

風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度LES

High Resolution LES of Topography-Induced Turbulence around WTG

内田 孝紀*1, 大屋 裕二*2, 李 貫行*3

Takanori UCHIDA, Yuji OHYA and Graham Li

*1 Assistant Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

*2 Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

*3 Manager, Eurus Energy Japan Corporation, Akasaka 1-Chome Center Building 5F, 11-30, Akasaka 1-Chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

ABSTRACT

We have been developing the LES (Large Eddy Simulation) code 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 this model can predict the airflow and the gas diffusion over complex terrain with high precision. The RIAM-COMPACT® has already been marketed by certain tie-up companies. The estimation of the annual electrical power output is also possible now based on the field observation data.

In the present study, a numerical simulation of a turbulent airflow over an actual wind farm was executed by using the high resolution elevation data. As a result, an appropriate point and an inappropriate point for locating a wind turbine generator were shown based on the numerical results obtained. This cause was found to be a topographical irregularity in front of the wind turbine generator.

キーワード: 複雑地形, 地形乱流, 流体工学モデル(LES)

Keywords : Complex Terrain, Topography-Induced Turbulence, CFD Model (LES)

1. はじめに

我々は数(十)km以下の狭域空間に的を絞り, RIAM-COMPACT®(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain:リアムコンパクト)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⁾. 乱流モデルにはLES(Large Eddy Simulation)を採用している. LESとは, 比較的大きな渦構造を直接計算し, それより小さい渦構造のみをモデル化する手法である. 現在, 国内で開発されている風況予測ソフトは, 計算時間の問題からRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)と呼ばれるレイノルズ平均型乱流モデルを採用している^{2, 3)}. 一般的にRANSでは, 時間的に変化しない定常的な流れ場を対象としている. しかしながら, 近年のコンピュータ性能の向上は著しく, 計算時間の問題も劇的に解消されつつある. 空間平均型の乱流モデルであるLESは, 時々刻々と変化する非定常な風況場をシミュレーションすることが可能である. ここが時間平均

型の乱流モデルであるRANSと大きく異なる点である. また, モデルパラメータのチューニングにおいても, LESの場合はRANSに比べて極めて少なく, 汎用性に優れた手法である. 非定常な風況特性を簡単に数値予測し, その結果をアニメーションなどで視覚的に捉えることが出来れば, 多額の費用を要する風洞実験の代替ツールになるとともに, ウィンドファームWF(Wind Farm)の事前検討の一助になることが大いに期待される.

最近になり, 複雑地形上に建設された大型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風力発電機WTG(Wind Turbine Generator)や, WTG内外の故障の問題が顕在化しつつある. この主たる原因は, WTG近傍の僅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が原因になる場合も考えられる⁴⁾. 我々は, 既に10m

*1, 2 九州大学応用力学研究所 助教, 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

*3 (株)ユーラスエネジージャパン マネージャー (〒107-0052 東京都港区赤坂一丁目11番30号 赤坂1丁目センタービル5階)

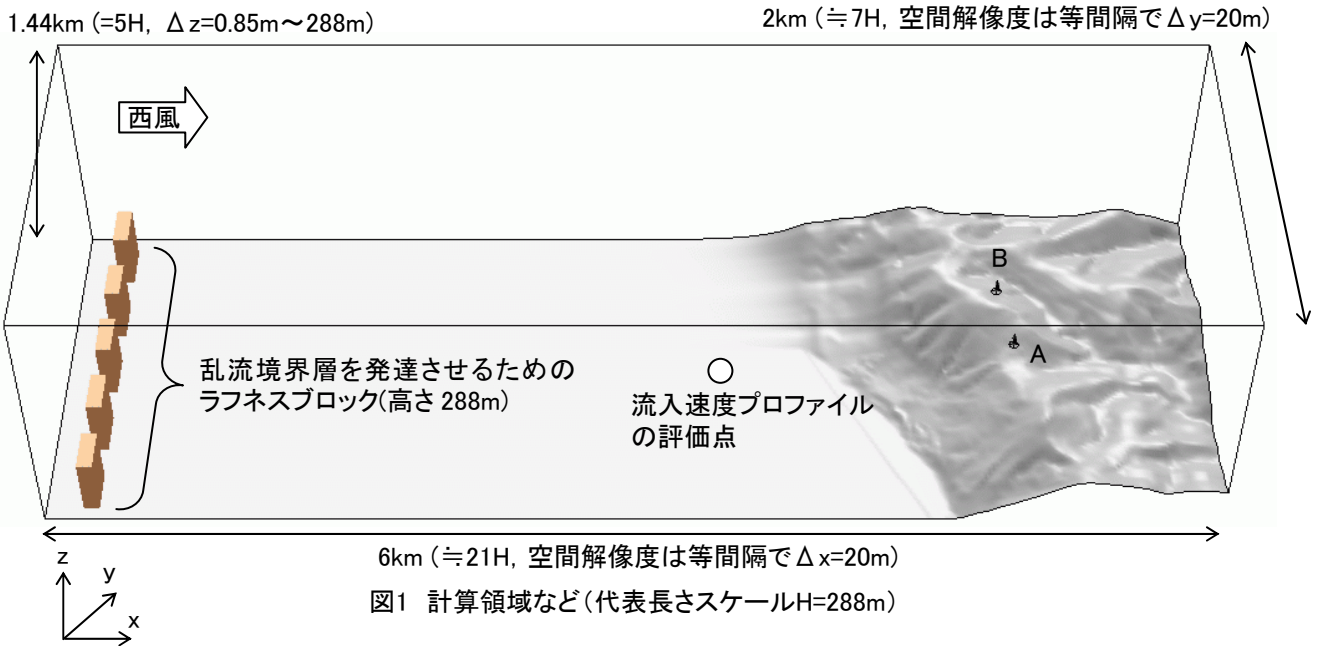


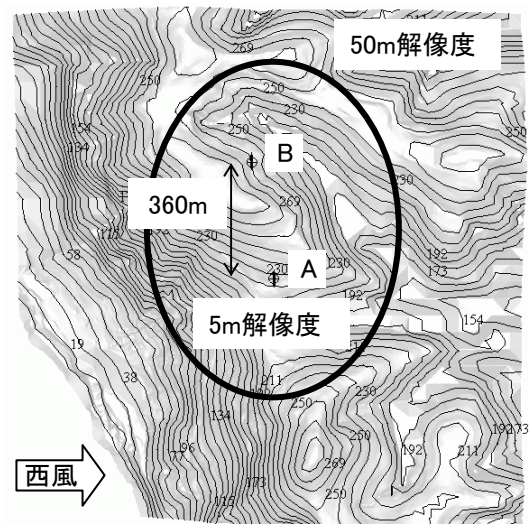
図1 計算領域など(代表長さスケールH=288m)

以下の高解像度標高データ^{5, 6)}を利用し, 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手法を提案してきた⁷⁻⁹⁾. 但し, 過去の研究⁷⁻⁹⁾では, 地形の凹凸がWTG周辺に与える影響にのみ着目しており, 実際の流入気流が有する風の乱れと地表面粗度の影響は省略していた. 本報では, より現実に近い状況を模擬するため, WFの上流側に風の乱れを発生させるラフネスブロックを配置し, 対象にするWTGが乱流境界層に完全に埋没した状況, つまり, 流入気流が有する風の乱れを再現する¹⁰⁾. この状況において, WTG周辺に発生する地形乱流の影響を報告する.

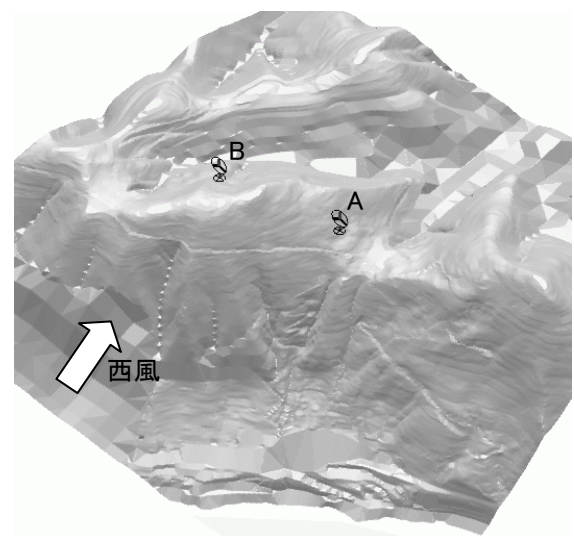
2. RIAM-COMPACT®によるLES乱流シミュレーション

本研究の計算領域を図1に示す. 計算対象地域は国内某所のWFである. 計算を行った風向は西である. 計算領域は, 主流方向(x)および主流直交方向(y)に6km×2kmである. 鉛直方向(z)の高さは1.44kmである. 計算メッシュ数は301(x)×101(y)×51(z)点である. 水平方向メッシュ幅は等間隔で $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$ である. 鉛直方向メッシュ幅は不等間隔で $\Delta z = 0.85 \sim 288\text{m}$ である. 代表長さスケールHは, 計算領域中の標高差から定義され, 本計算の場合は $H = 288\text{m}$ である. 乱流境界層を模擬するため, 計算領域の上流側に高さ $H (= 288\text{m})$ のラフネスブロックを5個配置した.

図2には, WTG近傍の地形の平面図(図2(a))と鳥瞰図(図2(b))を示す. 本研究では, 図2(a)に示すように, 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

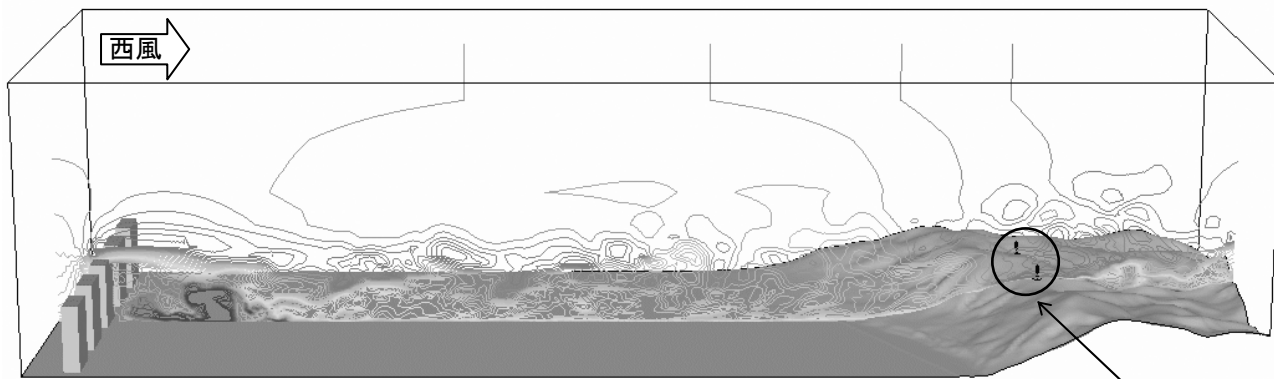


(a)平面図(上から見た様子)

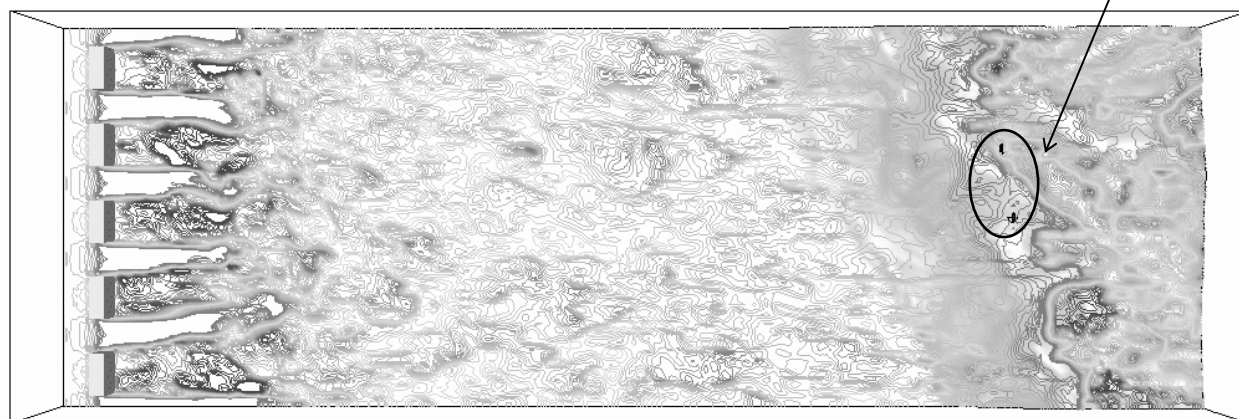


(b)鳥瞰図

図2 WTG周辺の地形起伏



(a)横から見た様子, WTG-Aを通る鉛直断面



(b)上から見た様子, ハブ高さ(地上高44m)での水平断面

図3 計算領域全体の流れ場の様子(瞬間場:無次元時間 $t^*=100$), 主流方向(x)の速度成分のコンター図(-0.5~1.5の範囲を30分割)

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。RIAM-COMPACT®ではWTGに関する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、世界測地系に基づいた十進経緯度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2(b)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。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、RIAM-COMPACT®により精密な風況シミュレーションを行う。

数値不安定を回避し、複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACT®を用いた。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成分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)差分法に基づき、乱流モデルとしてLESを採用す

る。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。流れの支配方程式は、フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式と運動方程式である。本研究では、強風時の気流予測を対象にしているため、大気が一般的に有する温度成層の効果は省略した。計算アルゴリズムは部分段階法に準じ、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過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は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。一般的に、3次精度風上差分は4次精度中心差分と4階微分の数値拡散項に分解できる。本研究では、4次精度中心差分に梶島¹¹⁾による4点差分と4点補間に基づいた補間法を用いる。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-桑原スキームタイプ¹²⁾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。LESのSGSモデルには、標準スマゴリンスキーモデル¹³⁾を用いる。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。

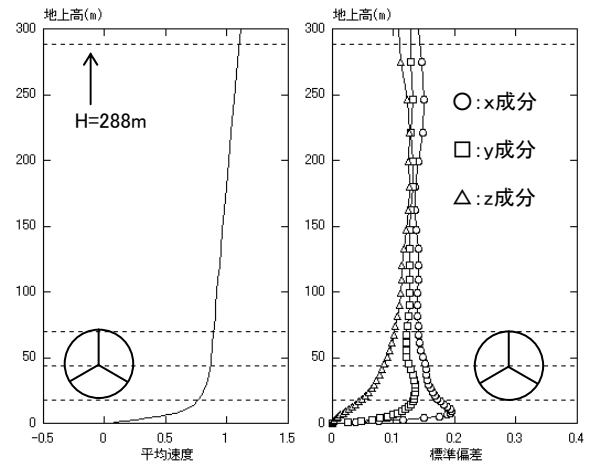
境界条件に関して、上方境界面には水平風速成分 (\bar{u} , \bar{v}) の鉛直方向(z)の勾配がゼロ、鉛直風速成分 (\bar{w}) をゼロとする滑り条件、側方境界面には水平風速成分 (\bar{u}) と鉛直風速成分 (\bar{w}) の主流直交方向(y)の勾配がゼロ、水平風速成分 (\bar{v}) をゼロとする滑り条件、流出境界面には対流型流出条件、地面には粘着条件を課す。流入境界断面には、1/7乗のべき法則に従う風速分布を与えた。

3. 計算結果と考察

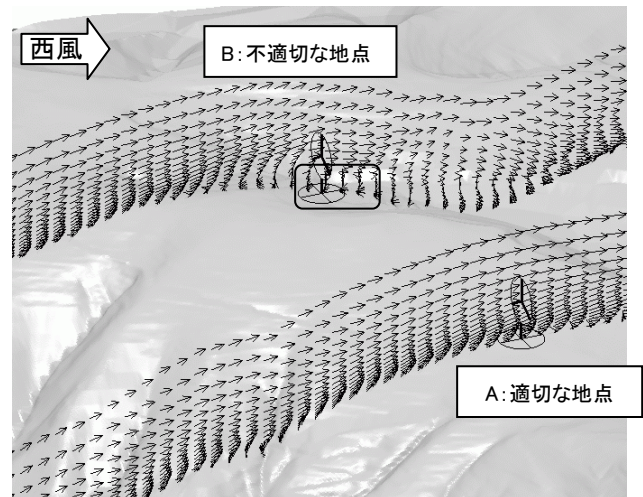
図3には、計算領域全体の流れ場(瞬間場:無次元時間 $t^*=100$)の様子を示す。表示している物理量は、主流方向(x)の速度成分 (\bar{u}) であり、-0.5~1.5の範囲を30分割したコンター図である。図4には、図1に示す評価点での平均速度プロファイル \bar{U} ($=\langle \bar{u} \rangle$) および、各方向の標準偏差 σ_u ($\sigma_u^2 = \langle \bar{u} - \bar{U} \rangle^2$)、 σ_v ($\sigma_v^2 = \langle \bar{v} - \bar{V} \rangle^2$)、 σ_w ($\sigma_w^2 = \langle \bar{w} - \bar{W} \rangle^2$) の鉛直プロファイルを示す。乱流諸量の評価時間は無次元時間で100である。図4において、縦軸は実スケールでの地上高 z^* m であり、横軸は地上高 $H=288$ m における流入風速 U_{in} で正規化された無次元値である。図中には本計算の代表スケールなどを表示している。これらの図から、流入断面付近に配置したラフネスブロックから剥離流が発生し、これが流下して空間的に発達しているのが分かる。結果として、WTGが乱流境界層に完全に埋没した状況を再現できた。

図5には、十分に流れ場が発達した時刻(無次元時間 $t^*=100$)におけるWTG周辺の速度ベクトル図を示す。図5(a)は、各々のWTGを含む鉛直断面図を示す。図5(b)は、同時刻における各々のWTG位置での速度ベクトルの鉛直分布図を示す。図5(a)のWTG-Aに注目すると、WTG前後で流れの剥離やそれに伴う渦形成などは見られない。図5(b)のWTG-Aを観察すると、受風面内の全ての高さレベルにおいて、ほぼ様な速度分布を呈している。また、地形効果による局所的な増速が確認される。一方、図5(a)のWTG-Bでは、図中に実線で示す受風面内の下方で逆流領域とそれに伴う渦形成が明確に確認される。図5(b)のWTG-Bにおいても、図中に矢印で示すように、大きな速度欠損が確認できる。これはWTG-Bのすぐ前方の地形起伏に起因した風の乱れ(地形乱流)の影響である。すなわち、WTG-Bは地形頂部付近から僅かに離れた標高の低い地点にWTGが立地しているため、このような局所的な風の乱れ(地形乱流)の影響を受けていると考えられる。アニメーションを作成し、これを吟味すると、周期的な渦放出現象が生じていることが確認された。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、地形の僅かな凹凸を精緻に再現することで捕えることができた。

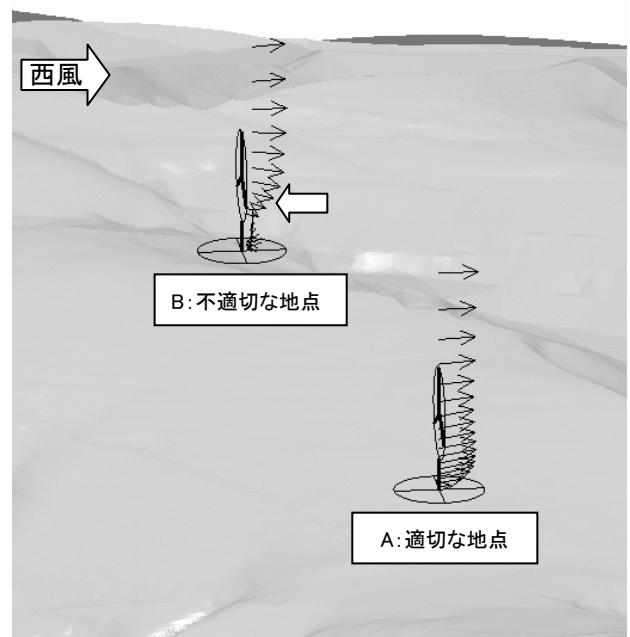
以下では、より定量的な評価を行う。WTG-AおよびWTG-Bのハブ高さ44mにおける主流方向(x)の平均風速 \bar{U} からのずれ u' ($=\bar{u} - \bar{U}$) の時間変化を示す。ここで



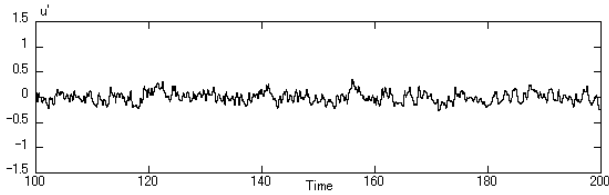
(a)平均速度プロファイル (b)各方向の標準偏差
図4 流入気流の性状, 図1のA点で評価



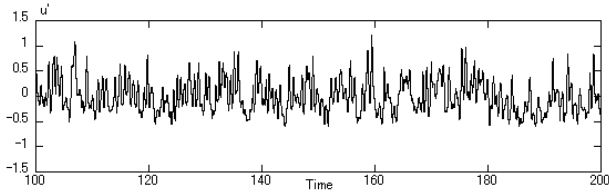
(a)各々のWTGを含む鉛直断面図



(b)各々のWTG位置での鉛直分布図
図5 WTG周辺の速度ベクトル図
(瞬間場:無次元時間 $t^*=100$)



(a)WTG-A



(b)WTG-B

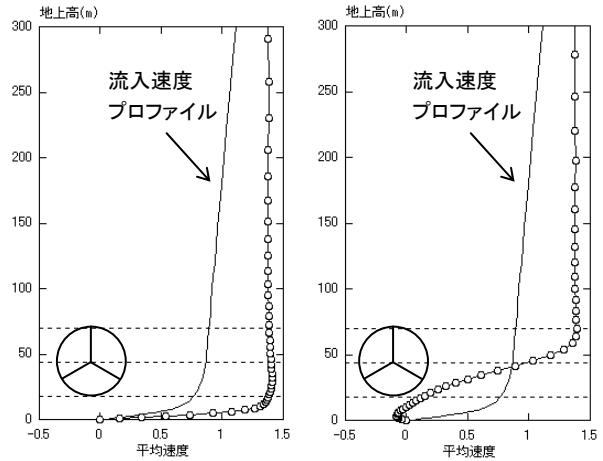
図6 WTGのハブ高さ(44m)における主流方向(x)の速度成分のずれ u' の時間変化, 実時間で約1時間に対応

示す時間変化は, 流入境界面の地上高 $H(=288\text{m})$ における風速 $U_{in}=7\text{m/s}$ とすると, 実スケールで約1時間に対応する. 図6(a)のWTG-Aで観察される速度変動は, 流入気流が有する乱れの影響を示している. つまり, 地形起伏に起因して直接的に形成される風の乱れ(地形乱流)の影響は極めて小さいことが分かる. 一方, 図6(b)に示すWTG-Bでは, 非常に大きな変動振幅が周期的に観察される. これは, 先に述べたように, WTGの直近の地形起伏から発生する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立地点での平均速度プロファイル $\bar{U}(=\langle \bar{u} \rangle)$ および, 各方向における標準偏差 $\sigma_u(\sigma_u^2=\langle \bar{u}-\bar{U} \rangle^2)$, $\sigma_v(\sigma_v^2=\langle \bar{v}-\bar{V} \rangle^2)$, $\sigma_w(\sigma_w^2=\langle \bar{w}-\bar{W} \rangle^2)$ の鉛直プロファイルを図7, 図8に示す. 乱流諸量の評価時間は無次元時間で100である. 縦軸は実スケールでの地上高 $z^* \text{ m}$ であり, 横軸は流入境界面の地上高 $H=288\text{m}$ における流入風速 U_{in} で正規化された無次元値である. 図中にはWTGのロータ径を示す. 図7(a)に示すWTG-Aでは, 受風面内の全ての高さレベルにおいてほぼ様な速度分布を呈している. さらに, 受風面の最下部の地上高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, 図7(b)に示すWTG-Bでは, 受風面全体において大きな速度シアが形成されている.

WTGのパワーカーブは, WTGの存在は仮定せず, 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. よって, べき法則から大きく逸脱した速度シアの下では, 発電量の実測値が数値モデルによる予測値を大きく下回ることが予想される. 同時に, 非常に大きな速度シアは, WTGのタワーの振動問題や疲労強度の問題などと関連し, 今度重要になると考えられる^{14, 15}.

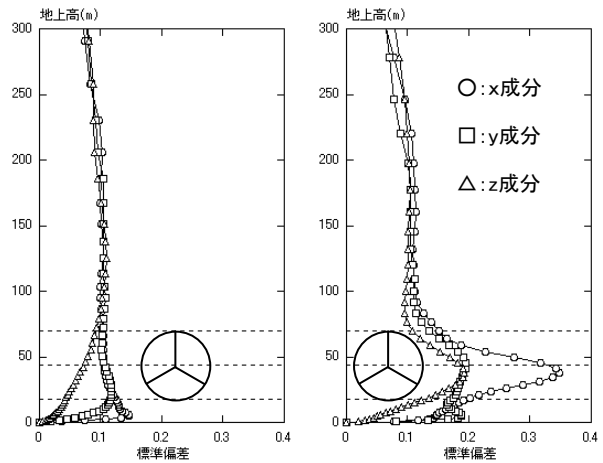
図8に示す各方向の標準偏差の鉛直プロファイルに注目する. 図8(a)に示すWTG-Aの場合は, 平坦地で評価した流入気流の鉛直分布と同程度の値を有している. よって, 地形乱流による乱れの影響はほとんど無いこと



(a)WTG-A

(b)WTG-B

図7 平均速度プロファイルの比較



(a)WTG-A

(b)WTG-B

図8 各方向の標準偏差の鉛直プロファイルの比較

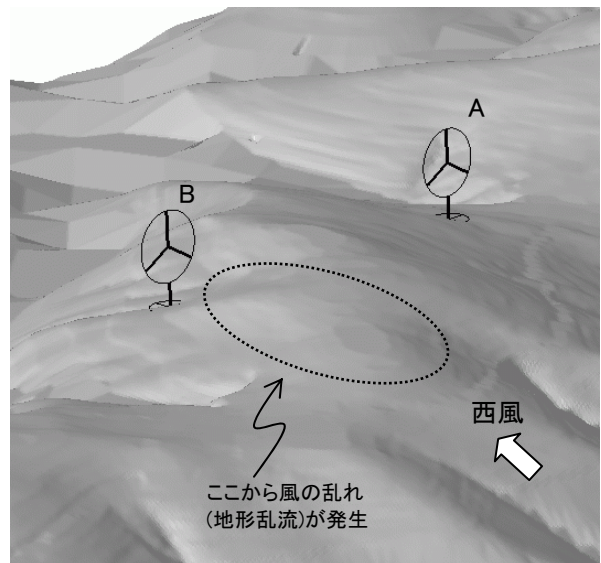


図9 風の乱れ(地形乱流)の発生メカニズム

が分かる。一方、図8(b)に示すWTG-Bの場合には、ハブ高さ44m付近において、主流方向(x)の標準偏差の極大値が出現している。これは、図5(b)および図7(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。

最後に、本研究で得られた風の乱れ(地形乱流)の発生メカニズムを再度ここで記述する。図9に示すように、WTG-Bは地形頂部付近から僅かに離れた標高の低い地点に立地している。このため、WTG直近の地形起伏を過ぎる流れは、WTG付近で剥離を生じる。さらに、これが周期的な渦放出現象を形成する。この一連の流動現象が、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。

4. おわりに

本研究では、(株)ユーラスエネジージャパンの協力の下、国内某所のWFを対象に、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作成した。この標高データを用いて、流入変動風を考慮した風況シミュレーションを実施した。我々が過去に実施した研究結果と同様、本研究でも、地形起伏の僅かな変化が起源となり、そこから機械的(直接的)に風の乱れ(地形乱流)が発生することを示した。同時に、WTGの立地に関して、適切な地点と不適切な地点を明らかにした。どの程度以上の風速変動がWTGに悪影響を及ぼすのかの定量的な検討は、今後の大きな課題である。本研究が進めば、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(産業)の確立に大きく寄与すると考えられる。

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。これに伴い、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(詳細気流解析)は、WTG建設前の風況精査にも適用されるべきものである。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の評価だけでは不十分であり、速度変動成分の表示、標準偏差の表示、鉛直断面内の表示も必須である。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評価は、今度ますます重要になると予想される。

謝辞

本研究の一部は、NEDOの度産業技術研究助成事業(若手研究 Grant, 2006年1月-2008年12月)、「空間解像度10m以下の詳細地形構築技術の開発とそれを用いた風力タービンハブ高さ周辺の風の乱れの視覚的評価」プロジェクト(研究代表者:内田孝紀)の援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 石原孟, ファバンフック, 高原景滋, 銘荊壯宏: 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
- 3) 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, 日本流体力学学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, pp.375-386, 2003
- 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回理論応用物理学講演会, 2006
- 7) T.Uchida and Y.Ohya, Micro-siting Technique for Wind Turbine Generator by Using High Resolution Elevation Data, JSME International Journal 「Environmental Flows」, Series B, Vol.49, No.3, pp.567-575, 2006
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二, 諏訪部哲也, 李貫行, 非常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTによるウインドファーム風況診断の提案, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.30, No.2, 通巻78, pp.101-108, 2006
- 9) 内田孝紀, 大屋裕二, 荒屋亮, 他, 風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度LES, 第30回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.113-116, 2008
- 10) T.Uchida and Y.Ohya, Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.91, pp.219-229, 2003
- 11) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂
- 12) T.Kawamura, H.Takami and K.Kuwahara, Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986
- 13) J.Smagorinsky, General Circulation Experiments with the Primitive. Equations, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963
- 14) 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, 日本流体力学学会年会2005講演論文集, pp.61, 2005
- 15) 石原孟, ファバンフック, 高原景滋, 銘荊壯宏: 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