

大規模数値計算による壁乱流の 理解とその進展

名古屋大学工学研究科 辻 義之

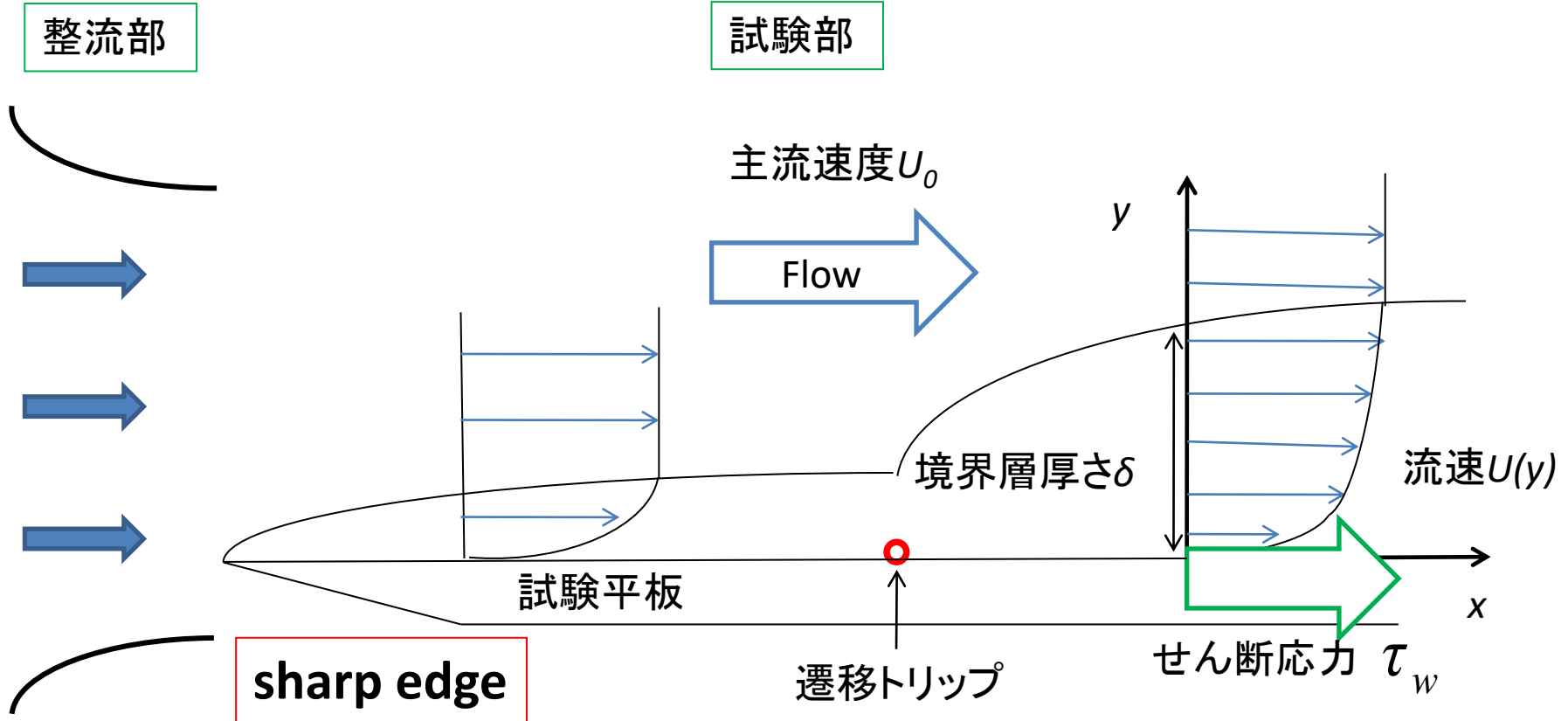
山梨大学工学部 山本義暢

名古屋大学情報基盤センター 高橋一郎

地球水循環研究センター 坪木和久

境界層

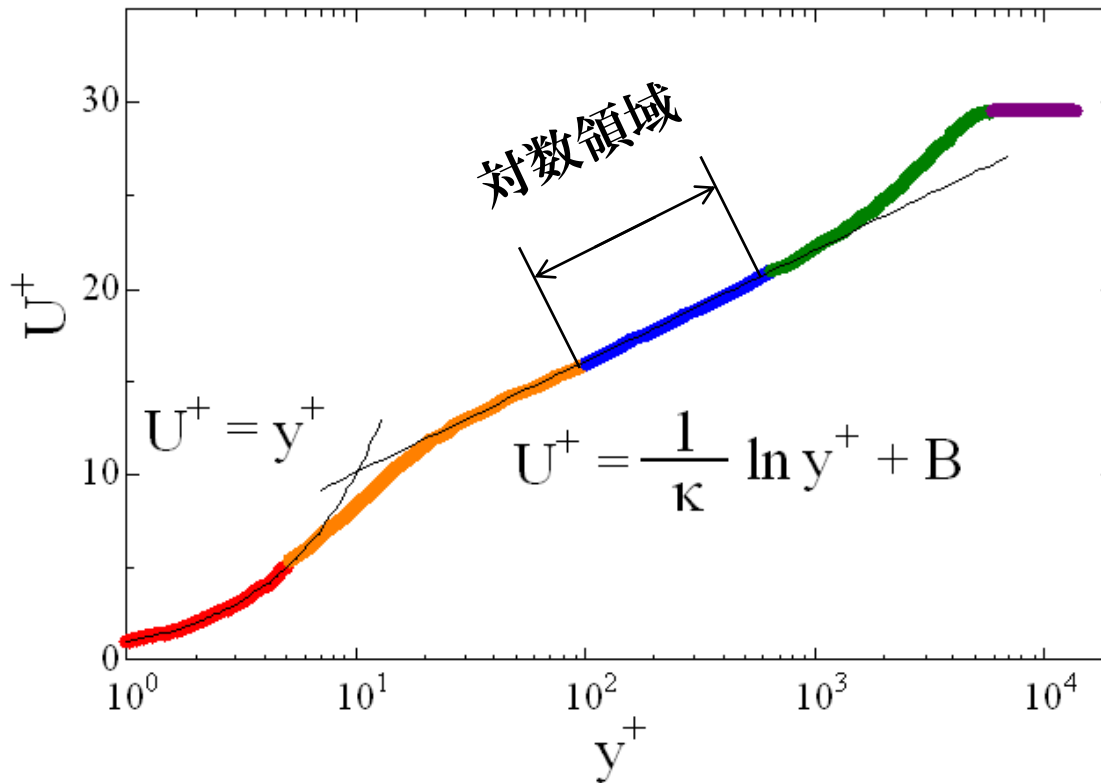
平板先端から発達する境界層



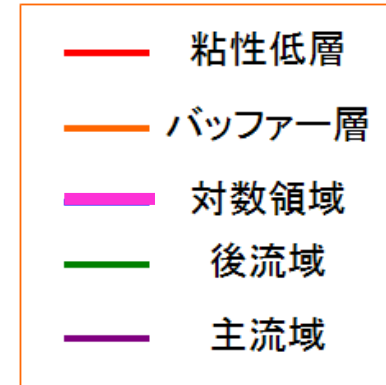
整流部から送られた流れが試験平板が切りとられ、先端から境界層が発達、遷移トリップにより乱流へと遷移する。

背景

* 平板乱流境界層における平均速度分布は下図に示すような領域分けがされている。



一般的に Re_θ が低い場合には、対数領域が現れないと言われている。



直接数値計算の概要

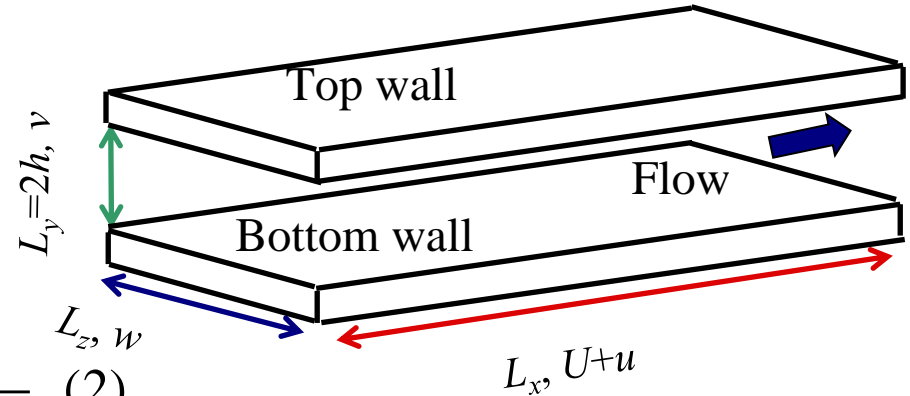
基礎方程式

○連続式

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

○運動方程式

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



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)

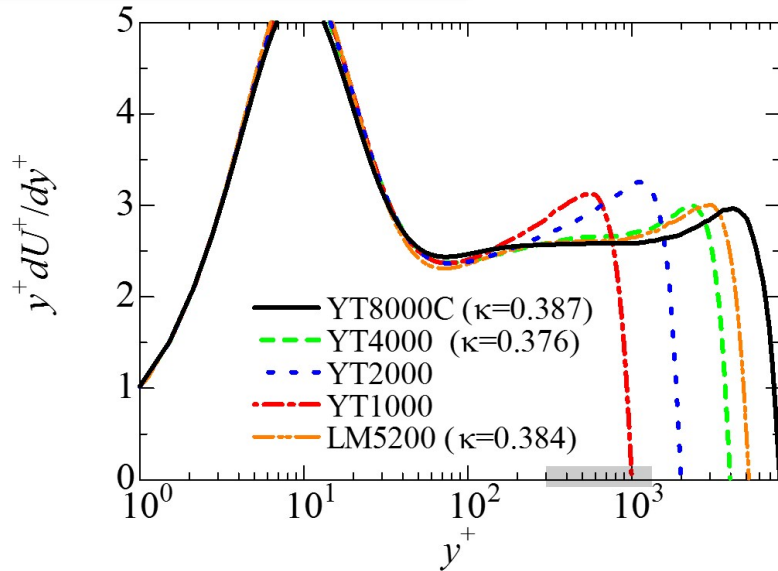
○空間: フーリエ・スペクトル法(x, z方向)
2次精度中心差分(y方向)

ES, 京, 不老, 富岳

Re_τ	L_x/h	L_y/h	L_z/h	N_x	N_y	N_z	Δx^+	Δy^+	Δz^+
4000	16.0	2	6.4	5760	2048	3072	11.1	0.6-8.0	8.3
8000	16.0	2	6.4	7200	4096	5760	17.8	0.6-8.0	8.9

Logarithmic variation of mean velocity

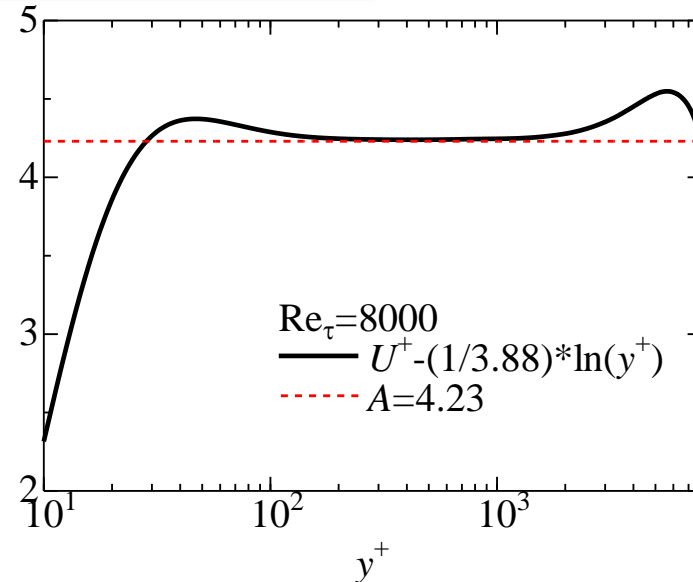
von Kármán constant



$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B$$

$$\Rightarrow \frac{dU^+}{dy^+} = \frac{1}{\kappa y^+} \quad \therefore \frac{1}{\kappa} = y^+ \frac{dU^+}{dy^+}$$

additive constant

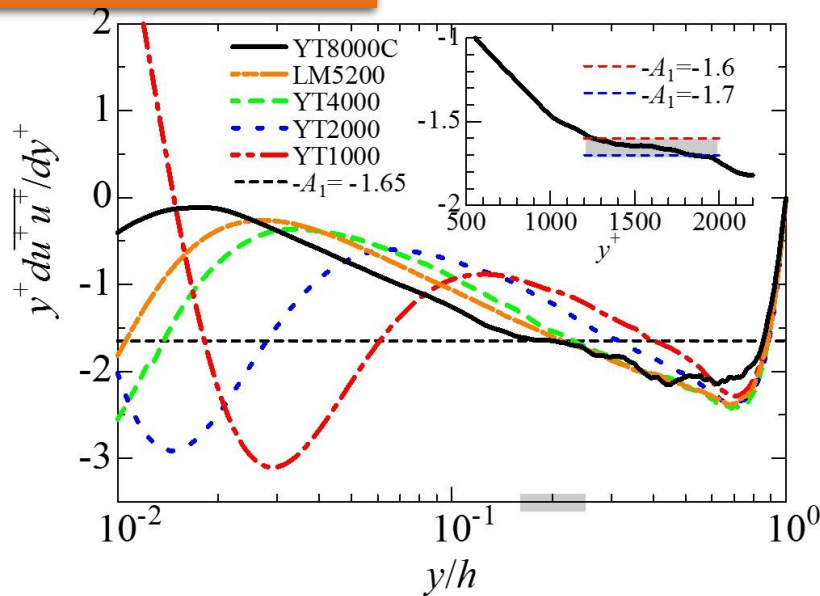


$$U^+ - \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) = B$$

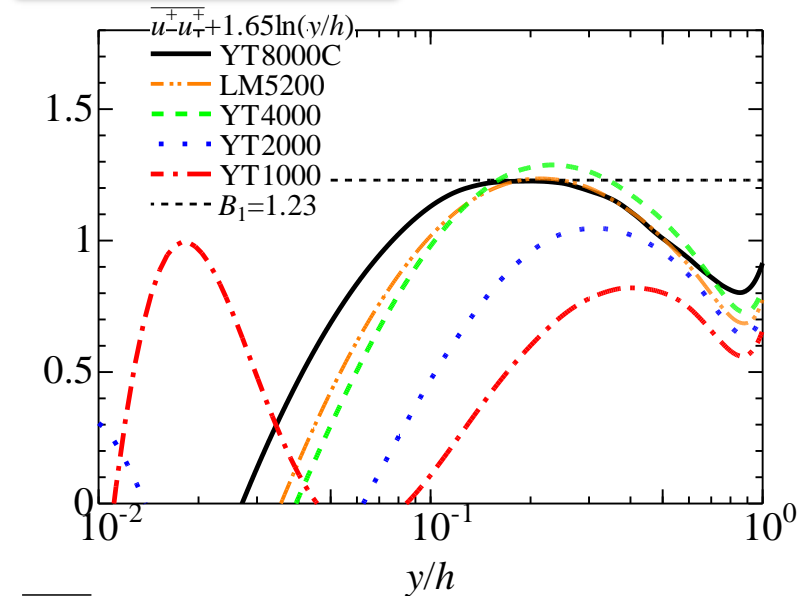
In $Re_{\tau} = 8000$,
 $\kappa = 0.387$, $B = 4.21$
 between $300 < y^+ < 1100$ ($y/h = 0.14$)

Logarithmic variation of streamwise Reynolds stress

von Kármán constant



additive constant



$$\overline{u^+ u^+} = B_1 - A_1 \ln(y/h)$$

$$\Rightarrow y^+ \frac{d\overline{u^+ u^+}}{dy^+} = -A_1$$

$$\overline{u^+ u^+} + A_1 \ln(y/h) = B_1$$

In $Re_{\tau} = 8000$,
 $A_1 = 1.65$, $B_1 = 1.23$
 between $1200 (y/h = 0.15) < y^+ < 2000 (y/h = 0.25)$

Comparison with experimental results

$$\overline{u^+ u^+} = B_1 - A_1 \ln(y/h)$$

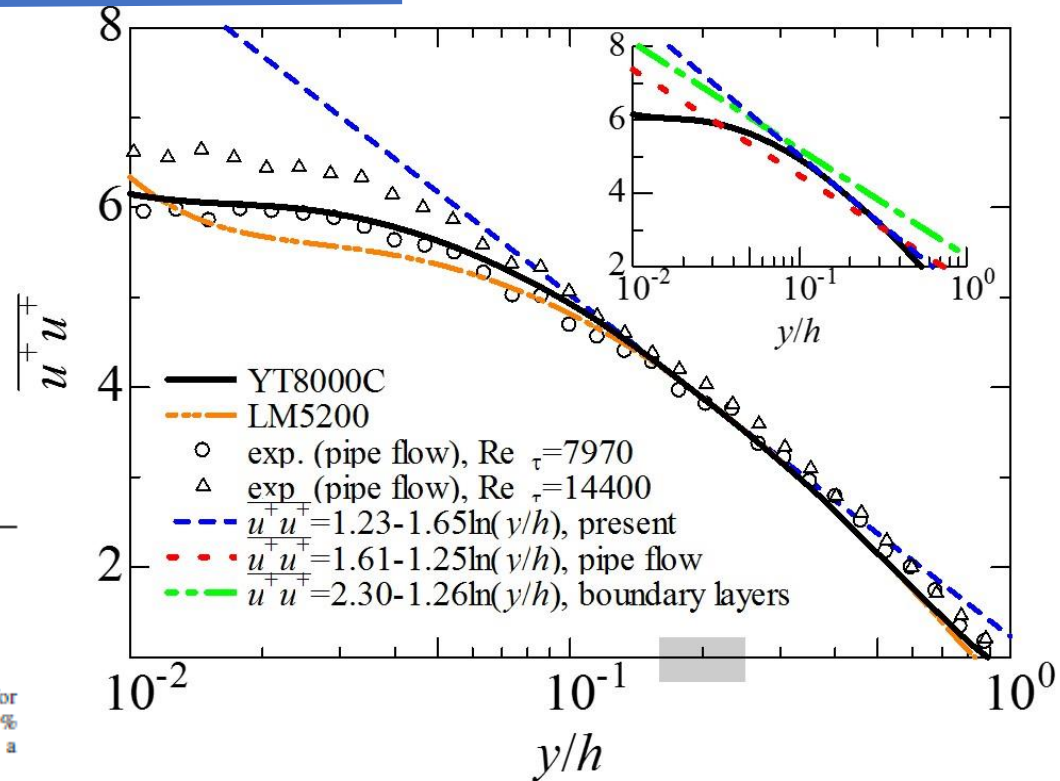
Present :channel (DNS) at $Re_\tau=8000$

$A_1 = 1.65, B_1 = 1.23$
 between $1200(y/h=0.15) < y^+ < 2000$
 ($y/h=0.25$)

Marusic et al. JFM(2013)

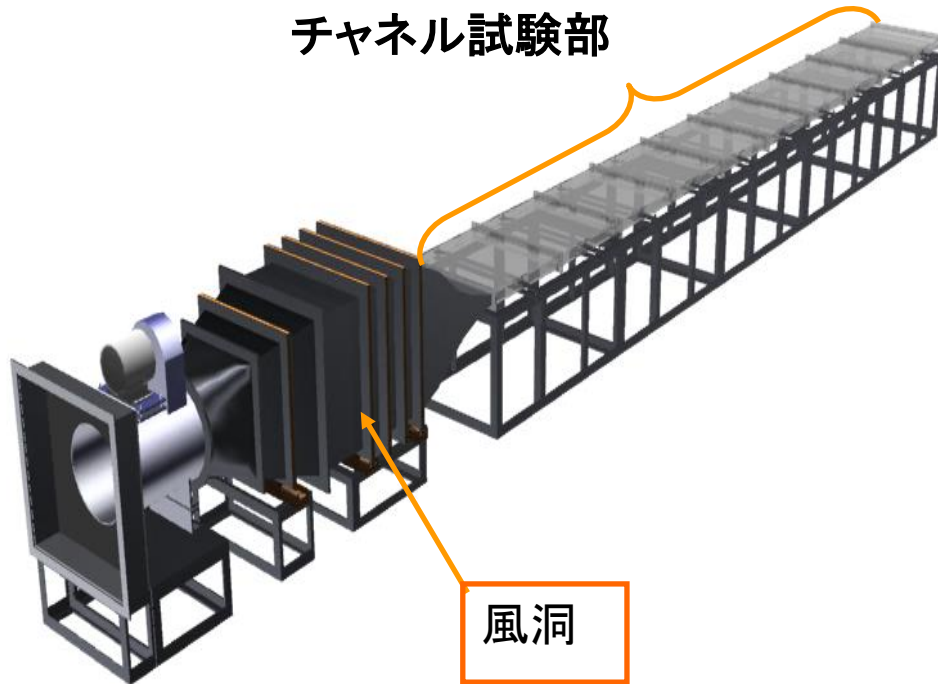
Facility	A_1	B_1	κ	A
LCC	1.21 ± 0.08	2.20 ± 0.25	0.384*	4.17*
Melbourne	1.26 ± 0.06	2.30 ± 0.18	0.387 ± 0.004	4.32 ± 0.20
Superpipes	1.23 ± 0.05	1.56 ± 0.16	0.391 ± 0.004	4.34 ± 0.19
SLTEST	1.33 ± 0.17	2.14 ± 0.40	0.410 ± 0.028	4.44 ± 1.83

TABLE 2. Parameters in (1.1) and (1.2) obtained from least-squares error curve fit for data in the region $3Re_\tau^{1/2} < z^+ < 0.15Re_\tau$. The uncertainty estimates are based on 95% confidence bounds from the curve-fitting procedure. An asterisk denotes values where a composite formulation was used to determine U_τ with these assumed constants.



The log-region in channel at $Re_\tau=8000$ is located around $y/h \approx 0.2$. By contrast Hultmark et al. PRL(2012) and Marusic et al. JFM(2013) reported that the log-regions are located around $y/h \approx 0.1$.

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	30.0 m/s

チャンネル高レイノルズ数実験

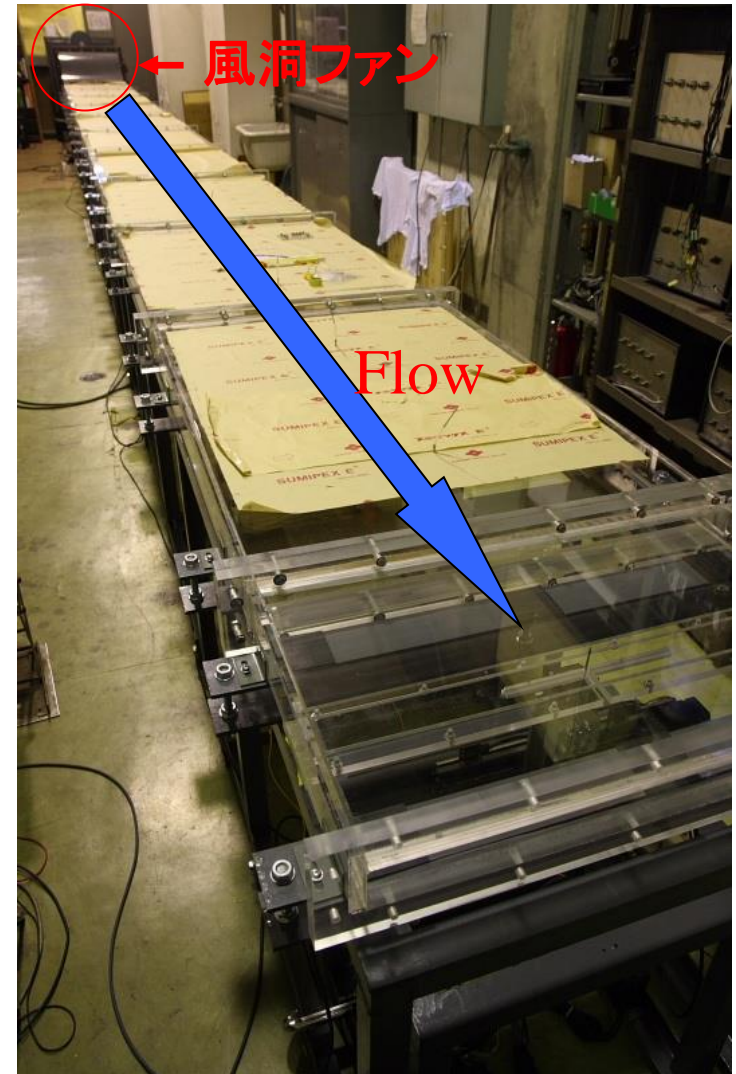
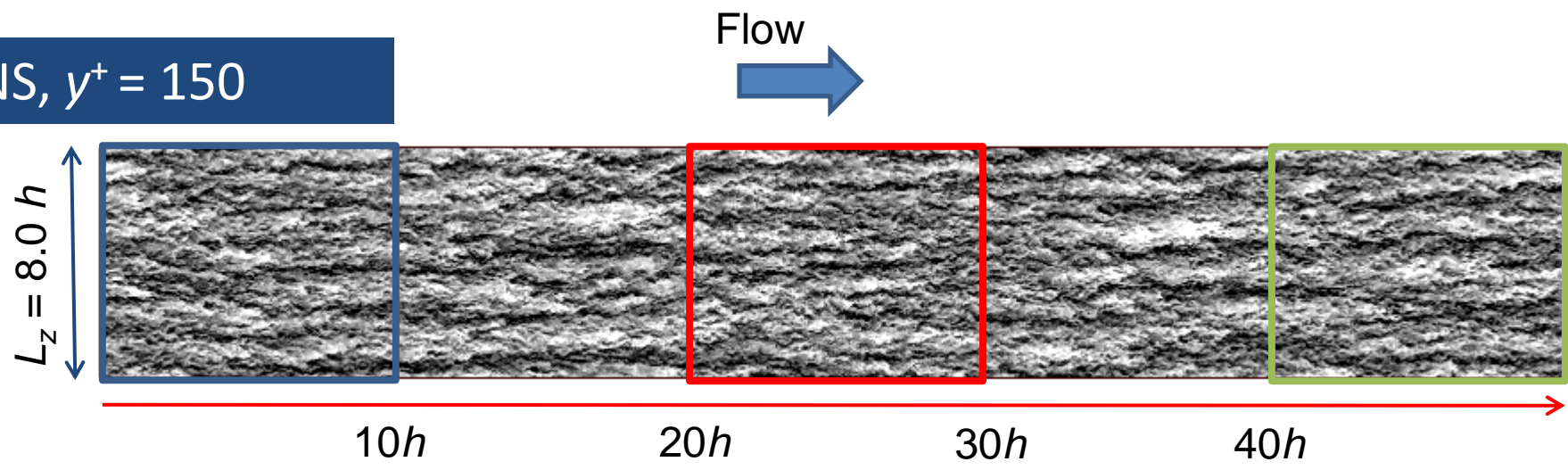


Fig. 測定用風洞全体図

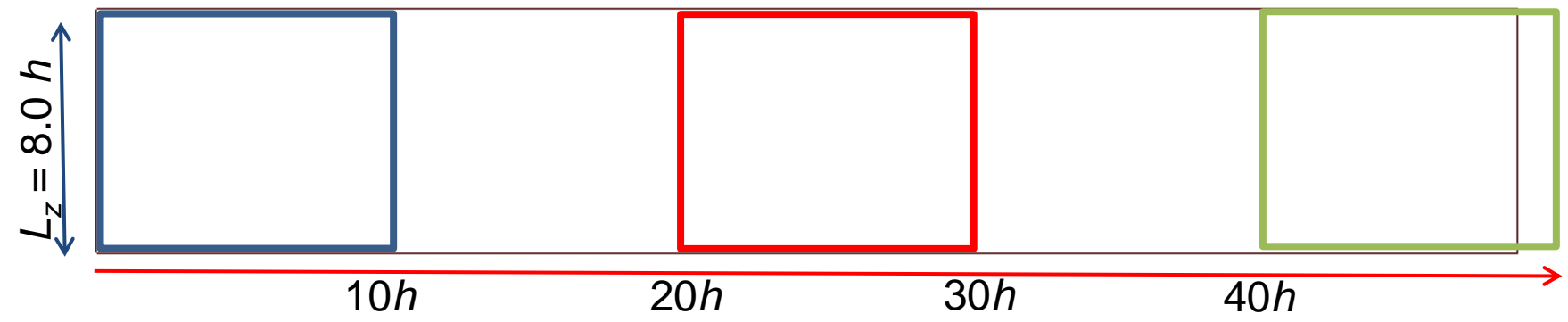
Streamwise turbulent velocity: log layer, $Re_\tau=1000$

DNS, $y^+ = 150$



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

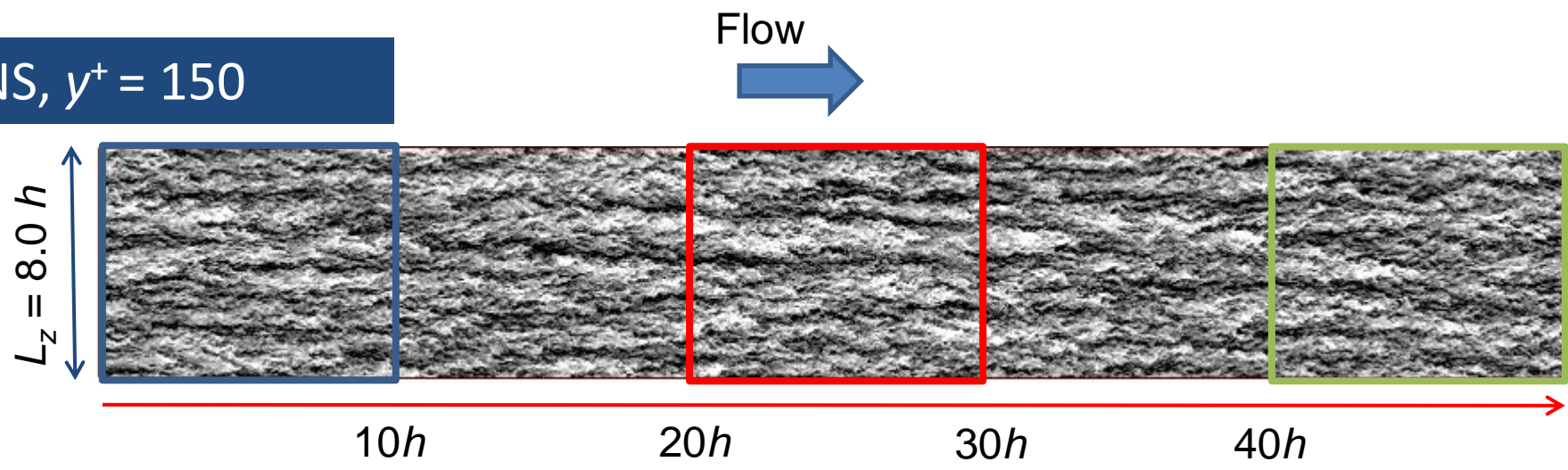
DNS Frozen turbulence, $y^+ = 150$



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。

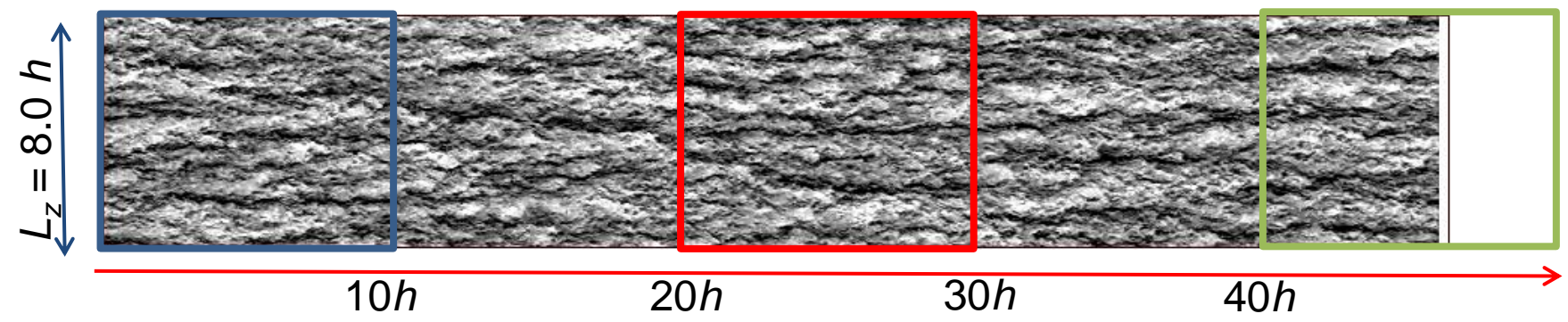
Streamwise turbulent velocity: log layer, $Re_\tau=1000$

DNS, $y^+ = 150$



DNS Frozen turbulence, $y^+ = 150$

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



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。

気象スケールの大規模構造

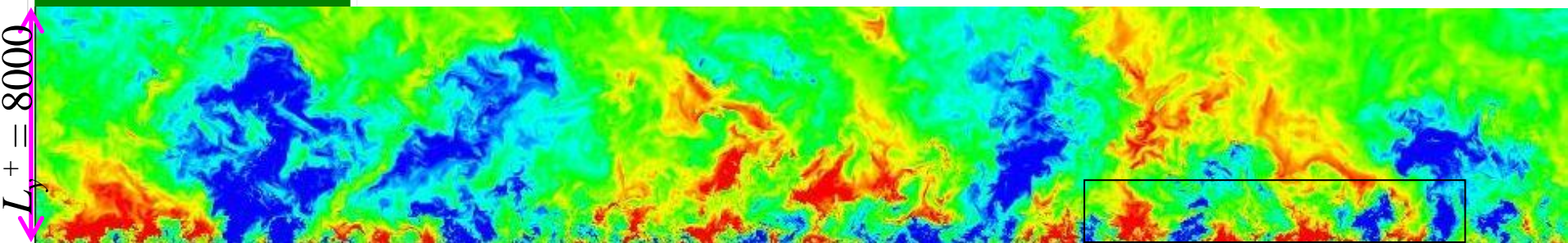


FIG. 1. Photograph of Lake Geneva, by *Olivier Staiger at klipsi.com*, documenting the special natural event that took place in February 2012, and pictorial evidence for the existence of coherent structures (Reprinted from source: Olivier Staiger at www.klipsi.com).

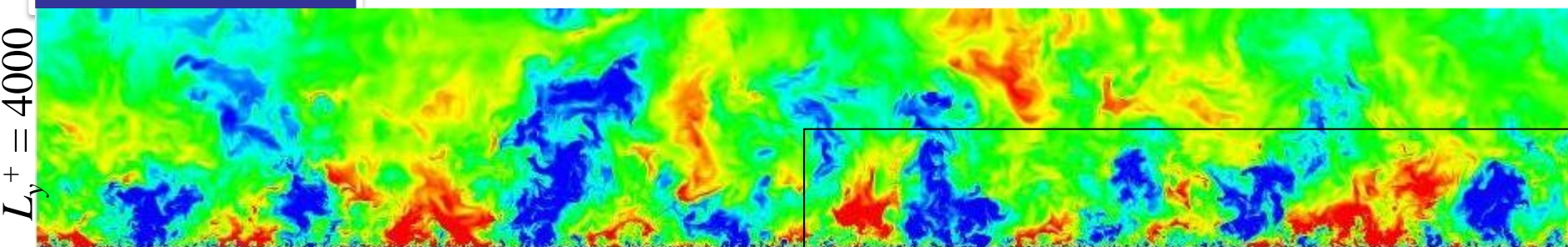
乱流構造 (end view)

Blue → Red
 $-1.2 < u^+ < 1.2$

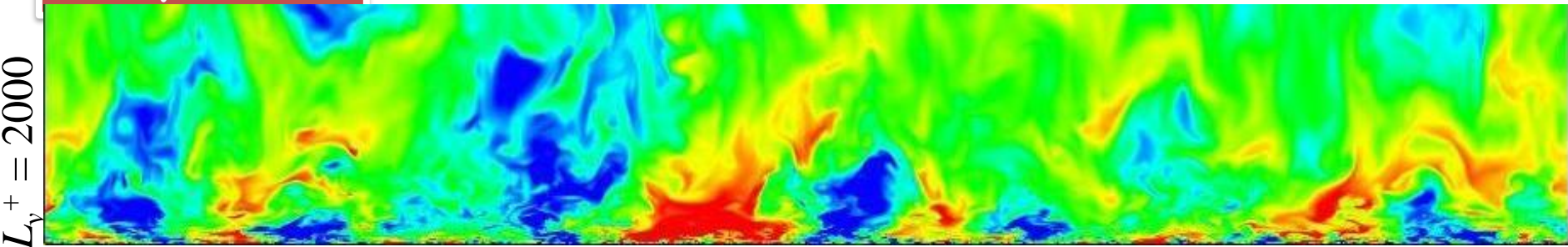
$Re_\tau = 8000$



$Re_\tau = 4000$



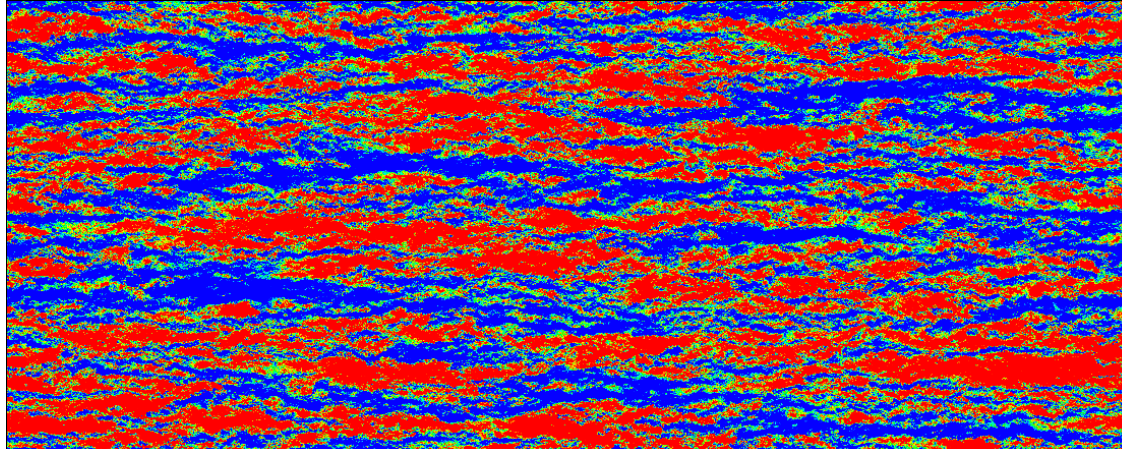
$Re_\tau = 2000$



$L_z^+ = 12800$

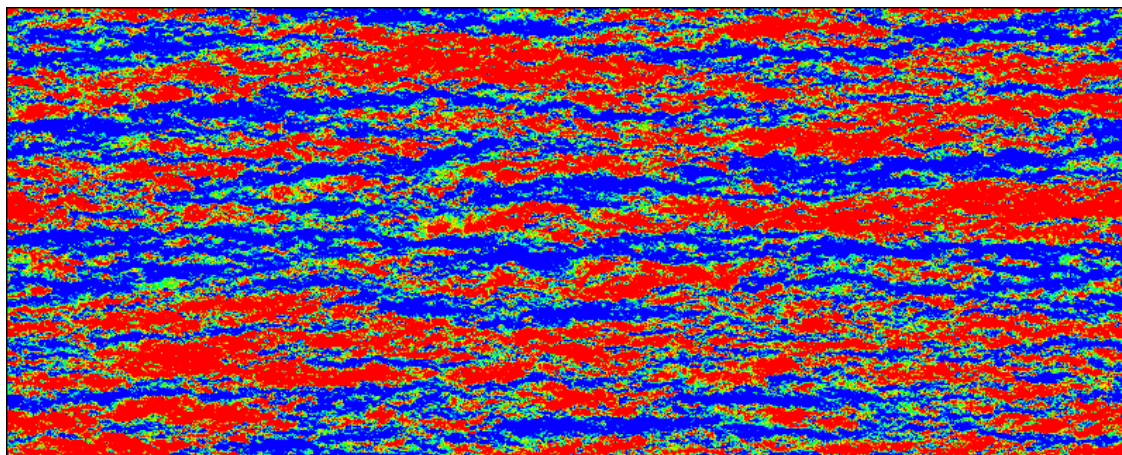
$y=0.2h$

$Re_\tau=8000$



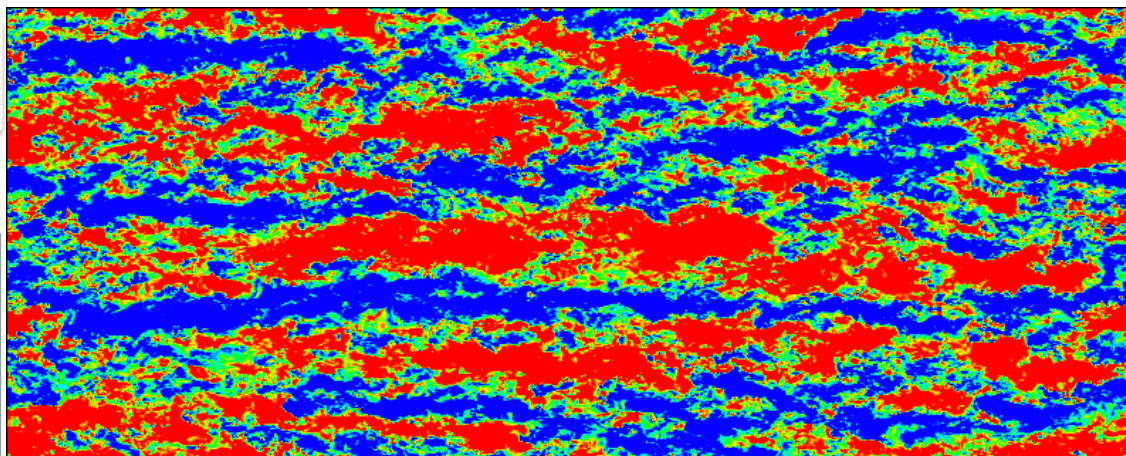
Blue \rightarrow Red
 $-1.2 < u^+ < 1.2$

$Re_\tau=4000$



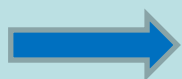
Blue \rightarrow Red
 $-1.2 < u^+ < 1.2$

$Re_\tau=2000$



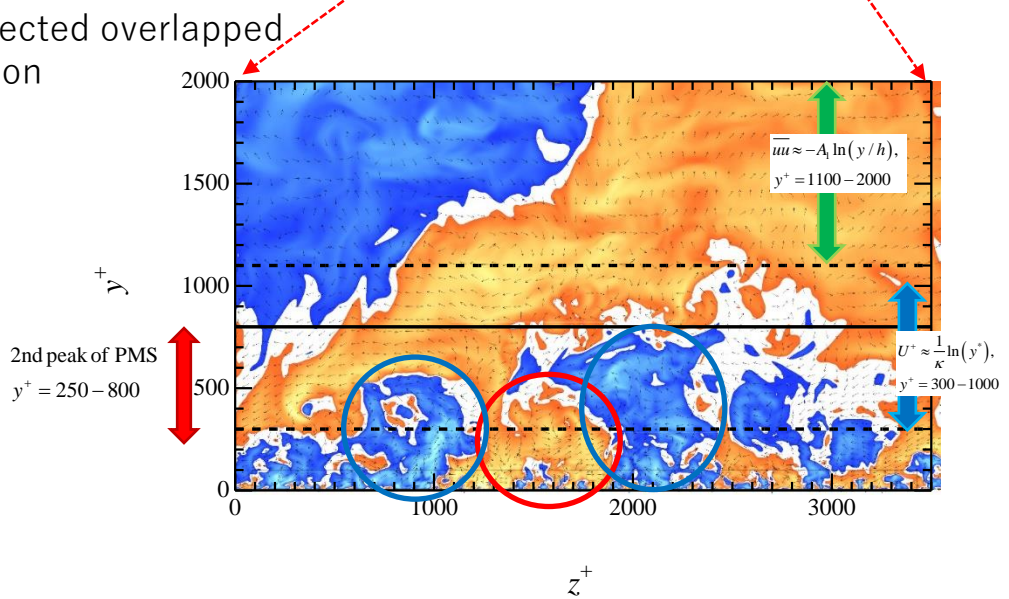
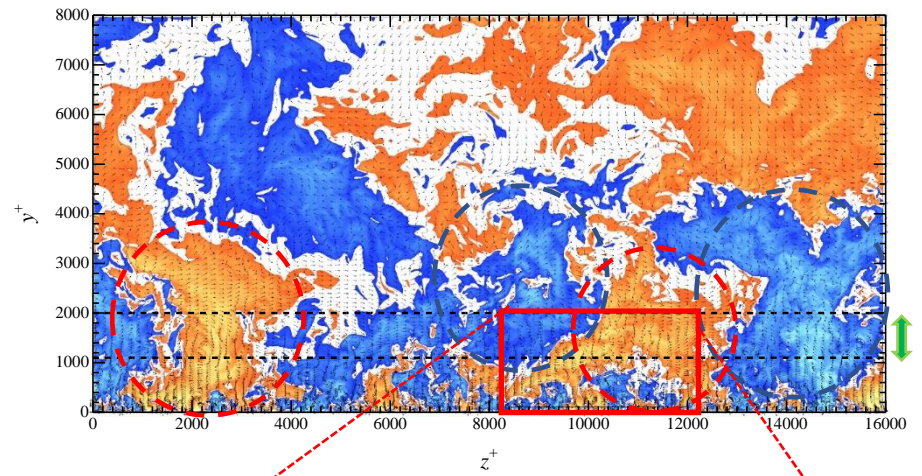
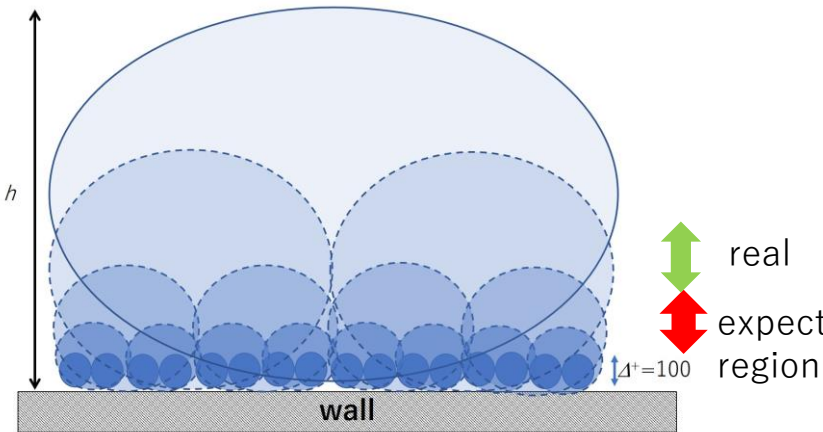
Blue \rightarrow Red
 $-1.2 < u^+ < 1.2$

乱流構造(top view)



Flow

Eddies at logarithmic region of streamwise Reynolds stress

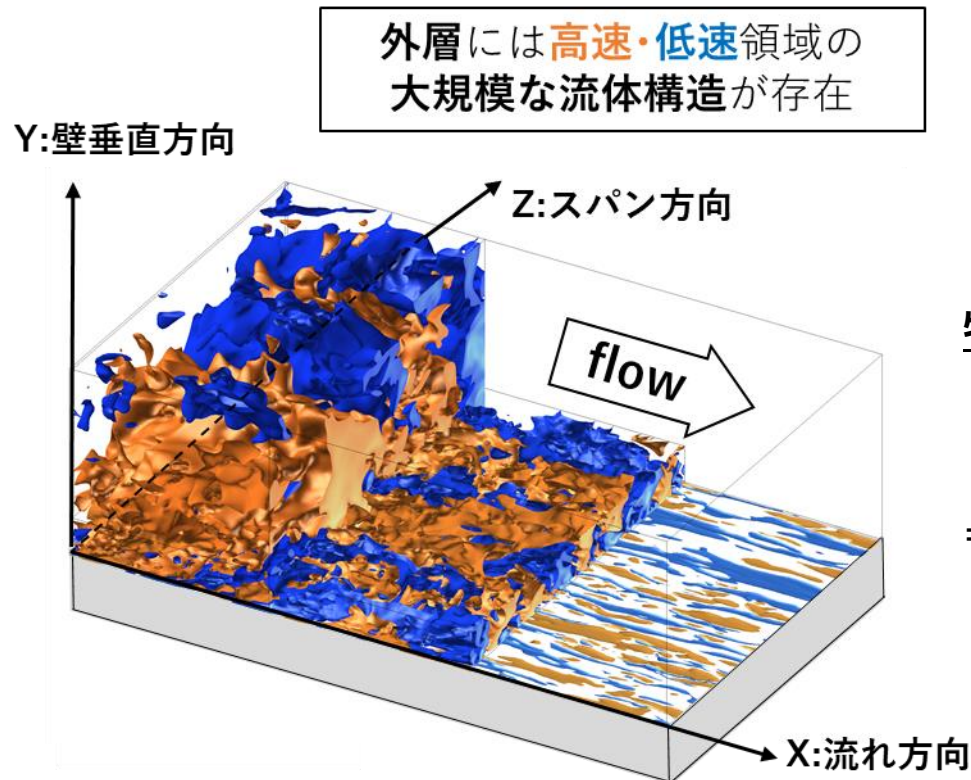


The logarithmic variation of the streamwise Reynolds stress will be caused from the interaction between large-scale structures and the intermediate structures.

The modified attached-eddy hypothesis (Agostini & Leschziner PRFluids,2017) can be explained the present results?

壁面近傍の流れに関する予測式^[1]

○外層の大規模な流体構造^[2]



特異な性質

- ・従来の流体構造より遙かに大きい
- ・秩序的な振る舞いを示す

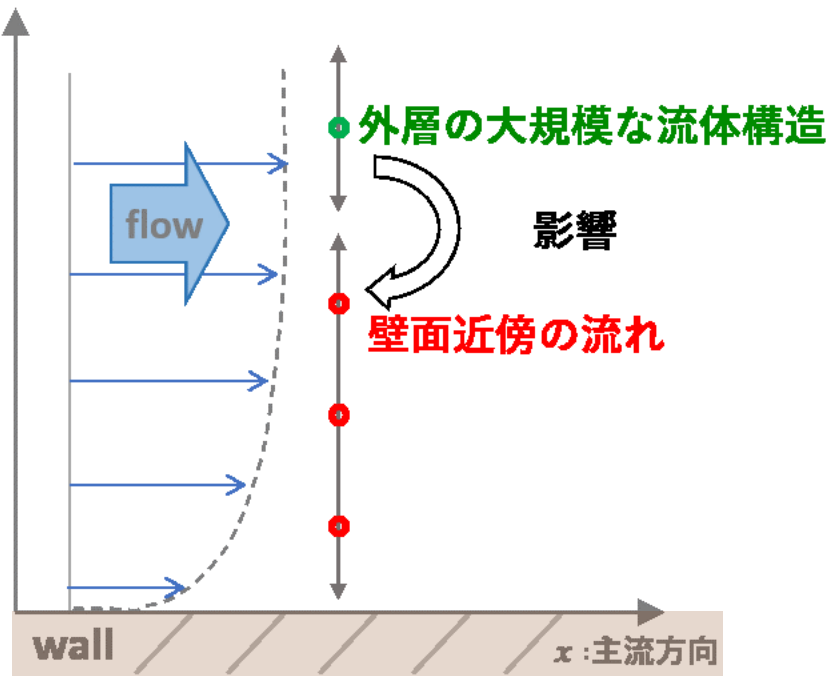
⇒多くの研究者からの関心を集める

[1] Mathis, R., et al., J. Fluid Mech. 628, pp311-337 (2009).

[2] 山本義暢, “高レイノルズ数乱流現象解明のための計算・実験科学研究ネットワーク形成”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 平成 28年度共同研究 終報告書, (2017)

壁面近傍の流れに関する予測式^[1]

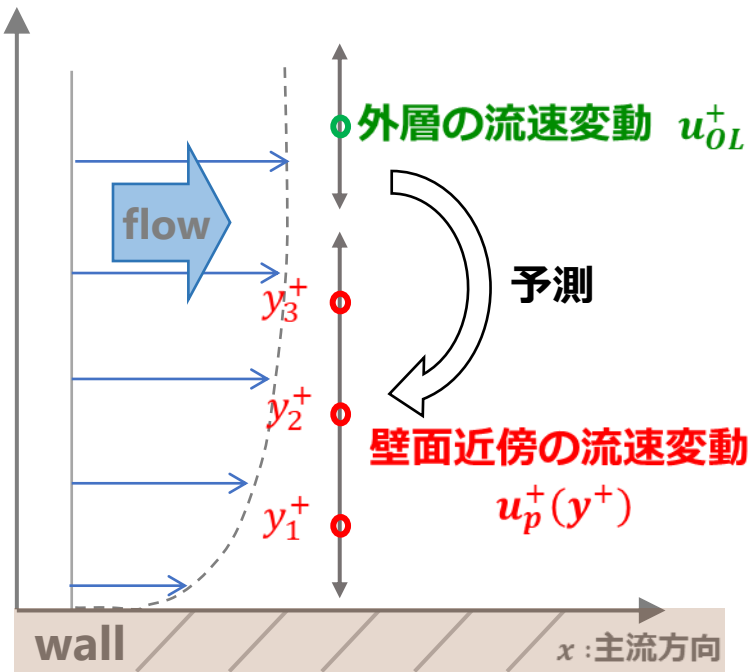
y : 壁垂直方向



壁面近傍の流れに関する予測式^[1]

外層1点の流速変動から壁面近傍全体の流速変動を予測できる

y : 壁垂直方向



$$u_p^+(y^+) = u^* \{ 1 + \beta u_{OL}^+ \} + \alpha u_{OL}^+$$

$u_p^+(y^+)$... 各壁高さ y^+ における予測流速変動
(出力)

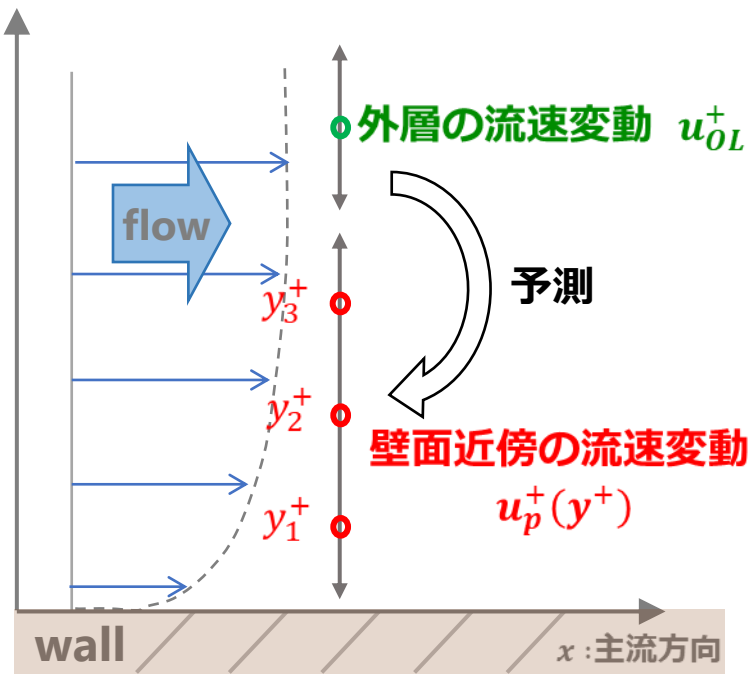
u_{OL}^+ ... 外層の大規模な流体構造による流速変動
(入力)

u^*, α, β ... 大規模な流体構造の影響に
関連するパラメータ (y^+ に依存)

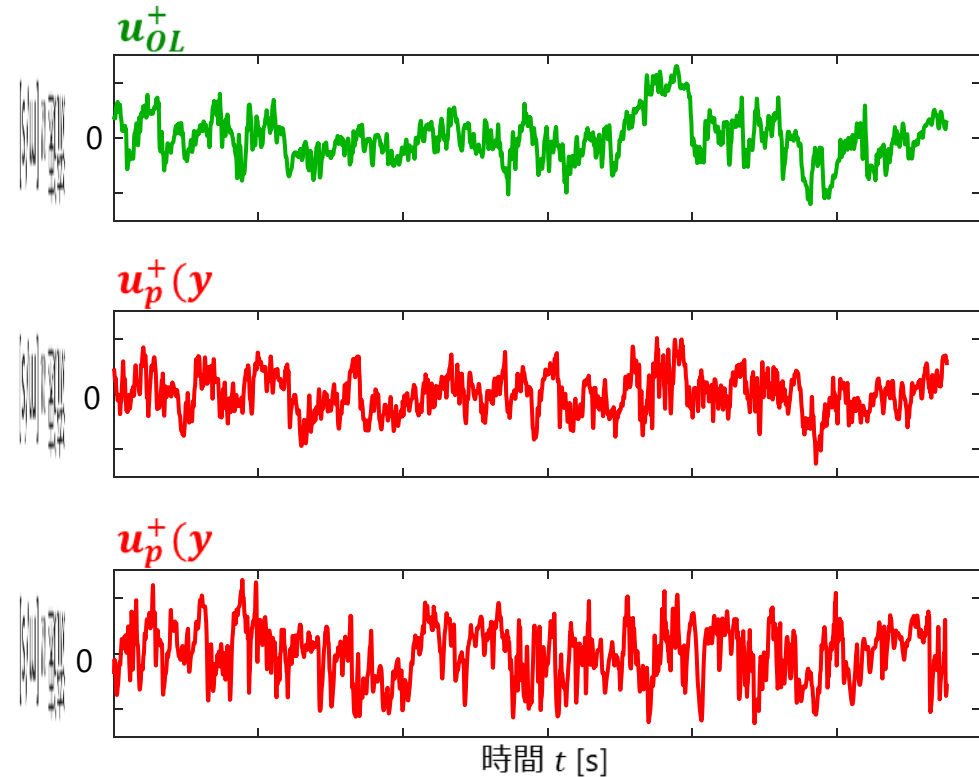
壁面近傍の流れに関する予測式^[1]

外層1点の流速変動から壁面近傍全体の流速変動を予測できる

y : 壁垂直方向

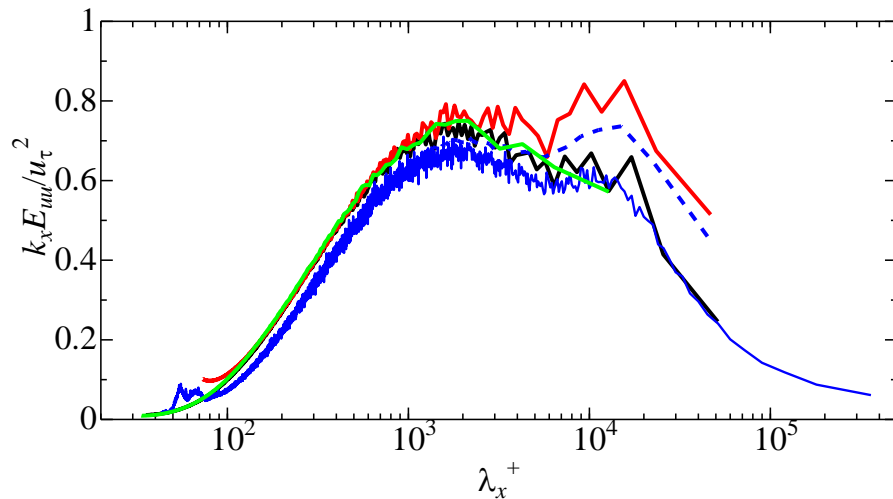


$$u_p^+(y^+) = u^* \{ 1 + \beta u_{OL}^+ \} + \alpha u_{OL}^+$$



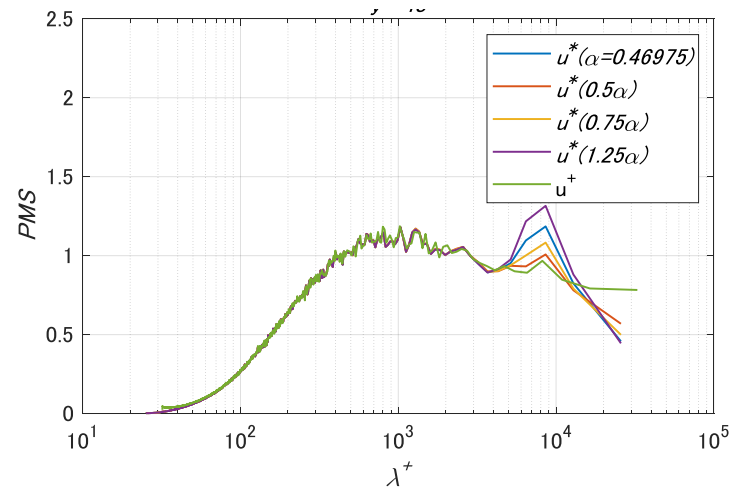
⇒ 正確な測定が困難な壁面近傍の流速変動,
壁面剪断応力の変動への更なる理解が期待

凍結乱流仮説の検証



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

凍結乱流仮説が成り立たない物理的要因は何か？



$$u_p^+(y^+) = u^* \{ \mathbf{1} + \beta u_{OL}^+ \} + \alpha u_{OL}^+$$

$u_p^+(y^+)$ … 各壁高さ y^+ における予測流速変動

u_{OL}^+ … 外層の大規模な流体構造による流速変動

u^*, α, β … 大規模な流体構造の影響に関連するパラメータ (y^+ に依存)

まとめ

○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の詳細な解析を実施した。この成果には、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、乱流構造の空間的変動に起因している。

○確率的予測法から大規模空間構造の時間変動を過大評価することが、凍結乱流仮説に影響すると考えられる。

○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データの活用について、大規模組織構造の役割をより詳細に調べる予定である。

研究成果

○名古屋大学HPCプロジェクトの成果の一部を利用し、下記の論文を出版することができました。この場を借りてお礼申し上げます。

Yuki Wada, Noriyuki Furuichi, Yoshiyuki Tsuji, Correction method of measurement volume effects on time-averaged statistics for laser Doppler velocimetry, European Journal of Mechanics / B Fluids, vol.91 (2022) pp.233–243.<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2021.10.007>

名古屋大学情報基盤センター 片桐 孝洋教授から、計算コードの高速化のために、数多くの有益な助言を賜りました。お礼申し上げます。

高橋一郎氏には、長年にわたり、支援をしていただいています。
(コールドストレージ(400T)、可視化システム)

より高レイノルズ数(世界最大)へのチャレンジを継続したい。