

# 桜島からの火山ガスプリューム の輸送・拡散過程の解析

鵜野伊津志<sup>1</sup>・若松伸司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 国立環境研究所 大気圏環境部 (〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

<sup>2</sup> 正会員 工博 国立環境研究所 地域環境研究グループ (〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

メソスケール気象モデルとラグランジェ型粒子モデルを用いて桜島からの火山ガスプリュームの輸送・拡散過程を解析した。気象モデルにはナッジングによる4次元データ同化手法を利用し、1987年5月7日から10日までの気流をシミュレートし、火山ガスプリュームの3次元的な輸送・拡散過程が捕えられた。火山ガスプリュームは高度500~2000m付近を輸送され、長崎県北部(風下移流距離200km)で水平方向に50kmの広がりを取っていた。上空を輸送される火山ガスプリュームの地上への輸送には、大気境界層の発達によるエントレイメントが重要な役割を示した。モデルの結果は同期間に行われた航空機観測結果と長崎県下の地上測定局のSO<sub>2</sub>濃度の時間空間変化をよく説明できた。

**Key Words:** mesoscale meteorological model, Lagrangian particle model, volcanic plume, atmospheric boundary layer, SO<sub>2</sub>

## 1. はじめに

九州各県では、桜島南岳(標高1060m)からの噴煙・火山ガスに起因する高濃度のSO<sub>2</sub>汚染がしばしば報告されている<sup>1)~3)</sup>。桜島南岳は、噴火の有無に関わらず大量の火山ガスを放出しており、SO<sub>2</sub>の発生量は1000~2000 ton/dayと推定されている<sup>4)</sup>。この量は1年間で37~63万トンに相当し、日本全国の排出量の4~6割に当たる。

桜島南岳の噴火口の標高が高いことから気象条件によってはかなりの範囲にSO<sub>2</sub>の高濃度汚染をもたらす、我が国のみでなく、朝鮮半島にも長距離輸送されると考えられる。

九州地域は、酸性降下物の越境大気汚染の問題となる中国大陸や朝鮮半島に近いこと、これらの地域からの汚染物質授受とその変質過程の把握は日本国内における酸性雨問題を議論する上で不可避な課題である。そのため、国外起源の寄与率の正確な評価を行う上からも、国内起源の火山からのSO<sub>2</sub>の輸送過程を正確に把握しておく必要がある。

山下ら<sup>5)</sup>は、雲仙野岳での長期間観測の結果から長崎県下への桜島からの長距離輸送の存在と、その気象条件を詳細に議論した。それによると、長崎県

下での地上でのSO<sub>2</sub>の高濃度の出現には九州地域が移動性高気圧の後面に位置することが重要な気象要因であることを示した。若松ら<sup>5),6)</sup>は、九州北部地域での航空機を用いた汚染物質の広域3次元観測から、桜島からの火山ガスプリュームを捕らえている。水野ら<sup>7)</sup>は最近、桜島の火山ガスが関東地方まで輸送され粒子状サルフェート濃度の増大をもたらした事例を報告している。

本論文では、メソスケール気象モデルとラグランジェ型粒子モデルを用いて、桜島からの火山ガスプリュームの輸送・拡散過程をシミュレートし、航空機による3次元観測結果との比較結果を示す。

## 2. 観測の概要とSO<sub>2</sub>濃度分布

### (1) 地上と航空機観測の概要と気象条件

九州北部地域において1987年5月に行われた気象と大気汚染の航空機と地上特別観測の概要を示す。

図-1には観測地点の配置を示す。地上での観測(S<sub>1</sub> - S<sub>6</sub>の6地点)は5月8日から14日まで連続的に行った。表-1にはこれらの地上測定局の測定項目を示した。エアロゾル成分(CI<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、ガス状SO<sub>2</sub>とNH<sub>3</sub>、全硝酸(Total NO<sub>3</sub>)

表-1 観測概要と観測項目

観測項目	観測点 <sup>a)</sup>	観測方法
地上観測		
上層風	S <sub>1</sub> -S <sub>4</sub>	パイロットバルーン <sup>b)</sup>
温湿度分布	S <sub>1</sub>	低層ゾンデ <sup>c)</sup>
O <sub>3</sub>	S <sub>1</sub> -S <sub>6</sub>	Dasibi オゾン計
SO <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> -S <sub>6</sub>	6% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 含浸セルロースフィルター
NH <sub>3</sub>	S <sub>1</sub> -S <sub>6</sub>	5% リン酸含浸セルロースフィルター
エアロゾル	S <sub>1</sub> -S <sub>6</sub>	ハイボリウムサンプラー イオンクロマトグラフ <sup>d)</sup>
炭化水素	S <sub>1</sub> -S <sub>6</sub>	真空瓶, ガスクロマトグラフ <sup>e)</sup>

航空機観測 <sup>f)</sup>	
O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	化学発光法
SO <sub>2</sub>	蛍光紫外線法
CO	ガス相関法
炭化水素	真空瓶, ガスクロマトグラフ <sup>e)</sup>
エアロゾル	ハイボリウムサンプラー イオンクロマトグラフ <sup>d)</sup>

気温, 湿度, 気圧

- a) S<sub>1</sub>=対馬, S<sub>2</sub>=福江, S<sub>3</sub>=長崎県式見, S<sub>4</sub>=見島, S<sub>5</sub>=鹿児島県東市来町, S<sub>6</sub>=雲仙野岳
- b) 上空3000mまで測定, 1987年5月8日~14日. 8日7時から10日21時まででは2時間間隔
- c) 上空3000mまで測定, 1987年5月8日~14日. 8日~10日は8時, 11時, 15時の1日3回
- d) 6時間毎. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 全硝酸
- e) 6時間毎. 非メタン炭化水素 (NMHC), CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>-C<sub>9</sub> の45種の炭化水素 (HC)
- f) 連続測定機 2-3秒間隔で測定, 炭化水素は指定地点で真空瓶に加压採取, エアロゾルはテープ式ハイボリウムサンプラーで10-15分間隔で採取
- g) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

表-2 航空機による観測時間

Run	Date	Time(JST)
1	May 8, 1987	0902 - 1134
2	May 8, 1987	1327 - 1550
3	May 9, 1987	0928 - 1158
4	May 9, 1987	1332 - 1608
5	May 10, 1987	0913 - 1152
6	May 10, 1987	1338 - 1552

は6時間平均濃度を測定しており, O<sub>3</sub> 濃度はDasibi O<sub>3</sub> 計で連続測定し, それ以外の項目は6時間毎にサンプリングを行い分析した.

航空機による観測は対馬空港を基地として5月8日から10日まで午前と午後2に2フライト(Run)ずつ合計6フライトを実施した. 航空機の測定項目は表-1に同時に示す. 表-2には航空機の各Runの実施時間を示した. 航空機でも地上と同様にエアロゾル成分 (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) を10分~15分の間隔でテフロンフィルター上に捕収し その濃度をイオンクロマトグラフィーにより分析した. ガス成分濃度は自動測定器からの出力値を2~3秒の間隔でデータロガーに収録した. 航空機測定システムの詳細はWakamatsu *et al.*<sup>8)</sup>に報告されている.

フライトの基本ルートは, 対馬空港~山口県萩市沖見島~福岡市沖~若岐~五島列島~福江島で基本高度は400mであるが気象条件等に応じて, コースと高度が適宜変更された.

図-2には1987年5月8日と10日の地上天気図と気象庁全球客観解析(GANL)から内挿した高度1000mの風系を示した.

5月8日午前までは九州地域は帯状の移動性高気圧の下に位置して風速が弱く, 対馬付近の下層の大気には停滞傾向が見られた. 一方, 9日からは, 移動性高気圧の後面に位置することにより九州南部から九州北部を回り込むようなS系の風系パターンが出現した.

図-3には, 鹿児島での高層気象観測データからの比湿, 風速, 風向の時間・空間プロットを示す.

この時空間分布で最も特徴的な点は7日21時から8日21時にかけての2km以上の高度における急激な比湿の低下であり, このような状態は10日21時まで継続した. これは上空の乾燥した大気の下降を意味している. また, 温位の同様なプロットから移動性高気圧の通過に伴う沈降性の逆転層の存在がみられた. これは, 鉛直上方への拡散を抑制するため桜島のように発生源の高度が高い場合に重要である.

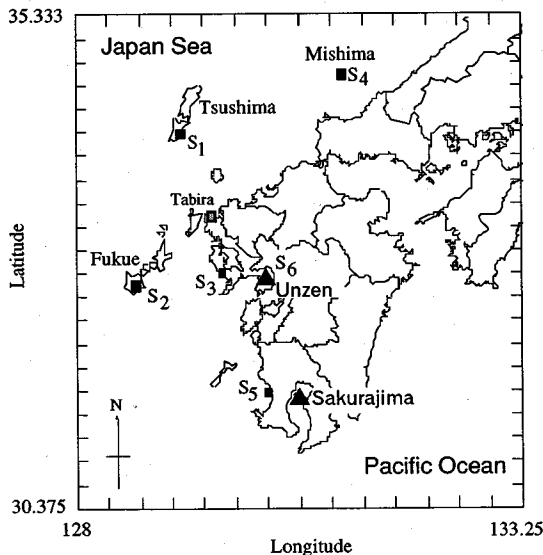


図-1 観測地点の配置 (■) とメソスケール気象モデルの計算領域.

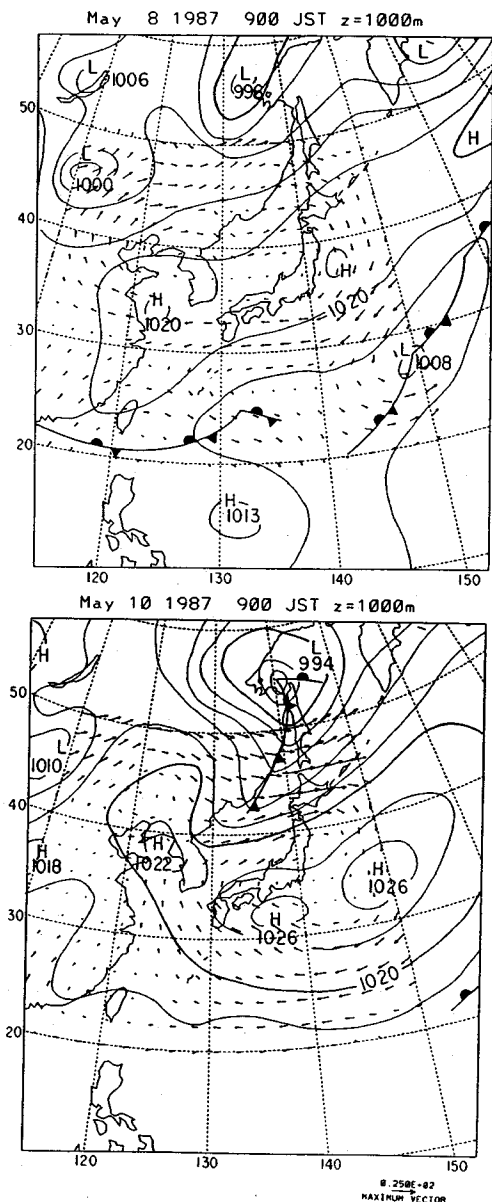


図-2 観測期間中の地上気圧配置と高度1000mでの風向・風速（気象庁全球客観解析データから内挿）。

## (2) SO<sub>2</sub> の高濃度プルーム

本論文では長崎県地上と航空機で高濃度のSO<sub>2</sub>が観測された5月9日と10日について中心に解析する。

SO<sub>2</sub> 濃度についての航空機観測と長崎県の地上モニタリング結果を図-4に示す。また図には、航空機によるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 濃度の分布と地上での風向・風速

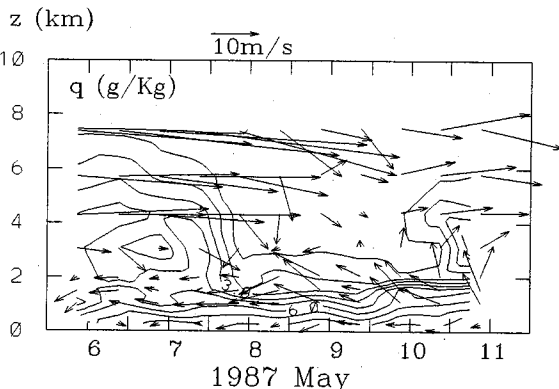


図-3 鹿児島高層気象観測データの比湿と風向・風速ベクトルの時空間変化。

ベクトル（アメダスと長崎県での一般環境大気汚染監視局）を示している。図中の黒丸の大きさがSO<sub>2</sub> 濃度（航空機は1分間平均，地上は1時間平均値），白丸がSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 濃度に対応している。

図-4に点線で示したフライトコース上において，SO<sub>2</sub> の明瞭なピークが観測された。SO<sub>2</sub> の瞬間ピーク濃度は Run 3では 38ppb，Run 4では 150ppb，Run 5では63ppbであった。高度約400mのフライトデータについてのSO<sub>2</sub> プルームの水平方向の広がり は 40km 程度である。このようなピークの出現位置は Run 3(9日午前)では五島列島付近上空に存在していたが，Run 4では平戸島～杵岐西部にかけて観測され，濃度のピークが五島列島から平戸島方向へと東進した。高濃度のSO<sub>2</sub> の移流は5月10日も図-4に示されたように継続して観測された。Run 5の結果からは，SO<sub>2</sub> プルームは Run 4と同様に長崎県の平戸島付近に位置しており，濃度レベルは約 40ppb である。この SO<sub>2</sub> プルームは航空機観測データでは中心軸が明瞭に示され，そのプルームは対馬付近にまで達していた。一方，上空のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 濃度とSO<sub>2</sub> 濃度には明瞭な相関が見られなかった。これは，SO<sub>2</sub> → SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>への変換が緩やかなためプルームの中心以外のSO<sub>2</sub>が低濃度の領域でも生成されることと，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>には大陸起源の長距離輸送の影響が多いためと考えられる。

長崎県下での地上測定局の結果では，9日の日中に高濃度を観測し（18局で40ppb以上を記録），長崎県北部の田平（図-1）ではSO<sub>2</sub> 最高濃度148ppb（15時）を観測している。10日の日中にも引き続き高濃度が出現しており，12時には長崎県北部の佐賀県境の福島において 55ppbのSO<sub>2</sub> が観測され，県内でも15局で 20ppb を越えていた。これらの地上の高濃度は夜間には観測されなかった。

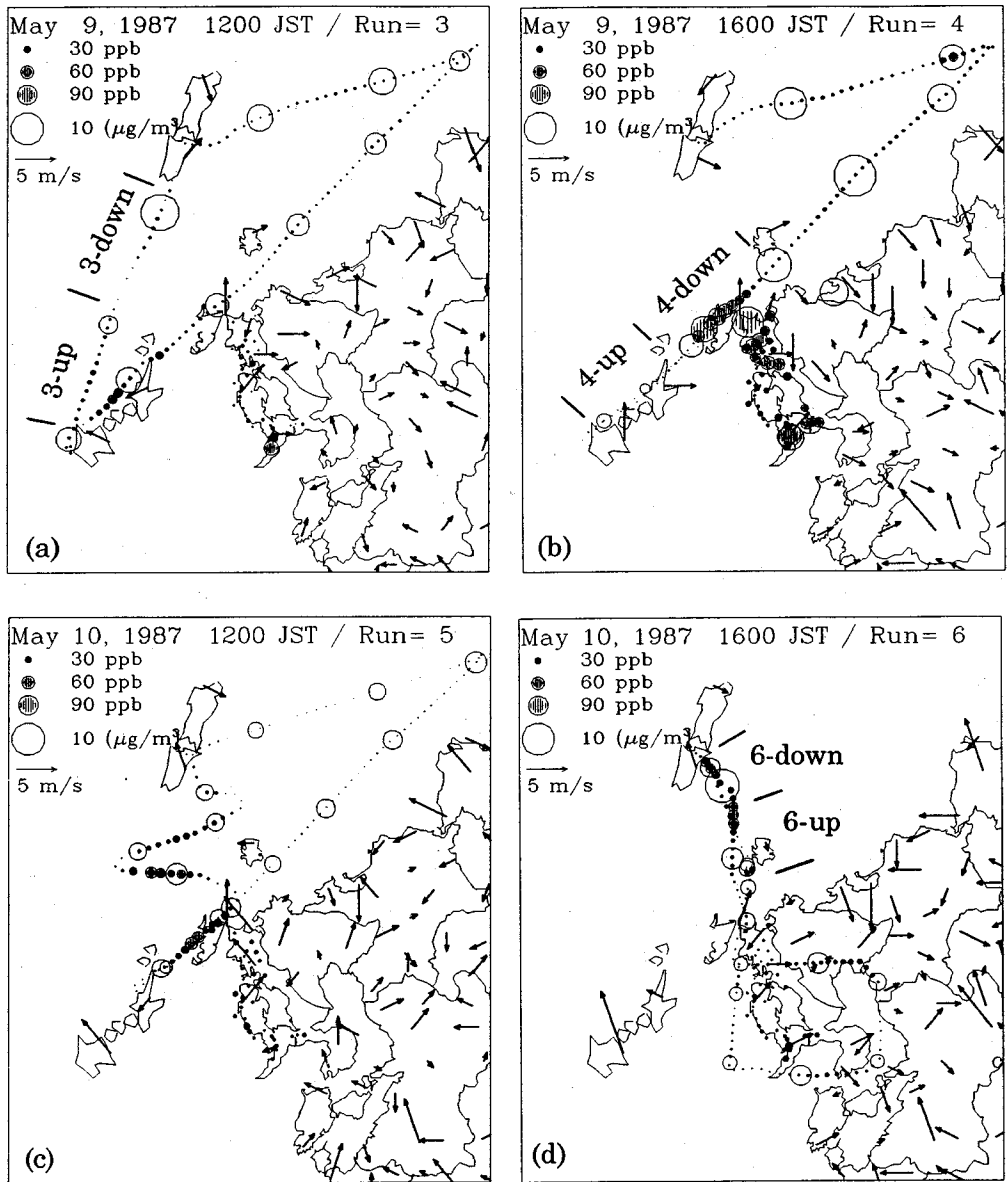


図-4  $\text{SO}_2$  と  $\text{SO}_2^*2$  濃度の空間分布 (航空機観測と長崎県の一般環境大気測定局)。図中の矢印はアメガスと長崎県の一般環境大気測定局の風向・風速を意味する。

図-5には、Run 3, 4, 6での $\text{SO}_2$ 濃度の鉛直プロファイルを示す。これらの鉛直プロファイルの地理的な位置は図-4に示した。これらの結果から $\text{SO}_2$ の高濃度は上空2000mにまで達している。対馬の低層ゾンデの温位 $\Theta$ からは高度2000m以上に顕著な逆転層がみられており、この高度内にプリュームの拡散が押さえられていることが判る。一方、10日には高度3000m近くにもピークがみられが、これは、気象条件の変化と火山活動の不規則性のた

めによるものと考えられる。

気象庁の火山報告<sup>9)</sup>によると、1987年5月7日9時15分と8日8時22分に噴煙中量以上の噴火が観測され噴煙が1000~1200mに達しているが、9、10日には大規模な噴火は報告されていない。噴煙の高度(山頂からの高度)と方向は7日~8日は200~1200mで西向き、9日~10日は100~700mで北西であった。

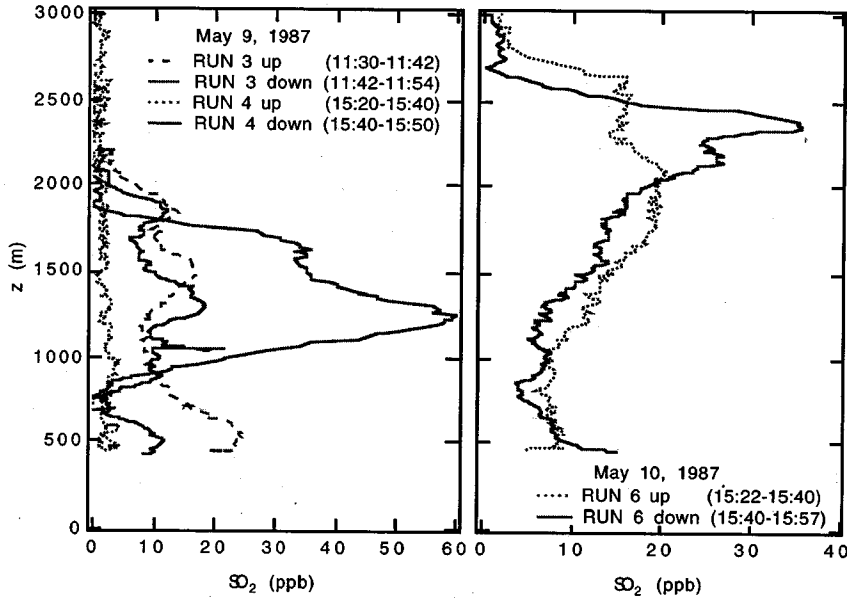


図-5 航空機で観測された  $\text{SO}_2$  の鉛直プロファイル。  
観測地点は図-4を参照。

### 3. 数値モデルの適用

#### (1) メソスケールモデルとナッジング手法

コロラド州立大学メソスケールモデル(Colorado State University Mesoscale Model; CSUMM)<sup>10-12</sup> をナッジングによる4次元データ同化手法(Four-Dimensional Data Assimilation; FDDA)を用いて適用する。本論文では Urlickson and Mass<sup>13</sup> と Kessler and Douglas<sup>14</sup> が改良したバージョンを用いており、以下にそのアウトラインを示す。

モデルは静力学平衡、ブシネスク近似をもとにしており、 $z_*$  座標系

$$z_* = z_i \frac{z - z_g}{z_i - z_g} \quad (1)$$

(ここで、 $z_i$  はモデル領域上端の高さ、 $z_g$  は標高)で、物理変数に通常の記法をもちいて、 $u$ 、 $v$  方向の運動方程式は、それぞれ、

$$\frac{Du}{Dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \left( \frac{z_* - z_t}{z_t} \right) \frac{\partial z_*}{\partial x} + \left( \frac{z_i}{z_i - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z_*} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z_*} \right) + f(v - v_g) + G \times w_t \times w_{xyz} \times (u_{obs} - u) \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \left( \frac{z_* - z_t}{z_t} \right) \frac{\partial z_*}{\partial y} + \left( \frac{z_i}{z_i - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z_*} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z_*} \right) + f(u_g - u) + G \times w_t \times w_{xyz} \times (v_{obs} - v) \quad (3)$$

と書かれる。また、静力学の式は、

$$\frac{\partial \pi}{\partial z_*} = - \left( \frac{z_i - z_g}{z_i} \right) \frac{g}{\Theta} \quad (4)$$

ここで、 $\pi$  は Exner function である。

一方、熱エネルギーと水蒸気の保存式は、それぞれ、

$$\frac{D\Theta}{Dt} = \left( \frac{z_i}{z_i - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z_*} \left( K_h \frac{\partial \Theta}{\partial z_*} \right) + S_\Theta \quad (5)$$

$$\frac{Dq}{Dt} = \left( \frac{z_i}{z_i - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z_*} \left( K_q \frac{\partial q}{\partial z_*} \right) \quad (6)$$

である。以上の式において、 $u$ 、 $v$  はそれぞれ東西、 $u_g$ 、 $v_g$  は地衡風の風速、南北成分の風速、 $\Theta$  は温位、 $q$  は比湿、 $f$  はコリオリ係数、 $S_\Theta$  は大気放射によるソース項である。 $D/Dt$  は  $z_*$  座標系での実質微分を意味し、乱流拡散係数  $K_m$ 、 $K_h$  は、Therry and Lacarrere<sup>15</sup> に従っている。モデルは以上の他に、連続の式、地表面熱収支式、土壌層の熱伝達式、大気長波放射モデルを持ち、地表面での顕熱・潜熱フラックスは Uno et al.<sup>16</sup> により改良された Louis<sup>17</sup> の方法を用いた。

式(2)、(3)の最右辺はナッジングによる4次元データ同化項を示し、 $G$  はナッジング係数、 $w_t$ 、 $w_{xyz}$  はそれぞれ時間的、空間的な重み係数、 $u_{obs}$ 、 $v_{obs}$  は観測値である。ナッジングは、総観規模の気圧変化やその他の外的な境界条件の変化をモデルに取り込

む方法であるとともに、モデル自身を観測値からあまりに離れないように矯正する手法でもある。ナッジング係数が大きいほど観測値とモデルの一致性は向上する。しかし、観測値の少ない地点には非現実的な気流が生じ、逆に小さすぎると観測値がうまく再現されない。従って、現象の時間スケールに応じた適切な係数の設定が重要となる。

ナッジングに用いる観測値の取り扱いとしては、観測地点での値を直接用いる Observation Nudging と、観測値を客観解析したモデルグリッド点への補間値を用いる Analysis Nudging が利用されている。ここでは、観測データをもとにした Analysis Nudging を使い、 $w_{xyz}=1$  とした。時間重み係数  $w_t$  は、ナッジングの時間間隔  $\Delta T_{FDDA}$  をもとに、 $t=t_i$  で  $w_t=0$  とし、 $t=t_i + \Delta T_{FDDA}$  で  $w_t=1$  となるように線形補間した。

4次元データ同化手法を用いた CSU-MM の適用とその有効性は、関東地域については鶴野<sup>18)</sup>、関西地域については鶴野ら<sup>19)</sup> に既に報告されている。

## (2) 計算領域と計算条件

1987年5月7日～10日の気流と火山プルームをシミュレートする。計算領域は九州と四国・本州の一部を対象とする。モデルは原点を、東経128°00′、北緯30°22′50″におき、 $\Delta x=$  約6.8 km、 $\Delta y=$  約6.5 km、グリッド数は東西方向に70、南北方向に85である。鉛直方向には22レベルをとり、地上から8000mまでを計算領域とした(格子点高度は、10, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2600, 3200, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000mである)。図-1にはメソスケール気象モデルの計算領域を同時に示している。また、数値積分の時間刻みは  $\Delta t=90$  sec とした。

FDDA には12時間毎の水平分解能1.875°の指定気圧面 GANL データと  $S_1-S_4$  でのパイロットバルーン観測データを CSU-MM のメッシュ点に客観解析したデータを用いて、上空1000m以上の風速の  $u$ 、 $v$  成分のみに FDDA を適用し、温度には FDDA を用いなかった。ナッジング係数の大きさは鶴野ら<sup>19)</sup> に従いコリオリ係数と同じにした ( $G=f$ )。

風速、温度と湿度の初期プロファイルは鹿児島の高層気象観測データから与えた。風向は、高気圧の移動に伴い7日～10日かけて、日毎にそれぞれ90, 90, 180, 195度と変化させた。海水面温度は、観測値として巖原(15.8℃)、西郷(15.6℃)、牛深(18.4℃)を参考として、全域で16.0℃の一定値とした。

## (3) ラグランジェ型粒子モデル

ラグランジェ型粒子モデルを用いて桜島からの火山ガスプルームを追跡する。ここでは、Kimura and Yoshikawa<sup>20)</sup> によるラグランジェ型粒子モデルを CSU-MM と全く同じ時間刻みで同時に行った。粒子の鉛直方向の乱流による移動は、

$$z(t+\Delta t) = z(t) \pm \sqrt{2\Delta t K_m} \quad (7)$$

で表される。ここで、 $K_m$  は CSU-MM で計算された運動量の乱流拡散係数、右辺第2項の符号は各々の粒子について一様乱数によりランダムに与える。Kitada and Tanaka<sup>21)</sup> は乱流拡散のステップ長の計算に拡散係数の勾配を加味した修正を施しているが、ここでは、Kimura and Yoshikawa<sup>20)</sup> の方法に従い、Matsuno スキームを用い、式(7)で記される鉛直方向の計算刻みを  $\Delta t/10$  (この場合9秒) とした。

水平方向の乱流による移動についても、同様に計算し、水平拡散係数は一定値( $2000\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )を用いた。従来の研究<sup>20)</sup>から、水平移流に比べ、乱流による水平拡散は小さいことが言われており、ここでの水平拡散係数  $2000\text{m}^2\text{s}^{-1}$  は、風速  $10\text{ms}^{-1}$  で風下距離100kmの時のパスキル安定度分類中立(C)の拡散幅  $\sigma_y=6\text{km}$  にほぼ相当する。

粒子は、桜島を囲む4グリッドの  $z=1000, 1200, 1500\text{m}$  に相当するレベルから20分間隔で300個を放出した。これは、桜島南岳の標高が1060mであり、火山活動の不規則性のために排出高度が変動することを含めるためである。

## 4. 結果

既往の研究により、桜島からの  $\text{SO}_2$  の長距離輸送は定性的に把握されている<sup>17,19)</sup>。しかし、噴火口が1060mの高度に位置することから、この高度に排出されたガスの地上への到達メカニズム、高気圧の後面に位置することによる沈降性逆転層の効果、プルームの水平・鉛直拡散のスケールには依然として未解明の部分が多い。ここでは、3.に示したモデルの結果を2.の観測結果と比較し、これらについて考察する。

### (1) 気象モデルの気流の検証

ナッジングによる FDDA を用いた CSU-MM は局地循環と混合層の日変化を4日間に渡りよくシミュレートすることが確認されている<sup>18,19)</sup>。今回の計算でも、熊本平野付近で9日以降に風速に過大予測の傾向が見られたが、それ以外の領域では大気境界層中の局地循環による風向・風速の日変化をよく再現していた。結果の一例として、図-6には、福岡と佐世保のアメダス風速・風向と CSU-MM の計算結

果(モデル鉛直第1層  $z=10\text{m}$ )の比較を示す。モデルは、海陸風交替に代表される局地循環をよくシミュレートしている。

## (2) 火山プルームの輸送・拡散過程

図-4に対応する時刻のラグランジェ型粒子モデルの粒子コンターとCSU-MMでシミュレートされた上空1500mの風速ベクトルを図-7に示す。粒子コンターはCSU-MMのグリッドに入った粒子数を高さ方向に加えたものである。

粒子の輸送のパターンは図-4の観測結果によく一致している。9日の早朝にはプルームは桜島から真西に流れていた(図略)が、時間とともに移流方向が変化して、12時頃には五島列島上空に達し、その後は平戸島~長崎県西部上空に継続的に位置した。この輸送パターンは10日も継続していた。長崎県の地上での $\text{SO}_2$ の濃度変化はこのようなプルームの移動により生じたものと考えられる。

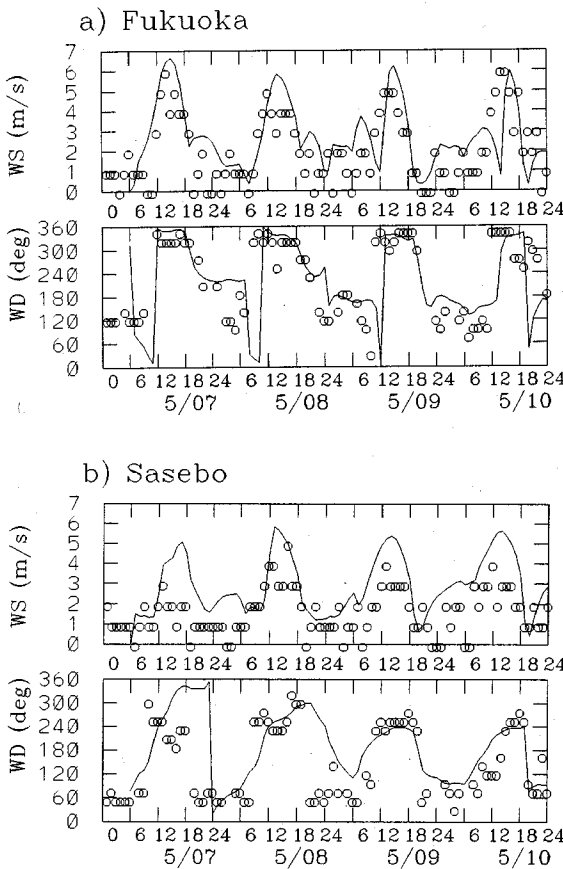


図-6 福岡と佐世保でのアメダス(○印)とメソスケール気象モデル(実線)の風速・風向の時間変化の比較。

図-7の12時と16時の粒子コンターの水平分布の比較から、両日とも12時の方がシャープでプルームが拡散していない。これに対して、16時には広域に拡散する傾向がみられ、濃度レベルも減少している。これは陸上を輸送中の混合層の発達過程の時間差のためと考えられる。

## (3) 火山プルームの鉛直分布と地上への輸送プロセス

図-4(b)のRun 4の山口県見島から福江島にかけての鉛直断面での航空機による $\text{SO}_2$ 濃度分布とラグランジェ型粒子モデルの粒子コンターを図-8に示す。粒子コンターは航空機の飛行時間中の平均値を示している。図中の(a)は乱流拡散によるランダムウォークを含み、(b)はそれを含まない結果であり、ピーク濃度に2.5倍の差がみられる。

図-8(a),(b)のコンターから鉛直乱流拡散の寄与が示される。濃度のピーク位置は両者とも1000m付近である。それより上方への拡散には大きな差が見られないが、ピーク位置より下側には顕著な差が見られる。特に、図中の長崎県北部(田平局)の地上付近の濃度上昇は(b)には見られない。従って、上空を輸送される桜島からの $\text{SO}_2$ プルームの地上への輸送には混合層の発達が支配的な役割を果たすことがわかる。

モデルによる高濃度の広がりには粒子数1のコンターで水平方向に50km程度、鉛直方向には高度500~1700mに分布し約1200mの広がりを持っている。粒子は桜島を含む東西、南北それぞれ2グリッド内から $\Delta x/5$ ,  $\Delta y/5$ の間隔で放出しており、初期に約13kmの広がりを持っている。一方、図-8に示した移流距離200kmでの空間的な広がり50kmであり、これは水平拡散係数を $2000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とおいたことによる水平方向の乱流拡散では説明できず、水平方向の風速変化による輸送の寄与が大きいと考えられる。

図-9には、桜島から対馬にかけてのラグランジェ型粒子モデルの粒子コンターの鉛直断面と図-4(d)のRun 6の航空機による $\text{SO}_2$ 濃度分布を示す。図-8と同様に、(a)は乱流拡散によるランダムウォークを含み、(b)はそれを含まない結果である。混合層の発達により、上空の高濃度プルームのエントレインメントがみられ混合層内の濃度は鉛直勾配が少なく、地上でも高濃度となっている。これに対して、(b)では粒子は地上に達せず、上空を高濃度のままに輸送されている。同様な結果はRun 5についても見られた。

長崎県の地上で1987年4月~1989年7月の883日中に長崎県内で広域 $\text{SO}_2$ 高濃度が観測され

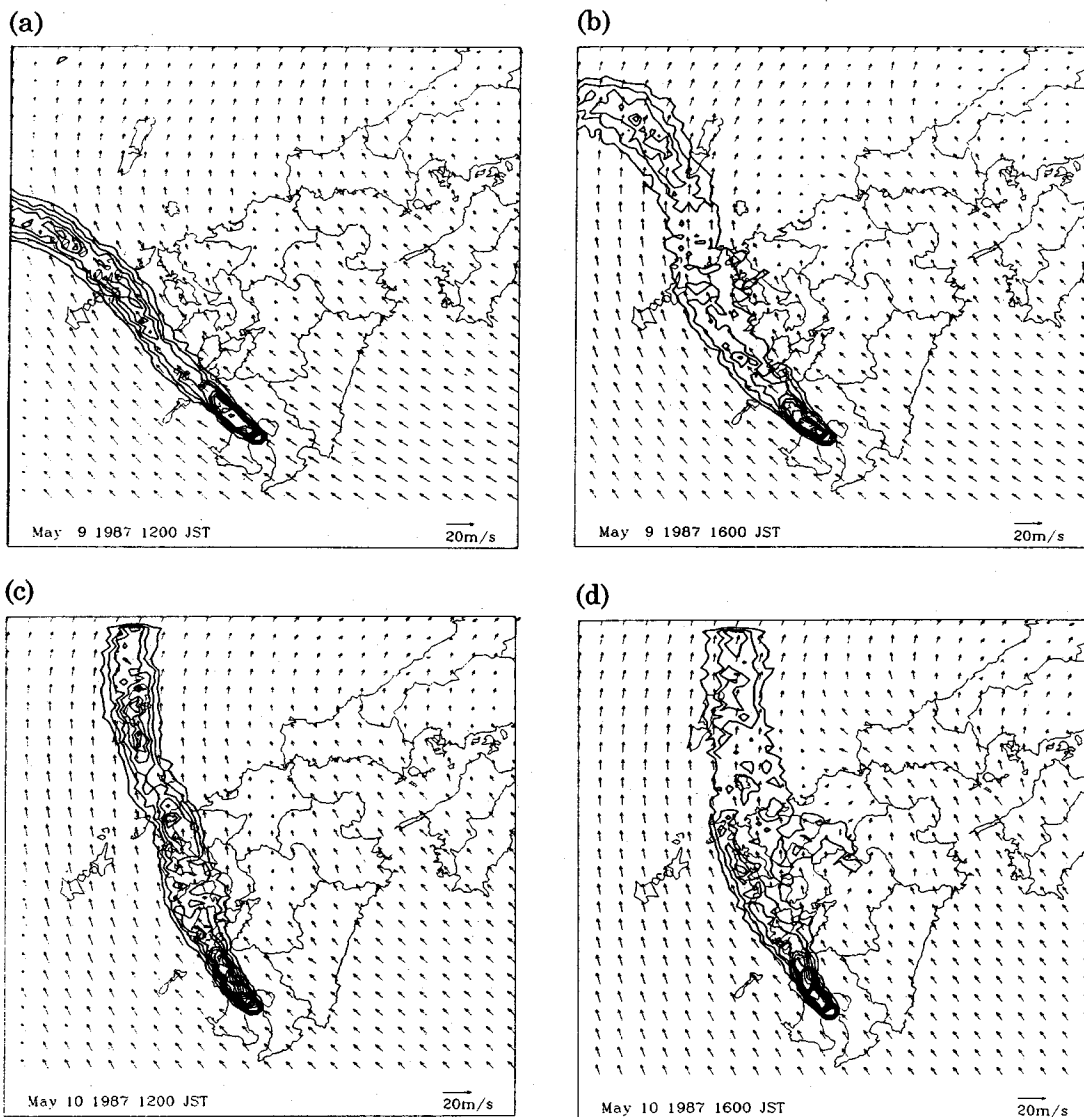


図-7 メソスケール気象モデルの  $z=1500$  m での風速・風向ベクトルとラグランジェ粒子モデルで計算された粒子数濃度の変化(鉛直カラムの濃度)。コンターの間隔は10である。

た19日のケースでは1例を除き、すべてが日中に観測されている<sup>1)</sup>。今回のシミュレーション結果は日中に観測される地上の高濃度SO<sub>2</sub>への混合層発達との重要性を示すものである。

#### (4) 濃度レベルの比較

今回の計算では20分毎に300個の粒子を放出している。桜島のSO<sub>2</sub>排出量を1000 ton/dayと考えると、1個の粒子は平均的に46kgのSO<sub>2</sub>を代表していることになる。放出後の粒子の状態が物理的・

化学的に保存されると考えると、CSU-MMで用いている代表的なグリッド(10km<sup>2</sup> x 100m)に1粒子が存在した場合には、そこでの濃度は1.6ppbに相当する。

桜島からの排出量は1000~2000 ton/dayと言われていることから、今回の計算グリッドサイズの場合には1粒子の存在は1.6~3.2 ppbを意味する。これ故、図-8(a)でのピーク濃度(粒子数コンター15)は24~48ppbに相当する。Run 4では3次元濃度の中心位置が観測では明確には捕らえられ



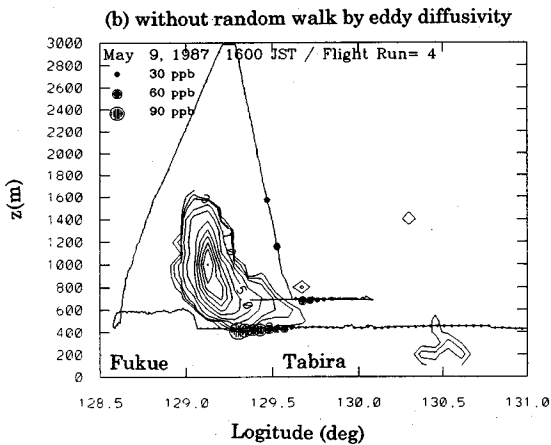
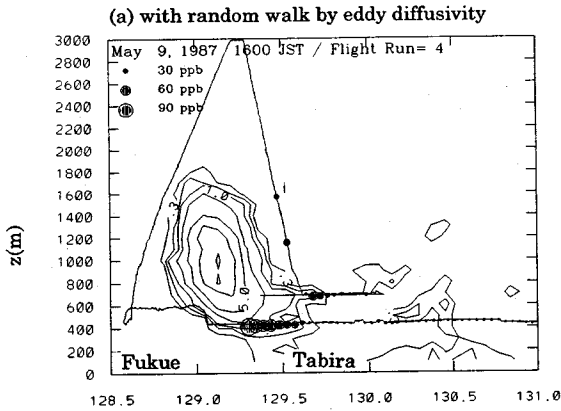


図-8 航空機 Run 4 でのSO<sub>2</sub>の鉛直断面分布（山口県見島と福江島のライン）とそれに対応するラグランジェ粒子モデルで計算された粒子濃度の断面分布。(a)は乱流拡散係数を用いたランダムウォークを含む場合、(b)含まない場合。コンターの間隔は粒子数 0.3, 0.6, 1.0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 である（濃度レベルへの換算は 4(4)を参照）。

ていないため直接的な比較にはならないが、この計算値はこれらの観測濃度（1分平均として約90ppb）とファクター2~4程度の一一致をみている。

一方、10日のRun 6についても同様な濃度レベルの一一致が示されている。即ち、地上では粒子数3~6で、これは濃度として5~20ppbになる。この濃度範囲は図-4(d)に示した濃度レベルとよく対応している。

しかしながら、9日の地上濃度の計算値は、実測値に較べて低濃度となっている。10日はプルームの中心軸が図-7(d)に示されているように概ね陸上を通過し、混合層中に高濃度SO<sub>2</sub>を取り込んでいる

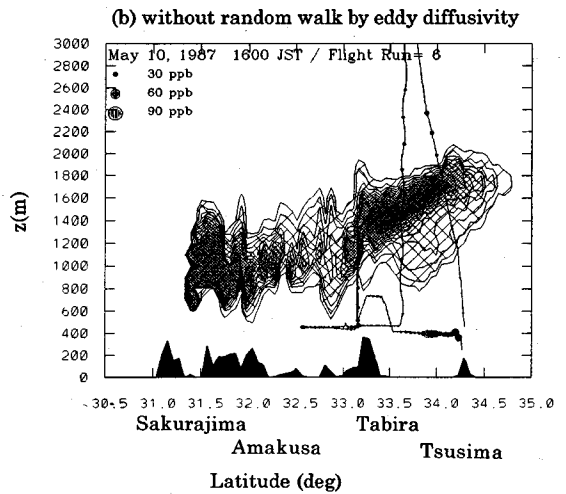
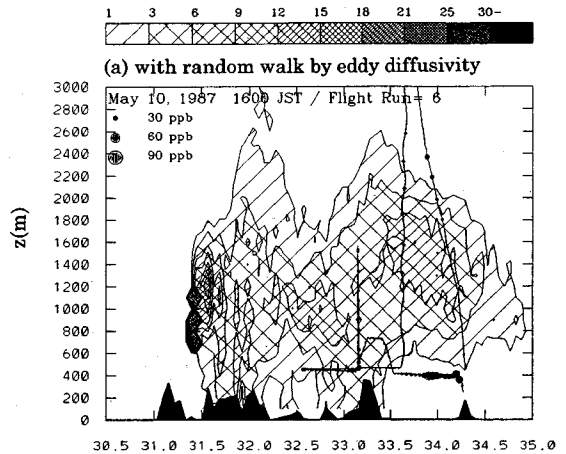


図-9 航空機 Run 6 でのSO<sub>2</sub>の鉛直断面分布（桜島と対馬のライン）とそれに対応するラグランジェ粒子モデルで計算された粒子濃度の断面分布。(a)は乱流拡散係数を用いたランダムウォークを含む場合、(b)含まない場合。コンター（シェーディング）の間隔は粒子数 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 25, 30- である（濃度レベルへの換算は 4(4)を参照）。

のに対して、9日はモデルで求めたプルームの主軸が海上側（モデルグリッドで1~2程度西側）に位置しているためと考えられる。

このようにラグランジェ型粒子モデルの結果は観測結果をよく説明し、空間的な広がり再現しているが、3次元的な位置関係は完全に一致してはいない。これは、火山活動の不規則性とメソスケール気象モデルによりシミュレートされた気流場の実際との差によると考えられる。特に、プルームの位置が陸上か海上を通過するかが非常に重要なポイント

となっている。また、桜島を日中の混合層発達時に出発するか、夜間に出発するかにより輸送中の濃度が大きく異なることが数値シミュレーションにより確認された。

## 5. まとめ

メソスケール気象モデルとラグランジュ型粒子モデルを用いて桜島からの火山プルームの輸送・拡散過程を解析した。気象モデルにはナッジングによる4次元データ同化手法を利用し、1987年5月7日から10日までの気流をシミュレートし、火山プルームの3次元的な輸送・拡散過程を解析した。

その結果、上空を輸送される火山プルームの地上への輸送には、大気境界層の発達によるエントレインメントが重要な役割を果たしていることがわかった。モデルの結果は同期間に行われた航空機観測結果と長崎県下の地上測定局のSO<sub>2</sub>濃度の時間空間変化をよく説明できた。特に、プルームが陸上を通過するか海上を通過するかが非常に重要なポイントである。また、桜島を日中の混合層発達時に出発するか、夜間に出発するかにより輸送中の濃度が大きく異なることが数値シミュレーションにより示された。

従来の研究にも示されているように、九州地域でのSO<sub>2</sub>高濃度は移動性高気圧の通過後に多く観測されている<sup>1)-3)</sup>。今回のラグランジュ型粒子モデルの結果から示されているように、その場合には五島列島から長崎県本土へのプルーム主軸の移動が見られる。今後はSO<sub>2</sub>長距離輸送に及ぼす局地気流の影響、例えば、海風とその反流による循環で上空のSO<sub>2</sub>取り込みの効果や、夜間と日中の混合層形成の差にともなう桜島を出発する際のプルーム濃度初期濃度差の効果を定量的に検討する必要がある。

謝辞：本研究には昭和61年度～平成元年に行われた国立公害研究所（現国立環境研究所）特別研究「雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究」の観測データを用いた。野外観測に参加された国立環境研究所の植田洋匡室長（現九州大学教授）、村野健太郎主任研究官、酒巻史郎主任研究員、水落元之主任研究員、長崎県衛生公害研究所の山下敬則氏（当時）、植野康成氏（当時）、鹿児島県環境センター寶来俊一氏（当時）の協力に感謝します。また、長崎県の一般環境大気汚染測定局の利用に便宜を頂いた各位にお礼いたします。

## 参考文献

1) 山下敬則, 森淳子, 本田雅幸, 鶴野伊津志, 若松伸

- 司：長崎県における高濃度SO<sub>2</sub>汚染の解析，大気汚染学会誌，26巻，320-332，1991。
- 2) 水野建樹：桜島から放出された二酸化硫黄が環境濃度へ及ぼす影響について（事例研究），天気，27巻，479-488.，1980。
- 3) 今井修，鶴田雄二，山野耕一：熊本県下のSO<sub>2</sub>の高濃度出現の原因について，熊本県衛生公害研究所報，15巻，32-34，1985。
- 4) 鎌田政明ほか編：地球流体の化学 - 環境科学の視点から - ，東京大学出版会，1985。
- 5) 若松伸司編：雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究，国立環境研究所特別研究報告SR-7-'91 (1991)。
- 6) Wakamatsu, S., K. Murano, I. Uno and Ueda, H.: Aircraft survey of three dimensional aerosol distribution. *Aerosols: Science Industry, Health and Environment*. (Ed. S. Masuda and K. Takahashi), Vol. 2, 978-981, 1991.
- 7) 水野建樹，田中ちえ，藤村満：関東平野で観測された粒子状硫黄濃度の事例解析，大気環境学会誌，31巻，20-29，1996。
- 8) Wakamatsu, S., I. Uno and Suzuki, M.: A field study of photochemical smog formation under stagnant meteorological condition. *Atmos. Environ.*, Vol. 24, 1037-1050, 1990.
- 9) 気象庁：火山報告，Vol. 27, No. 2, 1988.
- 10) Pielke, R.A.: A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 102, 115-134, 1974.
- 11) Pielke, R.A. and Mahrer, Y.: Verification analysis of the University of Virginia three-dimensional mesoscale models prediction over south Florida for 1 July 1973, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 106, 1568-1589, 1978.
- 12) Mahrer, Y. and Pielke, R.A.: A test of an upstream spline interpretation technique for the advective terms in a numerical mesoscale model, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 106, 818-830, 1978.
- 13) Ulrickson, B.L. and Mass, C.F.: Numerical investigation of mesoscale circulations over the Los Angeles basin Part I A verification study. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 18, 2138-2161, 1990.
- 14) Kessler, R.C. and Douglas, S.G.: A numerical study of mesoscale eddy development over the Santa Barbara channel, *J. Applied Meteorol.*, Vol. 30, 633-651, 1991.
- 15) Therry, G. and Lacarrere, P.: Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 25, 58-88, 1983.
- 16) Uno, I., Cai, X.-M., Steyn, D.G. and Emori, S.: A simple extension of Louis method for rough surface layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, 1996 (in press).
- 17) Louis, J.-F.: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 17, 187-202, 1979.
- 18) 鶴野伊津志：4次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価，大気環境学会誌，30巻，351-366，1995。
- 19) 鶴野伊津志，大原利真，若松伸司，松井一郎：近畿地域の局地循環シミュレーションと評価，天気，43巻，304-317，1996。

- 20) Kimura, F. and Yoshikawa, T.: Numerical simulation of global scale dispersion of radioactive pollutants from the accident at the Chernobyl nuclear power plant, *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 66, 489-495, 1988.
- 21) Kitada, T. and Tanaka, T.: Simulated semi-global transport of SO<sub>2</sub> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> from east Asia to the northern Pacific in spring season: The role of low and high pressure systems, *Air Pollution Modeling and its Application IX* (ed. H. van Dop and G. Kallos), Plenum Press, 445-454, 1992.

(1996. 3. 6 受付)

## ANALYSIS OF THE MT. SAKURAJIMA SO<sub>2</sub> VOLCANIC PLUME TRANSPORT AND DIFFUSION PROCESSES

Itsushi UNO and Shinji WAKAMATSU

Mt. Sakurajima volcanic SO<sub>2</sub> plume transport process over the Kyushu island was simulated by Lagrangian particle model based on the wind and turbulence fields simulated by a mesoscale numerical model using four-dimensional data assimilation. Mesoscale numerical model simulated well the general wind fields during the passage of high pressure system, and the complicated local wind circulation within the planetary boundary layer.

Numerical results of plume transport process were compared with SO<sub>2</sub> surface and 3-D airborne measurements. It was revealed that simulated 3-D plume behavior explained well the observed SO<sub>2</sub> variation, and the day-time development of PBL played an important role for the transport of the volcanic SO<sub>2</sub> aloft to the surface level.