

3次元数値モデルによる 九大新キャンパスの風況シミュレーション

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4783552>

出版情報：九州大学情報基盤センター年報. 2, pp.99-106, 2002-03. 九州大学情報基盤センター
バージョン：
権利関係：



3次元数値モデルによる 九大新キャンパスの風況シミュレーション

Numerical Simulation of Airflow over the New Campus Area of Kyushu University

内田 孝紀[†] 大屋 裕二[†]

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

[†]…九州大学応用力学研究所

[†]…Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

要旨 数百m～数十km程度の小規模スケールから中規模スケールまでの風況場解析を対象に開発した、局地的風況予測モデル(RIAM-COMPACT)の特徴を示し、九州大学新キャンパス移転地を含む実地形上の風況場解析に適用した。特に新キャンパス移転地上とその周辺における風況特性を詳細に調べるため、ネストグリッドシステム(水平分解能 $\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$)を導入した。同時に行った風洞実験結果との比較から、計算コードの有効性と計算結果の妥当性が示された。さらに、より現実に近い状況を模擬するため、新キャンパス移転地が乱流境界層に埋没した場合の計算も行った。

Abstract In order to simulate unsteady three-dimensional airflow over complex terrain with characteristic length scales of the order of kilometers, we have been examining the large-eddy simulation (LES) technique using a finite-difference method (FDM). These LES codes are referred to as the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). In this paper, using the RIAM-COMPACT, We have performed the calculation of airflow over real complex terrain by introducing the nested grid system ($\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$). This area covers the new campus of Kyushu University. Compared with the wind tunnel experiment, the numerical results show that the airflow is locally accelerated or decelerated, due to the topographic effects. Furthermore, we carried out the calculation of turbulent airflow over the new campus area.

1. 緒言

日本の地勢を概観すると、平坦な地形は少なく、複雑で急峻な地形がほとんどである。したがって、欧米で汎用的に使用されている既存の線形数値モデル¹⁾を国内の局所風況予測に適用した場合、その予測精度は著しく低下する。この理由は、欧米の線形数値モデル¹⁾が流れの剥離を伴わない比較的なだらかな丘陵地形を対象にしているからである。日本国内において地表面近くの風況特性を高精度に数値予測するためには、風に対する地形効果を考慮することが極めて重要となる。すなわち、急峻な複雑地形に起因して生じる剥離流や乱れなどを高精度に数値予測できる局

地的風況予測モデルの確立が強く期待されている。このような社会的、工学的要請があるにも関わらず、十分な予測精度を有する数値モデルは未だ確立されておらず、各方面で精力的な研究が行われている²⁻⁴⁾。

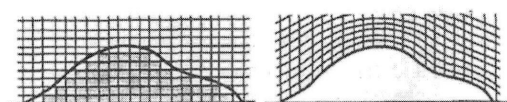
我々は空間スケールで数百m～数十km程度の強風時および弱風時の風環境予測を対象にした、RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する計算プログラムを開発している⁵⁻¹⁰⁾。具体的に強風時の風環境予測には、風力発電の適地選定に関連した局所的な風の増速域と増速率の推定などが含まれる。一方、弱風時の風環境予測には、

安定成層状態下での大気汚染物質の移流拡散予測などが含まれる。本研究ではRIAM-COMPACTを九州大学新キャンパス移転地(図3を参照)を含む実地形上の風況場解析に適用した。また同時に風洞実験を行い、計算コードの有効性と計算結果の妥当性を検証した。さらに、より現実に近い状況を模擬するため、移転地が乱流境界層に埋没した場合の計算も行い、流入気流の速度勾配と乱れの影響を検討した。

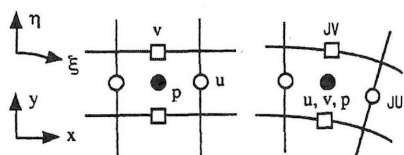
2. RIAM-COMPACTの概要

我々の開発した局地的風況予測モデルRIAM-COMPACTは差分法に基づいたFORTRANプログラムである。主な特徴は以下に示す通りである。詳細な内容については、文献⁷⁾を参照していただきたい。

- 1) 国土地理院などの標高数値データに基づいて複雑地形を再現する際、直交座標系のスタガード格子、あるいは一般曲線座標系のコロケート格子を適宜選択し、計算格子を形成することが可能である(図1、図2を参照)。前者の場合には、実地形はセルの集合体で矩形状に近似される。この際、格子解像度を上げれば曲線的な地形形状も再現可能である。



(a)直交座標系 (b)一般曲線座標系
図1 RIAM-COMPACTにおける座標系



(a)スタガード格子 (b)コロケート格子
図2 それぞれの座標系に適した変数配置

- 2) 雑地形上の非定常な高レイノルズ数複雑乱流場を計算対象とするため、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)と呼ばれる乱流モデルを採用している。LESでは流れ場に空間フィルタを施し、格子スケール以上の大規模渦については、流れ場の影響を強く受けるため、モデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、格子スケール以下の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用については、物理的考察に基づいてモデル化し計算に取り入れる¹¹⁾。

- 3) ネスティング手法を導入することにより、広域の風況場から注目する局所域の風況場まで多段階で効率良く計算することが可能である⁹⁾。
- 4) 計算領域の上流側にドライバ部を設定し、そこで十分に発達した乱流境界層を直接生成し、これを流入条件として用いることで、より現実に近い状況を模擬することが可能である^{8, 10)}。

3. 実地形上の風況場解析への適用

九州大学新キャンパス移転地を含む実地形上の風況場解析に、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTを適用した。図3に示すように、移転地は福岡市西区の元岡・桑原地区(糸島半島中央東寄りに)位置し、周辺地勢の特徴として西側に火山(244m)、南西に可也山(365m)が位置している。

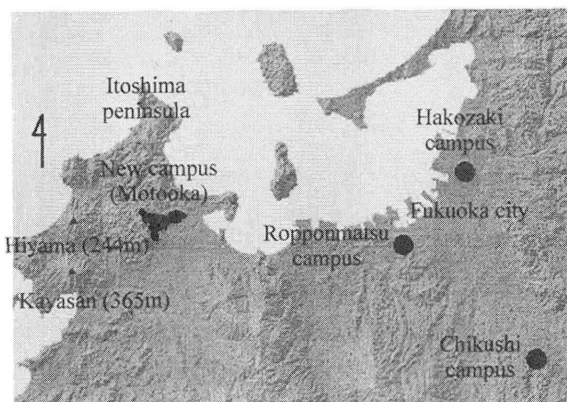


図3 新キャンパス移転地周辺の地勢

3.1 広域地形を対象にした風況場シミュレーション

本研究では、新キャンパス移転地周辺の卓越風である西風を想定した。周辺地勢から、移転地上の風況場に影響を及ぼす地形として火山(244m)と可也山(365m)が予想された。そこで、まずこの二つの地形を含む比較的広い領域を対象に計算を行った。図4に計算領域と座標系を示す。計算領域は実スケールで主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $9.75(\text{km}) \times 7.8(\text{km}) \times 1.46(\text{km})$ の空間を有する。実地形の形状は国土地理院の50m標高数値データに基づいて作成した。格子点数はx, y, z方向に $196 \times 157 \times 81$ 点である。水平方向は等間隔($\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$)の空間分解能、鉛直方向は地表面付近において密になるように不等間隔($\Delta z = 1.8 \sim 180\text{m}$)の空間分解能とした。速度の流入条件に関して、地形の起伏変化に伴う地表面付近の風況場の変化を明確にするため、速度勾配と乱れの影響は省略し一様風速を与えた。流入気流の速度勾配と乱れの影響

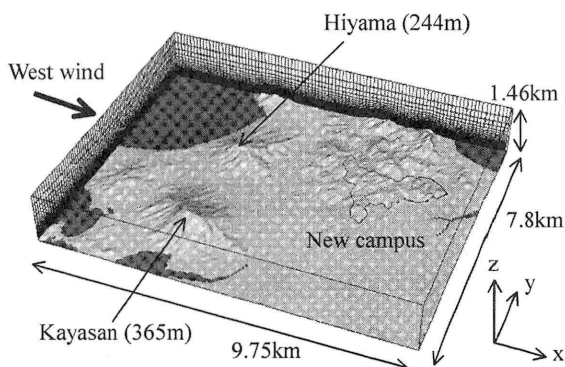


図4 広域地形を対象にした場合の計算領域と座標系

を考慮した計算は後述する。その他の速度の境界条件は、側面と上部境界は滑り条件、流出断面は対流型流出条件とした。地面境界条件は、鉛直方向の最小メッシュサイズを1.8(m)と十分に小さくし、対数則に基づく人工的境界条件は用いず、粘着条件を適用した。また、森林などの地表面粗度の影響は考慮していない。さて、自然風との相似性を考慮して複雑地形上の大気流を再現する場合には、レイノルズ数を臨界値以上にすることが望ましい。風洞実験における臨界レイノルズ数は、平坦地において 3.7×10^4 、複雑地形において 3.8×10^4 などの報告がある。いずれにしても臨界レイノルズ数は 10^4 のオーダーである。よって、これ以上のレイノルズ数では乱流特性はほぼ不変となり、大気境界層と相似な乱流場が再現できると報告されている¹²⁾。以上の理由から、本研究では可也山(365m)を高さの代表値 h とし、流入境界面での高さ h における一様流入風速 U を用いてレイノルズ数 $Re(=Uh/\nu)=2.5 \times 10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t=1 \times 10^{-3}h/U$ とした。計算パラメータについて実スケールとの対応を考察する。風速を $U=5(m/s)$ とすると、無次元時間100の計算は約2時間の時間積分に対応する。

図5に地形表面からの実スケール $z^*=60(m)$ における瞬間場(主流方向(x)の速度成分 $\bar{u}/U$)と時間平均場($\langle \bar{u} \rangle / U$)を示す。両者ともに火山と可也山の upstream 斜面における気流の増速($\bar{u}/U > 1$, あるいは $\langle \bar{u} \rangle / U > 1$)、両地形背後における逆流($\bar{u}/U < 0$, あるいは $\langle \bar{u} \rangle / U < 0$)、両地形を迂回する流れなどが明確に観察される。またわずかな地形起伏の変化に伴い、局所的な増速域や減速域が形成されている。地形効果に伴い地表面近くの風況パターンが変化する様子を再現できることは、RIAM-COMPACTの大きな特徴であると言える。さて、移転地(図中に表示)に対する火山と可也山の影響に注目する。西風を想定した場合、移転地のほぼ上流に位置する火山については、火山背後の剥離流とそれに起因した乱れが移転地上の風況場に強く影響していることが予想される。これに対し、可也山に起因した剥離流の影響はほとんど確認できない。

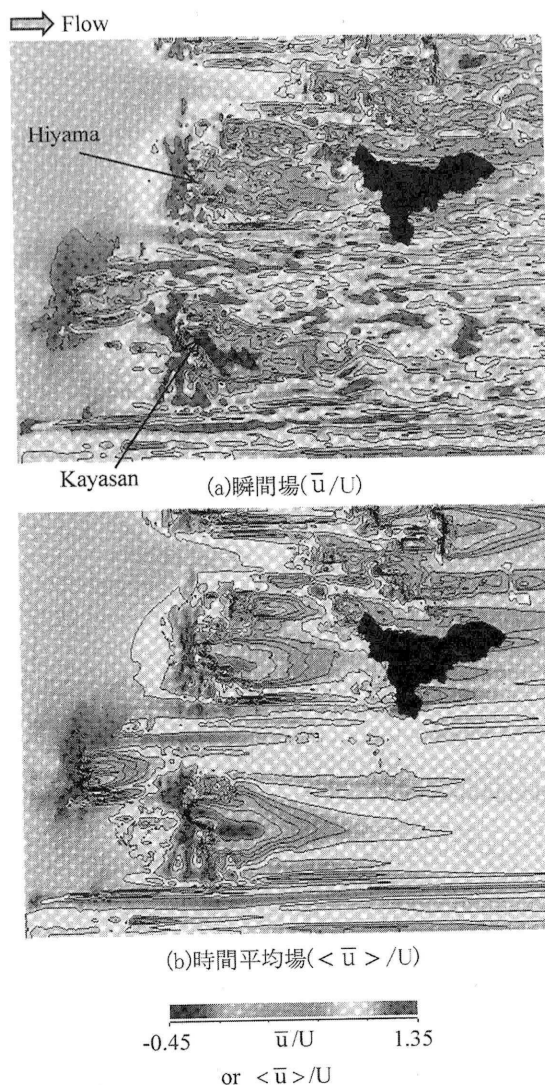


図5 主流方向(x)の速度成分の分布, $z^*=60(m)$

3.2 ネストグリッドによる高解像度風況場シミュレーション

前節の計算結果から、西風を想定した場合、新キャンパス移転地上の風況場に対して、可也山に起因する剥離流の影響はほとんどないことが確認された。そこで図6に示すように、可也山を省略した計算領域を新たに設定した。また同時に、移転地内外の風況特性を詳細に調べるため、ネストグリッドシステム(one way nesting)を導入した。この手法の特徴は、広域の風況場から注目する局所域の風況場までの多段階計算を同時並行的に行うことである。結果として、注目する領域の風況場を高解像度でかつ効率的に計算することが可能である。移転地周辺の広域をグリッド1(水平分解能50m)、移転地を含む局所域をグリッド2(水平分解能25m)とした。グリッド1は $9.75km(x) \times 4.65km(y) \times 1.46km(z)$,

グリッド2は5km(x)×2.7km(y)×1.46km(z)の空間をそれぞれ有する。格子点数はグリッド1で約150万点、グリッド2で約180万点である。

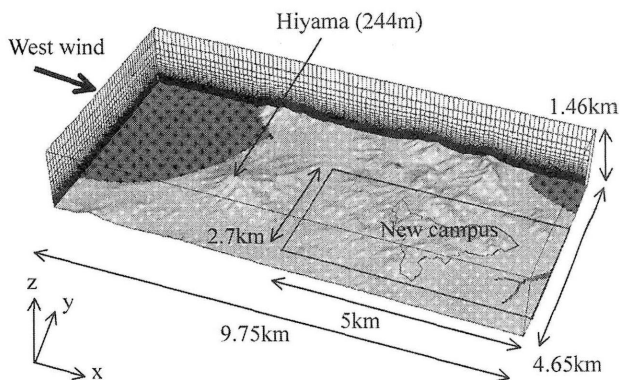


図6 ネストグリッドを用いた場合の計算領域と座標系

グリッド2に関して、 $z^*=60(\text{m})$ の時間平均場(主流方向(x)の速度成分 $\langle \bar{u} \rangle / U$)を図7に示す。格子解像度の増加に伴い、地形起伏の影響を受けた気流の局所的増速($\langle \bar{u} \rangle / U > 1$)、あるいは減速($\langle \bar{u} \rangle / U < 1$)がより顕著に再現されている。特に移転地内(図中の黒線)に注目すると、南部の石ヶ岳(99m)の山頂付近において、一様流入風速Uに対して約20%の増速が確認される(図中に表示)。これは火山を迂回した流れが、石ヶ岳山頂付近で増速された結果であると推測される。

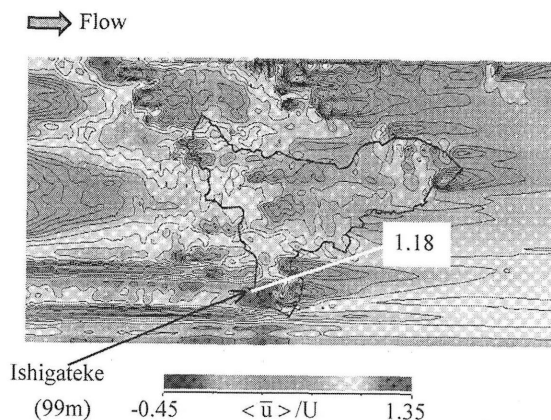
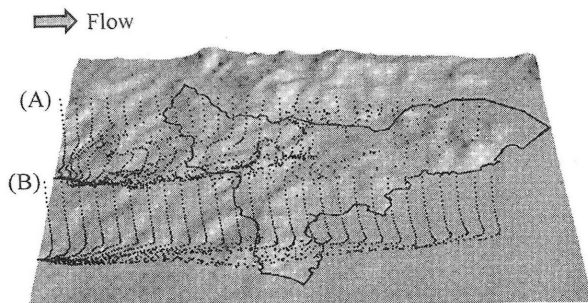


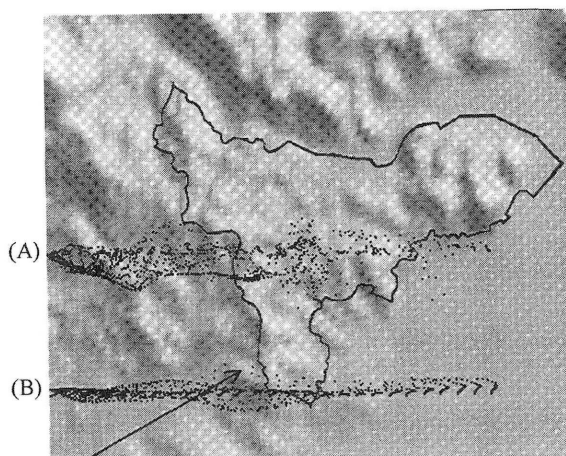
図7 新キャンパス移転地周辺の時間平均場(主流方向(x)の速度成分 $\langle \bar{u} \rangle / U$, $z^*=60(\text{m})$, グリッド2)

図8に移転地周辺における粒子追跡の結果を示す。粒子を放出した位置は、火山山頂の下流に当たる図中(A)と、移転地南部の石ヶ岳山頂を通る図中(B)である。この図から、これまで述べてきた移転地内外の風況特性がより明確に理

解される。図8(a)に示す粒子(A)は、火山に起因した剥離流に伴い水平方向および鉛直方向ともに激しく変動しながら流下している。この様子は図8(b)において粒子(A)の変動の幅が水平方向に広がっていることから分かる。一方、粒子(B)は水平方向および鉛直方向ともに変動は非常に小さく、石ヶ岳山頂付近において流れが局所的に増速していることを明確に示唆している。



(a)Side view



(b)Top view

図8 新キャンパス移転地周辺における粒子追跡の結果、グリッド2

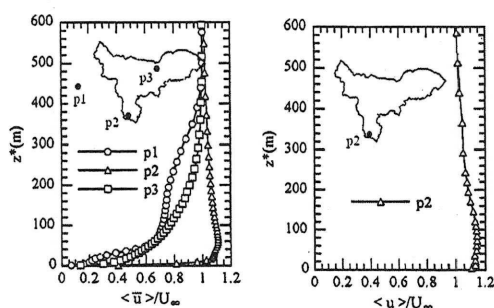
3.3 風洞実験による計算結果の検証

九州大学応用力学研究所の温度成層風洞¹³を用いて計算結果の検証を行った。この風洞は開放型の吸い込み式で、長さ13.5(m)×幅1.2(m)×高さ1.2(m)の測定胴を有する。風速範囲は0.5~2.0(m/s)であり、主流風速を1.0(m/s)に設定した際の主流方向の乱れ強さの分布は0.4(%)程度である。

地形模型の縮尺は1/2440である。数値計算と類似な一様流入条件を課すため、地形模型は風洞床面から310(mm)持ち上げた。これは風洞床面に発達する地面境界

層の影響を受けないようにするためである。また併せて地形模型を設置したベニヤ板前縁では、アルミ板を用いてそこから流れが剥離しないようにした。新キャンパス移転地内外の気流計測は、X型の熱線プローブと熱線流速計(ダンテック社製)を鉛直方向にトラバースして行った。時系列データは200(Hz)のローパスフィルターを通した後、500(Hz)のサンプリング周波数でA/D変換を行い、乱流諸量の鉛直分布を求めた。各測定点でのデータ数は30,000個で約60(s)の計測時間である。標高244(m)の火山(地形模型では100mm)に基づいたレイノルズ数を数値計算と同じ 10^4 のオーダーとするため、設定風速を1.5(m/s)とした。

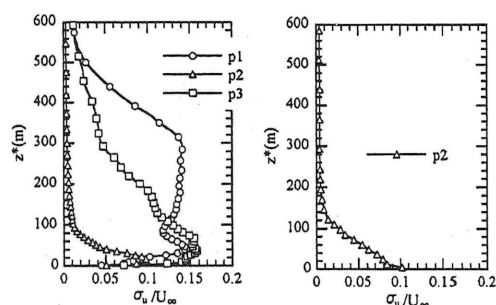
主流方向(x)の平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_\infty$)と乱れ強さ(σ_u / U_∞)の鉛直分布に関して、数値計算と風洞実験の比較を図9、図10に示す。縦軸は地形表面からの実スケール $z^*(m)$ を示し、横軸は上空風速 U_∞ で正規化している(一様流入風速 U でないことに注意)。数値計算において乱流諸量を算出した位置は図9(a)に示すp1, p2, p3である。p1は火山下流で移転地のすぐ上流である。p2は移転地南部の石ヶ岳山頂付近である。p3は移転地の中央部近くに位置する谷部である。風洞実験では、p2を対象に気流計測を行った。p1では、 $z^*=60\sim 400(m)$ において平均速度プロファイルに速度欠損が明確に見られる。これに伴い、この



(a)数値計算

(b)風洞実験

図9 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較



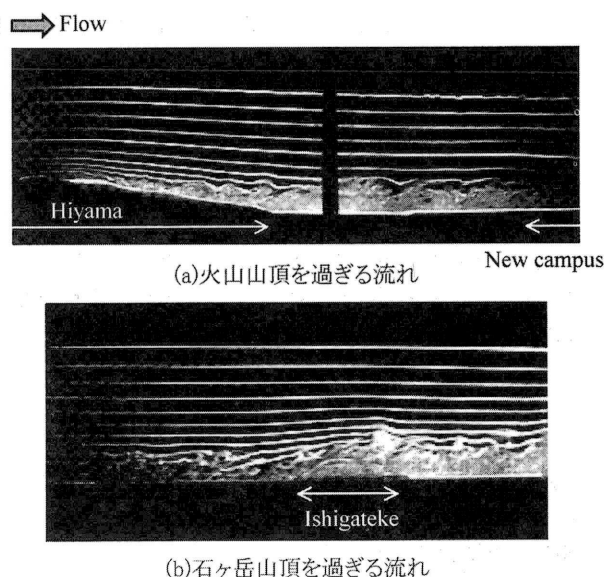
(a)数値計算

(b)風洞実験

図10 主流方向(x)の乱れ強さの鉛直分布の比較

範囲における乱れ強さもかなり大きい。これは火山背後の剥離流の影響であり、これが移転地を含む周辺地域の風況特性に強く関与していることを示すものである。石ヶ岳山頂付近のp2では、数値計算と風洞実験は定性的および定量的に非常に良い一致を示している。すなわち、両者ともに $z^*=60(m)$ 付近で10%近い平均速度の増速が見られ、また同時に乱れ強さはp1, p3と比較して全レベルで非常に小さい。

地形模型を過ぎる気流の様子を視覚的に捉えるため、スモークワイヤー法による流れの可視化を行った。その結果を図11に示す。ここで、設定風速は1.0(m/s)とした。可視化を行った鉛直断面は図8(a)に示す計算結果と同じである。図11(a)の火山山頂を通る鉛直断面では、火山下流側の斜面において流れが剥離し、それに起因した乱れが移転地上に流下しているのが分かる。図11(b)の石ヶ岳山頂を通る鉛直断面においても、火山を迂回した変動の小さい気流が、石ヶ岳山頂付近で局所的に増速している様子が捉えられた。これらの気流パターンは図8に示す計算結果とほぼ同じである。



(b)石ヶ岳山頂を過ぎる流れ

図11 スモークワイヤー法による流れの可視化

3.4 乱流境界層に埋没した場合の風況シミュレーション

より現実に近い状況を模擬した計算も試みた。具体的には、図12に示すように、計算領域の上流側にドライバ部を設定し、そこで乱流境界層を直接生成した。ドライバ部(領域Aと称する)と新キャンパス移転地を含む複雑地形上の風況場(領域Bと称する)は同時並行的に計算を行い、1ステップ毎に領域Aの流出断面の風速分布を領域Bの流入境界面に流入条件として与えた。領域Aの計算は直交座標系の

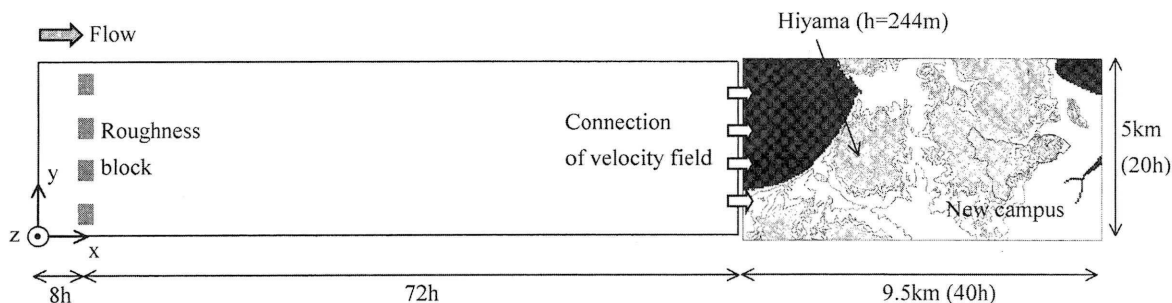


図12 新キャンパス移転地が乱流境界層に埋没した場合の計算領域と座標系

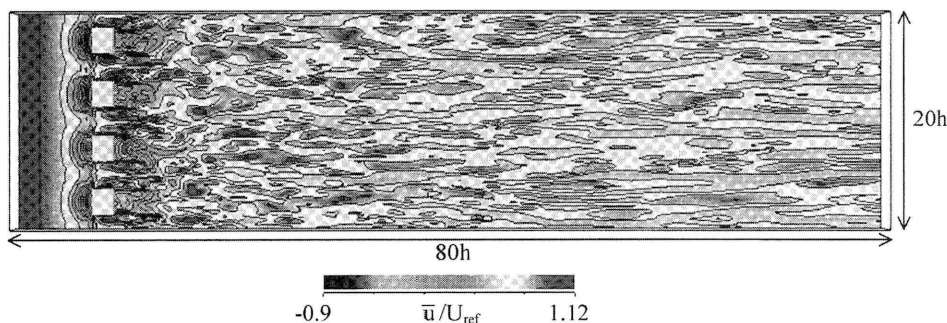


図13 ドライバ部における主流方向(x)の速度成分($\bar{u}/U_{ref}$)の分布, $z^*=20(m)$, 瞬間場

不等間隔スタガード格子に基づいたRIAM-COMPACTで行った。その計算領域は火山(244m)を代表値 h とし、主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)に $80h \times 20h \times 5h$ である。一方、領域Bの計算領域は $40h \times 20h \times 5h$ である。領域Aでは乱流促進体として長さ $1.6h \times$ 幅 $2h \times$ 高さ $1h$ の3次元ラフネスブロックを流入境界面から $8h$ 下流の地面上に4個設置した。よって、ラフネスブロック下流の助走距離は $72h$ である。流入境界面では一様風速を与え、ラフネスブロック下流に厚い乱流境界層を発達させた。

図13に $z^*=20(m)$ における主流方向(x)の速度成分($\bar{u}/U_{ref}$)の分布(瞬間場)を示す。ここで、 U_{ref} は高度 h における風速である。ラフネスブロック背後において3次元的な強い渦が形成され、それが流下するとともに縞状のストリーク構造に成長しているのが分かる。

図14に流入境界面から $76h$ 下流におけるy-z面の流線図(瞬間場)を示す。地表面付近に大小様々な渦構造が形成されている。これらはストリーク構造や乱流バーストに対応するものである。

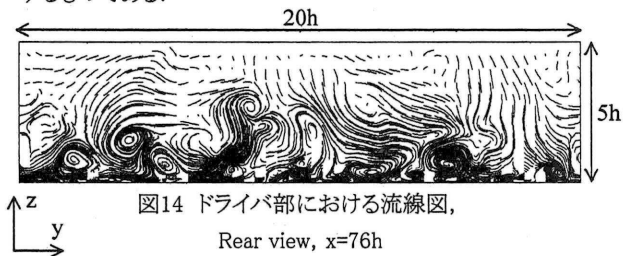
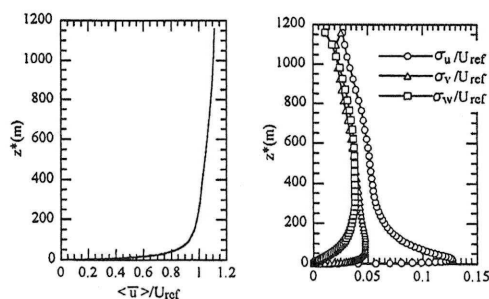


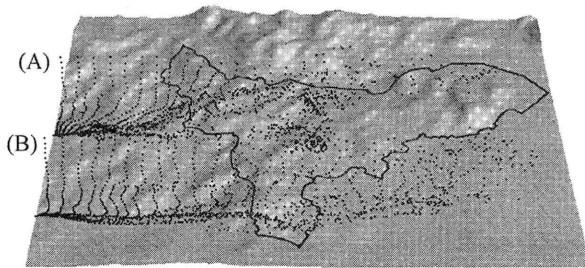
図14 ドライバ部における流線図, Rear view, $x=76h$

図15にドライバ部の流入境界面から $76h$ 下流で評価した主流方向(x)の平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_{ref}$)と各方向の乱れ強さ(σ_u / U_{ref} , σ_v / U_{ref} , σ_w / U_{ref})の鉛直分布を示す。縦軸は地形表面からの実スケール $z^*(m)$ を示し、横軸は高度 h における風速 U_{ref} で正規化している。これらはy方向の空間平均量を観察し、統計的に定常状態に達した後、時間平均を求めた。この図から、ラフネスブロックをドライバ部の床面上流に設置し、その下流に十分長い助走距離($72h$)を設けた今回の方法で、完全発達した乱流境界層が形成されていることが分かる。よって、これを流入気流として用いた領域Bの計算は、新キャンパス移転地が乱流境界層に埋没した状況を模擬したものである。

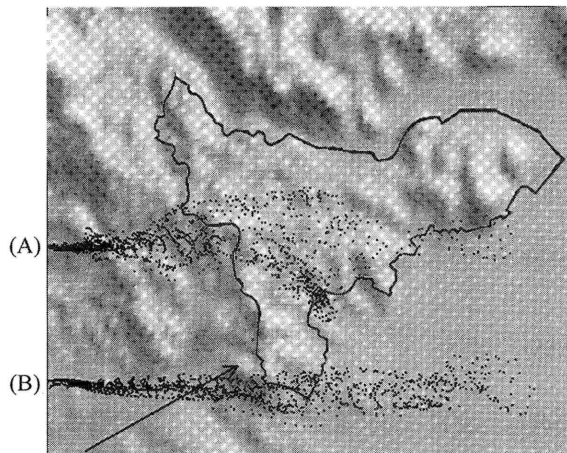


(a)平均速度プロファイル (b)各方向の乱れ強さ
図15 ドライバ部で得られた気流特性, $x=76h$

図16に移転地周辺における粒子追跡の結果を示す。粒子を放出した位置は図8と同じである。すなわち、火山山頂の下流に当たる図中(A)と、移転地南部の石ヶ岳山頂を通る図中(B)である。粒子(A)は火山に起因した剥離流に伴い水平方向および鉛直方向ともに激しく変動しながら流下している。一方、粒子(B)は粒子(A)に比べて変動は非常に小さい。図15に示す粒子の変動は、乱れを有する流入気流に伴い図8と比べてかなり大きい。しかしながら、定性的な傾向は図8とほぼ同じである。



(a)Side view

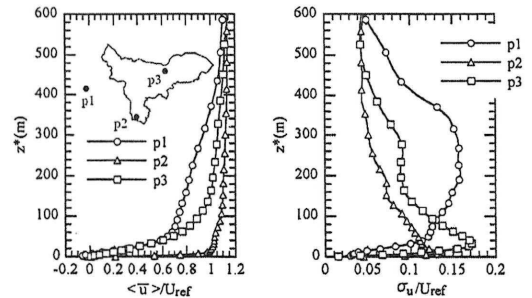


(b)Top view

図16 新キャンパス移転地周辺における粒子追跡の結果

図17に移転地内外における主流方向(x)の平均速度プロファイル($\langle \bar{u} \rangle / U_{ref}$)と乱れ強さ(σ_u / U_{ref})の鉛直分布を示す。統計量を算出した位置は図9、図10と同じである。縦軸は地形表面からの実スケール $z^*(m)$ を示し、横軸は高度 h (火山)における流入風速 U_{ref} で正規化している。流入気流の速度勾配や乱れの有無の違いはあるものの、移転地内外の風況特性の定性的な傾向は、図9、図10とほとんど同じである。すなわち、p1では $z^*=60\sim 400(m)$ において火山後流域に起因した平均速度プロファイルの欠損が顕著に見られる。p2では、風の局所的な増速域が地表面近傍で

明確に観察される。図16と併せて考えると、地表面近傍の気流に対しては、地形効果が最も支配的であるということが示唆される。



(a)平均速度プロファイル (b)主流方向の乱れ強さ

図17 新キャンパス移転地内外の風況特性

4. 結論

数百m～数十km程度の小規模スケールから中規模スケールまでの風況場解析を対象に開発した、局地的風況予測モデル(RIAM-COMPACT)の特徴を示し、九州大学新キャンパス移転地を含む実地形上の風況場解析に適用した。また同時に風洞実験を行い、計算コードの有効性と計算結果の妥当性を検証した。本研究で得られた主な結果は以下に示す通りである。

- 1) 西風を想定した場合に移転地上の風況場に関与すると予想された火山(244m)と、可也山(365m)の影響を最初に調べた。この目的に対し、50m標高数値データに基づいて二つの地形を含む比較的広い領域を再現し計算を行った。瞬間場と時間平均場の可視化から、移転地上の風況場に対しては、可也山に起因した剥離流の影響はほとんどないことが示唆された。
- 2) 1)の結果を踏まえ、可也山を省略した計算領域を新たに設定した。また同時に、移転地上とその周辺の風況特性を詳細に調べるため、ネストグリッドシステムを導入し、この地域に対して水平分解能25mの高解像度計算を行った。時間平均場の可視化と粒子追跡の結果から、地形起伏の変化に強く影響を受けた風況パターン、すなわち、気流の局所的な増速や減速などが明確に捉えられた。特に移転地内に注目すると、火山の剥離流が移転地上の風況特性に強く影響していることが示された。また移転地南部に位置する石ヶ岳山頂付近においては、 $z^*=60(m)$ 付近で一樣流入風速に対して20%近い気流の増速が認められた。これらの風況特性は移転地内外の特徴的な場所における主流方向の平均速度プロファイルと乱れ強さの鉛直分布の定量的考

察からも示された。

- 3) 風洞実験では、移転地南部の石ヶ岳山頂付近を対象に気流計測を行った。その結果、主流方向の平均速度プロファイルと乱れ強さの鉛直分布は、数値計算と定性的および定量的に非常に良い一致を示した。スモークワイヤー法による流れの可視化においても、数値計算と類似な気流パターンが確認された。
- 4) より現実に近い状況を模擬するため、流入気流の速度勾配と乱れの影響を考慮し、移転地が乱流境界層に埋没した場合の計算も試みた。結果として、移転地内外の風況特性は、一様風速を流入条件とした場合とほぼ同じ傾向が得られた。

謝辞

新キャンパス移転地周辺の25m標高数値データの作成に関して、工学研究院附属環境システム科学研究センターの江崎研究室にお世話になった。数値計算においては、九州大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻大学院生の藤井斉君(現在:株式会社デンソー)に協力を頂いた。地形模型の風洞実験に関しては、九州大学応用力学研究所文部技官の杉谷賢一郎氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 近藤裕昭：風力発電のためのマイクロサイティング手法について，資源と環境，Vol.3，No.5，1994，pp.271-282
- 2) 石原孟，山口敦，藤野陽三：複雑地形における高精度の風況予測モデルの開発に向けて，第22回風力エネルギー利用シンポジウム講演集，2000，pp.63-66
- 3) 中山昭彦，岸修士郎：ラージ・エディ・シミュレーションによる実地形上気流の予測，応用力学論文集，Vol.3，2000，pp.737-744
- 4) 李春鉉，持田灯，他三名：LESによる地形まわりの局所風況予測(その1)，2次元山越え気流を対象とした地表面粗度の影響の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，2000，pp.699-700
- 5) 内田孝紀，大屋裕二：局地的風況予測に対するLESの適用，第16回風工学シンポジウム論文集，2000，pp.59-64
- 6) 内田孝紀，大屋裕二：ラージ・エディ・シミュレーションによる局地的風況予測モデルの評価，九州大学応用力学研究所所報，第120号，2001，pp.29-34
- 7) 内田孝紀，大屋裕二：ラージ・エディ・シミュレーションによる局地的風況予測モデルRIAM-COMPACTの評価—その2. 壁面せん断乱流場による計算精度の検

証と実地形上の風況場解析への適用—，九州大学応用力学研究所所報，第121号，2001，pp.73-85

- 8) 内田孝紀，大屋裕二：九州大学新キャンパス移転地上の風況場に関する数値シミュレーションと風洞実験，九州大学応用力学研究所所報，第121号，2001，pp.59-72
- 9) 内田孝紀，大屋裕二：ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション，日本風工学会論文集，2001，submitted
- 10) T. Uchida, Y. Ohya：Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2001, submitted
- 11) Deardorff, J. W.：A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid. Mech., Vol.41, 1970, pp.453-480
- 12) 加藤真規子，萩野谷成徳，花房龍男：複雑地形上の気流の乱流特性—野外観測と風洞実験の比較—，天気，Vol.37，1990，pp.29-41
- 13) 大屋裕二 他13名：大気海洋環境研究のための温度成層風洞(大気海洋システム解析実験設備)，九州大学応用力学研究所所報，第75号，1993，pp.147-165