Bolund Experimentを対象にした LES乱流モデルの予測精度の検証 —風洞実験との比較—

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
連絡先：takanori@riam.kyushu-u.ac.jp，092-583-7776

1. はじめに

現在，世界では空前の勢いで風力発電産業が成長を遂げている．これは再生可能エネルギーの中で風力発電が最も脱化石燃料，CO2削減に対してコストパフォーマンスが高いからである．日本においても風力発電が最も有力な再生可能エネルギーであることは間違いなく，風力発電をより一層普及させることが，地球温暖化の克服「グリーン・イノベーション」に世界的な規模で貢献すると確信する．

風力発電分野においても，風車の配置計画や年間発電電力量の試算などに対して，数値流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)の利用が急速に進んでいる．こうした状況を受けて，風力発電分野で利用されているCFDソフトウエアの予測精度の検証(Validation Testing)が各方面で進められている．その一つに，Bolud Experimentがある(図1を参照)．これはデンマーク工科大学(DTU)のリソ研究所が中心となり，海上にある孤立地形を過ぎる流れ場を対象として実施したプロジェクトである．このプロジェクトでは，風況観測（カップ式，超音波式風速計およびLIDAR）および数値シミュレーション(CFD)が実施され，CFDの予測精度が議論されている．ここでは，非定常・非線形風況解析モデルであるLES（空間平均モデル）よりも，定常・非線形風況解析モデルであるRANS（時間平均モデル）が比較的高い評価を受けている．一方，日本ではLES系のモデルも高い評価を受けていることから，改めてその評価を実施した．この目的に対し，独自に別途，風洞実験も実施した．本報では，我々の研究グループが開発を進めるLES系の数値風況予測技術RIAM-COMPACT®[1)]の結果と，風洞実験の気流計測結果[2)]の比較を報告する．

図1　Bolund Experimentにおける対象地形，点線部分

2. 実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウエアの概要

RIAM-COMPACT®(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain;リアムコンパクト)[1)]に関して，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®の商標と実用新案を取得)．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®ソフトウエア」と名付け，業界標準モデルの一つとして広く普及に努めている．現在では，国内の風力事業者最大手の(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)を含め，多数の導入実績を有する．

非定常な乱流シミュレーションに主眼を置いたRIAM-COMPACT®では，計算時間の問題が懸念されてきた．現行の流体計算ソルバーは，Intel Core i7などのマルチコアCPU(Central Processing Unit)に対応しており，計算時間は劇的に短縮され，実用面での利用において特段の問題は無くなってきた[3)]．

さらに，現在ではGPGPUコンピューティングへの対応にも成功した[4, 5)]．GPGPU(General Purpose computing on GPU：GPUによる汎用計算)のコンセプトとは，グラフィック・レンダリングのみならず，GPU(Graphics Processing Unit)が有する浮動小数点

演算能力を，他の数値演算にも幅広く利用することである．

RIAM-COMPACT®の数値計算手法を説明する．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，変数配置には一般曲線座標系のコロケート格子を採用している．コロケート格子では，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．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．

流れ場の支配方程式は，空間フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である．本研究では，約5m/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(密度成層)の効果は省略した．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad -(1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad -(2)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u_i' u_j'} \approx \frac{1}{3}\overline{u_k' u_k'}\delta_{ij} - 2\nu_{SGS}\bar{S}_{ij} \qquad -(3)$$

$$\nu_{SGS} = \left(C_s f_s \Delta\right)^2 \left|\bar{S}\right| \qquad -(4)$$

$$\left|\bar{S}\right| = \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{1/2} \qquad -(5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad -(6)$$

$$f_s = 1 - \exp\left(-z^+ / 25\right) \qquad -(7)$$

$$\Delta = \left(h_x h_y h_z\right)^{1/3} \qquad -(8)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)[6]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．空間項の離散化は式(2)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[7]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[8]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[9]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．

3. 地形標高データおよび計算条件など

ここでは，本研究で使用した地形標高データおよび計算条件などについて説明する．図2には，地形標高データに対するコンターマップを示す．図中に

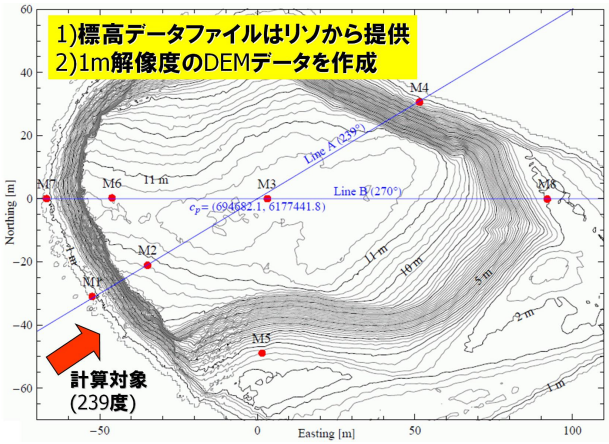


図2　本研究で使用した地形標高データなど

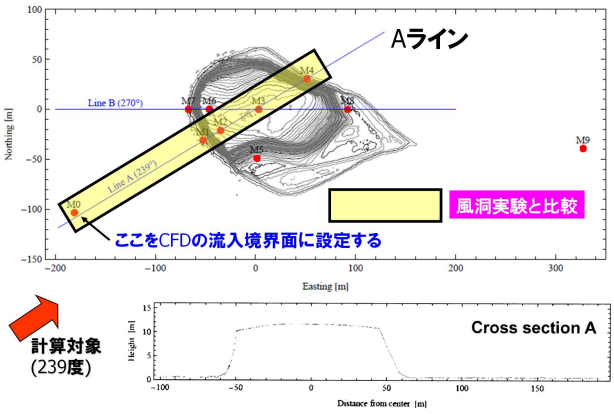


図3　気流の鉛直プロファイルを評価した地点など

記載しているように，オリジナルの地形データはリソ研究所から配布されているデータを使用し，これに基づいて空間解像度1mのDEMデータを作成した．計算を実施した風向は，北をゼロ度として239度である．

図3には，気流の鉛直プロファイルを評価した地点などを示す．本研究では，Bolud Experimentで定義されたAライン上の4点(M1，M2，M3，M4)において，RIAM-COMPACT®と風洞実験で得られた平均風速分布を比較した．図中に記載しているように，Aライン上のM0地点で得られた風洞実験の平均風速分布を数値シミュレーションの流入境界面に与えた．

図4には，計算領域，計算格子，座標系などを示す．計算領域は，計算領域中の最大標高H(=11m)を基準にし，主流方向(x)および主流直交方向(y)に38.55H四方，鉛直方向(z)に15.45Hの空間を有する．特に鉛直方向は，ブロッケージの影響を避けるため，風洞実験と同じ条件に設定した．計算格子はx方向およびy方向に213点，z方向に65点の合計約300万点を設定した．空間解像度に関して，x-y断面は⊿x=⊿y=2m(=0.18H)の等間隔とし，z方向は地面付近で密になるように不等間隔⊿z=0.038m～7.64m(0.003H～0.7H)とした．流入条件は，図3で既に述べたように，Aライン上のM0地点で得られた風洞実験の平均風速分布を流入境界面に与えた．ここで，本研究における風速の代表スケールU_{ref}は，流入境界面の最大標高H(=11m)位置における風速値である．このU_{ref}とHに基づいたレイノルズ数Re(=$U_{ref}H/\nu$)は，風洞実験に合わせて2.8×10^4とした．

4. 風洞実験の概要

ここでは，本研究で実施した風洞実験の概要について説明する[2]．図5には，風洞実験設備の概要を示す．本研究で使用した風洞装置は，東京大学生産技術研究所所有の境界層型風洞であり，長さ16.5m，幅2.2m，高さ1.8mの測定胴を有する(詳細はhttp://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/equip/を参照して頂きたい)．

気流場の計測には，逆流の検出が可能なスプリットファイバープローブを使用した(図6を参照)．サンプリング間隔は1kHzとし，計測時間は60sとした．

図7には，本研究で作成した地形模型を示す．地形模型の縮尺は1/150であり，最大標高H(=11m)は，風洞実験では約7cmとなる(図7(a)を参照)．図7(b)には地形模型の拡大写真を示す．図8には，気流計測の様子を示す(Rear View)．地形模型の上流側にスパイヤーとラフネスブロックを設置し，1/7のべき乗則に従う境界層流を生成した．

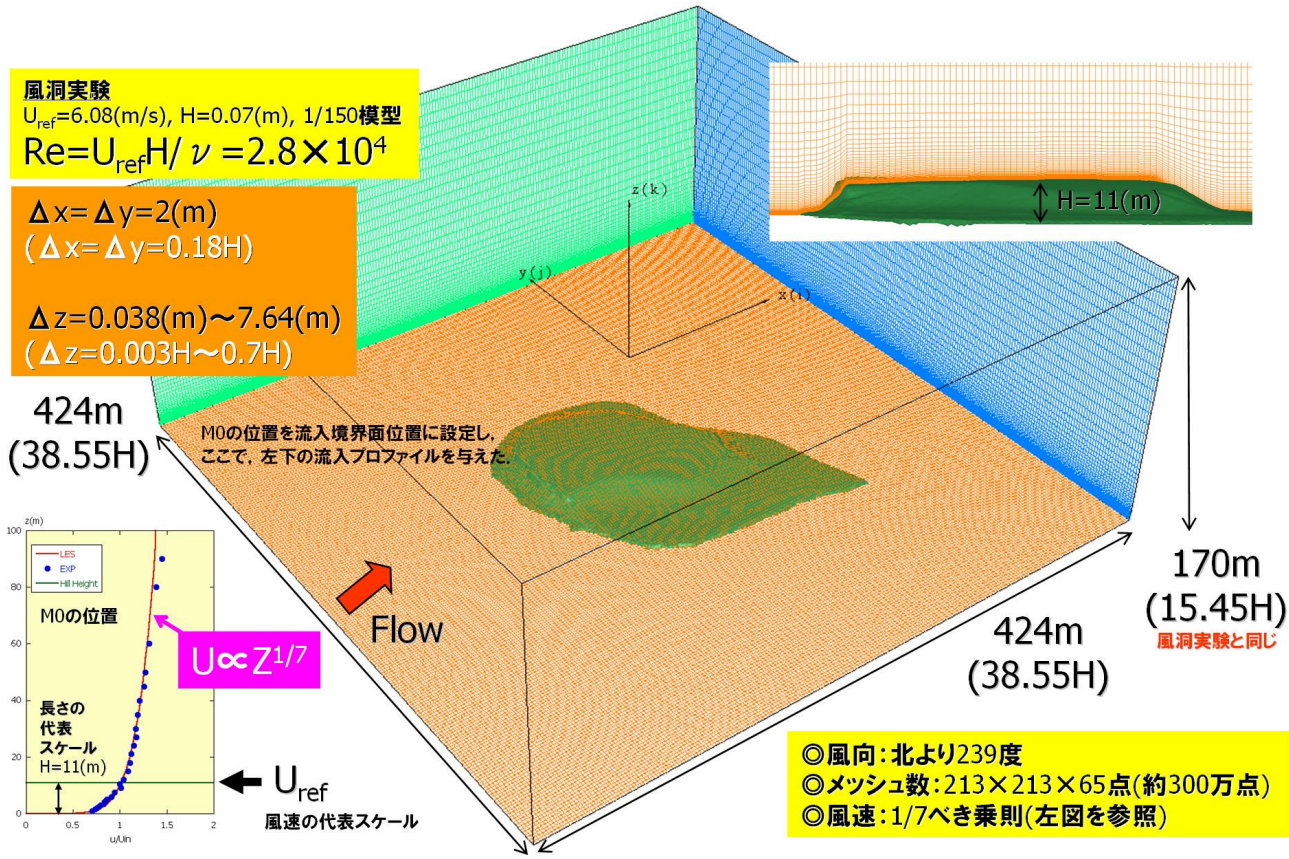


図4 計算領域，計算格子，座標系など

風洞本体	測定部断面	2,200mm(幅)×1,800mm(高さ)
	測定胴長さ	161,470mm
	境界層長さ	12,850mm
	風速範囲	0.2～20m/s
送風機	型式	手動可変ピッチ付 低騒音型軸流送風機
	風量	$80m^3/sec$
	静圧	80mmAq
電動機	型式	他力強制冷却型直流電動機
	容量	DC440V160kw
	回転数	0～1,150rpm
	制御	サイリスタ制御

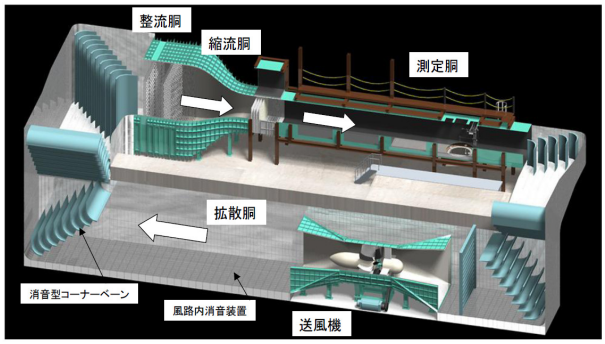


図5　本研究で使用した境界層型風洞
（測定部長さ16.5m，幅2.2m，高さ1.8m），
東京大学生産技術研究所所有

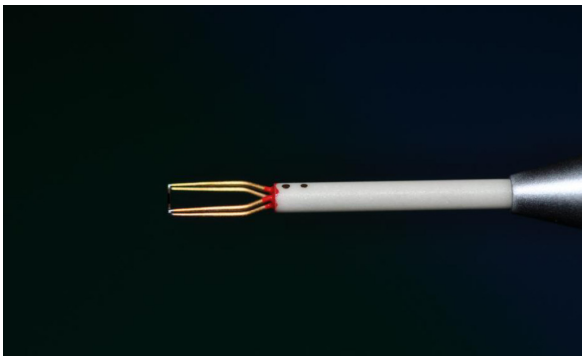
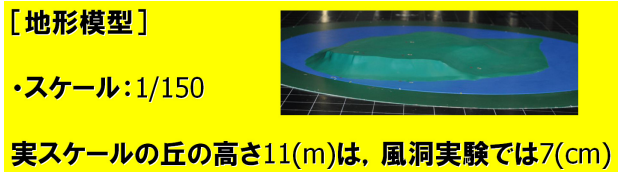


図6　逆流の検出が可能な
スプリットファイバープローブ

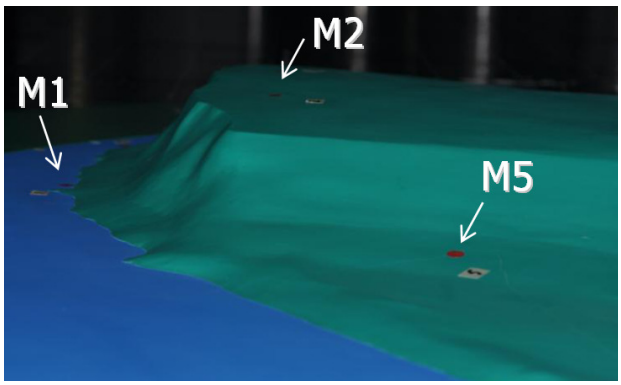
5. 結果および考察

ここでは，数値シミュレーション(RIAM-COMPACT® LES乱流モデル)と風洞実験の比較について説明する．

図9には，数値シミュレーション(RIAM-COMPACT® LES乱流モデル)に関して，時間平均風況場(無次元時間t^*=100～200)の可視化図(主流方向(x)の速度成分の分布図)を示す．比較のため，地表面粗度を考慮したケースも合わせて表示する．地表面粗度は文献[10]に記載している外力項(キャノピーモデル)を支配方程式に付加することで表現した(抵抗係数Cd=10)．粗度モデルの適用範囲は，風洞



(a)全体図



(b)拡大図
図7　地形模型の様子

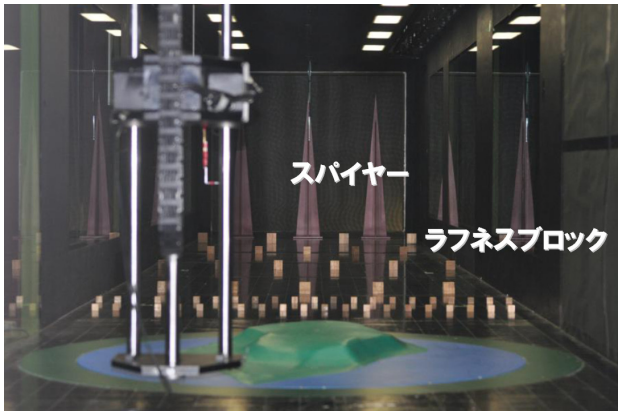
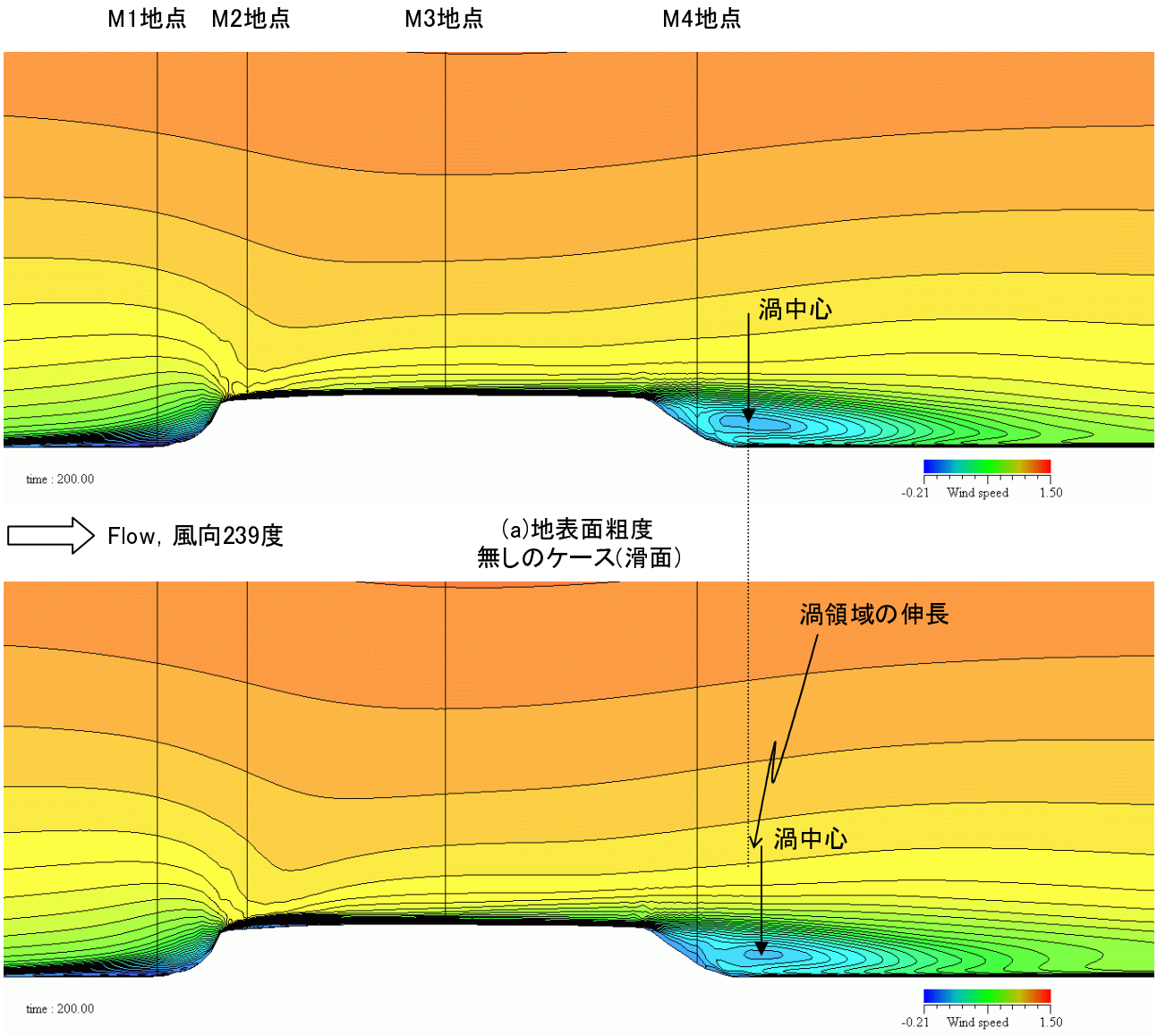


図8　気流計測の様子，Rear View

実験を参考にして地表面からz*≦0.0286Hまでの空気層とした(風洞実験スケールで2mm)．ここで，Hは本研究の代表長さスケールである最大標高(=11m，風洞実験では7cm)である．図9(a)の滑面ケースおよび図9(b)の粗面ケースの両者を観察すると，地形背後に渦領域が形成されているのが分かる．図9(b)では，地表面粗度の影響により，図中に示すように渦領域の伸長が明確に示されている[10]．

図10には，図9に示すM1～M4の地点における主流方向(x)の速度成分の鉛直プロファイルの比較を示す．ここで，ラインが風洞実験(滑面)，シンボル○がLES数値シミュレーション(滑面)，シンボル＋がLES数値シミュレーション(粗面)をそれぞれ意味する．全ての地点，高さレベルにおいてLES数値シミュレーションと風洞実験の結果は良好な一致を示しているのが分かる．また，LES数値シミュレーションにおけるM1～M3地点の平均風速の鉛直プロファイルに関して，



(b)地表面粗度
有りのケース(粗面)

図9　数値シミュレーション(RIAM-COMPACT® LES乱流モデル)の結果，
時間平均風況場(無次元時間t*=100～200)，主流方向(x)の速度成分の分布図

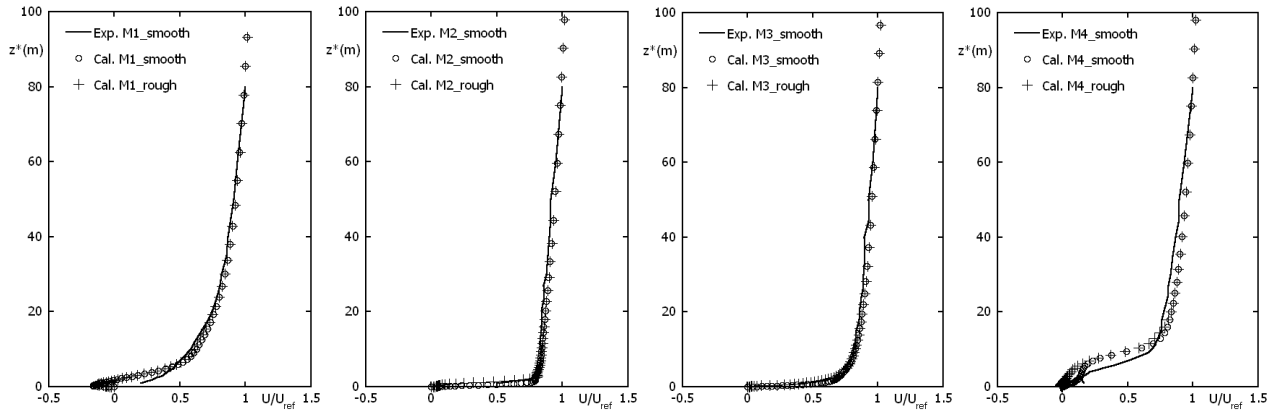


図10　数値シミュレーション(RIAM-COMPACT® LES乱流モデル)と風洞実験の比較，
図9に示すM1～M4の4地点，主流方向(x)の速度成分の鉛直プロファイル，
ライン：風洞実験(滑面)，○：LES数値シミュレーション(滑面)，＋：LES数値シミュレーション(粗面)

地表面粗度の有無による有意な差異は見られなかった．地表面粗度の影響は，図9で述べたように，地形背後の渦領域の大きさに顕著に現れている．これに伴い，M4地点の地面近傍において平均風速の鉛直プロファイルの値に違いが確認される．

6. おわりに

本研究では，LES乱流モデル(CFD)に基づいた実地形版RIAM-COMPACT®を用いて，Bolund Experimentを対象に数値風況予測を実施した．また同時に，東京大学生産技術研究所(加藤研究室)の境界層風洞にて，スプリットファイバープローブによる気流計測を実施した．Bolund Experiment観測サイト周辺の気流性状を明らかにするとともに，LES乱流シミュレーション(CFD)の予測精度を検証した．その結果，CFDによる予測値は，全ての地点，高さレベルにおいて風洞実験結果と良好な一致を示し，LES乱流モデルに基づいたCFDの有効が明らかになった．

謝辞

本研究の一部は，NEDO「風力等自然エネルギー技術研究開発／次世代風力発電技術研究開発／基礎・応用技術研究開発（数値シミュレーション技術を用いた風車性能評価技術等の国際標準化に係る研究開発），2010年度～2012年度」，「科学研究費補助金・基盤研究(B)（課題番号：24310120），2012度～2014度」による援助を受けました．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 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) 高橋岳生，加藤信介，中尾圭佑，飯田誠：孤立丘上の気流性状に関する風洞模型実験，日本建築学会学術講演梗概集（東海），2012年9月
3) 内田孝紀：インテル次世代ハイエンドCPU「Sandy Bridge-EP」を用いたRIAM-COMPACT®のOpenMP並列風況シミュレーション―ここまできた！デスクトップPC1台による大規模計算とその高速化―，日本風力エネルギー学会論文集，Vol.36，通巻101，pp.82-85，2012
4) 内田孝紀，大屋裕二：GPGPUコンピューティングによる数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化，風力エネルギー協会誌，Vol.35，通巻98，pp.78-84，2011
5) 内田孝紀：GPGPUコンピューティングによる数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化―第2報マルチGPUによる大規模計算の試み―，日本風力エネルギー学会誌，通巻103，2012
6) Kim, J. and Moin, P. : Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985.
7) 梶島岳夫，太田貴士，岡崎和彦，三宅裕：コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析，日本機械学会論文集，(B編)，63巻，614号，pp.3247-3254，1997.
8) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K. : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986.
9) Smagorinsky, J. : General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.
10) 内田孝紀，大屋裕二：一様流中の2次元崖状地形まわりの気流性状に関する数値的研究，応用力学論文集，Vol.8，pp.831-838，2005