

# 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2. 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.2 The Case of a Stable 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 two types of stable conditions. One is a linear type of temperature profile, and the other is a polynomial type. Typical characteristics were observed in the numerical results.

**Key words :** RIAM-COMPACT, Gas diffusion, Stable condition, Linear type, Polynomial type, Hill, Complex terrain

## 1. 緒言

前報<sup>1)</sup>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した。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った。

本報では、大気安定度が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。

## 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。

- (2)式の運動方程式を2段階に分け、圧力勾配項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。
- $u^*$ ,  $v^*$ ,  $w^*$ 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。
- $u^*$ ,  $v^*$ ,  $w^*$ 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。
- (3)式から新たな時間ステップの $\theta^{n+1}$ を求める。
- (4)式から新たな時間ステップの $c^{n+1}$ を求める。

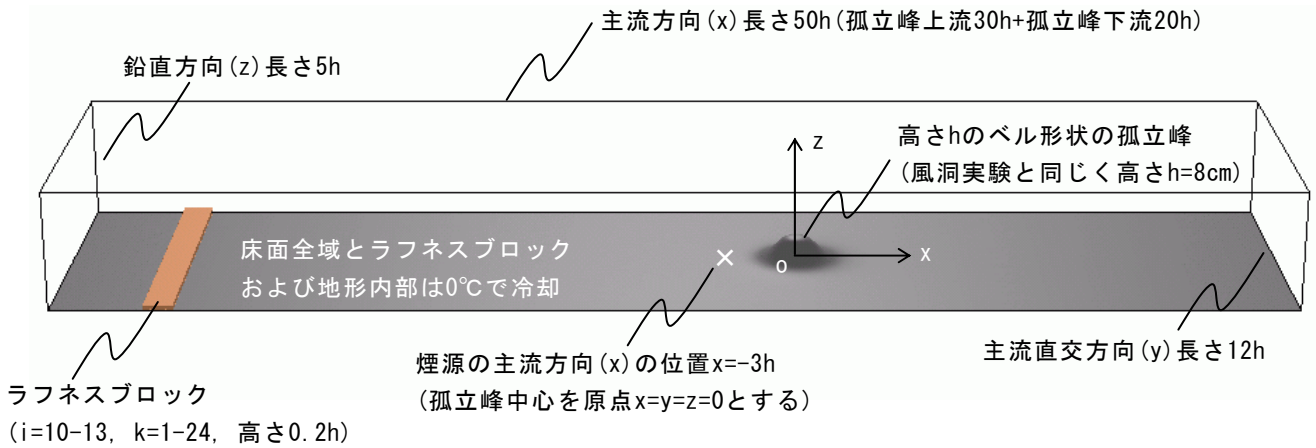


Fig.1 Computational domain and coordinate system for an isolated three-dimensional hill

### 3. 安定時その1 (リニヤーな鉛直温度分布の場合)

#### 3.1 孤立峰の場合

ここでは、孤立峰を対象にした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図.2に示す。計算パラメータなどをTable.1に示す。本研究では、大気安定度を示すフルード数  $Fr=3.26$  の弱安定ケースと、 $Fr=0.1$  の強安定ケースの計算を行った。レイノルズ数は両ケースでほぼ同じになるように設定した。床面温度については、ラフネスブロックおよび地形を含めて  $0^\circ\text{C}$  に冷却した。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  $195 \times 121 \times 61$  点である。x, z方向は不等間隔に分割し, y方向は等間隔に分割した。

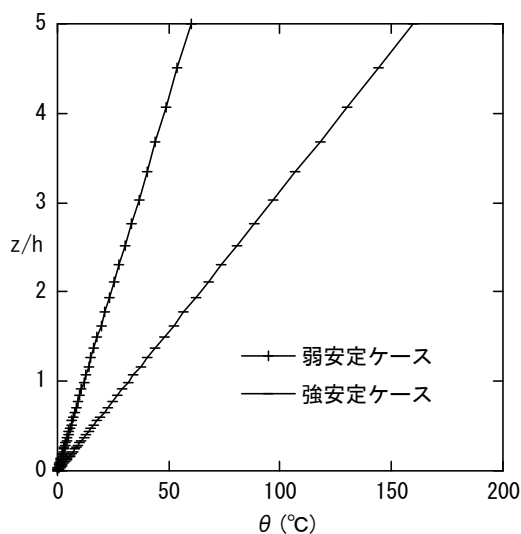


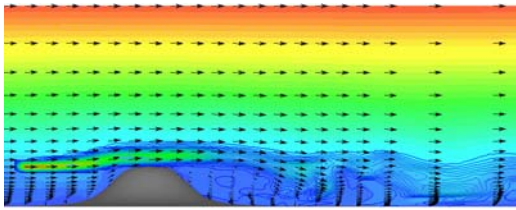
Fig.2 Vertical temperature profile at the entrance of the computational domain

	Case1 (弱安定)	Case2 (強安定)
床面温度 $\theta_{bot}$ ( $^\circ\text{C}$ ) (ラフネスブロックと地形含む)	0	
上部温度 $\theta_{top}$ ( $^\circ\text{C}$ )	60	160
参照温度 $\theta_{ref}$ ( $^\circ\text{C}$ ) ( $z=0.5h$ , $h$ は孤立峰高さ)	6	16
重力加速度 $g$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )	9.81	
動粘性係数 $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.5 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-7}$
孤立峰高さ $h$ ( $\text{m}$ )	0.08	
流入風速 $U$ ( $\text{m}/\text{s}$ )	0.6	0.03
時間刻み $\Delta t$ ( $\text{s}$ )	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
浮力振動数 $N$ ( $=((g/\theta_{ref})(d\theta/dz))^{1/2}$ ) ( $\text{rad}/\text{s}$ )	2.30	3.68
フルード数 $Fr (=U/Nh)$	3.26	0.1
レイノルズ数 $Re (=Uh/\nu)$	3200	3000
プラントル数 $Pr$	0.71	

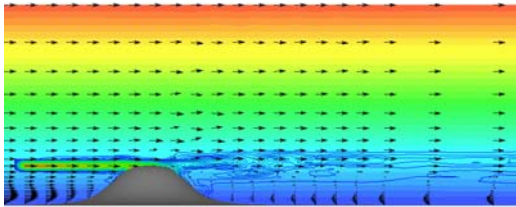
Table.1 Numerical conditions

鉛直断面 ( $x-z$ ) の可視化を図.3(瞬間場)および図.4(時間平均場)に示す。弱安定の場合Case1では、孤立峰背後に形成された渦領域にスカラー濃度が取り込まれている様子が観察される。強安定の場合Case2に注目する。煙源高さ  $1.0h$  ( $h$ は孤立峰の高さ) の場合では、スカラー濃度の鉛直方向の移動は強く抑制されている。結果として、孤立峰の下流においてもほぼ孤立峰の高さレベルで流下している。煙源高さ  $0.5h$  の場合では、スカラー濃度は孤立峰を迂回しており、孤立峰下流では明確な濃度分布は見られない。これについては後述する。

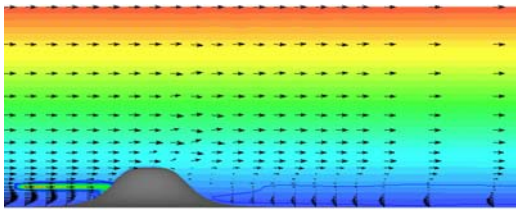
水平断面 ( $x-y$ ) の可視化を図.5(瞬間場)および図.6(時間平均場)に示す。強安定の場合Case2において、瞬間場(図.5)に注目する。煙源高さ  $0.5h$ ,  $1.0h$  の両者と



(a)Case1,  $t=70(s)$ , smoke source height=1.0h

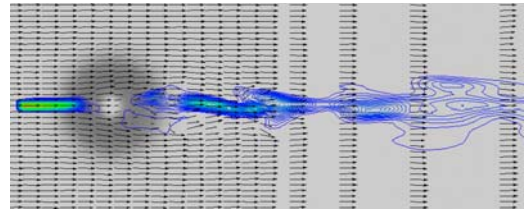


(b)Case2,  $t=400(s)$ , smoke source height=1.0h

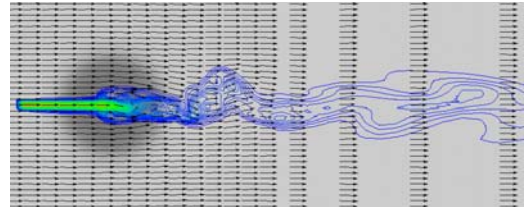


(c)Case2,  $t=400(s)$ , smoke source height=0.5h

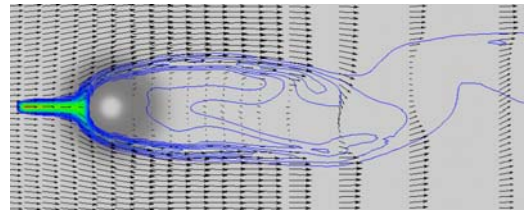
Fig.3 Comparison of the instantaneous flow,  $y=0$



(a)Case1,  $t=70(s)$ , smoke source height=1.0h,  $z=1.0h$

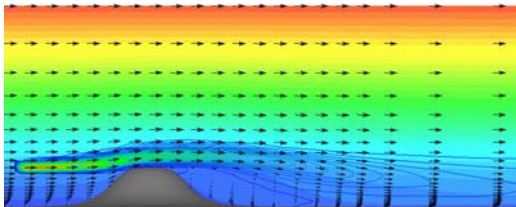


(b)Case2,  $t=400(s)$ , smoke source height=1.0h,  $z=1.0h$

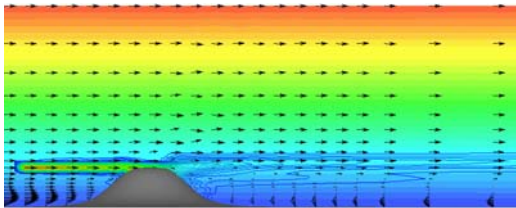


(c)Case2,  $t=400(s)$ , smoke source height=0.5h,  $z=0.5h$

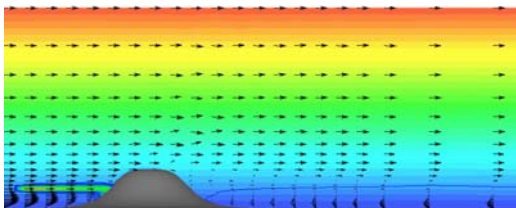
Fig.5 Comparison of the instantaneous flow



(a)Case1,  $t=70-90(s)$ , smoke source height=1.0h

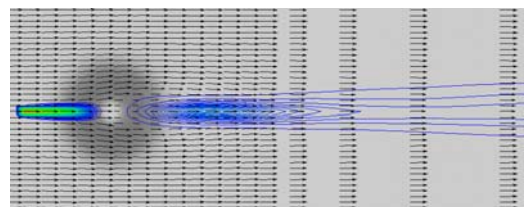


(b)Case2,  $t=400-500(s)$ , smoke source height=1.0h

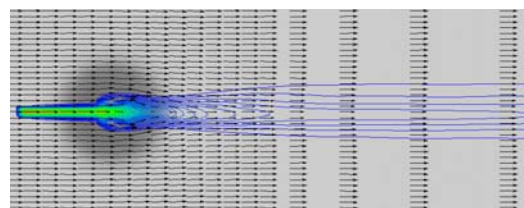


(c)Case2,  $t=400-500(s)$ , smoke source height=0.5h

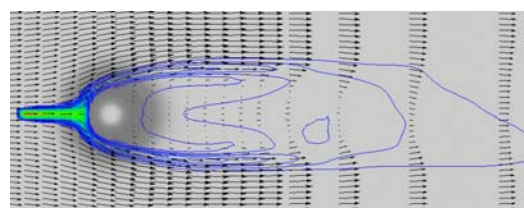
Fig.4 Comparison of the time-averaged flow,  $y=0$



(a)Case1,  $t=70-90(s)$ , smoke source height=1.0h,  $z=1.0h$



(b)Case2,  $t=400-500(s)$ , smoke source height=1.0h,  $z=1.0h$



(c)Case2,  $t=400-500(s)$ , smoke source height=0.5h,  $z=0.5h$

Fig.6 Comparison of the time-averaged flow

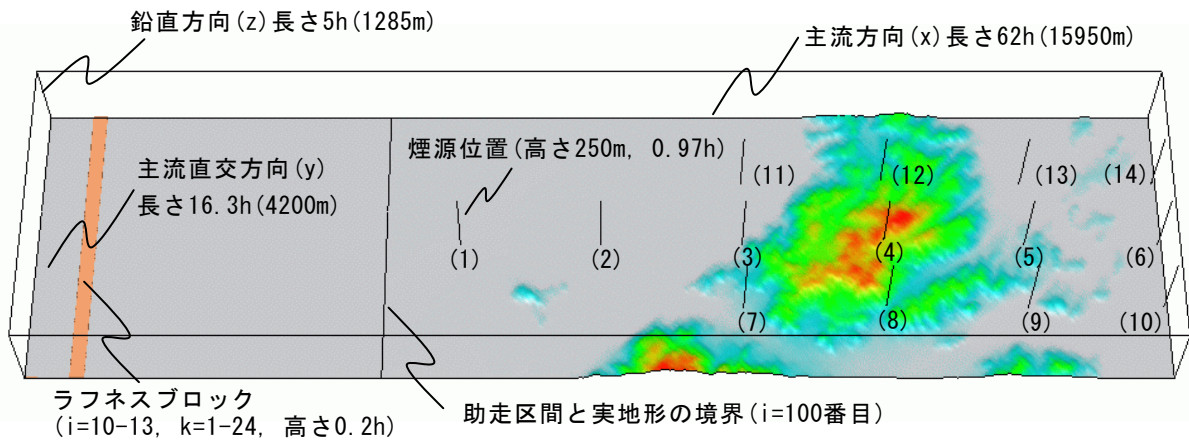


Fig.7 Computational domain and coordinate system for real complex terrain

もにスカラー濃度は蛇行しながら流下している。

### 3.2 実地形の場合

ここでは、実地形を対象にした計算結果について示す。計算の対象は、岡山県倉敷市の水島地区である (Fig.7を参照)。計算領域中の最大標高は $h=257(m)$ である。1/2500のスケール比を想定し、50(m)標高数値デー

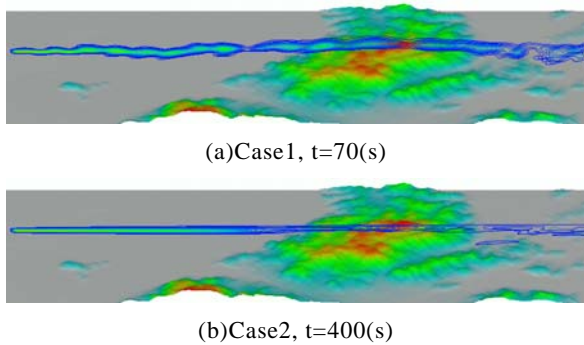


Fig.8 Comparison of the instantaneous flow field, smoke source height=0.97h, y=0

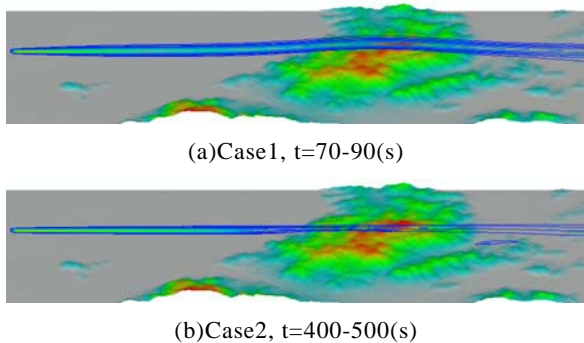


Fig.9 Comparison of the time-averaged flow field, smoke source height=0.97h, y=0

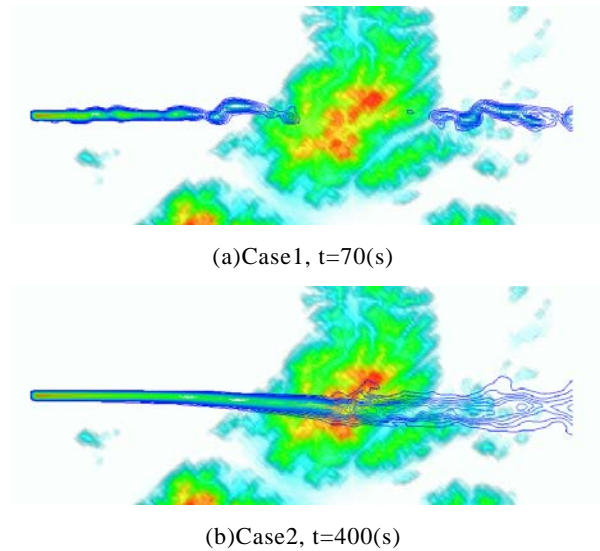


Fig.10 Comparison of the instantaneous flow field, smoke source height=0.97h, z=1.0h

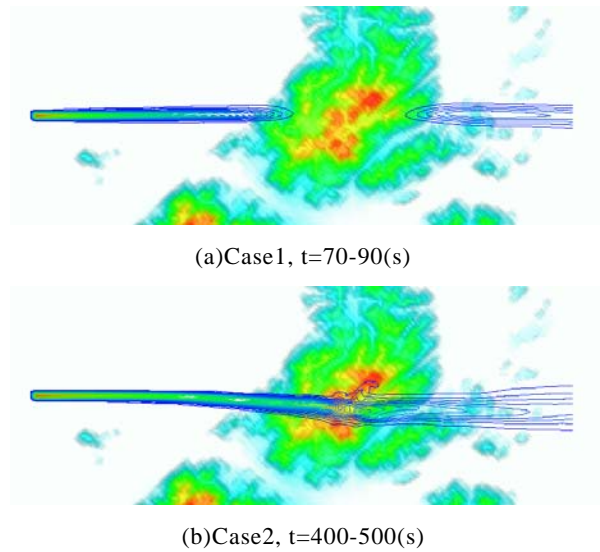


Fig.11 Comparison of the time-averaged flow field, smoke source height=0.97h, z=1.0h

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(Table.1)と同じである。なお、Fig.7には乱流統計量を評価した地点((1)~(14))を示しているが、ここではその結果については省略する。

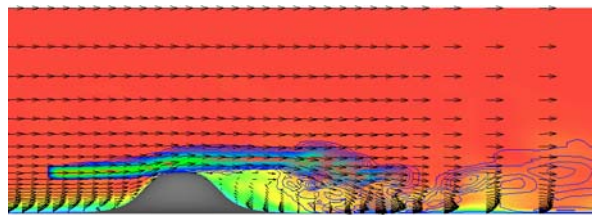
鉛直断面(x-z)の可視化をFig.8(瞬間場)およびFig.9(時間平均場)に示す。Fig.8に示す瞬間場に注目する。弱安定の場合Case1では、周囲の流れの変化に伴い、スカラー濃度は鉛直方向に若干変化しながら流下している。一方、強安定の場合Case2ではスカラー濃度の鉛直方向の移動は強く抑制されている。Fig.9に示す時間平均場に注目する。弱安定の場合Case1では、強安定の場合Case2と比較して鉛直方向の拡散幅は若干広い。その結果として、スカラー濃度の影響が地形上においても明確に確認される。

水平断面(x-y)の可視化をFig.10(瞬間場)およびFig.11(時間平均場)に示す。Fig.10に示す瞬間場に注目する。弱安定の場合Case1では、スカラー濃度がy方向へ変化している様子が観察される。一方、強安定の場合Case2では地形に到達するまでほとんどy方向には変化せず、その後、地形の影響によりわずかに偏向して流下している。

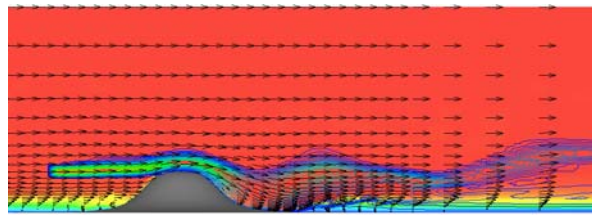
## 4. 安定時その2 (Polynomialな鉛直温度分布の場合)

### 4.1 孤立峰の場合

ここでは、孤立峰を対象にした計算結果について示す。計算領域と座標系はFig.1と同じである。計算領域の入り口では鉛直方向に $40^\circ\text{C}$ の様な温度分布を与



(a)Case1



(b)Case2

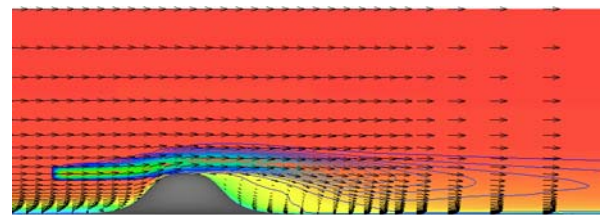
Fig.12 Comparison of the instantaneous flow field, smoke source height=1.0h, y=0, t=60(s)

	Case1 (弱安定)	Case2 (強安定)
床面温度 $\Theta_{\text{bot}}$ ( $^\circ\text{C}$ ) (ラフネスブロックと地形含む)	0	
一様流入温度 $\Theta_{\text{in}}$ ( $^\circ\text{C}$ )	40	
参照温度 $\Theta_{\text{ref}} (= \Theta_{\text{in}})$ ( $^\circ\text{C}$ )	40	
重力加速度 g ( $\text{m/s}^2$ )	9.81	
動粘性係数 $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.5 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-6}$
孤立峰高さ h (m)	0.08	
流入風速 U (m/s)	0.8	0.2
時間刻み $\Delta t$ (s)	$2.0 \times 10^{-4}$	
リチャードソン数 Ri ( $= gh \Delta \Theta / \Theta_{\text{ref}} U^2$ )	0.16	2.51
レイノルズ数 Re ( $= Uh / \nu$ )	4300	
プラントル数 Pr	0.71	

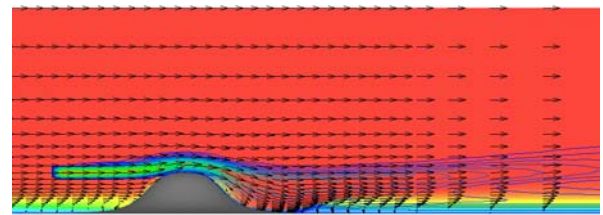
Table.2 Numerical conditions

え、床面はラフネスブロックおよび地形を含めて $0^\circ\text{C}$ に冷却する。計算パラメータなどをTable.2に示す。大気安定度を示すリチャードソン数Ri=0.16の弱安定ケースと、Ri=2.51の強安定ケースの計算を行った。

鉛直断面(x-z)の可視化をFig.12(瞬間場)およびFig.13(時間平均場)に示す。弱安定の場合Case1では、孤立峰背後に逆流領域が形成されており、スカラー濃度はそこへ取り込まれている様子が観察される。強安定の場合Case2では、安定成層の効果により孤立峰背後に形成された逆流領域は縮小されている。結果として、スカラー濃度は孤立峰の下流側斜面に沿って移流・拡散している。



(a)Case1



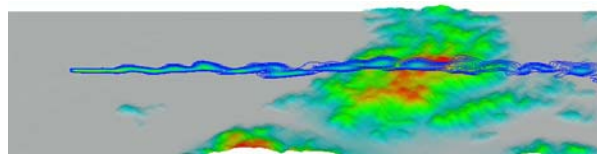
(b)Case2

Fig.13 Comparison of the time-averaged flow field, smoke source height=1.0h, y=0, t=60-80(s)

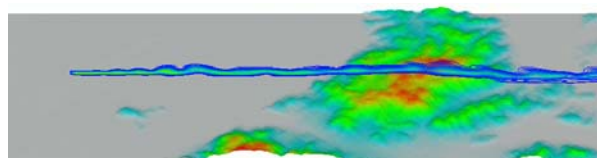
## 4.2 実地形の場合

ここでは、実地形を対象にした計算結果について示す。計算領域と座標系はFig.7と同じである。計算パラメータなどはTable.2と同じである。

鉛直断面(x-z)の可視化をFig.14(瞬間場)およびFig.15(時間平均場)に示す。安定度の増加に伴い、鉛直方向の拡散は抑制され、ほぼ水平的に流下している。

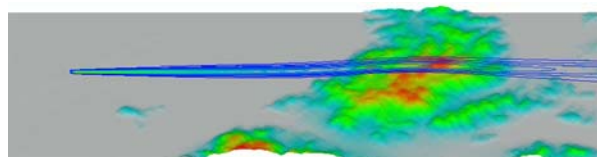


(a)Case1

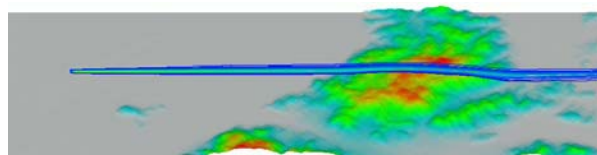


(b)Case2

Fig.14 Comparison of the instantaneous flow field, smoke source height=0.97h, y=0, t=60(s)



(a)Case1



(b)Case2

Fig.15 Comparison of the time-averaged flow field, smoke source height=0.97h, y=0, t=60-80(s)

## 5. 結言

風況シミュレータRIAM-COMPACTを用い、大気安定度が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。流入温度分布として、リニアな場合とPolynomialな場合を検討した。また、それぞれの温度分布に対して弱安定ケースと強安定ケースの計算を行った。その結果、それぞれの温度分布と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15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, 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-, 九州大学応用力学研究所報, 第126号, 2004