

風況シミュレータRIAM-COMPACTによる拡散場シミュレーション —その1. 不安定時の場合—

内田 孝紀*, 大屋 裕二*

(2004年1月30日受理)

Numerical Simulation of Gas Diffusion by using the RIAM-COMPACT —Part.1 The Case of an Unstable Condition—

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: *takanori@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

We are developing the numerical model called the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The object domain of this numerical model is from several m to several km, and can predict airflow over complex terrain with high precision. In this paper, the RIAM-COMPACT was applied to gas diffusion over an isolated three-dimensional hill and complex terrain under neutral and unstable conditions. In addition, the fumigation process was discussed. Typical characteristics were observed in the numerical results.

Key words : *RIAM-COMPACT, Gas diffusion, Unstable condition, Neutral condition, Fumigation process, Hill, Complex terrain*

1. 緒言

我々は、数(十)km以下の局所域スケールに的を絞り、RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する風況シミュレータを開発している¹⁾。既に、大気安定度が中立時において種々の単純地形と複雑地形を対象にした風況場解析を行い、風洞実験の結果と比較してその予測精度と有効性を確認している。

本報では、大気安定度が中立時および不安定時における単純地形、複雑地形周辺の拡散場シミュレーションの結果について報告する。また同時に、単純地形を対象にフューミゲーション時の検討も行う。

2. 数値計算手法

本研究では、直交直線不等間隔スタガード格子に基づいたRIAM-COMPACT(DNSバージョン)を用いた。流れの支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g \frac{\theta - \theta_{ref}}{\theta_{ref}} \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial^2 c}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

数値計算法に関して、本研究では直交直線不等間隔スタガード格子に基づいた差分法により数値解を求める。ここでスタガード格子とは、計算格子のセル中心にスカラー量の圧力、温度、濃度を定義し、セル界面に各速度成分を定義する格子系である。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムにはオイラー1次陽解法を基礎とした部分段階法を採用する。圧力については、2段階に分けた(2)式のうち圧力勾配項を含む式を(1)式に代入してポアソン方程式を導き、これをSOR法により緩和計算して算出する。空間項の離散化に関して、(2)式～(4)式の流れ項には補間法による4次精度中心差分に4階微分の数値粘性項を付加した3次精度風上差分を用いる。これは流れ項に4次精度中心差分のみを用いた計算では、矩形に近似された地形の角部から数値振動(wiggle)が発生したためである。ここで、数値粘性項の重みは $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくした。一般に使用される3次精度風上差分のK-Kスキームでは $\alpha=3$ である。その他の空間項については、全て2次精度中心差分で近似した。以下に実際の計算手順を示す。

1. (2)式の運動方程式を2段階に分け、圧力勾配項

*九州大学応用力学研究所

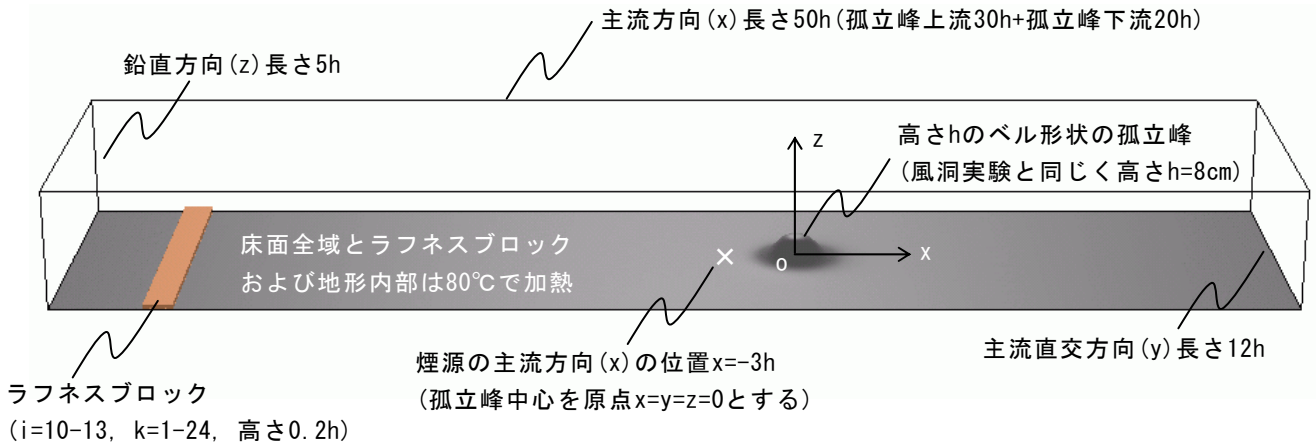


Fig.1 Computational domain and coordinate system for an isolated three-dimensional hill

以外の各項を含む式から速度成分 u, v, w の中間値 u^*, v^*, w^* を求める.

2. u^*, v^*, w^* が(1)式を満足するように圧力 P^{n+1} をポアソン方程式からSOR法により求める.
3. u^*, v^*, w^* に P^{n+1} の勾配を加えて新たな時間ステップの $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$ を求める.
4. (3)式から新たな時間ステップの θ^{n+1} を求める.
5. (4)式から新たな時間ステップの c^{n+1} を求める.

3. 結果と考察

3.1 不安定時の計算-孤立峰の場合-

ここでは、孤立峰を対象にした不安定時の計算結果について示す. 計算領域と座標系をFig.1に示す. 計算領域の入り口における温度の鉛直プロファイルをFig.2に示す. ここで、図中に示す部分は上空の強い逆転層を模擬するためのものである. 計算領域内に再現された対流境界層(CBL)では、地面から上空へ向かうプルーム、サーマルの逆転層への貫入、上空空気の連行など、強不安定時のCBLに特徴的な現象が明確に観察され

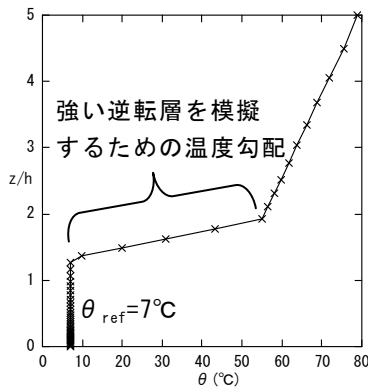


Fig.2 Vertical temperature profile at the entrance of the computational domain

た. 孤立峰の中心(座標原点)におけるCBLの高さ z_i は約 $2h$ (h は孤立峰の高さ) である. 計算パラメータに関して、計算メッシュ数は主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)に $195 \times 121 \times 61$ 点である. x, z 方向は不等間隔, y 方向は等間隔に分割した. プラントル数は $Pr=0.71$, 動粘性係数は $\nu = 1.5 \times 10^{-5} (m^2/s)$, 重力加速度は $g=9.81 (m/s^2)$, 一様流入風速は $U=0.8 (m/s)$, 時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-4} (s)$ である.

時間平均場に関して、中立時の結果との比較をFig.3に示す. 孤立峰背後の流れパターンはほぼ同じであることが分かる.

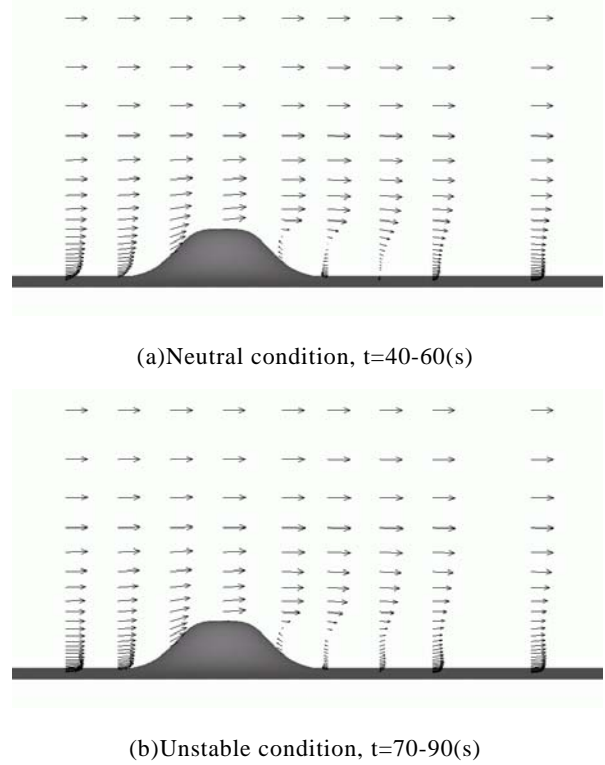
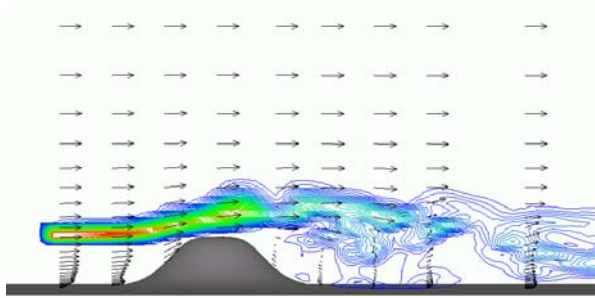
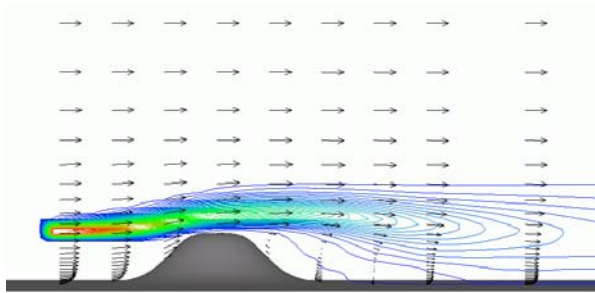


Fig.3 Comparison of the time-averaged flow, $y=0$

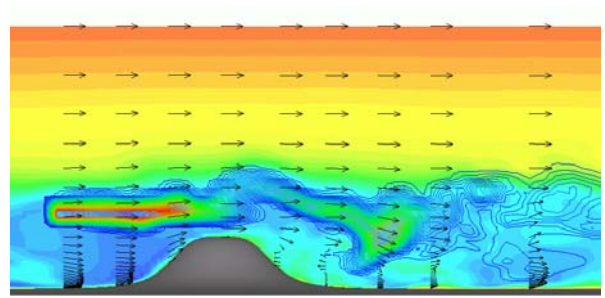


(a) Instantaneous flow field, $t=70(s)$



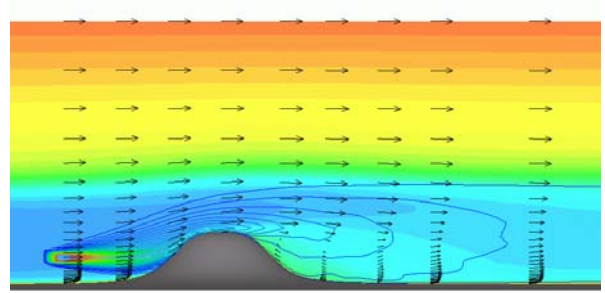
(b) Time-averaged flow field, $t=70-90(s)$

Fig.4 Flow visualization under neutral condition, smoke source height=1.0h, $y=0$

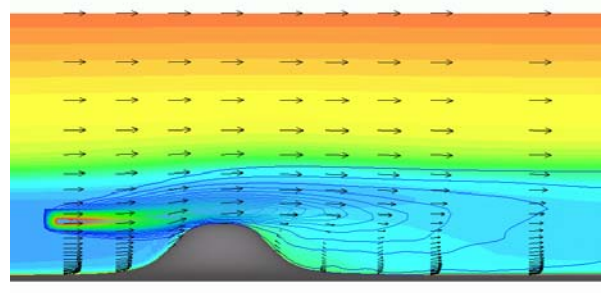


(c) Smoke source height=1.5h

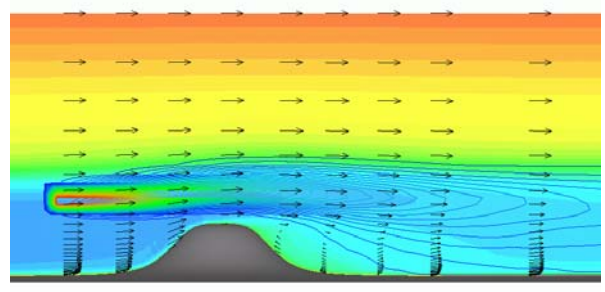
Fig.5 Flow visualization under unstable condition, instantaneous flow field, $t=70(s)$, $y=0$



(a) Smoke source height=0.5h

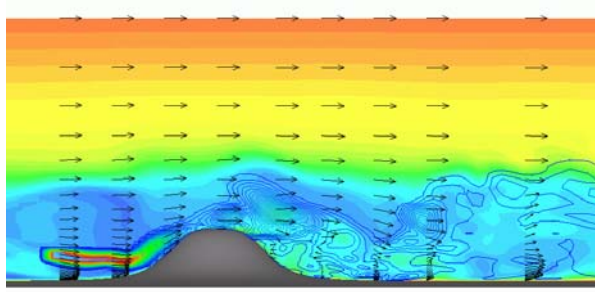


(b) Smoke source height=1.0h

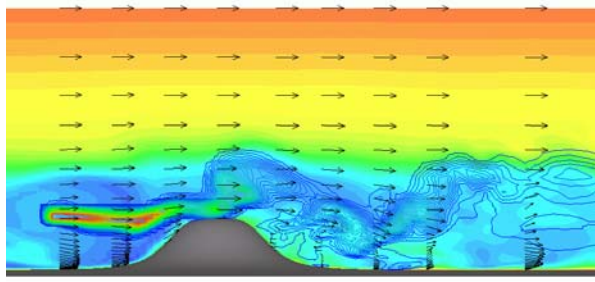


(c) Smoke source height=1.5h

Fig.6 Flow visualization under unstable condition, time-averaged flow field, $t=70-90(s)$, $y=0$



(a) Smoke source height=0.5h



(b) Smoke source height=1.0h

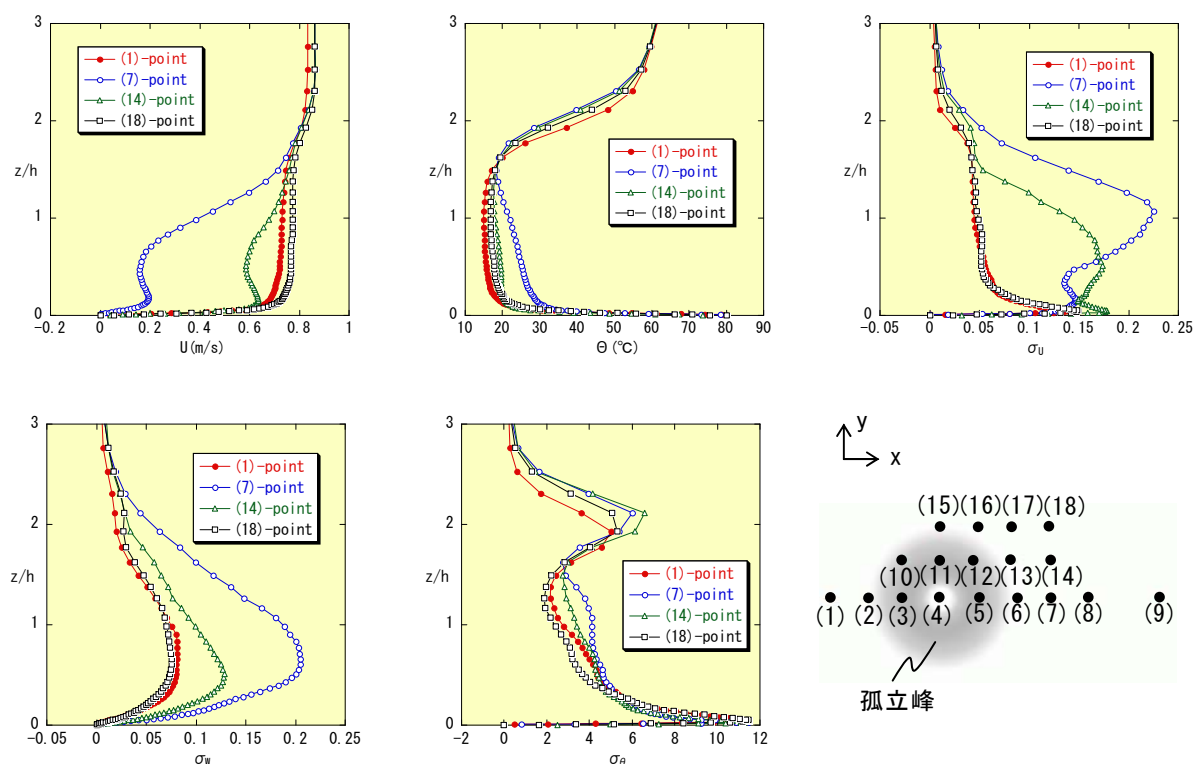


Fig.7 Turbulence statistics around a hill, unstable condition

中立時の拡散場シミュレーションの結果をFig.4に示す。ここで、(4)式の拡散方程式を解く際には、各タイムステップにおいて濃度場にリミッタをかけ、 $0 \leq c/c_{\max} \leq 1$ となるようにした。スカラー濃度が孤立峰背後に形成された剥離流に取り込まれている様子が観察される。

不安定時の拡散場シミュレーションの結果をFig.5およびFig.6に示す。煙源高さの違いに伴い、孤立峰下流での拡散の様子(濃度分布)に差異が生じている。

不安定時における孤立峰周辺の乱流諸量の鉛直分布に関して、代表点の結果をFig.7に示す。併せてFig.7には、乱流諸量の評価地点を示す。孤立峰背後の(7)地点では、地形の影響により各統計量は他の場所に比べて大きく変化している。(18)地点では、孤立峰上流の(1)地点とほぼ同じ傾向を示している。

3.2 不安定時の計算-実地形の場合-

ここでは、実地形を対象にした拡散場シミュレーションの結果について、中立時の結果と比較して示す。計算の対象は、岡山県倉敷市の水島地区である(Fig.8を参照)。計算領域中の最大標高は $h=257(\text{m})$ である。1/2500のスケール比を想定し、50(m)標高数値データで地形形状を再現した。計算メッシュ数は主流方向(x)、

主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $320 \times 85 \times 61$ 点である。その他の計算パラメータなどは、先の孤立峰を対象にした場合と同じである。

中立時および不安定時の拡散場シミュレーションの結果をFig.9およびFig.10に示す。Fig.9に示す瞬間場の結果に注目すると、中立時(Fig.9(a))と不安定時(Fig.9(b))では、明確な違いが確認される。中立時では鉛直方向の変化はそれほど大きくないが、不安定時には上下方向の大きな濃度変化が確認される。これは地面から上空へ向かうブルーム、サーマルの逆転層への貫入、上空空気の連行などに起因していると考えられる。Fig.10に示す時間平均場の結果では、中立時(Fig.10(a))に比べて不安定時(Fig.10(b))では鉛直方向の拡散幅は広く、かつコンターも複雑地形上ではそれほど密集していない。これは上下方向の対流現象と、これに伴う活発な乱流混合に起因していると推測される。

動粘性係数 ν を変更することで、実験スケールと実スケールの比較を行った。ここでは、Fig.8に示す(4)地点の平均風速と平均温度の鉛直プロファイルを図.11に示す。平均風速分布では、両者はほぼ同じ傾向を示すものの、平均温度分布では、CBLの内部で両者に有意な差異が見られた。これは ν の違いより地面からの熱の伝わり方が変化していることを示唆するものである。

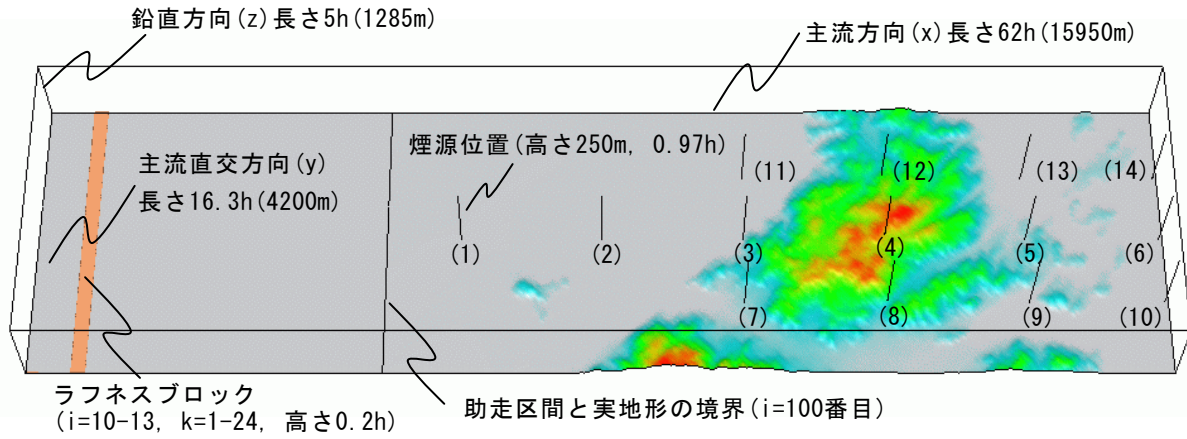
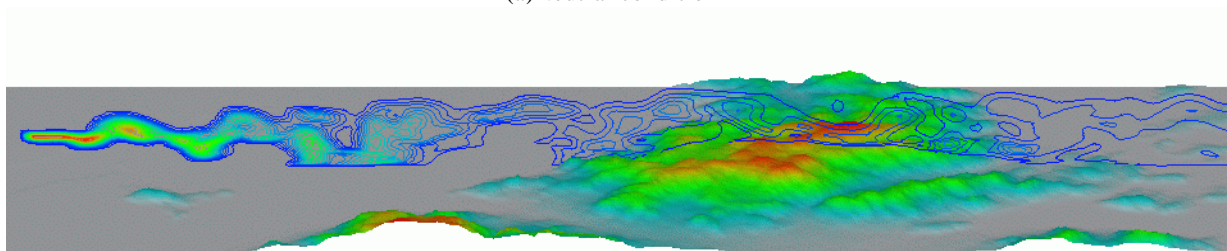
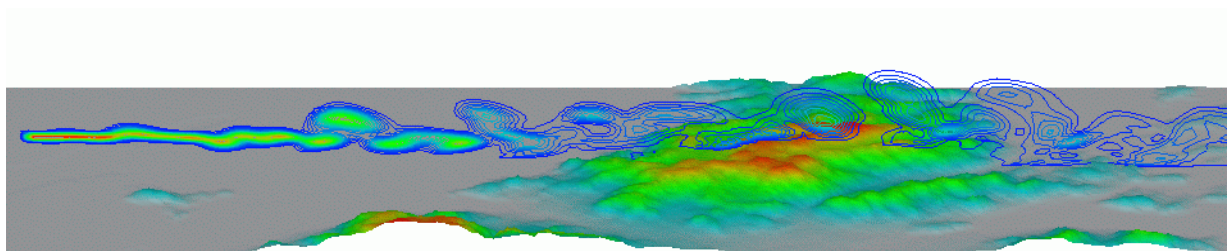
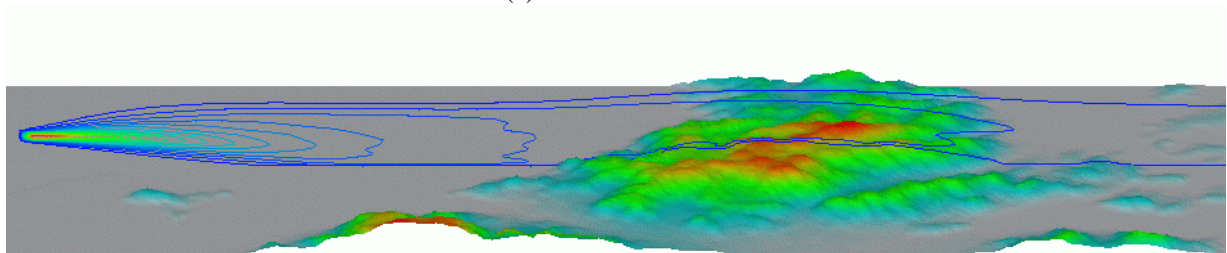
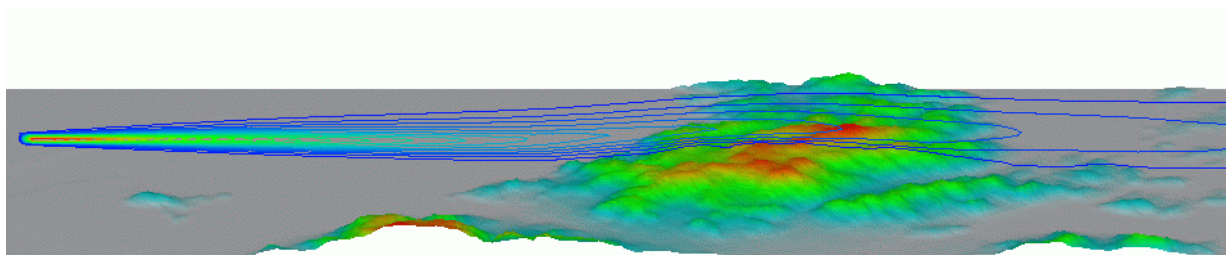


Fig.8 Computational domain and coordinate system for real complex terrain

Fig.9 Comparison of the instantaneous flow field, $t=80(s)$, $y=0$, smoke source height=0.97hFig.10 Comparison of the time-averaged flow field, $t=60-80(s)$, $y=0$, smoke source height=0.97h

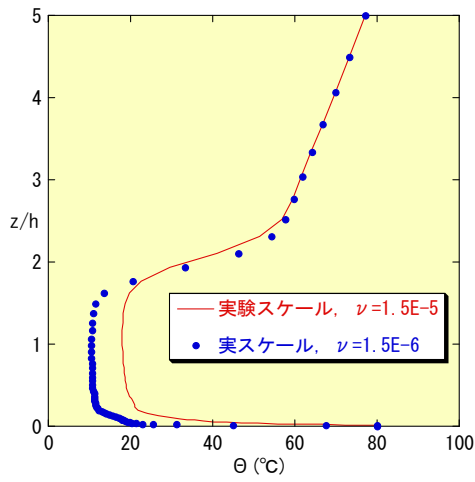
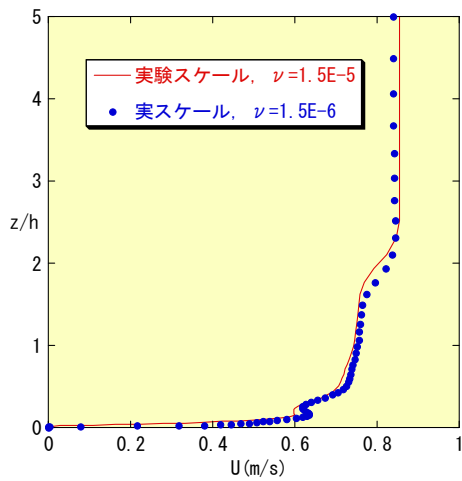


Fig.11 Comparison of the mean velocity and temperature profile at position (4)

3.3 孤立峰を対象にしたフューミゲーション計算

ここでは、孤立峰を対象にしたフューミゲーション時の計算結果について示す。計算領域と座標系をFig.12に示す。計算領域の入り口における温度の鉛直プロファイルを図.13に示す。リニアな温度分布を計算領域の入り口で与え、計算領域の上流側床面はラフネスブロックを含め0°Cに冷却する。一方、計算領域の中央部と下流側では、孤立峰を含め70°Cに加熱する。計算メッシュ数は主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に261×121×61点である。参照温度 θ_{ref} は孤立峰の高さにおける温度22°Cを用いた。その他の計算パラメータなどは、先の孤立峰を対象にした場合と同じである。

平均風速と平均温度の空間発達の様子を図.14に示す。併せてFig.14には、統計量を評価した地点を示す。この結果から、平均速度および平均温度分布が安定境界層から対流境界層へ変化していることが分かる。

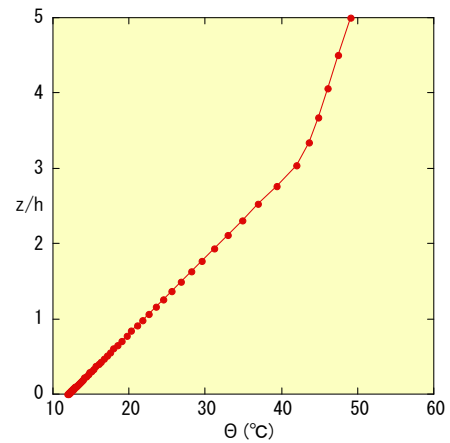


Fig.13 Vertical temperature profile at the entrance of the computational domain

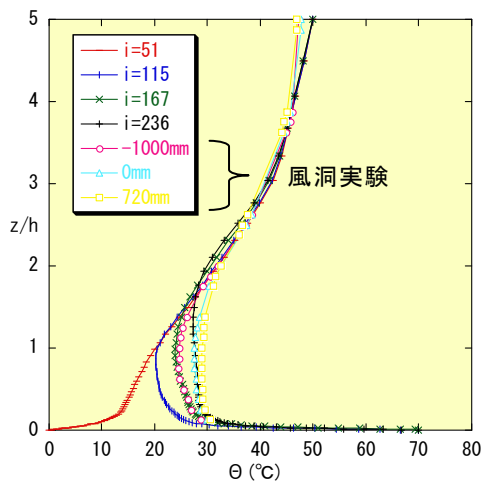
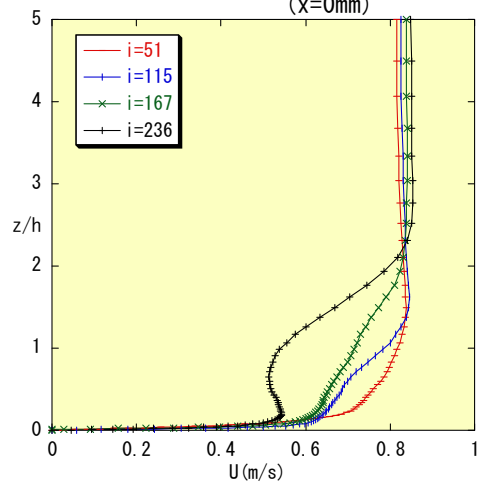
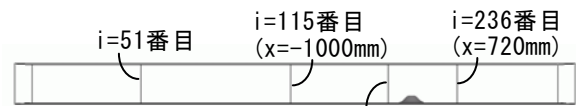


Fig.14 Mean velocity and temperature profile at various positions, $t=50-70(s)$, $y=0$

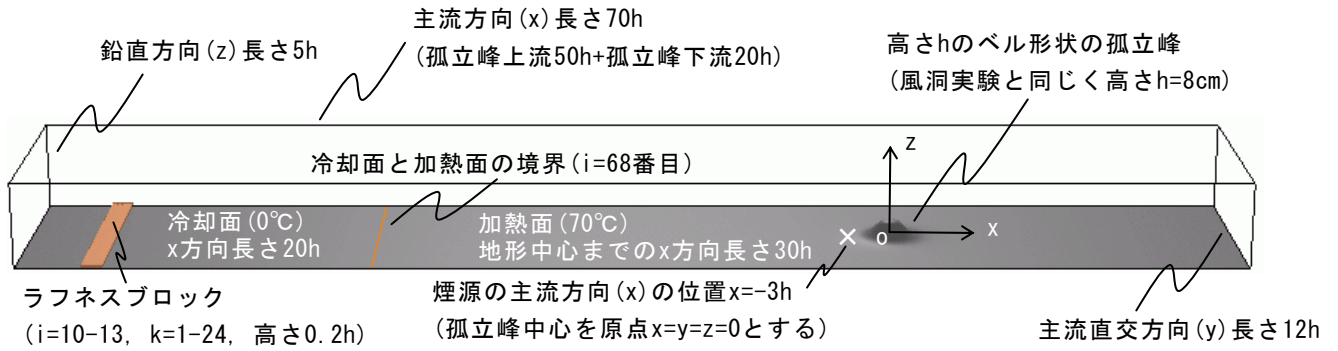
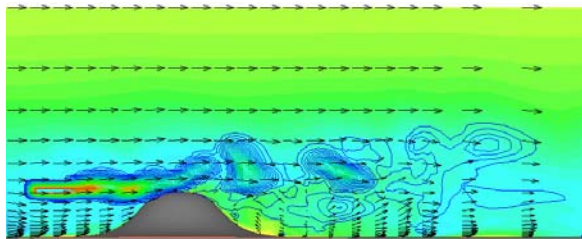
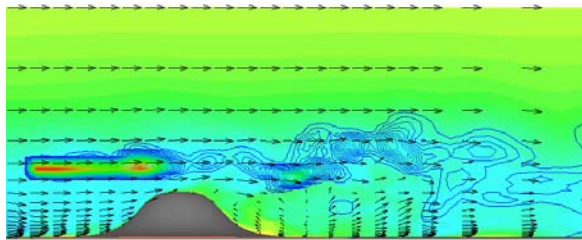


Fig.12 Computational domain and coordinate system for the fumigation process

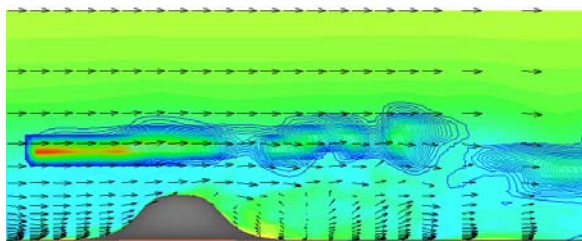
瞬間場の結果をFig.15に、時間平均場の結果をFig.16に示す。煙源が高くなるに伴い、スカラー濃度は孤立峰背後の循環領域に取り込まれることなく流下しているのが分かる。



(a)Smoke source height=1.0h

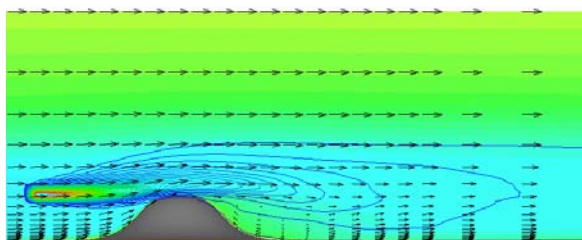


(b)Smoke source height=1.5h

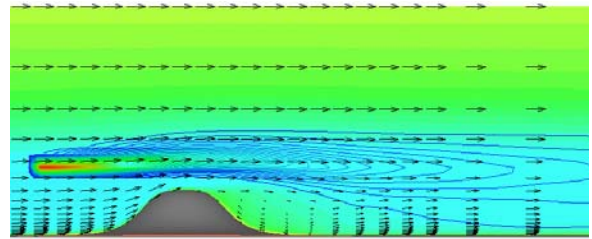


(c)Smoke source height=2.0h

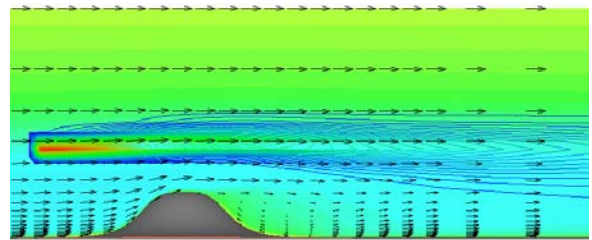
Fig.15 Flow visualization of the instantaneous flow field, fumigation process, $t=70(s)$, $y=0$



(a)Smoke source height=1.0h



(b)Smoke source height=1.5h



(c)Smoke source height=2.0h

Fig.16 Flow visualization of the time-averaged flow field, fumigation process, $t=70-90(s)$, $y=0$

4. 結言

風況シミュレータRIAM-COMPACTを用い、大気安定度が中立時および不安定時における単純地形、複雑地形周辺の拡散場シミュレーションを実施した。また同時に、単純地形を対象にフェューミゲーション時の検討も行った。その結果、それぞれの気安定度において特徴的な風況場および拡散場が再現された。

謝辞

本研究は、平成14年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「複雑地形へ適用可能な行政用拡散モデル及び長期予測システム開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 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, No.92, pp.135-144, 2002