

TSUBAME 共同利用 平成 23 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。異なる起伏形態の 4 種類の地形を検討対象として風速の予測を行い、既往の風洞実験結果および観測結果との比較により予測精度の検討を行った。各ケースともに風洞実験結果および観測結果と良い対応となり、本検討で設定した計算モデルや計算条件の妥当性を示した。

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、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 により単純化した地形および複雑な起伏を有する実在地形など様々な形状を持つ地

形上における風速の予測を行った。風洞実験結果や観測結果等との比較により風速予測結果の計算精度を検討し、適切に解析を行うための計算モデルや計算条件を提示した。

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 および図-b に示すように単純化した地形および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-c に示すように、得られた解析結果を風洞実験結果および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。

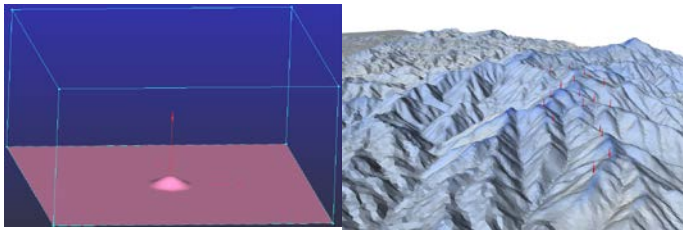
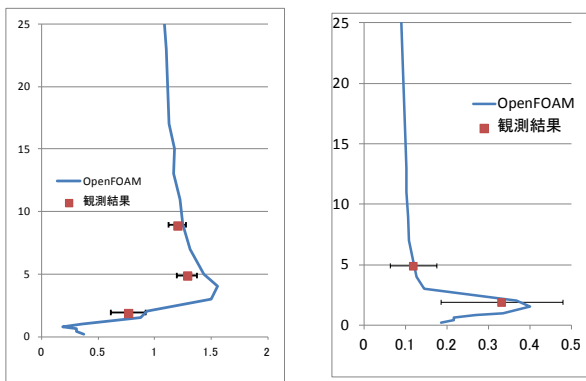


図-a 単純化した地形

図-b 複雑地形



平均風速の比較

乱れ強さの比較

図-c 予測結果と観測結果の比較

結果および考察

1. 単純化した地形

単純化した地形として図-1 に示す 2 次元丘陵地を解析の対象とした。表-1 に解析ケースの概要を示す。解析領域の大きさは主流方向×スパン方向×高さ=30H×30H×15H(H:丘陵地高さ)とした。図-2 に解析格子の表面メッシュ、図-3 に鉛直断面を示す。解析格子は非構造格子により作成しており、図-2 に示す表面メッシュは三角形で構成されている。また、図-3 に示すように、地表近傍には三角柱(プリズム)形状の境界層要素を 3 層配置し、その上空は三角すい(テトラ)形状の格子で構成されている。解析のソルバーには OpenFOAM (Ver1.7.1)を使用した。表-2 に OpenFOAM による解析条件を示す。変動成分まで予測可能な LES により解析を行っている。流入境界条件には別途作成した時々刻々変動する流入変動風を設定している。図-4 に流入境界条件として設定した流入変

動風の鉛直分布と、比較対象とした風洞実験結果を示す。図-5 に山の中心断面における主流方向成分平均風速(U/U_h)および主流方向成分乱れ強さ(σ_u/U_h)の鉛直分布を示す。両分布ともに風洞実験結果と良く対応しており、本検討で設定した計算モデルおよび計算条件で単純化した地形が適切に予測できることがわかる。

表-1 解析ケースの概要

解析領域	要素数	最小解像度		地表境界条件	Re _H (=U _H H/ν)
		鉛直	水平		
30H×30H ×15H	約 650 万	0.05H	0.05H	z ₀ 型対数則 (H/ z ₀ =133)	U _H H/ν ≒ 9000

表-2 OpenFOAM による予測の解析条件の概要

乱流モデル	LES (標準型スモグリンスキーモデル)
離散化手法	有限体積法
流入境界条件	準周期境界条件を用いた LES により別途作成
上面および側面境界	Slip 条件
流出境界条件	ノイマン型
地表面境界条件	z ₀ 型対数則 (滑面:H/ z ₀ =4000, 粗面:H/ z ₀ =133)
移流項のスキーム	2 次精度中心差分

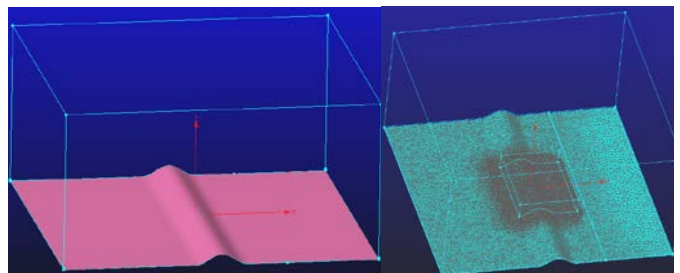


図-1 計算モデル

図-2 表面メッシュ

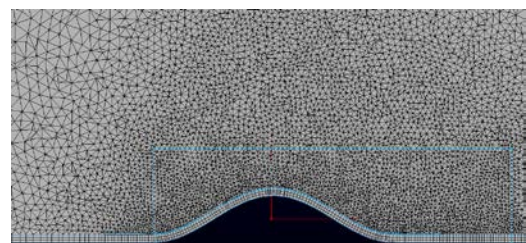


図-3 解析格子の鉛直断面

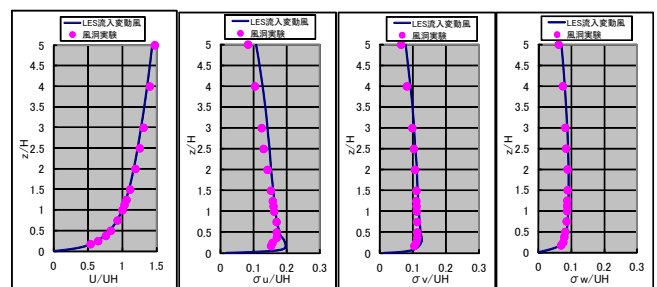
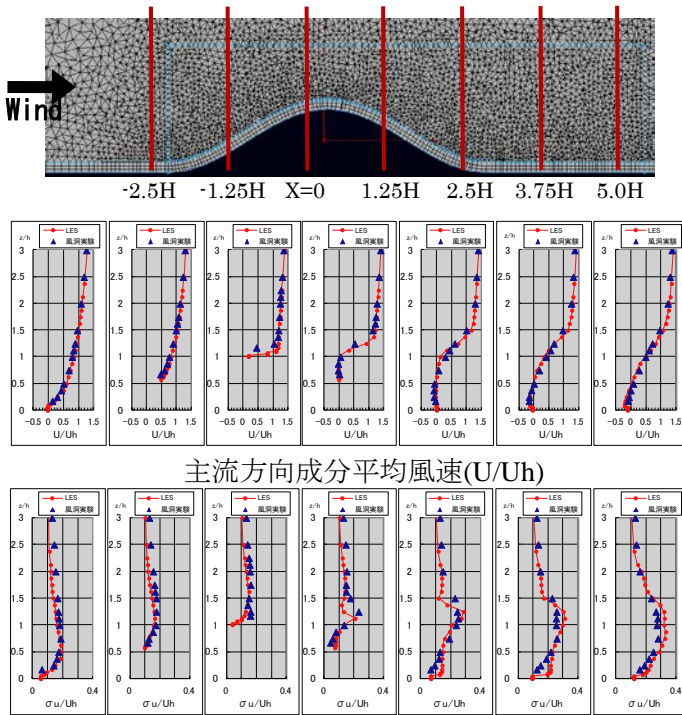


図-4 流入変動風の鉛直分布



主流方向成分平均風速(U/U_h)
主流方向成分乱れ強さ($\sigma u/U_h$)
図-5 山の中心断面における鉛直分布の比較

2. 実在地形

実在地形の解析例として図-6 に示す Bolund を解析の対象とした。このサイトは海上にある規模の小さな島であり、島の西側には急峻な崖がある。島の大きさは東西方向約 250m、南北方向約 150m であり、海面からの最高高さは約 11m である。図-7 に解析格子を示す。非構造格子で構成しており、要素数は約 940 万である。地表近傍には 5 層の境界層要素を挿入しており、急峻な崖の部分においても境界層要素が配置されていることがわかる。図-8 は高さ 2m における平均風速の解析結果と観測結果の比較である。OpenFOAM による解析結果は崖の頂上の剥離領域や後流の減速領域などの特徴を捉えられており、観測結果と良く対応していることがわかる。



図-6 実在地形 (Bolund) の概要

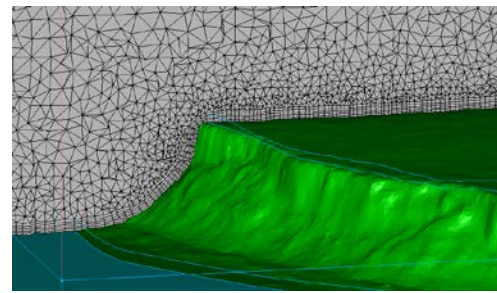


図-7 Bolund の解析格子

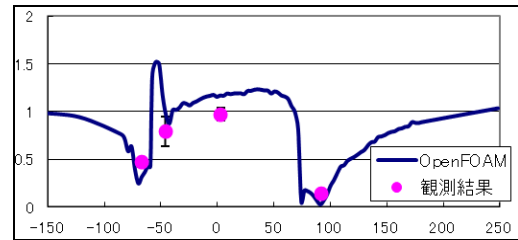


図-8 平均風速の水平分布の比較 (高さ 2m)

次に、複雑な起伏を有する実在地形の例として、図-9 の竜飛崎の例を示す。本サイトでは海岸線より急激に立ち上がった半島上にウインドファームがある。地形の起伏の再現には国土地理院の数値標高モデル (10m メッシュ) を用いている。図-10 に解析格子を示す。要素数は約 1040 万であり、地表近傍には 5 層の境界層要素を挿入している。図-11 にウインドファーム周辺の瞬間風速分布を示す。海上からの流れがウインドファームのある半島に直接的に流入している様子が見られる。半島の尾根では風速が増速しており、後流側では風速が減速している様子が見られる。図-12 に予測結果と観測結果との比較を示す。水平方向成分風速 U はおおよそ観測結果と対応している。海岸線から急峻に立ち上がった地形を対象とした場合も精度良く予測できることがわかる。

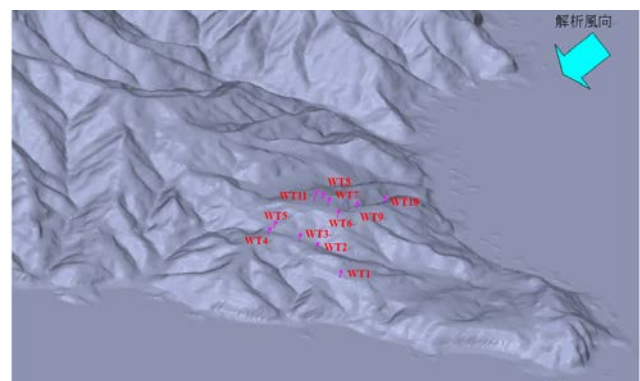


図-9 竜飛崎の概要

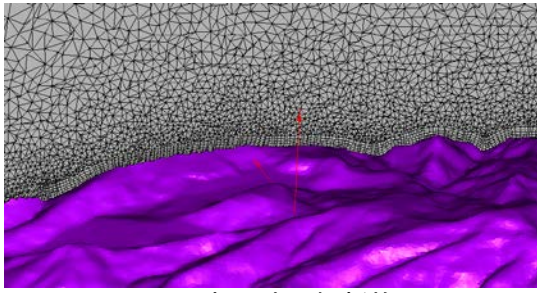


図-10 竜飛崎の解析格子

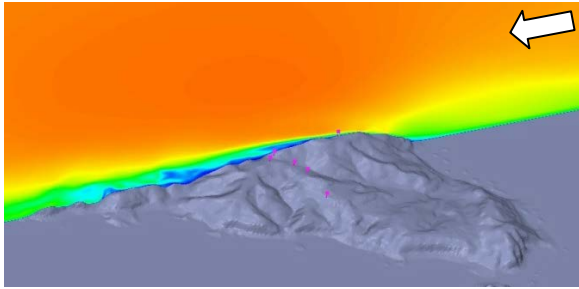


図-11 ウィンドパーク周辺の瞬間風速分布

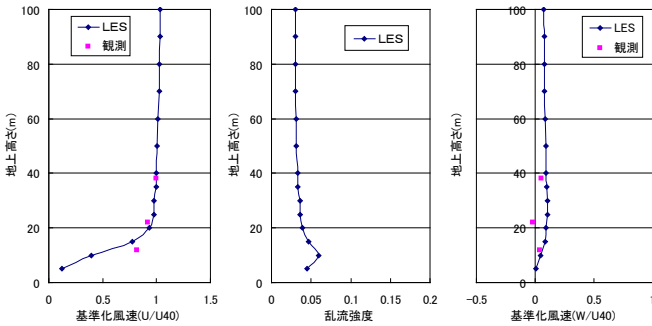


図-12 予測結果と観測結果との比較

最後に、図-13 に白滝山にあるウィンドファームの例を示す。このサイトの予測対象地点は、海岸線より 10km 程度内陸の複雑な起伏の地形が連なる場所に位置している。標高約 400m~600m の山間部に位置する尾根上に 20 基の風車が配置されている。図-14 に解析格子を示す。地表面には境界層セルを 3 層挿入しており、要素数は約 1000 万セルとなっている。図-15 に水平断面における瞬間風速コンター図 (高さ 600m) を示す。起伏の複雑な地形上を長い距離に亘り吹走して乱れた流れがウィンドファーム近傍の尾根へと到達している様子がわかる。また、尾根の後流域には風速の減速した領域があることがわかる。図 16 に平均風速および乱れ強さの予測結果と観測結果の比較を示す。観測点 No11 は他の観測点と比較して平均風速は小さく、乱れ強さは大きい観測点であるが、そのような傾向も予測できていることがわかる。本検討の計算モデルおよび解析条件

で、複雑な地形が連なった実在地形においても、平均風速、乱れ強さともにおおよそ観測結果と良く対応していることがわかる。

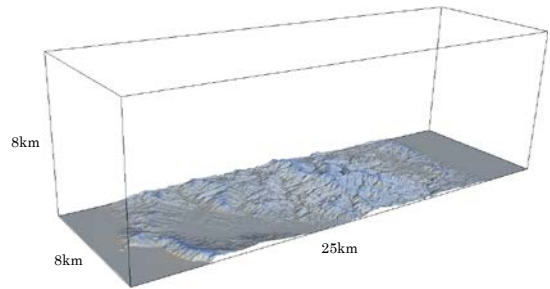


図-13 白滝山の解析領域



図-14 解析格子

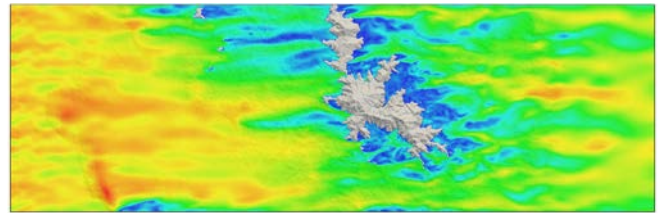


図-15 瞬間風速コンター図(水平断面, 高さ 600m)

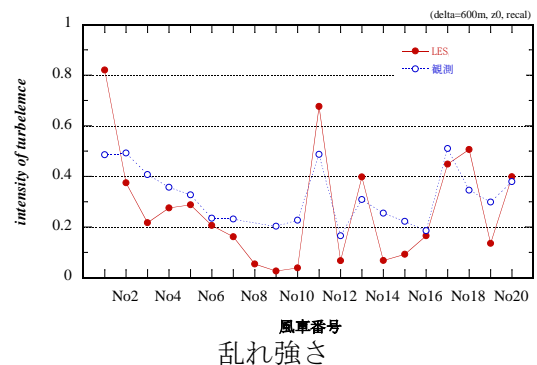
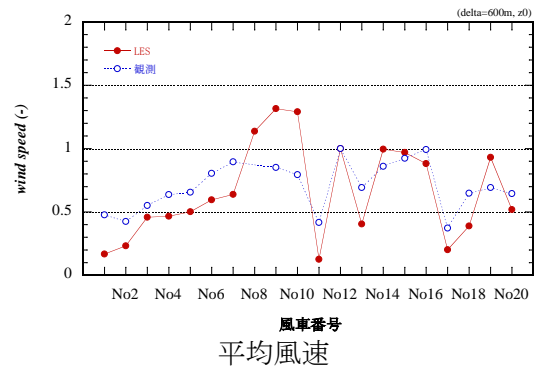


図-16 予測結果と観測結果の比較

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。地表面の起伏の形態の異なる 4 サイト(単純化した地形, Bolund, 竜飛崎, 白滝)を対象に解析した。解析結果をそれぞれ風洞実験結果および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。

しかし、本プロジェクトで設定した解析条件が必ずしもバランスの取れた条件となっているかは判定されてはおらず、計算条件と計算精度の関連性については、まだ検討の余地がある。今後は、格子解像度、乱流モデル、地表面境界条件などの計算条件を整理することで、精度確保のための必要最小限の計算条件について吟味する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は国土交通省の実施する平成 23 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(地形影響評価 WG)」の成果の一部である。また、本検討を実施するにあたり観測データのご提供をいただいた株式会社きんでん様に謝意を表します。