

壁乱流における大規模組織構造と 凍結乱流仮説の数値的研究

山梨大学工学部 山本義暢

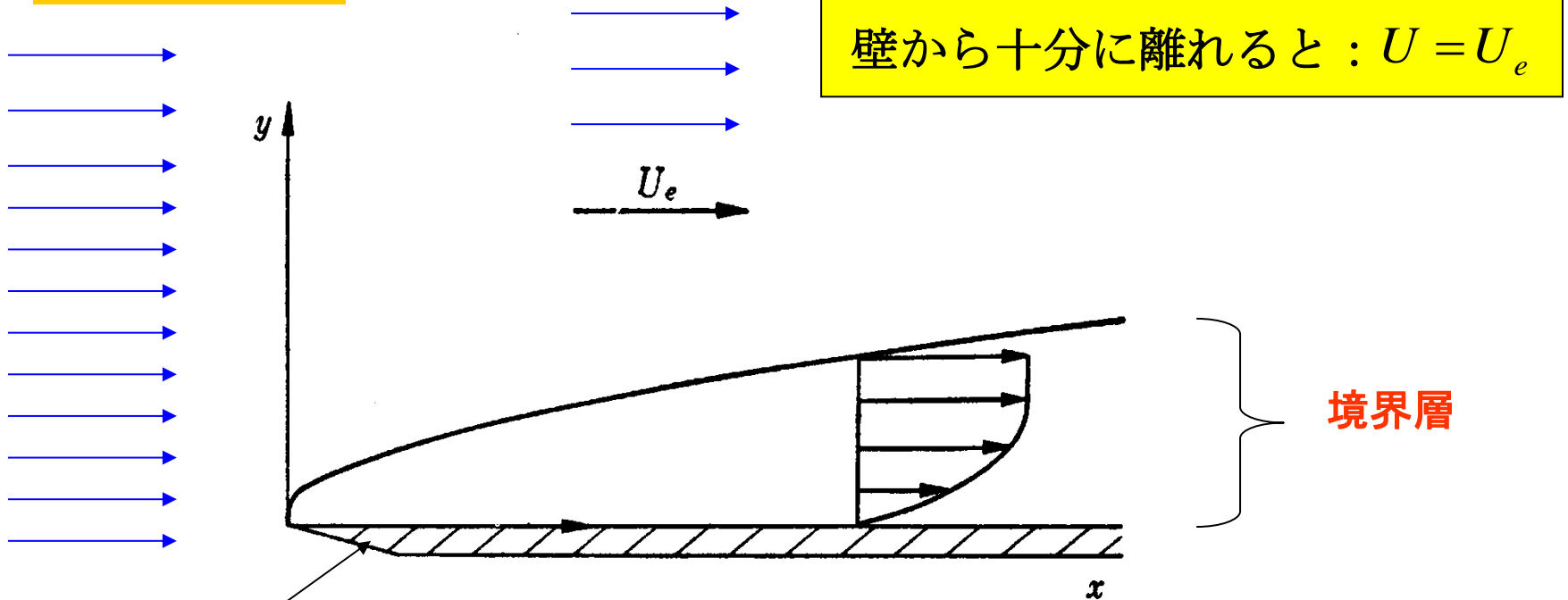
名古屋大学工学研究科 辻 義之

名古屋大学情報基盤センター 石井克哉

地球水循環研究センター 坪木和久

壁乱流(境界層、チャネル、円管)

一様な流れ



壁から十分に離れると： $U = U_e$

境界層

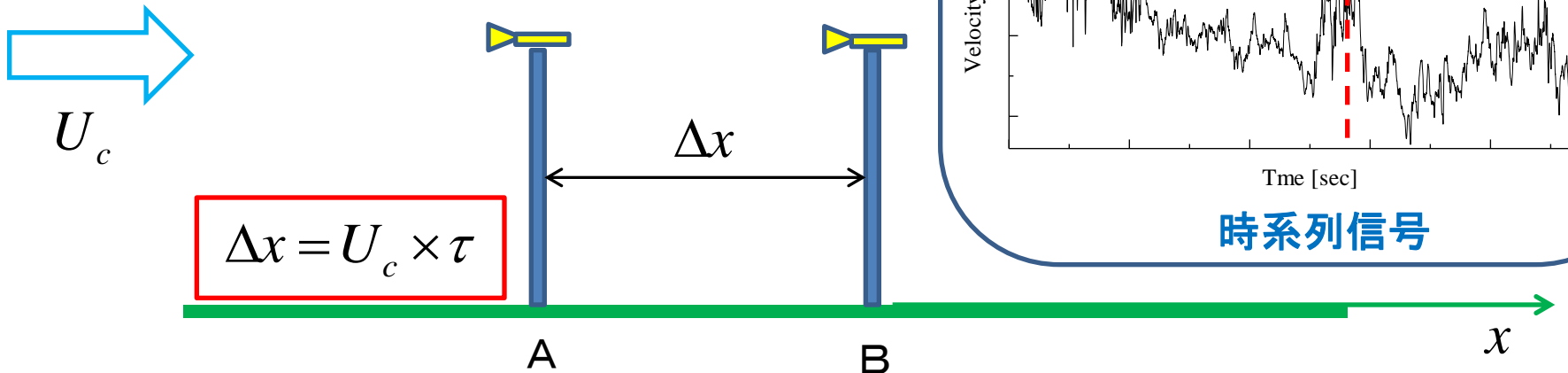
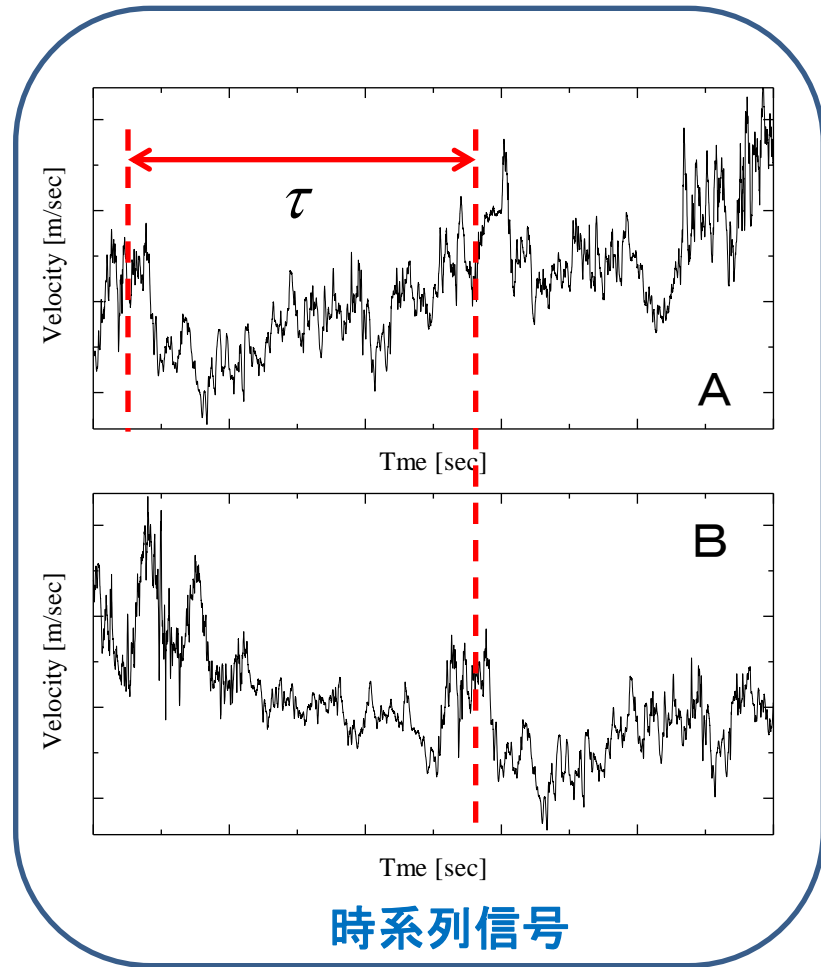
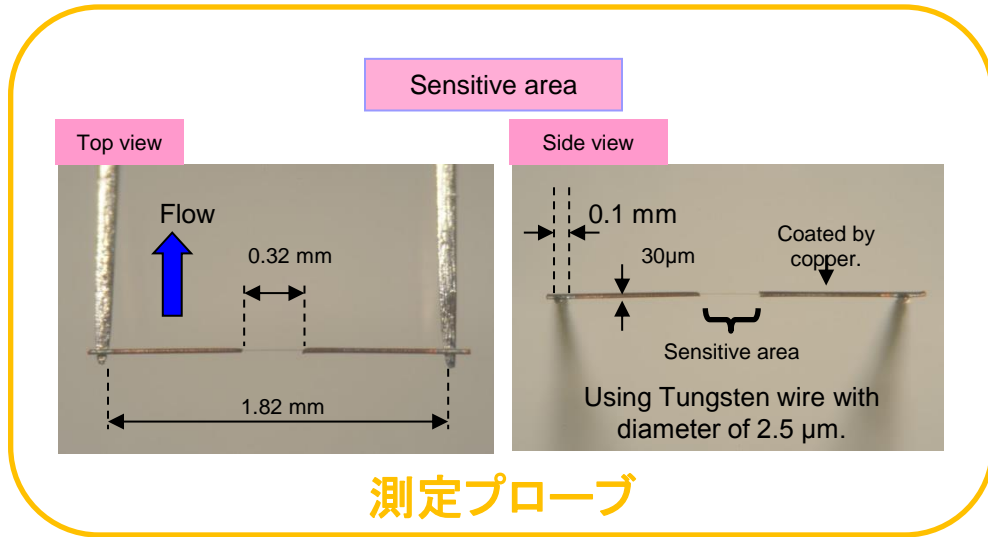
平板の層流境界層 (拡大図)

平板・壁

壁の上では： $U = 0$

凍結乱流仮説

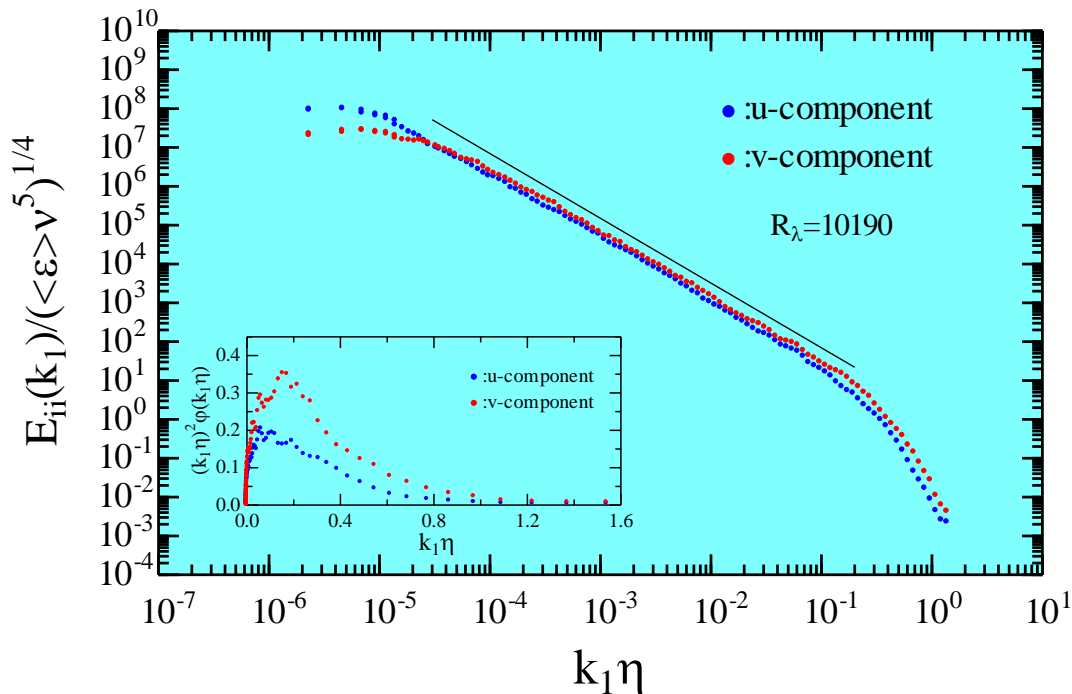
$$U(x, t) = U(x - U_c \tau, t + \tau)$$



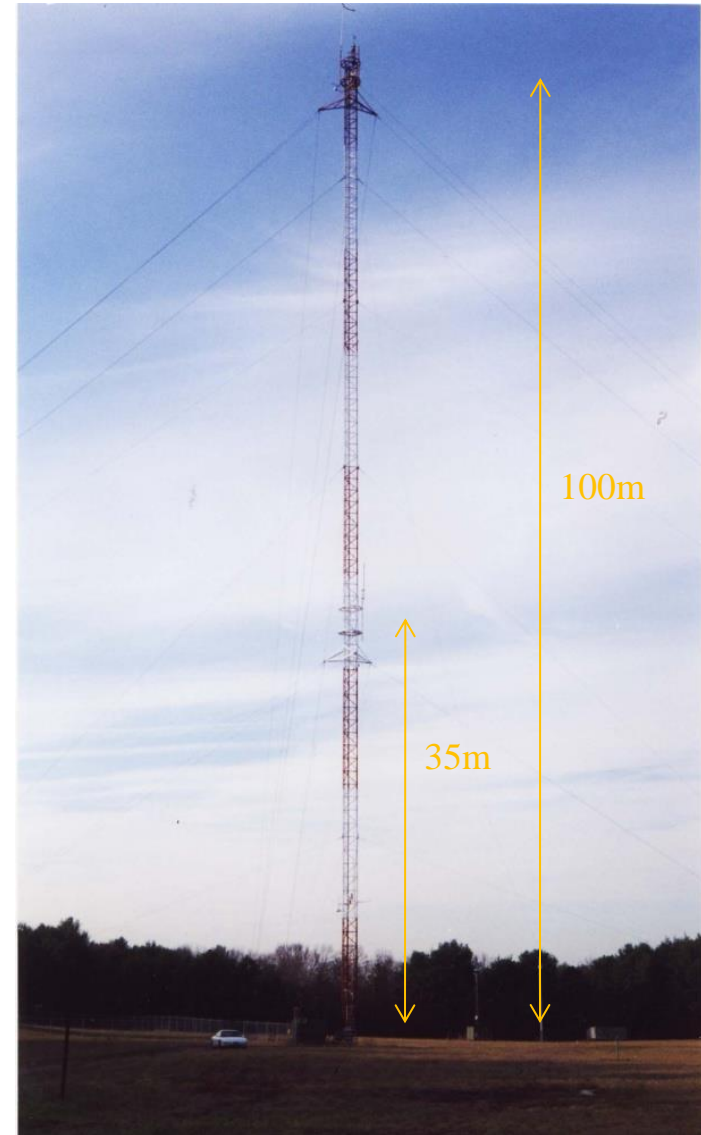
High-Reynolds number experiment 1

On the tower 35m high from the ground.

$$R_\lambda \cong O(10^4)$$



The flow is very close to H.I.T.



Brookhaven National Laboratory

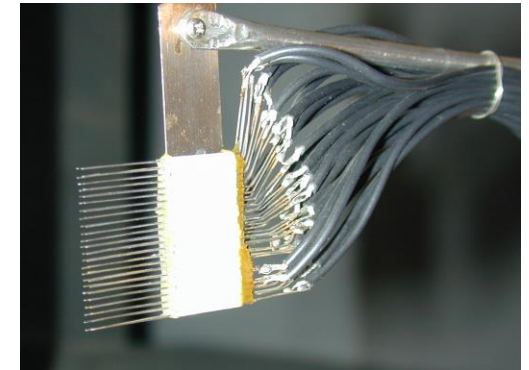
Large scale motion in turbulent boundary layer

There is no clear definition on the structures

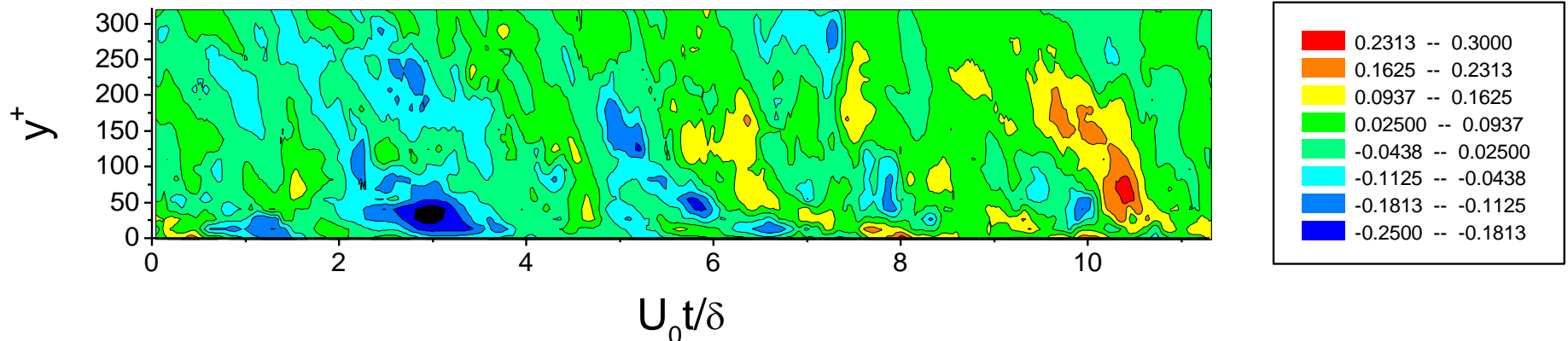
cf. hairpin vortex, stream-wise vortex, typical eddy, low speed streaks, ...

Experiments by 24-ch probes measurement.

$$U_0 = 13.5[m/s] \quad R_\theta \cong 3300$$



← Flow



Del Alamo & Jimenez (2009)

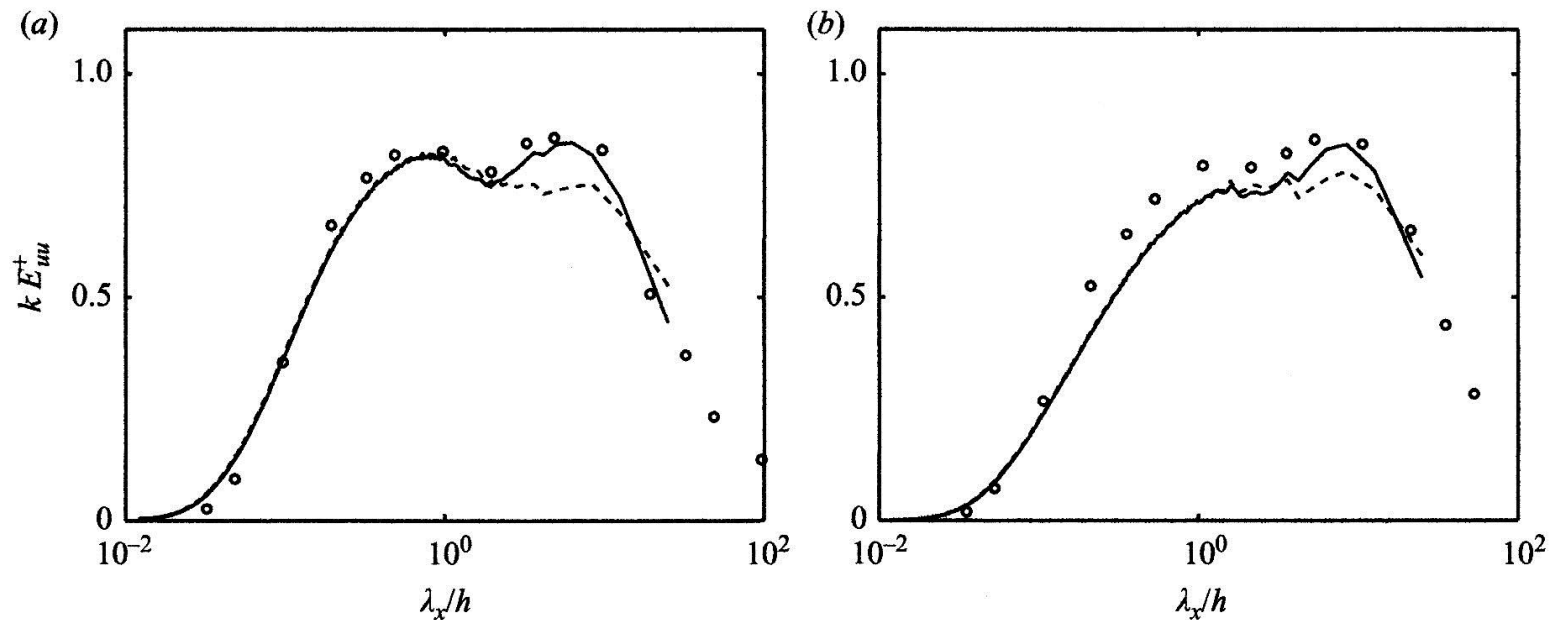


FIGURE 10. One-dimensional pre-multiplied energy spectra, $k_x E_{uu}(k_x)$. \circ , Perry & Abell (1975), $Re_\tau = 2325$. Lines are case (Hoyas & Jiménez 2006): $---$, true wavelengths; $---$, uncorrected Taylor wavelengths. (a) $y^+ = 100$, (b) $y^+ = 200$.

$$E(\omega) = \int E[k_x(\omega, k_z), k_z] dk_x / d\omega | dk_z$$

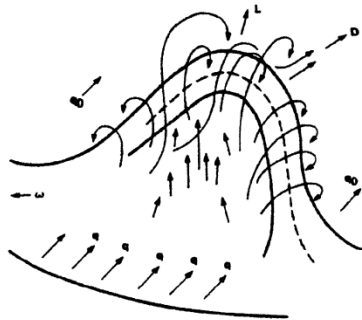
model ?

$$E_{uu}(k_x) \propto k_x^{-1}$$

壁乱流の組織構造

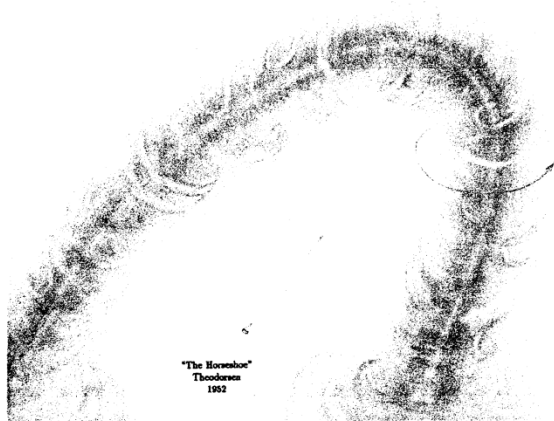
Robinson's summary of structures found in DNS

(a)



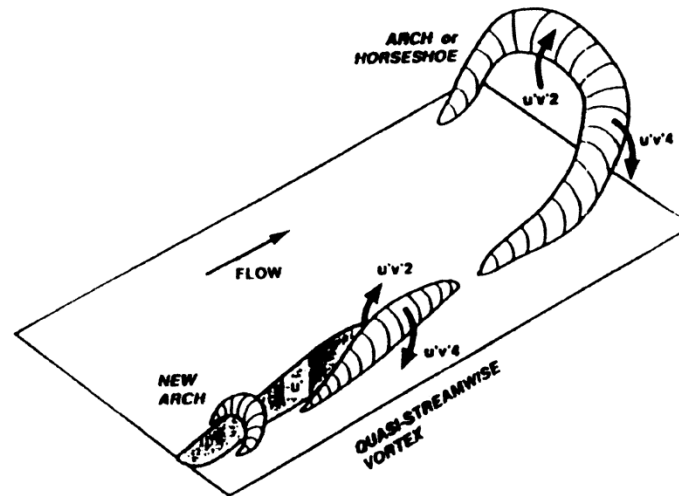
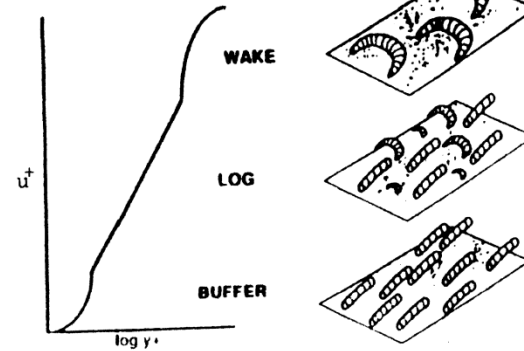
Theodorsen's (1952) description of Horseshoe vortex

(b)



Sketch of "Horseshoe" attributed to Weske

(c)



1980, 1990年代

Dennis & Nickels (2008)

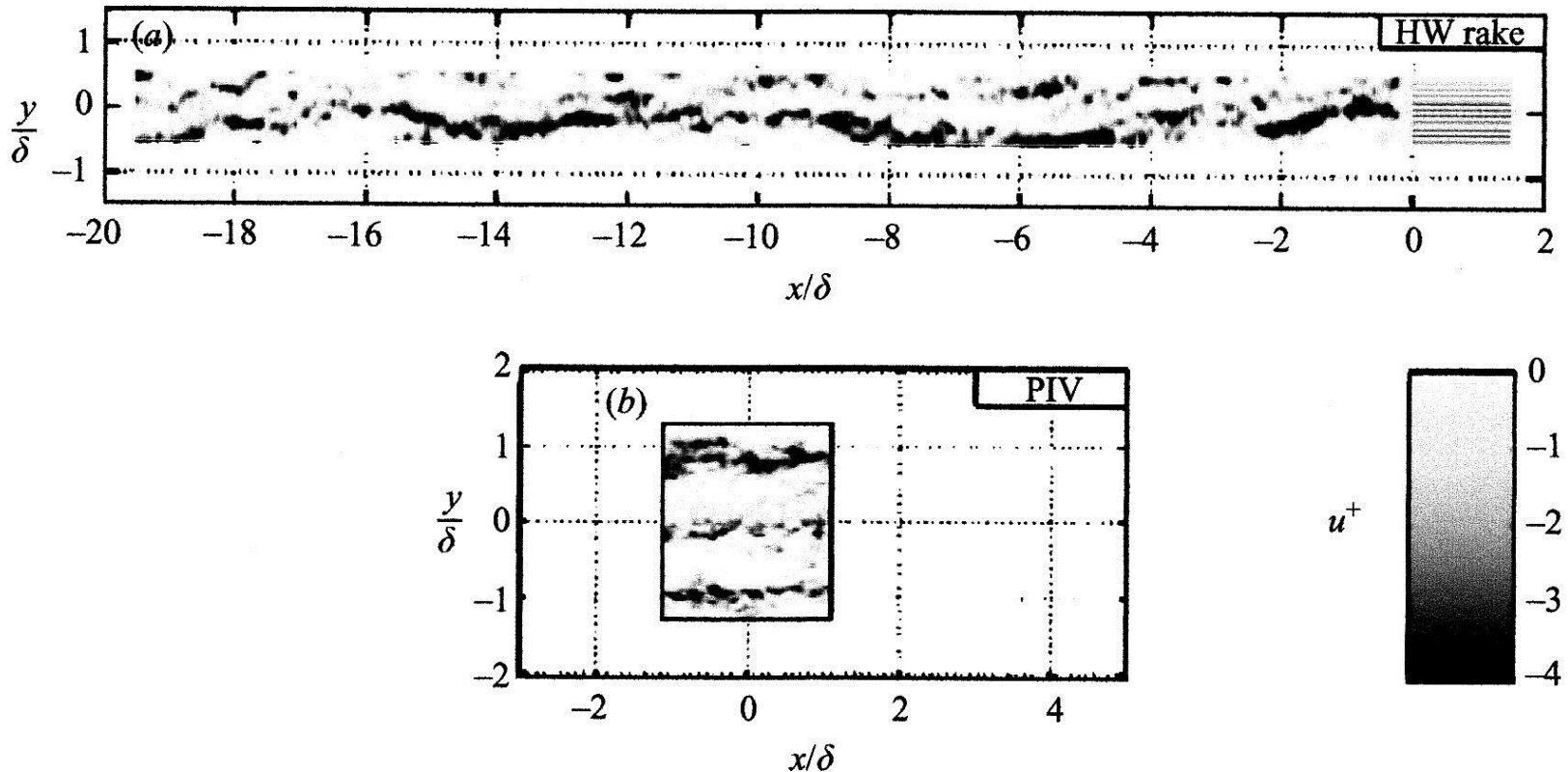


FIGURE 1. (a) Example rake signal at $y/\delta = 0.15$, for $Re_\tau = 14380$, and (b) PIV snapshot, from Hutchins & Marusic (2007a). Note their y is our z .

Log-region , large scale motion

直接数値計算の概要

基礎方程式

○連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

○運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \delta_{i1} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

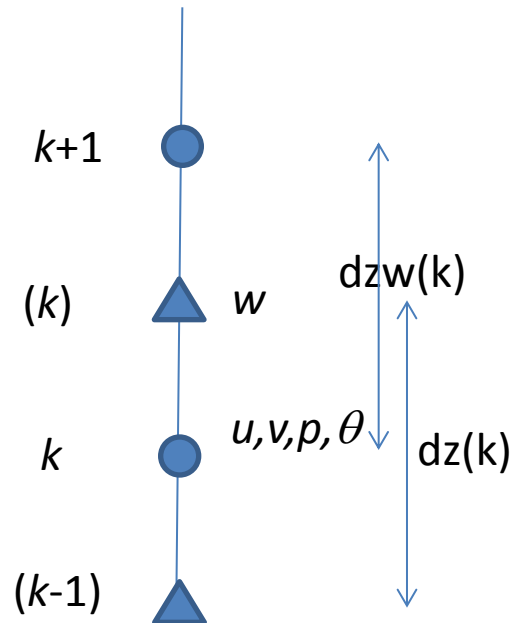
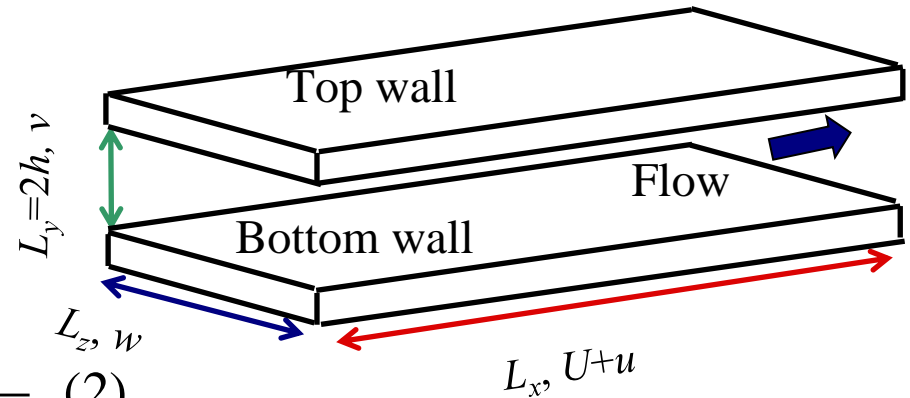
○エネルギー方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

離散化手法

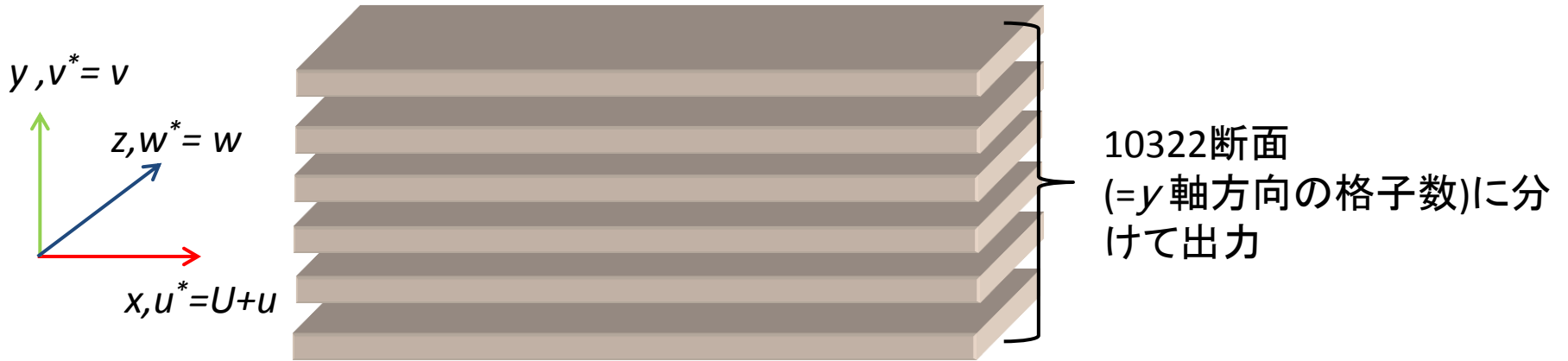
○時間: 3次精度Runge-Kutta法(対流項)、
2次精度Crank-Nicolson法(拡散項)
Euler陰解法(圧力項)

○空間: フーリエ・スペクトル法(x, z方向)
2次精度中心差分(y方向)



○鉛直方向にスタガード格子

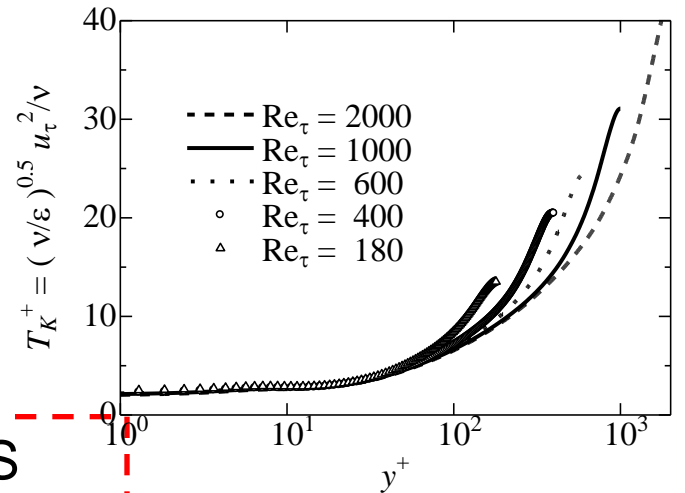
凍結乱流検討用：4次元DNSデータベースの概要



Re_τ	L_x, L_y, L_z	N_x, N_y, N_z	$\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$	Δt^+	T^+
1000	51.2h, 2h, 8.0h	2916, 1032, 1024	17.6, 0.5-2.0, 7.8	2.1e-2	2553.6

×5

- 時間積分：121600step、 $T^+ = 2553.6$
 100ステップ毎に記録 ($dt^+_{samp}=2.1$)、
 1点あたりのデータ数：
 $2916 \times 1024 \times 1216 = 3,630,956,544$
- 解析時間長：2553.6, $m=5$
 → バルク平均速度による移流距離： $U_b T = 51.1 h$



時空間のコルモゴロフスケールを解像するDNS
 データベースを長時間で蓄積

コルモゴロフの時間スケール

DNSコード/ポスト処理コードの並列化・高速化

1) DNSコード

○領域分割:

1次元及び2次元の領域分割法を適用

○alltoall通信:

1対1通信(isend/irecive)、one-side通信(put)、集団通信(alltoallv)の各手法を計算機タイプに応じて、使い分け

○shift通信:

通信のスケジューリングを適用

2) ポスト処理コード

○4次元データベースに対応した、領域分割(時間&y方向)による完全並列化
→80TBデータの統計処理が約4時間で可能(FX1/128ノード使用時)
(従来は、M9000の共有メモリ型を利用)

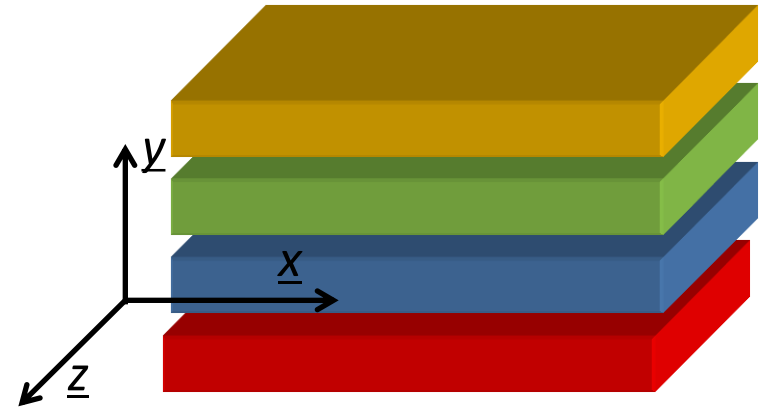


FIG. 1-D domain decomposition
(y-direction) < 4096 nodes

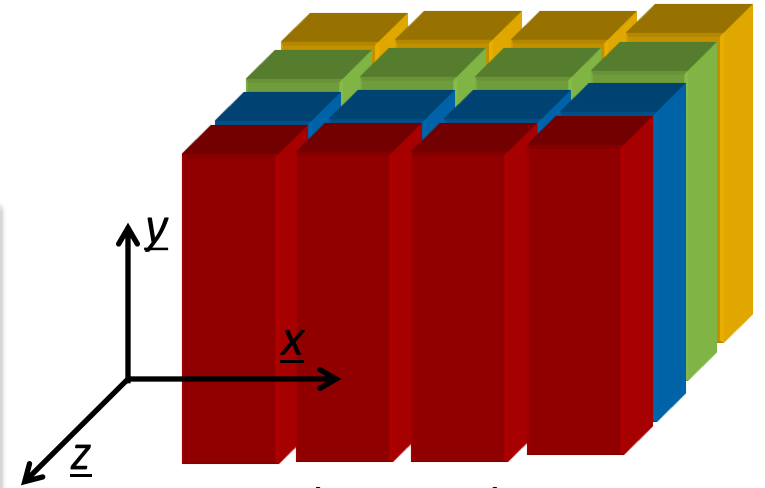


FIG. 2-D domain decomposition
(x, z-direction) > 2048 nodes

DNSコードのパフォーマンス (FY2012)

Table 1 Performance of DNS

	計算機	最大ノード数/メモリ量	MPI 並列数	AP	総並列数 [MPIxAP]	Rpeak [TFLOPS]	R_{peak}/R_{max} [%]
名大	FX1	768/21TB	384	4	1536	<u>1.06</u>	6.95
東北大	SX-9	16/16TB	64	1	64	<u>1.42</u>	21.73
			256	1	256	6.50	24.81
JAMSTEC	ES2	128/15TB	128	8	1024	<u>21.14</u>	20.16
理研	京	82944/ 1035TB	1024	8	8192	7.61	5.81
			2048	8	16384	13.03	4.97
			4096	8	32768	<u>20.37</u>	3.89

計算機スペック

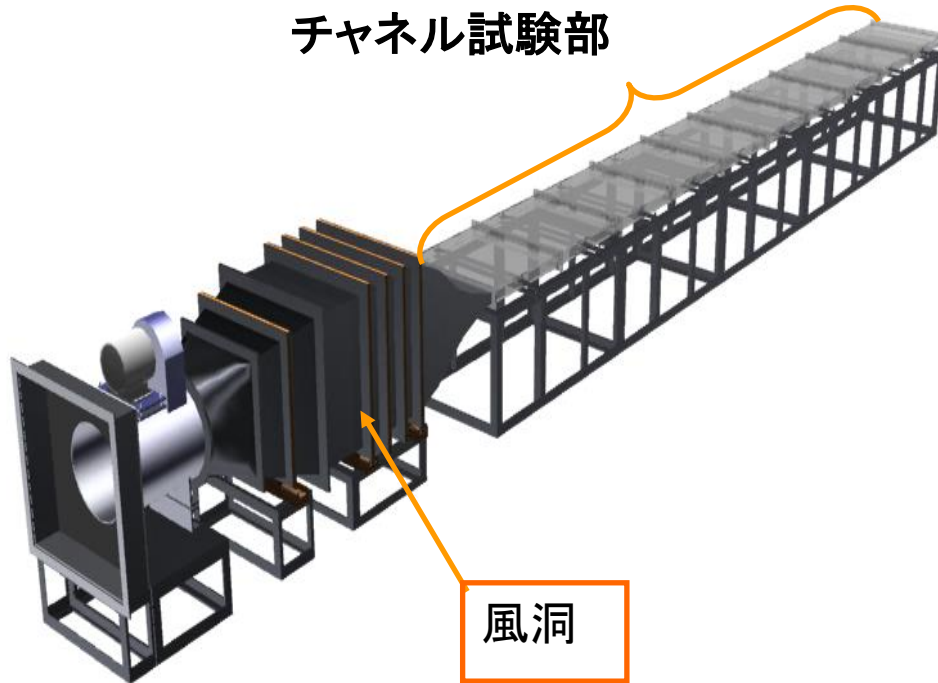
実測値

ベクトル並列計算機:
理論性能の20%程度、
最速: 21TFLOPS(128ノード)

スカラー並列計算機:
理論性能の5%程度、
最速: 20TFLOPS(4096ノード)

スカラー機においても、高速化により最大値ではベクトル機並の性能が得られるようになった。さらなる実行効率の向上が今後の課題

チャンネル流路



試験部全長	10.4 m
ダクト断面形状	650mm × 50mm
最大流速	20.0 m/s

高レイノルズ数実験: 装置改良が完了

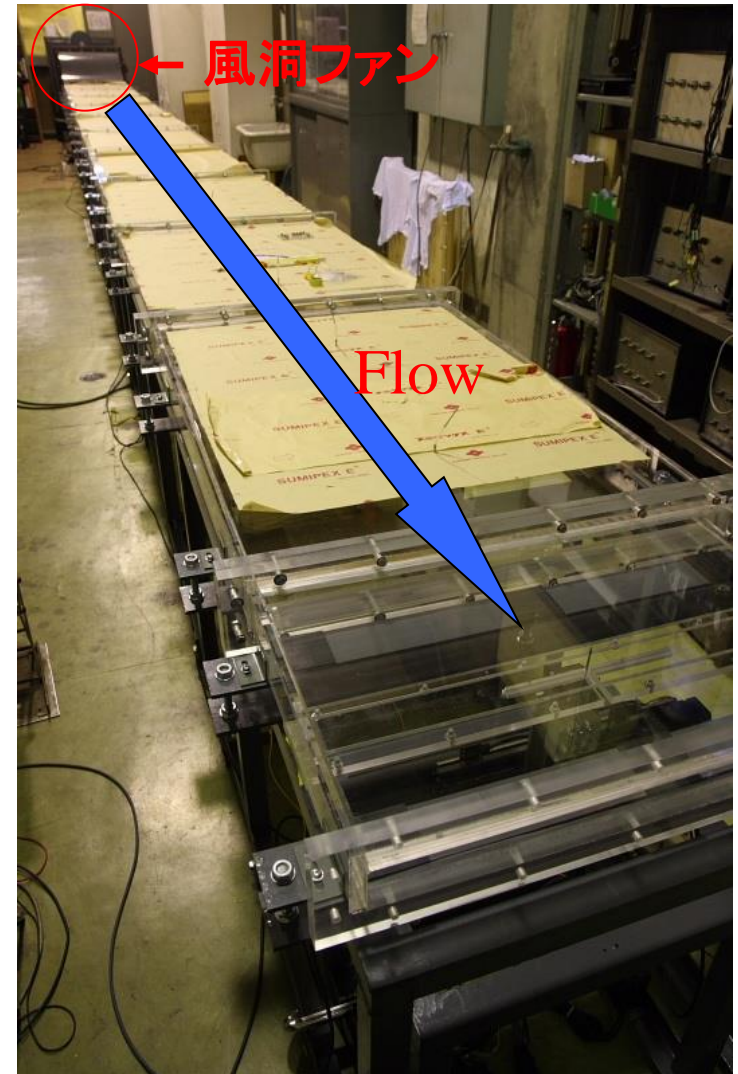
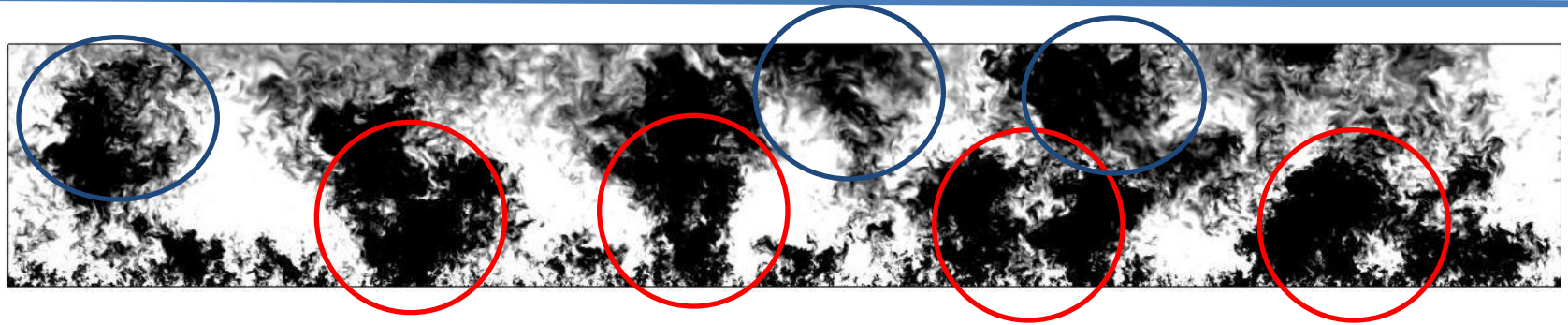
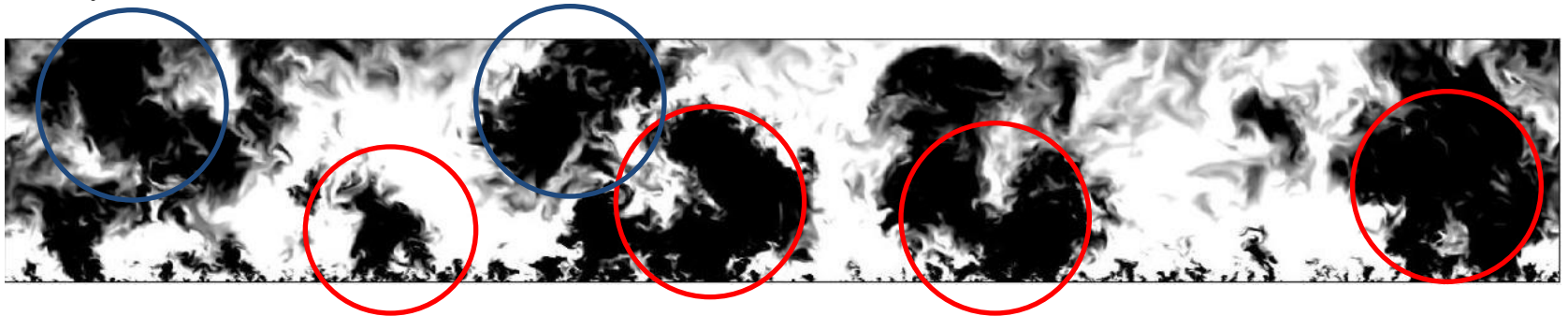


Fig. 測定用風洞全体図

大規模構造における高レイノルズ数効果、End view



1) $Re_\tau = 8000$ (LES) 4800x1536x1920

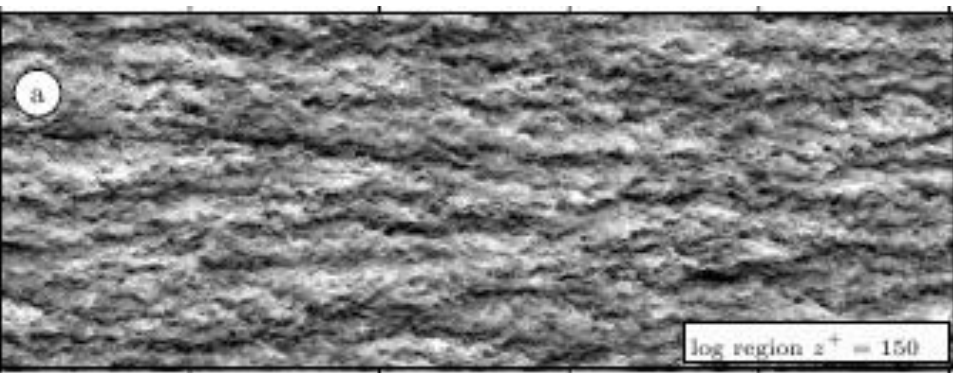
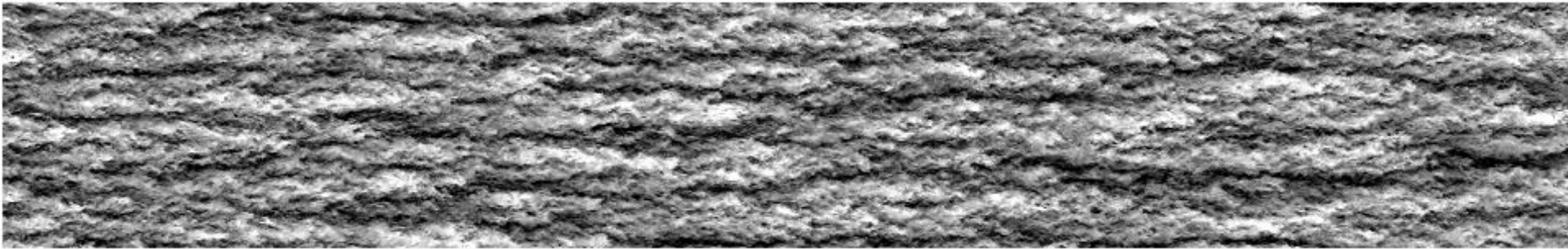


2) $Re_\tau = 4000$ (DNS) 3600x2048x3072



3) $Re_\tau = 2000$ (DNS) 1800x2032x1600 -1 (black) $< u^+ < 1$ (white)

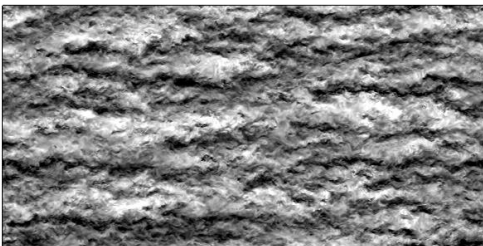
凍結乱流の精度確認用の大規模計算領域



○Present $Re_{\tau}=1000, L_x=51.2h, L_z=8h$

従来の世界最大領域計算の
2倍以上

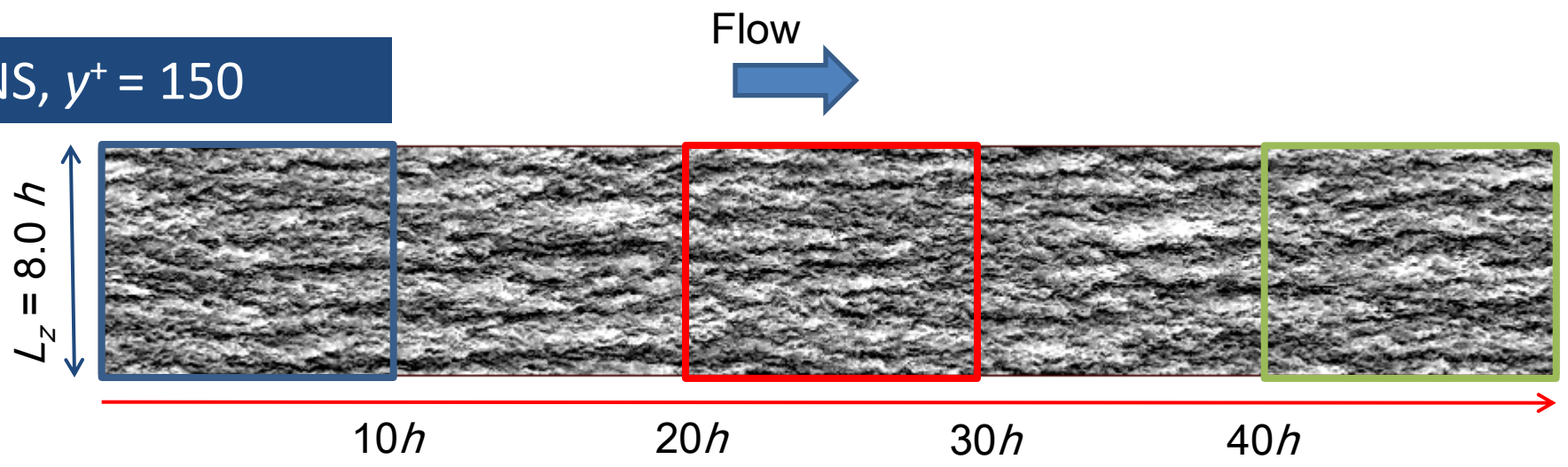
○del Alamo et al.(2004) $Re_{\tau}=934, L_x=8\pi h, L_z=3\pi h$



○Abe et al,(2002) $Re_{\tau}=1024, L_x=12.8h, L_z=6.4h$

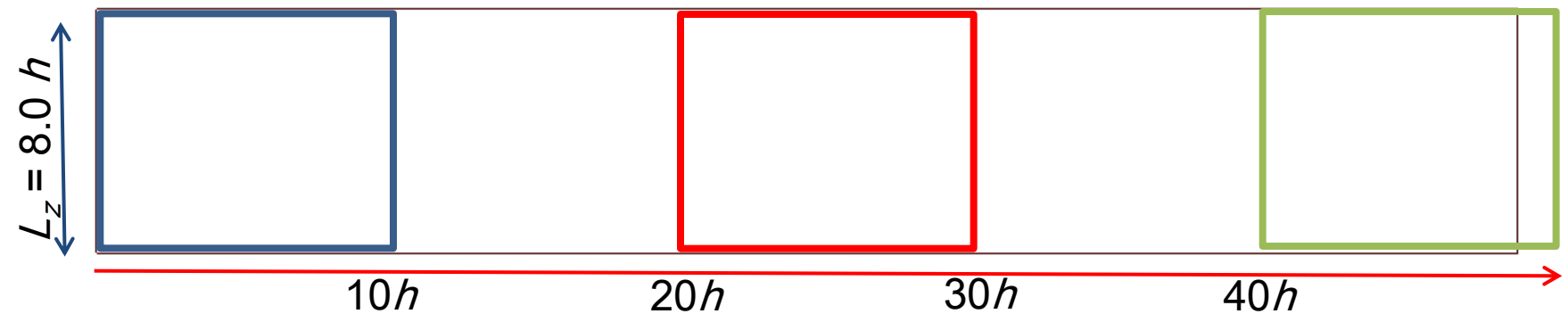
Streamwise turbulent velocity: log layer, $Re_\tau=1000$

DNS, $y^+ = 150$



Color contour : $-4(\text{black}) < u^+ < 4(\text{white})$

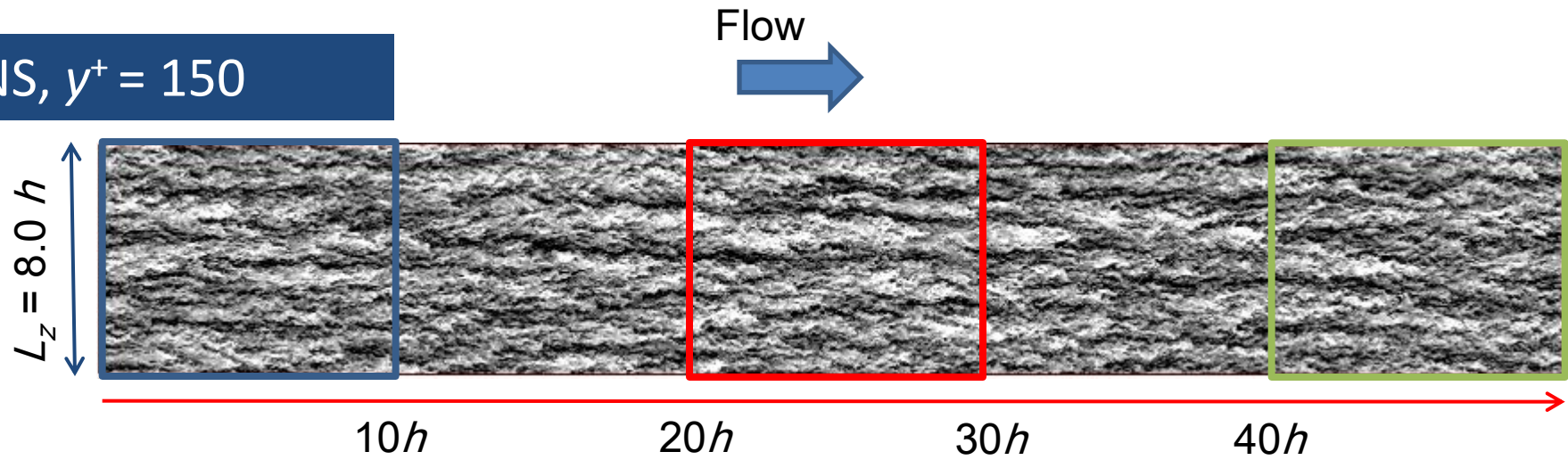
DNS Frozen turbulence, $y^+ = 150$



凍結乱流とDNSとの差異は、 $L_x > 20h$ になると可視化によっても明確に確認できる。

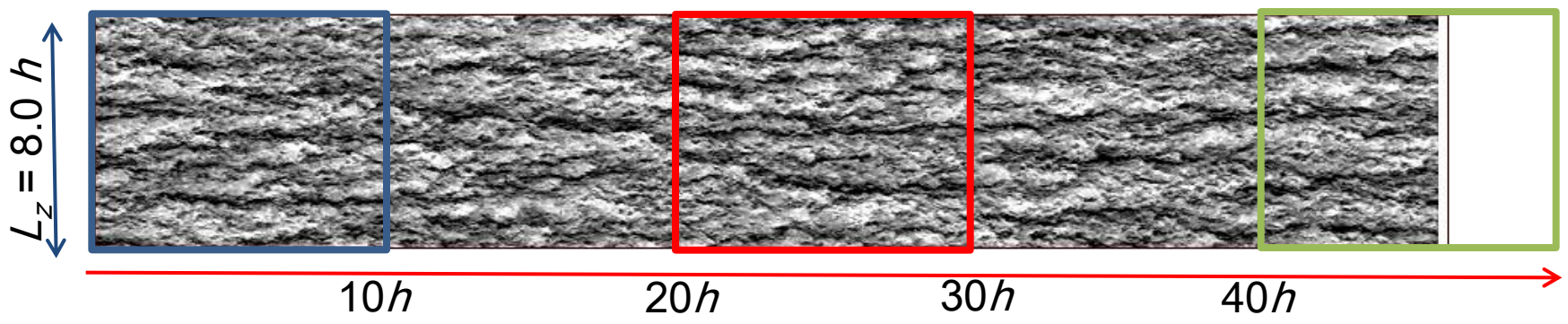
Streamwise turbulent velocity: log layer, $Re_\tau=1000$

DNS, $y^+ = 150$



Color contour : $-4(\text{black}) < u^+ < 4(\text{white})$

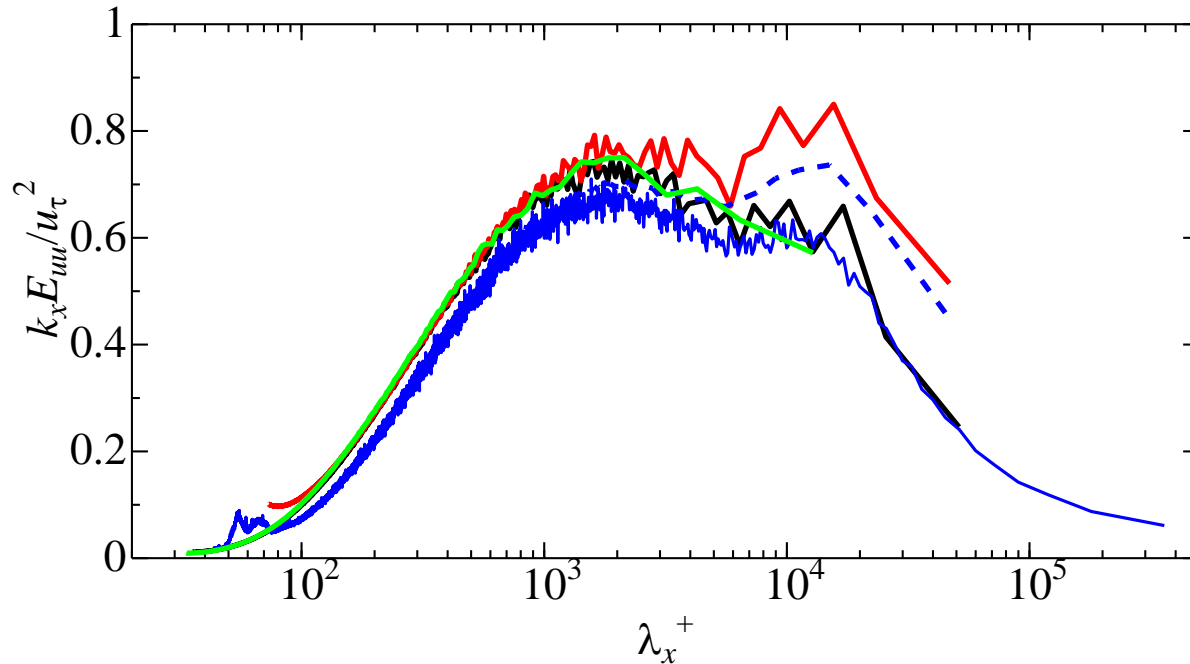
DNS Frozen turbulence, $y^+ = 150$



凍結乱流とDNSとの差異は、 $L_x > 20h$ になると可視化によっても明確に確認できる。

凍結乱流仮説の検証

PMS : 対数層 (サンプリング長の影響)



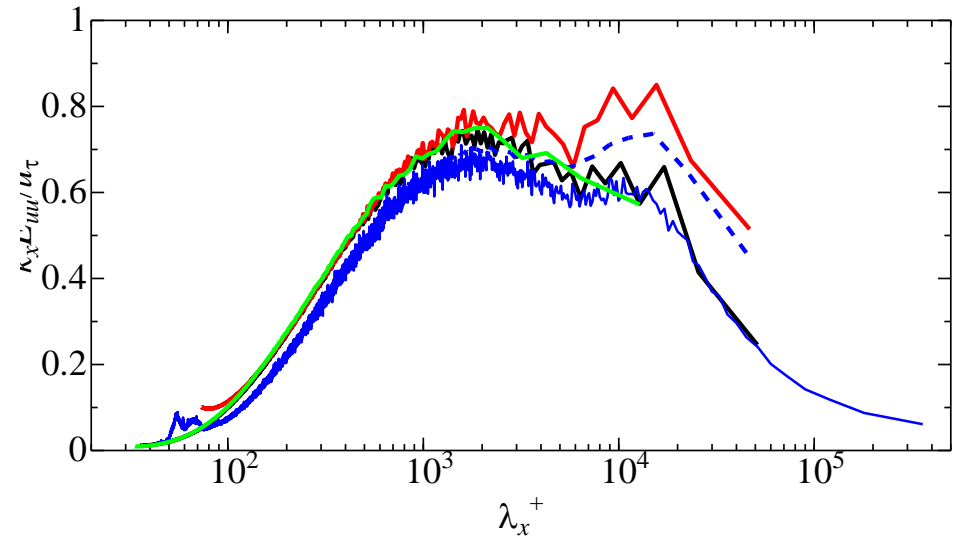
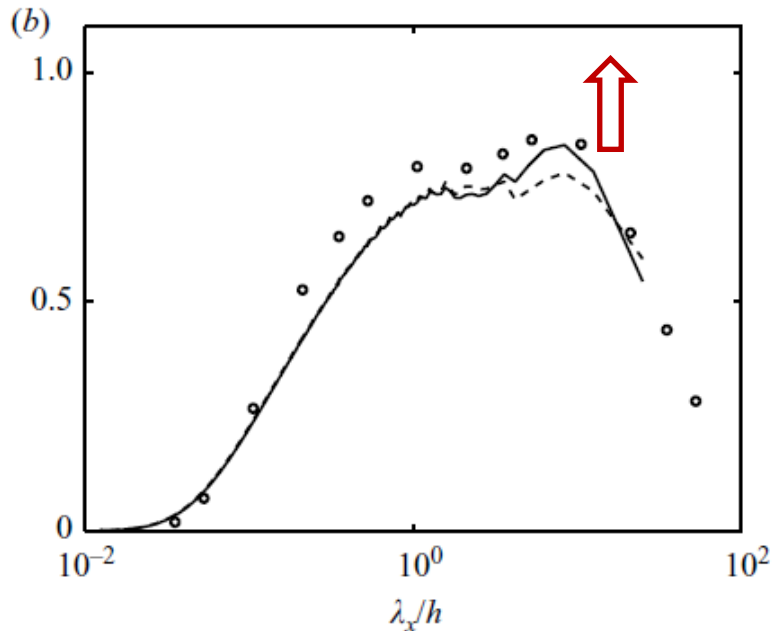
実験データにおける、
データサンプリング長を
DNSと同程度とする。



実験データにおいても
第2ピークの過剰評価を
確認

- $y^+ = 150$
- DNS $L_x = 51.2h$
- DNS Frozen turbulence $T^+ = 2688$
- Exp.
- - - Exp. $T^+ = 2605$
- DNS $L_x = 12.8h$

PMSの第2ピークの過剰評価に関する推測



$y^+=150$

— DNS $L_x=51.2h$

— DNS Frozen turbulence $T^+=2688$

— Exp.

- - - Exp. $T^+=2605$

— DNS $L_x=12.8h$

Delalamo&Jimenezと同様にPMSにおける第2ピークの過剰評価を確認
しかし、その原因は凍結乱流の精度というよりも、サンプリング長の短さが原因

さらに2倍程度のデータベース構築が必要(300TB?)

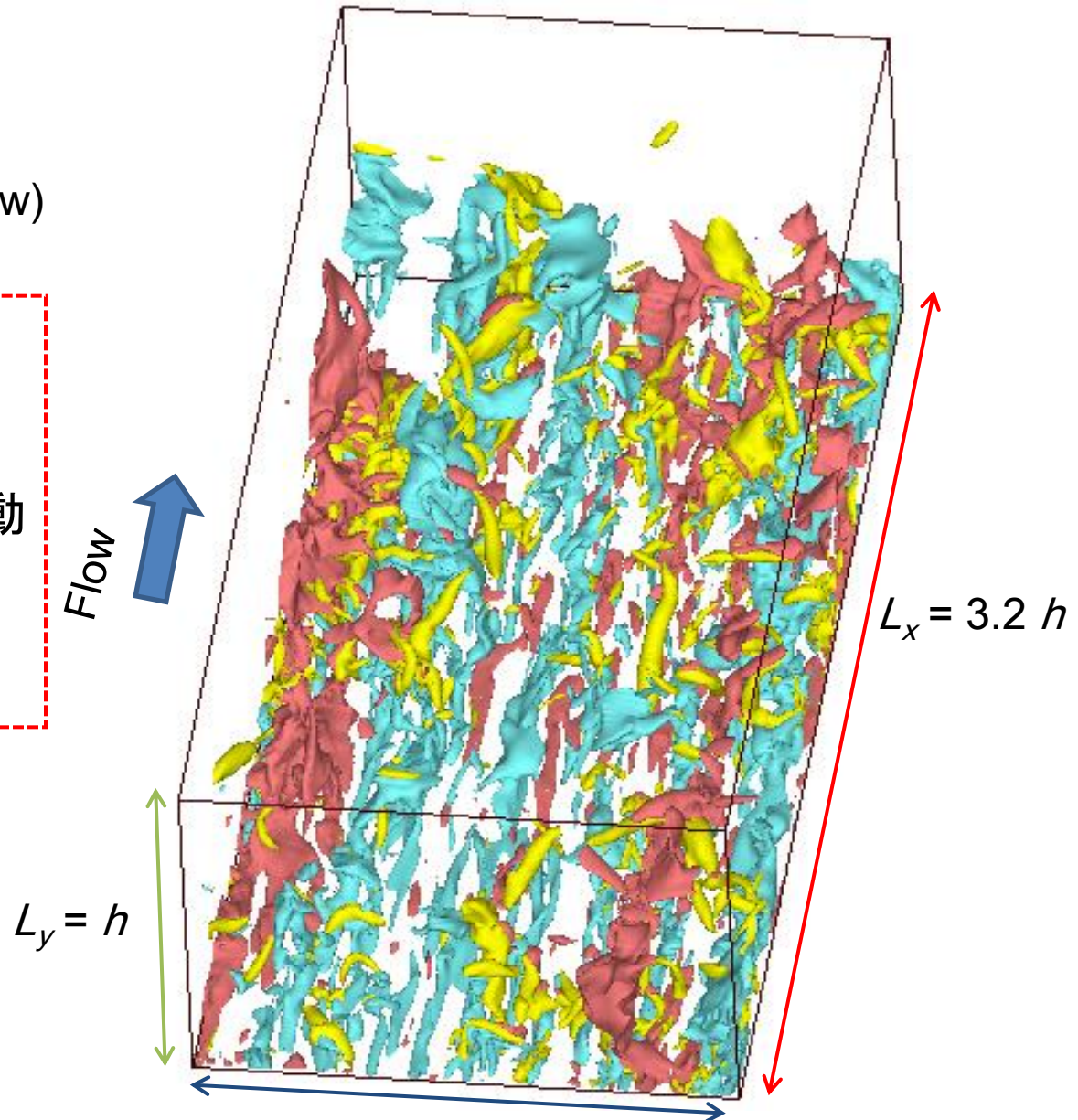
大規模直接数値計算における課題

Iso-surface : $u^+ = 4$ (red)
Iso-surface : $u^+ = -4$ (blue)
Iso-surface: $p^+ = -5$ (yellow)

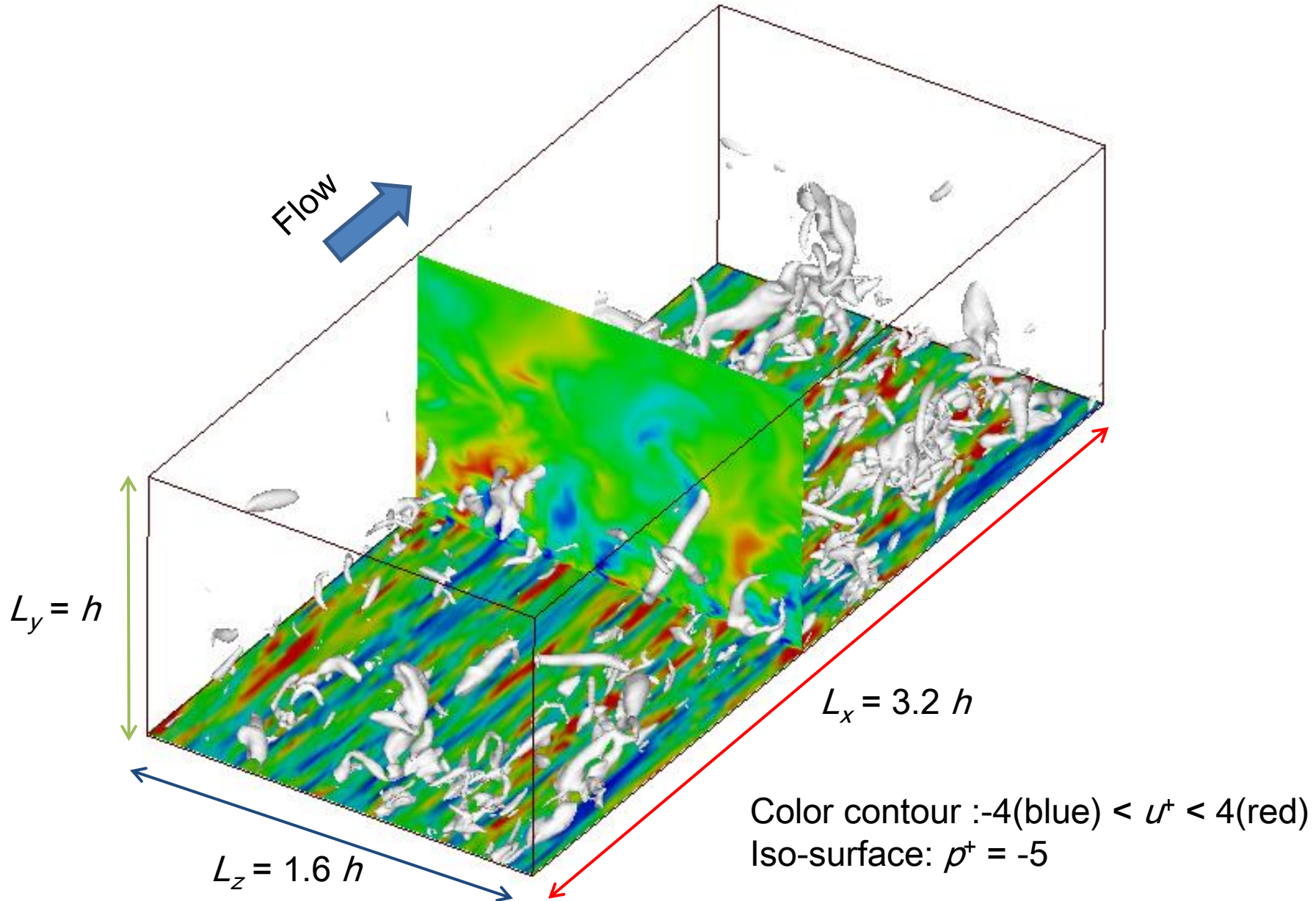
140TBを越すデータの可
視化及び動画化



大規模組織乱流構造の動
力学を解析したい！
(現状は一部を切り出し、
全体を見たことがない)

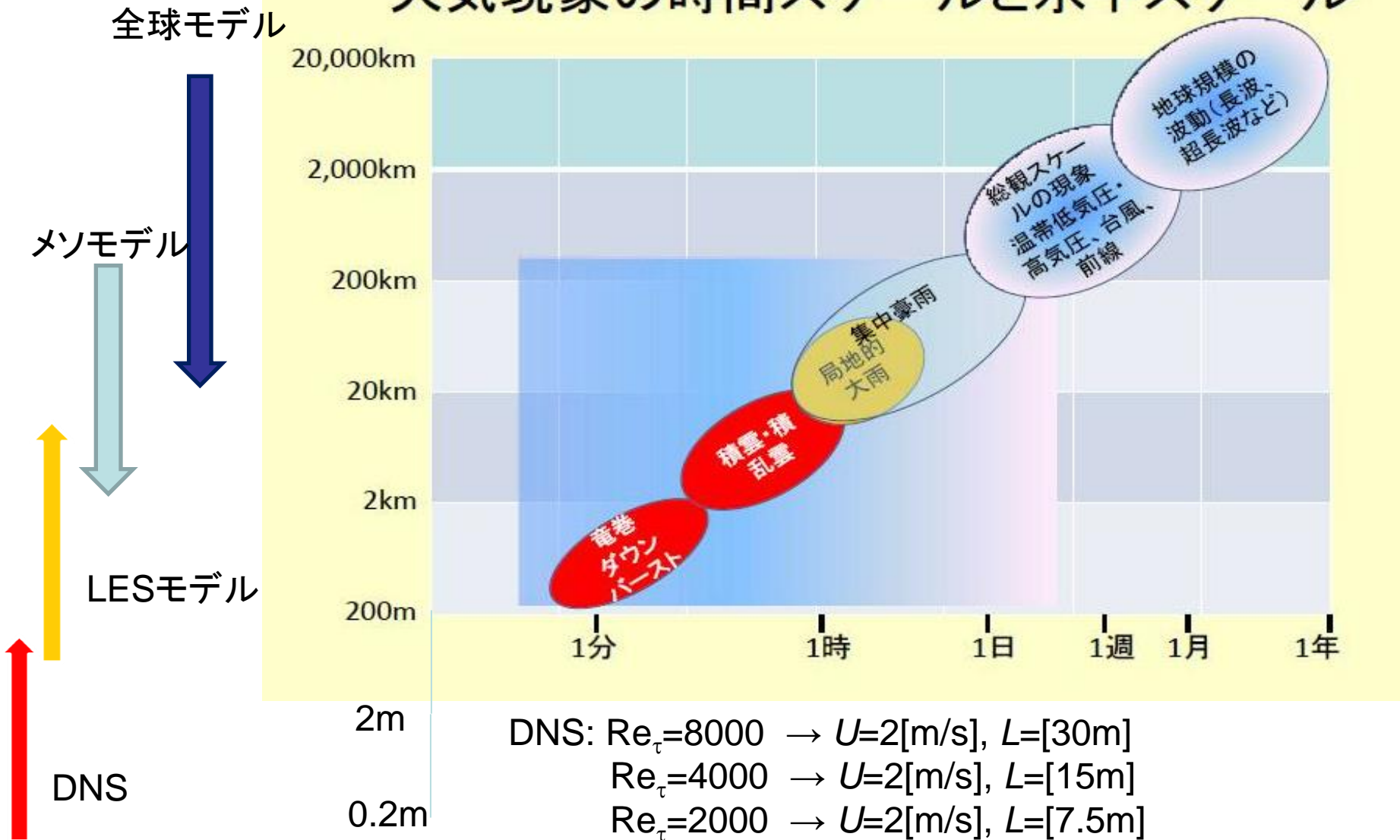


大規模直接数値計算における課題



気象シミュレーション→流体計算

大気現象の時間スケールと水平スケール



まとめ

○マルチパラメータサーベイ型シミュレーション及び名古屋大学HPCプロジェクトを活用し、従来困難であった高レイノルズ数乱流場の4次元高精度データベース構築を達成した。この達成には、各拠点システムにおける最適かつ高性能なシステムを複合利用できたことが大きい。

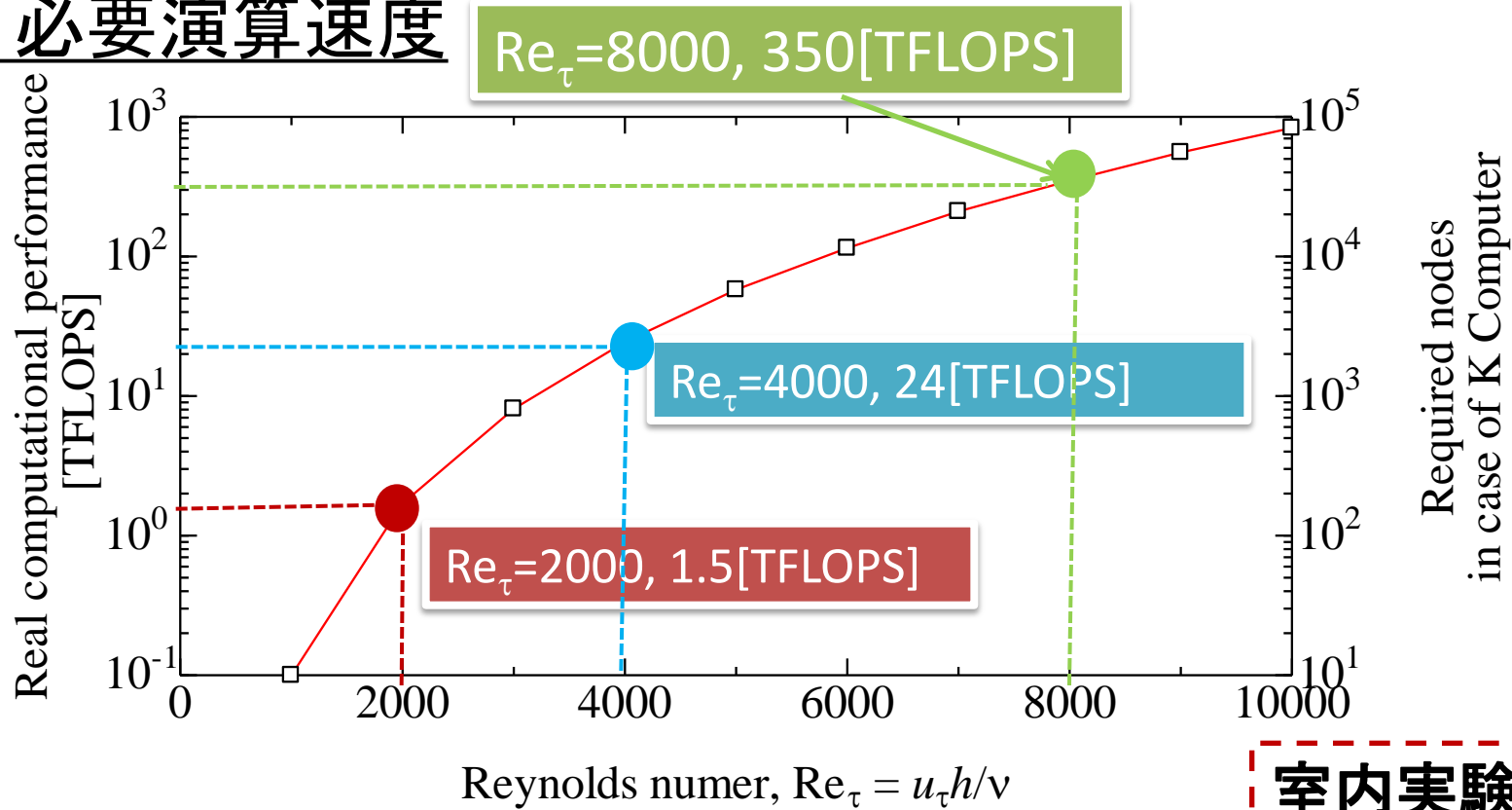
○構築データベースに基づき、実験的手法において不可欠な凍結乱流の仮説を検討した。その結果、従来の問題点と同様の結果を確認したが、その原因は、凍結乱流の仮説ではなく、データ長の短さに起因していると推測できる。

→その検討にはさらなるデータベースの蓄積が不可欠

○凍結乱流仮説の実用的な応用、気象観測データ解釈へのLESデータの活用。小スケール運動の計算精度の検証方法の確立。

データベース構築に必要な実効演算速度

1) 必要演算速度



elapsed time = 3 weeks, $N_{flow} (=U_b T/L_x) = 10$
 U_b : bulk velocity, T : time integration length,
 $L_x = 16h$, h : channel half length

室内実験結果より
 $Re_\tau = 8000$ 規模の
データが必要

見積方法 $L_x^+ = 16 Re_\tau$, $U_b^+ = \{2/[0.73*(2Re_\tau)^{-1/4}]\}^{4/7}$

→ $N = 10L_x^+ / (U_b^+ \Delta t^+)$: 必要タイムステップ数、さらに $Re_\tau = 1000$ 時の Δt^+ , 1タイムステップあたりの時間, FLOPS値 より、総計算時間を概算