

第5回EFD/CFD融合ワークショップ  
2012年1月23日 秋葉原

## 乱流の数値実験に関する考察

Discussion on Numerical Experiment of Turbulent Flows

大阪大学 工学研究科  
梶島岳夫

### 実験としての測定と計算

- 実験の再現
  - 測定値を参照して、計算法やモデルの検証を行う
- 実験の補完
  - 測定値の一部を検証に用い、測定不可能な知見を得る
- 実験と協調
  - 測定値と計算値を整合させ、一つの実験手段を構成する
- 実験を先導
  - 実現可能性を予測し、測定すべき事項を提示する

自律的な数値実験



数値計算自身による検証

## 乱流解析の目的

### ■ 制御

- 揚力
- 抗力
- 伝熱
- 拡散
- 反応
- 騒音

### ■ 観測・操作

- 平均速度
- 平均圧力
- 速度変動
- 圧力変動
- 組織的な渦構造
- 微細な渦構造

## 話題提供内容

### ■ 論点

- 測定結果と計算結果の照合における不確かさの低減
- 測定値により物理モデルの定数群を調整することは妥当か

### ■ 題材

- 格子解像度に対する収束の非単調性
- 不完全な境界条件の影響
- 補完関係(例: 音源と音)の問題

## 不確かさ

- EFDとの協調により、  
CFDの不確かさは低減されなければならない
- 参考 (ASME, Author Resources)
  - Journal of Fluids Engineering
    - Statement on the Content of Numerical Accuracy
    - Editorial on Experimental Uncertainty

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

## Journal of Fluids Engineering Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy

1. The basic features of the method including formal truncation error of individual terms in the governing numerical equations must be described.
2. Methods must be at least second order accurate in space.
3. Inherent or explicit artificial viscosity (or diffusivity) must be assessed and minimized.
4. Grid independence or convergence must be established.
5. When appropriate, iterative convergence must be addressed.

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

## Journal of Fluids Engineering Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy

6. In transient calculations, phase error must be assessed and minimized.
7. The accuracy and implementation of boundary and initial conditions must be fully explained.
8. An existing code must be fully cited in easily available references.
9. Benchmark solutions may be used for validation for a specific class of problems.
10. Reliable experimental results may be used to validate a solution.

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

### 7. The accuracy and implementation of **boundary and initial conditions** must be fully explained.

Typically, the overall accuracy of a simulation is strongly affected by the implementation and order of the boundary conditions.

When appropriate, particular attention should be paid to the treatment of inflow and outflow boundary conditions.

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

## 9. Benchmark solutions may be used for validation for a specific class of problems.

However, in general this does not demonstrate accuracy for another class of problems, especially if any adjustable parameters are involved, as in turbulence modeling.

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

## 10. Reliable experimental results may be used to validate a solution.

However, "reasonable agreement" with experimental data alone will not be enough to justify a given single-grid calculation, especially if adjustable parameters are involved.

<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>

## スケール比 ～ 例: リブレット

$$h = 1/8 \text{ mm}$$



High Performance Film  
3M Scotchcal (1983)

$$H = 20 \text{ m}$$



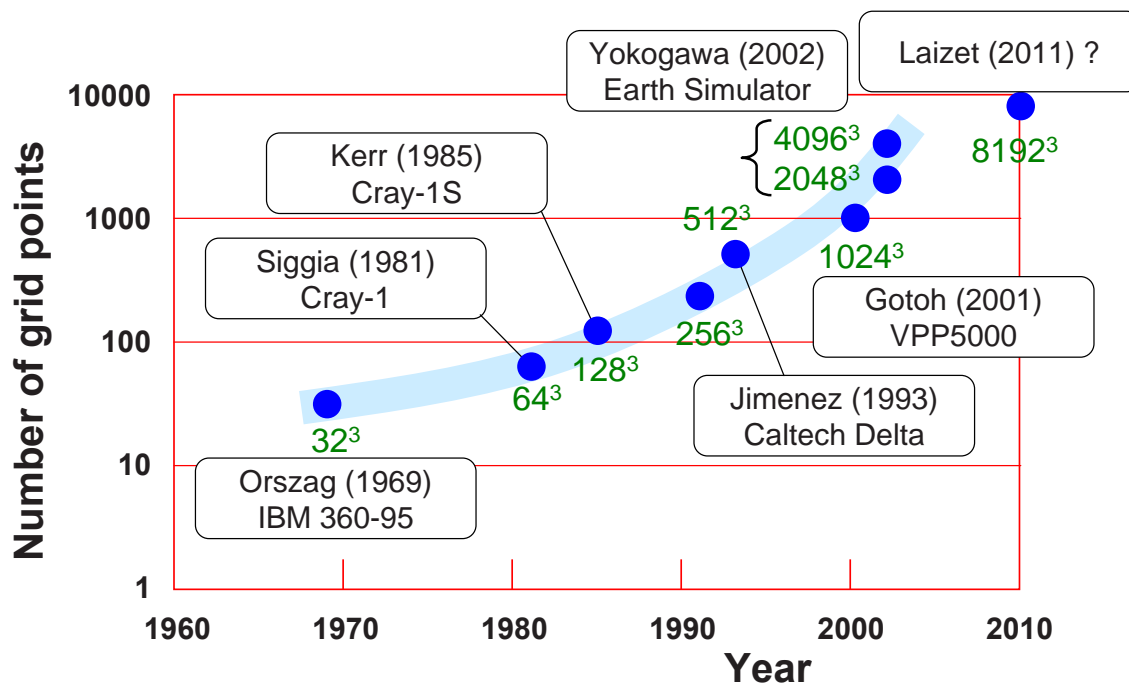
San Diego Yacht Club  
Stars & Stripes (1987)

$$L > 3H$$

$$\Delta < h/8$$

$$N = \frac{L}{\Delta} \sim 10^{6 \sim 7}$$

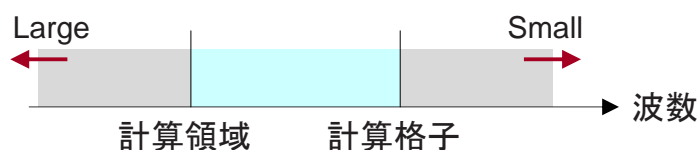
## DNSの計算規模 ～ 一様等方乱流



## スケール比 ～ 数値計算の限界

### ■ スケールの窓

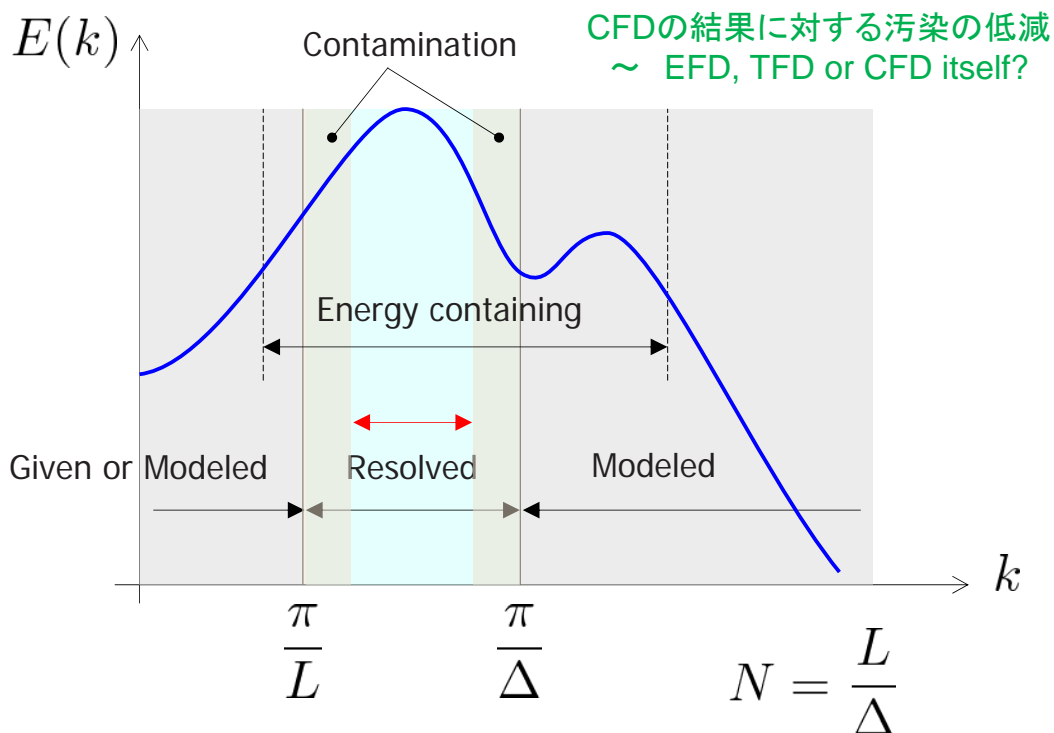
- 低波数側（赤外側）      ← 境界条件
- 解析対象（可視域）      ← 数値計算法
- 高波数側（紫外側）      ← 物理モデル



### ■ 可視域は高々4桁のスケール幅

- 格子分割数(三次元計算)
  - PC :  $\mathcal{O}[(10^2)^4] \sim$  HPC :  $\mathcal{O}[(10^4)^4]$

## 波数空間での計算領域



## 汚染源

- 境界条件
  - 領域の打ち切り: 流入、流出、遠方
  - 界面: 固体壁面、気液界面(捕獲法)
- 数値計算法
  - 離散化誤差
  - 陽的な数値拡散
- 乱流モデル
  - Closure
  - 経験定数群
  - 壁関数

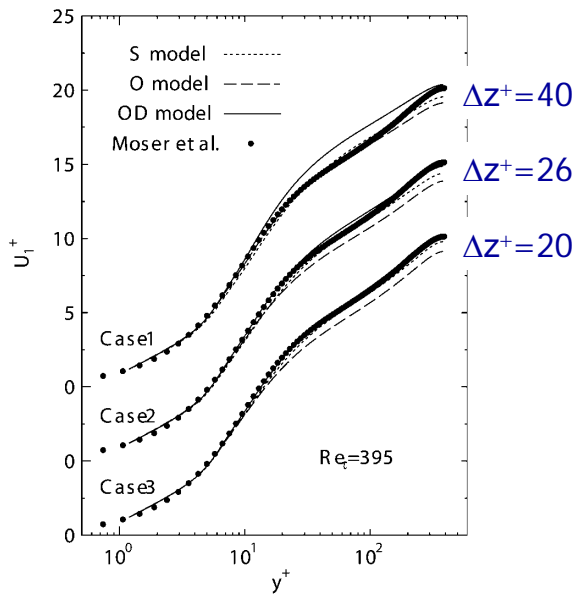
## 収束の非単調性

- 平行平板間乱流のLESにおける格子解像度の影響
- Subgrid Scale Models
  - Smagorinsky model
  - 1-Eq. model (Yoshizawa, Okamoto-Shima)
  - 1-Eq. Dynamic (Kajishima-Nomachi)
- DNS database
  - Moser, Kim & Mansour (1999)

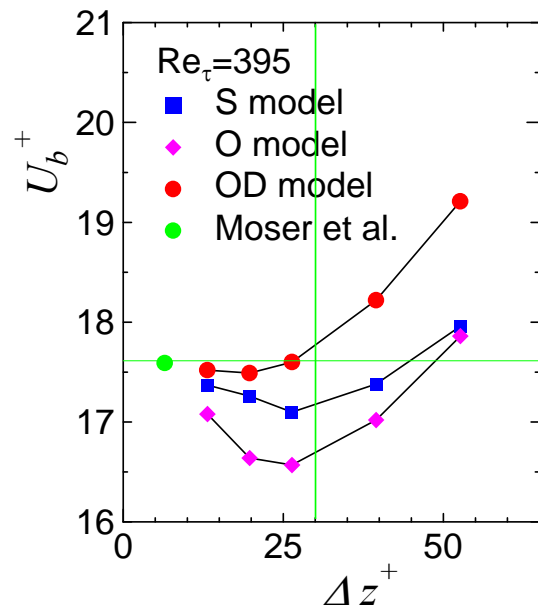


## $Re_\tau = 395$

### ■ 平均速度分布



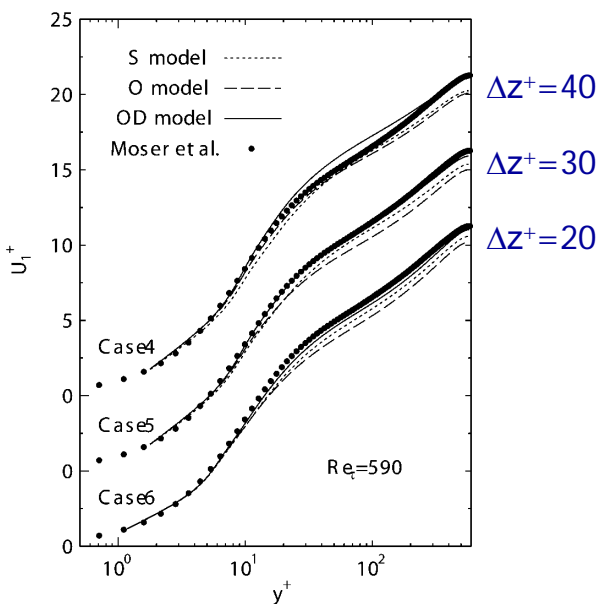
### ■ 断面平均流速



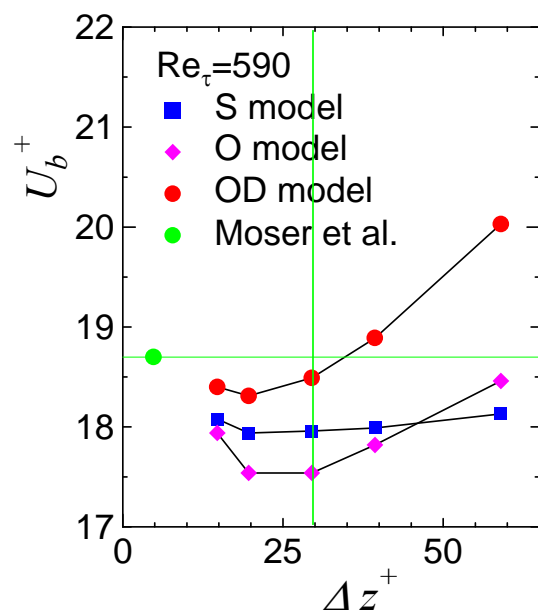
Kajishima, T. & Nomachi, T. (2006) J. Appl. Mech., **73**-3, 368-373

## $Re_\tau = 590$

### ■ 平均速度分布



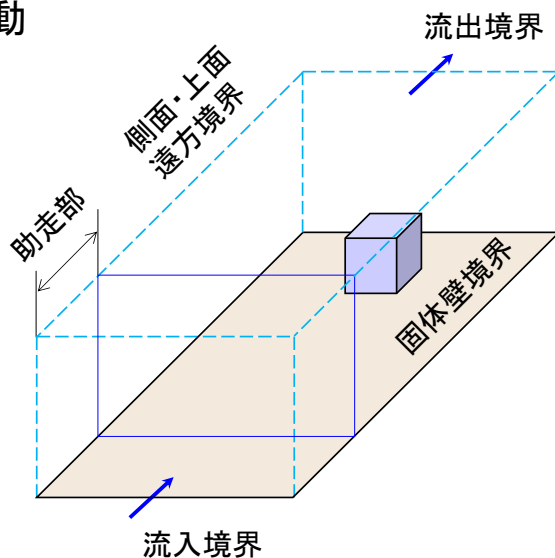
### ■ 断面平均流速



Kajishima, T. & Nomachi, T. (2006) J. Appl. Mech., **73**-3, 368-373

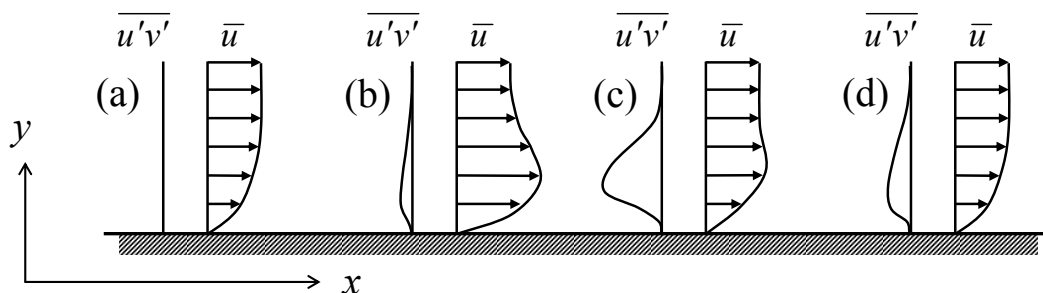
## 汚染源 ～ 数理モデル、物理モデル

- 境界条件のモデル
  - 固体壁：粗面、壁関数
  - 流入：速度変動・圧力変動
  - 流出：無反射対流流出
  - 遠方：トラクションフリー
- NS式の一部、もしくは異なる式を用いる
- 最大スケール側の仮定の最も影響は大きい



## 不完全な流入境界条件

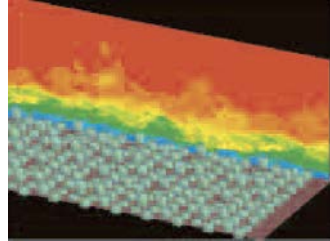
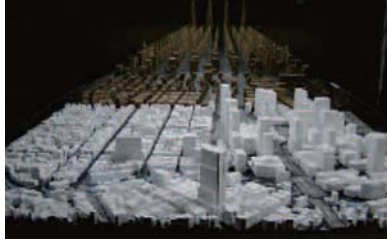
- 平衡状態にない流入条件からの回復



- 助走区間も扱い流入条件を作成することは高負荷 →

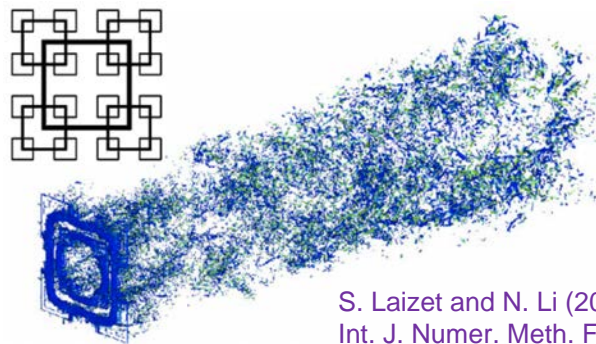
## 発達乱流の生成

- 助走区間も模擬した実験、計算(粗さ要素も考慮)



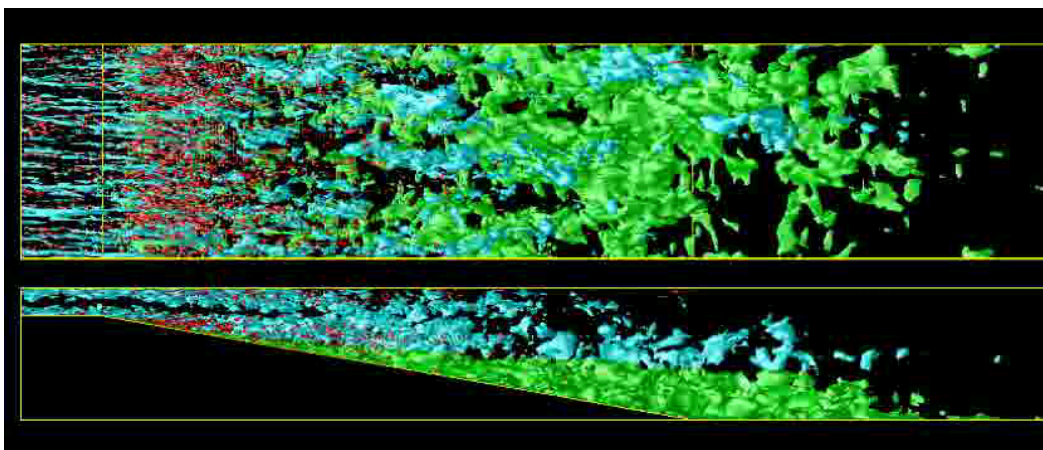
田村哲郎(2010)  
ながれ, 29,3-14

- 高レイノルズ数乱流のスペクトルも再現



S. Laizet and N. Li (2011)  
Int. J. Numer. Meth. Fluids, 67, 1735-1757

## 空間発展乱流の例： 非対称ディフューザー



Reverse flows :  $u^+ = -0.1$

Low speed streaks :  $u'^+ = -3$

Elementary vortices :  $Q^+ = 0.02$

Ohta, T. and Kajishima, T. (2010)  
J. Fluid Sci. Tech., 5-3, 515-527

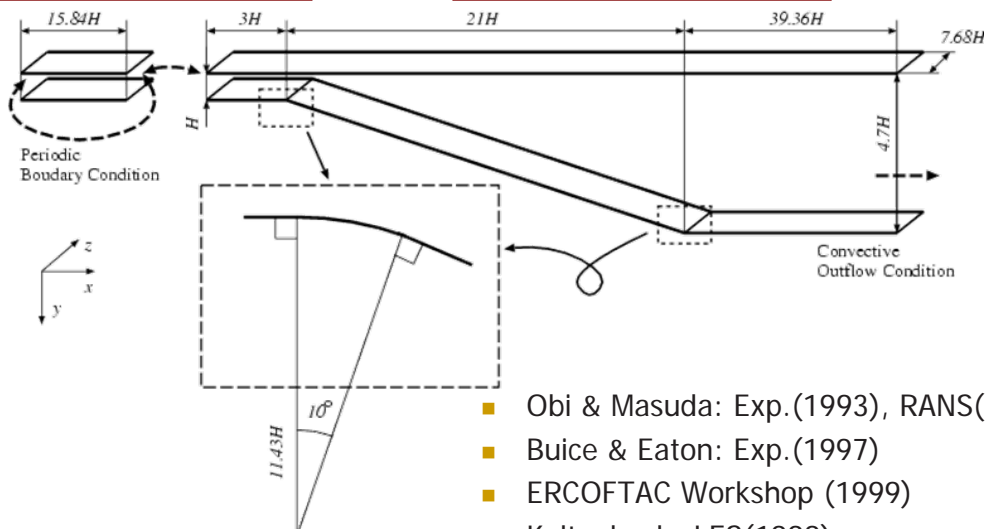
## 非対称ディフューザー

$$Re_\tau (= u_\tau H / \nu) = 300, \quad 407$$

$$Re_c (= u_c H / \nu) = 5383, \quad 7500$$

**Driver:**  $256 \times 128 \times 256$   
 $15.8H \times H \times 7.7H$

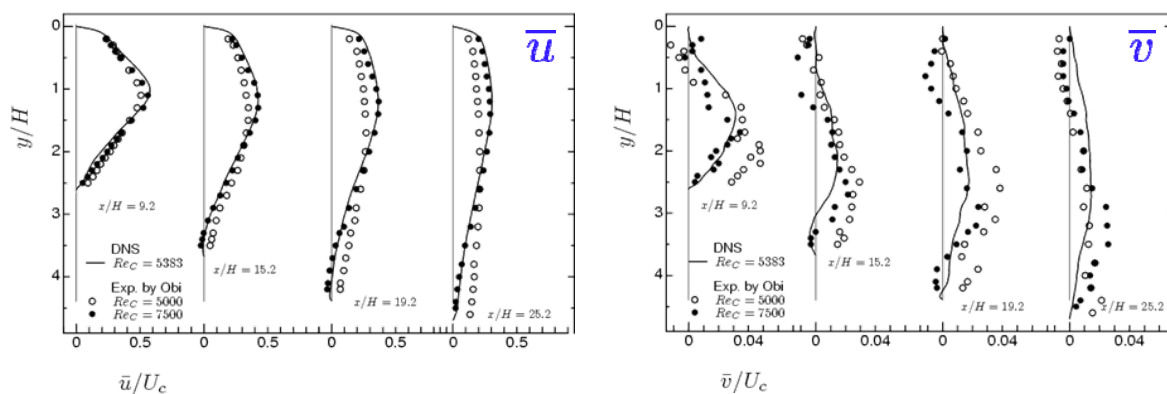
**Diffuser:**  $640 \times 128 \times 256$   
 $63.6H \times (H \sim 4.7H) \times 7.7H$



Ohta, T. and Kajishima, T. (2010)  
 J. Fluid Sci. Tech., **5-3**, 515-527

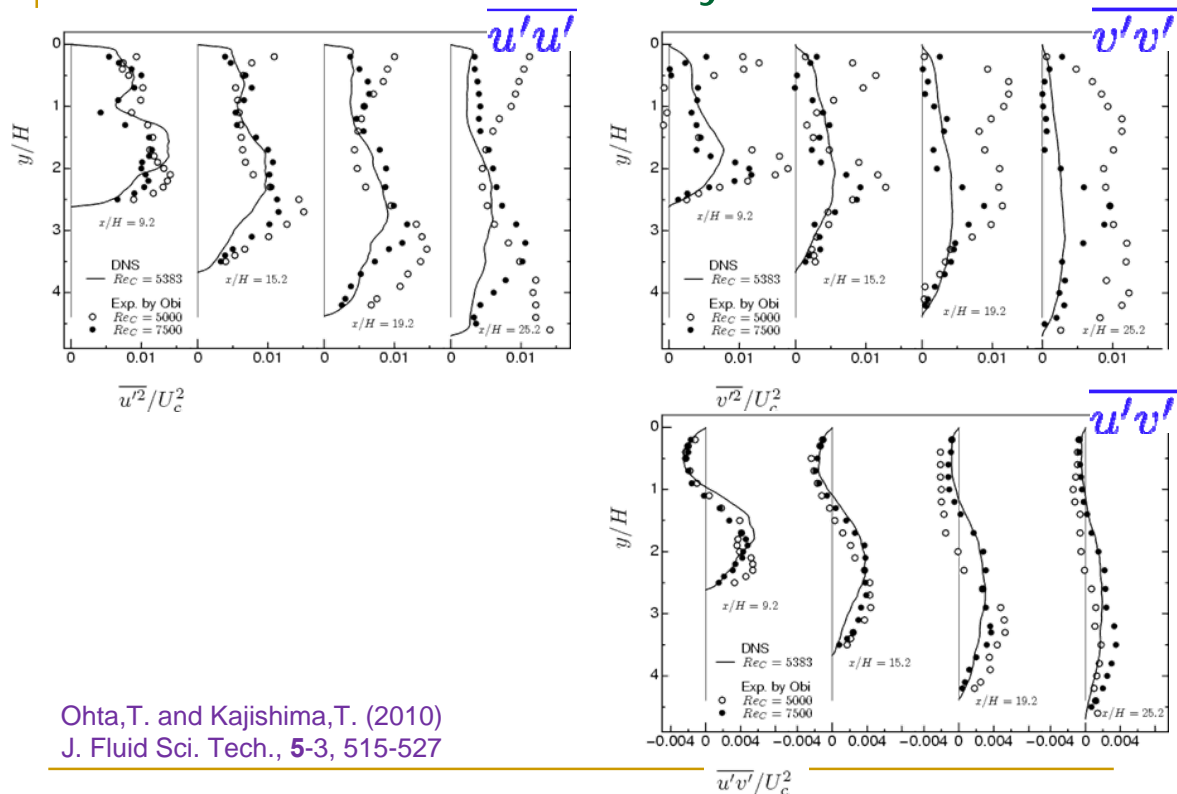
- Obi & Masuda: Exp.(1993), RANS(1999)
- Buice & Eaton: Exp.(1997)
- ERCOFTAC Workshop (1999)
- Kaltenbach: LES(1999)
- Johansson, et al. : Exp.(2003)

## 非対称ディフューザー ～ 平均速度分布



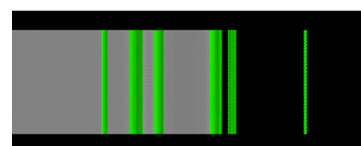
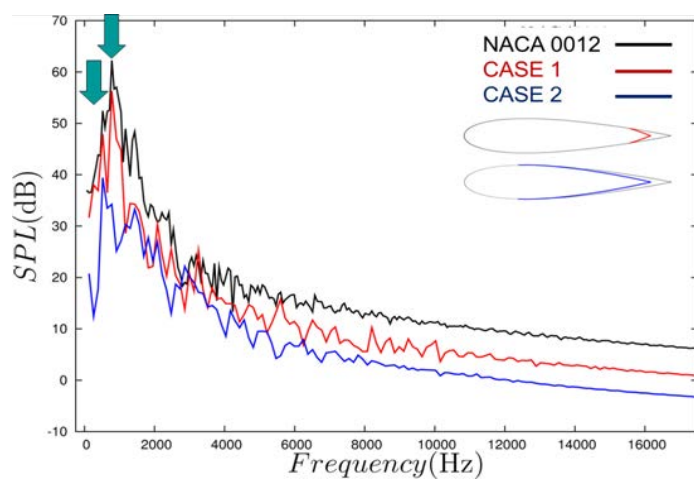
Ohta, T. and Kajishima, T. (2010)  
 J. Fluid Sci. Tech., **5-3**, 515-527

## 非対称ディフューザー ～ Reynolds応力分布

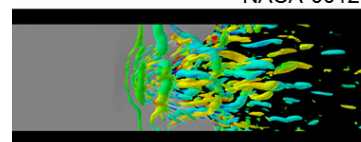


## 音源と音

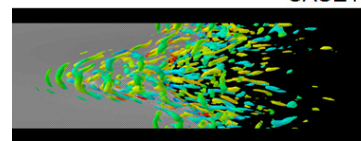
- 補完関係を構築が望まれる例
- 計算例：セレーション翼



NACA 0012



CASE1



CASE2

Instantaneous contours of  $Q=500$   
rendered by streamwise vorticity

Han, C.H., Omori, T. and Kajishima, T. (2011) AJK2011-02009 (Hamamatsu)

## 遠方場のSPL(Sound Pressure Level)

### Curleの式

$$p_a = \frac{x_i}{4\pi c_0 |\mathbf{x}|^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S n_i (p - p_0) (t - |\mathbf{x}|/c_0) dS$$

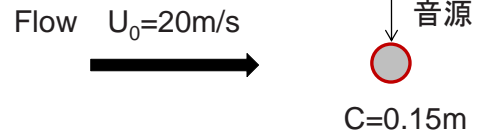
$p_a$  遠方場での音圧

$p_0$  遠方場での圧力

$\mathbf{x}$  観測点

$c_0$  音速

Flow  $U_0=20\text{m/s}$



1m

音源

$C=0.15\text{m}$

## 結言

- CFD/EFDとのハイブリッドのためのCFD側の要件
  - 広範なスケールのうち高々4桁しか扱い得ない
    - 同等な解像度を前提とした(測定器の分解能や計算格子の幅だけでなくフィルターがかかっていることを考慮した)データの照合
  - 不確かさが系統的に把握されている計算法・乱流モデル
  - 領域打ち切り(流入条件、流出条件、遠方条件)による汚染を先に除去