

複雑地形における風力資源の数値予測に対する大気安定度の影響

Stratification Effects on Wind Resource Assessment in Complex Terrain

内田 孝紀^{*1}

高桑 晋^{*2}

Takanori UCHIDA and Susumu TAKAKUWA

^{*1} Associate Professor, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM), Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

^{*2} Team Leader, Japan Renewable Energy Corporation, Roppongi Hills North Tower 10F, 6-2-31 Roppongi, Minato-ku, Tokyo, 106-0032, Japan

Abstract

The atmospheric boundary layer is often characterized by vertical variations of air density. In density stratified layers such as the surface inversion layer that is frequently observed at nighttime, the air density decreases with height. In stably stratified conditions, negative buoyancy forces are present. As a result, when air flows over simple or complex topographies in stably stratified conditions, wave and other fluid phenomena emerge that are not observed in neutrally stratified conditions. In this report, we performed numerical simulations considering various atmospheric stability conditions for small-scale topography. Based on the obtained simulation results, we visualize the flow field and introduce drastic changes in the flow patterns. Furthermore, the effect of stable stratification on the evaluation of power generation is shown for typical complex terrain.

キーワード: 大気安定度, LES, 複雑地形

Key Words: Stable stratification effect, Large-eddy simulation, Complex terrain

1. はじめに

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,上空に向かって温度が高くなる安定成層流を形成する。安定成層流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。その結果,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,大気汚染物質の移流拡散現象予測などに関連して極めて重要である¹⁾。

我々の研究グループにおいても安定成層流に関する研究実績を多数有するが(例えば,文献²⁾),風力エネルギー利用の観点からは検討課題が幾つか残っている。

そこで本研究では,最初に小規模地形(孤立峰)を対象に,中立成層,不安定成層,安定成層状態の種々の大気安定度を考慮した数値風況シミュレーションを実施し,流れ場の可視化結果に基づいて流れパターンの違いを明らかにする。次に,丘陵地形を過ぎる流れ場を対象とした

数値風況シミュレーションを実施する。得られた計算結果に基づき,1年間の風況データ(仮想マストを想定)を用いて2MW級の大型風車の経済性評価を行い,安定成層が与える効果について考察を行う。

2. 数値風況シミュレーションの概要

本研究では,最初に小規模地形として種々の傾斜角度を有する孤立峰の数値風況シミュレーションを行った。特に,中立成層,不安定成層,安定成層の広範囲の大気安定度を有する流れ場の再現を試みた。

本計算はRIAM-COMPACT数値モデル³⁾を用いて行った。数値計算手法は(有限)差分法に基づき,乱流モデルにはLarge-Eddy Simulation(LES)を採用している。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Grid Scale(GS)成分の渦と,それよりも小さなSub-Grid Scale(SGS)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に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,ブシネスク近似に基づいたナビエ・ストークス方程式およびエネルギー方程式(温度方程式)である((1)式~(3)式照)。

*1 九州大学応用力学研究所 准教授 (〒816-8580 春日市 春日公園 6-1) E-mail: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

*2 ジャパン・リニューアブル・エナジー株式会社 チームリーダー (〒106-0032 東京都港区六本木 6 丁目 2 番 31 号六本木ヒルズ ノースタワー10 階) E-mail: stakakuwa@jre.co.jp
(原稿受付: 2020 年 10 月 4 日)

計算アルゴリズムは部分段階法⁴⁾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SOR法により解く。空間項の離散化は(2)式と(3)式の対流項を除いて2次精度中心差分とし、対流項は補間法⁵⁾に基づいた3次精度風上差分とした。ここで、3次精度風上差分の数値拡散項の重みは、河村-桑原スキームタイプ⁶⁾の $\alpha = 3.0$ に対して $\alpha = 0.5$ とした。LESのSGSモデルには渦粘性近似モデル⁷⁾を用いた((4)式～(11)式)。

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + R_i \bar{\theta} \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{\text{SGS}} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_{\text{SGS}} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}|, \text{ ここで } C_s = 0.1 \quad (5)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (6)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (7)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$h_j = -\alpha_{\text{SGS}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{SGS}} = \frac{\nu_{\text{SGS}}}{\text{Pr}_{\text{SGS}}}, \text{ ここで } \text{Pr}_{\text{SGS}} = 0.5 \quad (11)$$

(2)式中の R_i を含む項が、大気安定度を意味する浮力項である。 R_i はリチャードソン数であり、(12)式で定義される。なお、 R_i の定義は温度成層風洞を用いた室内実験の手法に準じている⁸⁾。言い換えると、本研究では温度成層風洞内に縮尺模型を設置した状況を数値的に再現することを想定している。(3)式中の Pr はプラントル数であり、空気の値($=0.71$)を用いた。

$$R_i = \frac{g(\theta_{\text{in}} - \theta_{\text{bottom}})H}{\theta_{\text{in}} U_{\text{in}}^2} \quad (12)$$

ここで、 θ_{in} は高度方向に一樣な流入温度($^{\circ}\text{C}$)、 θ_{bottom} は地面温度($^{\circ}\text{C}$)、 U_{in} は流入風速(m/s)、 H は代表長さ(m)、 g は重力加速度(m/s^2)である。本研究では、初期条件として地面以外の空間領域に一定の温度(= 流入温度)を与え、地面温度との温度差によって速度場に対応する温度場が形成されるようにした。孤立峰の計算では、山の最大高さを代表長さスケールに設定した。その形状は(12)式で示すコサイン関数で表現した。孤立峰の傾斜(広がり幅)を表すパラメータ a として、 $a = 2.0, 3.0, 10.0$ の3種類を用いた(Fig.1を参照)。ここで、 r は原点からの水平距離である。

$$z(r) = 0.5H \times \{1 + \cos(\pi r/a)\} \quad (12)$$

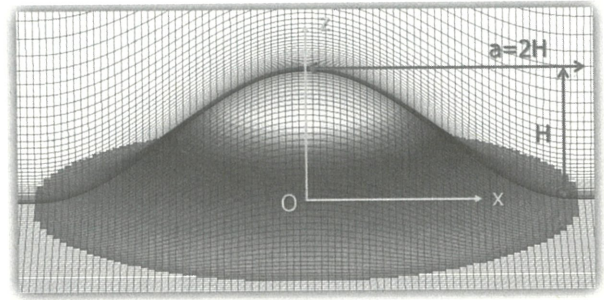


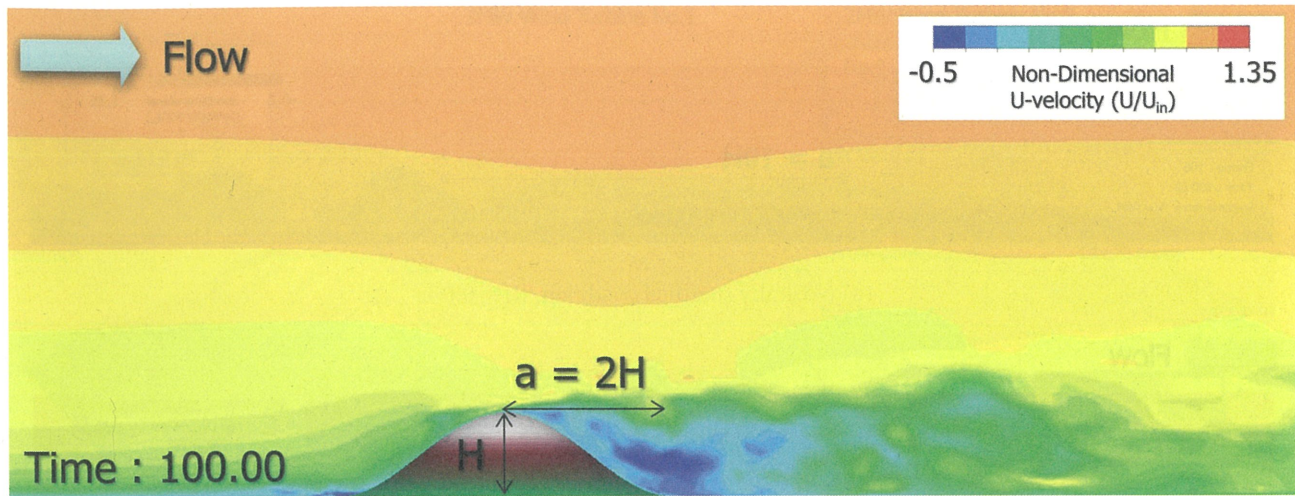
Fig.1 Computational grids near the hill, $a = 2.0$.

(13)式で定義される無次元パラメータのレイノルズ数は、 10^4 に設定した⁹⁾。ここで、 ν は動粘性係数(m^2/s)である。

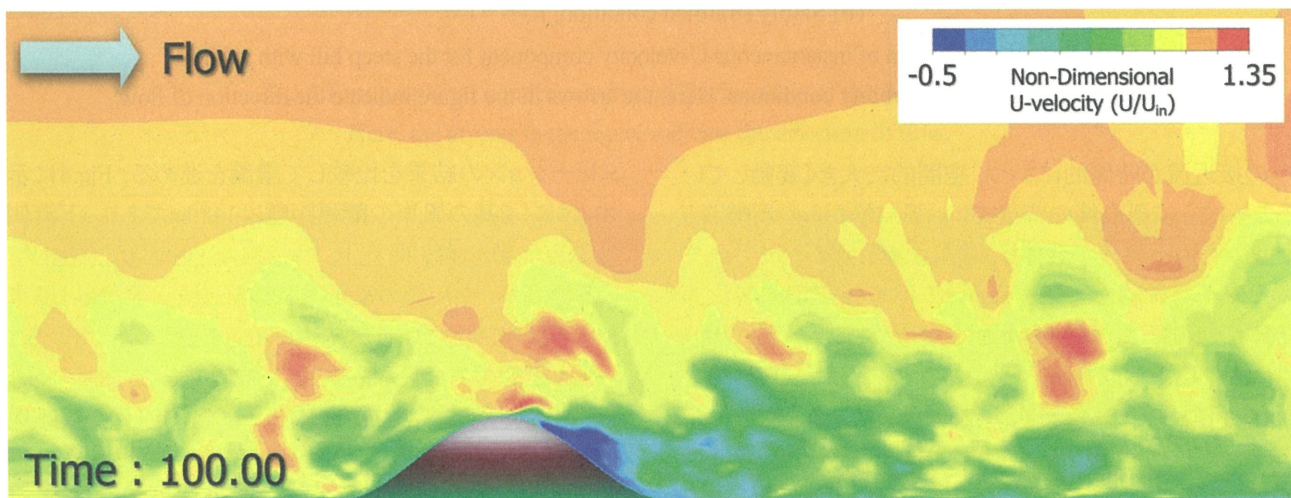
$$\text{Re} = \frac{U_{\text{in}} H}{\nu} \quad (13)$$

3. 種々の安定度における孤立峰周囲流れの変化

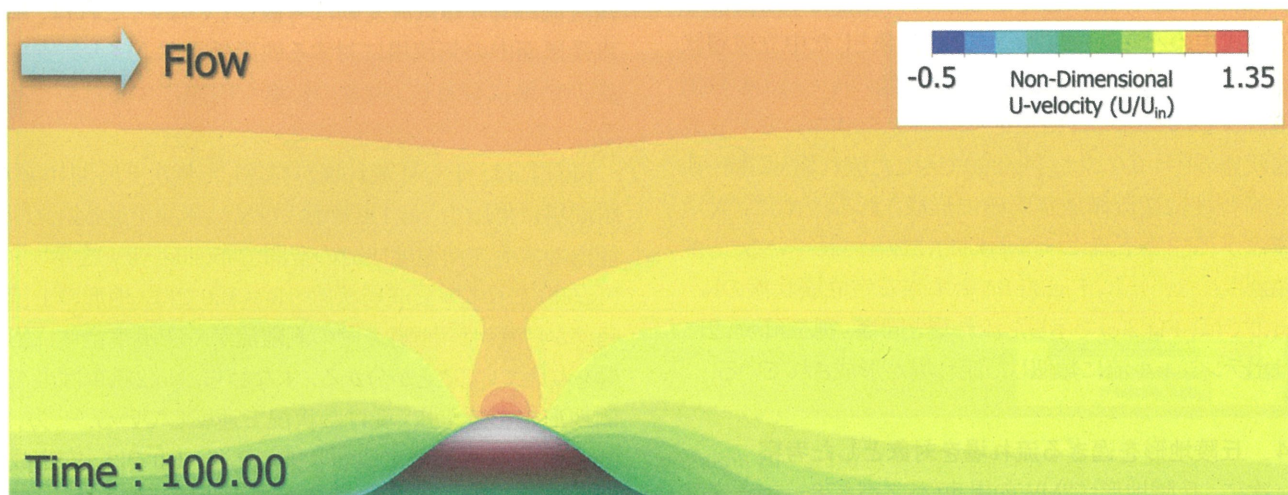
最初に急峻な傾斜角度を有する孤立峰((11)式中のパラメータ $a = 2.0$)を対象とし、中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、強不安定成層状態の $R_i = -1.0$ 、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ の広範囲な大気安定度の数値風況シミュレーションを実施した。Fig.2には、瞬間場(無次元時間100)における主流方向速度成分の空間分布(side view)を示す。流入境界断面(流入条件)では、一般的に用いられる $N = 7$ のべき乗則($[\text{風速}] \propto [\text{地上高さ}]^{(1/N)}$)に従う速度分布を与えた。Fig.2から、大気安定度の違いは流れ場に強く影響していることが見て取れる。Fig.2(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ では、流れ場のアニメーションを作成し、これを観察することで、孤立峰背後に逆流領域が形成され、そこから大規模渦が下流側にほぼ周期的に放出されていることが分かった。Fig.2(b)に示す強不安定成層状態の $R_i = -1.0$ においても流れ場のアニメーションを観察し、地面から上昇気流が間欠的に形成されていることや、孤立峰上流側では山



(a) Neutrally stratified condition, $Ri = 0.0$



(b) Unstably stratified condition, $Ri = -1.0$



(c) Stably stratified condition, $Ri = +1.0$

Fig.2 Spatial distribution of instantaneous U-velocity component for the steep hill with $a = 2.0$ under various atmospheric stability conditions. Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

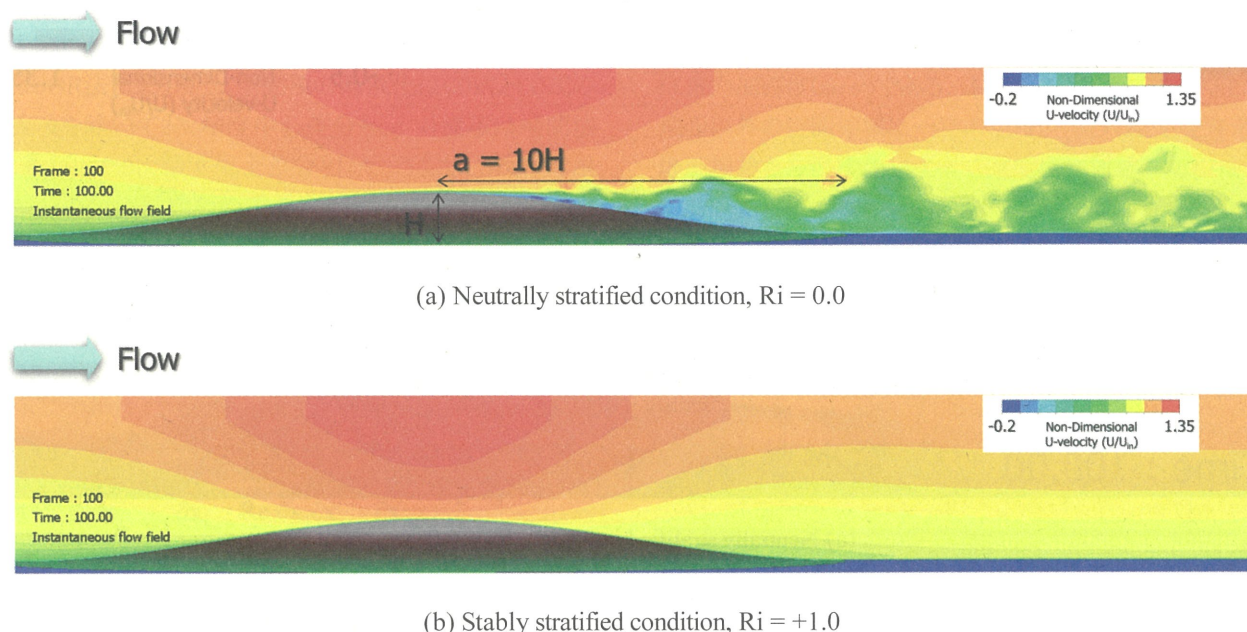


Fig.3 Spatial distribution of instantaneous U-velocity component for the steep hill with $a = 10.0$ under various atmospheric stability conditions. Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

への接近流が時間的にかつ、空間的に大きく変動していること、さらに孤立峰の背後では、孤立峰からの剥離流と地面からの上昇流が合体し、複雑な流れ場が形成されていることが確認された。Fig.2(c)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では、孤立峰周辺ではポテンシャル流に類似した流れ場が形成されている。すなわち、 $R_i = +1.0$ では、Fig.2(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ や、Fig.2(b)に示す強不安定成層状態の $R_i = -1.0$ で出現していた孤立峰背後の逆流領域が形成されていない。これは、Fig.2(c)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では、安定成層の効果に起因して鉛直方向の流体運動が強く抑制された結果である。

Fig.3には、非常に緩やかな傾斜角度を有する孤立峰((11)式中のパラメータ $a = 10.0$)を対象とした中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、および、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ の数値風況シミュレーション結果を示す。Fig.3(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ では、Fig.2(a)で示した流れ場と同様、孤立峰背後に逆流領域が明確に形成されるとともに、大規模渦が孤立峰下流にほぼ周期的に放出されていることが確認された。一方、Fig.3(c)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では、Fig.2(c)で示した流れ場と同様、孤立峰周辺にはポテンシャル流に類似した流れ場が形成されている。

4. 丘陵地形を過ぎる流れ場を対象とした考察

次に、丘陵地形に2MWの風車(ハブ高さ78m、ロータ直径80m)が直列に2基設置されている仮想的な状況を想定し、安定成層時の効果を議論する。中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、および、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ の数値風況シミュレーションの結果を比較して議論を進める。

Fig.4に示すように、2基の風車の離隔距離は1480mであり、下流側の風車(これ以降、便宜上、No.2風車と呼ぶ)が立地している標高が、上流側の風車(これ以降、便宜上、No.1風車と呼ぶ)が立地している標高より200mほど低くなっていることが本研究の対象サイトの大きな特徴である。また、No.1風車のすぐ横に高さ50mの仮想マストを想定した。複雑地形の形状は、国土地理院の10m標高データに基づいて構築され、数値風況シミュレーションの境界条件として反映されている。本計算では地表面粗度は考慮していない。また、流入気流条件は先の孤立峰の場合と同様であり、接近流が有する気流変動は考慮していない。これは、風車受風面内の気流場に対する地形効果および大気安定度の効果に着目し、両者の影響を明確にするためである。

Fig.5には、十分に流れ場が発達した無次元時間100の瞬間場に対して、No.1風車およびNo.2風車を通る鉛直断面内の主流方向速度成分の空間分布(side view)を示す。Fig.5(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ では、地形の上流角部から流れが剥離し、その剥離流がNo.2風車全体に影響を与えていることが分かる。すなわち、No.2風車は上流側地形の影響を強く受けた状態で運転している。一方、Fig.5(b)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では、安定成層の効果により、Fig.5(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ で観察された地形の上流角部からの剥離流はほとんど発生していないことが分かる。その結果、先に述べたように、No.2風車が立地している標高が、No.1風車が立地してい

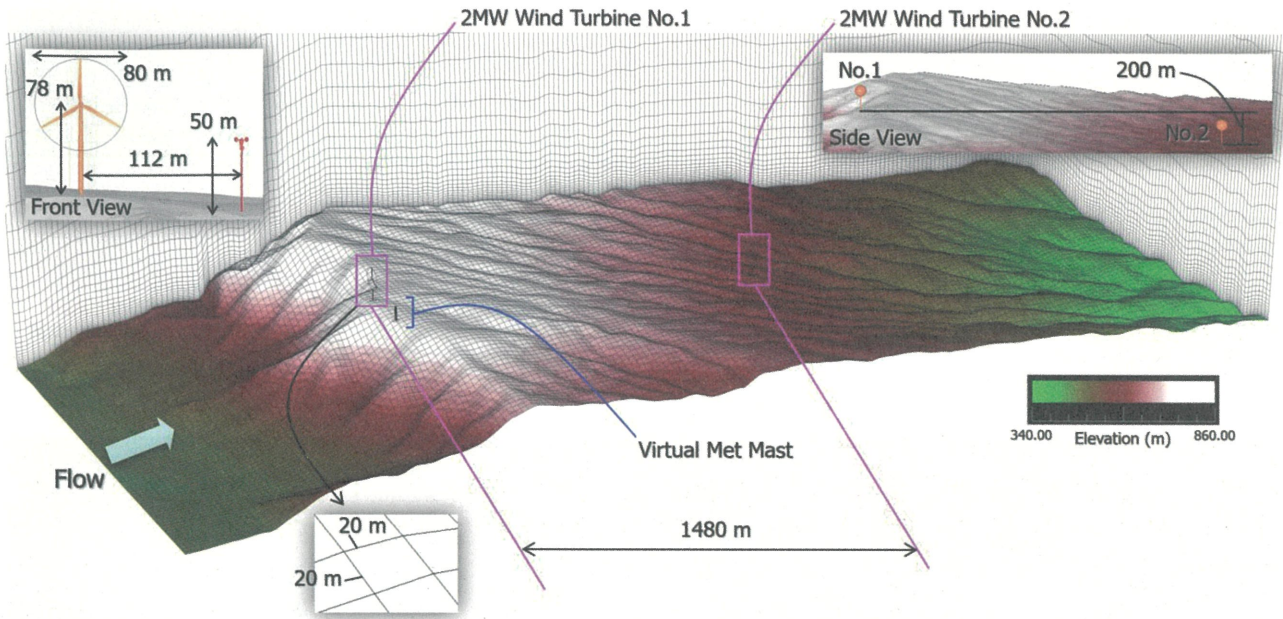
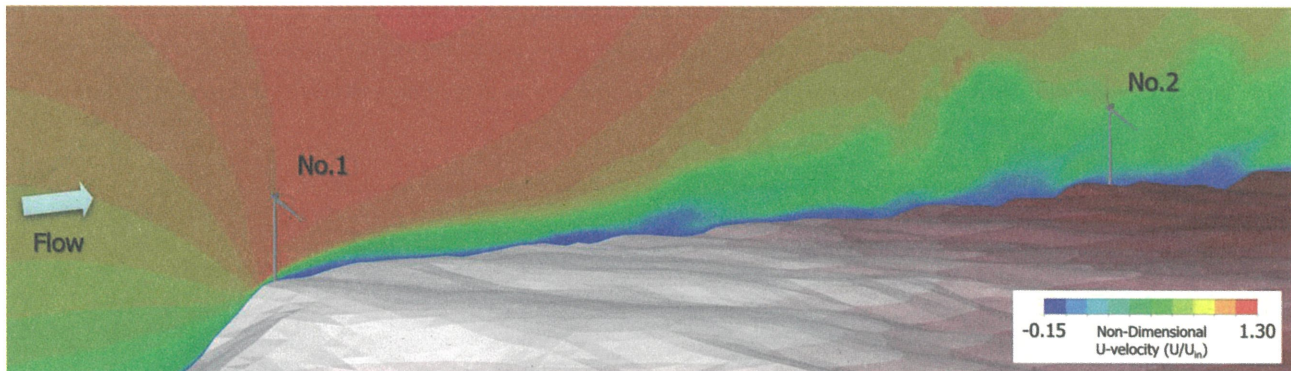
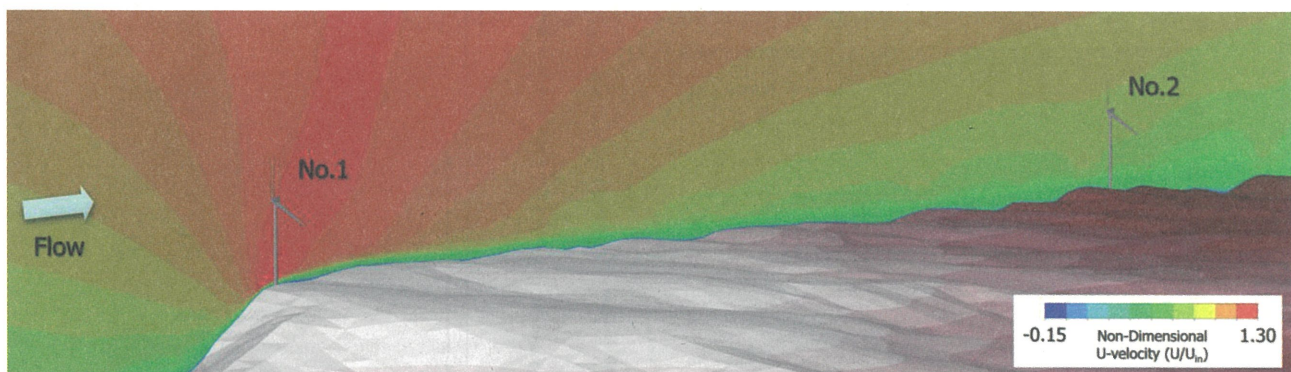


Fig.4 Topographical conditions around the location of the wind turbines.
Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

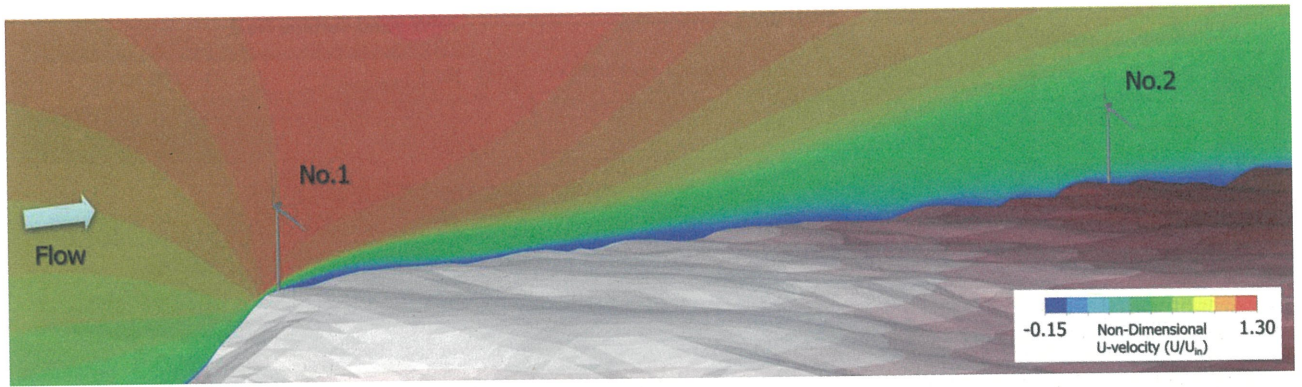


(a) Neutrally stratified condition, $Ri = 0.0$

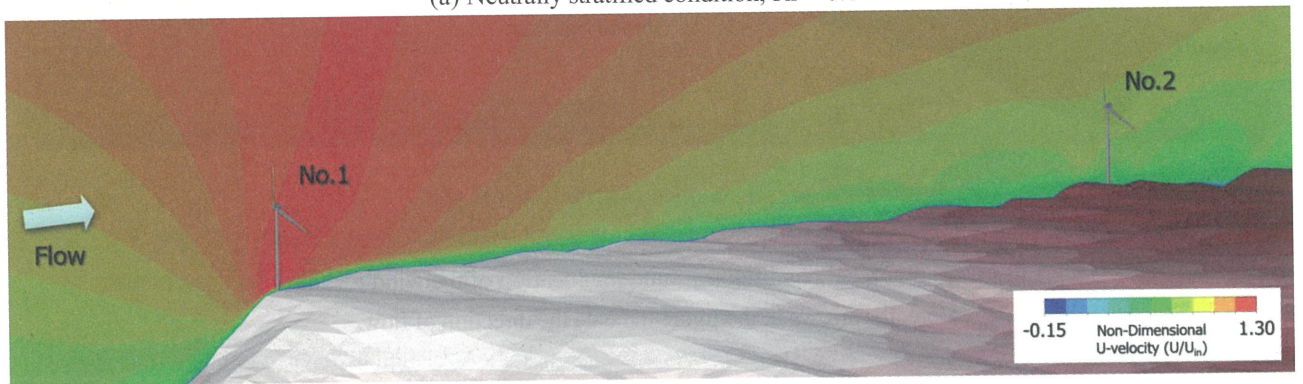


(b) Stably stratified condition, $Ri = +1.0$

Fig.5 Instantaneous flow field including the No.1 and No.2 wind turbines
and the spatial distribution of instantaneous U-velocity.
Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.



(a) Neutrally stratified condition, $Ri = 0.0$



(b) Stably stratified condition, $Ri = +1.0$

Fig.6 Time-averaged flow field including the No.1 and No.2 wind turbines and the spatial distribution of instantaneous U-velocity. Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

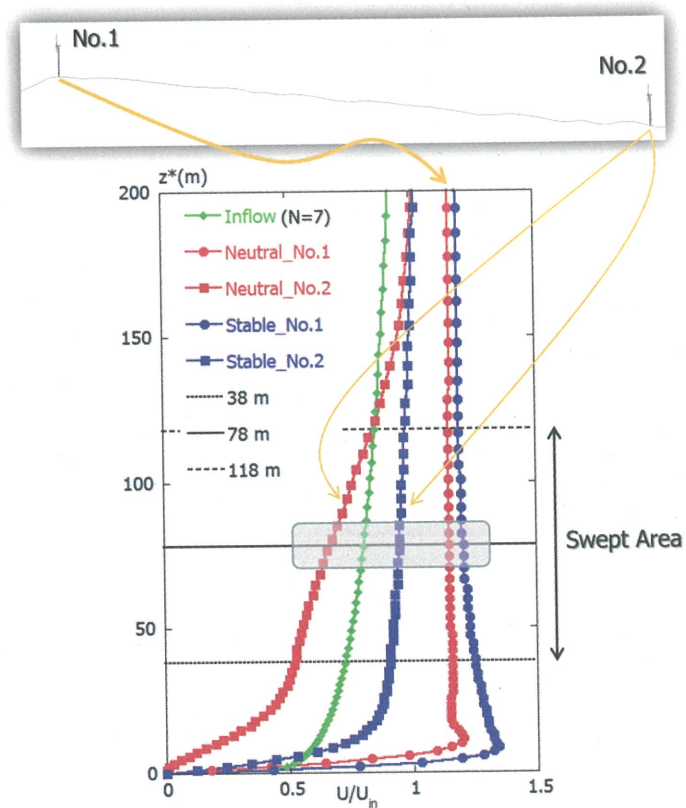


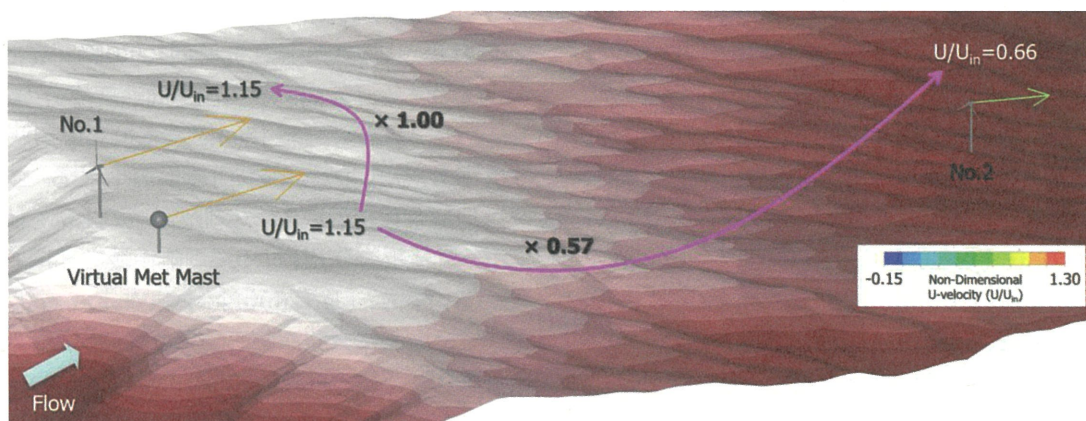
Fig.7 Profiles of time-averaged wind speed at No.1 and No.2 wind turbines.

る標高より200mほど低いいため、No.1風車の周辺に発生している風速よりもやや低くなっているが、No.2風車の周辺には地形性乱流の影響は見られない。Fig.6には、Fig.5に対応した時間平均場を示す。Fig.6(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ では、No.2風車は上流側地形の影響を強く受け、結果としてNo.2風車の周辺での速度は著しく低下している。Fig.6(b)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では、No.2風車の周辺で著しい速度低下は発生していない。

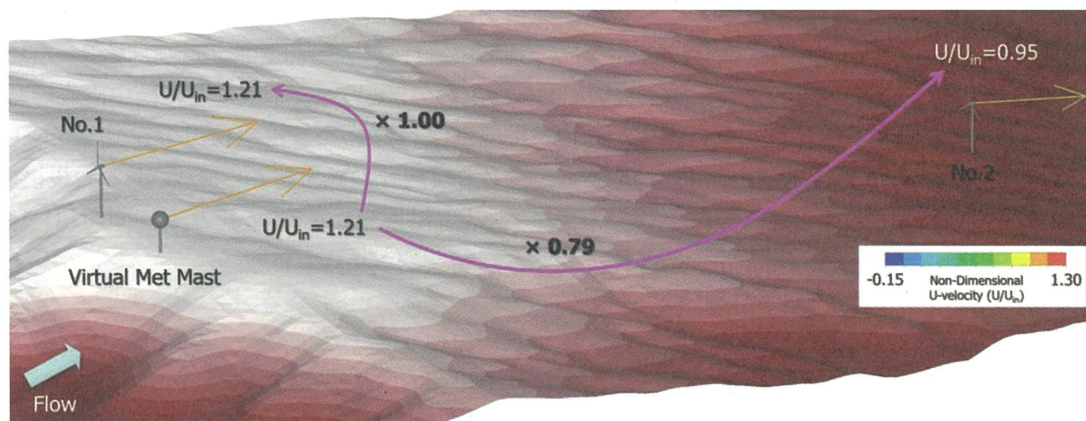
Fig.7には、中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、および、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ における風車立地点における主流方向の速度成分(時間平均値)の鉛直分布を示す。ここで、縦軸の z^* は地上高(m)を示す。地形効果と安定成層効果を明確にするため、流入プロファイル(緑色)も同図に示す。No.1風車の立地点における速度分布に注目する。グラフ中の緑色で示す流入プロファイルと比較して観察すると、No.1風車は最も標高が高い地点に立地しているため、中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、および、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ の両ケースともに流入プロファイルに対して風速が大幅に増速しているのが分かる。グラフ中に矢印で示す受

風面においても局所的な増速が明確に示されている。安定成層時の方が中立成層時に対して増速効果が大いことは興味深い点である。次に、No.1風車の下流側に位置するNo.2風車の風況特性に注目する。中立成層時では、先に述べたように地形の上流角部からの剥離流の影響を強く受け、No.2風車の周辺において速度は大幅に減速している。これはグラフにも明確に示されており、流入プロファイルと比較しても大幅な速度低下が見られる。これに対し、安定成層時には地形の上流角部からの流れの剥離は強く抑制され、地形表面に沿った流れ場が形成されている。この地形表面に沿った流れは、流入プロファイルと比較して大幅に増速していることは特筆すべき点である。以上のように、No.2風車周辺に形成される気流場には、中立成層時と安定成層時では著しい差異があることが明確に示された。これらの結果は、高さ50mの仮想マストに対する風車ハブ高さの風速比としてFig.8に整理した。

本研究では、Fig.9に示す一般的な年間風況特性(風速の発生頻度)が、Fig.4に示す高さ50mの仮想マストで取



(a) Neutrally stratified condition, $R_i = 0.0$



(b) Stably stratified condition, $R_i = +1.0$

Fig.8 Wind speed ratio of wind turbine hub height (78m) to virtual met mast with a height of 50m.

Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

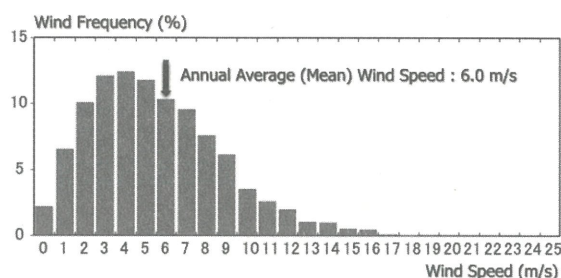


Fig.9 Annual wind speed distribution, 50m virtual met mast.

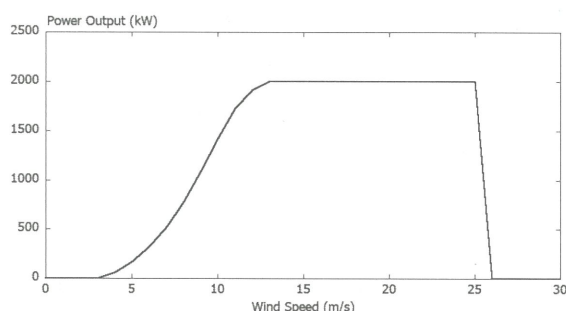


Fig.10 2MW wind turbine power curve.

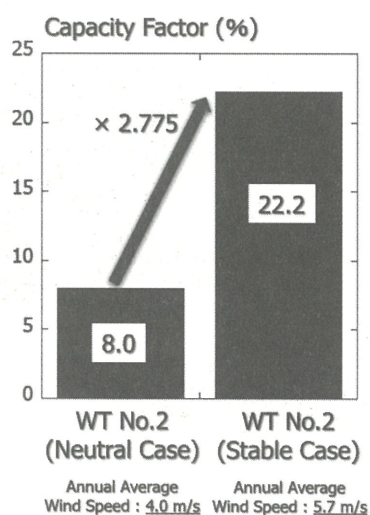


Fig.11 Comparison of capacity factors.

得されたと仮定した。この風況データに基づき、中立成層状態の $R_i = 0.0$ 、および、強安定成層状態の $R_i = +1.0$ の両ケースにおいて、Fig.10に示す理論パワーカーブに基づいて年間発電量(kWh)と設備利用率(%)を試算した。

実際には、Fig.9の風況データは1時間間隔の時系列データから構成されている。また、本研究では風向の変化は考慮せず、Fig.4に示す固定された一つの風向のみから風が1年間吹き続けている状況を想定した。また、仮想マストデータを各風車のハブ高さ位置に変換する際には、Fig.8に整理した風速比を乗じた。一連のデータ解析の後、得られた結果をFig.11に示す。Fig.11から、中立成層時のNo.2風車の年間平均風速は4.0m/sとなり、仮想マ

ストの年間平均風速と比較して著しく低い結果となった。結果として、設備利用率も8.0%と低い数値となった。一方、安定成層時のNo.2風車の年間平均風速は5.7m/sとなり、仮想マストの年間平均風速とはほぼ同程度の数値を示した。これに伴い、設備利用率は22.2%という結果を得た。Fig.11に示すように、両ケースの設備利用率を比較してみると、安定成層時の場合には中立成層時の場合の2.775倍であることが示された。風力業界におけるこれまでの発電量予測では、中立成層時のみを対象としたものがほとんどであった。しかしながら、実際の気象条件に照らし合わせ、安定成層時(または、不安定成層時)の状況も考慮することで、より正確な発電量予測に繋がると言える。

最後に、本研究では急峻な傾斜角度を有する孤立峰((11)式中のパラメータ $a = 3.0$)の頂部付近に風車を仮想設置し、その風車が下流側に形成するウエイクの挙動を考慮した数値風況シミュレーションを実施した。風車ウエイクの再現には、第一著者が最近開発したCFDポーラスディスク・ウエイクモデル¹⁰⁾を適用した。CFDポーラスディスク・ウエイクモデルは風車受風面を抵抗体として表現したモデルであり、詳細は文献¹⁰⁾を参照して頂きたい。十分に流れ場が発達した無次元時間100の瞬間場に対して、風車を通る鉛直断面内の主流方向速度成分の空間分布(side view)を示す。Fig.12(a)に示す中立成層状態の $R_i = 0.0$ における風車ウエイクの挙動に注目する。風車ウエイクは地形背後に形成された剥離領域の上部を流下し、その後、乱流混合作用によって剥離領域内部に取り込まれている。一方、Fig.12(b)に示す強安定成層状態の $R_i = +1.0$ では非常に興味深い流動現象が再現された。すなわち、孤立峰背後では逆流領域が形成されていないため、風車ウエイクは孤立峰の下流側表面に沿って下降流のように地面付近まで到達している。これは風車ウエイクの鉛直方向の蛇行現象である。中立成層時と比較し、安定成層時の流れパターンは地形からの剥離現象などが抑制されるものの、一方で安定成層時には中立成層時と比較して風車ウエイクの影響は顕在化することを示唆している。今後、複数台の風車群から構成される大規模ウィンドファームでは風車ウエイクの相互干渉問題として重要な研究課題¹¹⁾となる。

5. おわりに

本研究では、最初に小規模地形(孤立峰)を対象に、中立成層、不安定成層、安定成層状態の広範囲の種々の大気安定度を考慮した数値風況シミュレーションを実施した。得られた計算結果に基づき、孤立峰周辺の流れパターンの違いを明らかにした。次に、丘陵地形を過ぎる流

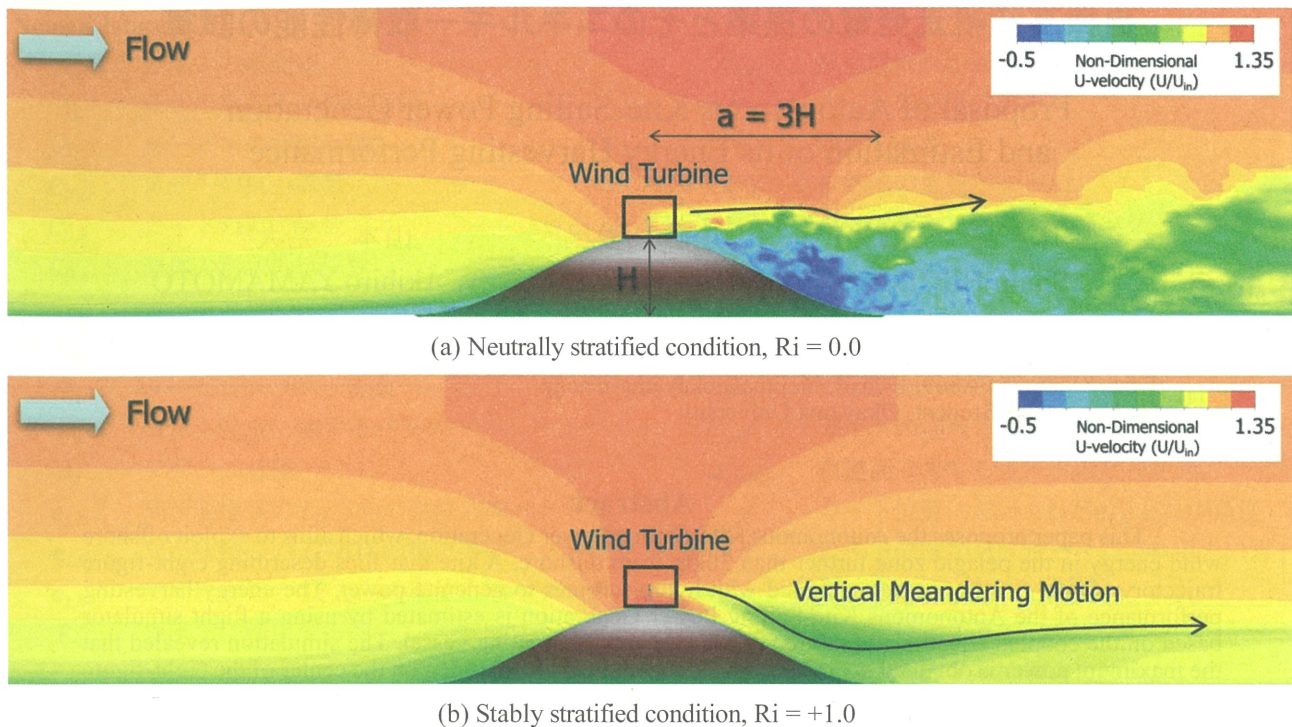


Fig.12 Instantaneous flow field including the CFD porous disk wake model

and the spatial distribution of instantaneous U-velocity. Here, the arrows in the figure indicate the direction of flow.

れ場を対象とし、中立成層時と安定成層時における数値風況シミュレーションを実施し、流れパターンの違いを示した。さらに、1年間の仮想マスト風況データに基づいて2MW級の大型風車の経済性評価を行い、安定成層が与える効果について考察を行った。本研究では、安定成層の効果が顕著に現れるように、強安定成層状態の $Ri = +1.0$ の状況が持続している状況を仮定した。両ケースにおける下流側に位置するNo.2風車の設備利用率を比較した結果、安定成層時の場合には中立成層時の場合の2.775倍になることが示された。これらの結果を踏まえ、風力業界でこれまで実施されてきた発電量予測は中立成層時のみを対象としたものがほとんどであったが、実際の気象条件に照らし合わせ、安定成層時(または、不安定成層時)の状況、さらに風車ウエイクの挙動を同時に考慮することにより、より正確な発電量予測が実現すると言える。

謝 辞

本研究の一部は、ジャパン・リニューアブル・エナジー株式会社との共同研究(研究代表者:内田孝紀)の支援を受けた。ここに記して、関係者に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- William H. Snyder and J.C.R. Hunt, Turbulent diffusion from a point source in stratified and neutral flows around a three-dimensional hill- II. Laboratory measurements of surface concentrations. *Atmospheric Environment*, 18(10), 1969.
- Uchida, T., Three-Dimensional Numerical Simulation of Stably Stratified Flows over a Two-Dimensional Hill, *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol.7, pp.579-595, 2017.
- Uchida, T. and Takakuwa, S., Large-Eddy Simulation-Based Assessment of the Risk of Wind Turbine Failures Due to Terrain-Induced Turbulence over a Wind Farm in Complex Terrain, *Energies*, 12(10), 1925, 2019.
- 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.
- 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014.
- 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.
- Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., *Mon. Weather Rev.*, Vol.91, pp.99-164, 1963.
- Ohya, Y. and Uchida, T., Laboratory and Numerical Studies of the Convective Boundary Layer Capped by a Strong Inversion, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.112, pp.223-240, 2004.
- 加藤真規子, 複雑地形上の乱れの構造の風洞内再現, *日本風工学会誌*, 第59号, pp.89-92, 1994.
- Uchida, T. et al., A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, *Energies*, 13(12), 3197, 2020.
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M. and Shamsoddin, S., Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorol.*, 174, 1-59, 2020.