

緩やかな粗面丘を過ぎる乱流境界層特性の実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF ROUGH-SURFACE BOUNDARY LAYER PAST GENTLE HILLS

中山 昭彦¹・横田太作²
Akihiko NAKAYAMA and Daisaku YOKOTA

¹ 正会員 Ph.D. 神戸大学大学院教授 自然科学研究科地球環境科学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 学生員 神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻 (同上)

Turbulence characteristics of boundary layers past gently curved hills with varying roughness height have been studied by wind-tunnel experiments. The results of the mean velocity distributions indicate that for the gently sloped hills, where no flow reversal occurs, the pressure-gradient and boundary curvature effects and the surface roughness act almost independently and the wall-law similarity similar to the rough boundary layers on flat surface exists. The surface roughness, however, is seen to soften the pressure-gradient effects on both mean velocity and turbulent stresses. Furthermore, the turbulence stresses that are known to be highly anisotropic near the solid surface are made more isotropic due to the surface roughness.

Key Words : rough surface boundary layer, gentle hill, turbulence model

1. はじめに

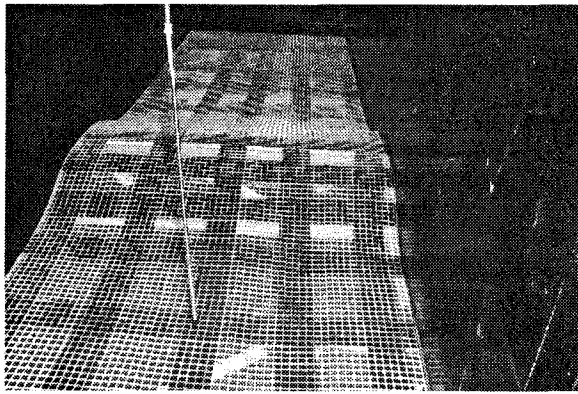
実地形上大気流や実河川流など自然界での流れは、非常に複雑な境界形状の領域での流れである。こういった流れの定量的予測のための厳密なシミュレーションは不可能で、今日の計算機ではせいぜい乱流モデルを用いた平均流の計算が出来る程度である。ここで必要な乱流モデルや数値計算法であるが、比較的単純な流れではある程度の信頼性が得られているが、それを地形や河床など境界形状が大きく変化し、しかも境界面は粗面と見なさなければならない場合に直接適用するにはまだまだ問題がある。複雑な自然境界の形状は平坦ではなくしかも土砂、植生など乱れスケールより大きな凹凸が存在し、粗面と捉えられなければならない場合が殆どである。本研究ではこういった、境界が粗面でしかも起伏のある境界上の乱流の特性を調べる。

地形上大気乱流の研究としては Taylor et al.¹⁾が現場測定及び風洞実験などのデータを調べ、丘が境界層に及ぼす影響を纏めている。また Hunt et al.²⁾は緩やかな丘を過ぎるせん断流を理論的に解析する方法を提案している。しかし数値計算法には乱流モデルが必要で、地表近傍で

も対数則などの経験的相似則が必要である。こういった相似則は滑面を想定したもの、あるいは粗面でも平坦な境界上の境界層にのみ適用可能なもので、山や谷による局所的に変化の激しい、逆流を伴うような流れや大きい粗度のある場合には適用出来ない。こういった複雑な条件での境界近傍で適用出来る相似則の構築・検証は複雑要素を系統的パラメータ化した実験データに頼らねばならない。

加速や減速を伴う開水路流での相似則の実験的研究は鬼束ら³⁾、瀬津ら⁴⁾より行われており対数則への影響が調べられている。境界層では Baskaran et al.⁵⁾、孟・日比⁶⁾により丘を過ぎる境界層の計測が行われているが相似則の検討までは行われていない。著者ら⁷⁾は風洞実験により、粗面境界層が圧力勾配により受ける影響は、内層では摩擦速度増加のため対数則切片が下がり、外層では滑面と同様逆圧力勾配で対数則から上方に、順圧力勾配で下側にずれることを見出している。

本研究では粗度高さの異なる粗面よりなる、緩やかな丘を過ぎる流れを風洞実験により調べることににより、粗度、圧力勾配に加え、境界形状も含めた複合的影響を受ける境界層流れの特性を明らかにし、そのモデリングについての提案をするものである。具体的には平均流速分



網目粗度

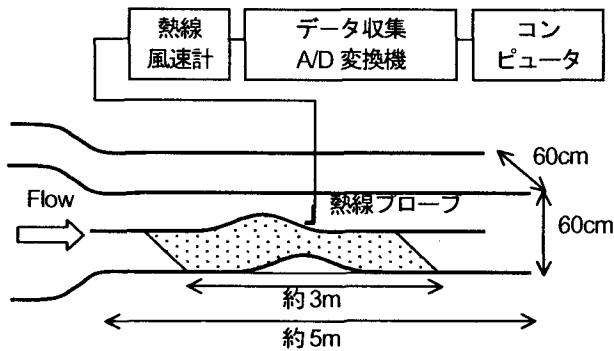


図-1 風洞実験設備

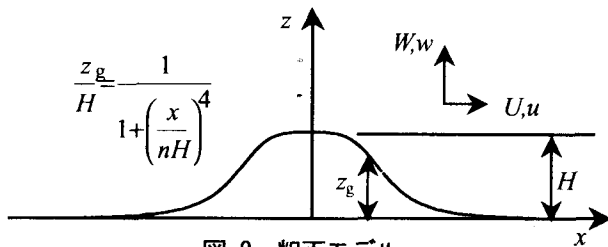


図-2 粗面モデル

布及び乱流応力を熱線風速計にて測定し、その特性相似性の評価などを行う。丘は基礎的研究にモデルとしてよく用いられる解析関数で表現できる理想化した2次元形状のもので、勾配は比較的小さく剥離のないものである。結果は計算法の検証にも使えるよう纏めてある。

2. 実験

(1) 風洞と丘モデル

実験は測定部の断面が60cm×60cm、長さが5mの低速吹き出し型風洞を用いて行われた。図-1はこの風洞と丘モデルの概要を示す。丘モデルの曲面はプラスチックの薄板で整形され、風洞の壁の端版に設置されてある。丘の形状は図-2に示されているような有理関数で表される形状で、余弦関数の二乗で表される形状²⁾と共に基礎研究に用いられるものである⁷⁾。風速測定は反対側の壁に設けられたスリットより熱線プローブを挿入するこ

表-1 実験ケース

ケース名	丘最大 斜度, θ_m	地表面 種類
S15	15°	滑面
RM15	15°	網 ($h=2\text{mm}$)
RC15	15°	網 ($h=5\text{mm}$)
S25	25°	滑面
RF25	25°	サンドペーパー
RM25	25°	網 ($h=2\text{mm}$)
RC25	25°	網 ($h=5\text{mm}$)

とにより行われた。中立成層時の大気流を想定し、温度勾配は与えていない。丘の高さ H は70mmで風洞の閉塞率は11%と無視できないが、直接的影響は圧力勾配を大きくする程度で、計算法の検証ケースとしては問題ないと考えられる。流入面での境界層厚は孟・日比⁶⁾の実験では境界層の厚さは山の高さの数倍であるが、本実験では約30mmで、丘の高さの1/2弱である。ただし、粗度は丘の中心から1500mm上流の位置から設置しているので、粗度高さの大きいケースは境界層も幾分厚くなっている。

(2) 実験法

風速の測定は平均流にピトー管と圧力変換器、変動風速には定温型熱線風速計にX型プローブを用いた。本実験では緩やかな丘を対象としているので、逆流はない、ただX型プローブでは逆流はなくとも乱れ強度の高い場合精度に問題があるが、本計測においては丘頂上のすぐ下流以外では平均流速及びレイノルズ応力計測には問題はない。熱線風速計の出力はフィルターに通され、500HzでサンプリングされA/D変換器にてデジタル化されコンピュータに取り込まれた。これらより平均風速及び、乱流応力が算定された。座標は図-2に示してあるように、 x は主流方向、 y は横方向、 z は鉛直上方向の座標である。これらの方向の平均速度成分及び乱れ速度成分はそれぞれ U, V, W, u, v, w である。

プローブの検定は同じ風洞内で丘の影響のない位置で行なわれた。

(3) 測定ケース

実験は表-1に示すように丘の最大傾斜角 θ_m が15°の緩やかな勾配のものと、25°のややきつい角度のものについて行った。これらは孟・日比⁶⁾や向ら⁸⁾の行った実験での地形モデルより緩やかな勾配のものである。各々の場合について、表面が滑らかなプラスチック面(S15, S25)のものと、サンドペーパー(RF25)、及び、2種類の網を貼り付けた粗面(RM15, RM25, RC15, RC25)について計測した。サンドペーパーは砂粒高さ h が約1mmのもので、網の場合は目の大きさ h が約2mmのもの(RM15, RM25)と5mm(RC15, RC25)のものである。 h を基にした粗度レ

レイノルズ数はサンドペーパーの RF ケースで約 10, の遷移粗度, RM 及び RC の場合でそれぞれ 20 から 50 で最も大きい粗度の場合完全粗度になっている。網目粗度は図-1 の写真に示してある。既存の粗面丘の実験では粗度に Lego ブロック^{9),10)}や人口芝⁶⁾, ビーズ¹¹⁾などが用いられているが, 本研究では, 同じモデル表面に取り付け取り外しの簡単に行える網を選んだ。何れのケースも測定は上流での基準風速 U_{ref} を約 2.8m/s に設定し, H と U_{ref} を基にしたレイノルズ数が 13,000 で行った。

3. 実験結果

(1) 平均速度場

各測定ケースについての平均速度 U の分布を図-3 に示す。最大斜度 $\theta_m = 15^\circ$ のケースでは剥離は全く見られず, 25° の場合も逆流があるとすれば RC25 の $x/H=2$ で瞬間的に逆流している可能性があるのみで他のケースでは逆流は見られない。 $\theta_m = 15^\circ$ のケースは非常に緩やかな曲率で丘頂上での増速度は $\theta_m = 25^\circ$ と同程度であるが圧力勾配は小さく乱れへの影響も小さい。粗面の結果は滑面のものに比べ境界層厚さが大きく, また粗度高さの大きい場合は丘の後流の幅も大きくなっている。しかし丘頂上での速度増加は減少している。丘の風下での地表面近傍の速度回復は中粗度の RM のケースが最も早くなっている。

図-4 に境界層外縁での圧力を圧力係数

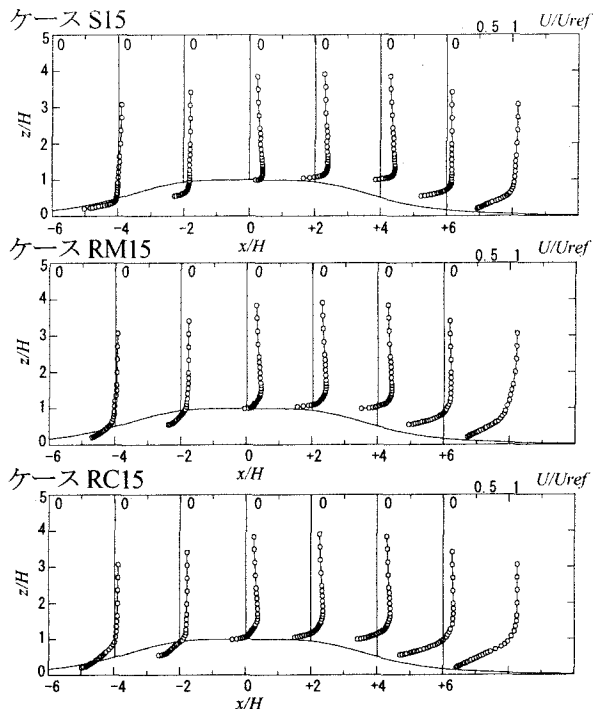
$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad (1)$$

の形で図示している。ここで p_{ref} は基準位置での静圧である。一般に圧力は丘の風上側では減少し, 風下で回復する形になっている。緩やかな勾配の $\theta_m = 15^\circ$ の丘の場合頂上付近で最小になっているが, 勾配のきつい $\theta_m = 25^\circ$ の場合頂上よりやや風下側で最小となる。圧力勾配は同じ形状の丘でも地表面の種類により異なっている。これは粗度の大きいケースでは摩擦損失が大きくなること, また境界層による排除厚が大きくなり丘の実質形状が平坦化されることによる考えられる。圧力勾配の程度を表す, 排除厚 δ^* と地表面せん断応力 τ_w で定義されるパラメータ

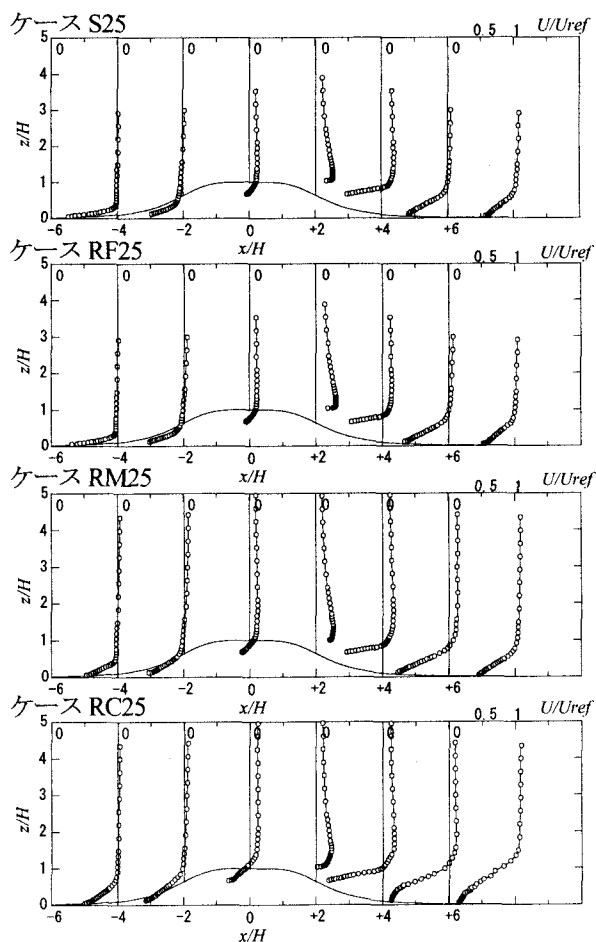
$$\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

の値は, $\theta_m = 15^\circ$ の場合山前方の加速部で最大約 0.7, 風下側では 0.8 程度で緩やかであるが, $\theta_m = 25^\circ$ の場合は山前方で 2.5, 風下側では 3.7 程で圧力勾配の影響は大きいと考えられる。

図-5 は平均流速分布の対数則プロットである。対数則プロットに必要な摩擦速度 u_τ は次のようにして決定された。まず滑面の結果は滑面对数則に従うと仮定し, 滑



(a) $\theta_m = 15^\circ$



(b) $\theta_m = 25^\circ$

図-3 平均流速分布結果

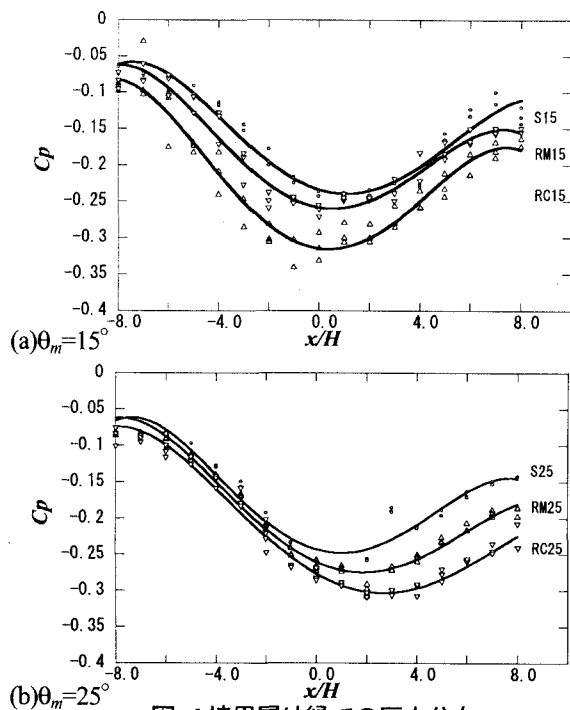


図-4 境界層外縁での圧力分布

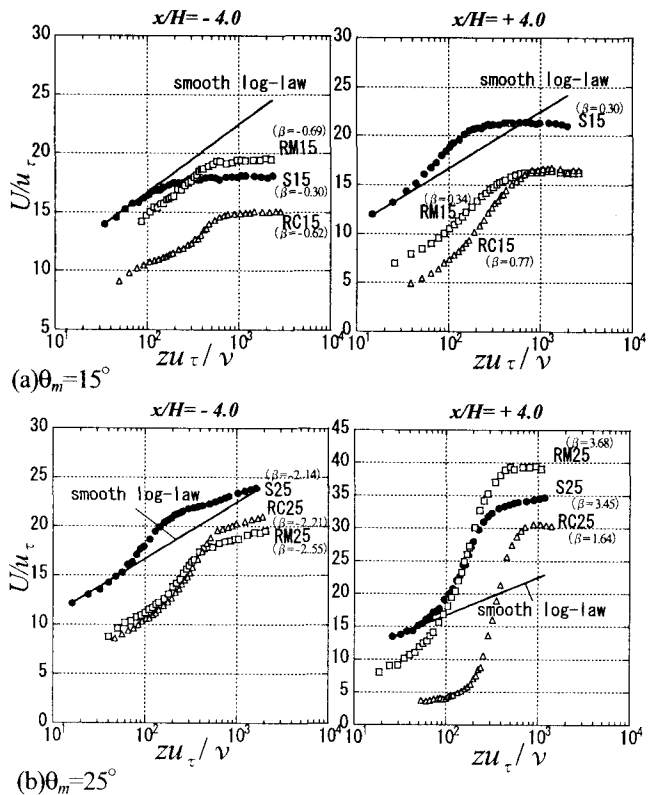
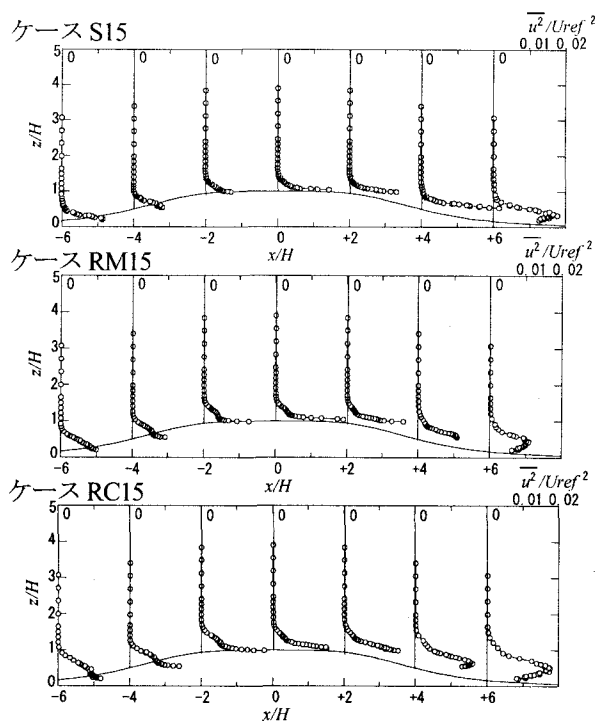
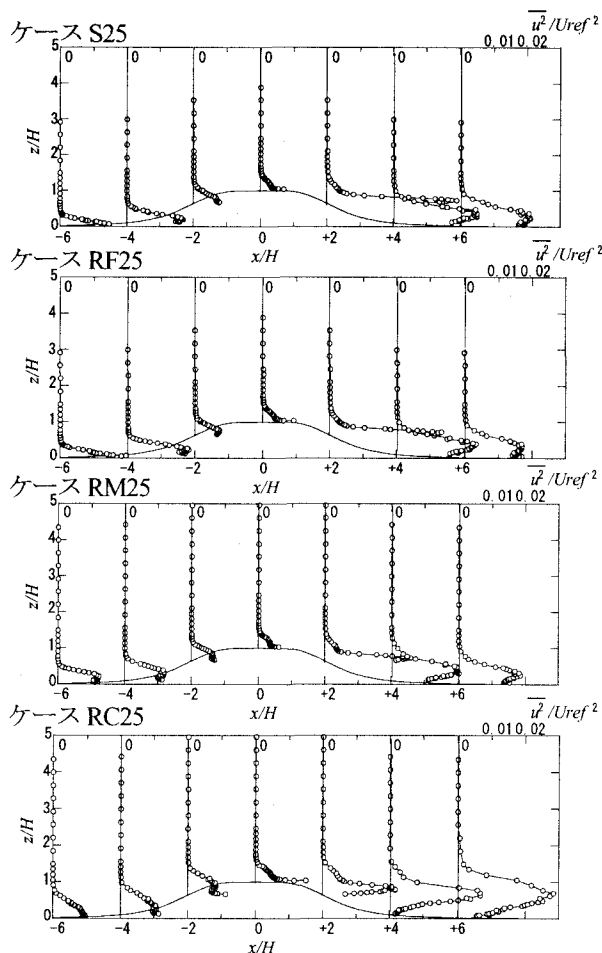


図-5 平均流速の対数則プロット

面の u_τ を決定した。このとき壁近傍でのせん断応力、圧力勾配及び運動量バランスにより算出される u_τ の値と大差ない事を確認している。粗面丘の場合は壁近傍のせん断応力の測定値と圧力勾配より壁面せん断応力 τ_w を決定した。粗面境界の速度分布は滑面の場合に比べほぼ一様に下方にずれている。この粗度による減速 ($\Delta U/u_\tau$) は、圧力勾配のない平坦面上の境界層の場合、粗度高さを基にしたレイノルズ数のみに依存し、Raupach & Antonia¹²⁾ に



(a) $\theta_m = 15^\circ$



(b) $\theta_m = 25^\circ$

図-6 レイノルズ応力 $\overline{u'^2}/U_{ref}^2$

より相関関係が求められている。本実験結果の ΔU は丘風上側の圧力勾配の小さいところでは Raupach & Antonia¹²⁾の相関に近い値で、粗度高さの大きい場合に大きくなっているが、風下では圧力勾配パラメータ β の値にも影響されていることが分かる。外層での対数則からのずれは、滑面、粗面とも同じ傾向になっている。すなわち順圧勾配($\beta < 0$)では対数則から下方に、逆圧勾配($\beta > 0$)で上方にずれていることが分かる。従って本実験で対象としたような逆流を伴わない比較的緩やかな勾配の粗面境界層の場合、圧力勾配と粗度とは相互に干渉し合わずそれぞれの影響は独立に働くとしても良いと考えられる。

(2) レイノルズ応力

図-6, 7, 8はそれぞれ流れ方向レイノルズ垂直応力 u^2 、鉛直方向垂直応力 w^2 及び、せん断応力 $-uw$ の分布である。全て上流の基準速度の2乗で無次元化した値である。それぞれのケースで丘の前方の加速域では乱れ強度は減少し、頂上で最小値をとり、下流側の減速域で増大している。特に $\theta_m=25^\circ$ の場合滑面丘の頂上付近ではせん断応力は殆どなくなるほど加速されているのが見られる。 $\theta_m=15^\circ$ の場合乱流量は粗度にあまり影響されていない。これらはRapid-distortion theoryの圧力勾配の影響で説明できる現象である²⁾。従って丘による u^2 の減少は w^2 の減少より大きくなっている。さらに $\theta_m=25^\circ$ の場合で、粗度の異なる結果について見れば粗度が大きい場合、 u^2 、 w^2 とも大きくなっているが、サンドペーパーのケースRF25の場合は丘下流で流れ方向の応力は大きくなっている。これは圧力勾配の効果が粗度により十分和らげられていないからと考えられる。図-8にプロットされているせん断応力の粗度高さによる変化は、 u^2 、 w^2 の変化に順じており、粗度により速度成分の相関は変わらないことを意味している。

近年境界近傍で対数則などの相似則の成り立たない複雑な乱流の計算で、壁面近傍の特性を取り入れた低レイノルズ数モデルが提唱され、粗面境界層にも応用されている(例えばZhang et al.¹³⁾)。これらのモデルでは壁垂直方向の乱れが壁接線方向成分に比べ大きく抑えられ、異方性が大きくなるという特性を利用しているが、本実験結果は粗面境界層では垂直方向乱れは滑面ほど抑えられていないことを示唆するもので、異方性を利用したモデリングでは不十分である事を意味する。境界が緩やかに変化する場合粗度と局所圧力勾配を考慮した相似則が有用になると考えられる。

4. 結論

複雑な形状粗度上の乱流境界層の特性、相似性を調べるため緩やかな勾配の孤立丘を過ぎる境界層を風洞実験により調べた。本実験のように緩やかな丘の場合、丘の起伏による圧力勾配の影響と表面粗度の影響は独立に働

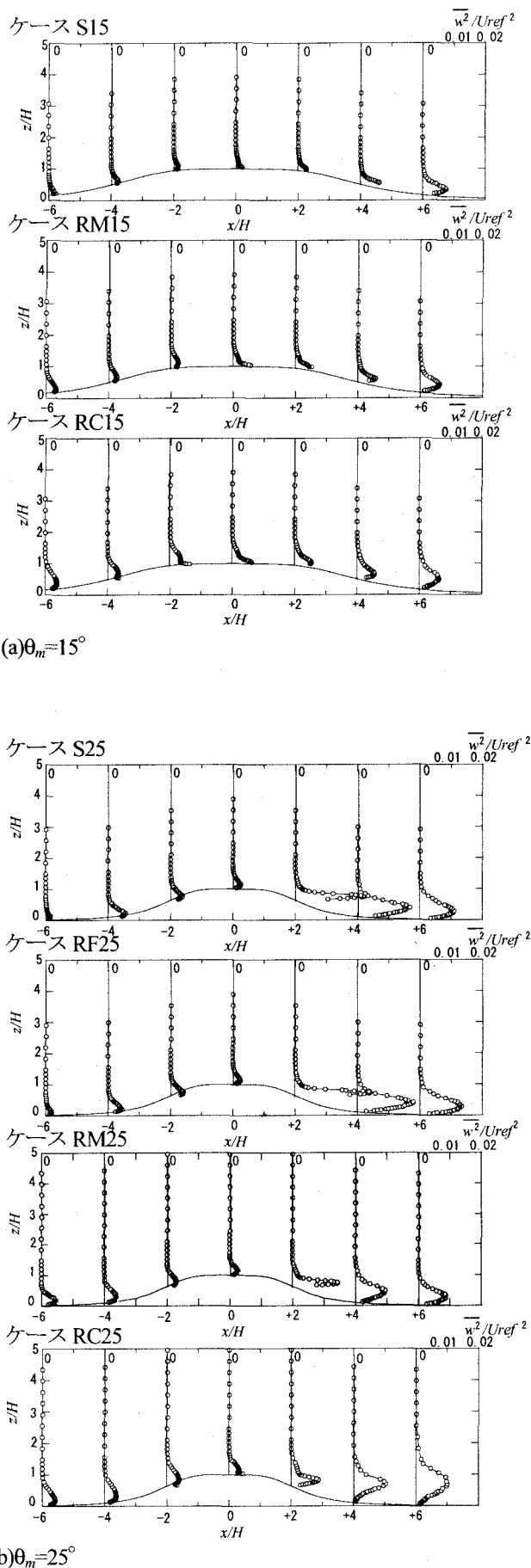
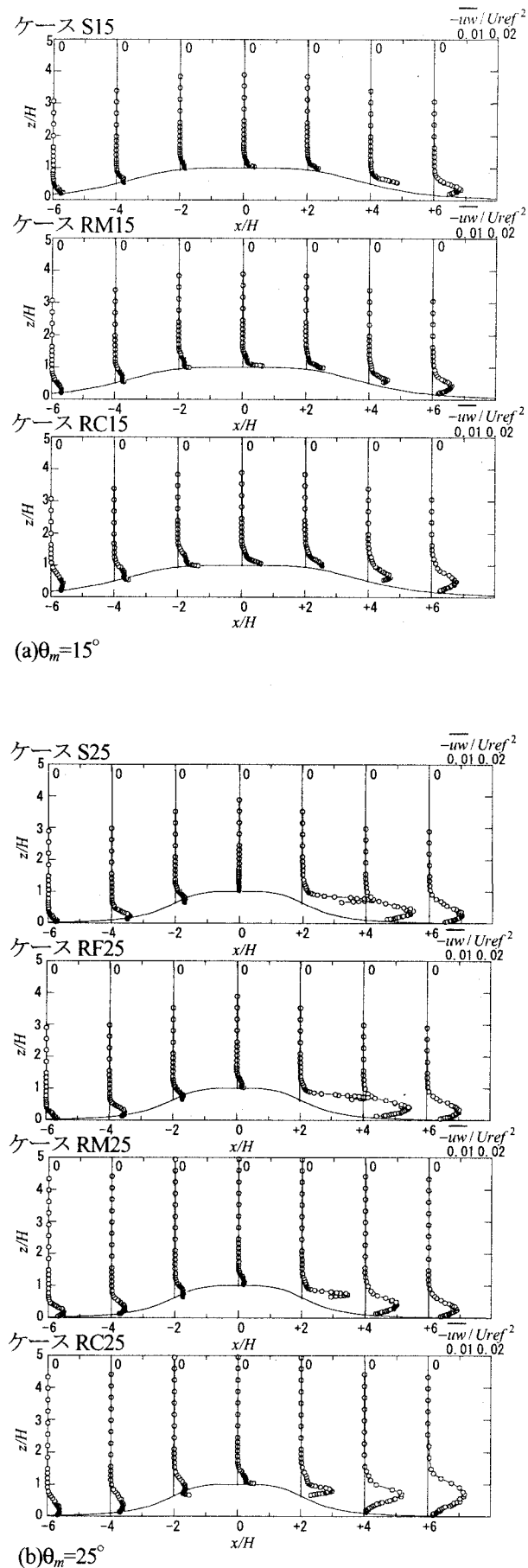


図-7 レイノルズ応力 $\overline{w^2} / U_{ref}^2$

くと考えてよい。すなわち粗度の影響は境界層内層で対数則全体を下方に移動させる。圧力勾配の影響は外層に現れ、加速領域では平均流速は対数則から下方にずれ、減速領域では上方にずれるような分布である。レイノルズ応力に関しては Rapid-distortion theory で説明できるような圧力勾配による影響と、粗度による乱れの増加と等方化の効果があり、粗面丘のように複合効果のある場合はこれらの重ね合わせて説明出来、計算モデルでも同様の扱いが出来ると考えられる。

参考文献

- 1) Taylor, P.A., Mason, P.J. and Bradley, E.F.: Boundary-layer flow over low hills, *Boundary-Layer Meteorol.* Vol.39, pp.107-132, 1987.
- 2) Hunt, J.C.R., Leibovich, S. and Richards, K.J.: Turbulent shear flows over low hills, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol.114, pp.1435-1470, 1988.
- 3) 鬼束幸樹・浦勝・秋山壽一郎・岡本智和・松岡定和：逆圧力勾配を有する開水路流に関する研究，土木学会論文集，No.558/II-38, pp.71-79, 1997.
- 4) 瀬津家久・鬼束幸樹・藤田正樹：順圧力勾配開水路流れの乱流構造，応用力学論文集，Vol.2, pp.619-626, 1999.
- 5) Baskaran, V., Smits, A.J. and Joubert, P.N.: A turbulent flow over a curved hill, *J. Fluid Mech.*, Vol.182, pp.47-83, 1987.
- 6) 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 pp.61-66, 1998.
- 7) 横田太作・中山昭彦：粗面境界層における圧力勾配と境界形状の影響，日本流体力学会年会 2000 講演論文集，pp.339-340, 2000
- 8) 向秀元・中村修・宮下康一・野田博・田村哲郎：複雑地形まわりの強風予測に関する系統的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.161-162, 1997.
- 9) Kobayashi, M.H., Pereira, J.C.F. and Siqueira, M.B.B.: Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2D hill, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol.53, pp.357-374, 1994.
- 10) Ferreira, A.D., Lopes, A.M.G., Viegas, D.X. and Sousa, A.C.M.: Experimental and numerical simulation of flows around two-dimensional hills, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.54-55, pp.173-181, 1995.
- 11) Coleman, H.W.:The accelerated fully rough turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol.82, pp.507-528, 1977.
- 12) Raupach, M.R., Antonia, R.A. and Rajagopalan, S.: Vol.44, pp.1-25, 1991..
- 13) Zhang, H., Faghri, M. and White, F.M.: Flow over smooth and rough surfaces, *J. Fluids Engng.*, Vol.18, pp.255-259, 1996.



図—8 レイノルズ応力 $-\overline{uw}/U_{ref}^2$
(2000. 10. 2 受付)