

桜島噴煙流の写真解析

木下紀正・吉田 潔*

(1990年10月15日受理)

Photo Analysis of Volcanic Plumes from Mt. Sakurajima

Kisei KINOSHITA and Kiyoshi YOSHIDA

Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University

Abstract

Shapes of volcanic smokes stationally emitted from Mt. Sakurajima are analyzed by means of the superimpose of wire frame computer graphics with wide angle photographs taken at various locations around the volcano. Stereographic features of the plumes are obtained ranging a few 10 km downstream or more with the plume axis at 1000~2000 m above the sea level.

Initial dispersion resulting from the turbulence at the stage of buoyant rise is important especially for the vertical diffusion, whereas the horizontal diffusion is sensitive to the velocity and shear of the wind around the heights of the plume spread. Typical patterns of the plume diffusion are found to be the following ones: linear advection with small spread under strong wind, wide angle fan type spread under weak wind with large shear, and wide belt type under relatively weak wind with indefinite shear. Some intermediate patterns are also seen among them.

§1. はじめに

桜島南岳は時として爆発噴煙を空高く吹き上げるが、時間的に連続してほぼ同じ強度で噴煙放出を続ける場合、すなわち定常噴煙が多く見られる。この稿では、定常噴煙の拡散を写真観測と立体解析によって検討する。

桜島火山噴煙研究の意義と現状およびビデオカメラ等によってえられた噴煙の基本的特徴については、前に簡単に報告した¹⁾。そこで述べたように、大気の流れによって変化する大きいスケールでの大気拡散についての貴重な情報を噴煙拡散の観測から引き出すことが出来ると期待される。

鹿児島大学教育学部物理学教室

*現在 熊本県合志町立合志中学校

このことは桜島だけにとどまらず、最近問題とされている広域での大気汚染や酸性雨の長距離輸送、原子力災害などの検討の重要な手がかりとなるであろう。

大規模な煙流の研究は、火力発電所の排煙観測やエアートレーサー放出実験によって、レーザーレーダーや飛行機なども用いて行われている。これらの研究の現状は文献²⁾⁻⁴⁾にまとめられているが、大規模観測は短い限られた期間に煙流の一部を調べる事にならざるを得ず、様々な気象条件に対応したものにはなっていない。桜島の場合、煙源強度の時間的変動は制御出来ないが、定常噴煙の上昇高度 500~1000 m の激しい活動もしばしば見られ、海上独立峯としての 1050 m の標高と併せて、1000 m 以上の上層大気中での煙流拡散についての得難い資料を求める事ができる。手軽な写真観測でも、数十km下流までの噴煙流の全貌を捉えられ、大きく離れた数点からの同時観測によって立体構造を求めることが出来る。

この稿では火口から約 10 km 西方からの定点観測と、40 km 下流に到る移動撮影を含む 1989 年 11 月前後のデータについて、パソコンのグラフィックとスーパーインポーズ機能の利用によって解析した概要を報告する。§ 2 では噴煙流の形態について検討し、輪郭を与えるパラメーターを定義する。観測と解析の方法については § 3 で述べる。§ 4 では解析の結果を整理し高層気象データと対比して気象条件と噴煙拡散の特徴との関係を検討する。そのうち、11.21 の観測については人工衛星によるデータとの対比も行う。最後に、§ 5 でまとめの議論を行う。

§ 2. 定常噴煙の形態

噴煙の放出強度が一定で、上空の風向・風速など大気の状態も時間的に変化の無い場合、上昇と移流・拡散を続ける噴煙は同じ形を保っている。煙源の近くで上昇から移流に変わるまでの形は風速と噴煙強度によって異なるが、煙源から数km離れてからは周辺大気とバランスした水平方向の移流と見なすことが出来る。これは、次に述べる煙流拡散公式の対象と考えられる。

大気中で点源から定常的に排出されたガスや微粒子などの大気汚染物質の風下における濃度分布は、風も含め大気状態が一様な場合、良い近似で正規分布となっていることが知られている。この場合、煙流始点を原点とし x 軸を平均風の方向にとり、この煙流軸に垂直な水平方向に y 軸、鉛直方向に z 軸を取ると、風下方向の任意の位置の濃度は次の式で表される⁵⁾。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2.1)$$

Q は煙源からの単位時間当りの流出量、 u は一様な風速であり、放出物質の全量は拡散の過程で保存されるとして規格化されている。水平及び上下方向の拡散幅 σ_y 、 σ_z は、多くの場合に次の式で表現される。

$$\sigma_y(x) = \alpha x^b, \quad \sigma_z(x) = \beta x^a \quad (2.2)$$

ここで、正值の係数 α , p , β , q は、大気状態によって異なる値をとる。正規分布の濃度は標準偏差 σ のかなり外側まで広がり、限界はぼやけているが、中央の濃度の $1/10$ になる所である σ の 2.15 倍が分布の境界の目安とされる。この定義では、境界内に 96.8 % が含まれる事になる。

噴煙流の場合、断面の濃度分布が y , z 方向それぞれについて正規分布で良く表されるかどうかは問題である。煙源近くではある瞬間の煙は凸凹のあるはっきりした境界が認められることが多く、正規分布は適当な時間平均したものが詳細な比較の対象となる。しかし、この稿では濃度分布の詳細には立ち入らず、写真観測で得られる煙流の概形を問題にする。そのため、煙流の輪郭を与える公式を次の様に仮定する。

煙流軸は水平な直線であるとする。この軸上で南岳火口上部を煙流始点と定義し、そこから下流 x では煙流の断面は長円であるとし、次の式で表す。

$$\frac{y^2}{R_y^2} + \frac{z^2}{R_z^2} = 1, \quad (2.3)$$

$$R_y(x) = ax^p + c, \quad R_z(x) = bx^q + c. \quad (2.4)$$

ここで、噴煙流は点源からの拡がりとは見なし難いので、煙流始点において定数項 c で表される初期拡がりを導入した。これは上昇過程における強い乱流拡散によって生ずるので等方的であると考え、定数項の y , z 方向の違いは取り合えず無視する。

上層大気は安定な成層構造をなしている場合が多く、上下方向の拡散は横方向に比べて抑えられやすい。すると、この式では煙流の断面は始めの円形から下流に進むにつれて $R_y > R_z$ となり、横にひしゃげた長円形となって発達する。図 1 に煙流始点を原点とし、水平な煙流軸を基準にした座標系による表現を示す。

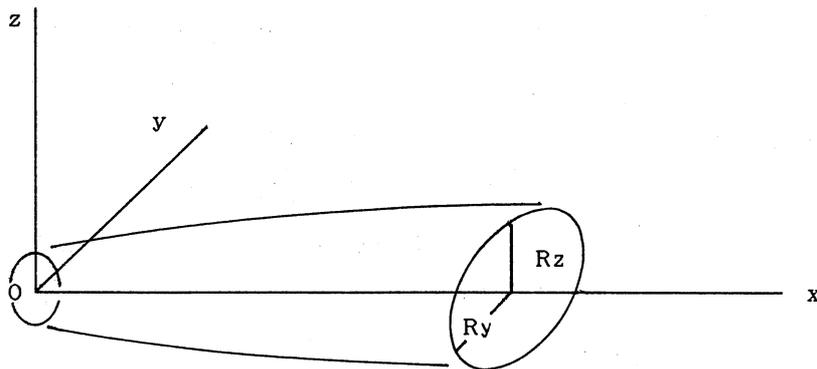


図 1. 水平煙流軸を x 軸とする座標系での煙流の輪郭の表現.
断面を水平半径 R_y , 鉛直半径 R_z の長円で表す。

実際には、噴煙流の次の様な性質はこの式では表せない。

風が強い場合、水平移流に達するまで緩やかな上昇の段階がある。非常に強い場合、山岳波と呼ばれる波打ち現象を示す。また、風が弱い場合、火口上でかなり高く上昇してから少し下降して水平移流軸の高度に落ち着くことがある。これらの場合、水平軸上で定義された煙流始点は火口上の

噴煙の実際の高さとは異なる。

煙流の上下対称性は、大気安定度の高度による変化、激しい噴煙の場合の多量の降灰などでかなり破れている場合がある。また、気象条件によっては煙流の上半部が積雲となって発達する事もある。

海拔 1000~2000 m の風向・風速が高度により大きく変化していると、煙流軸に対する左右対称性が破れ、上下対称性にも影響する。また、風向の短時間での大きな変化は煙流軸の直線性も破る。

噴煙放出強度のゆらぎは、上流での非定常で複雑な形をつくる。これは下流に進むにつれて拡散によって平均化されて薄められる。

このような問題はあがるが、水平な煙流軸直線の周りの式 (2.3-4) による断面の表現は定常噴煙の基本的特徴をとらえることが出来るので、上述の点に留意しながら解析を行うことにする。なお、爆発噴煙や断続噴煙の場合は、定常噴煙よりも高い水平移流高度を取るが、煙流 plume でなく煙塊 puff として時間的发展を扱うべきであり、ここでは議論しない。

§ 3. 観測と解析の方法

3.1 観測方法

桜島を含む広い範囲が展望出来る場所を観測点とする。本観測では鹿児島大学教育学部理科棟屋上 (A 点, 海拔約 30 m, 南岳は方位角 82°, 距離 10.75 km) 及び鴨池港近傍建物 (B 点, 海拔約 26 m, 南岳は方位角 71°, 距離 9.8 km) の定点と共に、日によって異なるが、後に示す鹿児島湾に面した各地で観測を行った。

観測には一眼レフカメラとビデオカメラを用いた。持ち運びの関係や、煙の概形がより鮮明であるということから一眼レフカメラによる写真を解析し、ビデオカメラによるインターバル撮影は噴煙の定常性の検討に用いた。使用したカメラは、MINOLTA X 700 + レンズ Sigma ($f=21\sim 35$ mm) と PENTAX SFX + ズームレンズ ($f=28\sim 80$ mm) がほとんどであり、広い画角を得るために主として最も広角側にして使用した。他に固定焦点カメラ MINOLTA AF-E ($f=35$ mm) も多点撮影の一部に用いた。噴煙がかなり遠距離までたなびいているときには、煙源をファインダーの端に置き、煙流を画面の対角線にしても一枚の画面には全景を収めることが出来ない場合が多い。一画面でカバー出来ない場合は 2 枚あるいは 3 枚で煙流の全景を撮影した。また、半魚眼レンズによる超広角撮影も行ったが、その解析は後日報告する。

いづれのカメラもフィルムの右下に時刻を写し込むことが可能であり、後での整理に便利である。撮影時刻は、气象台のラジオゾンデによる定時観測に対応する 9 時、15 時の前後を主にしたが、噴煙が良く見える早朝や遠方でのチャンスにも撮影した。また、地表観測衛星ランドサット 5 号と MOS-1 号の鹿児島の上空飛来日には、その時刻に合わせた同時観測も行った。

噴煙の立体構造を詳しく知るには、かなり離れた 2 つ以上の点からの同時観測が望ましいが、定常噴煙と見なせるほど時間的变化が僅かな場合、30 分程度の時刻のずれは深刻ではない。この

点はビデオデータを参照して確認する。そこで、離れた2点以上でのデータのある場合を始めて詳しく解析する。また、噴煙流の形態について確かな推測が出来れば、一点だけからのデータでも情報を引き出すことが出来る。その様な事例についてさらに解析を行う。

3.2 噴煙の透視図形

写真による3次元測量の標準的方法は、離れた2点からの同種のカメラによる写真の視差を利用して行うステレオ解析である⁶⁾。しかし、噴煙の場合には空間的スケールが非常に大きいので2点間の基線長を大きくとる必要があり、静止物体ではないので撮影の同時性も要求される。更に、普通の地物と異なり、煙流は漠然とした輪郭で、明確な対象点を定めることが非常に困難であり、標準的なステレオ解析には向かない。そこで、§2で述べた煙流の輪郭を表す3次元図形の透視図を描き、写真と照合することによって、輪郭を表現するパラメータの組を求める。これを離れた2点以上の写真について行うことによってパラメータの値を絞り込むことが可能となる。

噴煙流の透視図は、3次元の座標変換の組み合わせと、フィルム面への2次元射影変換により、パソコンのグラフィック機能を用いて、以下に述べる手順で容易に得ることが出来る。

- A. 図1の様に煙流始点を原点とし、風下方向を x_A 軸とする直交座標系 (A系とよぶ) で式 (2.3-4) を用いて煙流の輪郭を表す。
- B. 同じ原点と鉛直軸で、南方を x_B 軸、東方を y_B 軸とするB系に風向 θ_{WD} を用いて回転変換を行う。風向は風上の方向を示す慣行なので、この変換は、

$$\begin{aligned} x_B &= x_A \cos\theta_{WD} + y_A \sin\theta_{WD} \\ y_B &= -x_A \sin\theta_{WD} + y_A \cos\theta_{WD} \\ z_B &= z_A \end{aligned} \quad (3.1)$$

- C. 観測者のカメラの位置を原点 O_C とし、南方を x_C 軸とする視点座標系 (C系と呼ぶ) にB系を平行移動する。 $O_B=O_A$ と O_C の高度差を L_H 、水平距離 L_D 、視点から見て南岳は東から北に角度 ϕ にあるとすれば、煙流始点 $O_A=O_B$ の座標は、C系では $(-L_D \sin\phi, L_D \cos\phi, L_H)$ となるから、

$$\begin{aligned} x_C &= x_B - L_D \sin\phi \\ y_C &= y_B + L_D \cos\phi \\ z_C &= z_B + L_H \end{aligned} \quad (3.2)$$

この3つの直交座標系の関係と、次に述べるH系への変換を図2に示す。

- D. カメラの向きの方角角と仰角に対応して、鉛直軸 (z_C 軸) の回りの東から北への回転角 θ_H と仰角 θ_V による次の変換を定義する。

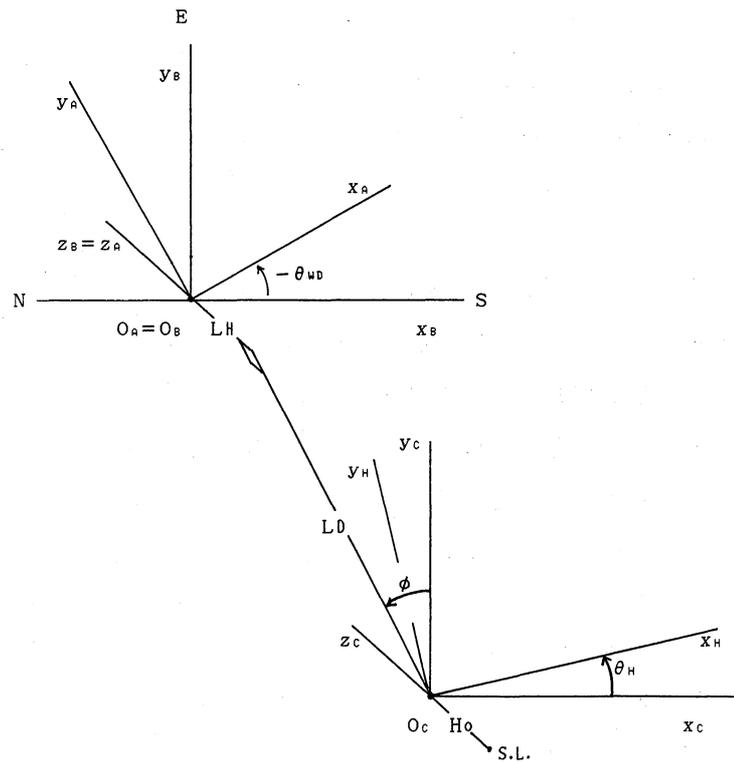


図 2. A, B, C, H 系の関係. 観測者のカメラの位置 O_C は, 海拔 H_0 にあり, 煙流始点 $O_A = O_B$ はそれより L_H 高い. S.L. は Sea Level を示す.

ヘディング変換

$$\begin{aligned} x_H &= x_C \cos \theta_H + y_C \sin \theta_H \\ y_H &= -x_C \sin \theta_H + y_C \cos \theta_H \\ z_H &= z_C \end{aligned} \quad (3.3)$$

ピッチ変換 (x_H 軸の回りの回転)

$$\begin{aligned} x_V &= x_H \\ y_V &= y_H \cos \theta_V + z_H \sin \theta_V \\ z_V &= -y_H \sin \theta_V + z_H \cos \theta_V \end{aligned} \quad (3.4)$$

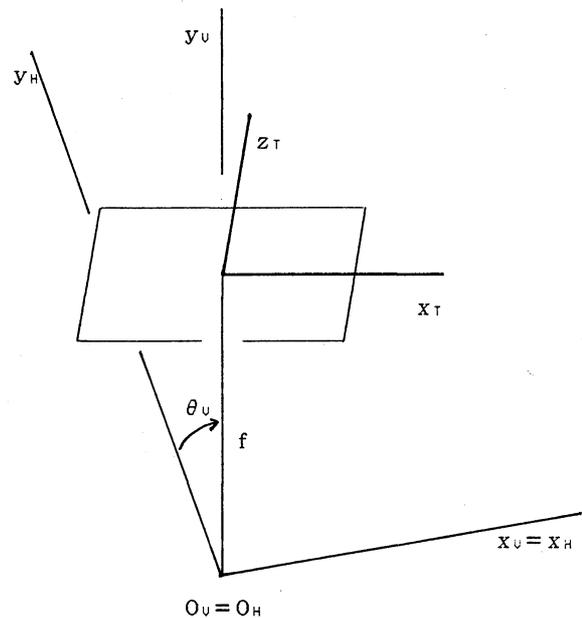
この結果, x_V 軸は水平面と平行であり, 以後の考察を容易にする。

E. 透視変換

フィルム面は y_V 軸に垂直である。そこに結ばれる倒立実像の代わりに, 焦点距離 f のレンズを投影中心に, $y_V = f$ 面への平面投影として正立の透視図を求める。観測者の前方 ($y_V > 0$) の点 (x_V, y_V, z_V) は, この面上の点 (x_T, z_T) に, 図 3 の様に次の関係で射影される。

$$\begin{aligned} x_T &= (x_V / y_V) f \\ z_T &= (z_V / y_V) f \end{aligned} \quad (3.5)$$

図3. カメラの仰角回転に伴うH系からV系への座標変換と、フィルム面に対応するT系への透視変換.



撮影範囲として、 (x_T, z_T) は 35 mm フィルムの画面サイズ 36 mm × 24 mm の枠内になければならない。このフレームは、カメラをレンズの光軸の周りに回転させることに対応して、横長だけでなく縦長や斜めにしても良い。写真プリントでは、引き伸ばし倍率だけでなく、画像の周辺部のカットされている程度も正確に評価しなければならない。また、背景と噴煙との境がはっきり判る様、撮影条件やプリントの調整にも注意する。境がはっきりしない場合は、基本的には写真での視認限界を煙の輪郭と考え、更に写真全体から総合的に判断する。

見やすさと計算スピードのために、煙流の透視図は数kmおきの断面を内接多角形で近似し、それを直線的につないだものにする。撮影条件のうち、カメラの回転角 θ_H と仰角 θ_V は得られた写真上の桜島と水平線との位置から求める。桜島が画面の外にある場合、 θ_H は桜島が画面内にある写真とのつながりから幾何学的に計算するか、開聞岳の位置から求める。これらのために、透視図には噴煙図形とともに桜島南岳・北岳山頂と海岸線の代表点数個をつなぐ線や無限遠の水平線を描くとともに、開聞岳山頂の位置も表せる様にしておく。

透視図を得るためのパラメータは、次の様に整理される。

煙流の輪郭に関するもの： c, a, p, b, q .

煙流軸と観測視点の位置に関するもの： $\theta_{WD}, L_H, L_D, \phi$, 及び視点の海拔 H 。

カメラの状態に関するもの： f, θ_H, θ_V , フレームの傾斜角, 撮影日時。

3.3 写真像と透視図との比較

コンピューターグラフィックによる透視図を、写真プリントやその拡大コピーのサイズに合わせてトレーシングペーパーにハードコピーして、写真データと重ね合わせるのが最も簡単な比較法である。しかし、これでは多くのパラメータの微調整に手間がかかる。そこで、写真像をパソコンに

表示し、モニター上で透視図と重ね合わせる方法を主に用いた。これでは、モニター上の写真像は変えずに透視図のパラメータを変更してグラフィックを描き直すことが出来る。

ここでは、 320×200 ドットでは約 6 万色表示が可能で、画像の大量保存も手軽に出来る機種である PC-88VA3 にビデオボード PC-88VA3-11K を装着して⁷⁾、図 4 の様なシステム構成で作業を行った。つまり、写真フィルムをアダプターに装着して、その画像をビデオカメラからカラーコレクターを通してパソコンにビデオ信号として入力し、これをデジタイズ（赤と青各 32 階調、緑 64 階調）して 128.5KB の数値画像データとして約 9 MB の容量の 2TD フロッピーに保存する。なお、この機種では解像度のより高い 640×200 ドットの 2^{16} 色表示も出来るが、煙流について横方向の分解能はそれほど必要としないので、沢山の画像を扱うために上記の使い方をした。

カラーコレクターはネガフィルムのカラー反転を行い、噴煙の概形、濃淡がよく表現できるよう色を微調整するのに用いる。また、そのワイプ機能を利用して、写真の水平線がモニター上で正確に水平になるようフィルムアダプターの取付角を調整することが出来る。斜めに構えた写真の場合、ビデオカメラのズーム機能を用いてモニターからはみ出ない様にする。

こうしてフロッピーにデジタルデータとして記録された画像を随時呼び出して、透視図との比較検討を行う。個々の画像を表現するパラメータの組は、3.2 の終わりにまとめたものの他に、フィルム画像のビデオカメラによる読み込みのズーム比と、下流をどこまで計算するかを加え、データファイルとして保存する。このデータファイルは、PC-9801 シリーズのパソコンで MS-DOS 上のファイルと同等に処理できる。

PC88VA3 上の画像とグラフィックの重ね合わせはパラメータを絞り込むのに大変便利であるが、一枚ずつの処理となるので、全体を通覧するにはトレーシングペーパーへの透視図のハードコピーが役に立つ。また、重ね合わせ機能のないコンピュータでも、典型的な場合のパラメータの組のデータベースに基づいて、写真とモニター画面の直接比較とハードコピーによって解析を進めることが出来る。

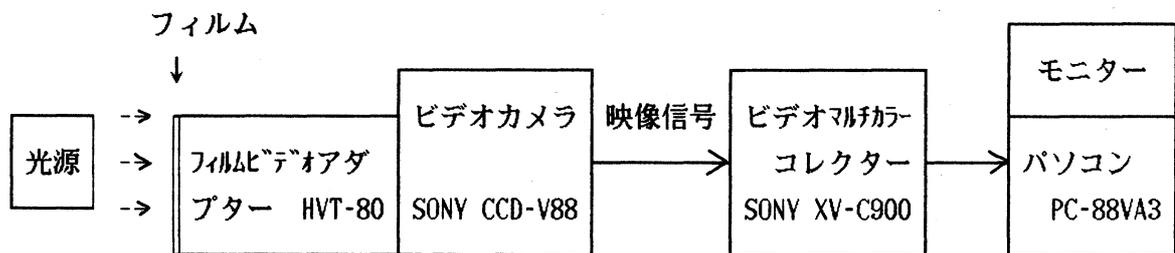


図 4. 写真フィルム像をパソコンにデジタル画像として取り込むための機器構成。

3.4 関連データについて

鹿児島地方気象台高層課では南岳北西約 10 km の吉野台地からラジオゾンデによる観測を 6 時間毎に行っている。このうち、写真解析では定常噴煙の水平移流高度にあたる 1000~2000 m の風

向・風速を特に参照した。気象データの指定気圧面 900, 850, 800 mb の高度は、それぞれ約 1000, 1500, 2000 m であるから、これらの高度での風向・風速を $\omega_i, u_i, i=1, 1.5, 2$ と記すことにする。高度による風向の違いが重要なので、風向偏角の大きさを次の様に記す。

$$\Delta\omega_1 = |\omega_1 - \omega_{1.5}|, \quad \Delta\omega_2 = |\omega_2 - \omega_{1.5}|. \quad (3.6)$$

更に、9 時と 21 時には温度、湿度も観測されており、地表（海拔 283 m）、700 mb（約 3000 m）等の高度のデータも合わせて上空の大気状態の検討に用いることが出来る。700 mb 面の風データは、800 mb 面から離れ過ぎているので、ここでの定常噴煙の検討では考慮しなかった。

人工衛星によるリモートセンシングは、煙流の水平拡散を広域的に観測する強力な方法であるが、観測日時が限られており、曇天では困難である。ここで解析する期間では、'89.11.21 にランドサット 5 号と MOS-1 号による鹿児島上空からの観測がなされている。観測時刻はそれぞれ午前 10 時 12 分、58 分である。桜島噴煙の検出にはあまり細かい空間分解能は必要としないので、ここではランドサットの MSS データと MOS-1 号の MESSR データをリモートセンシング技術センターの提供するフロッピーディスクの形で利用する⁸⁾。

§4. 解析結果

4.1 写真データの概要と見方

ここでは、1989.10.22~12.6 の 46 日間のうちの 30 日の写真 192 枚を解析する。同一地点・時刻からの撮影をまとめて 1 シーンとすると、133 シーンである。本文中の観測シーンの引用では、'89 年の月日と時刻を記す。撮影時刻は日の出前の早朝から夕刻にわたるが、早朝から午前中にかけてが比較的多い。夜間撮影は 4 シーン 4 枚ある。雨天・曇天は除き、全体として様々な噴煙放出強度と風向・風速の場合を含んでいる。一日の時刻との相関はあまり見られない。むしろ、気圧配置の変化と結び付いた上層の風系の時間変化が問題であり、短い時間に大きく変わる場合がある。

撮影地点は定点 A, B が多く、その他は日によって異なるが、野外移動撮影を行った代表的な地点を図 5 に示す。桜島のすぐ南で鹿児島湾を横断する垂水フェリー上での撮影も、航路上の位置を時刻から推定した所、良い結果が得られた。写真上の桜島の大きさと噴煙流の方向から距離と角度の妥当性が判り、煙流の広がり解析する資料とすることが出来る。また、桜島南方約 40 km の山川フェリーからの撮影も解析した。

定常噴煙の上昇形態は、前稿で議論した様に、上層風速 $u_1, u_{1.5}$ に強く依存して、およそ風速 0~4, 5~9, 10 m/s 以上に対応して弱風時の鉛直上昇、並風時の斜め上昇、強風時の微または緩い上昇に分けられる。その到達高度は、風速と火口からの噴出強度による。強度については直接測定はないので、噴煙の火口近傍での様相から推察する外ないが、初期拡散項の大きさはその指標と考えられる。噴出活動が激しい場合は多量の火山灰を含んで黒や茶に色づき、激しい降灰を伴うことが多

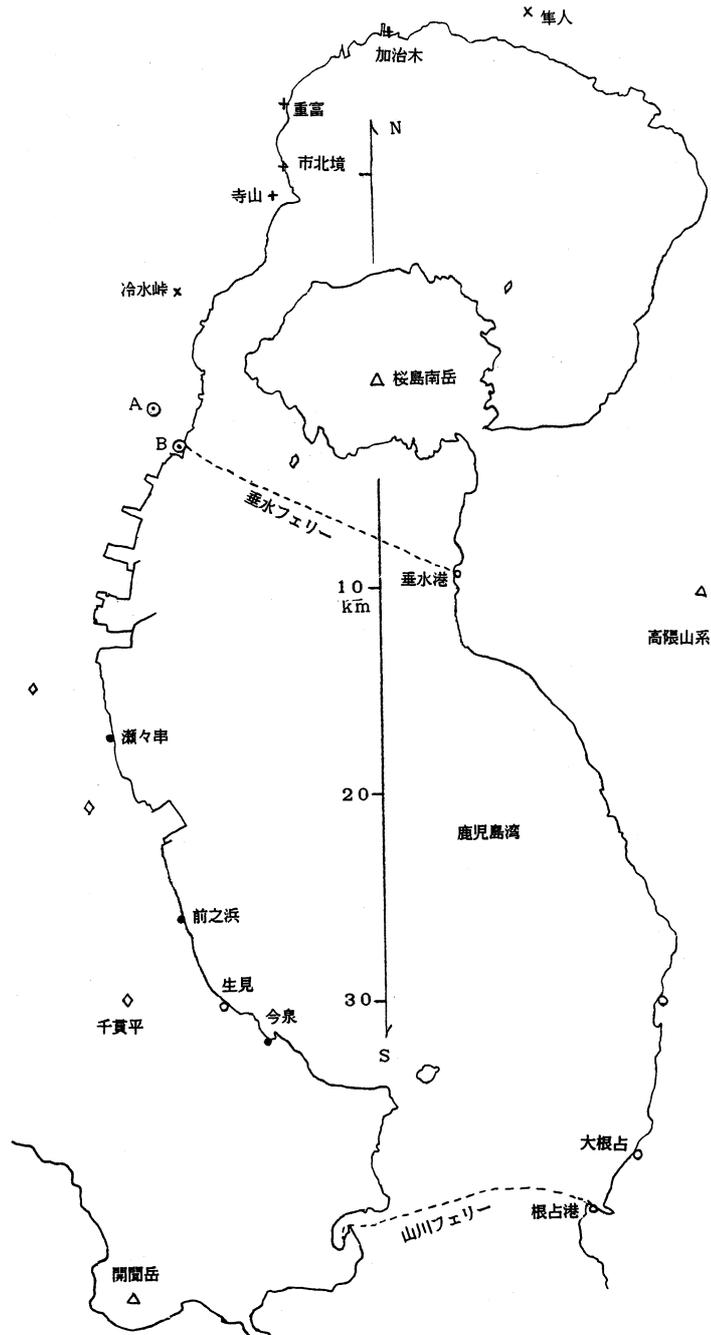


図5. 鹿児島湾岸図と撮影点. 定点A, Bと, 同日の近い時刻の撮影地点の主なものをそれぞれ ● 89.10.22, ○ 89.11.20, + 89.11.21, ◇ 89.11.25 で示す. ×相互は同日ではないが, 定点の何れかとは同時撮影である。

いが, 多量の水蒸気のために白煙となっていることもある。穏やかな噴煙では降灰は視認されず, ほぼ白煙となっているが, 煙流が火口から遠ざかると僅かに茶色味を帯びていることもある。穏やかな噴煙でも, 乾燥大気中を遠くまでたなびくから, 粒径の小さい火山灰などがエアロゾルとしてかなり含まれていると考えられる。

桜島火山灰は黒灰, 赤灰, 白灰に分類され, その鉱物・化学組成が研究されている⁹⁾。火山ガスの化学組成も調べられており, 非常に多量のSO₂を放出していることが確認され¹⁰⁾, 数十km下流でも検出されている¹¹⁾。

噴煙の移流と拡散の様相は、煙流高度での風速と、その上下での風向の高度変化によって大きく異なる。煙流の上下幅 $2R_z$ は様々であるが、初期拡散項 c が大きな割合を占めている場合が多い。煙流の上下での風向偏角の目安として、ここでは 900~850 mb, 850~800 mb 面での風向の違いの大きさ $\Delta\omega_{1,2}$ を参照して議論する。観測資料を噴煙の拡散形態によってここでは簡単に表 1 のように分類する。あまり拡散せずに細くたなびく場合と、大角度の拡散の場合を両極端として、幾つかの典型的な場合と、中間的なものがある。以下、典型的な形態の代表的な事例を中心に検討を進める。対応する上層風のベクトルは、この節の終わりの図 12 にまとめて示す。なお、この稿では (2.4) の a, b, c の単位であるメートルとその冪は省略して記述する。

表 1. 噴煙流の撮影リスト (1989年)

タイプ	撮 影 日 時 分		
細い煙流	10. 29. 6:44, 11. 6. 6:31-9:13,	11. 2. 6:23-47, 11. 20. 7:03-30	11. 5. 9:07-11:23,
強風下の猛煙	11. 1. 16:14, 12. 1. 9:03,	11. 9. 9:04, 12. 2. 15:07,	11. 19. 15:40-17:18, 12. 4. 15:00 11. 30. 14:59
大角度拡散	10. 30. 15:08-17:24, 11. 20. 13:04-15:36,	11. 3. 6:31-14:01, 11. 21. 6:53-11:13	11. 4. 6:37-17:38,
広い帯状拡散	10. 22. 5:19-15:23,	11. 20. 8:45-12:09,	12. 1. 15:02-16:23
中間的なもの	11. 2. 9:17-15:03, 11. 15. 15:05, 11. 20. 8:11-39, 11. 25. 8:53-15:55, 12. 3. 7:11,	11. 7. 15:10-57, 11. 17. 6:58-21:44, 11. 23. 16:31, 11. 26. 9:30&14:50, 12. 5. 7:17,	11. 10. 7:52-10:04, 11. 18. 3:38-9:01, 11. 24. 7:07-9:01, 11. 27. 6:46, 12. 6. 7:23

4.2 細い煙流

火山が穏やかな噴煙活動を続け、水蒸気を主成分とする噴煙を定常的に放出している場合、煙流高度近傍での風向が揃い、風速が小さくなければ、煙流はあまり拡がらずに細くたなびく。典型的な例として 11.2. 6:23 の写真を図 6a に示し、煙流輪郭式 (2.3-4) による表現を図 6b に示す。この前後の上層風は、この節の終わりの図 12a に示す。

観測例での気象条件は、 $u_1, u_{1.5}$ ともに 10 m/s 前後かそれ以上の強風で $\Delta\omega_1$ は小さく、 0° から 20° となっている場合がほとんどである。また、これらの日時には快晴で視界が良く、20~30 km 下流ぐらいまではっきりしており、さらに遠方まで細く伸びているのが判る。これらは、水平拡散幅については $(a, p) = (0.4, 0.8)$ で統一的に再現出来る。初期拡散は $c = 200 \sim 250$ 程度で、

11.5 と 11.20 は $c=300$ である。上下幅の距離変化は僅かなので、パラメータを決定するのは困難であるが、 $(b, q)=(0.05, 0.7\sim 0.8)$ か、これと同程度の広がりを与える数値の組である。これらの場合、20 km 下流で R_y は 1.1 km 増加するが、 R_z の増加は 50~140 m であり、初期幅よりも小さい。鉛直拡散が非常に抑えられているのは、風速は 10 m/s 前後でも上層大気が非常に安定なためである。

u_1 が 5 m/s 以下の 10.29. 6:44 の場合は、約 800 m の鉛直の上昇から折れ曲がって水平移流に変わり、上層の強風によって細い煙流となっている。他の例では図 1 の 11.2 も含めてあまり上昇しているようには見えないが、4~5 km 下流までに 300~600 m 浮上して水平煙流軸に達するような緩い初期上昇があることが、輪郭式による線画と重ね合わせることで判る。

11.20 の朝は噴煙活動がやや活発で、濃い煙流が風向が揃っている間はあまり広がらずに直線的にたなびいている。

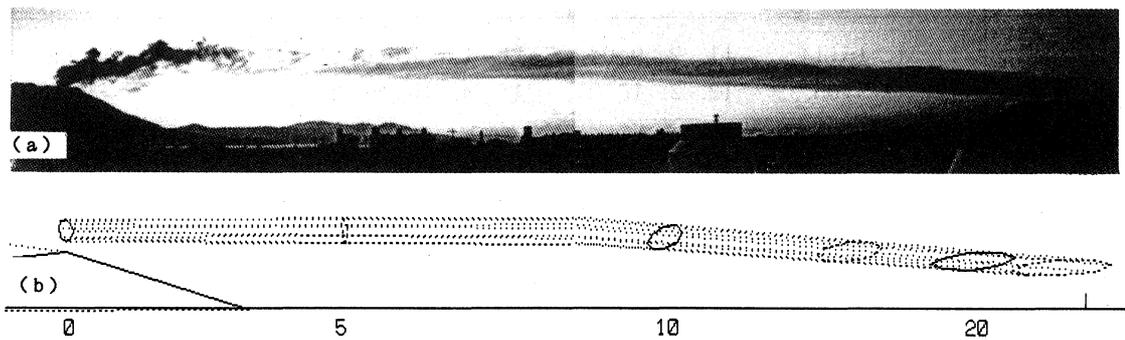


図 6. 細い煙流の例. A 点より 89.11.2. 6:23.

(a) 写真 ($f=21$ mm) 2 枚の張り合わせで、上下はカット.

(b) 対応する煙流輪郭図. 式 (2.3-4) で初期拡散項 $c=200$, 水平拡散係数 $(a, p)=(0.4, 0.8)$, 鉛直拡散係数 $(b, q)=(0.05, 0.7)$ としたもの. 煙流の 5 km おきの断面を内接する 8 角形で表し、それを点線をつなぐ. 下側の直線は水平線.

4.3 強風下の猛煙

噴煙活動が激しくて山頂が強風の場合、図 7 のように定常噴煙の上縁は弧状をなして上昇するか、ほとんど上昇せずに水平移流にうつる。噴煙下部は激しい降灰がカーテン状に見られるが、その裾は下流 5 km ぐらいを過ぎると段々短く、薄くなる。煙流軸は高度 1500~1700 m である。いずれの場合も $u_{1.5} \geq u_1$ で、偏角は小さく、 $\Delta\omega_1 \leq 20^\circ$ である。これらの観測例はどれも NW の風に近く、大隅半島の垂水市方向に流れているが、定点 A, B から煙の下を通して高隈山系の海拔 800~1200 m の稜線が判別できる場合が多い。上記の煙流軸高度の評価は、降灰が収まってのちの下流に対して行ったもので、そこでは $c=350\sim 400$, $(b, q)=(0.1, 0.8)$ とおける。観測角度が限られているため、水平幅については不明である。しかし、強風の際は一般にシアアが小さいた

め、細い煙流の場合と同様にあまり広がらずに一つの方向に直線的に移流していると推測される。但し、煙流下部は地形効果の及ぶような強風のもとでは、細い煙流とは異なった乱流拡散による広がりが加わると考えられる。

図7の様に桜島の山裾に達する煙の幕は、激しい降灰とともに、風下の山の斜面に沿って風が吹き降ろしていることによる。このことはビデオカメラによるインターバル撮影を参照すると判る。吹き降ろしが噴煙全体に及ぶと、山岳波現象が見られる訳である。

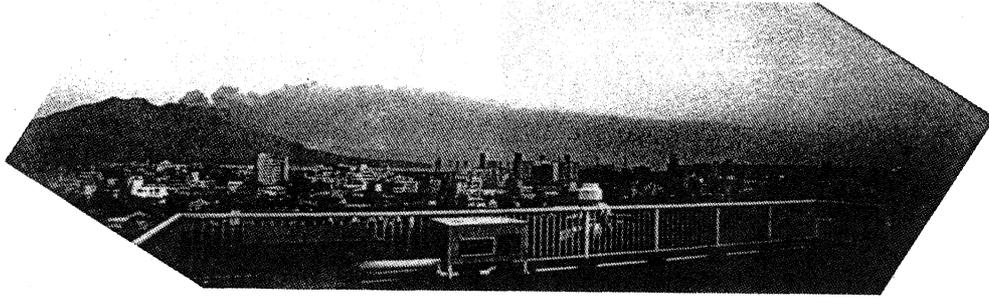


図7. 強風下の猛煙の例. 89.11.19. 17:18, A点より $f=21$ mmで撮影.

4.4 弱風時の大角度拡散

u_1 , $u_{1.5}$ が 5 m/s 以下の弱風で、煙流高度の近傍で風向偏角が大きければ、ほとんど鉛直に上昇した噴煙は水平に広げた扇子のように大きな角度で拡散する。観測例では、 $p=0.9\sim 1.0$ である。 $p=1$ とすると $a\geq 0.2$ となっており、 10 km下流では R_y は 2 km以上になっている。特に、微風状態の 11.3 では時刻によって $a=0.6\sim 5.0$ が得られたが、 $6:31$ には無風状態で蓮葉状に広がって滞留し、輪郭式では表現出来ない形であった。

扇状の拡散では、中央よりも両側あるいは片側の境界付近の方向に沿って最も濃厚な部分がある場合がよく見られる。これは、 $p\sim 1$ とともに、風向偏角による大角度拡散の結果として理解される。高度による移流方向の違いが、風上または煙流の下から直接観察される場合もある。

特に、図8に示す人工衛星データの得られた 11.21 の場合は、煙流直下で火口から $10\sim 15$ km の3点(図5の重富、市北境、寺山)で角度と高度の関係が良く観察されている。図9に、重富からの広角写真に対応する煙流輪郭図を示す。9時の上層風は図12cに示す。この日は薄い白煙で、ランドサット MSS データ、MOS-1 号 MESSR データともに海上の扇形の広がりには2つの可視バンド(波長約 $0.5\sim 0.6$, $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$) と可視に近い近赤外バンド(波長約 $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$) で容易に検出できるが、更に北西の陸上ではほとんど判らない。他方、A点および加治木からの地上観測では、煙の薄い部分は遠くて見えないが、煙の濃厚な西側の部分が内陸部まで伸びているのが、 30 km以上も下流まで判る。このことを手がかりに上記の衛星データを解析すると、これに対応するパターンが、図8bに示す様に中間的な輝度の領域として認められる。

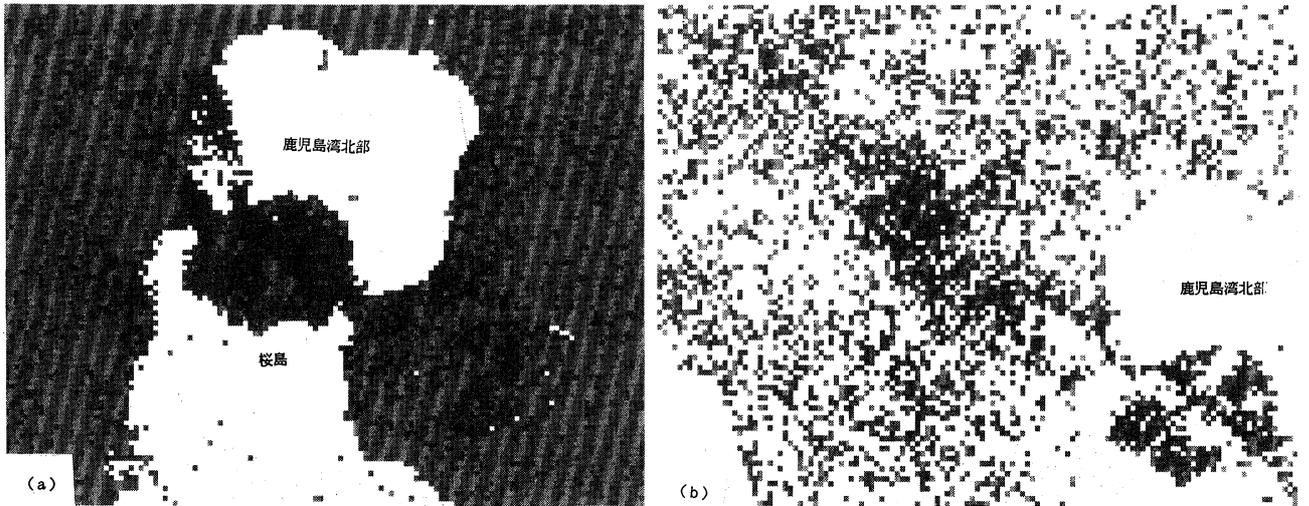


図 8. 89.11.21 のランドサット MSS 画像. 間引率 6 のデータのシーンの一部を反射輝度の数値で区分したもの.

- (a) バンド 6 で, 4 以下の低輝度を白抜き, 5~20 の中間輝度を黒, 21 以上の高輝度を黒灰色.
 (b) バンド 5 で, 11 以下の低輝度と 17 以上の高輝度を白抜き, 12~16 の中間輝度を黒と黒灰色.

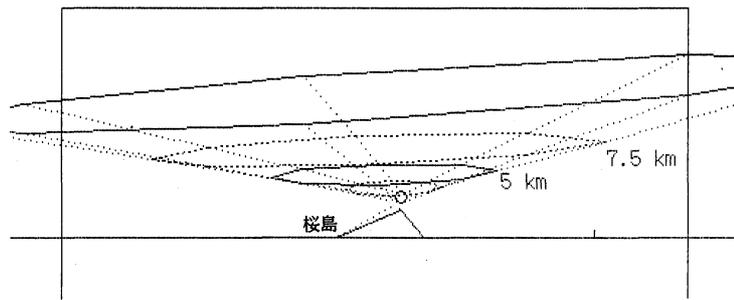


図 9. 大角度拡散の例. 89.11.21. 10:53, 重富より, $f=21$ mm の写真に対応. 煙流断面は 2.5 km おき. 拡散パラメータは $c=200$, $(a, p)=(1.0, 0.9)$, $(b, q)=(0.1, 0.7)$.

4.5 弱風時の広い帯状拡散

噴煙が鉛直上昇するような弱風時で, 煙流高度に安定した顕著な風のシヤーがない場合, 煙流は支配的な風向に沿って流れるが, 弱いシヤーや不安定な風のゆらぎは弱風に対して無視出来ないから, 上流部から大きな横幅をもって拡散する。下流で幅があまり広がらないこともあるから, $p < 0.5$ のケースもある。

10.22 の場合, 南岳南方約 32 km の今泉まで, 帯状の厚い煙流が下から見上げるように観察された。その途中の瀬々串からの 6:55 の写真を図 10a に示す。これに対応する煙流輪郭図を図 10b に示す。この撮影時刻の約 20 分後に, 南に流れている煙流に対してその上半部を横に掃く様に東風が吹き, 横幅は一層広がった。約 1 時間後には 30 km 下流で R_y は 10 km あまりに達していた。この間の水平拡散指数は $p=0.3\sim 0.5$ となっている。しかし, この傾向は持続せず, 2 時間後には収まった。この日はかなり弱風だが, 図 12d に示す様に定時観測のシヤー $\Delta\omega_2$ は小さい。煙流を横に幅広くしたシヤーは, 定時データには捉えられていない。

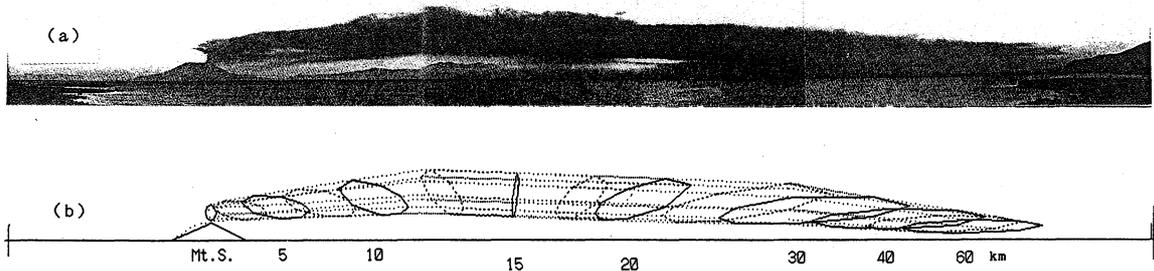


図10. 広い帯状の拡散の例. 89.10.22. 6:55, 瀬々串より.

(a) $f=28$ mmの写真を3枚つないだもの. 上下はカット.

(b) 対応する輪郭図. 20 kmまでは2.5 kmおき, それより下流は5 kmおきの断面を60 kmまで. 拡散パラメータは $c=500$, $(a, p)=(40, 0.5)$, $(b, q)=(0.2, 0.7)$.

11.20の場合, 早朝は強い北風で濃い煙流が直線的に流れていたのが, 8:30頃から風が弱まるとともに風のシヤーが効きはじめ, 帯状の拡がりへ移行した. この日は大気の高透明度が高く, 大隅半島南部の根占港から約40 km北にあたる桜島が噴煙を上げているのが明瞭に視認された. その地点からの写真に対応する煙流の輪郭図を図11に示す. パラメータの値は, 煙流直下を含むこの前後の地点での移動撮影とB点からの観測をあわせて求めたものである. なお, この日は移動性高気圧の接近に伴い12時頃から東方への大角度拡散に移行した. この日の強風から弱風への変化は, 図12eに示されている. その翌日が図8, 9に関して議論した図12cの場合である.

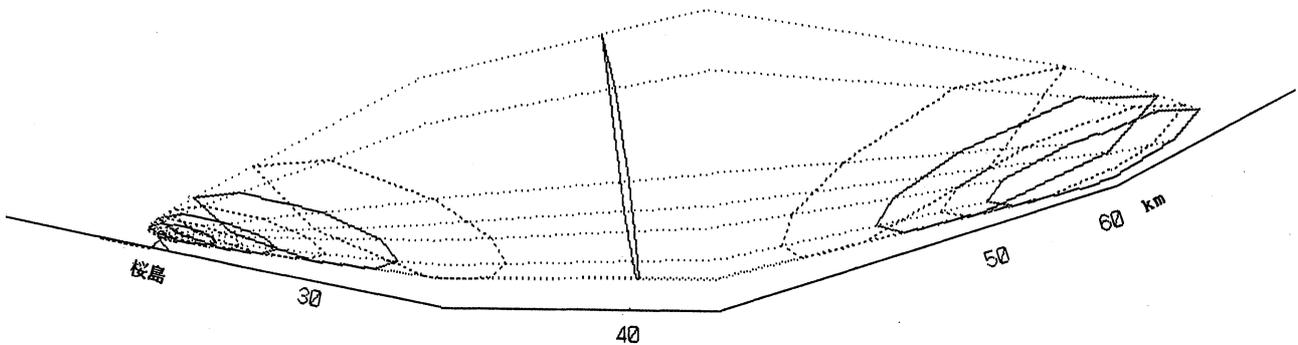


図11. 根占港より見た89.11.20. 10:44の煙流輪郭図. $f=21$ mmの写真3枚あまりをつないだものに対応する. 数字は断面の煙流始点からの距離で, 断面は5 kmおき. 水平線が折れ曲がるのは, 広角レンズで大きな仰角で撮影した写真のつなぎ目に対応するため, 拡散パラメータは $c=400$, $(a, p)=(25, 0.5)$, $(b, q)=(0.2, 0.7)$.

4.6 並風での普通拡散

山頂付近の風速 u_1 があまり強くなければ, 噴煙は斜めに直線的に上昇して山頂から数kmも離れないうちに最高点に達し, 水平煙流軸の高度に落ち着く. 噴煙活動が激しくて多量の火山灰を含む場合は, 降灰は山頂の近くに集中し, 強風時のような厚い煙幕が下流まで尾をひくことはない. しかし, 細かい灰粒子が煙流からゆっくり離脱するために, 煙流の下が薄くけむる現象が多くの場合

に見られる。このような効果と煙流の始めの厚みは噴煙活動の強度によって様々である。初期拡散項は、 $c=200\sim 500$ 程度の値をとっている。

煙流高度は大体 $1400\sim 2000$ m であり、そこでの $5\sim 9$ m/s ぐらいの風速で流されながら拡散していく。一般に上下方向にはあまり広がらないが、水平方向の広がり方は様々で、風のシヤーに強く依存している。 $1000\sim 2000$ m のシヤーは強風時には小さく、弱風時には大きい傾向があるのに対し、並風の時には様々な場合がある。

シヤーの効果があると、弱風時の大角度や広幅の拡散に準ずる中小角度の扇形の場合や、やや狭い帯状の場合がある。前者の例は 11.2. 9:17~15:03 で、早朝には図 6 に示す細い煙流であったものが変化した。これは 9 時過ぎの弱風化とシヤーの増大の結果である。後者の例としては、§ 4.5 に述べた 11.20 の場合、始めの太い直線的な形からだんだん帯状となる過程として、8:30 頃の状態に見られる。また、11.10 の 7:52~10:04 の場合、煙流下部に対する横風によってやや狭い帯状となった。

上空の風がやや強いのか、弱くてもシヤーが小さければ、§ 4.2, § 4.3 に近い場合は、やや太い煙流があまり広がらずに流れて行く。多くの場合が拡散パラメータ $(a, p)=(1\sim 1.3, 0.8)$, $(b, q)=(0.1\sim 0.2, 0.8)$ で大体描写できる。

4.7 上層風データ

今までの議論で、観測例として図 6~11 に取り上げた時刻を挟む定時観測の高層気象資料データのうち¹²⁾、900, 850, 800 mb 面の風ベクトルを図 12 に示す。煙源を原点にして煙流を考えるために、風下に向かうベクトルとして表示する。サークルは風速 5 m/s に対応し、弱風の指標である。南北方向の軸の先端は 10 m/s で、強風の目安となる。

図 6, 7 に対応する (a) の 9 時までと (b) は強風でシヤーは小さい。(c) は弱風でシヤーが大きく、図 8, 9 で議論した大角度拡散の場合である。この日の 15 時は定期欠測である。図 10, 11 の広い帯状拡散に対応する (d) と (e) はやや弱風である。

なお、高層気象資料によって 9 時及び 21 時の温位の鉛直分布を求めたが、噴煙の鉛直拡散との顕著な相関は見られなかった。上層大気は一般に安定であり、安定度の微妙な違いの影響を R_2 の x 依存性に見出すことは、初期拡散項が大きい事もあって困難である。

4.8 拡散パラメータのまとめ

個々のシーンに対する写真解析の結果得られたパラメータを整理して、タイプ別に分類してまとめ直した結果を表 2 に示す。個々のシーンに対するパラメータの決定精度は様々であるので、適切な複数の地点からの同時撮影の結果を重視して総合的に評価したものである。ここで検討した観測例は、微風時の滞留型を除き、適切なパラメータのセットが表の数値の範囲にある。多くの観測例は、下流 20 km 以上まで煙流の輪郭が視認出来たが、強風下の猛煙だけは水平拡散が不明である。

しかし、強風でシヤーは小さいので、一応の推測値を？として今後の解析のために表示した。具体例として述べたものなど幾つかの観測例では、下流 20~40 kmの近傍で移動撮影で得た 20~60 kmの煙流輪郭の解析に基づいている。

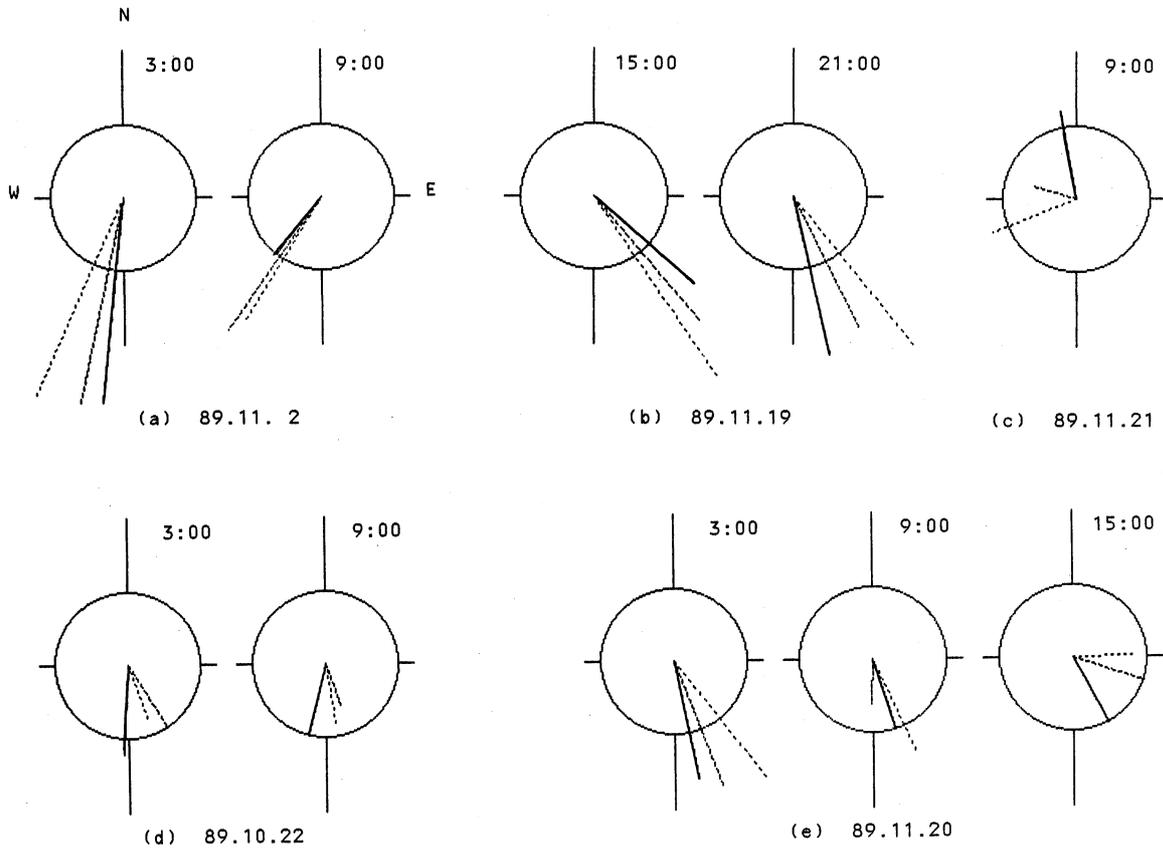


図12. 典型的な観測例に対する定時観測¹²⁾の上層風ベクトル. 北を上方, 東を右方とし, 風下の向きを示す. 高度およそ 1, 1.5, 2 kmに当たる 900, 850, 800 mb 面の風をそれぞれ実線, 破線, 点線で示す. サークルは風速 5 m/s を表す.

表 2. 煙流輪郭のパラメータ (a, b, c の単位は m の冪)

タイプ	c	(a, p)	(b, q)
細い煙流	200~300	(0.4, 0.8)	(0.05, 0.7~0.8) (0.8, 0.5)
強風下の猛煙	350~400	(0.4~1.0, 0.8) ?	(0.1~0.2, 0.8)
大角度の扇型	100~300	(0.5, 0.9)~(5, 1)	(0.1, 0.7~0.8)
広い帯状拡散	300~400	(100, 0.3)~(9, 0.7)	(0.1, 0.8)
中間的なもの	200~500	(1~1.5, 0.8)	(0.1~0.2, 0.8)

§5. まとめと考察

広角写真撮影とコンピュータグラフィックによる解析は、煙流の立体的な広がりを求めるのに有効である。適切な複数地点からの同時撮影が望ましいが、迅速な移動撮影も役に立つ。煙流軸はほとんど水平で直線的であるから、煙流の方向と形態によっては 1 点からのデータでもある程度の情報を引き出すことが出来る。

煙流輪郭式 (2.3~4) は、§2 の終わりに述べた適用限界に留意が必要であるが、定常的な噴煙流の立体構造を表す第一近似として有効である。但し微風時の滞留状態については別の表現が必要である。初期拡散項を水平、鉛直方向共通にとる近似は妥当であった。

解析に基づき、噴煙拡散の特徴は次のように考えることが出来る。噴煙流は煙源から離れるにつれて水平拡散が卓越し、鉛直拡散は上層大気の安定性のためにあまり増大しない。水平拡散は風のシヤーに主に規定される。強風時にはシヤーが小さく、あまり拡散せずに一つの方向に直線的に移流する。弱風時には、煙流の鉛直分布の中央部の高度で大きなシヤーがあって持続すれば、大角度の扇形拡散となり、その両端の方向が高濃度となることが多い。シヤーが鉛直分布の周辺部の場合、その高度の僅かの変動に影響されて持続性は小さく、中央部の支配的な風向に沿った広い帯状となる。これら 3 つのタイプの間、種々の中間的な形態がある。

この様な噴煙流の特徴は、北西の強風時を除いてはほとんど地形効果を受けないで、高度 1000~2000 m の上層風に支配されることによる。これは、高度 300 m 以下の煙源からの拡散の性質とはかなり異なっている。平坦な地表近傍では正規分布による拡散式 (2.1~2) に地面での反射効果を加味したものが標準的な公式として用いられ、パラメータは大気安定度との関連でよく議論される。地表高度 108 m から下流 10 km までの拡散実験に基づく BNL パラメータでは、 R_y/R_z 比が Pasquill 安定度によって 1 から 5 であるが⁵⁾、噴煙流の場合は 10 km 下流で初期拡散を除いた増加分の比 $\Delta R_y/\Delta R_z$ は細い煙流では 10 程度で、強風でないときはもっと大きい。最近の高煙源データを含む 20 km 下流までの分析では、1 時間平均としての水平拡散幅はほぼ x に比例して増大する結果が得られ³⁾、この性質は、風向の時間的変動に結び付けて理解されている¹³⁾。噴煙流の写真の場合は瞬時値であるが、より下流まで扱うので時間的変動の影響も受けている。他の実験との大きな違いは、かなり大きな初期拡散幅のため、シヤーの効果を受けやすい事である。初期幅は鉛直拡散の詳細を調べるには障害となるが、水平拡散に対しては拡散の高度依存性のシミュレーションと見なすことが出来る。高煙源データでは煙流高度が上がるとともに大気安定度よりも風速が重要になることや³⁾、陸上に比べて地表乱流効果を受けにくい海上拡散は小さいことなど⁴⁾、最近の大規模な大気拡散実験で得られた知見は、噴煙流にも該当する側面である。さらに詳細な比較検討が必要である。他方、人工煙源による実験では気象条件が限られやすく、拡散幅の小さい事象にバイアスがかかるのに対し、桜島噴煙は様々な上層風環境のもとでの多様な拡散形態を示している。

噴煙について前稿で挙げた様々な研究課題があるが、定常噴煙に限っても良質のデータをさらに蓄積し、解析を進めることが必要である。特に、遠距離の下流への移動撮影が役立つ。超広角の撮影と解析も残されている。この項ではビデオデータは副次的に利用したが、拡散の動的機構の解析や時間変化の立ち入った検討は重要である。人工衛星によるリモートセンシングデータと地上観測との対比については、別稿で報告する¹⁴⁾。ここでは煙流の濃度分布には立ち入らなかったが、観測法と解析法の両面について検討を進める必要がある。定常噴煙の基本的特徴はある程度把握されたと考えられるが、本格的解明はこれからである。

謝 辞

大河内康正氏（八代高専）、三仲啓氏（鹿大教育学部）、細山田三郎氏（同）の有益な議論と物理系列学生諸氏の協力に感謝します。著者の一人（木下）は、岡本眞一氏（東京情報大）、水野建樹氏（公害資源研）、児玉龍男氏（九州産業衛生センター）や多くの方々の貴重な助言と資料の提供に感謝します。

参考文献

- 1) 木下紀正, 桜島火山噴煙と大気拡散一序論的考察一, 鹿大教育学部研究紀要自然科学編, **41**, 1, 1989.
- 2) 岡本眞一, 片谷教孝, 大気汚染の長距離輸送モデル, 天気, **35**, 461, 1988.
- 3) 岡本眞一, 孤立発生源を対象とした拡散モデルの開発と性能評価, 大気汚染学会誌, **24**, 163, 1989 : 大気汚染濃度予測のための調査研究報告書一拡散パラメータの推定方法について一, 1983, 早大理工学研/産業公害防止協会.
- 4) 岡本眞一, 塩沢清茂, 海上および沿岸地域での拡散モデル, 天気, **36**, 711, 1989.
- 5) 伊藤昭三, 環境工学一大気編入門一, 1984, 朝倉書店.
- 6) 日本写真測量学会編, 写真による三次元測定一応用写真測量一, 1983, 共立出版.
- 7) 日本電気, パーソナルコンピュータ PC-88VA/VA3 リファレンスマニュアル, 1988 : PC-88VA-11K ユーザーズマニュアル, 1988.
- 8) 日本リモートセンシング学会出版委員会編, パソコンによるリモートセンシングデータ解析, 1989, 啓学出版.
- 9) 大庭昇 他, 桜島火山の黒灰・赤灰・白灰の性状と成因, 鹿大理学部紀要(地学・生物学), **13**, 11, 1980. 大庭昇 他, 1977~1979年噴出桜島火山灰の物理化学的性質, 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, p.75, 1980.
- 10) 鎌田政明, 桜島火山活動の特異性一化学的立場からみた一, 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, p.29, 1980. 太田一也 他, 二酸化硫黄放出量観測による火山活動度の評価, 鹿児島国際火山会議, 1988, p.406. 柳川民夫他, 桜島火山周辺地域における二酸化硫黄の高濃度出現状況とその特徴, 県環境センター所報, **3**, 27, 1987. 柳川民夫, 南園博幸, 火山ガスの環境大気への影響とその特徴について, 鹿児島国際火山会議, 1988, p.714.
- 11) 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**, 479, 1980. 竹山栄作他, 桜島火山噴出物の動態に関する研究 I 一大隅地域における二酸化硫黄の挙動一, 県環境センター所報, **5**, 61, 1989.
- 12) 高層気象資料, 鹿児島地方气象台, 1989.
- 13) 山本晋, 横山長之, 煙流拡散幅の推定法, 大気汚染研究, **9**, 287, 1974.
- 14) 木下紀正, 桜島火山噴煙の衛星画像と地上観測との対比, 第10回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, 1990, p.15.