

風車および小規模地形の周辺流れに対する温度成層の効果 —その1: 流れ場の可視化—

内田 孝紀*

(2015年8月31日受理)

Thermal Stratification Effects on Flow around Wind Turbine and Topography —Part 1 : Flow Visualization—

Takanori UCHIDA

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

Abstract

We are developing the numerical model called the RIAM-COMPACT® (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The object domain of this numerical model is from several m to several km, and can predict airflow over complex terrain with high precision. In this paper, the RIAM-COMPACT® was applied to thermally stratified flows around the wind turbine and the topography (isolated-hill).

Key words : LES, Thermally stratified flows, Wind turbine, Topography

1. 緒言

大気境界層は鉛直方向に密度,あるいは,温度が変化する成層状態を形成する場合が多い.特に夜間などに出現する接地逆転層内の流れは,上空に向かって密度が小さくなる,つまり,温度が高くなる安定成層流となる.安定成層した流れが複雑地形を過ぎる場合には,流れ場に負の浮力が作用する.結果として,中立成層時には見られない様々な波動現象や流動現象が出現する.以上から,安定成層場において複雑地形上の風況特性を予測し把握することは,風力エネルギーの有効利用,大気汚染物質の移流拡散現象予測,森林や農作物の風害対策,飛行機の離発着や安全運航などに関連して極めて重要である.

著者はこれまで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きた¹⁻³⁾.本技術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.

本報では,風車および小規模地形を対象にRIAM-COMPACT®を用いて,種々の大気安定度を有する流れ場の数値風況シミュレーションを試みた.

2. 数値計算手法の概要と計算パラメータ

本研究では,風車および小規模地形を対象にRIAM-COMPACT®を用いて,種々の大気安定度を有する流れ場の数値風況シミュレーションを試みた.

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,エネルギー方程式である.

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

* 九州大学応用力学研究所

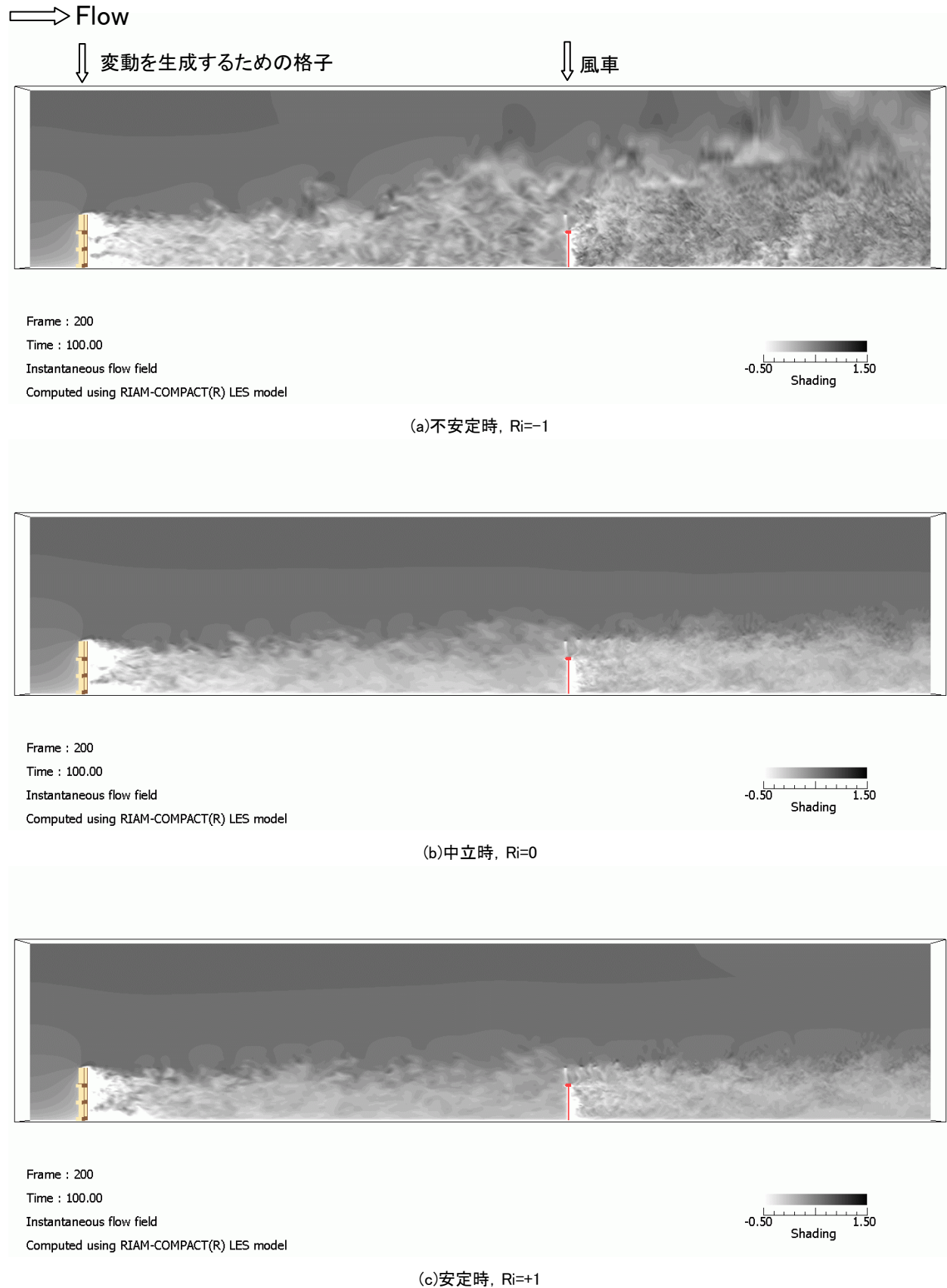
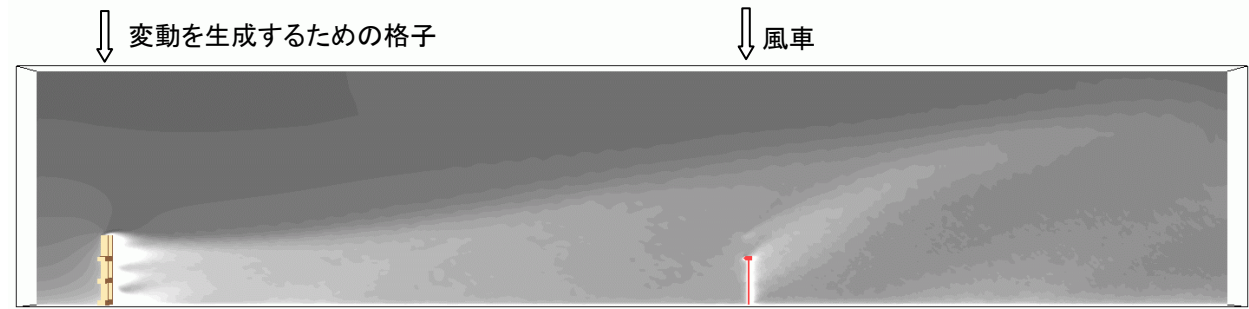
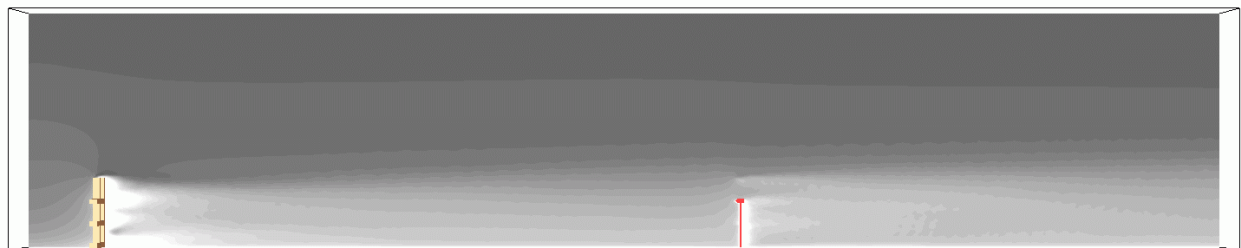


図1 スパン中央面における主流方向の速度成分の分布, 瞬間場, $Re=10^4$

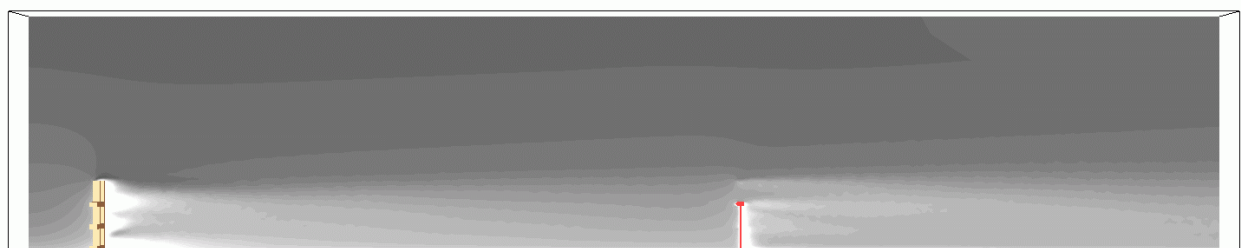
⇒ Flow



(a)不安定時, $Ri=-1$



(b)中立時, $Ri=0$



(c)安定時, $Ri=+1$

図2 スパン中央面における主流方向の速度成分の分布, 時間平均場(フレーム平均場), $Re=10^4$

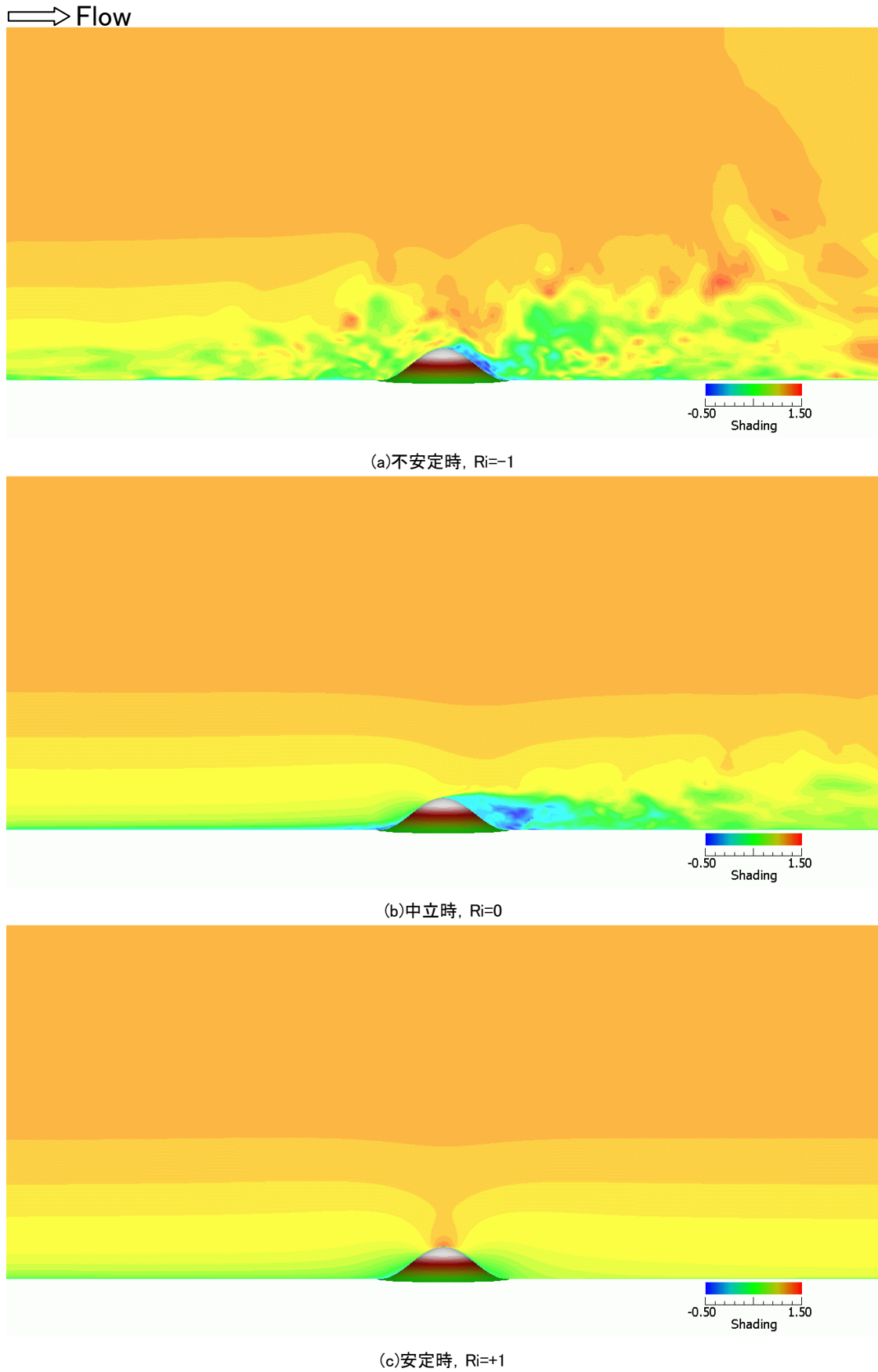
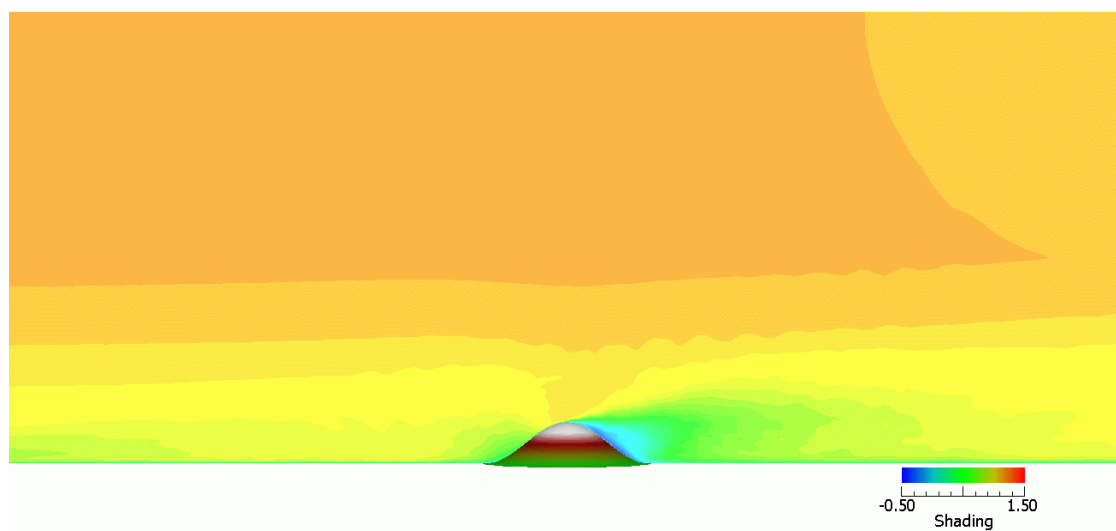
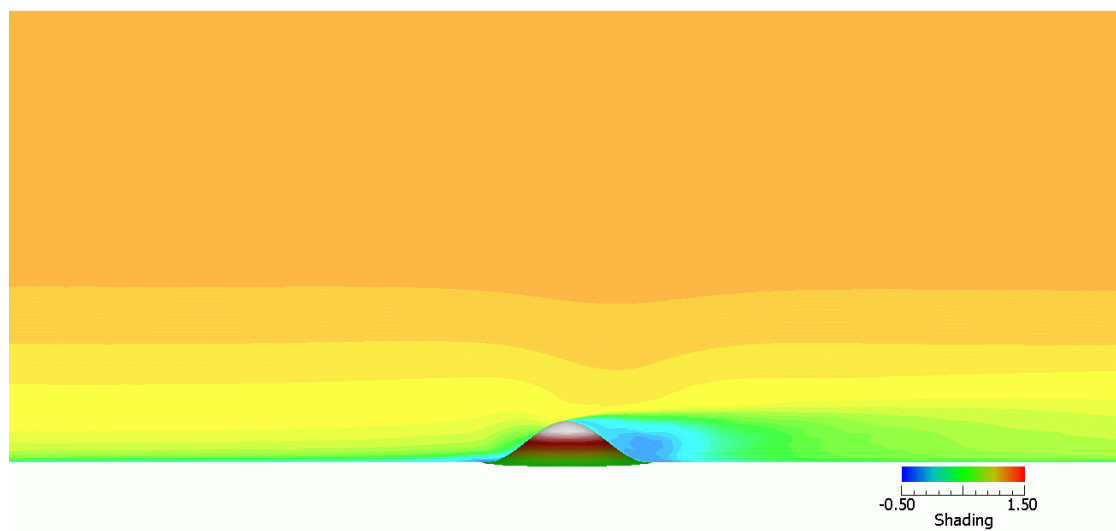
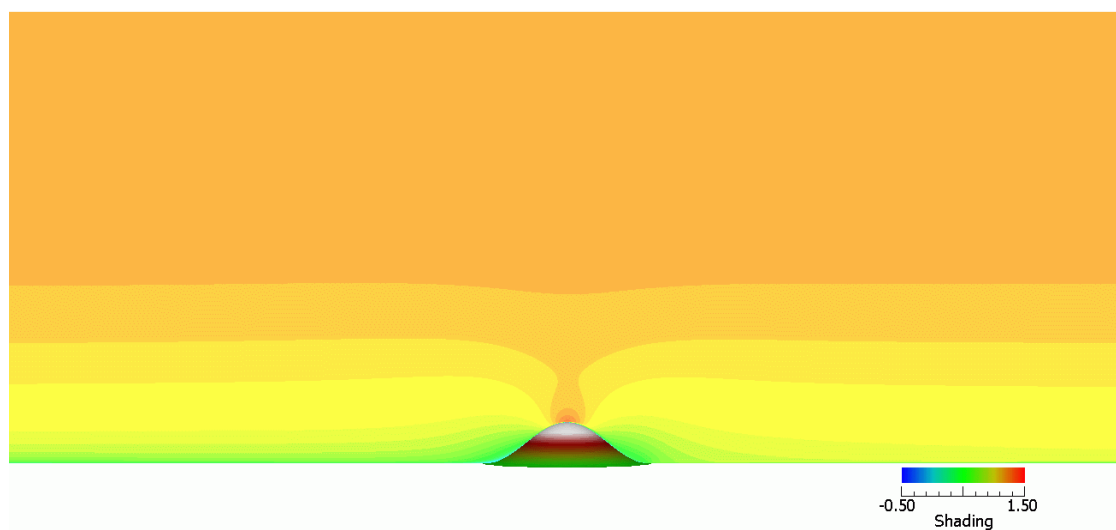


図3 スパン中央面における主流方向の速度成分の分布, 瞬間場, $Re=10^4$

⇨ Flow

(a)不安定時, $Ri = -1$ (b)中立時, $Ri = 0$ (c)安定時, $Ri = +1$ 図4 スパン中央面における主流方向の速度成分の分布, 時間平均場(フレーム平均場), $Re = 10^4$

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。

温度成層流の数値風況シミュレーションでは、大気安定度を表す無次元パラメータとしてリチャードソン数 Ri が式(1)にて定義される。

$$Ri = \frac{g(\Theta_{in} - \Theta_{bottom})H}{\Theta_{in}U^2} \quad (1)$$

ここで、 Θ_{in} は流入温度、 Θ_{bottom} は地面温度、 U は流入風速、 H は代表長さ、 g は重力加速度である。

風車を対象にした場合には風車の半径を、小規模地形(孤立峰)を対象にした場合には孤立峰の高さをそれぞれ代表長さに設定した。風車および小規模地形(孤立峰)の両ケースともに、 $Ri=-1$ (強不安定)、0(中立)、+1(強安定)の3ケースの数値風況シミュレーションを実施した。式(2)にて定義される無次元パラメータのレイノルズ数は、両ケースともに 10^4 に設定した(ここで、 ν は動粘性係数である)。Pr=0.71、Pr_{SGS}=0.5とした。

$$Re = \frac{UH}{\nu} \quad (2)$$

風車を対象とした場合には、流入変動風を作成するため、風車の上流側に格子を設置した。また風車ロータの回転を模擬するため、アクチュエータラインモデル(最適周速比4)を採用した。計算格子数は $1,001(x) \times 151(y) \times 161(z)$ 点とし、無次元時間刻みは0.001とした。

一方、小規模地形(孤立峰)を対象とした場合の計

算格子数は、 $201(x) \times 201(y) \times 61(z)$ 点とし、無次元時間刻みは0.002とした。なお、数値計算手法の詳細は文献¹⁻³⁾を参照して頂きたい。

3. 計算結果と議論

図1～図4には、風車および小規模地形(孤立峰)のそれぞれの場合に関して、スパン中央面における主流方向の速度成分の分布(瞬間場および時間平均場)を示したものである。これらの結果を観察すると、大気安定度の影響は流れ場に強く影響していることが見て取れる。

4. 結言

本研究では、風車および小規模地形を対象に、RIAM-COMPACT®を用いて、種々の大気安定度を有する流れ場の数値風況シミュレーションを試みた。得られた計算結果の流れ場の可視化を行い、大気安定度の影響を定性的に確認することができた。今度は定量的な評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 安定成層流体中の地形効果とその可視化, 可視化情報学会誌, Vol.26(102), pp.205-211, 2006
- 2) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 風況シミュレータRIAM-COMPACT®による拡散場シミュレーション—その1. 不安定時の場合—, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, pp.9-15, 2004
- 3) 内田 孝紀, 大屋 裕二, 風況シミュレータRIAM-COMPACT®による拡散場シミュレーション—その2. 安定時の場合—, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, pp.17-22, 2004