

地形性強風の数値予測と格子解像度の影響

Numerical Simulation of Local Strong Wind Induced by Topographic Effect
and Influence of Grid Resolution

内田孝紀*・大屋裕二**・友清衣利子***・前田潤滋****
Takanori UCHIDA, Yuji OHYA, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

*工博 九州大学助手 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)
**工博 九州大学教授 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)
***工修 九州大学助手 人間環境学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-19-1)
****工博 九州大学教授 人間環境学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-19-1)

This paper describes the numerical study of a non-stratified airflow over real complex terrain. Attention is focused on a mechanism of a local strong wind induced by a topographic effect. As a result, the airflow has converged to the col and a local strong wind has been generated leeward along the slope of the col. Furthermore, the influence of the reproduction accuracy of geographical features, that is, horizontal grid resolution was examined. Consequently, to reproduce the above-mentioned local strong wind, it was shown that the horizontal grid resolution from 50 to about 100m was necessary.

Keywords : CFD, LES, Complex terrain, Local strong wind, Topographic effect, Grid resolution

1. はじめに

2004年10月20日、九州に接近した台風0423号(トカゲ, TOKAGE)は、九州に上陸はしなかったものの、強風域が非常に広く、特に佐賀県旧小城町(現小城市、以後、小城町と称する)には被害が集中した(図1を参照)¹⁾。今回の台風0423号による被害発生時の風向は、北東～北北東であり、周辺の地勢を考慮すると、小城町の北側に位置する天山山脈の影響が大きいと推測される²⁾。すなわち、台風による強風が、局所的な地形効果によってさらに増大し、結果として強風被害が大幅に拡大したものと予想される。このような地形効果を伴う強風発生のメカニズムを解明するには、地表面粗度や温度分布の影響などを省いた条件設定が可能である数値シミュレーションが有効である³⁾。

我々の研究グループでは、RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する、国内・国外の急峻な複雑地形上の風況場・拡散場解析に適用可能な非定常・非線形風況シミュレータ(LES乱流モデル)の開発を行っている⁴⁾。解析空間は数百m～数km程度の狭領域に的を絞っており、流れの剥離、それに伴う逆流領域の形成、流れの局所的な増速、剥離せん断層の再付着など、風に対する地形効果を高精度に数値予測することが可能である。

本研究では、上記のRIAM-COMPACTを用い、二つの問題を調査・検討した。一つは、北北東の風向を対象に、広範囲の数値シミュレーションを実施し、小城町周辺に発

生した強風現象のメカニズムを明らかにする。もう一つは、局地的な規模の地形の再現精度、すなわち、格子解像度が計算結果に与える影響を調べる。

2. 一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた差分法によるラージ・エディ・シミュレーション(LES)

ここでは、本研究で用いた数値計算法や計算領域、境界条件などを記述する。

数値不安定を回避し、複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子を用いた。ここでコロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と(総)圧力を定義し、セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM)に基づき、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)を行う。流れの支配方程式は、フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式とナビエ・ストークス方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)⁵⁾に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン

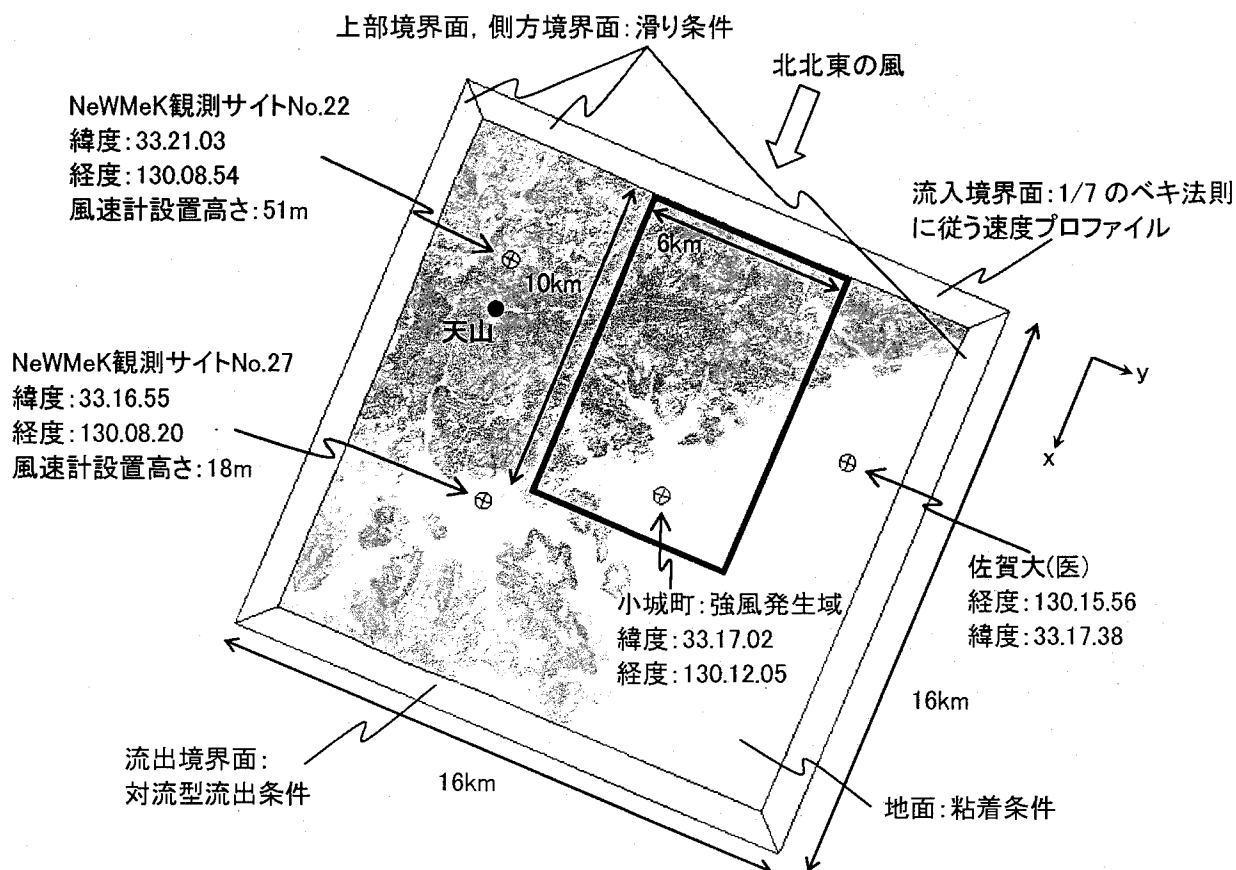


図-1 計算領域および境界条件など

ン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は梶島による補間法⁶⁾(4点差分+4点補間)を用いる。数値拡散項の重みは通常使用される河村-桑原スキーム⁷⁾タイプの $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ としその影響は十分に小さくする。SGSモデルには標準スマゴリンスキーマ⁸⁾を用いる。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。

計算領域および境界条件などを図-1に示す。計算領域は小城町を中心として16km×16km四方とした。上空の計算領域は5kmとした。地形形状は国土地理院の50m標高データ(数値地図50mメッシュ(標高))を用いて作成した。各方向の格子点数は主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)方向に161×161×51点である。x方向およびy方向の格子幅はほぼ等間隔で100m解像度とし、z方向の格子幅は不等間隔で地表面付近に滑らかに引き寄せた。地表第一セル、すなわち、最小メッシュ幅は約3mである。

対象とする風向は北北東である。流入境界面は1/7乗のベキ法則に従う速度プロファイルを与え、側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地面は粘着条件を課した。式(2)の無次元パラメータ Re はレイノルズ数($=U_{in}h/\nu$)であり、 $Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$ とした。

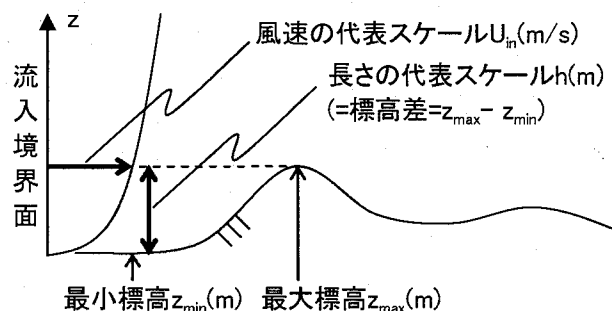


図-2 本計算における代表スケールの取扱い

ここで、 h は計算領域の標高差($h=1029$ m), U_{in} は流入境界面の最大標高における風速(図-2を参照), ν は動粘性係数である。時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3} h/U_{in}$ とした。

図-1には、小城町と併せて、NeWMeK⁹⁾の観測サイト(No.22, No.27)および佐賀大(医)(以後、佐賀と称する)を示している。NeWMeK (Network for Wind Measurement in Kyushu)は、九州電力(株)の広域高密度風観測システムである。台風通過時などにおける局地風の生成消滅過程など、広域での強風分布特性をリアルタイムで捉えることが可能である。このシステムは、九州全域で送電鉄塔頂部を利用した123カ所の観測点を有し、1秒間隔のデータを同時連続記録できる。NeWMeK観測サイトのNo.22, No.27では、台風通過時に強風が観測されている。これは後述する。ま

た、佐賀は小城町との比較のためのサイトとして用いた。

3. 台風0423号通過時の風速記録

表-1に、NeWMeK観測サイトのNo.22, No.27で記録された台風0423号通過時の風速データを示す。2004年10月20日、16時30分～40分における10分間の結果である。No.27の風速計が設置されている地上高が18mであることを考慮すると、この時間帯には広範囲にかつ、地上付近で強風が発生していたことが予想される。

表-1 NeWMeK観測サイトで記録された風速データ

記録時間: 2004年10月20日, 16時30分～40分の10分間				
NeWMeK	最大瞬間風速(m/s)	風向	平均風速(m/s)	風向
No.22 (51m)	31.4	北北東	18.1	北東
No.27 (18m)	17.6	北北東	10.4	北北東

4. 計算結果と考察

4.1 流れの可視化と強風発生メカニズム

この節では、小城町周辺における流れの可視化を示し、小城町周辺の強風発生メカニズムを考察する。図-3には、地上高20mの速度ベクトル図(瞬間場)を示す。図-3(a), (b)はそれぞれ異なる時刻の結果である。図-4には、図-3の時刻に対応した主流方向(x)速度成分のコンター図(瞬間場)を示す。ここで、コンターの範囲は $0.6 \leq (u/U_m) \leq 1.3$ で、この範囲を30分割して表示している。よって、コンターが表示されている地域は、周辺に比べて局所的に風速が大きいことを意味する。図-3の小城町と佐賀に注目する。佐賀周辺では風速の大きな領域はほとんど発生しておらず、弱風域である。これに対し、小城町では上流側に位置する標高の高い地域と同程度の強風が発生しているのが見て取れる。図-4と併せて吟味すると、これはさらに明確に理解できる。図-4では、小城町周辺に絶えず増速域が発生している。これは流れのアニメーションからも確認された。興味深いのは、図-4に示す局所的な増速域が上流側から筋状に繋がっていることである(図中の点線で囲んだ領域)。これは、小城町上流から地形効果により増速流が発生し、これが減速することなく小城町に流下していることを示唆している。

図-3および図-4の実線で囲んだ地域に、小城町周辺にまで到達する増速流の発生源があることが明らかになった。よって、以下ではその部分を拡大し、これを図-5に示す。図-5には、流線図と図-4で示した主流方向(x)速度成分のコンター図を重ね合わせた結果(瞬間場)を示す。ここで、流線図は地上高20mから仮想粒子を放出し、この軌跡として描いた。流線図に注目する。小城町上流の山脈地形には、図中に実線で囲むあたりにわずかな地形の窪みが存在し、そこで流れが収束している様子が捉えられている。つ

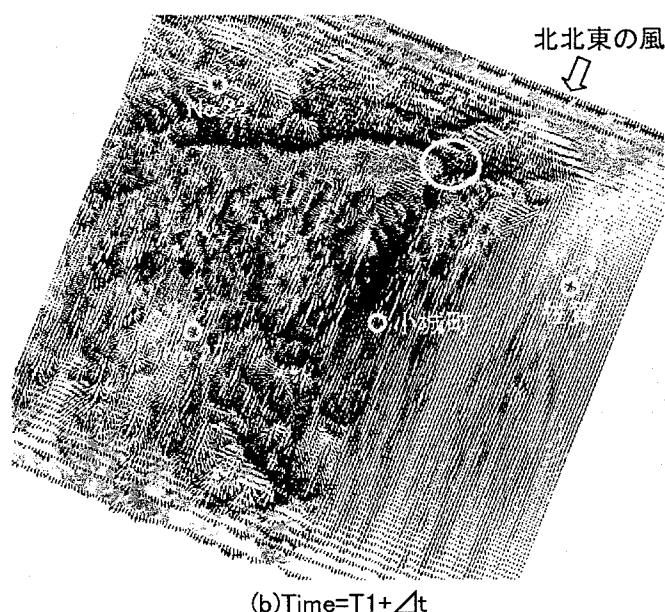
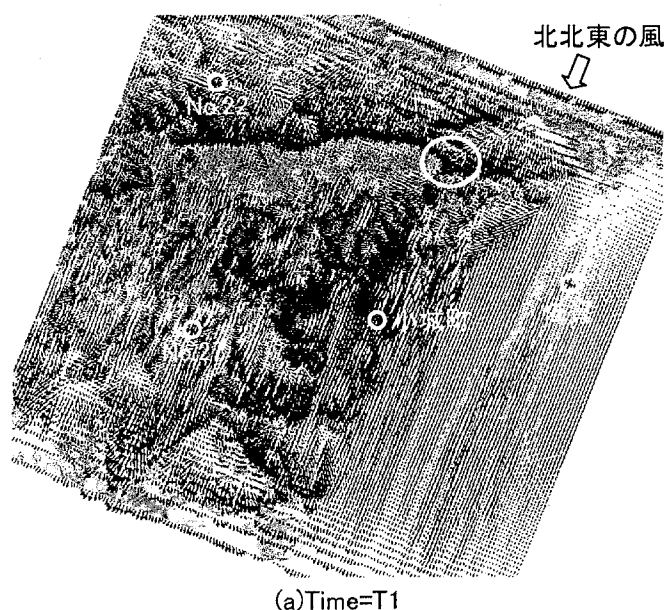


図-3 地上高20mの速度ベクトル図

まり、小城町周辺に発生する強風は、上流に位置する山脈地形のわずかな窪みに風の流れが収束し、それが、いわゆる、だし風(Gap Flow)を形成しているために生じていると推測される。さらに、図-6に示すように、だし風が流下しやすい地形形状(風の道)であることも増速流がそれほど減速していない理由と考えられる。

4.2 時刻歴波形と乱流諸量の鉛直プロファイル

この節では、より定量的な考察を行う。図-7には、小城町の位置に関して、主流方向(x)の実スケール速度成分の時間変化(地上高20m, 30m)を示す。比較のため、佐賀(地上高20m, 30m)の時刻歴波形も併せて示す。ここで、数値シミュレーションにより出力された無次元風速値を実スケールに換算する方法について説明する。本計算では、風速および時間は図-2に示す代表スケールに基づいて、式(3)およ

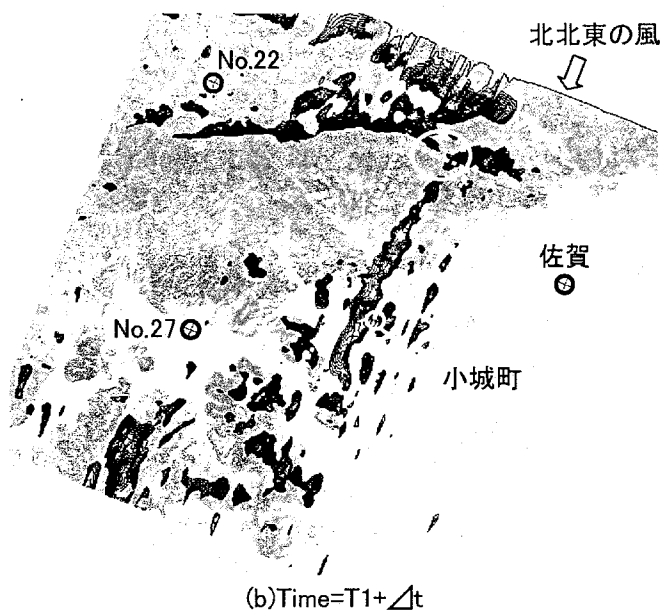
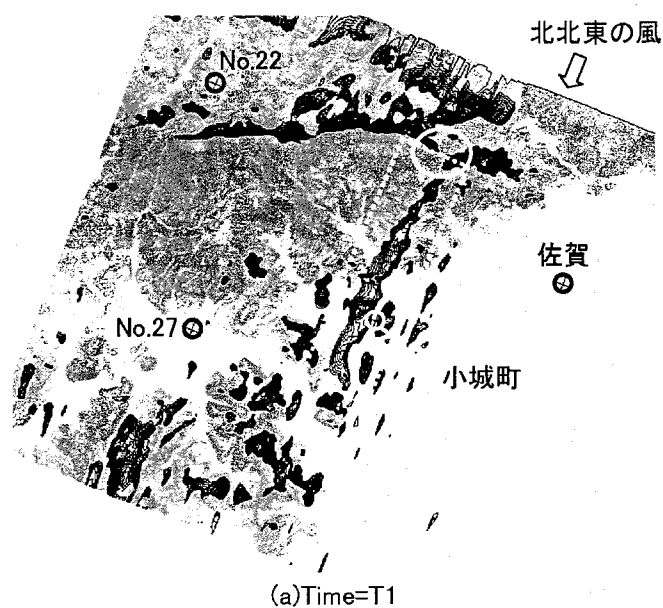


図-4 地上高20mの主流方向(x)速度成分のコンター図,
 $0.6 \leq (u/U_m) \leq 1.3$ を30分割

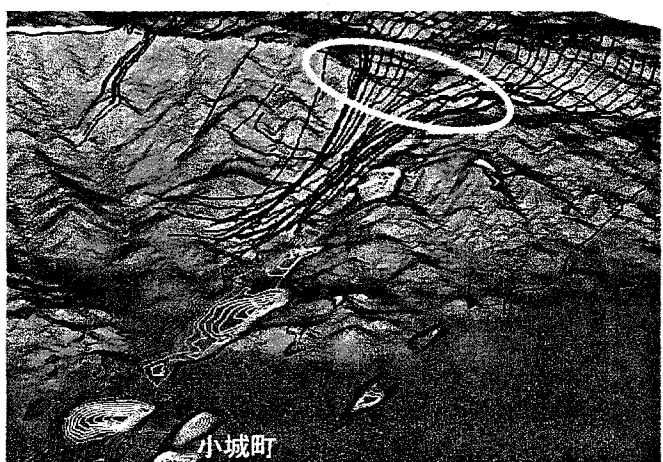


図-5 地上高20mから描いた流線図と、主流方向(x)
速度成分のコンター図, $0.6 \leq (u/U_m) \leq 1.3$ を30分割,
Time=T1



図-6 小城町周辺に発生する局地強風のメカニズム

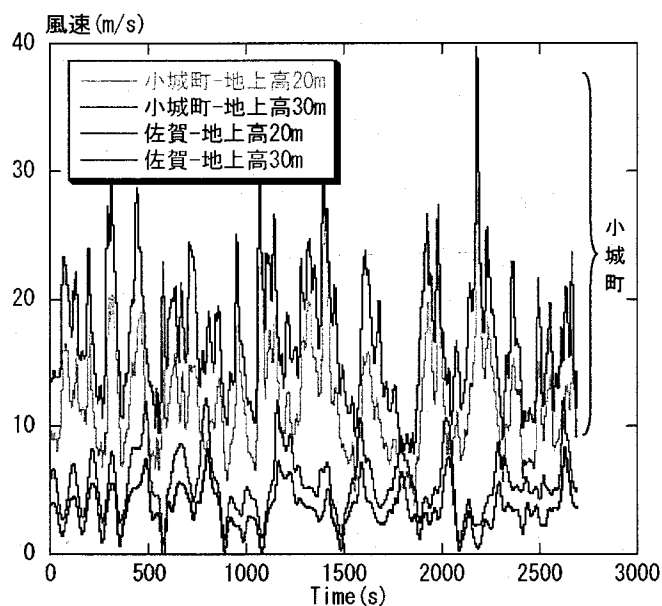


図-7 小城町および佐賀地点における主流方向(x)
速度成分の時刻歴波形、実スケール

【風速および時間の正規化】

$$u_i \Big|_{\text{無次元}} = u_i \Big|_{\text{実スケール}} / U_m \quad (3)$$

$$t \Big|_{\text{無次元}} = t \Big|_{\text{実スケール}} / (h/U_m) \quad (4)$$

び式(4)のように正規化している. ここで, 便宜上, 空間フィルタ操作を施した上付き(-)は省略する. 実スケールの値に換算する際には, 式(3)および式(4)に基づいて, 具体的な代表スケール h (m), U_m (m/s)の数値を代入すれば良い. 風速については, NeWMeK観測サイトのNo.22(地上高51m)に対応する無次元平均風速値が, 表-1に示す2004年10月20日, 16時30分~40分における10分間平均風速(18.1m/s)に一致するように U_m (m/s)を設定した. これは, NeWMeK観測サイトのNo.22が本計算領域の上流側に位置し, かつ, 地上高が51mと比較的高いため, 周囲の地形の影響などが小

さいと予想されたためである。

図-7から、佐賀地点においては地上高20m、30mともにそれほど大きな風速は出現しておらず、弱風状態であるのが分かる。これに対し、小城町では地上高20m、30mともに平均風速は佐賀地点よりもはるかに大きい。また、スパイク状に大きな風速値が頻繁に出現している様子が観察される。図-7に示す時刻歴波形から求めた平均風速を表-2に示す。

表-2 小城町および佐賀地点における主流方向(x)速度成分の平均値, 実スケール

地点	主流方向(x)速度成分の平均値(m/s)
小城町, 地上高20m	11.8
小城町, 地上高30m	16.9
佐賀, 地上高20m	3.6
佐賀, 地上高30m	5.6

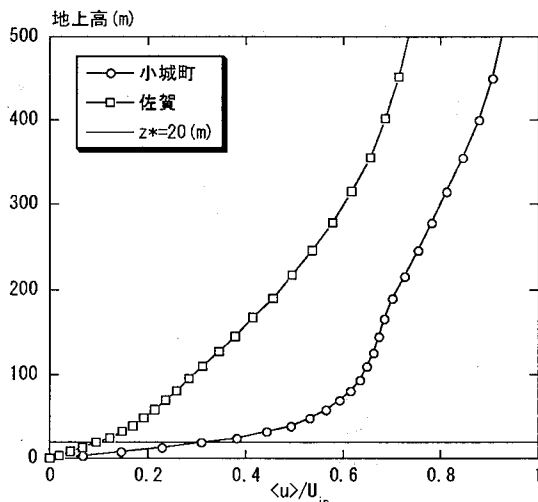


図-8 小城町および佐賀地点における平均速度プロファイル, 主流方向(x)速度成分

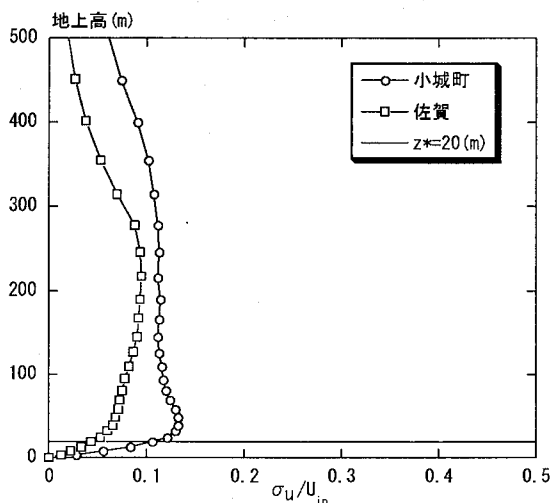


図-9 小城町および佐賀地点における標準偏差の鉛直プロファイル, 主流方向(x)速度成分

小城町および佐賀地点における主流方向(x)の平均速度プロファイルと標準偏差の鉛直プロファイルを図-8および図-9に示す。縦軸は実スケールでの地上高 z (m)であり、横軸は流入風速 U_{in} で正規化された無次元値である。図-9は、各メッシュ点の標準偏差を、その点の平均風速で除した乱れ強さ(乱流強度)ではないことに注意していただきたい。図-8および図-9ともに地上高20mの位置を図中に示している。図-8に示す平均速度プロファイルに注目すると、地上高20mにおいて、小城町では佐賀地点と比較して約3倍程度の強風が生じていることが分かる。図-9に示す標準偏差の鉛直プロファイルにおいても、地上高20mでは、小城町は佐賀地点と比較して明らかにその値が大きい。よって、小城町では図-7でも述べたが、変動の大きい非常に強い風が発生していることが明らかになった。

5. 格子解像度の影響

前節において、僅かな地形起伏の変化が地形性強風(局地強風)の発生源(本研究では、だし風: Gap Flow)になることが示された。そこで、数値シミュレーションを用いて、こうした流動現象を再現するためには、どの程度の精度で微小地形を再現すれば良いのか、つまり、どの程度の格子解像度が必要なのかを明らかにすることは非常に重要である。本研究では、格子解像度の異なる三ケースの数値シミュレーションを行い、上記の問題について検討を行った。

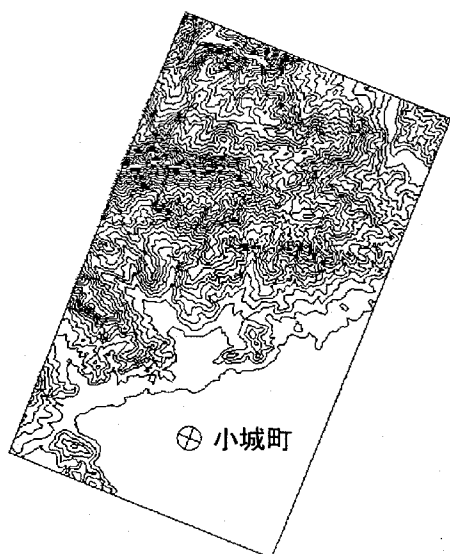
計算領域は、図-1に実線で囲んだ領域である。この領域は主流方向(x)に10km、主流直交方向(y)に6kmの空間を有し、鉛直方向(z)は4kmに設定した。格子解像度は、表-3に示す三ケースを検討した。なお、鉛直方向(z)のメッシュ数は三ケースともに51点とし、格子解像度も同じである。最小メッシュ幅である地表第一セルは約2.4~2.5mである。

表-3 検討した三ケースの格子解像度

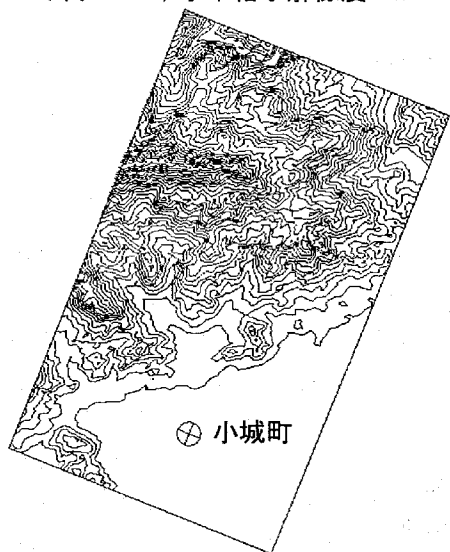
	水平格子解像度 ($\Delta x = \Delta y$)	格子点数 ($N_x \times N_y \times N_z$)	最小標高, 最大標高, 標高差, 単位(m)
ケース1	50m	201 × 121 × 51	4, 832, 828
ケース2	100m	101 × 61 × 51	4, 820, 816
ケース3	200m	51 × 31 × 51	4, 801, 797

図-10には、地形性強風(局地強風)の発生源となった地形周辺の再現精度の比較を示す。図-10(a)に示す50m解像度と、図-10(b)に示す100m解像度(前節までの広領域の計算における解像度)に有意な違いは見られない。一方、図-10(c)に示す空間解像度200mの結果は、図-10(a), (b)と比較して、地形起伏の再現に顕著な違いが見られる。それぞれの格子解像度で得られた計算結果を以下に示す。

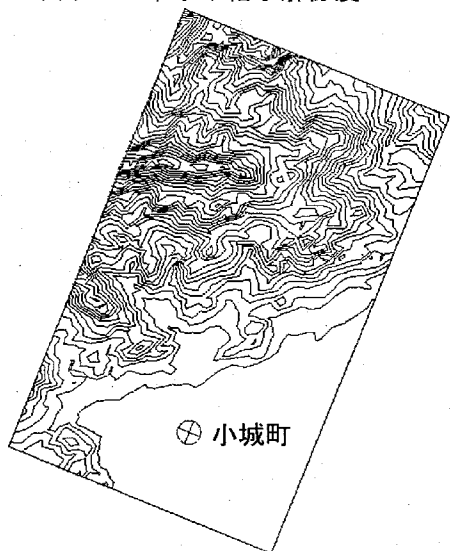
図-11には、地上高20mにおける主流方向(x)速度成分



(a) ケース1, 水平格子解像度50m



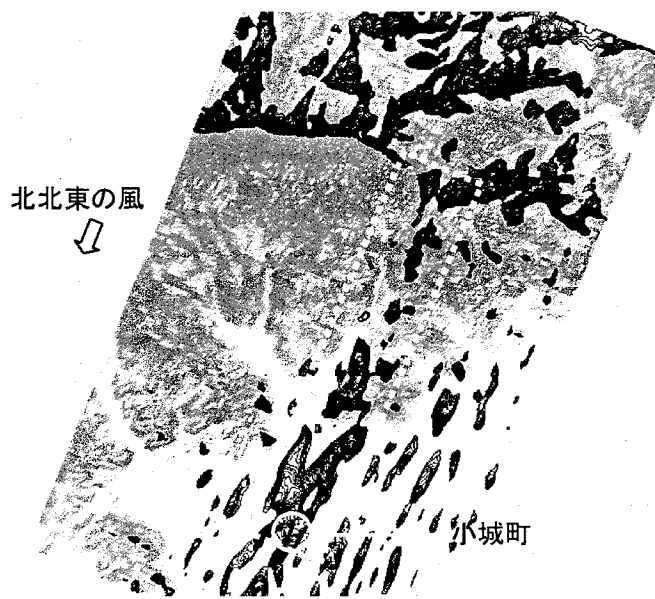
(b) ケース2, 水平格子解像度100m



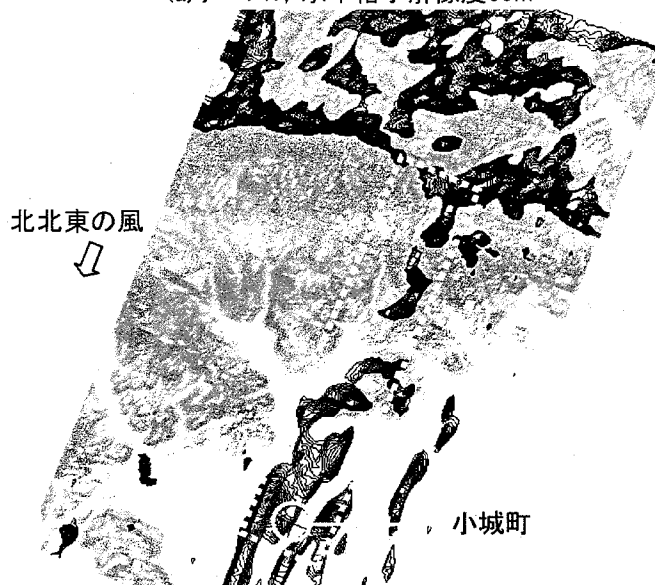
(c) ケース3, 水平格子解像度200m

図-10 地形の再現精度の比較

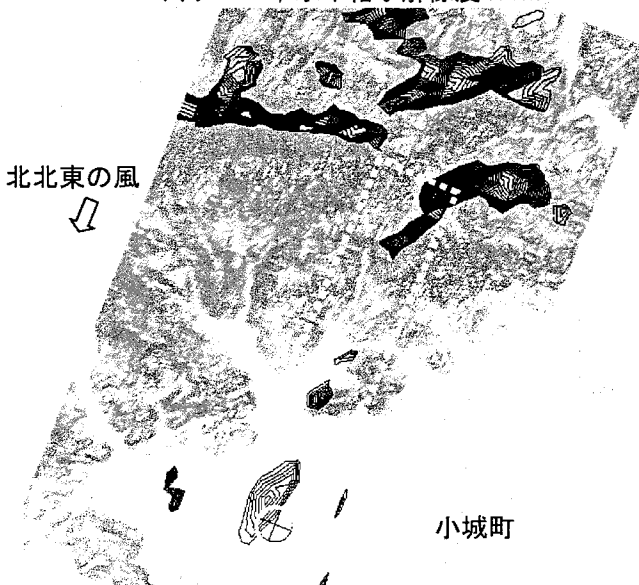
のコンター図(瞬間場)を示す。ここで、コンターの範囲はこれまでと同様、 $0.6 \leq (u/U_m) \leq 1.3$ の範囲を30分割して表示



(a) ケース1, 水平格子解像度50m

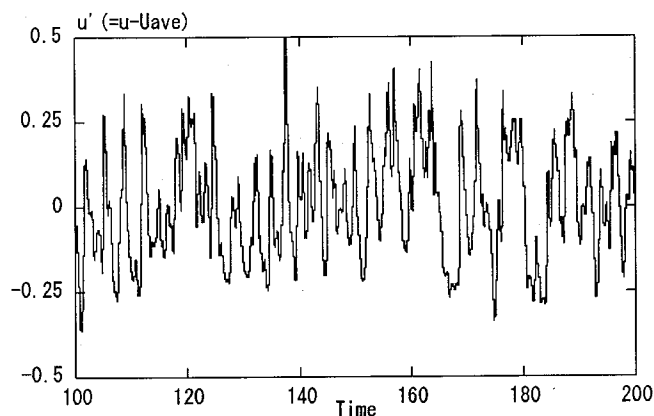


(b) ケース2, 水平格子解像度100m

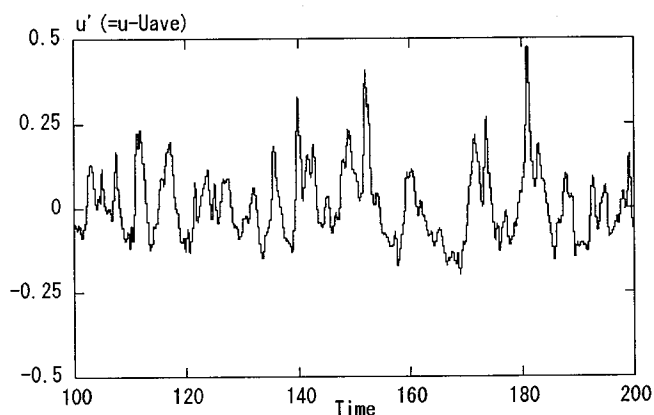


(c) ケース3, 水平格子解像度200m

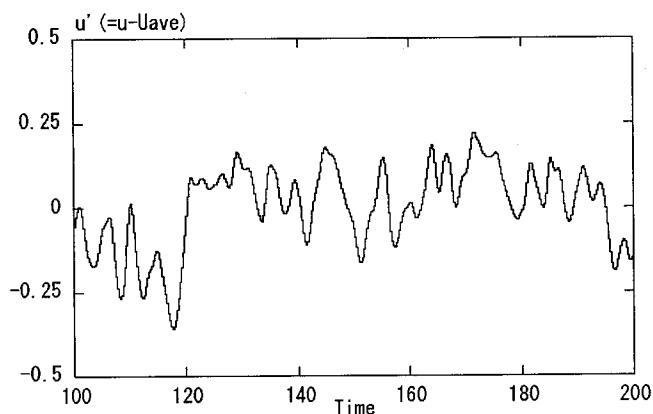
図-11 地上高20mの主流方向(x)速度成分のコンター図,
 $0.6 \leq (u/U_m) \leq 1.3$ を30分割



(a) ケース1, 水平格子解像度50m



(b) ケース2, 水平格子解像度100m



(c) ケース3, 水平格子解像度200m

図-12 小城市における主流方向(x)
速度成分の時刻歴波形, 無次元スケール

している。図-11(a)に示す50m解像度と、図-11(b)に示す100m解像度では、小城市上流の谷部からの増速流が、図-4と同様に観察される。一方、図-11(c)に示す空間解像度200mの結果は、谷地形からの局地風はほとんど再現されていない。

格子解像度の影響は、速度変動成分の時刻歴波形を示すことでより明確に理解される。図-12には、小城市の位置に関して、地上高20mにおける主流方向(x)の速度変動成分 $u' (=u - U_{ave})$ の時間変化を示す。縦軸および横軸ともに無

次元スケールである。なお、横軸の時間スケールは、図-7に示した実スケールにほぼ対応する。図-12(a)に示す50m解像度と、図-12(b)に示す100m解像度では、図-7で述べたような大きな速度変動(変動振幅)が観察される。特に、図-12(a)に示す50m解像度では、格子解像度の増加に伴い、高周波成分がより顕著に再現されているのが分かる。これに対して、図-12(c)に示す200m解像度の結果では、上記で述べた増速流の通過に伴う速度変動はほとんど捉えられておらず、平滑化されたような結果となっている。

6. おわりに

本研究では、非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACTを用い、台風0423号に伴い佐賀県小城市に発生した強風発生メカニズムを調査した。さらに、こうした地形性強風を数値シミュレーションで再現する場合に必要な地形の再現精度、すなわち、格子解像度の違いが計算結果に与える影響についても検討を行った。本研究で得られた知見は以下に示す通りである。

- 1) 台風0423号による被害発生時の風向は、北東～北北東であり、小城市の北側に位置する天山山脈が影響していることが示された。
- 2) 小城市上流の山脈地形には、わずかな地形の窪みが存在し、そこで流れが収束している様子が捉えられた。すなわち、小城市周辺に発生する強風は、上流に位置する山脈地形のわずかな窪みにおいて風の流れが収束し、それが、いわゆる、だし風(Gap Flow)を形成するために生じた可能性が高いことが明らかになった。
- 3) 局地的な規模の地形の再現精度に関しては、50m～100mの水平解像度が必要であることが示された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、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の喜多村美保さんには、多大な協力を頂いた。また、文部科学省科学研究費補助金「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(基盤研究(B)(2)課題番号16360279, h16～18, 代表:前田潤滋)」の援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 友清衣利子, 前田潤滋: 2004年台風による九州での風災害について(速報)―台風0416号, 0418号, 0421号, 0423号―, 日本風工学会論文集, No.102, pp.57-65, 2005.
- 2) 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—, 日本建築学会九州支部研究報告, 第45号, pp.181-184, 2005.
- 3) 丸山 敬, 石川裕彦, 内田孝紀, 河井宏允, 大屋裕二: 台風0418号通過時の宮島周辺の強風場に関する数値シミュレーション, 日本風工学会論文集, 投稿中
 - 4) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発—風況精査とリアルタイムシミュレーション—, 日本流体力学会誌ながれ, Vol.22, pp.417-428, 2003.
 - 5) Kim, J. and Moin, P. : Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, J. Comput. Phys., Vol.59, pp.308-323, 1985.
 - 6) 梶島岳夫, 太田貴士, 岡崎和彦, 三宅裕: コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, pp.3247-3254, 1997.
 - 7) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K. : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986.
 - 8) Smagorinsky, J. : General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.
 - 9) 前田潤滋, 石田伸幸: 広域高密度風観測システムによる強風分布特性のモニタリング, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.1-6, 1996.

(2006年4月13日 受付)