

CFDを用いた複雑地形周りの風の性状予測に関する検討

— 実在複雑地形における複数点の観測データとの比較に基づくLESの精度検証 —

丸山 勇祐*1・田村 哲郎*2・岸田 岳士*3

A Study of Wind Prediction Accuracy around Complex Terrains by CFD

Evaluation of LES Applicability Based on Comparison with Observation Data on Several Points

Yusuke MARUYAMA, Tetsuro TAMURA, Takeshi KISHIDA

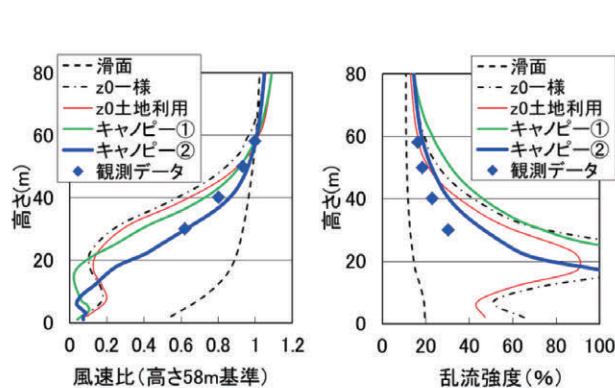


図-1 観測ポイントにおけるプロファイルの比較

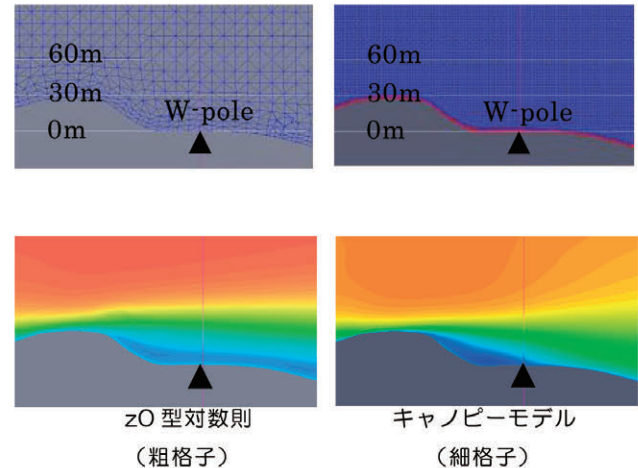


図-2 格子解像度による流れの状況の変化

研究の目的

複雑地形において構造物の耐風設計を行う際、地形による風速の割り増し効果だけでなく、複雑地形による乱れの増加も考慮する必要がある。筆者らは、CFD によって複雑地形周りの風の状況を精度よく予測することを目的として検討を進めている。本報では、実在複雑地形を対象に LES による計算を実施し、複数点での観測データと比較することから、LES の適用方法について検討を行った。

技術の説明

複雑地形の流れを計算する場合、地形の形状を精度よく再現するだけでなく、地表面を覆う植栽等の影響を十分に再現する必要がある。本報では、地表面粗度の効果を検証するため、 z_0 型対数則に基づく壁関数を用いた計算を実施し、観測データと比較を行った。地表面に粗度の効果がないと、剥離等の状況が再現されず、実測の傾向をとらえることができなかった。このことから、地形周りの風の計算を行うには地表面粗度境界条件の設定方法が重要であることを示した。しかし対数則型壁関数を用いる場合、地表面からの第一格子点を対数則領域に設定する必要があり、この条件が格子解像度の制限となってくる。そこで、地表面の粗度効果をキャンピーモデルで再現することにより格子解像度の高い計算を実施したところ、剥離部分での性状がより観測データに近づくことを確認した。

主な結論

- 地表面の境界条件に z_0 型対数則に基づく壁関数を用いた計算を実施し、滑面の場合と植栽を模擬した粗度の場合の結果と観測データとの比較から、粗度効果があるものの方が実測に近い傾向を示すことが確認され、複雑地形周りの風の状況を予測するために粗度の効果が重要であることを示した。
- 地表面境界条件にキャンピーモデルを適用することで、剥離領域の格子解像度を上げた計算を実施したところ、より観測データに近い結果がえられた。このことから剥離等の性状を正しく再現するためには、十分な格子解像度が必要であることが分かった。

*1 本店 技術研究所 建築環境研究室

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授

*3 (株)風工学研究所

CFDを用いた複雑地形周りの風の性状予測に関する検討 - 実在複雑地形における複数点の観測データとの比較に基づくLESの精度検証 -

丸 山 勇 祐*¹ 田 村 哲 郎*²
岸 田 岳 士*³

要 旨

複雑地形において構造物の耐風設計を行う際、地形による風速の割り増し効果だけでなく、複雑地形による乱れの増加も考慮する必要がある。筆者らは、CFDによって複雑地形周りの風の状況を精度よく予測することを目的として検討を進めている。本報では、実在複雑地形を対象にLESによる計算を実施し、複数点での観測データと比較することから、LESの適用方法について検討を行った。

本報では、地表面粗度の効果を検証するため、対数則壁関数を用いた計算を実施し、観測データと比較を行った。地表面に粗度の効果がないと、剥離等の状況が再現されず、実測の傾向をとらえることができなかった。このことから、地形周りの風の計算を行うには地表面粗度境界条件の設定方法が重要であることを示した。しかし対数則型壁関数を用いる場合、地表面からの第一格子点を対数則領域に設定する必要がある、この条件が格子解像度の制限となってくる。そこで、地表面の粗度効果をキャノピーモデルで再現することにより格子解像度の高い計算を実施したところ、剥離部分での性状がより観測データに近づくことが確認できた。

キーワード LES／複雑地形／風速の割増／乱流強度／地表面粗度／格子解像度

目 次

- | | |
|-------------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 地表面粗度の効果 |
| 2. 計算対象サイトおよび計算概要 | 5. 格子解像度の影響 |
| 3. 比較対象気象イベント | 6. まとめ |

A STUDY OF WIND PREDICTION ACCURACY AROUND COMPLEX TERRAINS BY CFD

Yusuke MARUYAMA Tetsuro TAMURA
Takeshi KISHIDA

Synopsis:

For the wind resistant design of the structures built on the complex terrain, it is necessary to take into consideration not only the amplified level of mean wind velocity but also the variation of turbulent intensity. Turbulent intensity is very important for fatigue load. In order to accurately predict the turbulent statistics by CFD, we should use LES (Large eddy simulation) which can solve unsteady flow fields as a simulation model. So, we performed LES over an actually existent complex terrain, and verified the accuracy of prediction for turbulent characteristics, especially focusing on the turbulent intensity, in comparison with the observational data in this paper. Also, we considered the influence of surface roughness and mesh resolution near the terrain on the turbulent flow field.

* 1 本店 技術研究所 建築環境研究室
* 2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授

* 3 (株) 風工学研究所

1. はじめに

複雑地形の上に建設される構造物の風荷重を考える際に、地形の形状による平均風速の割増だけでなく、疲労の問題等を考慮する上で乱流強度を正しく評価することも重要となってきている。2013 年には、複雑地形に建てられたことにより、乱れの影響に起因すると考えられる風力発電施設の破損事故が数件報告された^{1)~3)}。建築基準法の告示 1454 号には「局所的な地形や建物の影響により平均風速が割増されるおそれのある場合には、その影響を考慮しなければならない。」と書かれているが、平均風速の割増についての表記だけであり乱れの取り扱いについては触れられていない。建築学会の「建築物荷重指針・同解説（2004）」⁴⁾では、小地形による風速の割増し係数と、小地形による乱れの強さの補正係数が風洞実験に基づく近似式で与えられているが、単純な形状に直交するケースのみが与えられており、複雑地形への適用性については明確ではない。土木学会の「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（2010 年版）」⁵⁾では、地形による平均風速の割増係数・地形による乱流強度の補正係数の算定を CFD 等に基づいて行う方法が示されているが、精度を確保するための CFD 手法等については明記されておらず、乱れを解析するための非定常解析については触れられていない。

乱れの影響まで含めた計算を行うためには、時々刻々の乱れを再現することができる非定常解析手法である LES による計算が必要である。本報では、実在する複雑地形周りの風の計算を LES で実施し、複数点で観測された実測データと比較した結果について報告する。また、地表面粗度が乱れに与える効果について検討するため、対数則型壁関数およびキャノピーモデルを導入した計算を実施し、滑面と粗面の結果の比較についても議論する。

2. 計算対象サイトおよび計算概要

2.1 計算対象サイト

計算対象としたサイトは、鹿児島県いちき串木野市にある弁財天山（標高 519m）近傍の高さ 500~600m 程度の山岳地である。地形の概要図及び現地での観測ポイントを図-1 に示す。西側は東シナ海が広がり、北東の平野が薩摩川内市の市街地となっている。図中に示す NeWMeK⁶⁾の風観測高さは地上 70.5m である。図中の W-pole および E-pole は、NEDO プロジェクトにおいて観測を行っているものであり、地上 30~60m の高さで、数点の観測を行っている。

2.2 計算モデル

計算用の地形は、E-pole 近傍を中心に半径 7km の範囲を国土地理院発行の 10m メッシュ標高データを基に忠実に形状を再現し、半径 9km の地点で高さが 0m となるように 7~9km の範囲に実地形に合わせてテーパーをつけて

いる。円形領域を抽出しテーパーを周辺につけたのは、全風向のモデルが容易に生成できるようにすることと、流入変動風の流入高さを明確にし、流入出の流量を合わせることで計算を安定化するためである。計算にあたっては、図に示す（風向 NNW）ように地形の中心から長さ 20km×幅 4km×高さ 10km の領域を切り出し、その中に計算格子を生成する。図-2 に計算に用いた格子の概要を示す。計算には非構造格子系の OpenFOAM を用いるため、六面体要素（ヘキサ）を基本とし、テトラ要素、ピラミッド要素、プリズム要素を組み合わせた非構造格子を使用している。領域内高さ方向に 3つのボックスと解析中心周りに複数の円柱を設け、それぞれの領域の格子幅が 2 倍ずつリファイン（格子解像度が 2 倍）されるようにし、解析中心の地表面近傍では地表面境界に合わせた細かな格子となっている。また地表面に沿っては 3~5 層の境界層格子を設置する。なお、本報告では風向 NNW（北北西）についての計算を対象とする。

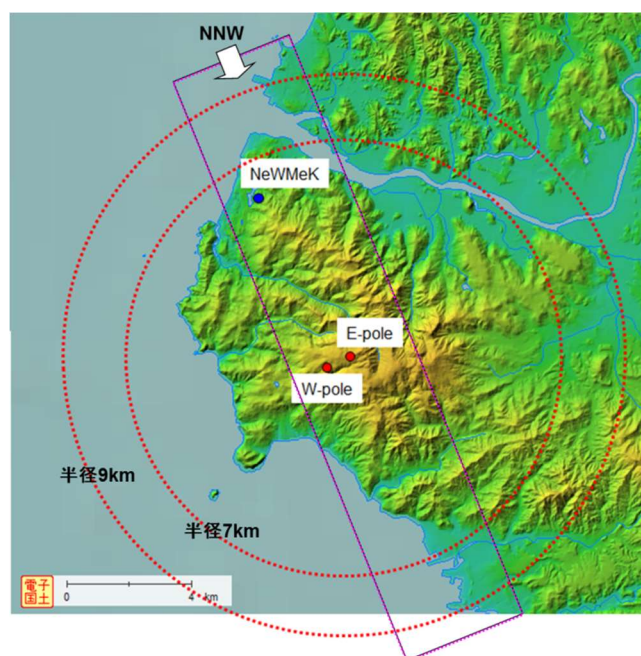


図-1 計算対象サイトの概要及び風観測点

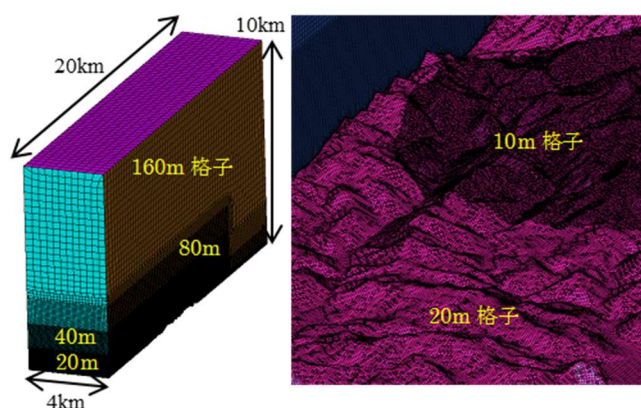


図-2 計算格子の概要（非構造格子：風向 NNW）

2.3 計算概要

解析にあたっては、オープンソースコードである OpenFOAM ver. 1.7.1 を使用し、乱流モデルとして LES (pisoFoam: 標準スマゴリンスキーモデル) を用いる。流入面には、地形計算用に作成した Lund⁷⁾型流入変動風⁸⁾を用い、時々刻々変動する風速時刻歴波形を与える。地表面については、OpenFOAM の滑面対数則 (滑面)、粗面用に z_0 (粗度長) の値を設定した対数則およびキャノピーモデルの 3 種類を用いる。 z_0 の値は、陸地及び海面を一律な値 (海: 0.0002, 陸地: 0.8) とした場合 (z_0 一様) と、100m メッシュ土地利用情報に対応した値とした場合 (z_0 土地利用) について解析を実施し、比較した。各土地利用に対応する z_0 の値は、非線形風況予測モデル MASCOT で石原⁹⁾の提案したものを用いる。

3. 比較対象気象イベント

3.1 強風気象イベント

計算結果と比較する観測データは、大気安定度が中立状態に近いと想定される風向が安定し長い時間強風が持続する気象イベント時のものを対象とした。図-3 に E-pole の最上部 (観測高さ: 地上 58m) での 2009 年 4 月 25 日～26 日に観測された風向・風速のデータを示す。図-4 にこの 2 日間の午前 9 時の天気図を示す。この期間は 2 つの低気圧が日本上空で発達しながら東に移動する際に、日本全国で強風が吹いた。図-3 の時刻歴によると 2009/4/25 の正午から 2009/4/26 の夕方までは風向がほぼ NNW で安定しており、10 分間平均風速が 10m/s を越える強風状態が持続している。この期間の観測データを計算結果との比較データとして用いる。

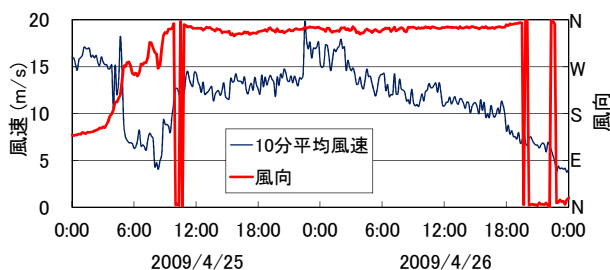


図-3 2009/4/25～26 の風観測データ (E-pole)

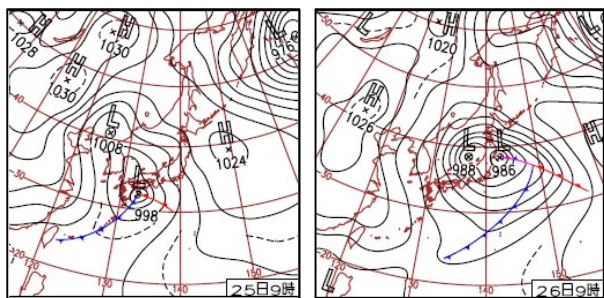
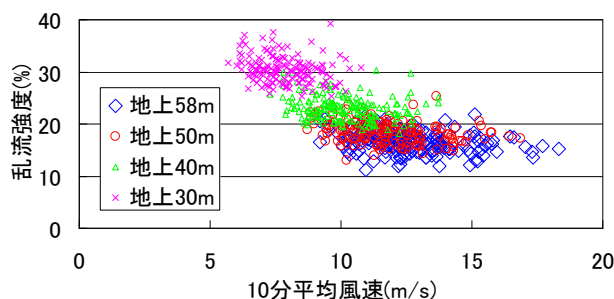


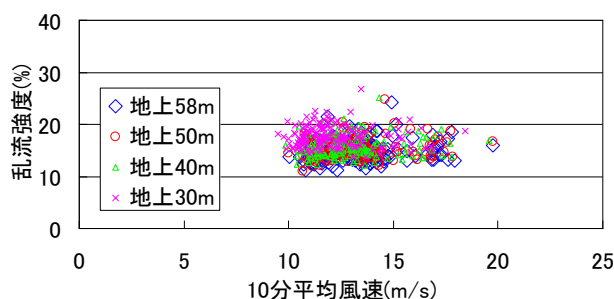
図-4 2009/4/25～26 の天気図

3.2 観測データの乱れの特性

図-5 に強風が持続した 4 月 25 日 11 時から 4 月 26 日 15 時までの、10 分間平均風速と乱流強度の関係をそれぞれの観測ポイント毎にプロットしたものを示す。W-pole では、高さ方向に平均風速が下がっており、それに応じて乱流強度が大きくなっている。しかし、各高さでは乱流強度はややばらついているものの明確な平均風速の依存性は見られない。E-pole では、観測高さによる変化が風速・乱流強度ともにあまり見られず、乱流強度のばらつきは同じ値の周りにあり、風速の依存性があまり見られない。ここでは、頂部の風速計で 10 分平均風速が 10m/s を超える強風時のみを対象としているため乱流強度の風速依存性が無いものと考えられる。計算結果との比較にあたっては、ここに示した強風期間の全データのアンサンブル平均値を用いることとする。



(a) W-pole



(b) E-pole

図-5 強風時の平均風速と乱流強度の関係 (観測)

4. 地表面粗度の効果

4.1 瞬間風速分布

図-6 は標高 300m の断面の瞬間風速分布 (計算結果) である。流入から入ってくる、変動成分が計算対象地点付近まで流下することが確認できる。滑面と粗面 (z_0 一様・ z_0 土地利用) の比較では、粗面の結果の方が剥離に伴う低風速領域が広がっている。 z_0 の値については、山岳地であるため森林で一様とした場合も土地利用データを用いた場合もあまり違いは見られない。地表面の粗度の状況により剥離の性状が異なってくるものと考えられる。

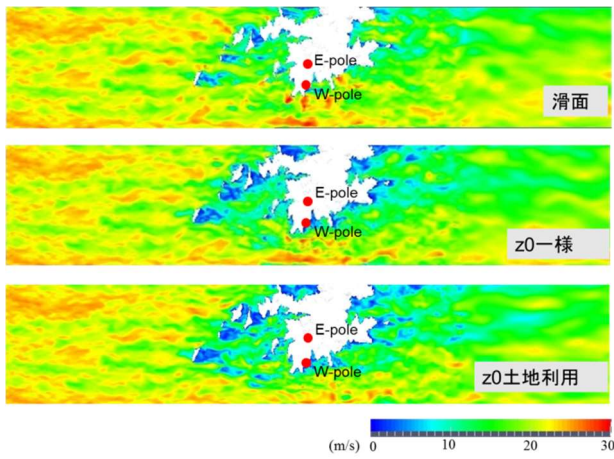
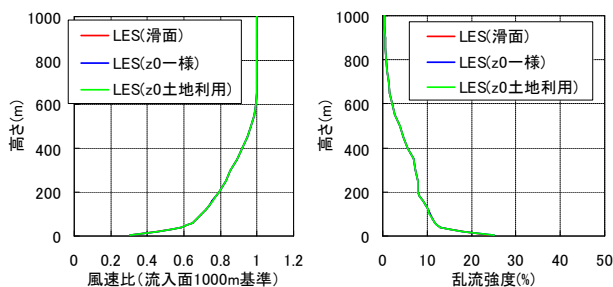
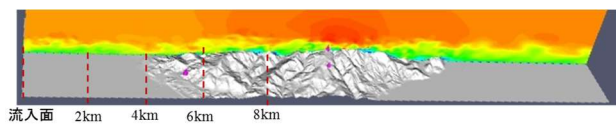


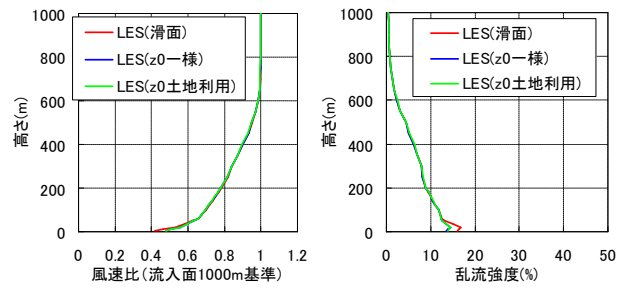
図-6 瞬間風速分布の比較 (標高 300m)

4.2 接近流の変化

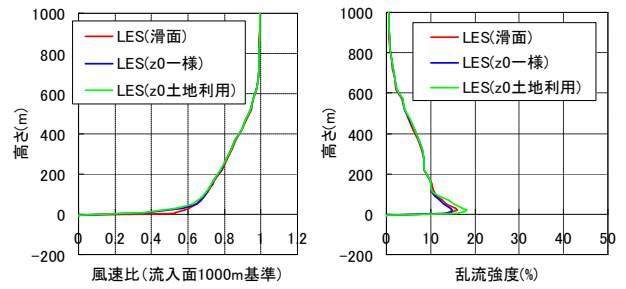
図-7 に解析領域のスパン方向中央断面における流入から 2km 毎の平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルを示す。流入面から 4km までは、海上となっておりプロファイルの形状に大きな違いが見られない。陸地に入って 1~2km の流入面から 6km の場所では、 z_0 型対数則と滑面对数則で平均および変動のプロファイルの形状に違いが見られる。この部分は海から流入してすぐの場所であり、それほど地形が複雑ではないため、床面境界条件に z_0 型対数則を用いた効果が顕著にあらわれていると考えられる。流入面から 8km の位置では、床面境界条件によらず平均・変動ともにほぼ同様のプロファイルとなっている。この地点はいくつもの尾根を越えて気流が到達する場所であり、プロファイルの形状が複雑地形の形状によって決定されている可能性が考えられる。しかし、後に示す観測ポールにおける鉛直プロファイル (図-8) では、床面境界条件により違いが見られており、地形の複雑さだけで平均風速や乱流強度のプロファイルが決定されるわけではないと考えられる。また、特に W-pole では、風上側の尾根からの剥離の影響を強く受ける地点にあり、剥離等の性状に対しては床面境界条件が顕著であるとも考えられる。



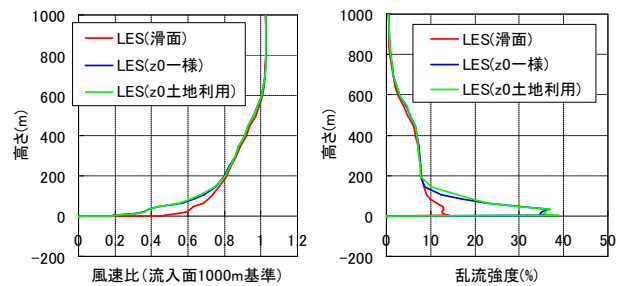
(a) 流入面



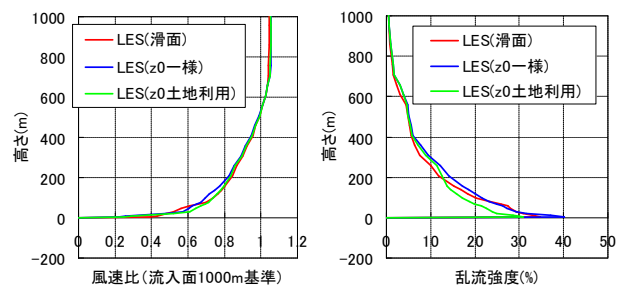
(b) 流入面から 2km



(c) 流入面から 4km



(d) 流入面から 6km



(e) 流入面から 8km

図-7 接近流の鉛直プロファイルの変化

4.3 観測データとの比較

図-8 に計算結果と 3 章で示した観測期間の観測データの平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルの比較を示す。平均風速については観測ポール最上部 (高さ 58m) のスカラー風速で基準化した値としている。図-9 に観測ポール近傍の地形の状況を示す。どちらの観測点も風向 NNW に対しては尾根を越えた流れがあたる部分となっており、ポールの下部は尾根のウエイク (剥離に伴う低風速領域) に入ると考えられる。E-pole では、尾根の頂部に近く、風速が下がっている部分の高さが低いが、風速が高さとともにやや低くなる傾向は粗面用 z_0 型対数則を用いた場合のほうが合っている。乱流強度については

観測と計算が良く合っている。W-pole では、前方の尾根からの剥離の影響で下部の風速が大きく減少し、乱流強度が大きくなっている。計算では、滑面对数則を用いたものでは下部での傾向は明確に出ていないが、z0 型対数則を用いると下部での減速効果が観測以上に強く出ている。風速が低くなる分、乱流強度も大きめになっている。定性的な傾向は z0 型対数則を用いることで、平均風速・乱流強度ともに近くなっているものと考えられるが、地表面の効果が z0 型対数則を用いることで定量的に再現されるかについては疑問が残る。z0 型対数則を用いることは、対数則領域の流速を低減することで地表面の摩擦効果を入れることとなるが、非常常現象における床面摩擦速度の定義方法、対数則領域から下の乱流構造等に不明確な部分が多く、必ずしも正しく乱流構造を再現していない可能性がある。また、z0 型対数則を用いる計算では、地表面第 1 格子点を対数則領域に設定する必要があるが、今回の計算では地表面から高さ 5~10m に第 1 格子が設定されている。それに合わせて水平方向も比較的粗い格子となっていたため、格子解像度が低い影響で剥離等の性状が十分に再現されていないことが懸念される。

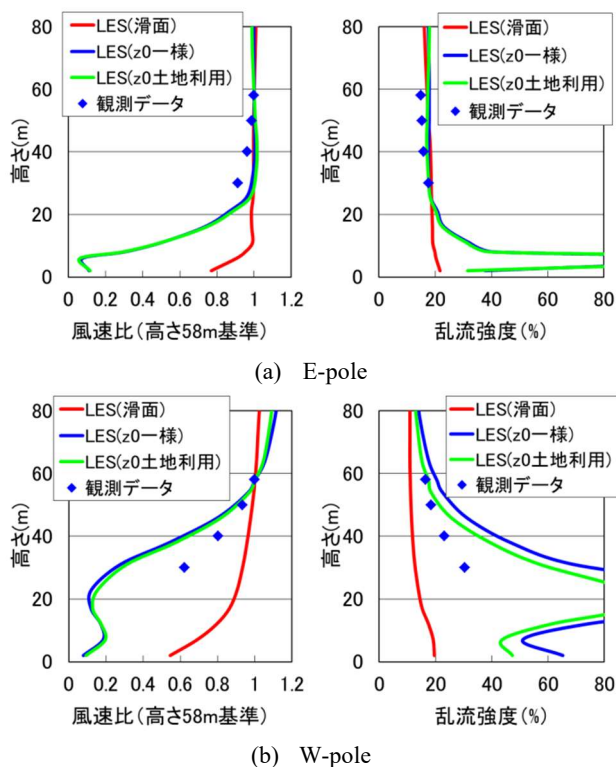


図-8 観測ポールでの実測と計算結果の比較

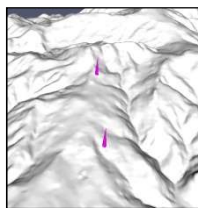


図-9 観測ポール周辺の地形の状況

5. 格子解像度の影響

5.1 キャノピーモデルの導入

4 章の計算では風洞実験レベルのレイノルズ数を用いて計算を行ったが、z0 型対数則に基づく壁関数を用いる場合、地表面からの第 1 格子点を対数則領域に設定する必要があるため、地表面第 1 境界層格子の厚さは実スケールで 5m 程度となっており、水平方向の格子解像度が約 10m となっている。この解像度では小さな尾根などからの剥離の現象や渦の挙動を明確にとらえられない可能性が考えられるため、地表面粗度効果にキャノピーモデルによる抵抗力を用いることで、格子分割が対数則で限定されない、地表面近傍の格子を細かくした計算を実施することとした。

今回の計算で用いるキャノピーモデルは[1]式のようにナビエ・ストークス方程式に速度に対応した抗力項を付加した形のものである。[2]式が植栽の抵抗を表すものとなっており、3 つのパラメータであらわされるが、今回の計算では植栽の分布・種類等の詳細な情報が分からないため、陸上部分の地表面に一樣に一定厚さのキャノピー層を与えた。また、[2]式のパラメータの詳細もわからないため 3 つの係数を掛け合わせたものを 1 つの抗力係数と考え全領域に同じ値を与えた。値とキャノピー層の厚さに関しては、テスト計算を行い森林に対応した z0 型対数則と同等の境界層が生成される値を用いた。

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + F_{u,i} \quad [1]$$

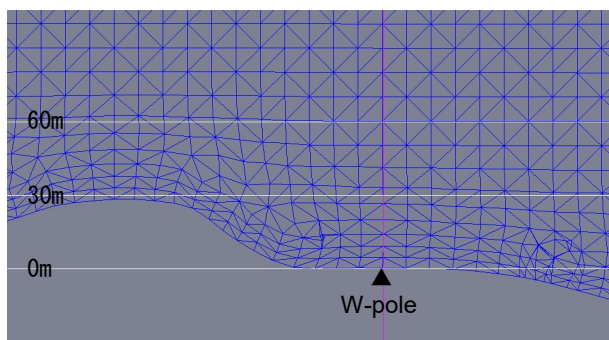
$$F_{u,i} = -\rho C_f A \eta \sqrt{u_j^2} u_i \quad [2]$$

F : 抗力, ρ : 空気密度, μ : 動粘性係数, P : 圧力
 u : 流速, t : 時刻, x : 座標

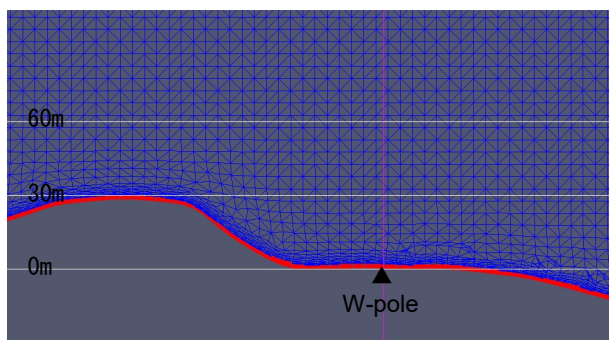
C_f : 抗力係数, A : 葉面積密度, η : 緑被率

5.2 格子解像度

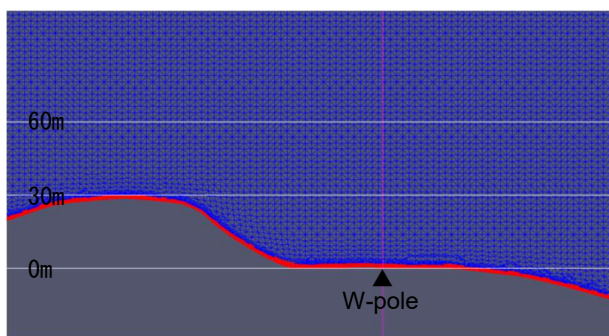
図-10 にそれぞれの地表面境界条件に応じて用いた風観測点 W-pole 近傍の計算格子を示す。図の左側が風上となっており、北北西の風向に対しては W-pole は高さ約 30m の小さな尾根の風下になっている。図中の▲は観測ポールの位置を表し、数値は観測ポールが立っている場所からの高さを表す。対数則用に作成した格子はポール周りの水平方向の格子幅が約 10m であるが、キャノピーモデル用には 5m 格子幅 (キャノピー用①) としたもの、さらに細かく 2.5m 格子幅 (キャノピー用②) としたものを生成した。また、キャノピーモデルの場合には地表面境界条件を non-slip (地表面で流速 0) とするため、最下層の格子を地表面鉛直方向に 3 分割している。キャノピーモデル用格子の床面近傍の色を変えている部分がキャノピー層であり、今回の計算では層厚を 2m としている。



(a) z_0 型対数則用格子 (z_0 土地利用)

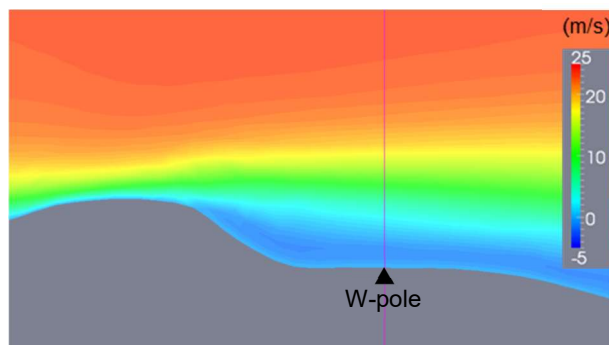


(b) キャノピーモデル①用格子

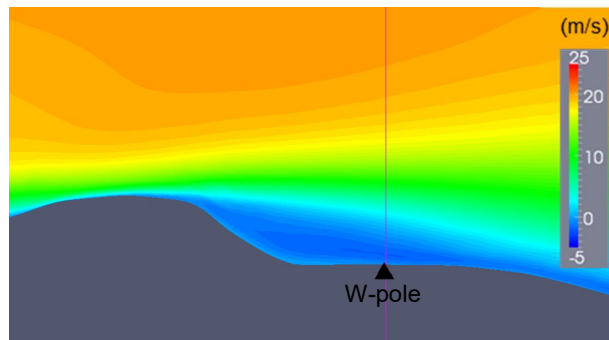


(c) キャノピーモデル②用格子

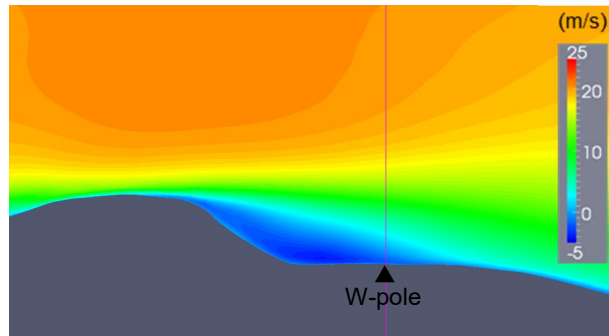
図-10 地表面境界条件に応じた格子の状況



(a) z_0 型対数則用格子



(b) キャノピーモデル①用格子



(c) キャノピーモデル②用格子

図-11 平均風速分布の比較

5.3 剥離性状の比較

図-11 に風上の尾根の剥離の影響を受けやすい W-pole 近傍（図-10 に示した格子に対応）の主流方向平均風速のコンターを、 z_0 対数則、キャノピーモデル①、キャノピーモデル②について示す。流れの状況は、剥離に伴う低風速領域が、キャノピーモデルを用いて格子解像度を上げたものほど地表面に近づいている。 z_0 対数則とキャノピーモデル①では、W-pole の後方を剥離流が超えているが、解像度が最も高いキャノピーモデル②では、W-pole の後方の平坦地で剥離流が再付着している。このように格子解像度によって、剥離に伴う流れの性状が変化することが確認された。

5.4 観測データとの比較

図-12 に計算結果と 3 章で示した観測期間の観測データの平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルの比較を示す。図中には 4 章とキャノピーモデルの結果について示す。

平均風速については水平方向のスカラー風速を観測ポール最上部（高さ 58m）のスカラー風速で基準化した値としている。

E-pole では平均・乱れ共にどの結果も実測とほぼ対応している。W-pole では、平均風速はキャノピーモデル②の結果が最も観測結果と対応しているが、これは図-9 に示した剥離流の微妙な位置までが高解像度の格子によって表現されているためだと考えられる。乱れについてもキャノピーモデル②の結果が実測に最も近いが、値としてはやや大きくなっている。この原因については、今後検討が必要である。どの結果を見ても滑面对数則を用いた場合のみ下部の剥離領域において著しく異なった傾向となっている。山岳地のような複雑地形が続くような場合にも剥離の現象をとらえるためには、地表面状況の再現が重要であると考えられる。キャノピーモデルを用いた場合には、格子解像度が粗いものは、粗面用 z_0 型対数則と同等の結果であり、粗面用 z_0 型対数則とキャノピー

モデルの粗度効果は同等のものと考えられる。キャノピーモデルは、格子サイズが対数則領域による制限を受けないことから有効な手法であると考えられる。

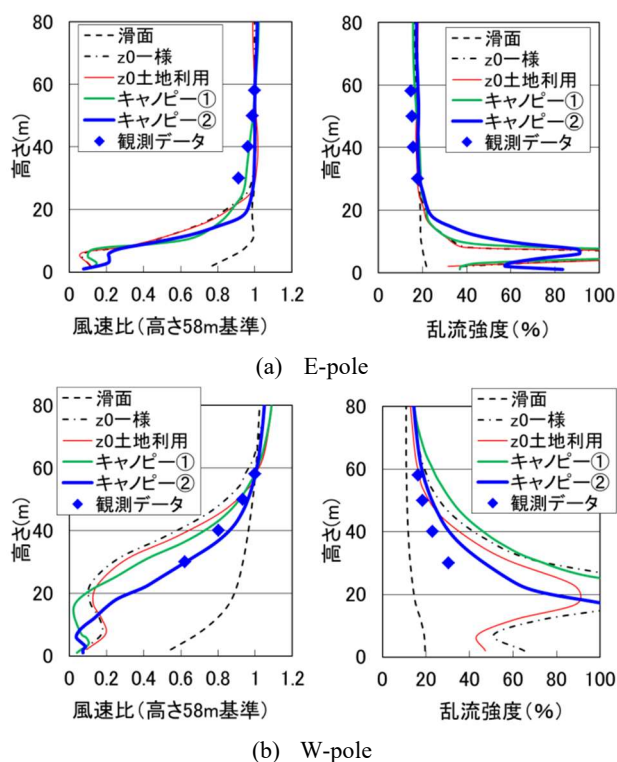


図-12 観測ポールでの実測と計算結果の比較

6. まとめ

複数の観測地点がある実在複雑地形周りの流れの LES を実施し、複雑地形の影響を受ける風を LES によって予測する手法について検討を行った。複雑地形の尾根等からの剥離の性状には地表面の粗度の影響が大きく、粗度効果を取り込まれる境界条件の設定が重要であることが分かった。z0 型対数則とキャノピーモデルを地表面境界条件に導入して比較したところ、同等の粗度効果が得られることが分かったが、キャノピーモデルの方が格子解像度を上げることができるため、剥離等の性状を精度よく再現できることが確認された。今後は、計算領域の設定方法、キャノピーの分布や抗力係数の与え方などについても検討を進めていきたい。

謝辞：本研究は国土交通省の実施する平成 24 年度建築基準整備促進事業の一環として実施している事業のうち「風圧力、耐風設計等に関する基準の合理化に資する検討委員会」の成果の一部である。複雑地形における観測データについては NEDO 次世代風力発電技術開発（基礎・応用技術研究開発）事業より提供を受け、NeWMeK 観測データについては九州電力㈱及び九州大学から提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 京都府資料，太鼓山風力発電所事故について，http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/furyokuhatsuden_setsubi/pdf/004_01_01.pdf
- 2) 株式会社シーテック，ウインドパーク笠取発電所 C K-19 号機風車ナセル脱落事故について（報告書），<http://www.ctechcorp.co.jp/news/pdf/25-6-18.pdf>
- 3) 株式会社ユーラスエナジージャパン：苫前グリーンヒルウインドパーク 11 号風車破損事故報告書，<http://www.eurus-energy.com/common/images/press/uploads/files/131115houkokusyo.pdf>, 2013.11
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)，2004.9
- 5) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（2010 年版），2011.1
- 6) 前田潤滋，石田伸幸：広域高密度風観測システムによる強風分布特性のモニタリング，第 14 回風工学シンポジウム論文集，pp.1-6，1996.12
- 7) Lund, T. S., Wu, X., Squires, K. D.: Generation of turbulent inflow data for spatially developing boundary layer simulation”, Journal of Computational Physics, 140, 233-258. 1998
- 8) Tamura, T., Cao, S., Okuno, A.: LES Study of Turbulent Boundary Layer Over a Smooth and a Rough 2D Hill Model, Flow Turbulence Combust (2007) 79:405–432
- 9) 石原孟：非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化，日本流体力学会誌，第22巻，第2号，pp.387-396，2003