

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。

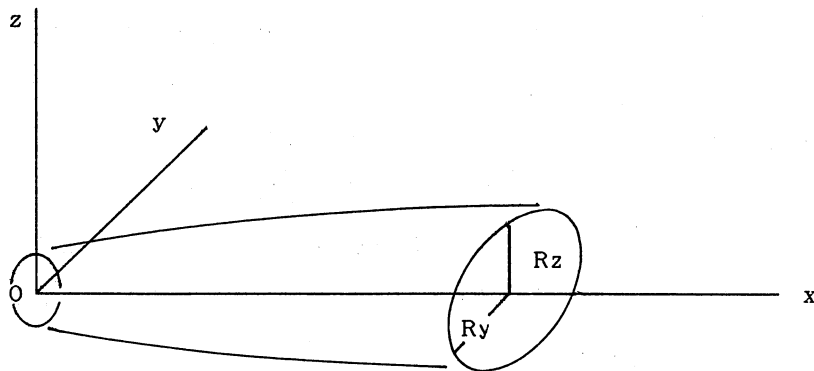


図 1. 水平煙流軸を x 軸とする座標系での煙流の輪郭の表現.
断面を水平半径 R_y , 鉛直半径 R_z の長円で表す。

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、気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。

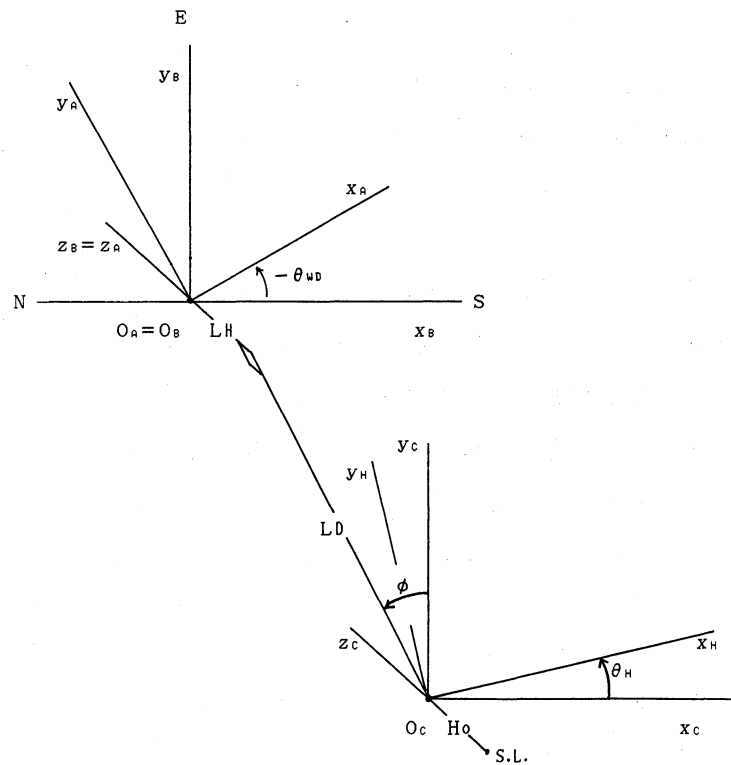


図 2. A, B, C, H 系の関係. 観測者のカメラの位置 O_C は, 海拔 H_0 にあり, 煙流始点 $O_A = O_B$ はそれより L_H 高い. S.L. は Sea Level を示す.

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)

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

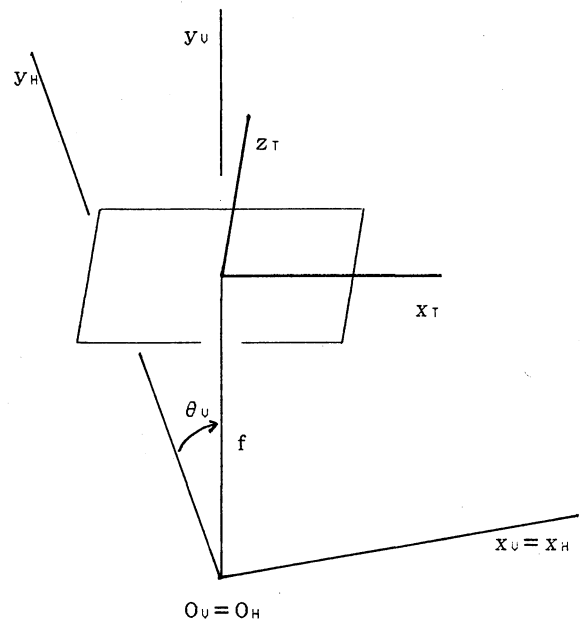
この結果, x_V 軸は水平面と平行であり, 以後の考察を容易にする。

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。

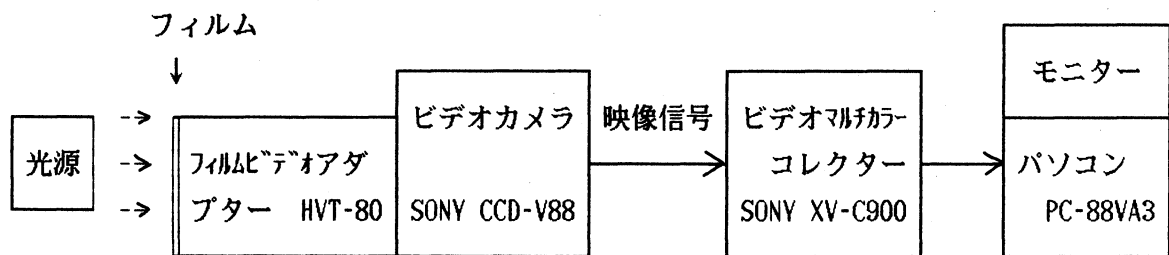


図 4. 写真フィルム像をパソコンにデジタル画像として取り込むための機器構成。

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

