

# データ同化による乱流モデルの最適化

東北大学 流体科学研究所  
加藤博司

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

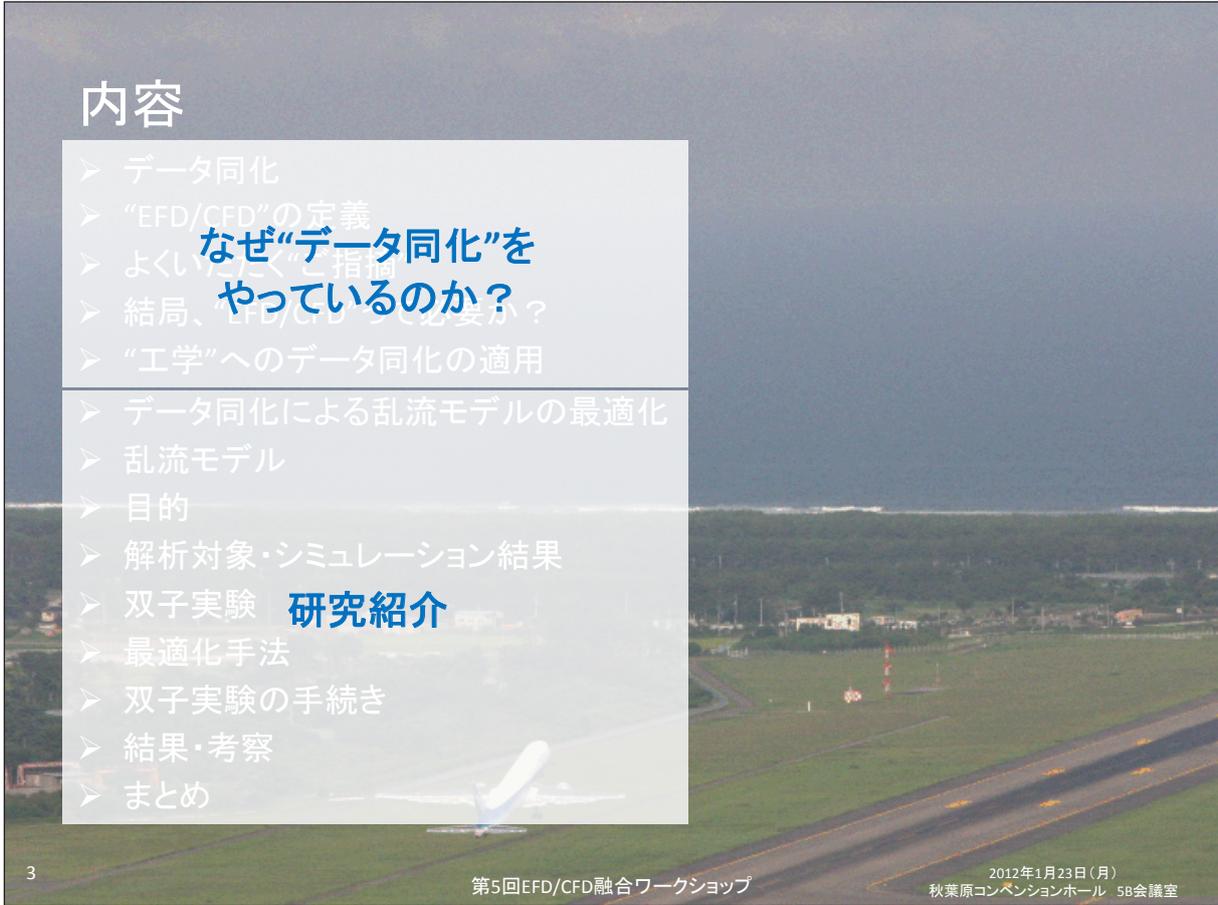
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

1

今からの話は、  
“データ同化”という技術が“EFD”、“CFD”に対してこういう  
“貢献”ができるのではないですか？という“提案”です。

細かな数式の話はないので“お気楽に”お聞きいただければ  
と思います。

2



# 内容

- データ同化
- “EFD/CFD”の定義
- **なぜ“データ同化”をやっているのか？**
- 結局、EFD/CFDは必要か？
- “工学”へのデータ同化の適用

---

- データ同化による乱流モデルの最適化
- 乱流モデル
- 目的
- 解析対象・シミュレーション結果
- 双子実験 **研究紹介**
- 最適化手法
- 双子実験の手続き
- 結果・考察
- まとめ

3

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

# データ同化

4

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## データ同化 1/3

### 主たる目的

シミュレーションに必要な初期・境界値を推定する  
(初期値推定については天気予報で実用化)

シミュレーション内で経験的に与えられているパラメータの最適化

シミュレーションと観測を融合して新たな統合データセットを作成する。  
これは再解析データセットと呼ばれ、新しい科学的発見をもくろむ。

感度解析を行い観測システムの評価と改善策を効率的に行う。

従来シミュレーション科学において副次的問題とされてきた  
シミュレーションモデルの評価法に統一的視点を与える。

樋口(統数研)  
蒲地(気象研) 他

“データ同化屋さん”

- 観測(実験、EFD)
- 数値シミュレーション(CFD)



現象理解・予測にとって  
“完璧”な“道具”ではない

5

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

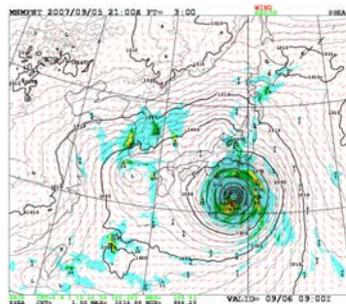
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## データ同化 2/3

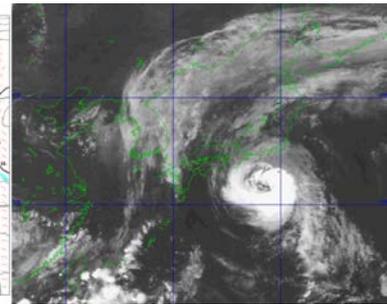
データ同化の研究メッカ  
“気象海洋分野”

➤ “現象理解・予測”のための  
4つの“道具”

- 理論
- 観測
- 数値シミュレーション
- **データ同化**



数値天気予報(データ同化)



雲画像(観測)

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>

### ■ 観測の“不確実性”

- “観測精度”
- “物理的・社会的制約により全地球をカバーできる観測は行えない”

### ■ 数値シミュレーションの“不確実性”

- “シミュレーションモデル自身”
- “初期値”

“データ同化”によって  
“最も尤らしい”初期値を推定

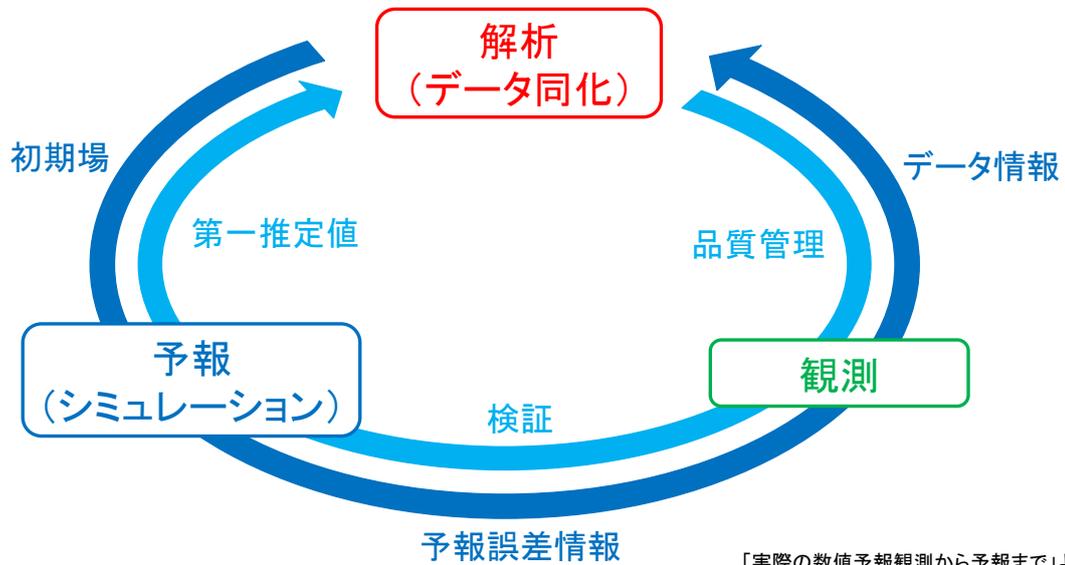
6

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## データ同化 3/3

観測・解析・予報の間で相互に情報交換をすることで、現実大気のシミュレーションが可能となる



7

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

「実際の数値予報観測から予報まで」より

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## “EFD/CFD”の定義

8

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室



## “EFD/CFD”の定義 3/3

工学分野の“道具”は3つ → 4つ？

1. 理論
2. 風洞実験(実験流体力学: Experimental Fluid Dynamics (EFD))
3. 数値シミュレーション  
(数値流体力学: Computational Fluid Dynamics (CFD))
4. データ同化 →
  - ・ “現象理解・予測”に役立つか？
  - ・ “ものづくり”に役立つか？

### EFD/CFD

“データ同化”によって、EFDの解析データセットとCFDの解析データセットの“不確実性”を評価し、EFD,CFD共に表現できない“新しい解析データセット”を創り出す“道具”

よくいただく“ご指摘”

## よくいただく“ご指摘” 1/5

---

### Question 1

“気象観測” と“風洞実験” は違う

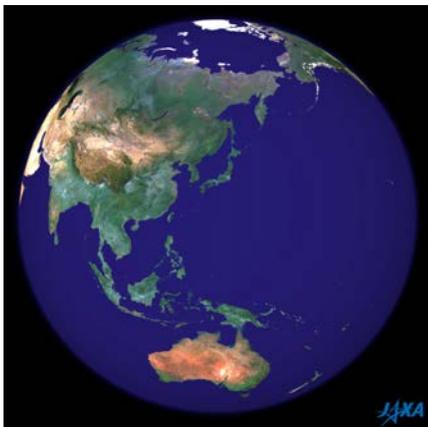
### Question 2

“気象シミュレーション” と“(ここでの)CFD”は違う

## よくいただく“ご指摘” 2/5

---

Q.1 “気象観測” と“風洞実験” は違う



気象観測

観測は一度だけしか行えない

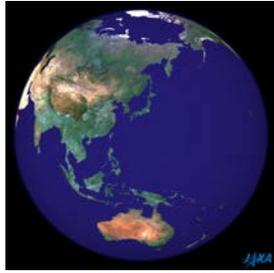


風洞実験

何度でも実験を行える

## よくいただく“ご指摘” 3/5

気象観測



風洞実験



**風洞実験のデータの“質”は気象観測と比較すると**良い**はず**

(何度も行えるので)

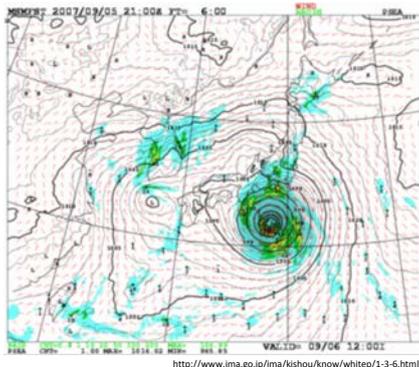
**気象観測・風洞実験の共通項**

1. 流れ場のすべての物理量の取得は不可能
2. 計測したい物理量はなんらかのシステム(人・装置)を介するデータの“質”
  - ・バイアスが0、バラつきが0のないいわゆる“真値”の計測は不可能

**風洞実験は、気象観測と同様に“完璧”な道具ではない**

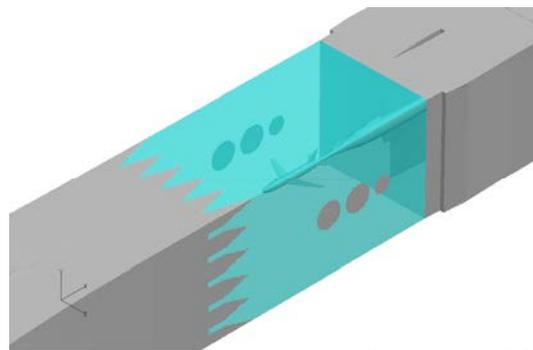
## よくいただく“ご指摘” 4/5

### Q.2 “気象シミュレーション”と“(ここでの)CFD”は違う



気象シミュレーション

- 複雑な物理過程(雲物理、地表面物理など)を“モデル化”する必要性
- 初期・境界値が不明
- 格子解像度

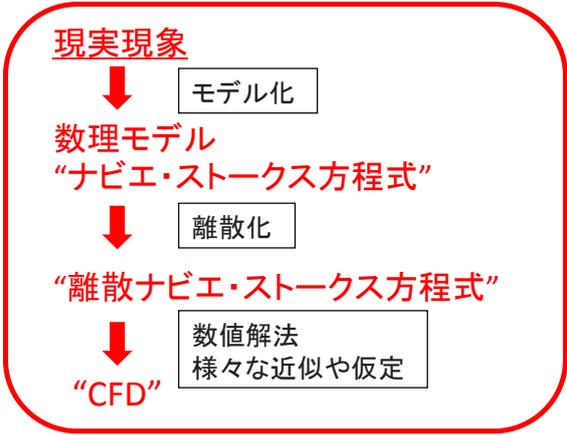
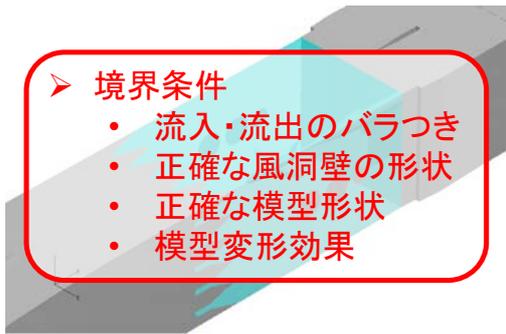


(ここでの)CFD

- “気象シミュレーション”と比較すると
- 少ないモデル化
- 初期値も分かる
- 高い格子解像度

## よくいただく“ご指摘” 5/5

1. 実際の境界条件は“不確実性”が高すぎるため扱えない
2. “気象シミュレーション”も“(ここでの) CFD”も“モデル”



CFDも気象シミュレーションと同様に“完璧”な“道具”ではないはず

## 結局、“EFD/CFD”って必要か？

## 結局、“EFD/CFD”って必要か？ 1/2

昔  
工学分野での“道具”は2つ

1. 理論
2. 実験(EFD)

現在  
工学分野での“道具”は3つ

1. 理論
2. 実験(EFD)
3. 数値シミュレーション(CFD)

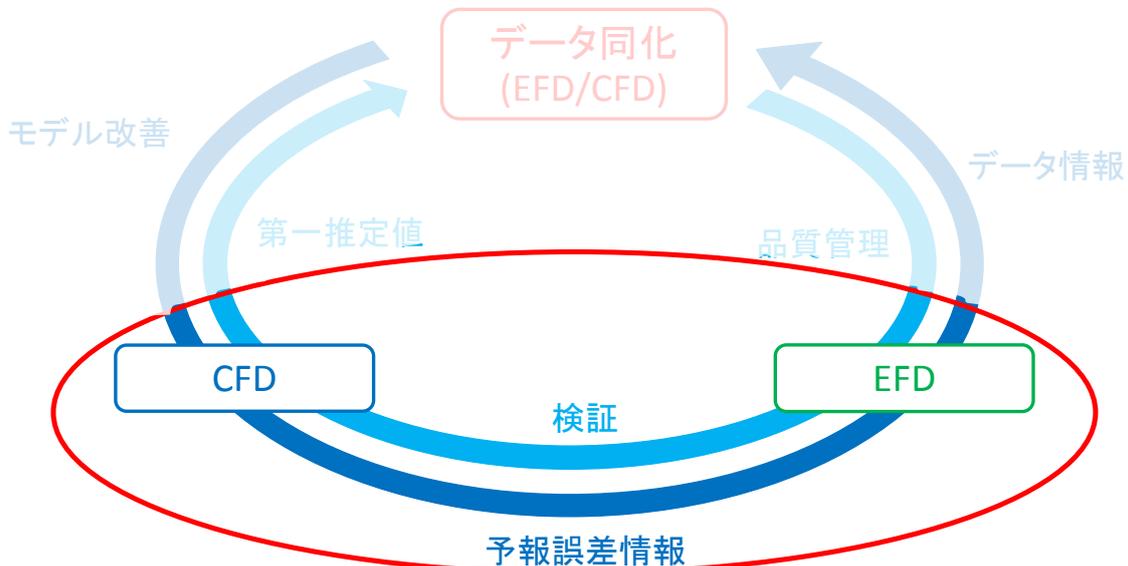
究極のところ、今後も、この3つの“道具”で  
なんとかなるのかもしれませんが

**10年、20年、もっと先の将来を考えた時に、  
この3つの“道具”だけだとは“思えない”し“おもしろくない”**

数値シミュレーションが“道具”として認められるようになったのと同様に、  
“データ同化(EFD/CFD)”という考え方があっていいはず

## 結局、“EFD/CFD”って必要か？ 2/2

EFD/CFDがあれば、EFD・CFD・EFD/CFDの間でサイクルを作り  
相互に情報交換をする形を確立できるはず



## “工学”へのデータ同化の適用

21

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## “工学”へのデータ同化の適用 1/1

### データ同化の主たる目的(再掲)

シミュレーションに必要な初期・境界値を推定する  
(初期値推定については天気予報で実用化)

**シミュレーション内で経験的に与えられているパラメータの最適化**

シミュレーションと観測を融合して新たな統合データセットを作成する。  
これは再解析データセットと呼ばれ、新しい科学的発見をもくろむ。

感度解析を行い観測システムの評価と改善策を効率的に行う。

従来シミュレーション科学において副次的問題とされてきた  
シミュレーションモデルの評価法に統一的視点を与える。

樋口(統数研)  
蒲地(気象研) 他

**これらの有効性を示していくしかない**

22

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## データ同化による 乱流モデルの最適化

23

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## データ同化による乱流モデルの最適化 1/1

### データ同化による乱流モデルの最適化

#### ➤ “乱流モデル内のパラメータ” の最適化

#### データ同化で行うこと

- パラメータの最適化のみ

#### 実験、数値シミュレーションへの影響はない

- 実験については、データを利用するだけ
- 数値シミュレーションのもパラメータを変更して利用するだけ  
(乱流のモデル屋さんがどう思うかは、気になりますが...)

データ同化で、実際に計測できない乱流モデル内の  
パラメータを、異なる物理量から推定できることを示す

24

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

# 乱流モデル

## 乱流モデル 1/6

Navier-Stokes方程式をアンサンブル平均した際に出てくる(レイノルズ応力)を評価するためのもの

乱流モデル

- レイノルズ応力方程式モデル
- 渦粘性モデル

### 渦粘性モデルの初期

プラントルが“混合長モデル”を提案(1925)

•渦粘性係数を混合距離と平均速度勾配で表現し、混合距離を壁からの距離に比例するとした

**壁法則**

$$\frac{u}{u^*} = A \log_{10}(y u^* / \nu) + B \quad u^* = \sqrt{\nu \left( \frac{du}{dy} \right)_{y=0}} : \text{摩擦速度}$$

y: 壁からの距離  
ν: 動粘性係数

乱流速度域

滑らかな管: A = 5.75, B = 5.5  
粗い管: A = 5.75, B = 8.5

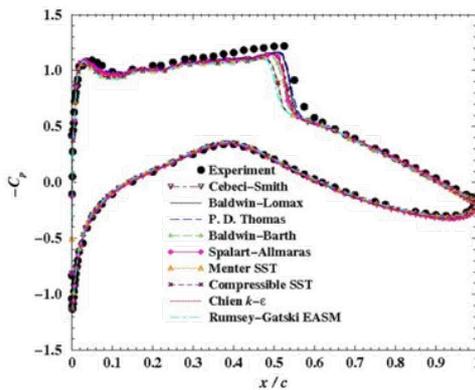
**実験的事実により決定  
(理論的に導かれたものではない)**

## 乱流モデル 2/6

### 渦粘性モデル

Baldwin-Lomaxモデル(代数型モデル)、Spalart-Allmarasモデル(1方程式モデル) k-εモデル、k-ωモデル、SSTモデル(2方程式モデル)...

**壁法則同様、モデル内に“定数”を含む**  
**これらの定数は、実験的事実、なんらかの経験則、仮定などを通して決定される**



Pressure coefficients on the RAE2822 airfoil  
 (http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/raetaf/raetaf05/raetaf05.html)

Q 渦粘性近似に基づく乱流モデルの中で  
 どれがベストなのか？

A. 流れ場によってベストなモデルが異なる。  
 結果、複数の渦粘性モデルが“共存”

### 1つの疑問

本当に、モデル内の定数はどんな流れ場  
 に対してもロバストなのか？

27

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
 秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 乱流モデル 3/6

### 標準k-εモデル

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left( (v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial X_k} \right) + P_k - \epsilon$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left( (v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_k} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{P_k \epsilon}{k} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$$

経験的に与えられるパラメータは少ないとはいえ、

$C_\mu$	二次元せん断流で局所平衡を“仮定”し、“実験事実”を利用し理論的(?)に決定
$C_{\epsilon 2}$	一様格子(等方)乱流の“実験事実”を利用し理論的(?)に“2”を導出 実際には、“1.92”を利用
$C_{\epsilon 1}$	平板境界層で局所平衡を“仮定”し、他のパラメータを利用し理論的(?)に“1.5”を導出 実際には、“1.44”を利用
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	実験結果との比較から数値実験的に決定

繰り込み群理論  $C_\mu = 0.0837, \sigma_k = 0.7179, \sigma_\epsilon = 0.7179, C_{\epsilon 1} = 1.063, C_{\epsilon 2} = 1.7215$

28

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
 秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 乱流モデル 4/6

### Spalart-Allmaras モデル

$$\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2})\hat{S}\hat{\nu} - [c_{w1}f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2}f_{t2}] \left(\frac{\hat{\nu}}{d}\right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\nu + \hat{\nu}) \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \right]$$

#### モデル内定数

$$c_{b1} = 0.1355 \quad \sigma = 2/3 \quad c_{b2} = 0.622 \quad \kappa = 0.41 \text{ カルマン定数}$$

$$c_{w2} = 0.3 \quad c_{w3} = 2 \quad c_{v1} = 7.1 \quad c_{t3} = 1.2 \quad c_{t4} = 0.5$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}$$

#### モデル内定数の決定方法

- Flat plate boundary layer (平板境界層)
- Mixing layer (混合層)
- Wake (後流)

➡ Calibration (校正)

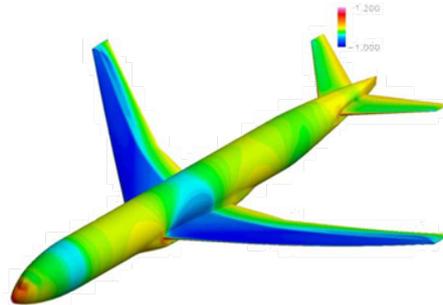
29

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

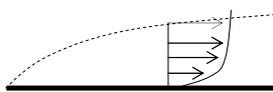
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 乱流モデル 5/6

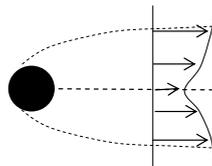
乱流モデル内のパラメータは、乱流の“代表的な流れ場”を満たすかもしれませんが、



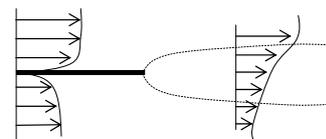
#### 乱流の代表的な流れ場



平板境界層



後流



混合層

これらで決定された定数は“全ての流れ場”を満たすのか？

30

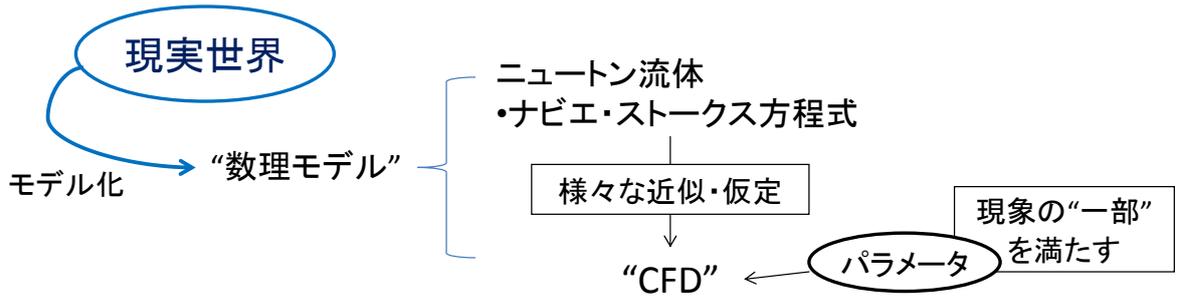
第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

# 乱流モデル 6/6

## システムモデルに“パラメータ”を与えるという行為の意味

### モデルの“簡略化”



### より良いモデル

- パラメータの含まれないシステムモデルを作る
- パラメータを“モデル化”する
  - 実験値を利用し“データ同化”により推定

# 目的

## 目的 1/1

---

渦粘性近似に基づく乱流モデルの“定数部分”を流れ場に  
応じて「最適化」することを試みる

### 最適化手法

- データ同化手法の1つ「アンサンブルカルマンフィルタ」を利用

### システムモデル(CFDソルバー)

- JAXA数値解析グループの「FaSTAR(FAST Aerodynamic Routines)」を利用

### 解析対象(非定常)

- 大迎角剥離流

## 解析対象・シミュレーション結果

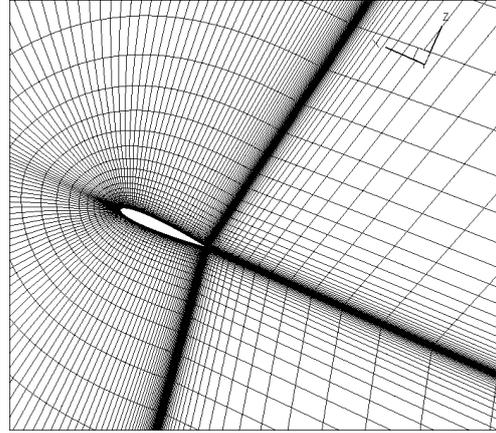
## 解析対象・シミュレーション結果 1/3

### 計算条件

- 翼型: NACA0012 (2次元翼)
- マッハ数: 0.3
- レイノルズ数: 100万
- 迎角: 24.0度

### 計算手法

- 離散化: セル中心有限体積法
- 非粘性流速: HLLW
- 勾配計算: Least Square
- 勾配制限関数: Hishida(van leer type)
- 時間積分: LU-SGS
- 乱流モデル
  - 修正Spalart-Allmarasモデル(SA-R)
  - Menter SST モデル(SST-2003)



計算格子

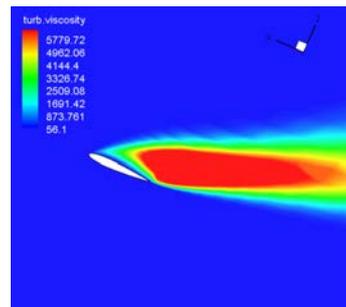
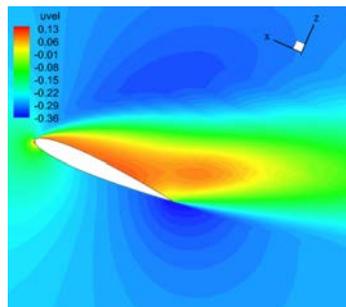
35

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

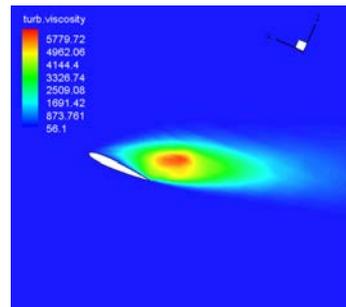
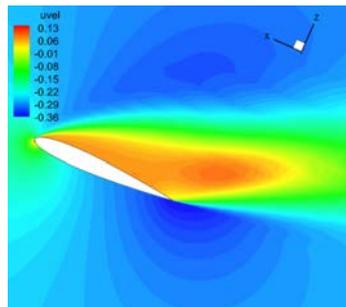
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 解析対象・シミュレーション結果 2/3

SA-R



SST-2003



X方向速度成分u

乱流粘性

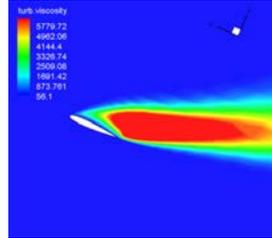
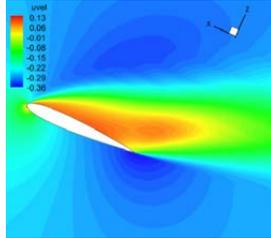
36

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 解析対象・シミュレーション結果 3/3

SA-R

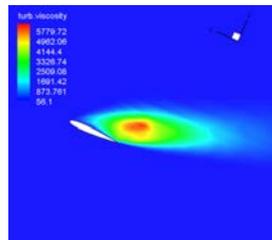
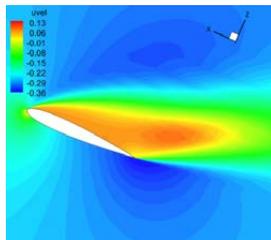


Q どちらのモデルが流れ場をよく捉えている？

A. 手元に実験値がないので分からない



SST-2003



今、手元にある2つの解析データを使ってできる問題

➤ どちらかの乱流モデルが“完璧な”モデルならば、どちらかの乱流モデルはおかしいはず

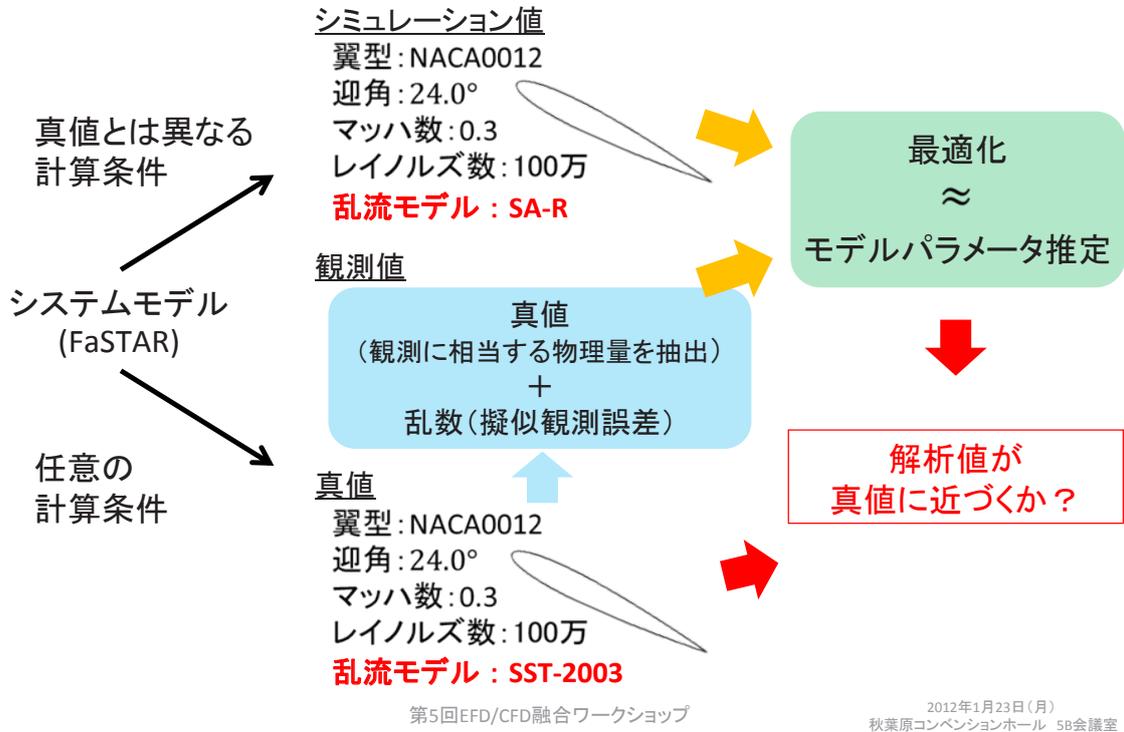
**双子実験**

x方向速度成分u

乱流粘性

# 双子実験

## 双子実験 1/2



## 双子実験 2/2

### Spalart-Allmaras モデル

$$\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2}) \hat{S} \hat{\nu} - [c_{w1} f_w - \frac{c_{b1} f_{t2}}{\kappa^2}] \left(\frac{\hat{\nu}}{d}\right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\nu + \hat{\nu}) \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \right]$$

#### モデル内定数

$c_{b1} = 0.1355$     ~~$\sigma = 2/3$~~     $c_{b2} = 0.622$     ~~$\kappa = 0.41$~~  カルマン定数

$c_{w2} = 0.3$     $c_{w3} = 2$     $c_{v1} = 7.1$     ~~$c_{t3} = 1.2$~~     ~~$c_{t4} = 0.5$~~

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}$$

#### 最適化を行うモデル内定数

- ほとんど使われることのない“遷移項”の定数は除く
- カルマン定数 $k$ は、ある程度“普遍性”があるので除く
- $\sigma$ は、プラントル数(0.6~1.0)に関するものらしいので除く

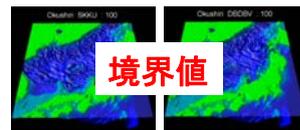
→  $c_{b1}, c_{b2}, c_{w2}, c_{w3}, c_{v1}$

# 最適化手法

## 最適化手法 1/3

### データ同化の目的

- 初期・境界値の推定
- モデルパラメータの推定
- 再解析データセットの作成
- 観測システムの評価
- モデルの統一的评价法



[http://daweb.ism.ac.jp/jst-crest/jst-crest\\_p2.html](http://daweb.ism.ac.jp/jst-crest/jst-crest_p2.html)

「津波データ同化」 統計数理研究所



初期値

「天気予報の初期値推定」 気象庁など

“データ同化” ≡ “最適化”

目的関数  
 ▶ 観測値(実験値) の一致度  
 ▶ 設計目標値



再解析データセット

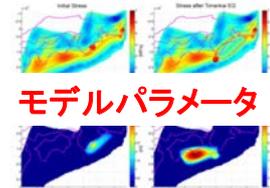
「磁気嵐発達過程の研究」 統計数理研究所、GSFC/NASAなど

「次世代生命体統合シミュレーションプログラムの開発」  
 東京大学 ヒトゲノム解析センターなど



モデルパラメータ

「地震発生予測システム」  
名古屋大学など



モデルパラメータ

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shing/gijyutu/gijyutu6/sonota/attach/1306007.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shing/gijyutu/gijyutu6/sonota/attach/1306007.htm)

## 最適化手法 2/3

### 工学分野の最適化問題

- 形状を最適化することが目的
- モデルの不確実な部分は“無視”(→信頼性の低いモデルは使えない)



N700系(エアロダブルウィング)



MRJ

“形状”のための最適化



“シミュレーション”のための最適化

## 最適化手法 3/3

### (先端的)データ同化手法

	逐次型(統計的手法)	非逐次型(最適化手法)
代表的手法	アンサンブルカルマンフィルタ 粒子フィルタ	4次元変分法
推定法	ベイズ推定	MAP推定(最尤推定)
得られる解	分布	最適解
シミュレーションの規模	小~中規模(性能に依存)	超大規模まで適用可
使用されている領域	すべて	気象・海洋の現業中心
プログラムの実装	既存のコードに容易にプラグイン	アジョイントコードの書き出し必要
HPC	スカラー計算向き	ベクトル計算向き
シミュレーションモデルの比較	尤度により可能	困難
非線形性の影響	平均値でなくなる	最適値探索に困難

樋口(統教研)、露木(気象庁)

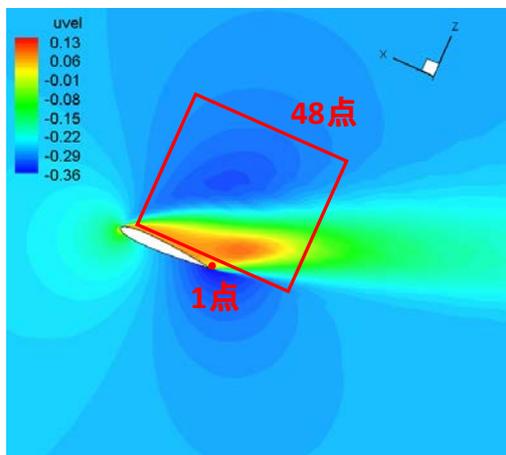
本研究では、“アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)”を用いる  
(最大の利点:アジョイントコードを書かなくてすむ)

## 双子実験の手続き

## 双子実験の手続き 1/4

### 真値の作成 & 擬似実験値の作成

➤ 乱流モデル: SST-2003



X方向速度成分u

#### 真値

“SST-2003” を使用した計算結果から  
X方向速度成分uを49点抽出  
➤10秒おきに (dt=0.05秒なので200ステップおき)

+

#### 擬似観測誤差

ガウスノイズ  $N(0, 5.e-6)$   
(有次元でおよそ0.76m/sの偏差)



#### 擬似実験値

0.056389806522280	-0.311424835963118	-0.3119670:
0.0555079071144670	-0.310544036737491	-0.3071679!
0.057169172980626	-0.310163673398355	-0.3140545!
0.057515714753822	-0.304039032186010	-0.3070568:
0.056918264196716	-0.311889434346011	-0.3088454:
0.053397525413347	-0.311194868194747	-0.3089466:
⋮	⋮	⋮

## 双子実験の手続き 2/4

### アンサンブルカルマンフィルタ

システムモデルのバラつき(不確実性)を表現しなければならない(事前分布)

初期値  
各アンサンブルメンバーで共通に

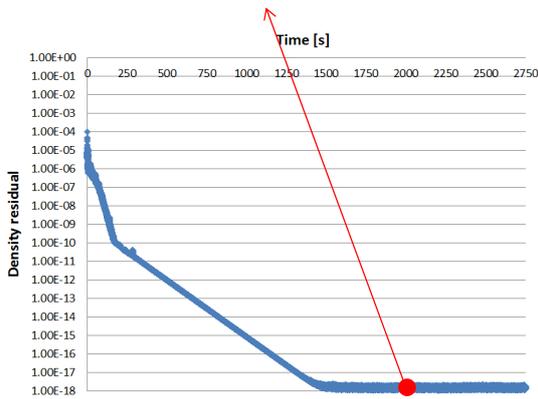


SA-Rモデル内のパラメータ

$$C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622$$

$$C_{\omega2} = 0.3, \quad C_{\omega3} = 2, \quad C_{v1} = 7.1$$

固定



SA-Rモデルでの残差履歴

それぞれのパラメータに“ばらつき”を与える  
ことで“アンサンブル”を表現

$$0.1270 < C_{b1}^{(l)} < 0.1440$$

$$0.5831 < C_{b2}^{(l)} < 0.6609$$

$$0.2813 < C_{\omega2}^{(l)} < 0.3188$$

$$1.875 < C_{\omega3}^{(l)} < 2.125$$

$$6.656 < C_{v1}^{(l)} < 7.544$$

\*<sup>(l)</sup>はアンサンブルの番号

## 双子実験の手続き 3/4

### 状態ベクトルの設定

“自己組織化モデル”を利用する

CFDの中で時間発展する変数は、密度、速度、圧力 ➡  $x_t = (\rho, u, v, w, p)^T$

RANSの場合は、乱流モデルで解く変数が加わり、  
SA-Rモデルの場合は、 ➡  $x_t = (\rho, u, v, w, p, \tilde{v})^T$

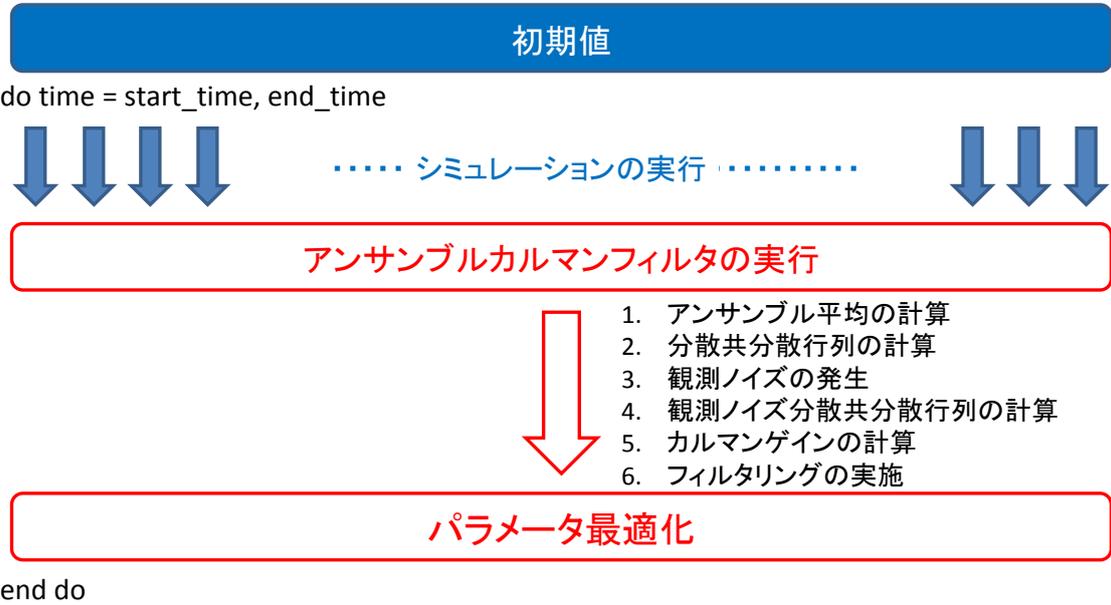
しかし、乱流モデル内の“定数”は、それだけで時間発展しないので、当然ながら、状態ベクトルには入らない。そこで、“形式的に”状態ベクトルに加える。

$$x_t^* = (x, C_{b1}, \sigma, C_{b2}, C_{\omega2}, C_{\omega3}, C_{v1})^T$$

$x_{t+1}^* = f_t(x_t^*)$  ← 加えた定数部分が変化しなければ元のコードと同じ

# 双子実験の手続き 4/4

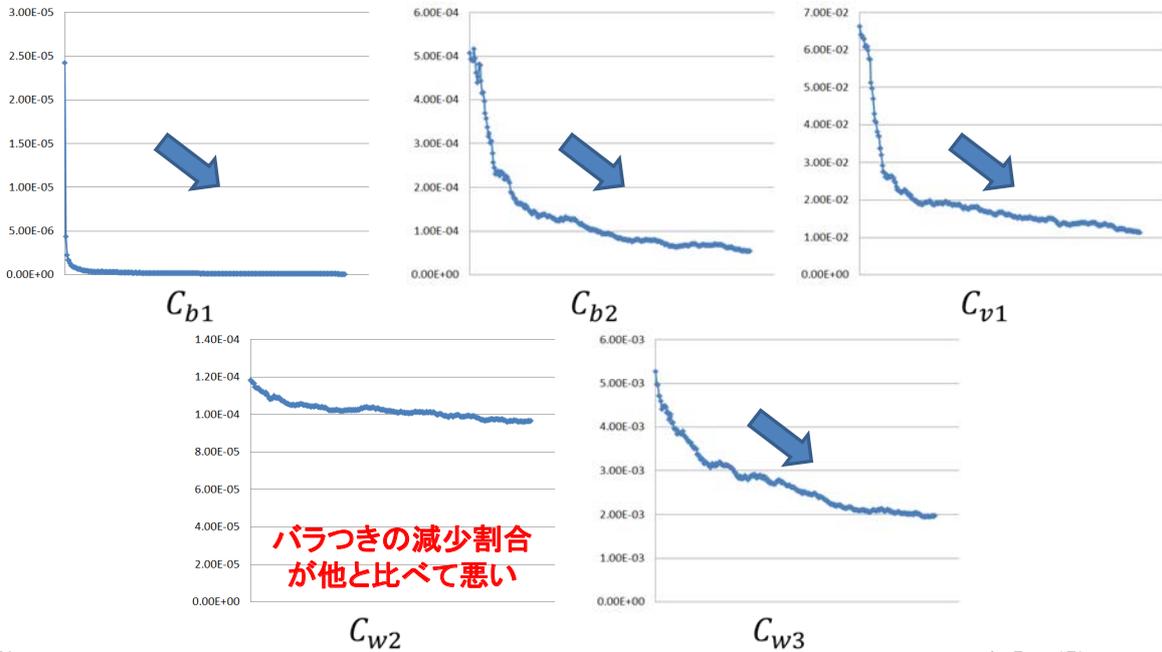
## アンサンブルカルマンフィルタの実行



# 結果・考察

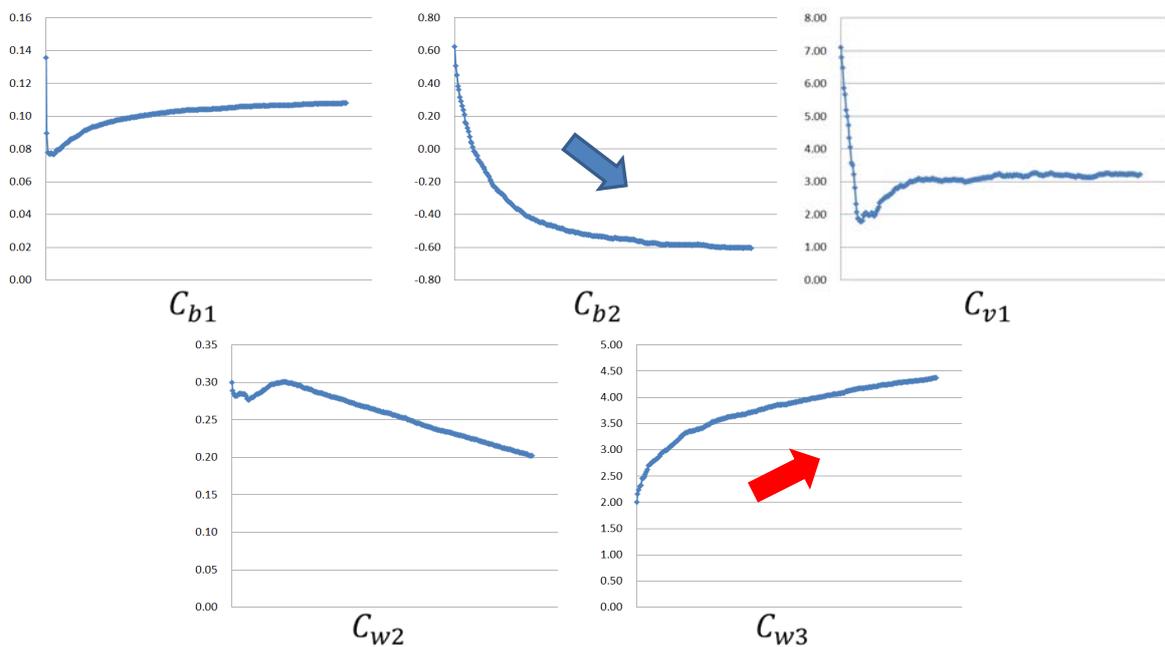
## 結果・考察 1/18

### バラつきの最適化履歴



## 結果・考察 2/18

### 平均値(アンサンブル平均)の最適化履歴



## 結果・考察 3/18

### パラメータの最適化の結果

Spalart-Allmaras turbulence model

$$\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2}) \hat{S} \hat{\nu} - \left[ c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left( \frac{\hat{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\nu + \hat{\nu}) \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \right]$$

オリジナル  $C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622, \quad C_{v1} = 7.1$   
 $C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2$



最適化結果  $C_{b1} = 0.10795, \quad C_{b2} = -0.60456, \quad C_{v1} = 3.2169$   
 $C_{w2} = 0.20255, \quad C_{w3} = 4.3740$

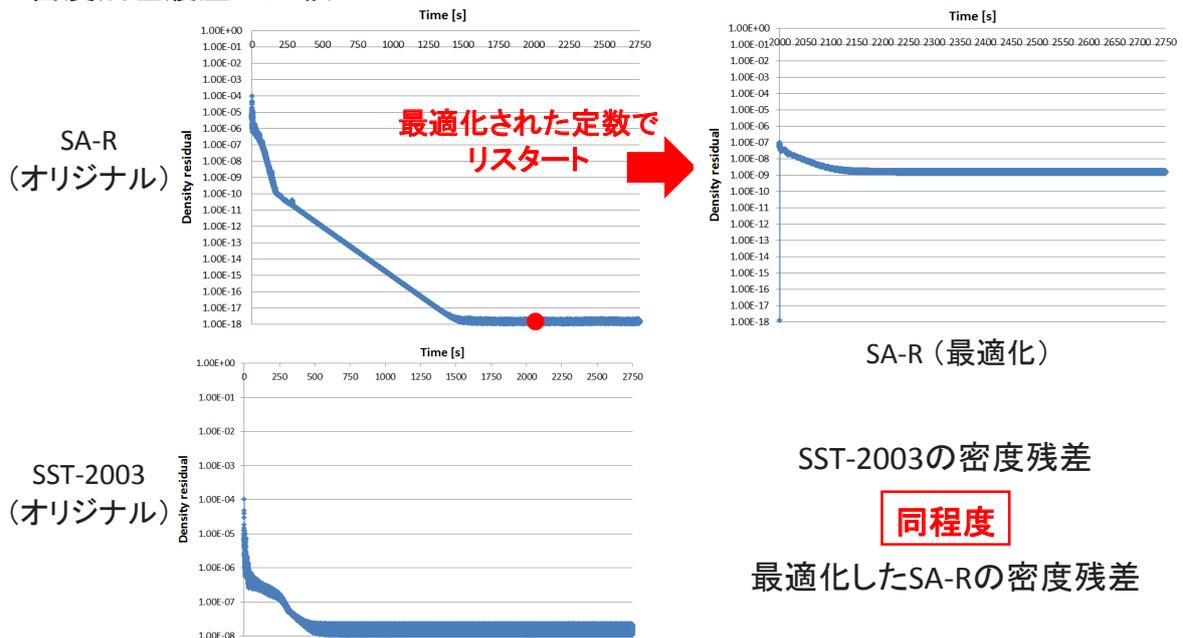
53

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 4/18

### 密度残差履歴の比較



54

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 5/18

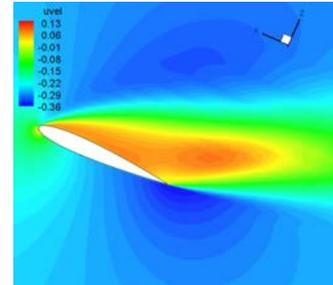
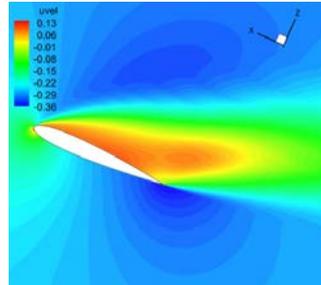
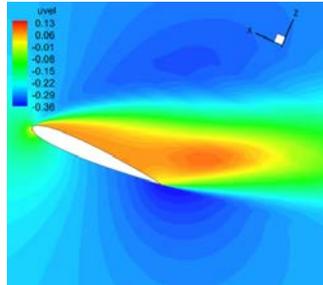
流れ場

SST-2003

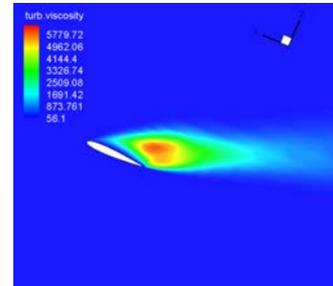
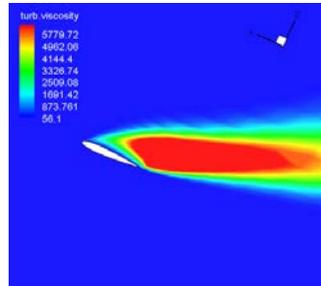
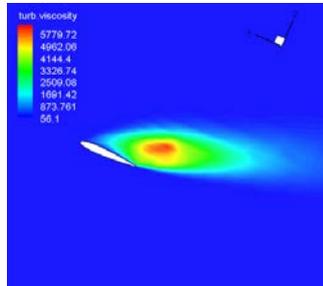
SA-R(オリジナル)

SA-R (最適化)

x方向  
速度成分u



乱流粘性



55

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 6/18

空力係数

SST-2003

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.371	0.728	-0.292

SA-R  
(オリジナル)

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.408	0.826	-0.341

SA-R  
(最適化)

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.370	0.727	-0.292

SST-2003の空力係数

**同程度**

最適化したSA-Rの空力係数

56

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 7/18

今からは、昨年12月に行われた数値シンポで頂いた質問に対する回答です

- **迎角の変更**でも今回の最適化定数は有効か？
- **乱流の代表的流れ場(今回は、平板境界層)**では今回の最適化定数は有効か？

あらかじめ答えを言っておきますが...

### この研究の土台

モデルに含まれる“パラメータ”をモデル化したほうが“より良いモデル”となるはず  
その方法として、実験値を利用した“データ同化”でパラメータを推定する

ので、違う条件でのモデル定数は、異なる条件では**“有効ではありません”**

57

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

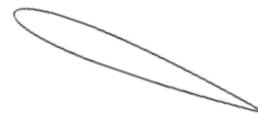
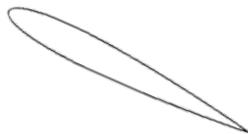
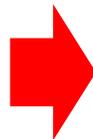
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 8/18

**迎角の変更**でも最適化のパラメータは有効か？

翼型: NACA0012  
迎角: **24.0°**  
マッハ数: 0.3  
レイノルズ数: 1000000

翼型: NACA0012  
迎角: **19.0°**  
マッハ数: 0.3  
レイノルズ数: 1000000



58

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 9/18

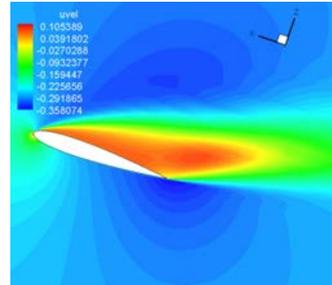
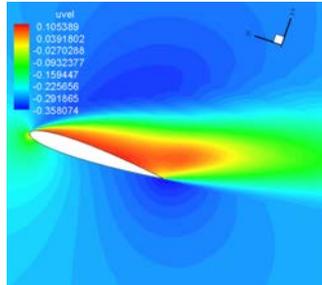
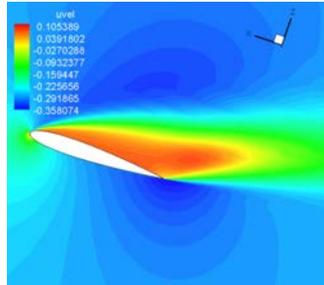
流れ場

SST-2003

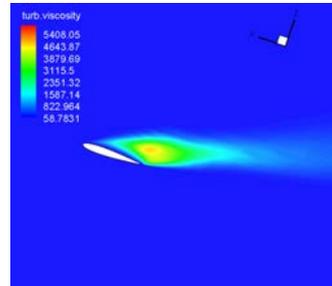
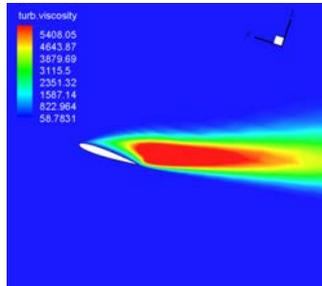
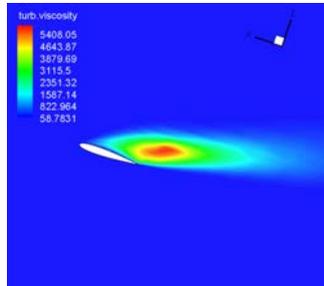
SA-R(オリジナル)

SA-R (最適化)

x方向  
速度成分u



乱流粘性



59

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 10/18

空力係数

SST-2003

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.263	0.645	-0.239

SA-R  
(オリジナル)

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.289	0.728	-0.280

SA-R  
(最適化)

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.258	0.618	-0.229

SST-2003の空力係数 同程度? 最適化したSA-Rの空力係数

60

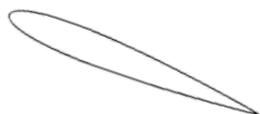
第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 11/18

### 迎角の変更でも最適化を試みる

翼型: NACA0012  
 迎角: 19.0°  
 マッハ数: 0.3  
 レイノルズ数: 1000000



同化

$$C_{b1} = 0.14321, \quad C_{b2} = -0.74142$$

$$C_{v1} = 4.4886$$

$$C_{w2} = 0.28926, \quad C_{w3} = 5.9049$$

## 結果・考察 12/18

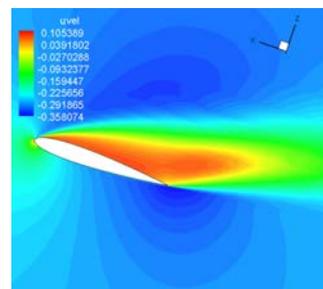
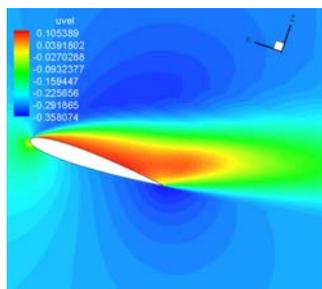
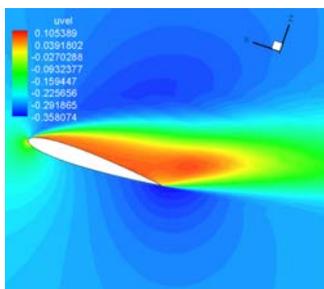
流れ場

SST-2003

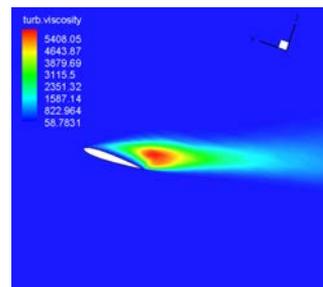
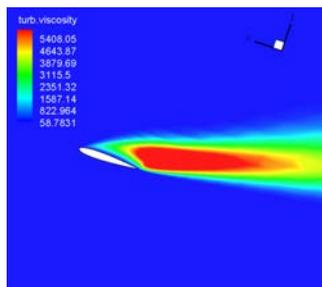
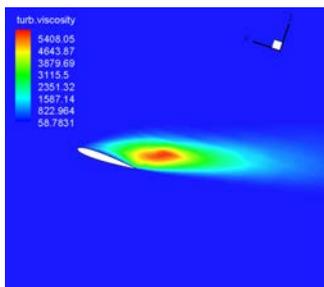
SA-R(オリジナル)

SA-R  
 (最適化: 迎角19.0°)

X方向  
 速度成分u



乱流粘性



## 結果・考察 13/18

### 空力係数

SST-2003

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.263	0.645	-0.239

SA-R  
(オリジナル)

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.289	0.728	-0.280

SA-R  
(最適化:迎角 $19.0^\circ$ )

$C_D$	$C_L$	$C_M$
0.263	0.647	-0.241

SST-2003の空力係数 同程度 最適化したSA-Rの空力係数

## 結果・考察 14/18

オリジナル

$$C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622, \quad C_{v1} = 7.1$$

$$C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2$$

最適化結果  
(迎角: $24.0^\circ$ )

$$C_{b1} = 0.10795, \quad C_{b2} = -0.60456, \quad C_{v1} = 3.2169$$

$$C_{w2} = 0.20255, \quad C_{w3} = 4.3740$$

最適化結果  
(迎角: $19.0^\circ$ )

$$C_{b1} = 0.14321, \quad C_{b2} = -0.74142, \quad C_{v1} = 4.4886$$

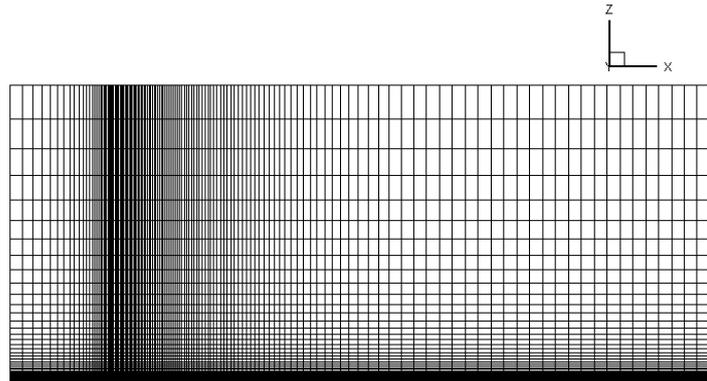
$$C_{w2} = 0.28926, \quad C_{w3} = 5.9049$$

## 結果・考察 15/18

### 平板境界層では最適化定数は有効か？

マッハ数: 0.2  
レイノルズ数: 500000

(参考)  
NASA Turbulence Modeling Resource  
Turbulence Model Validation Cases and Grids  
2D Zero Pressure Gradient Flat Plate  
([http://turbmodels.larc.nasa.gov/flatplate\\_grids.html](http://turbmodels.larc.nasa.gov/flatplate_grids.html))  
Grid : 273 × 193



計算格子

## 結果・考察 16/18

### 流れ場

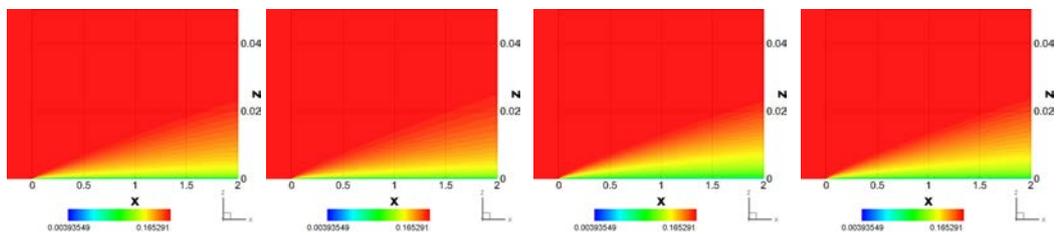
SST-2003

SA-R  
(オリジナル)

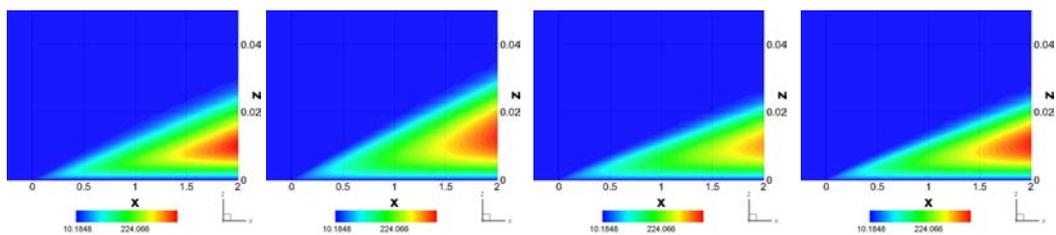
SA-R  
(最適化:迎角24.0°)

SA-R  
(最適化:迎角19.0°)

x方向  
速度成分u

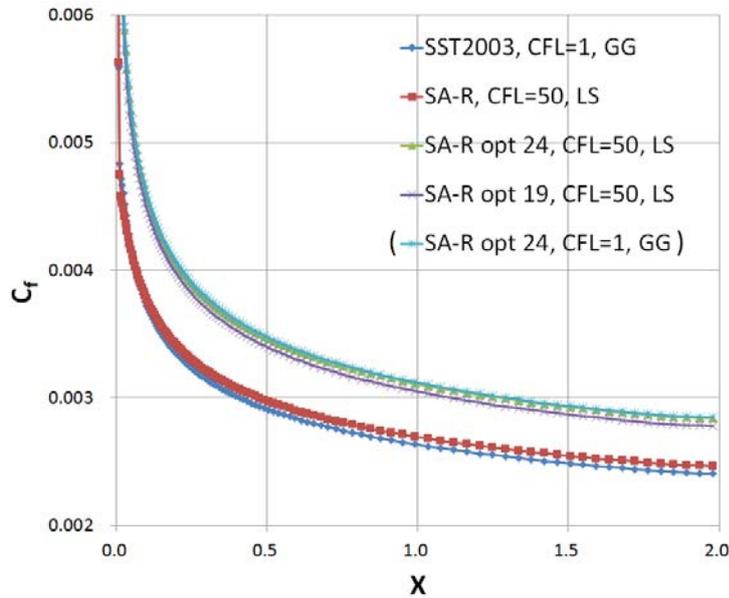


乱流粘性



## 結果・考察 17/18

表面摩擦係数



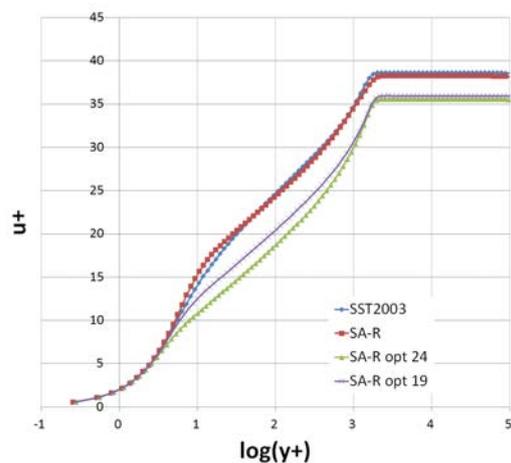
67

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

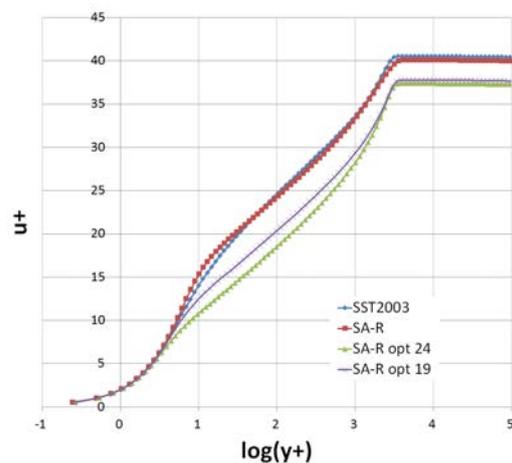
2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## 結果・考察 18/18

摩擦速度 $u^+$  無次元化距離 $y^+$



X = 0.97008



X = 1.90334

最適化パラメータは、平板境界層には“ふさわしくない”

68

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## まとめ

69

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## まとめ 1/2

### 自分が考える“EFD/CFD”という言葉の定義

EFDとCFDが表現できない  
解析データセットを創りだす“道具”  データ同化

目標として  
10,20年後には、工学分野の第4の“道具”としての価値を見出したい

そのためには、まずは、“既存のデータ同化手法”で結果を出して“有効性”  
を認めてもらうことが重要

•最も尤らしい値 ← データ同化で最も面白みのあるところだと思うが、まだ早い

理由：この分野のシミュレーションは、他分野と比較しても高精度なシミュレーション  
を実現しているため、なかなか受け入れ難い？

- 経験的に与えられているパラメータの推定
- 初期・境界値推定

70

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日(月)  
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

## まとめ 2/2

- Spalart-Allmarasモデルのパラメータ最適化を行った。
  - 目的関数は、Menter SST乱流モデルで計算した流れ場から作成した“擬似実験値”
- 最適化には、データ同化手法“アンサンブルカルマンフィルタ”を用いた。
- 結果、最適化された定数でのSpalart-AllmarasモデルがMenter SSTモデルと同程度の流れ場を再現できることを確認した。

異なる乱流モデルでもパラメータを調整することで同じ流れ場を与える可能性を示した。

データ同化が、乱流モデルのパラメータ推定法に使用できる可能性を示した。

