

# 航空機搭載型ライダー観測を用いたデータ同化による 晴天乱気流の数値シミュレーション

## Numerical Simulation of Clear Air Turbulence Based on Onboard LIDAR Data Assimilation

- 吉村 僚一, 東北大, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: ryouchi.yoshimura.s2@dc.tohoku.ac.jp
- 焼野 藍子, 東北大, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: aiko.yakeno@tohoku.ac.jp
- 三坂 孝志, 産総研, 茨城県つくば市並木 1-2-1, E-mail: takashi.misaka@aist.go.jp
- 菊地 亮太, DoerResearch, 千葉県千葉市中央区中央 2-5-1, E-mail: kikuchi-ryota@doerresearch.com
- 岩渕 秀, 東北大, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: shu.iwabuchi.p7@dc.tohoku.ac.jp
- 大林 茂, 東北大, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: s.obayashi@tohoku.ac.jp

In this article, we investigated applicability of the data assimilation technology to three-dimensional Clear Air Turbulence (CAT) estimation. Vortices induced by Kelvin-Helmholtz (KH) instability were estimated by combining pseudo Lidar observation and outputs from three dimensional Navier-Stokes equations. The result from the identical-twin experiment showed that observation of at least two wind elements was able to effectively reduce estimation errors.

### 1. 背景

乱気流は航空事故の原因の大部分を占める。国土交通省の事故調査報告書<sup>(1)</sup>によると、近年 10 年間で発生した航空事故のうち 46%の原因が乱気流であった。特に晴天乱気流(CAT)は鉛直シアを発生要因とし、雨雲起因ではないため、従来のレーダーでは発生を検知できないという問題がある。

乱気流への対処法として、様々な機関が手法を提案・実用化している。Tamarack は乱気流遭遇時の逐次揺動処理として既存の主翼端に装着可能な舵面付きウィングレット(ATLAS<sup>TM</sup>)を提案している。ATLAS<sup>TM</sup>は乱気流によって発生した主翼荷重変化を検知し、それを打消すように舵面を自動制御することで揺動低減を図る。アメリカ海洋大気庁(NOAA)では乱気流の発生指標を計算し、指標の高い空域を地図上に表示する GTG<sup>(2)</sup>というシステムを運用している。気象予測モデルの計算結果から、渦散逸率等のパラメータを基に乱気流の発生しやすい空域を予測し、データを公開している。JAXA<sup>(3)</sup>やDLR<sup>(4)</sup>は航空機に取り付けたドップラーライダーによる前方風速観測を用いた乱気流事前検知システムの開発に取り組んでいる。航空機前方の風速変化を観測することで、遭遇前に乱気流の存在を検知できる。検知した風速変化は飛行制御システムに取り込まれ、適切な舵面制御により機体揺動を低減する。

NOAA や気象庁などの機関によって提案・運用される手法は乱気流の遭遇を防止する観点では重要であるが、JAXA や DLR による手法は航空機の視点から乱気流を予測・対処するものであり、発生指標に頼らず目の前の現象に基づいた機体揺動の低減を目指す重要な提案である。

しかしながら、ドップラーライダーによる風速観測には空間データ密度が低いという問題がある。得られる情報はライダーから照射されるレーザー光線上の照射方向成分風速のみであるため、ライダー観測から乱気流構造・乱気流発生の有無等を判別し、効率よく飛行制御に反映させるのは難しい。従ってライダー観測よりも空間密度の高い前方気流データが必要とされる。

データ同化は、力学モデルと観測データを統計論的考え方に基づいて融合させることで力学モデルが現実を再現する性能を向上させる手法であり、ライダー観測による前方風況予測を空間的に拡張するのに有効な手法である。気象の数値計算に CFD を適用する場合、境界条件および初期条件が不明であることが多い。上述の通りライダーによる観測値は空間解像度が低い。データ同化により観測値を再現するような CFD のための初期条件・境界条件を推定することが可能であり、空間解像度の問題が解決される。観測情報を反映させた CFD により、ライダーが観測した乱気流場の構造が把握でき、その情報をより効率的な制御の構築に活用できる。

本研究では、データ同化技術およびライダー観測を活用した乱気流構造推定技術の構築する。本発表では、まず比較的単純な 3 次元流れ場を対象としてライダー観測を模した様々な種類の疑似観測を流体計算ソルバに同化することにより乱気流推定における観測値の効果性を調べるとともに、3 次元流体推定に対するデータ同化の有効性についての調査結果を報告する。問題設定として、本研究では KH 渦の推定問題を取り上げた。鉛直風速シアの KH 不安定性により誘起される渦は CAT の原因と言われている<sup>(5)</sup>。

### 2. 手法

#### 2. 1. 問題設定

流体計算には 3 次元圧縮性 NS 方程式を解く内製コード<sup>(6)</sup>を用いた。移流・粘性項の空間差分にはフィルタ係数 0.495 の 6 次精度コンパクトスキーム<sup>(7,8)</sup>、時間積分には 3 次精度 TVD-RK スキーム<sup>(9)</sup>を使用し、結果的に陰的 LES を行った。

参考文献<sup>(5)</sup>によれば、CAT は鉛直風速シアの KH 不安定が主な発生原因であるため、本研究ではまず鉛直シアによって発生する KH 渦およびその非線形時間変化の推定問題を取り上げた。式(1)-(2)に初期条件を記載する。

$$U_{\text{base}} = 0.5 \tan(2\pi(z - 11)/\delta), \quad (1)$$

$$u = U_{\text{base}}, v = 0, z = N. \quad (2)$$

$U_{\text{base}}$  はウィンドシアを定義する風速分布であり、高度  $z$  [km] とシア厚さ  $\delta$  [km] の関数である。 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  方向成分の風速であり、本計算では高度 11 [km] において  $u$  方向にシアが存在する設定になっている。 $N$  は KH 渦を誘起させる微小な大きさのノイズであり、後述の真値・アンサンブル生成にも使われる。

#### 2. 2. 双子実験

データ同化結果の評価は双子実験により行った。双子実験とは、推定したい現象について“真値”と“予測”の 2 種類の計算を流し、真値から取り出した疑似観測を予測計算にデータ同化することで、同化結果が真値にどの程度近づくかを評価する数値実験である。本計算において、データ同化は渦が十分に成長する  $t=750$  [s] から 100 秒間の間行われた。ライダー観測を得る時間間隔は 2.5 [s] とした。SRF 用のアンサンブル数は 40、そして共分散膨張係数を 1.5、共分散局所化を 5 [km] を閾値として行った。真値及びアンサンブルは共通の初期条件で生成されるが、鉛直方向風速に付加する乱数により互いに異なる強さ・大きさ・ペアリング間隔の渦列を予測するため、データ同化を行わない場合、予測は真値と異なる結果を導き出す。流体計算は図 1・表 1 の計算格子・条件に従った。

#### 2. 3. データ同化手法

平方根フィルタ<sup>(10)</sup>を用いてライダー観測を CFD に融合させた。本

手法はアンサンブルカルマンフィルタ系列のデータ同化手法の一つで、数値モデル誤差分散の更新式がカルマンフィルタのものと解析的に一致するように導出されているという特徴を持つ。

#### 2. 4. 疑似ライダー観測データ

ライダー観測データを模擬するために、風速データが真値計算から人工的に取り出される。ライダーから照射されるレーザー光線が一直線に進むため、風速観測は $z=11$  [km]の高度において一直線に19 [km]の範囲で得られるとした。また、ライダーを搭載する飛行機の移動も考慮し、観測領域は $x=0$  から250 [m/s]で $x$ の正方向へ移動させた。観測誤差を考慮し、真値に主流速さの2%の大きさを持つ正規分布型乱数を加えたものを観測として用いた。

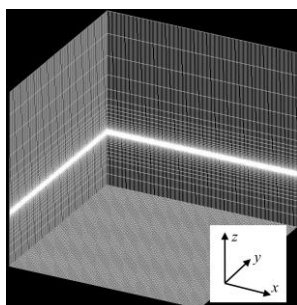


Fig. 1 Computational domain.

Table 1 Computational conditions

Time step interval	0.01
Grid size [km]	$D_x, D_y=0.26, D_{z_{\min}}=0.031,$ $D_{z_{\max}}=2.35$
Grid number	$N_x=151, N_y=151, N_z=61$
Domain size	$L_x=40, L_y=40, L_z=40$
Re	$1.0 \times 10^9$
$\delta$ [km]	1.7
$N$	$N(0, 0.0001^2)$

### 3. 結果

風速 $u$ および $w$ を観測した場合の双子実験の結果を図2, 3に示した。図2, 3は時刻 $t=800$  [s]および $t=850$  [s]の $y$ 方向渦度の真値・同化後推定値分布を、観測をした断面・観測領域付近で拡大したものである。図2は左から移動してきたライダー観測が $t=800$  [s]で中央に到達した時点での流体場の推定結果である。観測が右方向に移動するため、すでに観測した領域(観測領域の左側)は真値を再現した渦度分布になっている。一方まだ観測していない領域(観測領域の右側)では、アンサンブル平均は不明瞭な渦度分布を示している。計算の確率密度分布を表現する各アンサンブルがばらつき、異なる渦を推定したため計算に不確実性が残っている。図3は $t=850$  [s]の推定結果である。 $t=800$  [s]で不明瞭になっていた領域が同化により更新されているが、残った不確実性を完全には取り除けていないことがわかる。観測開始から時間が経ったことで流れの3次元性が増し、40アンサンブルで許容することのできない現象になりつつあるからであると考えられる。

風速 $u, w$ を観測した場合、高度11km上下10格子で平均したRMSEは、同化しないものと比べて約7割減少した。一方、風速 $u$ のみを同化した場合は推定がうまくいかず誤差が増加する結果となった。従って今回のような渦推定では、少なくとも2方向の風速成分を観測することが重要だと示された。

#### 4. まとめ

本研究ではCATの誘因と言われるKH不安定に注目し、ライダー観測を模した観測を用いたデータ同化による流れ場推定を双子実験の環境下で行った。結果として大きな渦構造を推定する場合少

なくとも渦を構成する2風速成分( $u$ および $w$ )が重要であると分かり、これらを同化すると7割の推定誤差を取り除くことが出来た。今後は進行方向に一直線にライダー観測を行うのではなく、2方向に分けて角度をつけるなど重要な2方向成分の風速を陰的に取り込む観測方法で双子実験を行い、結果評価を行う。

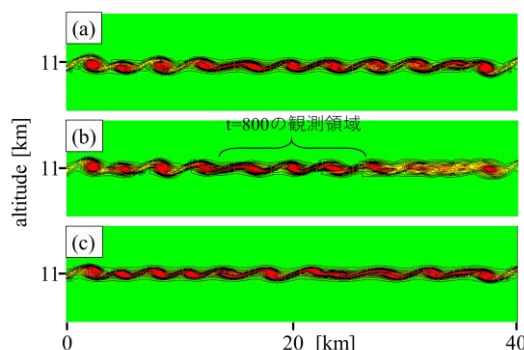


Fig. 2 (a) true, (b) assimilated and (c) not assimilated distribution of  $y$ -vorticity at  $t=800$  [s].

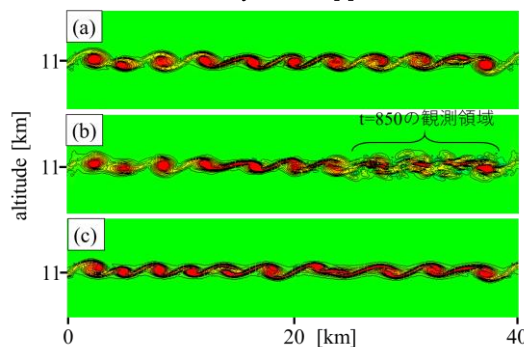


Fig. 3 (a) true, (b) assimilated and (c) not assimilated distribution of  $y$ -vorticity at  $t=850$  [s].

#### 参考文献

- (1) JTSB report, <http://www.mlit.go.jp/jtsb/airrep.html> (2019/10/12)
- (2) Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, "An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting." *Wea. Forecasting*, 21, (2006) pp.268-287.
- (3) JAXA safeavio <https://global.jaxa.jp/projects/aero/star/> (2019/10/12)
- (4) Nicolas, F., and Hans-Dieter, J., "Combined Feedback and LIDAR Based Feedforward Active Load Alleviation", AIAA Aviation Forum, (2017), AIAA2017-3548.
- (5) Ellrod, G.P. and D.I. Knapp, "An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use." *Wea. Forecasting*, 7, (1992) pp.150-165.
- (6) Obayashi, S. et al., "Improvements in Efficiency and Reliability for Navier-Stokes Computations Using the LU-ADI Factorization Algorithm", (1986), AIAA 86-0513.
- (7) Lele, S.K., "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution." *J.Comput. Phys.* 103 (1), (1992) pp. 16-42.
- (8) Kawai, S., Fujii, K., "Compact scheme with filtering for large-Eddy simulation of transitional boundary layer." *AIAA J.* 46 (3), (2008) pp. 690-700.
- (9) Shu, C.-W., Osher, S., "Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock capturing schemes", *J. Comput. Phys.* 77 (1988), pp. 439-471.
- (10) Tippett MK, et al, "Ensemble square-root filters." *Mon Weather Rev* 131, (2003), pp. 1485-1490.