

2016.7.26  
渦の特徴付け

# 渦と乱流工学

東京大学 生産技術研究所  
長谷川洋介

# 二つの流れの状態

現象を支配するパラメータ

- 流れの速度スケール  $U$
- 流れの長さスケール  $L$
- 流体の粘性  $\mu$

$$\frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} \sim \frac{O(\rho U^2 / L)}{O(\mu U / L^2)}$$

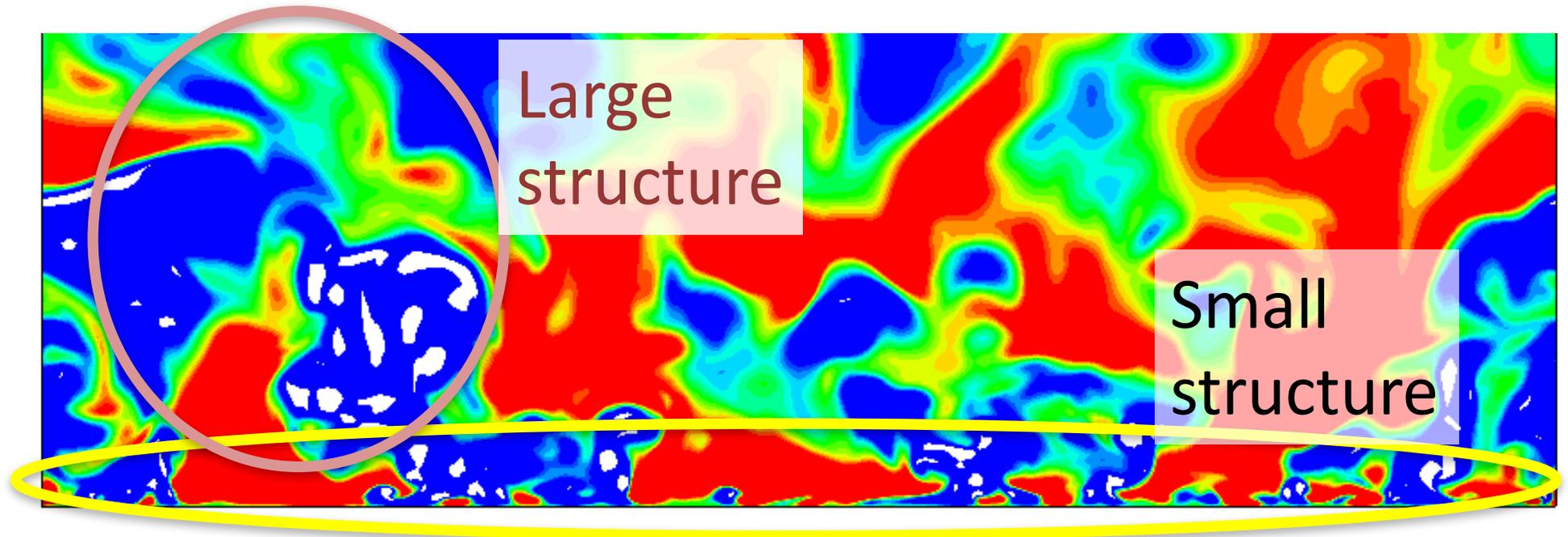
$$\sim O\left(\frac{\rho UL}{\mu}\right)$$



レイノルズ数

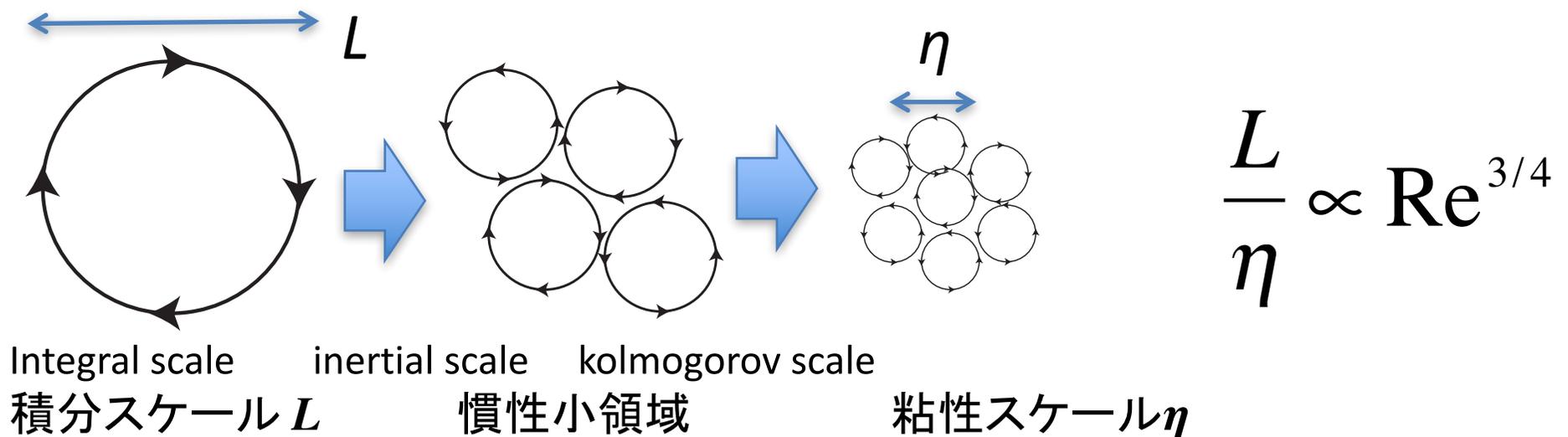


# Multi-scale Nature of Turbulence



Iwamoto, Kasagi & Suzuki, 2003

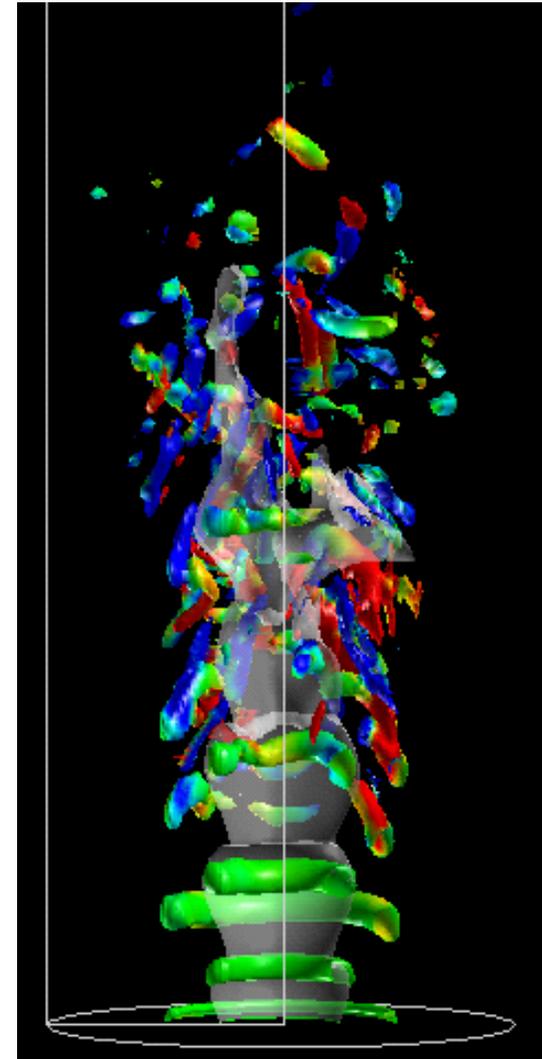
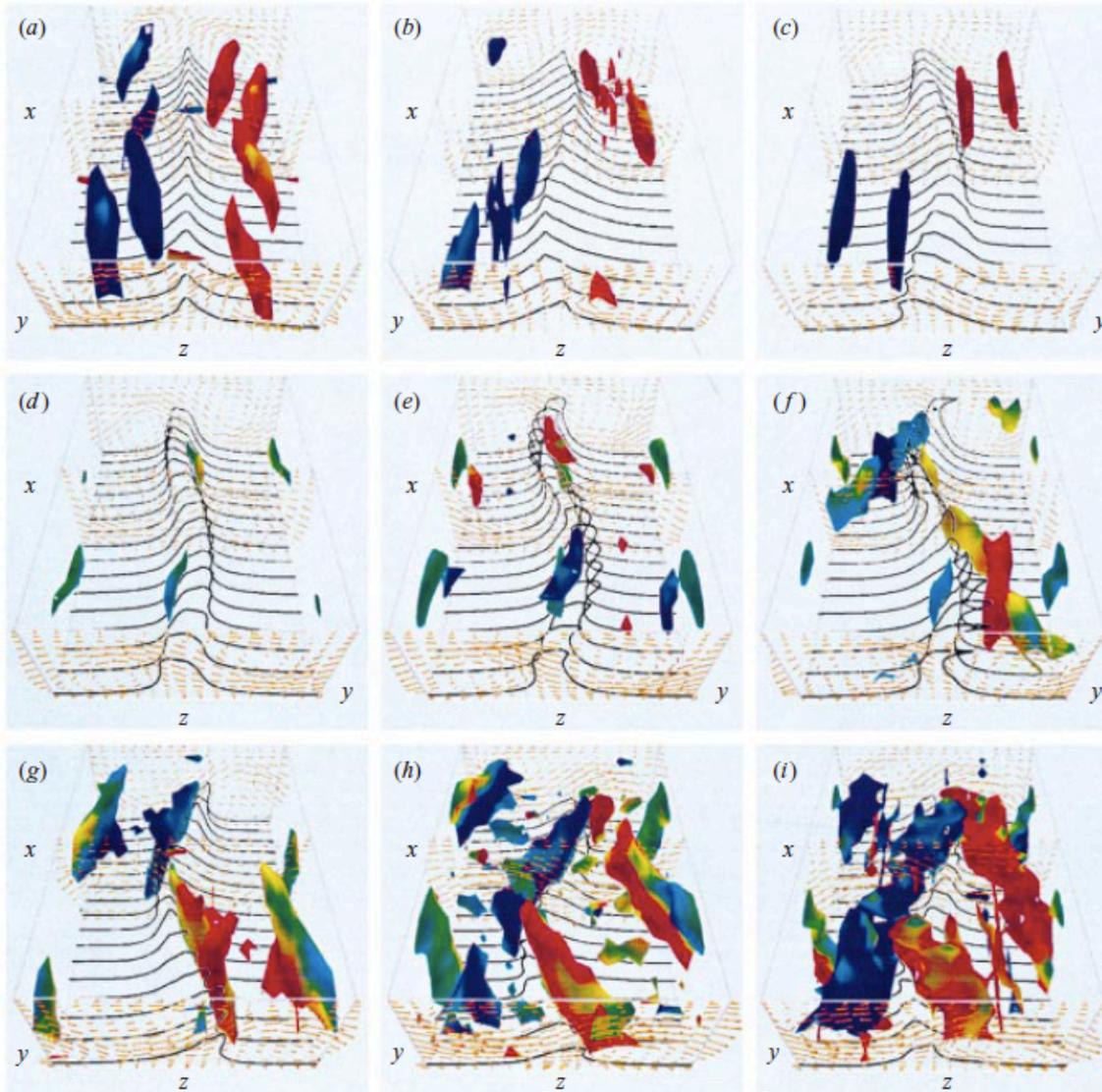
## Energy Cascade



# Coherence in Turbulence (乱流に見る秩序構造)

wall turbulence

free jet



Kawahara & Kida, 2001

Mitsuishi, Fukagata & Kasagi, 2006

# 乱流を自在に制御したい！

- 乱流の特徴
  - 高い混合特性
  - 高いエネルギー散逸率
- 乱流制御のニーズ
  - 乱流抑制
    - 摩擦抵抗低減
    - 振動, 騒音低減
  - 乱流促進
    - 混合促進 (伝熱 / 物質輸送)
    - 剥離抑制
    - 化学反応促進

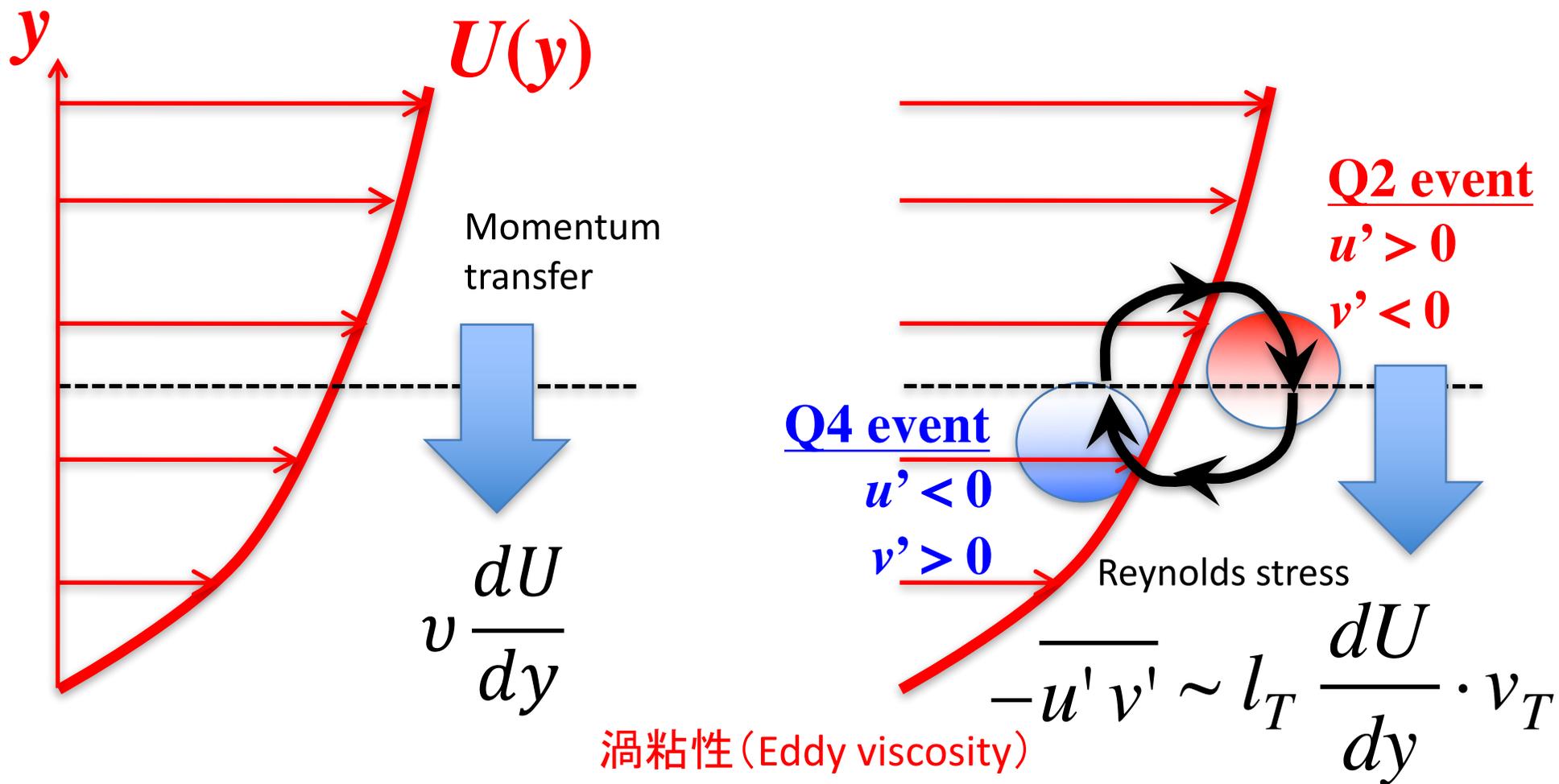


乱流輸送を支配しているのが「渦」である

# 「渦」：“Eddy” と “Vortex”

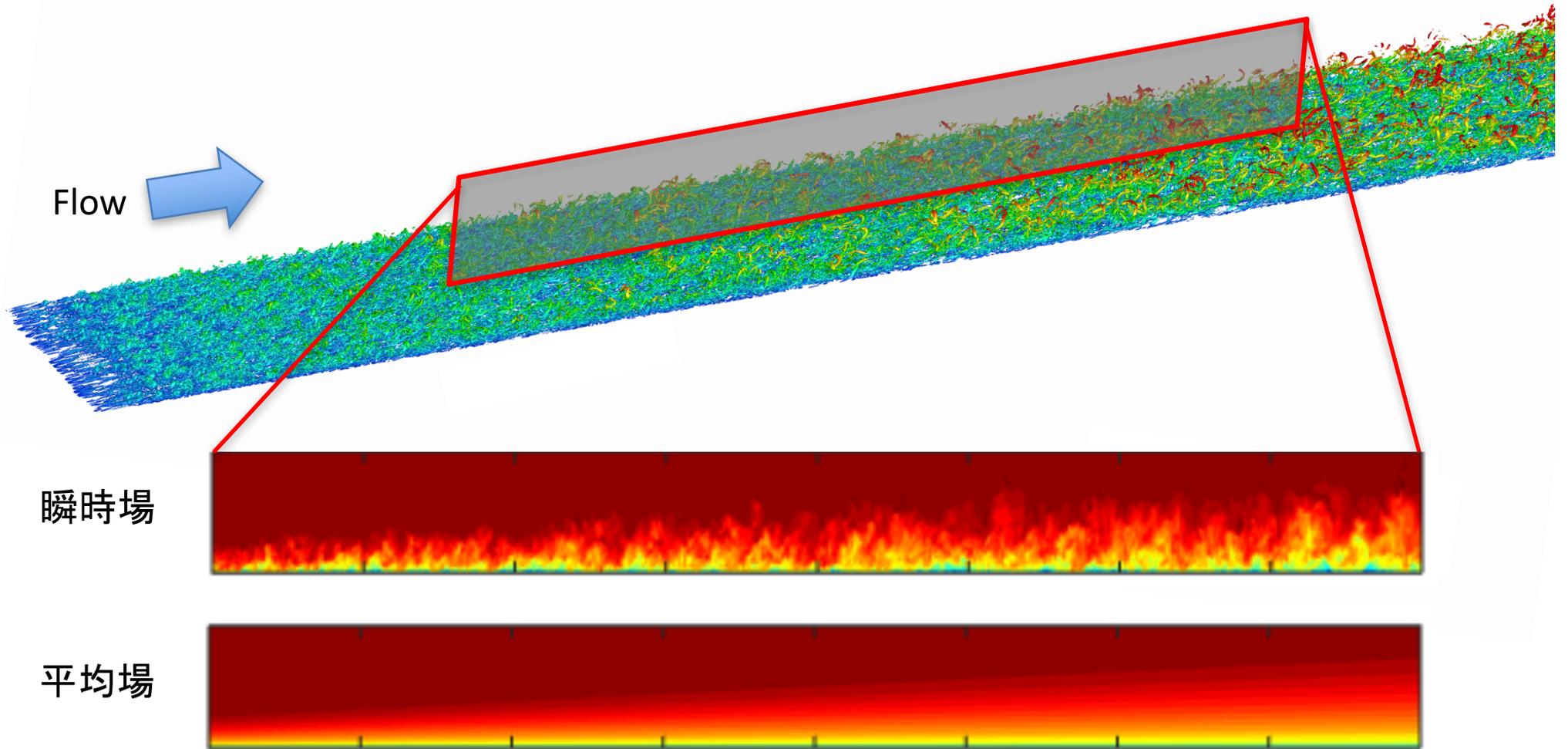
- Eddy (複数スケールの渦の集合体)
  - Eddy viscosity (渦粘性)
  - Eddy diffusivity (渦拡散)
  - Large-eddy simulation
- Vortex (個別の渦)
  - Vortex dynamics
  - Vortical structure

# “分子”粘性 vs “渦”粘性



$$\frac{\text{Turbulent transport}}{\text{Molecular transport}} \sim \frac{\nu_T l_T}{\nu} \rightarrow \text{Re}$$

# 乱流のクロージャー問題



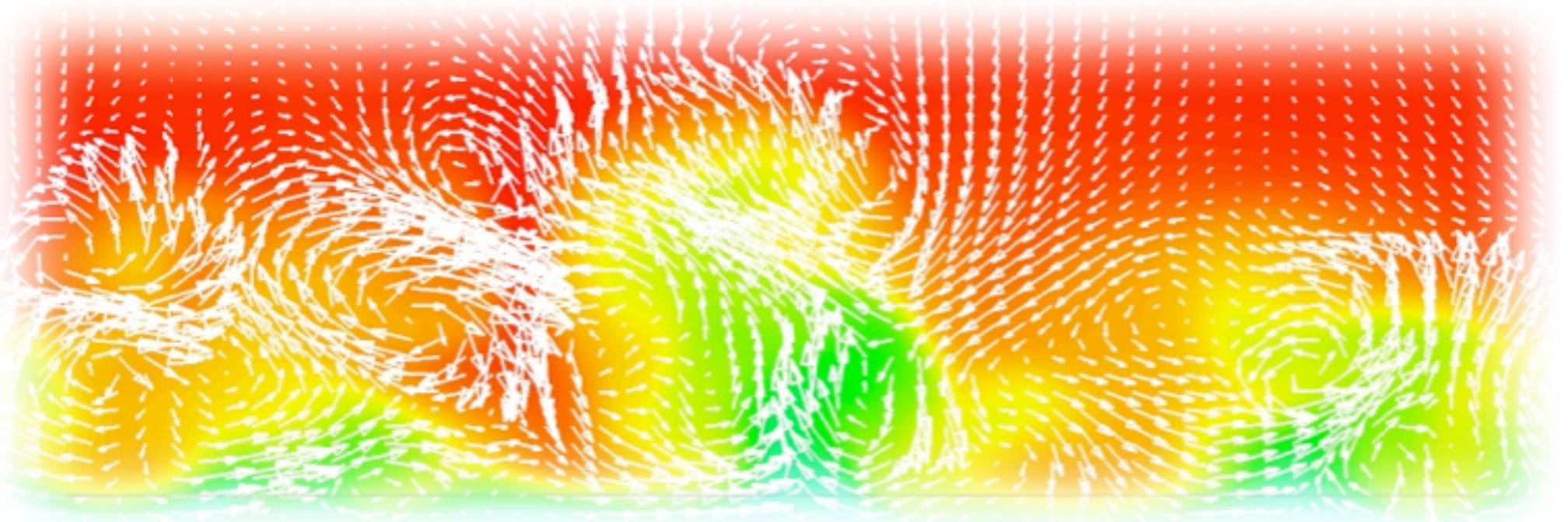
渦粘性 (Eddy viscosity)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_T) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\}$$

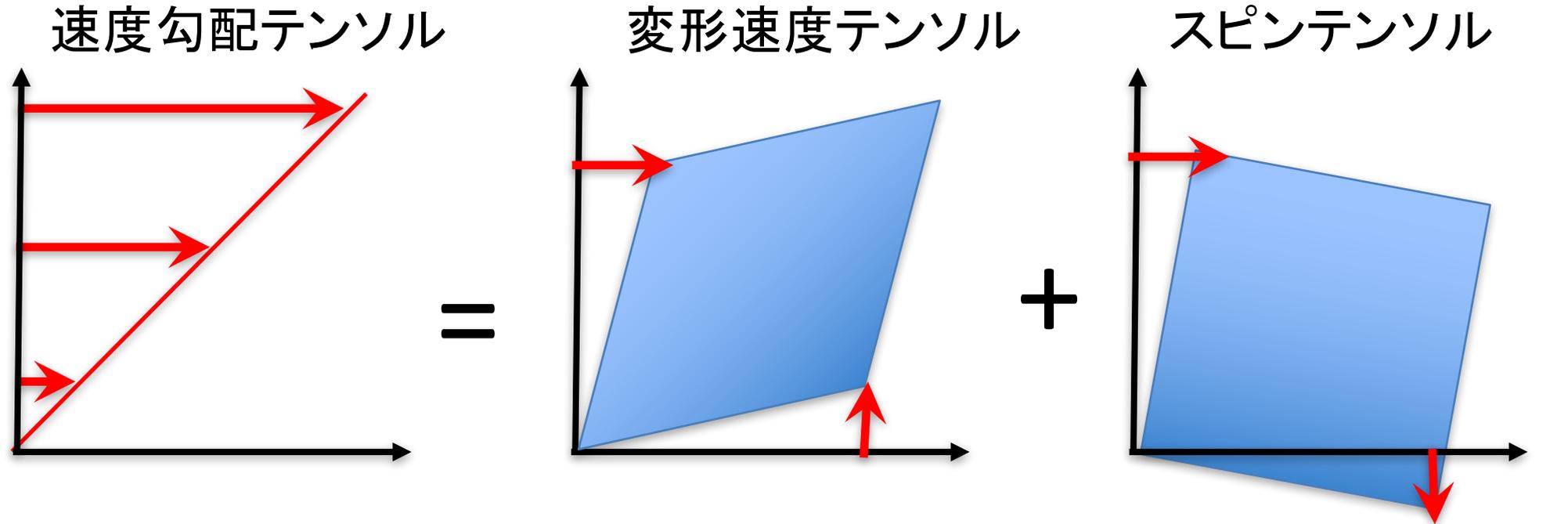
# Definition of “Coherent motion”

*“A three-dimensional region of the flow over which at least one fundamental flow variable (velocity component, density, temperature, etc.) exhibits significant correlation with itself or with another variable over a range of space and/or time that is significantly larger than the smallest local scales of the flow”*

Robinson, S.K.,  
Ann. Rev. Fluid Mech., 1991



# 渦度



$$D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_{ijk} \omega_k \end{aligned}$$

単純なせん断流においても渦度は存在  
→ 秩序構造の同定には不適

渦度

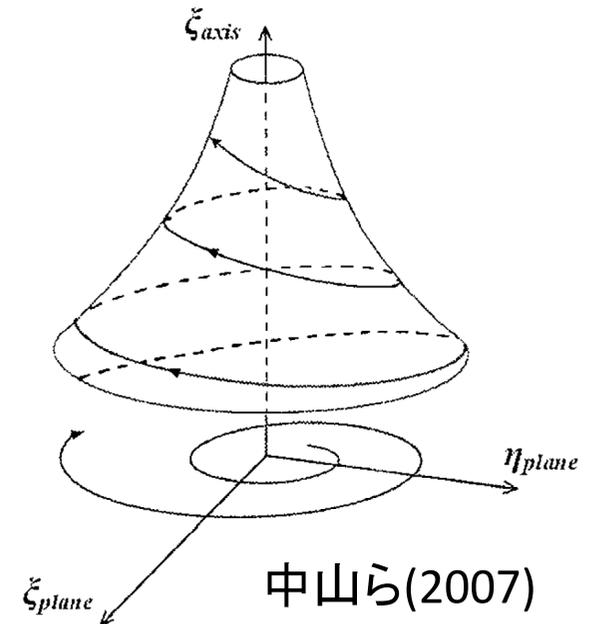
# よく使われる渦同定法

- 速度勾配テンソルの固有値の虚部  
(Chong, et al. 1990)

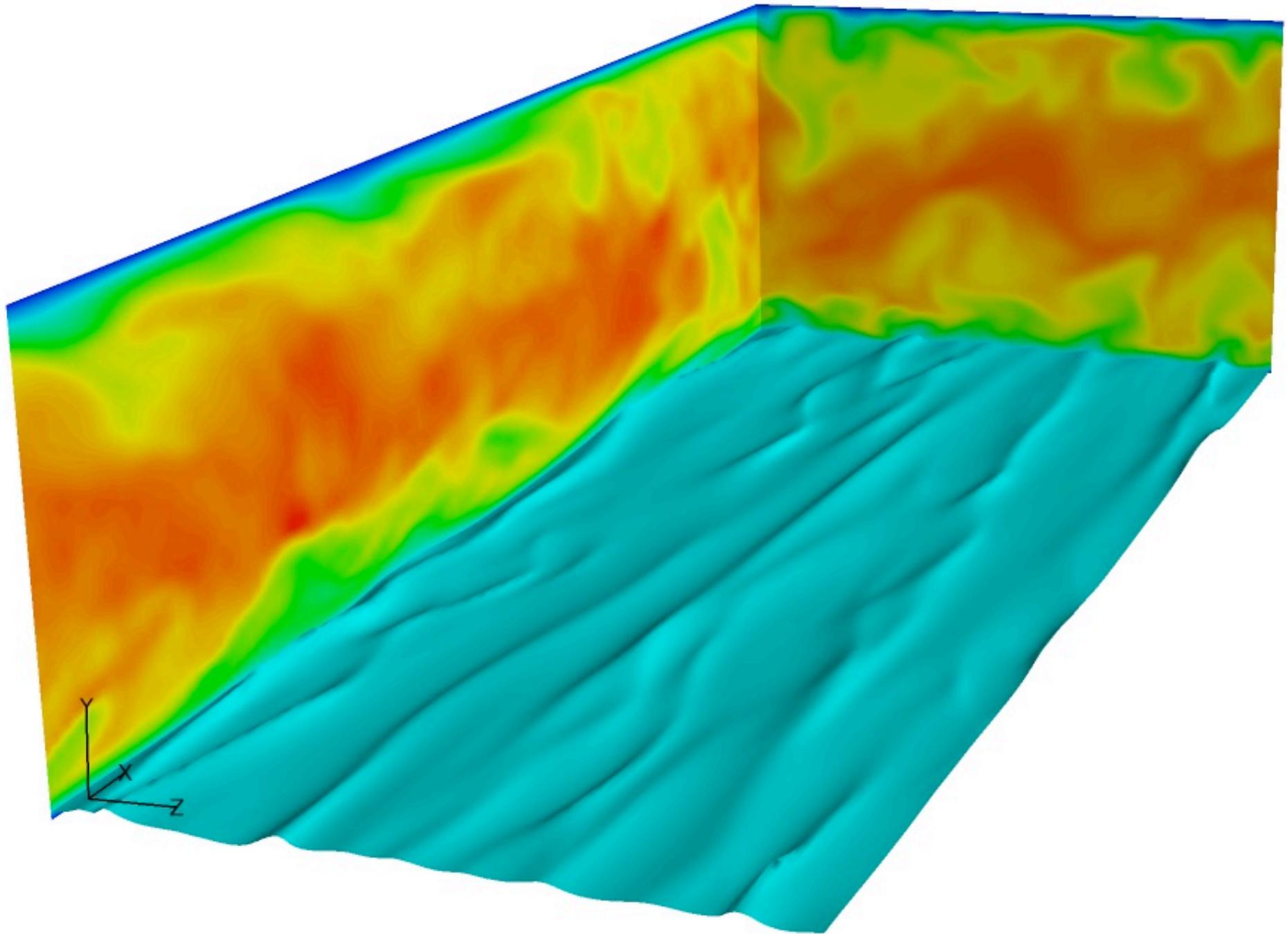
$$\sigma^3 - P\sigma^2 + Q\sigma - R = 0$$

- 速度勾配テンソルの第2不変量  
(Hunt, et al. 1988)

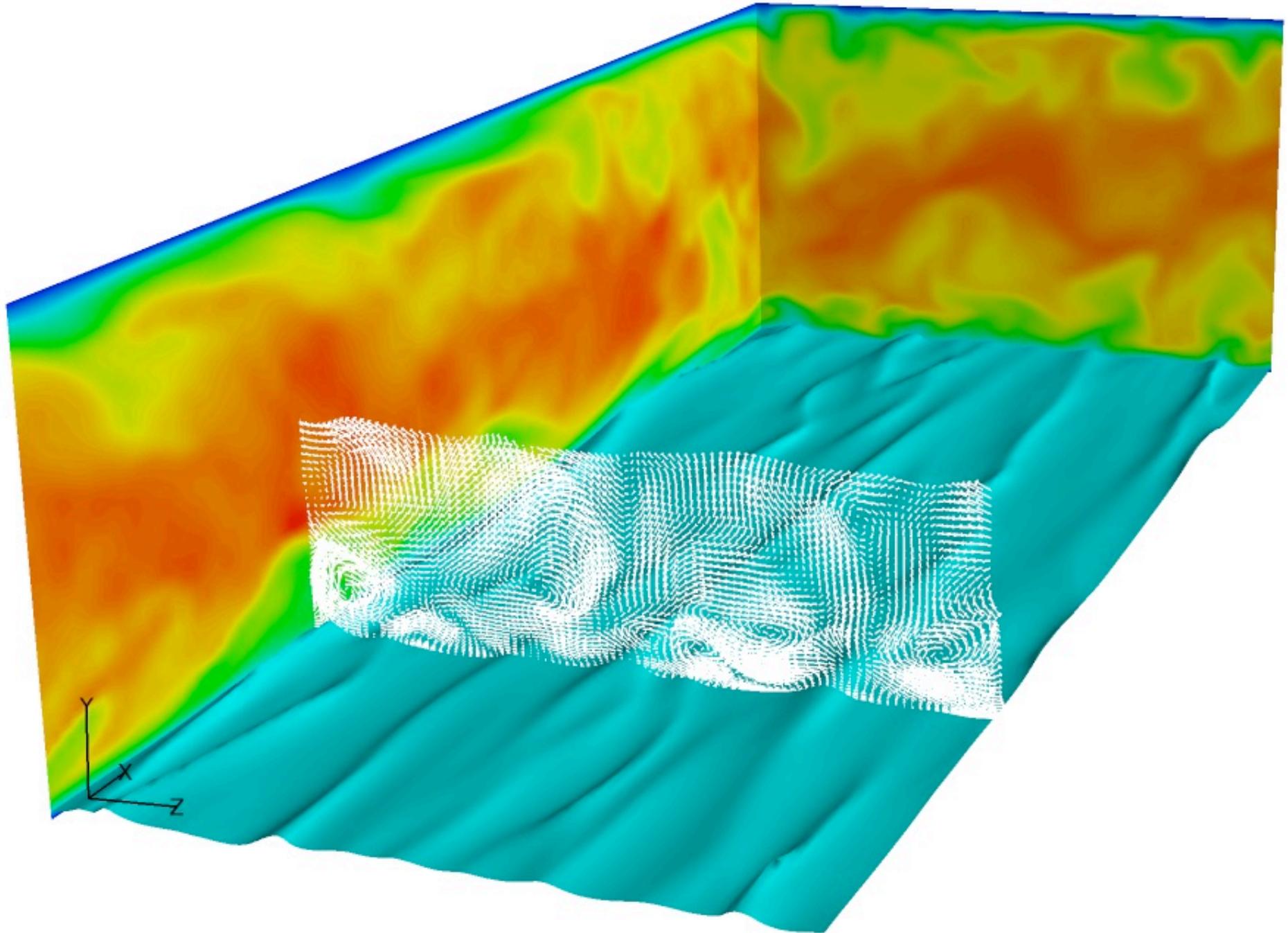
$$Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{1}{2} (\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\boldsymbol{S}\|^2)$$



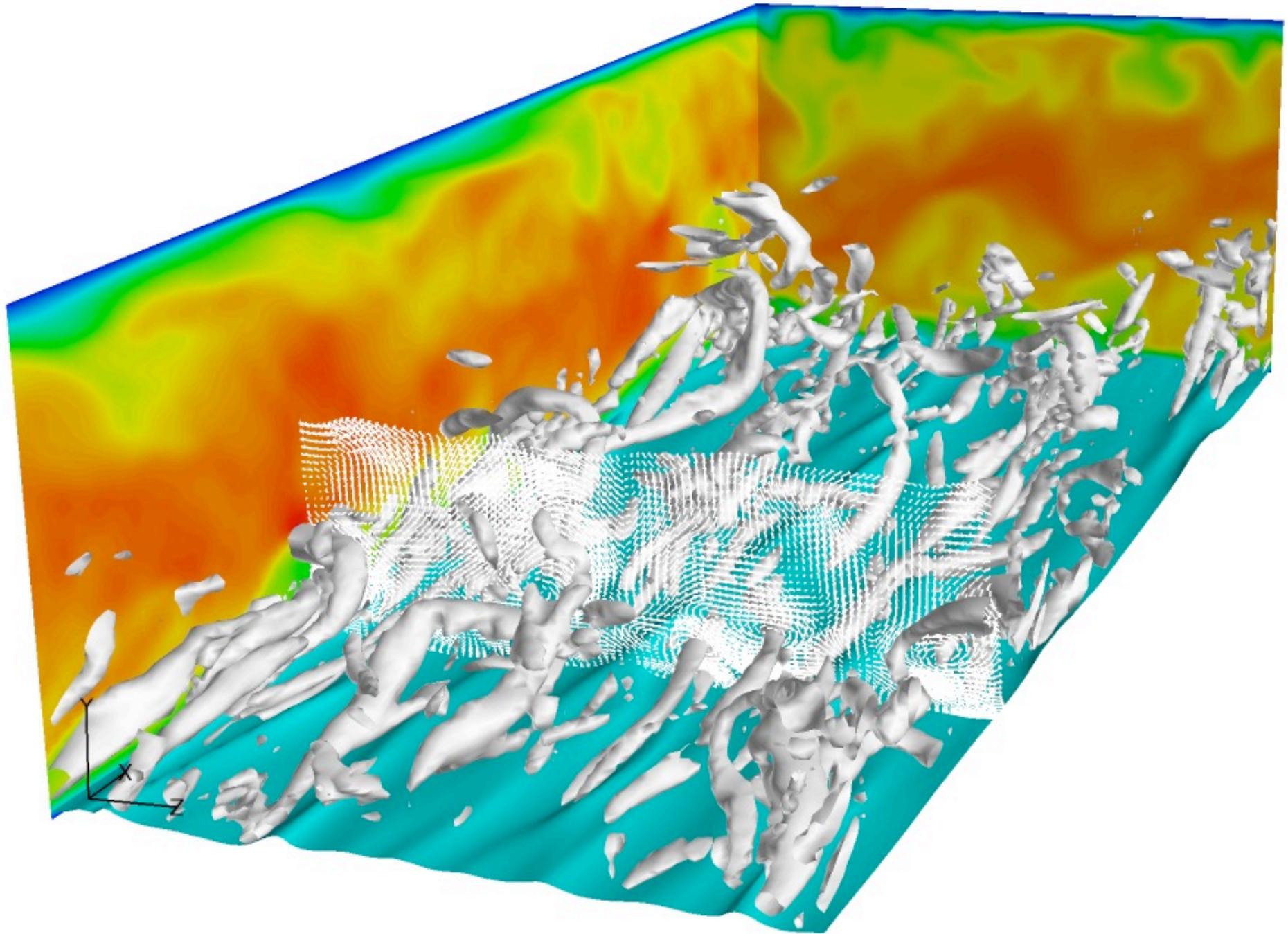
# 例) 平行平板間乱流



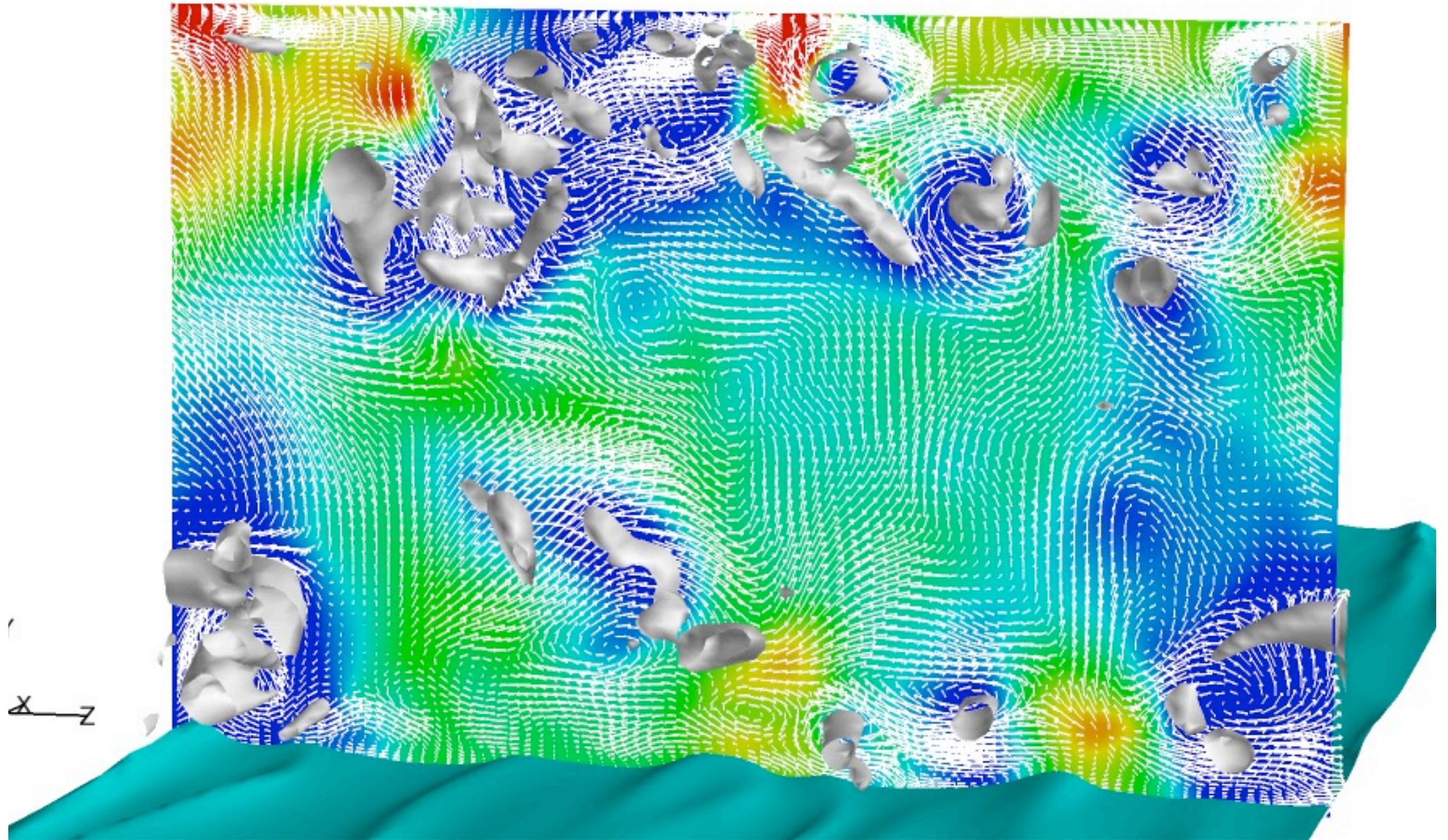
# 例) 平行平板間乱流



# 例) 平行平板間乱流



# 例) 平行平板間乱流



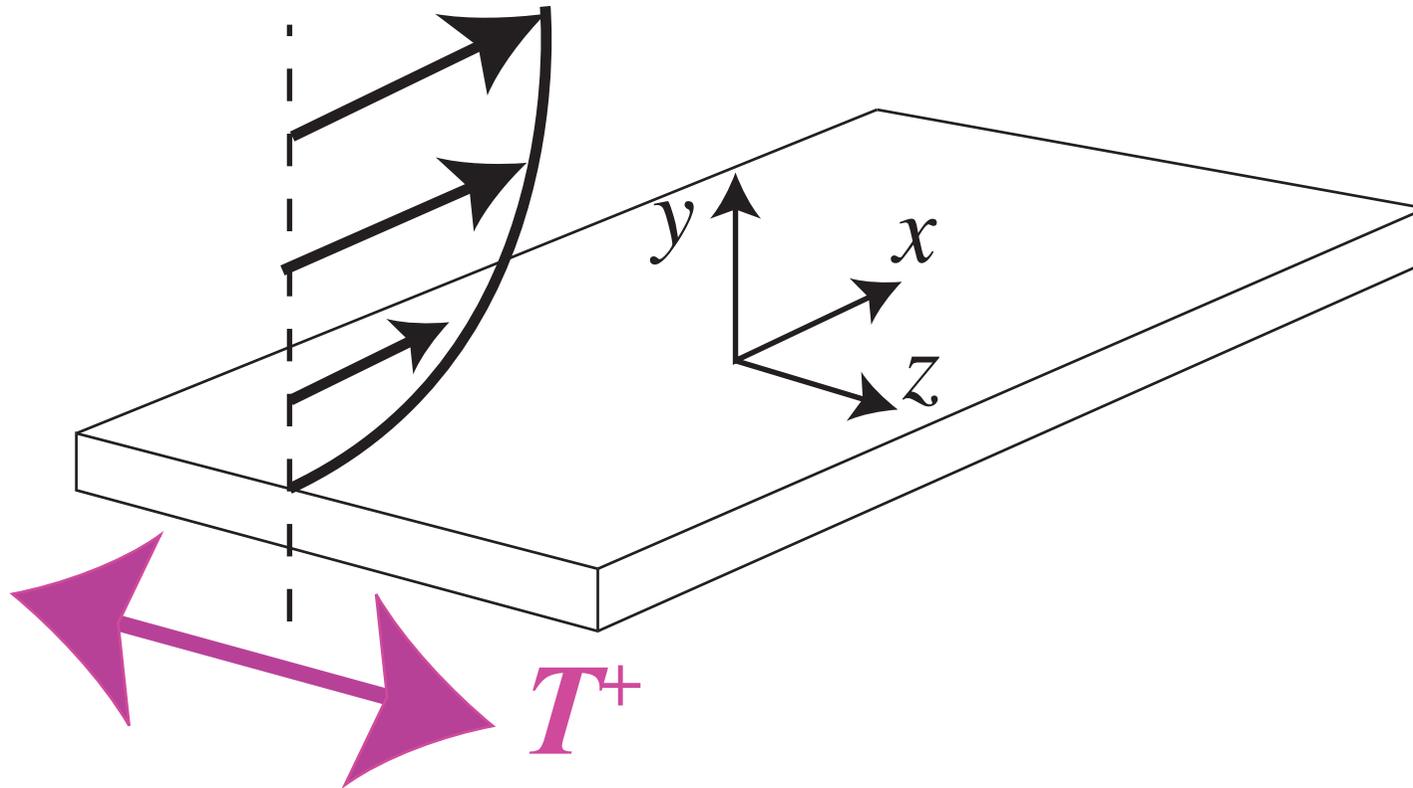
# スパン方向壁振動による 抵抗低減効果

## Reference:

Ricco et al. (J. Fluid Mech, 2012), Ciramelli et al. (Phys. Fluid, 2013)

Yakeno et al. (J. Fluid Mech, 2014), Hasegawa et al. (J. Fluid Mech, 2014)

# スパン方向壁振動制御

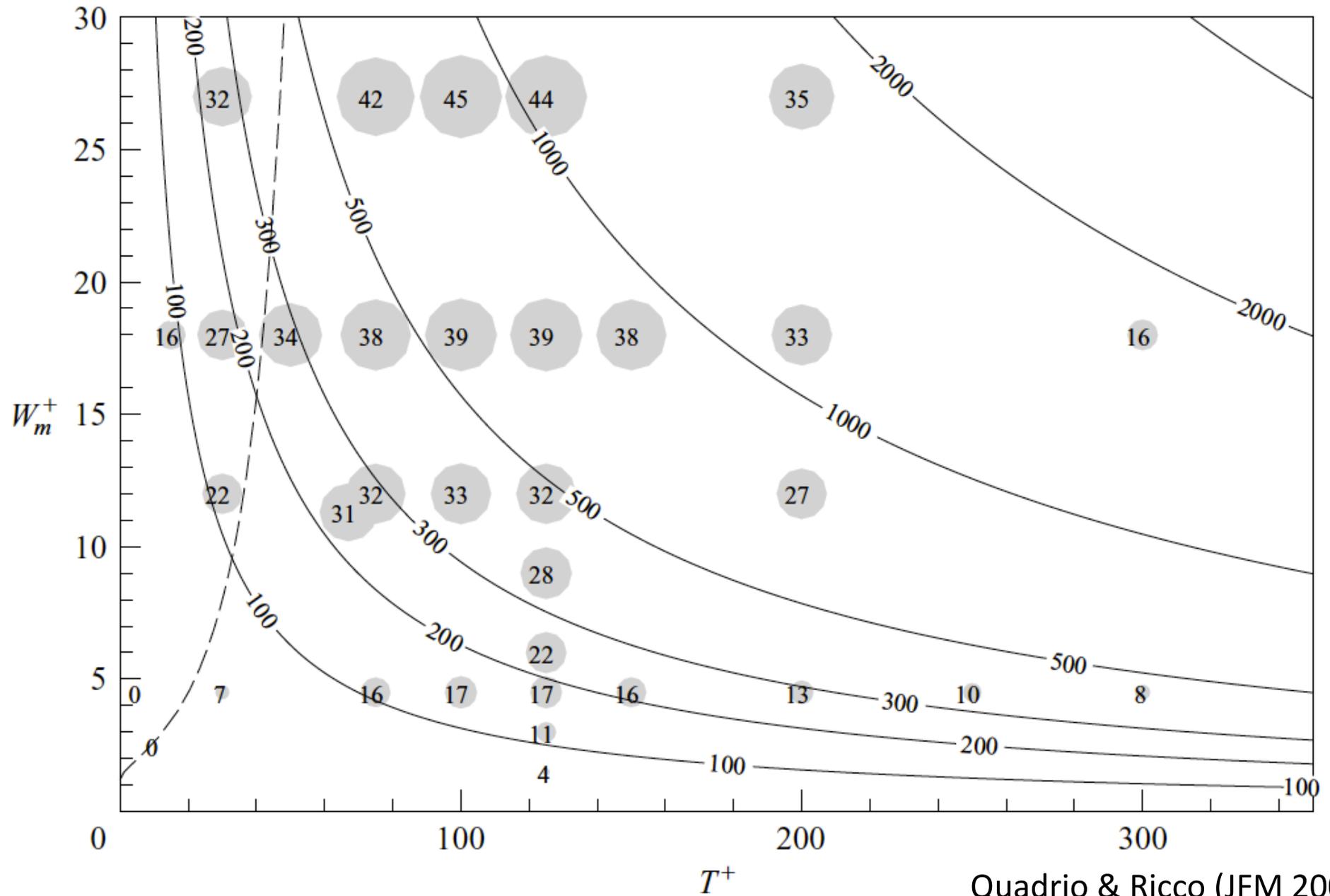


制御入力

$$w(x, \pm 1, z, t) = W_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

振幅:  $W_0$   
周期:  $T$

# 抵抗低減率: $R$ [%]



# ストークス層

## ■ 半無限領域における振動壁面近傍の層流解

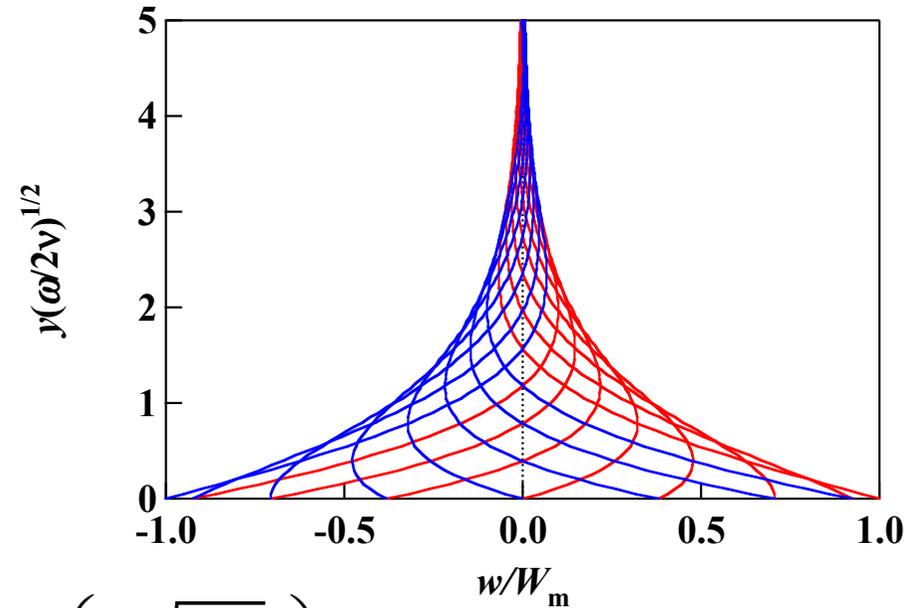
$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

B.C.

$$w(y,t) = \begin{cases} W_m \exp(i\omega t) & y = 0 \\ 0 & y = \infty \end{cases}$$

Solution

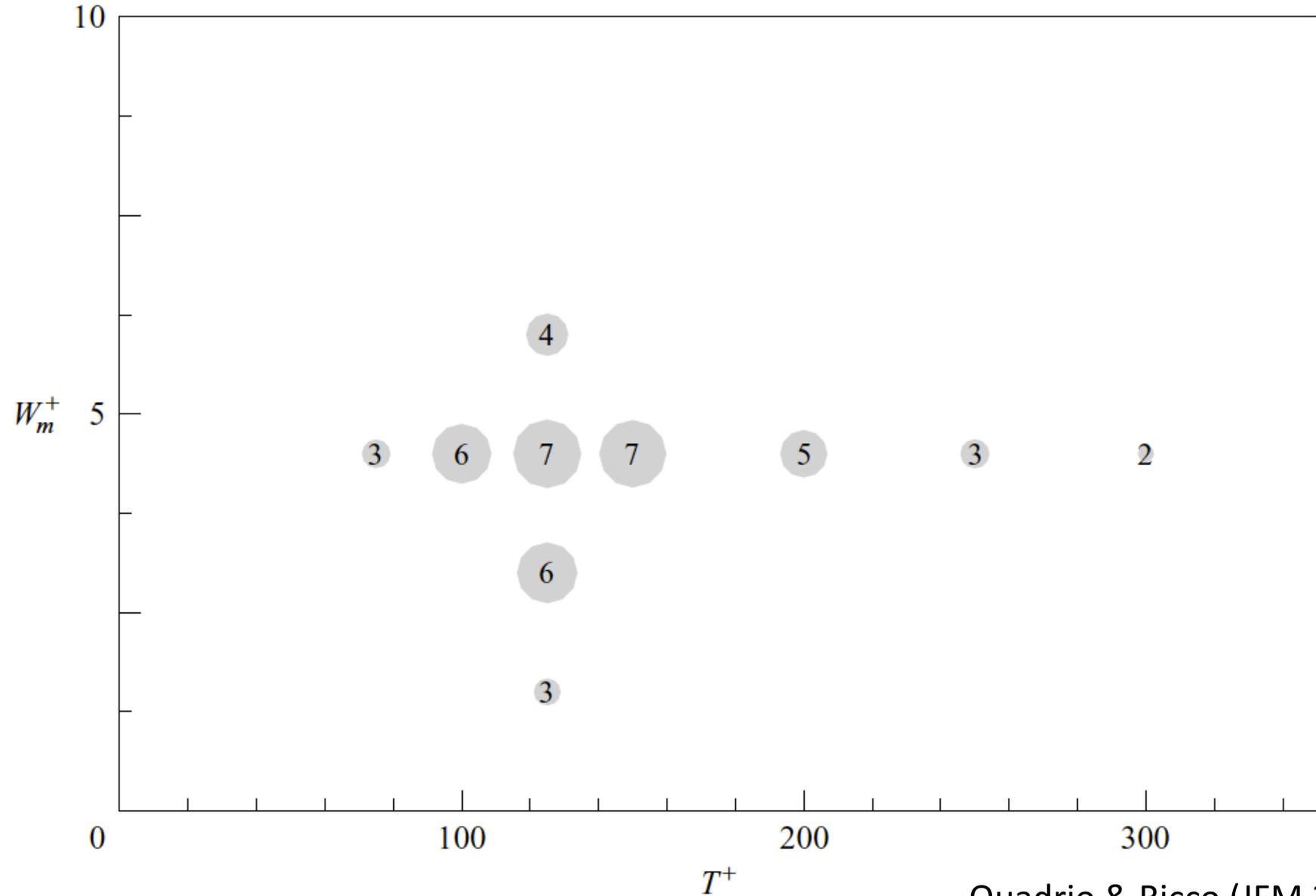
$$w(y,t) = W_m \underbrace{\exp\left\{i\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y\right)\right\}}_{\text{traveling wave}} \underbrace{\exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y\right)}_{\text{exponential decay}}$$



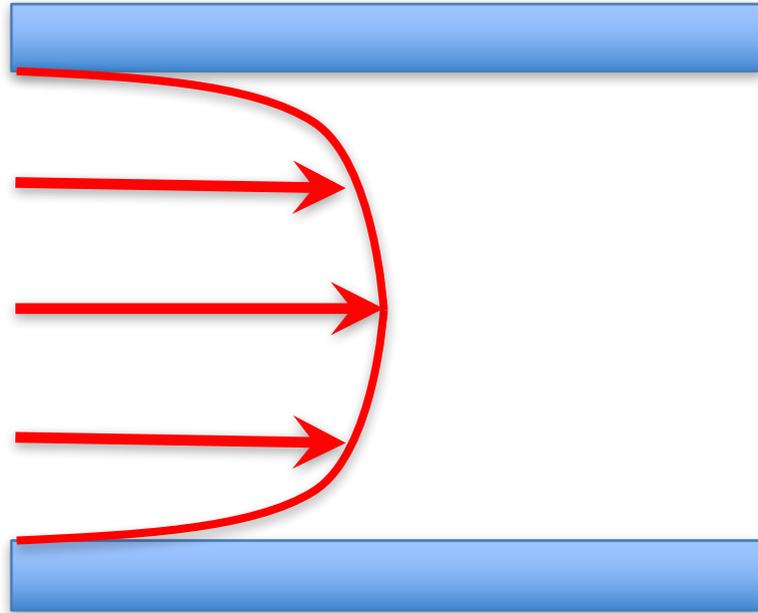
## ■ 投入エネルギー

$$P_{in} = \left\langle w \left( \nu \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\rangle_{wall} \propto W_m^2 \sqrt{\nu \omega} \quad \left( \omega = \frac{2\pi t}{T} \right)$$

# 省エネルギー率: $S$ [%]



# 平行平板間乱流



二つの流動条件

- ・流量一定

評価指標: 抵抗値の増減

- ・圧力勾配一定

評価指標: 流量の増減

圧力勾配一定時のバルク流量 (断面平均流速)

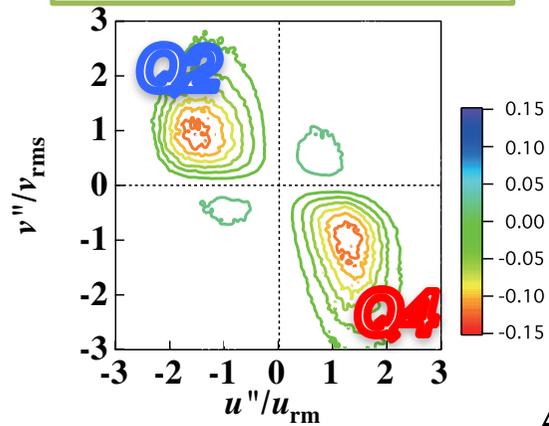
$$U_b = \frac{Re_\tau}{3} - \int_{Re_\tau} \left(1 - \frac{y}{Re_\tau}\right) \overline{(-u'v')} dy$$

層流時の値  
(一定値)

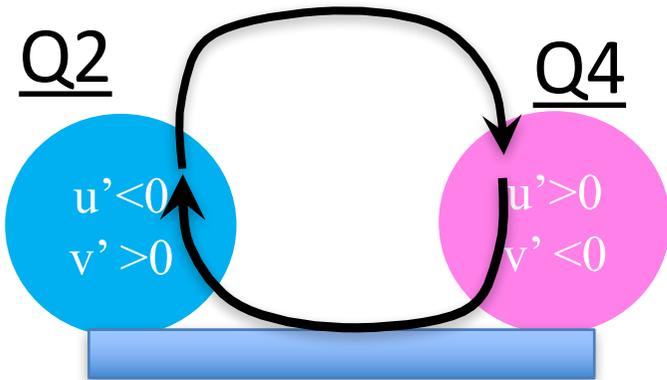
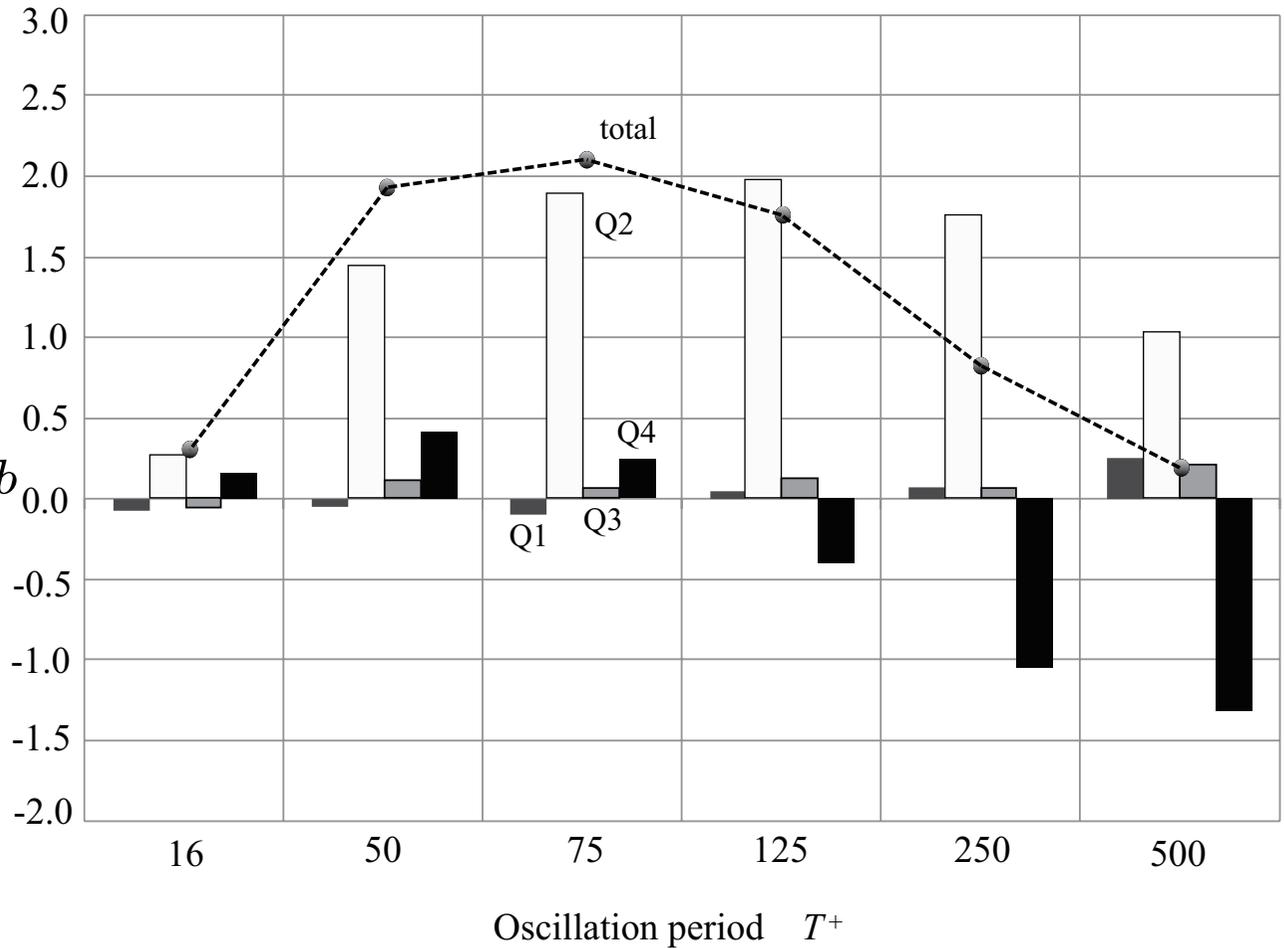
乱流による流量減少

# 四象限レイノルズ応力の抵抗低減効果 ( $U_b$ 増加) への寄与

Weighted Joint PDF

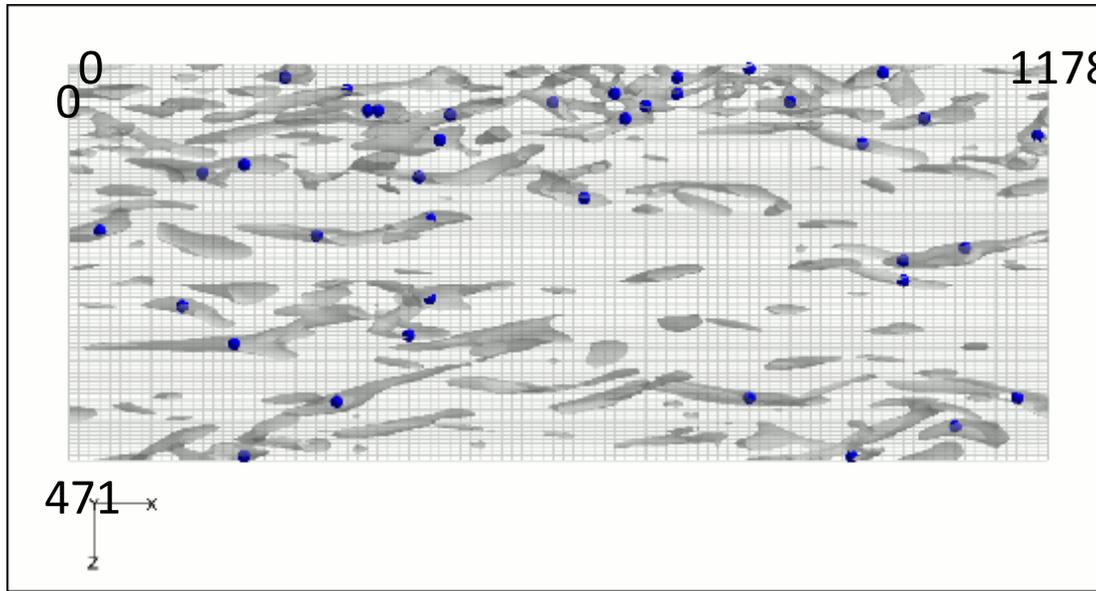


$\Delta U_b$

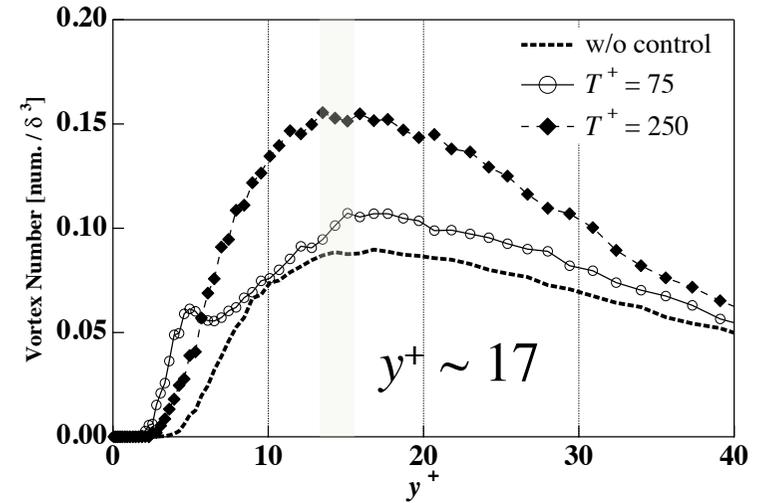


- ✓ 最適周期 ( $T = 75$ ) におけるレイノルズ応力 Q2 イベントの低減
- ✓ 長い制御周期におけるレイノルズ応力 Q4 イベントの増加 → 摩擦増大

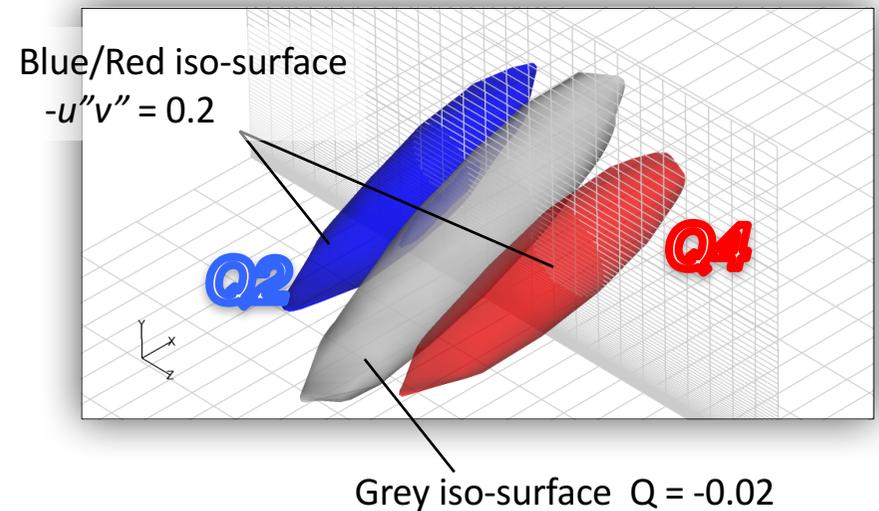
# 条件付き抽出



単位体積あたりの抽出数



条件付き抽出した縦渦構造



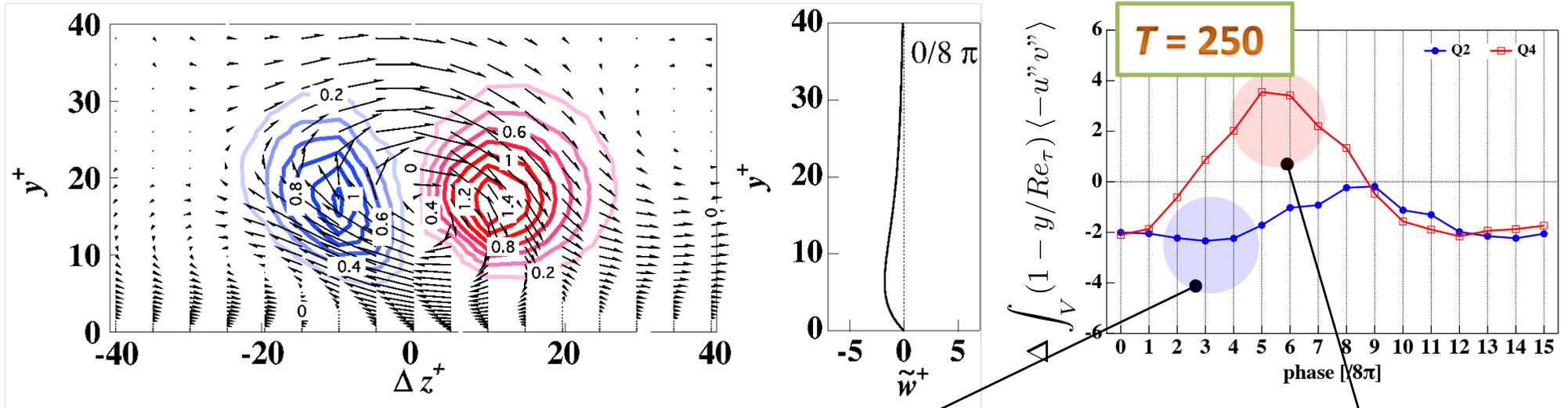
## 抽出条件

- ✓  $Q = \partial u_i / \partial x_j \partial u_j / \partial x_i < -0.02$
- ✓  $Q$ の最小となる点
- ✓ 回転方向  $\omega_x > 0$
- ✓ 平均する渦構造周りの検査体積

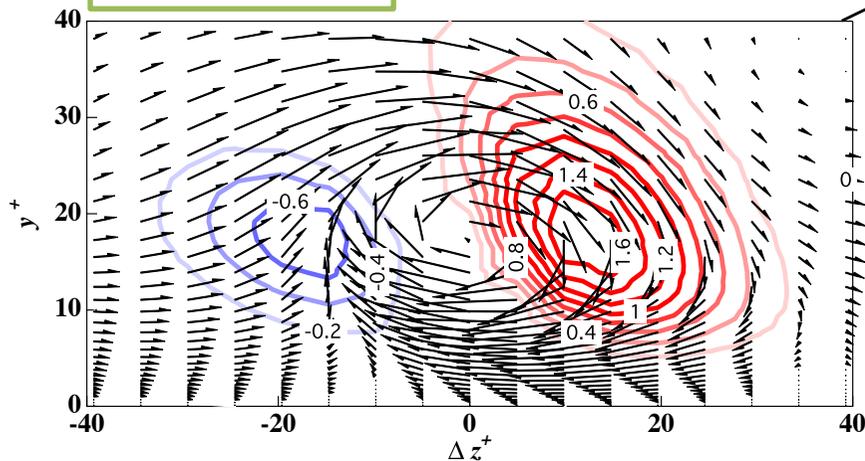
$$\lambda_x = -60 \sim 60$$

$$\lambda_y = 60 \quad \lambda_z = -60 \sim 60$$

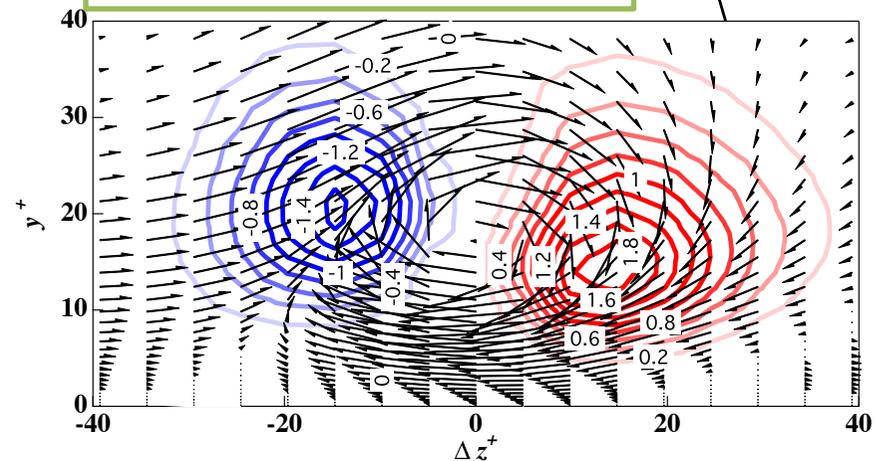
# 条件付き抽出結果



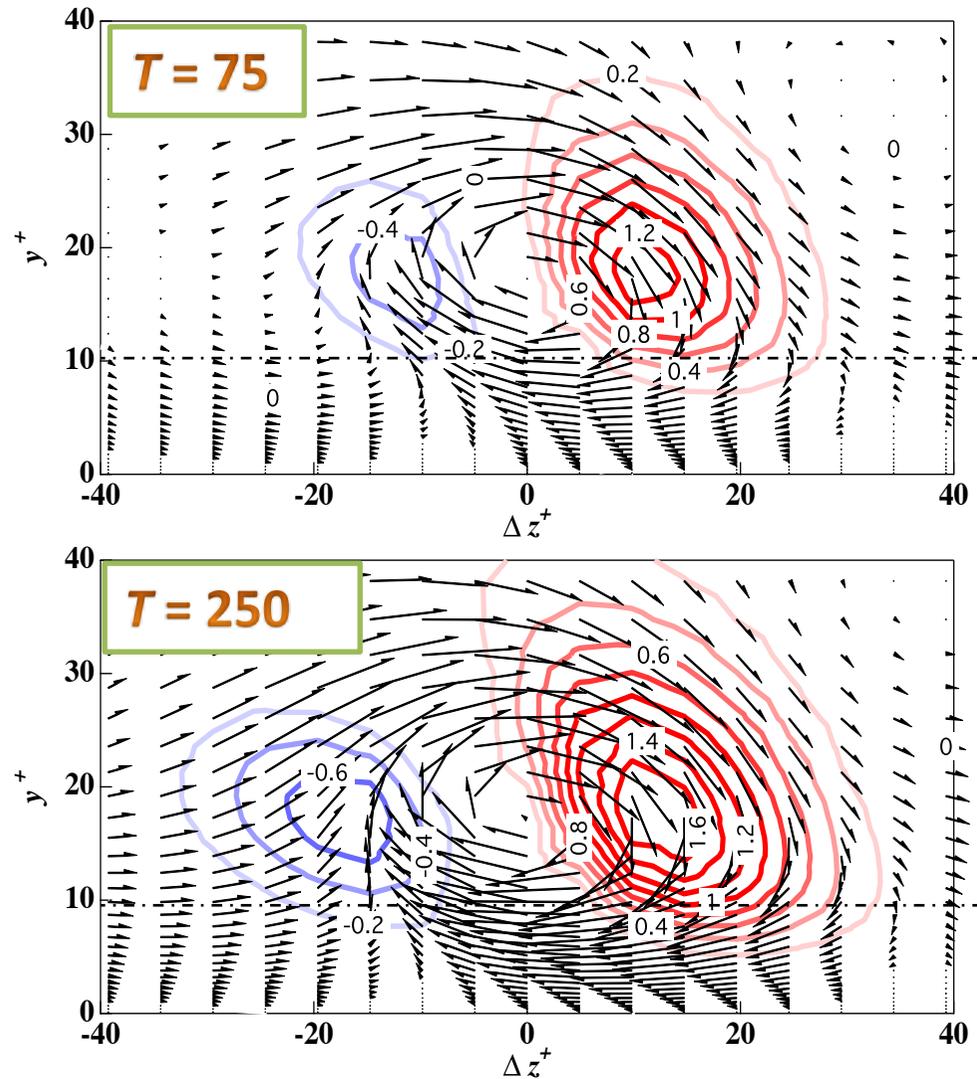
Q2の低減



Q4の増加



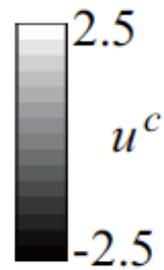
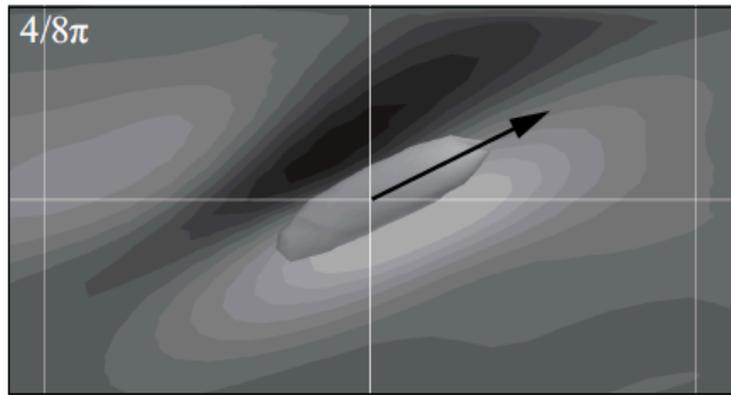
# Q2 の低減



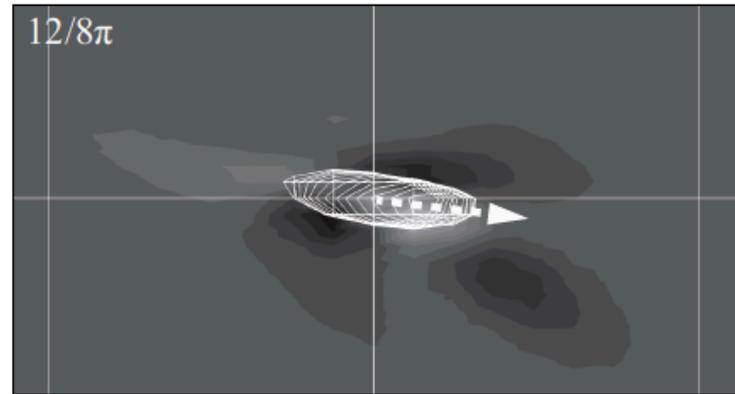
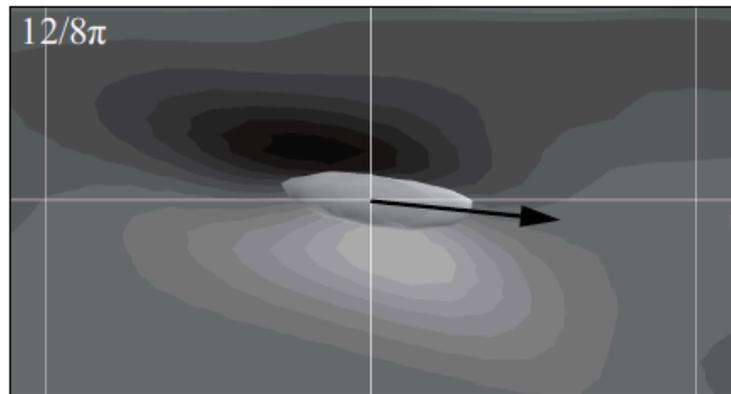
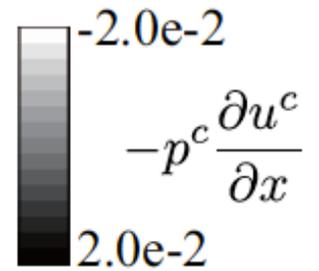
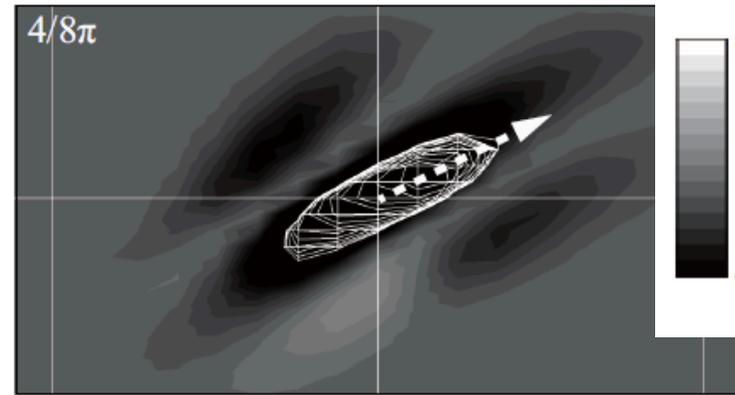
Q2の低減は  $\partial \tilde{w} / \partial y$  が渦の下部  $y = 10$  で最大となる位相と一致

# Q4の増加

流れ方向速度



流れ方向圧力歪み相関項



渦が傾くことによって渦が強まる(非線形効果)

# 摩擦抵抗低減効果

---

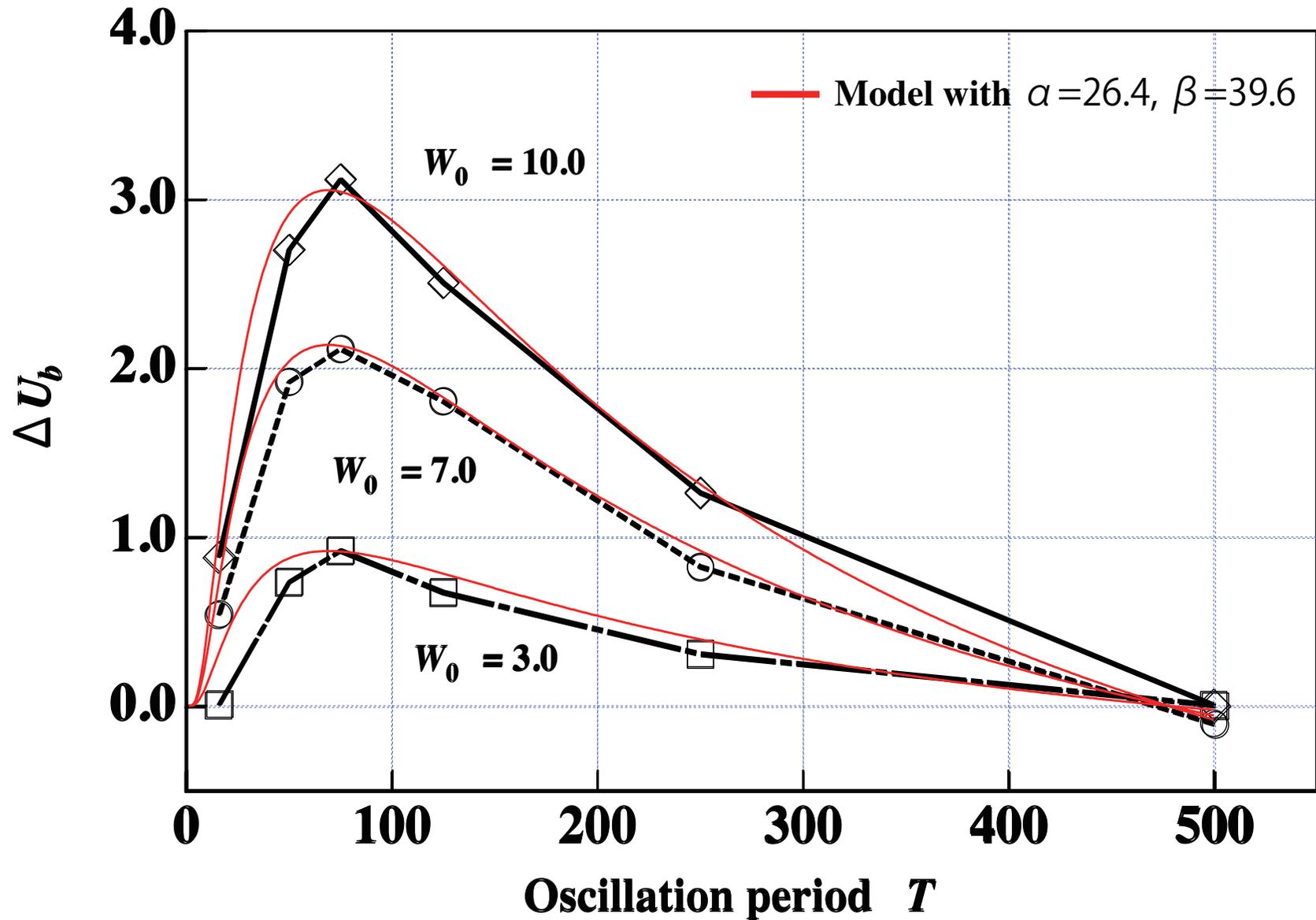
- ✓ Q2イベントの低減は渦の下部  $y \sim 10$  での渦回転と反対方向の平均速度剪断が最大となる位相で起こる
- ✓ 長い周期でのQ4の増加は渦の存在する  $y \sim 15$  付近の平均速度剪断により渦構造が傾けられ、渦内部の圧力ひずみ相関が増加し、生成が増加するために起こる
- ✓ 摩擦抵抗低減効果は、ストークス層の解析解から得られる  $\partial \tilde{w} / \partial y$  によって以下のように見積もられると考えられる

$$\Delta U_b \text{ model} = \alpha \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \Big|_{y=10} \right)_{rms} - \beta \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \Big|_{y=15} \right)_{rms}$$

**Q2 の低減**

**Q4 の増加**

# バルク流量増加 $\Delta U_b$



# まとめ

- 渦は乱流に秩序を与えており、これが乱流研究を面白くもあり、難しくもしている。
- 渦は乱流による運動量、熱、物質輸送を支配しており、その予測、制御は熱流体工学の最重要課題の一つ
- しかし、渦の定義は確立されておらず、それ自身も研究領域の一つ
- 渦に注目した研究例を紹介