

山岳地形上流れの LES

— 地表面粗度の違いが流れ場に及ぼす影響について —

飯塚 悟*・近藤裕昭 (産業技術総合研究所)

1. 序

山岳地形上の局所風況予測モデルの開発は、地球温暖化物質や有害化学物質の大気拡散・汚染、風力エネルギーの推定、構造物の耐風設計など、多くの問題解明の基礎となるものである。本研究では LES (Large Eddy Simulation) をベースとして、山岳地形上の局所風況を高精度に予測しうる数値モデルを開発することを目的とする。本報はその一環として、地表面粗度を変化させた 2 次元山岳モデル上の流れの LES を行い、LES の予測精度並びに地表面粗度の違いが流れ場に及ぼす影響について、実験結果¹⁾との比較に基づき検討する。

2. 計算概要

2.1 計算対象 孟らの風洞実験¹⁾と同じ余弦の 2 乗の断面形状を持つ 2 次元山岳モデル上の流れ (図 1 参照)。風洞基準風速 U_{ref} ($=5.9\text{m/s}$) と山の高さ H ($=40\text{mm}$) に基づく Reynolds 数は 1.57×10^4 。

2.2 計算ケース 表 1 に示す。case 1 が “rough” な地表面のケース、case 2 が “smooth” な地表面のケース。

2.3 計算条件 主な計算条件を表 2 に示す。SGS (sub-grid scale) モデルは標準 Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数は 0.1)。地表面粗度の影響は地表面境界条件に z_0 (粗度長) 型対数則を用いることで考慮。

3. 計算結果

以下に示す LES の結果は、3 次元計算に基づく瞬時結果を無次元時間 300 (U_{ref} で主流 (x_1) 方向の計算領域 5 周) 分を時間平均し、更にスパン (x_2) 方向の平均を施したものである。尚、以下に示す諸量は U_{ref} 及び H で無次元化されたものとして表記する。

3.1 平均風速分布 (図 1, 2)

(1) rough ケースと smooth ケースの比較 図 1 に LES により得られた平均風速ベクトルと流線を重ねて示す。rough ケース (case 1, 図 1(1))、smooth ケース (case 2, 図 1(2)) とともに山頂付近で剥離が生じ、山後方に循環流域を形成している。しかし、そのパターンは地表面粗度の違いにより大きく異なる。rough ケースの場合、ほぼ山頂位置で剥離が生じ、山後方に大きな循環流域を形成しているのに対し、smooth ケースでは rough ケースに比べて剥離点が風下側に移動し、後方の循環流域は遥かに小さい。後述するように、このような地表面粗度の違いによる流れ場の変化は実験結果¹⁾で確認されている傾向と一致する。

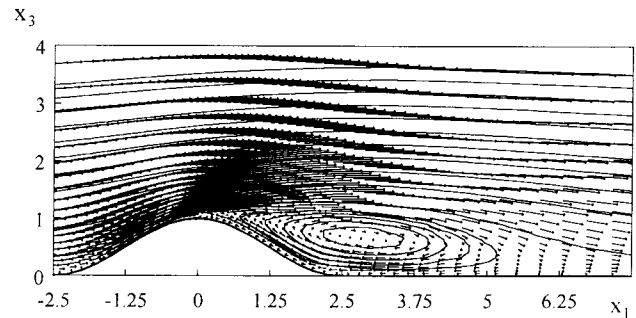
(2) 実験結果との比較 図 2 は主流方向風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布 ($0 \leq x_3 \leq 4$ の範囲) について、実験結果¹⁾と LES の結果を比較したものである。rough ケース (case 1, 図 2(1)) では、山の下り斜面 ($0 \leq x_1 \leq 2.5$) の近傍で実験結果と

表 1 計算ケース

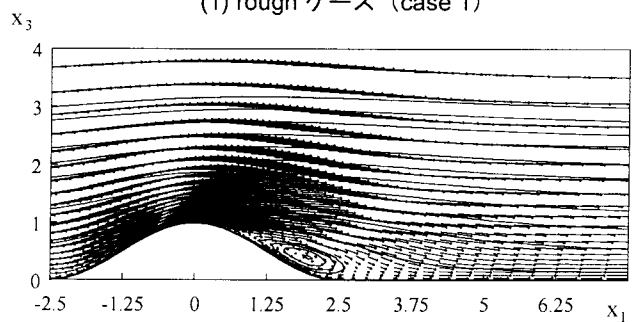
	z_0 (粗度長)	想定した地表面被覆状況
case 1 (rough)	0.3mm	5m 程度の樹木
case 2 (smooth)	0.01mm	10 数 cm の草

表 2 計算条件

① 座標系	一般曲線座標系
② グリッドシステム	コロケーショングリッド
③ アルゴリズム	SMAC 法
④ 圧力解法	Bi-CGSTAB 法
⑤ 空間スキーム	2 次精度中心差分
⑥ 時間スキーム	移流項: Adams-Bathforth 法 拡散項: Crank-Nicolson 法
⑦ 計算領域	$60H(x_1) \times 4H(x_2) \times 15H(x_3)$
⑧ 計算格子数	$130(x_1) \times 20(x_2) \times 29(x_3) = 75,400$
⑨ SGS モデル	標準 Smagorinsky モデル
⑩ 流入境界条件	片岡らの方法 ²⁾ に準じて変動風を生成
⑪ 流出境界条件	法線方向勾配 0 型
⑫ 側面境界条件	周期条件
⑬ 上空境界条件	対称条件
⑭ 地表面境界条件	z_0 型対数則



(1) rough ケース (case 1)



(2) smooth ケース (case 2)

図 1 平均風速ベクトルと流線

LESの結果に若干差が見られるが、全体的に両者は良く一致している。一方、smooth ケース (case 2, 図 2(2)) は山頂を過ぎた辺りから実験結果と LES の結果の差が徐々に大きくなり、LES は実験に比べて後流の速度の回復が速くなる。これは LES の結果が山後方の循環流域を過小評価していることによる (表 3)。

3.2 乱流エネルギー分布 (図 3) 図 3 に乱流エネルギー k (但し LES の結果は GS (grid scale) 成分のみ) の鉛直分布 ($0 \leq x_3 \leq 4$) を示す。rough ケース (case 1, 図 3(1))、smooth ケース (case 2, 図 3(2)) とともに、山後方の剥離された流れと循環流域の間 (自由せん断層域) をピークとして、LES の結果は k を過大評価し、実験との差が大きい。これは smooth ケースの方が顕著である。

3.3 剥離点・再付着点位置 (表 3) 剥離点位置と再付着点位置について、実験結果と LES の結果を比較したものを表 3 に示す。実験も LES も rough ケースは smooth ケースに比べ、①剥離点はより風上側で山頂付近の高い所に位置し、②再付着点はより風下側に位置するという点で同じ傾向を示す (図 1 を合わせて参照)。しかし rough ケースの再付着点位置を除き、両者の値はやや異なり、その対応は充分とはいえない。2 次元山の場合、再付着等の剥離した後の流れ場の性状は剥離点の高さ位置に支配され¹⁾、通常高い位置から剥離する流れは長い再付着距離を伴う。しかし rough ケース、smooth ケースともに、LES の結果は実験よりも高い位置から剥離が生じているにもかかわらず、再付着距離は伸びていない。これは剥離されてきた流れと循環流域の間で過大評価される k により (図 3 参照)、乱流混合が過剰に促進され、循環流域の成長が抑えられたためと推測される。剥離流れと循環流域の間の k の過大評価は smooth ケースの方が顕著であり、その結果、smooth ケースの LES は実験に比べて大幅に循環流域を過小評価したと考えられる。

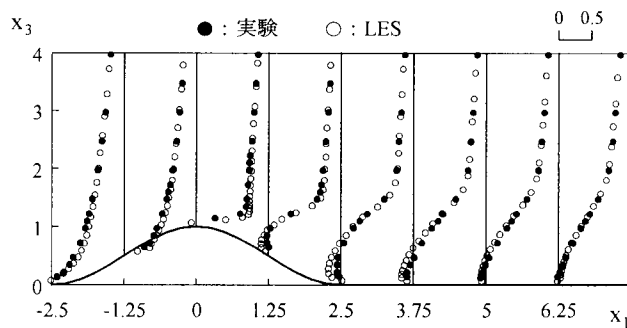
4. まとめ

①地表面粗度を変化させた 2 次元山岳モデル上の流れの LES を行い、地表面粗度の違いが流れ場に及ぼす影響について検討した。②地表面が rough な場合 (case 1)、smooth な場合 (case 2) に比べ、剥離点が風上側の山頂付近の高い所に位置し、山後方に形成される循環流域が大きくなる。この傾向は実験結果と定性的に一致する。③しかし定量的には、実験と今回の LES の結果は充分に対応していない部分も多い。④今後は高精度 SGS モデルの導入等により LES の予測精度の改善を図っていきたい。

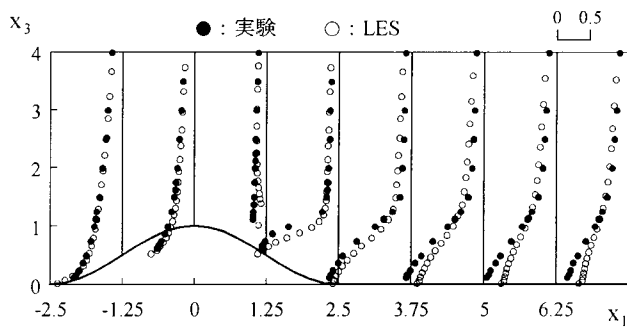
記号 x_i : 空間座標の 3 成分, u_i : 風速の 3 成分
 ($i=1$:主流方向, $i=2$:スパン方向, $i=3$:鉛直方向)
 \bar{f} : 変数 f に grid filter を施した値, $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値,
 U_{ref} : 基準風速, H : 基準高さ

謝辞 LES の比較対象とした風洞実験データは東京大学・石原孟助教授にご提供して頂いた。記して謝意を表する。

参考文献 1) 孟ら, 第 15 回風工学シンポ (1998) pp.61-66
 2) 片岡ら, 建築学会計画系論文集, 第 523 号 (1999) pp.71-77

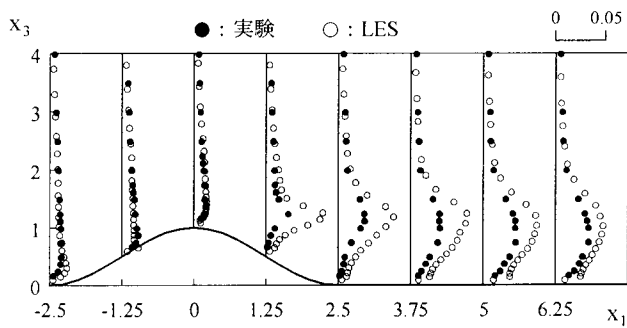


(1) rough ケース (case 1)

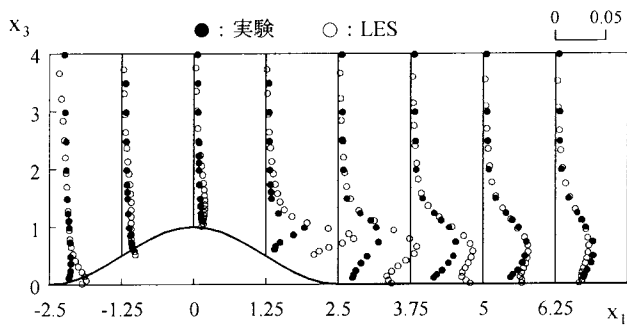


(2) smooth ケース (case 2)

図 2 主流方向風速 $\langle u_1 \rangle$ の鉛直分布



(1) rough ケース (case 1)



(2) smooth ケース (case 2)

図 3 乱流エネルギー k の鉛直分布

表 3 剥離点・再付着点位置 ($x_1 = 0, x_3 = 0$ が山頂)

		剥離点		再付着点
		x_1 位置	x_3 位置	x_1 位置
実験	rough	0.6	0.9	6.4
	smooth	1.1	0.6	4.6
LES	rough	-0.06	0.99	6.40
	smooth	0.80	0.76	3.09