

複雑地形上の風車サイトを対象にした 風況の品質管理と風車の運転制御

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
京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 耐風構造研究分野 丸山 敬, 西嶋 一欽

連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp, 092-583-7776

1. はじめに

東日本大震災を受け、国内の産業構造そのものが大きく転換しようとしている。こうした状況を受け、環境産業育成が急がれている。その筆頭が新エネルギー産業(風力エネルギー産業)である。今後、風力エネルギー産業は二つの方向で飛躍していくと考えられる。一つは、大型集中のウィンドファームである。もう一つは、適材適所、地産地消を目的とした小型分散電源システムである。いずれの場合においても、風力発電を適切に普及・拡大していくためには、導入地点周辺における大域のかつ局地的な風況を高精度に評価・予測する技術が不可欠である。また同時に、新規に建設予定の風力発電所は環境影響評価(環境アセスメント)の対象となった。これらの問題解決に向けて、我々の研究グループでは下記に示す取り組みを実施している。

大域のかつ局地的な風況を高精度に評価・予測する技術に関しては、RIAM-COMPACT®(リアムコンパクト)と称する、「数m～数km程度の狭域スケールに的を絞った、これまでにない革新的な数値風況予測技術の開発」を進めている¹⁾。そのコア技術は、九州大学応用力学研究所で開発が続けられており、2006年に第一著者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²⁾を取得した。

現在では、九州電力グループの西日本技術開発(株)および(株)環境GIS研究所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、風力業界の標準モデルの一つとして広く普及に努めている。主な納入先には、(株)ユーラスエナジーホールディングス、電源開発(株)、日本風力開発(株)、エコ・パワー(株)、(株)東芝、日立造船(株)などがある。

一方、上記の数値風況予測データや遠隔監視制御システムSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)から取得される実測データに基づいて、適切な風車の運転制御システムの提案も開始した³⁾。

そこで本報では、最新のRIAM-COMPACT®ソフトウェアの特長と、風況の品質管理および風車の運転制御の実例を紹介する。

2. RIAM-COMPACT®ソフトウェアの概要と事例

実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアの主な特長と、入力情報を下記に示す(表1を参照)。

主な特長

- ◆ 非定常・非線形の流体工学CFDモデル(Computational Fluid Dynamics model)
- ◆ 乱流モデルには、RANSモデル(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation model)よりも有望視されているLESモデル(Large-Eddy Simulation model)を採用
- ◆ 地理情報システムGIS(Geographic Information System)とCFD技術との相互連携に成功
- ◆ 国内外を問わず、世界中のあらゆる市街地、平坦地形、複雑地形に適用可能
- ◆ 風速分布のみならず、乱流強度分布などの3次元アニメーション表示が可能
- ◆ 野外風況観測データに基づき、ウエイクロスを考慮した任意地点の年間発電電力量(kWh)や設備利用率(%)が評価可能
- ◆ 風車立地点における風速分布や乱流強度の鉛直分布が表示可能
- ◆ 風車に対する風荷重を評価するための風速3成分の時系列データが出力可能(グラフ表示も可能)
- ◆ 風車受風面内における風の吹き上げ角度、吹き下げ角度の時系列データが出力可能(グラフ表示も可能)

入力情報

- ◆ 1年間の野外風況観測データ
(1時間間隔の風速および風向の時系列データ or 統計処理データ)
- ◆ 地図情報: 標高データおよび土地利用データ
(地表面粗度分布)
- ◆ 観測位置(世界測地系に基づいた十進経緯度)
- ◆ 観測マスト寸法: 地上高
- ◆ 風車位置(世界測地系に基づいた十進経緯度)
- ◆ 風車寸法: ハブ高さおよびロータ直径
- ◆ 風車性能特性(出力係数 or パワーカーブ)

実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェアの予測精度の検証や最新の研究成果は、文献^{4, 5)}を参照していただきたい。以下では、我々が最近実施した数値乱流診断を紹介する。

図1に、本研究で使用した計算領域を示す。標高データには、我々が独自に作成した空間解像度10mのデータを用いた。ここで、計算領域の入口部には工夫を施した。袖領域として勾配10%程度の傾斜を作成した。袖領域の作成によって標高差をなくし、下記に示す流入境界条件を課した。同時に、計算領域の出口部にも計算を安定に進めるための袖領域を付加した。計算領域の大きさや計算格子数などは、図1中に示す通りである。

	各ソフト群の名称
前処理 Pre-processing	① RC-Elevgen (計算格子作成ソフトウェア)
	② RC-RoughnessMaker (地表面粗度付与WEBサービス)
数値風況ソルバー Solver	③ RC-Solver (数値風況ソルバー)
後処理 Post-processing	④ RC-Scope (計算結果可視化ソフトウェア)
	⑤ RC-Explorer (発電量評価ソフトウェア)

表1 「実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェア」の構成

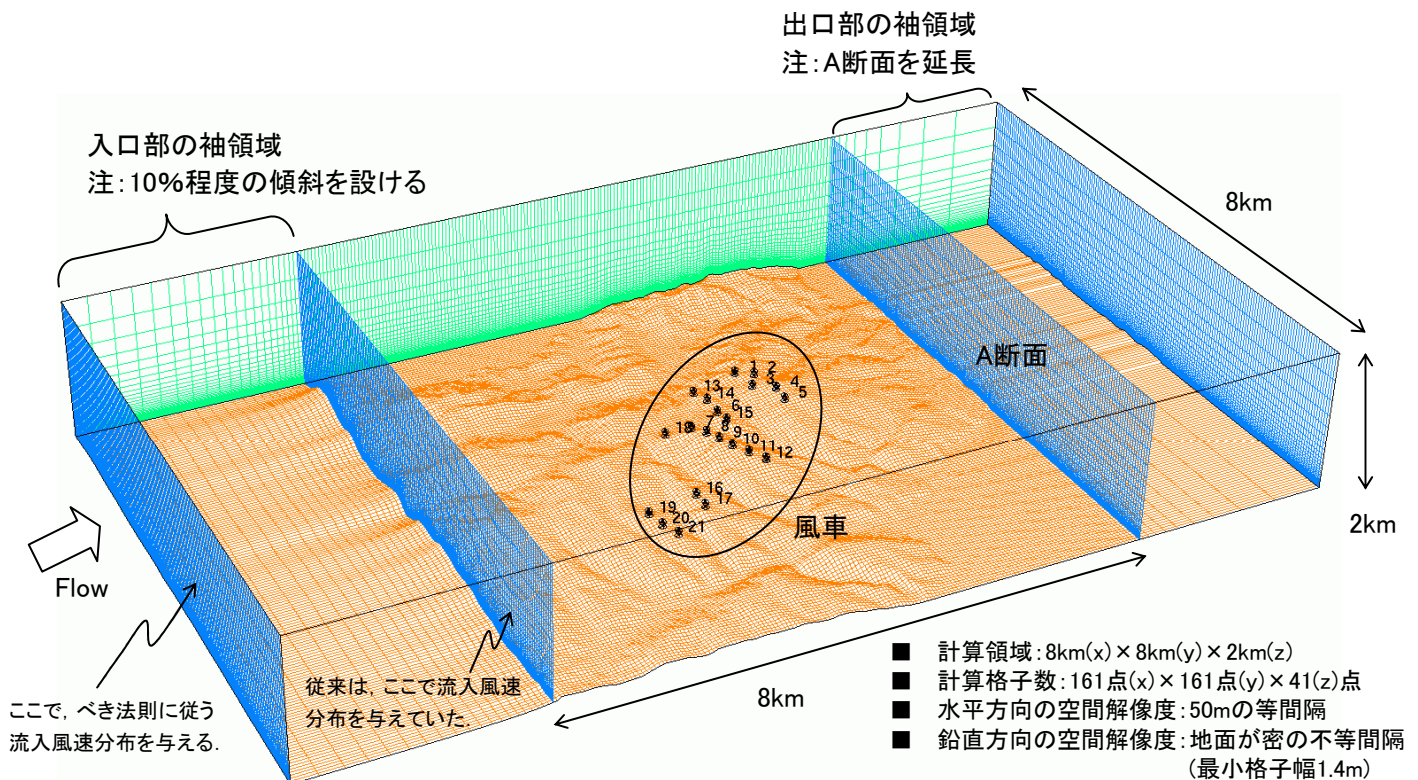


図1 本研究で使用した計算領域 (独自に作成した空間解像度10mの標高データを使用)

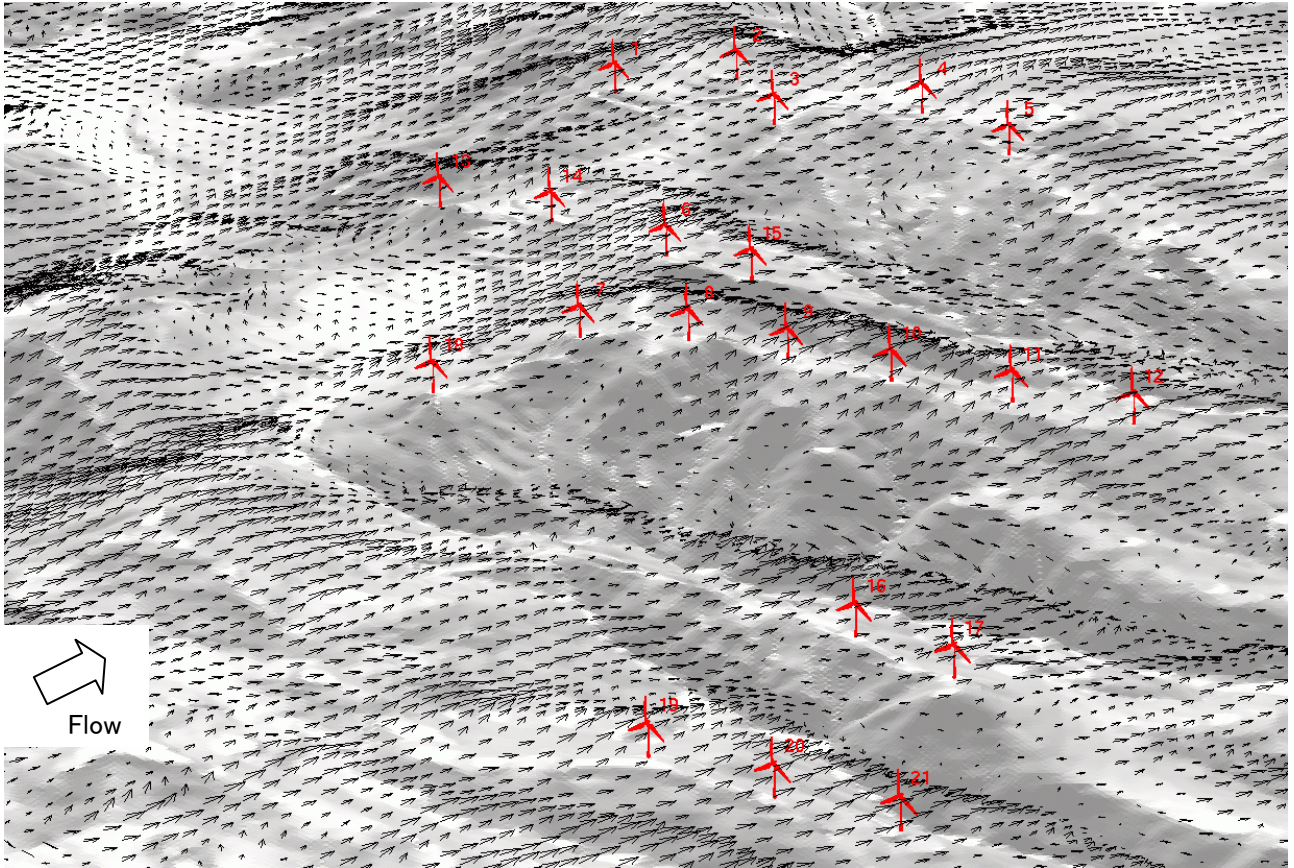


図2 風車ハブ高さ(地上高70m)における速度ベクトル図, 瞬間場

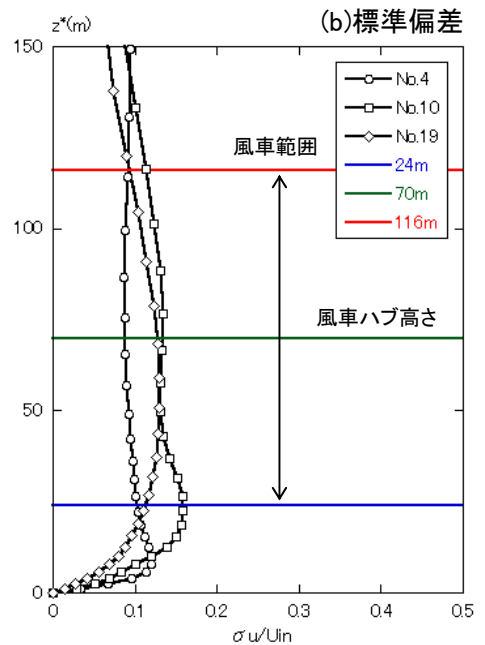
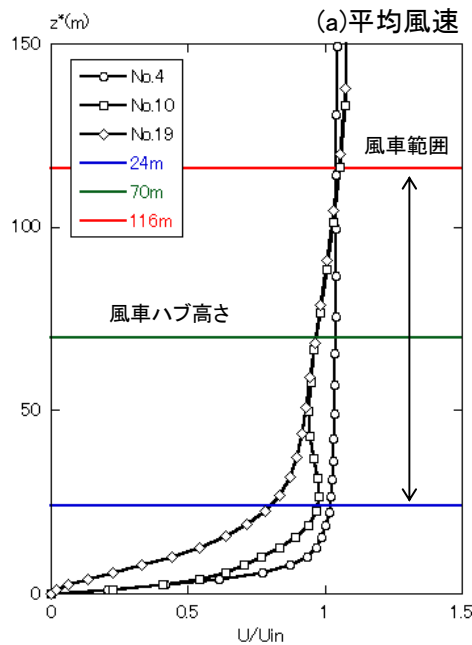
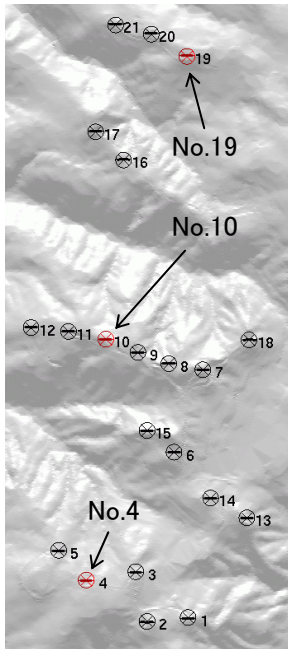


図3 風車立地点における乱流諸量の鉛直分布

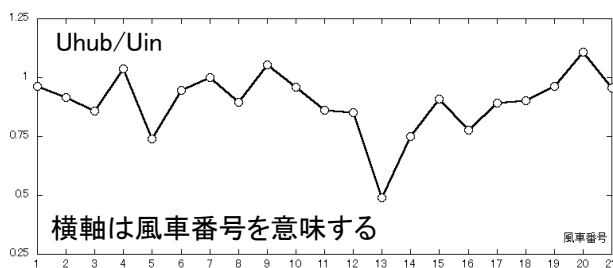
境界条件に関して, 流入境界面にはべき指数7に従う風速分布を与えた. 側方境界面と上部境界面は滑り条件, 流出境界面は対流型流出条件とした. 地面には粘着条件を課した. レイノルズ数は, 計算領域の標高差 $h(=399\text{m})$ と流入境界面における高さ h に

おける風速 U に基づき, $Re(=Uh/\nu)=10^4$ とした. 時刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U$ とした. 本研究では, 平均風速 6m/s 以上の強風場を対象にしているので, 大気有する高度方向の温度成層の効果は省略した. また, 地表面粗度の影響は地形表面の凹凸を高解像度に

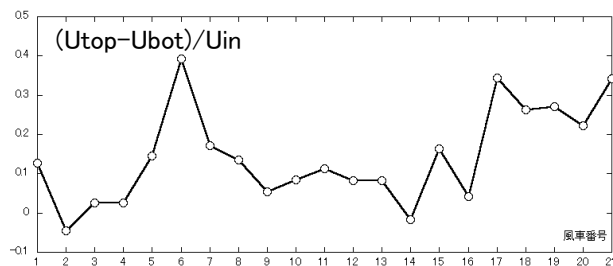
再現することで取り入れた。

図2には、風車ハブ高さ(地上高70m)における速度ベクトル図(瞬間場)を示す。この図を観察すると、風車周辺における風況は地形の凹凸の影響を強く受けていることが分かる。すなわち、風に対する地形効果により風速が局所的に増速している領域や、減速している領域が出現している。これらの局地的な風況パターンは、実地形版RIAM-COMPACT[®]ソフトウェアが有する「アニメーション表示機能」を用いることで、さらに明確に把握することが可能である。

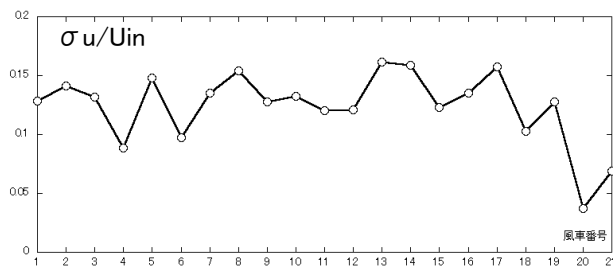
図3には、風車立地点における乱流諸量(a:平均風速, b:標準偏差)の鉛直分布を示す。本報では、



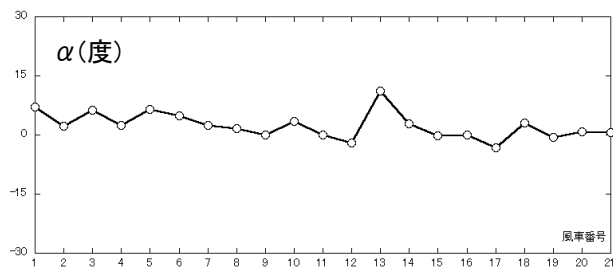
(a)平均風速



(b)ブレード上端と下端における平均風速の差



(c)標準偏差



(d)風車に対する風の進入角度

図4 風車ハブ高さでの乱流諸量((b)は除く), 横軸は風車番号, 縦軸は乱流諸量, 時間平均風況場から算出

紙面の都合上、代表して三箇所を示す。いずれの地点においても、地形効果により風速が局所的に増加していること、標準偏差は風車の受風面全体において小さいことが分かる。

図4には、風車ハブ高さ位置で評価した乱流諸量を示す。ここで、乱流諸量は時間平均風況場から算出した。図3および図4を総合的に吟味することで、ウインドファーム内の風車の気流特性を相対的に比較することが可能である。最終的には、得られた結果は各風車の日々の効率的な運転や、重大事故防止などのメンテナンスに対する指針として活用している。

3. 風車の運転制御

実際の風車の運用に際しては、我々は上述の数値風況予測データだけではなく、風車や付近の実測データを用いて各風車立地点における風況の統計的性質を求め、風車制御に必要な将来の乱流特性を予測して、風車の適切な運転制御を行う手法を提案している³⁾。

風車の効率的な運用と安全制御を行うためには、風車が運転中に受ける風速を事前に予測して、ブレードのピッチ角やナセルの方位角を制御する必要がある。特に最大風速の発現予測は、ブレードやタワーの損傷を防ぐために極めて重要であり、その予測精度を向上させることは、発電量だけでなく、装置の寿命の最大化に直結する。よって、各風車立地点における乱流特性の高精度な予測が求められる。我々の提案する風車の運転制御システムでは、風車や付近の観測点で観測された風の実測値を監視・収集し、過去のデータを基に各風車立地点における風況の統計的性質を求める。さらに、この統計的性質を用いて将来の乱流特性を予測し、日々の風車の運転制御を行うものである。以下では、風速予測を用いた風車の運転制御の一例を紹介する。

風車の適切な運転制御を行うためには、ブレードやタワーの損傷を防止し、機器の寿命を最大化できる「安全限界風速」以下で、最大の発電効率を得られるような制御が求められる。我々の提案する運転制御システムでは以下のように将来の風速を予測して、この要求に応じている。観測データに基づいて各風車立地点における風況の統計的性質を算出し、これを用いて現在の風速 V_n に対する将来の風速 V_f を予測する(図5)。その際、過去の観測データから、現在の風速 V_n に対する将来の風速 V_f の「発現確率」を求めて、これを用いる。各風車立地点における風況は周囲の地形などによってそれぞれ異なった性質を有するので、図6に示すように現在の風速 V_n に対して将来風速 V_f の風が吹く「超過確率」を各風車位置で

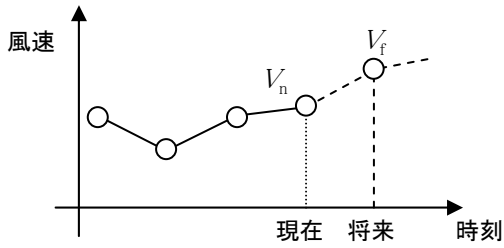


図5 現在の風速 V_n を用いて将来(次の時刻ステップ)の風速 V_f を予測する

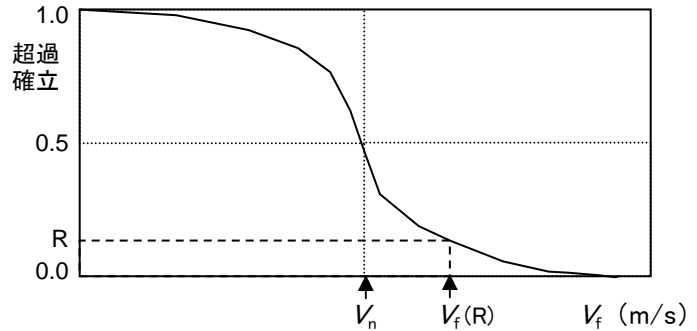


図6 現在の風速 V_n に対する将来(次の時刻ステップ)の風速 V_f の超過確立. 超過確率 R を指定し, 対応する $V_f(R)$ を求める

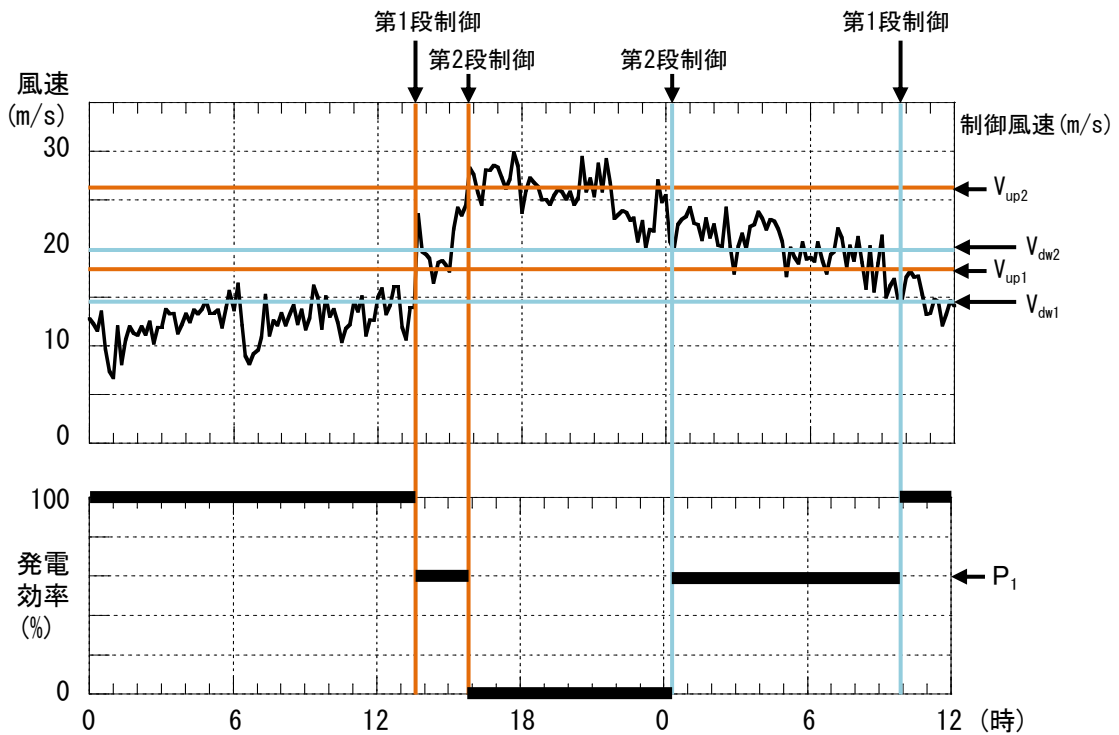


図7 観測された風速データによる風車の安全運転制御の一例

求めておく. これにより, 超過確率 R を指定して対応する $V_f(R)$ を求める. 風車の運転制御はブレードのピッチ角やナセルの方位角を制御することにより行われるが, 実際には発電効率を指定して制御することが多い. つまり, 発電効率を下げることで, 風車を受ける風力を低減し, 結果としてブレードやタワーの損傷を予防する. このとき, どの時点で発電効率を下げるかの判断は, 発電効率に応じた風力と, それにより各部材に生じる応力が引き起こす損傷や劣化などを考慮して, 風車が求められる稼働期間内に重大な故障が起こらないように行われる. 通常の運用に際しては, 風車に加わる風速を「損傷限界風速」に安全率を掛けた「安全限界風速」以下になるように発電効率を制御する風速が「運転制御風速」として設定される. これにより, 将来吹くと予測される風速 V_f が運

転制御風速を超える場合に, 発電効率を下げるように制御を行うことになる. 一連の風車の運転制御の具体例を以下に示す.

図7に示すように, 風速が低い期間(この場合は12時頃まで)は発電効率を100%とし, 最大効率で発電を行う. その後, 風速が増加してくると, 将来予測される風速の超過確立 R の値を指定して図6のように V_f を求め, この値が運転制御風速を超える場合には風車の発電効率を下げるように制御する. この制御は以下のように2段階で行われる. 第1段階の制御は運転制御風速 V_{up1} で行い, 発電効率を最大発電効率の $P_1\%$ に下げてブレードが受ける風力を低減する. 風速が上がってくると, 第2段階の制御を運転制御風速 V_{up2} で行い, 発電効率を0%に下げてブレードが受ける風力を最小限に抑える.

次に風速が減少し、風車の運転を安全に再開させる運転制御風速について述べる。上述のように、風速が大きくなって発電出力を最大発電出力の $P_1\%$ に制御、あるいは停止させた後、風速が減少して発電を再開させようとする場合の運転制御風速は、風速が増加する場合の運転制御風速よりもそれぞれ小さく設定する。この理由は以下の通りである。運転制御風速 V_{dw1} , V_{dw2} で再起動あるいは発電出力を上げた後、風速が前述の風速増加期間における運転制御風速をすぐに超えてしまうと、頻繁に出力制御がかかって都合が悪いので、すぐには運転制御風速 V_{up1} および V_{up2} を超えないように設定する。よって、風速減少期間での第1段階の運転制御風速 V_{dw1} は V_{up1} 以下に、第2段階の運転制御風速 V_{dw2} は V_{up2} 以下に、それぞれ設定する。

これまで述べてきた風車の制御時の発電効率、および風速増加期間・減少期間の運転制御風速は、発電効率に応じた風力とそれによりブレードなどに生じる応力、さらに、各部材の劣化・損傷などを考慮して、風車が求められる稼働期間内に重大な故障が起らないように設定される。

4. おわりに

本報では、「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」の最新情報および数値風況診断(風況の品質管理)の結果を紹介した。また、上記の数値風況予測データや遠隔監視制御システムSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)から取得される実測データに基づいた風車の適切な運転制御システムを紹介した。

「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」による数値乱流診断では、風車立地点や風車ハブ高さ位置において、種々の乱流諸量を算出する。それらを総合的に吟味し、ウインドファーム内の風車を相対的に比較する。最終的に、得られた結果は各風車の

日々の効率的な運転や、重大事故防止などのメンテナンスに対する指針として活用する。平行して、上記の乱流諸量と発電量の定量的な関係においても研究を進めている。

さらに、数値風況予測データや遠隔監視制御システムSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)から取得される実測データに基づき、各風車立地点における風況の統計的性質を求め、風車の運転制御に必要な将来の乱流特性を予測して、効率的で安全な運転を行う風車制御システムも提案している。

風力業界において、「産学連携(大学、風力事業者、風車メーカー、電力会社)」は重要なキーワードである。今後もこの産学連携のスキームをさらに強化し、風力発電産業の普及に向けた取り組みを積極的に実施していく。

参考文献

- 1) Uchida, T. and Ohya, Y. : 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) 流体解析支援システム(実用新案第3128436号)
- 3) 発電システム(実用新案第3184277号)
- 4) 内田 孝紀, 丸山 敬, 石川 裕彦, 座古 勝, 出口 啓: 白滝山ウインドファームの風車ブレード損傷事故の原因解明—コンピュータシミュレーションによるアプローチ—, 風力エネルギー協会誌, Vol.34, 通巻.96, pp.77-84, 2011
- 5) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 川島 泰史, 猿渡 和明, 西田 利彦: RIAM-COMPACT®によるウインドリスク(地形乱流)の数値診断—愛知県渥美風力発電所を例として—, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.35, 通巻99, pp.14-23, 2011