

風洞実験による山地気流特性の評価 Evaluation of Flow Characteristics over Mountain Topography by Wind-Tunnel Test

中山昭彦*・市成隼一*・長谷川 功**

by Akihiko NAKAYAMA, Junichi ICHINARI and Isamu Hasegawa

Turbulent flow on mountain topography has been investigated experimentally. Special emphasis has been placed on the flow characteristics near a large-scale embankment that is often necessitated in the construction of large facilities like aircraft landing strips in hilly areas, that are typical of large-scale development in Japan. Experiments using scale model of real topography and idealized escarpment model were conducted. It is found that the wind blowing towards the slope is accelerated, but the turbulence does not grow due to the speed-up. The quantitative effects depend on the scale of turbulence in the oncoming atmospheric boundary layer and supporting experiments were also conducted to examine the scale effects.

Keywords: Flow over topography, Atmospheric boundary layer, wind-tunnel experiment

1. はじめに

山岳地の多い本邦においては宅地、道路、空港などの用地は山地に造成される場合が多くなってきている。大規模な山の切り取りや盛り土などによる地形の改変を伴う場合、局地的風環境の変化が重要となる。とくに空港用地造成においては周辺地域の気流特性を予知する事は不可欠である。小規模な道路盛り土によっても局所風が加速されるのが良く知られている¹⁾が、大規模な斜面が建設される場合どういった変化が起こるかは予測出来にくい。特に我が国の山間部のような不規則地形に設けられる斜面の場合大規模な乱れがすでに存在しており問題は複雑である。

近年の計算流体力学の発達で数値シミュレーションも試みられているが、簡単な形状に理想化されたものについての計算にとどまっております^{2,3)}、広範囲にわたる地形上での流れの予測は不可能に近い。本研究では実際兵庫県に造成された空港周辺の山地地形模型を用いて風洞実験を行い、複雑地形内の斜面回りの乱流特性を調べた。実地形では多くの要素が作用し合うので、これに平行し、理想的台形斜面に乱れの大きい境界層が接近する場合についての実験も行い、理想的形状でスケール効果の乱流特性への影響も調べた。模型実験では実際の風特性の再現が難しく、レイノルズ数はどうしても小さくなり問題もあるが、温度、密度変化がない場合で、ある特定された条件での局地乱流特性は評価できると考えられる⁴⁾。本研究

* 正会員 Ph.D	神戸大学助教授	工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町)
*	神戸大学技官	工学部土地造成工学研究施設
**	三井建設研究員	三井建設株式会社技術研究所

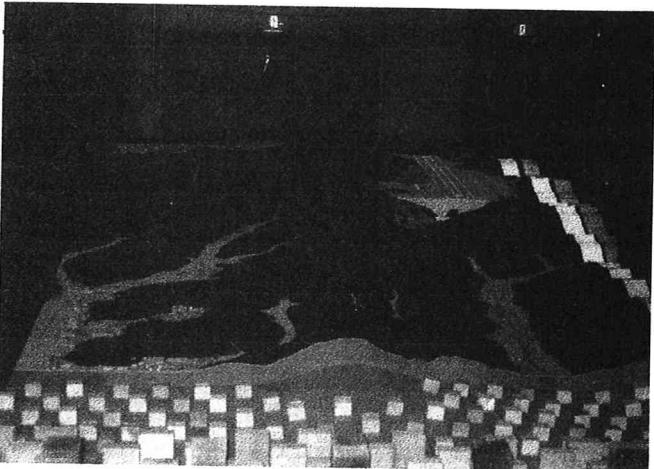
でも温度勾配、密度成層や地球の自転によるコリオリー力の影響も考慮にいけない。なお本実験の一部の予備結果は文献5)報告している。

2. 実験

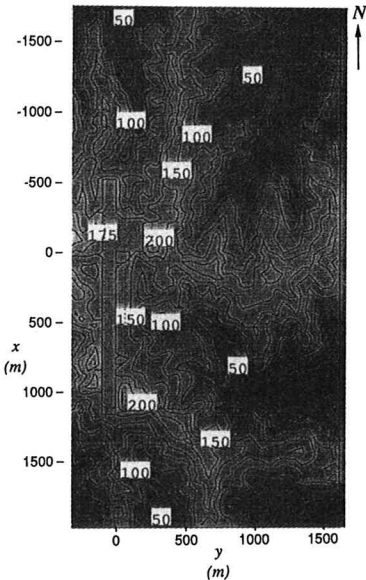
2. 1 実地形模型の風洞実験

実地形の模型についての実験は幅2.5m、高さ2.0mの測定部と15mの序走部をもつ大型吹き出し型境界層風洞で行われた。図ー1は風洞測定部に設置された地形模型の写真である。図ー2はその地形図で、風洞モデルの範囲を示す。模型の縮尺は1/900で実地形の2.25km x 6kmの領域を包括する。モデル中央部左側に空港滑走路にあたる長さ約1200mの平坦部分があり、その東側に写真では見難いが、高さ75mの大規模法面がある。また滑走路両端にも法面が存在する。この地域は海拔200mから400mの山並が続いており滑走路面は標高175mに位置する。険しくはないが、山地地形のため境界層も厚く、乱れも平坦地に比べ非常に大きい。生成された大気境界層の鉛直平均風速分布が模型の上流端にあたる地点で現地観測結果に合うよう、高さ1mの境界層生成用スパイヤー、25cm x 10cm x 5cmの大粗度ブロックと5cm立方の小ブロックの組み合わせが設置された。小型ブロックは風洞序走部から地形モデル部に移る部分に置かれ、おもに床面近傍での流速と乱れを模擬している。

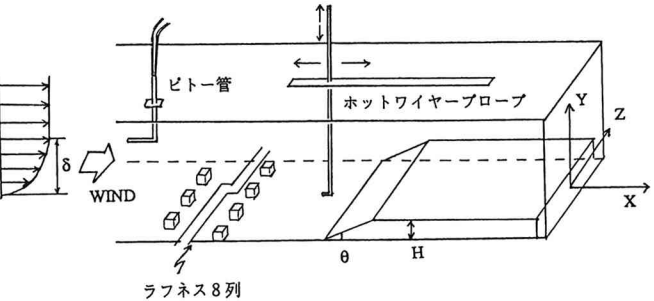
測定は北風、東風および南風の3方向についてモデルのほぼ全体にわたって行われた。風向が東の場合



図ー1 大型風洞での地形模型



図ー2 地形模型の地形図



図ー3 小型風洞での台形模型実験

表ー1 台形模型測定条件

	ケース1'	ケース2
θ	30度	30度
H	8 _{cm}	8 _{cm}
境界層厚さ δ	約20 _{cm}	約10 _{cm}
δ/H	2.50	1.25
壁面粗度 Z_0	0.225	0.119
Z_0/H	0.028	0.015
摩擦速度 $U\tau$	0.088	0.095
α	1/2.9	1/2.7

はこの模型を90度回転させるので測定範囲は中央の正方形部分のみである。平均流速はサーミスター流速計で計測され、瞬時速度は3成分定温型熱線流速計で行われた。プローブは測定部天井に設置された3次元トラバースにより移動させた。瞬時信号は1KHzの周期でサンプルし、一点で総数120,000のサンプルを実時間デジタル変換し、磁気ディスクに記録し、測定後平均流速、乱流強度、スペクトル等が算定された。斜面近辺の詳細はプローブサイズの小さい2次元ホットワイヤプローブで計測された。測定時の風速は、高度1200mの上空（模型では1.3mの高さ）にあたる位置で10m/sの一定値に保たれたが、この上空風速 Q_0 と境界層厚を基にしたレイノルズ数は 7.0×10^5 で、75mの法面高を基にすれば 4.4×10^4 である。x, y 座標はそれぞれ南、東向けに正にとられ、原点は図に示してある。z は鉛直距離である。x,y,z 方向の速度成分は u,v,w で表わす。

2. 2 理想斜面模型の風洞実験

理想斜面モデルの実験は50cm×50cmの小型吹き出し型風洞で行われた。この実験ではスパイヤーは用いず大きさの異なる立方体粗度を用い、ことなる境界層厚を生成し、高さ8m斜辺角度30度の台形斜面モデル回りの乱流測定を2ケース行った（図-3、表-1）。平均流速はピトー管で、瞬時速度は2次元熱線プローブで行い、データサンプリング、解析は大型風洞と同様の方法で行われた。何れの場合も測定は Q_0 が2m/secで行われ、境界層厚はケース1で20cm、ケース2で10cmであった。台形高さをもとにしたレイノルズ数は 1.4×10^4 で地形模型実験の約1/4である。座標 (x,y,z)は図のように定義する。

3. 実験結果

3.1 実地形模型実験の結果

この実験は実際の風特性を模擬するためアプローチフローは実測と合わせてある。図-4は冬季卓越する風速10m/sの北風時の平均流速分布と風洞で生成した大気境界層の平均風速分布の比較である。平均風速分布のべき乗則近似では現地計測の1/3乗もの大きい勾配をもち、境界層は約1000m程度（模型の縮尺で1m）となっている。図-5は乱れ成分のスペクトルである。 S_u, S_v, S_w はそれぞれ u, v, w のパワースペクトルで、n は波数である。スペクトルは波数 $n/U > 4$ (1/m) で -5/3乗則が見てとれる。これより速度相関係数 $R_{ij} = \overline{u(x,y,z)u(x+r,y,z)}$ の積分

$$L_{ij} = \int_0^\infty R_{ij}(r) dr$$

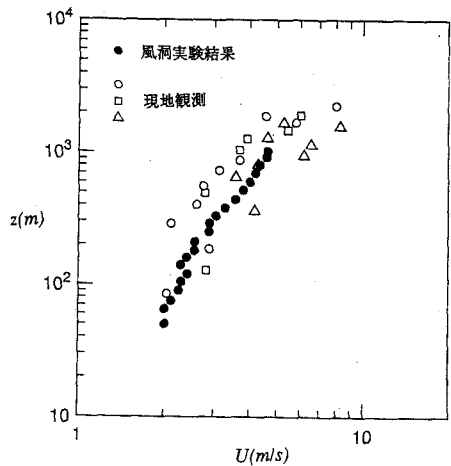


図-4 平均風速の鉛直分布

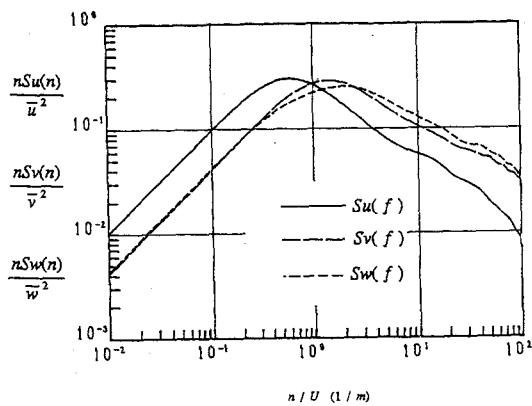
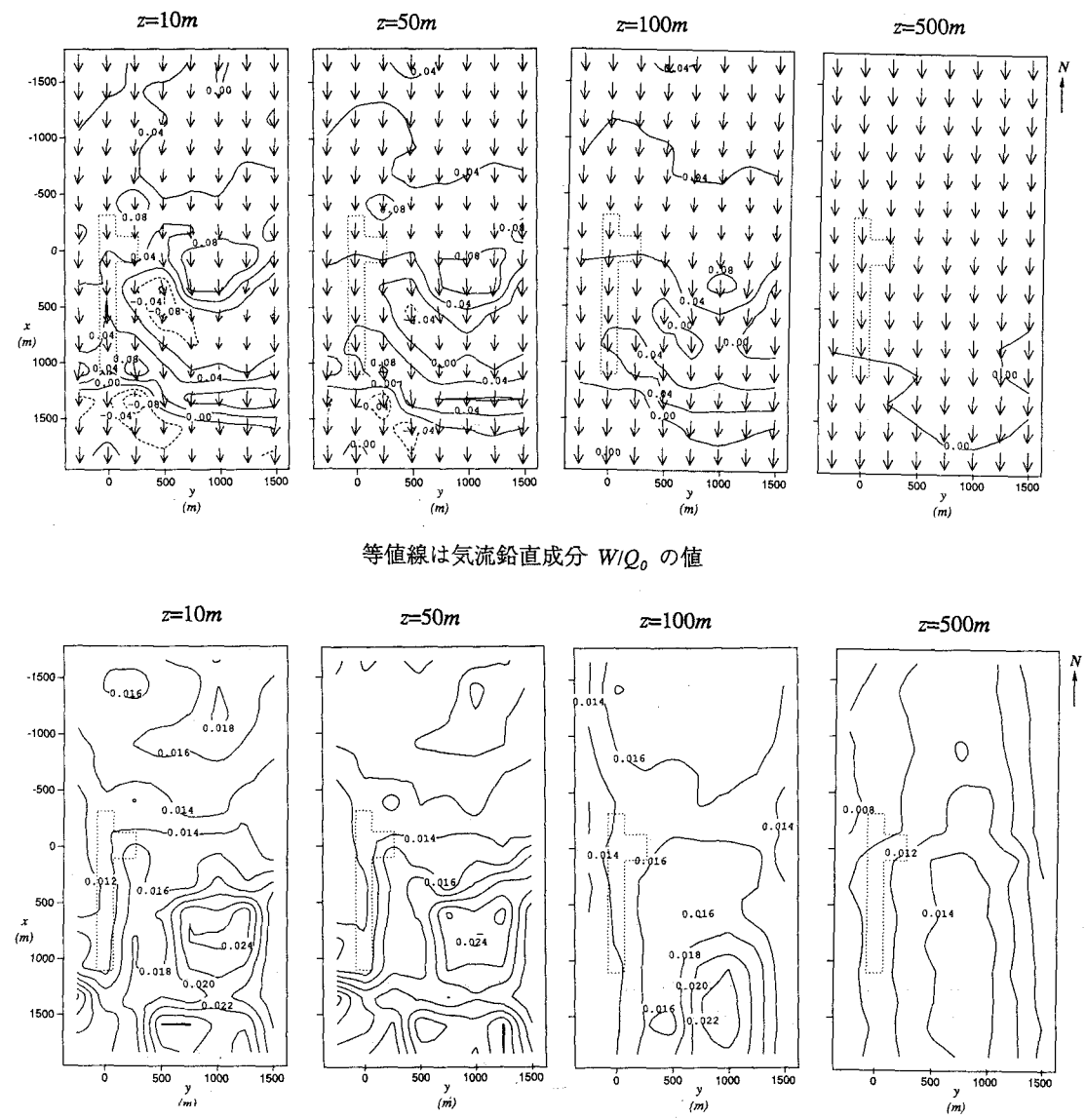


図-5 変動速度パワースペクトル

で定義される積分長さスケールは模型の縮尺で $L_{11}=0.24m$ 、 $L_{22}=0.10m$ 、 $L_{33}=0.10m$ であった。これらのスケールは乱流渦の最も大きいものにあたり、注目の斜面高さに匹敵する。



図－6 北風時模型全域にわたる平均風速分布

図一6に北風時の模型全域にわたる平均風速及び乱流エネルギー分布を示す。上段の図では水平風速成分を上空の風速 Q_0 で無次元化したものを、滑走路面（破線で表示されている）を基準にそれぞれ高度 $z=10m$ 、 $50m$ 、 $100m$ 、 $500m$ の4つ高度の水平面内でベクトル表示したものである。風速の鉛直成分は正（上昇流）の部分は実線、負の部分は破線の等値線で表されている。平均流は上空の風向とほぼ一致しているが、風向に平行な大規模盛土斜面上では谷底方向に向かっている。一般に高度50m以下で山の風上側で上昇、風下側で下降流になっているが50m以上では下降流は殆どみられず500mの上空ではほぼ水平になっている。下段の図は乱流エネルギーを Q_0^2 で無次元化したものを等値線で表わしている。一般に谷が広がった地域で乱れが低く山峯とその下流側では大きくなっている。これは後流渦のためと考えられる。

次に図-7に斜面（破線の滑走路部のすぐ東側）に直面する東風時の平均風速と乱流エネルギーの分布が示されてある。高度は $z=10m$ 、 $20m$ 、 $50m$ 及び $100m$ である。この場合鉛直成分風速は全て正で上昇流である。斜面上では周囲に比べ速度は低いが流速ベクトルが広がっているのが分かる。乱れエネルギーは斜面に近い部分でその他の領域より低くなっている。これは加速のためその他の原因かは判断し難い。

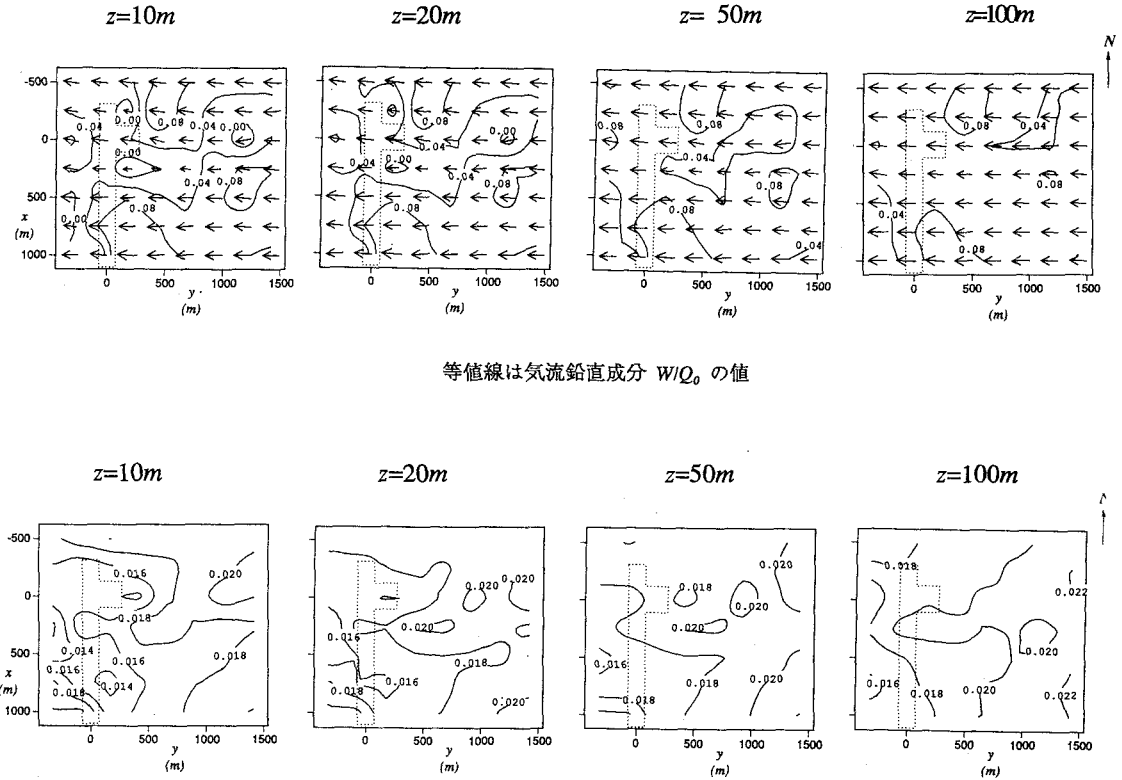


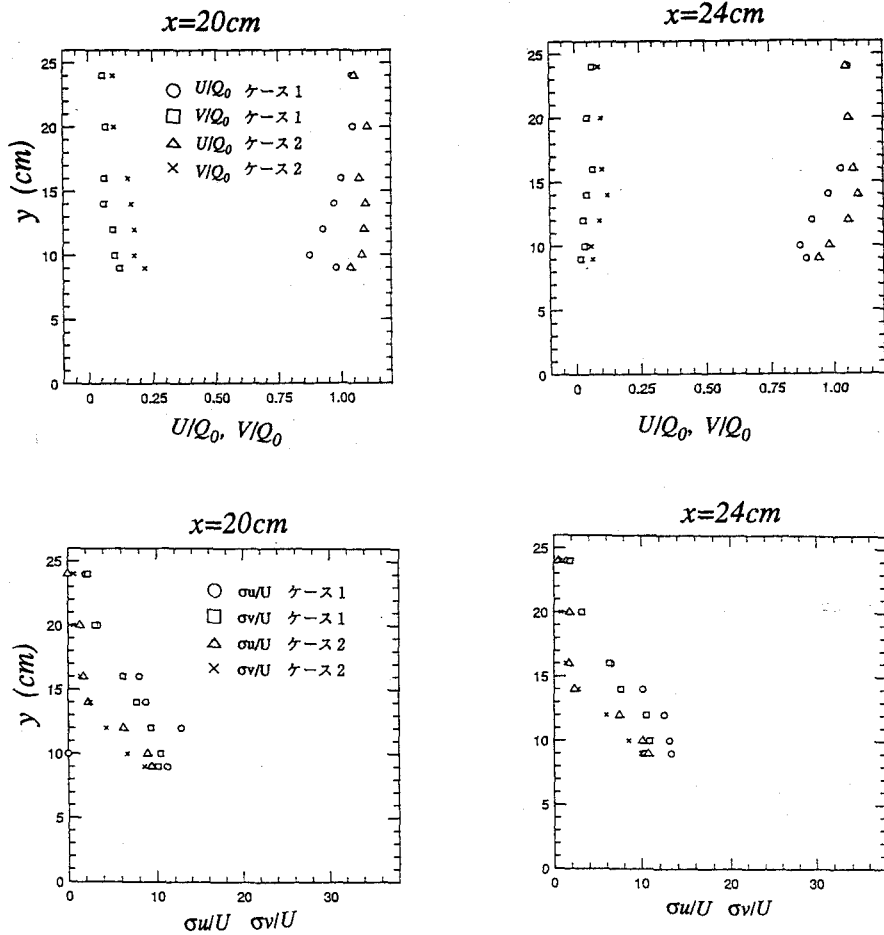
図-7 東風時斜面付近の平均風速分布及び乱流エネルギー分布

3.2 台形モデル実験結果

図-8は台形模型についての二つのケースの平均流速場と乱れ強度分布の結果を示す。平均風速分布は両方とも良く似た分布をしているが、境界層厚の薄い場合、すなわち斜面の規模が接近する境界層の厚さに比べ大きい場合には、斜面上端で非常に小さいが剥離していると思われる。また加速の度合もかなり大きい。これは小規模斜面のデータ（例えば文献6）の場合に比べ大きくなっている。乱れ強度プロファイルは大きく違い、乱流強度は当然ながらケース1の場合がケース2に比べかなり大きくなっているのが見てとれる。

4. おわりに

本研究では実際の山地地形にある大規模斜面近辺におけるにおける気流、とくに乱れの場合を風洞実験で調べた。斜面に向かう風向きの場合、小規模盛土近辺にみられるスピードアップが見られたが周囲の山並みのため乱れが大きく、運動量輸送が大きいため加速効果は小さく表れる。乱れ強度も低下の現象が見られる。まわりの状況にもよるが、単純化した台形モデルの実験結果より、接近する境界層が厚く乱れの長さスケールが斜面高さに比べ大きいとき、スピードアップ現象は和らげられることが確認された。最後にな



図－8 台形モデル周辺での平均風速と乱れ強度分布

るが模型実験でのレイノルズ数は実物のそれに比べ2桁から3桁低い。従って小スケール乱れは粘性に影響されていることはデータの解釈で注意を要する。

参考文献

- 1) 光田、山田、堀口、樋口：小地形上での気流の数値シミュレーション、京都大学防災研究所年報第32号No.32B,p.389,1989.1)
- 2) Bergstrom, D.J. and K.M. Boucher: Numerical study of wind flow over an elevated roadway, First International Symposium on Computational Wind Engineering, 11-4,1992.
- 3) Paterson, D.A. and Holmes, J.D., Computation of wind flow over topography, *J. of Wind Engineering*, No.52, pp.142-147, 1992.
- 4) 加藤、花房：大気乱流の風洞実験、第26回乱流シンポジウム講演論文集、PP.230-233, 1994.
- 5) 中山、長谷川、野田：地形模型をもちいた風洞実験による山地気流特性の評価、土木学会第48回年次学術講演会、I-369, 1993.
- 6) 亀井、丸田、牧野：崖及び傾斜地の鉛直速度分布に与える影響に関する風洞実験、日本建築学会全国大会論文概要集、pp.2381-2382, 1983.