

## ロケット発射時における地上風の数值風況予測の試 行

齊藤, 俊哉  
(独) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

内田, 孝紀  
九州大学応用力学研究所

荒屋, 亮  
(株) 環境GIS研究所

<https://doi.org/10.15017/1526131>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 145, pp.121-126, 2013-09. Research Institute for Applied  
Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# ロケット発射時における地上風の数値風況予測の試行

齊藤 俊哉\* 内田 孝紀\*\* 荒屋 亮\*\*\*

(2013年7月31日受理)

## Computation of Airflow for Space Rocket Launch

Toshiya SAITO, Takanori UCHIDA and Ryo ARAYA

E-mail of corresponding author: [saito.toshiya@jaxa.jp](mailto:saito.toshiya@jaxa.jp)

### Abstract

When launching a space rocket, cross wind is thought to be one of major weather hazards since a rocket experiences wind load and drifting. To develop new types of space rocket optimally, it is essential to understand fully about wind around a launch pad and a rocket itself, considering three-dimensional airflow structure. To simulate wind, large-eddy simulation (LES) technique was applied to Tanegashima Space Center and its launch facilities, structures and buildings. In this paper, comparison evaluation is discussed based on the results from LES technique and data acquired by anemometers in 15 years and the Doppler lidar system in a month. The numerical results showed good consistent with the observational data especially in the airflow locally affected by buildings and the topographical effects.

**Key words :** CFD, LES, GIS, Rocket launch, Local wind

## 1. 緒言

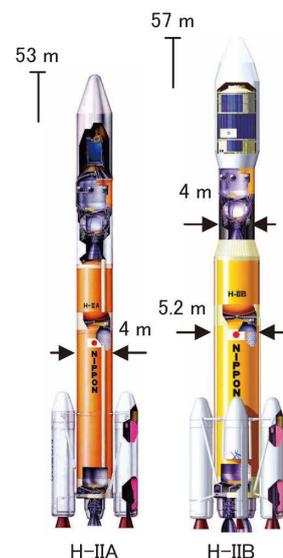
現在、九州大学応用力学研究所と環境GIS研究所では数値風況予測技術(CFD)の開発が進められている<sup>1)</sup>。地理情報システム(GIS)に対応した非定常・非線形の数値風況予測モデル(Airflow Analyst®, エアフローアナリスト)もその一つである<sup>1)</sup>。これは、CFDとGISの技術の融合により、都市計画、建築、土木、防災、医療、エネルギー等の様々な応用分野で気流場と拡散場を把握し、最適な意思決定の支援を目的に開発されたものである。特に、風力発電事業における適用事例が多く、数々の成果が既に報告されている<sup>2-4)</sup>。

今回、風力発電設備とロケットとの空間スケールおよび設計・運用上に考慮すべき風況リスクの取扱い等の相似性に着目し、ロケット打上げに伴う地上風の解析手法への適用性について検証を行った。現在、国内の人工衛星等の打上げには、H-IIAおよびH-IIBロケットが主に用いられている(右図を参照)。これらは高さ50m、直径が4~5m程度の推進薬タンクで構成され、アルミニウム合金製の薄肉の円筒構造となっている。発射前の地上起立時においては、地上風による風荷重に耐荷する必要がある。また、発射時においては横風による横滑り量と発射台設備との衝突を考慮しなければならない。このように、ロケット打上げにおいては機体設計

や打上げ時の意思決定に係る風速制約条件の設定において、局所的な風況予測が必要となる。

現状のロケットの設計条件や打上げ時の制約条件については、射点近傍の地形を考慮した地形風洞試験に加えて、統計的な風況精査をベースに設定し、安全性を確保している。しかしながら、風の局所的な空間構造や動的な渦構造については、詳細な検証までは踏み込みこめていない。今後、詳細な局所風況予測によって得られる設計上・運用上の定量的なメリットについては詳細評価を進めていく予定である。

本報告では、ロケット発射場を対象とし、数値解析手法の適用性検証として、Airflow Analyst®による数値風況予測の適用事例を紹介する。



\* (独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)

\*\* 九州大学応用力学研究所

\*\*\* (株)環境GIS研究所

## 2. 条件設定

### 2.1 評価項目・解析条件等

本研究では、風速10m/s以上の比較的強い風の中から、特に種子島宇宙センターにおいて卓越する風向に着目して解析を実施した。西高東低の冬型気圧配置の気象条件においては、過去30年の平年値としても北西風が卓越している(図1)。この風向ではロケットの発射台(以下および図中、LP: Launch Pad)が高さ80mの大型ロケット組立棟(以下および図中、VAB: Vehicle Assembly Building)の後流となることから、研究対象としても意義が大きい。なお、大気の温度成層(大気安定度)については省略した。

境界条件の設定は以下の通りである。流入境界面には1/7のべき法則に従う速度プロファイルを与えた(図2)。側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地面には粘着条件を設定した。レイノルズ数( $=U_{in}h/\nu$ )の値は、 $Re(=U_{in}h/\nu)=10^6$ とした。ここで、代表長さスケール $h$ は、計算領域内の主たる構造物であるVAB高さ(図3)、代表速度スケール $U_{in}$ は流入境界面における観測点位置高さの風速とした。 $\nu$ は動粘性係数である。時間刻みは $\Delta t=2\times 10^{-3}h/U_{in}$ とした。Airflow Analyst®による解析手法の詳細は、内田ら<sup>1)</sup>による報告に詳述されているため、本報告では割愛する。

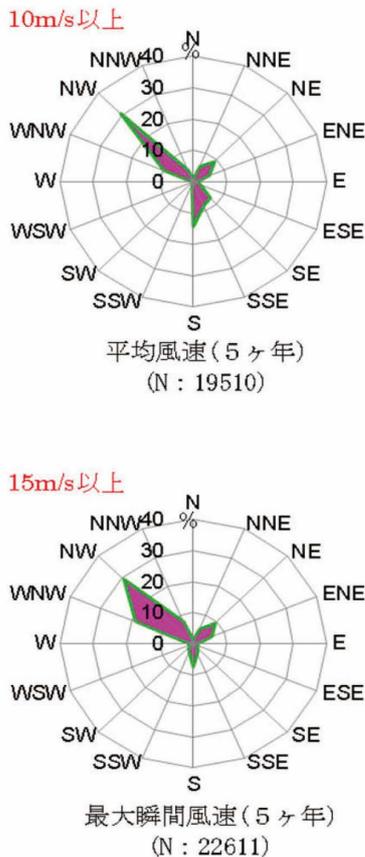


図1 種子島宇宙センターの気流特性(5年統計値)

### 2.2 地理情報システム(GIS)による格子生成等

本研究では、種子島宇宙センター内のロケット発射台周辺を計算対象とした。種子島宇宙センター内の地形と建屋等を再現した様子を図4に示す。地形に関しては、航空機デジタルセンサにより計測した0.5m空間解像度の地形標高データを使用した。また、宇宙センター外の地形については、地球観測衛星により計測された10m空間解像度の地形標高データを適用し、上記の高解像標高データと接続して解析に用いた。一方、種子島宇宙センター内のロケット発射設備、構造物、建物等については、製造図面に基いてGISレイヤを作成し、CADデータをGISデータに変換した。地上設備や構造物はポリゴンの図形データとして作成し、属性として「標高(m)」、「高さ(m)」を設定した。なお、実際の観測ポイントとの位置関係については、図5を参照して頂きたい。

格子生成には、Airflow Analyst®の格子生成機能を用い、計算領域の原点、計算格子数、最小格子幅、引き付け率、計算を行う風向等を指定した。

計算領域は約1.5km四方、500m高度とし、計算領域中において最大高さを有する構造物VABや発射台が含まれるように設定した。なお、計算領域の境界面(特に流出断面)に関して、この付近で地形や建物が分断されると計算が不安定になる場合があるため、計算領域の境界面設定については十分に配慮した(図6も参照)。

得られた解析結果は、任意断面における非定常な気流場および数値情報として出力した。さらに、GISデータとして風速や風向等の数値を出力し、統計処理や周囲の地物等の影響について空間的な把握・評価も行った。

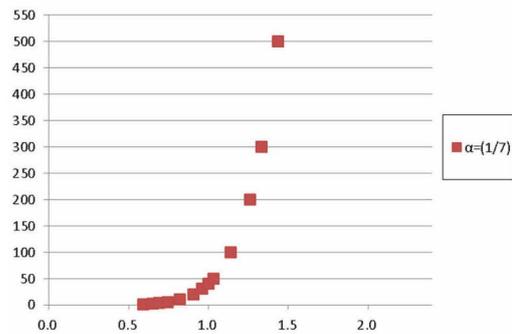


図2 風の流入条件, 1/7べき乗則

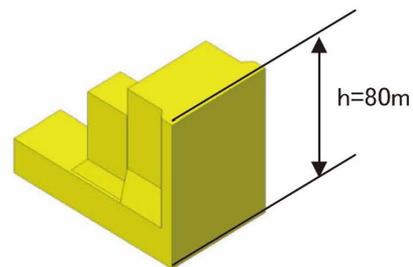
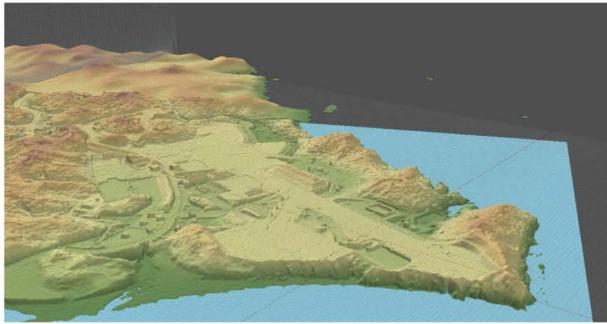


図3 大型ロケット組立棟(VAB)および代表高さ

数値地図: 0.5mメッシュ標高  
航空機デジタルセンターによる計測



発射設備・建屋  
(一部 CAD データを活用)

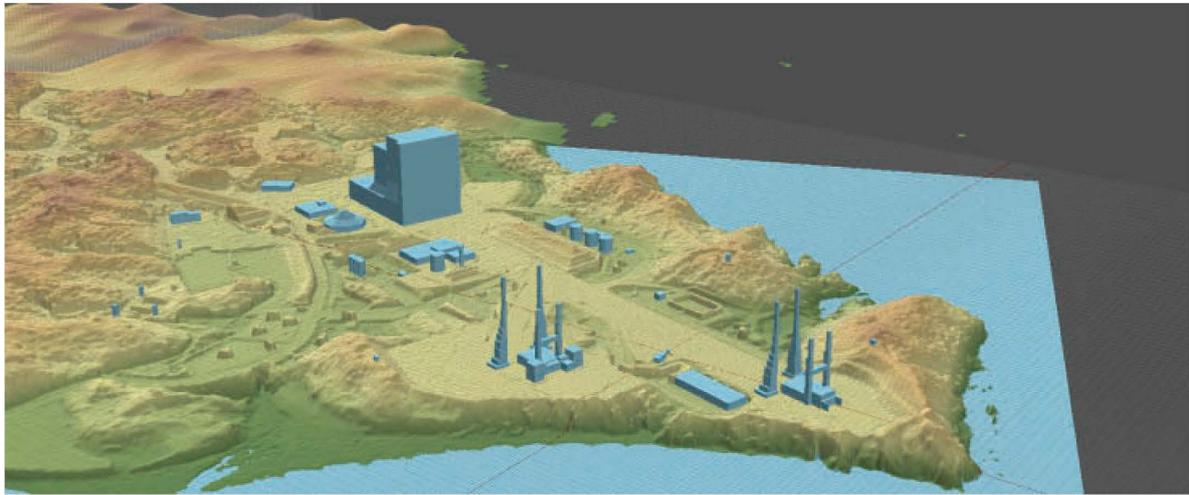
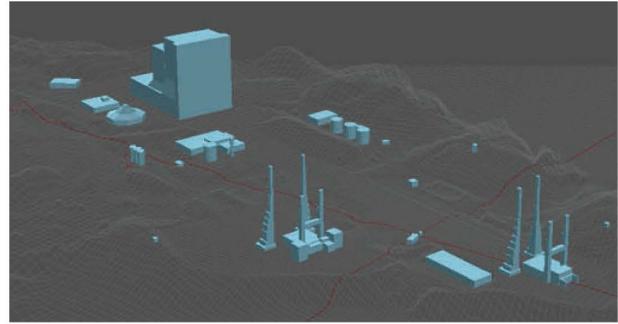


図4 発射台周辺の設備・建物を再現した様子

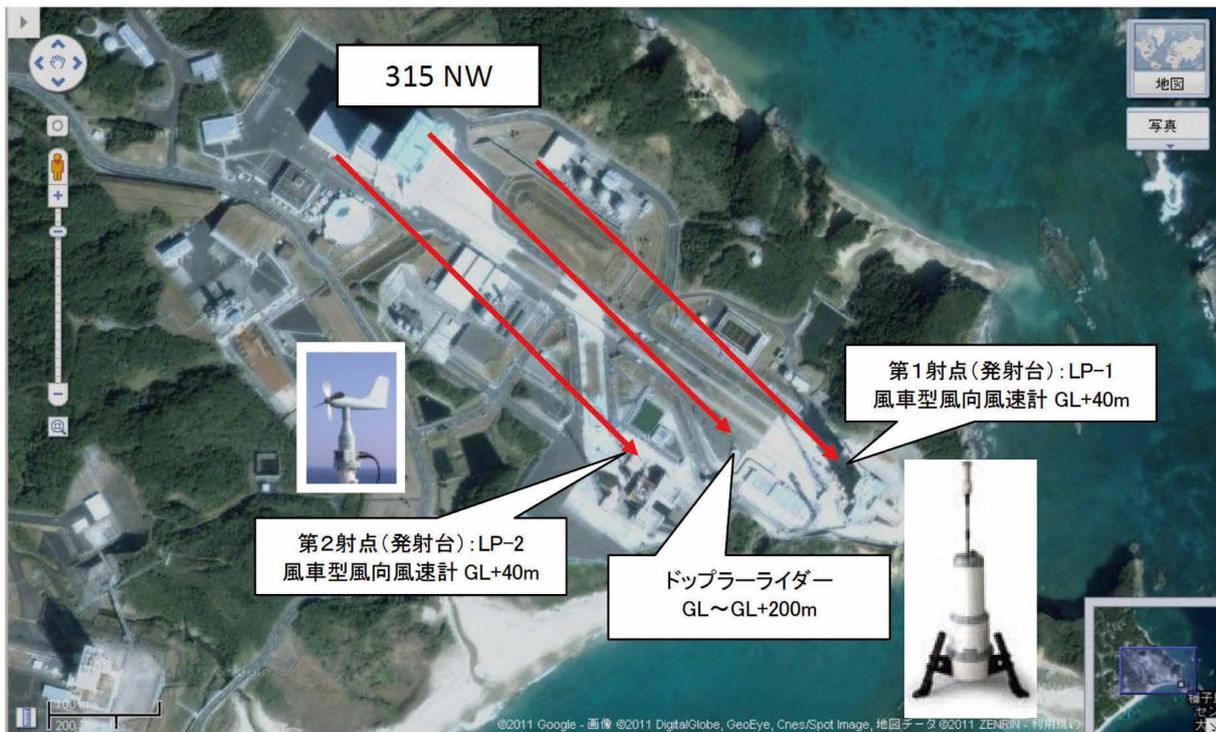


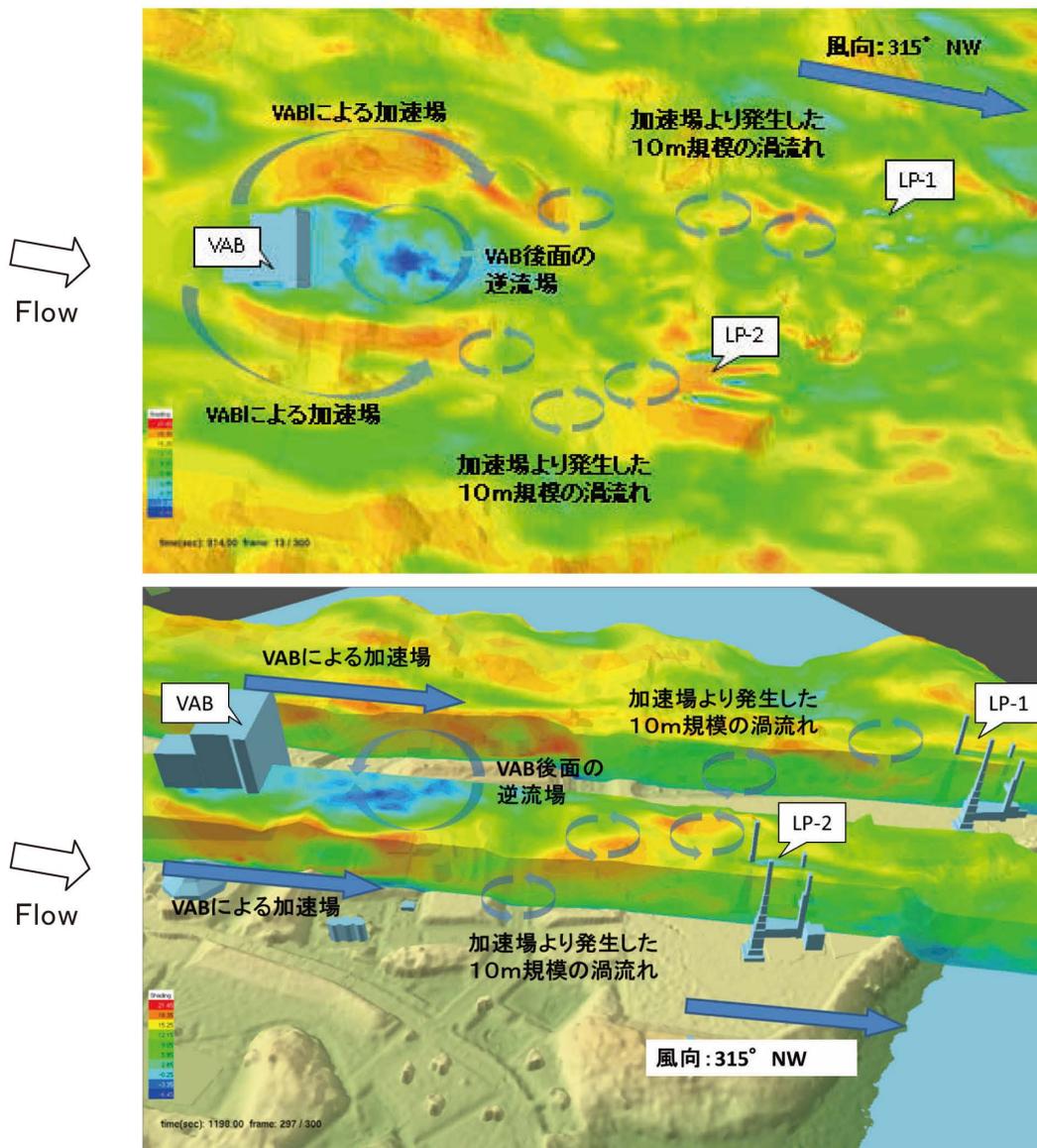
図5 解析した風向条件, 315° NW

### 3. 解析結果と観測統計値の比較・評価

冬季の種子島宇宙センターにおいて卓越する北西風の解析結果に関して、観測値との比較を行った。

図6に種子島宇宙センターの解析事例を示す。計算格子数は約300万点である。計算機は汎用的なデスクトップPCを用いた。その構成は下記の通りである。CPU: インテルCore i7 (3.50 GHz)×4基、メモリ:16 GB DDR3 SDRAM、NVIDIA GeForce GTX670 (2048 MB)。計算

ステップ数は60,000回とし、解析時間には15時間程度を要した。図6には、地上高約40mの主流方向速度成分のコンター図(瞬間場)を示す。VABによる加速場と、その背後における減速場において複雑な乱流場が形成されていることが確認された。詳細に流れ場を吟味すると、VAB背後では局所的な風の循環場が形成され、構造物周辺で加速された風が渦流となり、下流の発射台に到達していることも確認できた。これらの複雑な流



#### 計算条件

- 風向: 北西315°
- 代表長さスケール: 80m (VAB高さ)
- 領域サイズ: 約1,500m(x方向)×約1,500m(y方向)×約500m(z方向)
- 計算格子数: 200(x方向)×200(y方向)×80(z方向)点, 約300万点

図6 北西を対象にした解析事例(瞬間場), 種子島宇宙センターロケット発射台付近

動現象は、現状の風車型の風向風速計等の観測手法で捉えることは非常に困難であり、Airflow Analyst®によって初めて3次元の空間構造として大規模に捉えることに成功した。

解析結果の定量的な検証として、観測値との比較・検討を実施した。その結果、風の空間構造としての平均風速の鉛直プロファイル、また動的な特性としての乱流強度の両者ともに、解析結果・観測結果は良好な対応を示した。下記にその詳細を示す。

最初に、平均風速の鉛直プロファイルの比較・評価について述べる。比較条件とパラメータの詳細は表1に示す通りである。ドップラーライダー(観測値)については、図5に示すLP-1、LP-2のそれぞれの発射台の中間地点において観測を実施した。約1か月にわたり観測した結果の中から、風向が北西315°のケースの平均値のみを抽出した。図7に示す通り、11月は各風向の風がほぼ同じ頻度で発生しており、観測期間としては理想的であった。観測点は地上高2、10、40、60、100、200mの合計6高度とした。解析結果については、Airflow Analyst®により得られた600秒間の風の平均値について、ドップラーライダーと同様、地上高2、10、40、60、100、200mの合計6高度で出力した。図8には、解析結果および観測結果の比較を示す。地上付近では若干の差異が見られるが、地上高200mまでの各高度面において両者は良好な一致を示した。

次に、発射台近傍の乱流強度について風向風速計で得られた観測値との比較を行った。観測値には、図5に示すLP-1とLP-2それぞれの地点における地上高40mの風車型の風向風速計のデータを利用した。比較条件の詳細は表2の通りである。観測期間は2007~2012年の5年間分、観測周期は1秒毎、データとしては10分平均値、最大値、最小値をそれぞれ適用した。図9に解析結果および観測結果の比較を示す。観測値の平均値に対し、解析結果は良好な一致を示した。なお、乱流強度は以下のように定義した。乱流強度： $I = \sigma / U_{ave}$  ( $U_{ave}$ : 毎秒データの10分平均)

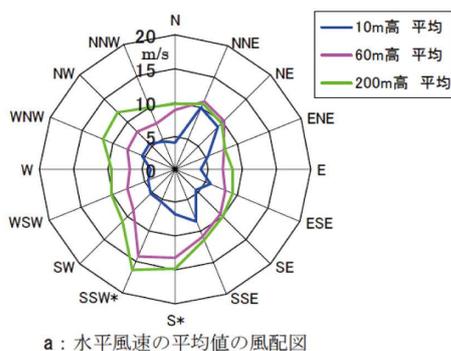


図7 ドップラーライダーによる観測結果(風配図)

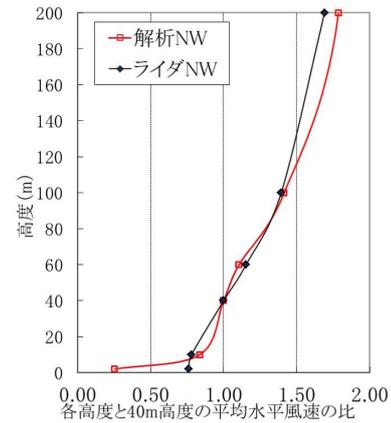


図8 風速の鉛直プロファイルの比較  
(赤: 解析結果, 黒: 観測結果)

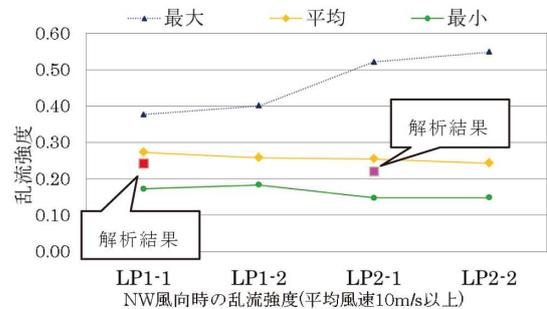


図9 乱流強度の比較  
(赤, 桃: 解析結果, 青, 黄, 緑: 観測結果)

表1 解析値・観測値の比較(風速の鉛直プロファイル)

観測値	解析値	評価 パラメータ
ドップラーライダー (LP-1, LP-2間)	Airflow Analyst®	水平風の鉛直 プロファイル
315° 風向時平均 (2011.11月)	315° ケース 600秒(10分)平均	地上~200m (6高度)

表2 解析値・観測値の比較(乱流強度)

観測値	解析値	評価 パラメータ
風向風速計 (LP-1, LP-2)	Airflow Analyst®	乱流強度
315° 風向時平均 (2007.3.1~ 2012.2.29)	315° ケース 600秒(10分)平均	地上高40m (1高度, 2地点)

## 4. 結言

ロケット打上げに伴う局地的な地上風を対象として、数值流体シミュレーション技術(CFD)と地理情報システム(GIS)との親和性を深めたAirflow Analyst®(エアフローアナリスト)による数值風況予測を試行した。

特に、ロケット打上げ時に監視すべき局所的な地上風の空間構造として、風速の鉛直プロファイルおよび乱流強度を解析した。得られた解析結果は、ドップラーライダーによる風速の鉛直プロファイル、および風車型の風向風速計による乱流強度と比較した。その結果、両ケースともに解析結果と観測結果は良好な対応を示し、複雑な地形や大型ロケット組立棟(VAB)等の建物による風の局所的な流れの変化や、乱流諸量を詳細に再現することに成功した。

以上より、現在開発が進められているAirflow Analyst®は、ロケット打上げを対象とした局所的な地上風解析ツールとして極めて有望な候補となることが示された。今後、さらなる詳細な検証作業を進め、ロケット打上げに向けた具体的な適用方法および定量的な適用効果について明らかにするべく、さらなる取り組みを継続する。

## 謝 辞

本報は、九州大学応用力学研究所、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、(株)環境GIS研究所との共同研究「ロケット打上げにおける地上風の空間構造の研究:研究代表者 内田孝紀」の研究成果を報告するものである。ここに記して、関係者に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] 内田 孝紀, 荒屋 亮, 福岡市街地を対象とした大規模数值風況予測, 九州大学応用力学研究所報, 第142号, pp.55-62, 2012
- [2] T.Uchida and Y.Ohya, Micro-siting technique for wind turbine generators by using large-eddy simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- [3] 内田 孝紀, 大屋 裕二, 3次元数值モデルによる九大新キャンパスの風況シミュレーション, 九州大学情報基盤センター年報, 第2号, pp.99-106, 2002
- [4] 内田 孝紀, 大屋 裕二, 3次元数值モデルによる九大新キャンパスの風況予測シミュレーション—第2報建物群まわりの風環境予測—, 九州大学情報基盤センター年報, 第3号, pp.57-66, 2003