特集

地形の影響を受けた風に対する CFD の適用性

地形の影響を受ける風における CFD 技術の確立に向けて For Establishment of CFD Technology on Terrain Affected Wind

岸田 岳士^{*1} 佐々木 亮治^{*1} 田村 哲郎^{*2}

Takeshi KISHIDA, Ryoji SASAKI, Tetsuro TAMURA

本章では、建築基準整備促進事業で実施された、以下の項目について報告するものとする。

- 1) 風速の地形による影響評価のための数値流体計算のベンチマークテストの提示
- 2) 風速の地形による影響評価のための適切な数値流体計算方法および計算条件の整備
- 3) 地形による風速の割増評価について代表的な地形の抽出、分類、および数値流体計算の実施、さらにはデータベースの構築

ここで得られた情報は、今後に向けて、CFD 技術が地形の影響を受けた風の推定に対して適切に活用されることが期待される。現在、すでに CFD 技術を保有する場合、地形を対象とする場合には、どのような計算方法を選択し、計算条件を設定すればよいかを判断するために用いられる。また、保有コードにより地形の問題に対して風速の特性が適切に推定されるかのベンチマークテストの方法も提示される。さらには、代表的な基本形状の地形における風の特性の変化をデータベースとして、まとめることとする。次章において、実地形を与えられたときのデータベースの活用方法について検討する。

なお、ここでの成果の課題として、計算条件については、ほぼ妥当な解が得られるためのデータが示されているが、これより解像度が粗い、より計算負荷が小さい計算条件

での解の再現性については、吟味されている訳ではなく、計算する上でのミニマムの要求条件が示されている訳ではない。また、ベンチマーク方法についても実際に存在する地形の影響は多種多様であることを踏まえると、三次元的な流れの回り込みに対する吟味も重要となるが、ここでは、比較的二次元性が顕著な形態の尾根上のもので、剥離の有無を中心に検討する参照データが提供されている。まずはこの段階でのコードチェックの実行を期待したい。また、今後の複雑地形での風観測の充実を切に希望するものである。さらにデータベースとしても地形の多様性を考えると、一部の形態について示されているだけである。ただし、それでもこのデータを用いた実地形での風速割増の評価方法については、先に述べたように次章で提案されている。データベースの充実については、今後の研究成果の蓄積を待ちたい。

1. 計算モデル・計算条件の設定方法

(岸田 岳士)

前章の計算事例を踏まえて、ここでは実地形周りの風の計算を適切に行うための計算モデル・計算条件の設定方法について纏める。前章で実施した解析条件の一覧を表-1に示す。

*1 ㈱風工学研究所

Wind Engineering Institute Co., Ltd.

*2 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻 教授

Professor, Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

表 1 実在地形周りの流れを対象とした解析の計算条件の一覧

該当する項目		前章 2.3		前章 2.2		前章 2.4					
手法		LES(自作)		LES(オープンソースコード)		LES(オープンソースコード)					
対象地形		いちき串木野		いちき串木野		白滝					
格子系		構造(一般座標)		非構造		非構造					
境界層要素 層数		—		5 層		3 層					
解析領域	風方向	20km(33.3h)		20km(33.3h)		25km(41.7h)					
	風直角	5km(8.3h)		4km(6.7h)		8km(13.3h)					
	鉛直	6km(10h)		10km(16.7h)		8km(13.3h)					
地形の最高高さ h		約 600m		約 600m		約 600m					
要素数		約 804 万 (600×200×67)		約 1440 万	約 2320 万	約 1000 万					
最小解像度	風方向	7.2m		10m	2.5m	20m	10m				
	風直角	7.9m		10m	2.5m	20m	10m				
	鉛直	0.04m		5m	0.2m	5m	5m				
地表面境界条件		キャノピーモデル		滑面 対数則	粗面 対数則	キャノピー モデル	滑面 対数則	粗面 対数則	滑面 対数則	粗面 対数則	
レイノルズ数				6.7×10 ⁵		6.7×10 ⁵		4.5×10 ⁵		4.5×10 ⁵	
流入境界条件		片岡の方法+粗面吹走		滑面 Lund	粗面 Lund	滑面 Lund	粗面 Lund	滑面 Lund	粗面 Lund	滑面 Lund	粗面 Lund
流入の境界層厚さ				600m	800m	600m	800m	600m	800m	600m	800m
乱流モデル		ダイナミックスマゴリンスキー		標準スマゴリンスキー				標準スマゴリンスキー			

【解析領域の大きさの設定】

- ・水平方向の解析領域の大きさは、対象領域（ウィンドファームなど）の大きさにより変化することとなる。対象領域と側面境界との距離は、壁面効果が小さくなるように広めに設定する、あるいは緩衝領域を設定するなどの方法が考えられる。
- ・鉛直方向の解析領域の大きさは閉塞率を考慮して設定することとなり、5%以下に設定することが望ましい²⁾。

【地形データ】

- ・対象とする地形の起伏形態に応じて地形データの水平方向解像度を選択する必要がある。国土地理院では水平方向 10m 間隔の地形データが日本のほぼ全域で整備され、誰もが使用可能な状況にある。また、水平方向 5m 間隔のデータに関しても整備されつつある状況である。

【メッシュ形状】

- ・地表面境界条件にキャノピーモデルを使用する場合には、キャノピーを設定する部分に対し鉛直方向にある一定以上メッシュ分割をする必要があるため、地表近傍での鉛直方向の格子を細かくする必要がある。
- ・非構造格子を用いる場合、急峻な地形に対しては、地表面に境界層セルを 3～5 層程度挿入し、境界層セルは

ブリズムメッシュ、その上部はテトラメッシュとすることが有効である。

【地表面境界条件】

- ・実在地形を対象とした予測を実施する場合には、地表面境界条件として z_0 型の粗面对数則やキャノピーモデルなどの地表粗度を考慮した境界条件を設定する必要がある。

【土地利用データ】

- ・対象地点周辺で粗度が変化する場合には、解析に使用する土地利用データの解像度や粗度高さを考慮することが有効である。

参考文献

- 1) 建築物の耐風設計のための流体計算ガイドブック, 日本建築学会, 2005, p90
- 2) 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 2008, p97

2. CFD 検証のためのベンチマークの提案

(佐々木亮治)

2. 1 ベンチマークテスト比較用データ

実在地形における CFD 検証用のベンチマークテストとして、以下の 2 つの地形を選定した。

- ・鹿児島県いちき串木野
- ・山口県白滝山

なお、ベンチマークテストにおける比較用のデータとしては、以下の3種類の図を用意した。

①平均風速コンター図

解析領域における平面的な風速分布の傾向を全体的に把握することを目的とする。また、2種類の高さのコンター図（地表面高さ 60m と 30m）を用意することで、鉛直方向における増速および減速の全体的な傾向も確認できる。

②断面位置での地形と風速比

ある鉛直断面における地形（標高）と平均風速の関係を把握することを目的とする。また、地形形状の変化に応じた増速および減速の全体的な傾向を確認する。

③断面位置での風速の鉛直分布

ある鉛直断面における風速の鉛直分布の関係を把握することを目的とする。上記②の断面において、増速や減速の傾向がよく表れている地点を対象に、地形形状の変化に応じた風速の鉛直分布を確認する。

2. 2 ベンチマークテスト1 鹿児島県いちき串木野

(1) 解析条件

解析対象は、鹿児島県いちき串木野地区とする。解析結果の検証用となる2か所の観測点を図1に、観測点の緯度経度および標高を表1に示す。解析風向は、図1に示す風向 NNW および風向 SW の2風向とする。両風向とも、海側から観測点に向けて徐々に標高が高くなる地形である。また、図2に示す航空写真から分かるように、本解析領域の陸地部分は、ほぼ森林である。従って、解析時においては、この状況を適切に地表面粗度に反映させることが必要である。

図1 解析風向

表1 ベンチマークテスト1の観測点概要

観測地点名	西側観測点	東側観測点
緯度(北緯)	31 度 46 分 37.3 秒	31 度 46 分 46.0 秒
経度(東経)	130 度 13 分 1.7 秒	130 度 13 分 32.8 秒
標高(m)	339	433

図2 解析領域の航空写真

(2) 比較用データ

風向 NNW と風向 SW における比較用の解析結果の図と、比較する際のポイントを以下に示す。ここでは、比較用データとして、「LES（オープンソースコード）-OpenFOAM」および「LES（自作）+メソ気象モデル WRF」の解析結果を用いている。

①平均風速コンター図

地表面高さ 60m と 30m の平均風速コンター図を図3に示す。(a)と(b)は風向 NNW, (c)と(d)は風向 SW における結果である。これらの図を用いて、平面的な平均風速分布の傾向（増速領域および減速領域）を確認する。

風向 NNW においては、両観測点の風上側に増速域が、風下側に減速域が見られる。また風向 SW では、両観測点は増速域に含まれている。

②断面位置での標高と風速比

風向 NNW では西側観測点を含む断面、風向 SW では東側観測点を含む断面における標高と地表面高さ 60m と 30m の風速比を図4に示す。なお、断面はそれぞれの風向に沿っており、それぞれの観測点位置を流化方向距離 $X=0m$ としている。断面位置を図3に合わせて示す。また風速比は境界層高さにおける風速で無次元化している。風向 SW では観測点に向かって徐々に標高が高くなっているが、風向 NNW では観測点の風上側 1200m あたりに谷状の地形が見られる。

両風向とも、尾根付近では風速比が増加しており、尾根の背後の標高が低い部分では風速比が減少している傾向が確認できる。また、地表面高さ 30m の方が高さ 60m よりも地形に応じた風速比の変化の幅が大きく示されている。

(a) 地表面高さ 60m, 風向 NNW

(b) 地表面高さ 30m, 風向 NNW

(c) 地表面高さ 60m, 風向 SW

(d) 地表面高さ 30m, 風向 SW

図3 平均風速コンター図

(LES (オープンソースコード) -OpenFOAM)

(a) 風向 NNW, 標高

(b) 風向 NNW, 地表面高さ 60m

(c) 風向 NNW, 地表面高さ 30m

(d) 風向 SW, 標高

(e) 風向 SW, 地表面高さ 60m

(f) 風向 SW, 地表面高さ 30m

図4 断面位置での標高と風速比

図 5 断面位置での鉛直プロファイル

③断面位置での標高と風速の鉛直分布

図 4 に示した断面において、増速域と減速域における風速の鉛直分布を確認する。鉛直分布を求めた位置は、風向 NNW では図 3(b)および図 4(b)(c)に示す $X=-400\text{m}$ と $X=700\text{m}$ 、風向 SW では図 3(d)および図 4(e)(f)に示す $X=250\text{m}$ と $X=600\text{m}$ とし、各位置における風速比の鉛直分布を図 5 に示す。

図 5(a)および(c)に示すような標高が徐々に上がっている尾根付近では地表面近傍まで増速傾向にあり、図 5(b)および(d)に示すような尾根の背後の標高が低い部分では地表面近傍で減速傾向にある。

2. 3 ベンチマークテスト 2 山口県白滝山

(1) 解析条件

解析対象は、図 6 に示す山口県白滝山地区とする。解析結果の検証用となる観測点位置を図 6 に、観測点の緯度経度および標高を表 2 に示す。観測点は尾根上に位置している。解析風向は、図 6 に示す風向 NE とする。この風向においては、海岸線より入りこんで観測点に向けて徐々に地形が複雑化している。

図 6 白滝山地区 (地図出典：プロアトラス SV5)

表 2 ベンチマークテスト 2 の観測点概要

緯度(北緯)	34 度 18 分 14.5 秒
経度(東経)	131 度 0 分 53.7 秒
標高(m)	580

(2) 比較用データ

風向 NE における比較用の解析結果の図と、比較する際のポイントを以下に示す。なお、比較用データとしては、すべて「LES (オープンソースコード) -OpenFOAM」の解析結果を用いている。

①平均風速コンター図

地表面高さ 60m と 30m の平均風速コンター図を図 7 に示す。これらの図を用いて、平面的な平均風速分布の傾向(増速領域および減速領域)を確認する。尾根上の観測点は増速域に含まれている。

②断面位置での標高と風速比

観測点を含む断面における標高と地表面高さ 60m と 30m の風速比を図 8 に示す。なお、断面は風向に沿っており、観測点位置を流化方向距離 $X=0\text{m}$ としている。断面位置を図 7 に合わせて示す。また風速比は境界層高さにおける風速で無次元化している。観測点の風上側 1200m あたりに谷状の地形が見られるが、その後は尾根上の観測点まで徐々に標高が高くなっている。

ベンチマークテスト 1 と同様に、尾根付近では風速比が増加しており、尾根の背後の標高が低い部分では風速比が減少している傾向が確認できる。また $X=-450\text{m}$ および $X=-170\text{m}$ あたりの位置に若干標高が低い部分が見られる。この領域において、図 7(b)に示す地表面高さ 60m では風速比の変化の幅が小さいが、図 7(c)に示す地表面高さ 30m では地形の影響をより大きく受けて風速比の変化の幅が大きく表れていることが分かる。

③断面位置での標高と風速の鉛直分布

図7に示した断面において、増速域と減速域における風速の鉛直分布を確認する。鉛直分布を求めた位置は、図7(a)に示す $X=-1037\text{m}$ と $X=3\text{m}$ とし、各位置における風速比の鉛直分布を図9に示す。

ベンチマークテスト1と同様に、図9(b)に示すような標高が徐々に上がっている尾根付近では地表面近傍まで増速傾向にあり、図9(a)に示すような尾根の背後の標高が低い部分では地表面近傍で減速傾向にある。

(a) 地表面高さ 60m

(b) 地表面高さ 30m

図7 平均風速コンター図

(a) 風向 NE, 標高

(b) 風向 NE, 地表面高さ 60m

(c) 風向 NE, 地表面高さ 30m

図8 断面位置での標高と風速比

(a) 風向 NNW, $X=-1037\text{m}$

(b) 風向 NNW, $X=3\text{m}$

図9 断面位置での鉛直プロファイル

3. 地形の影響を受けた風のデータベース

(岸田岳士)

建築物が地形の影響を受けて風が増速するような場所に建てられる場合には風速の割り増しを何らかの方法で考慮する必要がある。建築物荷重指針・同解説¹⁾では、2次元の傾斜地および尾根状地形を対象に平均および変動風速の割り増しに関する資料が纏められている。耐風設計を実施する設計者は、対象とする地形の起伏形態を考慮して纏められたデータから近い形状を選択して評価を実施することとなる。この荷重指針に纏められた資料は滑面の状態で実施した風洞実験に基づいたものであり、風向については傾斜地や尾根状地形に直角に風が当たる場合の実験結果である。一方、検討対象となる実在地形の地表面の被覆形態は樹木が生い茂っていることもあり、その場合には地表近傍における風は樹木による粗度効果を受けたものとなる。また、地形に対して必ずしも風が直角に当たるとは限らないため、風が地形に対し風向角を持って流入するような場合も考慮に入れておく必要がある。地形の影響を受けた風のデータベースを構築するうえで、こうした地表面の粗滑や風向角の影響も考慮することが重要である。

そこで本報では異なる地表面粗度、風向角を有する単純地形を対象にCFDにより風速の予測を実施し、地表面の粗滑および風向角が風に与える影響について検討を実施する。そのうえで、CFD解析結果に基づき地形の影響を受けた風のデータベースの構築を行う。

3. 1 単純地形周りのCFD解析結果の検討

(1) LESによる3次元孤立峰周りの解析²⁾

地形上の風を対象としたCFD解析の有効性を確認するために、図1に示す皿³⁾が風洞実験を実施した3次元孤立峰を対象にLESを実施し検証を行う。解析領域の大きさは流下方向×スパン方向×高さ方向=30H×30H×15Hとした。解析格子は非構造格子のメッシュであるNUMECA社のHEXPRESS/Hybridにより作成した。図2は表面メッシュで平坦な部分は四角形で、丘陵地の部分は三角形と四角形で構成されている。図3に示すように大部分の解析格子は6面体(ヘキサ)で構成され、地表面に近づくほど倍ずつ格子は細くなるように設定している。また、地表近傍には3層の境界層要素を挿入している。

解析のソルバーにはオープンソースコードであるOpenFOAM(Ver1.7.1)を用いた。表1に解析条件の一覧を示す。乱流モデルは標準型のスマゴリンスキーモデルと

し、地表面境界条件は滑面型および粗面型の対数則とした。流入境界条件については準周期境界条件を用いたLESにより別途作成して設定している。図4に設定した流入風の鉛直分布を比較対象とした風洞実験結果とともに示す。縦軸は丘陵地高さH、横軸は丘陵地高さHでの風速 U_H で無次元化している。風洞実験結果と比較すると平均、変動成分ともにかなり良く一致していることが確認できる。

図1 解析領域の概要

図2 表面メッシュ

図3 解析格子の概要

表1 解析条件

乱流モデル	LES (標準型スマゴリンスキーモデル)
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、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	滑面对数則 Z_0 型対数則
移流項のスキーム	2次精度中心差分

(a)滑面

(b)粗面

図4 流入風の鉛直分布

図5および図6は丘陵地の中心断面における流れ方向平均風速 U および流れ方向変動風速 σ_u/U_H の鉛直分布であり、図5は滑面、図6は粗面の場合の結果である。平均風速については滑面および粗面ともに風洞実験結果と概ね良く一致している。丘陵地の後流に形成される循環域の大きさは粗面のほうが大きくなるがLESの解析結果でも良く再現されている。変動成分については粗面の $H=1.25H$ の地表近傍で異なっているものの、風洞実験結果と概ねよく対応する分布となっている。

図5 平均および変動風速の鉛直分布の比較(滑面)

図6 平均および変動風速の鉛直分布の比較(粗面)

(2) 粗度効果を考慮した2次元傾斜地周りの解析²⁾

前節では3次元孤立峰の解析を実施しOpenFOAMによるLES解析モデルの有効性を示した。本節では、その解析モデルを2次元傾斜地モデルに適用して検討を行う。検討ケースは表2に示すように傾斜角は 15° と 30° の2

通り、地表面粗度は滑面と粗面の2通りで計4ケースの検討を実施した。流入境界条件などの解析条件の設定や格子生成法については2.1節と同様の方法とした。

表2 2次元傾斜地を対象とした検討ケース

	傾斜角	地表面粗度
Case-1	15°	滑面
Case-2	15°	粗面
Case-3	30°	滑面
Case-4	30°	粗面

図7に傾斜角 15° 、図8に傾斜角 30° の流下方向成分の平均風速 U のコンター図を示す。風速値はそれぞれ、傾斜地の影響を受けていない上流側の傾斜地高さ H の風速 U_H で無次元化されている。図7の傾斜角 15° では、滑面・粗面ともに傾斜地頂上近傍の領域で風速が大きくなるのは同様の傾向であり、傾斜地の上部では、Case-2の粗面のほうが地表近傍の減速領域の層がやや厚くなっているのがわかる。なお、Case-2の粗面の場合には傾斜地頂上部より下流での減速領域が滑面より大きいものの逆流域は形成していない。図8の傾斜角 30° の場合には、頂部近傍の領域で風速が強くなることや滑面より粗面のほうが丘陵地上部の地表近傍の風速の減速領域の層が厚いことは同様の傾向となるが、Case-4の粗面の場合には傾斜地の頂部から後流側に逆流領域がみられ、流れが丘陵地頂部で剥離している様子がわかる。傾斜角の違いに着目すると、傾斜角が 30° のほうが 15° の場合よりも傾斜地上部の増速領域では風速が大きくなるのがわかる。また、滑面の場合(Case-1とCase-3)では傾斜頂部より下流側の風速分布は、減速領域の厚さなどほとんど差が見られないが、粗面の場合(Case-2とCase-4)ではCase-4では剥離を伴うために異なる流況となり、Case-4のほうが地表近傍の風速の減速領域の厚みが大きくなっている様子がわかる。

図9は傾斜角 15° の場合の風速の増速率の鉛直分布の比較である。地表面の傾斜の影響により流れが収束して風速が増速することになり、丘陵地の頂部で滑面および粗面ともに増速率は最も大きくなる。また、増速率は粗面の方が滑面よりも大きくなっている。 $X/H=1$ よりも下流側に着目すると、粗面の場合には高さ $z/h=1.2$ あたりに増速率のピークがみられる。これは、図7で示したように、粗面では地表近傍で風速の減速領域が厚くなっており、粗面の場合には滑面よりも上層で流れが収束することになることから、その部分で風速の増速率が大きくなっていると考えられる。図10の傾斜角 30° の場合にも

似た傾向となっており、流れが剥離している $X/H=1$ および $X/H=2$ の地表近傍では増速率が小さくなるが、その減速部分の上部では粗面の増速率の方が大きくなっている。傾斜角の違いに着目すると、頂上部付近($X/H=0$)では傾斜角の大きいほうが増速率は大きくなる。図 11 に粗面の増速率と滑面の増速率の比を示す。滑面よりも粗面のほうが増速率が大きくなることが確認できる。 $X/H=1$ に着目すると傾斜角の違いにより異なる傾向となるが、傾斜角 30° の場合には滑面では $z/H \approx 1.1$ 、粗面の場合には $z/H \approx 1.3$ より上空では滑面より粗面の方が増速率の比が大きくなることになる。これは、対象とする建築物の大きさと地形の大きさとの関係により影響範囲は変化することになるが、これまでは考慮されていなかった粗面の方が滑面よりも増速率が大きくなる場合があることを示している。

(a)滑面(Case-1)

(b)粗面(Case-2)

図 7 平均風速のコンター図(傾斜角 15°)

(a)滑面(Case-3)

(b)粗面(Case-4)

図 8 平均風速のコンター図(傾斜角 30°)

図 9 増速率の鉛直分布の比較(傾斜角 15°)

図 10 増速率の鉛直分布の比較(傾斜角 30°)

図 11 粗面の増速率と滑面の増速率の比の鉛直分布

(3) 風向角を有する 2 次元傾斜地周りの解析⁴⁾

本節では 2 次元傾斜地に対し風が風向角を有して流入する場合を対象に検討を行う。耐風設計を実施する日本の地形の起伏はかなり複雑な形状となっており、地形に対して必ずしも直角に風が当たるとは限らない。特に、剥離を伴うような急峻な地形に風が風向角を持って流入する場合にはかなり複雑な流れ場が形成されることが予想され、風速の増速を評価するうえではこうした場合の風況を把握しておくことが重要であると考えられる。

前節までは LES による予測を対象に議論を進めてきたが、地形周りを対象とした CFD による風速予測はこれまでに計算負荷の低い RANS モデルでも多く実施されてきた。工学の分野では多くの場面で使われ実績のある標準型 $k-\epsilon$ モデルでは、本報の検討対象のように剥離を伴うような急峻で複雑な地形を対象とした場合には適切に予測できない場合があることも想定される。そこで本節では、剥離をとまうような急峻な地形に風が風向角を持って流入する場合を対象に検討を行う。データベースの作成を念頭に置き計算負荷の低い RANS モデルによる解析を実施することとし、複雑な流れ場でも予測精度の確保が期待される修正型の RANS モデルにより検討を実施する。また、前節までと同様の LES についても併せて実施して検証を行う。

解析のソルバーは OpenFOAM Ver2.1.1 とした。乱流モデルは、急峻な地形にみられるような非等方性の強い流れ場でも精度の確保が期待される、非線形モデルの Shih のモデル⁹⁾を採用した。さらに、衝突流で乱流エネルギー k の過剰生成する従来の課題に対して精度の向上が期待される Kato-Launder 補正を併せて適用することとした。なお、境界面では乱流エネルギーの過大評価を防ぐため

に生成項 P_k を修正して対応するアルゴリズム⁶⁾を補強している。

解析格子は図 12 に示すように、前節と同様な方法で作成している。検討対象とした傾斜地は、剥離を伴うような急峻な地形に対して風向角を持って風が流入して複雑な流れ場を形成するような場合を検討するために傾斜角を 75° 、風向角を 45° とした。

(a)鉛直断面 (b)表面メッシュ
図 12 解析格子の設定

図 13 に LES による解析結果を示す。(a)は高さ 1.25H におけるスパン方向(Y 方向)成分風速 V の瞬間場であるが、崖地の頂上部付近で複雑な乱流構造となっている様子が見られ、Y 方向負の成分の風速を持っている。(b)は平均場の流線であるが、崖地の頂部では崖地の形状に沿う方向へのらせん状の流れが確認できる。一方、図 14 は RANS による解析結果であるが、(a)標準 $k-\epsilon$ モデルでは LES と異なり崖地の上部で主流方向(X 方向)へとそのまま流下している。(b)の修正型 RANS では LES と近い流れ場となり、らせん状に流れていく様子がわかる。

(a)高さ 1.25H のスパン風速瞬間場 (b)流線(平均場)
図 13 LES の解析結果(傾斜角 75° 、風向 45°)

(a)標準 $k-\epsilon$ (b)修正型 RANS
図 14 RANS 解析結果(傾斜角 75° 、風向 45°)

図 15 は傾斜角 75° 、風向 0° における流下方向成分風速の比較である。標準 $k-\epsilon$ では崖地上部の $X/H=1$ より後側で LES とはかなり異なった結果となり、循環域が形成されていない。修正型 RANS では $X/H=3$ より後流で風速の減速が LES よりも大きくなっているものの、 $X/H=1$ および 2 では LES の結果と良く対応している。図

16 の傾斜角 75° 、風向 45° の場合の結果をみると、標準 $k-\epsilon$ では LES とはかなり異なった結果であるが、修正型 RANS では流下方向成分およびスパン成分ともに LES とかなり良く対応した分布となる。(b)のスパン方向成分風速の $X/H=1$ の分布は、地表近傍では負の成分、それより上空では正の成分で下層と逆向きとなる特徴的な分布となっているが、修正型 RANS は LES と同様の分布形状となっている。図 17 に風向 0° と 45° の水平方向成分風速の比較を示す。風向 45° の場合には流下方向およびスパン方向の水平 2 成分のスカラー風速である。 $X/H=1$ の分布をみると風速が地形の影響により増速され、高さ $Z/H=1.5$ 付近では風向 0° のほうが風速は強くなっている。これは、風向角を有する場合には相対的に地形の傾斜角が小さくなるためと考えられる。一方、 Z/H が 1.5 より低い場合には風向 45° の方が風速は強くなっていることがわかり、増速は風向 0° の方が必ずしも大きくなるとは限らないことを示している。

図 15 風向 0° における流下方向成分風速の比較

(a)流下方向成分 U

(b)スパン方向成分風速 V

図 16 風向 45° における流下・スパン方向成分風速の比較

図 17 風向 0° と風向 45° の水平方向成分風速の比較

3. 2 単純地形の風速の割増に関するデータベース

表3に単純地形として選定したデータベースのケースを示す。風速の増速が顕著でかつ実際の地形に対して適用する際にあてはめやすい形状を考慮して2次元の傾斜地および3次元の孤立峰とした。また、(2)の検討において、地表面の被覆形態の違いにより解析結果が異なり、風速の増速率も変化するため、風向角 0° の傾斜地および3次元孤立峰では、滑面および粗面の2種類とした。また、風向角については傾斜角 30° を対象に、風向角 15° , 30° , 45° および 60° としたケースも実施して単純地形における流入風の風向角の影響についても検討を行った。

データベースの作成は、(3)で検討を実施した修正型RANSモデルの解析結果により行うこととした。流入境界条件の設定は図4に示す分布と同様とし、滑面の場合にはべき指数 $\alpha \approx 0.15$ 、粗面の場合には $\alpha \approx 0.25$ となっている。図18に傾斜角 30° の2次元傾斜地の壁面近傍の解析格子を示す。壁面近傍には3層の境界層要素が挿入され、壁面第一層の鉛直方向格子解像度は約 $0.065H$ である。

表3 単純地形のデータベース

地形パターン		傾斜地					高さ	地表面	孤立峰
風向角($^\circ$)		0	15	30	45	60			
傾斜角 ($^\circ$)	7.5	滑面	○				H/4	滑面	○
		粗面	○					粗面	○
	15	滑面	○				H/2	滑面	○
		粗面	○					粗面	○
	30	滑面	○	○	○	○	H	滑面	○
		粗面	○					粗面	○
	45	滑面	○					滑面	○
		粗面	○					粗面	○
	60	滑面	○					滑面	○
		粗面	○					粗面	○

図18 壁面近傍の解析格子(2次元傾斜地、傾斜角 30°)

図19にデータベースの1例として、傾斜角 30° 2次元傾斜地の増速率を示す。増速率は、各地点の風速を流入気流の同一高さの風速で基準化した値である。風向角の影響についてみると、風向角が大きくなると風速の増速率は減少している。風向角が 45° の場合、流入風の流下方向断面の傾斜角は 22.2° となり 30° よりも緩やかになるため、風速の増速率は減少していると考えられる。なお、ここでは示さないが傾斜角 30° の場合には風向角が増すにつれて風速の増加率は減少する傾向となり、風向角 0° の場合が最も大きくなっている。ただし2.3節

で検討したように、かなり急峻な傾斜角を有する地形に風が斜めから流入し複雑な流れ場となる場合には、地表近傍において必ずしも風向角 0° のほうが大きくならない場合もあるので注意を要する。地表面の粗滑に着目すると、滑面よりも粗面のほうが増速率は大きくなる。

(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19 2次元傾斜地の増速率のコンター図

(a)滑面 高さ H

(b)粗面 高さ H

図20 3次元孤立峰の増速率のコンター図

図20に3次元孤立峰の中心断面における増速率を示す。増速率の分布のパターンは2次元傾斜地とおおよそ似ており頂部付近で最も大きくなる。また、2次元傾斜地同様に滑面より粗面の方が大きくなっている。

3. 3 まとめ

本節では、まず始めに風洞実験結果との比較により地形上の風に対する LES 解析モデルの予測精度の確認を行った。また、修正型 RANS モデルを地形上の風の予測に適用することの妥当性を示した。そのうえで、地表面の粗滑が風に与える影響らなびに風が地形に対して風向角を有して流入する場合の影響についての検討を行った。地表面の粗滑の影響は、滑面よりも粗面の方が増速率が大きくなることを示した。また、風向角の影響は傾斜角 30° の場合には正対風向の 0° が最も増速率が大きく、風向角が大きくなるほど増速率は小さくなった。ただし、流れが剥離したりらせん状の流れとなるような急峻な地形の場合には必ずしも正対風向が大きくなるとは限らない可能性があるため、今後さらに検討をする必要がある。最後に、CFD 解析結果に基づき地形の影響を受けた風のデータベースの構築を行った。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説」, (2004)
- 2) 岸田 岳士, 田村 哲郎, 「粗度効果を考慮した単純地形周りの流れの CFD」, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, (2013.12)
- 3) 孟 岩, 日比 一喜, 「急峻な山を越える乱流境界層に関する実験的研究」, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp. 61-66, (1998)
- 4) 岸田 岳士, 田村 哲郎, 「傾斜地周りの風に対する修正型 RANS の適用」, 日本建築学会学術講演梗概集, (2014.8)
- 5) Shih, T.H., et al., “A new Reynolds stress algebraic equation model”, Computer methods in applied mechanics and engineering, 125, pp. 287-302, (1995)
- 6) 石原 孟, 日比 一喜, 「急峻な山を越える乱流場の数値予測」, 日本風工学会誌, 第 83 号, pp. 175-188, (2000.4)
- 7) 中村, 田村ら, 「風速の地形による影響評価に関する検討 その 3 データベースの実地形への適用」, 日本建築学会学術講演梗概集, (2013.8)