

## 3次元孤立峰を越える乱流場に関する風洞実験 A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional hill

孟 岩<sup>\*1)</sup> 日比一喜<sup>\*2)</sup>  
Yan MENG Kazuki HIBI

1. はじめに 複雑地形周り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、森林や農作物の風害等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孤立峰である。孤立峰を越える乱流境界層の性質については過去20年間において盛んに研究されてきた。しかし、急な斜面をもつ3次元孤立峰周りの流れ場については、定量的なデータが少ないため、流れ場の平均分布とその乱流構造に関する知見が十分に得られていない<sup>1)</sup>。そこで、本研究では、逆流を検出できるスプリットファイバープローブを用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれたモデル3次元孤立峰における各速度成分の平均値及びその標準偏差を調べるとともに、3次元孤立峰の後流域の乱流構造を明らかにする。

2. 実験概要 実験は清水建設(株)技術研究所の小型回流式風洞を用いて行った。実験に用いられているモデル山は高さ(h)4cm、底面直径20cmの円形木製山であり、山の断面形状は余弦の2乗となっている。モデルは測定部入り口より風下方向4.6mの所に設置された。x、y、z軸をそれぞれ流れ方向、流れ直角方向、鉛直方向にとり、x、y、z方向の速度成分はu、v、wとする。また山の表面からの高さを鉛直座標z(=z-z<sub>n</sub>(x,y))で表し、z<sub>n</sub>(x,y)は山の表面を表す関数である。本研究では、一定高さの乱流境界層を得るため、高さ60mmの立方体を千鳥状に風洞の入り口に2列設置し、その背後に高さ20mmと10mmの立方体を入り口より下流側1.2mまで設置した。Fig.1はモデル山を設置する位置での平均速度と乱れの鉛直分布を示したものである。図中の実線はべき則により求めた曲線で、べき指数nは約0.135である。乱流境界層高さδは360mmであり、山の高さの約9倍となっている。また、流れ方向の速度成分の積分スケールにより推定された乱流境界層のスケールは実大気の約1/1000である。一般に山の後流域の流れ場は、3次元性が強い上、乱れも大きい。場合によって剥離に伴う逆流も生じている。そこで、本研究では、逆流を検出できるSplit-fiberプローブを用いた。Split-fiberプローブは、温度補償付きの定温度型熱線風速計に接続されており、風速計からの出力は、0.5msの間隔でA-D変換を行った。ローパスフィルタのカットオフ周波数は1KHzである。安定した統計量を得るために、平均時間を60秒とした。また比較のため、X-wireプローブも用いた。風洞風速は5.8m/sに設定した。

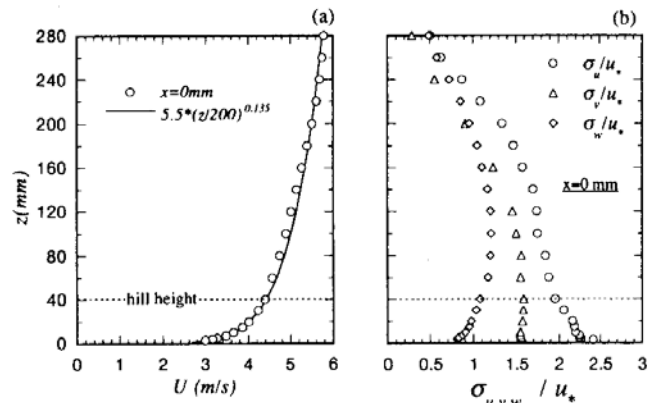


Fig.1 Vertical profiles of mean velocity and normal stresses over the flat floor.

3. 実験結果 3.1 平均速度場 Fig.2には山の中心断面内(y=0)における平均速度のベクトルを示す。平均流れは山の登り斜面で上昇し、下り斜面で下降する。更に、山の背後でははっきりした剥離域が見られる。この剥離は、山の頂上に近い背面の位置で発生し、山の麓で再附着する。図中の点線は流れ方向の速度成分が0となる位置を示している。Fig.3には山の中心断面内(y=0)における平均速度成分Uの鉛直分布を示す。図中の白丸はSplit-fiberプローブの測定結果で、×印はX-wireプローブによるものである。山の後流域における平均速度成分Uについては、X-wireプローブによる測定値はSplit-fiberプローブの測定結果より大きくなっていることが分かる。これは後流域での流れが間欠的に逆流していることによるものである。山の中心軸から風下5hを離れると、両者の差はかなり小さくなる。図中の点線は元の乱流境界層における平均速度の鉛直分布(山の中心軸位置での測定値)を示している。山による平均速度場への影響は山高さの約3倍以下の範囲において顕著である。平均速度成分Uは山の風上側の麓で減少し、山の頂上で増大する。また、山の風下側では、平均速度の欠損が山高さ以下の範囲に顕著に見られる。

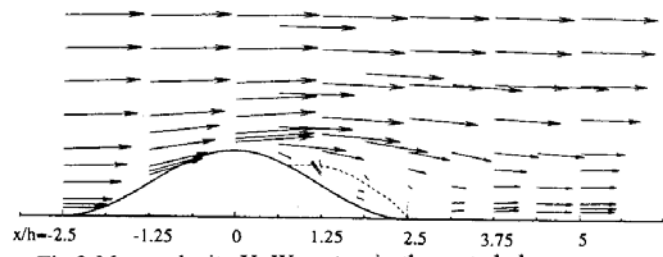


Fig.2 Mean velocity U, W vectors in the central plane.

\*1) 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博 \*2) 同 主席研究員 工博  
Institute of Technology, SHIMIZU Corporation

山による平均速度場への影響を表すパラメータとしては、増速率 $S = U(z)/U_0(z)$ がよく用いられている。 $U_0(z)$ は元の乱流境界層における平均速度である。Fig.4には増速率 $S$ の鉛直分布を示す。山の中心断面における速度比は風上側の麓では1より小さくなるが、側面の麓では1より大きくなっている。風上側の麓での速度の減少は山の前面で圧力が高くなっていることによるものであり、その影響は風速の小さい壁面付近で顕著に現れている。速度比の最も大きい場所は山の頂上で、その値は1.5となっている。このことは、山の頂上での平均速度は上流速度の1.5倍となっていることを意味する。このような風速の増大は山の頂上だけではなく、山の側面にある斜面の中間地点にも見られ、その値は壁面付近において山の頂上の値とほぼ同じである。この速度の増大は2次元地形の実験結果を基に作成したモデルから予測することができず、3次元地形の特有な現象と言える。

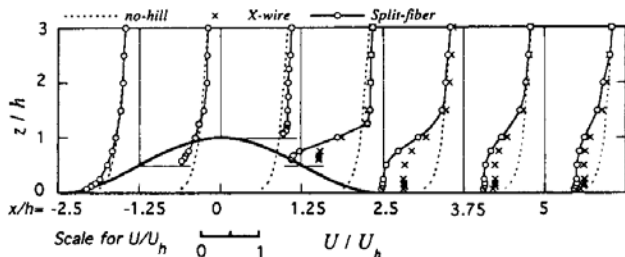


Fig.3 Vertical profiles of mean velocity in the central plane.

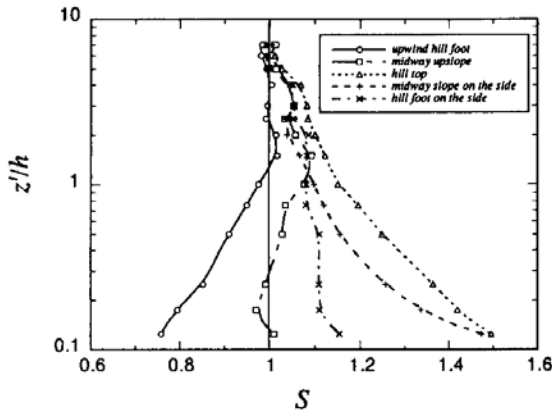


Fig.4 Vertical profiles of the speed-up factor at various positions.

**3.2 変動速度の標準偏差** 3次元孤立峰を越える乱流場については、風上斜面と風下斜面と大きく異なる。風上斜面では、3次元孤立峰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表すことができるが、風下斜面では孤立峰の背後に流れの剥離が発生し、元の乱流境界層とまったく異なる性質をもつ3次元複雑乱流場が形成される。これまでに、急な傾斜をもつ3次元孤立峰を越える乱流場を定量的に調べた研究例<sup>3)</sup>が少なく、孤立峰の後流域の乱流構造については殆ど明らかにされていない。Fig.5には山の中心断面内 ( $y=0$ ) における3つの速度成分の標準偏差の鉛直分布を示す。平均速度と同様に、乱れについてもX-wireプローブによる測定結果はSplit-fiberプローブの結果と大きく異なる。特にX-wireプローブは鉛直とスパン方向

の乱れを過小評価する傾向がある。山の風上斜面では、 $\sigma_u$ と $\sigma_v$ が山表面付近において若干増大するが、 $\sigma_w$ については大きな変化が見られない。一方、山の風下斜面では、流れの剥離に伴い大きな乱れが発生し、 $x/h=1.25$ の位置において3つの変動速度の標準偏差の分布とともに $z/h=1$ の高さで鋭いピークが見られる。一方、山の下流側では $\sigma_u$ と $\sigma_w$ の鉛直分布にまたはっきりしたピークが見られるが、ピーク位置は $\sigma_u$ が $1h$ の高さで見られるのに対して、 $\sigma_w$ が $0.5h$ の高さで見られる。最も特徴的なことは、壁面近傍でスパン方向の変動速度の標準偏差 $\sigma_v$ の分布にもう一つのピークが現れている点と、そこでの $\sigma_u$ の値がほぼ一様になっている点である。この $\sigma_v$ のピークは典型的な2次元後流<sup>6)7)</sup>で全く見られず、3次元後流の特有な現象と言える。実際、3次元孤立峰の後流域では、山の背面からの剥離流以外に、山を回り込む流れも存在している。壁面近傍での $\sigma_v$ のピークは山を回り込む流れによって作られていると考えられる。

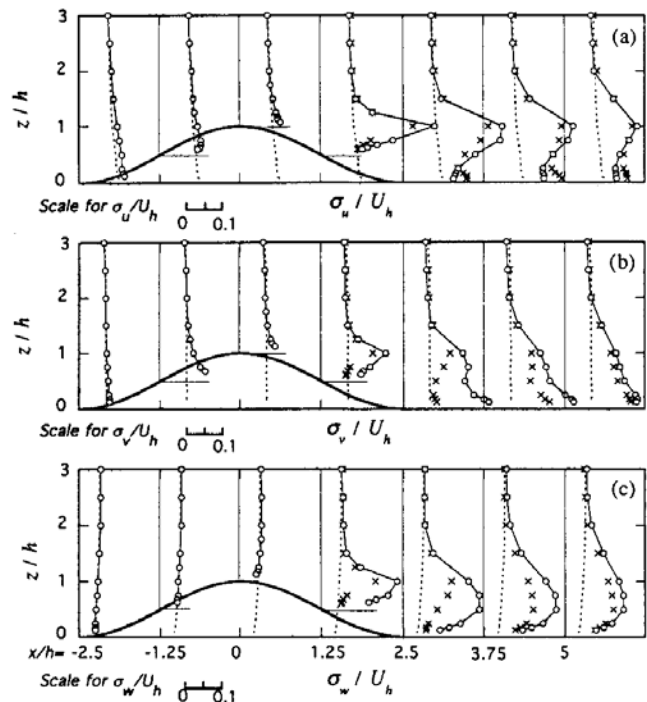


Fig.5 Vertical profiles of normal stresses in the central plane.

**4. まとめ** 本研究では、自然風を模擬した乱流境界層に置かれたモデル3次元孤立峰における各速度成分の平均値及びその標準偏差をSplit-fiberプローブにより調べ、3次元孤立峰周りの平均速度分布及びその後流域での乱流構造を明らかにした。

**参考文献** 1) Bradley E.F., Q. J. R. Meteo. Soc., 106, 1980, pp. 101-124. 2) Mason P.J. and King J.C., Q. J. R. Meteo. Soc., 111, 1985, pp.617-640. 3) Castro I.P. and Snyder W.H., Atmos. Environ. 16, 1982, pp.1869-1887. 4) Arya S.P.S. and Gadiyaram P.S., Atmos. Environ. 20, 1986, pp.729-740. 5) Gong W. and Ibbetson A., Boundary-Layer Meteo., 49, 1989, pp.113-148. 6) Castro, I. P. and Haque, A., J. Fluid Mech., 179, 1987, pp. 439-468. 7) 伊藤信明, 笠木信英, 流れの可視化, 9, No. 34, 1989, pp. 245-248.