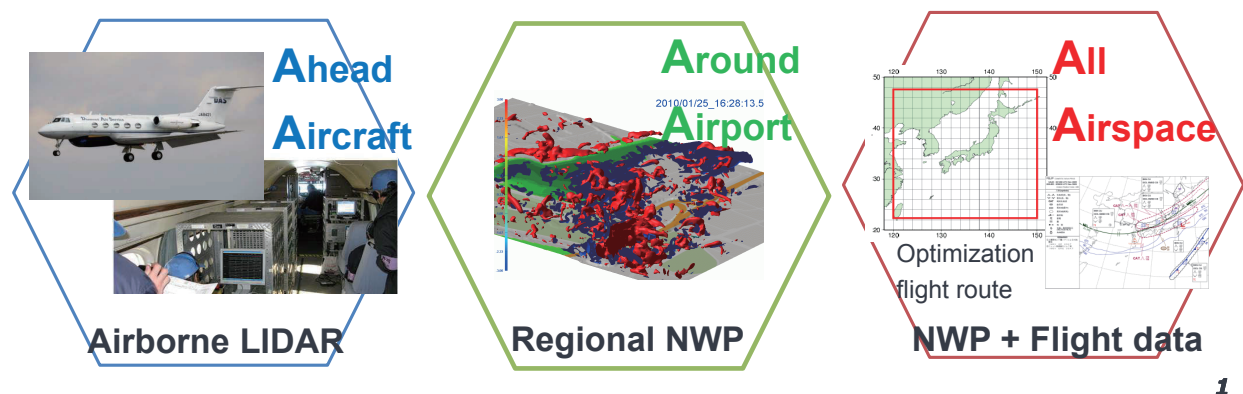




東北大学 流体科学研究所
Institute of Fluid Science, Tohoku University

縮約モデルとデータ同化による リアルタイム非定常流予測技術

○菊地亮太, 三坂孝志, 大林茂
(東北大学 流体科学研究所)



Outline

- ➔ 研究背景
- ➔ 研究手法
 - (1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化
- ➔ リアルタイム非定常流予測の適用
 - 適用事例(1):円柱後流のカルマン渦
 - 適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱
- ➔ まとめ



➔ 研究背景

➔ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

➔ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

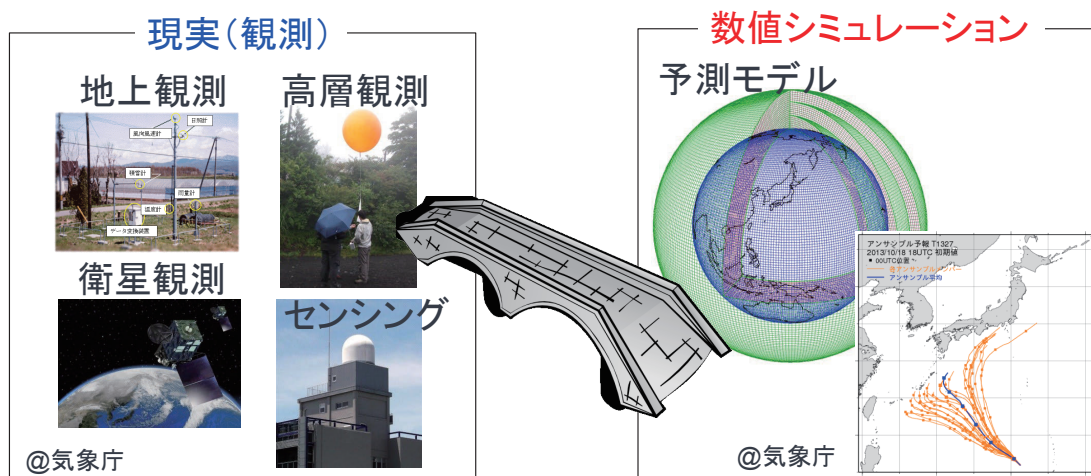
➔ まとめ

3

IFS 研究背景 データ同化のコンセプト

データ同化:現実と数値シミュレーションの間をつなぐ役割

例)気象予報の場合



- ・気象予報を行うための最適な初期値・境界条件の推定
- ・予測モデル内の未知パラメーター推定 etc

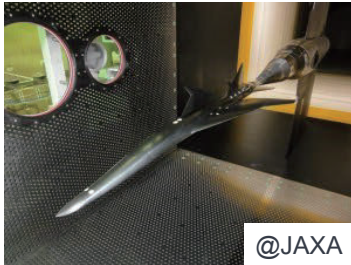
データ同化は気象予報にとって必要不可欠

4

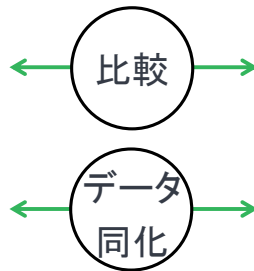


研究背景 EFDとCFD

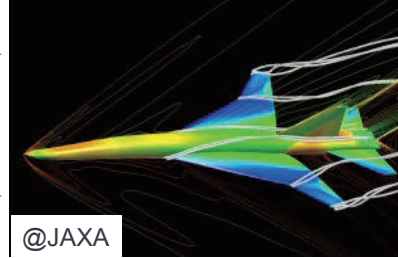
EFD(実験)



@JAXA



CFD(数値計算)



@JAXA

EFDとCFDから、より「確からしい」結果が手に入る



- ・EFDとCFDの違いを考察したい
- ・CFDの未知パラメーターを推定したい
- ・EFDに含まれる不確実性を推定したい

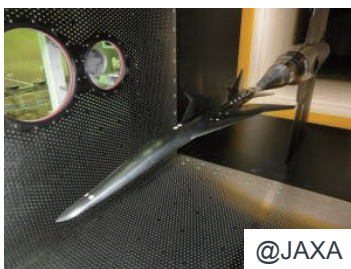
データ同化によって以上の目的を満たすことが出来る！
後日に設計や研究に反映できる！

5

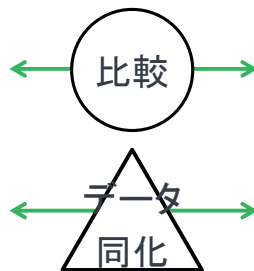


研究背景 EFDとCFD

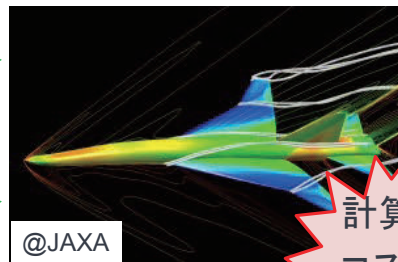
EFD(実験)



@JAXA



CFD(数値計算)



@JAXA

計算
コスト

EFDとCFDから、より「確からしい」結果が手に入る

実験中に...



- ・現象がどうなるか、すぐに**予測**したい！
- ・現象に合わせて、効率的に**制御**したい！
- ・現象に応じて、**意思決定**をしたい！

・計算コストが高いため、EFDの取得間隔と比べて、
実時間(リアルタイム)に計算する事は通常のCFDでは困難

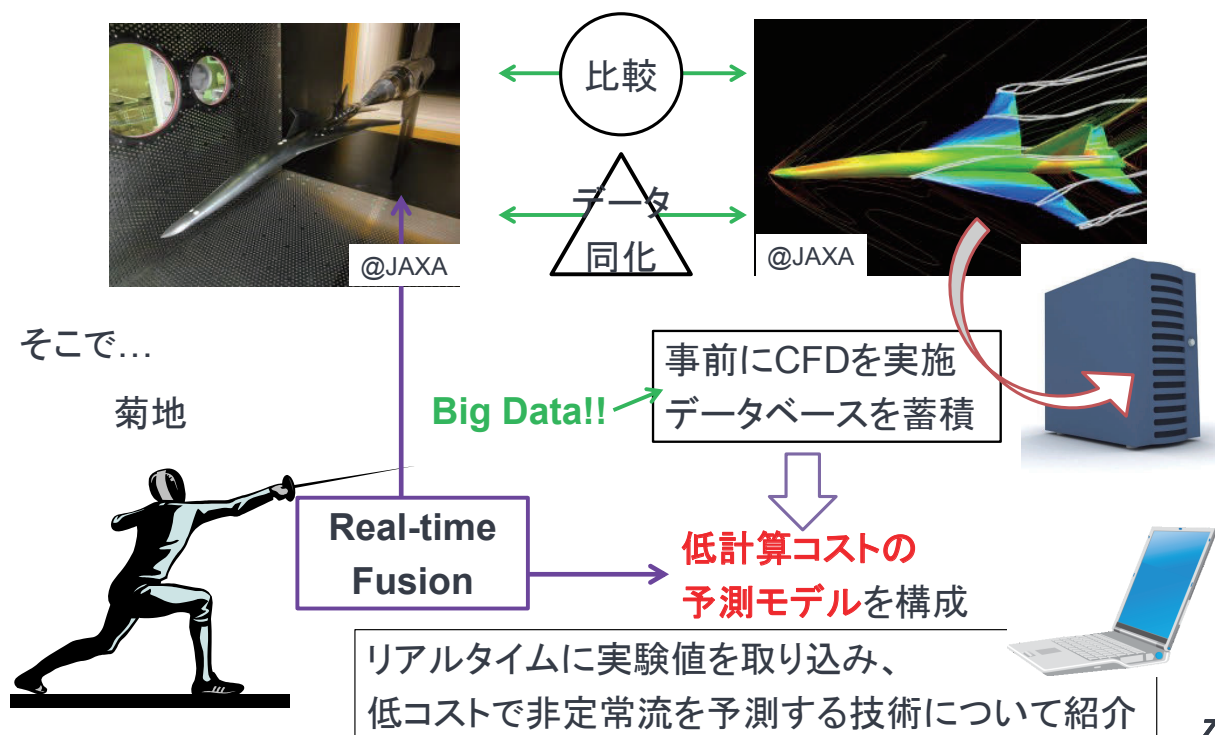
6



研究背景 EFDとCFD

EFD(実験)

CFD(数値計算)



7



Outline

➔ 研究背景

➔ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

➔ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

➔ まとめ

8



研究手法 システムフローチャート

(1) 事前に非定常流の計算を実施

- ・対象とする流れ場のデータベースを生成する

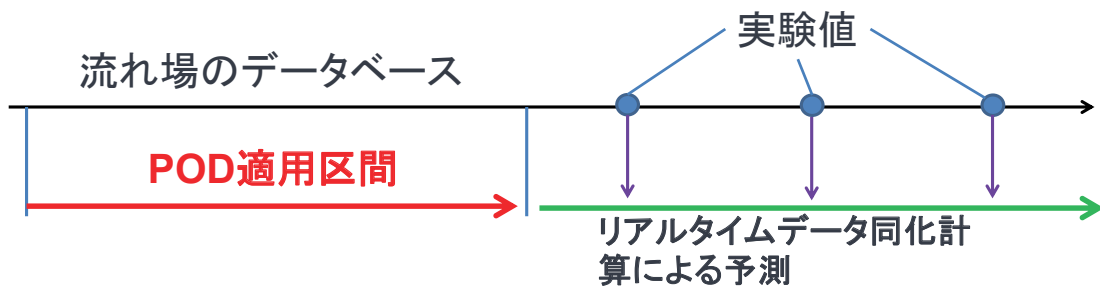
(2) 固有直交分解(POD)による特徴抽出

- ・流れ場の特徴を表現するPOD基底ベクトル取得

(3) 縮約モデルの構築

- ・POD基底ベクトルを用いて、計算コストの低い予測モデルを構築

(4) リアルタイムデータ同化計算



9



研究手法 固有直交分解(POD) Proper Orthogonal Decomposition

多次元データから低次元データを抽出する手法

→複雑な流れ場から特徴的な構造をエネルギーごとに抽出することができる

(1) 時間発展

$$X = \begin{pmatrix} u_1^1 & \cdots & u_1^t \\ \vdots & & \vdots \\ u_n^1 & \cdots & u_n^t \end{pmatrix}$$

格子点情報

(2) 固有値問題

$$X^T X u_k = \lambda_k u_k$$

(3) POD基底ベクトル

$$\varphi_k = \frac{X u_k}{\sqrt{\lambda_k}}$$

行列の固有値問題を解くことで、現象の特徴構造の抽出を行うことができる

10



研究手法 縮約モデル(ROM)

Reduced Order Model

非圧縮性ナビエーストークス方程式を、POD基底ベクトルに射影することで、縮約モデルを構築する

ナビエ
ストークス
方程式

$$\left\langle \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u}, \Phi_i \right\rangle = 0.$$

a_i の時間発展を表す常微分方程式に帰着

$$\frac{da_i}{dt} = A_i + \sum_{j=1}^r B_{ij} a_j + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r C_{ijk} a_j a_k,$$

流れ場

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{U}} + \sum_{i=1}^r a_i \Phi_i$$

$$A_i = -\langle \Phi_i, (\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{U}} \rangle + \frac{\mu}{\rho} \langle \Phi_i, \nabla^2 \bar{\mathbf{U}} \rangle,$$

$$B_{ij} = -\langle \Phi_i, (\Phi_j \cdot \nabla) \bar{\mathbf{U}} \rangle - \langle \Phi_i, (\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla) \Phi_j \rangle + \frac{\mu}{\rho} \langle \Phi_i, \nabla^2 \Phi_j \rangle,$$

$$C_{ijk} = -\langle \Phi_i, \Phi_j \cdot \nabla \Phi_k \rangle,$$

$\bar{\mathbf{U}}$: データベースの平均

a_i : Temporal coefficient

Φ_i : POD基底ベクトル

→ A_i, B_{ij}, C_{ijk} は事前に計算可能

11



研究手法 縮約モデル(ROM)

Reduced Order Model

非圧縮性ナビエーストークス方程式を、POD基底ベクトルに射影することで、縮約モデルを構築する

ナビエ
ストークス
方程式

$$\left\langle \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u}, \Phi_i \right\rangle = 0.$$

a_i の時間発展を表す常微分方程式に帰着

$$\frac{da_i}{dt} = A_i + \sum_{j=1}^r B_{ij} a_j + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r C_{ijk} a_j a_k,$$

流れ場

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{U}} + \sum_{i=1}^r a_i \Phi_i$$

計算量

CFD: 格子点の数 >> ROM: POD基底ベクトルの数

縮約モデルは計算コストを大きく削減できる

12



研究手法 縮約モデル(ROM)の課題

縮約モデルの課題

- (1) 時間発展的に計算が不安定
- (2) 時間積分を進めると計算精度が著しく低下

実用的な予測ツールとしては、大きな問題

例えば...

$$\text{圧力に関する項} \quad \langle \Phi_i, \nabla p \rangle = - \underbrace{\int_V p \nabla \cdot \Phi_i dV}_{(1) = 0} + \underbrace{\int_S p \Phi_i \cdot \hat{n} dS}_{(2) \sim 0}$$

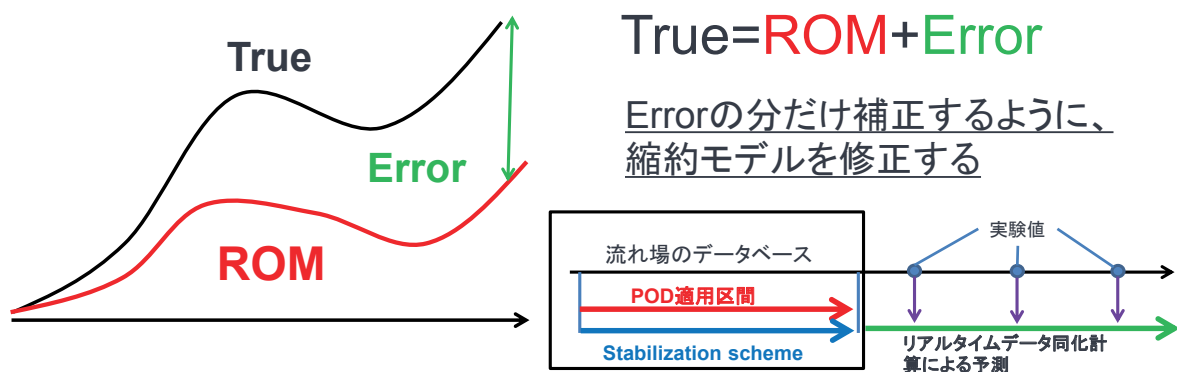
- (1) はそれぞれのPOD基底ベクトルはDivergence-freeなので消える
 - (2) は境界条件に関わる項であり、消せない可能性がある
- しかしながら、定式化の簡単のために、ゼロとして取り扱うことが多い

13



研究手法 Stabilization Scheme

ROMを用いて、PODを適用した区間の流れ場を再現した際に生じるErrorを小さくするよう縮約モデルを修正する



ROMの修正

$$\frac{da_i}{dt} = (A_i + \alpha_i) + \sum_{j=1}^r (B_{ij} + \beta_{ij}) a_j + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r C_{ijk} a_j a_k,$$

Stabilization term

14



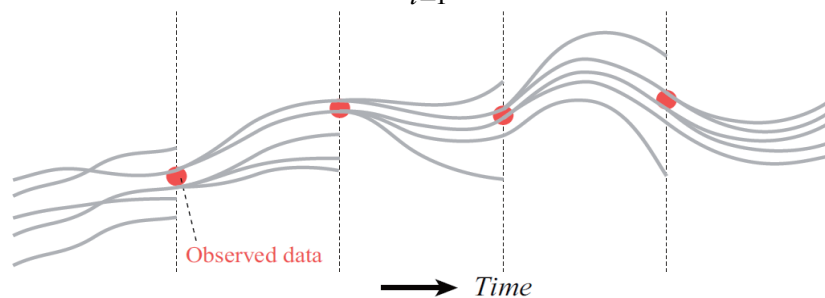
研究手法 データ同化手法:粒子フィルタ(PF)

データ同化を行う理由

- (1)ROMで使用するTemporal coefficient a_i の初期値推定
- (2)ROMに含まれる不安定性を取り除く(境界条件に関連する誤差etc)

粒子フィルタ:確率密度関数を多数の”粒子”によって近似する

$$p(x_t | y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - \underline{x_{t|t-1}^{(i)}})$$



Temporal Coefficientを実験値を用いて推定を行う

15



Outline

➔ 研究背景

➔ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

➔ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

➔ まとめ

16



Outline

→ 研究背景

→ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

→ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

→ まとめ

17



適用事例1 Building Cube Methods(BCM)

- ・Building Cube Methods(BCM) (Nakahashi,2003)を用いる
- ・3次元非圧縮性ナビエストークス方程式
- ・ $Re=1000$ における円柱後流のカルマン渦を計算する

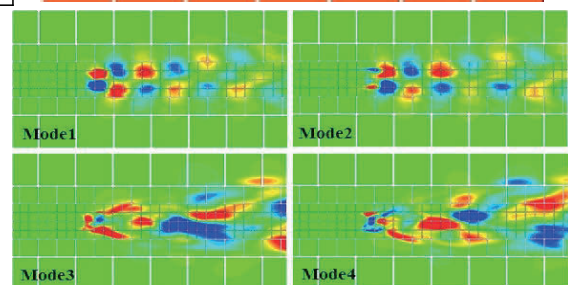
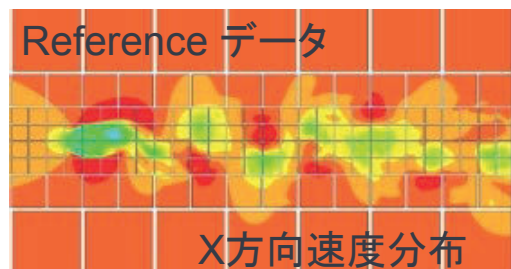
計算スキーム

対流項評価	3次精度河村・桑原スキーム
粘性項評価	2次精度中心差分
時間積分	4次精度ルンゲクッタ法
物体境界	Immersed boundary法

流れ場中から、
特徴的な構造を抽出



縮約モデルを構築



POD基底ベクトル

18



適用事例1 Building Cube Methods (BCM)

- ・Building Cube Methods (BCM) (Nakahashi, 2003) を用いる
- ・3次元非圧縮性ナビエ-ストークス方程式
- ・ $Re=1000$ における円柱周りのカルマン渦を計算する

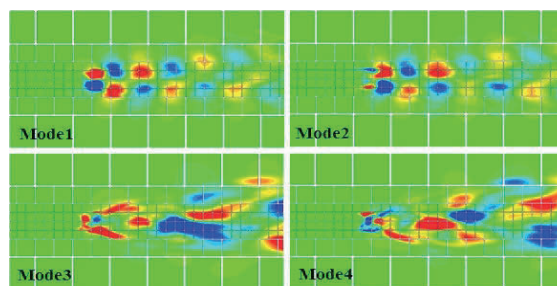
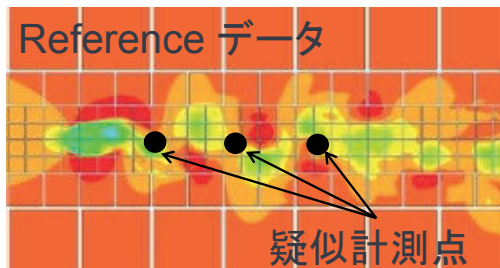
計算スキーム

対流項評価	3次精度河村・桑原スキーム
粘性項評価	2次精度中心差分
時間積分	4次精度ルンゲクッタ法
物体境界	Immersed boundary法

別の時刻の流れ場から
疑似的な計測値を生成



数値実験(双子実験)を実施

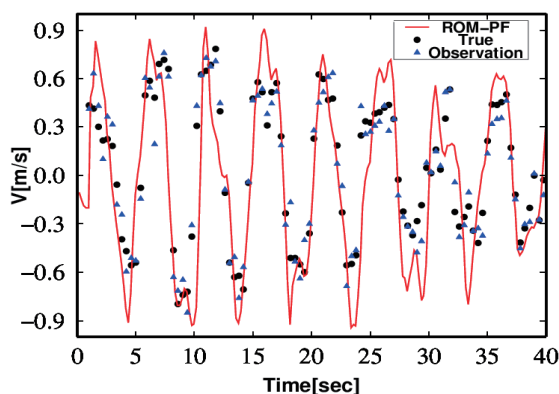
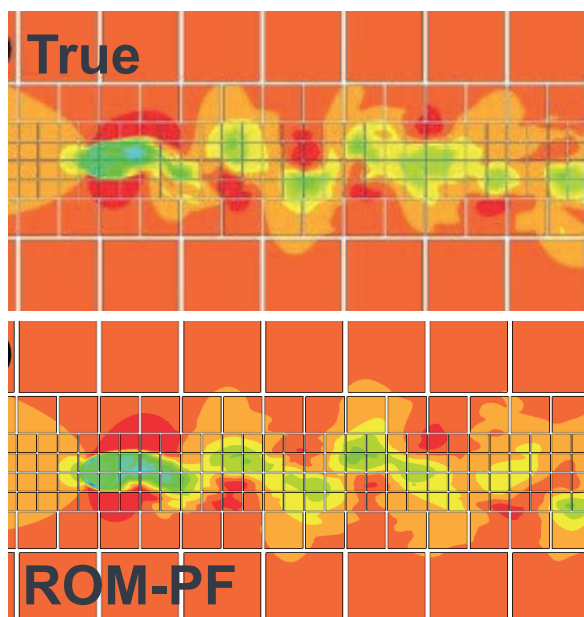


19



適用事例1 カルマン渦を対象としたリアルタイム同化計算

予測性能の評価(同化間隔:0.4sec/基底ベクトル30個/粒子数1000個)



風速の時間発展

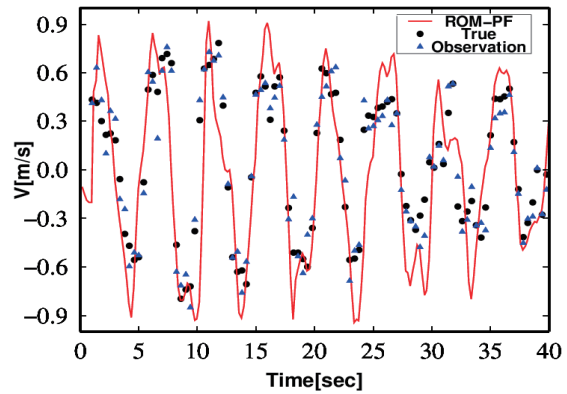
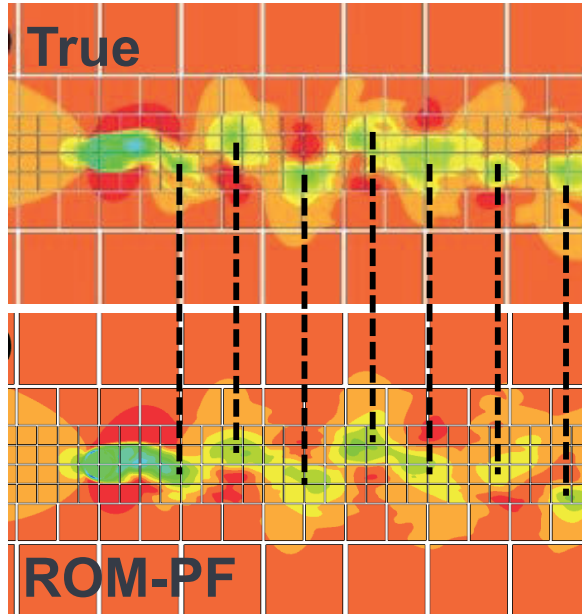
カルマン渦の空間的
特徴の再現が可能

20



適用事例1 カルマン渦を対象としたリアルタイム同化計算

予測性能の評価(同化間隔:0.4sec/基底ベクトル30個/粒子数1000個)



風速の時間発展

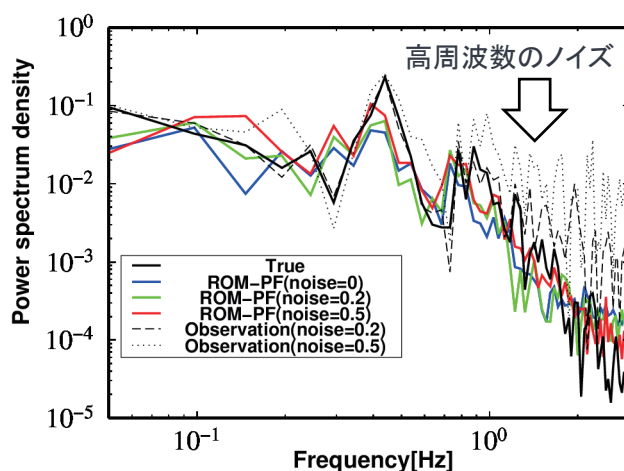
カルマン渦の空間的
特徴の再現が可能

21



適用事例1 カルマン渦を対象としたリアルタイム同化計算

水平風速のスペクトル解析結果



実験値=真値+誤差(ノイズ)

高周波数のスペクトルが過剰評価



データ同化することで、
高周波数のノイズを
フィルタリングできることを確認

BCM

- OpenMPによって32CPUの並列化演算を実施
- 40秒間の流れ場計算に約4時間

データ同化計算

- OpenMPによって4CPUの並列化演算を実施
- 40秒間の流れ場計算に約20秒

CPU時間を約0.02%に削減し、リアルタイム計算が可能なことを確認

22



Outline

➔ 研究背景

➔ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

➔ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

➔ まとめ

23



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱

低層風擾乱

- ・地上付近で発生する乱気流現象
- ・小規模な気象現象

丘などの地形



空港内のビルなどの人工構造物



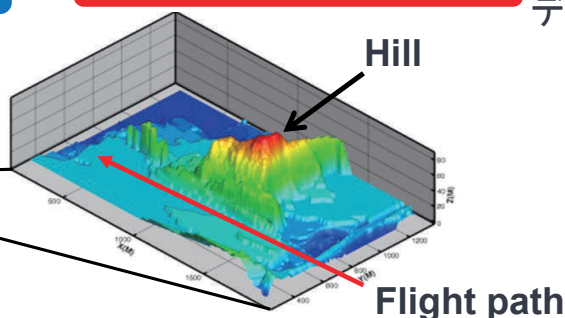
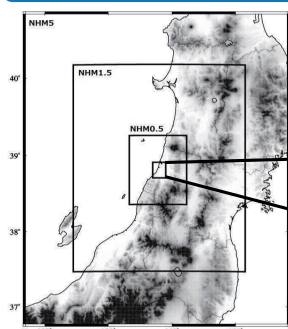
丘風下に低層風擾乱が発生

気象予測モデル

+

Large eddy simulation

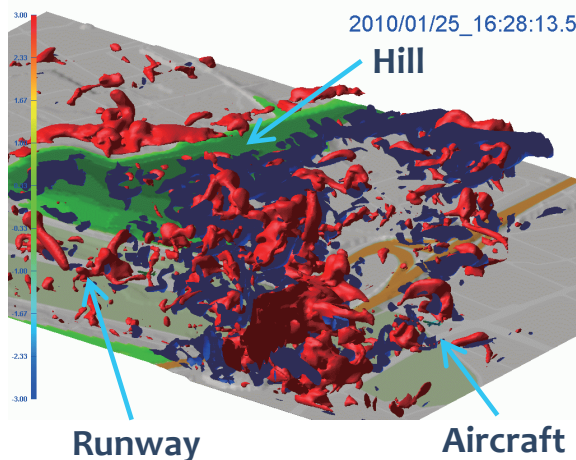
事前解析を実施し、データベース蓄積



24



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱



Red iso-surface:3.0m/s Blue iso-surface:-3.0m/s (鉛直風速)

- ・滑走路北側にある丘で発生した小規模乱気流の発生を解析可能
- ・航空機経路に影響を及ぼしていることを確認

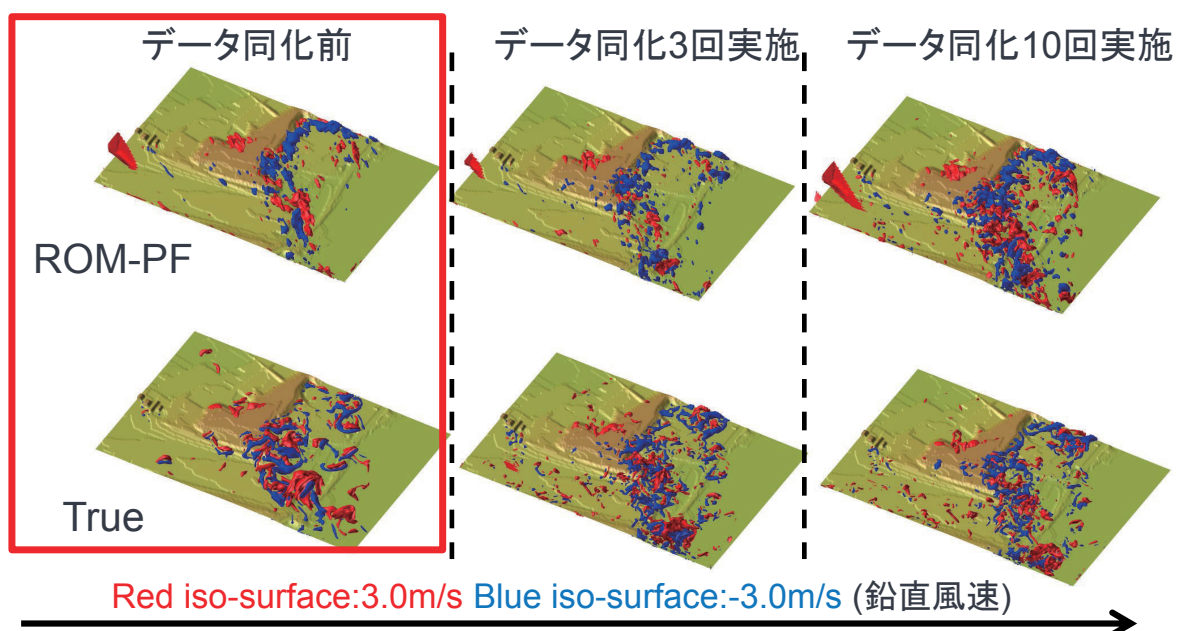
2) 空港周辺で発生する低層風擾乱の気象モデルとLESによる融合解析, 菊地亮太, 三坂孝志, 大林茂, 牛尾知雄, 嶋村重治, 又吉直樹, 日本航空宇宙学会論文集, 61(6), 2013.

3) Real-Time Prediction of Low-Level Atmospheric Turbulence, Ryota Kikuchi, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech 2015, January 2015.

25



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱



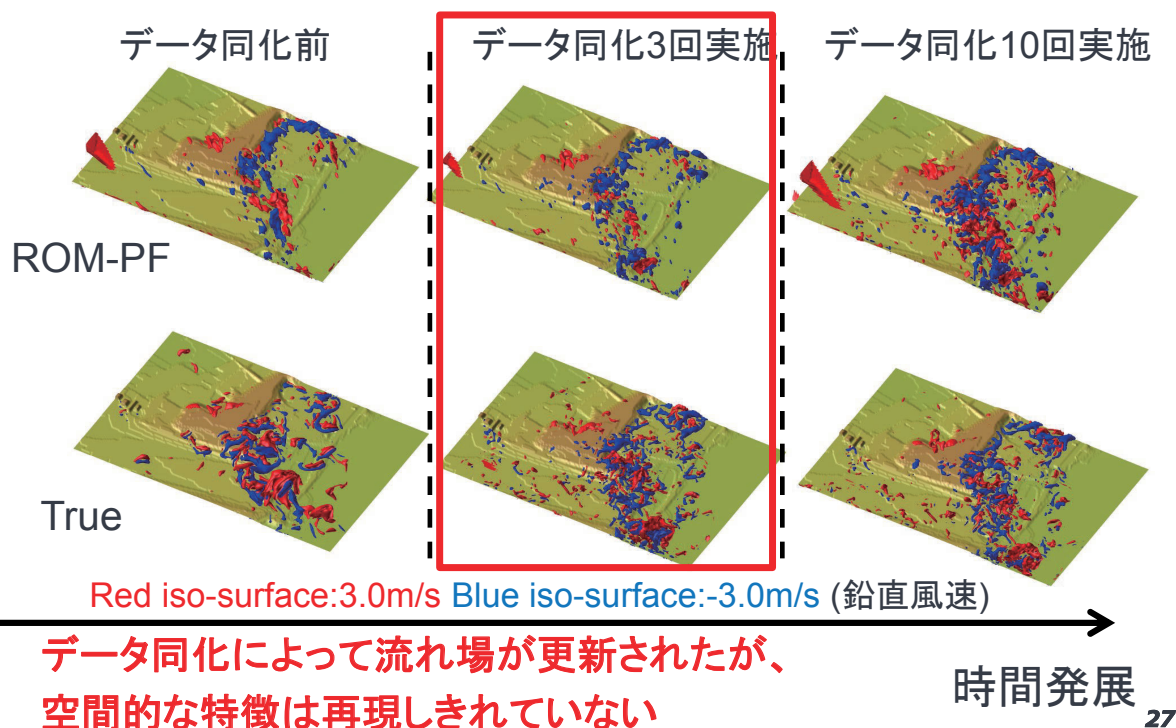
空間的な特徴は完全に再現されていない

時間発展

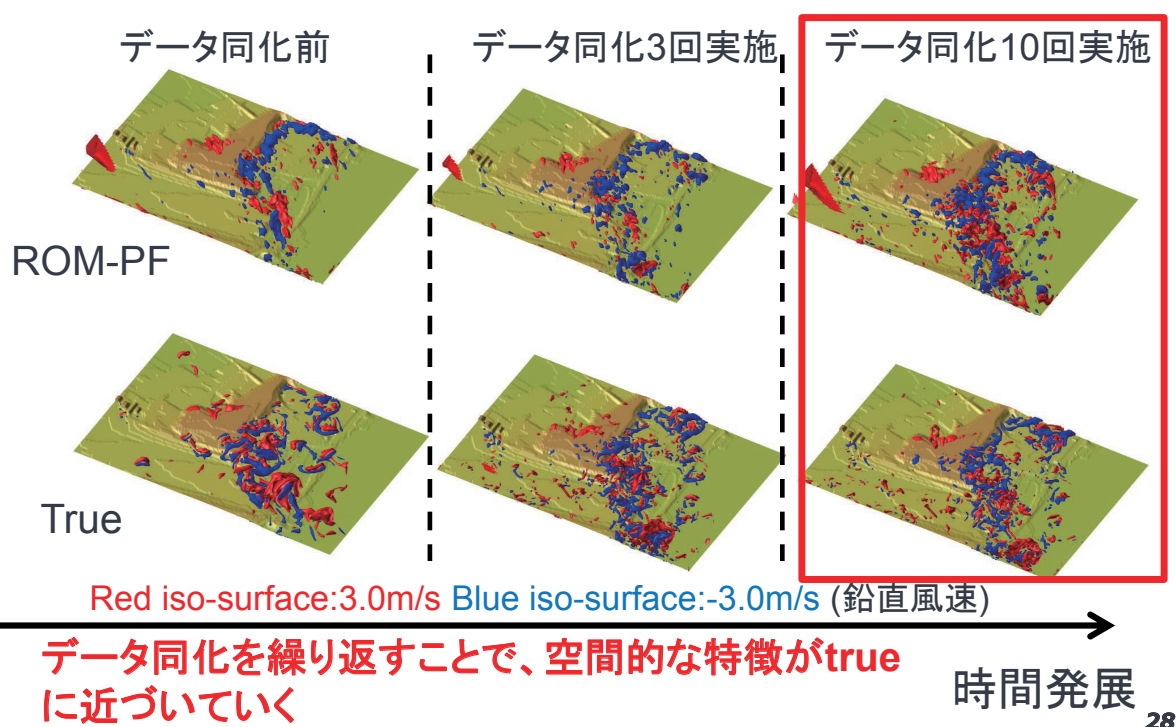
26



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱



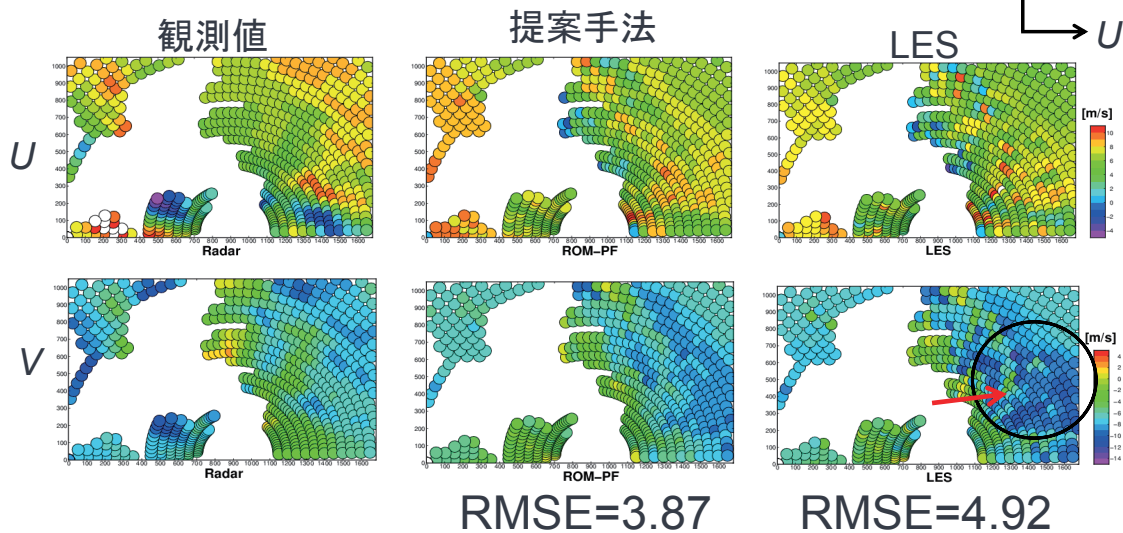
適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱





適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱

実際に観測された水平風速のスキャンデータの同化結果の比較
(Scan Angle:3deg)



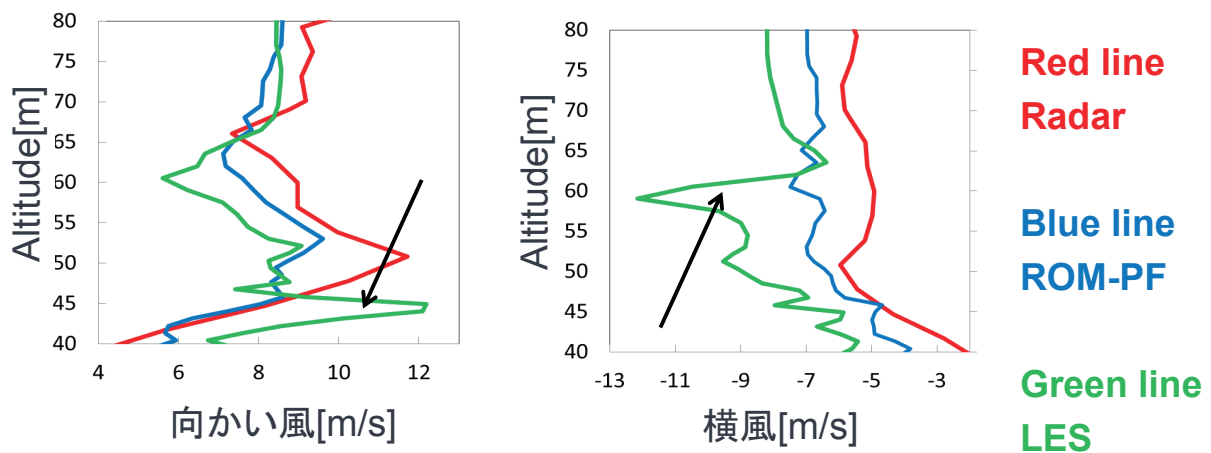
ROM-PFのほうがLESに比べて、RMSEが小さい

29



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱

実際に観測された水平風速のスキャンデータの同化結果の比較
(滑走路への経路上の風速分布の比較)



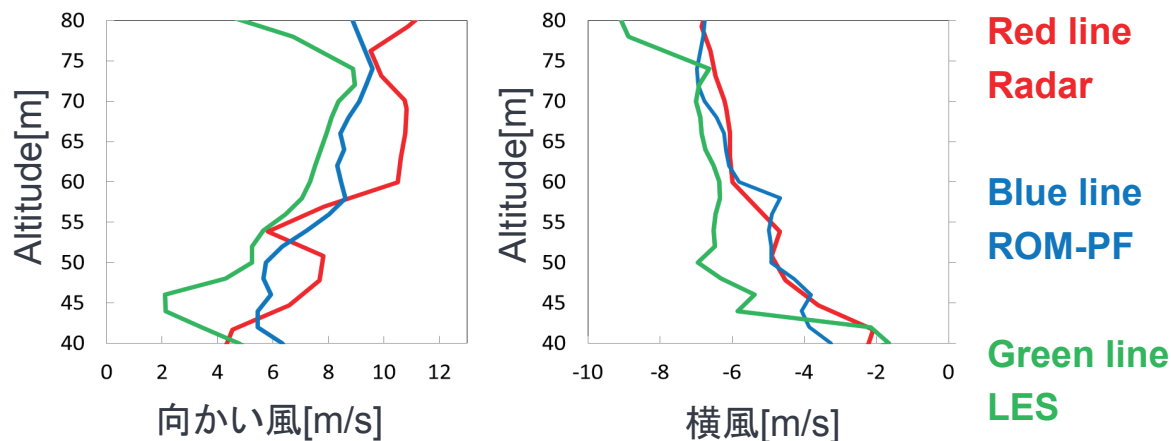
LESには、観測値にはないエラーピークがある
ROM-PFでは、より観測値に近い水平風速を予測できている

30



適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱

実際に観測された水平風速のスカンデータの同化結果の比較
(滑走路への経路上の風速分布の比較)



ROM-PFのほうが経路上の風の変化傾向をとらえることができる

縮約モデルの質(データベースの質)を改善、同化する観測値を増やすことで、さらに予測性能を向上できる可能性あり

31



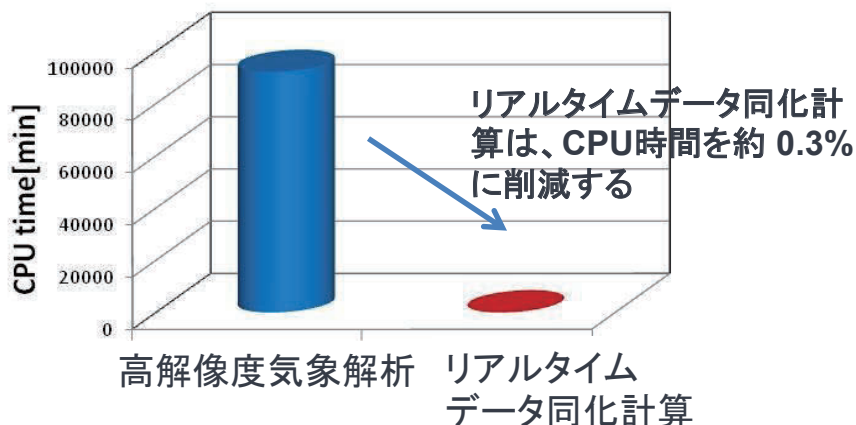
適用事例2 庄内空港で発生した低層風擾乱

高解像度気象解析

- OpenMPを用いて32CPUによる並列化演算を実施
- 10分間の流体計算に約5日

リアルタイムデータ同化計算

- OpenMPを用いて4CPUによる並列化演算を実施
- 10分間の流体計算に約8分



➡ リアルタイムに解析することができることを確認した

32



➔ 研究背景

➔ 研究手法

(1)固有直交分解 (2)縮約モデル (3)データ同化

➔ リアルタイム非定常流予測の適用

適用事例(1):円柱後流のカルマン渦

適用事例(2):庄内空港で発生した低層風擾乱

➔ まとめ

33

まとめ

ROMとDAを組み合わせたリアルタイム非定常流予測システムを構築した

(1)現象の再現性

・カルマン渦・低層風擾乱ともにデータ同化を繰り返すことで再現性が向上

(2)実験値に含まれる誤差のフィルタリング

・実験値に含まれる誤差の影響を抑制した流れ場を得ることが可能

(3)計算コスト

・計算コストを削減し、リアルタイムに実施できることを確認した

