

# 2014年12月16日に発生した晴天乱気流事例のLES解析

\*吉村僚一(東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻),鈴木健斗(気象庁情報基盤部),  
焼野藍子,大林茂(東北大学流体科学研究所),菊地亮太(京都大学産官学連携本部),  
伊藤純至(東北大学理学研究科)

## 1. はじめに

国土交通省の統計によれば航空事故原因の約半数は乱気流によって占められており,回避策の向上が求められている。「晴天乱気流」は対流雲を伴わず,一般には飛行機がレーダーで事前に察知することが困難である。晴天乱気流はジェット気流付近のせん断流に起因する Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定が主な原因とされ[1],山岳波や,低層の対流に伴う重力波が上空で砕波することがきっかけとなり発生することもある。このような乱気流による事故を減らすため,現在ドップラーライダーによる前方風速観測値を制御入力とする逐次飛行制御 (JAXA, DLR など) や翼荷重変化を入力するパッシブな舵面制御 (Tamarack など) といった,様々な技術開発が行われている。これら飛行制御技術の開発には,最終的には実機による飛行試験により実条件での性能調査が伴う。従って,数値流体計算により詳細かつ物理的に整合性のある乱気流場を再現し,仮想的な飛行試験により危険評価を行うことができれば,非常に有用であると考えられる。また,仮想空間上で新しい飛行制御則の評価も可能となり,開発を効率化することも期待される。そこで,本研究では過去に発生した乱気流事故事例に関して WRF-ARW による LES 解析を実施し,乱気流含む当時の大気場を再現することを試みる。

## 2. 注目した事例

本研究では 2014/12/16 10:35-10:38 UTC に北関東上空で発生した乱気流事故の事例解析を行う。乱気流の発生要因を WRF-ARW を用いて調査するとともに,最終的に LES を用いた乱気流構造の詳細解析の実施を目標とする。運輸安全委員会 (JTSB) の事故調査報告書[2]によれば,アメリカン航空 280 便は 10:35 頃,140E-140.5E,36.7N,高度 8.2 km にて晴天乱気流に遭遇し,+1.8G から -0.88G の鉛直加速度変化が起きた。これにより計 11 名の乗員・乗客が負傷した。雲頂高度とフライトレベルの関係およびシグメット情報から,フライトレベルと雲頂はほぼ同じ高度であり,また乗員も「時々薄い雲がかかる状況」と述べていることから揺動の原因は晴天乱気流であったとみられる。当時は低気圧が急速に発達しながら関東南岸を北東進していた(図 1)。

## 3. 解析条件

まず WRF-ARW を用いた数値解析により乱気流含む当時の気象場の解析を試みた。図 2 にドメイン構成を示す。137E, 37N を中心とする(1950 km)<sup>2</sup>の領域を第 1 ドメインとし,水平分解能は 3 km,鉛直方向は 100 層,高度 4 km より上空は格子幅 180 m に設定した。加えて第 2(1 km)・第 3 ドメイン(0.25 km)とダウンスケーリングした。第 1 ドメインの初期・境界条件には水平分解能 5 km の MSM 解析値を用いた。積分時間は事故発生の約 16.5 h 前から約 1.5 h 後とした。鉛直混合は MYJ PBL スキーム,水平混合は水平スマゴリンスキームを使用した。第 3 ドメインでは Deardorff モデルを利用し,乱気流を解像する Large-Eddy Simulation (LES)を行った。

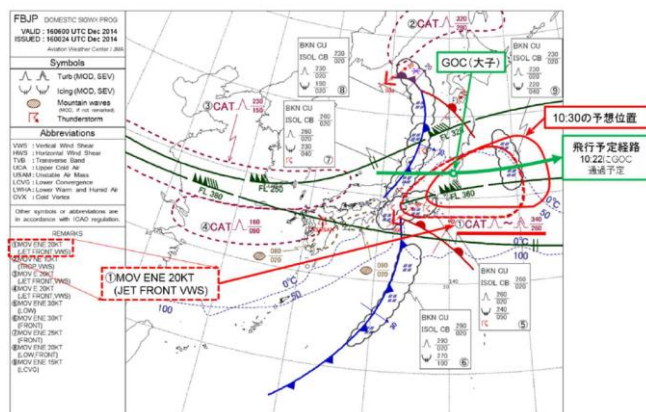


図 1 当時の悪天予想図 ([2]から引用)

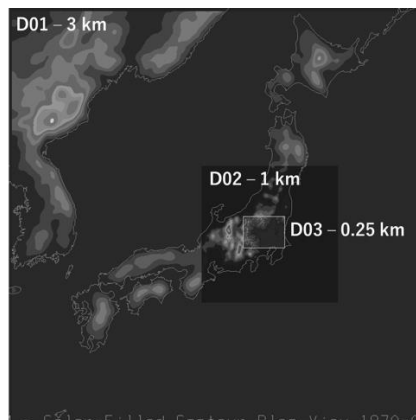


図 2 計算領域

## 4. 当時の気象場の解析

WRF-ARW による予測は本州南岸を発達しながら北東

進する低気圧を再現した。MSM 解析と比べて気圧配置、降水域のずれは小さく、総観場を適切に再現した。第 1 ドメインの解析結果 (図 3) に注目すると、遭遇時刻・地点付近では勾配リチャードソン数(Ri)が 0.25 以下となるせん断層不安定領域がみられた。不安定領域は雲物理量混合比が大きい空域の直上、また温位の鉛直勾配が緩やかな場所に対応している。Ri<0.25 の不安定領域は、高度 11 km に位置する上層ジェットとその下部の高度 6-7 km の風速が小さい領域の間で形成された (図略)。37.75N, 139.5E から水平距離 80 km 付近に位置する波長約 11.6 km の波は、せん断層不安定領域で発生する KH 波に相当すると考えられる。不安定領域で発生する KH 波の最大波長は[3]の方法で算出すると 12.6 km となり、ドメイン 1 の解析において、KH 波を捉えられたと考えられる。

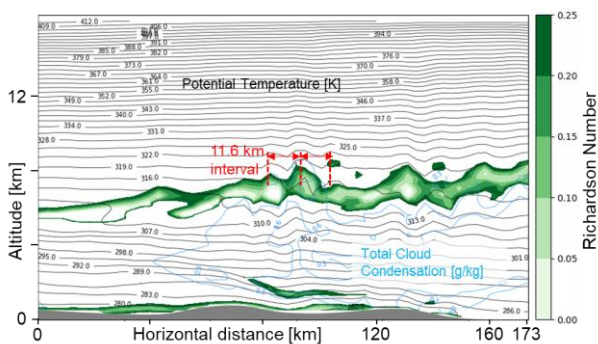


図 3 第一ドメイン 37.75N, 139.5E – 36.75N, 141E の断面図

## 5. 乱気流の発生要因の検討

遭遇時刻の 4.5 h 前に雲物理過程を OFF にした計算では、遭遇地点付近の Ri は比較的大きく、強いせん断は生まれず KH 不安定も誘起されなかった。湿潤対流による運動量輸送が対流雲上部の南西風を減速し、混合領域直上でのせん断の強化に繋がったとみられる。

地形除去実験では、地形ありと同様の領域に KH 不安定を伴う Ri<0.25 の領域が現れた上に KH 波の波長は地形ありの計算と同等であったため、地形による晴天乱気流の生成への影響は小さいと推察される。

## 6. LES の結果

第 3 ドメインでは、乱気流のより詳細な構造を捉えることが出来た。図 4 は遭遇時刻の 30 分前における鉛直風速場である。矢印 AB で示したように、鉛直風速の比較的大きな変動が規則的に生じている様子が観察できる。計算ドメイン内には 2014/12/16 08:00~11:00 においてこのような強い風速変動が絶えず存在しており、遭遇した乱気流と同じ性質を持つ乱気流を時刻ずれ・位置ずれはあるものの再現できたと考えられる。図 5 は矢印 AB に沿った鉛直断面において温位(黒実線)・鉛直

風速(赤：上昇気流、青：下降気流)・Ri を可視化している。高度約 8 km に分布する緑色の等値線は Ri=0.25 を示す境界であり、この内側は Ri<0.25 の不安定領域である。鉛直風速変動はこれに沿ってみられる。特に点 A から水平距離 40~55 km の区間において上昇・下降流域が規則的に分布しており、KH 不安定が誘起されていると分かる。また、境界層スキームを用いていた第 1 ドメインと異なり明確な渦を捉えており、鉛直風速変動は、50 km 地点の渦において最大 24 m/s(水平 2 km)以上と予測されていた。

## 7. まとめ・今後の予定

今回は、総観場を適切に再現した計 3 ドメインの WRF 解析において、乱気流の発生要因を明らかにしたとともに、発生地点において最大 24 m/s(水平 2 km)の鉛直風速変動を捉えることが出来た。

今後は LES により得られた大気場に注目し、乱気流強度指標を推算するとともに、6 自由度運動モデルをベースとするフライトシミュレータを使用し、飛行機が経験する G 変化を推算することを目指す。

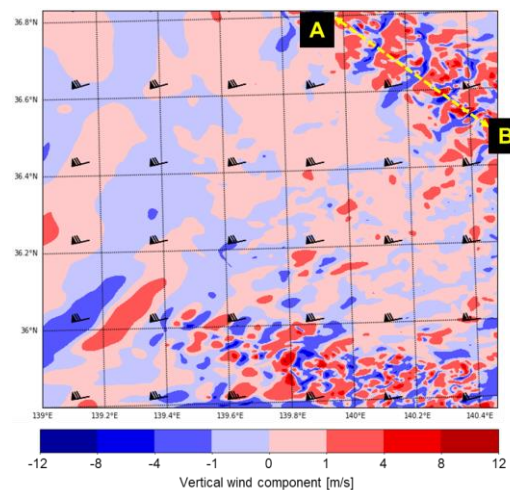


図 4 2014/12/16 10:06 UTC, 高度 8.2km の鉛直風速分布

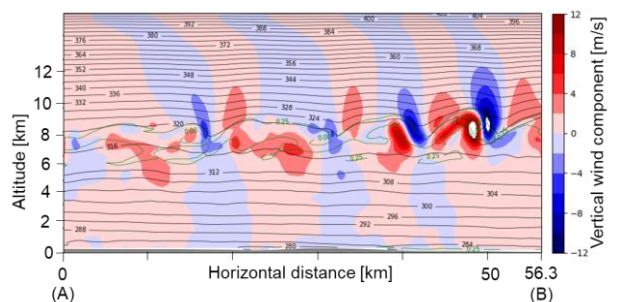


図 5 図 4 の矢印 AB に沿った断面図。緑色等値線は Ri=0.25

## 8. 参考文献

- [1] Ellrod, G.P. et al., 1992, *Wea. Forecasting*, 7, 150-165.
- [2] JTSB Accident Report, AA2016-2.
- [3] Scorer, R. S., 1969, *Radio Sci.*, 4, 1299-1308.