



論

文



風洞実験による2山地形周りの乱流特性に関する検討

A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow over Double Steep Hills

南 浩二^{*1} 老川 進^{*2} 服部康男^{*3} 漆原育男^{*4}

Koji MINAMI, Susumu OIKAWA, Yasuo HATTORI, Ikuo URUSHIHARA

石原 孟^{*5} 中村秀治^{*6} 田中伸和^{*3}

Takeshi ISHIHARA, Hideharu NAKAMURA, Nobukazu TANAKA

SUMMARY

The effect of two- and three-dimensional double steep hills on the mean velocity and turbulent characteristics of a boundary-layer were investigated in a wind tunnel. The mean flow and turbulence were measured using split-fiber probes designed for measuring flows with high turbulence and separation. The results were as follows:

- 1) Profiles of mean velocity and the standard deviation of the fluctuating velocity components above an upwind hill for continuous two- and three-dimensional hills were similar to those of the single hill.
- 2) The mean velocity data at a downwind hilltop for continuous two- and three-dimensional hills had lower values compared to that of upwind hilltop data. However, the standard deviation of fluctuating velocity components on the downwind hilltop data was higher than the values of the upwind hilltop data.
- 3) The reattachment behind downwind hill for continuous two- and three-dimensional hills was smaller than that of the single hill.
- 4) Velocity variance on downwind hilltop was greatly influenced by the distance between the double hill. The perturbation increased with the distance and the maximum perturbation in two-dimensional hills occurred beyond 12-15 hill heights, because of vortex shedding by upwind hill.

Key word: double steep hill, two- and three-dimensional hill, separation, turbulent characteristic, wind tunnel test.

*1 九州電力株式会社
Kyushu Electric Power Company

*2 清水建設(株)技術研究所
Shimizu Corporation

*3 (財)電力中央研究所我孫子研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

(原稿受理:平成14年11月5日)

*4 四国電力株式会社
Shikoku Electric Power Company

*5 東京大学 工学系研究科 助教授
University of Tokyo

*6 広島大学大学院 工学研究科
Hiroshima University

1. はじめに

1991年9月に発生した台風19号は、その勢力の強さに加えて、日本列島を縦断する進路となったため、とりわけ西日本地域において電力設備に著しい被害をもたらした。特に、送配電設備の被害は甚大であったため、台風被害の原因の究明および局地的な風に対する今後の対応策について検討がなされた¹⁾。送電鉄塔・架渉線のように山岳部の尾根の上、海岸周辺の急斜面や岬など風の増速が予想される地域に建設される構造物の設計の際には、複雑な地形影響を受けた強風の特徴を定量的に把握し、風荷重の評価に反映させることが重要である。

山を越える乱流境界層については過去20年以上にわたって研究が行われてきた。その研究成果はTaylorら²⁾、Finnigan³⁾およびKaimal and Finnigan⁴⁾によりレビューされている。急峻な山を越える流れ場は、ゆるやかな傾斜をもつ山と異なり山背後では流れがはく離し逆流域を形成する。こうした場では流れの非線形性が強く、緩やかな山と異なり線形的な評価方法では推定できない⁵⁾。そのため複雑地形の流れ場の予測には数値解析の手法が有効と思われる。しかしながら数値解析で得られた結果を検証するデータは十分ではない。これは逆流を伴う流れ場の計測に風洞実験で用いられている通常の熱線風速計が適用できないことが一因となっている⁴⁾。

これまでの山地形での多くの研究^{5)~15)}は1つ山を対象に行われており、流れ場が複雑となる2つの山が連なった場を対象としたものは限られている^{9), 11), 12)}。Duraóら⁹⁾は3次元山模型を用いて、またAlmeidaら¹¹⁾は2次元山模型を用いて2つの連続した山地形周囲の計測を行っている。これらの流入条件はいずれもダクトの流れ場であり実際の気境界層を模擬していない。またKimら¹²⁾は境界層を模擬した流れ場に2つの連続した2次元山の山高さを変化させた風洞実験を行っているが、通常のX型プローブを用いた熱線風速計を使用したためはく離域で逆流が形成される領域は計測されていない。これまでの研究では気境界層を模擬した流れ場にて2つの連続山周囲を対象とした乱流計測の例はほとんどないといえる。

本研究は、数値解析の検証データを得ることを目的とし、2つの連続した2次元山と3次元山周囲の乱流特性および2つの連続した山間の距離変化が乱流特性に与える影響等を逆流域の計測が可能なスプリットファイバープローブを用いて気境界層を模擬した風洞にて明らかにしたものである。

2. 実験概要

2.1 風洞と模型

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。測定部の長さは5.4m、測定断面の高さと幅はそれぞれ0.9mと1.1mである。流れ場の縮尺は1/1000の気境界層とした。毛足長さ5mmの人工芝を風洞床部に設置し日本建築学会指針¹⁶⁾の粗度区分IIIに相当する流れ場を形成した(風上流入条件の詳細は文献13)を参照されたい)。本実験では2次元山模型と3次元山模型の2種類の模型を用いた。2次元山を対象とした実験では、余弦の2乗の断面をもち山の底面直径200mm、山頂部の高さが40mmと60mmである2つの山模型を組み合わせた。3次元山を対象とした実験では、余弦の2乗の断面をもち底面直径200mm、高さ40mmの2つの山模型を組み合わせた。流入風速は床からの高さ400mmの位置で6m/sとした。このとき、粗度レイノルズ数は6.4であり空気力学的に完全粗面として取り扱うことができる¹³⁾。別途、入力風速を10m/sとした実験も行い、実験結果がレイノルズ数に依存しないことを確認した。本実験に用いた座標系をFig.1およびFig.2に示す。座標x, y, zは各々流れ方向、風向直角方向、鉛直方向を表し、各々の平均速度成分をU, V, Wで、速度成分の変動量の標準偏差を σ_u , σ_v , σ_w で表す。また、山表面からの高さは第2の鉛直軸z'で表す。

2.2 実験ケース

2次元山の実験(Photo 1)では風上側の山(M1山)とその下流側の山(M2山)を2つ組み合わせた。CaseAでは風上のM1山と下流のM2山の高さを同一とした模型を、CaseBではM2山高さをM1山高さの1.5倍にした模型を用いた。また、2つの山間の距離を変化させたケースを各々CaseA₁~CaseA₄およびCaseB₁~CaseB₄で表す(Table 1)。3次元山を対象とした実験(Photo 2)では、風上側のM1山と下流のM2山の2つの山を主流方向に並べたCaseCと、風上のM1山を半径分ほど流れ直交方向にずらしたCaseDの2ケースについて行った(Table 2)。また、本実験の2次元山および3次元山と孤立山との結果を比較する時には文献13)の実験結果を用いた。

2.3 測定方法

流れの計測は、逆流を検出できるスプリットファイバープローブ(55R55, 55R57; DANTEC)を用いた。

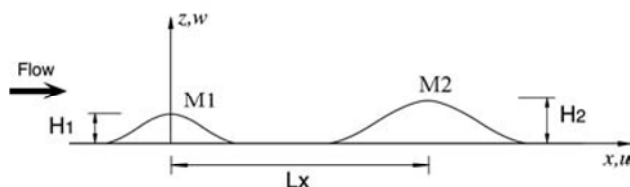


Fig. 1 2次元山模型配置図
(Arrangement of two-dimensional hills experiment)

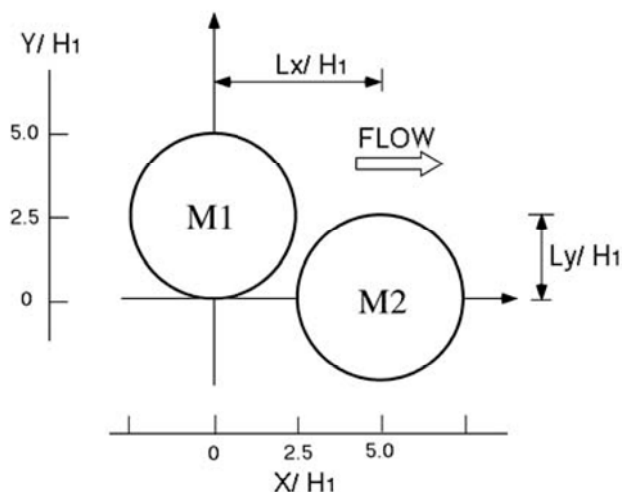


Fig. 2 3次元山模型配置図
(Arrangement of three-dimensional hills experiment)

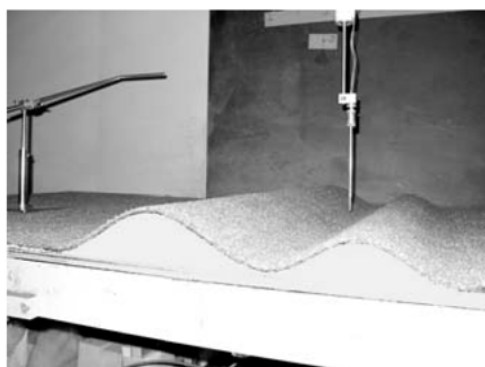


Photo 1 2次元山の実験状況
(Photographic view of two-dimensional hills experiment)



Photo 2 3次元山の実験状況
(Photographic view of three-dimensional hills experiment)

Table 1 2次元山実験ケース
(Experimental cases for two-dimensional hills)

実験ケース	H_2/H_1	Lx/H_1
CaseA ₀	1.0	5.0
CaseA ₁	1.0	7.5
CaseA ₂	1.0	10.0
CaseA ₃	1.0	12.5
CaseA ₄	1.0	15.0
CaseB ₀	1.5	6.25
CaseB ₁	1.5	8.75
CaseB ₂	1.5	11.25
CaseB ₃	1.5	13.75
CaseB ₄	1.5	16.25

Table 2 3次元山実験ケース
(Experimental cases for three-dimensional hills)

実験ケース	H_2/H_1	Lx/H_1	Ly/H_1
CaseC	1.0	5.0	0.0
CaseD	1.0	5.0	2.5

プローブは温度補償付き定温度型熱線風速計(56C System ; DANTEC)に接続し、サンプリング間隔を 1ms にて計測した(ローパスフィルタのカットオフ周波数を 450Hz に設定)。また、各速度成分の平均値とその標準偏差の平均化時間を 60 秒とした。熱線風速計の較正には基準風速にピトー管を用い、低流速域(0.2~1m/s 未満)では、放出した煙の移動時間をもとに較正した低風速計を基準とした。測定点は、鉛直方向に 16~19 点とし、2次元山を対象とした実験では u, w の 2 成分を、3次元山を対象とした実験では u, v, w の 3 成分の流速を測定した。

3. 2次元山の実験結果

3.1 平均速度と乱れの特性格(CaseA₀)

Fig.3 には 2次元山 Case A₀における中心断面($y=0$)の平均速度成分 U, W および変動速度成分の標準偏差 σ_u, σ_w の鉛直分布を示す。各データは境界層外縁の速度 U_{ref} により無次元化した。風上側の M1 山の平均速度 U において(Fig.3a), 山頂部で大きく増速し山の背後では流れのはく離に伴い逆流域が形成されている。その再付着点は $X/H_1=3.8$ 付近であり M2 山の山頂位置におよぶ。また、風下側の M2 山山頂位置および山頂の速度は、M1 山の後流の影響を受け M1 山のそれらより小さい。M2 背後においても逆流域が形成され、その再付着点は $X/H_1 = 10.0$ 付近にある。M2 山頂位置を

基準にこの再付着点位置を表すと 5.0 に相当し 2 次元孤立山の再付着点座標 6.4 よりも短い。平均速度 W (Fig.3b)はM1 山のり斜面で流れの上昇とともに正(上昇流)となり, M1 山のり斜面では負(下降流)となる。その影響は M2 山のり斜面中腹におよぶ。

速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.3c)において, M1 山風下斜面には大きな乱れが形成されている。そのピーク高さは $z/H_1=1.25$ 付近にあり M2 山のり斜面に続いている。M2 山の風下斜面においても大きな乱れが形成されている。ピーク高さは山高さ $z/H_1=1.0$ 付近にあり, そのピーク高さを保ちながら風下へ推移している。速度変動の標準偏差 σ_w (Fig.3d)は σ_u と同様に $z/H_1=1.2$ 付近にピークをもつが, M2 山から風下に行くにしたがいブロードなピークとなりピーク高さが低下している。

Fig.4 には 2 次元山 Case A₀ における M1 山 (○印)

と M2 山 (△印) の各々の山頂($X/H_1=0$ と 5.0)および風下麓($X/H_1=2.5$ と 7.5)の平均速度成分 U , W および σ_u , σ_w の鉛直分布の比較を示す。各図の縦軸は山表面からの高さ z/H_1 を表した。図中にはあわせて 2 次元孤立山のデータ(×印)を示した。平均速度 U (Fig.4a)において, 山頂では M1 山の後流の影響を受け M2 山の速度が低下している。風下麓の M2 山背後に形成される逆流は M1 山よりも弱い。また, 孤立山(×印)と風上側に位置する M1 山の値は山頂, 風下麓とも概ね一致する。平均速度 W (Fig.4b)において, 山頂では M1 山の表面からやや離れた高さに上昇流が形成されている。一方, M2 山の山頂では M1 山とは異なり上昇流は生じていない。風下麓の $z/H_1=1.25$ 以下の高さでは M1 山と M2 山の値に顕著な差がない。平均速度 W においても各ラインにおいて孤立山(×印)と風上側の M1 山の値は概ね同様な

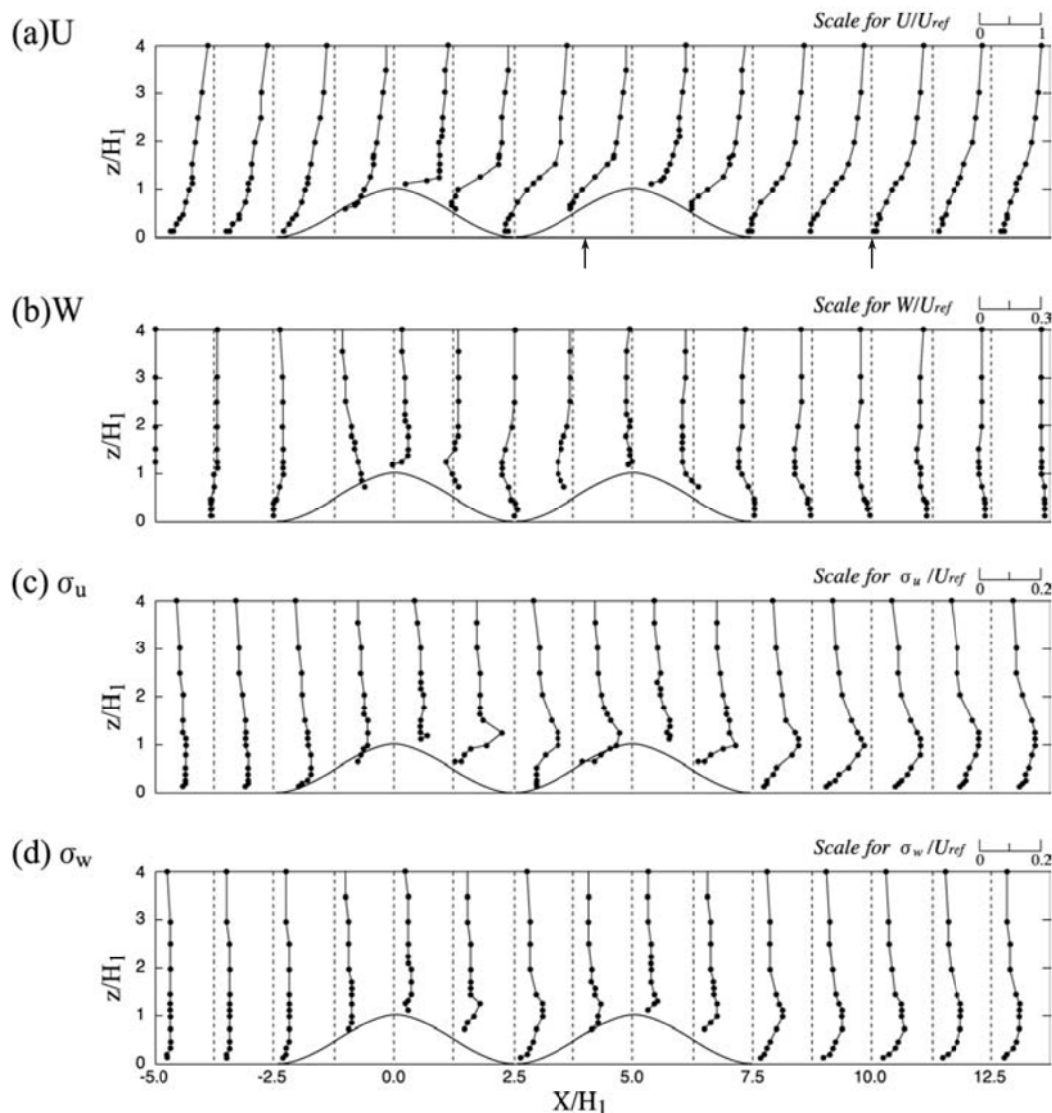


Fig. 3 2 次元山 CaseA₀ の平均速度成分 U, W および速度変動の標準偏差 σ_u, σ_w の鉛直分布 (図 a の矢印は再付着点を表す)
(Vertical profiles of mean velocity U, W and two normal stress components σ_u, σ_w for Case A₀)

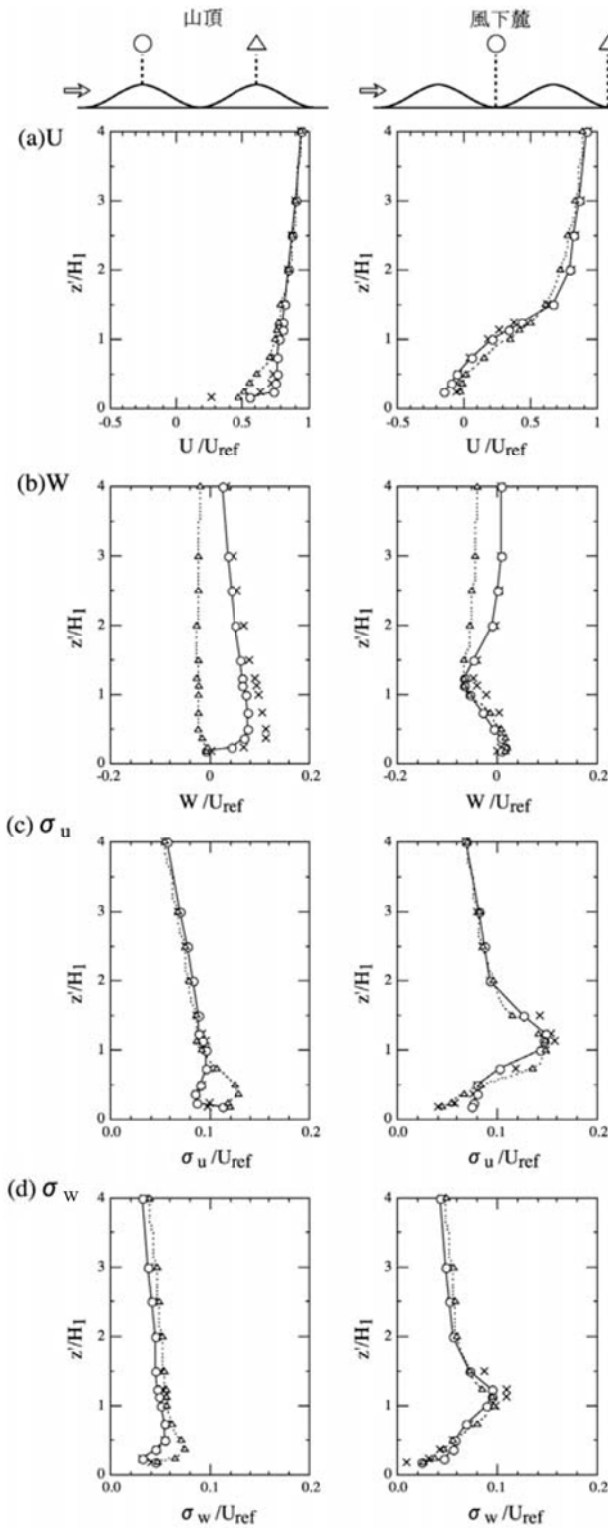


Fig. 4 平均速度成分および速度変動の標準偏差の鉛直分布比較 (2次元山 Case A₀, ○:M1 山, △:M2 山, ×:孤立山)
(Comparison of mean velocity U , W and two normal stress components for Case A₀ between M1 hill(○), M2 hill(△) and single hill(×))

傾向を示す。速度変動の標準偏差 σ_u , σ_w (Fig.4c, d)において、山頂の表面からやや離れた高さでは M1 山よりも M2 山の乱れが大きい。風下麓の地表近くの σ_u は M1 山の方が M2 山よりも値がやや大きい。

Fig.5 には Case A₀ の 2 高度における平均速度 U および σ_u の流れ方向の変化を示した。平均速度 U (Fig.5a) において、地表に近い $z'/H_1=0.25$ (○印) では M1 山頂と M2 山頂に 2 つのピークが形成されている。それよりも上層の高さ $z'/H_1=1.25$ (●印) では、2 つの山頂に緩やかなピークが形成されている。M2 山後流の上層 (●印) での速度は、風上側 ($X/H_1=-5$) の流入速度よりやや低めの一定値を示す。

速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.5b) では、地表近く (○印) の M2 山頂に顕著なピークがある。また、M2 山後流では乱れが増加している。それよりも上層 (●印) では、M1 山背後 $X/H_1=2.5$ に乱れのピークが現れている。また M2 山後流では乱れの大きな領域が形成され、風上側 ($X/H_1=-5$) の流入乱れの 1.5 倍程度の値を示している。

3.2 山間の距離変化の効果 (Case A₀~A₄, Case B₀~B₄)

Fig.6 には M1 山と M2 山の山間距離 Lx/H_1 を変化させた時の平均速度 U および σ_u の鉛直分布を示す。中央の図 ML2 は M2 山頂を通る計測ラインであり、ML1, ML3 は各々山頂より風上側と風下側に $5/4H_1$ 前後した計測ラインである。平均速度 U (Fig.6a) において M2 山上り斜面の ML1 では山間距離 Lx/H_1 の増加とともに速度は増加し下層ほど差が大きい。その値は Lx/H_1 が 10 以上で概ね一定値を示す。山頂の ML2 では、山間距離の増加により同様な増加傾向がみられるがその差は小さい。風下斜面 ML3 では山間距離変化の影響は現れていない。速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.6b) の鉛直分布は、表面付近は距離 Lx/H_1 の変化による差は小さいが、表面から離れた上層では Lx/H_1 の増加とともに乱れが大きくなる。

Fig.7 には山間距離 Lx/H_1 変化による M2 山頂の平均速度 U および σ_u の変化を示した。図の ●, ○印は M1 山と M2 山の高さが同じケース (Case A₀~A₄) を、図の ▲, △印は風下の M2 山が高いケース (Case B₀~B₄) を表す。また、点線は Case A₀ の M1 山頂の値を示す。平均速度 U (Fig.7a) において、高さ $z'/H_1=1.25$ では Case A (●印) および Case B (▲印) とも山間距離変化によらずおおむね一定値を示す。一方、地表近くの $z'/H_1=0.25$ では山間の距離 Lx/H_1 の増加とともに Case A (○印) の速度は増加するが、Case B (△印) では $Lx/H_1=11$ までは増加し、それ以降では一定値を示す。Case A における $Lx/H_1=15.0$ の値はい

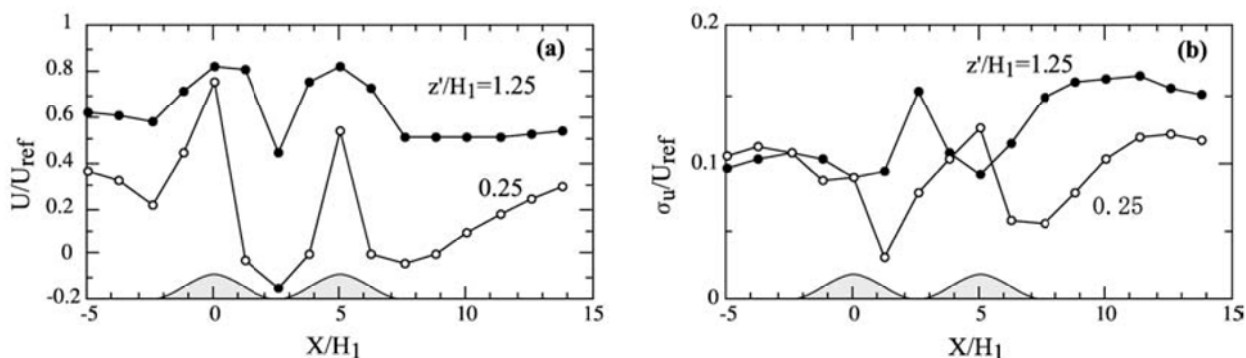


Fig. 5 2次元山 Case A₀ の2高度における(a)平均速度成分Uおよび(b)速度変動の標準偏差 σ_u の流れ方向の分布 (○: $z'/H_1=0.25$, ●: $z'/H_1=1.25$)
(Mean velocity U and standard deviation of u component at two heights for Case A₀)

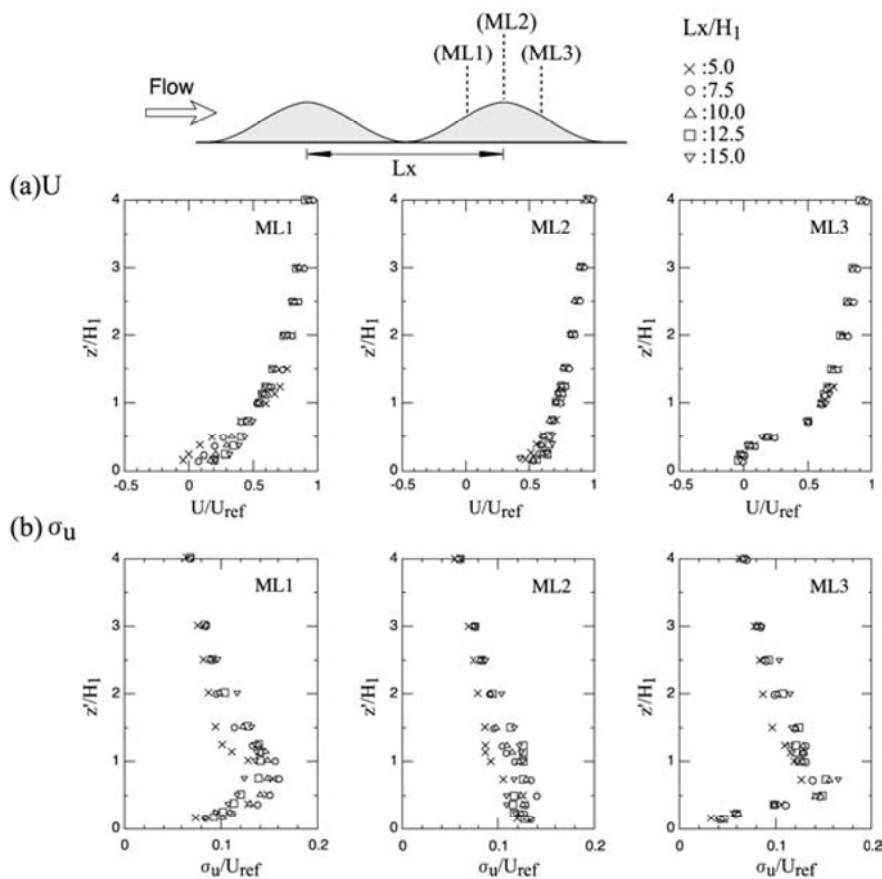


Fig. 6 山間距離変化 Lx/H_1 と平均速度成分 U および速度変動の標準偏差 σ_u の鉛直分布(CaseA₀~A₄)
(Profiles of mean velocity U and standard deviation of u component for different distances Lx/H_1 , Case A₀~A₄)

ずれの高度(●, ○印)も M1 山頂の値(点線)よりも低く、この距離でもなお風上側の山の影響を受けている。

速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.7b)において、地表近く $z'/H_1=0.25$ の CaseA(○印)では Lx/H_1 の変化によらず乱れはほぼ一定値であるが、CaseB(△印)では $Lx/H_1=14$ まで増加傾向にある。高さ $z'/H_1=1.25$ では CaseA(●印)および CaseB(▲印)とも σ_u は山間の距離 Lx/H_1 の増加とともに乱れが大きくなる。CaseA における $Lx/H_1=15.0$ の値はいずれの高度も M1 山頂の値(点線)よりも高く、離

れた所にピークを示している。この距離においてもなお風上側の山の影響を受けている。このような山間距離による乱れの変化は、M1 山背後に形成される渦の動き方による。すなわち Lx/H_1 が短い時には、M1 山背後のはく離渦は風下の M2 山に阻まれ動きが少なくなり乱れが小さい。一方、 Lx/H_1 が増大すると、それに伴いはく離れた渦は M2 山が離れたことにより動きの自由度がふえ乱れも増大する。また、平均速度および乱れ強さにおいて風下側の M2 山高さの変化による影響は顕著ではない。

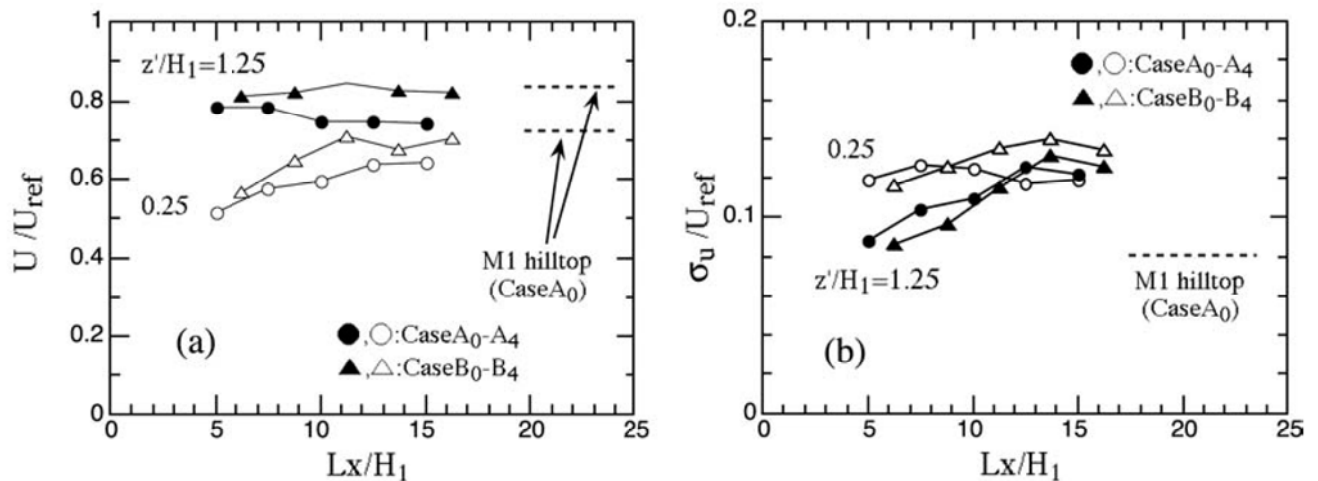


Fig. 7 山間距離変化 Lx/H_1 と M2 山頂の平均速度 U と σ_u (2 次元山, $\circ, \triangle$: Case A, Case B at $z'/H_1=0.25$, $\bullet, \blacktriangle$: Case A, Case B at $z'/H_1=1.25$)
(Mean velocity U and σ_u on M2 hilltop for different distances Lx/H_1)

4. 3 次元山の実験結果

4.1 平均速度と乱れの特性(CaseC)

次に 3 次元山 CaseC の実験結果について述べる。CaseC は M1 山と M2 山の山頂が $Y/H_1=0$ 上にある。CaseC における中心断面($y=0$)の平均速度成分 U , W および変動速度成分の標準偏差 σ_u , σ_v , σ_w の鉛直分布を Fig.8 に示す。平均速度 U において(Fig.8a), M1 山頂で増速し山の背後で流れのはく離に伴い逆流域を形成している。その再付着点は $X/H_1=3.2$ 付近にあり 2 次元山($X/H_1=3.8$)よりも風上側にある。また, M2 山背後の逆流域は風上側の M1 山のそれよりも小さく $X/H_1=7.5$ 付近に再付着点がある。これは M2 山では風上側の M1 山の影響で大きな乱れが形成され M2 山背後の渦放出が弱まるためである。また, 2 次元山の再付着点($X/H_1=10.0$)に比べると風上側にある。M2 山頂位置を基準に, この再付着点位置を表すと 2.5 に相当し 3 次元孤立山の再付着点 3.6 よりも短い。

平均速度 W (Fig.8b)は M1 山の山頂で上昇流が生じ, M1 山の山頂で M1 山頂に向かう強い上昇流が起こっている。また, M2 山の山頂でもやや弱めの上昇流が生じている。この様な風下側から M1 山頂へ向かう顕著な上昇流と M2 山上り斜面の上昇流は 2 次元山では生じていない。一方, 速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.8c)は, M1 山風下で大きな乱れが形成されている。そのピーク高さは $z/H_1=1.2$ 付近にあり, M2 山の山頂および M2 山の風下側において, ピーク高さを保ちながら風下へ推移している。速度変動の標準偏差 σ_v (Fig.8d)は, M1 山および M2 山の山頂で乱れが大きい。速度変動の標準偏差 σ_w (Fig.8e)は σ_u と同様に $z/H_1=1.2$

付近にピークをもち, M2 山から風下に行くにしたがいブロードなピークとなりピーク高さが低下していく。

Fig.9 に 3 次元山 CaseC における M1 山 ($\circ$ 印) と M2 山 ($\triangle$ 印) の各々の山頂, 風下麓の平均速度成分 U , W および σ_u , σ_v , σ_w の鉛直分布の比較を示す。図中にはあわせて 3 次元孤立山のデータ($\times$ 印)を示した。平均速度成分 U (Fig.9a)において, M2 山の山頂にて M1 山の U より低めとなる現象は 2 次元山 Case A₀(Fig.4a)と同様である。一方, M2 山の風下麓では 2 次元山に比べ 3 次元山は速度の回復が早い。また, 孤立山($\times$ 印)と風上側の M1 山の値は山頂, 風下麓とも一致する。一方, 平均速度 W (Fig.9b)は, M2 山の風下麓で 2 次元山に比べ表面からやや離れたところで強い下降流が生じている。また, M1 山の山頂の σ_u , σ_v は, 高度の増加とともに乱れが減少しているが σ_w では表面に近い方が乱れが小さい(Fig.9c-c)。M2 山の山頂では σ_v は高度の増加とともに乱れが減少し, σ_u , σ_w では表面よりやや高いところにピークがある。

Fig.10 には CaseC の 2 高度における平均速度 U および σ_u の流れ方向の変化を示した。平均速度 U (Fig.10a)では, 2 高度とも 2 つのピークが形成されるなど 2 次元山 Case A₀(Fig.5a)と同様な傾向を示す。一方, 速度変動の標準偏差 σ_u (Fig.10b)では, 2 高度とも M2 山後流の乱れの大きな領域が 2 次元山 Case A₀(Fig.5b)より小さい。

4.2 スパン方向の特性(CaseC)

Fig.11 には 3 次元山 CaseC の山間の中央 $X/H_1=2.5$ における流れに直角方向の平均速度成分 U , V , W の分布を示した。平均速度 U において, 中心軸上 $Y/H_1=0$ か

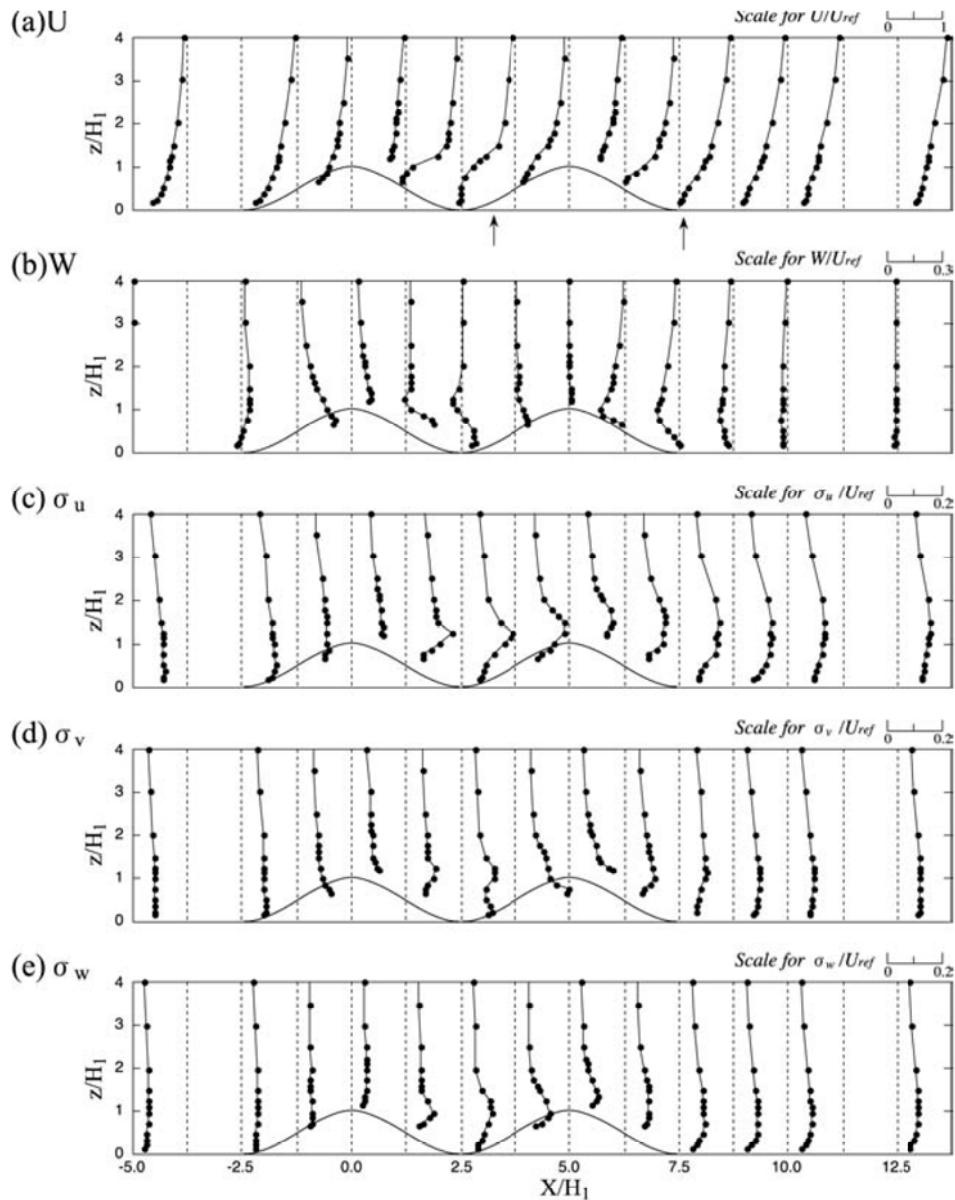


Fig. 8 3次元山 CaseC 平均速度成分 U, W および速度変動の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ の鉛直分布 (図 a の矢印は再付着点を表す)
(Vertical profiles of mean velocity U, W and three normal stress components $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ for CaseC)

らスパン方向にいくにつれ速度が大きくなる。平均速度 V の地表近くでは、 $Y/H_1=1.25$ にて負となり外側方向から中心軸上 $Y/H_1=0$ 方向へと流れている (V 成分は $Y/H_1=0$ から $Y/H_1=2.5$ 方向の流れが正)。Fig.12 には CaseC の流れに直角方向における $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ の分布を示した。上層では 3 成分とも中心軸上 $Y/H_1=0$ からスパン方向にいくにつれ乱れが減少する。

4.3 2 つ山の配置がずれた場合の流れの特性(CaseD)

Fig.13 には CaseD の M2 山頂における平均速度成分 U, V, W および $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ の鉛直分布を示した。このケースでは M1 山が流れ方向に半径分だけ Y/H_1 の正の

方向に軸がずれている、図の●印は CaseD の M2 山頂の値を示し、○印は軸が同一線上にある CaseC の M2 山頂の値を示した。平均速度成分 U, W (Fig.13a) における CaseD の M2 山頂の値は 3 次元孤立山 (×印) の山頂に比べ大きな差異はない。また、各変動速度成分の標準偏差 (Fig.13b) においても、M2 山頂の値は 3 次元孤立山の乱れに近い値であり風上側の M1 山の影響が少ない。

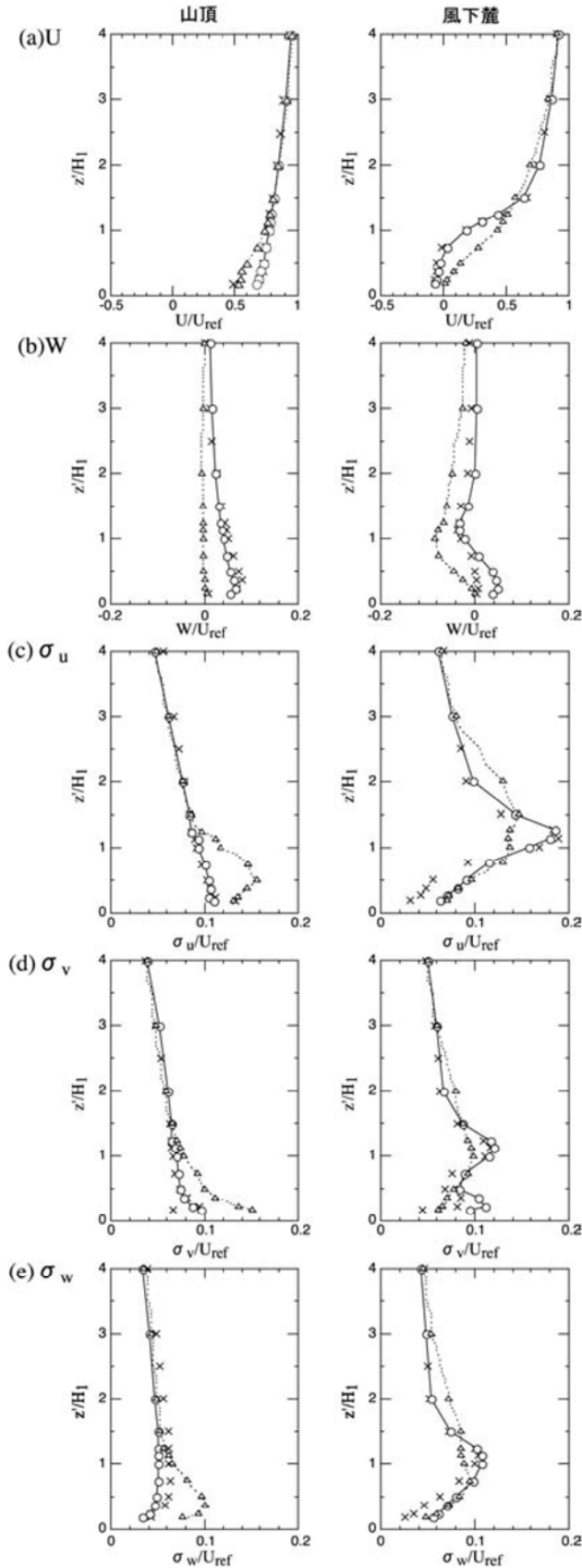


Fig. 9 平均速度成分 U, W および速度変動の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ の鉛直分布比較(3次元山 CaseC, 記号は Fig.4 に準ずる)
(Comparison of mean velocity U, W and three normal stress components for CaseC between M1 hill(○), M2 hill(△) and single hill(×))

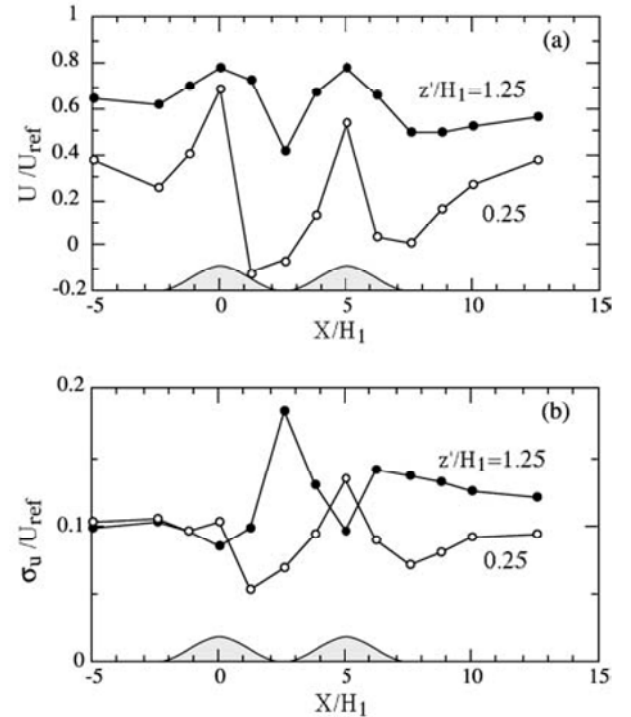


Fig.10 3次元山 CaseC の2高度における(a)平均速度成分 U および(b)速度変動の標準偏差 σ_u の流れ方向の分布 (○: $z'/H_1=0.25$, ●: $z'/H_1=1.25$)
(Mean velocity U and standard deviation of u component at two heights for CaseC)

5. まとめ

本研究では、急な傾斜をもつ2次元および3次元形状の連続した2つの山模型を風洞に設置し、スプリットファイバースローブを用いた乱流計測を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) 2つの連続山(2次元山および3次元)において、風上側のM1山の山頂、風下麓では、平均速度および速度変動の標準偏差の鉛直分布は孤立山のそれに概ね等しい。
- 2) 2次元山および3次元山における山頂の表面近くの平均速度は、風上側に比べ風下側のM2山頂の値の方が低い。一方、乱れの大きさは逆に風下側のM2山の方がM1山頂に比べ大きい。
- 3) 風下のM2山後流の再付着点位置は2次元山, 3次元山とも孤立山の再付着点位置より短い。
- 4) 2次元山の山間距離変化が風下M2山頂の乱れに与える影響は、山間距離が近い時よりも離れた時の方が大きい。風上山高さの12~15倍離れた時にM2山頂の乱れが最大となる。これは風上山後流に形成されるはく離渦の動きによる。

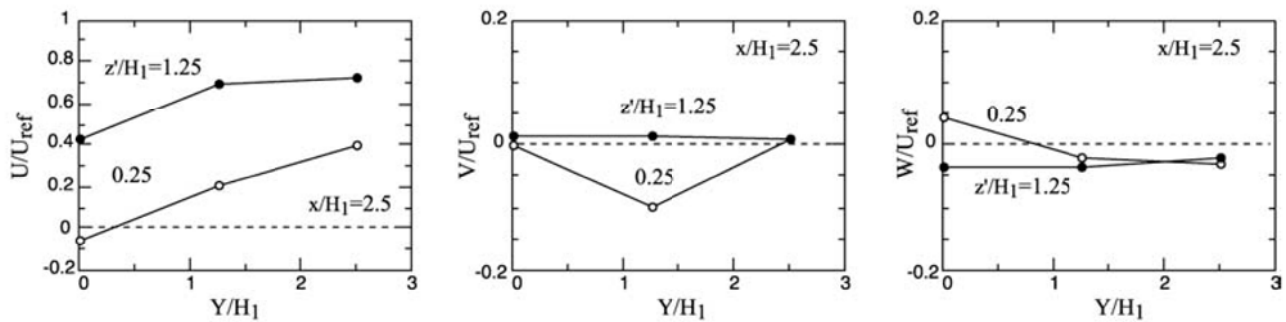


Fig.11 平均速度成分 U, V, W のスパン方向の分布(3次元山 CaseC, $X/H_1=2.5$)
(Lateral distributions of mean velocity for CaseC)

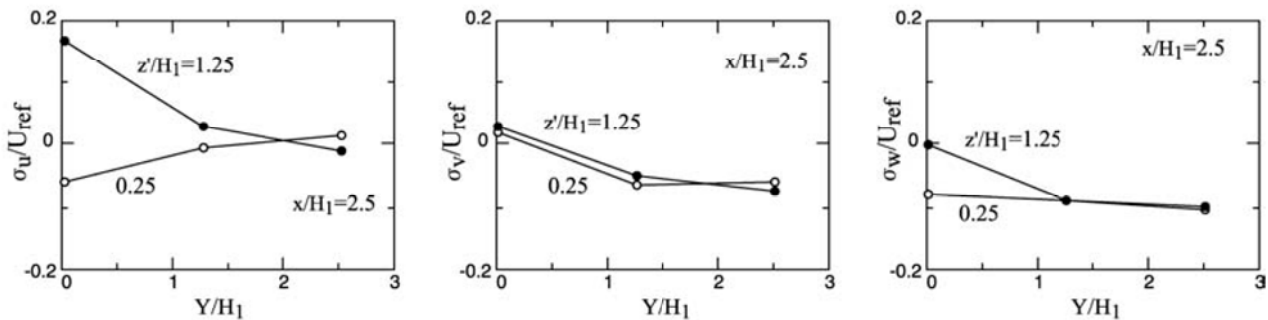


Fig.12 速度変動の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ のスパン方向の分布(3次元山 CaseC, $X/H_1=2.5$)
(Lateral distributions of three normal stress components for CaseC)

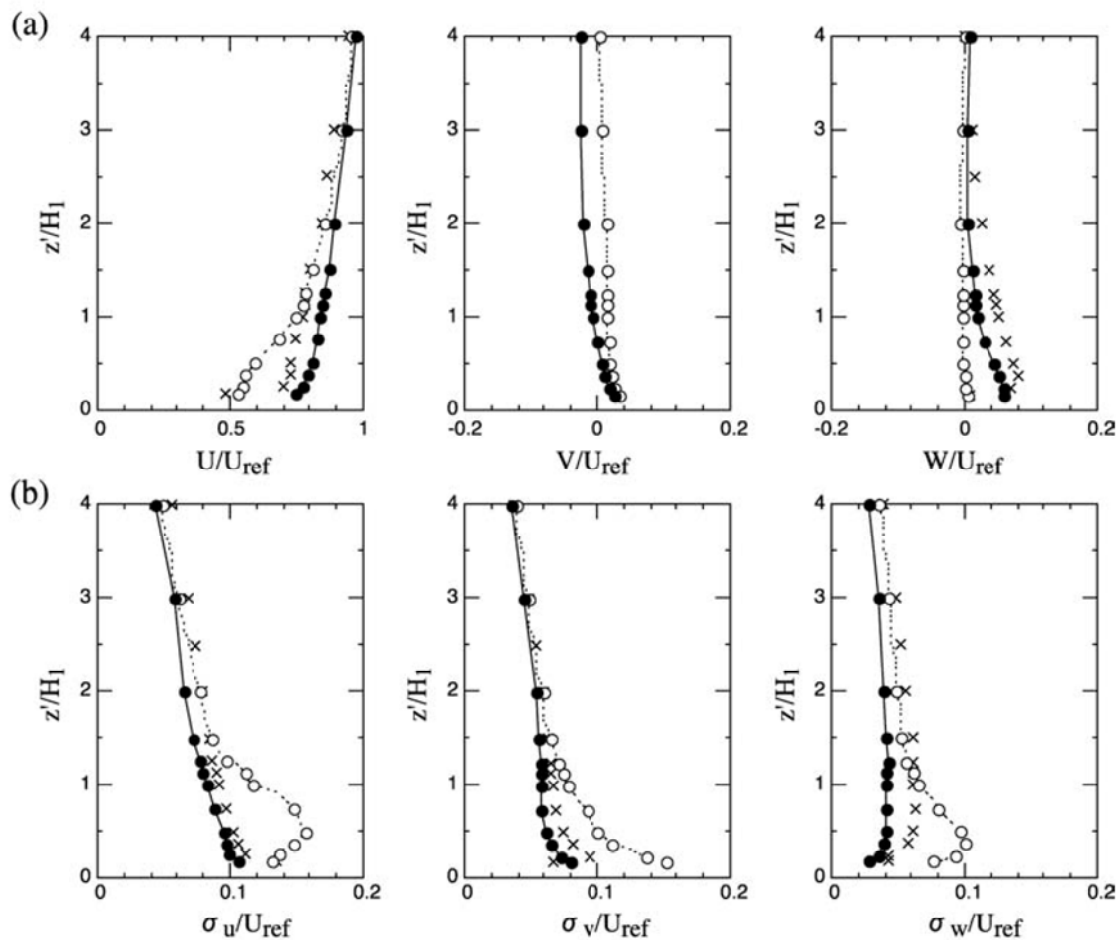


Fig.13 3次元山配置がずれた場合の M2 山頂における平均速度成分 U, V, W および速度変動の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ の鉛直分布比較(●:CaseD の M2 山頂, ○:CaseC の M2 山頂, ×:孤立山の山頂)
(Comparison of mean velocity U, V, W and three normal stress components on M2 hilltop between CaseD(●), CaseC(○) and single hill(×))

謝 辞

本研究は、電気事業連合会より依頼を受け実施した「耐風設計合理化研究」の一環として行われた。本研究を実施するにあたり、「耐風設計合理化委員会」においてご指導いただいた大熊武司委員長（神奈川大学教授）および各委員の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大熊武司, 他:特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その1)～(その4), 日本風工学会論文集, 第82号, 2000～第83号, 2000.
- 2) Taylor, P.A., Mason, P.J. and Bradley, E.F.: Boundary-layer over low hills - a review, *Boundary-Layer Meteorol*, 39, 1987, pp.107-132.
- 3) Finnigan, J.J.: Air flow over complex terrain, in Steffen, W.L. and Denmead (Eds.): *Flow and Transport in the Natural Environment*, Springer, 1988, pp.183-229.
- 4) Kaimal, J.C., Finnigan, J.J.: *Atmospheric Boundary Layer Flows, their structure and measurement*, Oxford University Press, 1994, pp.155-206.
- 5) Britter, R.E., Hunt, J.C.R. and Richards, K.J.: Airflow over a two-dimensional hill: studies of velocity speedup, roughness effects and turbulence, *Quart.J.Roy.Meteor. Soc.*, 107, 1981, pp.91-110.
- 6) Jackson, P.S., and Hunt, J.C.R.: Turbulent wind flow over a low hill, *Quart.J.Roy.Meteor. Soc.*, 101, 1975, pp.929-955.
- 7) Castro, I.P. and Snyder, W.H.: A wind tunnel study of dispersion from sources downwind of three-dimensional hills, *Atmos. Environ.*, 16, 1982, pp.1869-1887.
- 8) Araya, S.P.S. and Gadiyaram, P.S.: An experimental study of flow and dispersion in the wakes of three-dimensional low hills, *Atmos. Environ.*, 20, 1986, pp.729-740.
- 9) Durao, D.F.G., Heitor, M.V. and Pereira, J.C.F.: A laser anemometry study of separated flow over a model three-dimensional hill, in *Applications of laser anemometry to fluid mechanics*, Adrian et al, Eds., pp.93-118, Springer-Verlag, New York, 1989.
- 10) Finnigan, J.J., Raupach, M.R., Bradley, E.F., and Aldiss, G.K.: A wind tunnel-study of turbulent flow over a two-dimensional ridge, *Boundary-Layer Meteorol*, 50, 1990, pp.277-317.
- 11) Almeida, G.P., Durao, D.F.G., and Heitor, M.V.: Wake flows behind two-dimensional model hills, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7:87-101, 1993.
- 12) Kim, H.G., Lee, C.M., Lim, H.C. and Kyong, N.H.: An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66, 1997, pp.17-33.
- 13) 孟 岩, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流境界層に関する実証的研究, 第15回風工学シンポジウム, 1998, pp.61-66.
- 14) Ishihara, T., Hibi, K. and Oikawa, S.: A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, 1999, pp.95-107.
- 15) 石原 孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学論文集, 第83号, 2000.
- 16) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993.