

TSUBAME 共同利用 平成 24 年度 産業利用 成果報告書

利用課題名 オープンソースコードによる風速の地形影響評価に関する LES
英文: LES for effect of topography on wind velocity by open source code

利用課題責任者 中村修
Osamu Nakamura

所属: 風工学研究所
Affiliation: Wind Engineering Institute
URL: <http://www.wei.co.jp/>

近年、計算機資源が充実したことや数値流体解析技術が進歩したことにより、数値流体解析による風速の地形影響評価が実施されるようになってきたが、計算結果の妥当性の評価基準は明確に示されていない。本プロジェクトではオープンソースコードである OpenFOAM により、変動成分まで予測可能な LES で地形の影響を受けた風速の予測を実施する。高精度の観測結果のある実在地形を検討対象として風速の予測を行い、観測結果との比較により予測精度の検討を行った。また、地形による風速の割り増しという観点から代表的な地形を抽出して数値流体解析を実施し、データベースの構築を行った。

In order to evaluate the effect of topography on wind speed, this project performs the prediction of the wind speed by open source code (Open FOAM). We try to predict the wind speed on four different topographies. In comparison with experimental and observational data, predictive value show reasonably good agreement.

Keywords: LES, OpenFOAM, 風速予測, 地形影響評価

背景と目的

建築物の耐風設計を行う際に、地形の影響により設計風速が増速される恐れがある場合には、平成 12 年度建設省告示第 1454 号第 1 第 2 項ただし書きに基づき、風速の割り増しを評価する必要がある。しかしながら、割り増しをどのような数値で見積もるかの具体的な方法は現状では示されていない。最近では、風力発電用風車の支持構造物における耐風設計の実施例において、数値流体計算によって増速の影響を評価する場合が増えてきているが、計算の妥当性の評価基準について明確な情報が示されていないため、今後の数値流体計算技術の使用頻度が高まる傾向を踏まえると、技術的な評価基準の明確化、さらには適切な計算法・計算モデルの具体的な提案が望まれている。

本プロジェクトでは、昨年度に引き続き、近年様々な分野で広く使われるようになってきたオープンソースコードである OpenFOAM を用いて、変動成分まで予測可能な LES により複雑な起伏を有する実在地形を持つ地形上における風速の

予測を行う。質の良い観測結果があるサイトを対象に予測を実施し、数値流体解析手法の適用性について検討を行う。また、地形の割り増しという観点から代表的な地形の抽出・分類を行い、それらの単純化した地形に対して数値流体解析を実施し、データベースを纏める。

概要

地形の影響のある場所に建築物を建てる場合には、建築基準法に基づき地形の影響による風速の割り増しを評価する必要がある。近年、計算機資源が充実したことや数値流体計算技術が進歩したことにより、数値流体解析による風速の地形による影響評価が実施されるようになってきており、その実用化への期待が高まっている。本研究では、フリーソフトである OpenFOAM を用いて変動成分まで予測可能な LES により、図-a に示すように複雑な起伏を有する実在地形を対象として変動成分まで含めた風速の予測を行う。LES は一般的に計算負荷がかなり高くなるが、TSUBAME2 の計算資源を利用することで大規模

な並列化が可能となり、高解像度の解析格子を用いた解析を高速に実行することができる。図-bに示すように、得られた解析結果を観測結果等と比較して予測精度を確認し、適切に風速を予測するための計算モデルの作成や計算条件を示した。



図-a 複雑な起伏を有する実地形

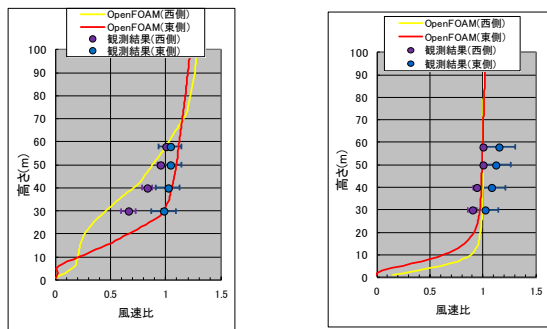


図-b 予測結果と観測結果の比較

結果および考察

1. 実地形を対象とした解析結果の精度検証

本検討では、2か所の高さ約60mの観測鉄塔で高精度な風向・風速の鉛直分布が観測されているサイトを対象として風速の予測を実施し、観測結果と比較してその精度検証を行う。

図-1に対象とした観測サイトを示す。当該地域周辺は谷と尾根が繰り返しているようなかなり起伏に富んだ山岳地形となっている。また、地表面の大部分が森林で覆われている。解析の対象とした風向は図-1に示すように風向 NNW および SW の2風向とした。この場合、上流側の流入境界付近はともに海上となる。

図-2に解析領域の概要を示す。解析領域の大きさは主流方向×主流直角方向×高さ方向=12km×4km×6kmとした。地表面の地形データは国土地理院の数値標高モデル(10mメッシュ)により作成している。図-3に解析格子の概要を示す。上空では格子解像度は粗く設定し、対象領域に近づくに従い格子解像度が細くなるように設定してい

る。水平方向の最小格子解像度は国土地理院の標高メッシュと同等の10m、鉛直方向の最小格子解像度は5mとしている。地表近傍にはヘキサおよびプリズム形状の5層の境界層要素を挿入している。解析空間の総要素数は約760万である。

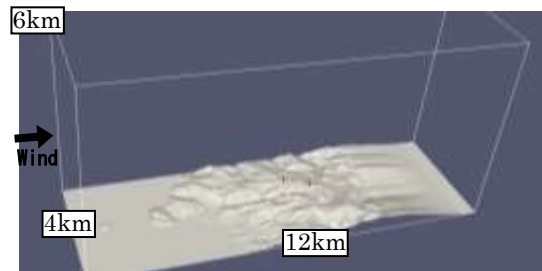
解析のソルバーには近年オープンソースコードとして広く用いられるようになってきたOpenFOAM(Ver1.7.1)とし、乱流モデルにはLESの標準型スマゴリンスキーモデルを用いている。流入境界条件には準周期境界型のLundらの手法により時々刻々変動する流入変動風を設定した。作成した滑面の乱流境界層はべき指数 $\alpha=0.15$ 、境界層厚さ $\delta \approx 600\text{m}$ である。地表面の境界条件については、 z_0 型の粗面対数則を用いることとした。粗度長 z_0 は海上を0.0002m、森林部分を0.8mに設定した。



図-1 解析対象地点の概要



(a) 風向 NNW



(b) 風向 SW

図-2 解析領域の概要

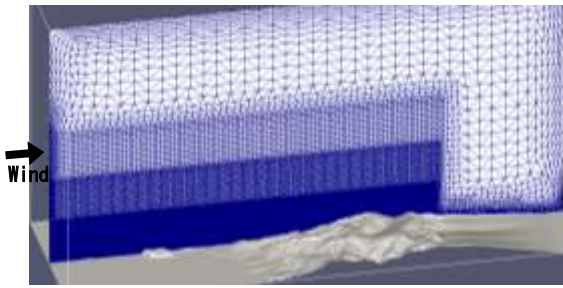
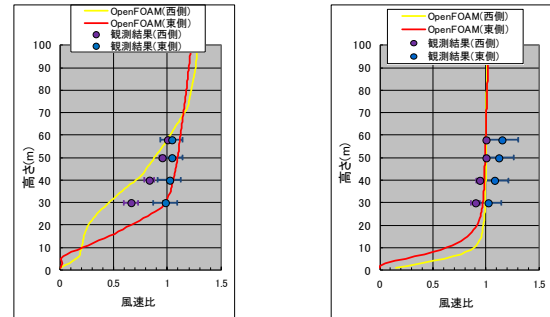


図-3 解析格子の概要(風向 SW)

図-4 に平均風速の鉛直分布の比較を示す。観測記録は両観測点ともに高さ 30m,40m,50m および 58m の計 4 レベルで三杯風速計により観測され、高さ 58m では風向も観測されている。平均風速の風速比は、検討対象とした両風向ともに西側観測点の高さ 58m の風向・風速の観測記録を基準に算出しており、基準点での風速が 5m/s 以上の観測記録により整理を行っている。観測結果の鉛直分布の傾向は風向により異なったものとなり、風向 NNW では鉛直分布の定性的な傾向が異なるのに対し、風向 SW では定性的な分布形状は変わらず東側観測点の方が増速して分布が全体的にシフトする結果となる。

OpenFOAM による解析結果をみると、風向 NNW では、西側観測点の下層部分で観測結果よりやや小さくなるものの、下層で減速する傾向は観測結果と良く対応している。図-5 は風向 NNW における西側観測点周辺の平均流れ場の解析結果であるが、観測鉄塔は前方の地形により剥離した領域にあり、下層では減速することとなる。図-4(b)の風向 SW の解析結果をみると、風速の勾配については両観測点ともに観測結果と同様の結果となるが、風速比の大きさは西側と東側で同程度となり、観測結果とは異なる傾向となる。図-6 は風向 SW における地表面から高さ 58m の平均風速のコンター図である。当該地点の地形の起伏はかなり複雑であり、平均風速の分布はそれに対応し水平方向に対して変化が大きい分布となる。また、図中に赤丸で示す両観測点とともに、地形により増速して周辺よりも風速が大きくなる領域であることがわかる。図中に赤線で示すライン上の風速比を図-7 に示す。地形の起伏によりかなり

大きく風速は変化することが確認でき、場所によっては数十メートル移動するとかなり異なる結果となる。これは解析結果と観測結果を比較する際、正確な位置が特定できない場合には設定する位置により結果が大きく異なることを意味する。



(a) 風向 NNW (b) 風向 SW
図-4 平均風速の鉛直分布の比較 (西側の高さ 58m を基準)

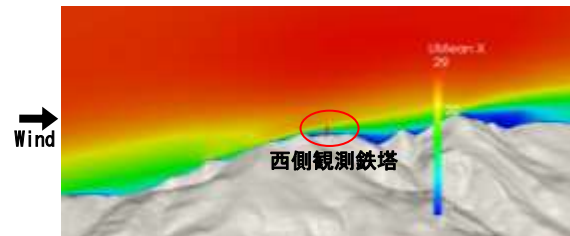
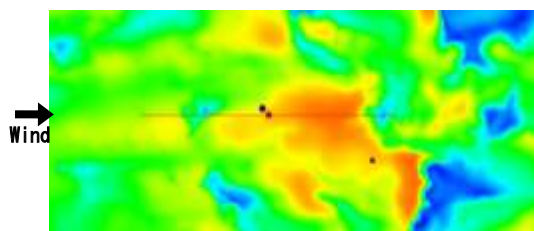


図-5 流下方向成分風速の平均場(風向 NNW: 西側観測点)



(a) 観測点周辺の鳥瞰図



(b) 高さ 58m の平均風速の流れ場
図-6 高さ 58m における平均風速のコンター図 (風向 SW)

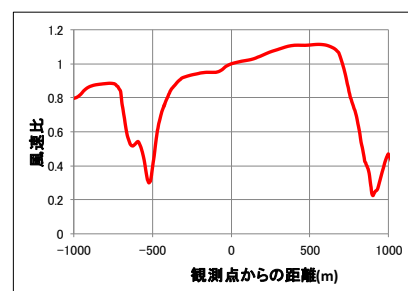


図-7 図-6 のライン上の平均風速の分布

2. 単純化した地形を対象とした風速予測

数値流体計算により単純地形を対象とした風速の割り増しに関するデータベースを作成するには数多くの計算を実施する必要がある。近年、LES による解析が実施されるようになってきたが、精度は高いものの計算負荷が大きいため数多くのパラメータスタディを実施するには現状ではまだ不向きである。本検討ではデータベース作成にあたり、計算負荷の小さい RANS モデルにより計算を実施することとした。標準型の $k-\varepsilon$ モデルはこれまでに様々な分野で使われ実績のある乱流モデルであるが、急峻な傾斜を有する地形で剥離を伴うような流れ場では解析精度を確保することが難しく、こうしたケースではよどみ点において乱流エネルギー k が過剰に生成されるなどの問題点が指摘されている。RANS モデルによりこうした解析を実施するには、乱流モデルや地表境界の処理方法などを改良した計算を実施する必要がある。そこで本検討では、歪みが大きい流れ場を再現できない従来の渦粘性モデルを改良した Shih らの提案する非線形モデルによどみ点での乱流エネルギー k の過剰生成の抑制が期待される Kato-Launder 補正を組み合わせた乱流モデルを用いることとする。解析ソルバーには OpenFOAM (Ver 2.1.1) を用いることとした。

図-8 に 2 次元傾斜地 (傾斜角 60°) の解析結果を示す。流れ場の現象を正確に把握するために、LES でも併せて解析を実施している。(a)の LES の瞬間場をみると、傾斜角の大きい 60° の場合には崖地頂部で流れが剥離し、非定常性の強い複雑な乱流場が形成されている。(b)の LES の平均場をみると、崖地の上部の壁面近傍には循環域が形成されている様子がわかる。(c)の RANS(標準 $k-\varepsilon$)の解析結果は、LES の場合と異なり崖地頂上部分に剥離に伴う循環域が形成されていない。一方、(d)の Shih-KatoLaunder では、循環域が形成されている様子が確認できる。図-9 に LES 解析結果、RANS の Shih-KatoLaunder モデルの解析結果および風洞実験結果の増速率の比較を示す。流下方向成分風速 U の増速率については、剥離を伴う傾斜

角 60° および剥離を伴わない傾斜角 30° の場合ともに解析結果と風洞実験結果はおおよそ対応する結果となる。

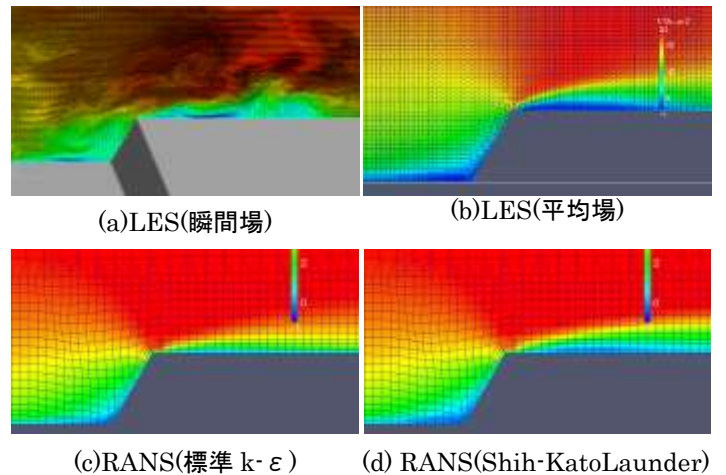


図-8 2次元傾斜地(傾斜角 60°)の解析結果の比較

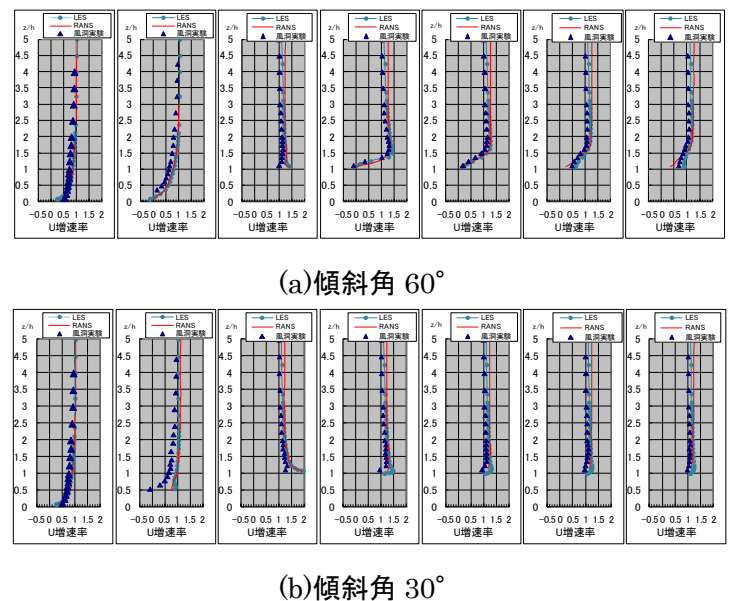
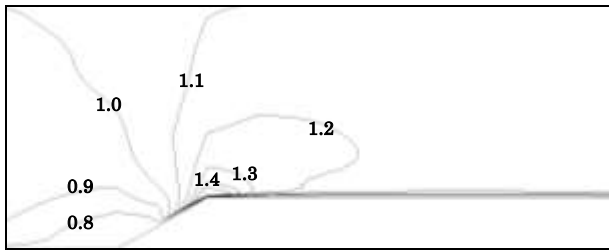
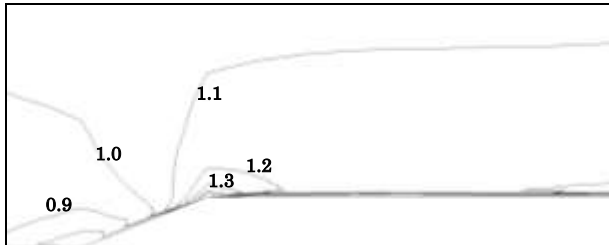


図-9 2次元傾斜地の鉛直分布の比較
(風洞, LES および RANS)

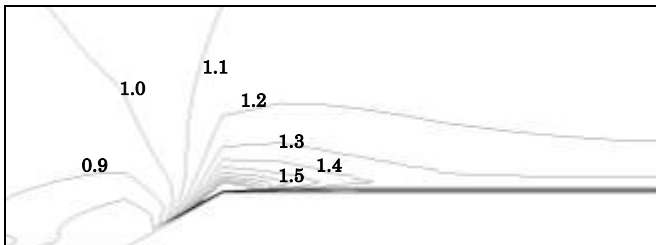
図-10 は数値流体計算により作成したデータベースの 1 例である。風向角の影響をみると、風向が大きくなるにつれて増速率は小さくなる傾向にあり、風向 0° が一番大きい値となる。粗面と滑面を比較すると粗面の増速率の方が大きくなる。粗面の場合には、接近流の低層部の風速がかなり減少するために低層部で大きな増速率になるものと考えられる。



(a) 傾斜角 30° (滑面, 風向 0°)



(b) 傾斜角 30°
(滑面, 風向 45° 流下方向の傾斜角 22.2°)



(c) 傾斜角 30° (粗面, 風向 0°)

図-10 単純地形の増速率のコンター図

に資する検討委員会」の成果の一部である。また、本検討を実施するにあたり、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）事業からデータの提供を受けたものである。ここに謝意を表します。

まとめ、今後の課題

本検討ではオープンソースコードである OpenFOAM を用いて、地形の起伏の影響を受けた風速の予測を変動成分まで予測可能な LES により実施した。高精度の観測結果があるサイトを対象に解析を行い、解析結果を観測結果と比較して、おおよそ良い対応であることを示し、精度良く予測するための適切な計算モデル、計算条件を提示した。また、単純化した地形に対して数値流体解析を実施し、風速の割り増しに関するデータベースの構築を行った。

謝辞

本研究は国土交通省の実施する平成 23・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