

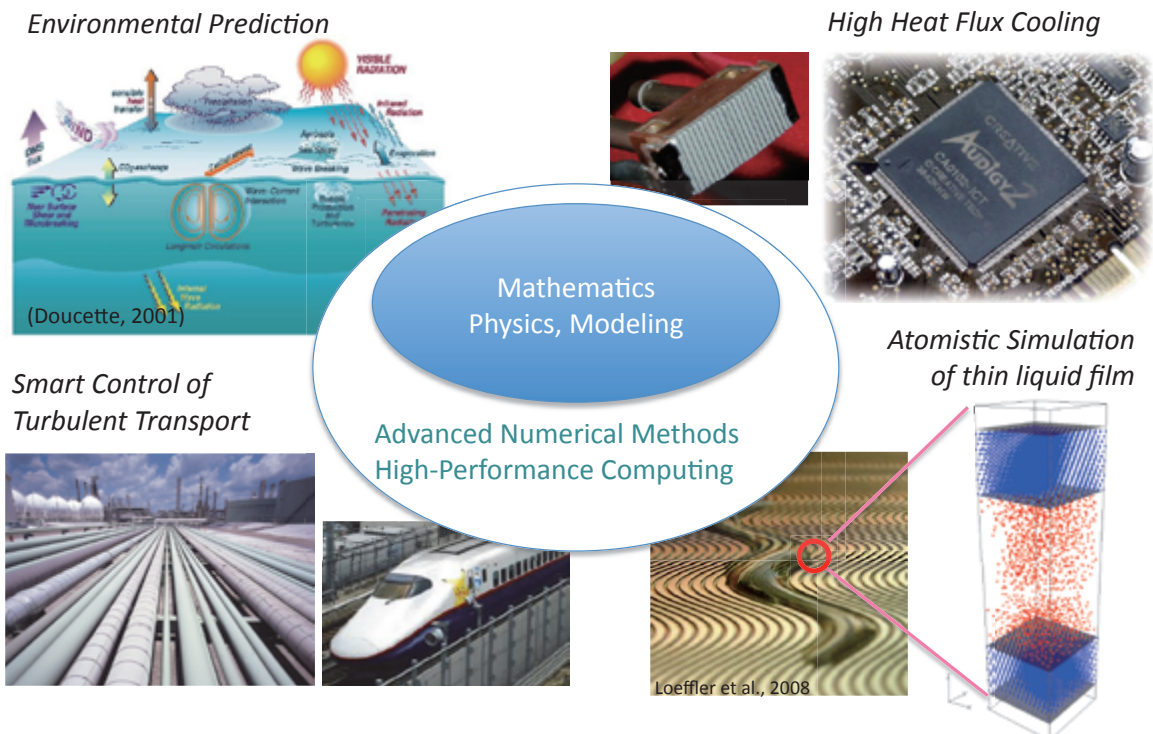
2014年1月30日  
第6回EFD/CFD融合ワークショップ

# データ同化技術への期待

～乱流工学の観点から～

東京大学 生産技術研究所  
講師 長谷川 洋介

## Overview of Research Activities

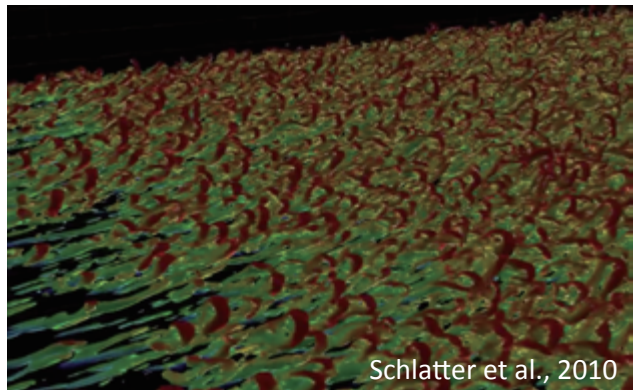
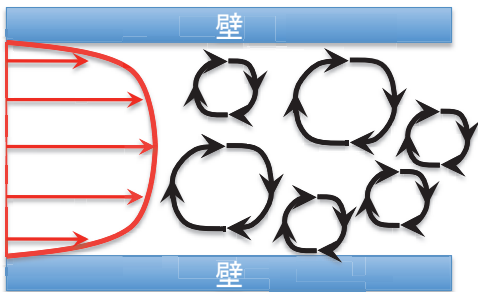


# 壁乱流摩擦抵抗低減に関する研究

## □ 高速輸送機器の抵抗低減



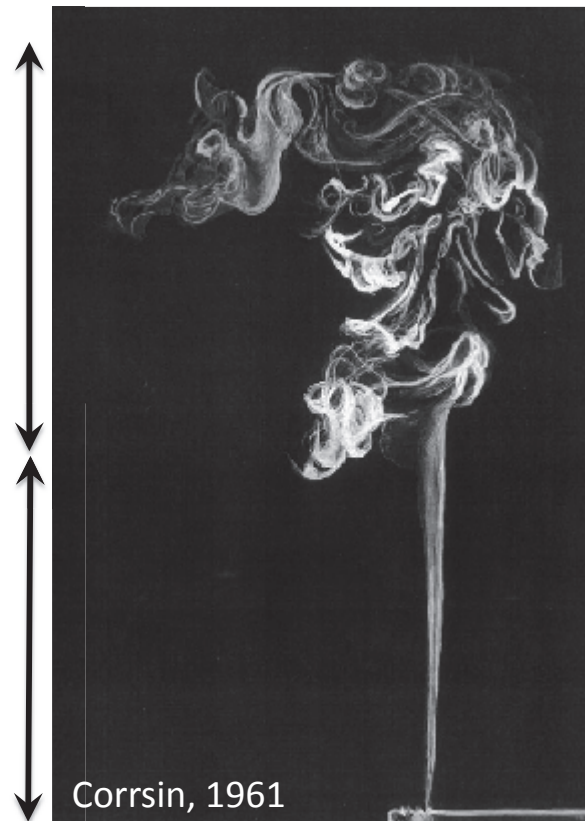
## □ 平行平板間完全発達乱流場



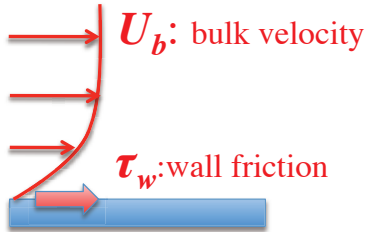
## Two Flow States

turbulence

laminar

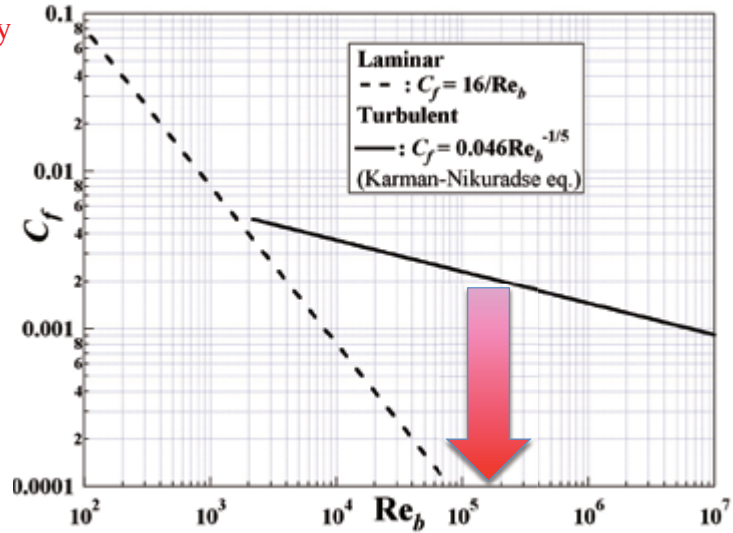


# $C_f$ -Re Plot



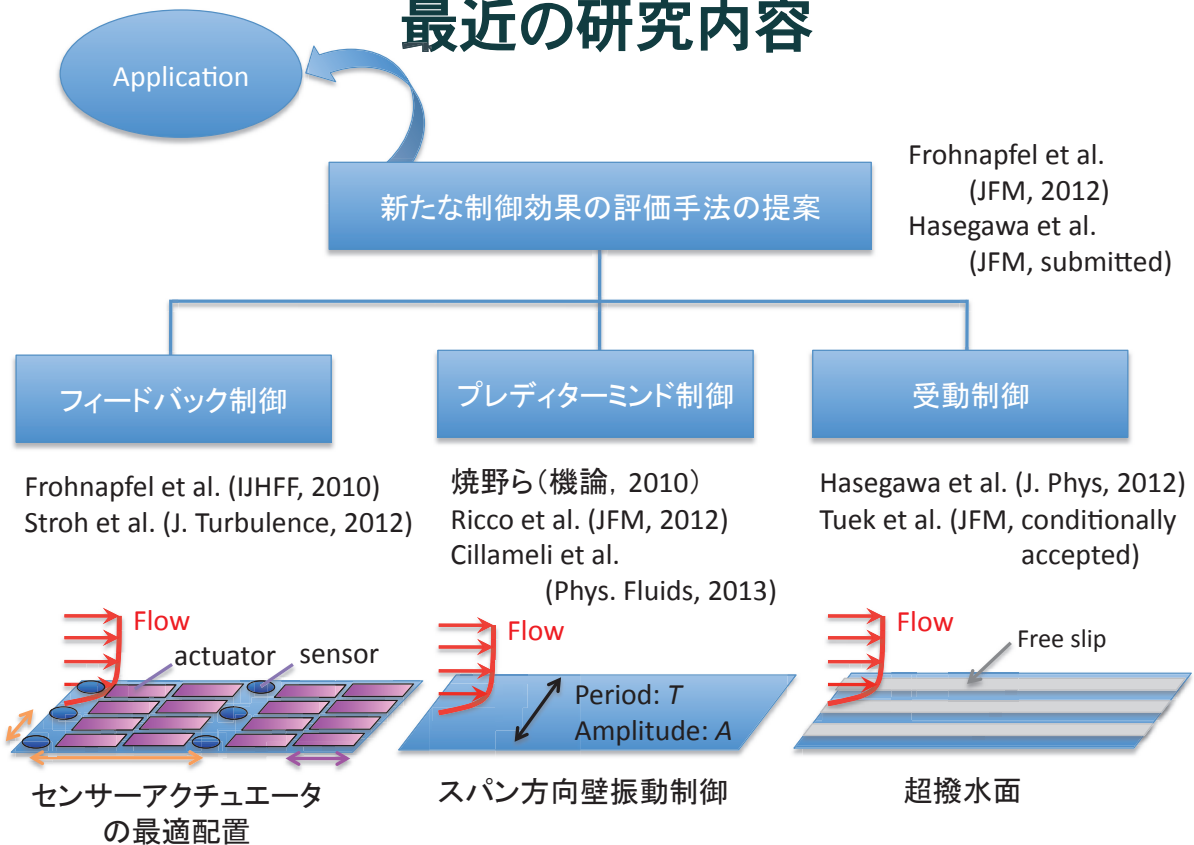
Friction coefficient

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_b^2}$$



もし高レイノルズ数乱流を層流化できれば大きな省エネ効果！

## 最近の研究内容



# 低中温熱源の有効利用

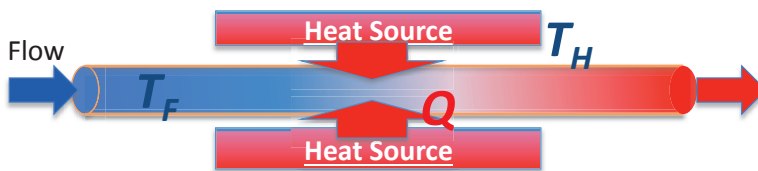


内燃機関, 化学プラントからの排熱



地熱

低い温度差, 小体積における伝熱促進



$$Q = hA(T_H - T_F)$$

$h$ : 熱交換係数

$A$ : 伝熱面面積

## 運動量輸送と熱輸送の非相似制御



Kasagi, Hasegawa, Fukagata & Iwamoto  
(ASME J Heat Transfer, 2012)

準最適制御理論

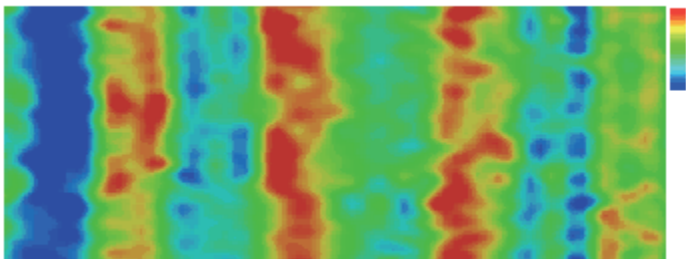
Hasegawa & Kasagi (JFM, 2011)

最適制御理論

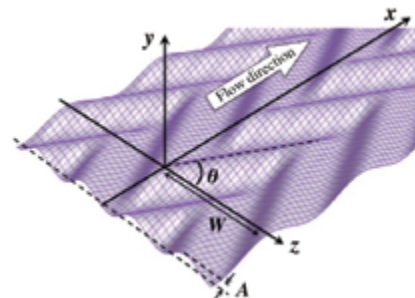
Yamamoto, Hasegawa & Kasagi (JFM, 2013)

伝熱面形状最適化

長谷川&鹿園  
(熱工学コンファレンス2012, 特許出願済)

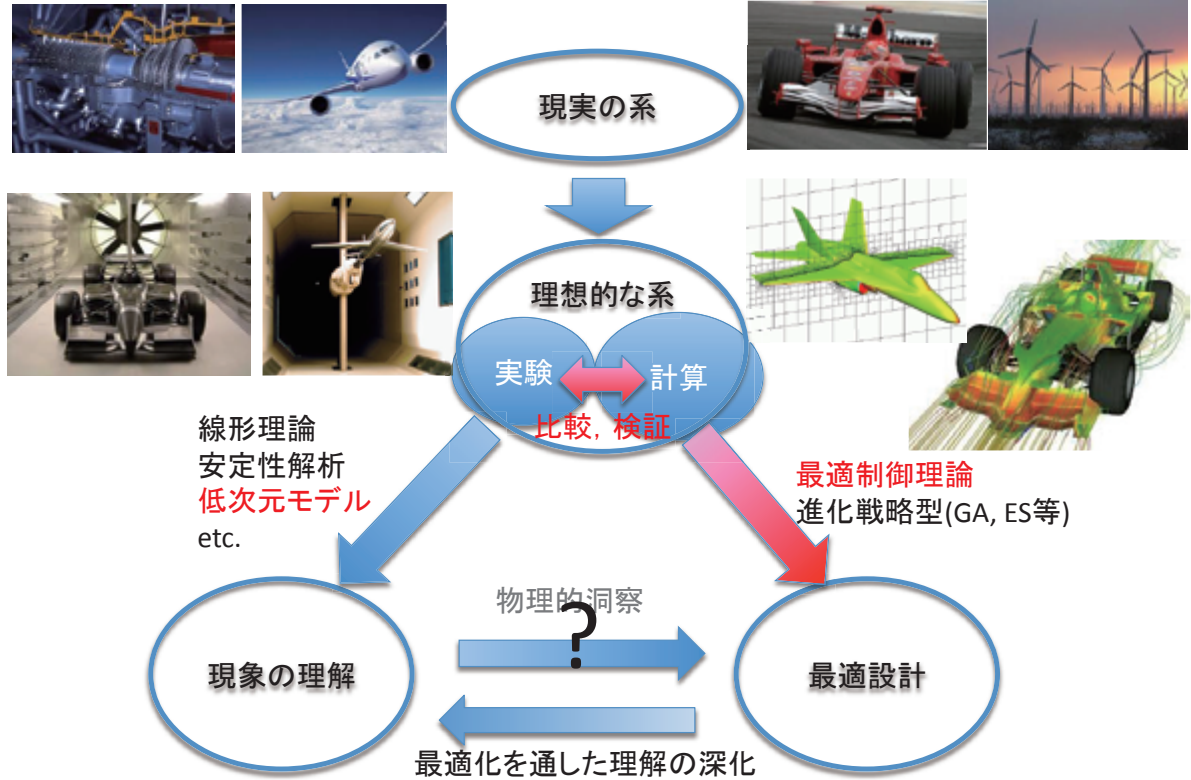


壁吹き出し/吸い込みの最適制御分布



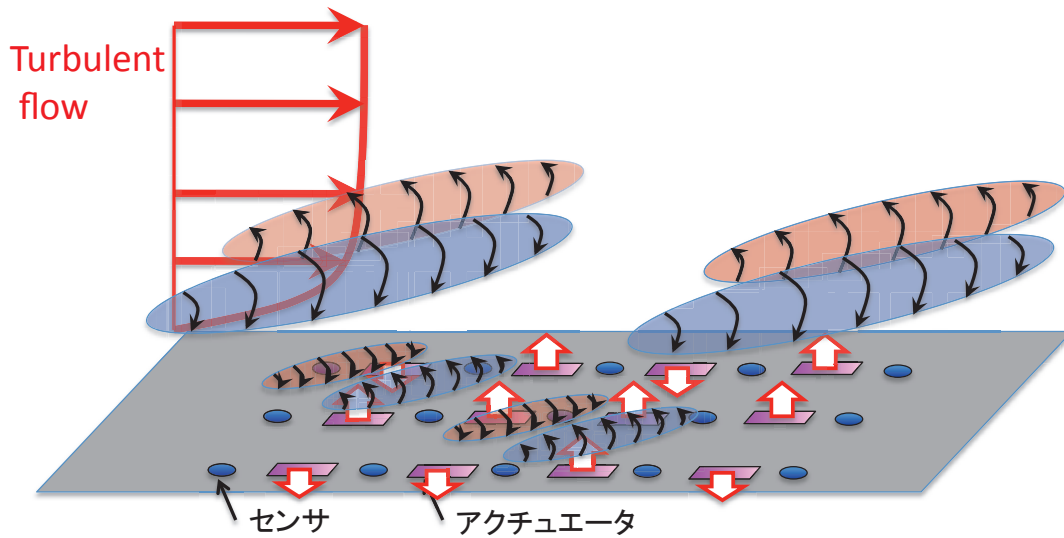


# 熱流体領域の研究進展とデータ同化技術



## 乱流輸送現象への 最適制御理論の応用

## 究極の乱流制御



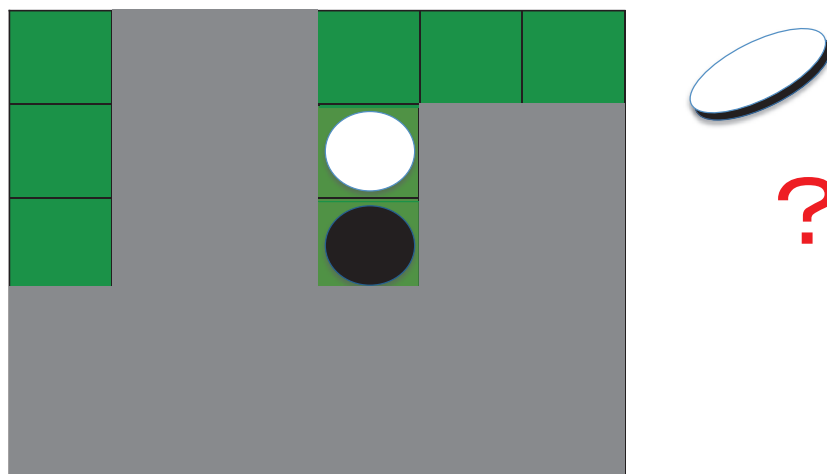
### 最適(最尤)状態推定(現象の予測):

有限のセンサ入力から如何に乱流場を予測するのか?

### 最適制御:

流れ場の状態が分かった時, どのような制御入力を加えるのか?

## 人類は乱流を予測し, 制御できるのか?

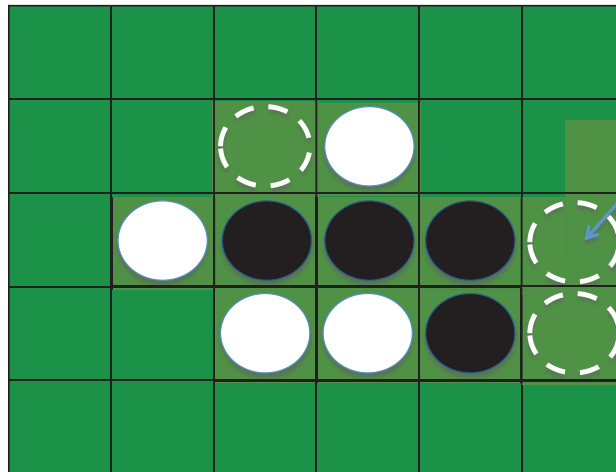
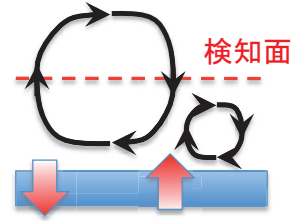


乱流制御は, 盤面の大部分が見えないオセロゲーム

# 流れ場の全情報が利用できたら どこまで制御できる？

## ■ アクティブ・キャンセレーション (Choi et al., JFM 1993)

- 壁からある距離の検知面の速度を打ち消す
- 低レイノルズ数において高々20%の抵抗低減率



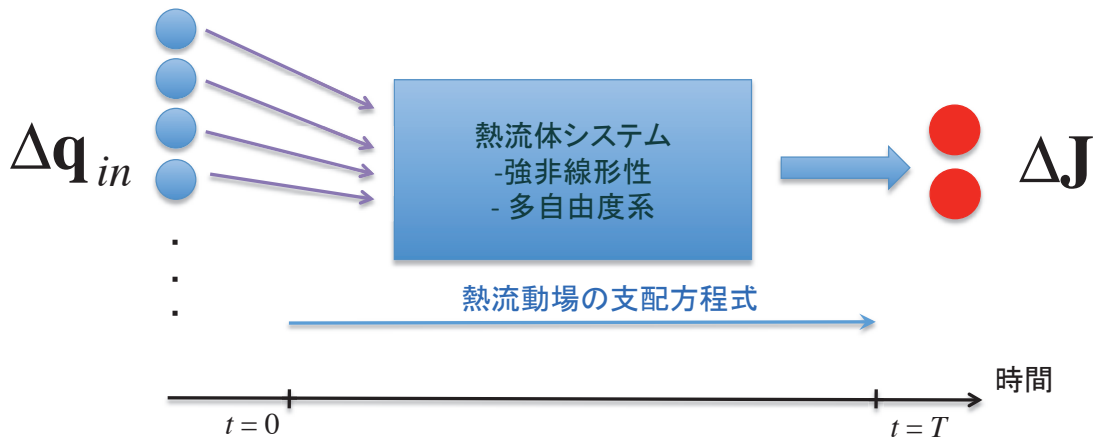
# 熱流体現象への制御理論の応用

## 多自由度の制御パラメータ

- いつ？
- どこに？
- どのような？
- どれだけ？

## 制御目的

- 伝熱
- 圧損
- 反応
- 揚力 etc...



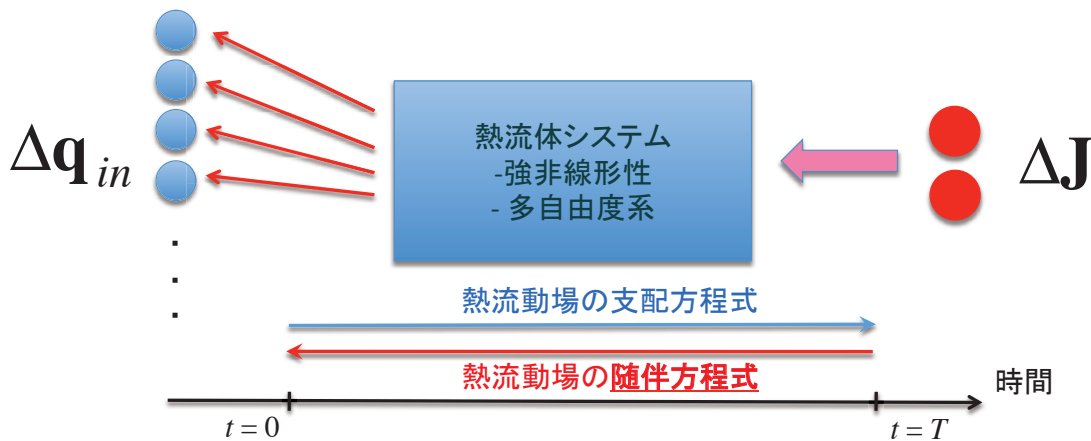
# 熱流体現象への制御理論の応用

## 多自由度の制御入力

- ・いつ？
- ・どこに？
- ・どのように？
- ・どれだけ？

## 制御目的

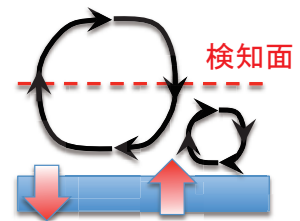
- ・伝熱
- ・圧損
- ・反応
- ・揚力 etc...



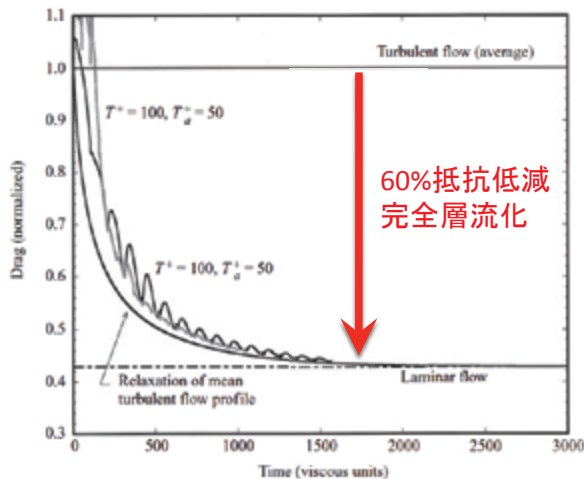
## 流れ場の全情報が利用できたら どこまで制御できる？

### ■ アクティブ・キャンセレーション (Choi et al., JFM 1993)

- ・壁からある距離の検知面の速度を打ち消す
- ・低レイノルズ数において高々20%の抵抗低減率



### ■ 最適制御理論 (Bewley et al., JFM 2001)



将来のダイナミクスを考慮すれば、  
著しい制御効果を得られる。



# 乱流の最適制御による 非相似伝熱促進

*Less Friction & More Heat Transfer*

**References:**

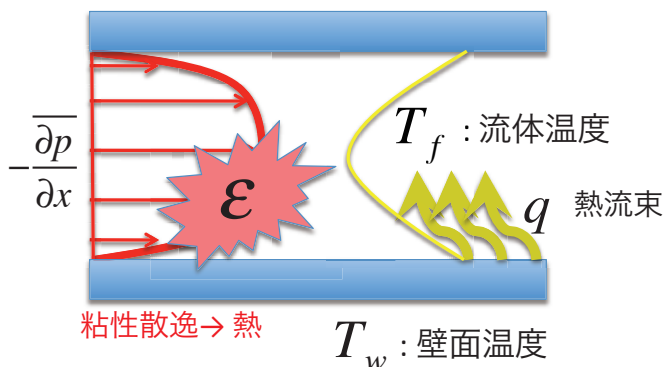
- 1) Hasegawa & Kasagi, *J. Fluid Mech.*, **683**, pp. 57-93, 2011
- 2) Kasagi, Hasegawa, Fukagata, Iwamoto, *ASME J Heat Transfer*, **134**, 031009, 2012
- 3) Yamamoto, Hasegawa & Kasagi, *J. Fluid Mech.*, **733**, pp. 189-220, 2013

## 究極の伝熱技術

*-Less Friction More Heat Transfer-*

- 次世代エネルギー機器: ヒートポンプ, 排熱からの動力回収, 高性能冷却 etc
- 高効率化, 低コスト化のための不可逆過程の抑制

伝熱を伴う管内完全発達流



□ エントロピー生成

(Bejan, *IJHMT* 1978)

$$\Delta s_f = \frac{\epsilon}{T_f} + q \left( \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_w} \right)$$

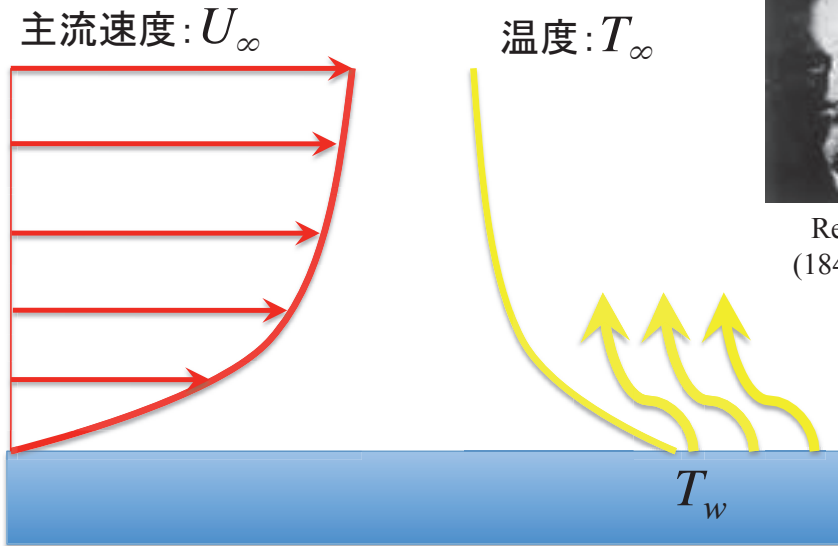
$$= \frac{\tau_w^* U_b^*}{T_f^*} + \frac{h^* \Delta T^{*2}}{T_f^* T_w^*}$$



熱伝達率 大  $h \rightarrow \infty$

圧力損失 小  $\tau_w \rightarrow 0$

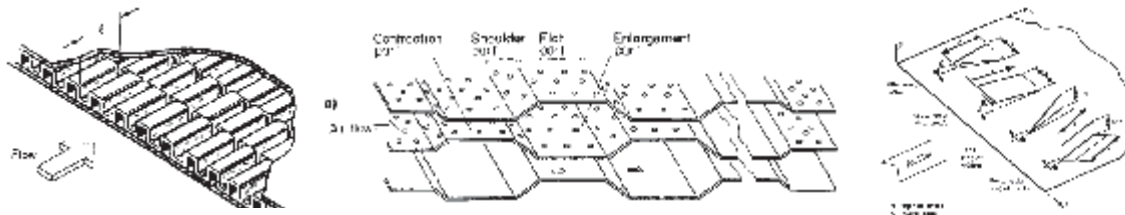
# なぜ非相似伝熱促進が難しい？



運動量輸送と熱輸送の強い相似性(レイノルズ相似則)

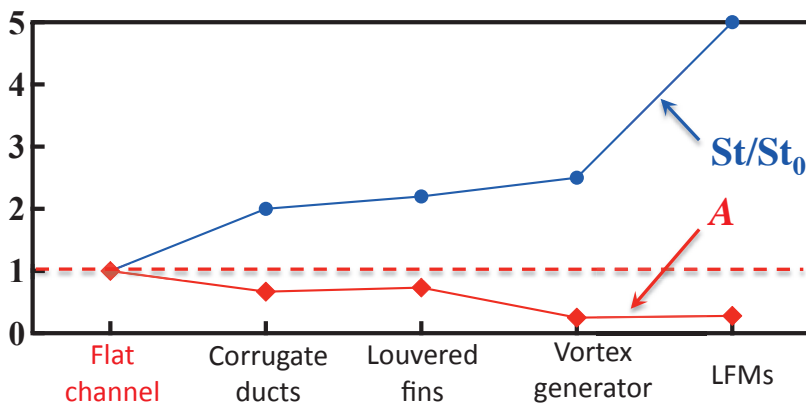
伝熱促進 → 圧力損失の増大

## 既存の伝熱促進技術



Bergles (1997)

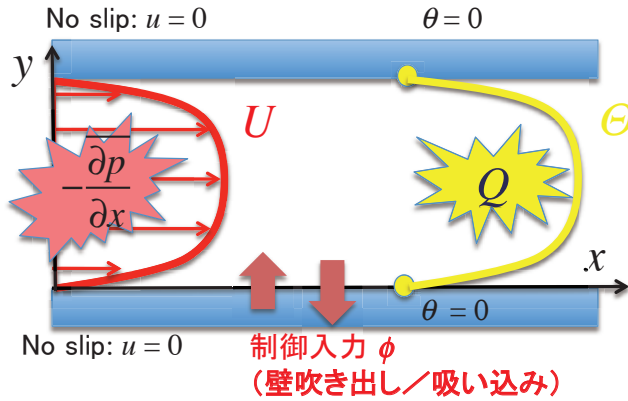
Heat transfer per unit pumping power



非相似因子

$$A = \frac{2St}{C_f} = \frac{\text{伝熱}}{\text{ポンプ動力}}$$

# 計算条件



- ✓ 一様発熱  

$$Q = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = const.$$
- ✓ 滑り無し, 壁温一定条件  

$$u = \theta = 0 \text{ at two walls}$$
- ✓  $Re_b = 1452, 2293, 4980, Pr = 1.0$   
 $(Re_\tau = 110, 150, 300 \text{ in uncontrolled flow})$

平均化した運動量方程式

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

平均化したエネルギー式

$$\bar{Q} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial(\overline{\theta'v'})}{\partial y} - \frac{1}{Pr Re} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2}$$

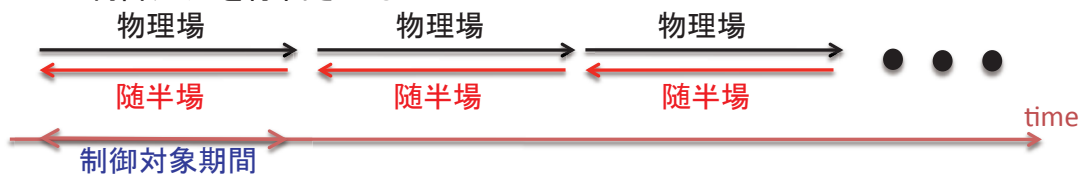
(Pr = 1.0)

## 乱流輸送現象への最適制御の応用

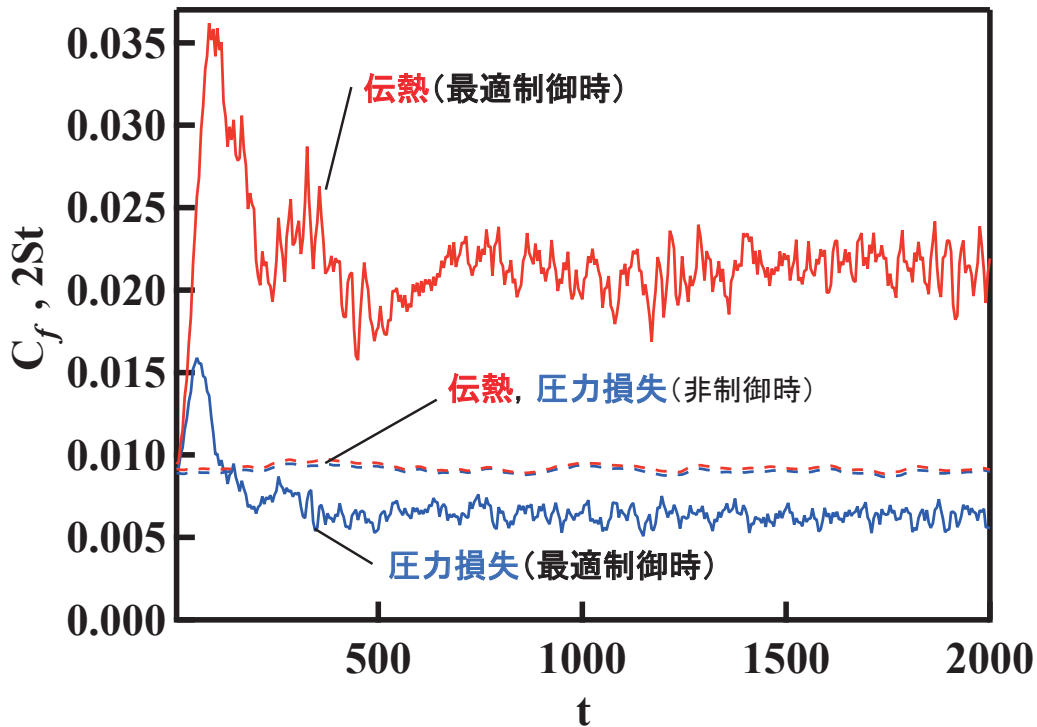
- 基本的な手順
  - ✓ コスト汎関数の定義
  - ✓ 制御入力の微小変化に対するコスト関数の変化量の導出
  - ✓ 制御入力の更新
- コスト汎関数 (Hasegawa & Kasagi, JFM 2011)

$$J(\phi) = \underbrace{\frac{\beta}{2A\Delta T} \int_S \int_t^{t+\Delta T} \phi^2 dt dS}_{\text{制御コスト}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} C_f dt}_{\text{圧力損失}} - \underbrace{\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} 2St dt}_{\text{伝熱}}$$

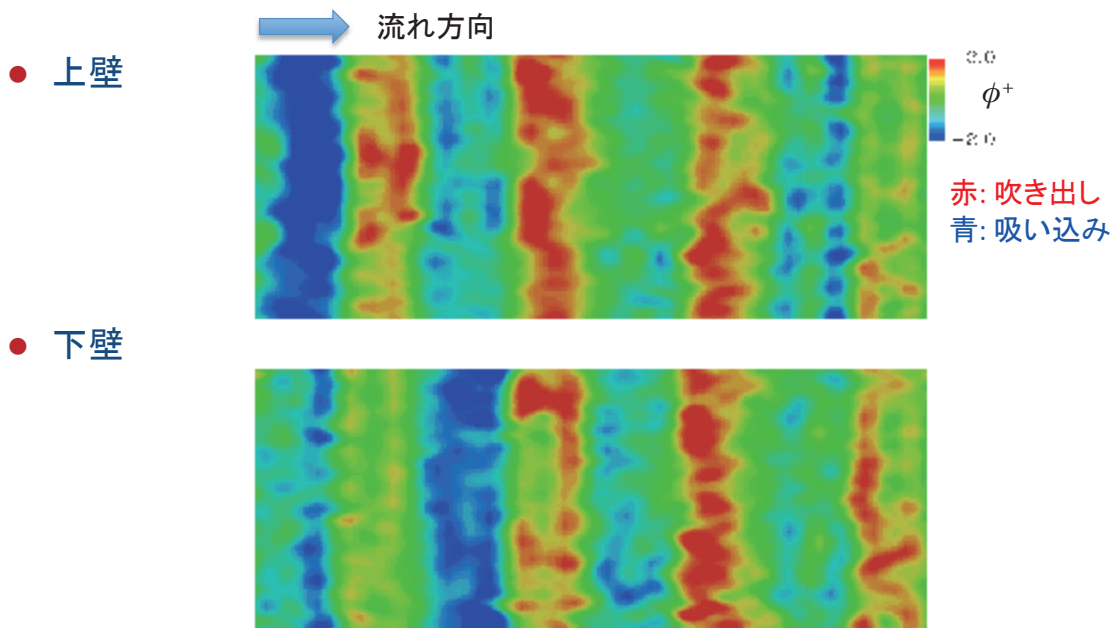
- 最適制御理論 (Bewley et al, JFM 1993, JFM 2001)
  - ✓ 有限の制御対象期間における随伴方程式を解くことにより, 制御入力を停留させる.



## 制御結果

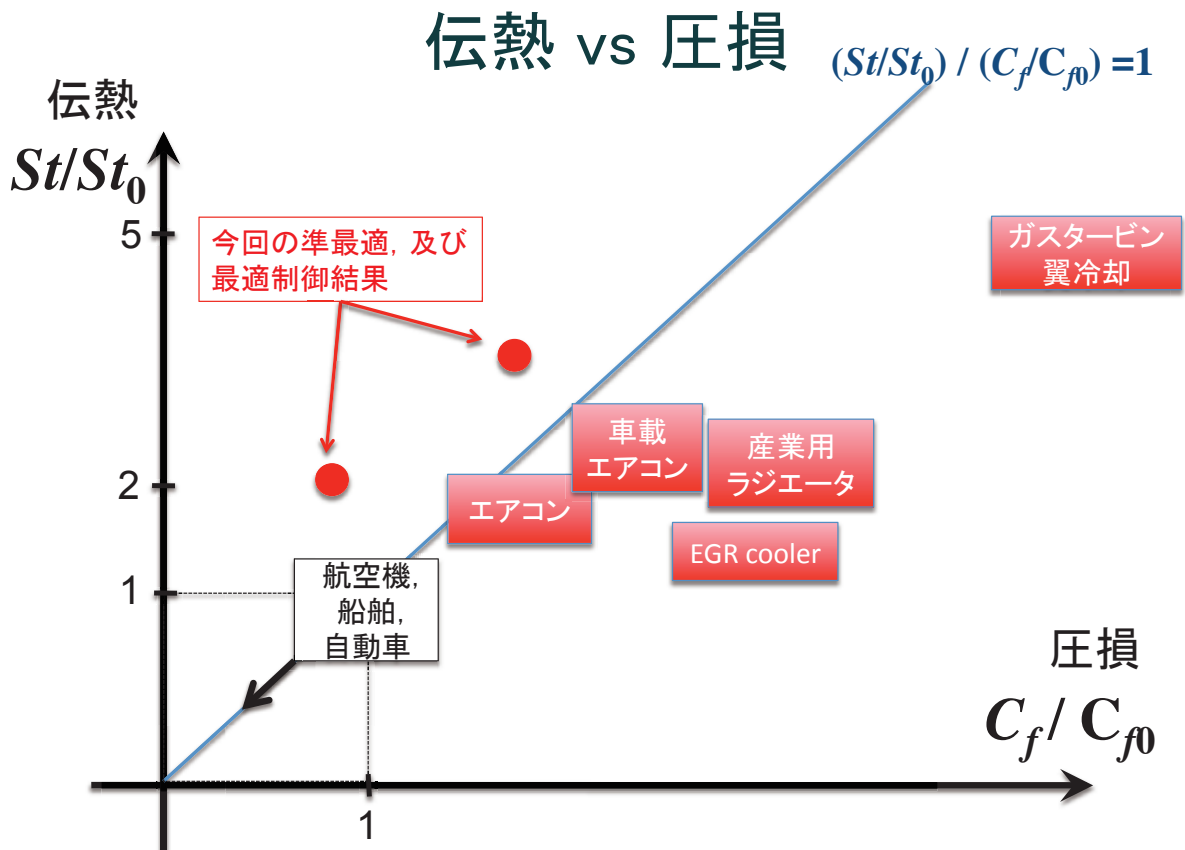


## 最適制御入力



- ✓ 下流に一定速度で伝播する進行波
- ✓ 最適制御入力はVaricosモード





## ここまでのまとめ

- 最適制御理論を応用し、従来難しいと考えられてきた壁乱流の再層流化や伝熱と摩擦抵抗の非相似制御が実証
- 将来のダイナミクスを考慮して制御入力を決めれば革新的な制御の可能性
- しかし、最適制御の適用では、流れ場の全情報が与えられていることが前提
- 有限センサー情報から流れ場の推定が必要

# 壁面情報のみに基づく 乱流制御事例

有限のセンサでどこまで乱流状態を推定できる？

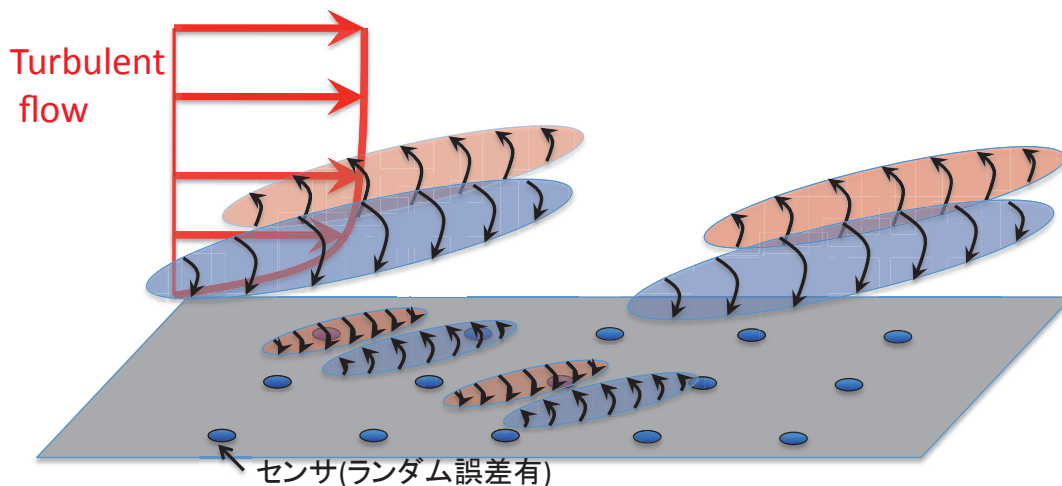
## ■ 最適(最尤)状態推定の乱流場への適用

層流: Kalman Filter (Hoegberg et al., JFM 2003, Hoepffner et al., JFM 2005)

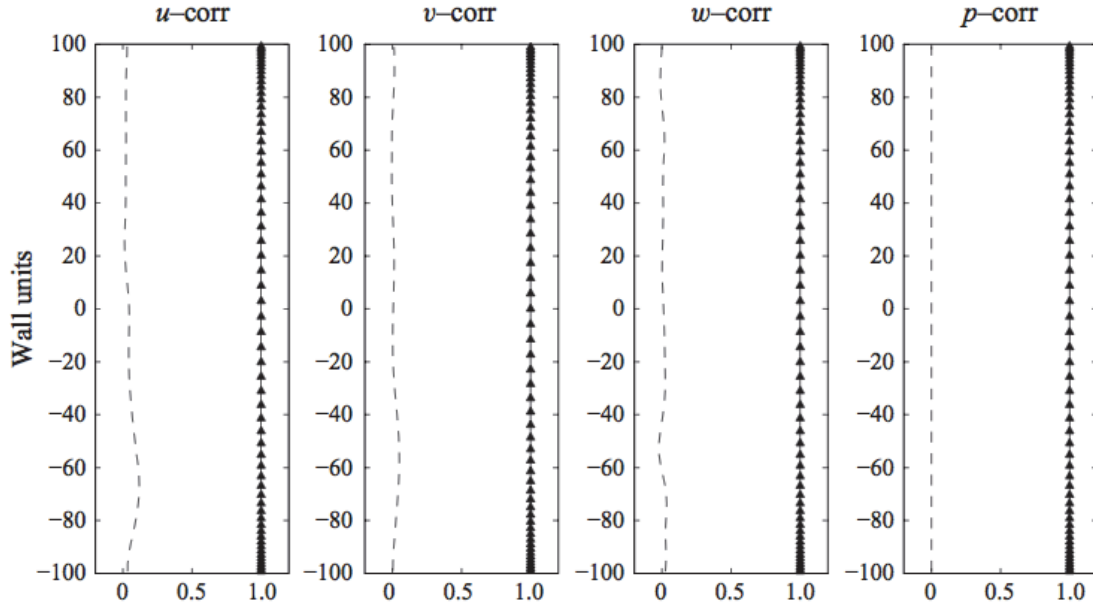
乱流: Adjoint Method (Bewley & Protas, Physica D 2004)

Extended Kalman Filter (Chevalier et al., JFM 2006)

**Ensemble Kalman Filter (Colburn et al., JFM 2011)**



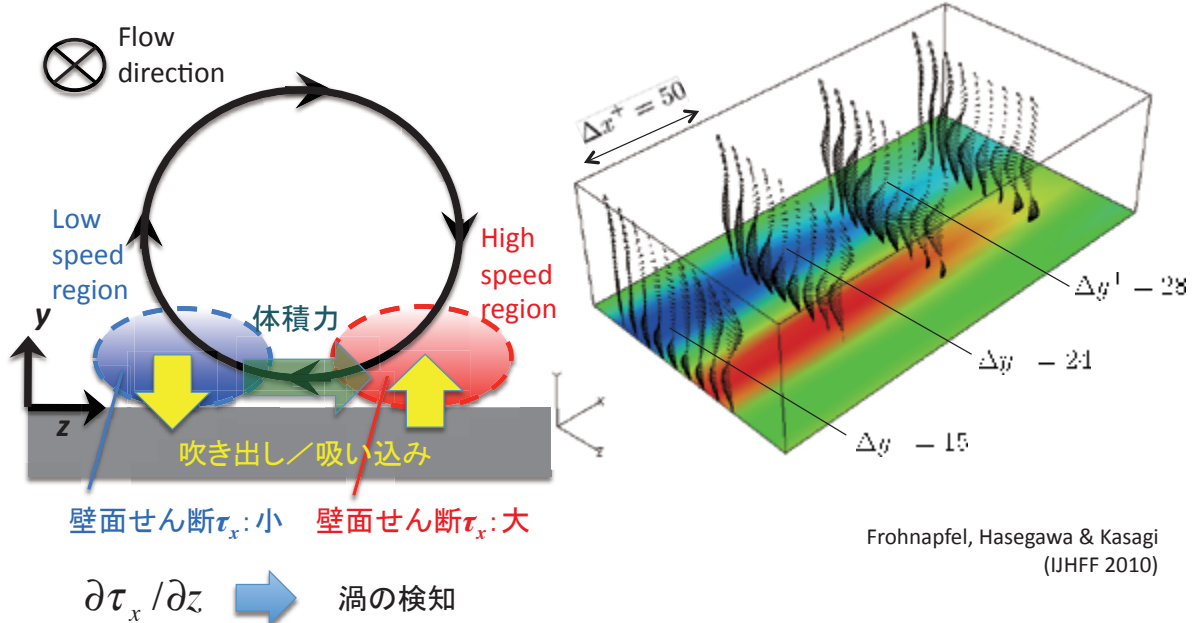
## それでは、有限のセンサでどこまで乱流状態を推定できる？



全領域で、正解と予測の相関がほぼ1！

(Colburn et al., JFM 2011)

## 壁情報に基づくOpposition Control



Frohnafel, Hasegawa & Kasagi (JHFF 2010)

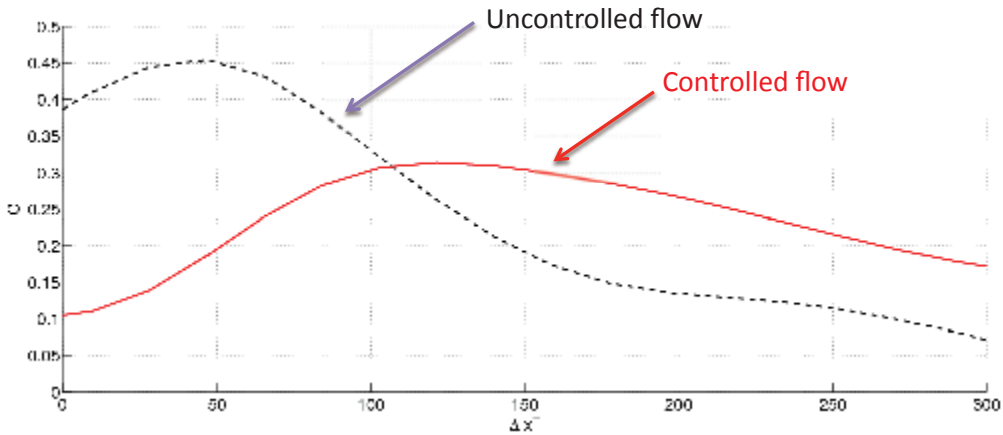
# Comparison of Correlations

W-Damping based on Spanwise Wall Shear Stress

$$f_w = -\frac{f(y^+)}{\Phi^+} y^+ \epsilon_{\tau} (\tau^+ - \tau^-)$$

sensor input

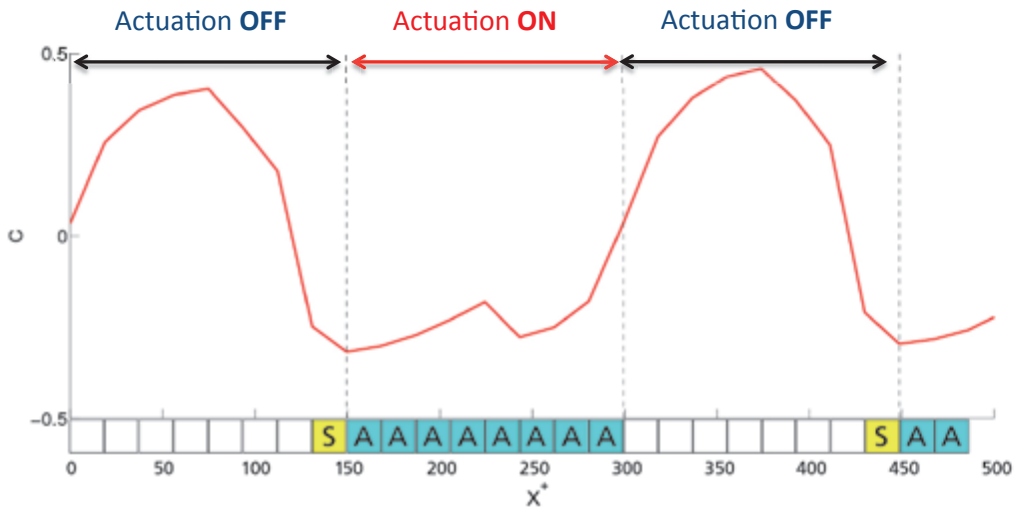
$$C^+ \left( \frac{\partial \tau_w}{\partial z}, -\tau_w(x^+ - \Delta x) \right)$$



EFMC8, Sept. 13-16, 2010 31  
 B. Frohnäpfel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi

# Partial Opposition Control

The correlation between  $\partial \tau_x / \partial z_x$  and wall normal velocity in the detection plane

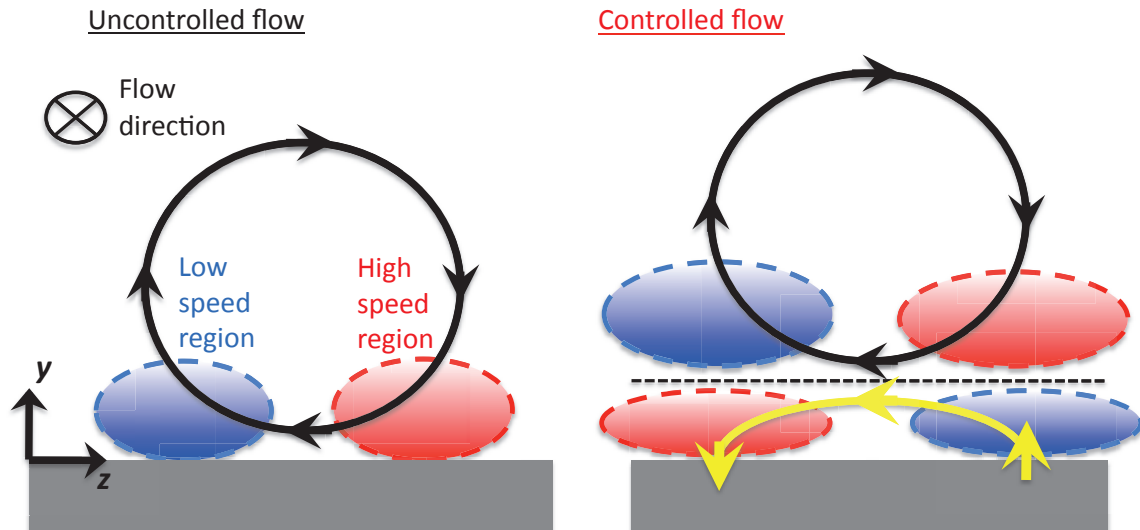


The correlation rapidly responds to the control input.

EFMC8, Sept. 13-16, 2010  
 B. Frohnäpfel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi



# Control Effects on Sensing Quantity



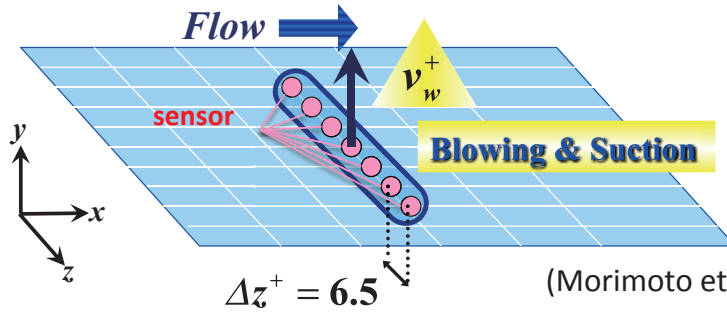
Relationship between  $\partial T_x / \partial z$  and the vortex motion becomes opposite when opposition control is applied.

EFMC8, Sept. 13-16, 2010  
 B. Frohnäpfel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi

壁面情報のみに基づく  
 適応型乱流制御

# Genetic algorithm (GA) for feedback control

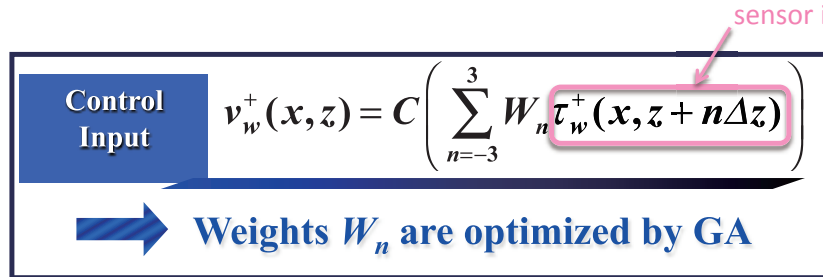
Turbulent Channel Flow of  $Re_t = 100$



■ Cost function  
→ wall friction

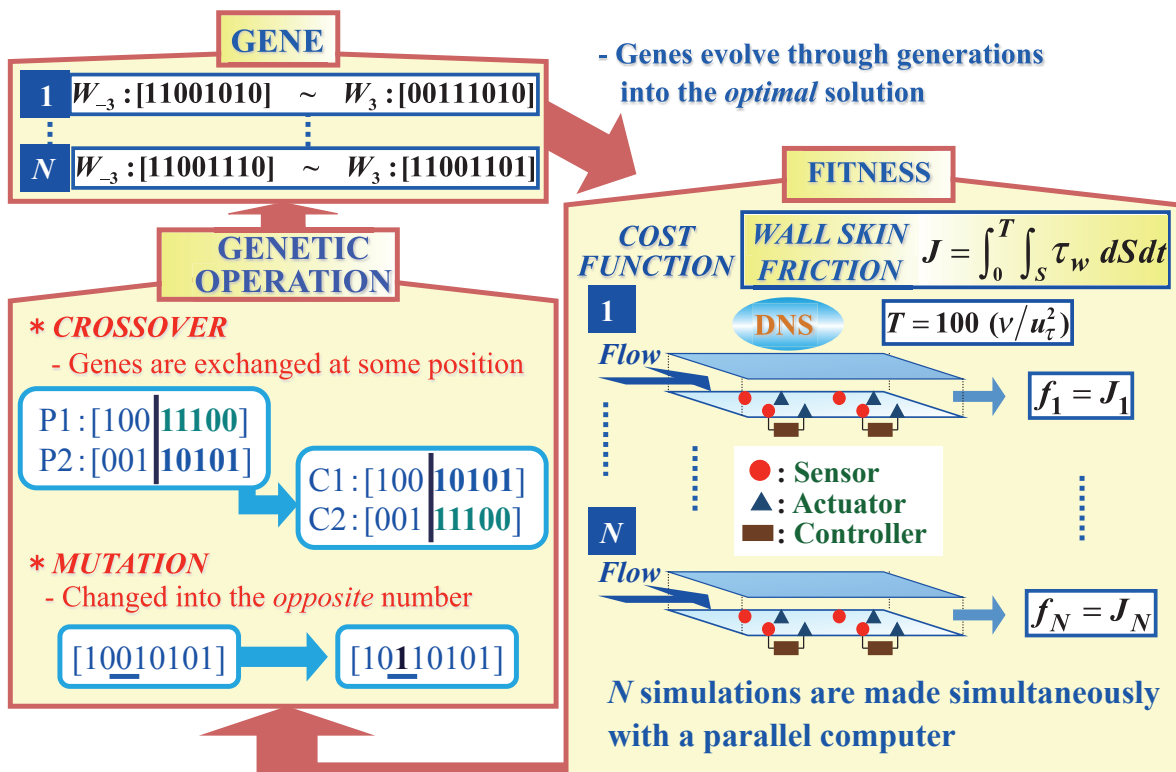
$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_w dt$$

(Morimoto et al., Proc. SMART-3, 2002)

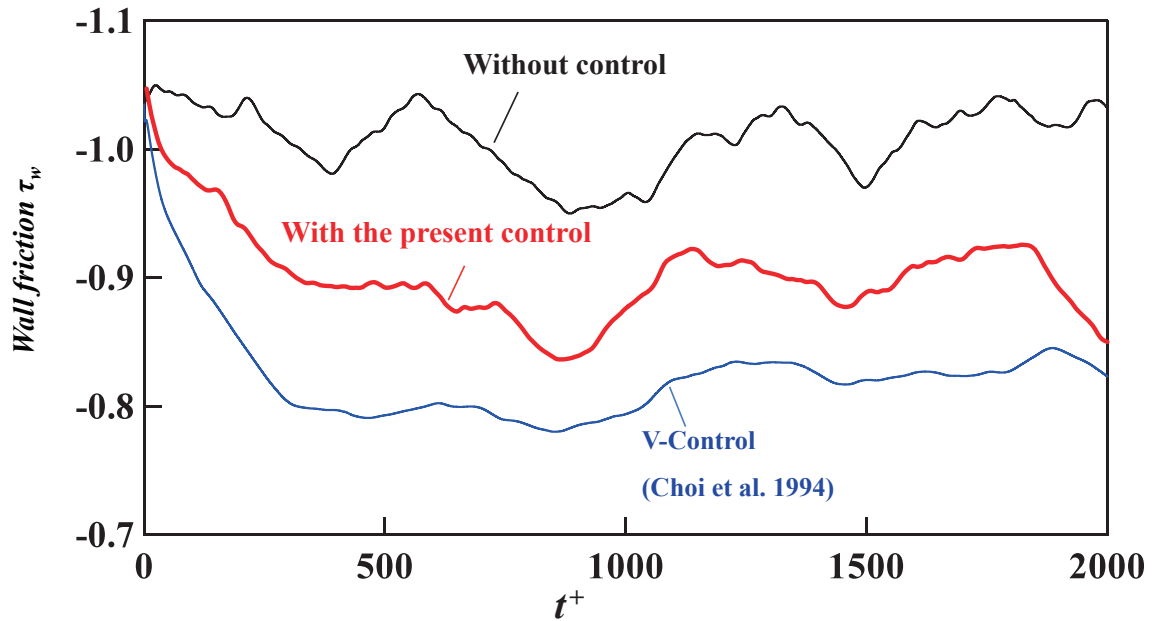


3535

## GA-based optimization



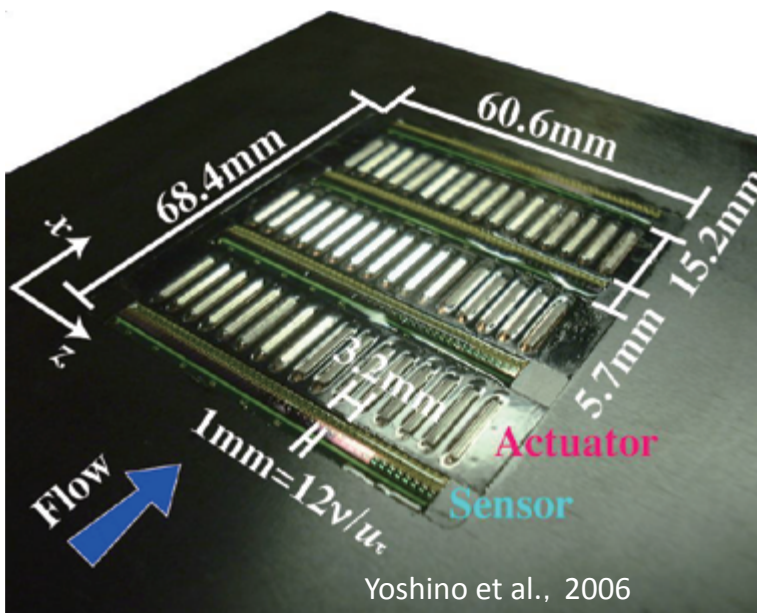
## Control Results



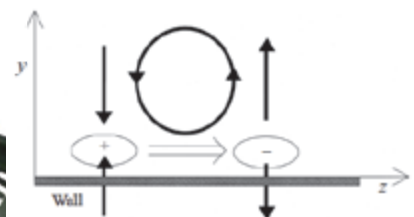
- Significant drag reduction from the onset of the control
- ➡ Mean reduction rate: 12%, Maximum rate: 18%

## フィードバック制御の実証実験

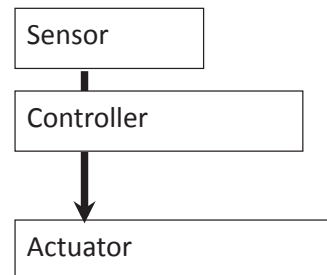
- Smart Skin



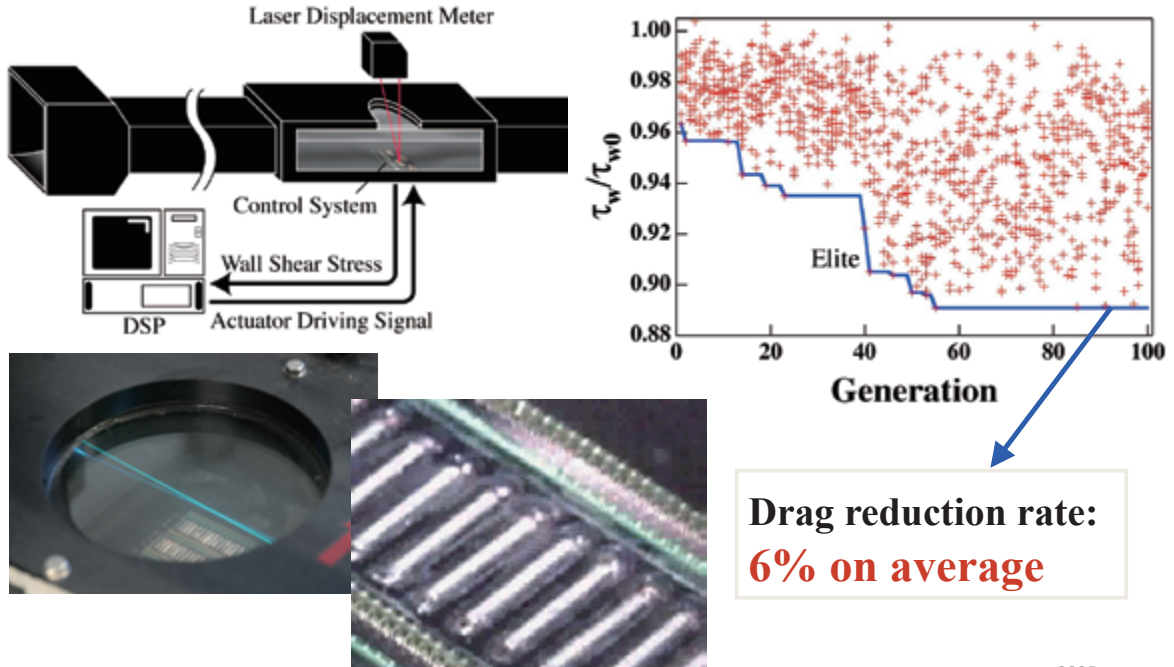
Active cancellation



Lee et al., 1998

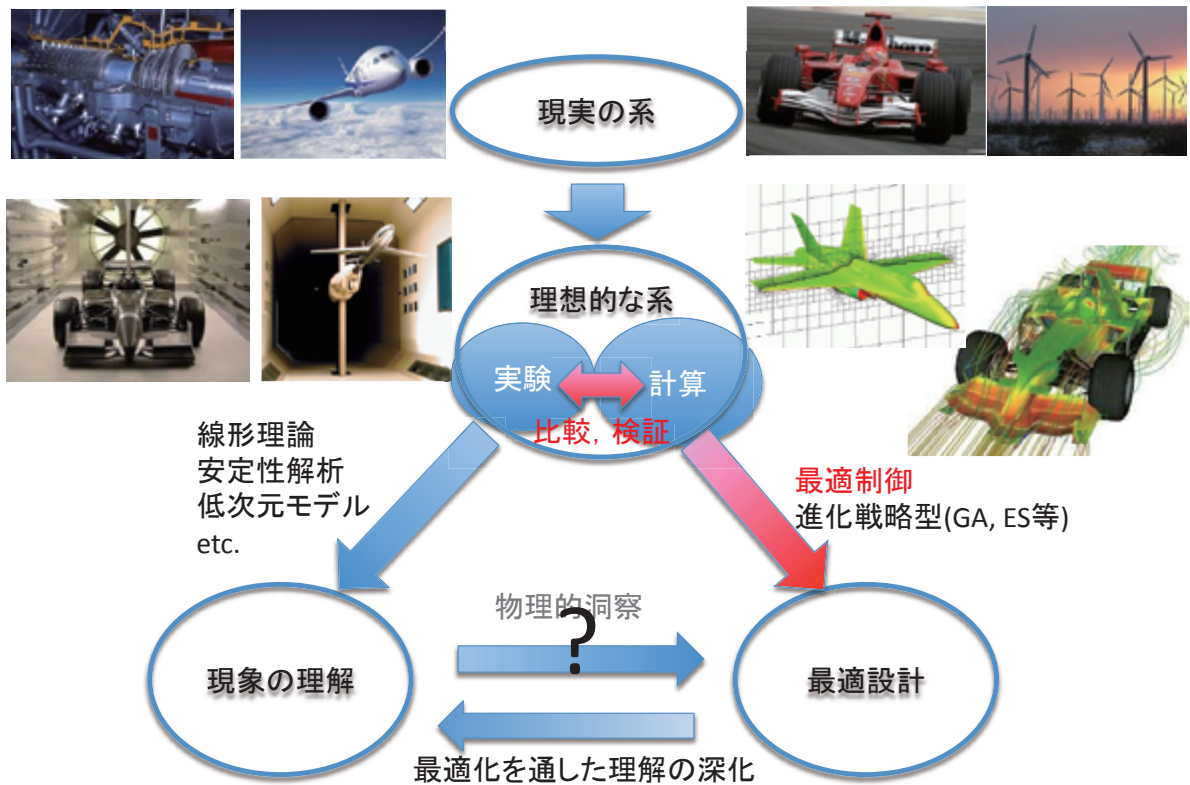


# 摩擦抵抗低減の実証



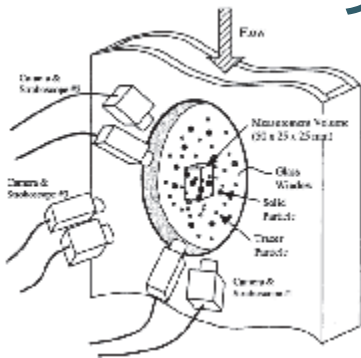
3935

# 熱流体領域の研究進展とデータ同化技術

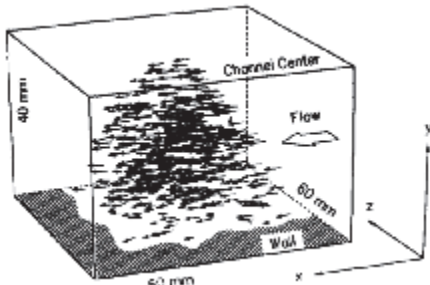
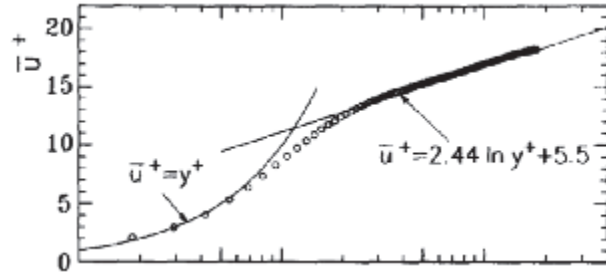




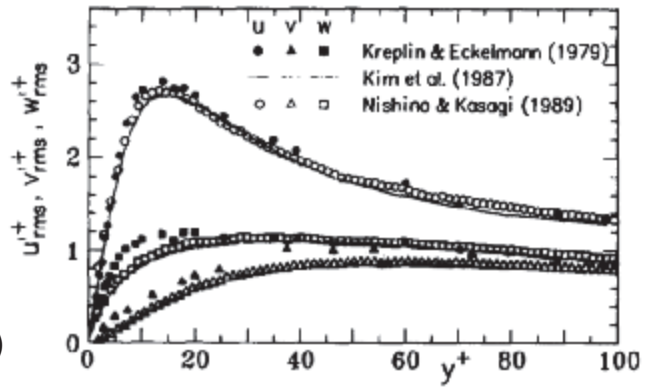
# 実験 vs 計算



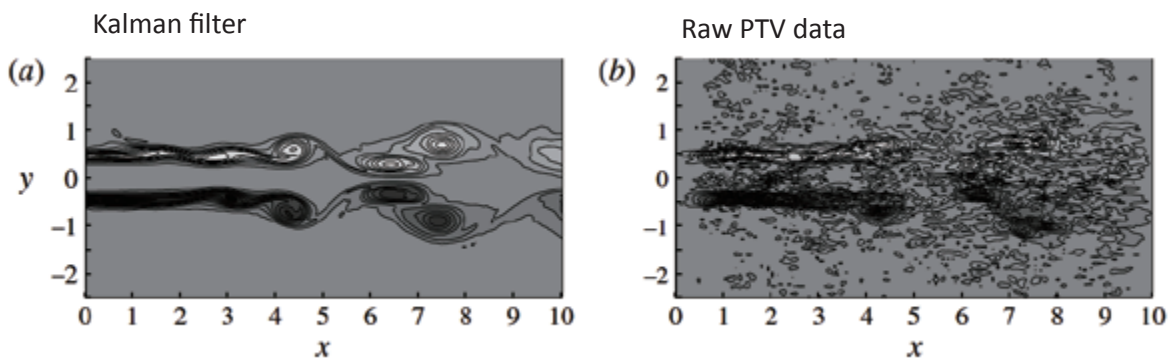
Suzuki et al. (2000)



Kasagi & Nishino (1991)



# 実験データの有効利用

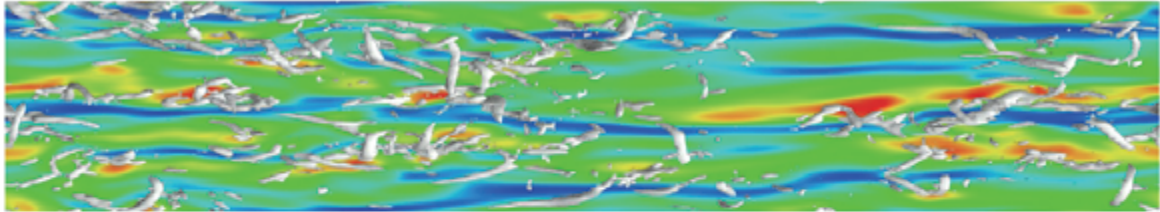


Suzuki (JFM 2012)

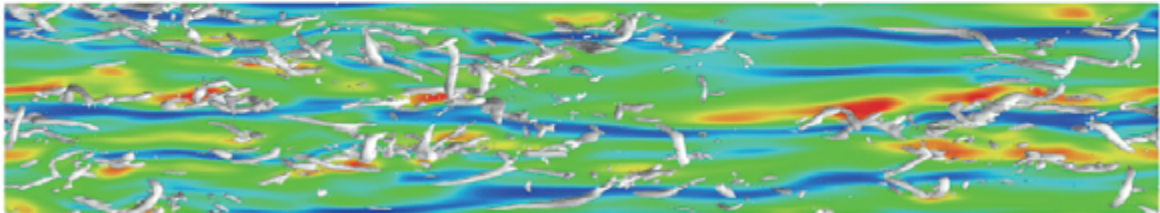
- ・境界条件, 初期条件の不確かさ
- ・計測ノイズ
- ・大事な乱流統計量の多くは微分量
- ・計測困難な領域(壁面近傍等)

## 統計量から瞬時場へ

倍精度のシミュレーション(有効桁16桁)



単精度のシミュレーション(有効桁8桁)



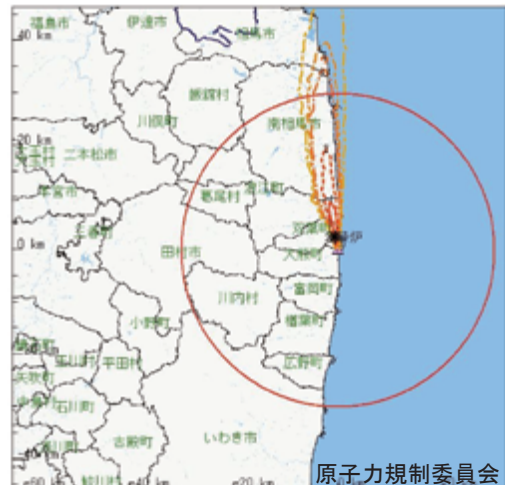
様々な誤差因子:境界条件, 初期条件, モデル精度, 打ち切り誤差……

## 環境予測におけるニーズ

- 異常気象予測(台風, ゲリラ豪雨)
- 風況予測(建築構造物, 風力発電)
- スカラー源予測(CO<sub>2</sub>, 有害物質等の拡散)

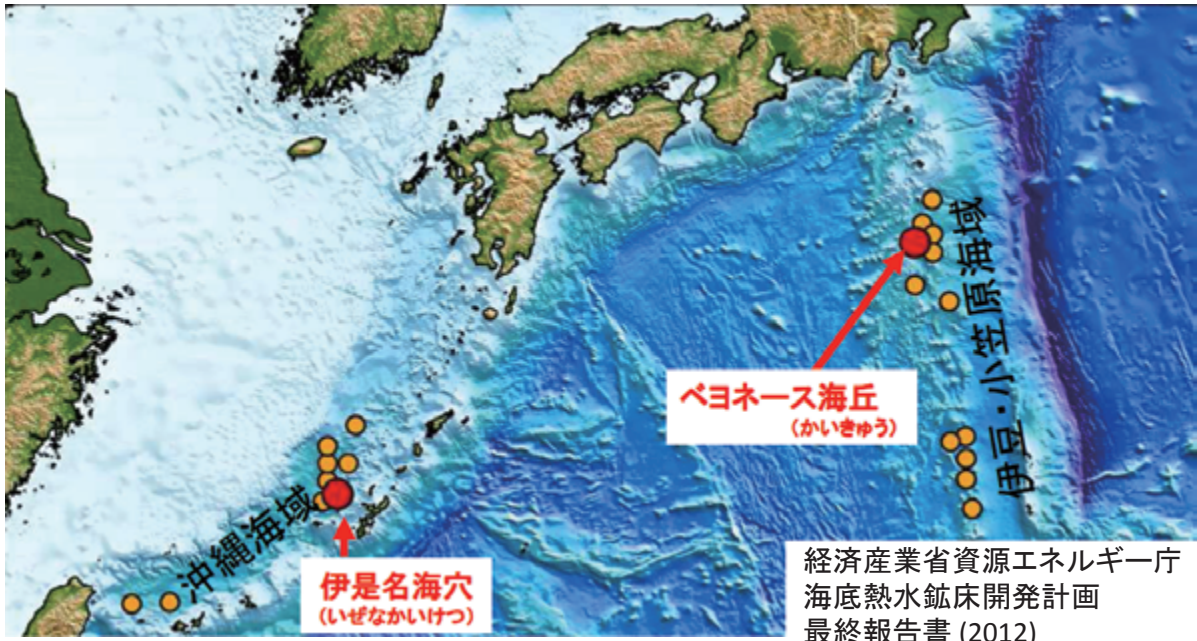


Mechali et al.



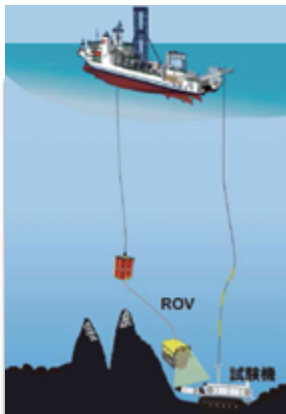
原子力規制委員会

# 日本国周辺の海洋熱水鉱床

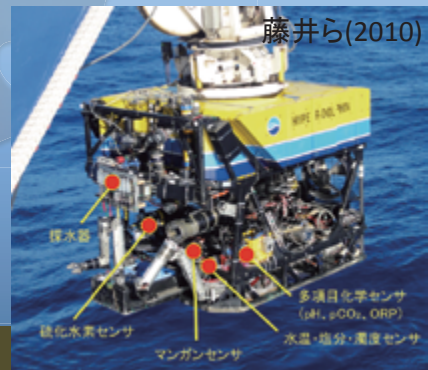
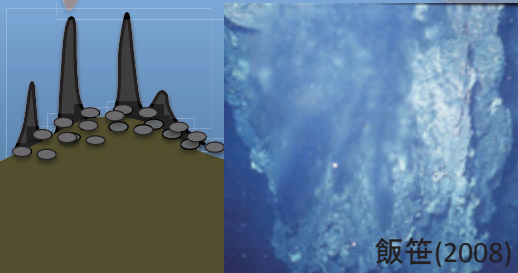


- ✓ 金属鉱物資源 (ベースメタル, 貴金属, レアメタル, レアアース)
- ✓ 固有の生態系

## 海洋資源探査

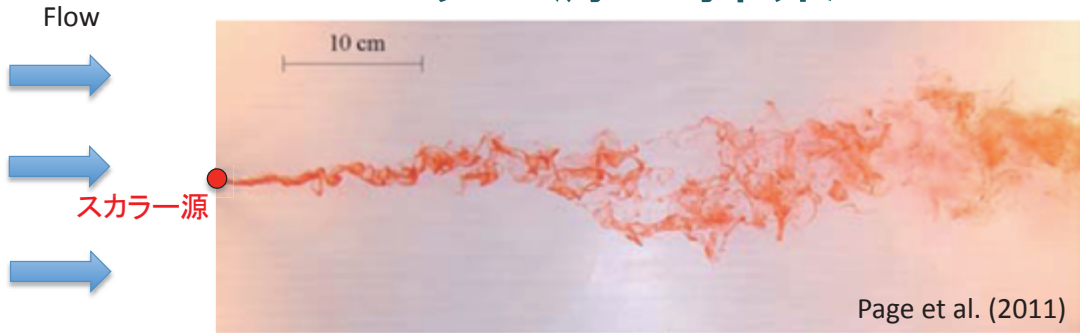


- ・限られたセンサー情報
- ・熱水鉱床の推定
- ・周辺環境, 生体系の把握
- ・採鉱による汚染物質拡散予測

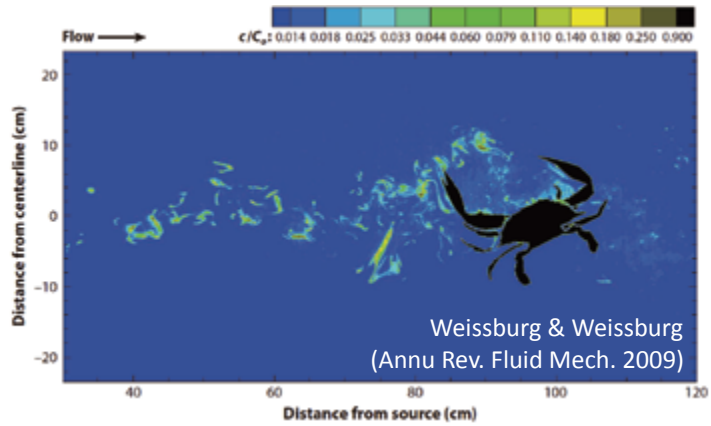




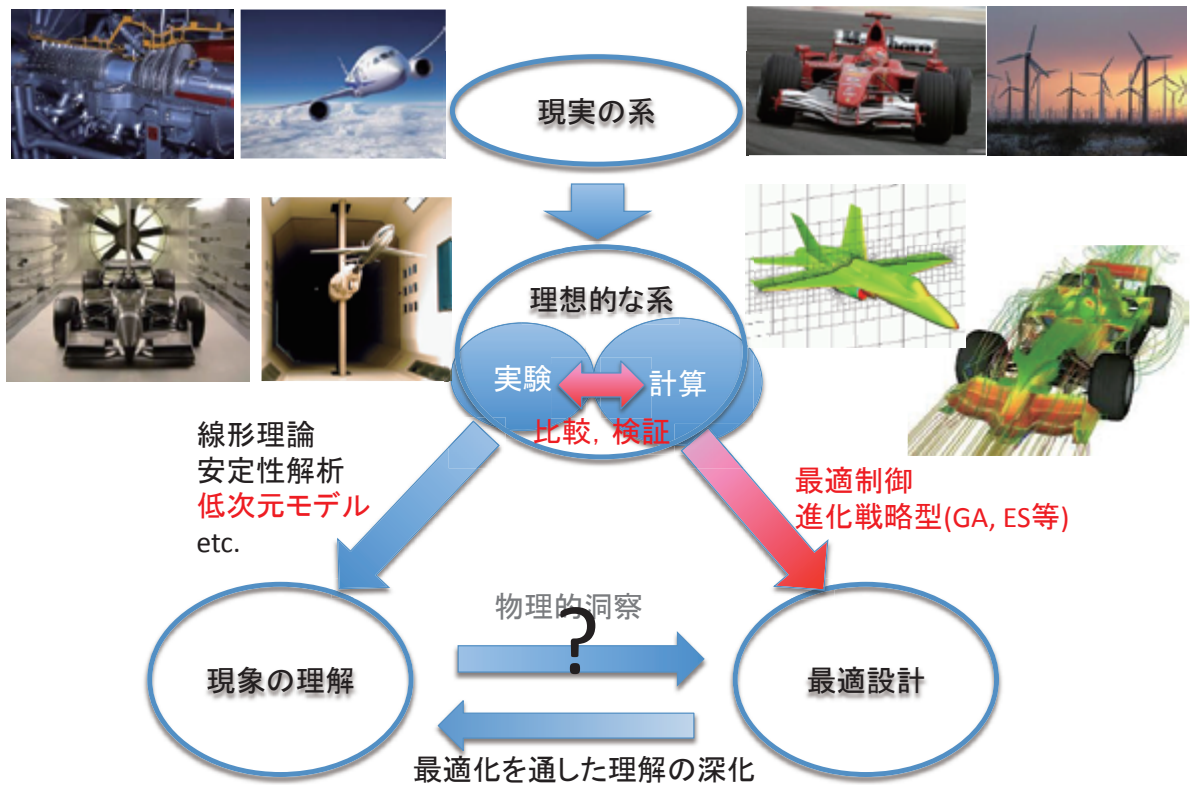
# スカラー源の探索



- ・有限個の臭覚センサー
- ・瞬時の濃度スパイクに基づくスカラー源探索



# 熱流体領域の研究進展とデータ同化技術



## まとめ

- 乱流制御の観点から
  - 能動制御の問題は,
    - 1)有限のセンサー情報に基づく**流れ場の推定**, 及び
    - 2)与えられた流れ場に対する**制御入力最適化**という2つのサブ課題に分けられる.
  - 流れ場が与えられれば, 最適制御理論は制御入力を決める強力なツール
  - 一方, 状態推定に関する研究事例は比較的少なく, センサー配置や観測すべき量に関して更なる研究の余地あり
  - Model-based or Model-free (adaptive) ?
- パラメータ推定の観点から
  - 乱流場における渦粘性, 反応流における反応定数等の未知パラメータの同定
  - 単なる**フィッティング**にならないように
- 乱流予測の観点から
  - これまで実験と計算の比較検証は, 専ら**統計量のみ**
  - ある**瞬時場**が予測できるかは別問題
    - 大気・海洋の汚染物質拡散
    - 局所の異常気象, 風況予測
    - 海洋資源探査 等
  - 信頼できる統計量が得られないアプリケーションでは, データ同化技術が重要となる