九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

市販CFDソフトウエアによる急峻な3次元孤立峰を対 象とした気流場解析

内田, 孝紀 九州大学応用力学研究所

渡邊, 文人 株式会社日立パワーソリューションズ

見上,伸 株式会社日立パワーソリューションズ

https://doi.org/10.15017/1543591

出版情報:九州大学応用力学研究所所報. 148, pp.35-41, 2015-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University バージョン: 権利関係:

市販CFDソフトウエアによる 急峻な3次元孤立峰を対象とした気流場解析

内田 孝紀*, 渡邊 文人**, 見上 伸**

(2015年1月30日受理)

Analysis of the Airflow Field around a Steep, Three-dimensional Isolated Hill with Commercially Available CFD Software

Takanori UCHIDA, Fumihito Watanabe and Shin Mikami

E-mail of corresponding author: 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) Meteodyn WT (turbulence model: k-L 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. Although the Reynolds number settings differed between the simulation with Meteodyn WT and that with RIAM-COMPACT®, 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 : k-L 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®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.

ー方で、海外においても独自のCFDソフトウエアが 開発され、各国に流通している.代表的なものにフラ ンスのMeteodyn社(http://meteodyn.com/)が開発し ているMeteodyn WT²⁾がある. Meteodyn WT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ソフトウエアである.2014年1月20日には、同社 の最新版となる「WT 4.5」がリリースされている.

本報では、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®ソフトウエアと、RANS乱流モデルに基づ いたMeteodyn WTソフトウエアの計算結果の比較を実 施した.

2. 両ソフトウエ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®ソフトウエアと、RANS乱流モデルに基づ いたMeteodyn WTソフトウエアを用い、急峻な傾斜角 度を有する3次元孤立峰を対象に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、Meteodyn WTソフトウエアにおける計算領 域と計算格子を示す.図2には、Meteodyn WTソフトウ エ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、Meteodyn WTソフトウエアにおける流入プロ ファイルの設定方法と、本研究で作成したデータを示 す.図4には、RIAM-COMPACT®ソフトウエアにおけ る代表スケールの取扱いを示す.hは孤立峰の高さ、 U_nは流入境界面での高度hにおける風速、v は動粘 性係数である.

以下には、両ソフトウエ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®ソフトウエアを用い 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

35

^{*} 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

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; <u>F</u>inite-<u>Difference Method</u>)に基づき,乱流モデルにはLES (<u>Large-Eddy Simulation</u>)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(<u>Grid Scale</u>)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.

CFDモデル	RIAM-COMPACT®ソフトウェア	Meteodyn WTソフトウエア
乱流モデル	標準Smagorinsky LESモデル	k-L RANSモデル(一方程式モデル)
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:0.05 (地形以外0.001)
地表面の境界条件	粘着条件 (非滑り条件,風速3成分ともにゼロとする)	
孤立峰の形状関数z(r)	0.5h×{1+cos(πr/a)} 但し. 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/v)	10 ⁶	107
時間刻みΔt	10 ⁻⁵ h/U _{in} (s)	-
計算領域サイズ	19h (i) × 18h (j) × 8h (k)	
計算格子数	436 (i) × 325 (j) × 101 (k) 点	436 (i) × 325 (j) × 37 (k) 点
	(約1,430万点)	(約520万点)
主流方向(x)の格子サイズ(⊿x)	(0.035∼0.5)×h	
主流直交方向(y)の格子サイズ(∠y)		
鉛直方向(z)の格子サイズ(⊿z)	(0.0001~0.6)×h	(0.005~1.2)×h

表1 RIAM-COMPACT®とMeteodyn WTによる数値計算手法および計算パラメータなどの比較





図2 Meteodyn WTで用いた計算格子の拡大図, Re=107







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 ているので、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、地面および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 ポアッ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α=3に対して,α=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¹⁰を参照して頂きたい.

実地形版 RIAM-COMPACT®ソフトウエアでは, Re(=U_{in}h/ ν)=10⁷の計算は時間刻みの問題から実施 が困難であったため, Re=10⁶の数値風況シミュレーシ ョンを行った.ここで,鉛直方向の格子点数は101点に 変更し(Meteodyn WTでは37点),鉛直方向の最小格 子幅は下記の式に従い, $\Delta Z_{min}/h=10^{-4}$ に設定した (Meteodyn WTでは $\Delta Z_{min}/h=5\times 10^{-3}$,表1を参照).

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

流入境界面には、Meteodyn WTの計算で用いた流 入プロファイル(図3)とほぼ同様な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. 地面は粘着条件(非滑り 条件)を課した. 時間刻みはΔt=10⁻⁵h/U_{in}とした(表1を 参照).

一方, Meteodyn WTでは, RANS equation with one-equation closure scheme (k-L turbulence model, ここで, kは乱流エネルギー, Lは乱流長さである)を採用している. 数値計算法などの詳細は文献²⁰を参照して頂きたい.

3. 両ソフトウエアの計算結果

図5~図7には、Meteodyn WTソフトウエア(k-L RANSモデル)の結果を示す. Meteodyn WTソフトウエ アの結果(Re=10⁷)では、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 シャル流に似た流れパターンが得られた. 図8には、 実地形版 RIAM-COMPACT®ソフトウエア(標準 Smagorinsky LESモデル)の結果を示す. 得られた結 果を観察すると、Re(=U_{in}h/ ν)=10⁶においても孤立峰 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.

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ソフトウエアで あるMeteodyn WT(k-L 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)の予測精度 を比較した.レイノルズ数の設定に違いがあるものの, 孤立峰の周辺(特に地形背後)において,両モデルで 得られた流れパターンには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

- 内田 孝紀:LESに基づいたRIAM-COMPACT® CFDモデルの紹介一風車の安全運転に資する 数値風況診断技術の確立へ向けて一,日本風力 エネルギー学会誌,Vol.36,No.105,pp.6-9, 2013
- 2) 内田 行宣:現実のウインドファームでの複雑地 形におけるCFDモデルの実証と挑戦,日本風力 エネルギー協会誌, Vol.34, No.4, pp.113-117, 2010



図5 スパン中央断面(y=0)における主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図, Meteodyn WT, k-L RANSモデル, Re=10⁷



図6 スパン中央断面(y=0)における主流方向(x)の乱流強度(無次元量)の分布図, Meteodyn WT, k-L RANSモデル, Re=10⁷

内田・渡邊・見上:市販CFDソフトウエアによる急峻な3次元孤立峰を対象とした気流場解析



図7 スパン中央断面(y=0)における速度ベクトル図、地形近傍、Meteodyn WT, k-L RANSモデル、Re=107



図8 スパン中央断面(y=0)における主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図,地形近傍, RIAM-COMPACT®,標準Smagorinsky LESモデル,Re=10⁶

40

補遺

本文で述べたように、レイノルズ数をRe=10⁷ (Meteodyn WTのデフォルト値)に設定したMeteodyn WT(k-L RANSモデル)の結果では、孤立峰背後にお いて風速値がマイナスを示すような逆流領域(渦領域) は確認されなかった.そこで本研究では、RIAM-COMPACT®(標準Smagorinskyモデルに基づくLESモ デル)を用いた場合においても、Meteodyn WT(k-L RANSモデル)と同様な流れパターンが発生するのか を調査するため、地面境界条件の設定方法を変更し た数値実験を試みた.

具体的には, Meteodyn WT(k-L RANSモデル)の 計算格子におけるk=2番目(k=1番目は地面および地 形表面)の風速3成分の値を, RIAM-COMPACT®(標 準Smagorinskyモデルに基づくLESモデル)の地面境 界条件(k=1番目)として与えてみた(図9を参照). すな わち、全計算ステップにおいて、ゼロではない風速値 を与えた計算である(ディリクレ条件,ある格子点に注 目すると、全ステップにおいて同じ風速値を与えてい ることになる). 孤立峰の高さに基づいたレイノルズ数 をRe(=Uinh/v)=104とし、計算格子は図1と図2に示し たものを用いた. 流入プロファイルは, 高度方向に変 化しない一様流とし,その他の境界条件の設定方法 は本文と同じである.時間刻みはΔt=2×10⁻³h/Uinとし た.得られた結果は、地面および地形表面に粘着条 件(非滑り条件), すなわち, 風速3成分の値を全てゼロ のディリクレ条件として与えた計算結果と比較した. 便 宜上、ゼロではない風速値をディリクレ条件として与え た計算をCase1と表記し、風速3成分の値を全てゼロ のディリクレ条件として与えた計算をCase2と表記する. 得られた計算結果の比較を図10に示す.

図10を観察すると、ゼロではない風速値をディリクレ 条件として与えたCaselの計算では、風速値がマイナ スを示すような剥離領域(渦領域)は形成されず、ポテ ンシャル流に似た流れパターンが得られた.これに対 し、風速3成分の値を全てゼロのディリクレ条件として 与えたCase2の計算では、孤立峰の背後において風 速値がマイナスを示すような剥離領域(渦領域)が明確 に形成された.よって、地面および地形表面に与える 速度場の境界条件の違いによって、孤立峰周辺に出 現する流れパターンは大きく異なることが確認された.



図9 地面と地形表面(k=1番目)の速度ベクトル図, Meteodyn WTから得られたk=2番目の風速値を ディリクレ条件として与えた計算, Case1



(b)Case2:風速3成分の値を全てゼロの ディリクレ条件として与えた計算結果

図10 スパン中央断面(y=0)における 主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図, 地形近傍, RIAM-COMPACT®, 標準Smagorinsky LESモデル, Re=10⁴