

大規模な崖状地形に建設された大型ウインドファームを対象とした気流場解析

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

鵜沢, 憲
東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター

<https://doi.org/10.15017/1660339>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.78-84, 2015-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

大規模な崖状地形に建設された 大型ウインドファームを対象とした気流場解析

内田 孝紀*, 鶴沢 憲**

(2015年8月31日受理)

Analysis of the Airflow Field around a Steep, Three-dimensional Escarpment with Commercially Available and Open Source CFD Softwares

Takanori UCHIDA and Ken UZAWA

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

Abstract

Huadian Group's first wind project in Yunnan, Duogu wind farm, has been approved by the Provincial Development and Reform Commission. The acquired site is in Mengzi, south east of Yunnan Province. The developer intends to employ 33 units of 1.5MW turbines in this new wind farm (49.5MW) and the total cost of construction has been estimated to be CNY449.7 million (\$69.61 million).

The present study compared the prediction accuracy of two CFD software packages for simulating a flow around an actual escarpment with a steep slope: 1) OpenFOAM (turbulence model: SST $k-\omega$ RANS), which is a free, open source CFD software package developed by OpenCFD Ltd at ESI Group and distributed by the OpenFOAM Foundation and 2) RIAM-COMPACT® (turbulence model: the standard Smagorinsky LES), which has been developed by the lead author of the present paper. Relatively good agreement was obtained between the OpenFOAM and the RIAM-COMPACT®.

Key words : RANS, SST $k-\omega$ model, LES, Standard Smagorinsky model, Escarpment

1. 緒言

第一著者は、LES乱流モデルに基づいたRIAM-COMPACT®¹⁾ (リアムコンパクト)と称する数値風況診断技術の開発を進めている。RIAM-COMPACT®は、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)産学連携機構九州から独占的ライセンス使用許諾を受けている。主に国内の風力業界(民間の風力事業者、自治体、風車メーカーなど)に対して普及に努めている。

一方で、オープンソースソフトウェアの利用も進んでいる。その代表的なものにOpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)²⁾がある。OpenFOAMは、GNU General Public License (GPL)³⁾のもと、非営利団体であるOpenFOAM Foundationから公開・配布されているオープンソースのCFDツールボックスである。

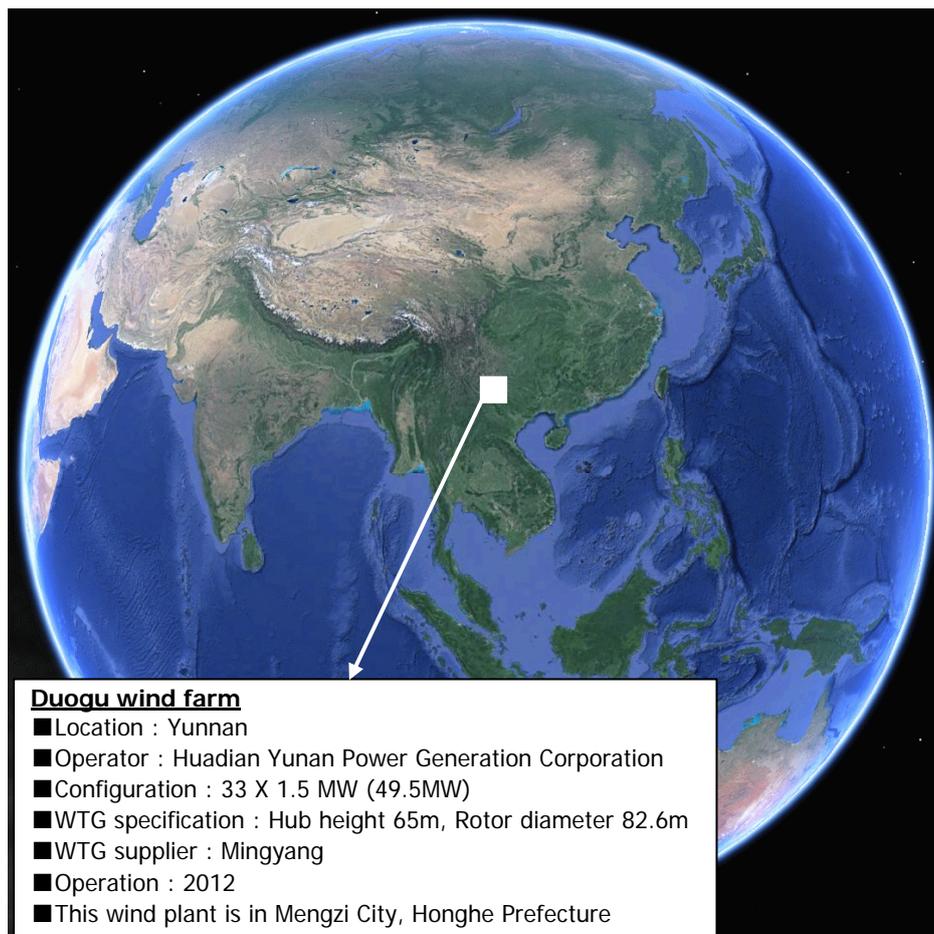
非圧縮性流れ、圧縮性流れ、多相流、直接数値計

算、化学反応、燃焼、浮力流れ、固体熱連成、ラグランジュ粒子計算、分子動力学、直接シミュレーションモンテカルロ、電磁流体、固体応力解析などの極めて幅広い分野において、任意多角形で構成される3次元非構造コロケート格子上で有限体積法に基づき離散化された支配方程式を解くことができる。また、乱流モデルもRANS, LES, DESまで、市販ソフトウェアと比較して遜色ない豊富なモデルが実装されている。市販ソフトウェアと比較して格子生成機能が貧弱で収束性・数値安定性が悪い、国産ソフトウェアと比較して大規模並列性能が悪い(標準でノード内並列化は未対応、係数行列格納方式に座標リスト形式を使用、動的ライブラリの多用)などの課題もあるが、ある程度のC++言語と数値計算の能力があれば手軽にCFDの結果を得ることができるため、近年、中小企業を中心に産業界で活用され始めてきている。

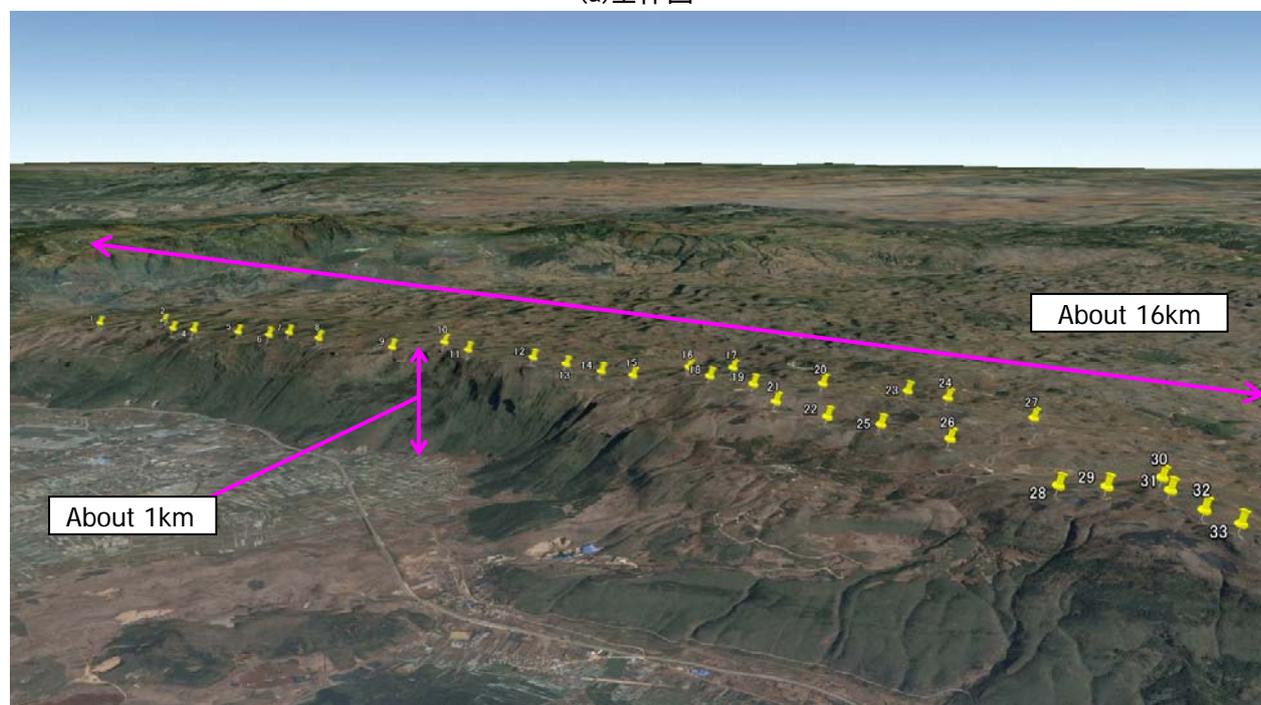
本報では、大規模な崖状地形に建設された大型ウインドファームを対象に、LES乱流モデルに基づいたRIAM-COMPACT®ソフトウェアと、OpenFOAMソフト

* 九州大学応用力学研究所

**東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター



(a)全体図



(b)拡大図, 大規模な崖状地形に風車群(33基)が建設されている.

図1 本研究で対象とした大型ウインドファーム

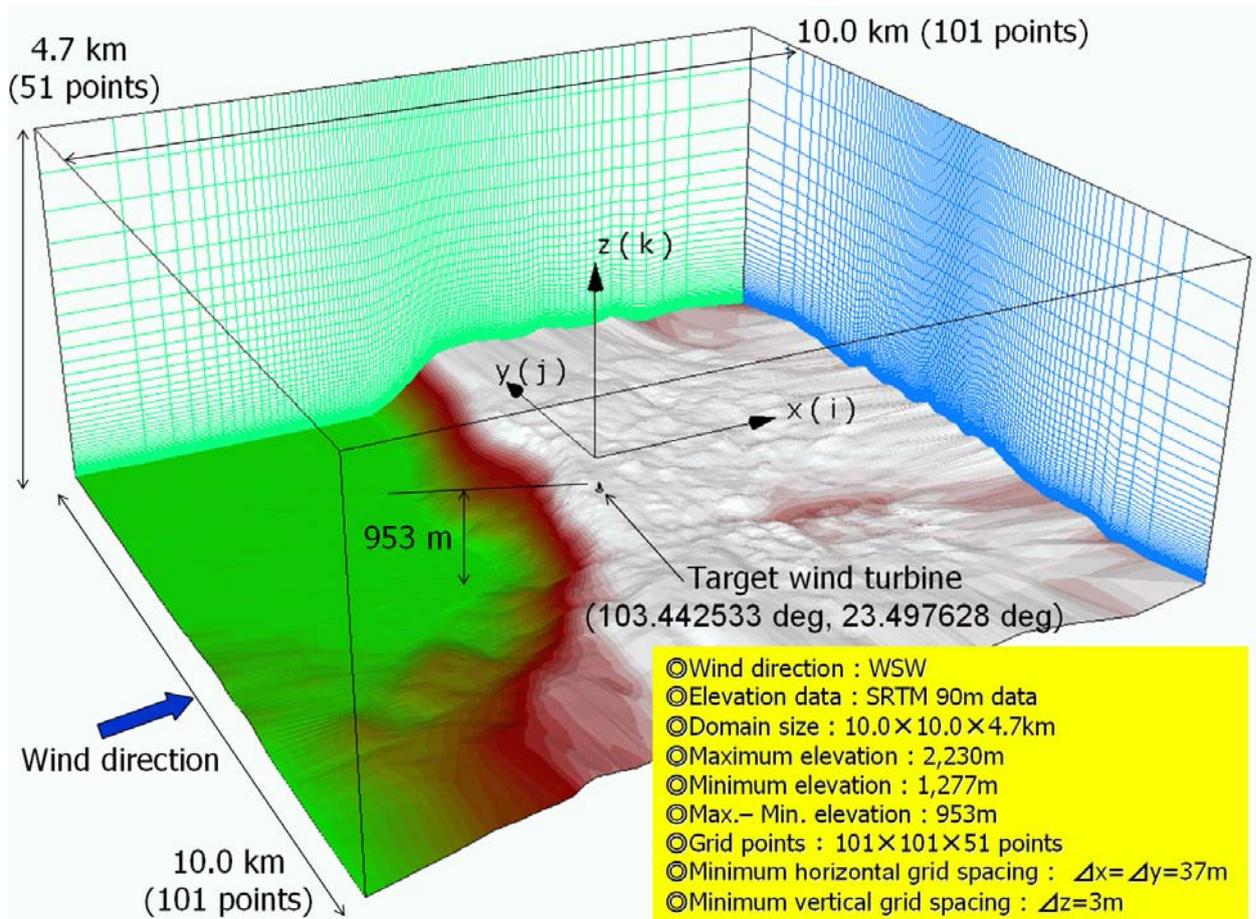


図2 本研究における計算格子図

ウェア(SST $k-\omega$ RANS乱流モデル)の計算結果の比較を実施した(バージョン情報:v.2.1.0).

2. 本研究で対象にしたウインドファーム

本研究では, 図1に示すように中国に実在する大型ウインドファームを対象とした. ここには, 中国の風車メーカーであるMing Yang(明陽)製の風車(1.5MW, Hub height 65m, Rotor diameter 82.6m)が33基建設されている. なお, Ming Yang社は世界第9位の風車メーカーであり, 2013年単年度には世界市場シェア3.7%を有する.

3. 各ソフトウェアの概要と計算パラメータ

本研究では, LES乱流モデルに基づいたRIAM-COMPACT®ソフトウェアと, OpenFOAMソフトウェア(本研究ではRANS乱流モデルを選択)を用い, 中国の急峻な崖状地形に建設された大型ウインドファームを対象に数値風況シミュレーションを行った(図1を参照). 図2には, 本研究で用いた計算格子図を示す.

以下には, 各ソフトウェアの数値計算手法と計算パラメータを示す. 本研究では, 数値不安定を回避し, 複雑地形上の局所的な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実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアを用いる. ここで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(FDM; Finite-Difference Method)に基づき, 乱流モデルにはLES(Large-Eddy Simulation)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ナビエ・ストークス方程式であ

る。

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(中立大気)。地表面粗度の影響は考慮しておらず、地面を含む地形表面は滑面として取り扱った。

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S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。空間項の離散化はナビエ・ストークス方程式の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。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は、梶島による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のサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用いる。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。数値計算手法の詳細は文献¹⁾を参照して頂きたい。

一方、OpenFOAMソフトウェアでは、RANSモデルの一種であるSST $k-\omega$ モデルを用いた^{4, 5)}。当モデルは乱流せん断応力による輸送(Shear Stress Transport, SST)を考慮し、乱流運動エネルギー k と乱流エネルギー比散逸率 ω の輸送方程式を解いて渦粘性を決定する2方程式モデルである。バルクを $k-\epsilon$ モデルで解いて境界層近傍では $k-\omega$ モデルにスイッチすることで、それぞれ単体で解く場合と比較して予測精度と数値安定性が向上している。具体的な数式は右に示す通りである。

既存の市販ソフトウェアと同様に、OpenFOAMでは速度と圧力の連成解法に同時緩和手法であるSIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)系を採用している。本研究では、SIMPLE法の収束性を改善したPISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)アルゴリズム⁶⁾に基づく非圧縮流れの非定常乱流解析ソルバであるpisoFoamを用いた。線形ソルバは代数的マルチグリッド(GAMG)法、時間方向の離散化は2次精度後退差分とし、空間方向の離散化は流束差比に応じてTV安定となるように2次精度中心差分に1次精度風上差分をブレンドした(Gauss limited linear 0.05)。OpenFOAMに実装されているSST $k-\omega$ モデルは高レイノルズ数型RANSモデルであり、第1格子位置 z_{min} を $30 < z_{min}$ に取り、壁関数を併用することで予測精度を担保することが可能である。壁面上の k と ω に対して、それぞれ標準的な壁関数を用いた。

図3には、本研究における代表スケールの取扱いを

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ + 2(1 - F_1) \alpha \omega_2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{cases}$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega \right)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left[2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right]$$

$$F_1 = \tanh \left[\left(\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \alpha \omega_2 k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right)^4 \right]$$

$$F_2 = \tanh \left[\left(\max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right)^2 \right]$$

$$S = \left[\frac{1}{2} (\partial_j u_i + \partial_i u_j) \right], \quad v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, F_2 S)}$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \quad \alpha_2 = 0.44, \quad \beta_1 = \frac{3}{40}$$

$$\beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = \frac{9}{100}, \quad \sigma_{k1} = 0.85$$

$$\sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

示す。hは標高差(m)、 U_{in} は流入境界面での高度hにおける風速(m/s)である。本研究のレイノルズ数は各ソフトウェアとともに $Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$ に設定した。ここで、 ν は動粘性係数(m^2/s)である。境界条件についても各ソフトウェアで同様な設定とした。流入境界面には、べき指数5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(非滑り条件)を課した。時間刻みに関して、RIAM-COMPACT[®]では $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U_{in}$ とし、OpenFOAMでは $\Delta t=10^{-4}h/U_{in}$ とした。

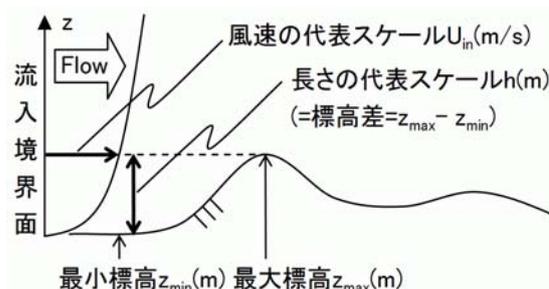


図3 代表スケールの取扱い

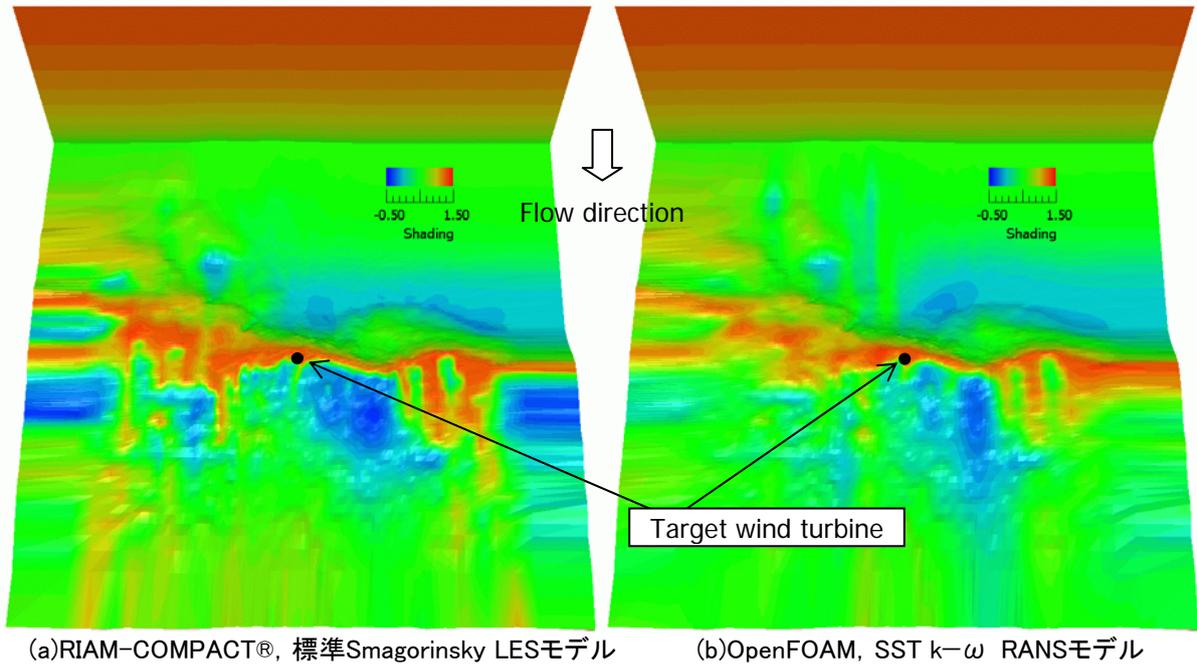


図4 流入境界断面および風車ハブ高さ(地上高65m)における主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図, ここで, (a)RIAM-COMPACT®は無次元時間 $t=100\sim 200$ の時間平均, (b)OpenFOAMは無次元時間 $t=50\sim 100$ の時間平均の結果である.

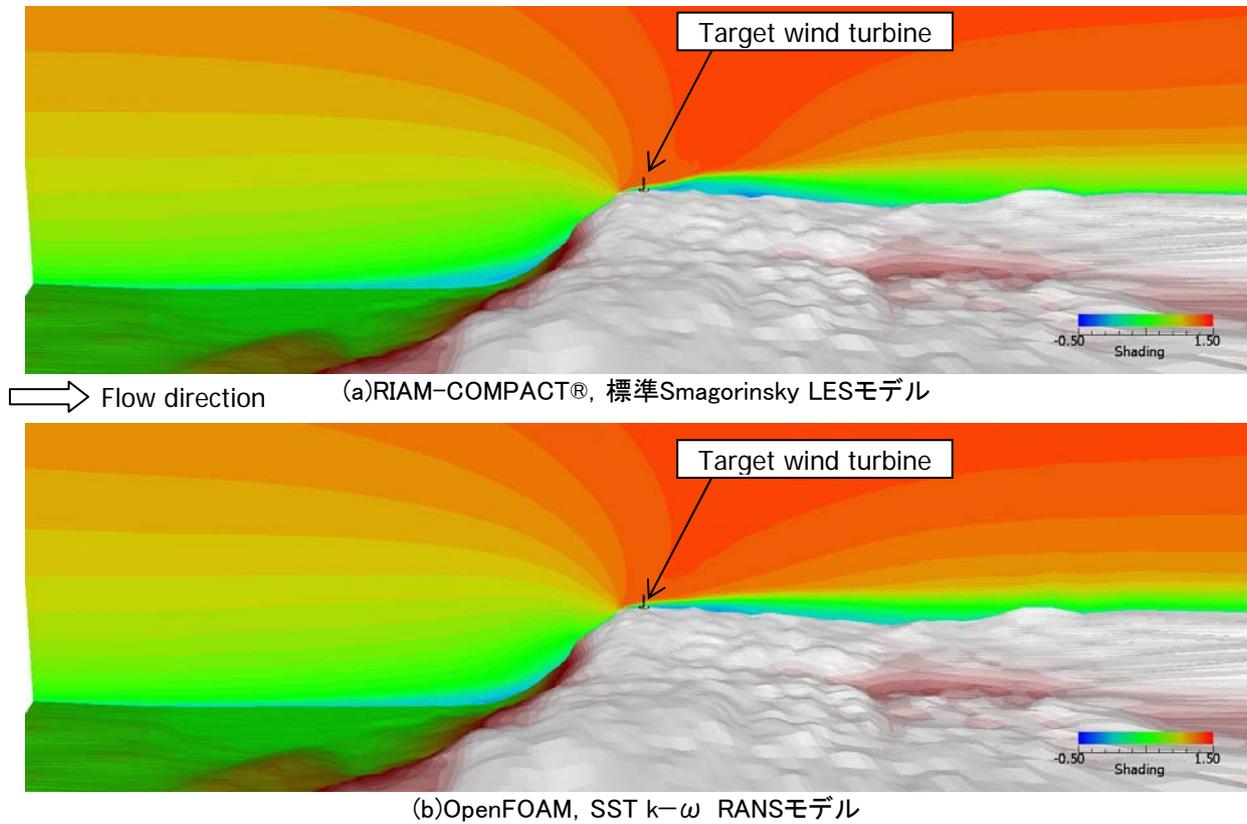


図5 風車立地点を含む鉛直断面内における主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図, 図4に対応

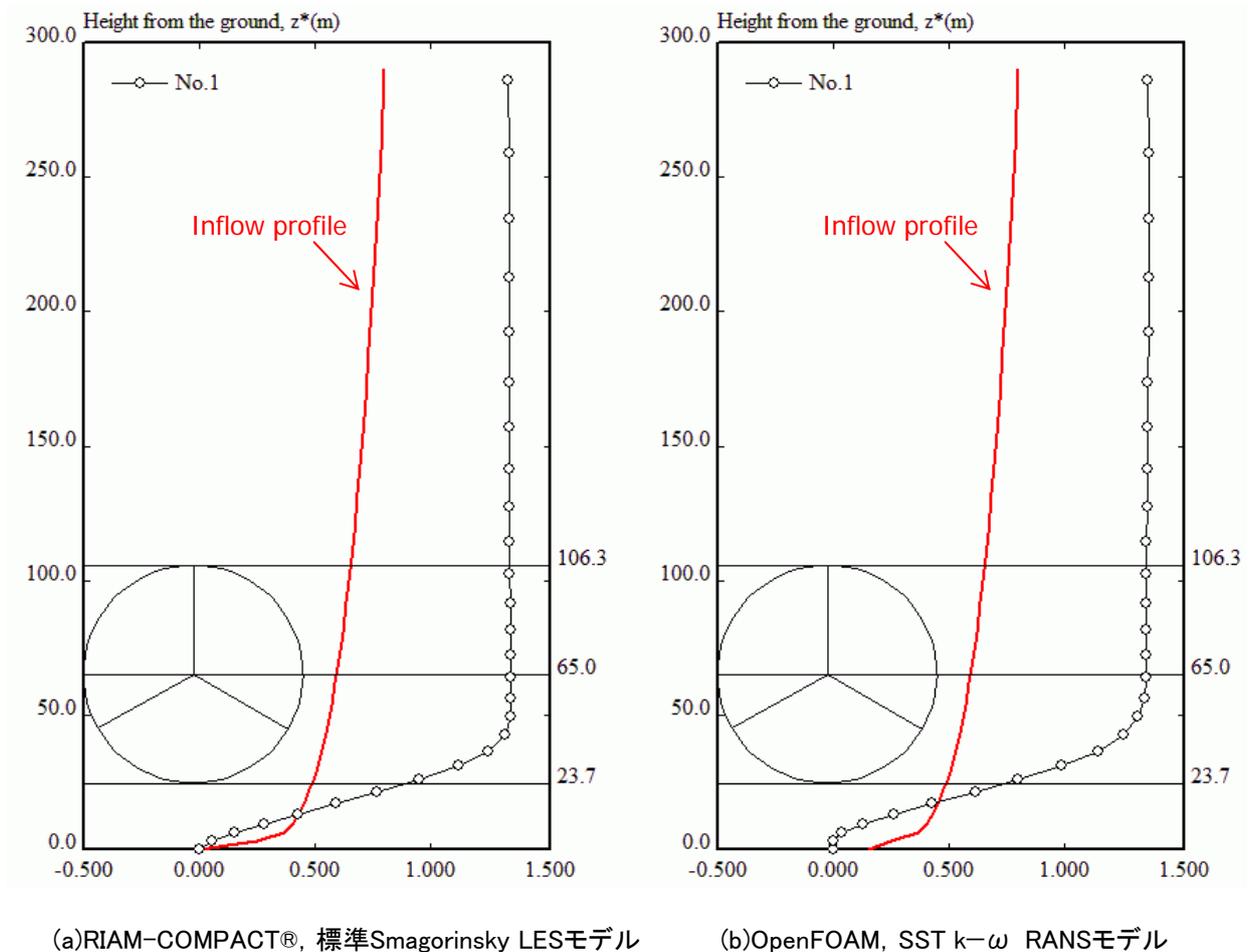


図6 風車立地点における主流方向(x)の風速(無次元量)の鉛直プロファイル, 図4および図5に対応

4. 各ソフトウェアの計算結果の比較

図4～図6には, RIAM-COMPACT®ソフトウェア(標準Smagorinsky LESモデル)と, OpenFOAMソフトウェア(SST $k-\omega$ RANS乱流モデル)の計算結果の比較を示す. 得られた計算結果を観察すると, 両者はほぼ一致した傾向を示すことが確認された.

5. 結言

本研究では, 中国国内の大規模な崖状地形に建設された大型ウインドファーム(33基の風車群)を対象に, RIAM-COMPACT®ソフトウェア(標準Smagorinsky LESモデル)と, OpenFOAMソフトウェア(本研究では, 種々の乱流モデルの中からSST $k-\omega$ RANS乱流モデルを選択)により数値風況シミュレーションを実施した. 得られた計算結果を観察すると, 両者はほぼ一致した傾向を示すことが示された. 特に風車立地点における風速の鉛直プロファイルでは, 風速の局所的な増速(風に対する地形効果)が確認された.

謝 辞

本研究の一部は, 国立大学法人東京大学, 独立行政法人理化学研究所との共同研究「LES乱流モデルによる孤立地形周辺流れに関する共同研究, 代表者: 内田 孝紀, 平成25年7月1日～平成27年6月30日」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) 内田 孝紀, 渡邊 文人, 見上 伸, 市販CFDソフトウェアによる急峻な3次元孤立峰を対象とした気流場解析, 九州大学応用力学研究所所報, 第148号, pp.35-41, 2015
- 2) <http://www.openfoam.com/>
- 3) <http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>
- 4) Menter, F., Esch, T., Elements of Industrial Heat Transfer Prediction, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Nov. 2001
- 5) Menter, F., Two-equation eddy-viscosity

turbulence models for engineering applications,
AIAA Journal 32(8), pp.1598-1605, 1994

- 6) Issa, R., I., Solution of the Implicitly Discretized
Fluid Flow Equations by Operator-Splitting,
Journal of Computational Physics, 62, pp.40-65,
1985