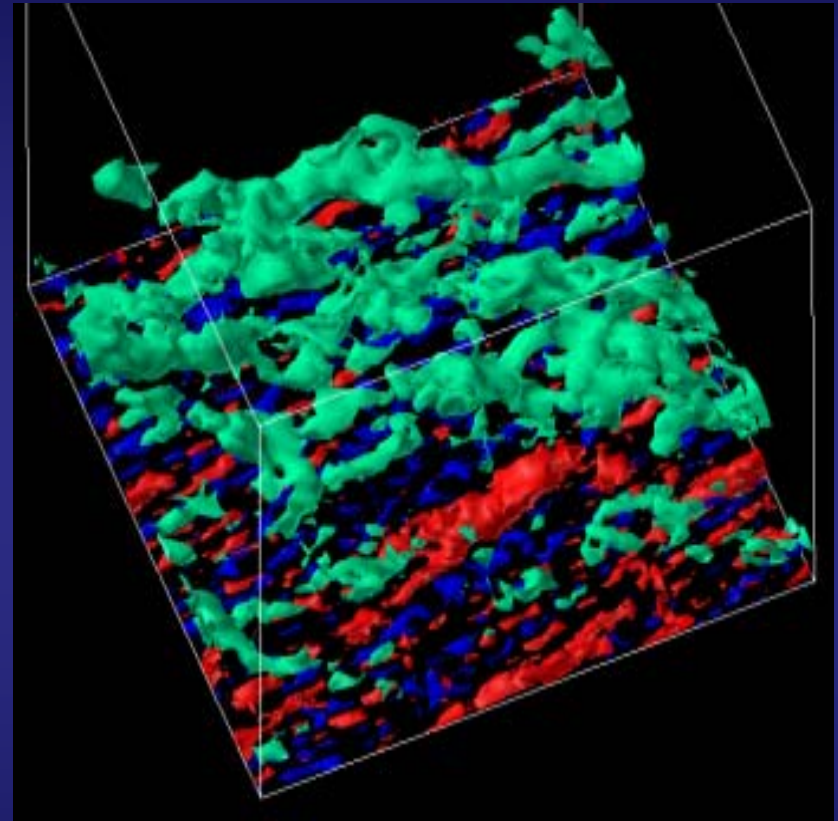
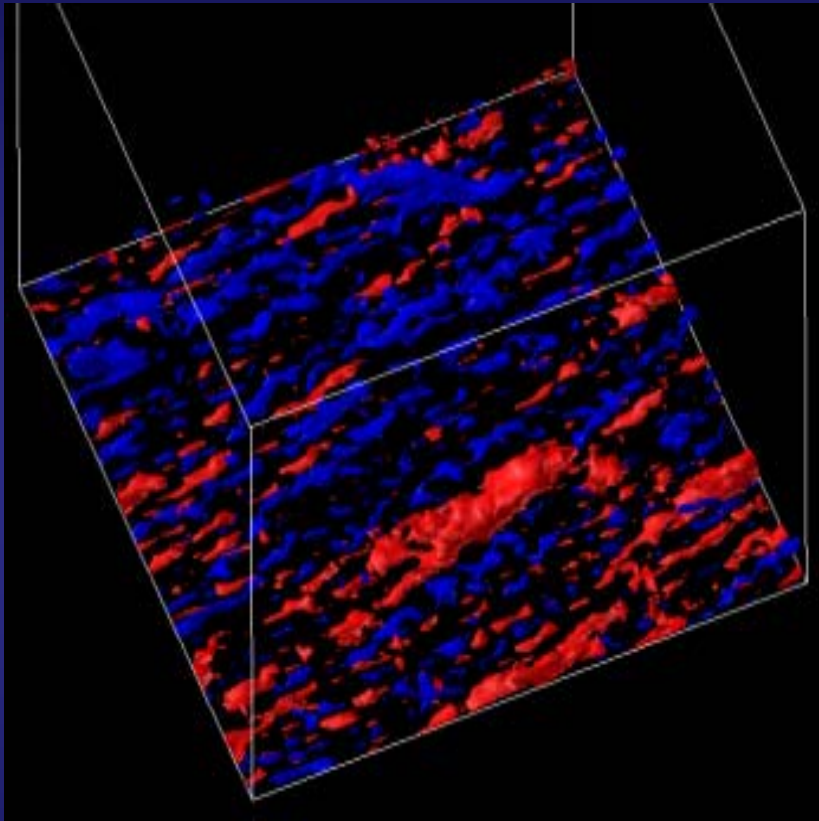
# Hodograph of mean velocity



	Laminar		Turbulence		
$Re_f$	-	510	600	775	1140
$\phi$ [Deg.]	45.0	25.4	23.3	21.2	19.1

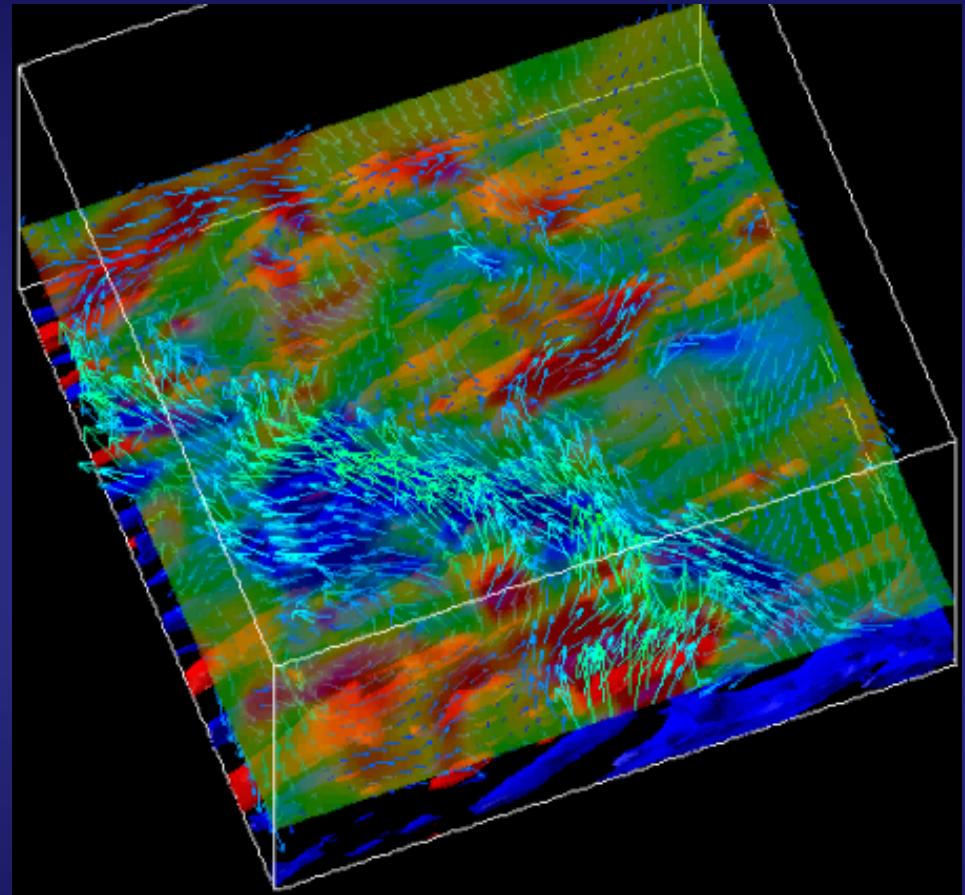
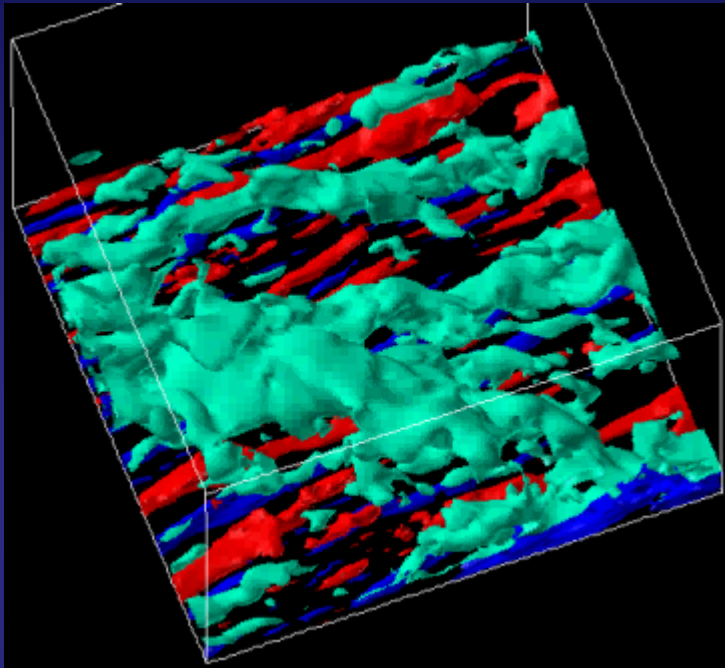
$\phi$  : Angle between Geostrophic wind and mean shear direction at wall

# *Turbulent structure $Re_f = 1140$*



Red : high-speed region ( $u' > 3.0$ ),  
Blue : low-speed region ( $u' < -3.0$ ),  
Light blue : low-speed region ( $u' < -1.0$ )

# *Turbulent structure $Re_f = 600$*

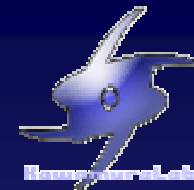


Pressure grad.

Geostrophic wind

Red : high-speed region ( $u' > 3.0$ ), Blue : low-speed region ( $u' < -3.0$ ),  
Light blue : low-speed region ( $u' < -1.2$ ), Contour :  $u'$  at  $z/\delta_{Qmax} \sim 1.0$

# Parallelization



## HPFを用いて並列化

### ❖ データの転置の性能向上

#### ◆ 新しいHPFコンパイラの導入

▶ 逆に実行時間が遅くなるサブルーチンが発生

#### ◆ コンパイラの開発元で原因を特定, 修正(makefile等)

▶ データ転置の実行時間が減少  
(経過時間に対するcommunication timeが1割減少)

### ❖ 計算の規模を拡大

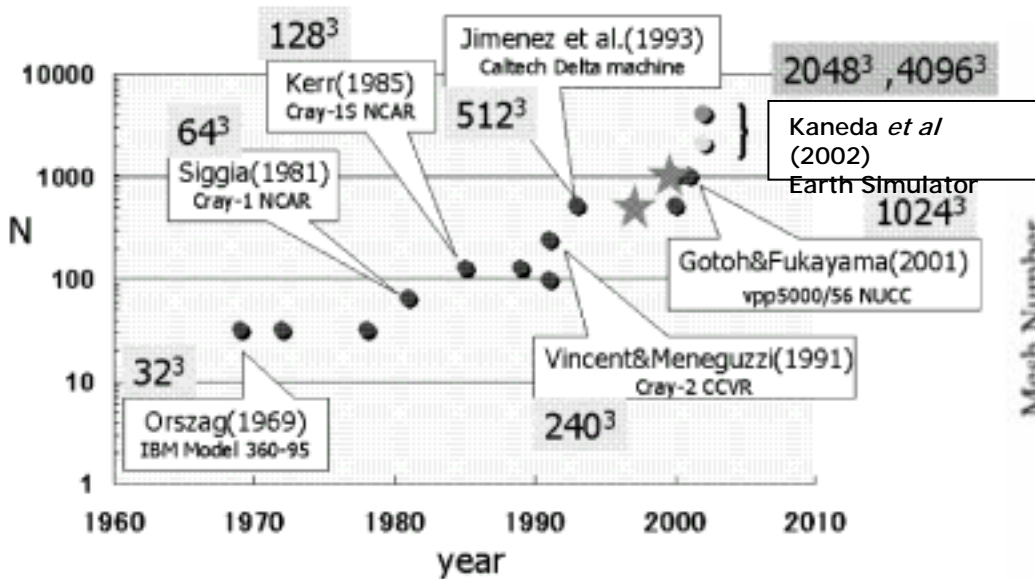
#### ◆ 並列化率99.92%を達成 (ベクトル化率99.04%)



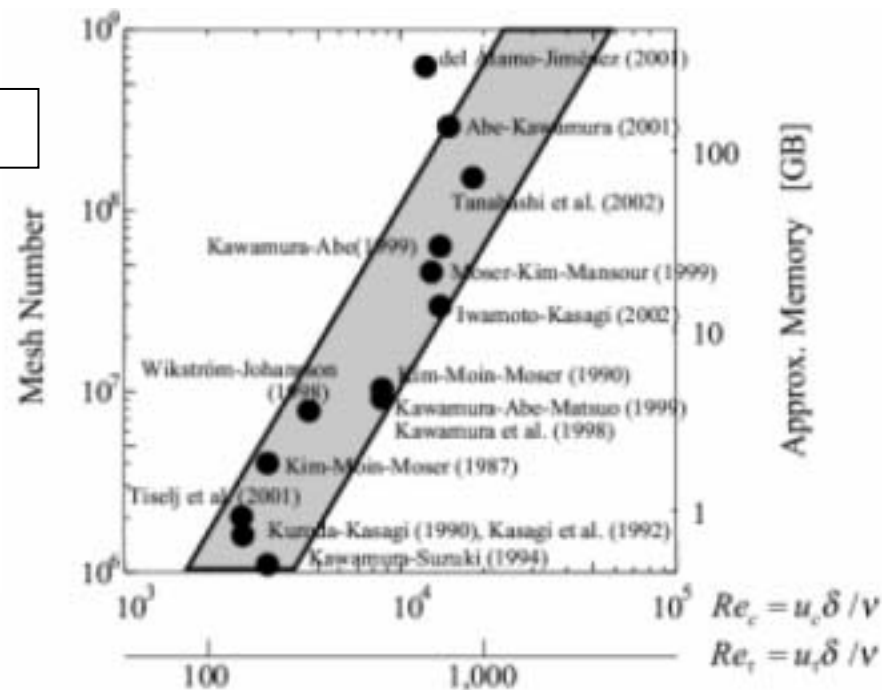
### ❖ 計算の規模をさらに拡大 - メモリー使用量の抑制が必要

# 乱流の大規模DNS これまで

## 一様等方性乱流



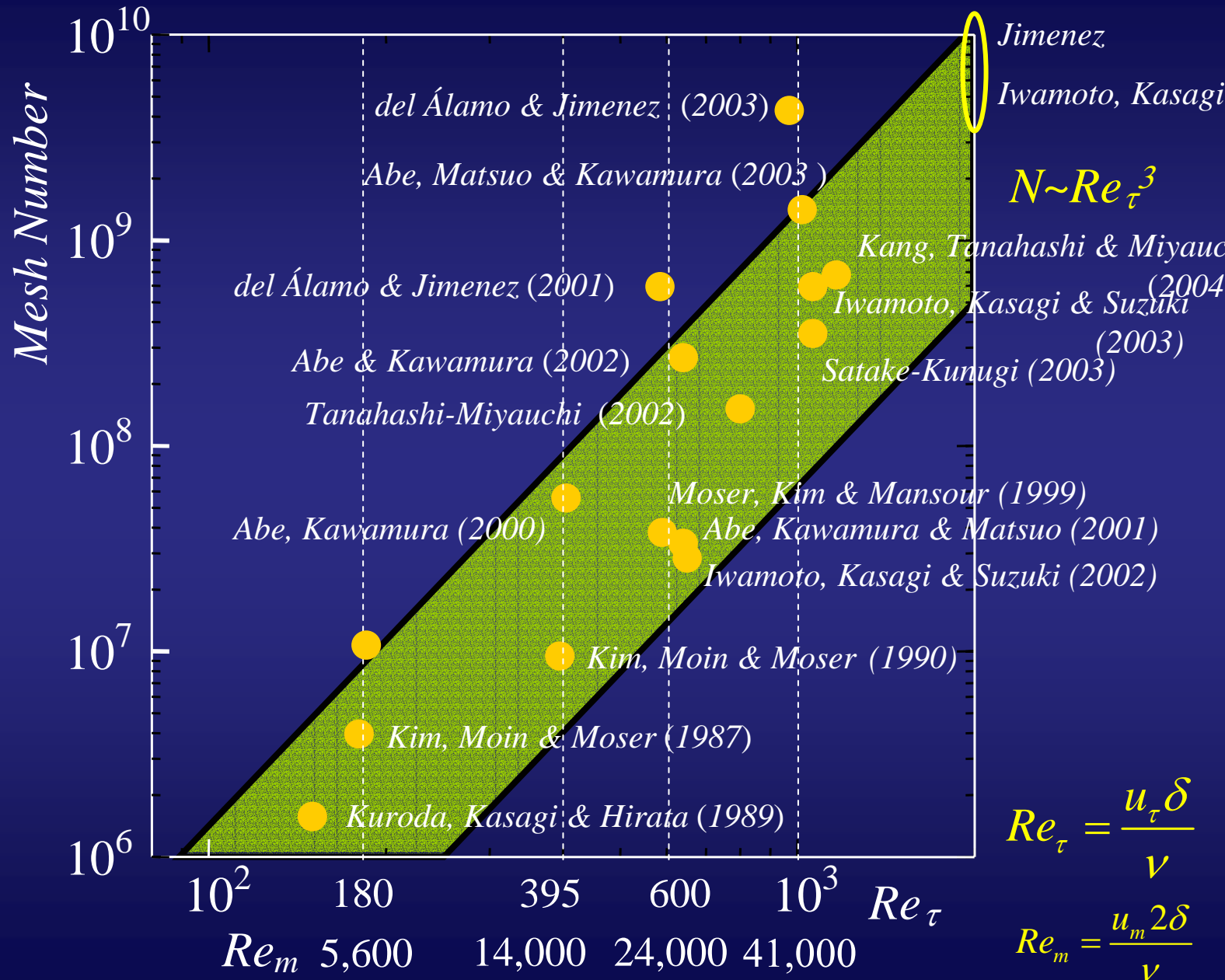
## 壁乱流



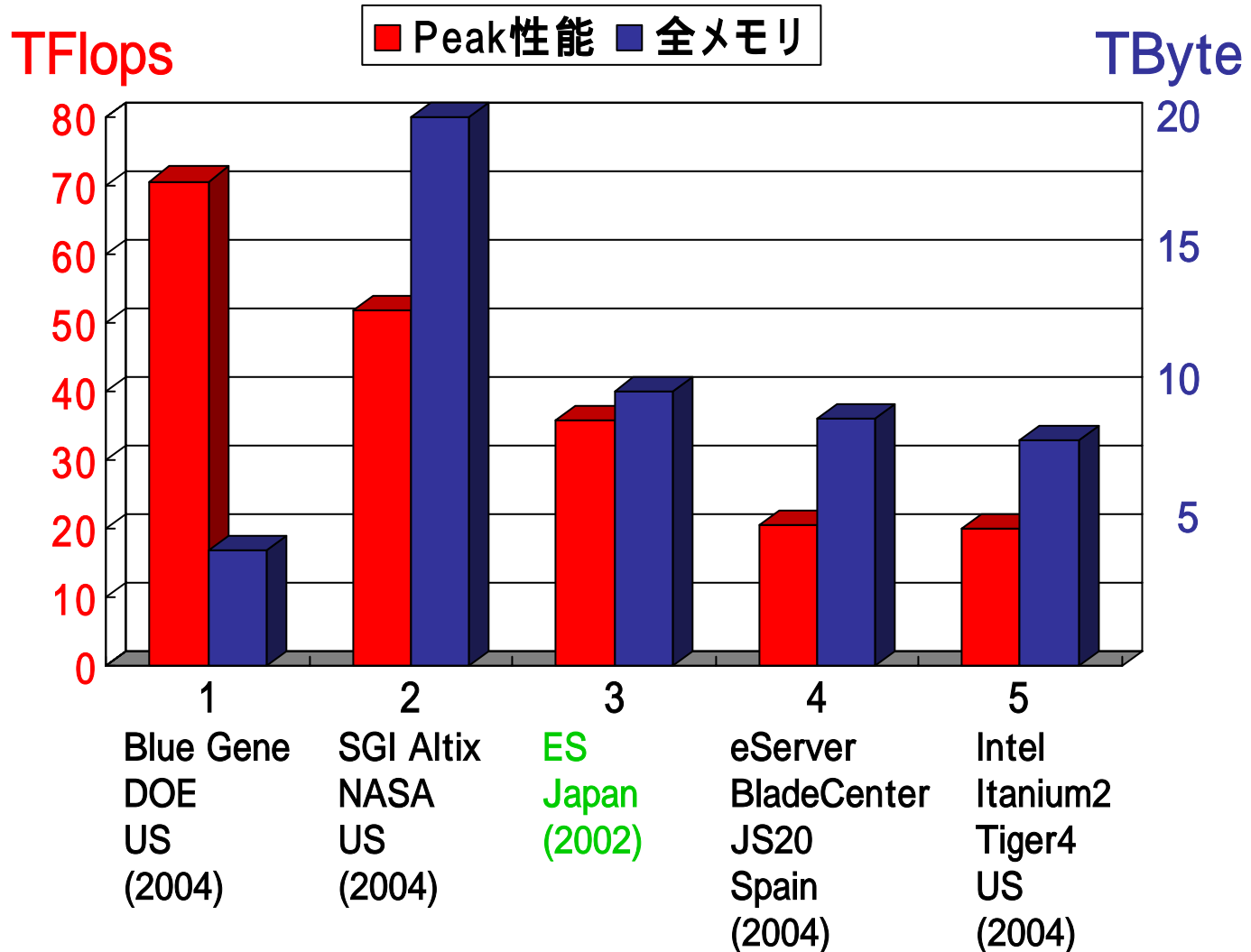
FROM  
Ishihara T, Kaneda Y.  
Proc. Int. workshop on 'Statistical theories and computational approaches to turbulence,'  
Nagoya, JAPAN, 177-188 (2002)

FROM  
河村洋  
日本流体力学会数値流体力学部門Web誌  
第11巻 第2号 2003年3月

# DNS of Poiseuille Channel Flow

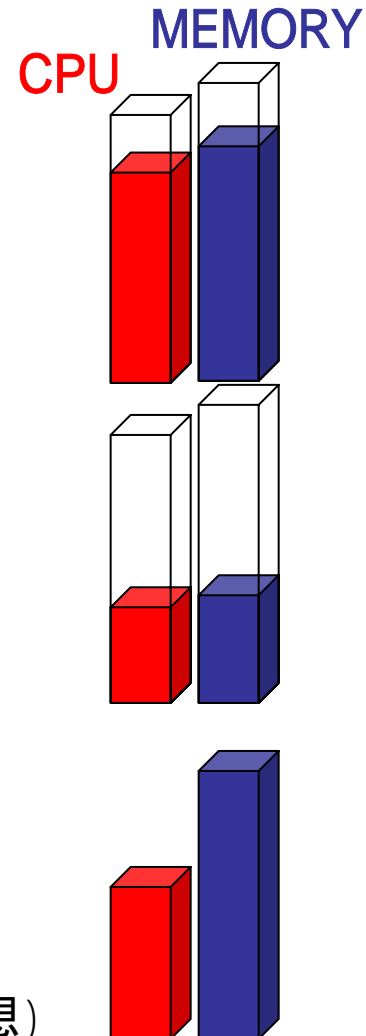


# Super Computer Top 5 (2004Nov.)



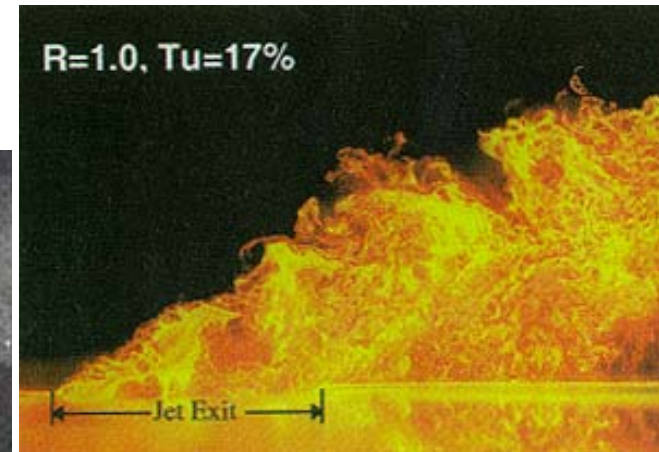
# 乱流の大規模DNS最先端

- 一様等方性乱流
  - $4096^3 (R_\lambda = 1200, 675)$ 
    - 512node  $\times$  280h, ES (Kaneda *et al* 2002)
- チャネル乱流
  - $2000 \times 2000 \times 1500 (Re_\tau = 2320)$ 
    - 256node, ES (Kasagi *et al* 2004)
  - $(Re_\tau = 4000)$ 
    - Barcelona Supercomputer Center (Jimenez *et al* 2004)



# 今後の展開

- カノニカル乱流
  - 一様等方性乱流
  - 壁乱流
  - 一様非等方性乱流 (回転、シア、成層)
  - ジェット、混合層
  - 乱流境界層



# 必要なノード時間の見積もり

- 乱流境界層/ジェット
  - 格子点数 : 2048<sup>3</sup>相当
    - 時間ステップ数 : 20000程度
    - (約10000node時間/1ケース) × 4ケース・・・4万node時間
  - 格子点数 : 4096<sup>3</sup>相当
    - 時間ステップ数 : 20000程度
    - (約10万node時間/1ケース) × 1ケース・・・10万node時間
    - (約10万node時間/1ケース) × 2ケース・・・20万node時間

# 乱流コンソーシアムとしての課題

- ◆ 基礎班を中心として利用計算資源の不足
- ◆ 回転乱流といった特殊な分野に絞り、個性的な研究を進めている
- ◆ 壁面乱流では、世界の他の計算機、あるいは多くの計算時間を有するESCの他プロジェクト研究者に「道を譲る」といった形となっている
- ◆ 応用班は日本の環境に適した新しい風車の研究開発を中心に推進する
- ◆ 日本流体力学会として新しい乱流分野に挑戦する研究者を育てる