

# 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(第2報)

内田 孝紀\*, 渡邊 文人\*\*, 見上 伸\*\*

(2015年8月31日受理)

Analysis of the Airflow Field around a Steep, Three-dimensional Isolated Hill  
with Commercially Available CFD Software (2nd report)

Takanori UCHIDA, Fumihito WATANABE and Shin MIKAMI

E-mail of corresponding author: [takanori@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

## Abstract

The present study compared the prediction accuracy of two CFD software packages for simulating a flow around a three-dimensional, isolated hill with a steep slope: 1) WindSim (turbulence model: RNG  $k-\varepsilon$  RANS), which is one of the leading commercially available CFD software packages in the wind power industry and 2) RIAM-COMPACT® (turbulence model: the standard Smagorinsky LES), which has been developed by the lead author of the present paper. Distinct differences in the flow patterns were identified in the vicinity of the isolated hill (especially downstream of the isolated hill) between the flows simulated by the two CFD software packages.

**Key words :** *RNG  $k-\varepsilon$  RANS, Large-Eddy Simulation, Isolated-Hill*

## 1. 緒言

第一著者は、LES乱流モデルに基づいたRIAM-COMPACT® (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<sup>1)</sup>。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、海外においても独自のCFDソフトウェアが開発され、各国に流通している。代表的なものにノルウェイのWindSim AS社 (<https://www.windsim.com/>)が開発しているWindSim<sup>2)</sup>がある。WindSimは、RANS乱流モデルを採用した風力資源アセスメントに特化したCFDソフトウェアである。2015年の春には、同社の最新版となる「WindSim 7.0」がリリースされている。

本報では、前報<sup>1)</sup>に引き続き、急峻な傾斜角度を有する3次元孤立峰を対象としてLES乱流モデルに基づいたRIAM-COMPACT®ソフトウェアと、RANS乱流モデルに基づいたWindSimソフトウェアの計算結果の比較を実施した。

## 2. 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、RANS乱流モデルに基づいたWindSimソフトウェアを用い、急峻な傾斜角度を有する3次元孤立峰を対象とした高レイノルズ数流れの数値風況シミュレーションを行った(表1を参照)。図1には、WindSimソフトウェアにおける計算格子図を示す。図2には、WindSimソフトウェアにおける地形近傍の計算格子の拡大図を示す。図3には、本研究で用いた流入プロファイルを示す。図4には、RIAM-COMPACT®ソフトウェアにおける風速および長さの代表スケールを示す。

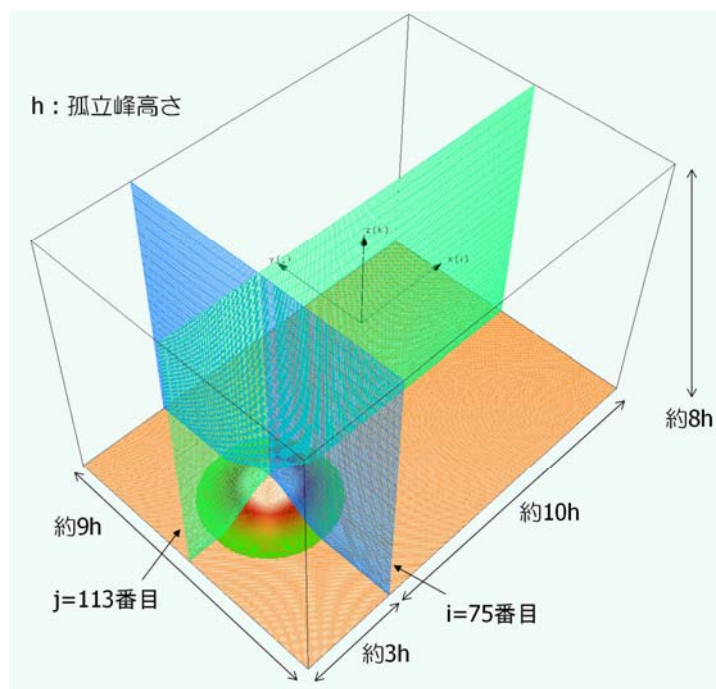
実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアでは、数値不安定を回避し、複雑地形上の局所的な風の流れを高精度に予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子を用いている。数値計算法は(有限)差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき、乱流モデルにはLES(Large-Eddy Simulation)を採用している。計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化はナビエ・ストークス方程式の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度

\* 九州大学応用力学研究所

\*\* (株)日立パワーソリューションズ

CFDモデル	RIAM-COMPACT®ソフトウェア	WindSimソフトウェア(v.5.1)
乱流モデル	標準Smagorinsky LESモデル	RNG k-ε RANSモデル
大気成層(大気安定度)	中立大気	
コリオリカ	考慮していない	
地表面の粗度	考慮していない(滑面)	粗度長:0.001
地表面の境界条件	非滑り条件 (風速3成分ともにゼロ)	壁関数
孤立峰の形状関数 $z(r)$	$0.5h \times \{1 + \cos(\pi r/a)\}$ $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , $a = 2h$	
孤立峰の高さ $h$	100 (m)	
レイノルズ数 $Re(=U_{in}h/\nu)$	$5 \times 10^4$ and $1 \times 10^7$	$5 \times 10^4$ and $5 \times 10^7$
時間刻み $\Delta t$	$10^{-3} h/U_{in}$ (s) for $Re = 5 \times 10^4$ $10^{-7} h/U_{in}$ (s) for $Re = 1 \times 10^7$	-
計算領域サイズ	$13h$ (i) $\times$ $9h$ (j) $\times$ $8h$ (k) for $Re = 5 \times 10^4$ $19h$ (i) $\times$ $18h$ (j) $\times$ $8h$ (k) for $Re = 1 \times 10^7$	$13h$ (i) $\times$ $9h$ (j) $\times$ $8h$ (k)
計算格子数	$325$ (i) $\times$ $226$ (j) $\times$ $37$ (k) 点 (約270万点) for $Re = 5 \times 10^4$ $436$ (i) $\times$ $325$ (j) $\times$ $101$ (k) 点 (約1,430万点) for $Re = 1 \times 10^7$	$325$ (i) $\times$ $226$ (j) $\times$ $37$ (k) 点 (約270万点)
主流方向(x)の格子サイズ( $\Delta x$ )	$0.04h$ for $Re = 5 \times 10^4$	$0.04h$
主流直交方向(y)の格子サイズ( $\Delta y$ )	$(0.035 \sim 0.5) \times h$ for $Re = 1 \times 10^7$	
鉛直方向(z)の格子サイズ( $\Delta z$ )	$(0.05 \sim 0.40) \times h$ for $Re = 5 \times 10^4$ $(0.000004 \sim 0.6) \times h$ for $Re = 1 \times 10^7$	$(0.05 \sim 0.40) \times h$

表1 各ソフトウェアにおける数値計算手法, 計算パラメータなどの比較

図1 WindSimソフトウェアで用いた計算格子図,  $Re = (5 \times 10^4 \text{ and } 5 \times 10^7)$

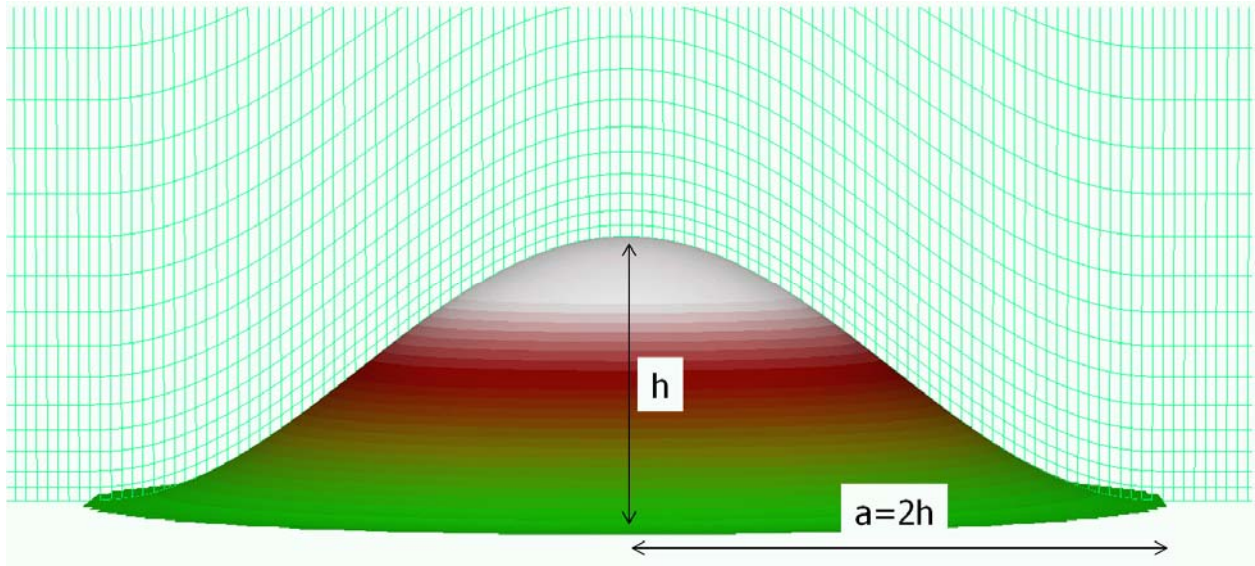


図2 WindSimソフトウェアで用いた計算格子の拡大図,  $Re=(5 \times 10^4 \text{ and } 5 \times 10^7)$

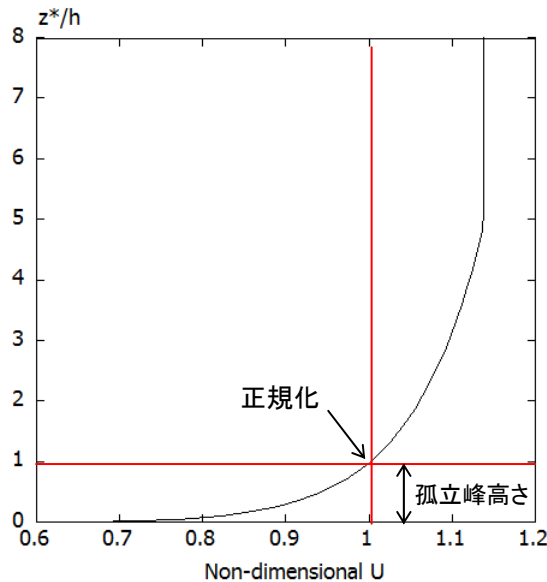


図3 本研究で用いた流入プロフィール

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  $\alpha=3.0$  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<sup>1)</sup>を参照して頂きたい.

境界条件に関して, 流入境界面には, WindSimソフトウェアの計算で用いた流入プロフィール(図3)と同様なプロフィールを与えた. 側方境界面と上部境界面は

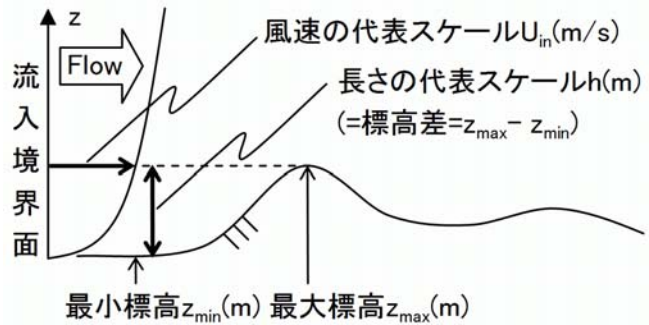


図4 RIAM-COMPACT®における風速および長さの代表スケール

滑り条件, 流出境界面は対流型流出条件とした. 地面は非滑り条件(粘着条件)を課した. 特に,  $Re(=U_{in}h/\nu)=10^7$  の計算では, 鉛直方向の格子点数は101点に変更し, 鉛直方向の最小格子幅は下記の式に従い,  $\Delta z_{min}/h=4 \times 10^{-7}$  に設定した(表1を参照).

$$\Delta z_{min} / h = \frac{0.1}{\sqrt{Re}}$$

一方, WindSimソフトウェアでは, RNG  $k-\epsilon$  RANSモデルを採用している. 数値計算法などの詳細は文献<sup>2)</sup>を参照して頂きたい.

### 3. 各ソフトウェアの計算結果の比較

図5には、WindSimソフトウェア(RNG  $k-\epsilon$  RANSモデル)の計算結果(アンサンブル平均した流れ場)を示す。WindSimソフトウェアの結果( $Re=5 \times 10^4$  and  $5 \times 10^7$ )では、二種類のレイノルズ数ともに孤立峰の背後に風速値がマイナスを示す逆流領域(渦領域)は形成されず、ポテンシャル流のような流れパターンが得られ

た。

図6には、実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア(標準Smagorinsky LESモデル)の計算結果( $Re=5 \times 10^4$  and  $1 \times 10^7$ )を示す(瞬間場)。RIAM-COMPACT®で得られた計算結果を観察すると、孤立峰の背後には、風速値がマイナスを示す逆流領域(渦領域)が明確に存在することが確認された。

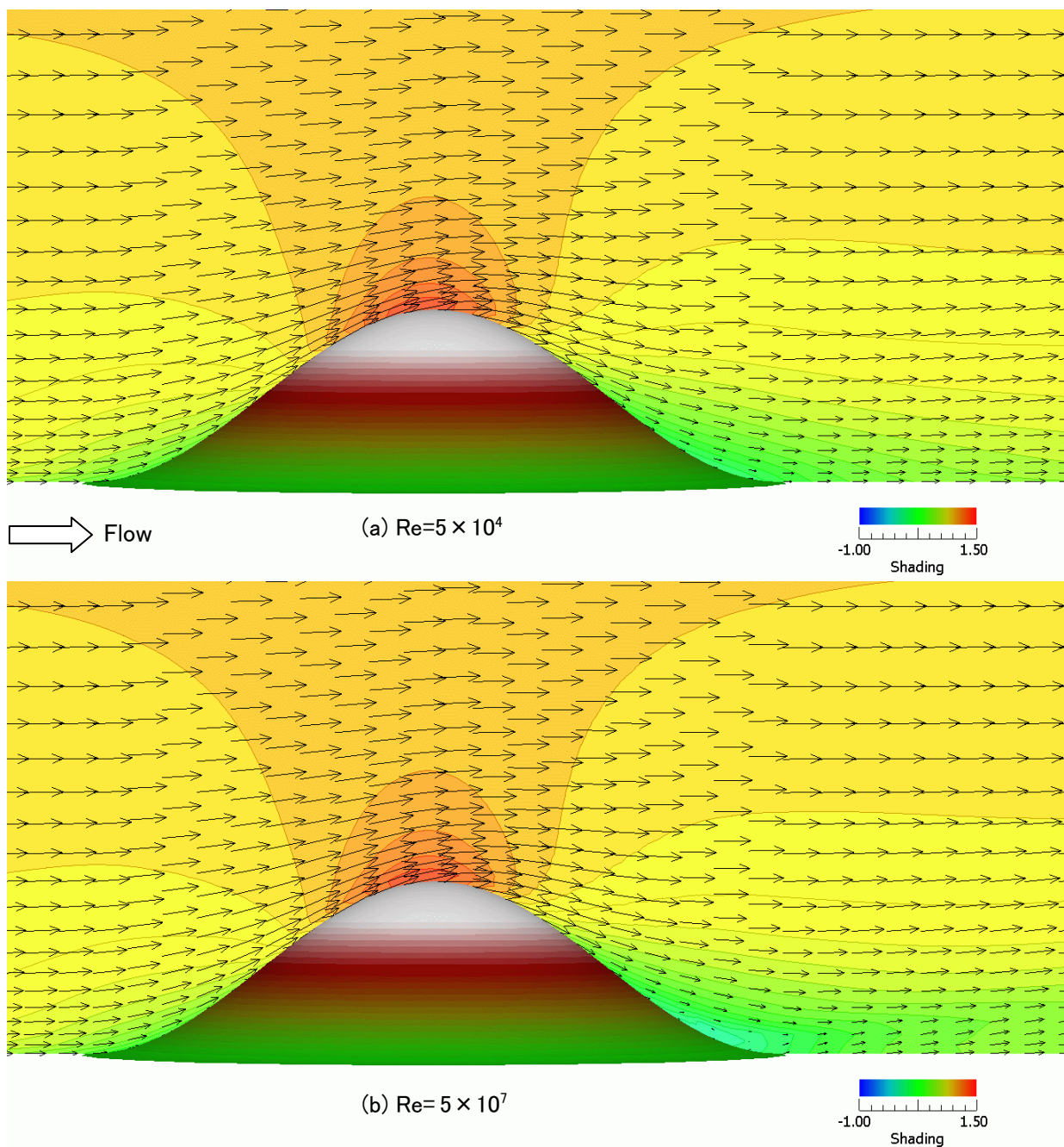
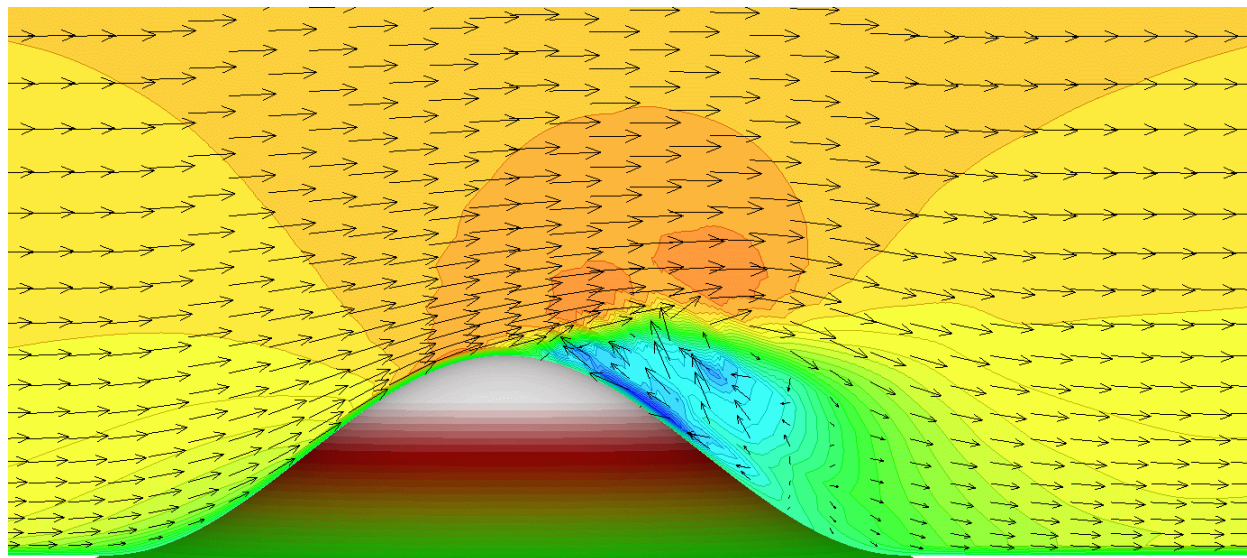


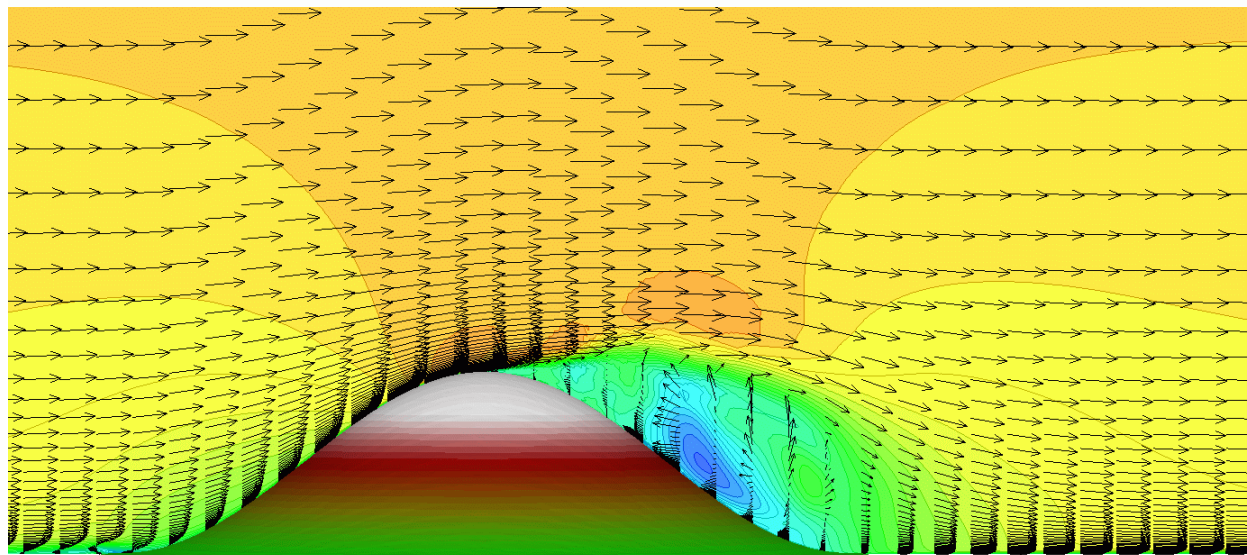
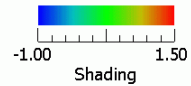
図5 スパン中央( $y=0$ )における速度ベクトル図と主流方向( $x$ )の風速(無次元量)の分布図, WindSimソフトウェア, RNG  $k-\epsilon$  RANSモデル





Flow

(a)  $Re=5 \times 10^4$ , Non-dimensional time=5.0



(b)  $Re=1 \times 10^7$ , Non-dimensional time=7.0

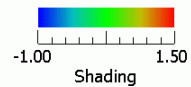


図6 スパン中央( $y=0$ )における速度ベクトル図と主流方向( $x$ )の風速(無次元量)の分布図, 瞬間場  
RIAM-COMPACT®, 標準Smagorinsky LESモデル

#### 4. 結言

急峻な傾斜角度を有する3次元孤立峰を対象として、風力業界において代表的な市販CFDソフトウェアであるWindSimソフトウェア(RNG  $k-\epsilon$  RANSモデル)と、第一著者が開発を進めているRIAM-COMPACT®(標準Smagorinskyモデルに基づくLESモデル)に関して、各ソフトウェアの孤立峰近傍における流れパターンの比較を行った。その結果、孤立峰の周辺(特に地形背

後)では、流れパターンに明確な違いが確認された。

#### 謝辞

本研究の一部は、株式会社日立パワーソリューションズとの共同研究「複雑地形上の数値風況予測におけるLESとRANSの比較に関する共同研究開発、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) 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) 植田 祐子, WindSimによる風況シミュレーション  
風力エネルギー, 37(2), pp.209-211, 2013