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：

KYUSHU UNIVERSITY

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．

一方で，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 WT[2]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．

* 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

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_{in}は流入境界面での高度hにおける風速，ν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

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．

CFDモデル	RIAM-COMPACT®ソフトウエア	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)	$0.5h\times\{1+\cos(\pi r/a)\}$ 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$Re(=U_{in}h/\nu)$	10^6	10^7
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 (約1,430万点)	436 (i) × 325 (j) × 37 (k) 点 (約520万点)
主流方向(x)の格子サイズ(Δx)	(0.035～0.5)×h	
主流直交方向(y)の格子サイズ(Δy)		
鉛直方向(z)の格子サイズ(Δz)	(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

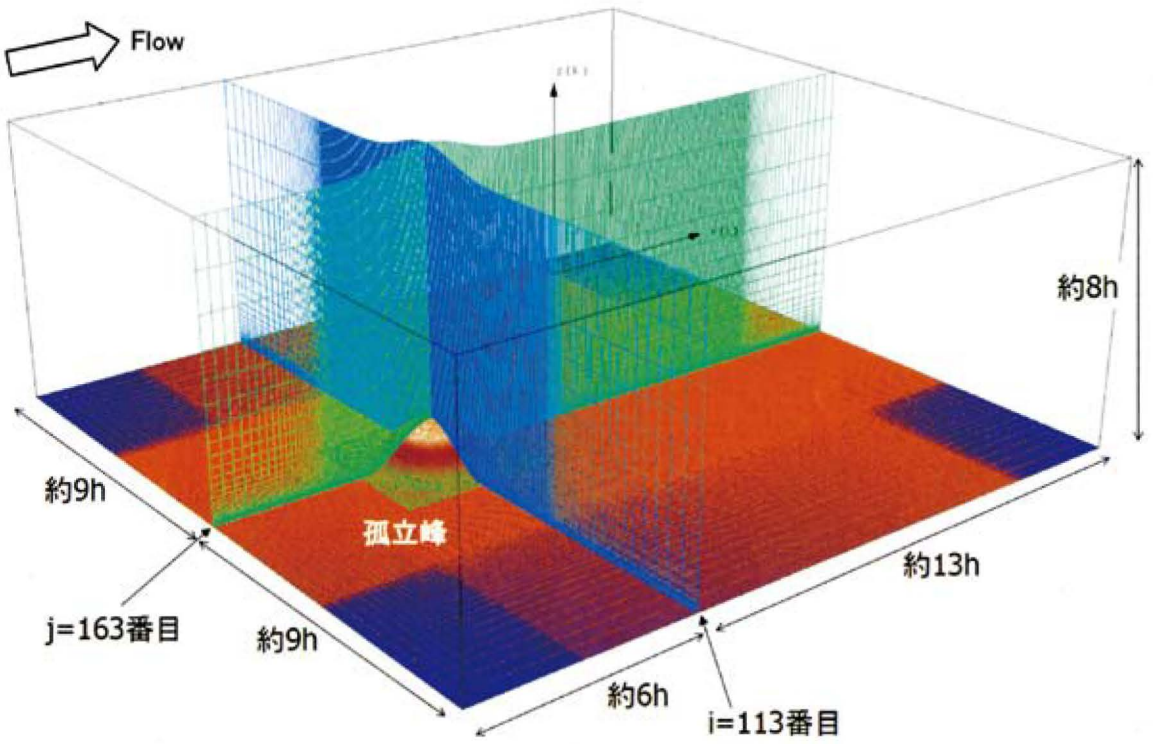


図1　Meteodyn WTで用いた計算領域と計算格子，$Re=10^7$

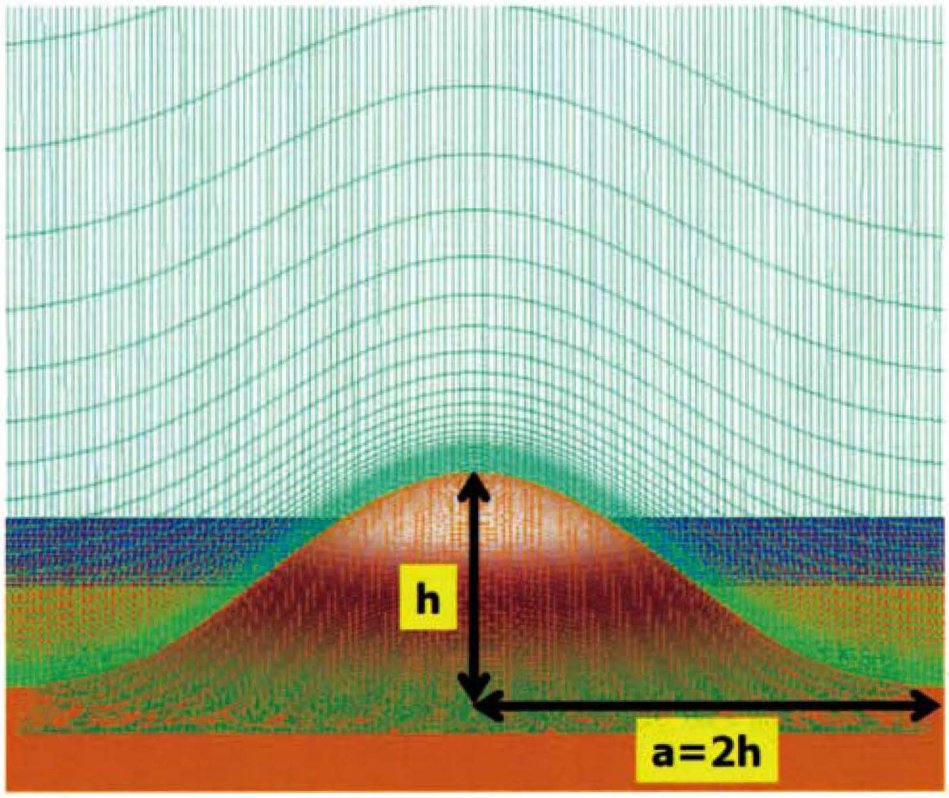
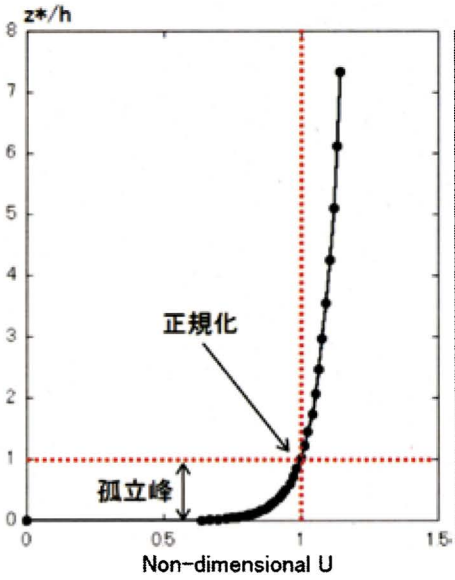


図2 Meteodyn WTで用いた計算格子の拡大図, $Re=10^7$



Meteodyn WTの流入風は，一様流ではなく，実世界の大気流れを表すため，高さ方向に変化する．すなわち，流入風は次の3つの層に分けられる．

・接地層： 0 < z < hs
⇒ プロファイルはLogarithmic law により決定

・エクマン層： hs < z < hbl
⇒ 接地層上部の風から自由大気の地衡風への遷移

・自由大気： hbl < z < Zskv
⇒ 地衡風をTop boundary conditionまで適用

流入風プロファイルは以下のRef.に基づいて計算される．
・Vref = 10.0 m/s : Ref. wind
・Href = 10.0 m : Ref. height
・Zoref = 0.05 m : Ref. roughness length

接地層内部では，turbulent kinetic energyは一定とし，大気安定度と流入箇所近傍の地表面粗度データに基づき計算される．
エクマン層内ではそれが線形に減少する．

図3 Meteodyn WT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

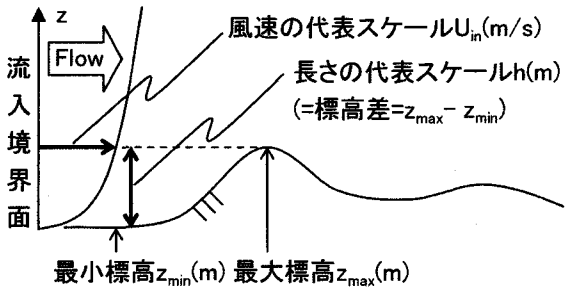


図4 RIAM-COMPACT®における代表スケールの取扱い

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[1]を参照して頂きたい．

実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウエアでは，$Re(=U_{in}h/\nu)=10^7$の計算は時間刻みの問題から実施が困難であったため，$Re=10^6$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$\Delta Z_{min}/h=5\times10^{-3}$，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$\Delta t=10^{-5}h/U_{in}$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[2]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($Re=10^7$)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，$Re(=U_{in}h/\nu)=10^6$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

1) 内田　孝紀:LESに基づいたRIAM-COMPACT® CFDモデルの紹介―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―，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, $Re=10^7$

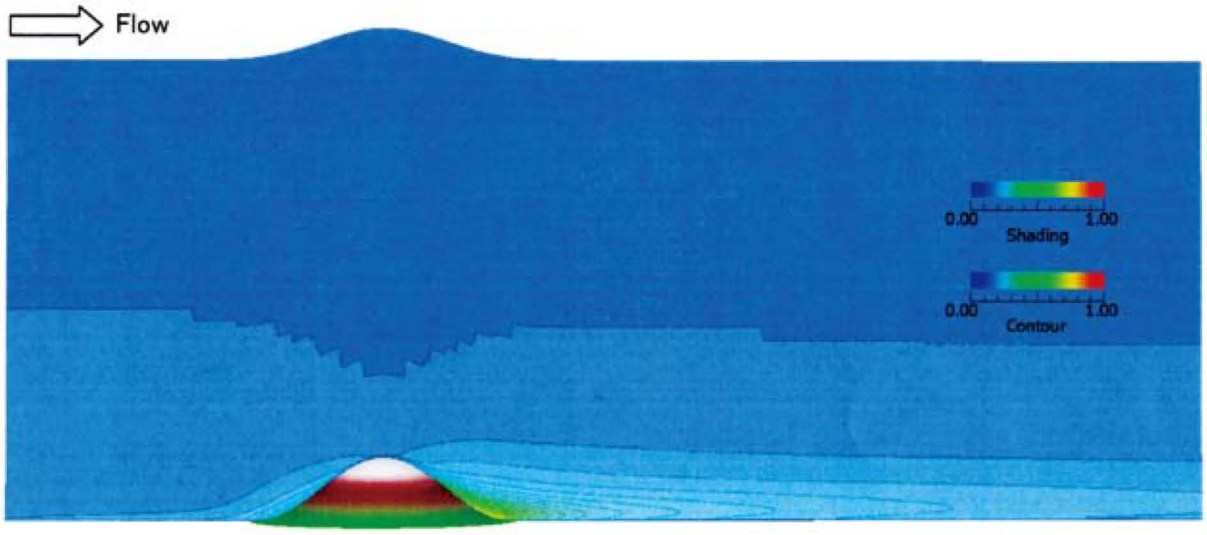


図6 スパン中央断面(y=0)における主流方向(x)の乱流強度(無次元量)の分布図,
Meteodyn WT, k-L RANSモデル, $Re=10^7$

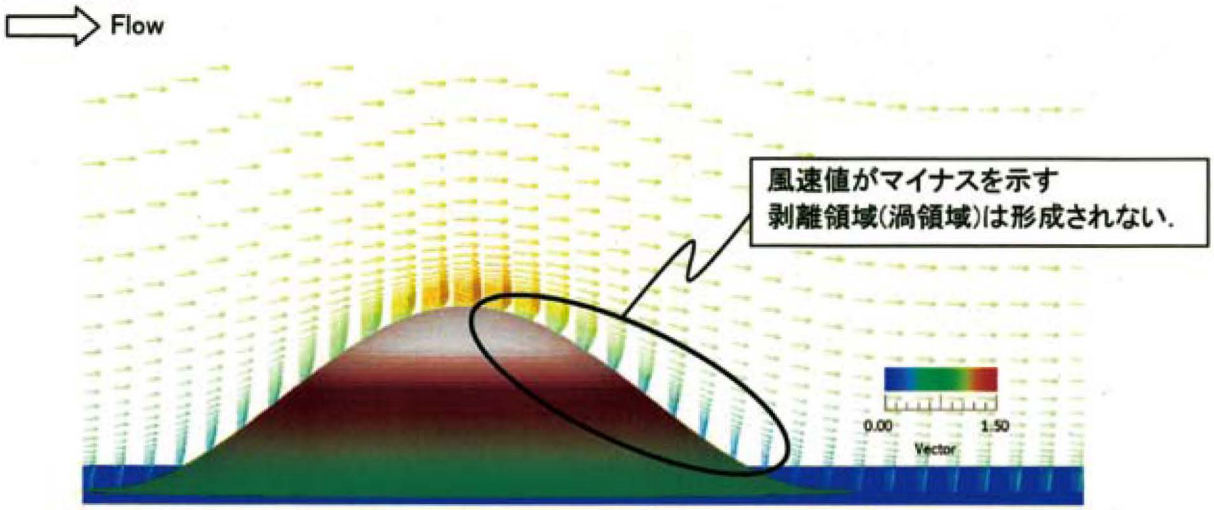


図7　スパン中央断面(y=0)における速度ベクトル図，地形近傍，Meteodyn WT，k-L　RANSモデル，$Re=10^7$

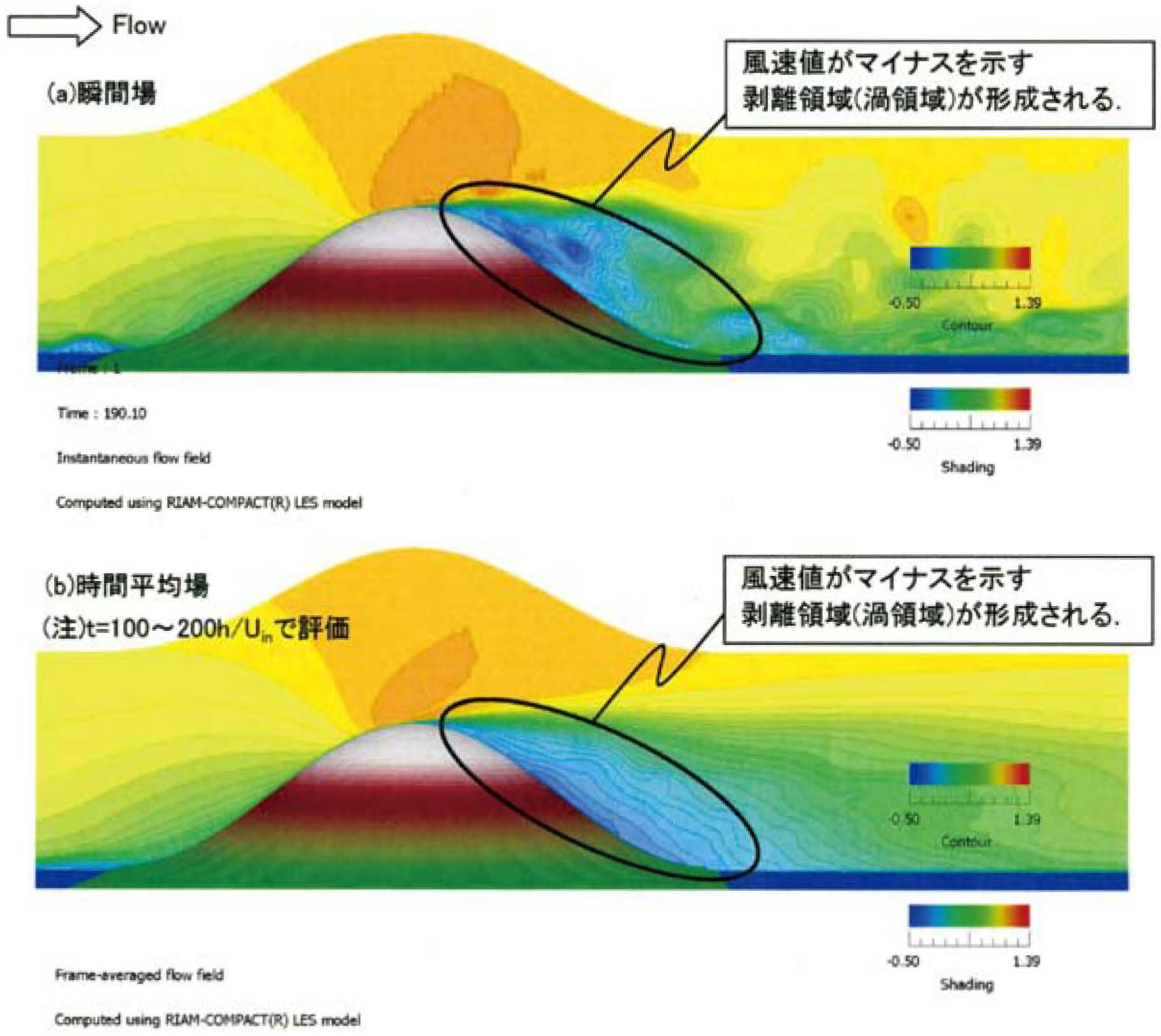


図8　スパン中央断面(y=0)における主流方向(x)の風速(無次元量)の分布図，地形近傍，
RIAM-COMPACT®，標準Smagorinsky LESモデル，$Re=10^6$

補遺

本文で述べたように，レイノルズ数をRe=10^7(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(=$U_{in}h/\nu$)=10^4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$\Delta t=2\times10^{-3}h/U_{in}$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Case1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．

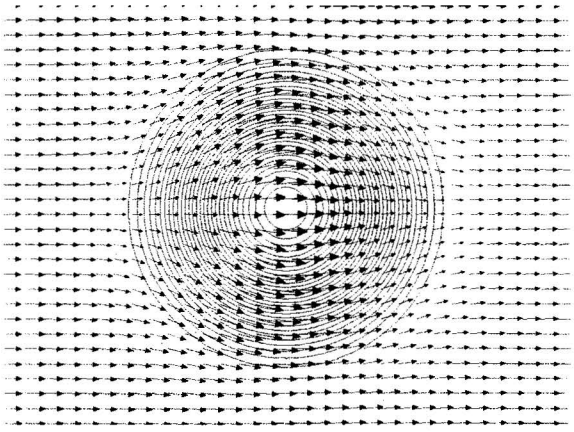
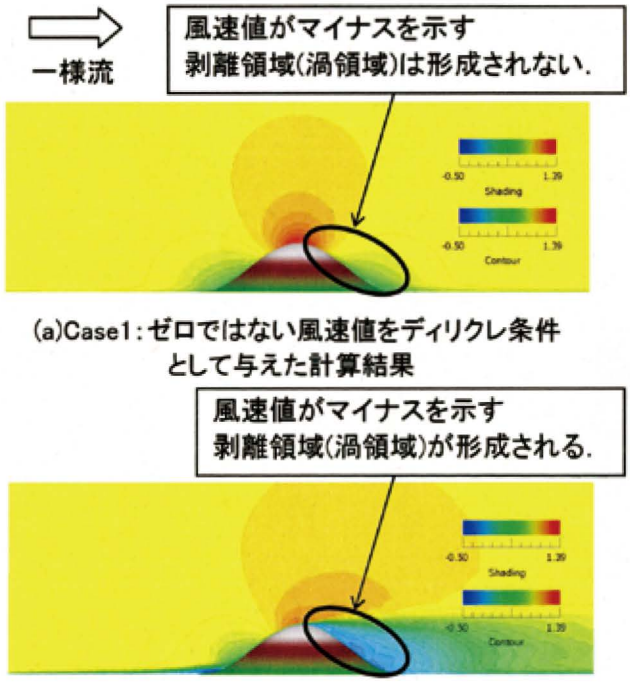


図9 地面と地形表面(k=1番目)の速度ベクトル図，Meteodyn WTから得られたk=2番目の風速値をディリクレ条件として与えた計算，Case1



(a)Case1：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結果

(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=10^4