

非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTを用いた ウィンドファーム風況診断

内田 孝紀* 大屋 裕二* 荒屋 亮** 田辺 正孝*** 川島 泰史****

(2006年1月31日受理)

Diagnosis of Flow Characteristics in Wind Farm using the Numerical Model "RIAM-COMPACT"

Takanori UCHIDA, Yuji OHYA, Ryo ARAYA, Masataka TANABE and Yasushi KAWASHIMA

E-mail of corresponding author: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

We are developing the numerical model called the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The object domain of this numerical model is from several m to several km, and can predict the airflow and the gas diffusion over complex terrain with high precision. The spread to the market has already been begun by three enterprise companies. The estimation of the annual electrical power output is also possible now based on the observation data.

In the present study, wind simulation of an actual wind farm was executed using the high resolution elevation data. As a result, a suitable point for wind power generation and an improper point were clarified. This cause was found to be a change in slight ups and downs of geographical features.

Key words : RIAM-COMPACT, Complex terrain, High resolution elevation data

1. 緒言

現在,地球温暖化を防ぐため,CO₂の大幅な削減が緊急課題となっている。これに伴い,クリーンで環境に優しい風力エネルギーの有効利用に注目が集まっている。日本でも,2010年度の300万KWの導入目標に向け,数基の風力発電機(WTG, Wind Turbine Generator)から,複数台のWTGから構成される大型のウィンドファーム(WF, Wind Farm)に至るまで,風力発電施設は急速に増加している。

我々の研究グループでは,数(十)km以下の狭領域に的を絞り,RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する非定常・非線形風況シミュレータを開発している¹⁻³⁾。最大の特徴は,PC1台で動作し,国内外を問わずあらゆる市街地から複雑地形にまで適用可能で,かつ,局所域の風の流れをアニメーションとして視覚化できる点にある。RIAM-COMPACTは,(有)流体物理研

究所(042-373-1264),西日本技術開発(株)(火力開発部,092-713-0470),(有)環境ジーアイエス研究所(092-847-0105)の産学連携で提携した企業により,市場への普及が既に開始されている。

最近になり,建設後のWFにおいて,稼働率が当初の予想を下回る,すなわち,発電出力が著しく悪いWTGの問題が顕在化しつつある。この主たる原因は,WTG近傍のわずかな地形起伏の変化が起源となり,そこから機械的(直接的)に発生する風の乱れ(地形乱流)であると考えられる。また,地球温暖化に伴い,WF内の卓越風向や平均風速の経年変化⁴⁾が原因になる場合も考えられる。

いずれにしても,稼働中のWFにおいても定期的な風況評価が必要であると考えられる。そこで我々の研究グループで提案するのは,RIAM-COMPACTによるWF風況診断である。これには,最新の土地造成状況を反映した,10m以下の高解像度標高データ^{5,6)}が不可欠である。具体的には,既存のWFに対して精緻な風況シミュレーションを実施し,WTGの配置が現状維持で良いのか,あるいは,運転状況の悪いWTGは移動が必要な

* 九州大学応用力学研究所, 092-583-7776, takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

** (有)環境ジーアイエス研究所, 092-631-6406, araya@engisinc.com

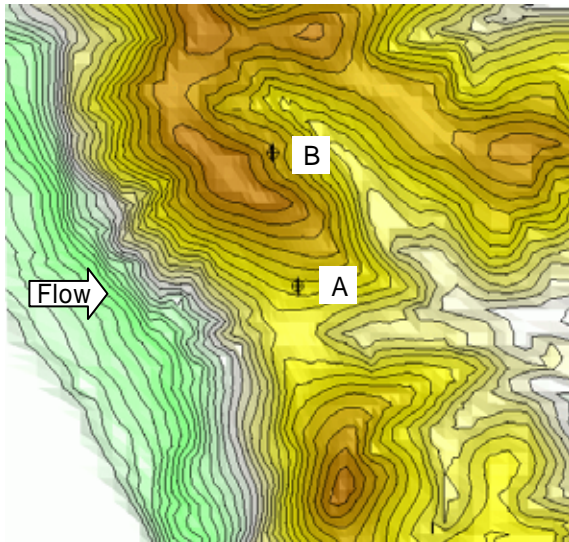
*** (有)流体物理研究所, 042-373-1264, tanabe@ifpj.com

**** 西日本技術開発(株), 092-713-0470, y-kawashima@wjec.co.jp

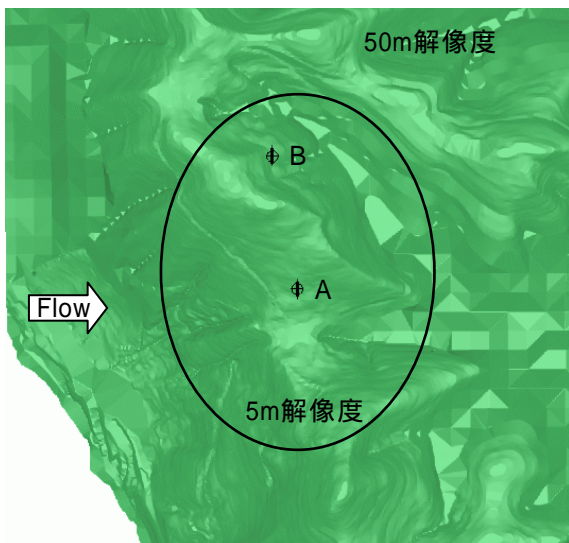
のか、コスト面からみて停止させるべきなのかといったWF内のWTG再配置問題を支援するものである。RIAM-COMPACTに実装されている風力発電量評価ツール(RC-Explorer)を併用することで、再配置後のWTG単体の発電量からWF全体の発電量を試算し、経済的な観点からの再評価も可能である。言い換えると、我々の提案するWF風況診断は、WTGの立地危険度調査(ウィンドリスクマネジメント)を行い、WTGの建設を避ける地点を選定することである、とも言える。本報では、既存のWFに対して風況診断を行った結果を報告する。

2. RIAM-COMPACTによるWF風況診断

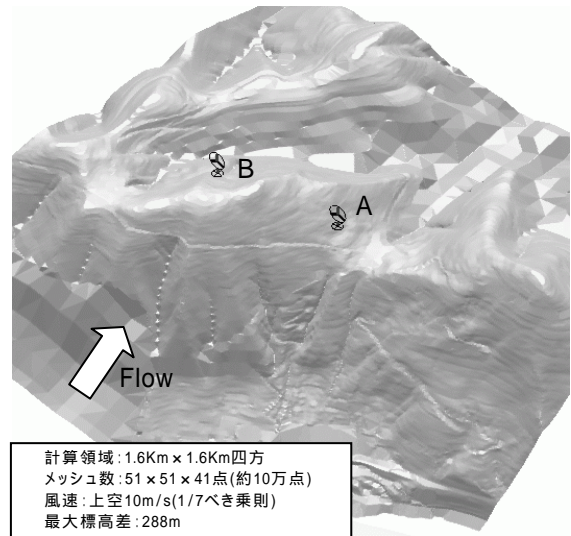
図1には、本研究で対象にしたWTG立地点周辺の地形と計算条件を示す。図1(b)に示すように、



(a)標高データのコンター図(上から見た様子)



(b)平面図(上から見た様子)



(c)鳥瞰図

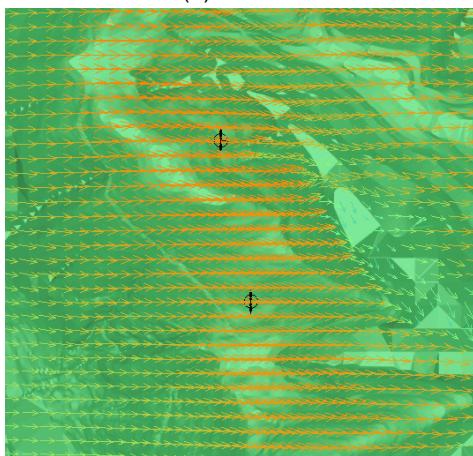
Fig.1 Geographical features around WTGs

本研究では、WTG立地点周辺をDXF形式のCADデータから5m解像度で詳細に構築し、その周囲は国土地理院の50m標高データと滑らかに接続させた。このように、地理情報システム(GIS)の技術を活用し、紙地図やDXFファイルに基づいて独自に構築した高解像度標高データと、既存の標高データをマージさせて地形データを効率的に作成することを実現した。自治体や電力事業者が保有している紙地図やCADデータは、最新の土地造成状況を反映している。よって、国土地理院の50m標高データなどと比較して格段に高い精度を有する。GISに基づいて作成された標高データは、RIAM-COMPACTで即座に利用可能である。標高データの作成期間は図面1枚あたり数日程度である。同様の手法により、レーザープロファイラーで測定された地形データや、現在無償で公開されている全世界を対象にした1秒メッシュ(約30m)のスペースシャトル地形データ(SRTMデータ)の利用も可能である。もう一つの特長として、RIAM-COMPACTでは実スケールのロータ直径、ハブ高さ、受風面の風向、表示カラーなどを設定し、十進経緯度(日本測地系(旧測地系)、世界測地系(新測地形)の両者に対応)で立地点を指定すれば、WTGの線図を計算領域中に挿入することが可能である(図1を参照)。本研究で対象にしたWTGは、ロータ径52m、ハブ高さ44mである。便宜上、WTG-A、WTG-Bと称し、図中には記号A、Bで示すものとする。

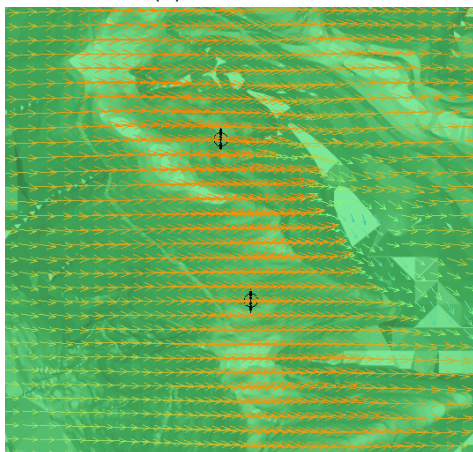
以上のように作成した高解像度標高データを入力データとして、非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTにより精密な風況シミュレーションを行う。以下では、計算結果について説明する。



(a)時間T1



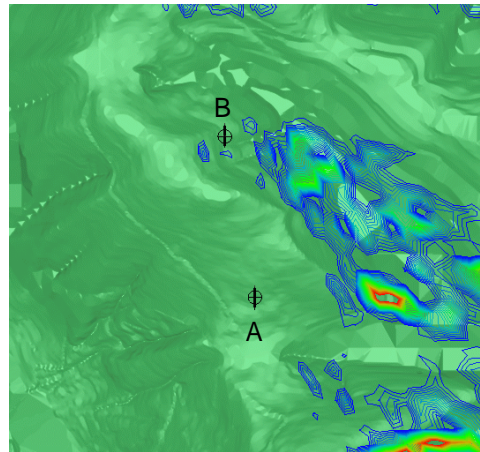
(b)時間T1+ ΔT



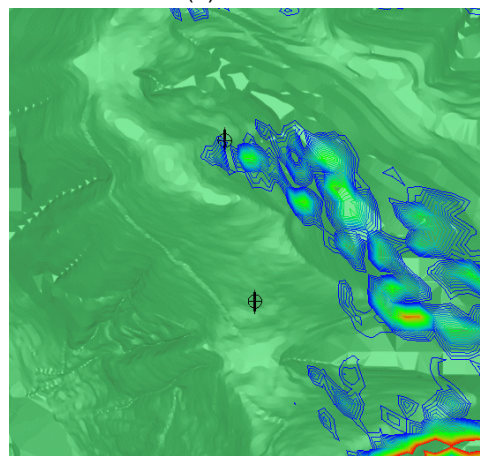
(c)時間T1+2 ΔT

Fig.2 Time evolution of velocity vectors in the height of the hub ($z^*=44\text{m}$)

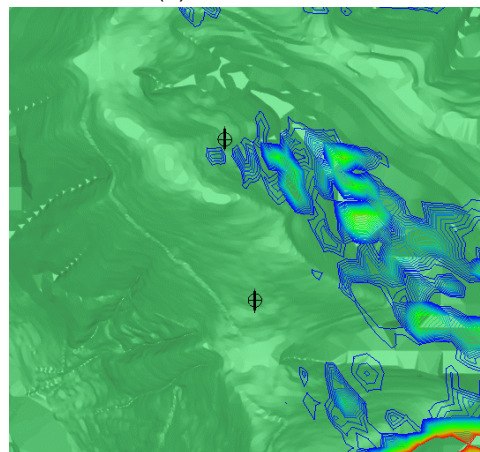
図2には、WTGハブ高さにおける速度ベクトルの時間変化(瞬間場)を示す。ここで示す静止画では分かりにくいですが、アニメーションを作成し、これを観察するとWTG-A、WTG-B周辺の風況の差異が容易に理解される。WTG-Aに比べてWTG-Bでは速度ベクトルの変化が大きい。WTG-AとWTG-Bの



(a)時間T1



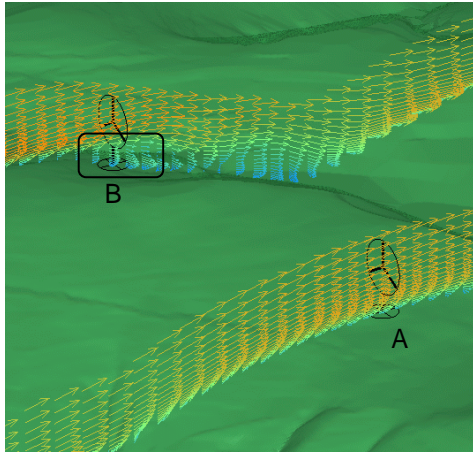
(b)時間T1+ ΔT



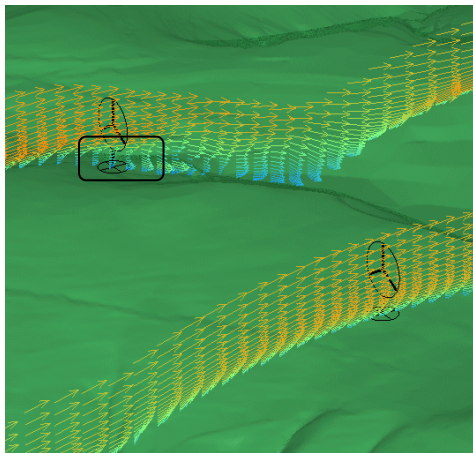
(c)時間T1+2 ΔT

Fig.3 Time evolution of gust ($=|u-U_{ave}|$) in the height of the hub ($z^*=44\text{m}$)

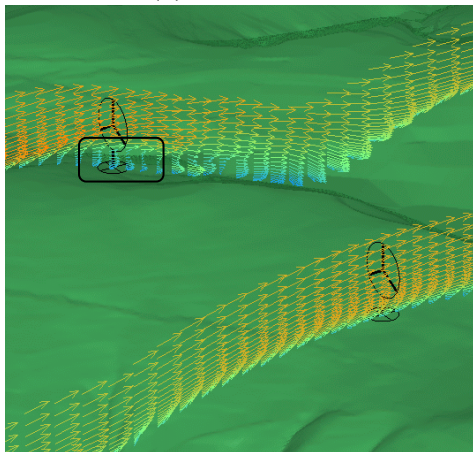
両者の風況の違いをより明確にするため、図2に対応した主流方向の速度変動成分 $|u| (=|u-U_{ave}|)$ のコンター図(瞬間場)を示す。ここで、 u 、 u 、 U_{ave} は同一格子点上の無次元値であり、0.05から0.5までを30分割して表示している。図3を吟味すると両者の違いは明らかである。WTG-Bの周辺には速度



(a)時間T1



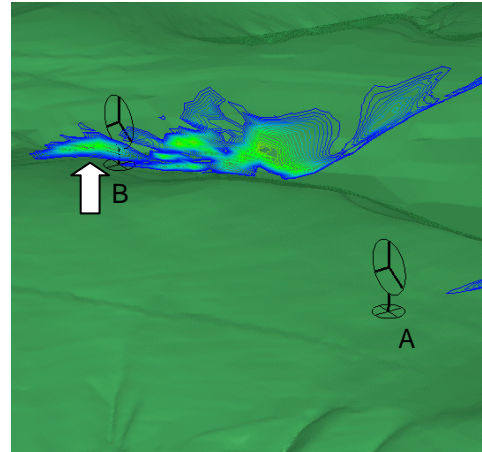
(b)時間T1+ T



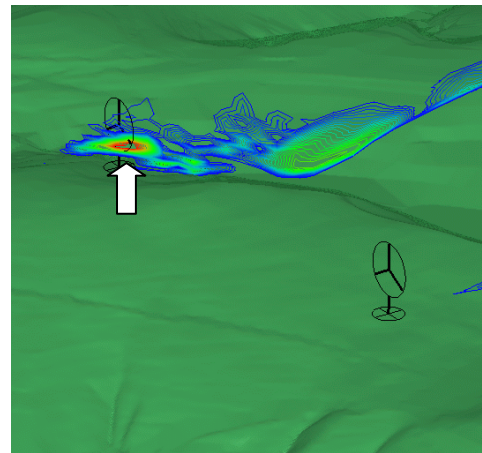
(c)時間T1+2 T

Fig.4 Time evolution of velocity vectors in the vertical plane of each WTG

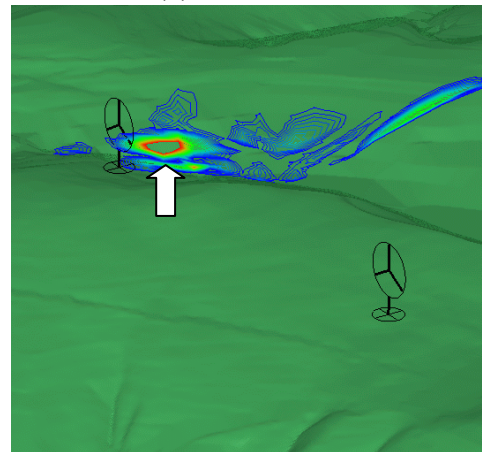
変動成分のコンターが出現しているのが分かる。特筆すべきは、時間とともにその分布が変化しているということである。このメカニズムは後述する。このような時間変化は非定常な風況シミュレーションを実施することで捉えられるものである。それぞれのWTGの鉛直断面内の分布(瞬間場)を表示する



(a)時間T1



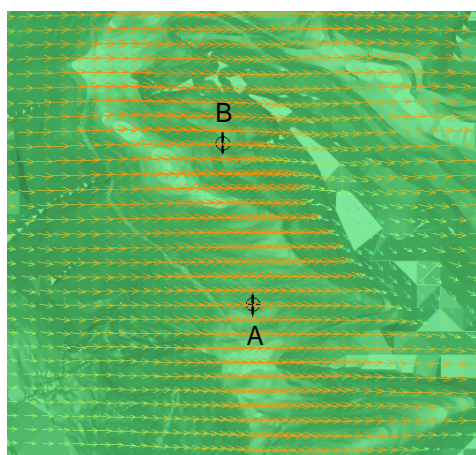
(b)時間T1+ T



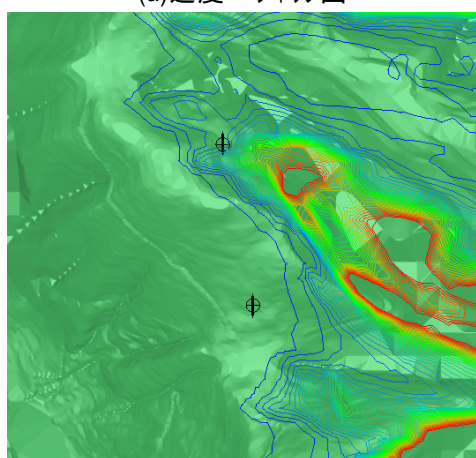
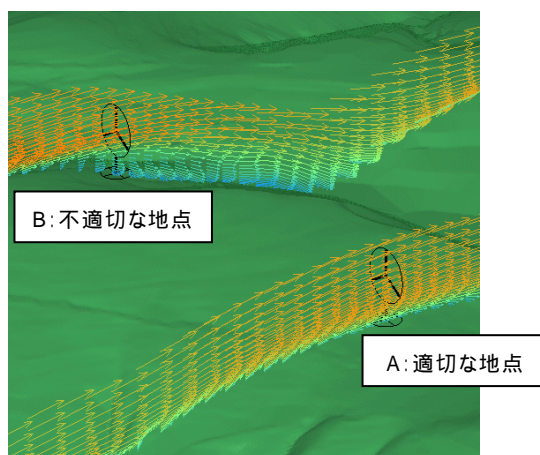
(c)時間T1+2 T

Fig.5 Time evolution of gust ($=|u-U_{ave}|$) in the vertical plane of each WTG

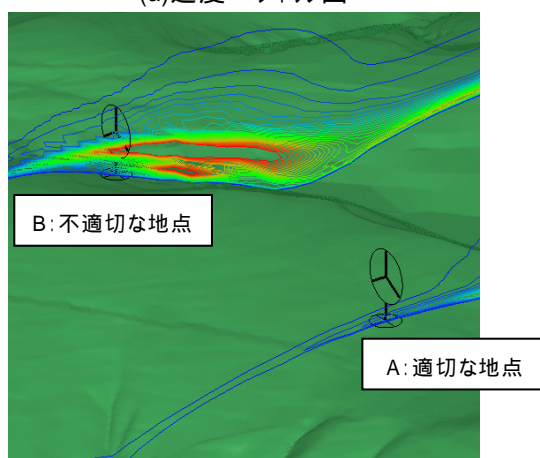
と、WTG-AとWTG-Bの両者の風況場の違いはさらに明確になる。その結果を図4および図5に示す。図4に示す速度ベクトル図の時間変化に注目する。WTG-Aでは、受風面内の全ての高さレベルにおいてほぼ一様な速度分布であるのが分かる。さらに、地形の効果による局所的な増速が確認され



(a)速度ベクトル図

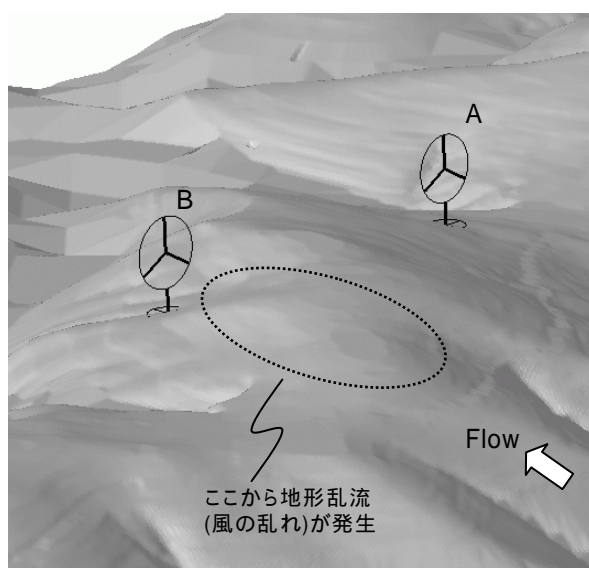
(b)乱流強度(速度変動の二乗平均値)の
コンター図Fig.7 Time-averaged field
in the height of the hub ($z=44\text{m}$)

(a)速度ベクトル図

(b)乱流強度(速度変動の二乗平均値)の
コンター図Fig.8 Time-averaged field
in the vertical plane of each WTG

る。これに対してWTG-Bの場合、逆流領域が図中に実線で示す受風面内の下方で確認される。これはWTG-Bのすぐ前方の地形起伏に起因した地形乱流の影響である。すなわち、WTG-Bは地形頂部から僅かにずれた低い地点に位置しているため、このような地形乱流の影響を受けていると考えられる(図6を参照)。ここで示すような流動現象は、最新の土地造成状況を反映した10m以下の高解像度標高データを用いることではじめて再現される。図5に注目すると、図中に矢印で示すように、速度変動の大きい領域が時間とともに移動している様子が見て取れる。アニメーションを作成し、これを観察すると、同様の現象が繰り返し生じていることが判明した。すなわち、WTG-Bのすぐ前方の地形の起伏(図6を参照)から周期的な渦放出が生じていることが明らかになった。

図7には、時間平均場に対して描いた速度ベクトル図と乱流強度(別の言い方をすると、風速変

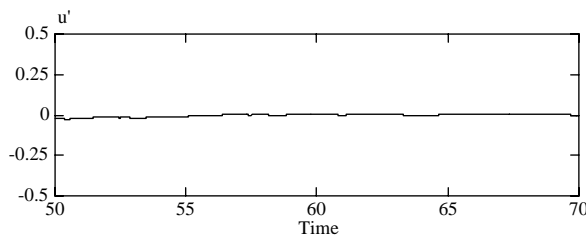
Fig.6 Closeup of geographical features
around WTGs

動の二乗平均値, 風速のrms値, 風速の標準偏差)のコンター図(0から0.2の間を30分割)を示す. 表示面はハブ中心高さの水平断面である. ここで注目して頂きたいのは, 図7(a)に示すハブ中心高さの時間平均速度ベクトル図(定常モデルの結果に相当)だけでは, これまで述べてきたWTG-Bで観察された地形乱流の影響がほとんど確認できないということである. 言い換えると, この結果のみで判断すると, WTG-Bは風の乱れの影響が少なく, かつ, 極めて風況の良い地点であるとの誤解を招きかねない. よって, 対応する乱流強度分布(図7(b)), 図8に示す鉛直断面内の分布と併記することが極めて重要となる.

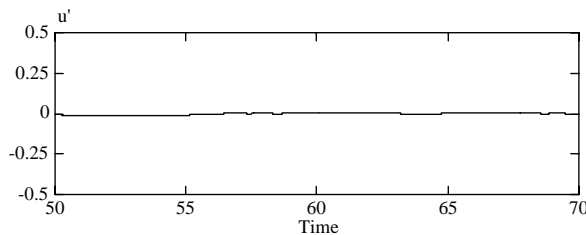
以下では, より定量的な評価を行う. 受風面の最下部である地上高18m, ハブ中心高さ44m, 受風面の最上部である地上高70mの主流方向の速度変動成分 $u' (=u - U_{ave})$ の時系列データを図9および図10に示す. これは, 図3および図5に示した物理量である. また, 横軸の時間スケールは流入風速 U_{in} と計算領域中の標高差 H で正規化された無次元値である. 図中には時系列データを採取した場所を黒点で示す. 図9に示すWTG-Aでは, 全ての高さレベルにおいて速度変動成分はほとんどゼ

ロである. すなわち, 乱れの影響は極めて小さい. 一方, 図10に示すWTG-Bでは, 特に地上高18mで非常に大きな変動振幅が観察される. これは, 図4および図5で述べた周期的な渦放出に伴う速度変動(風の乱れ)に対応している.

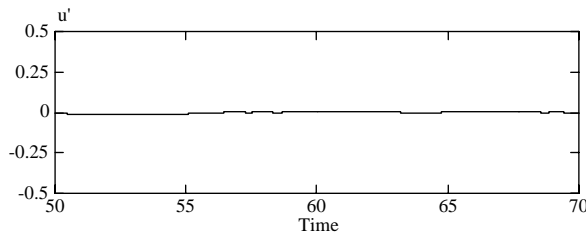
WTG-AおよびWTG-Bの立地点における平均速度の鉛直プロファイルと乱流強度の鉛直プロファイルを図11および図12に示す. 縦軸は実スケールでの地上高 z' (m)であり, 横軸は流入風速 U_{in} で正規化された無次元値である. また, 図中にはロータ径を示す. 図11(a)に示すWTG-Aでは, 図4で述べたように, 受風面内の全ての高さレベルにおいてほぼ一様な速度分布を呈しているのが分かる. さらに, 受風面の最下部である地上高18m付近では, 地形の効果による局所的な増速が確認される. これに対して図11(b)に示すWTG-Bでは, ハブ中心高さのすぐ下部で大きな速度シアが形成されている. 図11に示す結果は, 図13に示す時間平均場に対して描いた速度ベクトル図と併せて吟味するとより明確に分かる. WTGのパワーカーブは, WTGの存在は仮定せずに, ハブ中心へ流入する風速値で規定されている. また, 速度シアも5~7程度のべき乗則に従う分布が前提になっている.



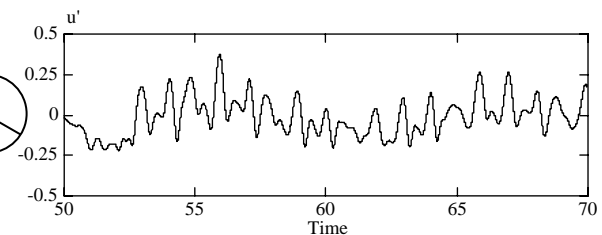
(a)地上高18m



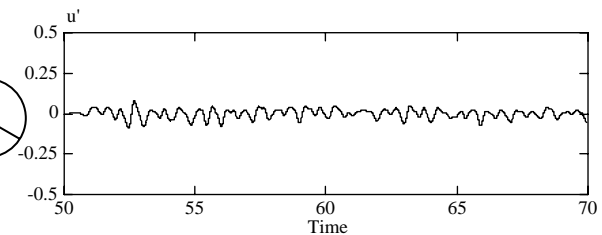
(b)地上高44m(ハブ中心高さ)



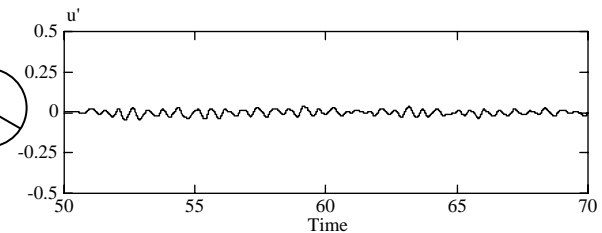
(c)地上高70m

Fig.9 Time series data of u' of WTG-A

(a)地上高18m

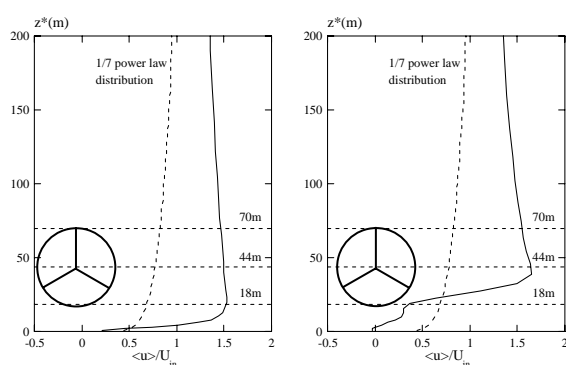


(b)地上高44m(ハブ中心高さ)



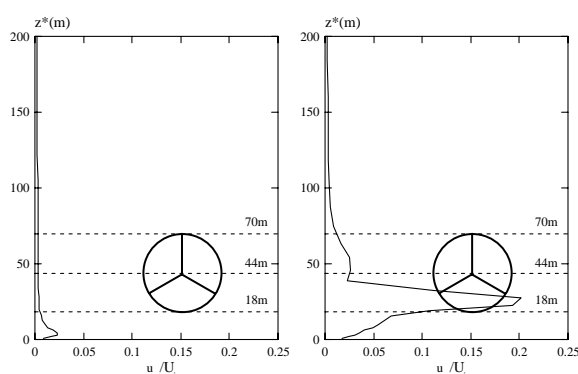
(c)地上高70m

Fig.10 Time series data of u' of WTG-B



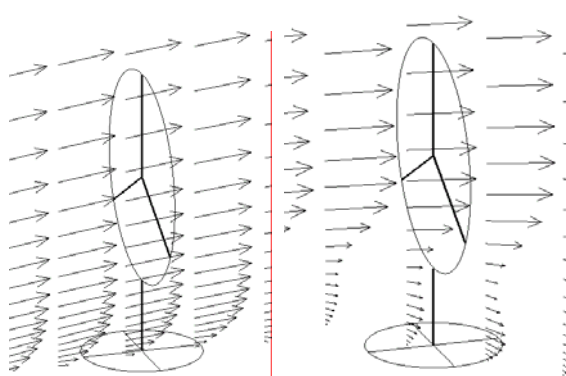
(a)WTG-A (b)WTG-B

Fig.11 Mean velocity profile



(a)WTG-A (b)WTG-B

Fig.12 Vertical profile of turbulence intensities



(a)WTG-A (b)WTG-B

Fig.13 Closeup of velocity vectors for time-averaged field in the vertical plane of each WTG

よって、ベキ法則から大きく逸脱した速度シアの下では、発電量は従来のシミュレータによる計算値を大きく下回ることになると予想される。同時に、この非常識的な大きな速度シアは、WTGのタワーの振動問題、あるいは、疲労強度の問題などと関連して今度重要になると考えられる^{7, 8)}。図12(a)に示すWTG-Aの乱流強度は、全ての高さレベルにおい

てその値は小さく、地形乱流による乱れの影響はほとんど無いことが分かる。一方、図12(b)に示すWTG-Bの場合には、地上高20m付近に極大値が出現している。これは、図11(b)で述べた大きな速度シアが存在する高さ付近に対応する。なお、本研究では、風の息に伴う乱れの影響は考慮しておらず、地形の凹凸により機械的(直接的)に形成される乱れ成分のみを検討していることを再掲しておく。

3. 結言

きめ細やかな調査が必要とされるWF風況診断では、非定常な風況シミュレーション技術と最新の状況を反映した詳細地形データの構築技術が必要であることが示された。また、風況場の可視化手法に関しても、従来までのハブ高さにおける水平断面内の速度分布だけでは不十分であり、速度変動成分の表示、これに基づいた乱流強度分布の表示、鉛直断面内の表示も必要である。同時に、これらを定量的にグラフ化(数値化)することも重要である。特に、WTGの大型化に伴い鉛直断面内の可視化と、平均速度や乱流強度の鉛直分布の表示は、今度ますます重要になると予想される。

どの程度以上の風速変動が、発電成績に悪影響を及ぼすのかを数値実験、風洞実験、野外観測から検討する必要がある。これらは今後の大きな課題である。結果として、WTG立地危険度の判断基準の策定、これに基づいた立地危険度マップの構築に繋がり、ひいては日本に適したJ-Classの風力発電の確立に大きく寄与するものと考えられる。

我々の開発する非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTは、計算結果を任意倍率で拡大・縮小する機能、3Dで多角的に表示する機能など、実務設計者が親しみやすい操作環境を備えている。さらに、既存の風力発電支援ソフト^{9, 10)}では不可能な、風の流れのアニメーション化機能を併せもつ。任意断面内・任意地点のグラフ表示機能も標準的に実装されている。よって、RIAM-COMPACTは次世代の風力発電支援ソフトとして不可欠なツールになると確信している。

最後に、今後の風力発電施設は山間部などのより厳しい場所に設置せざるを得ない。したがって、今後の風力発電施設の事業評価はより厳密に、かつより高精度に行う必要がある。今回提案した、10m以下の高解像度標高データを用いたWF風況診断は、WTG建設前の風況精査にも適用されるべきものであると考える。

謝 辞

本研究は、平成17年度科学研究費補助金(研究タイトル:流体計算技術と地理情報システムを融合した新しい防災・緊急支援対策システムの開発)、財団法人九州産業技術センター(KITEC)による平成17年度「研究開発委託事業」(プロジェクトタイトル:風力タービン候補地選定のためのPC1台によるマイクロサイティング技術の高精度化に関する研究開発)により多大な支援を頂いた。

また、(株)ウインド・エナジーの谷垣三之介氏には、本稿を作成するにあたり貴重なご意見を頂いた。

ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発 風況精査とリアルタイムシミュレーション, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.417-428, 2003
- 2) 内田孝紀, 大屋裕二, 田辺正孝, 葛生和人, 橋本晃慈: 風力タービン適地選定のためのコンピュータによるマイクロサイティング技術 実地形を対象にした非正常風況・拡散シミュレータRIAM-COMPACT, 土木施工, Vol.45, No.8, pp.49-55, 2004
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二, 田辺正孝, 葛生和人, 橋本晃慈: 風力タービン適地選定のためのコンピュータによるマイクロサイティング技術 実地形を対象にした非正常風況・拡散シミュレータRIAM-COMPACTの紹介, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.28, No.2, pp.46-51, 2004
- 4) 北谷匠子, 結城陽介, 早崎宣之, 谷川亮一: ECMWF40年再解析データを用いた風速の長期変動評価, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.223-226, 2004
- 5) 内田孝紀, 大屋裕二, 荒屋亮, 田辺正孝, 川島泰史: 流体シミュレーション技術と地理情報システムを連携した新しい風力発電適地選定手法の開発, 第27回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.241-244, 2005
- 6) 内田孝紀, 大屋裕二, LESによる局地的風況シミュレーション 紙地図から構築した高解像度標高データの利用, 第55回理論応用力学講演会, 2006
- 7) 山本学, 内藤幸雄, 近藤宏二: 風力発電コンクリートタワーの風応答実測, 日本流体力学会年会2005講演論文集, pp.61, 2005
- 8) 石原孟, ファバンフック, 高原景滋, 銘苅壮宏: 実風車における現地観測と風応答解析, 第27回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.153-156, 2005
- 9) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子: 局所風況予測システムLAWEPSの開発と検証, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp. 375-386, 2003
- 10) 石原孟: 非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp. 387-396, 2003