

複雑地形上における気流解析 Wind Analysis over Complex Terrain

- 大戸博仁, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, E-mail: 1te10675r@gmail.com
- 内田孝紀, 九州大学, 福岡県春日市春日公園 6-1, E-mail: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp
- 谷山賀浩, 東芝, 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-4, E-mail: yoshihiro.taniyama@toshiba.co.jp
- 大迫俊樹, 東芝, 神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34, E-mail: toshiki.osako@toshiba.co.jp

Hirohito OHTO, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Fukuoka, Japan
 Takanori UCHIDA, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Fukuoka, Japan
 Yoshihiro TANIYAMA, TOSHIBA Corporation, 2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Japan
 Osako TOSHIKI, TOSHIBA Corporation, 72-34, Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, Japan

Recently, the new wind farm has been successfully built in Nagashima island, Kagoshima prefecture. This site is located in complex terrain, and flow pattern is also thought to be complex. In this site, field observation has been conducted using Doppler LIDAR called WINDCUBE v2. In addition to the field observation, we have analyzed flow with CFD and wind tunnel experiment. From the comparison of CFD and field observation, we found the condition of real wind which has good agreement with the result of CFD.

1. 背景・目的

近年, 化石燃料の過大な使用による地球温暖化などへの関心の高まりから, 再生可能エネルギーへの注目が高まっている. その中でも, 風力発電は最も成熟した発電方法の一つである. しかし, 山岳地形が大部分を占める日本においては, 複雑地形に起因する乱流の影響が無視できないため, 風車の設置場所には注意を払う必要がある.

現在, 我々は複雑地形上の気流を高精度でシミュレーションできる技術(RIAM-COMPACT)を開発中であり, 数値計算のみを用いて風車の立地点を決定できるようにシミュレーションの精度を高めることを目標としている. 本研究では, 数値計算上の流れが実スケールのどの風速域を表現しているのかということを見つけることに焦点を絞っている.

2. 対象とするウィンドファーム

鹿児島県長島町に位置し, 定格出力 2MW の風車 3 基からなるウィンドファームを対象として研究を行っている(図 1 参照).



図 1 対象のウィンドファーム
(出典: 国土地理院ホームページのコンテンツを加工して作成 <http://www.gsi.go.jp/index.html>)

3. 野外観測

風車 No2 近傍にドップラー・ライダー WINDCUBE v2 を設置し, 高度 40m~260m まで, 20m 間隔で風の情報を取得している(表 1 参照). なお, 本機器の精度は風況観測ポールとの比較により, 十分な精度を有していることが確認されている(図 2 参照).

今回は表 2 に示すデータを分析した. 図 3 に, 全期間の時系列データを示す. 乱れについては, 標準偏差を地上 260m の風速で除して無次元化している. この時系列データから風速分布・風向分布(図 4・5)を調べると, 北西風が卓越し, 平均風速はかなり高いことが分かった.

時系列データを見ると, 低風速域(点線部)では風が安定せずに風向が頻繁に変化し, 乱れが大きくなっていることがわかる. 一方, 高風速域では風は安定し, 風向変化は緩やかで, 乱れは小さくなっていることが読み取れた.

表 1 WINDCUBE v2 の諸元

計測点	40 ~ 260m
計測周期	1s
計測点数	12 点

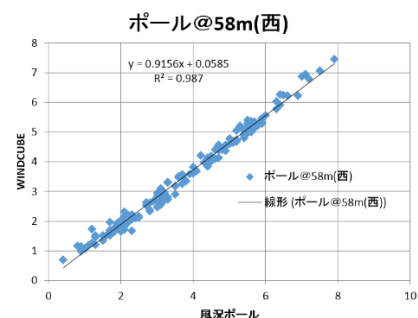


図 2 WINDCUBE と風況観測ポールで測定した風速の相関

表 2 観測データ

期間	2015/1/10 ~ 1/18
ケース数	1125 cases (10min × 1125 = 7.6days)

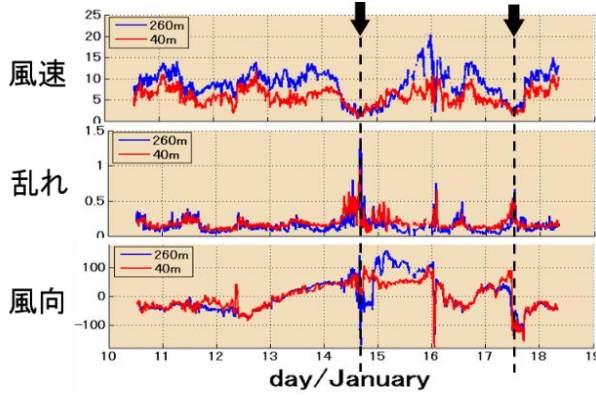


図 3 時系列データ

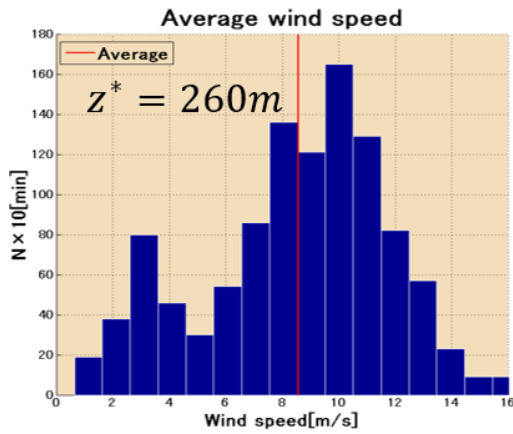


図 4 風速分布

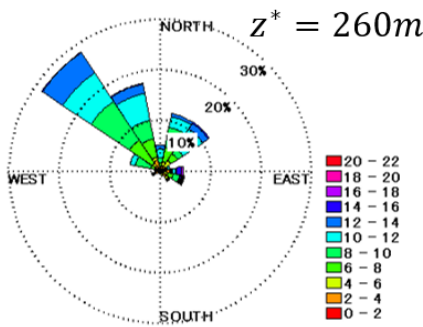


図 5 風向分布

4. 数値計算

LES 乱流モデルに基づいた RIAM-COMPACT(Uchida 2014)を用い、対象サイト上の流れの数値シミュレーションを行った。本研究では、一般座標系コロケート格子を用いて計算を行った。コロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し、セル界面に反変速度にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は有限差分法(FDM: Finite Difference

Method)に基づき、乱流モデルには LES(Large Eddy Simulation)を採用し、標準 Smagorinsky モデル (Smagorinsky 1963)を用いた。LES では流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を、計算格子よりも大きな GS(Grid Scale)成分の渦と、それよりも小さな SGS(Sub Grid Scale)成分の渦に分離する。GS 成分の大規模渦は、モデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、SGS 成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用は、SGS 応力を物理的考察に基づいてモデル化される。

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S 法) (Kim and Moin 1985)に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次化緩和法(SOR 法)により解く。空間項の離散化はナビエ・ストークス方程式の対流項を除いて全て 2 次精度中心差分とし、対流項は 3 次精度風上差分とする。3 次精度風上差分の数値拡散項の重みは、通常使用される河村-桑原スキームの $\alpha = 3$ に対して、 $\alpha = 0.5$ とし、その影響は十分に小さくする。

表 3 計算の設定

CFD モデル	RIAM-COMPACT
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル
地表面の粗度	考慮していない
地表面の境界条件	no-slip 条件
風向	北西
代表高さ	385m
$h(=z_{max} - z_{min})$	
Re 数($=U_{in}h/\nu$)	10^4
時間刻み Δt	$0.002U_{in}h/\nu$
計算領域サイズ	$(23 \times 13 \times 5)h$
メッシュ数	$451 \times 201 \times 51$
総メッシュ数	約450万点
x方向メッシュ幅	$(0.02 \sim 0.88)h$
y方向メッシュ幅	$(0.027 \sim 0.54)h$
z方向メッシュ幅	$(0.0003 \sim 0.6)h$

入り口における流入風速分布は、以下のべき法則を用いた。 U_{in} は、 $z = z_G$ の代表風速で無次元化されている。

$$U_{in} = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha \quad (z < z_G)$$

$$U_{in} = 1.0 \quad (z \geq z_G)$$

本計算では、

$$z_G = 400, \quad \alpha = 1/5$$

として流入風速分布を設定した。

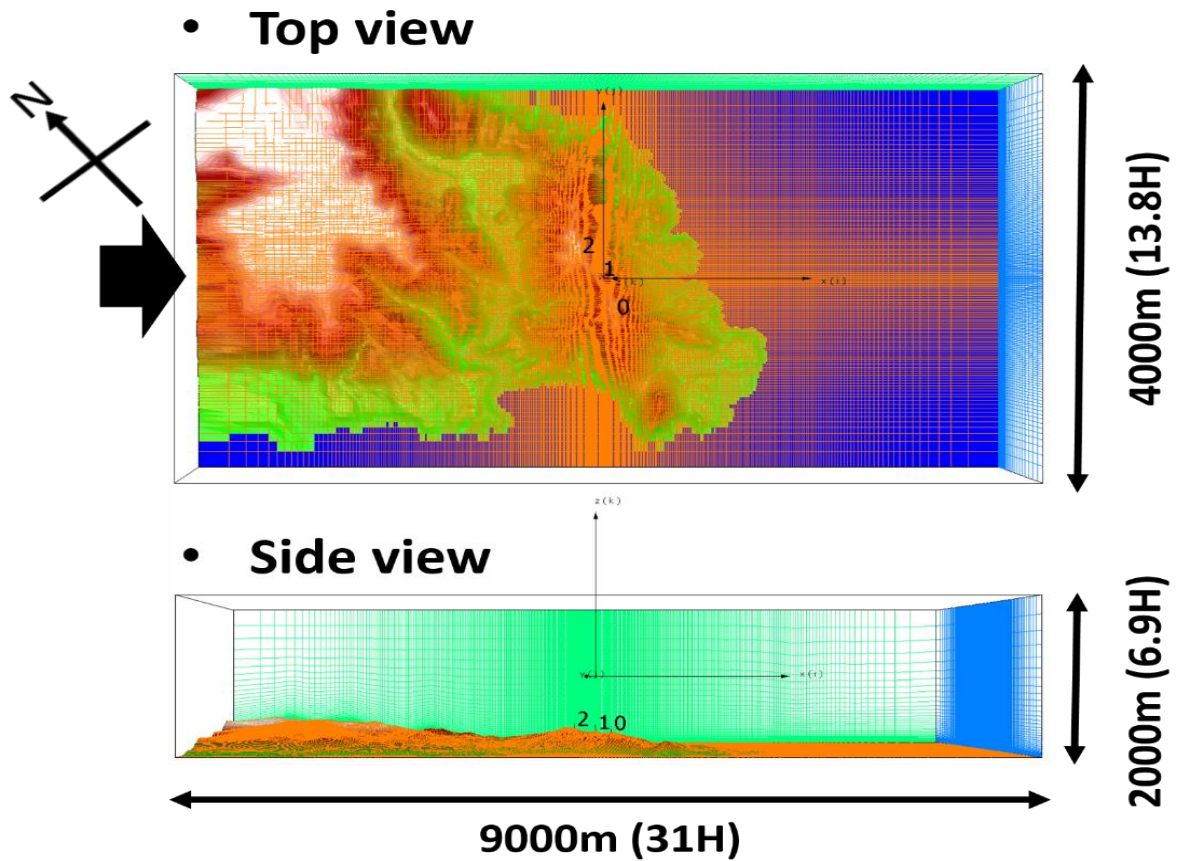


図 6 計算領域

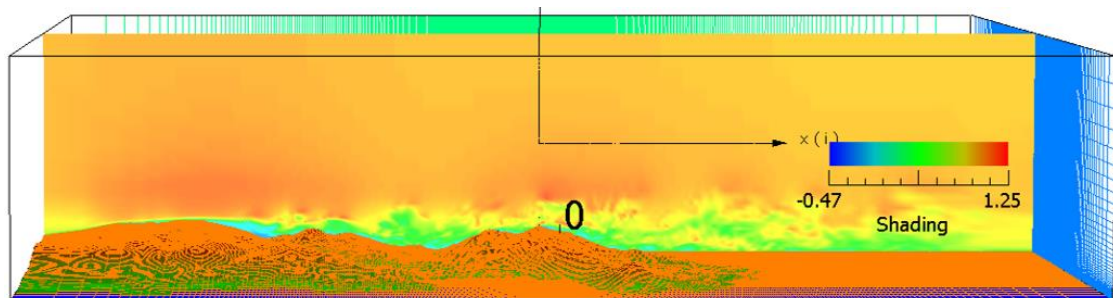


図 7 風車 No2 ($y = 0$) 断面における無次元風速の分布(瞬間場)

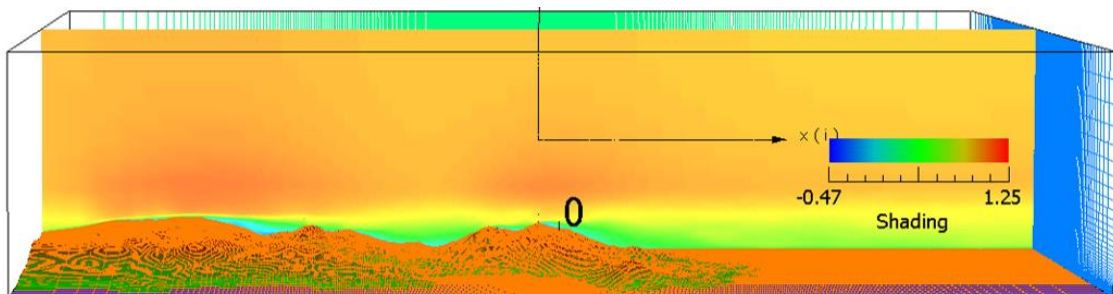


図 8 風車 No2 ($y = 0$) 断面における無次元風速の分布(平均場)

急峻な地形背後には剥離領域が発生し、風速値が負となる部分が発生している。複雑地形上の流れをうまく計算出来ていることがわかる。

5. 風洞実験

本研究の風洞実験は、九州大学応用力学研究所が所有する温度成層風洞を用いて行った。風洞は開放型の吸い込み式で長さ13.5m ×幅1.5m×高さ1.2mの測定洞を有する。

1/2900縮尺モデルを用い、風速1.5m/sで実験を行った。風向は対象サイトにおける主風向である北西とした。風車 No0~No2と、その他数点においてI型熱線プローブを用いて鉛直方向の数点に対して風速を計測した。各計測点60s間計測を行った。

I型熱線プローブはスカラー速度のみ計測可能なため、逆流域においては有意な計測を行うことはできない。そこで、計測を行う前にスモークワイヤー法を用いて計測地点において逆流が発生していないか確認するとともに、全体的な流れを確認した。流れの可視化により、計測地点において逆流が発生していないことを確認した。

表4 風洞実験の設定

風向	北西
代表高さ	約0.1m
$h(=z_{max} - z_{min})$	
代表風速 U_{in}	1.5m/s
Re 数($=U_{in}h/\nu$)	10^4
サンプリング周波数	500Hz
カットオフ周波数	200Hz
計測時間	60s
模型サイズ	約1.0 × 1.0 × 0.1m

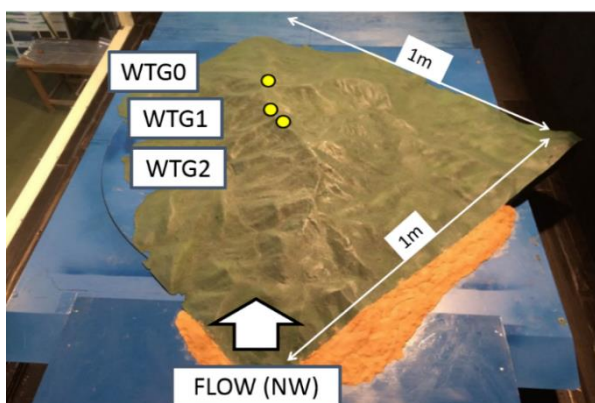


図6 1/2900縮尺模型

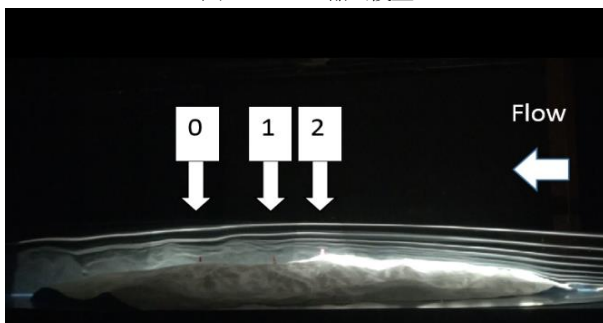


図7 スモークワイヤー法による可視化

6. 結果の比較

WINDCUBE v2による野外観測データと、数値計算・風洞実験のデータを比較・分析した。野外観測データは、上空40~260mの1s毎のデータが得られているが、その時系列データから、10分ごとの平均データを生成し、得られた複数の10分平均データと数値計算・風洞実験のデータを比較している。

図9は、WINDCUBEから得られた全10分平均データをプロットしている。速度は、 $z^* = 260m$ の風速で無次元化されている。数値計算の鉛直方向速度分布から大きく異なるデータが多数存在していることがわかる。

図10は、図9で示したWINDCUBEの垂直方向速度分布、数値計算の垂直方向速度分布間で、全ケースについて相関係数をとったものである。横軸には $z^* = 260m$ での風速をとった。上空風速が早くなるほど数値計算の結果と相関が高いことが見て取れる。上空風速が9 m/s以上では、非常に高い相関が見られる。

この結果から、次は $z^* = 260m$ での風速が風速10m/s以上の野外観測データを抽出し、数値計算の結果とともにプロットした(図11)。この風速域では、数値計算は実際の風を良く再現することができていると言える。

図12では、 $z^* = 260m$ での風速で野外観測データを分類し、それぞれの風速域での平均値をプロットしている。この図からも、数値計算はより早い風速域の風を再現していることが見て取れる。

表5 野外観測データ数

風向	風速域	ケース数
北西	全風速域	318
	10m/s 以上	132

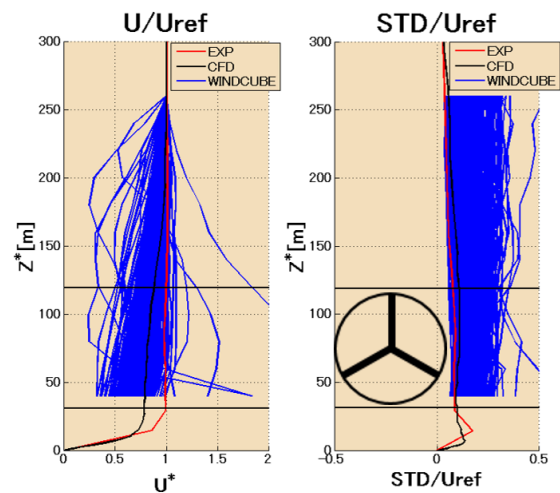


図9 全風速域の比較

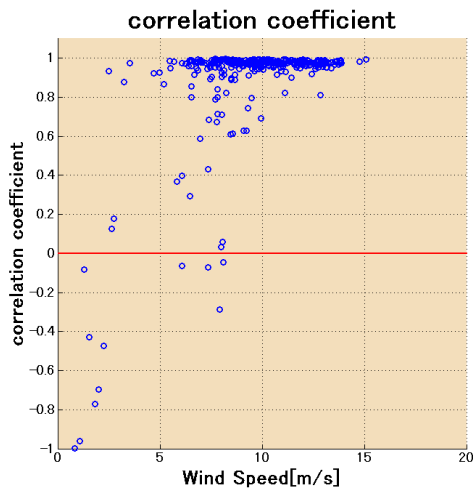


図 10 野外観測データ・数値計算の垂直方向速度分布の相関係数

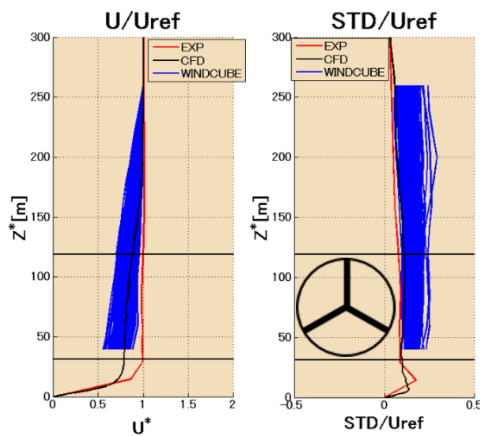


図 10 風速10m/s以上の比較

表 6 野外観測データの分類

風速域	マーカー	ケース数
0~4 m/s	■	12
4~8m/s	■	70
8~12m/s	■	180
12~m/s	■	56

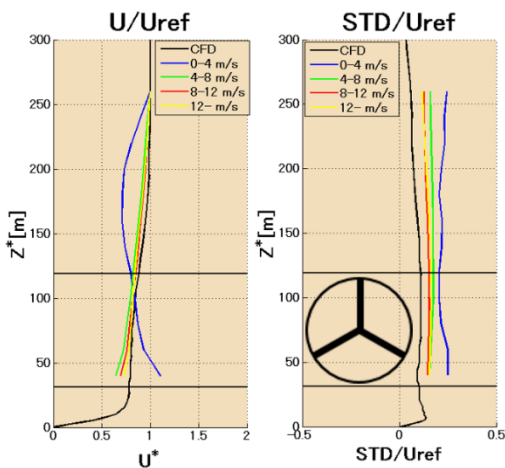


図 11 風速域毎の平均値

7. 考察・結論

数値計算と野外観測データの比較からは、低風速域の風を数値計算において再現することは難しいということが分かった。理由は、低風速域では風向変化が頻繁に変化し、それに伴って風の乱れも大きくなるからである。

一方、高風速域の風は数値計算を用いて比較的良好に再現することができた。高風速域では、風が安定しており風向変化もあまり見られず、数値計算で用いた流入風でドップラー・ライダー上流側の垂直方向速度分布をうまく再現できているからであると考えられる。

低風速域の風を数値計算上でうまく再現するためには、流入風の乱れと風向を時々刻々と変化させる必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、株式会社東芝との共同研究であり、多大なる援助を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1. Uchida, T. Validation Testing of the Prediction Accuracy of the Numerical Wind Synopsis Prediction Technique RIAM-COMPACT for the Case of the Bolund Experiment. s.l.: Report of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, No.147, September 2014, pp7-14, 2014.
2. Kajishima, T. Upstream-shifted interpolation method for numerical simulation of incompressible flows. s.l.: Japan Soc. Mec. Eng. B, 60-578(1994), pp.3319-3326, 1994.
3. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations. 1963: Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91(1963), pp.99-164.