

パッシブ粒子追跡法による三宅島火山ガス挙動の可視化*

内田 孝紀¹, 大屋 裕二²

Visualization of the Behavior of Volcanic Smokes from Miyake-jima by using the Passive Particle Tracking Method

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

ABSTRACT

Airflows over steep complex terrain with characteristic length scales of the order of kilometers contain the flow impingement, separation and reattachment. In order to develop an accurate model of simulating the above-mentioned topographic effects, 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).

First, using the RIAM-COMPACT, we performed the calculations of stably stratified airflows over Miyake-jima. The characteristic phenomena of stably stratified airflows with various Froude numbers were successfully simulated. Next, in the airflow patterns obtained, the passive particles were released from the top of Miyake-jima. Based on their results by using the passive particles tracking method, behaviors of volcanic smokes were discussed. It was found that a variety of smoke patterns were induced, corresponding to the difference in the flow pattern around Miyake-jima.

Keywords : Miyake-jima, Stably stratified airflows, Passive particles tracking method

1. 緒言

三宅島は2000年7月8日の雄山(814 m)の山頂噴火以来、活発な火山活動が続いている。同年9月1日には、大規模な爆発的噴火や火砕流などの危険性を避けるため、全島民の非難が実施されている。現在では、火山ガス放出の勢いは弱まっているものの、依然としてその危険性は継続している。こうした状況を受け、各方面で精力的な調査や研究が行われている¹⁾。

本研究の目的は、有風時の下、大気安定度が中立状態から非常に強く安定成層した状態において、三宅島頂上から放出された火山ガスが、島内の範囲でどのように移流拡散するかを数値シミュレーションにより明らかにすることである。このためには、まず急峻な地形起伏に起因して生じる流れの衝突、剥離、再付着、逆流など、風に対する地形効果を忠実に再現することが極めて重要で

ある。次に得られた風況パターンに基づき、火山ガスの移流拡散現象を高精度に予測することとなる。本論文では、第一段階として、中立成層流から強安定成層流に至るまでの広範囲の安定度に対して三宅島まわりの風況パターンを明らかにする。その後、この風況場に基づき、三宅島頂上付近からパッシブ粒子を連続的に放出する。これを実際の火山ガスに見立てその挙動を考察する。

2. RIAM-COMPACT の概要

2.1 LES 基礎式

我々は数百 m ~ 数 (十) km 程度の局所域的な絞りを、風に対する地形効果を高精度に予測する数値モデルを開発している²⁾。これを RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain) と称する。本論文では、RIAM-COMPACT を用いて三宅島を過ぎる非圧縮性の安定成層流 ($d\Theta_B/dz = 1$) のラージ・エディ・シミュレーション (LES) を行う。西風を対象とし、三宅島への近寄り流れは鉛直方向 (z) に一様で U とする。三宅島の高さを代表スケール h ($= 814$ m)

* 原稿受付 2003年3月25日

¹ 正会員 九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1, takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

² 九州大学応用力学研究所

とし、計算領域は主流方向 (x) に約 $50h$ 、スパン方向 (y) に約 $37h$ 、鉛直方向 (z) に $10h$ の空間を有する。三宅島は流入境界面から約 $18h$ 下流のスパン中央 ($y=0$) に設置し、その上流には比較的長い計算領域を設定する。これは安定成層場において、三宅島からその上流に伝播する擾乱波動の影響を避けるためである³⁾。

LES では流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなグリッドスケール (GS) 成分の渦と、それよりも小さなサブグリッドスケール (SGS) 成分の渦に分離する。GS 成分の大規模渦については、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、SGS 成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用については、フィルタリングにより生じた SGS 応力を物理的考察に基づいてモデル化して計算に取り入れる。差分法においては一般に空間フィルタと微分操作の互換性が成立するので、フィルタ関数を陽に与える必要はない。SGS モデルには局所平衡と渦粘性を仮定した標準スマゴリンスキーモデル⁴⁾を採用する。ブシネスク近似を用い、流れ場の代表スケール U, h, Θ_0 (参照値) で無次元化した LES 基礎式は以下ようになる。ここで、主流方向、スパン方向、鉛直方向を示す座標系は x_i ($x_1=x, x_2=y, x_3=z$) とし、これに対応する各方向の GS 速度成分は \bar{u}_i ($\bar{u}_1=\bar{u}, \bar{u}_2=\bar{v}, \bar{u}_3=\bar{w}$) とする。(2)式および(3)式中の無次元パラメータ Re, Fr, Pr はレイノルズ数 ($=Uh/\nu$)、フルード数 ($=U/Nh, N$ は浮力振動数)、プラントル数 ($=0.71$) である。なお、重複する添え字には総和規約が適用される。

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\bar{\theta} \delta_{i3}}{Fr^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} + \bar{w}, \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij}, \quad (4)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}|, \quad (5)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+/25), \quad (6)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3}, \quad (7)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (8)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2}, \quad (9)$$

$$h_j = -\frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}. \quad (10)$$

2.2 数値計算法

一般曲線座標系 ($\xi-\eta-\zeta$) のコロケート格子を導入する。結果として、上記の(1)-(10)式は計算面 ($\Delta\xi = \Delta\eta = \Delta\zeta = 1$) に変換される。(2)式は若干の付加項を伴うナビエ・ストークス方程式である。よって、一般に使用される非定常流体解析法がそのまま適用できる。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、オイラー陽解法に基づいた部分段階法⁵⁾を用いる。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)式に代入して圧力のポワソン方程式を導き、逐次過緩和法 (SOR 法) により反復計算する。空間項の離散化に関して、(2)式および(3)式の対流項には3次精度風上差分を適用する。但し、それを構成する4次精度中心差分は補間法⁶⁾で近似し、4階微分の数値拡散項の重みは通常使用される K-K スキームタイプ⁷⁾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。残りの空間項については2次精度中心差分を用いる。

2.3 計算パラメータ

三宅島の起伏形状は国土地理院の 50 m 標高数値データに基づいて 100 m 分解能で再現した。格子点数は x, y, z 方向に $161 \times 145 \times 81$ 点とした。三宅島近傍の流動現象や波動現象を高精度に捉えるため、計算格子は地形表面に十分に引き付けている。三宅島頂上付近の最小格子幅は $\Delta z_{min} = 3 \times 10^{-3}h$ である。三宅島の高さ h と一様近寄り流れ U で定義したレイノルズ数は $Re (=Uh/\nu) = 10^4$ とした。これは実大気スケールのレイノルズ数での計算は困難であり、 10^4 以上では風況パターンの定性的な挙動はほぼ同じであることが期待されるためである。計算は鉛直方向に温度変化がない中立成層した流れの $Fr (=U/Nh) = \infty$ から非常に強く安定成層した流れの $Fr = 0.1$ に至るまで、広範囲の成層度 ($Fr = \infty, 5, 3, 1, 0.5, 0.1$) に対して行った。初期条件はインパルススタートとした。速度の境界条件に関して、流入境界面は一様流入条件、側方境界面と上部境界面は滑り条件、地表面は粘着条件、流出境界面は対流型流出条件とした。無次元時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$ とし、SGS モデルのパラメータは $C_s = 0.1, Pr_{SGS} = 0.5$ とした。ここで、安定度の指標として用いたフルード数 $Fr (=U/Nh)$ に関して、実際の気象条件との対応を検討する。 Fr の定義式における N は浮力振動数であり、 $N = (g/\Theta_0 \cdot d\Theta/dz)^{1/2}$ で記述される。今、近寄り風速を $U = 10$ (m/s)、三宅島の麓の温度を $\Theta_0 = 293$ (K) とする。三宅島の麓から頂上に向かって $d\Theta/dz = 2/814$ (K/m) の温度差があるとする、 $N \approx 9 \times 10^{-3}$ (rad/s) となり、 $Fr \approx 1.4$ となる。以上から、本論文で設定した Fr 数は十分に出現可能な気象条件であると言える。

3. 計算結果と考察

以下では、中立成層流の $Fr = \infty$ と安定成層流の $Fr = 5, 3, 1, 0.5, 0.1$ に関して、安定度の違いによる流れパターンの変化を示す。瞬間場 (無次元時間 $t = 100$) の速度ベ

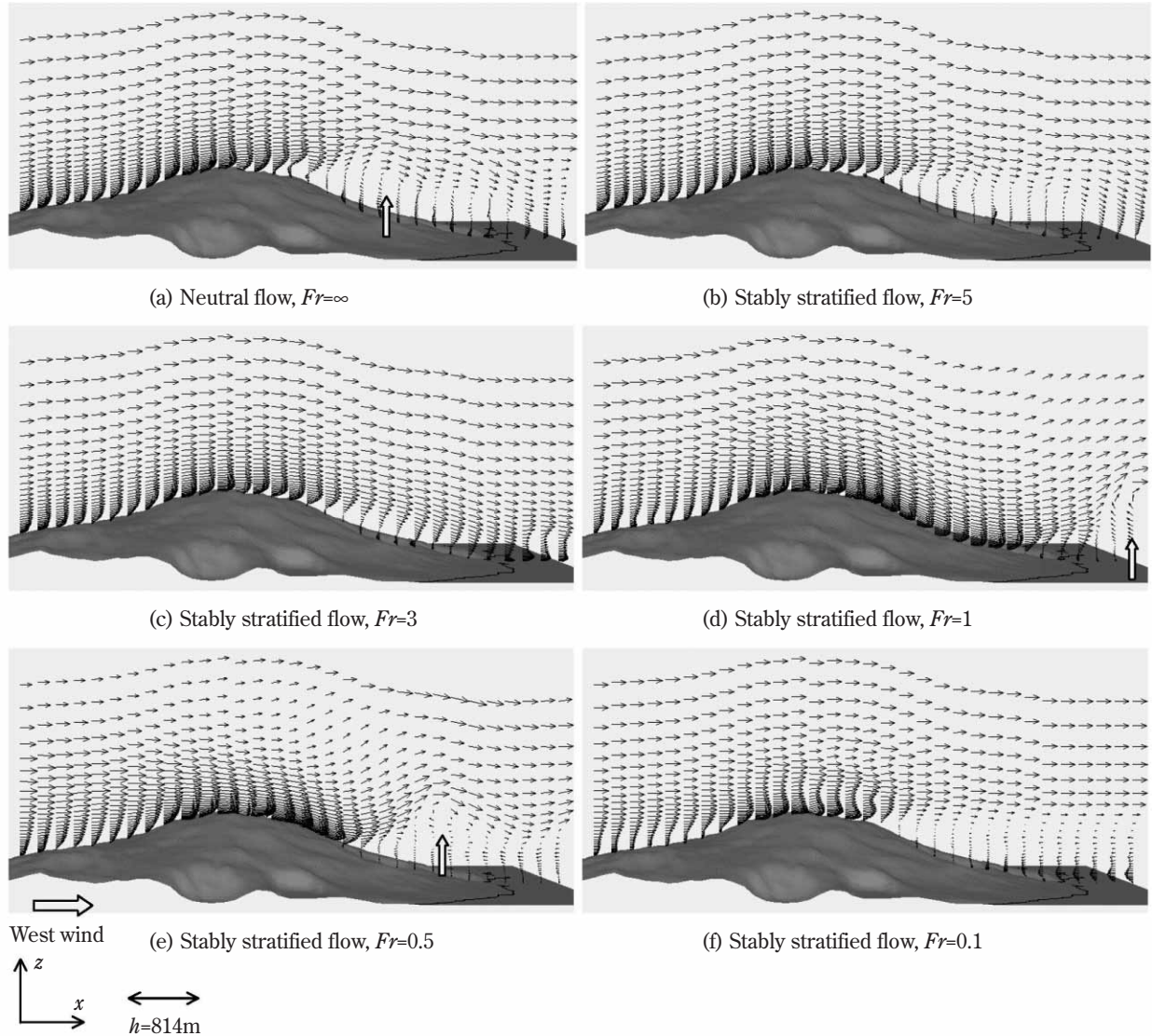


Fig. 1 Instantaneous velocity vectors in the central plane ($y = 0$), side view, $t = 100$.
The sign of h is the height of Miyake-jima.

クトル図 (スパン中央断面 ($y = 0$)) を **Fig. 1** に示す。ここで、速度ベクトルの基準スケールはすべてのケースにおいて同じである。また便宜上、主流方向 (x) と鉛直方向 (z) に一点おきに表示している。中立成層流の $Fr = \infty$ では、三宅島背後において渦構造が観察される (図中に矢印で表示)。この渦構造はほぼ周期的に地形下流へ放出されて流下する。弱い安定成層流の $Fr = 5, 3$ では、安定度の増加に伴い三宅島背後に形成される逆流域は徐々に小さくなっている。強い安定成層流の $Fr = 1$ では、 $Fr = \infty, 5, 3$ と比較して地形周辺流れは大きく変化している。このケースでは、内部重力波 (風下波) が三宅島の下流に形成されている。その波長は三宅島の主流方向 (x) の長さと同程度である。風下波の形成に伴い三宅島頂部付近からの流れの剥離が抑制されている。三宅島の下流側斜面に沿って流れの局所的な増速域が発生している。これは後述する **Fig. 2(d)** からより明確に分かる。三宅島の下流側斜面に沿った流れは、風下波の上昇

流により三宅島の裾野付近から剥離し、そこで逆流域 (ローター) を形成している (図中に矢印で表示)。強い安定成層流の $Fr = 0.5$ では、安定度の増加に伴い $Fr = 1$ と比べて波長の短い風下波が三宅島の下流に形成されている。結果として、三宅島の下流側斜面に沿った増速流は三宅島の中腹付近から剥離し、地形からすぐ下流の上空にローターが誘起されている (図中に矢印で表示)。 $Fr = 1, 0.5$ において励起される風下波はほぼ定在波であり、その波長は線形理論⁸⁾ による予測値 ($2\pi Fr$) とほぼ一致する。最も強く安定成層した流れの $Fr = 0.1$ では、鉛直方向の流体運動は強く抑制され、その結果、ほぼ水平的な流れ場が形成される。これは三宅島を迂回する流れが卓越していることを意味する。強く安定成層した流れ ($Fr < 1$) の挙動に関しては、分離流線高さ H_s ($= 1 - Fr$) と呼ばれるクライテリア⁸⁾ が知られている。これは地形上流において、 H_s よりも上層の流体は地形頂部を乗り越え、 H_s よりも下層の流体は地形を水平的に回り込むとい

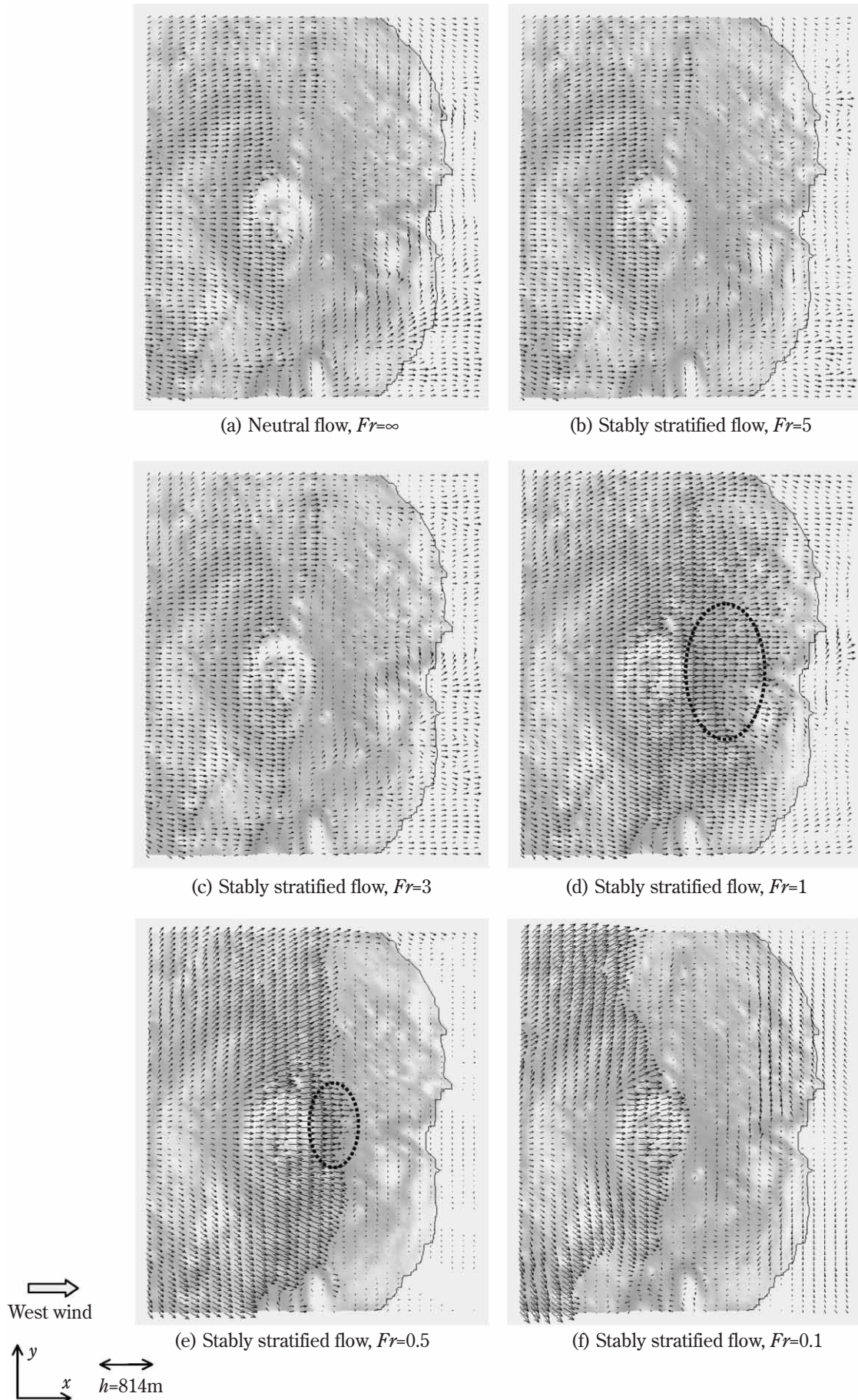


Fig. 2 Instantaneous velocity vectors near the ground ($z^*/h = 0.04$), top view, $t = 100$.
The sign of h is the height of Miyake-jima.

うものである。本研究の $Fr = 0.5, 0.1$ においても H_s が観察され、その値は理論値とほぼ一致した。

Fig. 1 に対応した三宅島の表面近傍 ($z^*/h = 0.04$) における速度ベクトル図を **Fig. 2** に示す。ここで、 z^* は地形表面からの高度であり、図中の実線は三宅島の輪郭を示す。また、速度ベクトルの基準スケールはすべてのケースにおいて同じであり、便宜上、主流方向 (x) のみ一点おきに表示している。中立成層流の $Fr = \infty$ と弱い安定成層流の $Fr = 5, 3$ では、流れは三宅島の上流側で減速し、頂上付近で局所的な増速を示し、下流側では剥離流の影響に伴い複雑な流れ場を呈している。特筆すべきは強い安定成層流の $Fr = 1, 0.5$ である。先に述べたように、これらのケースでは、風下波の形成に伴う下降流が三宅島の下流側斜面で明確に見られる（図中に点線で表示した領域を参照）。そのベクトル長から、かなり強い下降流が地表面近傍で発生していることが分かる。

以下では、**Fig. 1** および **Fig. 2** に示した風況場に基づき、雄山火口付近から放出したパッシブ粒子の追跡結果を示す。実際の火山ガスの挙動は、三宅島まわりの風況

パターンに大きく影響を受けていると考えられる。すなわち、火山ガスは三宅島周辺の風の流れに乗って移流拡散していると考えられる。よって、パッシブ粒子の挙動は実際の火山ガスの定性的な振る舞いを再現したものであると言える。パッシブ粒子は無次元時間 $t = 100 \sim 120$ において $\Delta t = 0.2$ で連続的に放出した。また、雄山火口から放出される噴煙の熱浮力による上昇効果を模擬するため、火口において $0.05U$ (U は一様近寄り風速) の噴出速度を与えた。パッシブ粒子追跡の結果を横から見た様子を **Fig. 3** に示す。中立成層流の $Fr = \infty$ と弱い安定成層流の $Fr = 5, 3$ では、粒子が地形背後に形成された逆流域に取り込まれ、そこで激しく混合されている様子が伺える。アニメーションを作成してこれを観察すると、 $Fr = \infty, 5$ では、いったん海上付近に流下した粒子が逆流域に取り込まれ、三宅島の下流側斜面を再び這い上がってくる様子が捉えられた。 $Fr = \infty, 5, 3$ では、流下方向 (x) と鉛直方向 (z) の比較的広範囲に粒子が分布していることが特徴的である。三宅島の下流側斜面や裾野付近の広範囲において火山ガスの影響が示唆される。**Fig. 1(c)** で述

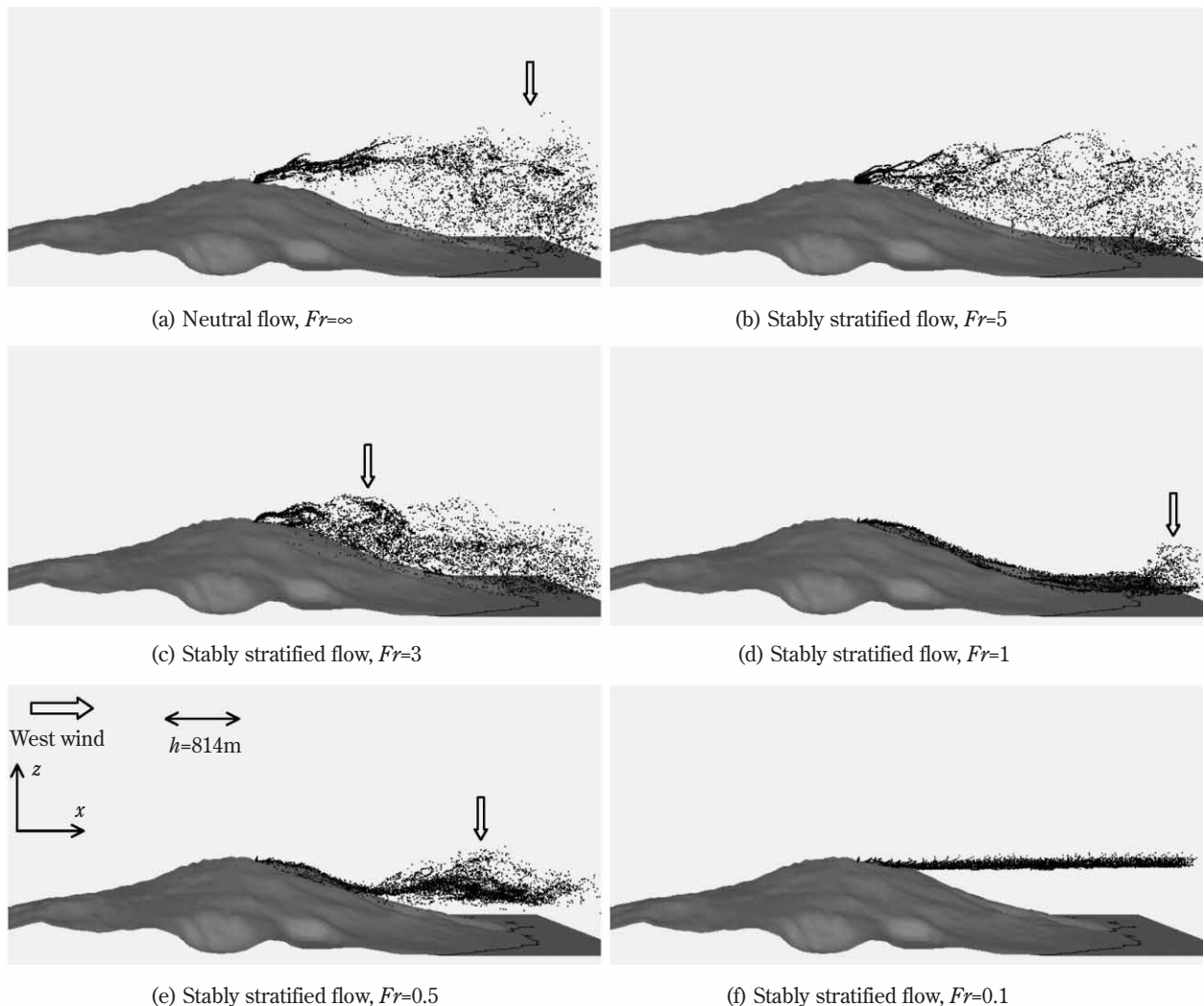


Fig. 3 Results of the passive particle tracking method, side view, $t = 120$.
The sign of h is the height of Miyake-jima.

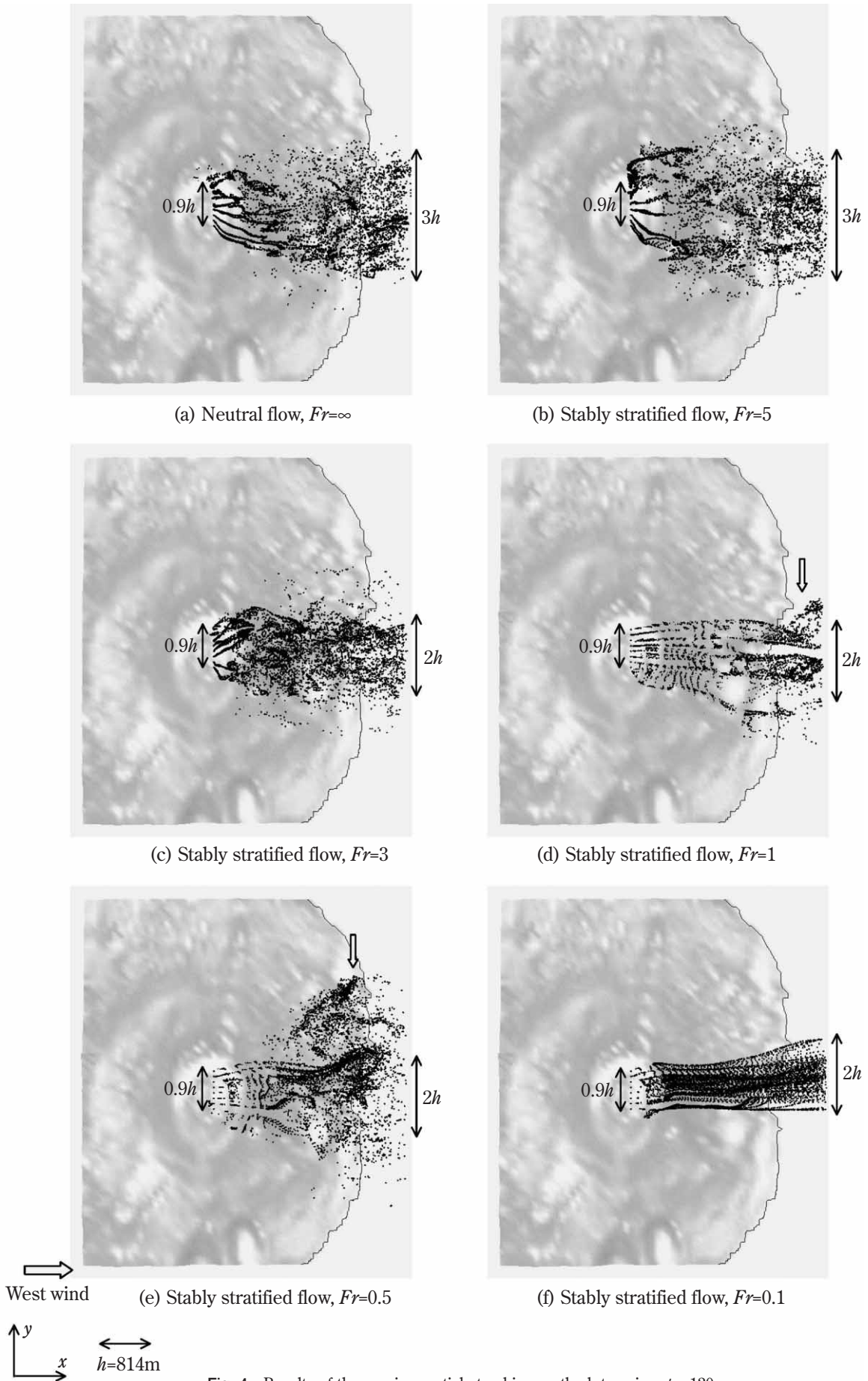


Fig. 4 Results of the passive particle tracking method, top view, $t = 120$.
The sign of h is the height of Miyake-jima.

べたように, $Fr = 3$ では安定成層の効果により逆流域が縮小している. その結果, $Fr = \infty, 5$ と比較して逆流域中では高い濃度場を形成していることが予想される. $Fr = \infty, 3$ では図中に矢印で表示するように, 安定度の増加とともに粒子が密に集まっている領域が三宅島の頂部に近づいている. これは安定度の増加に伴い, 三宅島の頂部付近で剥離したせん断層の巻き込み(渦の巻き込み)の位置が, 頂部付近に近づいていることに起因している. 強い安定成層流の $Fr = 1, 0.5$ では, 風下波の強い下降流に乗って粒子が山の下流側斜面を移流している. 両ケースともに移流する粒子の鉛直方向(z)の広がりほとんど無く, そこで火山ガスの高濃度域が発生することが予想される. $Fr = 1, 0.5$ ともに風下波の上昇流に伴い誘起されるローターの中で粒子が停滞している(図中に矢印で表示). 最も強く安定成層した $Fr = 0.1$ では, 粒子は三宅島の下流側斜面や裾野付近に達することはなく, ほぼ三宅島の高さレベルで水平的に移流している. よって, このケースでは三宅島の下流側斜面や裾野付近において火山ガスの影響はほとんどないものと考えられる. しか

しながら, 流下する粒子については, その鉛直方向(z)の移動は強く抑制され, 非常に薄い分布を呈している. すなわち, ここではかなり高い濃度分布を示すものと推測される.

Fig. 3に示すパッシブ粒子追跡の結果を真上から見た様子を **Fig. 4**に示し, それぞれの成層層で粒子のспан方向(y)の分布を考察する. ここで, 図中の実線は三宅島の輪郭を示す. 中立成層流の $Fr = \infty$ と弱い安定成層流の $Fr = 5$ では, y 方向への粒子の広がり同程度であり, その分布の幅は三宅島の高さ h の3倍程度である. 弱い安定成層流の $Fr = 3$ では, $Fr = \infty, 5$ と比較して y 方向の広がり抑制され, これに伴いспан中心($y = 0$)付近に粒子が密集している. このケースにおける粒子の y 方向への広がり幅は $2h$ 程度である. **Fig. 3**で述べたように, この図からも $Fr = \infty, 5, 3$ ともに, 粒子が三宅島背後に形成された逆流域に取り込まれ, そこで激しく混合されている様子が明確に分かる. 強い安定成層流の $Fr = 1, 0.5$ では, 両ケースともに粒子は風下波の強い下降流に乗り, ほとんど乱されることなく山の下流側斜面を移流してい

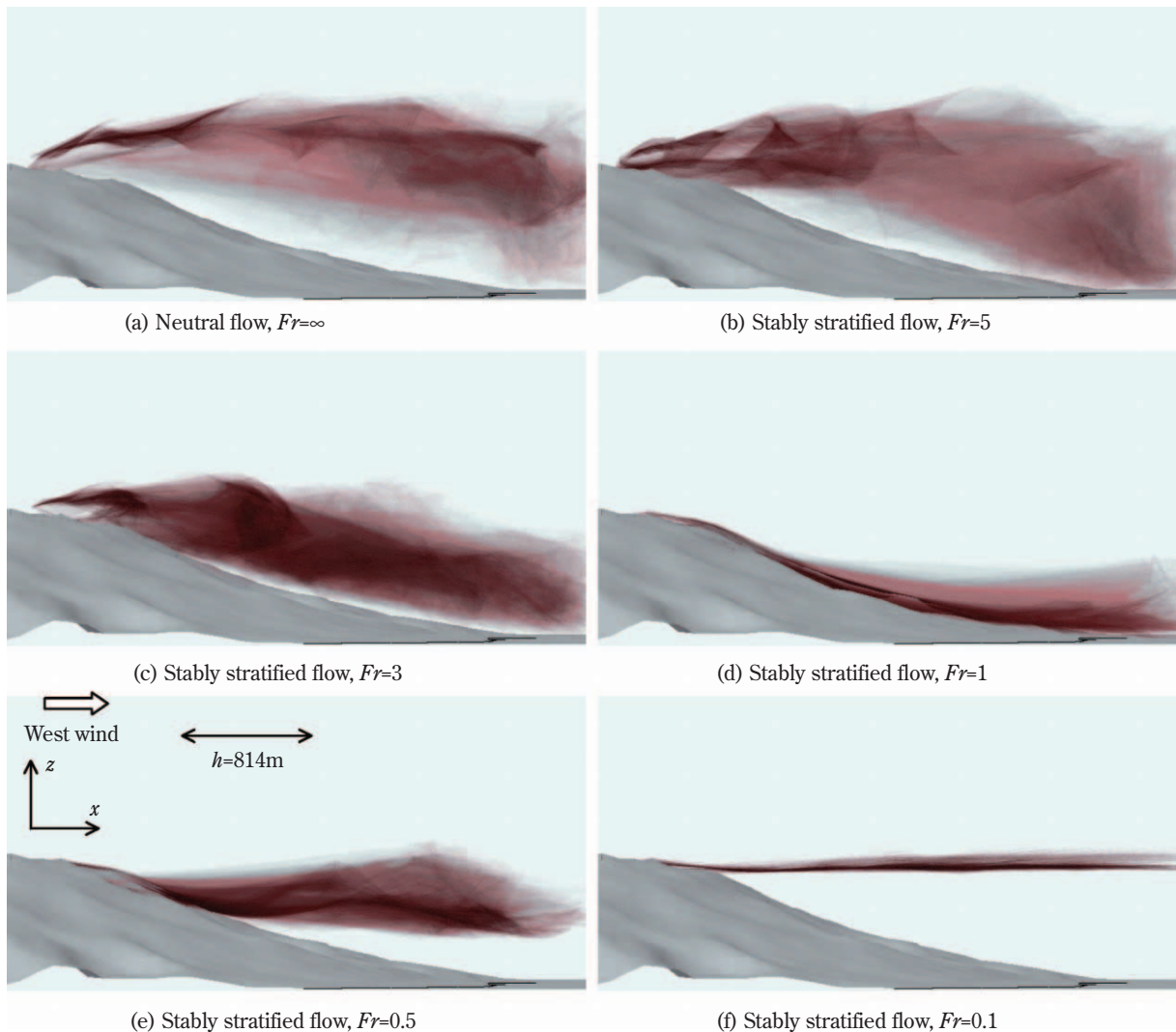


Fig. 5 Results of the surface path rendering method, side view, $t = 120$.
The sign of h is the height of Miyake-jima.

る。ここで注目すべきは以下の点である。図中に矢印で示すように、 $Fr = 1$ では三宅島の裾野付近に形成されているローター内に粒子が取り込まれている。そこでは粒子が停滞し、また同時に y 方向への移動も確認できる。 $Fr = 0.5$ では、その傾向はさらに顕著である（図中に矢印で表示）。ローター内の粒子の挙動に関して、 $Fr = 1$ に比べてより強く安定成層した $Fr = 0.5$ の方が y 方向への移動量が大きいということは非常に興味深い。これは $Fr = 0.5$ ではローター内で激しい乱流混合が生じていることを示唆している。最も強く安定成層した $Fr = 0.1$ では、粒子は y 方向にほとんど乱されることなく、わずかに蛇行しながら流下している。

Fig. 3 および **Fig. 4** に示すパッシブ粒子の挙動を、サーフィスパスレンダリング法⁹⁾で可視化し、これを横から見た様子を **Fig. 5** に示す。この方法では粒子を微小面要素に置き換え、さらにライティングの効果を与えることでより3次元的に視覚化する。この手法により、噴煙挙動の立体的な構造を視覚化することが可能になる。それぞれのケースにおいて、細部を詳細に観察すると濃淡の局所的な変化が明確に観察される。これは火山ガスの濃度分布が地形背後の風況パターン（渦の巻き込みなど）を反映して局所的に変化していることを示唆するものである。

4. 結 言

本論文では、中立成層流から強安定成層流に至るまでの広範囲の安定度に対して三宅島まわりの風況場予測シミュレーションを行った。その後、得られた風況場に基づき、三宅島の雄山火口付近からパッシブ粒子を連続的に放出した。これを実際の火山ガスに見立てその挙動を考察した。その結果、それぞれの成層度（フルード数）に特徴的な風況パターンが明らかになった。パッシブ粒

子の挙動に関しては、三宅島まわりの風況パターンに強く依存した結果を得た。特に、強く安定成層した場 ($Fr = 1, 0.5$) であっても、ローター内では活発な乱流混合を示し、その結果、そこで粒子（火山ガス）が停滞することが示された。ローター内の粒子（火山ガス）の挙動に関しては、 $Fr = 1$ に比べてより強く安定成層した $Fr = 0.5$ の方が y 方向への移動量が大きいという興味深い知見を得た。今後は火山ガスの移流拡散現象を高精度に予測するモデルを付加した計算を行い、定量的な検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 木下紀正編：鹿児島大学多島域フォーラム講演論文集—列島火山の噴煙活動を探る— (2002)。
- 2) 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，日本風工学会誌，No. 92 (2002) pp. 135–144。
- 3) Uchida, T. and Ohya, Y.: Numerical study of stably stratified flows over a two-dimensional hill in a channel of finite depth, *Fluid Dyn. Res.*, 29 (2001) pp. 227–250。
- 4) 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。
- 5) Kim, J. and Moin, P.: Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, *J. Comput. Phys.*, Vol. 59 (1985) pp. 308–323。
- 6) 梶島岳夫：乱流の数値シミュレーション，養賢堂 (1999)。
- 7) Suzuki, M. and Kuwahara, K.: Stratified flow past a bell-shaped hill, *Fluid Dyn. Res.*, 9 (1992) pp. 1–18。
- 8) Snyder, W. H.: Fluid modeling of pollutant transport and diffusion in stably stratified flows over complex terrain, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17 (1985) pp. 239–266。
- 9) 葛生和人：サーフィスパスレンダリング法による流れの可視化—3次元可視化新技術を用いた数値流体シミュレーション—，可視化情報学会論文集，Vol. 21, No. 12 (2001) pp. 144–150。