

仙台空港における後方乱気流の計測融合シミュレーション

三坂 孝志*, 大林 茂*, 藤代 一成*, 竹島 由里子*, 山田 泉†, 奥野 善則‡

*東北大学 流体科学研究所, †電子航法研究所, ‡宇宙航空研究開発機構

misaka@edge.ifs.tohoku.ac.jp

概要: 飛行する航空機の後方に発生する後方乱気流は空港における離発着数を制限する要因の一つであり、今後必要となる空港容量拡大のためには様々な気象条件下における後方乱気流の減衰過程を検討する必要がある。本研究ではデータ同化手法により仙台空港における後方乱気流のライダー計測値を数値流体力学シミュレーションに融合し、実運行機の後方乱気流を解析した。

1. はじめに

空港における航空機の離発着間隔を制限する要因の一つに飛行する航空機の後方に発生する後方乱気流がある。この後方乱気流に後続の航空機が巻き込まれると危険であることから、安全かつ効率的な運行のためには、様々な気象条件下における後方乱気流の減衰過程に関する研究が必要となる。

後方乱気流の減衰過程に関する研究としては、翼端渦をモデル化した渦対の数値流体力学(CFD)シミュレーションが、大気乱流スペクトルに基づく一様乱流によって乱れ速度成分を加えることにより行われている。しかしながら、このような方法では空港周辺の実環境を再現するのは難しい。現在、航空機設計など理想状態の解析では CFD シミュレーションが非常に強力なツールとなっている。一方、後方乱気流のように実環境下での現象理解が重要なケースでは、初期・境界条件の設定の困難さから、そのシミュレーションは依然困難である。

一方、ライダーという装置により実運行機の後方乱気流計測が行われてきている[1]。ライダーはレーザを空間的に走査することにより距離と風速を計測することができるので、航空機通過後の鉛直断面の風速分布を得ることができる。しかしながら、現状では空間解像度が低く翼端渦の詳細は分かるまでには至っていない。

本研究では仙台空港に設置されたライダーによる後方乱気流の実計測値をデータ同化手法により CFD シミュレーションに融合する計測融合計算手法により、実運行機の後方乱気流の詳細をシミュレートする手法の開発を行っている。

2. 数値計算手法

基礎方程式には 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた。非粘性数値流束フラックスは MUSCL 法により高次精度化した基本変数を用いて Roe の近似リーマン解法により求めた。MUSCL 法による高次精度化においてはリミッターを用いていない。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。また、渦流れのための修正を加えた Smagorinsky モデルによる LES 解析を行った。

データ同化に用いた 4 次元変分法は、非定常計測値と時空間的に一致する非定常流れ場を求めるために、計測値と計算値の差をコスト関数として定義し、その最小化により計測値の計算への同化を行う方法である。このときコスト関数は初期流れ場の関数となるため、(空間の格子点数)×(物理変数)の設計変数を持つことになる。このような多変数関数の勾配情報を効率よく求める方法をととして、Navier-Stokes 方程式のアジョイント方程式を用いる。アジョイント方程式の時間積分により求めた勾配を利用し、準ニュートン法によりコスト関数を最小化する。ヘシアン行列は省メモリ型 BFGS 法により近似的に求めた[2,3]。

コスト関数は計測値と計算値の差で定義されるが、具体的には計算空間内で実際の計測プロセス(レーザを鉛直に走査することによって面データを取得のプロセス)を模擬して擬似ライダーデータを得て、これを実ライダーデータと比較することにより評価する。本研究では図 1 に示すように、航空機が離陸した直後の領域に計算領域を設定した。計算領域一辺の長さは約 400m である。

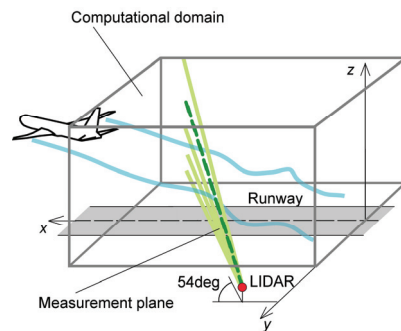


図1 計算領域とライダー計測面

3. ライダー計測融合シミュレーションの結果

図 2(a)に仙台空港におけるライダー計測で得られた風速分布を示す。ライダーではレーザ出力方向の速度成分のみが得られるので、渦対は図中央のような速度変動となって観測される。また、図 2(b)に上記ライダー計測値を同化した流れ場から得られた擬似ライダー計測値を示す。これらの図の比較から実ライダー計測値と一致する流れ場が計算空間内に再現されていることがわかる。

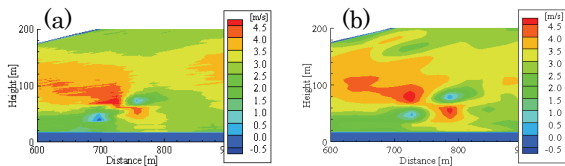


図2 ライダ計測面の風速分布, (a)実ライダ計測, (b)データ同化したシミュレーションの結果

表1に準ニュートン法の反復1回に要したプログラム主要部分のCPU時間(単位は秒)を示す. 並列化にはOpenMPを用いている. 格子点数は $50 \times 80 \times 80 = 320,000$ 点で, 実時間では20秒に相当する時間積分を行った. 単純な構造格子系の3次元計算を行っているので, Navier-Stokes およびアジョイントコードは最外ループの並列化を行っている. 計算には東北大学 流体科学研究所 未来流体情報創造センターのスカラシステム SGI Altix 3700Bx2 (Itanium2 1.6GHz)を使用した.

表1ではNavier-Stokes 方程式の時間積分をNS, アジョイント方程式の時間積分をAD, データ入出力をIO, 準ニュートン法で行われる直線探索(コスト関数評価のためのNavier-Stokes 計算を含む)をLS, その他の部分を含めた全体の計算時間をTotalとしている. アジョイント方程式は時間積分を逆方向に行う必要があり, その際に各時間ステップでの流れ場データを利用するので, ハードディスクに流れ場データを全て書き出している. 上記IOは流れ場バイナリデータのダイレクトアクセスによる入出力に要した時間に相当する. この入出力に要する時間も比較的大きいので, 入出力を使用CPU数に分割し並列処理を行っている.

また, 図3に単一CPU使用時の計算時間を1としたときの並列化によるプログラム主要部分の速度増加を示す. また, IOに要する時間は実行する毎に変動が大きかったため, 3回試行して平均値を示している.

表1 並列数によるCPU時間の変化[秒]

#CPU	NS	AD	IO	LS	Total
1	4515.9	36675.0	2742.1	5248.0	49181.0
2	2705.4	22370.0	1777.6	2705.6	29887.7
10	664.5	5497.9	447.4	626.0	9443.3
20	435.5	3458.3	269.2	404.0	5738.7
40	320.5	2151.0	178.9	300.6	3690.0
80	268.4	1430.9	168.8	250.7	2408.4

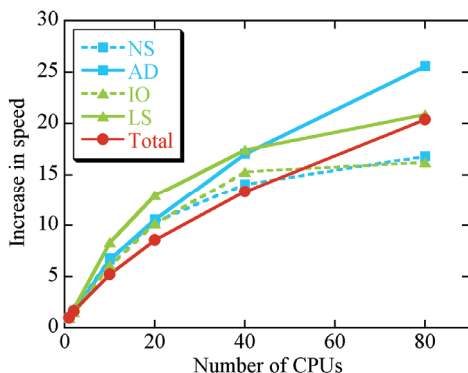


図3 プログラム主要部分の速度増加率

ライダデータを同化した流れ場を得るために準ニュートン法の反復を10回程度行うとして, 並列化の方法または計算機性能の向上により1200倍以上の高速化が実現できれば, リアルタイムで結果を出すことができる. 現状では計算高速化に関して単純な並列化以外行っていないので, 時間積分やデータ同化手法の工夫による部分だけでも大幅な高速化が期待できると考えられる.

4. 仮想環境を用いた視覚解析

再現された翼端渦の減衰過程を効果的に視覚解析するために, 未来流体情報創造センターに設置されているリアライゼーションワークスペースの没入的仮想環境を利用した. 同環境は前方2面, 床2面の合計4面の大型スクリーンから構成されるステレオ表示系と, 観察者ならびにコントローラ的位置・姿勢を複数台の赤外線カメラを用いてトラッキングする装置を特徴とする.

空港シーンデータは, 複数枚の写真をベースに3次元的にモデリングした後, 市販可視化ソフトウェアAVSで重畳表示できるように加工したものである. 一方, 翼端渦の形状はその特徴が現れる特定の渦度値を時刻ごとに選定し, 色付き等値面で表現した. それと同時に, レーザ走査面を含む放射状の鉛直断面を疑似カラーコーディングによって複数枚描き, 3次元計算空間における渦場の様子を簡易的にボリューム可視化した(図4).

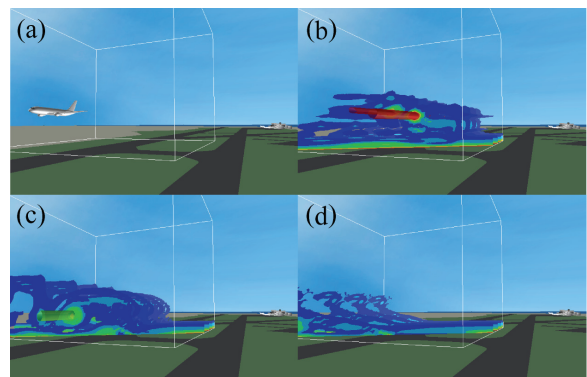


図4 可視化された翼端渦(左上から横へ)

5. まとめ

本研究では計測融合計算手法を仙台空港における実運行機のライダ計測データに適用し, 空港周辺の気象を考慮した後方乱気流の解析を行った. また, リアライゼーションワークスペースによる没入的仮想環境で可視化を行った.

参考文献

- [1] 加来 信之, “レーザによる後方乱気流の観測,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 311, pp. 13-16, 2006.
- [2] Takashi Misaka, Shigeru Obayashi and Eiichi Endo, “Measurement-Integrated Simulation of Clear Air Turbulence using Four-dimensional Variational Method,” Journal of Aircraft, Vol. 45, No. 4, pp. 1217-1229, 2008.
- [3] Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Takeshi Ogasawara, Izumi Yamada and Yoshinori Okuno, “Measurement Integrated Simulation of Wake Turbulence,” AIAA Paper 2008-466, 2008.