

船舶CFDにおけるデータ同化の必要性と そのプロトタイプ開発

海上技術安全研究所
坂本信晶・日野孝則

発表内容

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性
2. パラメター推定用データ同化システムの開発
3. テストケース
4. 2次元翼周りデータ同化結果の検証と考察
5. 3次元船体周り流れへの適用
6. まとめ

謝辞：

本研究の一部はJSPS科研費課題番号"22K04567"の助成を受けたものです。

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

写真引用：https://www.namura.co.jp/ja/product/ship/ship_list/bulkcarrier.html



ばら積み船

■ 船舶における「省エネ5%」の効果

- 50,000トンの小麦を米西海岸積み神戸で揚げる
- 船を日本で用船開始、西海岸まで空船で航海

用船料一日	USD10,000/日
船の燃料使用量	32トン/日
燃料価格 fuel oil	USD300/トン
港費	米国西海岸 USD180,000/港 神戸 USD100,000/港
日本/米西海岸(4585マイル)/14.7ノット - 空船航海日数	13日
米西海岸/神戸(4585マイル)/14.0ノット - 満載航海日数	13.65日
積港	5日
神戸港	8日
用船料計	USD10,000 × (13日+13.65日+5日+8日) = USD396,500 (42pct)
燃料計	USD300 × 32トン × (13日 +13.65日) = USD255,840 (27pct)
港費用	USD180,000 + USD100,000 ----- USD932,340 (100pct)
総費用	USD932,340 / 50,000トン = USD18.65

- ・省エネ1トン(燃料代300ドル/トンのセーブ)は船価1MILドルに相当
- ・燃料高騰時の600ドル/トンは船価 2MILドル以上に相当

- 1日の燃料代は、
 $\$300 \times 32 = \$9,600 \sim 140\text{万円/day}$
- 流力性能改善により、**5%の省エネを達成**出来たとする。
- 1日当たり、燃料代は
 $\$300 \times 32 \times 0.05 = \$480/\text{day}$ 節約。
- 26.65日航海すれば、燃料代は**一航海total**で、
 $\$480 \times 26.65 = \$12,792 \sim 190\text{万円節約}.$
- 1年に7航海すると仮定すれば、
 $\$480 \times 26.65 \times 7 = \$89,544 \sim 1300\text{万円節約}.$
- 為替レート・燃料価格次第ではもっと...

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

■ 船舶の流力性能設計



https://www.monohakobi.com/ja/r_and_d/esg_activity_support/energy_saving_devices/

写真の出典：
<https://www.jmuc.co.jp/products/container/>

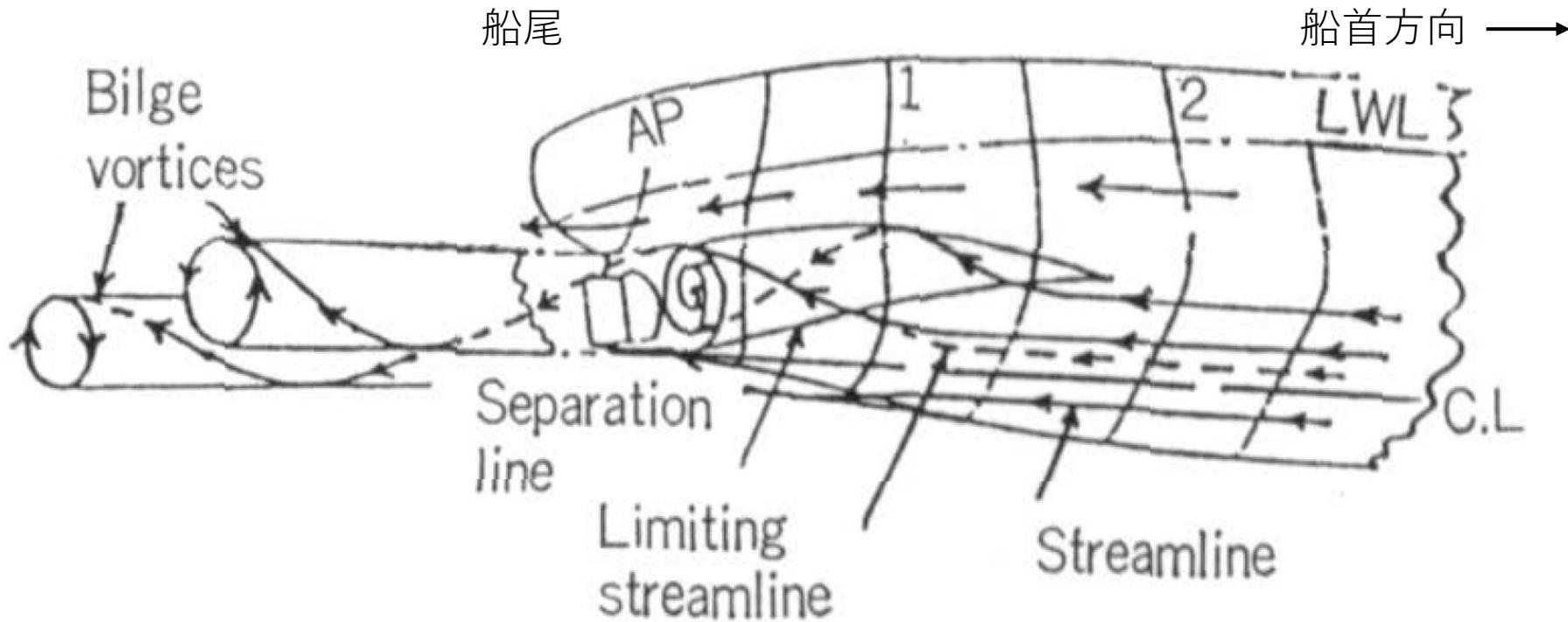


船首部での造波現象は、一般的には粘性影響が小さい。
→設計現場では、ポテンシャル理論が使われることが多い。
(但し、碎波などの強非線形現象の解析にはCFD計算が必要)

船尾では**境界層が発達**→**粘性抵抗**が支配的。
→船尾形状・推進器・付加物設計には、**船尾流れの情報が必要不可欠**。
→設計ツールとして、**粘性CFD計算**を使用。期待されていることの1つは、**流場の精度良い推定**。
→船舶分野でCFDは、水槽試験(航空機分野での風洞実験)、実船計測と**相互補完的に利用**。

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

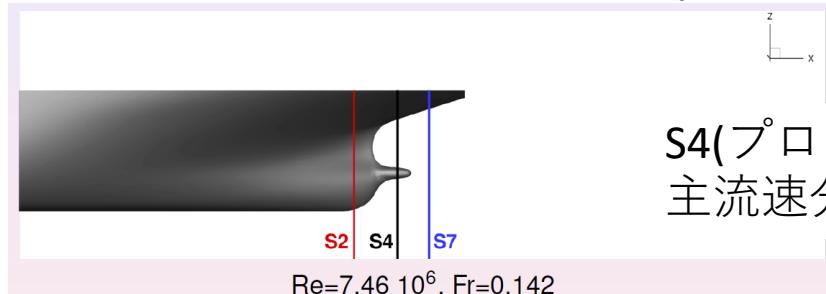
■ 船尾における流れの剥離



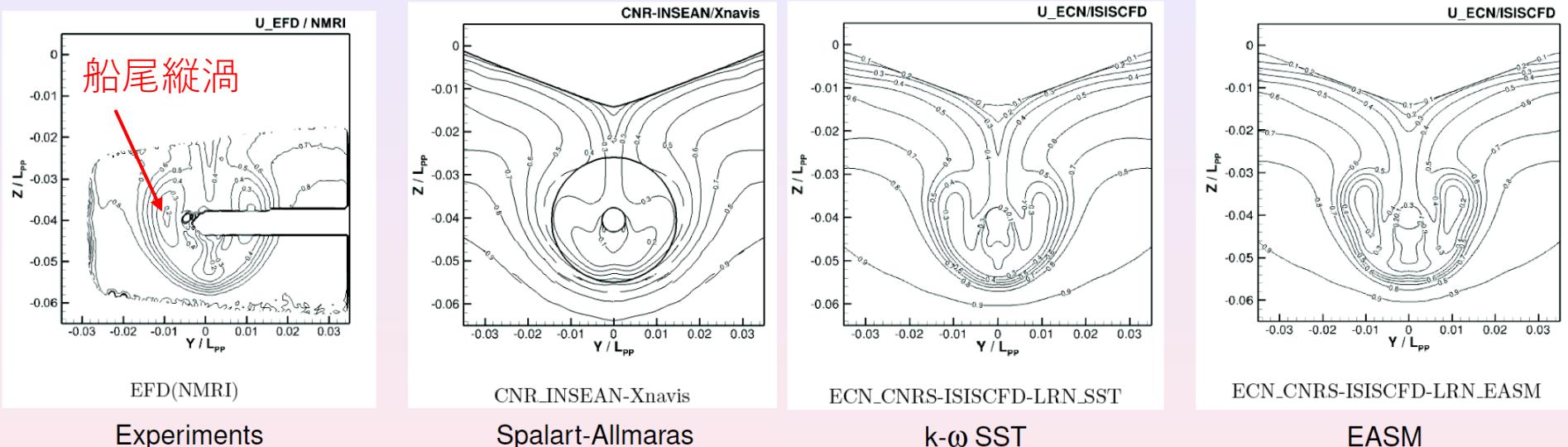
- 鈴木他 (1993)
- 右舷側船尾を、水中斜め下から見たイメージ
- 船尾プロペラ面付近における ビルジ渦(Bilge vortices)のCFDによる解像がkey

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

■ 粘性CFDによる船尾流れの推定精度 (Hino et al. Ed. 2020)



S4(プロペラ面)での主流速分布を見てみると…



■ 主流は、 $k - \omega$ SST, EASM。乱流モデルの持つ性能を、より発揮することができれば、更に高精度な流場推定が可能なのでは？

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

■ 船舶CFDにおける乱流モデルパラメター変更の一例

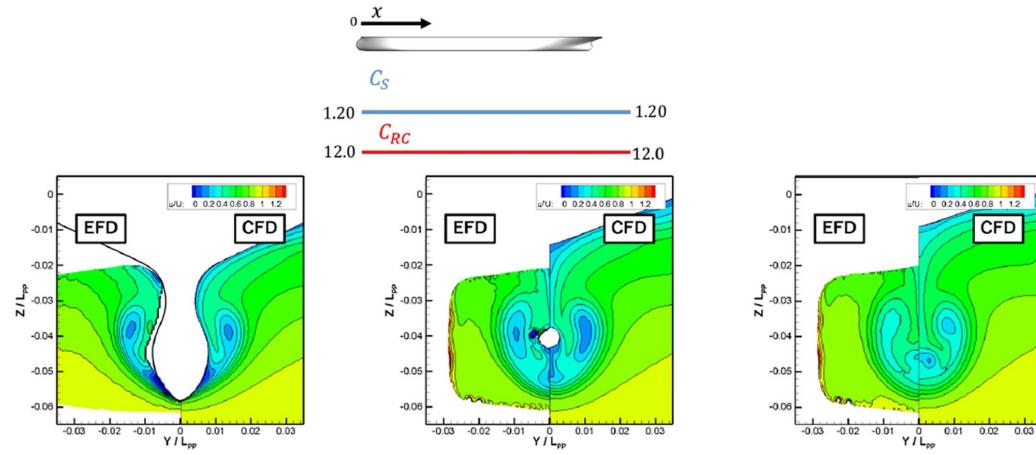


Fig. 10 Comparison of x -directional velocity (u/U) distributions of the modified model (Case 1) with the experimental data (EFD) at $x/L_{pp} = 0.9625, 0.9843$ and 1.0

- Hino et al. (2022)
- 肥大船の船尾流れを対象
- Generalized k- ω “like” model
- モデル定数に空間分布を与えることで、船尾流れの再現性が改善。
- 与え方はad-hocに決定。

C_s : separation parameter
 C_{RC} : rotation/curvature correction

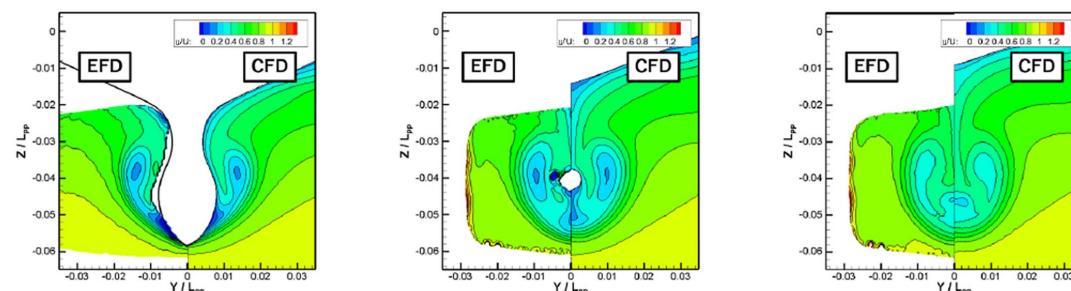
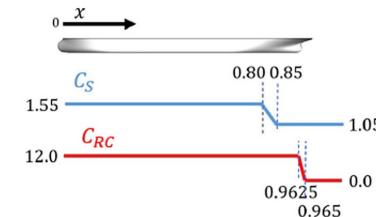


Fig. 12 Comparison of x -directional velocity (u/U) distributions of the modified $k-\omega$ model (Case 3) with the experimental data (EFD) at $x/L_{pp} = 0.9625, 0.9843$ and 1.0

1. 船舶CFDにおけるデータ同化の必要性

■ 研究目的

データ同化により、船舶CFD計算に適した乱流モデルパラメターを推定し、船舶の流力性能評価精度を向上させること。

■ 本発表の主な内容

→2次元翼後縁の剥離流れを捉えることの出来る
 $k - \omega$ SSTモデルパラメターを、実計測値を援用した
データ同化により推定&精度検証
→推定したパラメターで、3次元船体周り流れを推定し、
精度を検証

機械・航空分野で多数の先行研究：

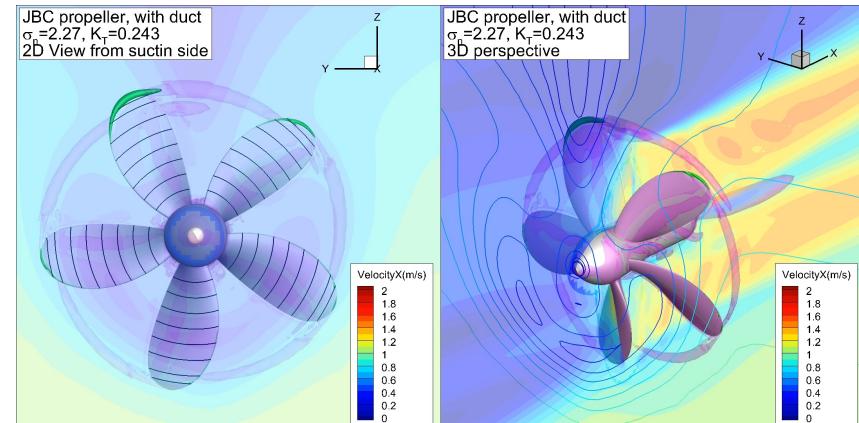
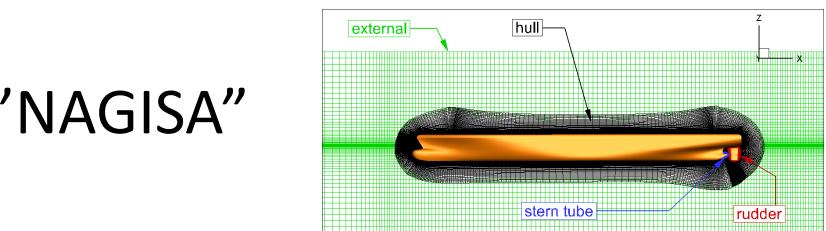
Kato&Obayashi (2011, 2013), Kato et al. (2015, 2016)

Misaka et al. (2019), Obayashi et al. (2021), Misaka et al. (2022) etc...

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

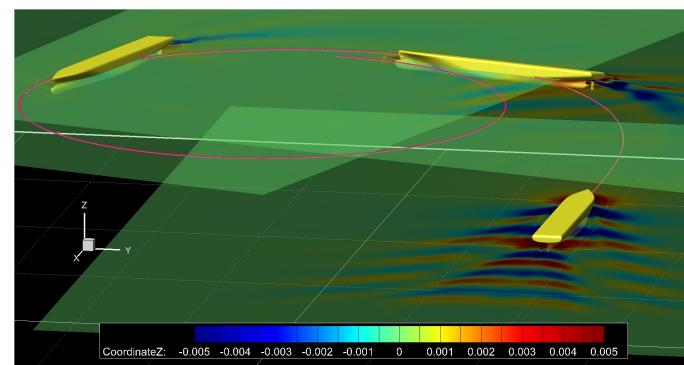
■ 海技研in-house CFDソルバー：“NAGISA”

- 構造格子有限体積法(疑似圧縮)
- 乱流モデル：1-eq/2-eq/EASM/DES/WF/low Rn, 壁面粗度
- 自由表面モデル：単相レベルセット法
- 定常/非定常計算
- 6自由度運動
- プロペラ影響：体積力/実形状
- 静的/動的重合格子
- OpenMP並列化



今回の計算：

- $k - \omega$ SST(2-eq)モデル
- 粗度無し、自由表面無し
- 定常計算 (時間平均流場)



2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ 乱流モデル：Menter's $k - \omega$ SST(2-eq)モデル

$$\frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial t} + u_i \frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial x_i} = Prod_{k,\omega} + Diff_{k,\omega} + Dest_{k,\omega} + CrossDiff_{\omega}$$

k 方程式の右辺項

$$Prod_{k,\omega} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$Dest_{k,\omega} = -\beta^* \omega k$$

$$Diff_{k,\omega} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

ω 方程式の右辺項

$$Prod_{\omega} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$Dest_{\omega} = -\beta \omega^2$$

$$Diff_{\omega} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_{\omega} \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

$$CrossDiff_{\omega} = 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

- k, ω についての輸送方程式を2本解く。
- 壁近傍では ω 方程式、それ以外では ε 方程式を解く。
- 関数 F_1, F_2 の導入により、 $k - \omega / k - \varepsilon$ をblendingし、両者の利点を活かす。
- 圧力勾配影響を受ける流れに適する。

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

ϕ_1 としてblending functionに入る係数

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

k- ω model

ϕ_2 としてblending functionに入る係数

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

k- ε model

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ 乱流モデル：Menter's $k - \omega$ SST(2-eq)モデル

$$\frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial t} + u_i \frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial x_i} = Prod_{k,\omega} + Diff_{k,\omega} + Dest_{k,\omega} + CrossDiff_{\omega}$$

F_1, F_2 および ν_t

$$F_1 = \tanh(arg_1^4)$$

$$arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega}} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad a_1 = 0.31$$

$$F_2 = \tanh(arg_2^2)$$

$$arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right)$$

- k, ω についての輸送方程式を2本解く。
- 壁近傍では ω 方程式、それ以外では ε 方程式を解く。
- 関数 F_1, F_2 の導入により、 $k - \omega / k - \varepsilon$ をblendingし、両者の利点を活かす。
- 圧力勾配影響を受ける流れに適する。

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

ϕ_1 としてblending functionに入る係数

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

k- ω model

ϕ_2 としてblending functionに入る係数

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

k- ε model

Ω : 渦度強さ(magnitude)、 y : 壁面までの最小距離

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ 乱流モデル：Menter's $k - \omega$ SST(2-eq)モデル

$$\frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial t} + u_i \frac{\partial(k, \omega)^T}{\partial x_i} = \text{Prod}_{k, \omega} + \text{Diff}_{k, \omega} + \text{Dest}_{k, \omega} + \text{CrossDiff}_{\omega}$$

F_1, F_2 および ν_t

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega}} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad a_1 = 0.31$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right)$$

- データ同化対象とするパラメター

$\rightarrow a_1, \beta_1, \beta_2, \sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2}$

- $\kappa, \beta^* (= C_\mu \text{ in } k - \varepsilon)$ は外す。
 →どちらも壁乱流における対数則をベースに求まる定数だから。

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

ϕ_1 として blending function に入る係数

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

k- ω model

ϕ_2 として blending function に入る係数

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

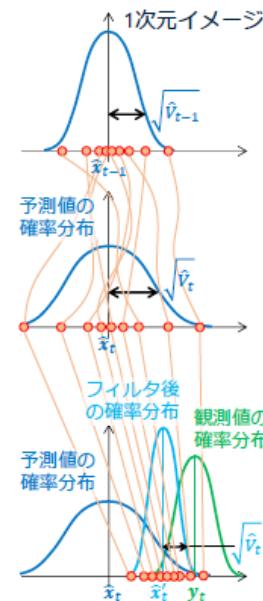
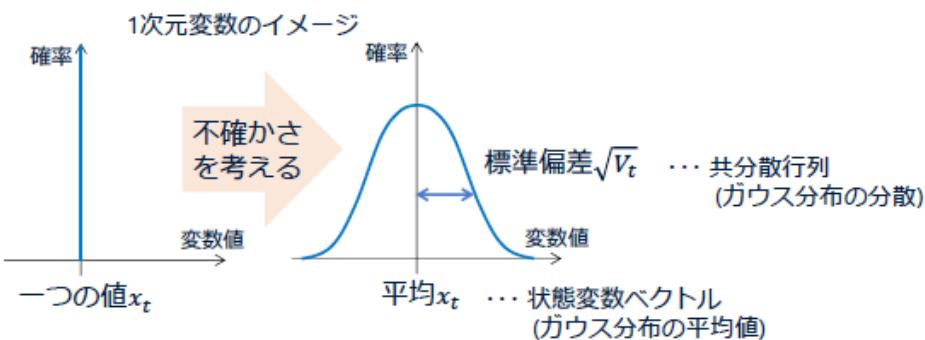
k- ε model

Ω : 渦度強さ(magnitude)、 y : 壁面までの最小距離

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ Ensemble Kalman filter: EnKF (図は三坂 (2021) より抜粋)

正規分布で考える!!



- 予測値の確率分布を、アンサンブルで近似
- 共分散行列の時間発展も、アンサンブルで近似
- 状態遷移行列を陽に定義する必要がない。
→ 非線形のシステムモデルがそのまま使用可能。

観測値と同化前の結果との差

$$\text{同化結果} \rightarrow \hat{x}'_t^n = \hat{x}_t^n + \hat{K}_t(y_t - H_t \hat{x}_t^n + w_t^n) \dots n = 1 \sim N$$

同化前 n 結果

観測値が相関を通じて、同化前の結果を修正するための重み

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ Ensemble Kalman filter: EnKF

$$\vec{x}_{t|t} = \vec{x}_{t|t-1} + K_t (\vec{y}_t^{obs} - H_t \vec{x}_{t|t-1} + \vec{w}_t)$$
$$V_{t|t} = (I - K_t) V_{t|t-1}$$

計測点数<アンサンブルメンバーナー数の場合：

$$K_t = V_{t|t-1} H_t^T (H_t V_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1}$$

計測点数>アンサンブルメンバーナー数の場合：

$$K_t = \tilde{E}_{t|t-1} \left[I + (H_t \tilde{E}_{t|t-1})^T R_t^{-1} (H_t \tilde{E}_{t|t-1}) \right]^{-1} \tilde{E}_{t|t-1}^T H_t^T R_t^{-1}$$

$\tilde{E}_{t|t-1}$ ：アンサンブル摂動を、メンバーナー数だけ列方向に並べた行列
 H_t ：観測演算子。セルID(i,j,k)から陽に定義。



サポートサイトを参考に実装。
非常に助かっています!

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ EnKFとCFDコードの関係(今回の問題の場合)

$$\text{状態変数: } \vec{x}_{t|t-1}^n = (u_{t|t-1}^n, v_{t|t-1}^n, [a_1, \beta_1, \beta_2, \sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2}]_{t|t-1}^n)^T$$

RaNS計算により、計算格子のセル中心で定義された流速成分

$k - \omega$ SSTモデル中のパラメター

システムモデル: NAGISAにより数値的に解くRaNS方程式

アンサンブルメンバー:

データ同化の対象となる乱流モデルパラメターを、**複数個サンプリングした集合(初期値はラテン超方格法により決定)**。およびそのモデルパラメターを用いたRaNS計算で得た**流場データの集合**。

アンサンブルメンバーの時間発展:

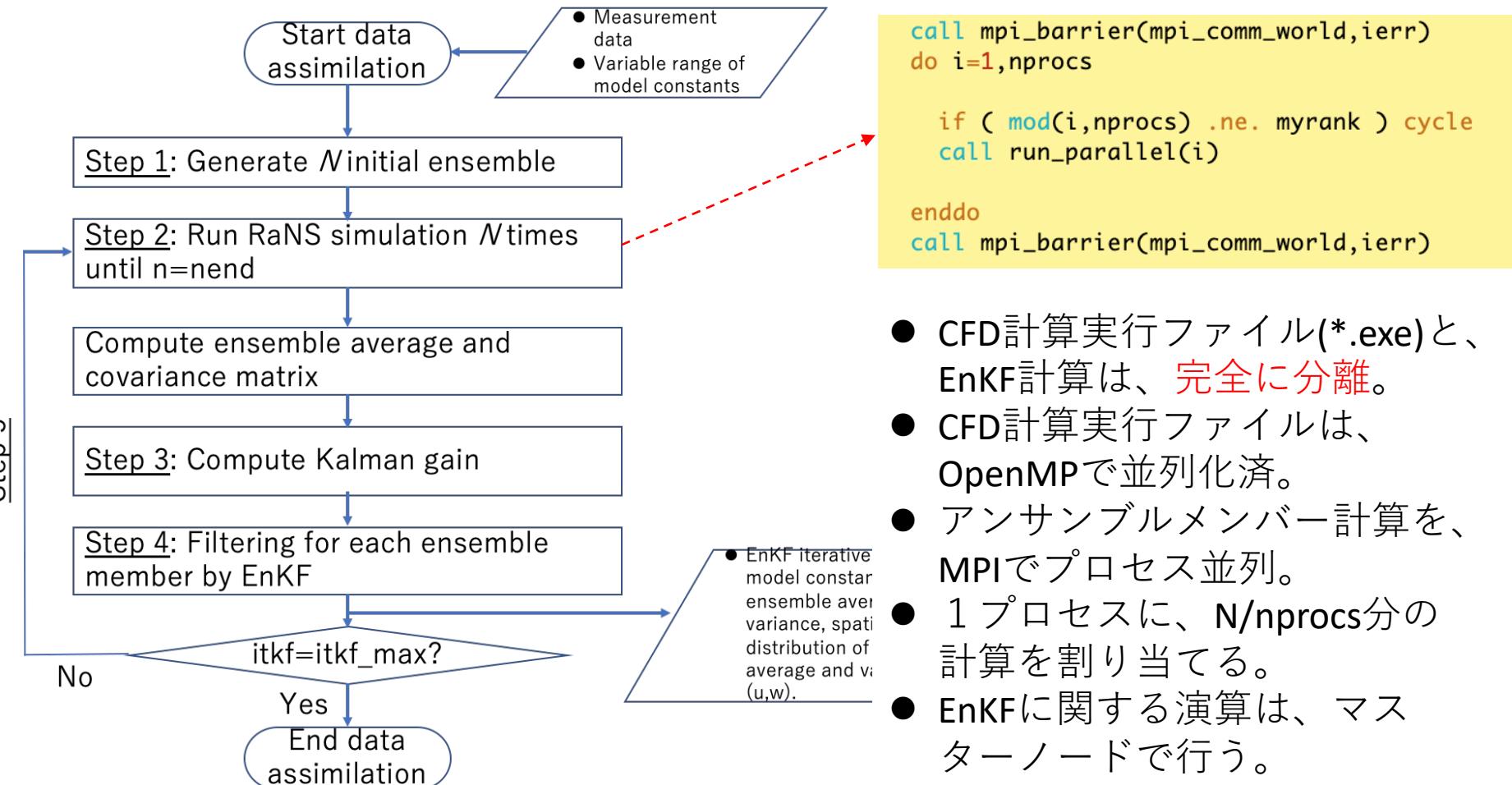
各メンバーを、流場が収束するまでNAGISA(=システムモデル)により計算すること。

観測モデル:

線形(=定常観測であり、1回計測した実験値をfiltering中は変えずに使用。)

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

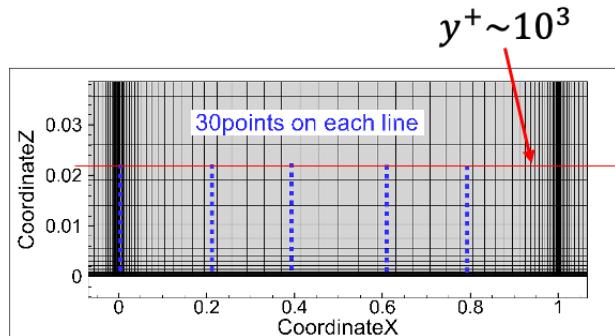
■ EnKFとCFDコード(システムモデル)の統合



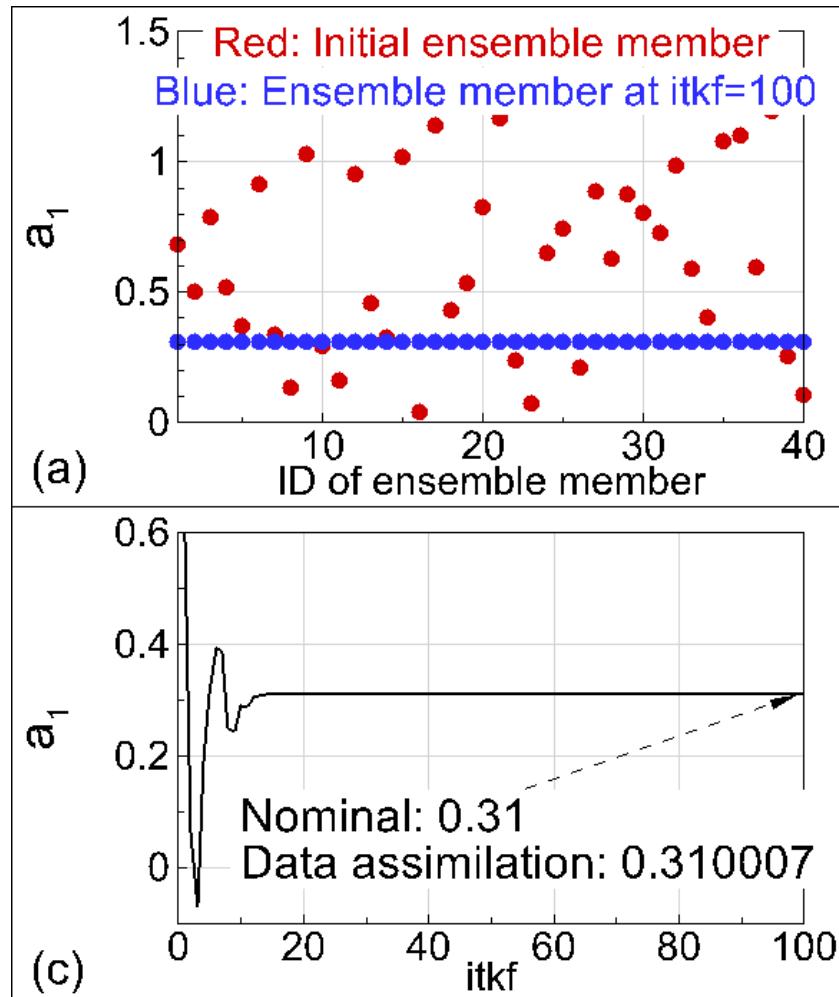
大林他(2021)を参考に作成

2. パラメター推定用データ同化システムの開発

■ 統合したコードの妥当性確認(双子実験)



- 2次元平板を用いた双子実験
- 先行研究として、Kato&Obayashi (2013)。
- 平板上の速度プロファイルを用いて、双子実験を実施。
- アンサンブルメンバー数：40
- フィルタリング回数：100
- 乱流モデルパラメター“ a_1 ”を、双子実験により再現。
- この他、SA乱流モデル中の5パラメターを対象とした双子実験で、すべてのパラメターが元パラメターに収束することを確認。
- Sakamoto (2023, OMAE)に詳細を報告。



3. テストケース

■ データ同化問題の決定

三坂(2021)より

まず考えること

- ▶ 数値シミュレーションの「**どの変数・パラメター**」を「**どんな計測データ**」を用いて「**どうやって**」推定するのか。そして、推定精度は「**どう評価**」するのか

「**どの変数・パラメター**」

→NAGISAの $k - \omega$ SST乱流モデル中の**モデル定数** $a_1, \beta_1, \beta_2, \sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2}$ 。

「**どんな計測データ**」

→**2D NACA4412翼型**周りの流れで、NASA Turbulence modeling resourceに公開されている**実計測結果**に人工的なノイズを加えた**計測データ(速度場u,v)**。

「**どうやって**」

→EnKF。

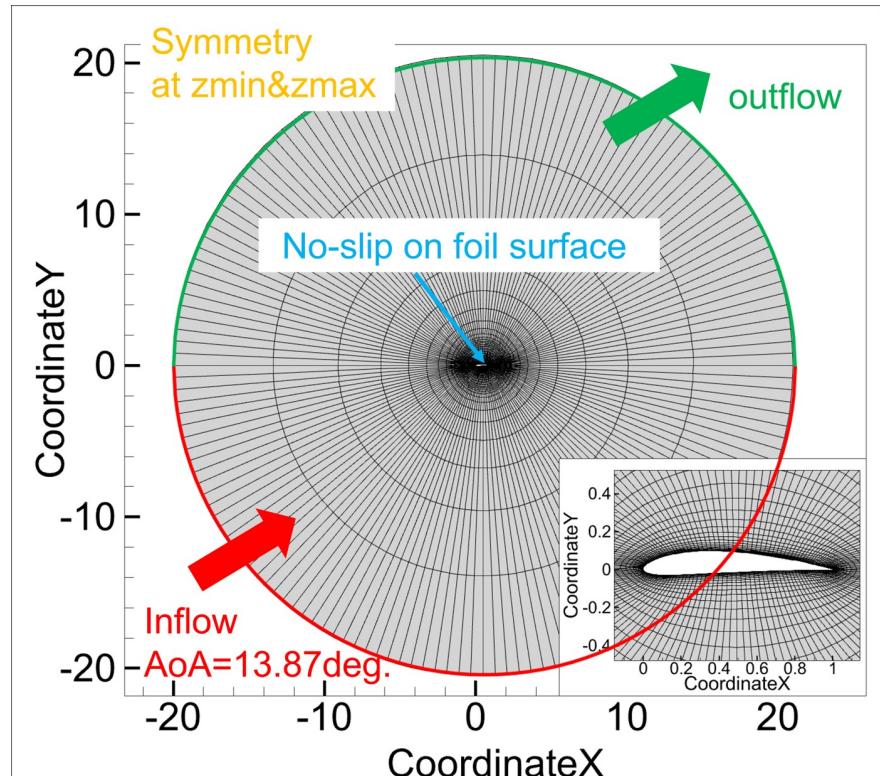
「**どう評価**」

→同化結果の流場(u,v)と、実計測結果の流場(u,v)の**RMSE**を用いて。

どうなれば成功？：データ同化過程で、モデル定数の**アンサンブルスプレッド** &流場の**RMSE**が小さくなる。

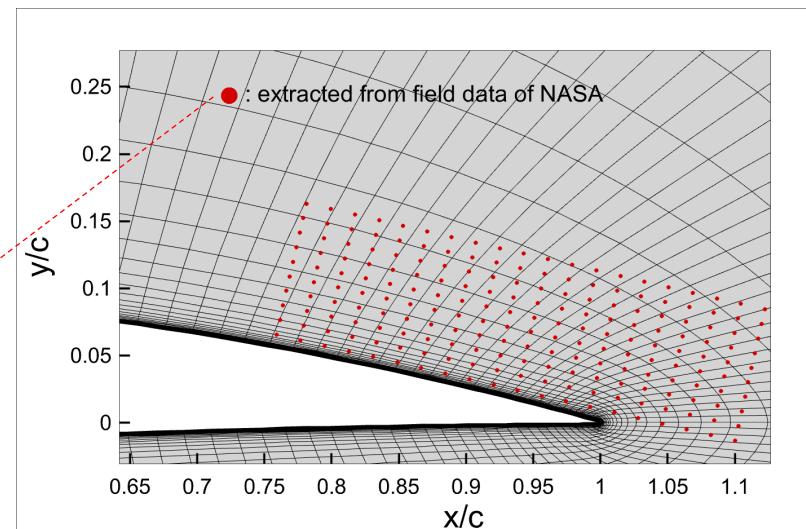
3. テストケース

■ 2次元NACA4412のCFD計算：設定



● : 10(wall normal) x 20(chordwise)=200
→セルセンターとの最近傍点を選択し、
1セルへの重複計測点を除外。
→最終的に、161点を採用。

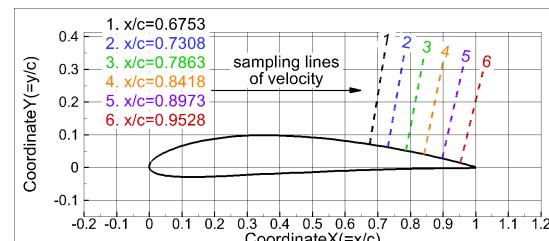
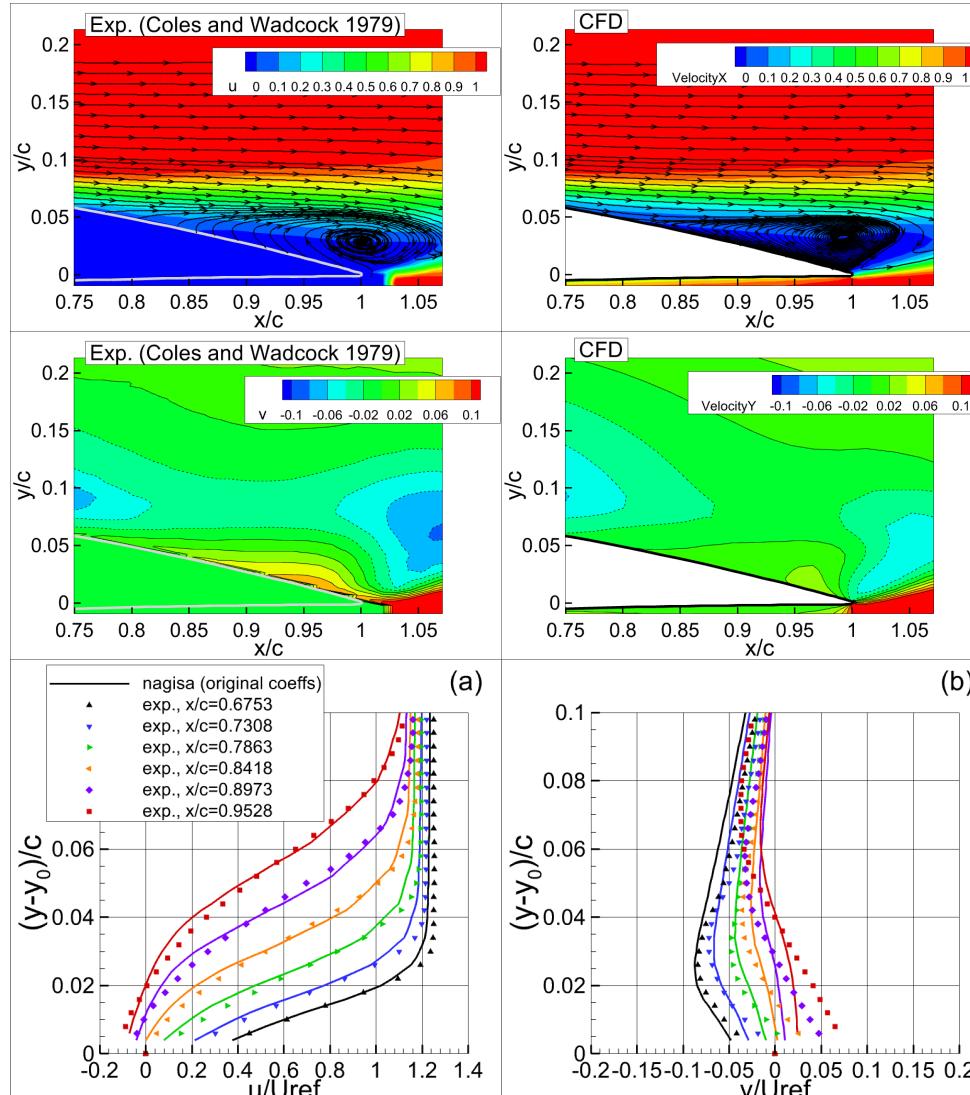
- $Rn=1.52e+6$, 全乱流
- 迎角(AoA)=13.87deg.
- 最小格子間隔= $2e-5$
- 160(翼弦方向)x4(スパン方向)x52(壁面法線方向)=33,280 cells
- データ同化に採用した速度場の計測位置は、以下の通り。



3. テストケース

■ 2次元NACA4412のCFD計算：基準パラメターでの精度検証

- 基準パラメターで、主流方向流速(u)は、精度良く推定。
- 上下方向流速(v)は、後縁付近($x/c > 0.8$)における壁近傍および後流での精度が不足。
- Separation bubbleのサイズも、計算結果は実験に比べやや小さい。



3. テストケース

■ EnKFによる $k - \omega$ SSTモデルのパラメター推定

Case	データ同化に用いる計測値	初期アンサンブルメンバー生成範囲
1	u, v	$0.248 \leq a_1 \leq 0.372$ (<i>nominal</i> : $a_1 = 0.31$)
2	u	$0.06 \leq \beta_1 \leq 0.09$ (<i>nominal</i> : $\beta_1 = 0.075$) $0.0786 \leq \beta_2 \leq 0.0869$ (<i>nominal</i> : $\beta_1 = 0.0828$)
3	v	$0.45 \leq \sigma_{\omega 1} \leq 0.55$ (<i>nominal</i> : $\sigma_{\omega 1} = 0.5$) $0.770 \leq \sigma_{\omega 2} \leq 0.942$ (<i>nominal</i> : $\sigma_{\omega 2} = 0.856$)

- アンサンブルメンバー数：30
 - フィルタリング回数：100
 - 観測値に与えるノイズ： $N(0, 1.0E - 6)$ の白色雑音
 - 共分散膨張：与えない
 - 局所化：行わない
- Case1,2と同一条件で
同化計算が出来なかった。

N_d : 計測データ数

N_{ens} : アンサンブルメンバー数

$\bar{\vec{x}}_{t|t-1}$: アンサンブル平均

$\vec{x}_{t|t-1}$: アンサンブルメンバー

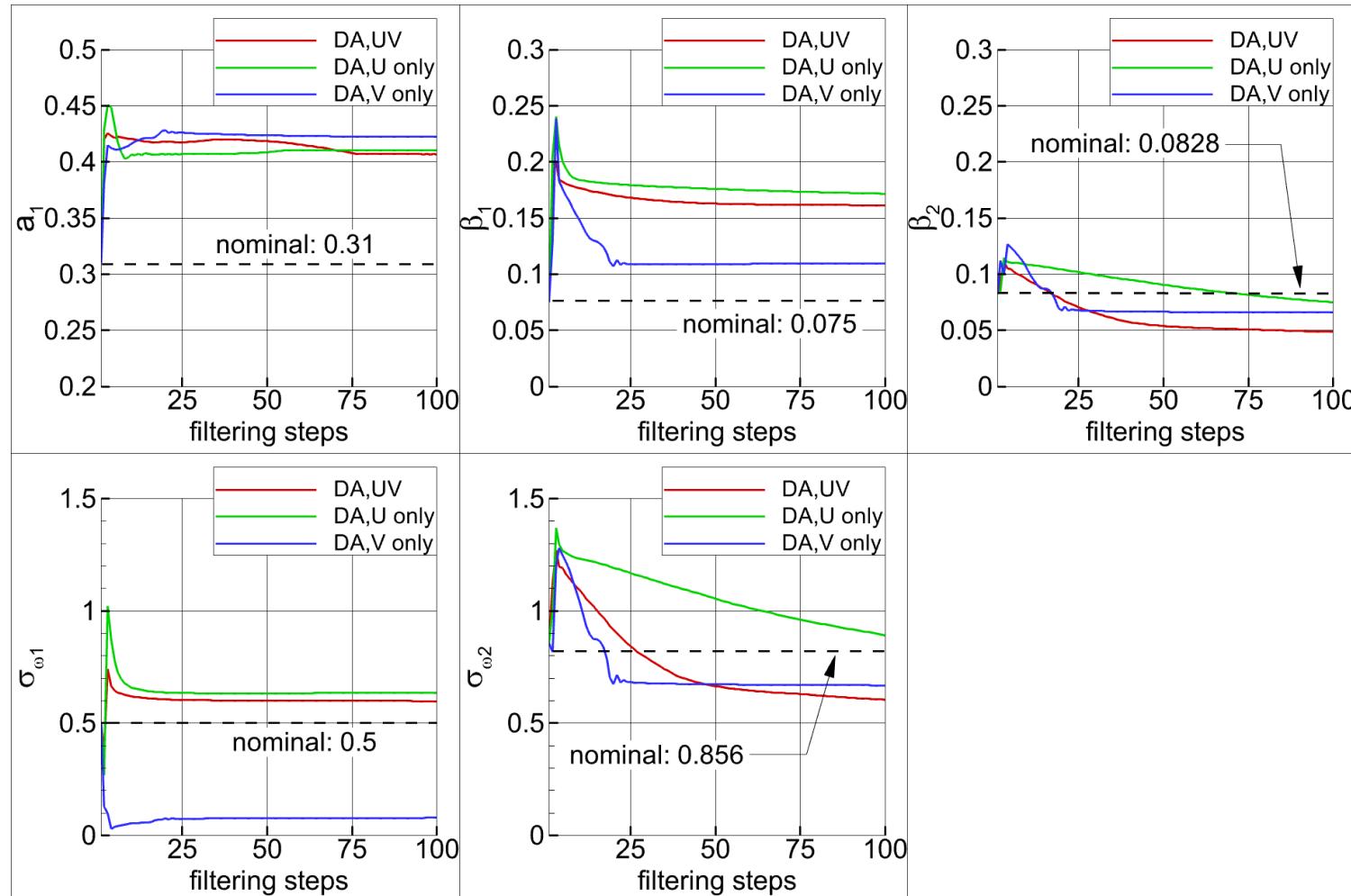
\vec{y}_t^i : 計測データ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (\vec{x}_{t|t-1|i} - \vec{y}_t^i)^2}$$

$$spred = \frac{1}{N_{ens}} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{ens}} (\vec{x}_{t|t-1}|_j - \bar{\vec{x}}_{t|t-1})^2}$$

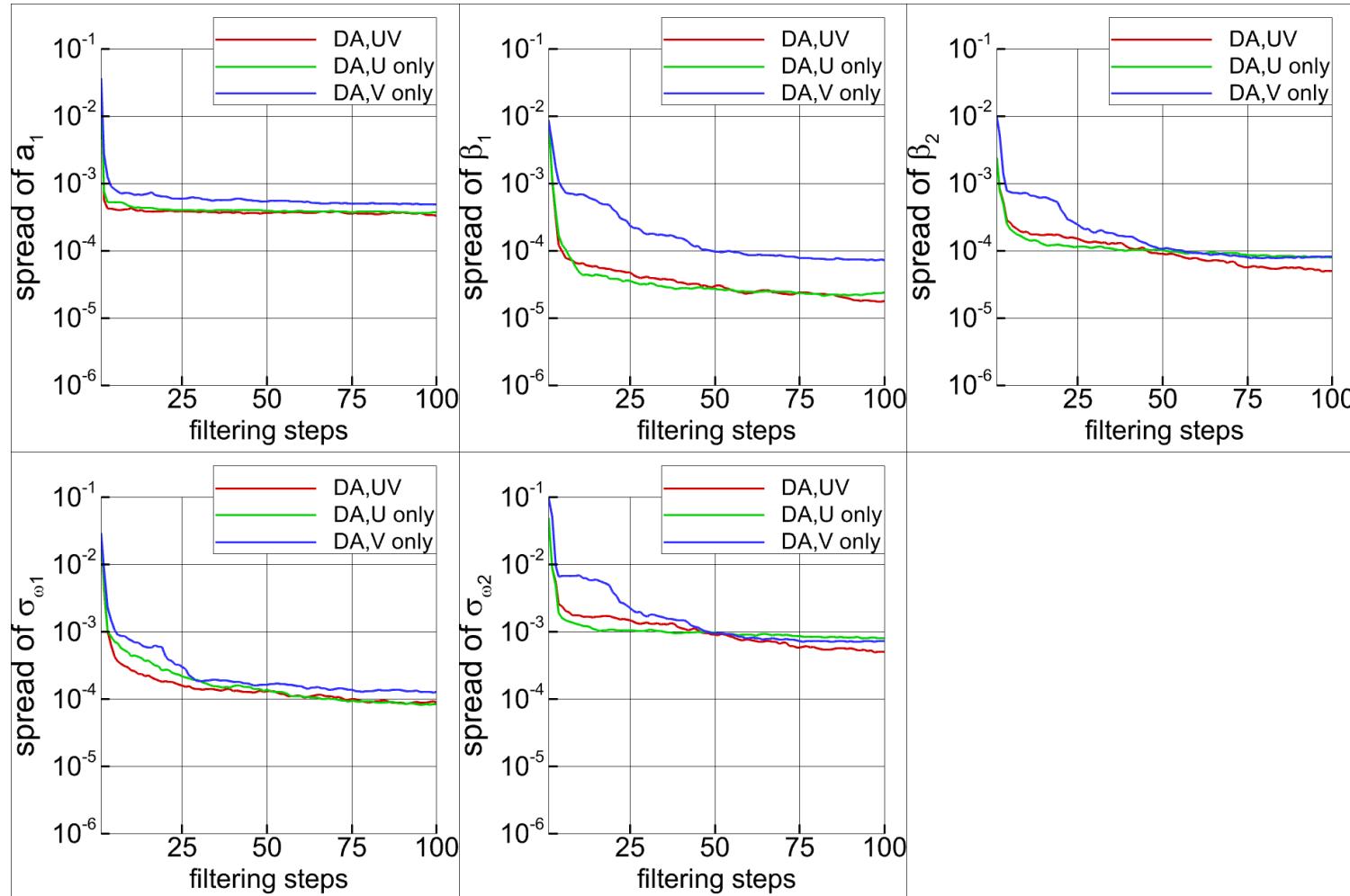
4. データ同化結果の検証と考察

■ パラメターのフィルタリング履歴



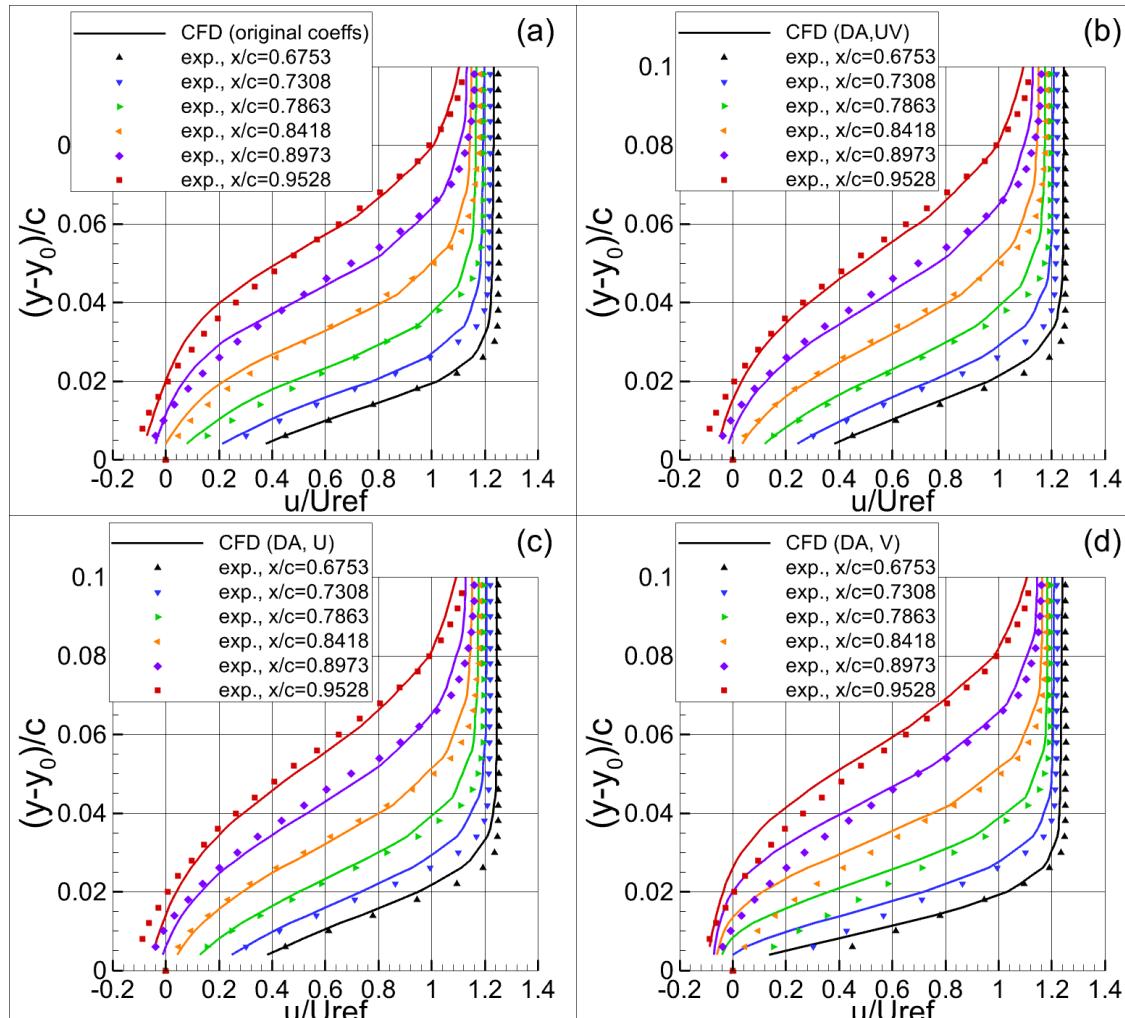
4. データ同化結果の検証と考察

■ パラメターのアンサンブルスプレッド



4. データ同化結果の検証と考察

■ データ同化前後の流場の再現性： u （主流方向流速）



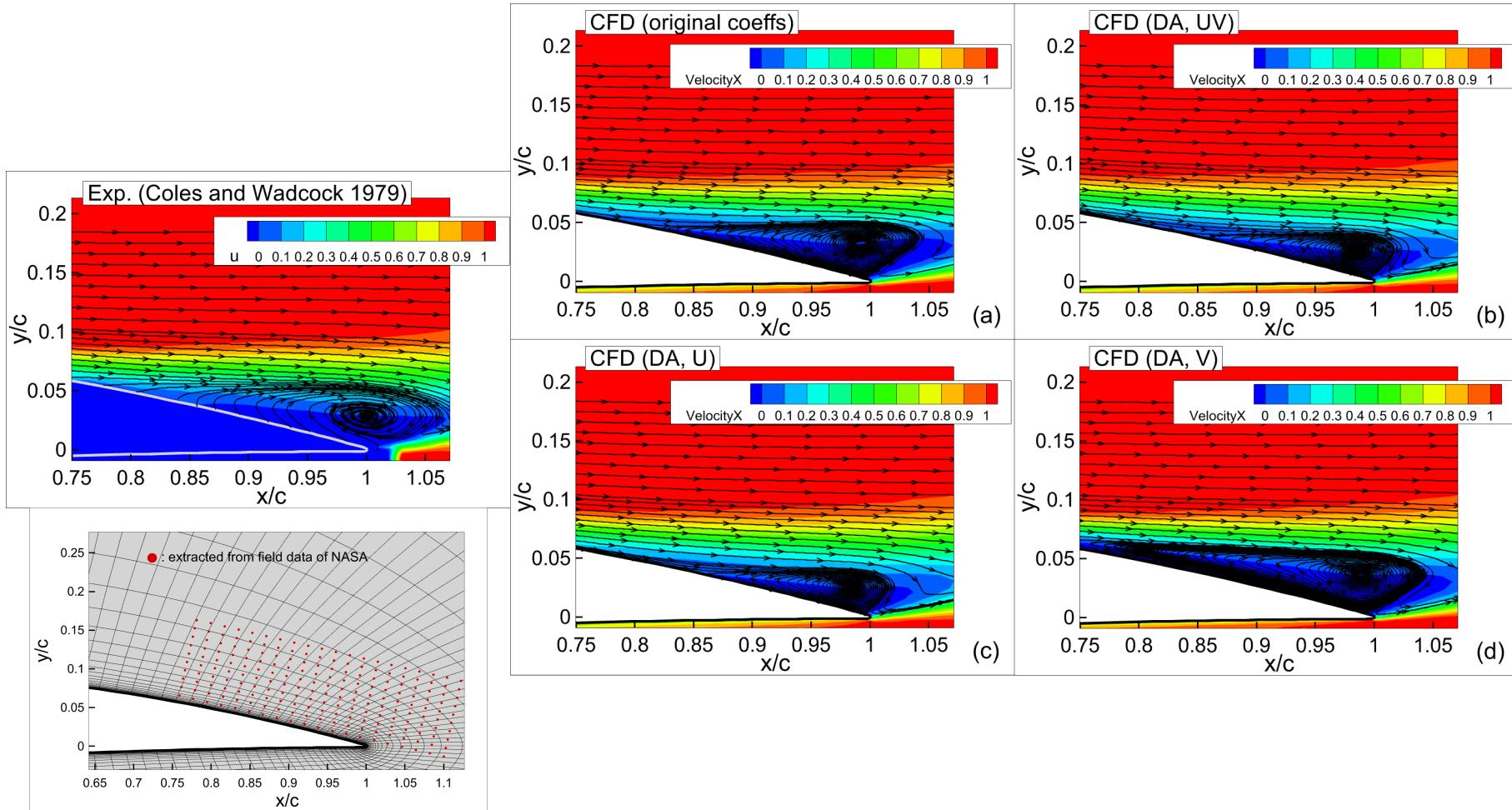
計測値 u, v 両方を用いてデータ同化

計測値 v のみを用いてデータ同化

計測値 u のみを用いてデータ同化

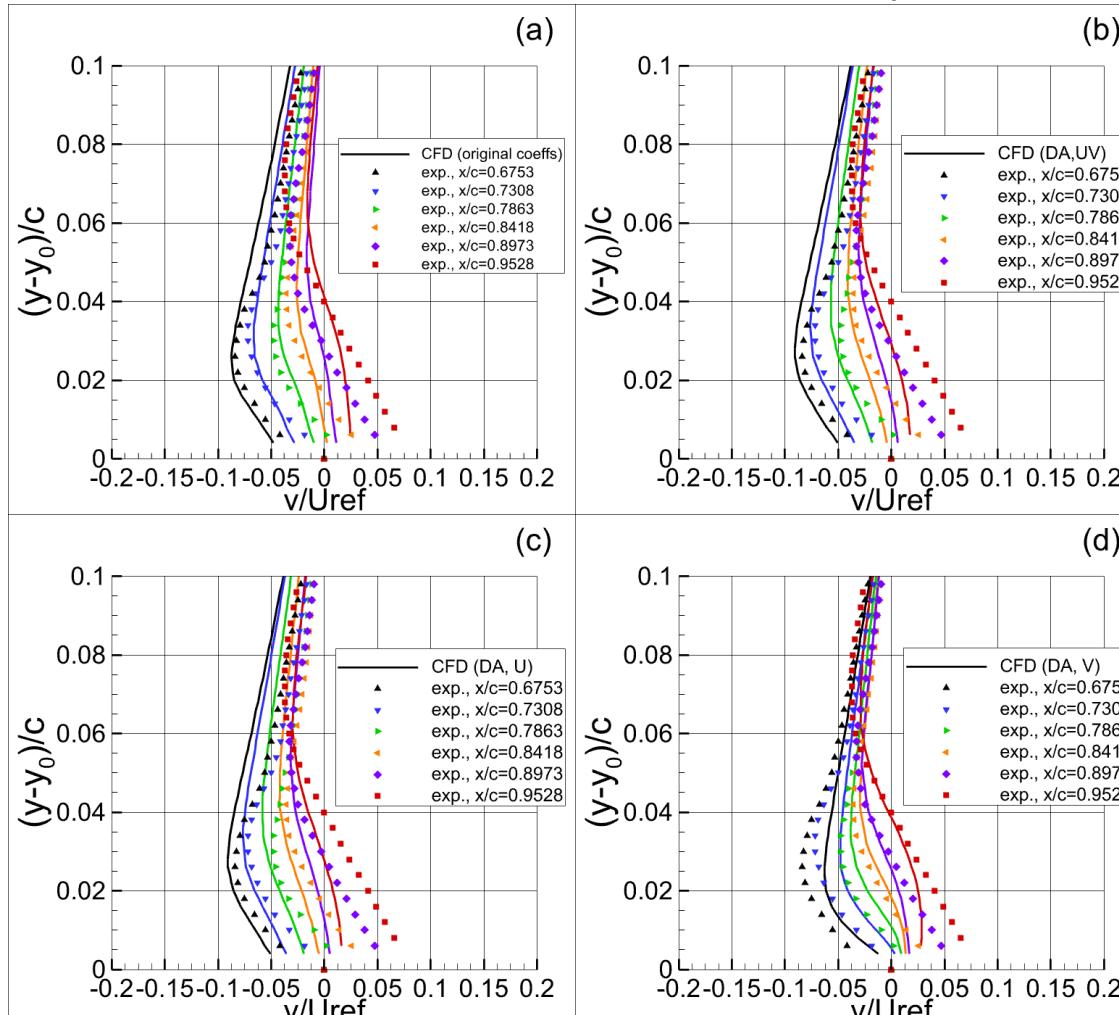
4. データ同化結果の検証と考察

■ データ同化前後の流場の再現性：流線およびu contour



4. データ同化結果の検証と考察

■ データ同化前後の流場の再現性： v (鉛直方向流速)



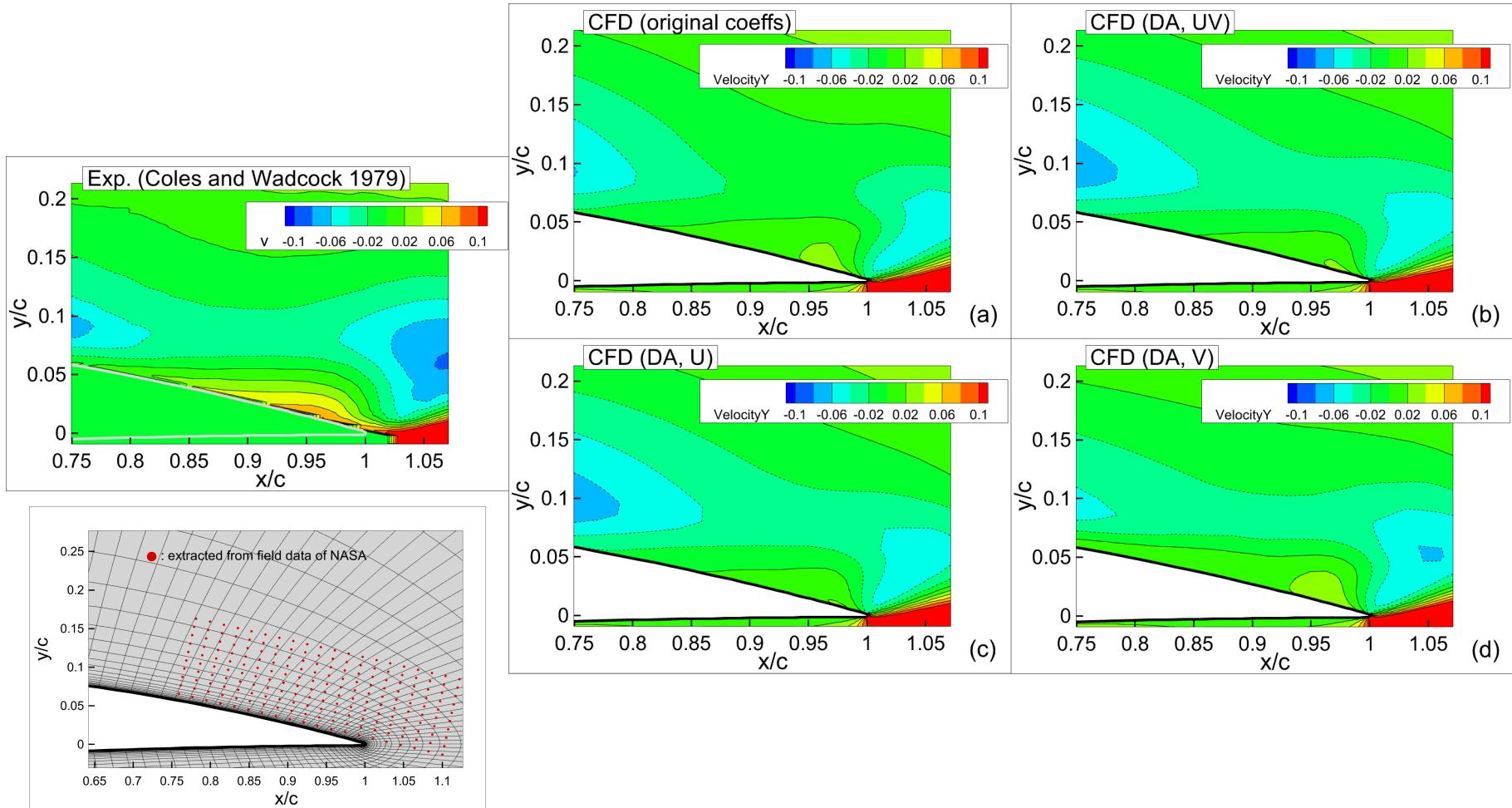
計測値 u, v 両方を用いてデータ同化

計測値 u のみを用いてデータ同化

計測値 v のみを用いてデータ同化

4. データ同化結果の検証と考察

■ データ同化前後の流場の再現性 : v contour



4. データ同化結果の検証と考察

■ データ同化前後の流場のRMSEとモデルパラメター

	Case	RMSE (w.r.t. Exp.)	$\Delta\text{RMSE}(\%\text{original})$	
同化前	→ original	4.59e-4		
同化後	DA, UV	4.27E-4	-6.91%	全流場の spread(u, v)も $O(1e-4)$ 以下に なっている。
	DA, U	4.42e-4	-3.66%	
	DA, V	7.05e-4	+53.6%	

	coeffs	a_1	β_1	β_2	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$
同化前	→ original	0.31	0.075	0.0828	0.5	0.856
同化後	DA, UV	0.41	0.16	0.0486	0.6	0.605
	DA, U	0.41	0.17	0.0749	0.6	0.892
	DA, V	0.42	0.11	0.0658	0.09	0.669

4. データ同化結果の検証と考察

■ 3次元船体周り流れに適用する前に

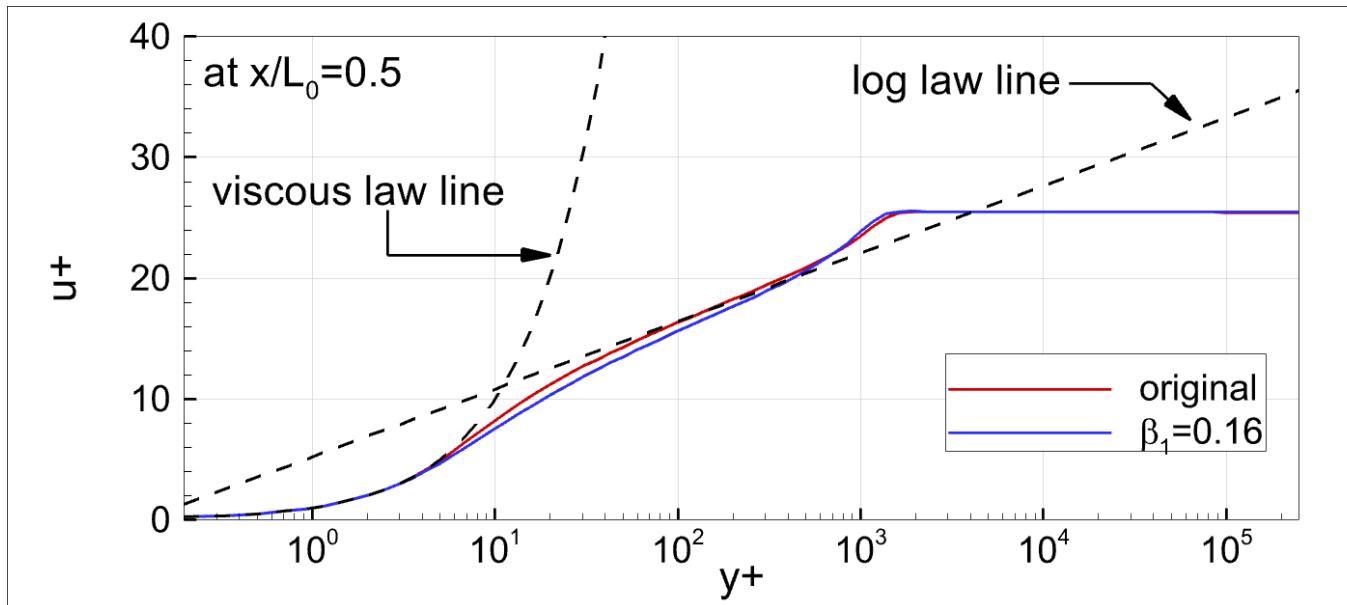
coeffs	a_1	β_1	β_2	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$
original	0.31	0.075	0.0828	0.5	0.856
DA, UV	0.41	0.16	0.0486	0.6	0.605

パラメターは、パラメターおよび流場と共に分散行列 $V_{t|t-1}$ を通じて変化しているので、下記のような恣意的な選択は良くないが…

- a_1 は、摩擦抵抗係数への影響が非常に大きい & Bradshaw 定数として 0.3 が適するとの実験結果多数 → original の値を採用。
- 壁近傍から生じるため剥離現象の再現には ω 方程式の係数が重要 → β_2 および $\sigma_{\omega 2}$ (壁から離れた乱流が発達する領域の定数) には original の値を採用。
- $\sigma_{\omega 1}$ は主に、壁近傍での ω 拡散に関わるためデータ同化後の値を用いるが、数値実験の結果 original の値を採用。
- $\beta_1 = 0.16$ (壁近傍での ω の生成項 & 崩壊項に作用、剥離現象と関係が強いと考えられる) のみを、データ同化結果として 3 次元船体計算に使用。

4. データ同化結果の検証と考察

■ “ $\beta_1=0.16$ ”の2次元平板流れへの影響

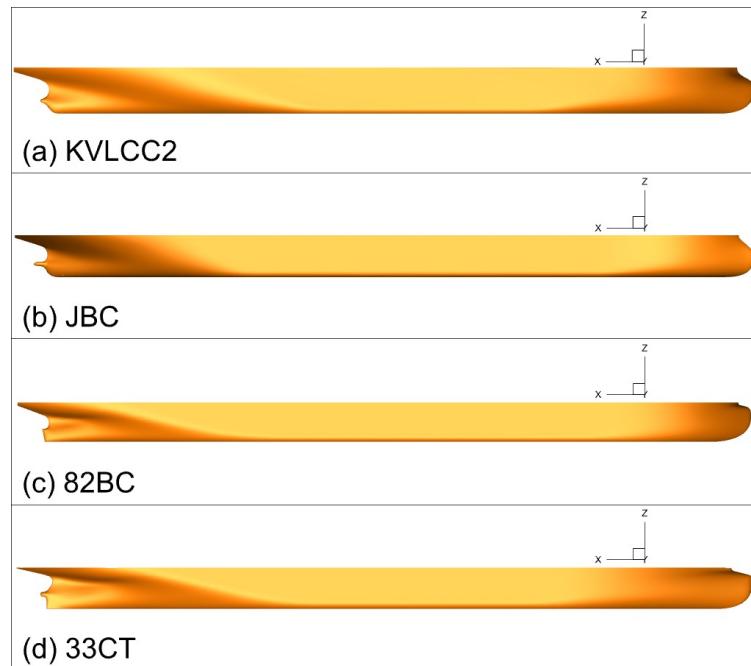


	Schoenherr	original	$\beta_1 = 0.16$
C_{f0m}	3.341E-03	3.317E-03	3.288E-03

- C_{f0m} に対する $\beta_1=0.16$ の影響は-0.86%original
- 船体抵抗の摩擦成分予測への影響は限定的(後述)

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ 3次元船体形状・流場条件



- 要目の異なる**4隻の肥大船**を対象
- プロペラ面における流場計算精度が、
データ同化結果である $\beta_1=0.16$ を採用
することで、どの程度向上するか。
- 比較のため、**EASM**モデルを用いた
計算結果も見てみる。
- 全てのケースで、**片舷二重模型流れ**
- 総セル数(構造格子)は約**1.4M**。

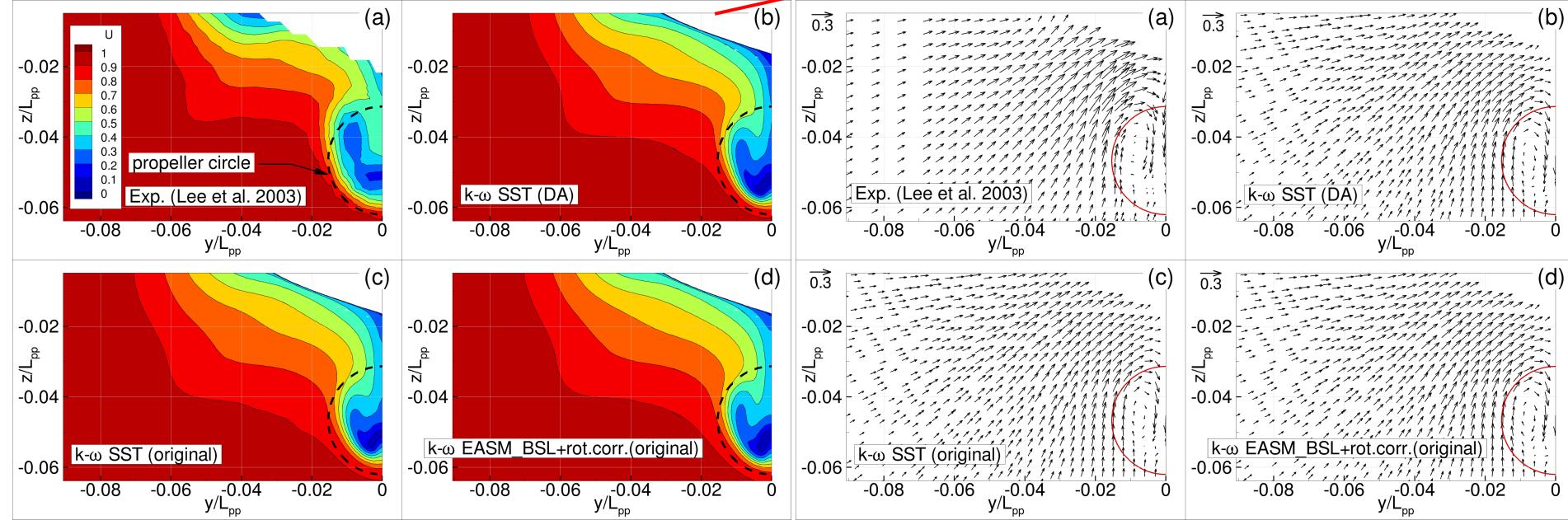
C_B	Ship name	Rn	Device	Validation data for the present study	Reference
0.8098	KVLCC2	4.6E+06	Hot wire anemometry	u, v, w, k, RS^*	Lee et al. (2003)
0.8580	JBC	7.46E+06	PIV	u, v, w	CFDWS2015
0.8713	82BC	8.26E+06	5-hole pitot tube	u, v, w	In-house Exp.
0.7953	33CT	7.45E+06	5-hole pitot tube	u, v, w	In-house Exp.

* Reynolds stress (five components except $\overline{v'w'}$)

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ KVLCC2: プロペラ面内流速分布

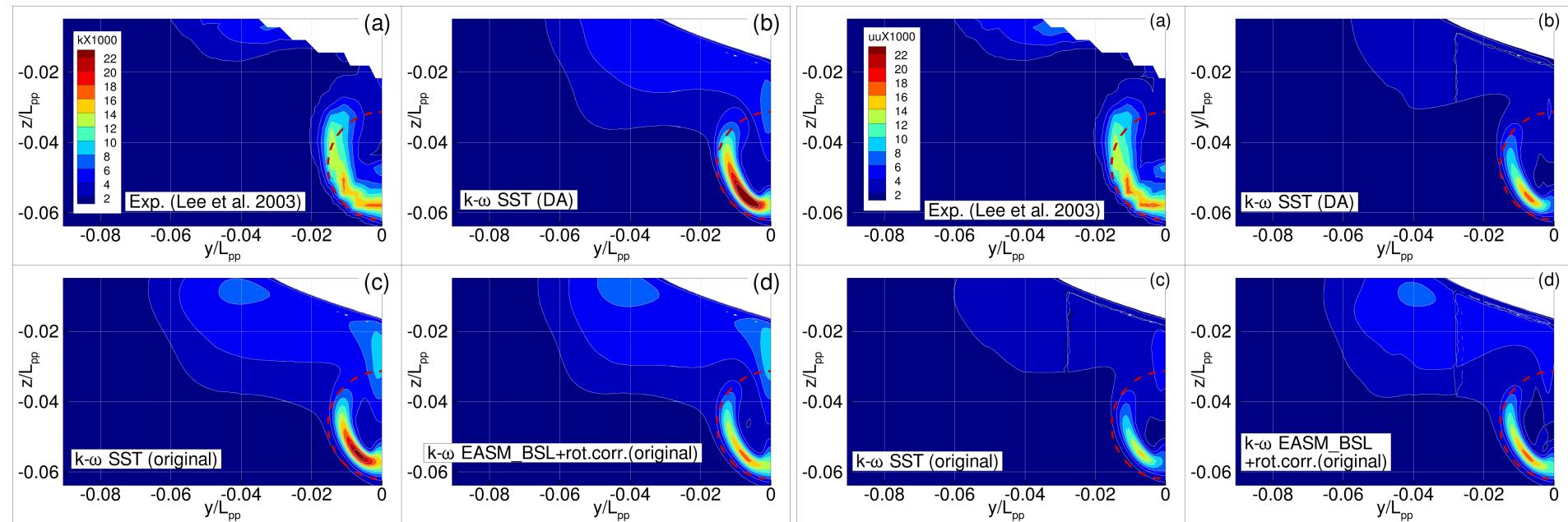
全抵抗係数の差は、
k- ω SST (original)に
比べ+0.2%。



- “ $\beta_1=0.16$ ”は、 originalに比べ、 u のhook shape再現性を改善。
- 限界流線を見る限り、どの乱流モデルでも剥離はSS.0.5~SS.1の間で生じている。(目立った違いはない)
→ “ $\beta_1=0.16$ ”は、 剥離した後の流れに効いている。

5. 3次元船体周り流れへの適用

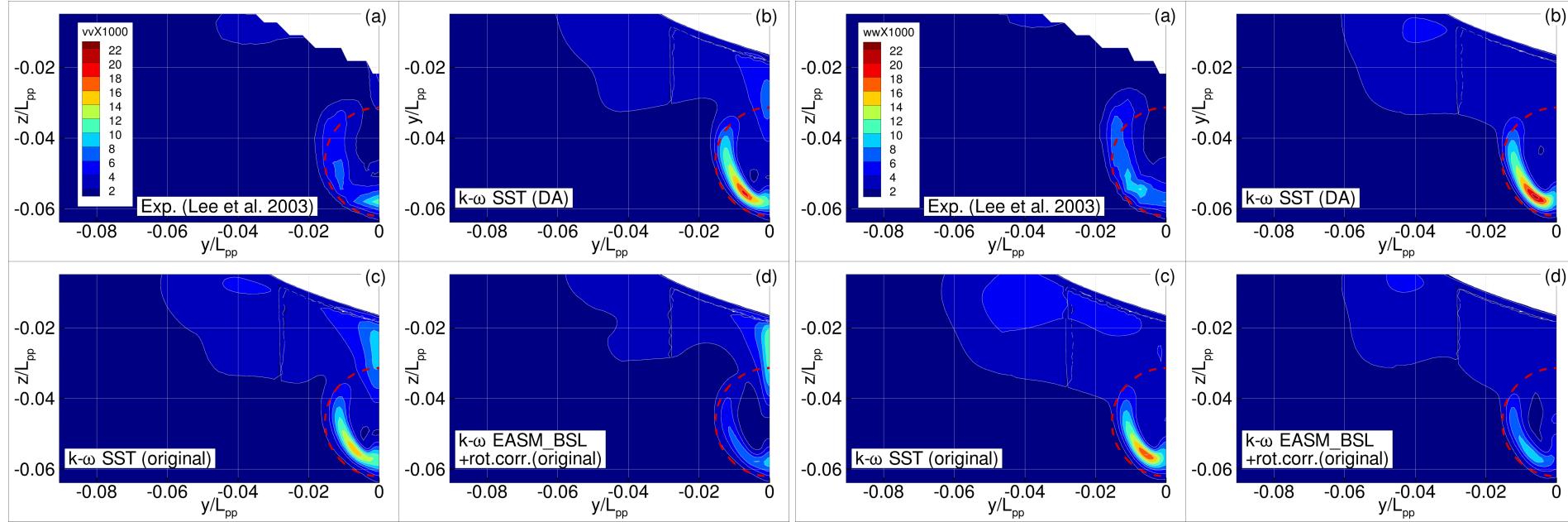
■ KVLCC2: プロペラ面TKE, $u'u'$ 分布



- “ $\beta_1=0.16$ ”は、originalおよびEASMに比べ、TKE分布を改善。
- TKE最大値は、計測値/EASMに比べ1.4倍大きい。
→実はoriginalも、TKE最大値は計測値/EASMに比べ1.2倍大きい。
- これは、 $v'v'$, $w'w'$ が過大評価されているため。しかしこれらの過大評価は、TKE分布の改善にも繋がってはいる...(次スライド)

5. 3次元船体周り流れへの適用

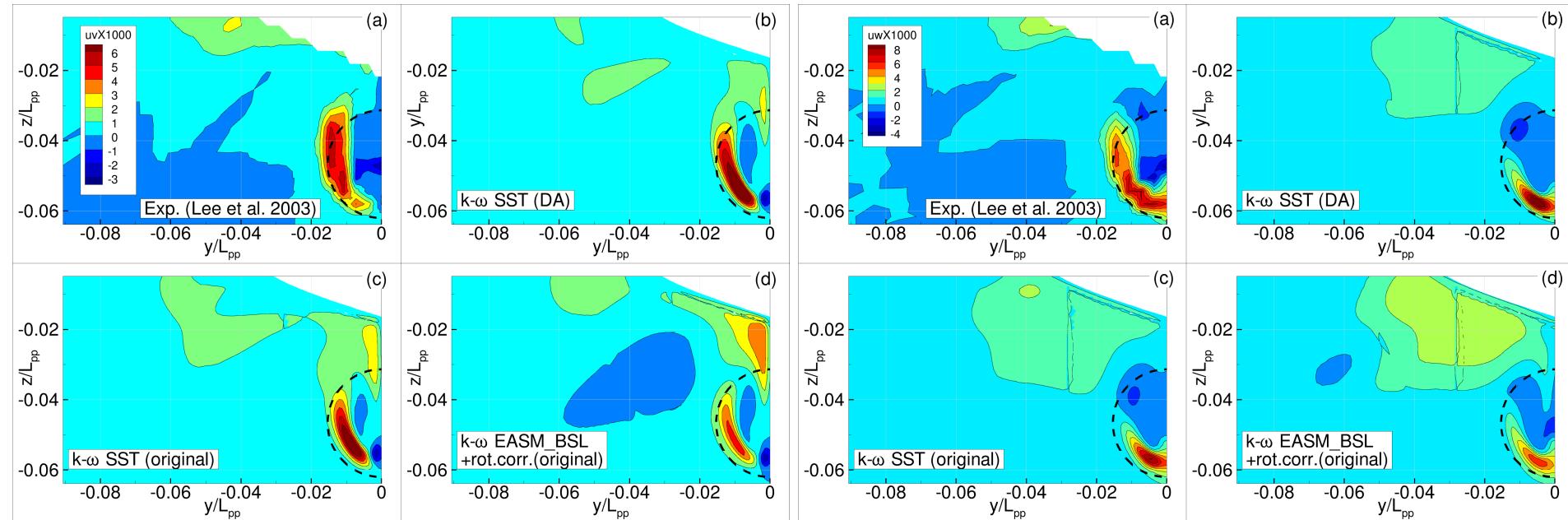
■ KVLCC2: プロペラ面レイノルズ応力($v'v'$, $w'w'$)分布



- original, “ $\beta_1=0.16$ ”は、EASMに比べ、 $v'v'$, $w'w'$ を大きめに推定。
→これが、original, “ $\beta_1=0.16$ ”がTKEを計測値に比べ大きめに推定する理由。
→ $\beta_1=0.16$ が、RS normal componentsに特段悪影響を与えていているわけではない。

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ KVLCC2: プロペラ面レイノルズ応力($u'v'$, $u'w'$)分布

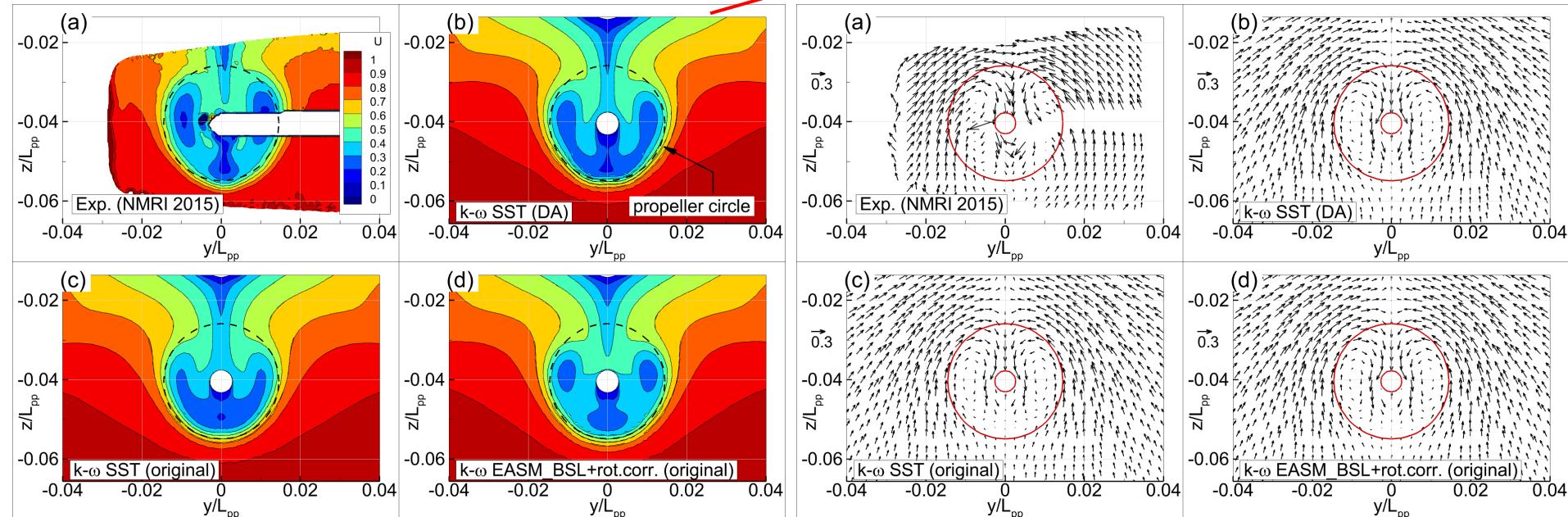


- “ $\beta_1=0.16$ ”は、EASMに比べ、 $u'v'$, $u'w'$ を計測値に近く推定。(分布、最大値)
- 少なくともKVLCC2については、乱流の非等方性影響は、RSの交差成分に対しては小さい。

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ JBC: プロペラ面内流速分布

全抵抗係数の差は、
k- ω SST (original)に
比べ+0.7%。

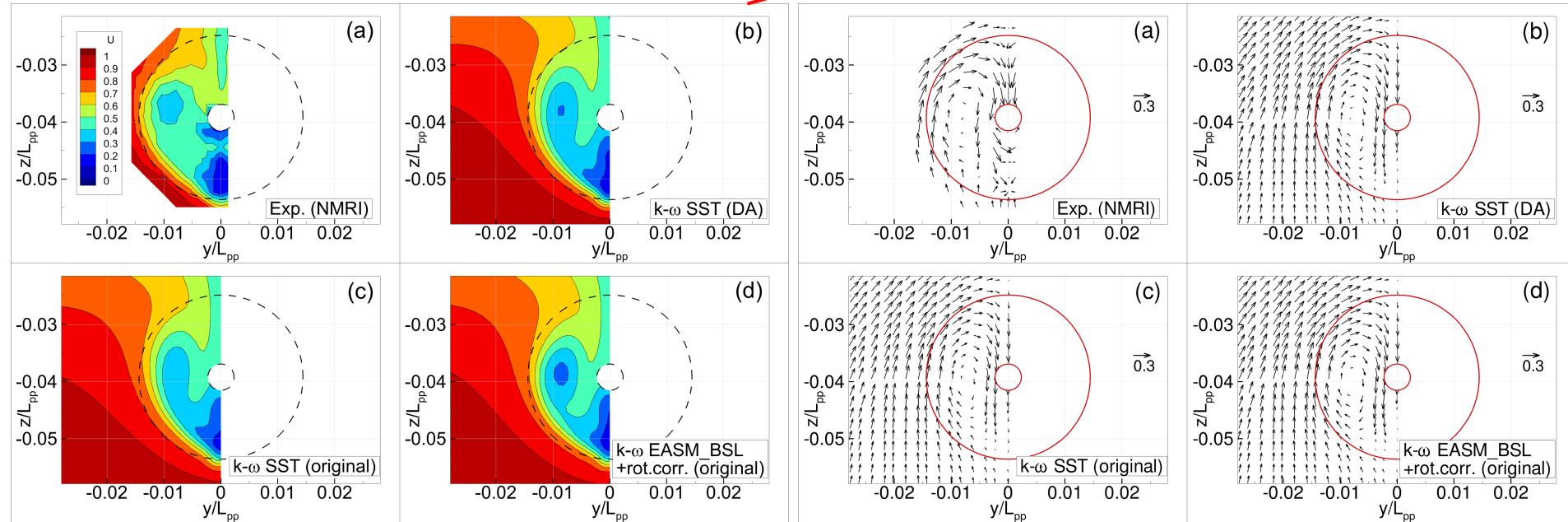


- “ $\beta_1=0.16$ ”は、 original/EASMに比べ、 u のhook shape再現性を改善。
- KVLCC2同様、限界流線を見る限りどの乱流モデルでも剥離は SS.0.5~SS.1の間で生じている。(目立った違いはない)
→やはり“ $\beta_1=0.16$ ”は、 剥離した後の流れに効いている。

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ 82BC: プロペラ面内流速分布

全抵抗係数の差は、
k- ω SST (original)に
比べ-0.4%。

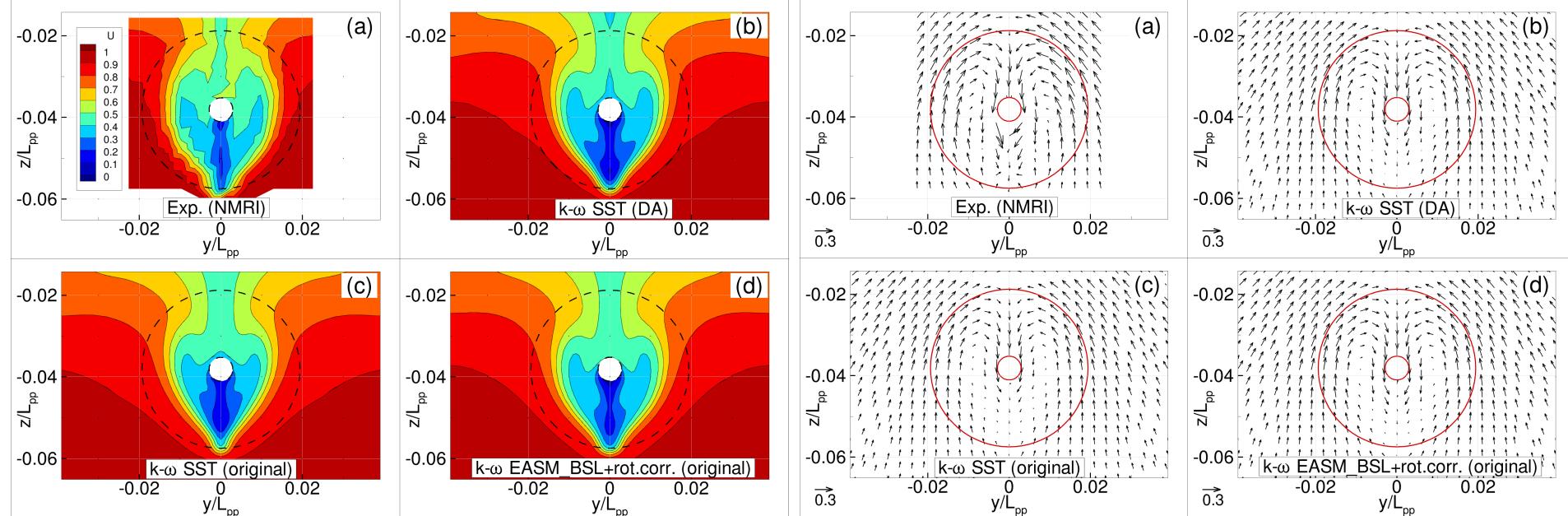


- “ $\beta_1=0.16$ ”のみならず、original/EASMは、 u の低速域を過大評価(=遅い領域を広めに推定する傾向)。

5. 3次元船体周り流れへの適用

■ 33CT: プロペラ面内流速分布

全抵抗係数の差は、
k- ω SST (original)に
比べ+0.8%。



- 33CTは、他3隻に比べビルジ渦が小さめ。
- “ $\beta_1=0.16$ ”は、originalに比べ、 u の低速域を若干計測結果に近く推定(EASMとほぼ同等)。
- “ $\beta_1=0.16$ ”は、流れの剥離を数値的に促進したりはしない。(痩せ型船にも悪影響は及ぼさないだろう。但し要検証。)

6. まとめ

- 2次元NACA4412(迎角13.87deg、後縁に剥離有り)における、
 $k-\omega$ SSTモデルのパラメター $a_1, \beta_1, \beta_2, \sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2}$ 推定を行うデータ同化問題を設定。
- データ同化に用いる計測値に、実計測値(流速U,V)を採用。
- EnKFと”NAGISA”を統合したデータ同化システムを、実計測値を用いたデータ同化問題に適用。
- U,U&Vを用いた際、データ同化成功。
- データ同化の結果から、 $\beta_1 = 0.16$ を3次元船体計算に使用。
→要目の異なる4隻の肥大船の船尾流場(主流速分布等)を、
original $k-\omega$ SSTに比べ精度よく再現。全抵抗係数の変化も
0.7%以内。EASM modelと比べても、遜色のない結果。
→3次元船体(肥大船)計算に適した $k-\omega$ SSTモデル
パラメター β_1 が、データ同化を援用して推定できた。
→パラメター選択が2D→3Dで恣意的。もっとstochasticに
出来ると良い。(人の手が入らないように)

Appendix: Bradshaw定数

■ Harsha and Lee (1970, AIAA J. Vol. 8. No. 8, pp. 1508-1510)

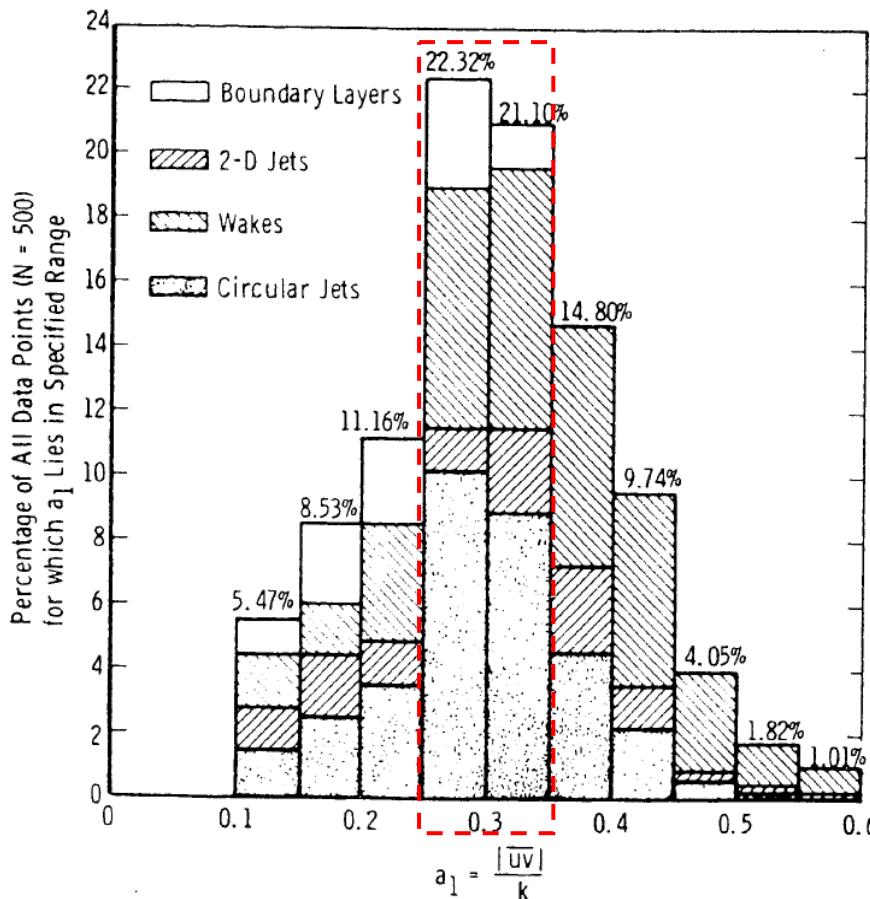
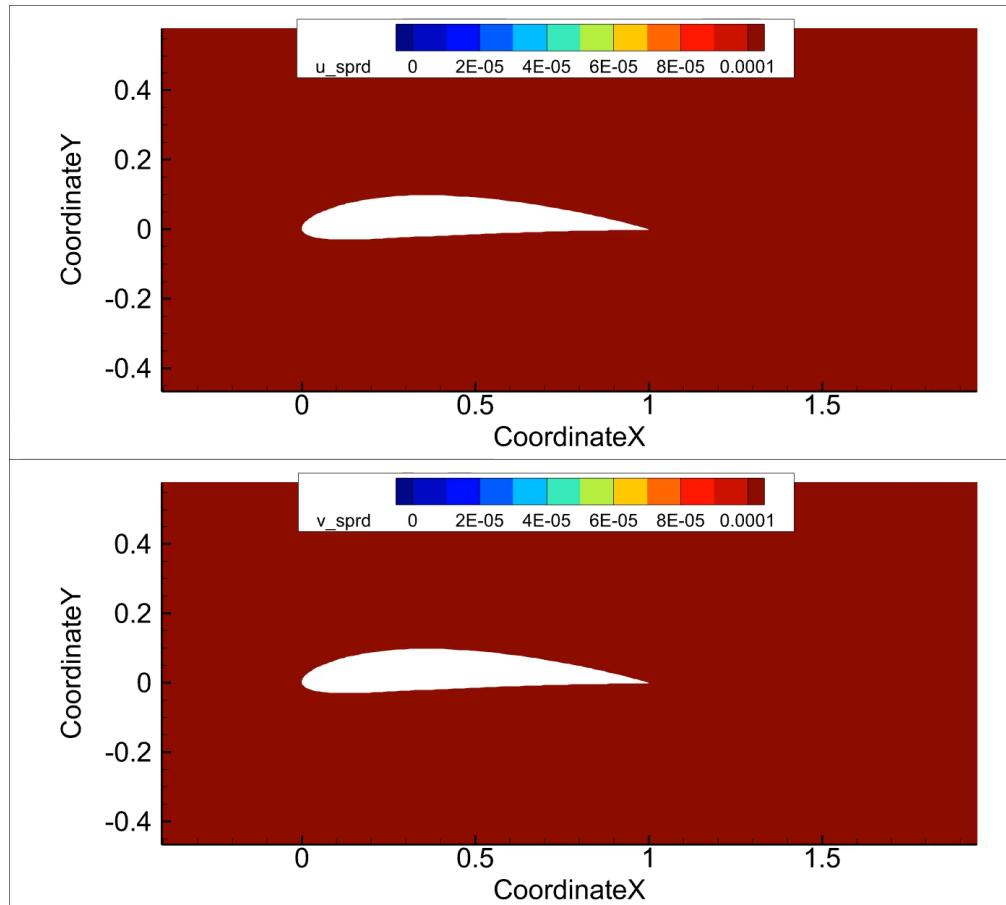


Fig. 3 Distribution of the observed values of the parameter a_1 for the data surveyed.

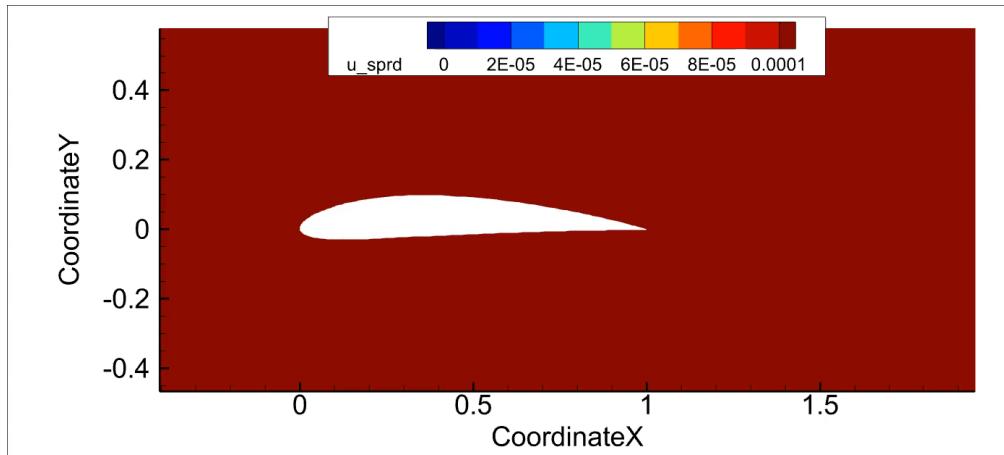
Appendix: Ensemble spread of u&v

■ DA result with U&V

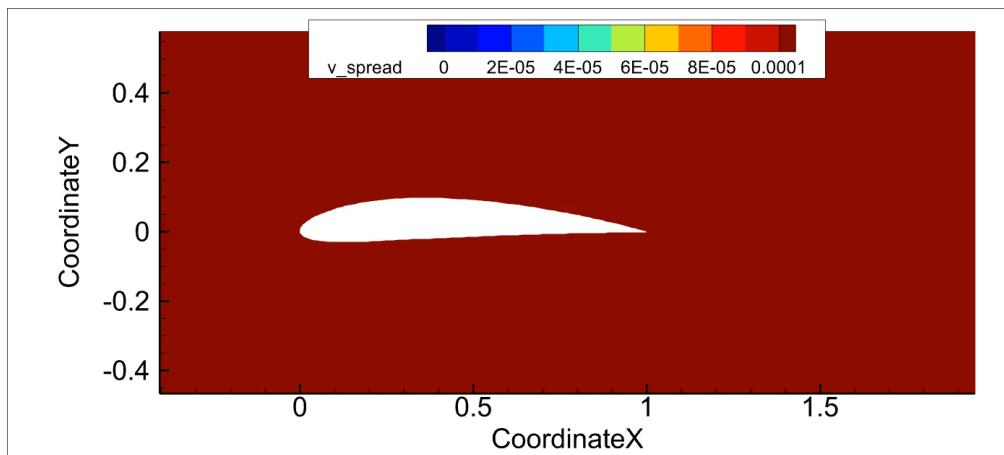


Appendix: Ensemble spread of u&v

■ DA result with U

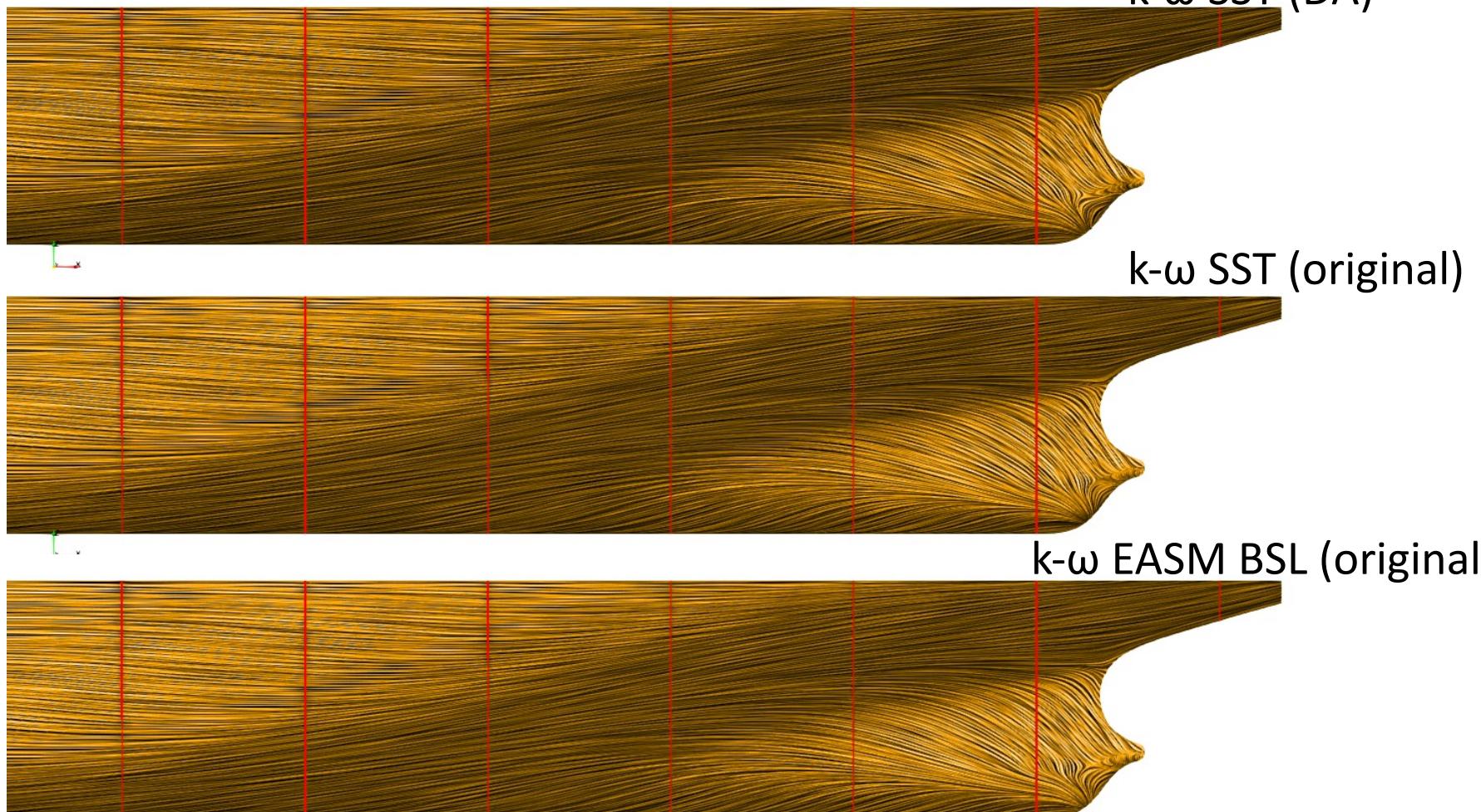


■ DA result with V



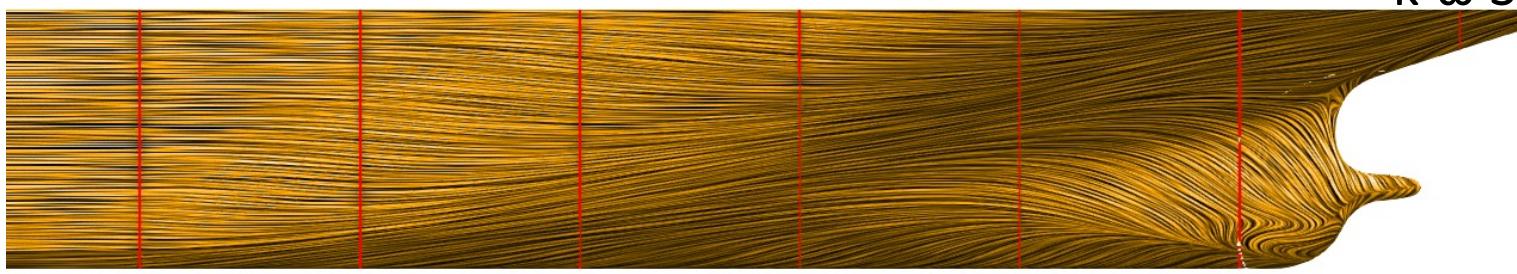
Appendix: 限界流線

■ KVLCC2(タンカー)



Appendix: 限界流線

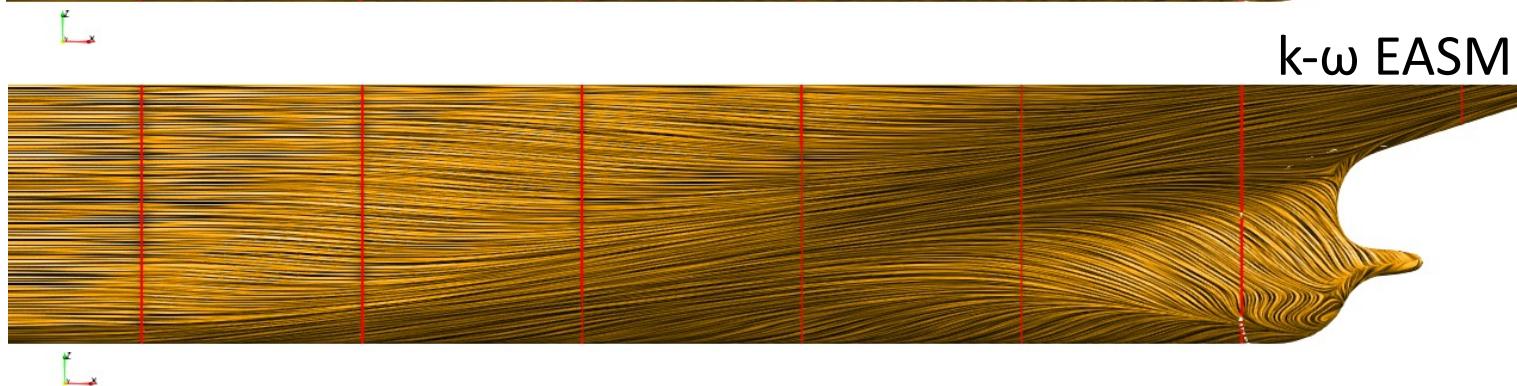
■ JBC(バルクキャリア)



k- ω SST (DA)



k- ω SST (original)



k- ω EASM BSL (original)