

## 複雑地形上の風車サイトを対象にした RIAM-COMPACT<sup>®</sup>による乱流診断とSoundPLAN<sup>®</sup>による風車音予測

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  
 (株)小野測器 技術本部コンサルティンググループ 須田 直樹  
 (株)環境GIS研究所 荒屋 亮  
 西日本技術開発(株) 火力本部 火力技術部 技術調査グループ 川島 泰史

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も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を環境影響評価(アセスメント)法の対象に新たに追加することが調整されており、風車音の予測技術の確立も急務である。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<sup>®1)</sup>(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。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<sup>®</sup>の商標と実用新案を取得した。

現在では、九州電力グループの西日本技術開発(株)、(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<sup>®</sup>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)、ミツウロコグリーンエネルギー(株)などがある。

一方、風車音予測に関して、(株)リアムコンパクトは、環境騒音予測において実績のあるSoundPLAN<sup>®</sup>((株)小野測器、<http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/software/others/spFram eset.htm>)による受託解析を開始した。

そこで本報では、RIAM-COMPACT<sup>®</sup>およびSoundPLAN<sup>®</sup>のそれぞれのソフトウェアの特長と計算事例を紹介する。

### 2. RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアの概要と事例

実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>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・非線形の流体力学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、複雑地形にまで適用可能
- ◆ 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
- ◆ 風車に対する風荷重を評価するための、風速の

- ◆ 時系列データが出力可能
- ◆ 風車立地点における風速分布や乱流強度の鉛直プロファイルが表示可能
- ◆ 風車受風面内における風の吹き上げ角度, 吹き下げ角度が出力可能

**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<sup>®</sup>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<sup>2)</sup>を参照していただきたい。以下では、我々が最近、推奨している数値乱流診断の実施例を紹介する。

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。

	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-WindmillMaker (風車線図作成ソフトウェア)
	③ RC-RoughnessMaker (地表面粗度付与WEBサービス)
ソルバー Solver	④ RC-Solver (風況ソルバー)
後処理 Post-processing	⑤ RC-Scope (計算結果可視化ソフトウェア)
	⑥ RC-Explorer (発電量評価ソフトウェア)

表1 「実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェア」の構成

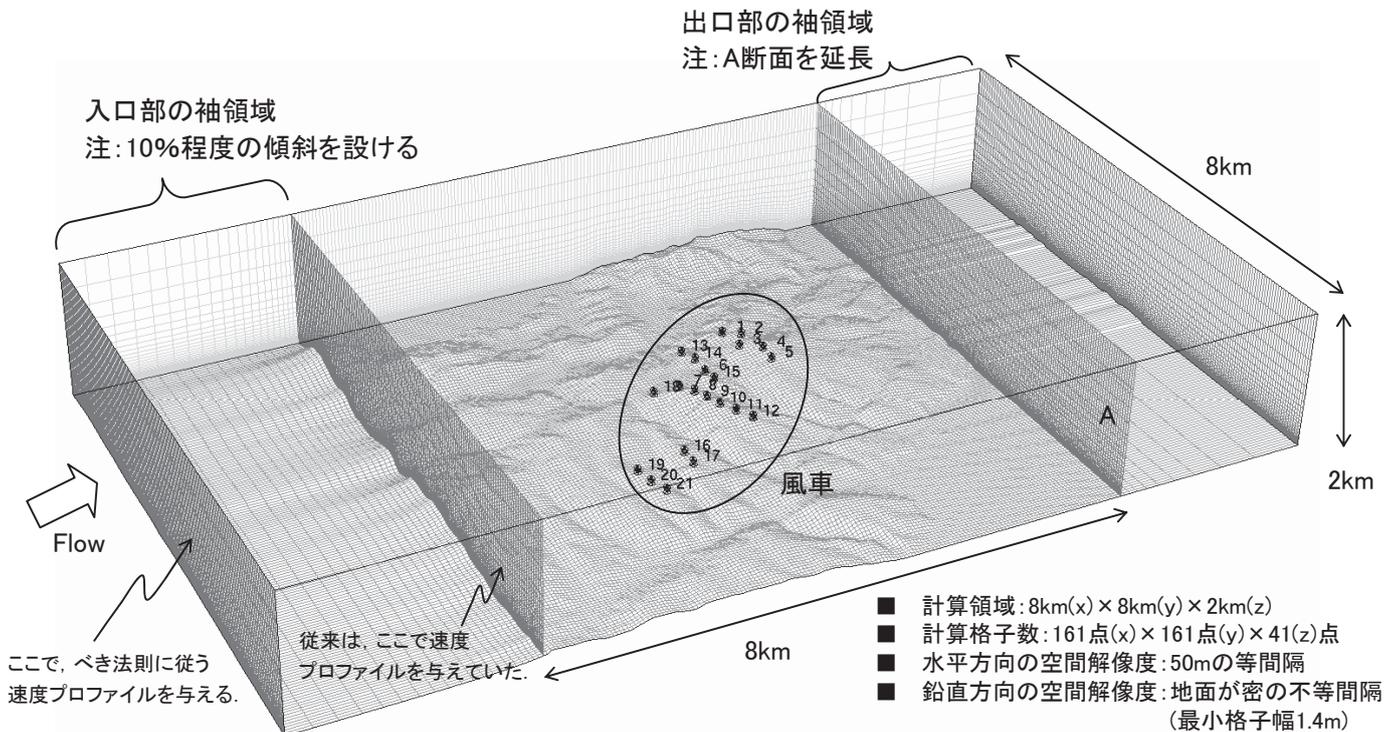


図1 本研究で使用した計算領域 (独自に作成した空間解像度10mの標高データを使用)

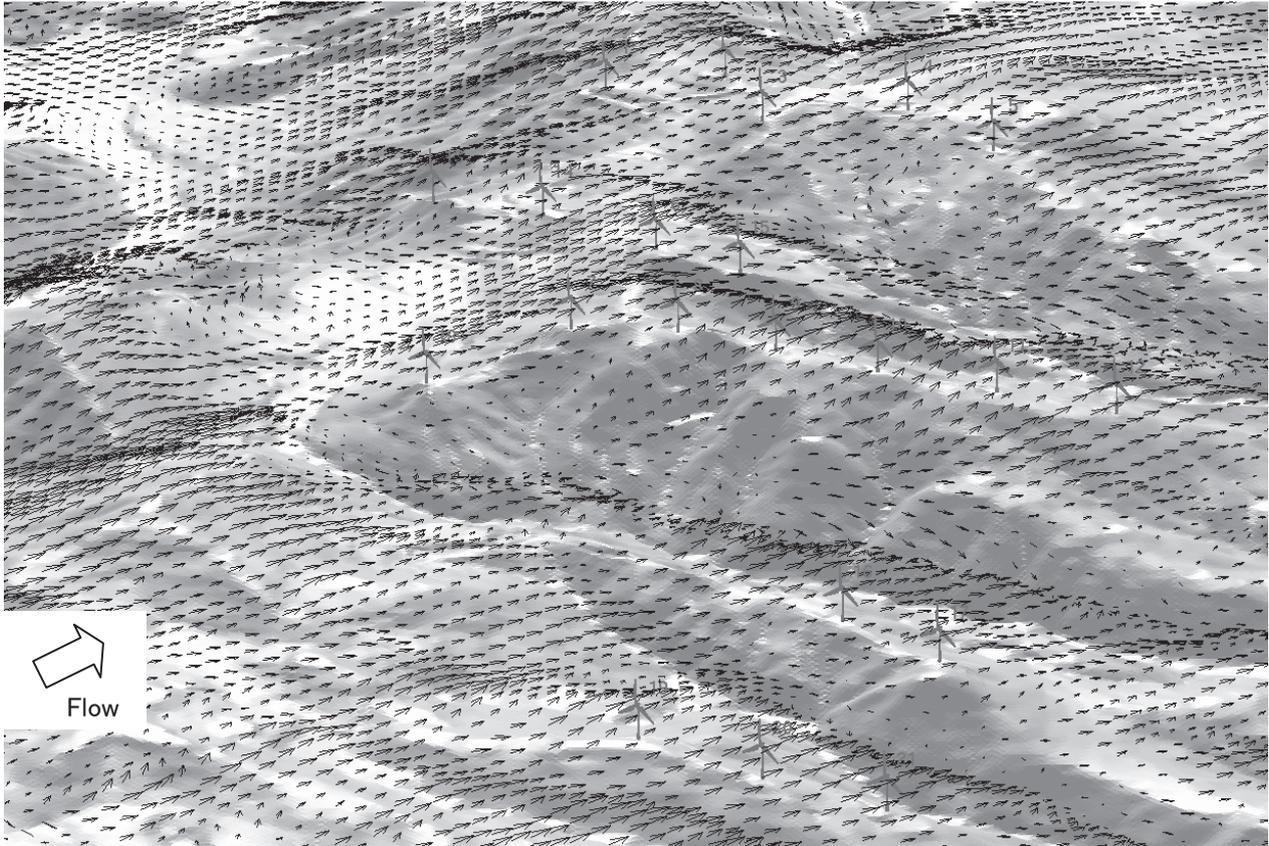


図2 風車ハブ高さ(地上高70m)における速度ベクトル図, 瞬間場

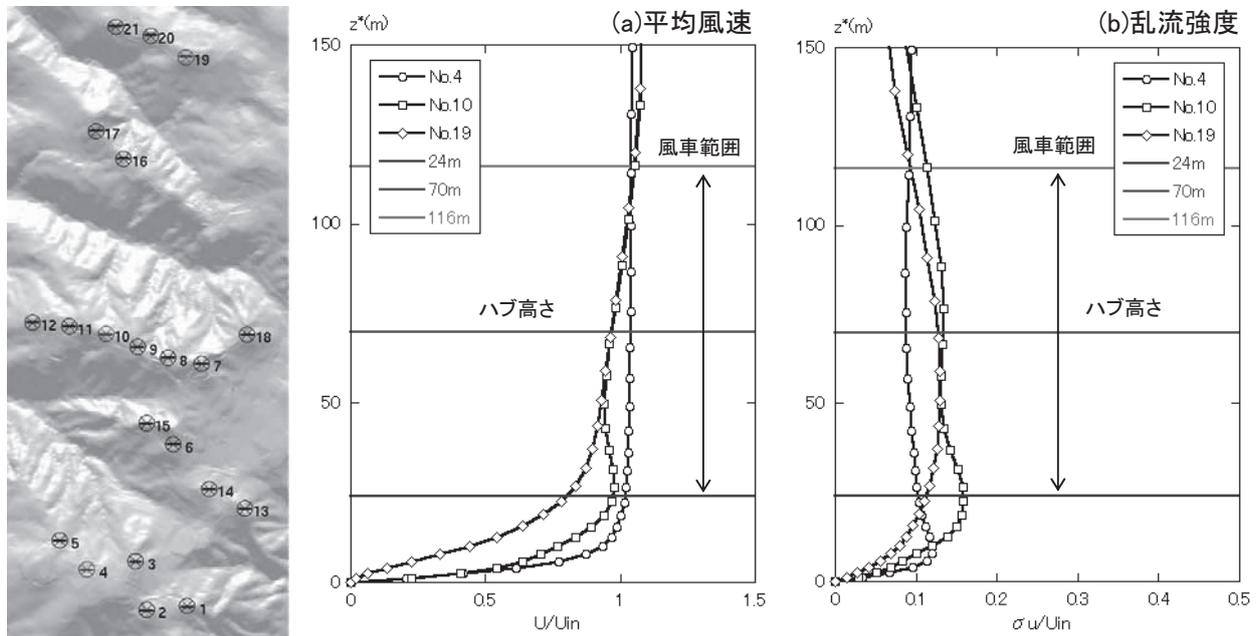


図3 風車立地点における乱流諸量の鉛直分布

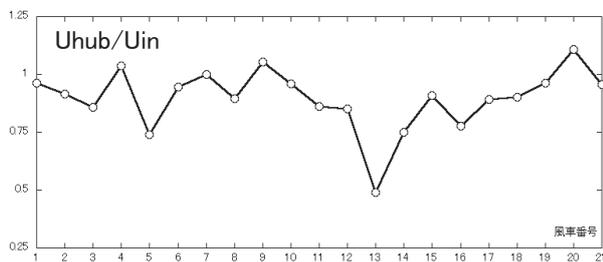
境界条件に関して、流入境界面にはべき指数7に従う速度プロファイルを与えた。側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地面には粘着条件を課した。レイノルズ数は、計算領域の標高差 $h(=399\text{m})$ と流入境界面における高さ

$h$ での風速 $U$ 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 $6\text{m/s}$ 以上の強風を対象にしているため、大気が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

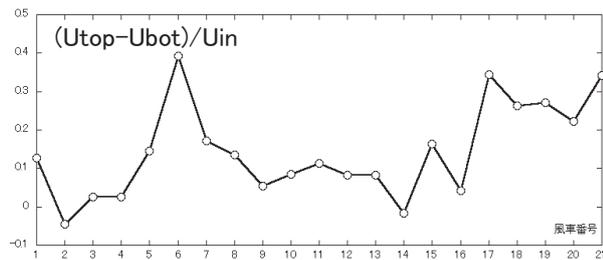
再現することで取り入れた。

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<sup>®</sup>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。

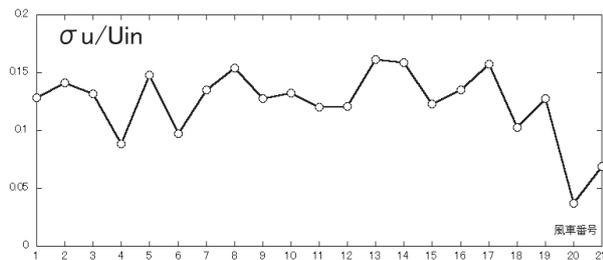
図3には、風車立地点における乱流諸量(a:平均風速, b:乱流強度)の鉛直分布を示す。本報では、



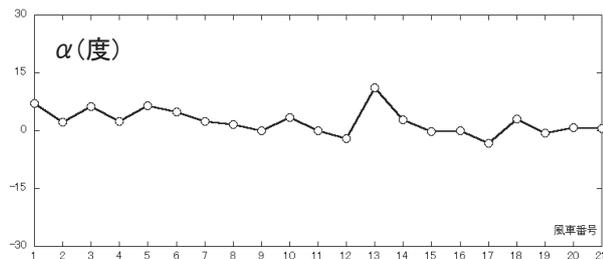
(a)平均風速



(b)ブレード上端と下端における平均風速の差



(c)乱流強度



(d)風車に対する進入角度

図4 風車ハブ高さで評価した乱流諸量, 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, 乱流強度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を相対的に比較する。最終的には、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たいと考えている。

### 3. SoundPLAN<sup>®</sup>ソフトウェアの概要と事例

SoundPLAN<sup>®</sup>は、道路交通、鉄道、工場や大規模小売店舗、建設工事などから発生する騒音の予測計算を行うことができるソフトウェアである。環境影響評価における騒音予測で広く活用されており、近年は風力発電施設から発生する騒音の予測計算にも用いられている。以下にSoundPLAN<sup>®</sup>の特長, および予測手法を示す。

#### 主な特長

- ◆ 幾何音響的手法による音響伝搬計算
- ◆ 日本および諸外国の環境騒音予測手法を導入
- ◆ 3次元地形を, 数値地図, DXF, ASCII形式のデータインポートで作成可能
- ◆ 地形の起伏, および障害物の位置・形状を考慮した3次元計算
- ◆ 音の反射を99回までの間で任意に設定可能
- ◆ 障害物による多重回折補正は, 受信点と騒音源との間で最も影響の大きなエッジを複数使用
- ◆ 水平面音圧レベル分布, および垂直断面音圧レベル分布を計算可能
- ◆ 特に水平面音圧レベル分布は, オーバーオールだけでなく, 周波数帯域ごとの出力も可能
- ◆ 計算結果は様々なグラフィックファイル形式, ASCII, シェープファイル形式等で出力可能

計算対象の地形は、実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアによる数値風況シミュレーションで用いた標高データと同じデータ(空間解像度10m, ESRI ASCII Grid形式)をインポートして作成した。その上に、騒音源となる21基の風車を点音源として、風車ハブ位置に入力した。騒音源には音響パワーレベルの周波数特性を与える。ここでは、ある風車の風速10m/sにおける音響パワーレベル周波数特性(25Hz~20kHz 1/3オクターブバンド, A特性オーバーオール値103.5dB)を与えた。

その他の設定は、受音点、水平面音圧レベル分布、および垂直断面音圧レベル分布を計算する範囲などを設定するだけで、計算対象地域の設定は終了となる。計算範囲は、風車を含んで東西方向に3.2km、南北方向に5.5kmとし、地上1.5mの高さで地形の起伏に沿って10m×10mの格子状の計算ポイントを設定して計算を行った。

### 予測計算手法

風力発電施設を対象とした従来の騒音予測は、「風力発電ガイドブック」<sup>3)</sup>および「風力発電のための環境影響評価マニュアル」<sup>4)</sup>など(以下、「ガイドブック」および「マニュアル」と称す)に記述される、距離減衰、および空気吸収のみを考慮した簡便な伝搬計算手法を用いて行われてきた。今後、風力発電施設が環境影響評価法の対象となるにあたり、さらに高度な騒音予測手法が研究対象となる可能性がある。

SoundPLAN<sup>®</sup>では、建設工事騒音予測手法「ASJ CN-Model 2007」<sup>5)</sup>をベースとした予測手法を導入しており、風力発電施設から発生する騒音に対しては、上述のガイドブック、およびマニュアルで記述される距離減衰、および空気吸収の他、障害物における回折や反射を考慮した伝搬計算を周波数帯域別に行うことが可能である。

予測手法の基本伝搬式を以下に示す。

$$L_p = L_{emission} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{cor} \quad (1)$$

$L_p$ : 予測点における騒音評価量[dB]

$L_{emission}$ : 音源の騒音発生量(音響パワーレベル)  
[dB]

r: 騒音源と予測点との直接距離[m]

$\Delta L_{cor}$ : 伝搬に影響を与える各種要因に関する補正量の和

$$\Delta L_{cor} = \Delta L_{dif} + \Delta L_{grnd} + \Delta L_{air} + \Delta L_{etc} \quad (2)$$

$\Delta L_{dif}$ : 回折に伴う減衰に関する補正量[dB]

$\Delta L_{grnd}$ : 地表面の影響に関する補正量[dB]

$\Delta L_{air}$ : 空気の音響吸収に関する補正量[dB]

$\Delta L_{etc}$ : その他の影響要因に関する補正量[dB]

日本国内において、周波数帯域別に風向・風速による影響、および地表面による影響を伝搬計算に適用する方法は、両者ともに従来の環境影響評価のための手法としては実用化されていない。そこで、今回の予測計算は、音響パワーレベルの値は風速10m/sにおける値であるが、風向・風速が伝搬に与える影

響と、地表面による影響の考慮は含まずに計算を実施した。

図5に、SoundPLAN<sup>®</sup>によって計算された水平面音圧レベル分布の結果を示す。計算結果はシェープファイル形式でSoundPLAN<sup>®</sup>からエクスポートすることができるので、実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアの発電量評価ソフトウェアRC-Explorer上でも表示することが可能である。従来の距離減衰および空気吸収だけを考慮した伝搬計算では得られない、地形の起伏による遮蔽効果を考慮した伝搬計算を行うことで、より実際の伝搬状況に近い予測を行うことができる。さらに、建物などが複数ある場合でも、その遮蔽、および反射を考慮することが可能であることから、様々な状況に対応した予測計算が可能である。

### 4. おわりに

本報では、「実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェア」と、「環境騒音予測ソフトウェアSoundPLAN<sup>®</sup>」の特徴と具体事例を紹介した。

「実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェア」による乱流診断では、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、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たいと考えている。平行して、上記の乱流諸量と発電量の定量的な関係も研究を進めている。

一方、「環境騒音予測ソフトウェアSoundPLAN<sup>®</sup>」では、「実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェア」で用いたものと同じ空間解像度の標高データを入力し、複雑地形上の風車音を予測した。得られた結果は、シェープファイル(ESRI Shapefile)として出力することで、「実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェア」の「発電量評価ソフトウェアRC-Explorer」で自動的に表示可能である。今回の伝搬解析では、「風向・風速による影響を考慮しない」という条件で実施したが、今後、RIAM-COMPACT<sup>®</sup>ソフトウェアとの相互連携を強化し、より現実に近い状況を模擬したいと考えている。具体的な研究課題として、騒音の面では風向・風速による影響、および周波数ごとの地表面による影響を考慮可能な予測手法の開発が急務であろう。これらの影響を考慮可能な北欧の予測手法「Nord2000」が、SoundPLAN<sup>®</sup>には導入されている。今後、Nord2000に代表される気象条件や地表面による影響適用の可能性が、日本でも検討されるであろう。

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、風力業界の普及に向けた取り組みを積極的に実施していきたい。

### 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) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 川島 泰史, 猿渡 和明, 西田 利彦:RIAM-COMPACT<sup>®</sup>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
- 3) NEDO : 風力発電ガイドブック(2008年2月改訂第9版)
  - 4) NEDO : 風力発電のための環境影響評価マニュアル(第2版)
  - 5) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会:建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2007”, 日本音響学会誌, 64巻, 4号, pp.229-260, 2008

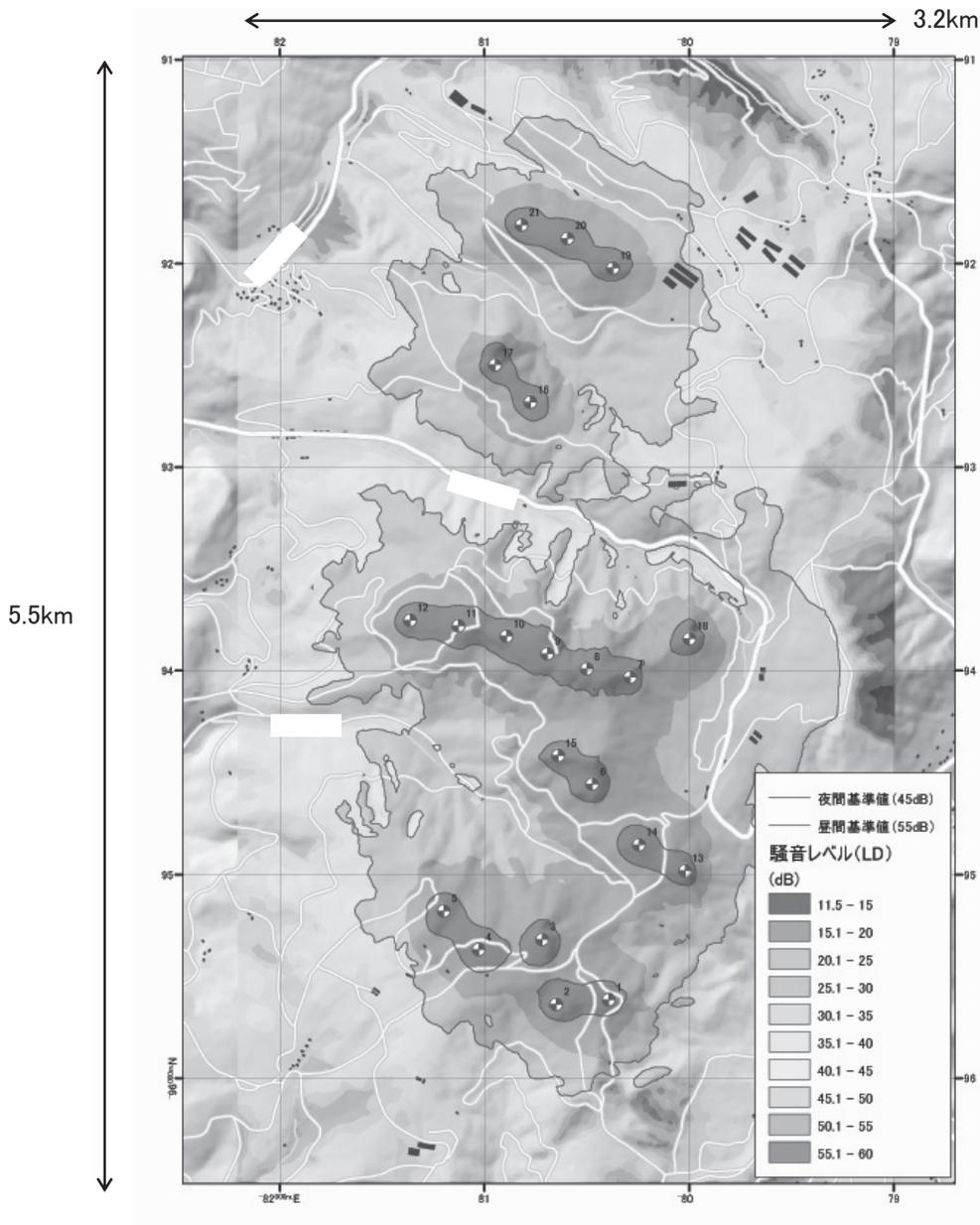


図5 SoundPLAN<sup>®</sup>による風車音の予測結果を、  
 実地形版RIAM-COMPACT<sup>®</sup>の発電量評価ソフトウェアRC-Explorerで表示した例  
 備考: SoundPLAN<sup>®</sup>による解析結果をシェープファイル(米国ESRI社のGIS標準データフォーマット形)として  
 出力することで, RC-Explorerで自動的に表示可能である