

## 単純山稜地形周りの風況に及ぼす計算格子解像度の影響

大坪, 和広  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

友清, 衣利子  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

前田, 潤滋  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/26767>

---

出版情報：都市・建築学研究. 22, pp.51-56, 2012-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン：  
権利関係：

# 単純山稜地形周りの風況に及ぼす計算格子解像度の影響

## Effects of CFD Grid Resolution on Wind Distributions around Mountainous Terrain

大坪和広\*, 友清衣利子\*\*, 前田潤滋\*\*

Kazuhiro OTSUBO, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

The strong wind flow affected by mountainous terrain generates occasionally a big gust, causing serious damage to houses, trains and so on. Generally, it is known that intensities of turbulence simulated by Computational Fluid Dynamics (CFD) are smaller than those associated with wind tunnel experiments and wind observations. We are sure that those are resulting from the insufficient grid resolution of a flow field around mountainous terrains in a CFD model. In this paper, we show experimental results on the leeward side of a mountainous model are reproduced by CFD analysis with a fine resolution using 64-bit Windows PC. That is, CFD analysis using 64-bit PC can simulate more accurately wind tunnel test results.

**Keywords:** Computational fluid dynamics, Local terrain, Grid resolution, Intensity of turbulence

数値流体計算, 局所地形, 格子解像度, 乱れの強さ

### 1. 序

台風や冬季季節風による強風は地形の影響を受けて増速し、電車の脱線<sup>1)</sup>や鉄塔倒壊事故<sup>2)</sup>、局地的な住家被害<sup>3)</sup>などをもたらすことがあるため、風速増加に及ぼす局所地形の影響予測は強風災害対策の有用なツールである。筆者グループは風洞実験<sup>4),5)</sup>や数値流体計算<sup>6-8)</sup>によって二次元山稜地形及び実地形周りの風況を検証、比較検討を行ったが、数値計算では、最大瞬間風速や乱れの強さが風洞実験値及び観測記録と比べて小さく、十分な対応を示さなかった。その要因の一つとして、32ビットパソコンの利用による格子解像度の不足が考えられる。一般に数値流体解析の計算精度は使用する乱流モデルの適応性と物体周りの領域分割数の解像度に強く依存し、通常のパソコン性能では計算処理性能から計算領域の格子解像度を十分に確保できないため、多くはスーパーコンピュータなどの大型フレームを利用してきた。しかしながら近年の64ビットパソコンはCPU処理速度の高速化とともに大空間メモリの利用拡大などにより高い格子解像度での計算が可能になり、より実際に対応した強風状況を予測できる可能性がある。このような状況は、一般の自治体などでの数値流体計算の汎用的な利用を広く、強風災害の防災・減災施策へ利用拡大が期待でき

\* 都市共生デザイン専攻修士課程

\*\* 都市・建築学部門

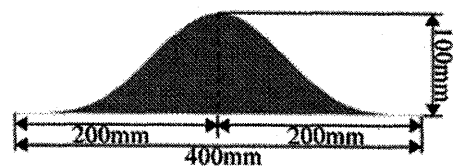


図1 山稜地形 流れ方向断面図

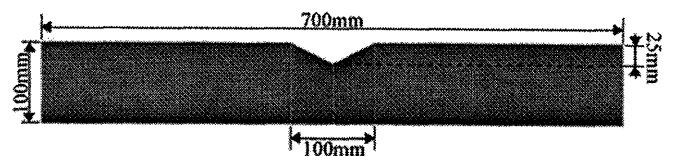
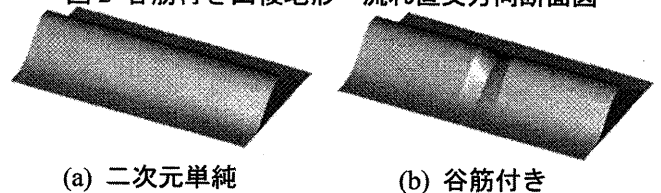


図2 谷筋付き山稜地形 流れ直交方向断面図



(a) 二次元単純

(b) 谷筋付き

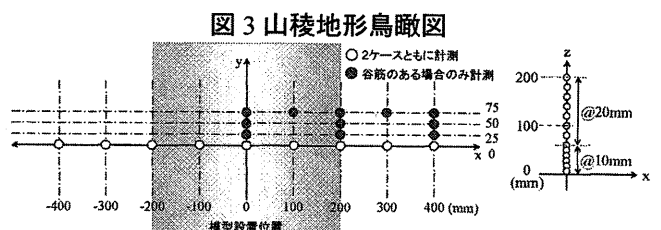


図4 風洞実験での風速計測位置

る。

本論では、最近の64ビットパソコンの使用を前提に、単純な地形モデルを格子解像度の異なる計算領域で数値流体計算を行い、風洞実験結果と比較検討を行うとともに、実現可能な格子解像度が風速変動の再現に及ぼす影響を検証する。

## 2. 地形モデル及び風洞実験の概要

本論では風洞実験結果<sup>8)</sup>との比較を行うため、実験で用いた風の流れ直交方向に一樣な形状を持つ二次元山稜モデルと流れ方向に浅い谷筋を持つモデル周りの数値流体計算を行った。図1に二次元単純山稜地形の流れ方向断面図、図2に谷筋付き山稜地形の流れ直交方向断面図を示す。図3はそれぞれのモデルの鳥瞰図である。山稜の大きさは幅400mm×高さ100mmの線対称とした。風洞実験で用いた模型の流れ直角方向長さは700mmである。谷筋のあるモデルは、模型中央に幅100mm深さ25mmのくぼみを設けた。

風洞内の基準風速は超音波風速計で測定し、模型近傍の風速は二次元レーザー流速計を用い測定を行った。山稜模型中心を原点として風の流れ方向にX、直交方向にY、高さ方向にZ軸を定義し、風流れ方向にはX=-400mmから400mmまで100mm毎に9点、高さ方向にはZ=10mmから60mmまでは10mm毎、Z=80mmから200mmまでは20mm毎に13点で風速を計測した。さらに谷筋のある山稜模型の場合には、風の流れおよび高さ方向に加えて風直交方向25mm毎に計測を行った。

Y=25mm及び50mmの位置ではX方向に200mm毎、Y=75mmの位置ではX方向に100mm毎に計測した。図4に風洞実験での風速計測位置を示す。

流入風速は高さ150mmで風速約1m/s、べき指数は1/5程度になるように接近流を調整した。

## 3. 数値流体計算領域の概要

図5に計算対象とした二次元単純山稜地形と谷筋付き山稜地形の形状および計算の境界条件を示す。山稜の形状や高さ、幅は実験で使用した模型に一致させ、谷筋のない単純モデルでは風直交方向の幅を60mm、谷筋のあるモデルでは、300mmとした。座標は風洞実験と同様に流れ方向をX方向、流れ直交方向をY方向、鉛直方向をZ方向とし、山稜の中央を原点とする。

使用したパソコンのCPUはintel Core i7 870で、クロック数は2.93GHz、メモリは16Gbyte、OSはWindows7である。4つのコアを有し、ハイパースレッディング技術を搭載しているため、8スレッドでの並列計算が可能である。また解析には市販の汎用熱流体解析プログラム(STAR-CD)を使用した。本ソフトは並列計算ライセンス(STAR-HPC)を使用することで、マルチスレッド処理が可能となる。ここでは2つのスレッドを利用した並列処理を行い、処理速度を上げた。二次元単純山稜地形は格子サイズが2mm、5mm、10mmの計算領域を作成した。それぞれ山稜高さに対して1/50、1/20、1/10の長さである。谷筋付き山稜地形は5mmと10mmの計算領域を作成した。計算領域はすべて等分割し、それぞれのモデル

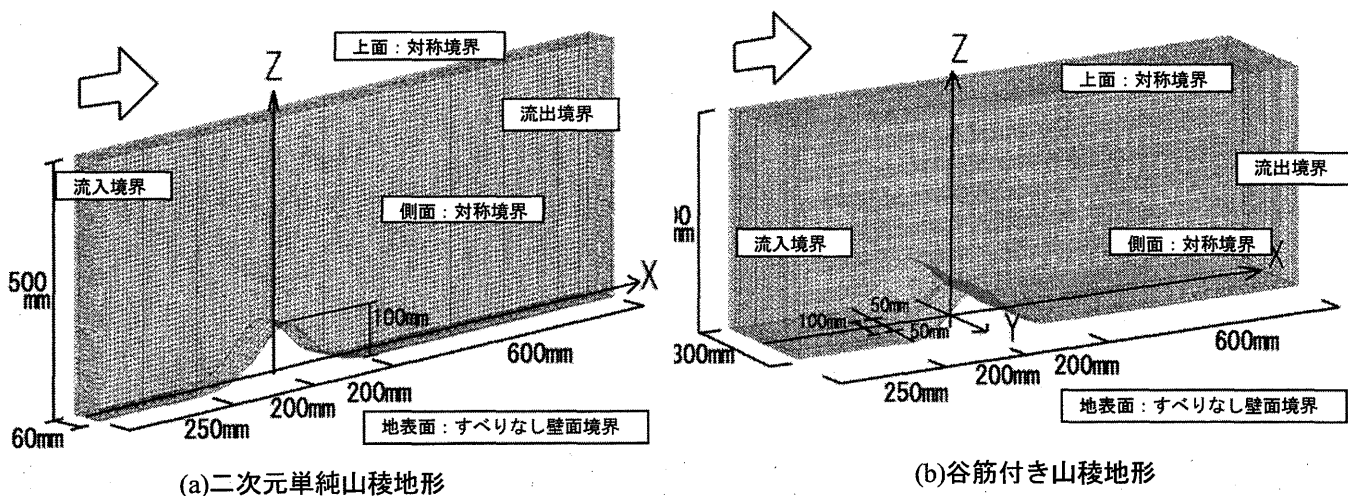


図5 数値流体モデル計算領域

表1 モデルの格子解像度

格子サイズ (山稜高さに対する比)	二次元山稜地形			谷筋付き山稜地形	
	2mm (1/50)	5mm (1/20)	10mm (1/10)	5mm (1/20)	10mm (1/10)
セル数	4,619,893	299,106	38,520	1,497,683	192,720
分割数 (風直交×風流れ×高さ)	30× 625×	12× 250×	6× 125×	60× 25×	30× 125×
	250	100	50	100	50

表2 流入風パラメータ

	二次元単純	谷筋付き
流入風速(m/s)	$1.54 Z^{0.22}$	$1.38 Z^{0.19}$
乱流強度	0.09	0.13
渦スケール(mm)	24.3	6.9

Z: 地表面からの高さ

の分割サイズと分割数、計算セル数を表1にまとめる。筆者グループが32ビットコンピュータで行った数値計算<sup>6-8)</sup>では、セルサイズ5mmが最小で、定常計算のみが行われた。流入風速はべき指数則に従うものとし、風洞実験結果に対応するよう定めた。流入風の条件を表2にまとめる。

#### 4. 定常流れの数値計算

##### 4.1. 計算の諸条件

二次元単純山稜地形と谷筋付き山稜地形を対象とし、平均の流れ場を計算する定常計算を行った。計算の諸条件は以下のとおりである。

- ・乱流モデル：k-ε/High-Reynoldsモデル
- ・差分スキーム(対流項)：一次精度風上差分
- ・差分スキーム(粘性項)：一次精度風上差分
- ・計算アルゴリズム：SIMPLE法

繰り返し計算は3,000回を上限としているが、すべての計算モデルで上限達する前に解は収束し、計算を終了した。

##### 4.2. 二次元単純山稜地形周辺の計算結果

数値計算による二次元単純山稜地形周辺の流れ方向の等風速線図を図6に示す。図(a)、(b)、(c)はそれぞれセルサイズ10、5、2mmでの結果である。図を見ると、格子解像度が上がるにつれて、流れが剥離して風速が0m/sとなる位置が山稜風下側から山稜頂上に近づくことが確認できる。また、セルサイズ5mmでは、ほかの二つに比べ、風が逆流して平均風速-0.5m/sを超えるような領域が大きくなった。セルサイズ10mmの計算では、他のケースより逆流領域が小さく、X=100mmでは、2mm及び5mmの数値計算結果よりも速い風速となった。

流れ方向の風速の各セルサイズの数値計算結果と風洞実験値との比較を図7に示す。山稜風上側のX=-400、-300mmでは、数値計算結果はセルサイズによる違いは

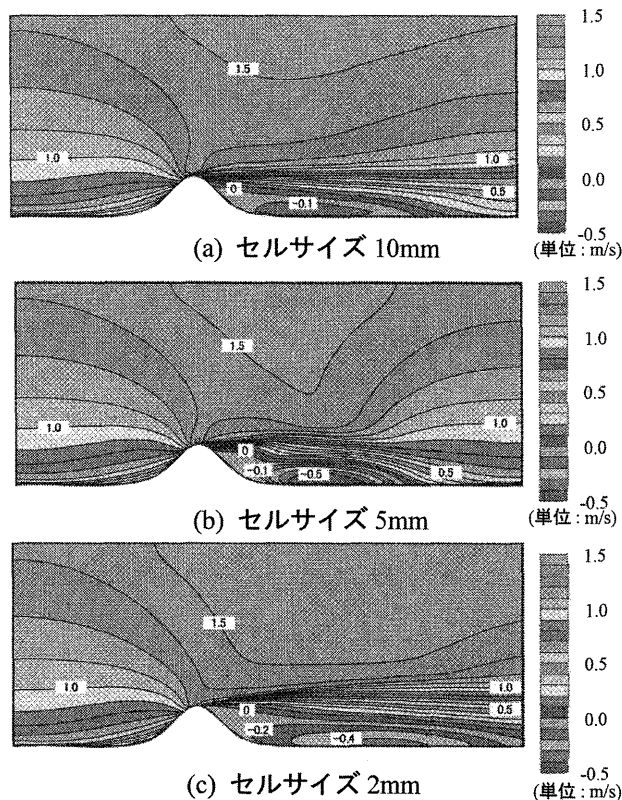


図6 二次元単純山稜地形 流れ方向等風速線図

なく、風洞実験値に近い値となった。山稜の傾斜が始まるX=-200mmから数値計算の値が風洞実験値よりも速くなり、X=0mmではどの高さでも風洞実験値よりも数値計算結果の方が0.2m/s程度速くなる。山稜風下側に着目すると、高さ100m付近で数値計算の各結果と風洞実験値とのばらつきが大きい。高さ100mmの山頂で風が剥離するため、その高さ付近で風速が急激に変化し、数値計算、風洞実験ともに正確な風速値をとらえるのが難しいためであると考えられる。ここでは特に地表面付近の結果に着目した。山稜風下側X=100mmではセルサイズ

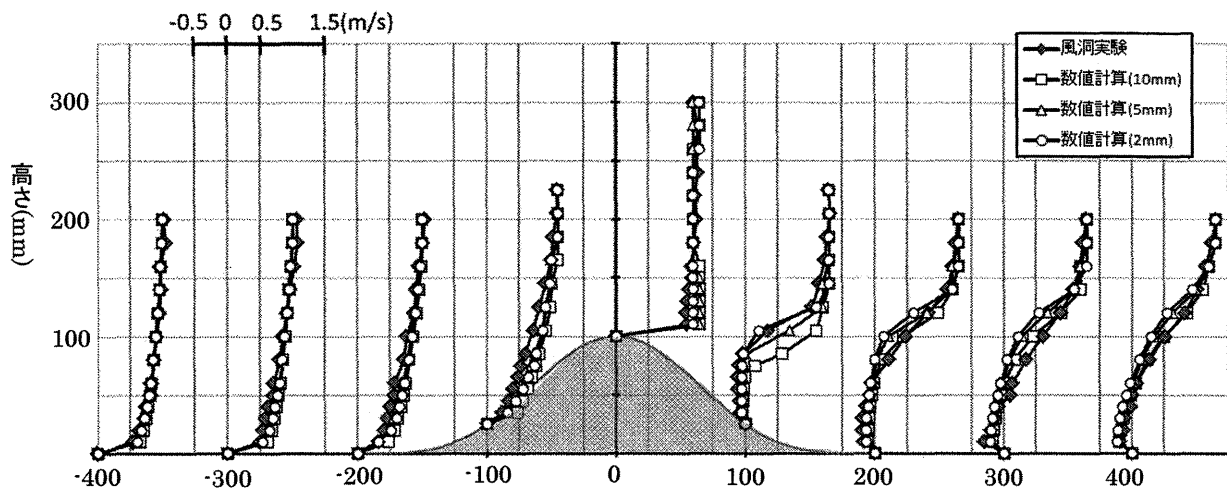


図7 二次元単純山稜地形 流れ方向風速比較

2mmでの数値計算結果が最も実験値と対応している。これは格子解像度を高くすることで山稜山頂での風の剥離を実際に近い状況で再現できたためと考えられる。セルサイズ 5mmの結果も概ね実験値と近い値となったが、前述のように山稜風下側に強い逆流が発生したため、 $X=200\sim 300\text{mm}$ の地上付近での風洞実験値とはあまりよく対応しなかった。一方、10mmの計算結果は逆流域が小さいために、 $X=100\text{mm}$ で実験値よりも地上付近では速い風速となっていた。

#### 4.3. 谷筋付き山稜地形周辺の計算結果

谷筋付き山稜地形を対象とした定常計算結果をまとめる。図8は山稜中央( $Y=0\text{mm}$ )での実験値と数値計算結果の流入方向、図9は $X=400\text{mm}$ での流入直交方向の風速比較である。また図10は高さ10、100mmでの水平方向の風速ベクトル図である。(a)はセルサイズ10mm、(b)はセルサイズ5mmの計算結果であり、各々の(1)が高さ10mmの(2)が高さ100mmのものである。

はセルサイズ 5mmの計算結果であり、各々の(1)が高さ10mmの(2)が高さ100mmのものである。

図8より、山稜風下側 $X=0\sim 200\text{mm}$ ではセルサイズ10mm、5mmとも計算風速はほぼ等しいが、実験値にくらべ数値計算のほうがやや風速が速い。 $X=300、400\text{mm}$ では高さ50mm以下の地表付近と高さ150mm以上ではセルサイズ10mm、5mmの数値計算値および実験値は全てほぼ対応しているが、高さ50~150mmでは実験値に比べてセルサイズ5mmの計算値は大きく、10mmの計算値は僅かに小さい。

図9の流れ直交方向の平均風速比較を見ると、セルサイズ10mmの流れ直交方向の風速はほぼ0m/sである。セルサイズ5mmの場合には風速値は異なるものの地表付近の風向は実験に対応している。

図10(a)より、セルサイズ10mmの計算では、山稜後方で流れ方向の渦が発生しているが、流れ直交方向の渦は

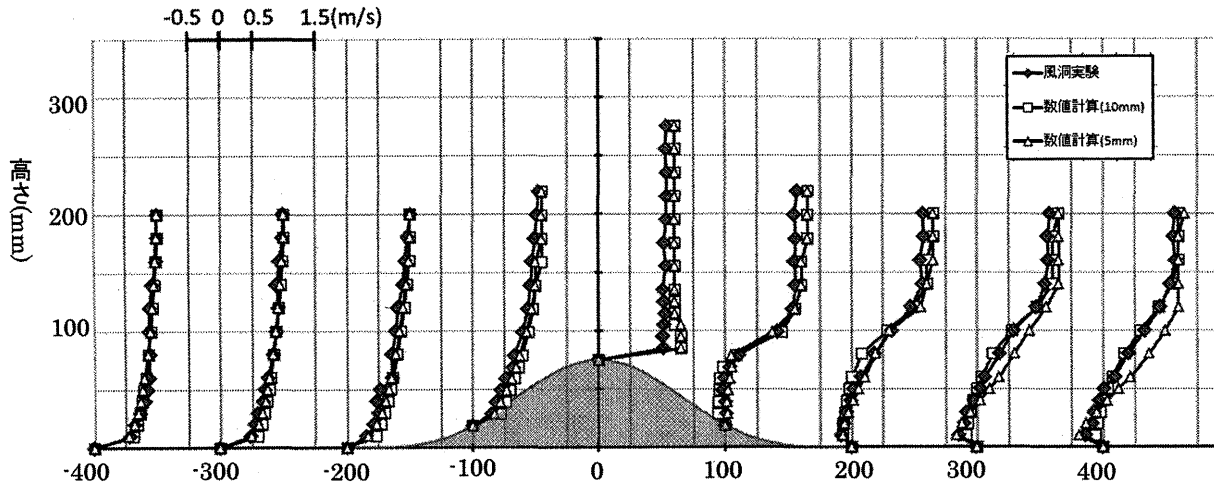


図8 谷筋付き山稜地形 流れ方向風速比較( $Y=0\text{mm}$ )

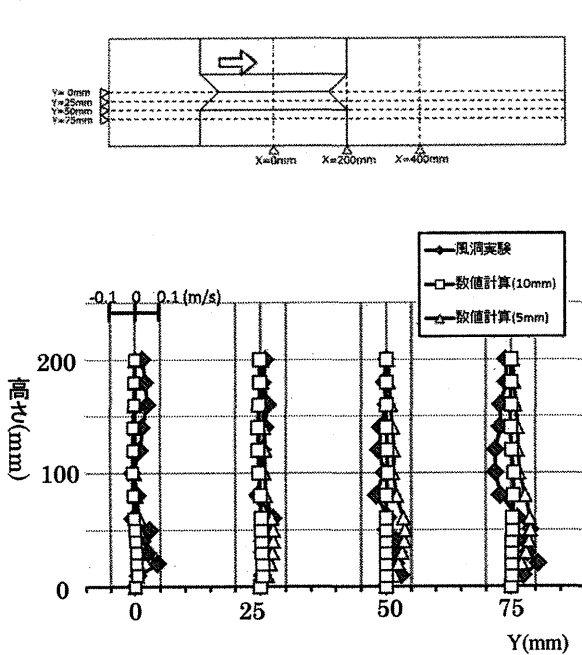
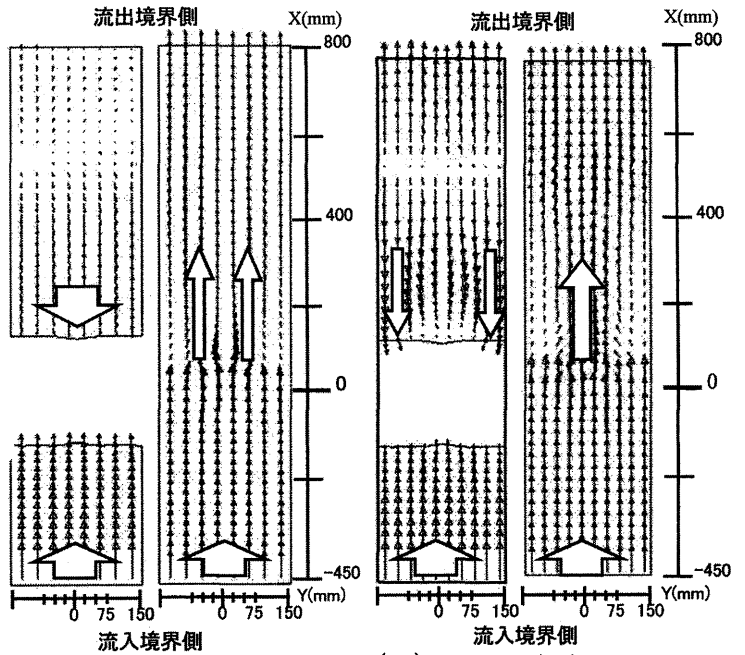


図9 流れ直交方向風速比較( $X=400\text{mm}$ )



(a-1)Z=10mm (a-2)Z=100mm (b-1)Z=10mm (b-2)Z=100mm  
(a)セルサイズ10mm (b)セルサイズ5mm

図10 水平方向風速ベクトル図

見られなかった。このため図9のように10mmの計算結果は流れ直交方向の風がほとんど生じなかったと考えられる。図10(b)のセルサイズ5mmでは(b-1)の地表付近で側壁面に強い逆流が生じ、その流れが山稜を上がり(b-2)の中央付近の流れに合流している様子が確認できる。前述のようにセルサイズ5mmの流れ直交方向の平均風速は風洞実験値と対応していたことから、実際の実験でもこの様な風の流れだった可能性がある。

## 5. 非定常流れの数値計算

### 5.1. 計算の諸条件

非定常流れの計算は二次元単純山稜地形のみを対象に行った。セルサイズは10mmと5mmの二通りとし、そ

他の設定は以下の通りである。

- ・乱流モデル：LES/Smagorinskyモデル
- ・スマゴリンスキー定数  $C_s = 0.10$
- ・解析時間：10秒(時間刻み0.001秒)
- ・解析アルゴリズム：PISO法
- ・差分スキーム(対流項)：二次精度多次元差分
- ・差分スキーム(粘性項)：中心差分

### 5.2. 計算結果

図11に非定常計算での数値計算及び風洞実験値の流れ方向の平均風速を、図12に風速の標準偏差を示す。ここでは山稜風下側に着目する。

模型山頂から風下側  $X=100\text{mm}$  での図11の平均風速をみるとセルサイズ10mmに比べ、セルサイズ5mmの方

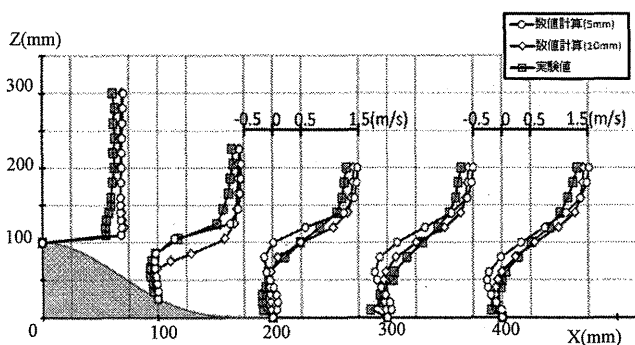


図11 流れ方向の平均風速比較

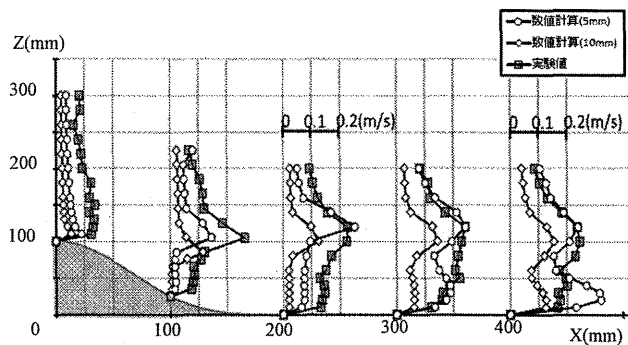
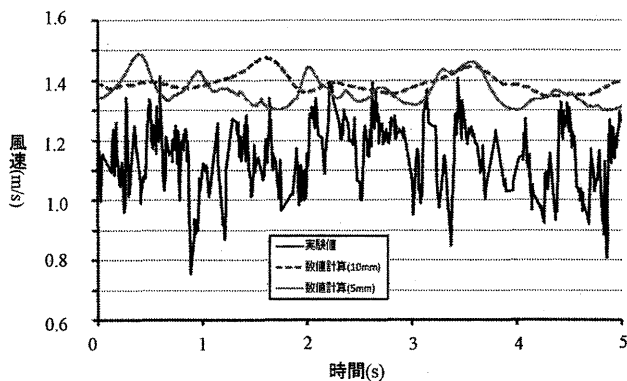
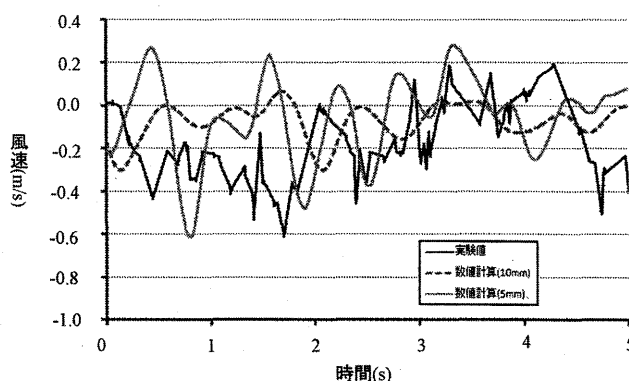


図12 流れ方向の風速の標準偏差比較

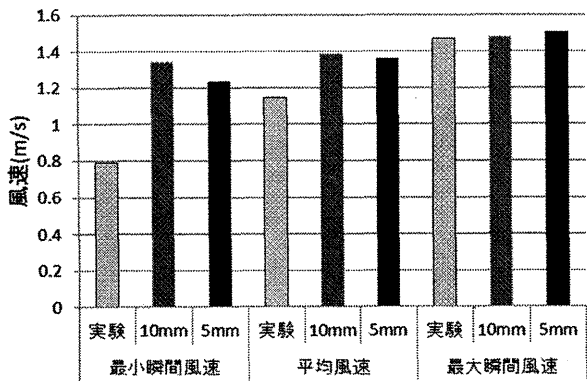


(a)  $(X = 0\text{mm}, Z = 40\text{mm})$

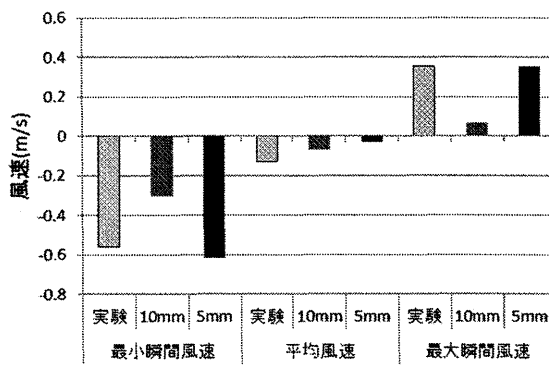


(b)  $(X = 300\text{mm}, Z = 30\text{mm})$

図13 風速の時刻歴波形比較



(a)  $(X = 0\text{mm}, Z = 40\text{mm})$



(b)  $(X = 300\text{mm}, Z = 30\text{mm})$

図14 最小・最大・平均風速の比較

が実験値とよく対応している。しかしながら  $X=100\text{mm}$  以外の位置では数値計算結果と風洞実験値の平均風速はあまりよい対応を示さなかった。図 12 の風速の標準偏差より、山稜山頂の  $X=0\text{mm}$  や  $X=100\text{mm}$  の地上付近では格子解像度によらず数値計算風速の標準偏差が小さく、乱れが小さくなっている。それらの位置以外では格子解像度の高いセルサイズ  $5\text{mm}$  のモデルの方が  $10\text{mm}$  のモデルより風速の標準偏差が大きく、風洞実験に近い値を示しており、大きな乱れが生成できた。またセルサイズ  $10\text{mm}$  および  $5\text{mm}$  の数値計算結果と風洞実験の3つとも、地上付近では山稜中心から風下に離れるほど乱れが大きくなる。平均風速が大きく変化する山稜風下側の高さ  $100\text{mm}$  付近で特に乱れが大きくなった。平均風速および風速の標準偏差の絶対値は異なるものの、定性的な風の乱れの性状は再現することができた。

図 13 に風洞実験と数値計算による風速の時刻歴波形を、図 14 に最小瞬間風速値、平均風速値、最大瞬間風速値の比較を示す。本論では山稜の頂部に位置する計測点(a) ( $X=0\text{mm}$ ,  $Z=40\text{mm}$ )及び風下に位置する(b) ( $X=300\text{mm}$ ,  $Z=30\text{mm}$ )での結果を、同図(a)と(b)に示す。

図 13 の計測点(a)での風速の時刻歴波形を見ると、前述のとおり数値計算による風の乱れは小さく、風洞実験と比較すると乱れの周期が長く短周期の乱れが再現されていない。図 14 の最小・最大瞬間風速、平均風速の比較をみると、計測点(a)では最大瞬間風速は数値計算風速と風洞実験値はよく対応するが、最小瞬間風速、平均風速は計算結果が風洞実験値よりも大きくなっている。格子サイズ  $5\text{mm}$  の場合、最大風速と最小風速との差がやや大きく短周期の波が再現されているものの、計算風速は格子サイズによらずほぼ等しく、山頂の計測点(a)では格子解像度の影響はほとんど見られなかった。図 13 の計測点(b)では格子解像度の高いセルサイズ  $5\text{mm}$  のモデルの計算では  $10\text{mm}$  のモデルと比べ、周期が短く実験値に対応する強い乱れを再現できている。図 14 の(b)を見ると平均風速はほぼ  $0\text{m/s}$  で、格子解像度によらず数値計算結果と実験値はよく対応しているが、最大瞬間風速と最小瞬間風速はセルサイズ  $5\text{mm}$  での計算結果がより実験値に近い値となった。

## 6.まとめ

本論では、風の流れ直交方向に一樣な形状を持つ二次元山稜及び流れ方向に浅い谷筋を持つ山稜について、本論では、風の流れ直交方向に一樣な形状を持つ二次元山稜及び流れ方向に浅い谷筋を持つ山稜について、64 ビットパソコンを用いて格子解像度の異なる計算領域を用いた数値流体計算を行い、風洞実験結果と比較検討を行った。また、非定常流れ場の数値計算結果と風洞実験結果とを比較し、格子解像度の違いが風速変動の再現に及ぼ

す影響を検討して、以下の所見を得た。

二次元単純山稜地形で定常計算を行った場合、

- 1) 山稜風上側では格子解像度にかかわらず数値計算結果と実験値はよく対応した。
- 2) 山稜風下側では、使用した 64 ビットパソコンで可能なセルサイズ  $2\text{mm}$  の場合の格子解像度が風洞実験値に最もよく対応した。

谷筋付き山稜地形で定常計算を行った場合は、

- 3) 山稜風下側では、格子解像度が風の 3 次元的な流れ方に影響する。

二次元単純山稜地形周りの非定常計算では、

- 4) 格子解像度が高いモデルで、より周期の短い強い乱れが再現でき、実験結果により近づく。
- 5) 格子解像度が高いほど最大と最小の瞬間風速がともに実験値に近くなった。

以上のように、従来の 32 ビットパソコンに比べて、64 ビットパソコンによる詳細な解像度での数値計算では山稜模型の実験結果により近い風速場を再現出来ることがわかったが、さらに、台風通過時などの実観測風速との比較検証が必要である。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金「台風・竜巻等のスーパー突風による建物の風荷重の増大インパクト（基盤(B)22360230 代表：前田潤滋）」及び「強風被害拡大影響因子のリアルタイム情報を学習するモデルの構築と住家強風危険度判定（基盤研究(C) 23510227 代表：友清衣利子）」の助成を受けました。

## 参考文献

- 1) 石田伸幸、前田潤滋、楠本貴博、本田誠、鶴則生、野口博志：福岡市西部での強風特性に及ぼす局所地域の影響、第 16 回風工学シンポジウム pp.7-12、2000.11
- 2) 友清衣利子、鶴則生、石田伸幸、前田潤滋：熊本県不知火町山地区の風況特性に関する風洞実験、2001 年度大会（関東）学術講演梗概集、pp.107-108、2001.9.
- 3) 友清衣利子、前田潤滋、鶴則生、孫玉平、森智治、喜多村美保、藤村真弓、下村百合子：2004 年台風による九州での風災害について（速報）その 2 九州地区での住家被害、日本建築学会研究報告九州支部 第 44 号・1 構造系、pp.509-512、2005.3.
- 4) 川床博昭、鶴則生、前田潤滋、友清衣利子：山稜山麓地形の風速分布に及ぼす地表面粗度の影響、日本建築学会研究報告九州支部 第 43 号・1 構造系、pp.229-232、2004.3.
- 5) 友清衣利子、喜多村美保、鶴則生、前田潤滋：強風被害の局所化に及ぼす周辺地形の影響 その 2 山稜越えの風速分布に関する風洞実験、日本建築学会研究報告九州支部 第 45 号・1 構造系 pp.185-188、2006.3.
- 6) 喜多村美保、友清衣利子、前田潤滋：強風被害の局所化に及ぼす周辺地形の影響 その 1 台風 0423 号通過時における佐賀県小城市周辺の CFD 解析、日本建築学会研究報告九州支部 第 45 号・1 構造系 pp.181-184、2006.3.
- 7) 友清衣利子、前田潤滋：台風 0423 号通過時における佐賀県小城市周辺風況の CFD 解析、2006 年度大会（関東）学術講演梗概集、pp.119-120、2006.9.
- 8) 前田潤滋：局所地形と大気温度層分布形状の相互作用による突風災害発生メカニズム、平成 16 年～平成 18 年度科学研究補助金（基盤研究(B)）研究成果報告

（受理：平成 24 年 6 月 7 日）