

急峻な山を越える乱流場の数値解析 A Numerical Study of Turbulent Flow Over a Steep Hill

石原 孟¹⁾

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに 急峻な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工学問題を考える上で重要である。緩やかな地形の場合は流れの剥離を伴わないため、地形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る。緩やかな地形上の流れ場の近似解法としてはHuntらにより提案された線形モデルが最も有名である。しかし、山の傾斜角が大きくなると、線形モデルによる予測は山頂での風速増加量を過大に評価し、山背後の風速の減少を過小に評価する傾向がある¹⁾。実際日本の山地の殆どは平均傾斜角が15度を超す急峻な山地であるために、流れの剥離を再現できる非線形モデルの開発が望まれる。そこで、本研究では、非線形3次元数値モデルを開発し、それにより急峻な3次元山を越える乱流場をシミュレートし、風洞実験の結果と比較することにより数値モデルの予測精度を明らかにした。

2. 解析方法 本シミュレーション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標準 $k-\epsilon$ モデルと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。

計算の入り口条件として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直接用いる。また乱流エネルギーの散逸率 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。壁面の境界条件は対数則を用い、粗度長は実験値を与える³⁾。

3. 解析結果 本解析は最大傾斜角度32度の3次元山を解析の対象とした。本解析に用いたモデルが高レイノルズモデルであるために、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。

3.1 平均流れ場 図1には3次元山の中心断面における平均速度成分 U 、 W の鉛直分布を示す。図中の白丸は実験値、実線はShihのモデルによる数値解析結果、点線は標準 $k-\epsilon$ モデルの結果を示す。全体的に見ると、解析結果は実験値とよく一致している。特にShihのモデルによる予測結果は後流域において標準 $k-\epsilon$ モデルより実験値に近い。

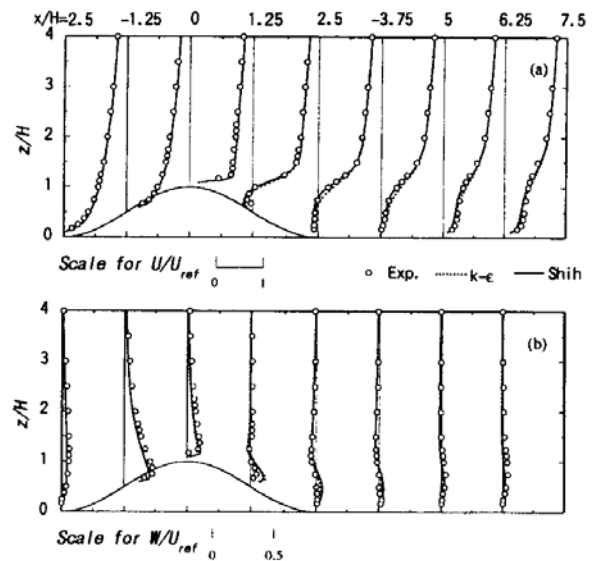


図1 3次元山の中心断面での U 、 W の鉛直分布
図2には3次元山の中心断面における平均速度のベクトルを示し、図中の実線は流れの流線を表している。2次元山背後の剥離泡に閉じた流線が形成されるのに対して³⁾、3次元山背後の剥離泡に開いた流線が形成されていることが分かる。これは2次元剥離の場合に流れ場が質量保存の式を満たすために循環流を形成しなければならないのに対して、3次元剥離の場合はスパン方向の流れが存在するために、循環流がなくても、質量保存の式を満たすことができる。図3には山表面 (第1セル) の平均速度ベクトル

1) 清水建設 (株) 技術研究所 研究員 工学博士 (旧姓 孟岩)

Researcher, DR. ENG., Institute of Technology, SHIMIZU CORPORATION

ルの水平分布と流線を示し、山の背後では山を回り込む流れにより収束流（対称面に向かう流れ）が形成されていることが分かる。この収束流は、3次元山の対称面内の流れ場を2次元場と見なす時に、仮想的な2次元場の中のソースとなる。

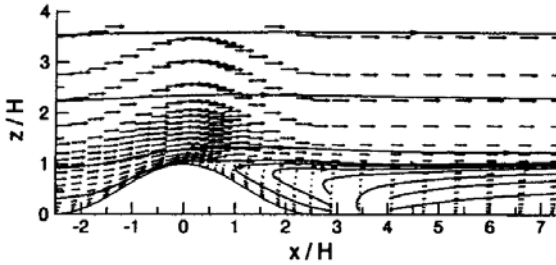


図2 3次元山における平均速度のベクトルと流線

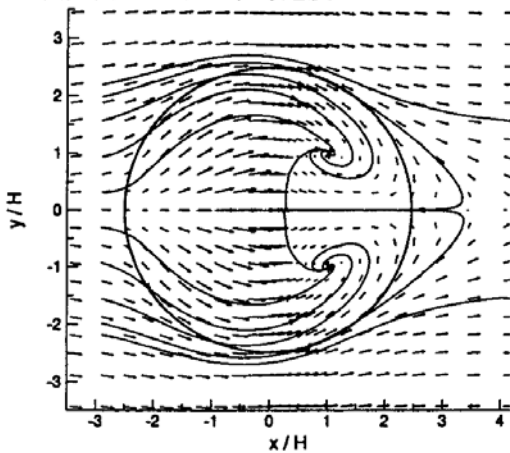


図3 山表面の平均速度ベクトルの水平分布と流線

3.2 乱流統計量 図4には3次元山の中心断面における乱流エネルギー k の鉛直分布を示す。全体的に見ると、Shihのモデルによる予測結果は標準 $k-\epsilon$ モデルより実験値に近い。特に剥離域においては標準 $k-\epsilon$ モデルの乱流エネルギーの過大評価がShihのモデルにより大きく改善されていることが分かる。Shihのモデルによる乱流統計量の予測結果の改善は山の登り斜面においても見られたが、乱流エネルギーの過大評価が完全に解消されていない。山の登り斜面における乱流エネルギーの過大評価はレイノルズ応力の予測結果に深く関係している。図5には3次元山の中心断面におけるノーマルストレスの鉛直分布を示す。標準 $k-\epsilon$ モデルに比べ、Shihのモデルによる予測はノーマルストレスの非等方性をよく再現している。Shihのモデルによる改善効果は流れ方向と鉛直方向の乱れの予測結果に大きく現れている。ただし、山の登り斜面ではShihのモデルによる改善効果が小さく、両モデルとも流れ方向の乱れを過小評価し、鉛直方向の乱れを過大評価している。この結果は山の登り斜面における平均流れ場の急速な変化に関係している。すなわち、流れの移流

効果の大きい山の登り斜面においては2方程式モデルが流れの移流効果をノーマルストレスの予測に正しく反映できず、平均速度の局部変化を過大に評価してしまうことによるものと考えられる。

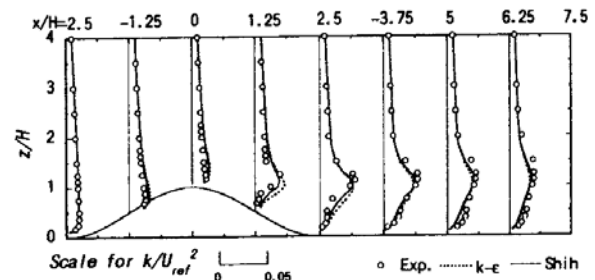


図4 中心断面での k の鉛直分布の比較

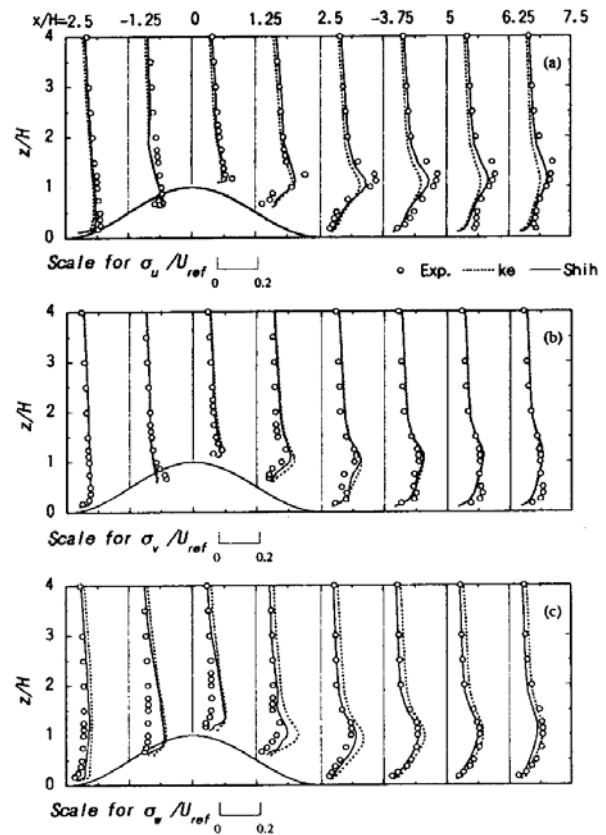


図5 ノーマルストレスの鉛直分布の比較

4. まとめ 本研究では非線形数値モデルを開発し、急峻な3次元山を越える乱流場をシミュレートした。その結果、非線形モデルによる予測は平均風速場をよく再現し、線形モデルに見られたような山頂での風速増加の過大評価や山の背後の風速減少の過小評価を改善した。標準 $k-\epsilon$ モデルに比べ、Shihのモデルによる予測結果は平均速度と乱流統計量とも実験値に近いことが分かった。

参考文献 1) 大木他：日本建築学会大会学術講演梗概集、1998、pp.119-120。 2) Shih et al.: Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.125, 1995, pp.287-302。 3) 孟、日比：風工学シンポジウム、1998、pp.61-66。