

2次元山における風の増速に関する数値解析

NUMERICAL STUDY OF WIND SPEED-UP OVER A TWO-DIMENSIONAL HILL

石原 孟¹⁾ 日比一喜²⁾
 Takeshi ISHIHARA¹⁾ and Kazuki HIBI²⁾

ABSTRACT

A numerical investigation of turbulent flow over a two-dimensional hill is presented. The numerical model developed for the present work is based on the finite volume method and the SIMPLE algorithm with a collocated grid system. Comparisons of the mean velocity profiles between the numerical predictions and the measurements show good agreement. Separation behind the hill was found at 11° slope. The speed-up ratio at the hilltop does not enhance monotonously with the increase of steepness and shows a maximum at 11° slope.

Key Words: Numerical simulation, Two-dimensional hill, Wind speed-up, Steepness.

1 はじめに

単純地形における風の増速を定量的に評価することは構造物の安全性、風エネルギーの利用などの問題を考える上で重要である。単純地形の典型的な例の一つは2次元山である。孤立した2次元山を越える乱流場の性質は山の傾斜角によって大きく変化する。特に山の傾斜角が大きい場合、山の存在が元の乱流境界層に与える影響を微小擾乱として近似的に評価できず、非線形数値モデルによる予測が必要となる。2次元山を越える気流についての研究は風洞実験、観測、数値解析によりこれまで多くなされてきたが、剥離を含む急峻な山を解析した例が少なく、傾斜角度を系統的に変化させて解析した例も少ない。また2次元山を越える気流の増速率を予測するモデルも提案されてきたが、その予測精度については不明な点が残されている。そこで、本研究では、3次元数値モデルを用いて、傾斜角の異なるいくつかの2次元山を越える乱流場を解析し、山の傾斜角の変化が平均速度の分布に与える影響を明らかにするとともに、数値解析の結果を用いて、風速の増速率を予測する代表的なモデルの予測精度を評価する。

2 解析方法

本解析はコロケート格子に基づく有限体積法を用いた数値解析コードにより行った¹⁾。数値解法は Patankar²⁾により提案された SIMPLE 法を採用した。また数値的な振動を防ぐために、Rhie と Chow³⁾により提案された圧力加重補間法を用いた。対流項の差分近似については速度に対して QUICK、乱流特性量である k と ε に対して一次風上差分を使用した。乱流モデルとしては Shih⁴⁾により提案された非線形渦粘性型モデルを用いた。Shih のモデルは標準 k - ε モデルに含まれた幾つかの問題点を改善し、レイノルズ応力の非等方性の再現を可能にしたと共に、流れの実現性 (Realizability) の条件も満足している。線形方程式の解法としては運動方程式について SIP 法⁵⁾、圧力補正式は ICCG 法⁶⁾を用いた。数値解法に関する詳細な記述は文献1を参照されたい。

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻、助教授 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

²⁾ 清水建設(株)技術研究所 流体解析グループ、首席研究員 (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

入り口の境界は山の影響を無視できる山高さ 30 倍の上流位置に設置した。そこでの平均速度 U と乱流エネルギー k の分布は山を設置しない時の風洞実験⁷⁾の結果を用いた。また散逸率 ε は乱流エネルギー k と乱流渦スケール ($l=kz$) から算出した。解析領域のトップでの平均流速と乱流量の値は流れ方向に変化しないと仮定し、入り口の値をそのまま用いる。流出境界は山の下流 30H の位置に設置し、そこでの平均流速と乱流量は勾配 0 の条件を与えた。側面境界についても同様である。圧力についてはすべての境界面において勾配 0 の条件を適用した。

壁面境界処理は以下に示す方法を用いる。すなわち、壁面第 1 セル内の平均速度と乱流エネルギーは運動方程式と乱流エネルギーの保存式を解くことにより求め、乱流の散逸率 ε は乱流エネルギーから直接に算出する。本研究では解析領域の底面をゼロ変位の高さに設置した。また解析に用いた粗度長 z_0 とゼロ変位 d の値は風洞実験⁷⁾から得られた値を用い、それぞれ 0.3mm と 3mm と設定した。図 1 には計算格子の一例を示す。なお、山の形状及び風洞実験についての詳しい記述は文献 7 を参照されたい。

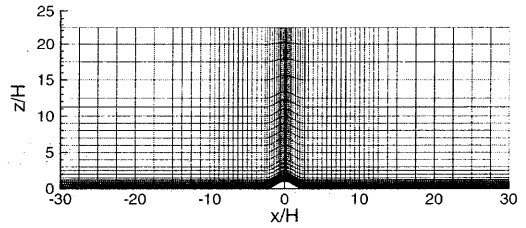


図 1 計算格子

3 解析結果

3.1 実験結果との比較

図 2 には平均速度成分 U, W の鉛直分布を示す。平均速度成分 U は山の風上麓で減速し、山の頂上で増大する。山背後では負の値となり、流れの逆流が現れる。一方、平均速度成分 W は山の登り斜面と山頂で大きな正の値を示し、山背後では負の値となる。図中の白丸は実験値、実線は数値解析結果を示す。また U_{ref} は風洞風速を表す。全体的に、解析結果は実験値とよく一致し、本解析コードの有効性が確かめられた。

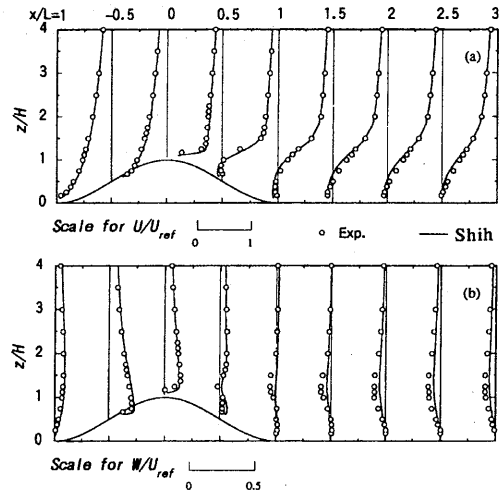


図 2 平均速度成分 U, W の鉛直分布

3.2 山の傾斜角の影響

山の傾斜角の変化が流れ場に与える影響を明らかにするために、本研究では山の平均傾斜角 θ ($=\tan^{-1}(H/2L)$) 2.9 度、5.7 度、11.3 度、21.8 度、38.7 度の 5 つのケースについての解析を行った。山頂から山の半分の高さまでの水平距離 L と山高さ H との比はそれぞれ 10、5、2.5、1.25、0.625 となっている。

図 3 には代表的な 3 つのケース (5.7 度、11.3 度、21.8 度) における流れの流線を示す。平均傾斜角 5.7 度 ($L/H=5$) のケースでは流れが剥離せず、山を越える流れの流線はほぼ対称となっている。平均傾斜角が 11.3 度 ($L/H=2.5$) になると、山背後に弱い剥離流が形成される。この剥離流は壁面近傍にしか見られない。更に傾斜角が 21.8 度 ($L/H=1.25$) を超えると、山の背後に大きな循環流が形成され、流線が閉じた形となる。この場合、山背後の流れ場は接近流と全く異なる性質を示し、山の風上と風下斜面の風速の分布も非対称となる。

図 4 には山の表面圧力の流れ方向の変化を示す。比較するため、流れ方向の座標は山底辺の半分の長さ $2L$ で無次元化されている。この図から分かるように、山の平均傾斜角 5.7 度以下の場合、山の表面圧がほぼ対称となっている。山頂では負圧となり、山の風上と風下の麓では正圧となる。平均傾斜角が 11.3 度になると、山の表面圧が少し非対称となり、圧力の回復も遅くなる。更に平均傾斜角が 21.8 度を超えると、山の背後に大き

な剥離域が形成されるために、山頂から山の風下斜面にかけて圧力の値が負となり、その分布も非対称となる。またこれらのケースでは山背後の負圧の値は山の傾斜角度に殆ど依存せず、ほぼ一定の負圧値となる。圧力の流れ方向の勾配は山表面付近での風速の増減に大きく寄与する。

3.3 流れの増速率

山を越える風速の増速率を正しく評価することは構造物に作用する風荷重を予測する上で重要である。図5に山の麓と山頂での増速率 $S=U(z)/U_0(z)$ の鉛直分布を示す。山の麓では増速率が1より小さく、流れが減速していることが分かる。この風速の減少は山の傾斜角の増大に伴い、大きくなっている。一方、山頂では増速率が正となり、流れが増速していることが分かる。ただし、この風速の増大は山の傾斜角と共に単調に大きくなり、平均傾斜角 11.3 度の時に最大となる。

山頂での増速率の傾斜角による変化を図6に示し、地上 10mm 以上(実スケール 10m)ではこの傾向が変わらない。山を越える流れの増減速は場所によって大きく変化する。図7には地上付近での増速率の流れ方向の変化を示す。山の表面圧力と異なり、何れのケースにおいても、風速の増速率の分布は非対称となっている。風速の減少は山の風上側より風下側の方が大きくなる。また風速の増速率の最大値は山頂より少し風上のところに見られるのが特長である。この傾向は傾斜角が小さくなるにつれ、顕著になる。

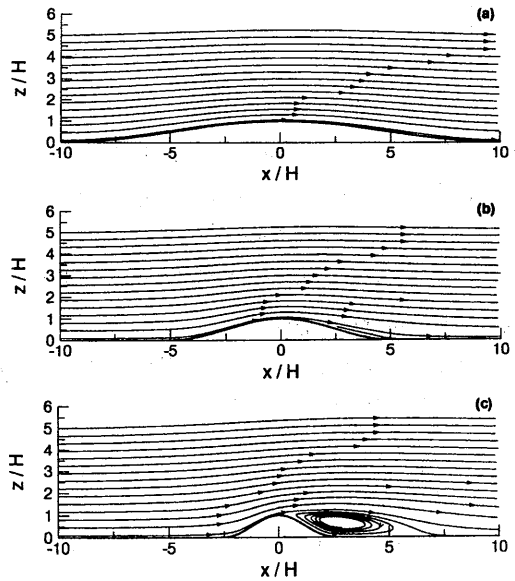


図3 2次元山を越える流れの流線 (a) $\theta=5.7^\circ$ (b) $\theta=11.3^\circ$ (c) $\theta=21.8^\circ$.

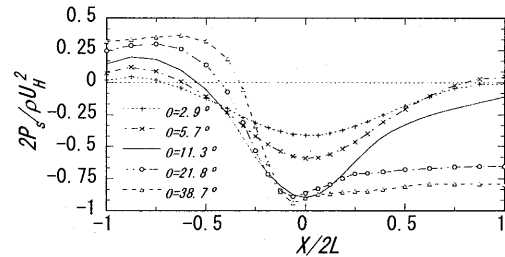


図4 山表面圧力の流れ方向の変化

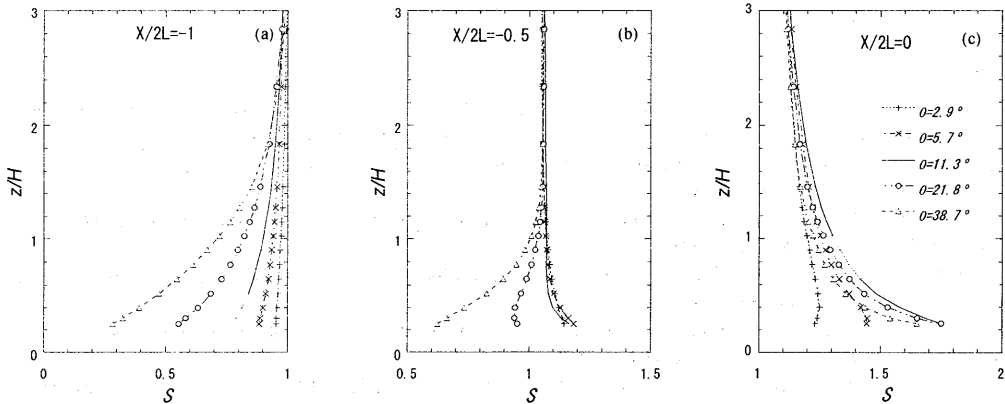


図5 山の麓と山頂での増速率の鉛直分布

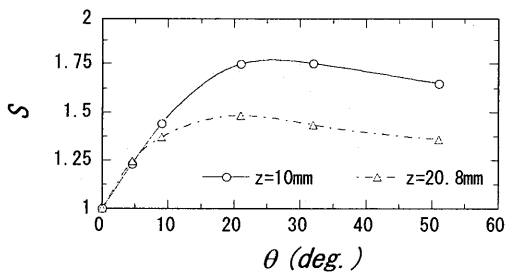


図 6 山頂での増速率の傾斜角による変化

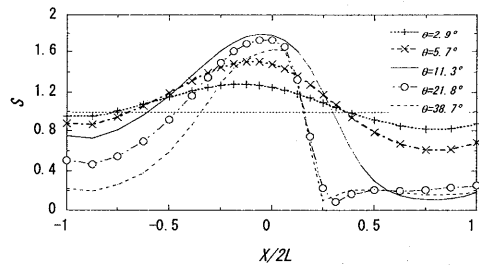


図 7 地上付近での増速率の流れ方向の変化

3.4 既存指針の予測精度の評価

2次元地形における増速率を表す式は過去いくつか提案されてきた。NBC⁸⁾の式はその一つの例である。

$$S = 1 + \Delta S_{\max} \left(1 - \frac{|x|}{kL} \right) e^{(-\alpha|L|)} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta S_{\max} (=2.2\min(H/L, 0.5))$ は ΔS の最大値であり、 H/L が0.5を越えた場合にはその値を1.1とする。また $\alpha(=3)$ は増速率の高さ方向の減少係数、 $k(=1.5)$ は形状常数である。図8には山頂における増速率の(1)式による予測値(Cal.)と数値解析結果(Num.)との比較を示す。山の高さまでには予測値と数値解析結果とは概ね一致しているが、それより高い場所では(1)式による予測値は傾斜角度11度を越えるケースにおいて数値解析結果より小さくなっている。

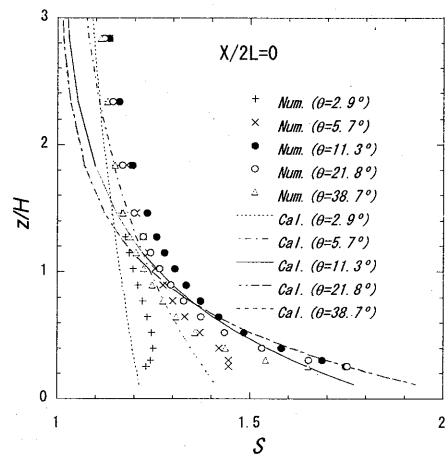


図 8 山頂における増速率の比較

4 まとめ

本研究では異なる傾斜角をもつ2次元山を越える乱流場を数値モデルにより調べた。その結果、山の平均傾斜角が11度を超えると、山の背後に剥離域が形成される。風速の増大は山の傾斜角と共に単調に大きくなり、傾斜角11度の時に最大となる。また風速の増速率の最大値は山頂より少し風上のところに見られ、その傾向は傾斜角が小さくなるにつれ顕著になることが分かった。NBCの式は傾斜角度11度を越えるケースにおいて、山頂における風の増速を過小評価することが分かった。

参考文献

- 1) 石原孟、日比一喜:急峻な山を越える乱流場の数値予測、日本風工学会論文集、No. 83、pp.175-187、2000
- 2) Patankar, S. V.: Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York, 1980.
- 3) Rhie, C. M. and Chow, W. L.: Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, AIAA J., Vol. 21, pp.1525-1532, 1983.
- 4) Shih, T. H., Zhu, J. and Lumley, J.L.: A new Reynolds stress algebraic equation model, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.125, pp.287-302, 1995.
- 5) Stone, H.L.: Iterative solution of implicit approximation of multidimensional partial differential equations, SIAM J. Numer. Anal., Vol. 5, pp.530-558, 1968.
- 6) Keshaw, D.: The incomplete Cholesky conjugate gradient method for the iterative solution of system of linear equations, J. Comput. Phys., Vol.26, pp.43-65, 1970.
- 7) 石原孟、日比一喜:急峻な山を越える乱流場に関する実験的研究、第15回風工学シンポジウム、pp.61-66、1998
- 8) National Building Code of Canada, National Research Council of Canada, Ottawa, 1990.