

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

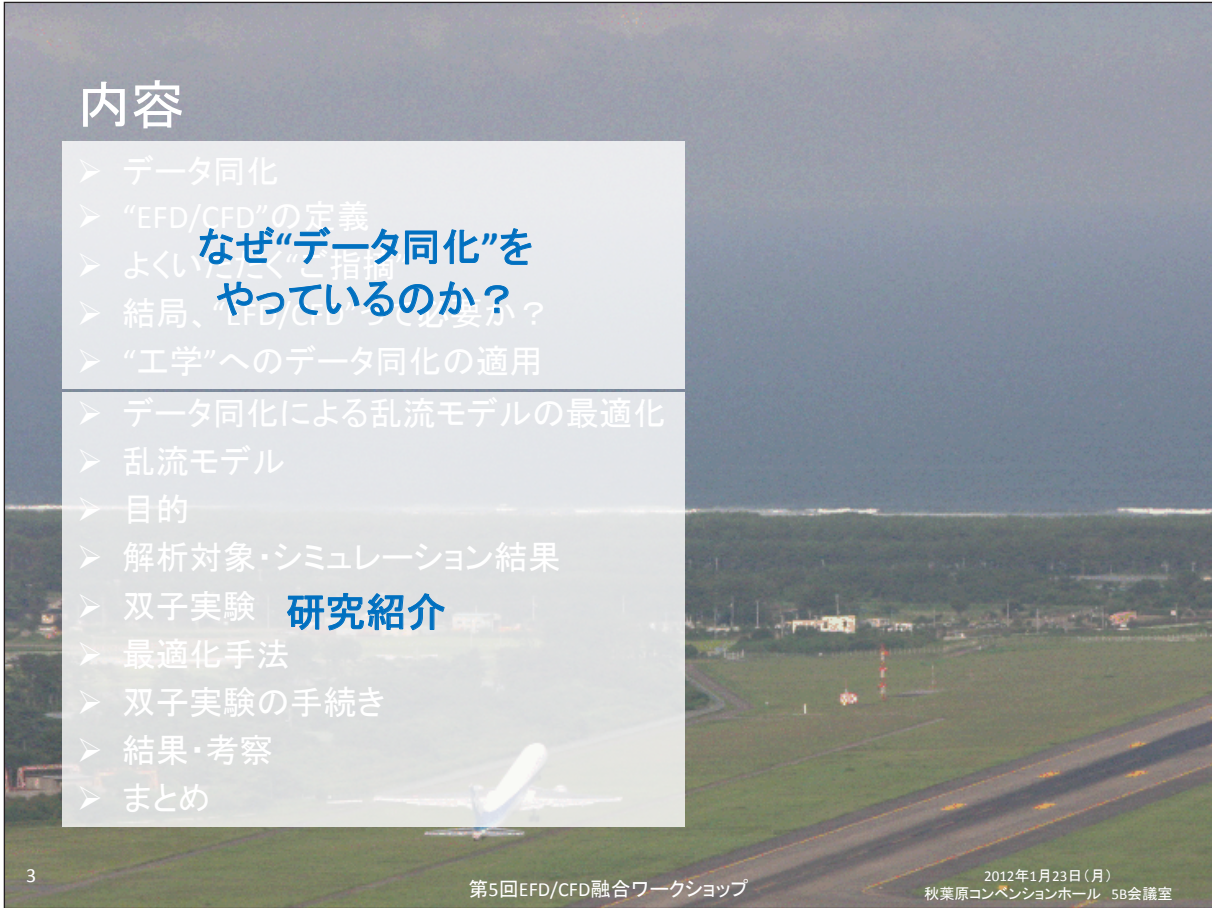
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

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

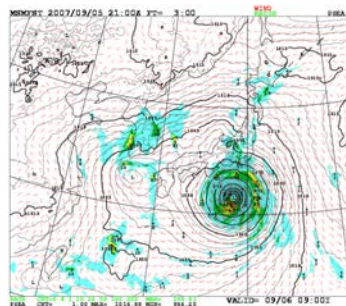
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

データ同化 2/3

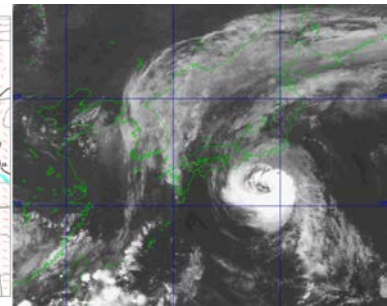
データ同化の研究メッカ
“気象海洋分野”

➤ “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

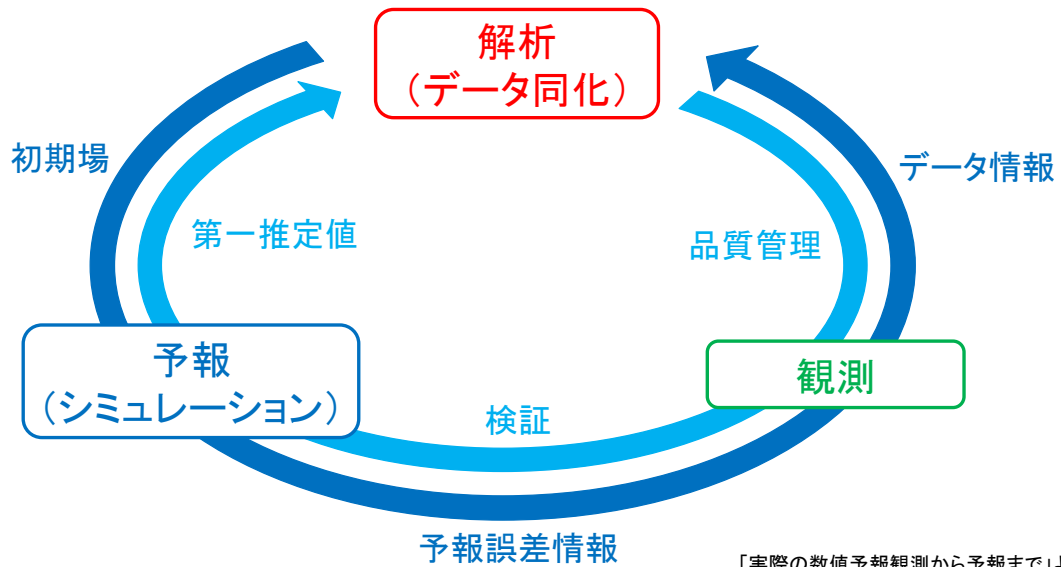
6

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 1/3

工学分野

- “現象理解・予測”のための“道具”は“3つ”
- “ものづくり”のための道具も“3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))



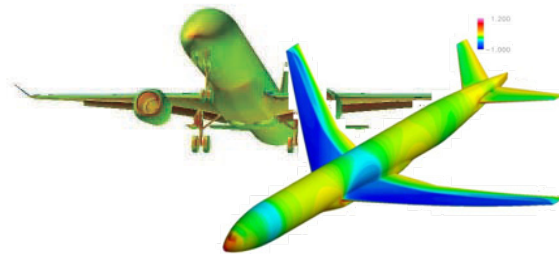
“EFD/CFD”の定義 2/3

EFD, CFD共に興味が“非定常流(より現実の流れ)”へ

EFD(実験)



CFD(数値シミュレーション)



このまま、両手法とも別々に開発を進めていけば、“現象理解・予測”、“ものづくり”のための“より良い道具”はできるのか？

“現象理解・予測”

より良い予測、解析精度を持つ“道具”があれば、なお“良い”はず

“ものづくり”

???

“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

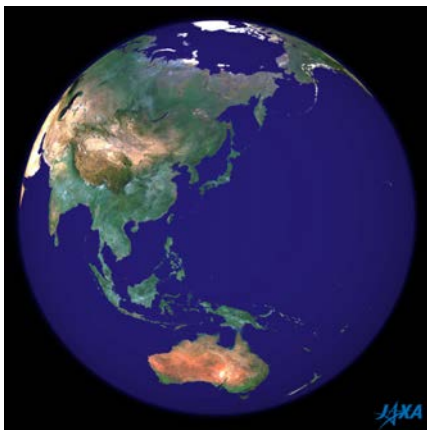
“気象観測” と“風洞実験” は違う

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

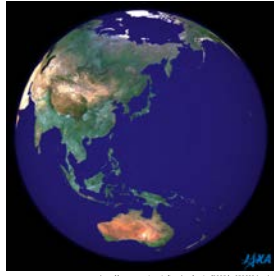


風洞実験

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)

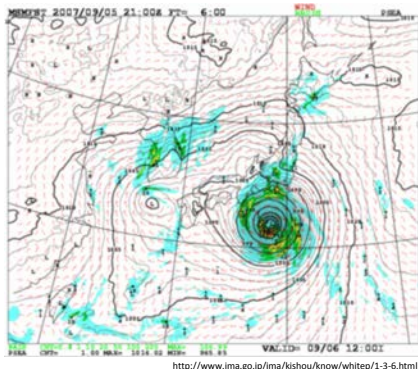
気象観測・風洞実験の共通項

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

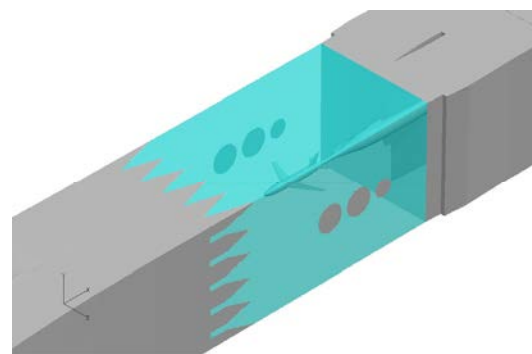
よくいただく“ご指摘” 4/5

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

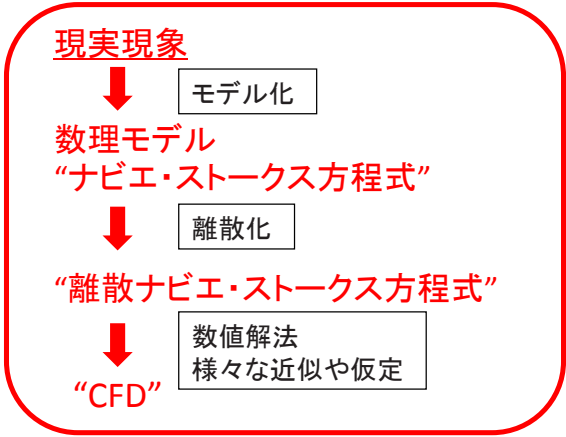
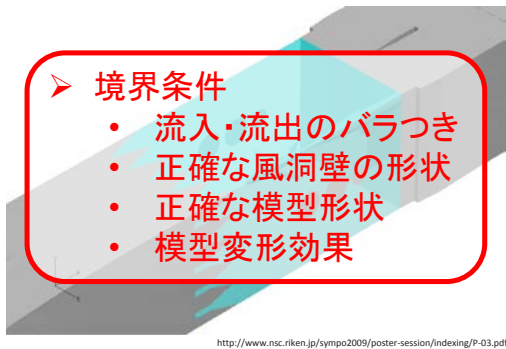


(ここでの)CFD

- “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

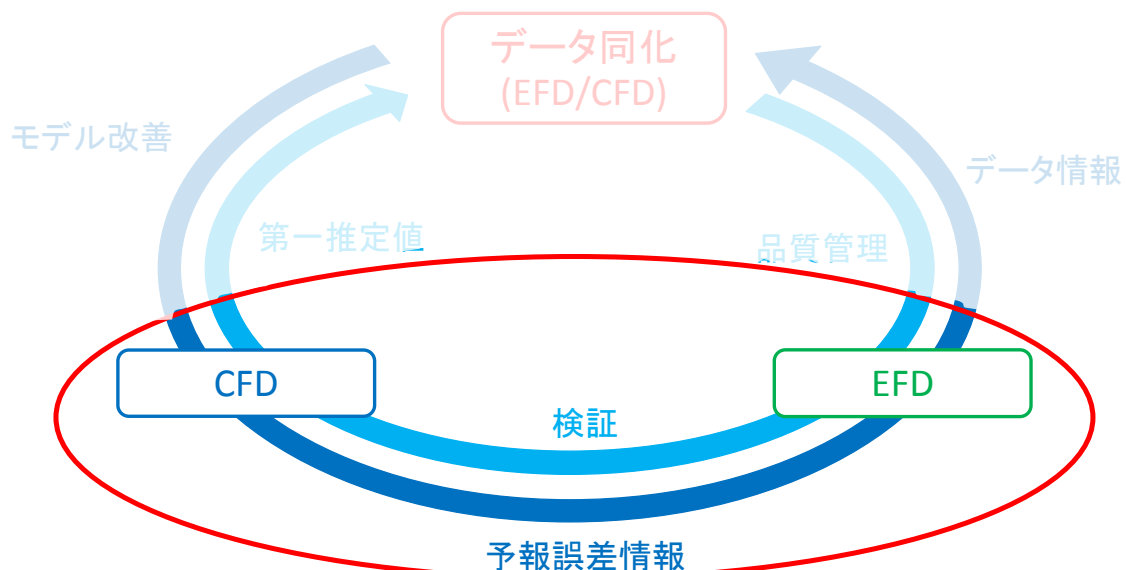
19

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



20

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

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

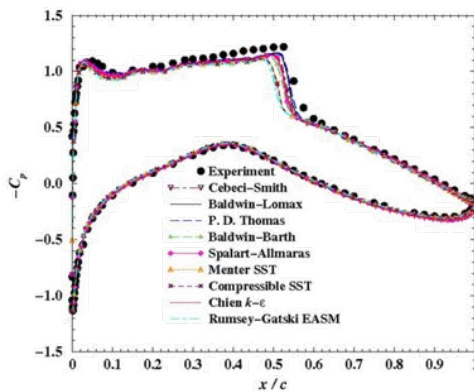
**実験的事実により決定
(理論的に導かれたものではない)**

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_μ	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)

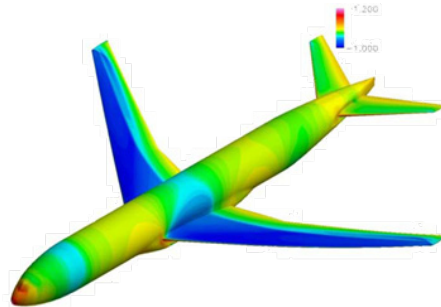
29

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

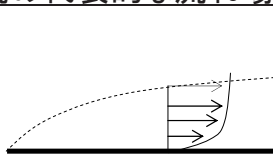
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

乱流モデル 5/6

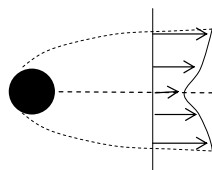
乱流モデル内のパラメータは、乱流の“代表的な流れ場”を満たすかもしれませんが、



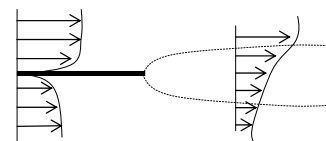
乱流の代表的な流れ場



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

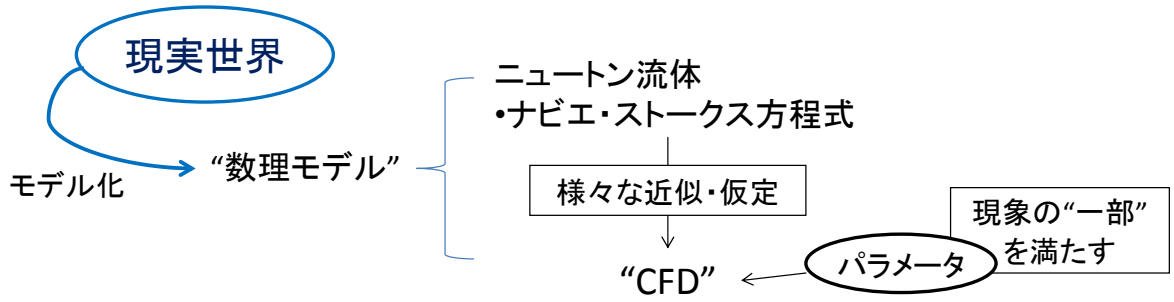
第5回EFD/CFD融合ワークショップ

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

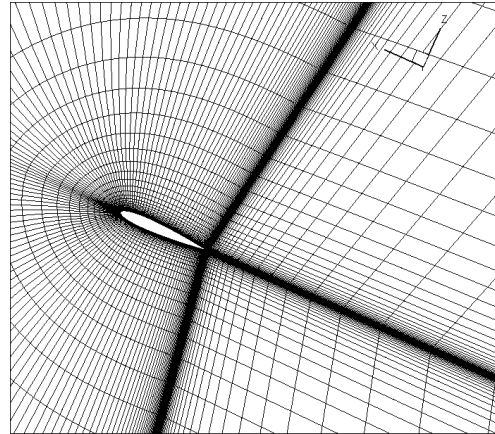
解析対象・シミュレーション結果 1/3

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

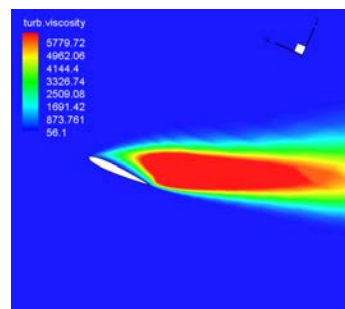
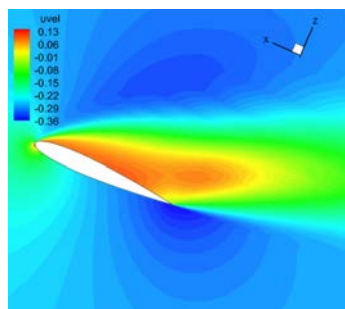
35

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

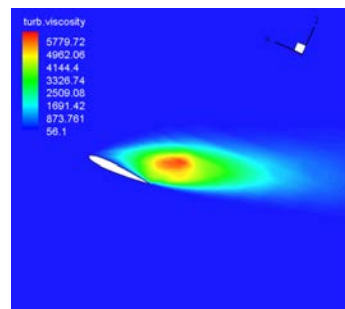
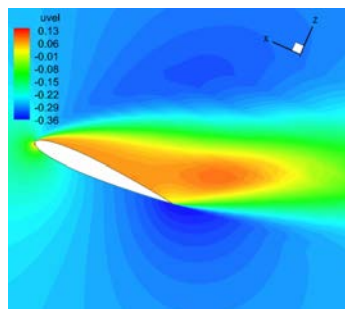
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

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

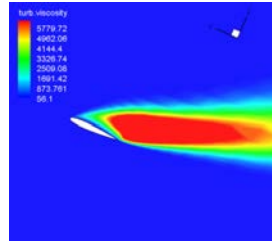
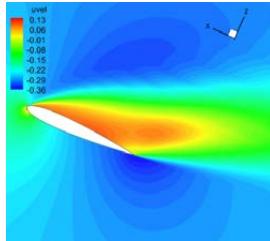
36

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

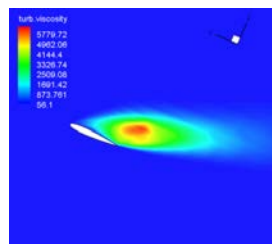
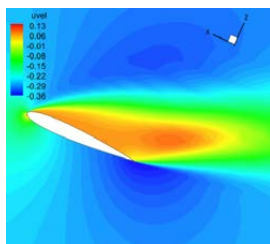


Q どちらのモデルが流れ場をよく捉えている？

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

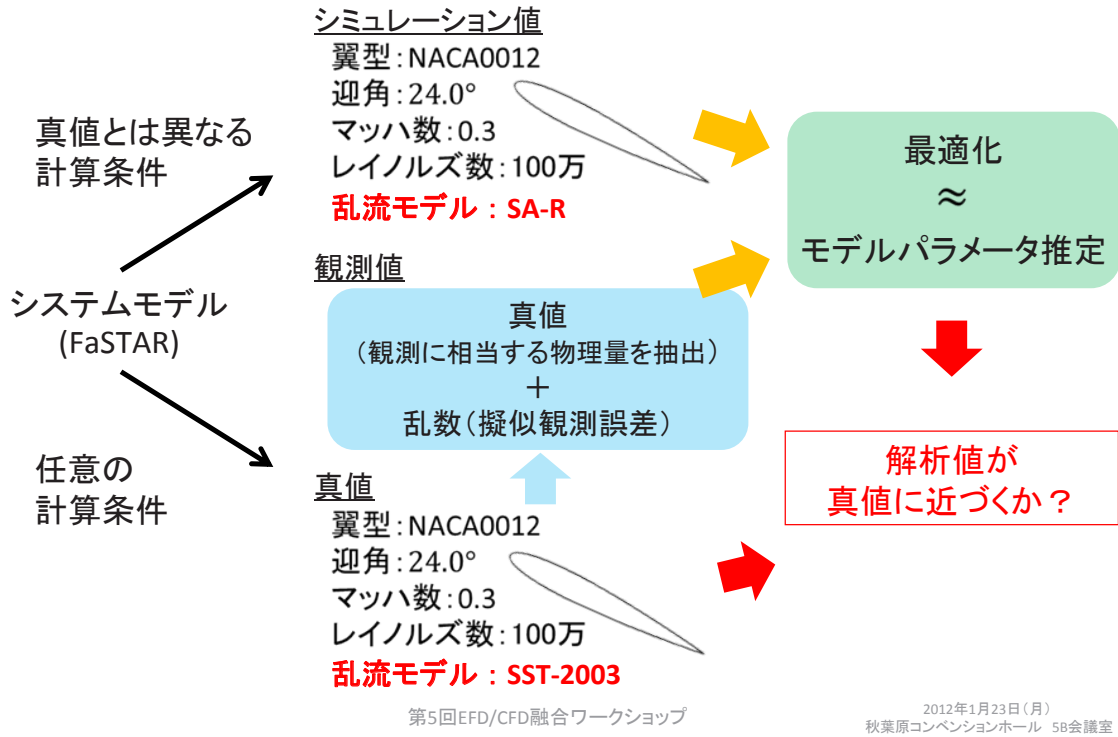
双子実験

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

- ほとんど使われないことのない“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
- σ は、プラントル数(0.6~1.0)に関するものらしいので除く

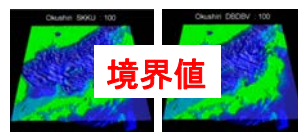
➔ $c_{b1}, c_{b2}, c_{w2}, c_{w3}, c_{v1}$

最適化手法

最適化手法 1/3

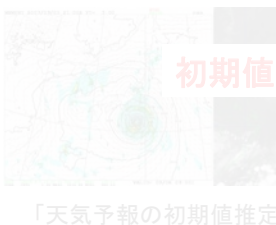
データ同化の目的

- 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

「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
 観測シ 目的関数
 観測値(実験値) 設計目標値
 の一致度



再解析データセット

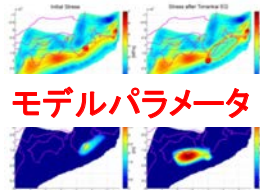
「磁気嵐発達過程の研究」 統計数理研究所、GSFC/NASAなど

「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/giyutu/giyutu6/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)

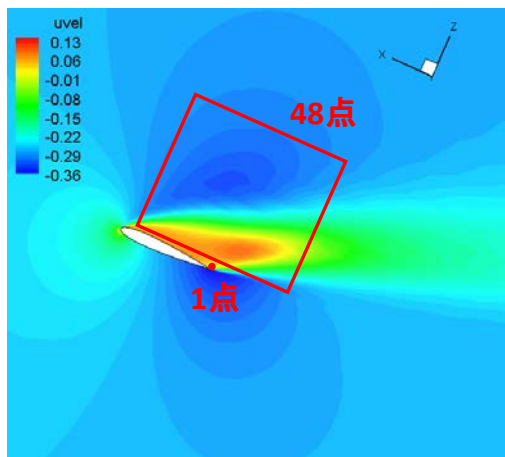
本研究では、“アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)”を用いる
(最大の利点:アジョイントコードを書かなくてすむ)

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

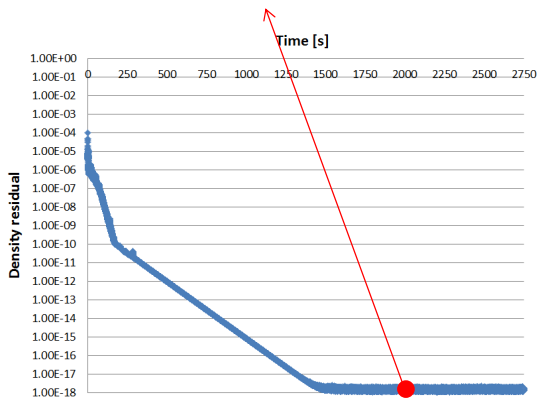


SA-Rモデル内のパラメータ

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

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

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

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

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

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

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

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

*^(l)はアンサンブルの番号

47

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

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

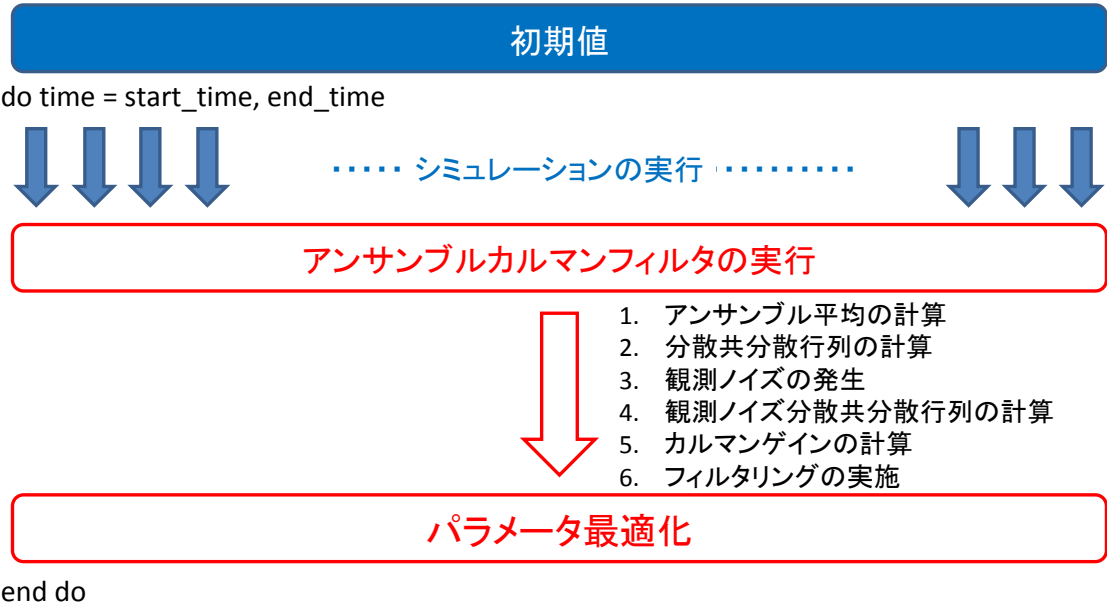
48

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

双子実験の手続き 4/4

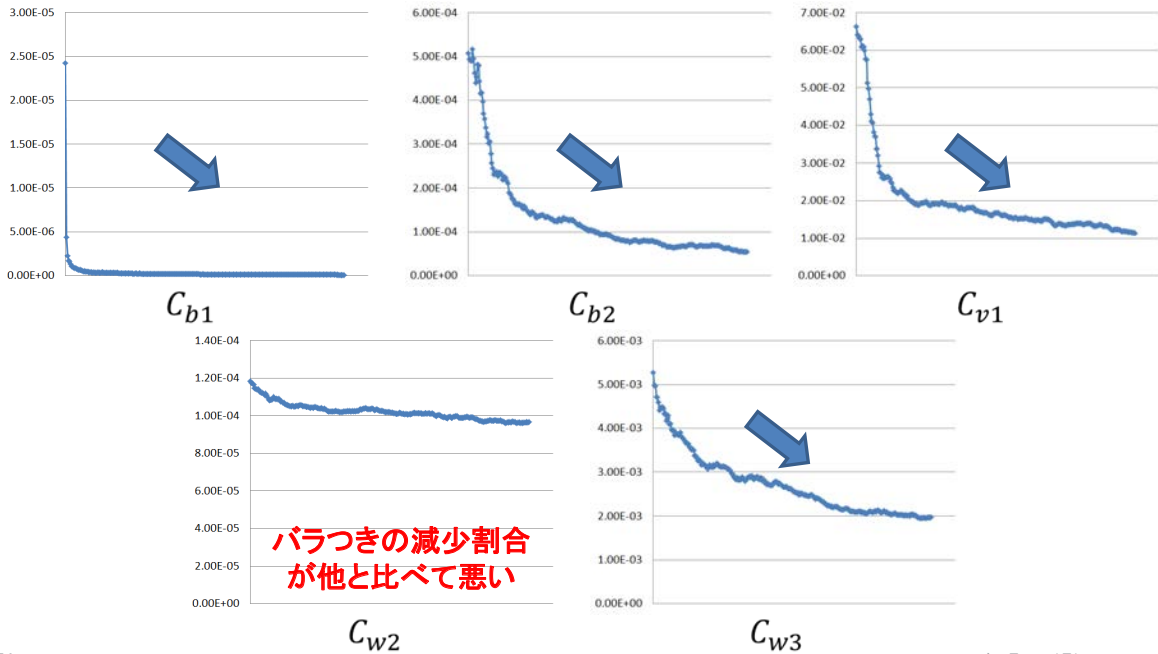
アンサンブルカルマンフィルタの実行



結果・考察

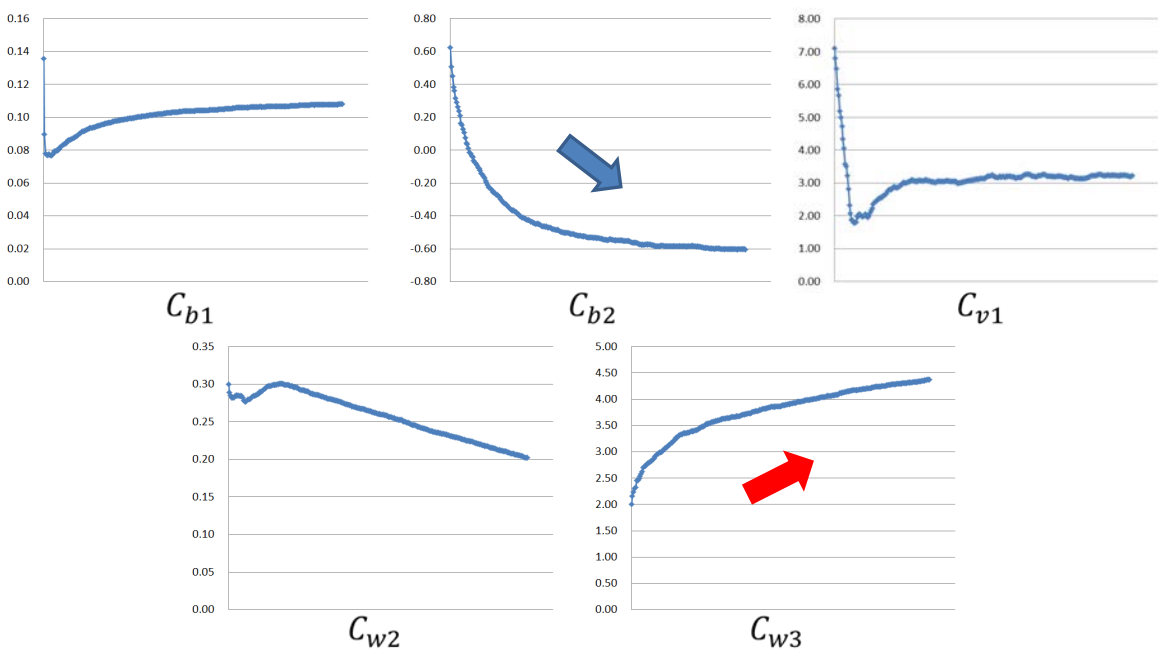
結果・考察 1/18

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

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

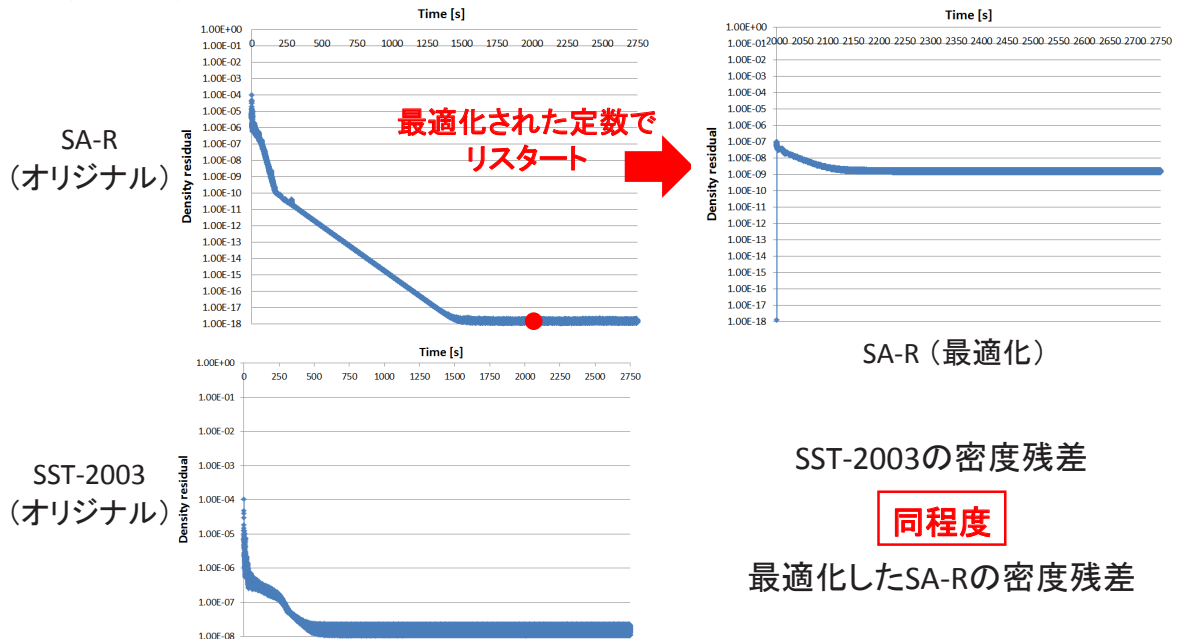
オリジナル $C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622, \quad C_{v1} = 7.1$
 $C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2$



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

結果・考察 4/18

密度残差履歴の比較



結果・考察 5/18

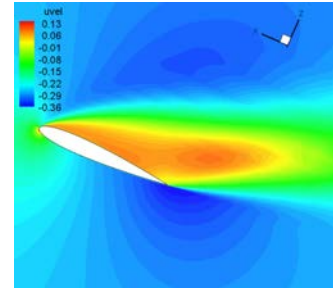
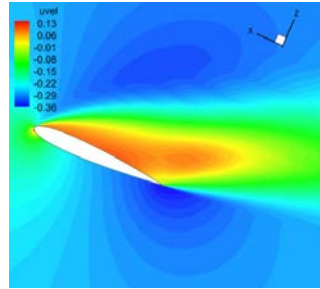
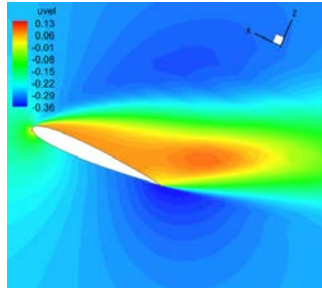
流れ場

SST-2003

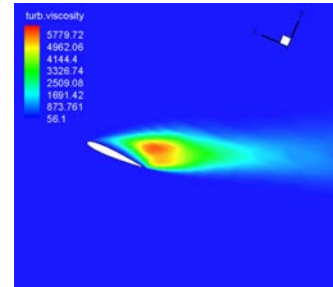
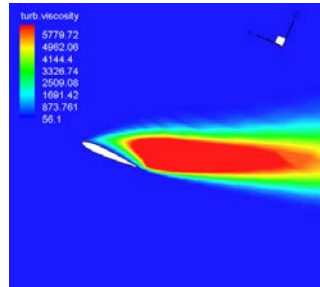
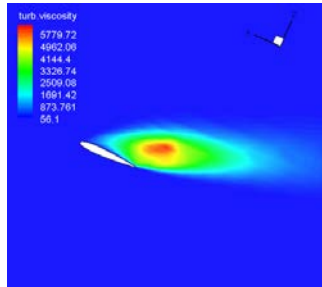
SA-R(オリジナル)

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

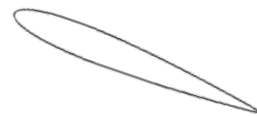
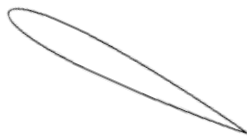
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

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

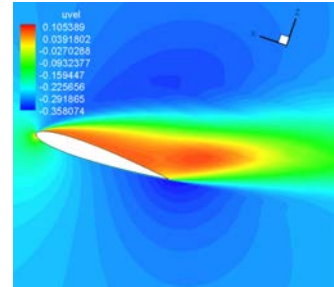
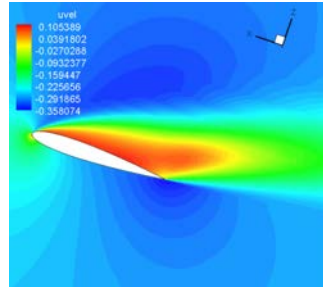
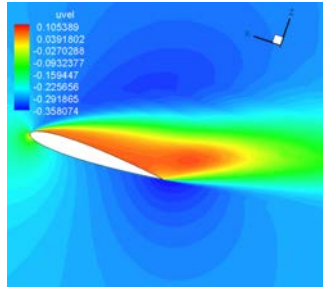
流れ場

SST-2003

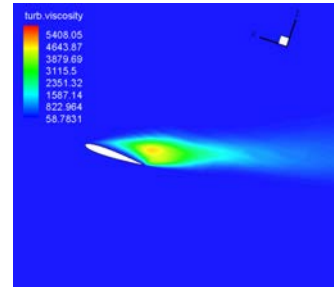
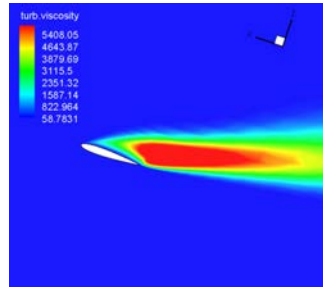
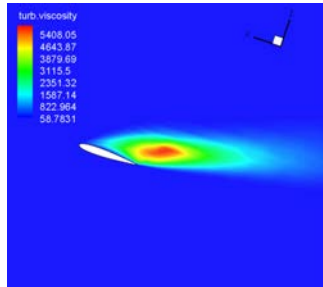
SA-R(オリジナル)

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

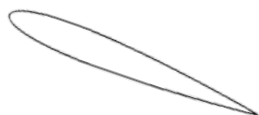
第5回EFD/CFD融合ワークショップ

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

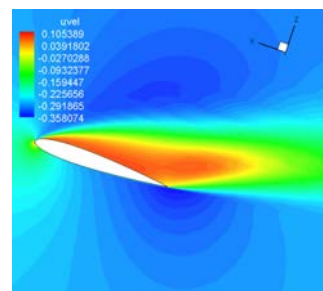
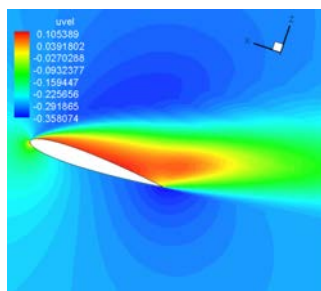
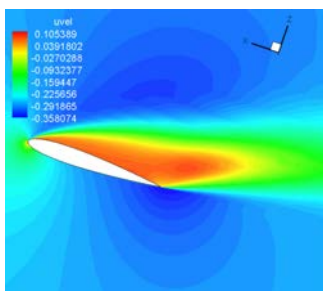
流れ場

SST-2003

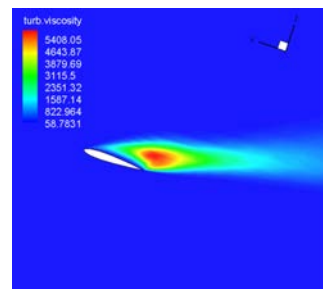
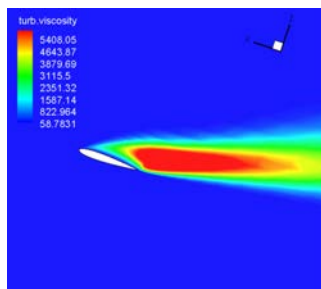
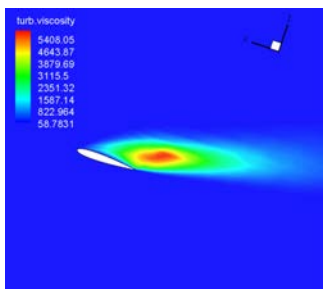
SA-R(オリジナル)

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°)

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°)

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

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

最適化結果
(迎角: 19.0°)

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

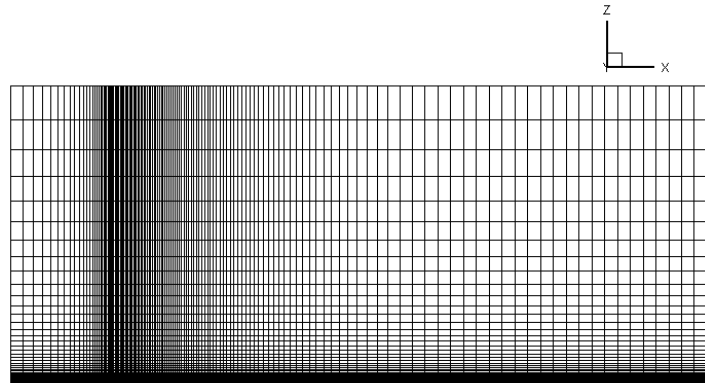
$$C_{w2} = 0.28926, \quad C_{w3} = 5.9049$$

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)
Grid : 273 × 193



計算格子

結果・考察 16/18

流れ場

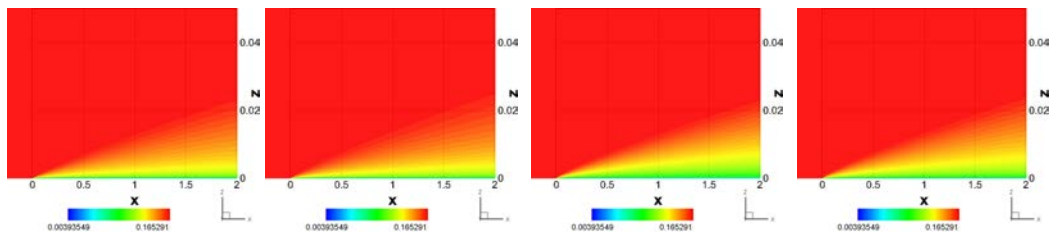
SST-2003

SA-R
(オリジナル)

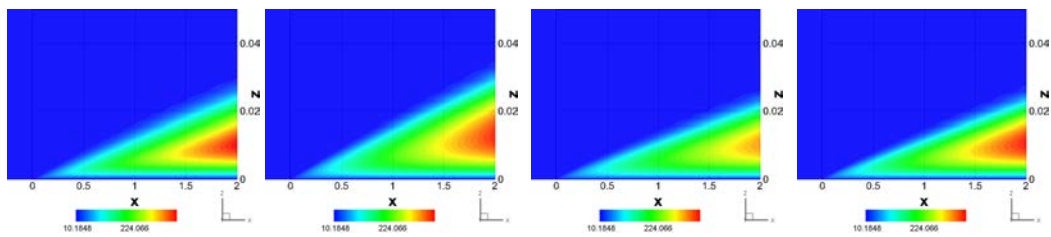
SA-R
(最適化:迎角24.0°)

SA-R
(最適化:迎角19.0°)

x方向
速度成分u

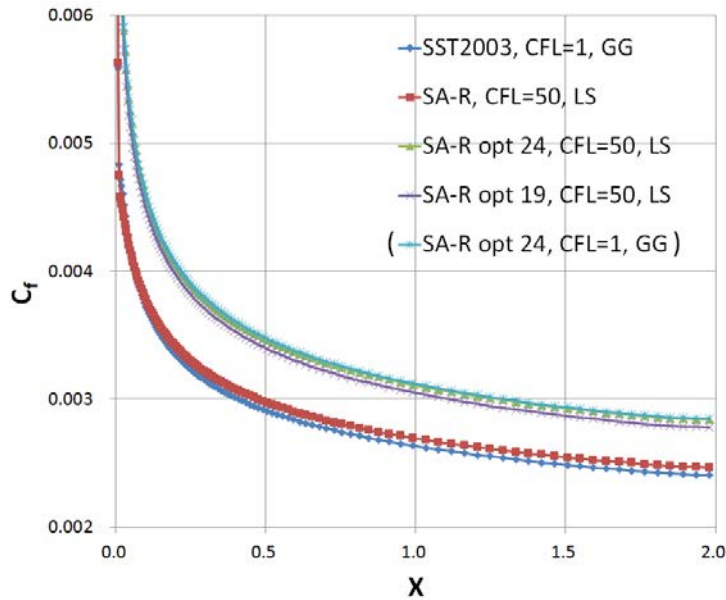


乱流粘性



結果・考察 17/18

表面摩擦係数



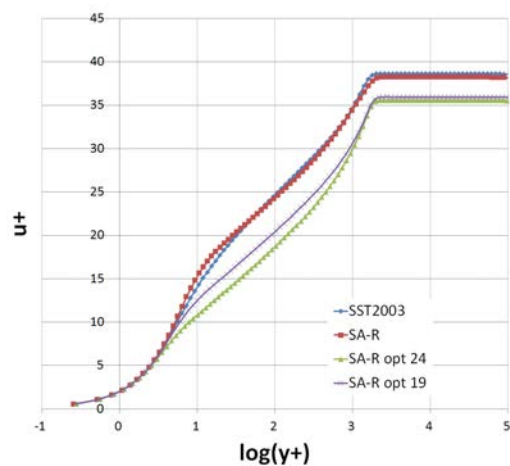
67

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

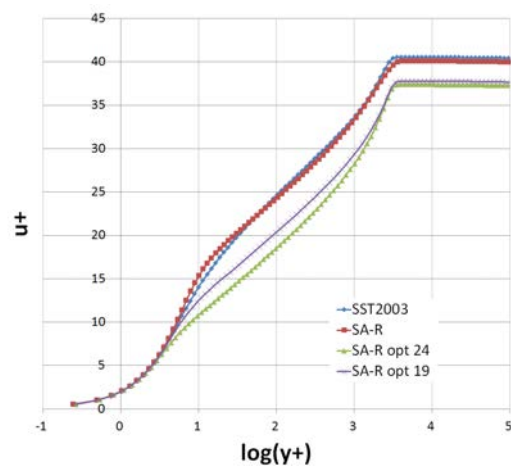
2012年1月23日(月)
秋葉原コンベンションホール 5B会議室

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。

