

2次元山を越える乱流場の数値予測

正会員 ○ 石原 孟*1

同 日比一喜*2

数値予測、2次元山、傾斜角、風速増減率

1. はじめに 複雑地形上の乱流場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、大気汚染物の拡散などの問題を考える上で重要である。複雑地形を構成する基本的な幾何学形状の一つは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少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。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シミュレートし、山の傾斜角の変化が流れ場に与える影響を明らかにした。

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。数値解法はPatankar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Chow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Shih²⁾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 $k-\epsilon$ 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。

計算の入り口条件は風洞実験から得られた平均速度と乱流エネルギーの分布を用いた。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。壁面境界条件は対数則を用い、粗度長は実験値を与えた³⁾。本解析はレイノルズ数依存性のない粗面のケースについて行った。粗度長さ z_0 は0.3mm、ゼロ面変位 d は3mmである。図1には計算格子の一例を示す。

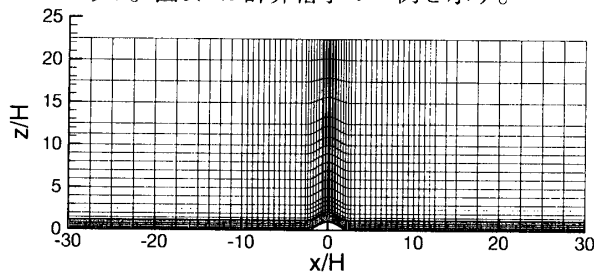
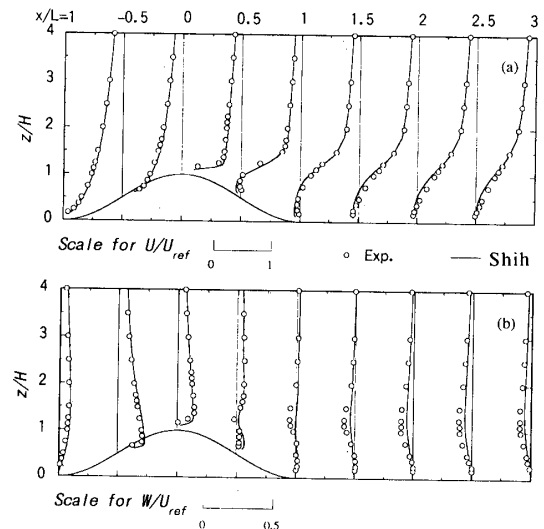


図1 計算格子

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。図中の白丸は実験値、実線は数値解析結果を示す。全体的に、解析結果は実験値とよく一致し、数値モデルの有効性が検証された。

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、本解析は山の平均傾斜角 $\theta (= \tan^{-1}(H/L))$ 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行った。山底辺の半分の長さ L と山高さ H との比はそれぞれ20、10、5、2.5、1.25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($L/H=10$)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($L/H=5$)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($L/H=2.5$)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 L 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

A numerical study of turbulent flow over two-dimensional hills

ISHIHARA Takeshi and HIBI Kazuki

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ほぼ一定の負圧値となり、山の表面圧力の分布も非対称となる。

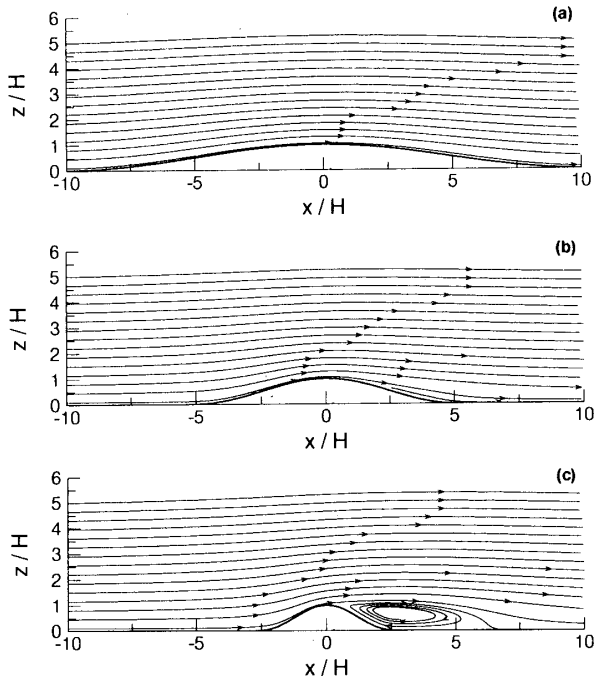


図3 二次元山を越える流れの流線

(a) L/H=10; (b) L/H=5; (c) L/H=2.5.

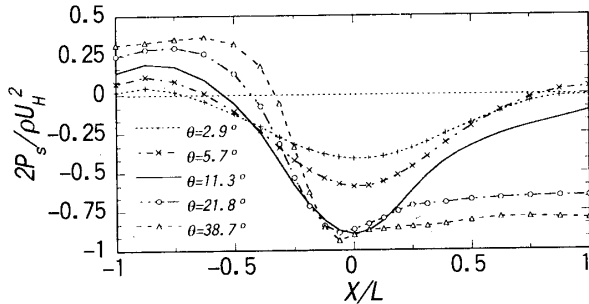


図4 山表面圧力の流れ方向の変化

3.3 流れの増速率 山を越える流れ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 ΔS ($=U/U_0-1$)の鉛直分布を示す。山の麓では増速率が負となり、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率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は特長である。この傾向は傾斜角が小さくなるにつれ、顕著になる。

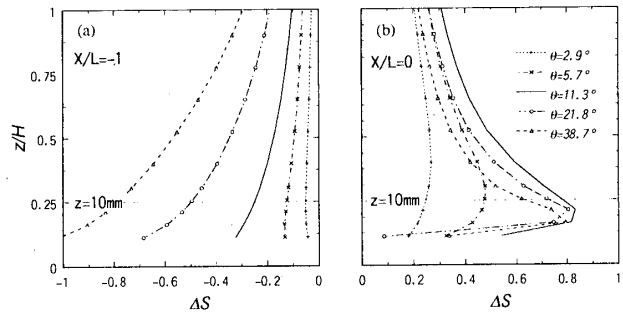


図5 山の麓と山頂での増速率の鉛直分布

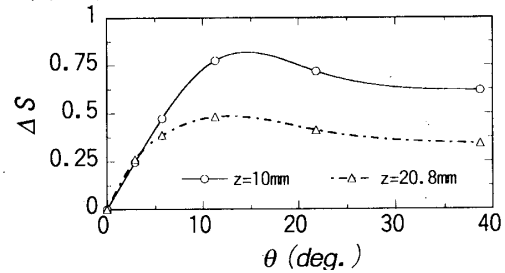


図6 山頂での増速率の傾斜角による変化

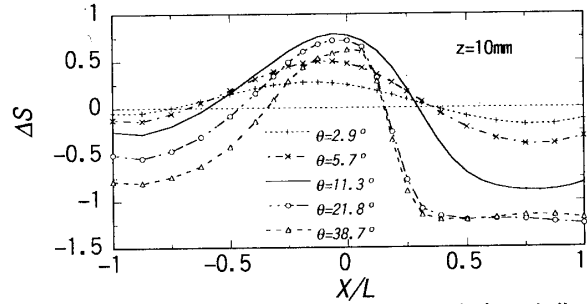


図7 地上付近での増速率の流れ方向の変化

4. まとめ 本研究では異なる傾斜角をもつ二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ことが分かった。また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ことを明らかにした。

参考文献 1) 石原：日本風工学会誌、1999、投稿中。

2) Shih et al.: Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.125, 1995, pp.287-302. 3) 孟、日比：第15回風工学シンポジウム、1998, pp.61-66.

*1 清水建設・技術研究所 研究員・工博

Researcher, Dr. Eng., Institute of Technology, SHIMIZU CORP.

*2 清水建設・技術研究所 主席研究員・工博

Chief Researcher, Dr. Eng., Institute of Technology, SHIMIZU CORP.