

# 気象観測と CFD を利用した後方乱気流シミュレーション

加藤 博司<sup>1</sup>, 三坂 孝志<sup>2</sup>, 大林 茂<sup>1</sup>, 山田 泉<sup>3</sup>, 奥野 善則<sup>4</sup>

1 東北大学 流体科学研究所, 2 ドイツ航空宇宙センター, 3 電子航法研究所, 4 宇宙航空研究開発機構

## Simulation of Wake Turbulence Using Weather Observation and CFD

Hiroshi Kato, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Izumi Yamada, Yoshinori Okuno

### ABSTRACT

For the wake turbulence simulation, initial and boundary conditions need to be set according to the actual condition. In this paper, the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of wake turbulence was performed by employing weather prediction data as the initial and boundary conditions. The weather prediction data was provided by the Down-Scaling Simulation System which was developed as mesoscale model by Atmospheric Science Laboratory, Tohoku University, and it showed qualitative agreement with actual weather observed at Sendai airport. In this wake turbulence simulation for the case of the horizontal roll convection currents in sea breeze, the initial and boundary condition obtained from the Down-Scaling Simulation System was employed. From the present results, the advection and decay process of wake turbulence affected by the horizontal roll convection currents in sea breeze was observed. And also the comparison to the simulation of wake turbulence with the uniform boundary and initial flow condition, which was set based on the weather observation value (10 minutes average value of wind velocity, direction of the wind) provided by Japan Meteorological Agency was conducted. The comparison confirmed that the more detail behavior of wake turbulence can be obtained with the initial and boundary condition provided by the Down-Scaling Simulation System.

### 1. はじめに

後方乱気流は、飛行中の航空機後方に発生し、後続の航空機にとって非常に危険である。また、後方乱気流は離発着時の航空機後方で最も強くなることが知られており、現在 ICAO によって離発着にはある一定の間隔が定められている。しかし、この離発着制限が空港管制を非効率にしている。また、今後 20 年の間に航空輸送量は約 2.5 倍に増加することが予想されており<sup>1)</sup>、この離発着制限を緩和することが求められる。

効率的な離発着間隔を設定するためには、後方乱気流の挙動を把握することが重要である。後方乱気流に関する詳細な情報を得るためには、数値シミュレーションの利用が有効と考えられる。しかし、初期・境界値が不変かつ一様な理想状態を仮定する従来のシミュレーション技術をもって、実大気環境の影響を強く受ける後方乱気流の挙動を正確に再現するのは困難である。

そこで、筆者らはこれまでに、データ同化手法の一種である 4 次元変分法を応用した計測融合シミュレーションに取り組んできた<sup>2), 3)</sup>。データ同化とは、大気のような時間発展する複雑なシステムの状態を、観測データと数値モデルに基づいて高精度に推定する方法のことであり、気象学の分野で主に発展してきた。この手法を使えば、数値モデルに必要な高精度の初期値を推定できる。この方法により後方乱気流の詳細な構造の解析、挙動の予測を精度良く実施できることが確認されている。

今後、後方乱気流の挙動予測を広範囲に行うためには、計算領域の拡張を考えていかなければならない。しかし、現在用いている手法の計算コストは莫大なものであるため現実的に不可能である。そこで、本研究の今後の方向性の一つとして、気象予報値を利用した後方乱気流の解析が考えられる。現在の気象予報は、データ同化手法を用いて適切な初期・境界値を推定し高精度な予報が可能となっている。また、気象予報値は、日々入手可能なデータとしてシステムが確立されている。この気象予報値を計算領域内の初期・境界値条件として設定してシミュレーションを行うことができれば、現在よりも高効率に後方乱気流の挙動予測を行うことができるはずである。

このシミュレーションシステムの概要を図 1 に示す。航空機の離発着時刻はスケジュール化されており、気象予報値同様に前もって入手することが可能である。つまり、それら離発着時刻において、その時の気象予報値を用いたシミュレーションを実施することができる。そして、そのシミュレーション結果をもとにした離発着間隔の設定を前日まででき、効率的な空港運営を行える可能性がある。

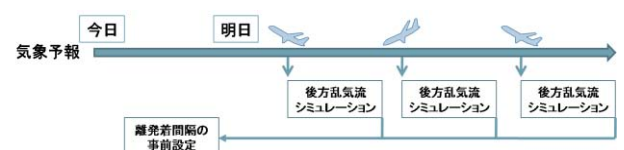


図 1 気象予報を利用した後方乱気流シミュレーション

そこで、本研究では、仙台空港の気象予報値を利用した後方乱気流の挙動解析を目的とする。

2. 解法

2. 1 流れ場の基礎方程式と数値解法

本研究では LES 解析を実施する。基礎方程式は 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。乱流のサブグリッドスケール成分には、渦中心での過剰な渦粘性の生成を抑える工夫を施した Smagorinsky モデルを採用した<sup>4)</sup>。数値解法としては、対流項に対して MUSCL 法（リミター無し）により 3 次精度化した基本変数を用いて、Roe の流束差分法により数値流束を求めた。粘性項には 2 次精度中心差分を用いた。時間積分には 4 次精度ルンゲ・クッタ法を用いた。表 1 には、数値計算法の概略を示す。

表 1 数値計算法

| 支配方程式           | 圧縮性 NS 方程式               |
|-----------------|--------------------------|
| 移流項             | Roe の FDS+MUSCL (制限関数なし) |
| 粘性項             | 2 次精度中心差分                |
| 時間積分            | 4 次精度ルンゲクッタ              |
| 乱流のサブグリッドスケール成分 | 渦粘性を考慮した SGS モデル         |

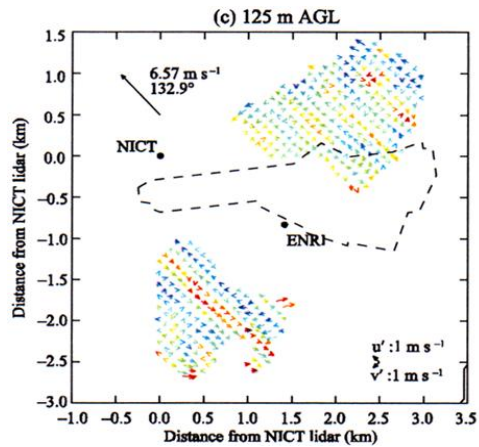
2. 2 局地気象予測システム

本解析の初期・境界条件として用いる仙台空港の気象予報値は、東北大学大学院理学研究科流体地球物理学講座のグループによって開発されている局地気象予測システム「Down-Scaling Simulation System (以下、DS<sup>3</sup>)」<sup>5)</sup>を用いて得られたものである。この DS<sup>3</sup> は、局地気象の解析のために従来の気象予報モデルよりも高解像度のスケールで局地気象を解析する手法である。このシステムは現時点では開発途中であるが、これまでに従来の気象予報モデルでは捉えられなかった海風中に生成する水平ロール対流の現象を捉えることに成功している。

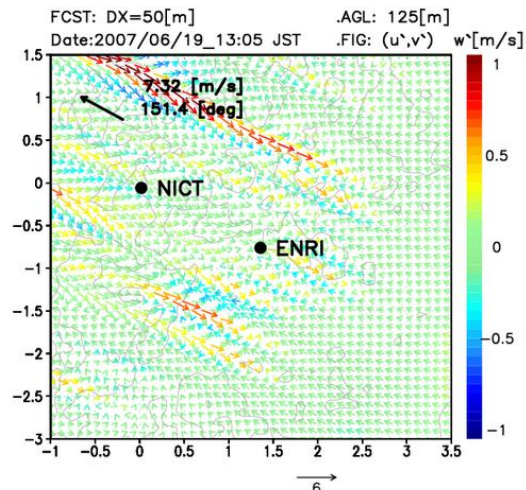
2. 3 解析条件

本解析に用いた DS<sup>3</sup> の解析値（水平解像度 50m）を観測値とともに図 2 に示す。これは、2007 年 6 月 19 日 13 時 5 分における観測・解析値である。これと同時に、仙台空港において集中的な観測イベントが行われ、2 台の Coherent Doppler Lidar (以下 Dual-CDL) を用いて海風前線の水平ロール対流が捉えられている。図 2 に示す DS<sup>3</sup> の解

析によっても定性的に一致しており、その妥当性が確認されている。ここで、図中のカラーは、鉛直風の平均場からの偏差を示している。



(a) Dual-DCL



(b) DS<sup>3</sup>

図 2 2007 年 6 月 19 日 13 時 5 分の観測・解析結果

計算領域は、図 3 に示すように、仙台空港の滑走路の半分を覆うように 2km×2km×0.4km の大ききで設定した。



図 3 計算領域の設定

このように設定した  $DS^3$  の解析値をそのまま利用しても後方乱気流の解析を行うことはできるが、後方乱気流の挙動は数 m 規模の空間スケールの現象である。しかし、現在利用している  $DS^3$  の水平解像度は 50m であり、そのため、後方乱気流の挙動を解析するためには、さらに空間解像度を高める必要がある。そこで、今回の解析では水平解像度 4.5m へと線形補間させた  $DS^3$  の解析値を用いて解析を行った。線形補間には、式 (1) を用いた。

$$\begin{aligned}
 f_p = & (1-\xi)(1-\zeta)(1-\eta)f_{i,j,k} + \xi(1-\zeta)(1-\eta)f_{i+1,j,k} \\
 & + (1-\xi)\zeta(1-\eta)f_{i,j+1,k} + \xi\zeta(1-\eta)f_{i+1,j+1,k} \\
 & + (1-\xi)(1-\zeta)f_{i,j,k+1} + \xi(1-\zeta)\eta f_{i+1,j,k+1} \\
 & + (1-\xi)\zeta\eta f_{i,j+1,k+1} + \xi\zeta\eta f_{i+1,j+1,k+1}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)は、点 P 上の物理量  $f_p$  が格子点の各頂点の量  $f_{i,k,j}$  などから補間されることを示している。  $\zeta, \xi, \eta$  は点 P を囲む格子点からの位置を示すパラメータであり、  $0 \leq \zeta, \xi, \eta \leq 1$  である。

こうして得られた初期・境界条件（等値面：渦度，カラー：密度）を図 4 に示す。図 4 中には、水平ロール対流の渦度等値面（緑色）が確認できる。

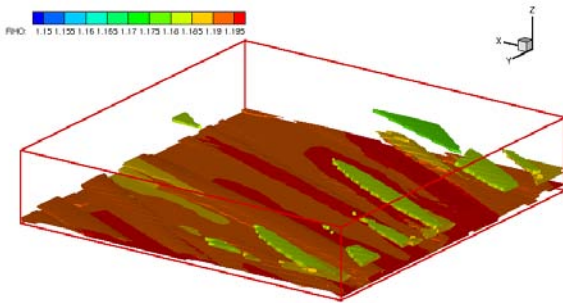


図 4 初期・境界条件

この初期流れ場に、式(2)で表される Hallock-Burnham 渦を後方乱気流と仮定して配置した。図 5 には、配置した擬似後方乱気流の渦度等値面（カラー：密度）を示す。ここで渦の強さを決めるパラメータは、B777 を模擬したものを用いた。  $\Gamma_0$  は循環で 600.0[m<sup>2</sup>/s]、  $b_0$  は渦対の間隔で 60.9[m]、  $h_0$  は渦対の高さで 60[m]、  $r_c$  は渦のコア半径で 2.0[m]とした、  $r$  はそれぞれの渦中心からの距離[m]である。

$$\begin{aligned}
 v = & \frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{-(z-h_0) + (z+h_0)}{r^2 + r_c^2}, \\
 w = & \frac{\Gamma_0}{2\pi} \frac{(y - \frac{b_0}{2}) - (y + \frac{b_0}{2})}{r^2 + r_c^2}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

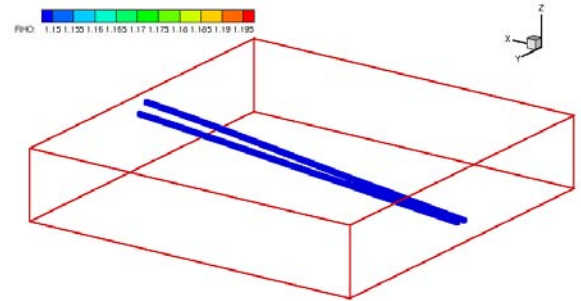
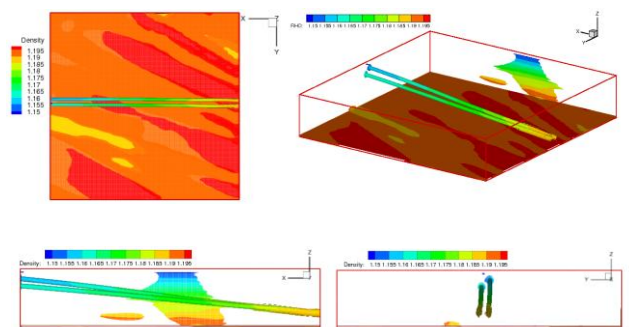


図 5 配置した擬似後方乱気流

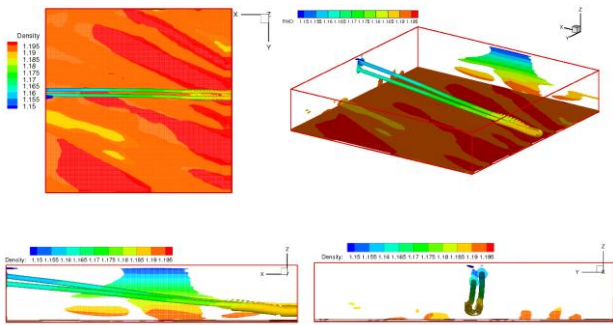
### 3. 結果および考察

図 6 (a)~(i)には、後方乱気流の移流・減衰過程のシミュレーション結果を示す。それぞれ、側面図（XY 断面，XZ 断面，YZ 断面），全体図を示している。等値面は渦度(0.2)を表し、カラーは密度を表している。XY 断面図，YZ 断面図のこれらの結果から、配置した擬似後方乱気流が横風に乗って移流していく様子が確認できる。また、XZ 断面図からは、渦が一様に減衰せず不均一に減衰していく様子が確認できる。これは、図 7 に示すように、配置した擬似後方乱気流が水平ロール対流による影響を受けたためであると考えられる。

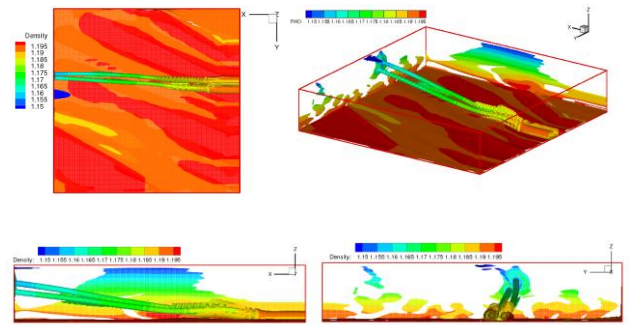


(a) Time = 10[s]

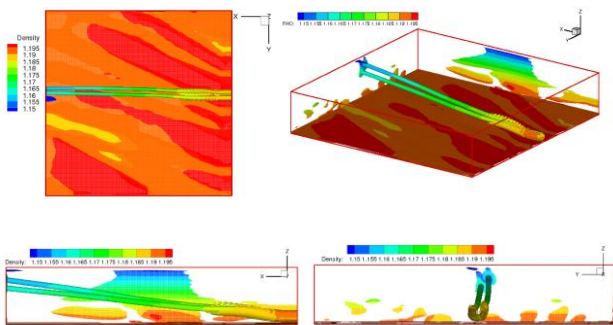
図 6 渦度等値面図（カラー：密度）



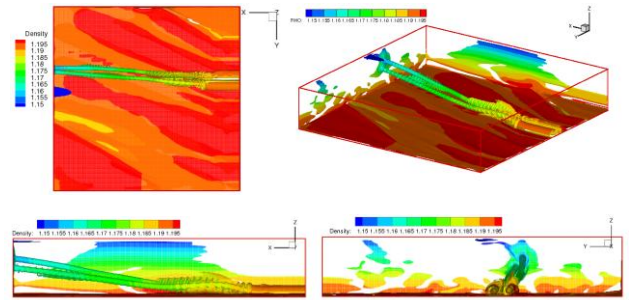
(b) Time = 20[s]



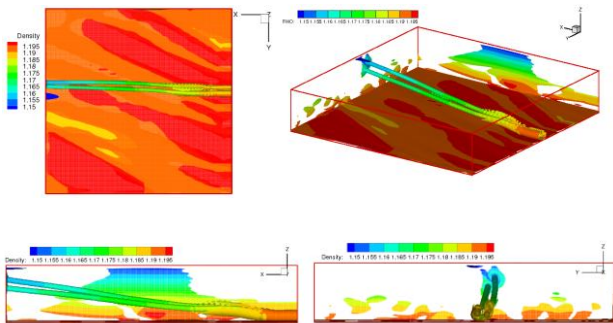
(f) Time = 60[s]



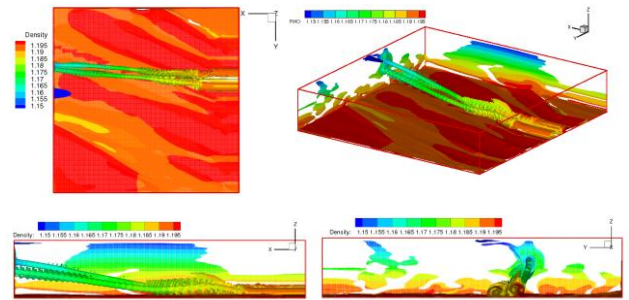
(c) Time = 30[s]



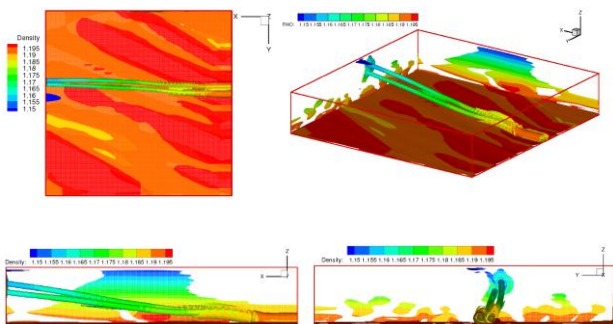
(g) Time = 70[s]



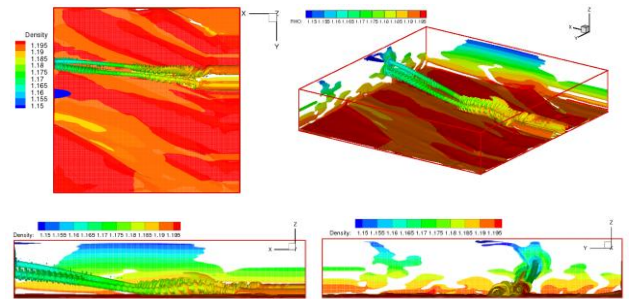
(d) Time = 40[s]



(h) Time = 80[s]



(e) Time = 50[s]



(i) Time = 90[s]

図6 渦度等値面図 (カラー:密度) (続き)

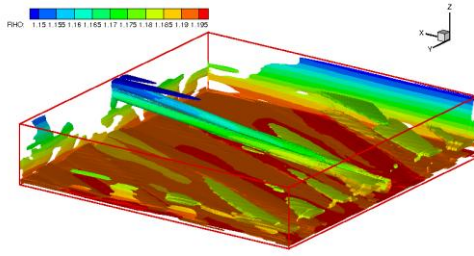
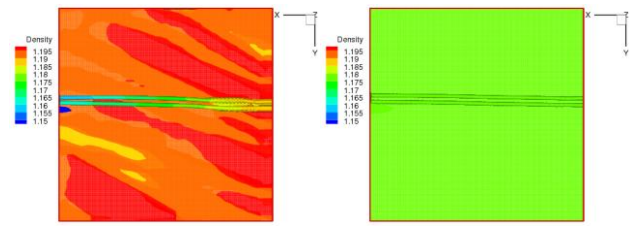


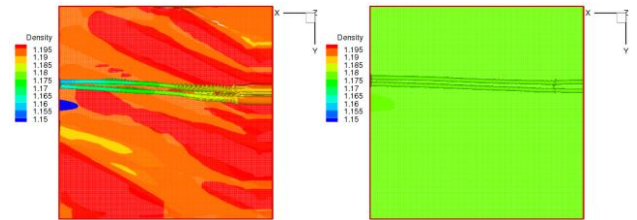
図 7 水平ロール対流との干渉の様子

また、今回の解析とは別に、局地気象予測モデル  $DS^3$  の解析値を用いず、この時刻における気象観測値（気象庁が提供する風速・風向の 10 分間平均値）を計算領域内に一様に設定した擬似後方乱気流のシミュレーションを行った。

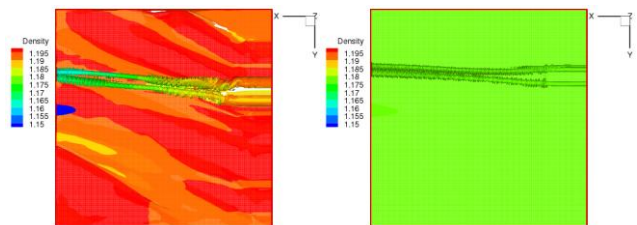
図 8 (i)~(iv) (a)~(c)には、そのシミュレーション結果と初期・境界値を  $DS^3$  により設定したシミュレーション結果との比較を、それぞれ全体図、側面図（XY 断面、XZ 断面、YZ 断面）で示している。XZ 断面図の比較結果(iii)から、気象観測値を一様に設定した時のシミュレーション（右）では、擬似後方乱気流（渦対）が一様に減衰する様子が確認できる。しかし、局地気象予測モデル  $DS^3$  の解析値を用いたシミュレーションではそのような様な減衰は確認できない。この結果から、後方乱気流のシミュレーションにおいて、初期・境界値を  $DS^3$  などの気象解析値を用いてより詳細に設定する必要性が確認できる。



(a) Time = 30[s]

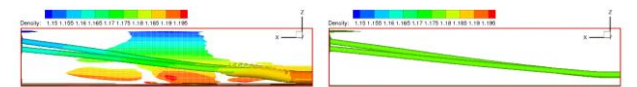


(b) Time = 60[s]

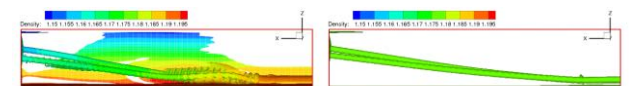


(c) Time = 90[s]

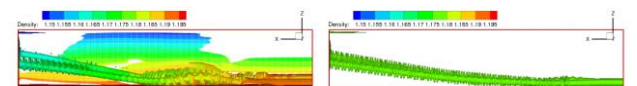
(ii) 側面図 (XY 断面)



(a) Time = 30[s]

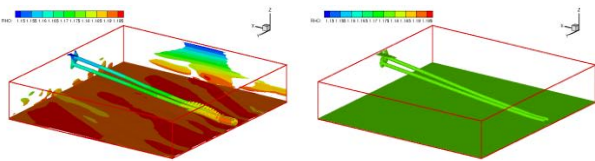


(b) Time = 60[s]

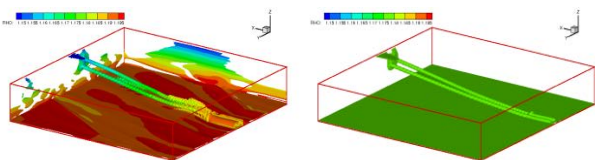


(c) Time = 90[s]

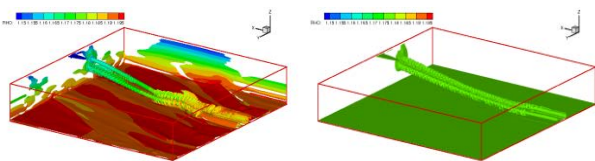
(iii) 側面図 (XZ 断面)



(a) Time = 30[s]



(b) Time = 60[s]



(c) Time = 90[s]

(i) 全体図

図 8 比較結果（左：局地気象予測モデル  $DS^3$ ，右：気象観測値のみ）

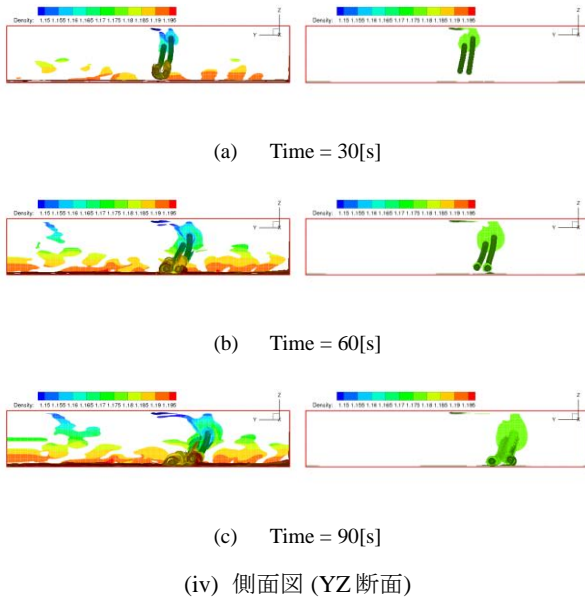


図 8 比較結果 (左：局地気象予測モデル  $DS^3$ ，右：気象観測値のみ) (続き)

#### 4. 結論

本研究では、局所気象予測システム  $DS^3$  によって得られた解析値を利用し、後方乱気流シミュレーションを実施した。解析結果から海風前線の水平ロール対流中での後方乱気流の挙動の様子を明らかにした。また、このように、気象予報値をシミュレーション内の初期・境界値として設定することで、CFD 利用法の新たな側面を示した。

#### 参考文献

- 1) 泉耕二. JAXA の航空と世界の動き. 日本流体力学学会, Vol. 25, No. 6, pp. 525-532, 2006.
- 2) T. Misaka, T. Ogasawara, S. Obayashi, Y. Izumi, and Y. Okuno. Assimilation experiment of lidar measurements for wake turbulence. *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 512-518, 2008.
- 3) 加藤博司, 三坂孝志, 大林茂, 山田泉, 奥野善則, 実大気環境を考慮した後方乱気流予測技術. 日本航空宇宙学会北部支部 2009 年講演会講演論文集, 2009.
- 4) Shen, S., Ding, F., Han, J., Lin, Y., Arya, S. P. and Proctor, F. H. Numerical Modeling Studies of Wake Vortices: Real Case Simulations, AIAA paper 99-0755, 1999.
- 5) 田村一卓. 局地気象予測システムによる仙台空港周辺の海風に関する数値的研究. 東北大学修士論文, 2009.