

RIAM-COMPACT®による数値風況予測の最前線 —設計風速評価とウインドリスク(地形乱流)診断—

九州大学応用力学研究所 新エネルギー力学部門 風工学分野
内田 孝紀, 大屋 裕二

1. はじめに

現在, 世界では空前の勢いで風力発電産業が成長を遂げている. これは再生可能エネルギーの中で風力発電が最も脱化石燃料, CO₂削減に対してコストパフォーマンスが高いからである. 日本においても風力発電が最も有力な再生可能エネルギーであることは間違いなく, 風力発電をより一層普及させることが, 地球温暖化の克服「グリーン・イノベーション」に世界的な規模で貢献すると確信する.

風力発電分野において, 今後解決すべき技術課題の一つは, 風車に対する局地的な風況を正確に把握し, 従来技術と比べて格段に高い精度で風車導入の事前評価を実施できる数値風況予測技術を確立することである. 同時に, 風車に対するウインドリスク(地形乱流)や現在社会問題になっている風車音の伝播問題, 複数の風車を効率的に配置するための風車ウエイク内の気流性状の定量的な把握(ウエイクモデルの開発)も重要検討課題である. 我々の研究グループが開発を進める風況予測技術RIAM-COMPACT®は, これらの諸問題を一挙に解決する潜在的な可能性を秘めている.

RIAM-COMPACT®(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain;リアムコンパクト)に関して, そのコア技術は九州大学応用力学研究所が開発が続けられており, 2006年に著者らが起業した九州大学発ベンチャー企業の(株)リアムコンパクト(<http://www.riam-compact.com/>)が(株)産学連携機構九州(九大TLO)から独占的ライセンス使用許諾を受けている(2006年にRIAM-COMPACT®の商標と実用新案を取得). 現在では, 九州電力グループの西日本技術開発(株), (株)環境GIS研究所, (株)FSコンサルティングと開発コンソーシアムを作り, 「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」と名付け, 業界標準モデルの一つとして広く普及に努めている. 国内の風力業界最大手の(株)ユーラスエナジージャパン, 電源開発(株), 日本風力開発(株)を含め, 多数の導入実績を有する.

本報では, 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いた設計風速評価と, ウインドリスク(地形乱流)診断の具体例を最新トピックとして紹介する.

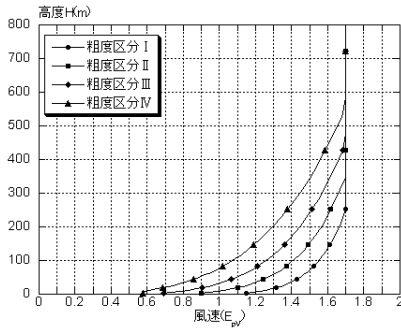
2. 設計風速評価手法

平成19年6月に「改正建築基準法」が施行され, 60mを超える工作物はこれまでの建築確認申請だけではなく, 指定機関による性能評価や国土交通省の大臣認定が必要となった. これに伴い, 風車ハブ高さ位置で耐風設計用の基準風速を算定する際には, 地形的要因を考慮した風速の割増係数を何らかの形で評価しなければならなくなった¹⁾. こうした状況を受け, 2007年に土木学会から「建築基準法」, 「建築学会荷重指針」に準じた「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」が発行された²⁾. 但し, 文献²⁾では, 強風の発現風向は考慮されておらず, 該地点に進入する風向を16方位に分割し, これを対象にしている. また, 各粗度区分の風速分布は, 地表面粗度が風上側に十分長い距離で, かつ一様に分布していると仮定し, 風洞実験や観測結果から求めた値を適用している. さらに, 大気は強風の中立状態とし, 風向と風速は定常状態を仮定している.

そこで本研究では, 最新の研究成果を取り入れ, より現実に近い強風性状を取り込み, かつ, 安全性を確保したもとして耐風設計用の基準風速を求め一手法を提案する. 具体的には, 対象地点を過去に襲来した台風の中で, 強風をもたらしたものを再現し, そこから得られた結果に基づいて, 流体工学モデルRIAM-COMPACT®³⁾から割増係数を算出する. 最終的に幾つかのシナリオを考慮し, 設計風速とする.

確認申請とは, 想定している期間中に最悪の風荷重で風車が倒壊しないことを確認することであるので, 現地の強風時の気流性状の実状を反映した風速分布を与えるべきであると考え. 本研究では, 日本国内の対象地域はほぼ台風襲来地域であり, 過去の強風も台風によるものであることから, この台風情報が入手可能であるならば, この実状に近い条件に基づいてメソスケール気象モデルを用いた台風シミュレーションを実施し⁴⁾, その結果は引き続き行うCFDの流入風速の鉛直分布として利用することとする⁵⁾. 上記の結果を受けて, 強風発生が予想される風向を特定し, この風向を対象に我々が独自に開発を進めている流体工学モデルRIAM-COMPACT®による解析を行う. ここで, RIAM-COMPACT®を用いる意味は, 風車設置点直近の地形の影響を精査することである.

最終的に、RIAM-COMPACT®から得られた値に安全率などを考慮して、風車ハブ高さ設計風速とする。



◆ 高度 H が Z_b 以下の場合

$$E_{pV} = 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha \quad \text{式(1)}$$

◆ 高度 H が Z_b を超える場合

$$E_{pV} = 1.7 \left(\frac{H}{Z_G} \right)^\alpha \quad \text{式(2)}$$

粗度区分	Z _b (m)	Z _G (m)	α
I	5	250	0.10
II	5	350	0.15
III	5	450	0.20
IV	10	550	0.27

図1 平成12年建設省告示1454号で与えられるE_{pV}

2.1 ウインドファームの概要

(株)ユーラスエナジー日本の協力の下、和歌山県南西部のウインドファームに関する耐風設計を試みた。ここは、発電出力1.3MW、ハブ高さ60m、ロータ直径62mの風車10基で構成されるウインドファームである。この地域は台風襲来地域にあるため、風車と風車タワーの耐風設計は、台風通過時の気流性状予測により求めることが妥当だと考えられる。そこで、過去にこの地域において強風が発生した台風を、メソスケール気象モデルMM5⁶⁾により再現し、広域の強風場を求めた。さらに、その結果を用いて、ウインドファーム周辺の詳細な地形起伏を再現した領域について、RIAM-COMPACT®による非定常乱流シミュレーションを行った。得られた結果から、耐風設計用の基準風速を予測した。

2.2 気象モデルMM5による台風シミュレーション

過去にこの地域を通過した台風の中で、1998年第7号台風(台風9807号と表記)を選んだ。この台風は、近年日本に接近した中で、和歌山県を含む近畿・北陸地方に強風被害をもたらした。台風シミュレーションに必要な数値データは、気象庁により整備・提供されている。図2には、台風中心径路の比較を示す。計算結果(☆)は、気圧最低点を追跡したもので、気象庁ベストトラック(○)とほぼ同じ径路を通過している。再現された台風9807号通過時のウインドファーム付近の強風場から、強風が発生する時刻、風向などを検討した(図3、図4)。その結果、風車建設地点において、台風の接近・通過に伴い風向はEからS, Sから

Wに変化し、1998年9月22日午後1時から3時頃に最も強い風が吹くことが確認された。RIAM-COMPACT®による非定常乱流場の数値シミュレーションは、図4より、SE, SSE, S, WNWの4風向を計算対象とした。

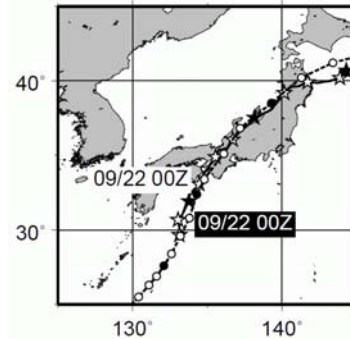


図2 台風9807号の中心径路の比較

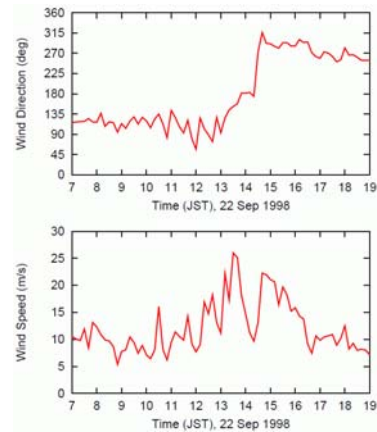


図3 ウインドファーム内の観測マストの風向と風速の変化、1998年9月22日、風向は北を0度、東を90度、南を180度、西を270度とする。

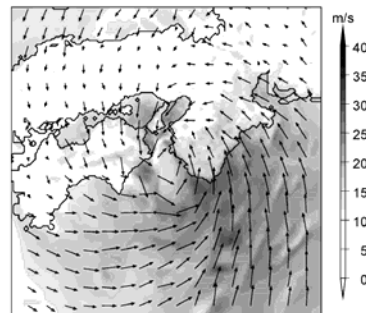


図4 領域2における最下層の風のパターン、1998年9月22日、9月22日13時30分、地上高約11m

2.3 流体工学モデル RIAM-COMPACT® による LES乱流シミュレーション

計算領域は、ウインドファーム内の観測マストを中心に8.5km四方とした。鉛直方向高さは約2.9kmである。計算メッシュ数は101×101×51点、水平方向メッシュ幅は32m～769m、鉛直方向メッシュ幅は1.7m～347mである。

台風シミュレーションの結果から、計算対象とする向はSE, SSE, S, WNWの4風向とした。上記の4風向において、マスト2の風速が最も強くなった時点の流入境界面中心の風速分布を求めると、図5のように各風向でそれぞれ異なる鉛直分布を有していた。

文献²⁾では、上空高さ550m以上の風速は一定としている。よって、RIAM-COMPACT[®]による計算においても、台風シミュレーションによる風速の鉛直分布を参考にする。つまり、高度550mの風速を基準風速 $U_0=1.0$ とし、それより上空では一定の風速を与えた。但し、高度550m以下の風速が高度550mの風速よりも大きい場合には、その高度以上で風速が基準風速 $U_0=1.0$ となるように与える。以上の条件の下、LES計算により、各風車のハブ高さ位置での平均風速比 E_{TCAL} を風向ごとに求めた(表1を参照)。なお、平均風速比は流入境界面の上空風速(高さ550m以上の風速)に対する比 $(=\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} / U_0)$ として表示する。

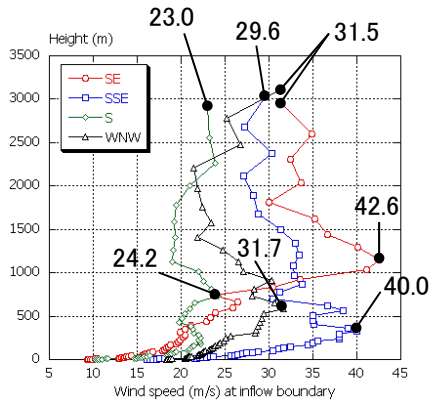


図5 風向SE, SSE, S, WNWにおいて、観測マストの風速が最も強くなった時点における、計算領域の流入境界面の中心における風速の鉛直分布。台風シミュレーションの結果

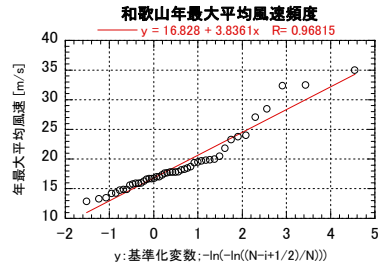
表1 RIAM-COMPACT[®]による平均風速比 E_{TCAL} (流入境界面の上空風速に対する比)

風車No.	SE	SSE	S	WNW
No.1	0.96	1.07	0.8	0.87
No.2	0.93	1.07	0.8	0.55
No.3	0.94	1.09	0.83	0.51
No.4	0.97	1.06	0.97	0.67
No.5	1.04	1.07	1.1	0.86
No.6	0.67	1.05	1.05	0.85
No.7	0.5	1.14	1.17	0.83
No.8	0.86	0.89	1.02	0.87
No.9	0.58	0.58	1.07	1
No.10	0.94	1.13	1.08	0.88

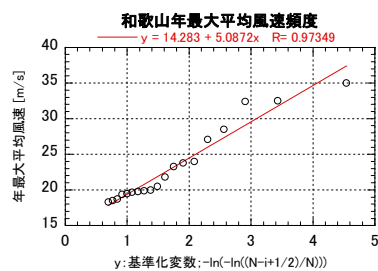
2.4 再現した台風の統計的評価

台風シミュレーションで発生させた台風が統計的に見てどれぐらいの強さをもった台風であるのか、つまり、流入境界条件として与えた風速は再現期間で何年に対応する強さをもったものかについて検討する。和歌山気象台における年最大平均風速から、最大平均風速の発生頻度を求めると、ゲンベル分布⁷⁾の基準化変数は図6(a)のようになる。図より、平均風

速の発生頻度は高風速と低風速で異なる傾向(グラフが途中で折れ曲がる)を示している。そこで、高風速時(風速19m/s以上)のみを取り出し、最小二乗近似を用いて直線近似すると図6(b)のようになる。



(a)全データ(N=47)に対するプロット



(b)高風速(風速19m/s以上)のデータに対するプロット

図6 和歌山気象台における年最大平均風速とゲンベル分布の基準化変数の関係

このとき、ゲンベルパラメータ a, b はそれぞれ、 $a=1/5.0872=0.197$, $b=14.3$ となり、 R 年再現期待値 U_R を求める式は、 $U_R = 1/a \times \ln R + b = 5.09 \ln R + 14.3$ と与えられる。よって、和歌山気象台における最大平均風速の50, 100, 200, 500年再現期待値はそれぞれ34.2, 37.7, 41.3, 45.9m/sとなり、建築基準法によって設計用基準風速として与えられている和歌山県の50年再現期待値34m/sと良く合っている。

一方、和歌山気象台における1998年の年最大平均風速は台風7号によるもので32.4m/sになり、これは35年再現期待値に等しい。よって、本研究でメソスケール気象モデルMM5を用いて再現した台風は、年最大平均風速の再現期待値で評価すると、35年に1度やってくる強さの台風に相当していると見なせる。これにより、台風シミュレーションの風速を、50, 100, 200, 500年再現期待値に換算するには、それぞれ、34.2/32.4, 37.7/32.4, 41.3/32.4, 45.9/32.4倍した値を用いれば良い。その値を表2に挙げておく。

表2 R年再現期待値に換算する倍率Q

R年	倍率Q
50	1.06
100	1.17
200	1.27
500	1.42

2.5 風車ハブ高さにおける設計風速 U_h の算出方法

最初に、文献²⁾に従って風車ハブ高さ位置における設計風速 U_h の評価法を説明する。 U_h は文献²⁾の式(3.1)から、文献²⁾の3.2節の図3.1に示される設計基準風速 V_0 (建築基準法施行令第87条より引用。和歌山県では34m/s)に、平均風速の割増係数 E_{iv} および高度補正係数 E_{pv} を乗じて次式で求められる。

$$U_h = E_{iv} E_{pv} V_0 \quad \text{式(3)}$$

ここで、 E_{pv} は図1の式(1)および式(2)で与えられる。RIAM-COMPACT®で求めた各風車ハブ高さ位置での平均風速比(割増係数)を E_{ICAL} とする。 E_{ICAL} はRIAM-COMPACT®における流入境界面上空風速、すなわち、図1の式(2)で H を Z_G 以上としたときの E_{pv} の値($=1.7V_0$)に対する U_h の比

$$E_{ICAL} = U_h / 1.7V_0 \quad \text{式(4)}$$

であるから、式(4)に式(3)を代入し、式(5)が導かれる。

$$E_{ICAL} = U_h / 1.7V_0 = E_{iv} E_{pv} / 1.7 \quad \text{式(5)}$$

よって、 E_{ICAL} は平均風速の割増係数 E_{iv} および高度補正係数 E_{pv} を含んだ値である。風車ハブ高さ位置での設計風速 U_h は文献²⁾の風速 V_0 ($=34\text{m/s}$)を用い、

$$U_h = 1.7V_0 E_{ICAL} = 57.8 E_{ICAL} \quad \text{式(6)}$$

となる。下記に示す2つのシナリオを提案する。

シナリオ1:

式(6)から算出した設計風速 U_h を台風シミュレーションから得られた風速の鉛直分布をもとに補正する。

シナリオ2:

式(6)の上空風速($=1.7V_0$)の代わりに各風向の台風シミュレーションの最大風速を用いる。

最初にシナリオ1を考える。既に述べたように、RIAM-COMPACT®の流入境界面に与える風速の鉛直分布は、実際の台風の気象学的な影響、風上側の広範囲な地表面の影響を受けたものとして計算されている。しかし、本研究で取り上げた台風特有の風速分布であることも否めない。その影響は、地面近くになるほど大きいと考えられる。よって上空風速の設定に際しては、出来る限り異なる台風による相違が少ないようにすべきである。本研究では、上空3kmの風速を異なる台風による相違が少ないと考え、この値を基準風速とする。これより、RIAM-COMPACT®の流入境界面における上空風の低減率 R が求められる。すなわち、式(6)を下記のように補正する。

$$U_h = 1.7V_0 E_{ICAL} = 57.8 E_{ICAL} R \quad \text{式(7)}$$

なお、上空風の低減率 R は表3のようになる。

表3 LES計算用の流入境界面における上空風の低減率 R

風向	南東	南南東	南	西北西
上空3kmの風速(m/s)	31.5	29.6	23.0	31.5
低減率 R	1.0	0.94	0.73	1.0

表3を考慮すると、シナリオ1では、風向SSEのNo.7の61.9m/sが最大風速となった。

次にシナリオ2を考える。既に述べたように、台風9807号は35年に1度やってくる強さの台風に相当していることが示された。例えば、これを50年再現期待値にするには、表2から倍率 $Q=1.06$ を各風向の設計風速 U_h に乘じれば良いことになる。別の言い方をすれば、1.06倍の余裕を持たせることになる。

$$U_h = U_{MAX} \Big|_{\text{各風向}} E_{ICAL} Q \quad \text{式(8)}$$

その結果、シナリオ2では、風向SSEのNo.7の48.3m/sが最大風速となった。仮に安全率を多めにとって、再現期待値を100年とすると、52.9m/sとなる。どのシナリオを使うか、再現期間を設定する倍率の取り方は、設計者の責任で選定することになる。

3. ウィンドリスク(地形乱流)診断

最近になり、複雑地形上に建設されたウインドファームにおいて、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車や、風車内外の故障の問題が顕在化している。この主たる原因は、風車直近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⁸⁻¹⁰⁾。ここでは、ウィンドリスク(地形乱流)診断の具体例を紹介する。

3.1 ウィンドファームの概要

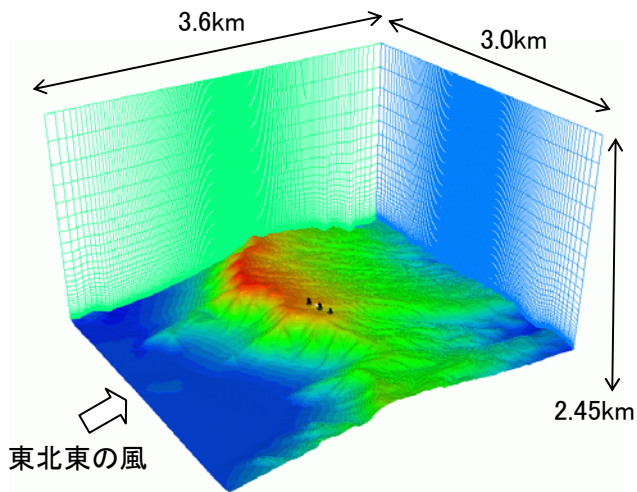
熊本県企業局工務課の協力の下、阿蘇車帰風力発電所(平成17年10月より運転を開始)の風況解析を実施した。発電所の概要は表4に示す通りである。

表4 阿蘇車帰風力発電所の概要

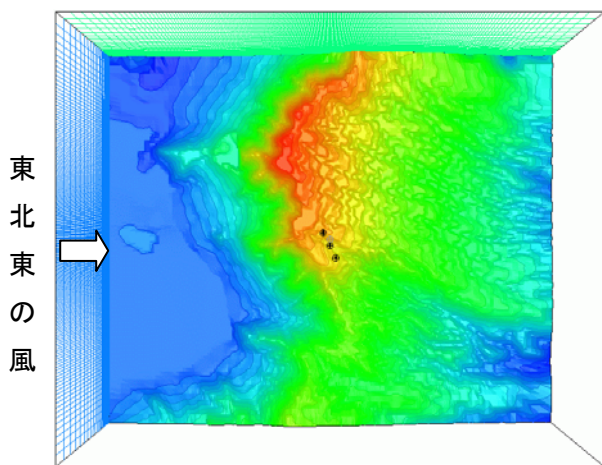
	1号機	2号機	3号機
最大出力	600kW		300kW
年間発生電力量	2,707,782kWh (約700世帯分の年間消費量)		
風車の高さ(地面~翼の先端)	59.05m		44.55m
翼(ブレード)直径	47m		29m

3.2 計算条件など

計算領域は各方向に3.6(x)×3.0(y)×2.45(z)kmの空間を有し、計算メッシュ数は241×201×41点(約200万点)である。水平方向の最小メッシュ幅は6.5m、



(a)鳥瞰図



(b)平面図

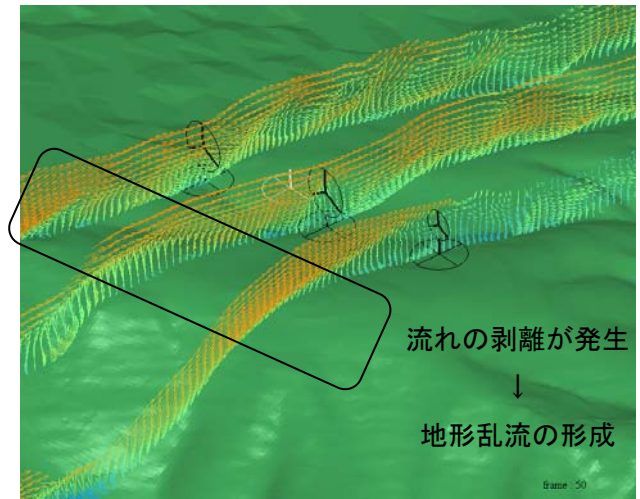
図7 計算領域

鉛直方向の最小メッシュ幅は1.25mである. 計算の風向は東北東, 西南西である. 地形データは, 最新の土地造成状況を反映し, 空間解像度3mで作成した. 流入風速は1/7乗に従うプロファイルを与えた. その他の条件などは前節と同様である.

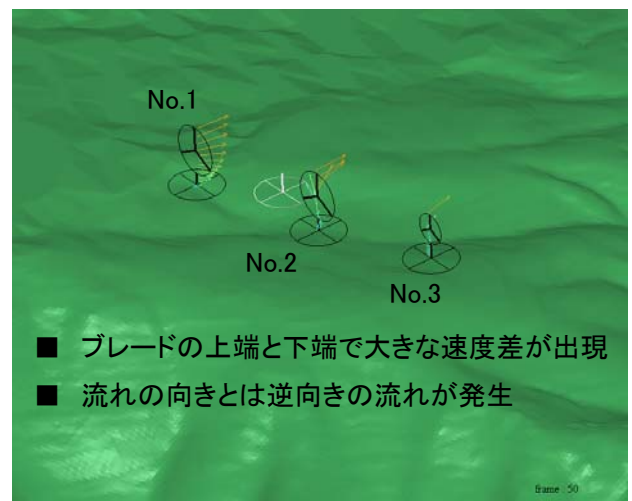
3.3 計算結果と考察

ここでは, 紙面の都合上, 地形乱流の影響が大きかった東北東の結果のみを示す.

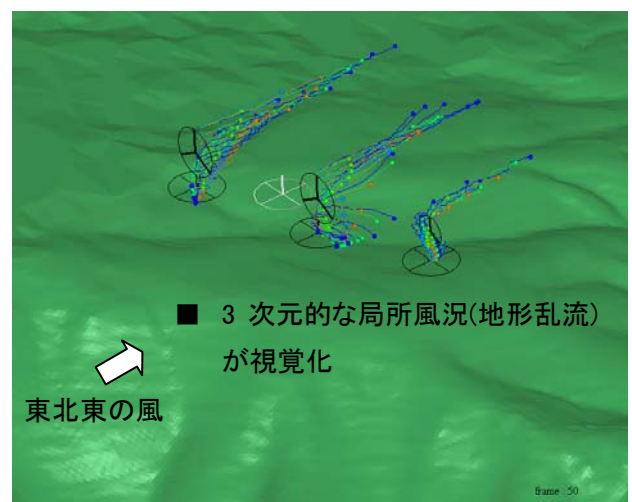
図8(a)に示す各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図を見ると, 図中に示すように3台の風車ともに前方の地形からの剥離流(地形乱流)の影響を大きく受けているのが分かる. つまり, 風車が地形乱流の中に完全に埋没した状況であることが分かる. 図8(b)に示す風車位置での速度ベクトル図を見ると, 高さ方向に速度が大きく欠損しているのが見て取れる. つまり, 風車ブレードの上端と下端で大きな速度差が生じている. アニメーションを作成し, これを吟味すると, 風車上流から周期的に放出される局所的な乱流渦の影響を受け, 流れの向きとは逆向きの流れも観察された. このような想定外の速度差は風車の振動を引き起こすとともに, 風車内故障に繋がる危険性が



(a)各々の風車を含む鉛直断面内の速度ベクトル図



(b)各々の風車位置での速度ベクトル図



(c)各々の風車位置から放出した仮想粒子の軌跡
図8 東北東の計算結果

ある. 3次元的な風況を把握するためには, 仮想粒子を配置し, この軌跡を観察する手法が有効である. 図8(c)は, 既に述べた3次元的な地形乱流の構造を明確に示している.

4. おわりに

最初に、(株)ユーラスエナジー日本の協力の下、和歌山県南西部のウインドファームを対象に、メソスケール気象モデルMM5と流体力学モデルRIAM-COMPACT®を併用した風車ハブ高さ位置での設計風速評価手法を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 台風シミュレーションで発生させた台風9807号は、和歌山気象台の観測記録の統計値より、年最大平均風速の再現期待値で評価すると、35年に1度やってくる強さの台風に相当している。和歌山気象台の観測記録の統計値は建築基準法に示された50年再現期待値の値と整合している。
- (2) 風車設置位置周辺の詳細計算では、最も強い風速が発生する風向を抽出し、流入風速分布に台風シミュレーションの結果を用いた。
- (3) 設計用の基準風速は、詳細計算で得られた流入境界面における上空風速と風車ハブ高さ位置での平均風速の比に、風向による低減率Rを掛けたものをシナリオ1として提案する。
- (4) 低減率Rは、台風通過時の風向の影響を取り込んだものであり、異なる台風による相違が少ない上空3kmの風速比として求める。
- (5) シナリオ1では、風向SSEのNo.7の61.9m/sが最大風速となった。
- (6) シナリオ2として、上述の低減率Rを用いず、基準風速 V_0 の1.7倍の上空風速(=1.7 V_0)の代わりに、各風向の台風シミュレーションによる最大風速を用いる。50年再現期待値として評価すると、風向SSEのNo.7の48.3m/sが最大風速となった。仮に安全率を多めにとり、100年再現期待値として評価すると、52.9m/sとなる。

次に、熊本県企業局工務課の協力の下、阿蘇車帰風力発電所(平成17年10月より運転を開始)を対象に、最新の土地造成状況を反映した高解像度標高データに基づいた詳細風況解析を実施した。その結果、新聞などで報道されているウインドリスク(地形乱流)の影響を再現することに成功した。

今後は、平坦地形や複雑地形を問わず、今回紹介したような詳細な風況診断を風車の全風向に対して実施し、各風車立地点の3次元局所風況(風車立地点の鉛直速度プロファイルの時間変化、風車ブレードの上下端、左右端での風速、乱流強度の時系列変化など)を正確に把握する必要がある。得られた風況診断結果に基づいて風車に対してウインドリスクの大きい風向をあらかじめ特定するとともに、一連の風況診断結果の知見を適切な風車制御に活用することが出来れば、地形乱流に起因した風車トラブルは劇的に減少し、風車稼働率を大幅に向上させることが可能になると考えられる。

上記とは別に、RIAM-COMPACT®に関する最新

の成果を簡単に記述しておく。非定常解析に主眼を置いたRIAM-COMPACT®では、計算時間の問題が懸念される。しかしながら、計算のソルバーはIntel Core i7などのマルチコアCPUに対応しており、計算時間は劇的に短縮され、実用面での利用において特段問題はない。RIAM-COMPACT®ユーザの利用は、数十万メッシュ規模の年間発電電力量などの経済性の評価から、数百万メッシュ規模の地形乱流解析まで多岐にわたる。著者らの最新の研究成果では、汎用的な64ビットWindowsPC1台の環境で、数千万メッシュ規模の大規模計算が1~2週間程度で計算完了することが確認されており、近くこの大規模計算に対応可能なソルバーの提供を開始する予定である。

国内外を問わず、世界レベルで著者らが推奨する数値風況解析を展開するためには、海外における地形標高データの入手が極めて重要である。この目的に対し、我々はMETI(経済産業省)とNASA(米国航空宇宙局)が共同で作成した空間解像度30mの全球3次元標高データ(ASTER)と、JAXA(宇宙航空研究開発機構)とNASAが共同作成した空間解像度10mの全球3次元標高データ(ALOSデータ)に注目し、これをRIAM-COMPACT®の入力データに自動変換する技術を開発している。これに伴い、世界中のあらゆる地域に対して数値風況予測が可能になり、その前処理の作業時間は、数日から1時間程度へと大幅に短縮される。

参考文献

- 1) 内田孝紀 他5名, 気象モデルと流体力学モデルを用いた風車設置地点における設計風速評価手法の提案, 日本風力エネルギー協会誌, 現在投稿中
- 2) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2007年版], 土木学会
- 3) T.Uchida and Y.Ohya, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- 4) 丸山敬 他4名, 第20回風工学シンポジウム論文集, pp.37-42, 2008
- 5) 丸山敬 他4名, 日本風工学会誌, No.108, pp.95-104, 2006
- 6) 竹見哲也, 中山浩成, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.28, No.1, pp.13-20, 2009
- 7) 建築物の耐風設計, 鹿島出版会
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二, 李貫行, 風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度LES, 日本風力エネルギー協会誌, 現在印刷中
- 9) 内田孝紀, 烏谷隆, 大屋裕二, 九州大学伊都キャンパスにおける流体力学モデルRIAM-COMPACT®を用いた100kW級風レンズ風車のマイクロサイティング, 九州大学応用力学研究所報, No.138, pp.41-54, 2010
- 10) NEDO若手グラント成果実例集Vol.2, 2010