

桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

木下 紀正・細山田三郎*

(1991年10月15日 受理)

Satellite Images and Ground Observation of the Dispersion of Volcanic Smokes from Mt. Sakurajima

Kisei KINOSHITA and Saburō HOSoyAMADA*

Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University

*Terayama Station for Education and Research on Nature, Faculty of Education, Kagoshima University

Abstract

Remote sensing data from the satellites LANDSAT-5, MOS-1, 1b and SPOT-1, 2 concerning the atmospheric diffusion of volcanic smokes from Mt. Sakurajima are studied in connection with the coincident observation from the ground by means of photo- and video-cameras and meteorological data on upper atmosphere. Various patterns of the horizontal dispersion of the volcanic ash clouds are understood in connection with the wind pattern in the altitudes 900-800 mb in accordance with the ground observation.

§1. は じ め に

1991年6月のピナツボ火山（フィリピン）大噴火は広大な地域を噴出物で埋め尽くすと共に、成層圏に達する噴煙が静止気象衛星からも観測され、気候に与える影響が憂慮されている。

他方、1991年5月以来の雲仙普賢岳の噴火や火砕流は多大の被害をもたらして、なお継続している。地球上の各地で時として起こる大噴火や国内の激しい火山活動が多くの場合やがて終息するのに対し、1972年以来の継続的で活発な桜島南岳の噴火活動は、世界的にもあまり例をみないものである。また、火山噴煙が航空機に与える障害と対策について、国際的にも問題となっている。¹⁾ 桜島からの日常的な噴煙はこの様な実際的な問題や他の火山噴煙を解明するためにも重要な

鹿児島大学教育学部物理学教室

*鹿児島大学教育学部寺山自然教育研究施設

研究の対象であるとともに、その移流と拡散の様相は、大規模な大気拡散現象として上層大気状態を把握する貴重なプローベであり、広域の大気汚染や酸性雨など地球環境問題を検討する手がかりとも考えられる。湾岸戦争によるクウェート油田火災の黒煙も、関連する気がかりな現象である。²⁾

ここでは、桜島火山噴煙の移流と拡散について、人工衛星によるリモートセンシングデータとカメラ、ビデオカメラによる地上観測や気象データとの対比について報告する。これまでの研究や解析結果の一部については3)に述べた。噴煙放出活動が時間的にあまり変化しない定常噴煙についての写真解析の方法と、1989年11月前後のデータの解析は4)に報告した。1989.1～1990.4のLANDSATとMOSを主とす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の対比については5)で簡単に報告した。気象衛星NOAA-11の1990.3～7のデータと地上観測との対比については6)で簡単に報告し、更に詳細な解析を進めている。⁷⁾

この稿では、最近のSPOT衛星によるデータも含め、1987.12～1991.8の衛星画像を地上観測と併せて総合的に検討する。また、1990.1～9の期間の地上多点観測については別に報告する。⁸⁾ 半魚眼コンバーターレンズを用いた超広角撮影写真の解析についても述べる。⁹⁾ 以下、次の順序で議論を進める。

§2. 噴煙拡散の取り扱い：2-1 噴煙の放出強度と時間変化，2-2 定常噴煙の拡散形態と表現，2-3 地上観測と解析，2-4 上層風について。

§3. 衛星による観測データについて：3-1 人工衛星によるリモートセンシング，3-2 衛星データの利用形態。

§4. 衛星データと地上観測との対比：4-1 最近の衛星データ，4-2 種々の拡散形態，4-3 上層風データ，4-4 濃度分布について，4-5 雲と噴煙の識別。

§5. 終りに

§2. 噴煙拡散の取り扱い

2-1 噴煙の放出強度と時間変化

以下の議論のために、この節では噴煙拡散の基本的特徴を述べ、取り扱いについて整理する。まず、放出の様相と強度についての基本的分類を述べる。

桜島火山噴煙は、海拔3000～4000mの上空に達する爆発噴煙、ほぼ2500m以下の定常噴煙、及び小爆発を断続的に繰り返す断続噴煙に分類出来る。定常噴煙の上昇形態は放出強度と山頂付近からさらに上層にかけての海拔高度1000～2000mの風速に強く依存し、およそ風速0～4，5～9，10m/s以上に対応して弱風時の鉛直上昇，並風時の斜め上昇，強風時の微か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。定常噴煙は煙源から数kmの内に周辺大気とバランスした水平移流状態となり、煙流軸高度はほぼ海拔1000～2000m

の値をとる。爆発噴煙や断続噴煙は放出後数分で最高度に達した後、かなり高度を下げ、煙塊として移流・拡散するが、その高度は爆発放出強度に依存し、定常噴煙の場合よりも上である。

噴出強度については、直接測定はないので、噴煙の火口近傍での様相から推察できる定性的指標によって、ここでは表1の様に分類する。初期巾とは、上昇からほぼ水平移流に移ってからの、視認される初期の上下の厚さである。これは初期の乱流拡散の激しさの指標と考えられる。噴煙の色については、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

表1. 噴煙強度のレベル

記号. 名称	色, 降灰, その他の特徴
D1. 薄煙	うっすらと白く、途切れる事もある.
D2. 弱煙	白っぽく、煙流の初期巾は小さいが、断続的に放出されている.
D3. 並煙	白っぽく、煙流の初期巾は中程度で、放出の脈動性は小さい.
D4. 強煙	灰白色で、煙流の初期巾は大きく、放出の脈動性は強. 降灰が視認される.
D5. 猛煙	黒っぽく、激しい降灰が数 km 下流までカーテン状に視認される.

い火山灰や硫酸のミスト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。

なお、火山噴煙の放出強度については、個々の火山の違いが大きいため、気象庁の監視業務でも全国的統一基準はなく、それぞれに即して表現を決めている。桜島についての鹿児島地方気象台の爆発と噴火の定義は、ここでの D5 に属する爆発噴煙を更に類別するものと考えられる。

2-2 定常噴煙の拡散形態と表現

地上観測の解析では、定常噴煙の輪郭を、水平な直線の煙流軸 (x 軸) に対して垂直な断面が長径, 短径

$$R_y(x) = ax^p + c, \quad R_z(x) = bx^q + c \quad (1)$$

の長円となる錐形でシミュレートして検討する。ここで、煙流始点を原点とし x 軸を平均風の方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 軸を取っている。火口上部 $x=0$ では初期拡散の方向による違いは無視する。これを第一近似として、複雑な場合は、この様な煙流表現での多成分系として表現する。煙流軸の高度と向き及び拡散パラメータ a, b, c, p, q は、パソコンによる立体図と観測データとの対応から求める。⁴⁾

これまでの解析で、定常噴煙の拡散形態について大体次の様なことが解った。^{4,5)} 初期拡散の水平、鉛直の違いは無視できるが、下流に行くにつれて水平拡散が卓越する。水平拡散は鉛直シャーに敏感であり、典型的な場合として①強風でシャーが小さい場合の長距離移流、②弱風でシャーが大きい場合の大角度の扇状拡散、③弱風時で安定した顕著なシャーがない場合の広い帯状

拡散がある。その他はこれらの中間的な形態と見なされる。それぞれの場合についての輪郭を与えるパラメータの概値が得られたが、更に多くの事例を解析する必要がある。この稿では、1987.12~91.8の期間の衛星データおよび同日の衛星観測に近い時刻の地上観測データについて検討し、水平拡散の中間的な形態としたものについてさらに類別を進める。

衛星データの水平拡散の解析では、噴煙流が広がるだけでなく、下流で薄くなって見えなくなる効果も含めて検討しなければならない。そのため、 x = 一定の断面の濃度 $C(x, y)$ について拡散幅 $\sigma_y = \sigma(x)$ を横広がり標準偏差とする正規分布

$$C(x, y) = \frac{Q/u}{\sqrt{2\pi}\sigma(x)} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma(x)} \right)^2 \right] \quad (2)$$

を仮定した場合の、画像解析で検出される限界の等濃度線 $y=Y(x)$ を与えるパラメータを求める。ここで Q/u = 排出量 (g/s) / 風速 (m/s) は保存されるとして規格化されている。煙流軸上の濃度 $C(x, 0)$ は $\sigma(x)$ に反比例して減少する。これが $x=x_{\max}$ で限界濃度まで薄くなるとすると、限界濃度線は、 $\exp [(y/\sigma(x))^2/2] = \sigma(x_{\max})/\sigma(x)$ を解いて、

$$Y(x) = \sigma(x) \cdot [2 \log \{ \sigma(x_{\max}) / \sigma(x) \}]^{1/2}, \quad (3)$$

が一般解として得られる。

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。大気拡散研究では、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、境界内に拡散物質の96.8%が含まれる事になる。これに対応する距離を $x=x_{\text{ref}}$ とすると、

$$Y(x_{\text{ref}}) = 2.15 \sigma(x_{\text{ref}}), \quad (4)$$

である。 $x < x_{\text{ref}}$ では限界濃度線は $Y > 2.15 \sigma(x)$ となって外側まで見え、下流では逆となる。

簡単で実際的な場合として

$$\sigma(x) = \alpha x^P, \quad (5)$$

を考える。スケール変数

$$z = x/x_{\max}, \quad 0 < z < 1, \quad (6)$$

を用いて、

$$Y(x) = \alpha \cdot x_{\max}^P \cdot z^P \cdot [-2P \log z]^{1/2}, \quad (7)$$

となる。これから、 Y の x 依存性は P と x_{\max} から決まり、その絶対値は α に比例している事が解る。横幅が最大になるのは $z=e^{-1/2P}$ の時で、

$$Y_{\max} = e^{-1/2} \alpha \cdot x_{\max}^P, \quad (8)$$

である。一般に, Y_{\max} を与える x を x_w と記すと, この場合は

$$x_w = e^{-1/2P} x_{\max}, \quad (9)$$

である。

このモデルでは, 水平分布の限界濃度線から x_{\max} , Y_{\max} , x_w が直読され, 上式から α , P が簡単に計算され, $x_{\text{ref}} = 10^{-1/P} x_{\max}$ が求められる。長距離の拡散では初期巾は無視できる場合が多く, NOAA データの簡単な検討ではこの結果を用いた。⁶⁾

拡散幅が(5)で与えられる場合の, P の違いによる限界濃度線の形の違いを図 1a に, $P=1$ の場合の等濃度線の例を図 1b に示す。

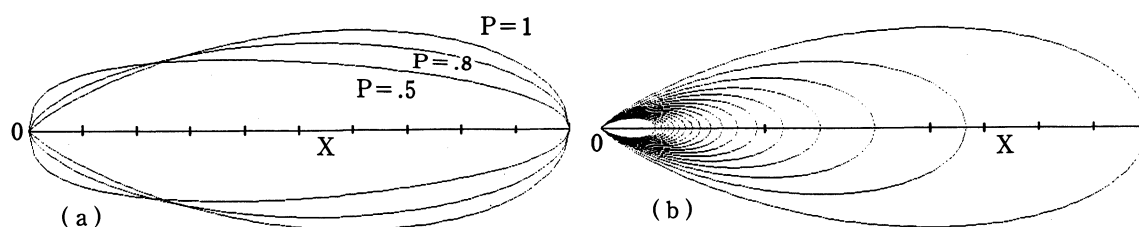


図 1. 拡散幅が(5)式の場合の水平拡散分布. (a) P の違いによる限界濃度線. $x_{\max}=100\text{km}$ では, $P=1$ に対し $\alpha=0.3$ で, $P=0.5, 0.8$ も $\sigma(x=50\text{km})$ を共通にとる.
(b) $P=1$, $\alpha=0.3$ の場合の等濃度線. $x_{\max}=100\text{km}$ の限界濃度とその10倍までを0.5倍間隔で描く.

初期幅が無視できない場合は,

$$\sigma(x) = \alpha x^P + \gamma, \quad (10)$$

と置いて数値的に取り扱う。その時, $\gamma=0$ の結果は第一近似として見通しを立てるのに役立つ。

上式の関数形は(1)と同じだが, x の指数 P は, R_y のパラメータ p とは異なり, $p < P$ となる事に注意しなければならない。初期拡散項も $\gamma < 0$ である。

噴煙流の場合, 断面の濃度分布が y 方向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。噴煙放出強度や風速のゆらぎは, 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。また, 1000-2000m 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, 風向の短時間での大きな変化は煙流軸の直線性も破る。拡散の過程で降灰や水分の蒸発による放出物質の離脱もある。逆に, 気象条件によっては煙流の上半部で水蒸気の凝結が進み, 積雲となって発達する事もある。このような問題はあがあるが, この稿では濃度分布の詳細にはあまり立ち入らず, 煙流の水平拡散と消滅を表現する式として(3)あるいは(7)を用い, そのパラメータで拡散形態を表現することにする。ここで述べた様な正規分布に基づく拡散公式による表現に比べての実際の場合の大きなズレは, 非定常性

などの目安ともなる。なお、背景が一様で煙流がある程度薄い場合は、衛星データの分光放射輝度が煙流濃度の目安となる可能性がある。

2-3 地上観測と解析

南岳火口から約 10km の西方の定点A (海拔約 30m, 南岳は方位角 82° , 距離 10.75Km), 西南西のB (海拔約 26m, 南岳は 71° , 9.8Km) に加え, 1990.1から北西の教育学部寺山自然教育研究施設を定点C (海拔 380m, 南岳は 150° , 10.15km) として, 35mm カメラ, ビデオカメラによる, 観測を行い, 時には鹿児島湾沿岸や湾内の船上あるいは航空機からの移動撮影を加える。ビデオによる定点観測ではインターバル撮影によって長時間をカバーする。一般に火口から数十 km の噴煙流を観測するには広角撮影が望ましく, カメラでは $f=17, 21, 28\text{mm}$ 等のレンズを用い, ビデオカメラでは最広角側にして0.5倍程度のワイドコンバータを用いる。1つの視野に収まらない場合, ビデオなら動かし, カメラなら数枚の写真をつなぐ。更に広い視野を捉えるには, 半魚眼コンバータレンズをカメラやビデオカメラに装着する。全天撮影には球面鏡を準備している。これらの観測では, 観測の時刻を写し込み, 年月日や場所を記録しておく。

写真やビデオ記録は, 噴煙拡散の輪郭を表すコンピュータグラフィックと重ね合わせ, 噴煙の煙流軸の高度と向き及び拡散パラメータ a, b, c, p, q を求める。爆発噴煙などの解析には, 煙塊中心を通り風向に沿った鉛直面または水平面のメッシュ図とビデオ画像とのスーパーインポーズを行う。噴煙流の透視図を3次元の座標変換の組み合わせとフィルム面への2次元写影変換により求める方法と, この比較に於けるビデオ入力のリサイズやグラフィックとのスーパーインポーズの機能を持ったパソコンの利用については前報で述べた。⁴⁾ 普通のレンズの場合は既に詳しく述べたので, ここでは半魚眼像や対応するグラフィックの煙流図と, ビデオカメラの画角の問題について述べる。

より広い画角を得るには, 一眼レフのようなレンズ交換式の他に, 本体レンズの前にコンバータレンズを装着する方法がある。歪曲収差があまり生じない範囲で設計されたワイドコンバータは, 本体レンズに比べて有効焦点距離を0.5~0.7倍にするものが各種市販されている。歪曲収差を厭わず, それより広い画角を得るものがスーパーワイドコンバータ或はセミ・フィッシュ・アイと呼ばれる半魚眼レンズで, 中心部の有効焦点距離を0.45倍程度にするとされている。普通, ワイドコンバータは撮像面の小さいビデオカメラ用に設計されており, 35ミリカメラに用いると周辺がぼけるが, 半魚眼レンズでは全体が鮮明な像を得る事が出来る。フィルター径が合わないコンパクトカメラのレンズの前に手持ちで撮影しても, 結構使いものになる。半魚眼コンバータによる著しい樽収差のある画像は, 極座標を用いた非線形写像として理解できる。

しかし, そのパラメータは公表されていないので, ここではフィルター径 52mm で0.45倍のケンコーセミ魚眼コンバージョンレンズについて検討した結果を述べる。

図 2a で, 焦点距離 f のカメラが y 軸の方向を向いて置かれているとすると (直交座標系は前報⁴⁾の V 系である), y 軸からの頂角 θ , x 軸からの軸角 ϕ の方向からの入射光はフィルム上に中

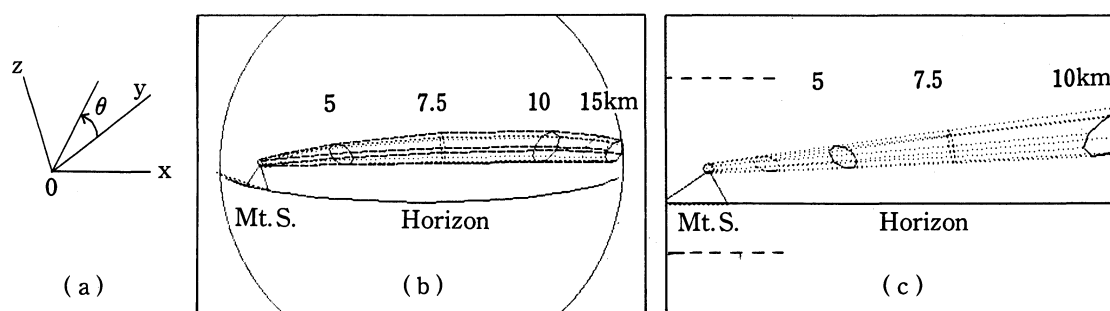


図2. 半魚眼コンバータレンズの効果. (a) レンズの光軸を y 軸とする V 系.
 (b) $f=35\text{mm}$ \times 半魚眼コンバータ ($C=0.48$). 枠は撮像面で, サークルは視野. 風向 320° , 煙流軸高度 1100m, 輪郭パラメータ (m単位): $a=0.5$, $b=0.1$, $c=150$, $p=q=0.8$.
 (c) $f=17\text{mm}$ でコンバータなし.

心から

$$b = f \cdot \tan \theta \quad (11)$$

の距離で x 軸から $\phi + 180^\circ$ の点に像を結ぶ。半魚眼コンバータを付加すると, 像の中心からの軸角 ϕ は変わらずに距離 b' が変化する。歪曲収差が僅かならば, $b' = C \cdot (b - Ab^2)$, C, A は定数, で近似できるが, 半魚眼レンズの場合はこれでは全く不十分で, 適当な関数形を見いださねばならない。試みに

$$b' = C \cdot f \sin \theta = C \cdot b \cos \theta \quad (12)$$

と置き, $C=0.47$ とすると, 取扱説明書での具体例をほぼ再現した。さらに, これが収差全体を良く表現しているかどうか, 格子状のパターンを示す建物の実写とコンピュータグラフィックの比較によって検討した所, $C=0.48 \sim 0.49$ が全体を良く再現することが解った。これは公称値 0.45 よりやや大きく, 視野半径は公称値 75° より小さい $\theta = 68^\circ \sim 67^\circ$ でフィルム像 ($f=28\text{mm}$ に対して $b'=1.25\text{mm}$) と合致する。この結果は野外での遠景の検討と, 室内での方眼図形や同心円の撮影結果で確かめた。これらの分析の過程で, (11) 式よりパラメータを増やした $b' = C \cdot b \cos(n\theta)$ も検討したが, $n=1$ が最適値であった。結果が公称値より少し異なるのは, 製品のばらつきの為か, 組合せる本体レンズとの関係によるのか問題として残っている。

また, ビデオカメラに半魚眼レンズを付加した効果についても検討し, 上記と矛盾しない $C \approx 0.5$ を得た。この場合, 撮像面のサイズは 2/3 インチカメラで $8.8 \times 6.6\text{mm}$, 1/2 インチでは $6.4 \times 4.8\text{mm}$ とされている。しかし, モニター画面やビデオプリンターによる出力では上下左右がかなりカットされており, 実写と実測による評価が必要であった。

球面鏡の場合, 近軸光線近似によらずに光学的解析によって厳密に扱われ, 球の半径より十分はなれたカメラでは $\theta \rightarrow \theta/2$ という簡単な関係で殆ど全方向を写し込む超広角像が理解できる。⁹⁾

半魚眼レンズの効果を見るために, 1990.12.10. 10:18 の桜島噴煙を, 垂水に近いフェリー上 (南岳は距離 8900m, 方位角 349°) から撮影した場合の輪郭図を図 2b, c に示す。図 2b は $f=$

35mm のカメラレンズに半魚眼コンバータをつけた場合で、仰角があるために水平線が湾曲している。噴煙流は 2.5km 毎の 8 角形の断面とそれをつなぐ線で表され、15km 下流まで視野に収まっている。コンバータをつけない場合は、 $f=17\text{mm}$ の超広角レンズといわれるものでも、視野は図 2c のように下流約 10km までである。パノラマ用 17mm レンズ付きフィルム（コニカのパノラマイト）の場合は、図の点線の上下をカットしたものになっている。¹⁰⁾

2-4 上層風について

南岳北西約 10km の吉野台地からの鹿児島地方気象台高層課のゾンデ定時観測のうち、ここでは衛星観測時刻をはさむ 9 時、15 時の、900, 850, 800mb 面の風向・風速データを参照する。これらの高度は、それぞれ約 1000, 1500, 2000m であるから、これらの面での風向・風速を $\omega_i, u_i, i=1, 1.5, 2$ と記すことにする。風向きの鉛直シャー、即ち高度による風向の違いが重要なので、その指標として風向偏角の大きさ

$$\Delta\omega_1 = |\omega_1 - \omega_{1.5}|, \quad \Delta\omega_2 = |\omega_2 - \omega_{1.5}|, \quad (13)$$

を用いて議論する。高度約 3000m に当たる 700mb 面の風データは、定常噴煙の検討には 800mb 面から離れ過ぎているが、爆発噴煙の場合は参照する必要がある。

図では、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 5m/s に対応し、弱風の指標である。南北方向の軸の先端は 10m/s で、強風の目安となる。

なお、高層気象資料によって 9 時の温位の鉛直分布が得られるが、上層大気は一般に安定であり、噴煙の鉛直拡散との顕著な相関は見られなかったもので、^{4,5)} ここでは議論しない。

§3. 衛星による観測データについて

3-1 人口衛星によるリモートセンシング

赤道上空の東経 140°にある静止気象衛星「ひまわり」GMS-4 は、日本を含む西太平洋・東南アジアを約 36000km 上空から毎日 3 時間毎に観測しており、特別の場合は 30 分毎に観測できる。大噴火の常時監視には適しているが、視野が広い代わりに分解能が悪く、噴煙が高度 4000m に達するような場合でないと見分けることは難しいとされている。¹¹⁾ その他の極軌道を周回する地球観測衛星は観測する日時が限られているが、地表に近い 700~900km 上空から桜島の普通の噴煙など詳しい様子が判る。

各衛星は、観測装置の違いによって視野の広さと分解能が異なり、観測する電磁波の波長領域によって何がどう見えるかが異なる。桜島の噴煙放出活動と上空の風の様子や天候は日時によって変わるので、人工衛星からの観測がいつ行われるかも重要である。衛星データでは SPOT で 50km, LANDSAT と MOS-1 では 100km を越える煙流の水平拡散が判る。NOAA データには

木下, 細山田: 桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

LANDSAT の視野を越える長大な噴煙拡散も見られる。⁶⁾ 大よそ, 視野の広さ及び観測機会と分解能は相反的である。極軌道地球観測衛星の高度・鹿児島観測周期や, それぞれの高分解能観測装置の特徴を表 2 に示す。分解能が粗く噴煙観測には向かない観測装置は表 2 には挙げていない。

MSS, MESSR データの 4 つのバンドのうち 2 つの可視バンドと可視に近い方の近赤外バンドでは普通の濃度の噴煙は十分検出されるが, その下の海岸地形が透視出来ることが多い。これらのバンドについての噴煙や火山灰の分光反射特性は, 文献11)-15) で詳しく調べられている。

桜島噴煙は SPOT の XS, P 両モードでもかなり捉えられている。ある程度活発な噴煙活動の場合, 噴煙流は NOAA の AVHRR データでも容易に認められる。表 1 のレベル D3 の程度の白煙でも, ch. 3, 4 の 2 つの赤外バンドの Multi-Level Slice 法によって検出可能である。⁶⁾ 一般に, 気象現象としての雲と噴煙の判別を衛星データからどう行うかがセンサーとの関連で問題であるが,¹³⁾ 4-5で議論する。

表 2 で画面の横幅は大体東西の幅であるが, 軌道が南北方向と少しずれる分だけ異なる。

表 2. 稼働中の極軌道地球観測衛星の種類と高分解能観測装置

衛 星 打上げ日	高度 km (周期 分) 観測周期 観測時刻	観測装置 [横巾 km] 分解能 m	チャンネル 又 は バ ン ド	波長帯 (μm)	色 光 名
NOAA-11	870km (107分)	AVHRR [3000km]	Ch. 1	0.58-0.68	可視光
88.9.24	1 日 ~13:30	1100m (直下)	Ch. 2	0.725-1.10	近赤外
			Ch. 3	3.55-3.93	中間赤外
			Ch. 4	10.5-11.3	遠赤外
			Ch. 5	11.5-12.5	遠赤外
LANDSAT-5	705km (99分)	TM [185km]	Bd. 1	0.45-0.52	青色光
	16日	30m	Bd. 2	0.52-0.60	緑色光
	~10:10	(120m 遠赤)	Bd. 3	0.63-0.69	赤色光
			Bd. 4	0.76-0.90	近赤外
			Bd. 5	1.55-1.75	中間赤外
			Bd. 6	10.4-12.5	遠赤外
			Bd. 7	2.08-2.35	中間赤外
84.3.1		MSS [185km]	Bd. 4	0.5-0.6	緑色光
		80m	Bd. 5	0.6-0.7	赤色光
			Bd. 6	0.7-0.8	近赤外
			Bd. 7	0.8-1.1	近赤外
MOS-1, 1B	909km (103分)	MESSR [100km]	Bd. 1	0.51-0.59	緑色光
87.2.19,	17日		Bd. 2	0.61-0.69	赤色光
90.2.7	~11:00	50m	Bd. 3	0.72-0.80	近赤外
			Bd. 4	0.80-1.10	近赤外
SPOT-1, 2	832km (101分)	HRV [60km]	XS モード	0.50-0.59	緑色光
		20m XS		0.61-0.68	赤色光
				0.79-0.89	近赤外
86.2.22,	26日	10m P	P モード	0.51-0.73	可視光
90.1.22	~11:20				

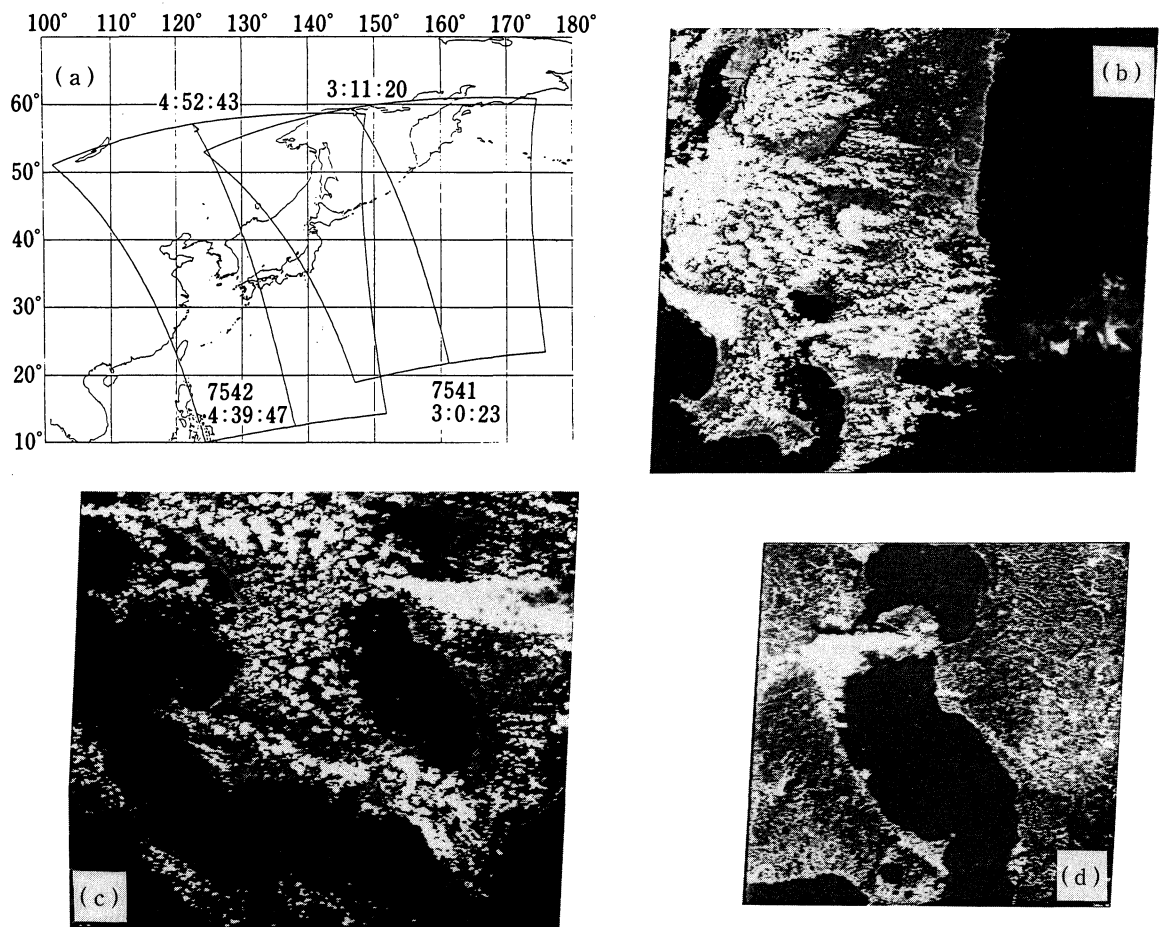


図3. 極軌道地球観測衛星の視野.

- (a) NOAA-11の90.3.13の観測範囲(日によって異なる).
- (b) LANDSAT-5 (90.7.19. 10:08 TM), (Path, Low) = (112, 38).
- (c) MOS-1 (89.8.11. 10:56 MESSR), (Path, Low) = (25-West, 76).
- (d) SPOT-2 (89.10.27. 11:07 Pモード), (Path, Low) = (315, 287).

NOAA の場合には、画面の両端の近くは斜めになるため分解能は悪くなる。どの衛星も軌道に沿った南北方向は同日時のデータが一緒に得られるが、両端の観測範囲からはみ出た部分は仕方がない。図3に例を示す。

噴煙流の鉛直構造については、陰影の輪郭がはっきりしている時に推測する他は困難である。熱赤外放射の強さから噴煙上部の高度を推測する方法があるが、まだ確立したとは言い難く、地上観測との対比が重要である。衛星の観測時刻は一瞬だけで、複数の時刻の情報が別の衛星データから得られる日は少ない。これらの弱点を補い、噴煙流の広域にわたる立体構造を求め時間発展を理解するには地上観測と合わせた解析が重要である。

3-2 衛星データの利用形態

日本周辺の詳細は、NOAA の場合は気象庁気象衛星センターが受信処理し、気象協会を通じて配布されている。LANDSAT, MOS, SPOT の場合は宇宙開発事業団地球観測センターが受信

処理し, リモートセンシング技術センターを通じて配布されている。ここではこれらのデータを検索して利用したが, 他にも直接受信して解析を行っている大学・研究機関がある。

南北の軌道 path に沿って表 2 に示す横幅で得られる情報は, 適当な長さの区切りで low に切り分けられたシーンとして電算機適合テープ (CCT) に収められている。LANDSAT の場合, 観測データの 1 シーンは地上での横 185km, 縦 170km の広さに相当する。これはフロッピーディスク 1 枚には収まりきれないので, MSS データでは 29km×23km の必要地域のデータを切り出すか, 適当に間引きしてそれより広い地域を数値画像データとしてフロッピーに収める。間引きなしの場合, LANDSAT の TM では 14km×11km, MOS の MESSR では 25km×20km である。フロッピーデータの他に, CCT データの適当な数値処理によって得られる画像の写真や, そのビデオコピー等も供給されている。ここでは, フロッピーディスクデータとともに, 画像写真やビデオコピーも検討の対象とする。噴煙の場合, 多くの事例を扱う事が望ましく, 画像写真やビデオコピーも研究資料としての価値が認められるからである。SPOT データの場合はパソコンで扱えるフロッピーとして供給されていないので, ビデオコピーのみを扱った。

§ 4. 衛星データと地上観測との対比

4-1 最近の衛星データ

ここでは, 表 3 に挙げた 1987 年 12 月以来の桜島噴煙の各種衛星データを検討する。これらのほとんどに対しては衛星観測時刻や大体それに近い時刻の地上観測データがあり, その解析から得られた結果も含めて表示する。この内, '89.1.21~'90.4.6 の間の 12 日の LANDSAT, MOS データについては前に簡単に報告したが,⁵⁾ さらに検討を進めている。なお, 1987 年までにも LANDSAT, MOS の衛星画像はかなり集積されており, 文献 12), 13) にまとめられ, 16) にも収録されている。表 3 で衛星の名称は Sat. 欄に略認し, 観測時刻は JST で示す。

衛星画像の中で, SPOT データは分解能が良い代わりに視野が狭く, 煙流が画面の左右にはみ出したものもかなりあるが, 水平拡散の情報を含むものとして用いている。表 3 の煙流のスケールの数値に + を付けたものは, 画面からはみだして + α がある事を表す。以下, 衛星画像の特徴によって類別を進め, 典型的な結果を重点的に取り上げて議論する。これらの上層風は, 図 12 にまとめて示す。

表 3 で, 扱ったデータの形態は, 画像写真を PI, 画像ビデオコピーを VI, フロッピーデータを F と記す。これらの数値画像処理の違いによって, 噴煙のスケールの評価に違いが出る事には留意しなければならない。また, 煙流輪郭のパラメータのうち, 安定度の微妙な違いの影響を R_z 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ので, b, q は記していない。おおよそ $q=0.8$ に対し $b=0.1-0.2$ 程度である。雲が出たりして地上観測の困難な場合, 近い時刻の様子から各種パラメータを推測する方法があるが, 不確かな場合は ? を付し, 不

表3. 衛星データリストと地上観測結果

Date	JST	Sat.	Data	x_{\max} km	$2Y_{\max}$ km	x_w km	Level	h m	c m	p	$a_{m^{1-p}}$	特徴
87.12. 8	10:42	M1	PI	25	4	15	D2	1700	250	.8	0.8	小角
87.12.17	15:27	N9	PI	80	10	50	D4	1600	300	.5	20.0	小幅
88. 1.11	10:49	M1	PI F	28	3	10	D2	1300	200	.8	0.4	小幅
88. 4. 5	10:40	M1	PI	43	13	40	D3?	—	—	—	—	小幅
88.12.14	11:03	S1	VI	26+	3?	13	D3	1200	250	.8	0.5	小幅
88.12.19	11:07	S1	VI	21	7	10	D3	1400	—	—	—	小角
89. 1.21	10:17	L5	PI F	60	25	35	D4	1600	300	.8	3.0	中角
89. 2.14	11:11	S1	VI	30	5	15	D2	1800	180	.8	0.8	小角
89. 2.22	10:17	L5	PI F	60	6	35	D1	1400	150	.8	.45	小角
	10:52	M1	PI F									
89. 3.10	10:17	L5	PI F	30	24	20	D3	1500	250	.85	4.0	大角
89. 4.11	10:17	L5	PI F	20+	3	15	D1	1200	200	.8	0.6	小幅
89. 4.12	11:14	S1	VI	21+	6?	16	D3	1700	300	.8	0.7	小角
89. 6. 4	10:55	M1	PI	40	2.5	15	D3	1500	300	.8	1.0	小角
89. 8.11	10:56	M1	VI	42+	12	32	D3	1700	300	—	—	小角
89. 9.26	11:03	S1	VI	35+	17	20	D3	1700	350	.3	300.0	中幅
89.10. 6	11:11	S1	VI	25	4	10	D2	1700	250	.5	20.0	中幅
89.10.18	10:57	M1	PI F	30	27	13	D3	2000	200			滞留
89.10.20	10:12	L5	PI F	20	5	15	D2	1500	200	.9	0.6	中角
89.10.21	11:23	S1	VI	35	5	20	D3	1700	250	.5	15.0	小幅
89.10.27	11:07	S1	VI	17	6	15	D4	1800	250	.5	15.0	小幅
89.11.21	10:11	L5	PI F	30	12	15	D2	1500	200	.9	1.0	大角
	10:58	M1	PI F									
89.12. 7	10:11	L5	PI F	120	10	70	D4	1500	250	.8	0.8	長流
90. 1. 8	10:10	L5	PI	20	5	12	D3	1500	200	.8	1.0	小角
90. 2. 9	10:09	L5	F	135	27	36	D4	1500	300	.8	3.0	広幅
90. 3. 3	10:59	M1	VI	22	9	12	D3	1500	400	.5	25.0	中幅
90. 3.13	10:08	L5	F	116	11	87	D3	1700	200	.5	15.0	長流
90. 4. 6	10:59	M1	VI F	50+	20	33	D4	1500	300	.8	2.8	大角
	11:11	S1	VI	60								
90. 6. 7	11:19	S1	VI	33+	10	25	D4	1500	300	.6	7.0	小幅
90. 7. 9	10:52	Mb	VI F	55	18	34	D4	1800	350	.5	24.0	中角
90. 7.19	10:08	L5	VI F	133+	30	80	D3	1500	250	.7	4.0	小幅
90.10.27	11:00	M1	F	22	4	12	D1	1400	200	.5	10.0	小幅
90.12.10	10:07	L5	VI F	26	3	24	D2	1400	150	.8	0.5	小幅
91. 1.14	11:19	S2	VI	40+	13+	30+	D4	1400	400	.8	0.8	小幅
91. 4.15	11:00	M1	VI F	20	3	10	D1	1400	200	.8	0.8	小角
91. 7.18	11:03	Mb	VI F	53	17	35	D2	1500	300	.8	1.5	小角
91. 7.22	10:11	L5	VI	135+	20	120	D3	1500	—	—	—	小幅
91. 7.26	10:59	M1	VI	53	6	32	D3	—	—	—	—	小幅
91. 8. 7	10:11	L5	VI	97	6	60	D4	1700	500	.5	20.0	小角

木下, 細山田: 桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

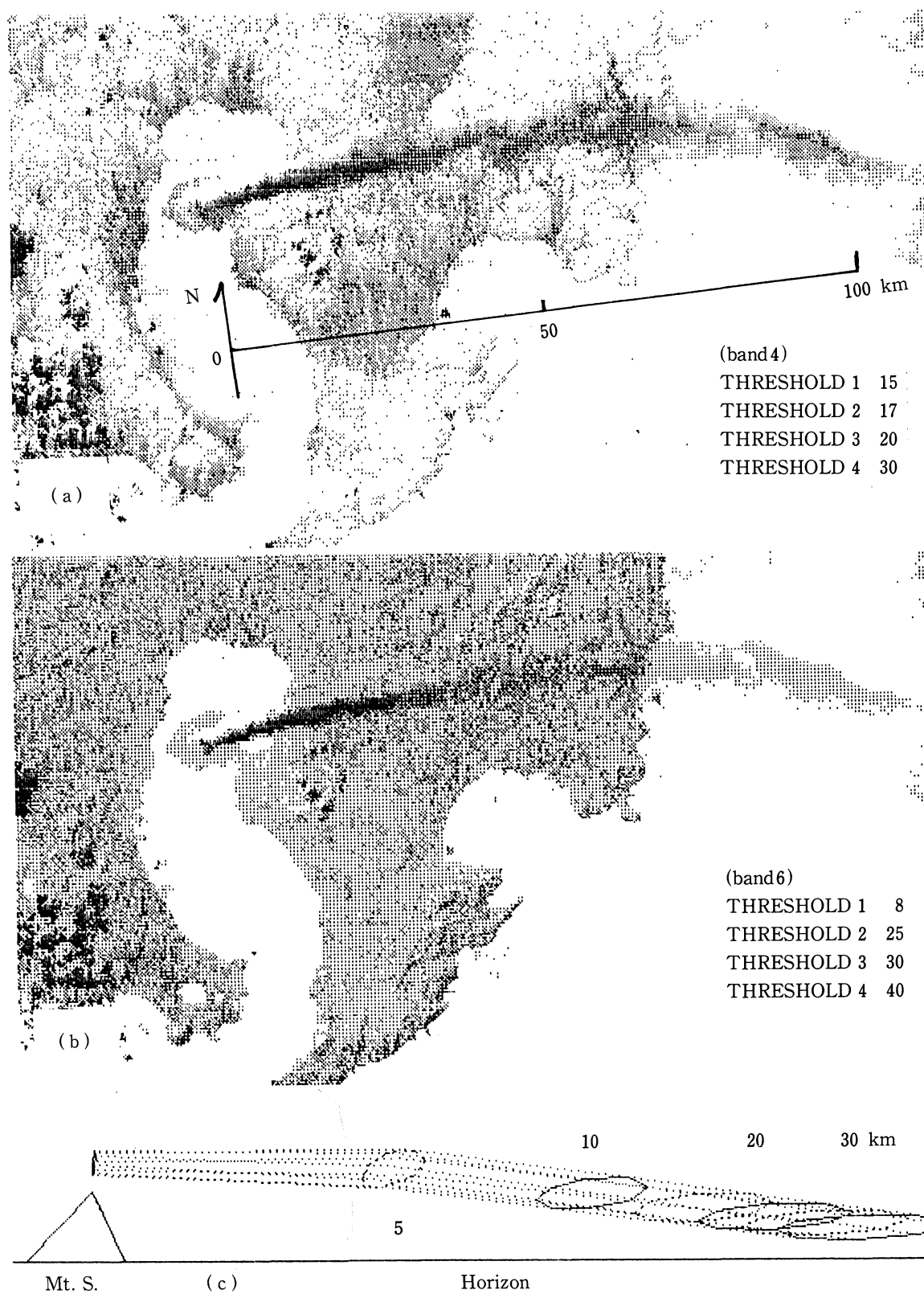


図4. (a), (b) 89.12.7. 10:11の LANDSAT-5 MSS データの Bd. 4 と6.
 分光反射輝度のしきい値は図中に示す (印刷の都合上明るいほど黒く表す).
 (c) 南岳が方位角 350° となる 8.6km 離れた点から見た煙流輪郭図 ($f=28\text{mm}$ の写真2枚をつなぐ). 風向 264° , 煙流軸高度 1500m, 輪郭パラメータ $a=1$, $b=0.1$, $c=200$, $p=q=0.8$.

明の場合は一を記した。また、それぞれの噴煙の拡散形態を次に述べるような類別をした結果を特徴の欄に記す。

4-2 種々の拡散形態

(i) 長距離の移流 (長流)

上空 1000-2000m が強風で風向が揃っている場合、噴煙活動が活発ならば、あまり拡散せず遠くまで移流している様子が衛星画像で捉えられる。表 3 の特徴では長流と記す。図 4a, b に 89.12.7 の MSS データの Bd. 4 と 6 を示す。Bd. 4 では可視光を強く反射する市街地などの裸地や雲・噴煙が強調されるのに対し、Bd. 6 では植物が近赤外光を良く反射するために陸地の全体が明瞭に現れている。どちらの場合も噴煙が濃いために陸上から海上にかけて大体同じ輪郭で検出できる。下流での煙流軸の湾曲は午前 3 時は北西よりの風 5m/s で、強い西風になる前の痕跡と考えられる。この日は衛星観測に対応して B 点と共に垂水フェリー上から観測しており、図 4c に南岳南方から見た煙流輪郭図を示す。

90.3.13 の MSS 画像では 100km を越える下流まで噴煙流が判ることは、5) の図 1 に示した。そこで述べた様に、1.5 時間後の NOAA-AVHRR データでは、種子島を越えて 150km に達しているのが分かる。この日も図 4 の場合も鉛直シヤーは小さく、(13) 式の $\Delta\omega_1$, $\Delta\omega_2$ は 9, 15 時とも 8° 以下である。

(ii) 小幅の煙流と小角度の拡散

長距離移流に準ずるものとして、前筋の図 3b, d の様に衛星画像で細い流れや小さな幅が拡がらない場合が多く見られる。まとめて、表 3 で小幅として類別する。図 3d の 89.10.27 の場合に下流で急に途切れているのは、爆発に始まる連続的噴煙放出と推測される。この日は爆発時の

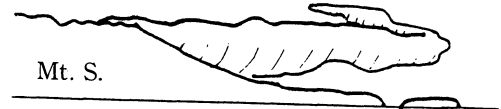
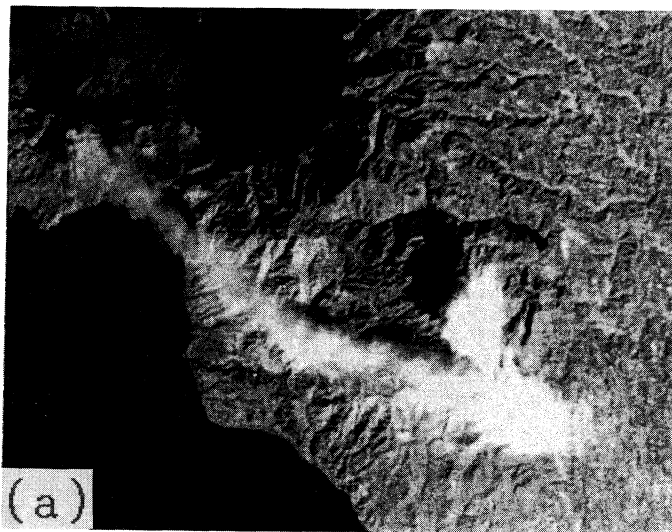


図 5. (a) 90.12.10. 10:07 の LANDSAT-5 MSS 画像 (Bd. 4, 5, 7 の合成).
(b) 爆発噴煙が押し流される様子の 9:48 の鴨池港からの写真スケッチ.

木下，細山田：桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

観測はないが，図 5 に示す 90.12.10 の場合は 9:35 の小爆発の噴煙が 5 分後に最高高度約 2000m に達したあと高度を下げながら移流し，続いてやや薄く白い噴煙が連続的に放出されていた。これは，図 5a の 10:07 の LANDSAT 画像で細い煙流の先端が大隅半島の中央の高隈山系上部で屈曲しているのに照応し，爆発噴煙の上部が別方向に少し押し流されたためである。図 5b に爆発噴煙が押し流される様子の 9:48 の写真スケッチを示す。図 2b の半魚眼像は，同じ日の更に時間が経ってからで，爆発噴煙は視界の外である。

一般に噴煙放出強度が弱い場合は衛星画像では細く見え，強い場合は濃く太く見える。細い煙が陸地を背景に流れる場合は 88.1.11，89.4.11 があるが，数値画像処理を行っても検出がやっとである。海上の場合は，90.10.27 の薄い煙も数値処理によってはっきり検出することが出来る。

上層風が強風ではなくて鉛直シヤーが小さい場合，図 3c の 89.8.11 の様に煙流の幅が x と共に少し広がるケースが見られる。また，89.2.14 と 89.2.22 ではシヤーは大きい噴煙が穏やかで初期幅が小さいために水平拡散の角度が小さい。これらの場合をまとめて小角度の拡散として類別する。これらは，下流まで衛星画像の視野に収まれば，上に述べた小幅に移行するか見えなくなるかである。

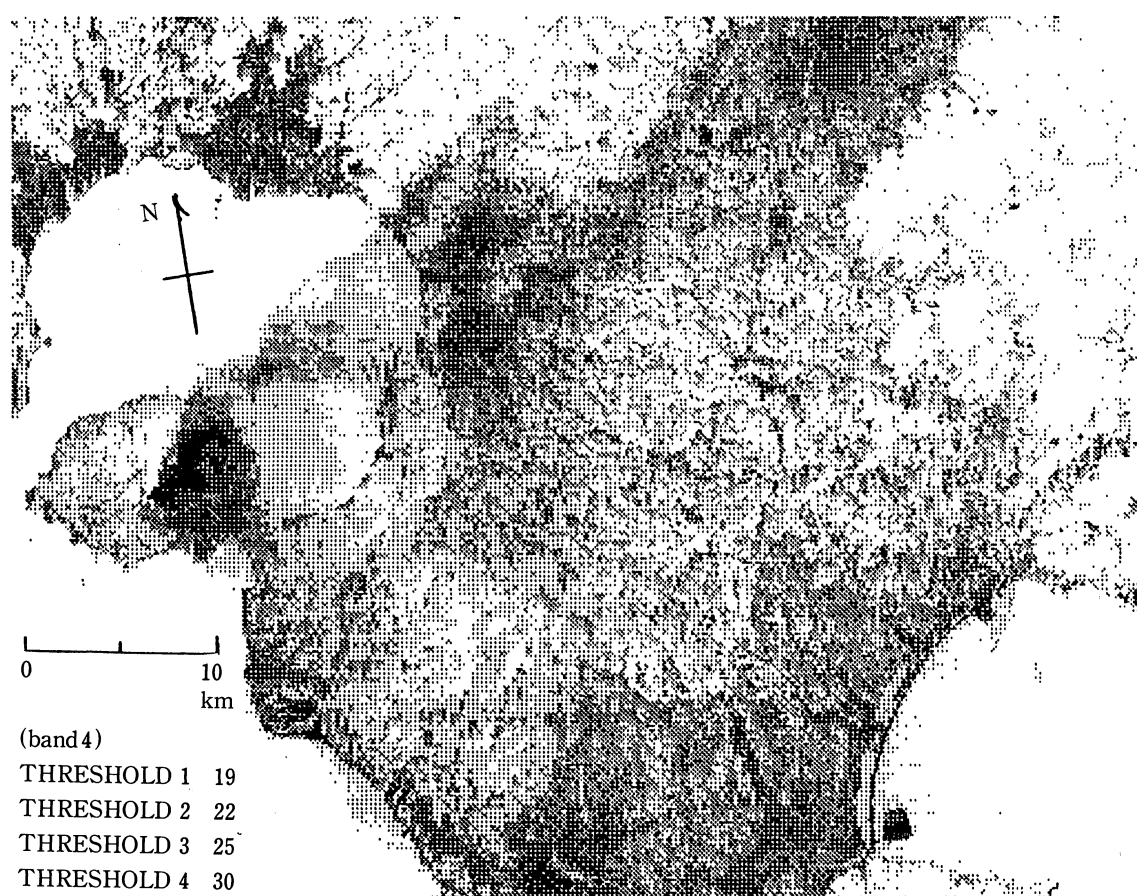


図 6. 大角度拡散の例，89.3.10. 10:17 の LANDSAT-5 MSS Bd. 4 の輝度レベルスライス。

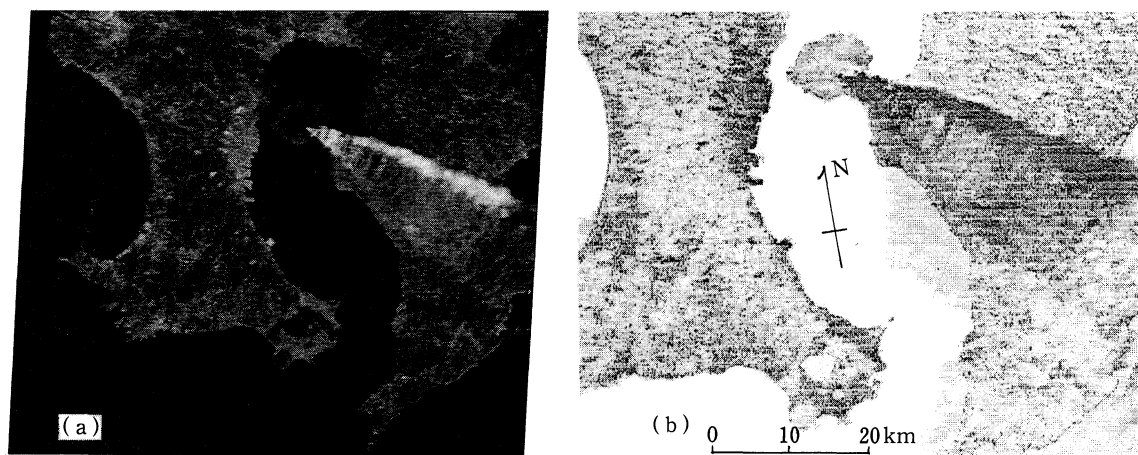


図7. MOS-1 MESSR 画像 (90.4.6. 10:59)。(a) Bd. 1, 2, 4, 合成画像のビデオコピー。
(b) Bd. 1 の輝度レベルスライス. しきい値は11, 15, 20, 25.

(iii) 大角度の扇状拡散

鉛直シャーが煙流の上下の厚さの範囲で大きいと大角度の扇状拡散となる。これは上層風が比較的弱く、5m/s 前後までの場合に時々見られる。前報で詳しく議論した89.11.21が典型的な例であるが、⁵⁾ 図6, 7に示す89.3.10, 90.4.6もこれに当たる。89.3.10には煙源から10km離れた上流側の定点Aから煙流の上下部に対する風のシャーの効果が明瞭に観察された。図7aのMESSR画像では拡がりの両縁の方向に濃い部分が流れている。その1時間前には、同様な開きの角度で全体として南よりに流れているのが、その直下の古江港から観察された。衛星観測時刻には、図7aに見られる拡がりより外側の海上に細かい灰粒子が残されて漂っているのが、数値処理したBd. 1の画像にみられる(図7b)。'90.4.6には上流の欠けたSPOT画像があり、10分前のMOS-1データとの比較が出来る。SPOTのPモードのビデオコピーでは、扇形のうち東流する濃い部分だけが容易に判別される。薄い部分が見えないことは、他のビデオコピー画像判読で留意しなければならない。

(iv) 滞 留

上空が無風状態では、噴煙は周辺大気とバランスした高度で薄い円盤状に滞留する。図8の89.10.18の場合は高度2000mが無風に近いたため、南西よりの弱風で僅かに押し流されながら殆ど滞留し、鹿児島市街地を含め湾奥部の2/3を覆っている。この下の湾岸を移動観測したが、薄日がさす程度であり、降灰はすくなくかった。図8はBd. 1の可視光による写真画像であるが、煙の下湾岸地形の一部が透けて見える。

(v) 中角度のラケット形拡散

並風で若干の鉛直シャーがある時、噴煙強度D3以上あれば中角度で拡がり始め、やがて最大幅に達してから視認されないほど薄くなる部分が増えるために、図1の限界濃度線のように下流

木下，細山田：桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

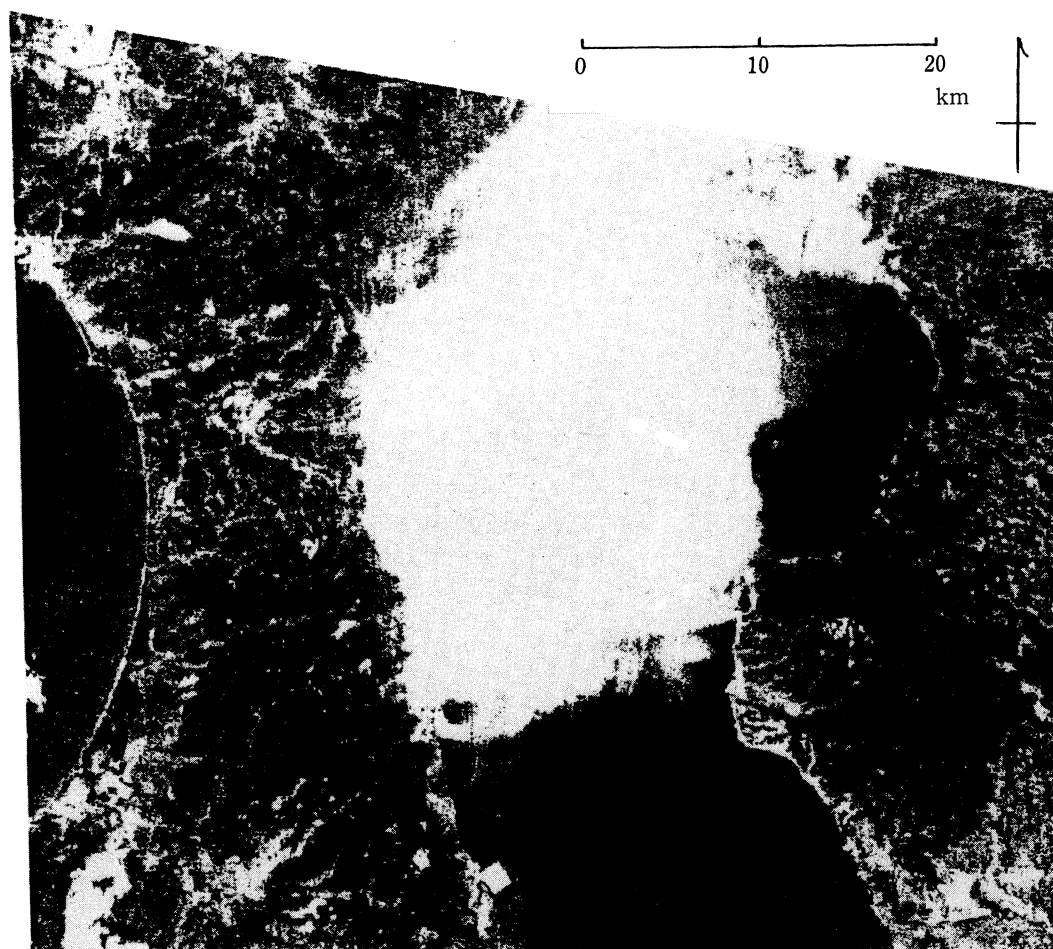


図8．滞留の例，89.10.18. 10：57 MOS-1 MESSR Bd. 1 の写真画像（部分）.

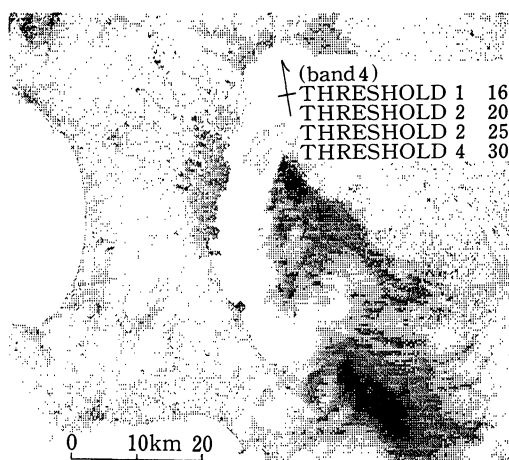


図9．中角度の拡散，89.1.21. 10：17 LANDSAT-5 MSS Bd. 4 の輝度レベルスライス.

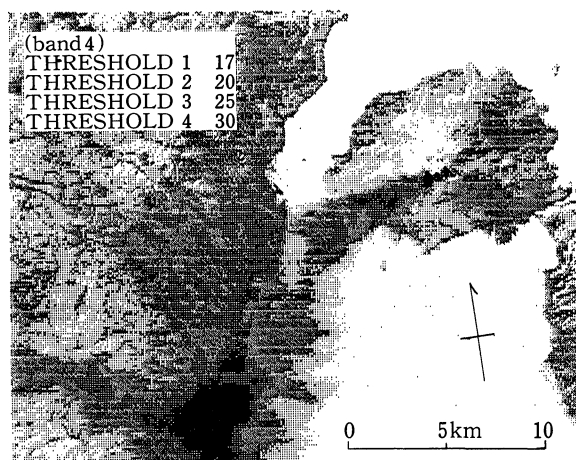


図10．白煙の中角度拡散，89.10.20. 10：12 LANDSAT-5 MSS Bd. 4 の輝度レベルスライス.

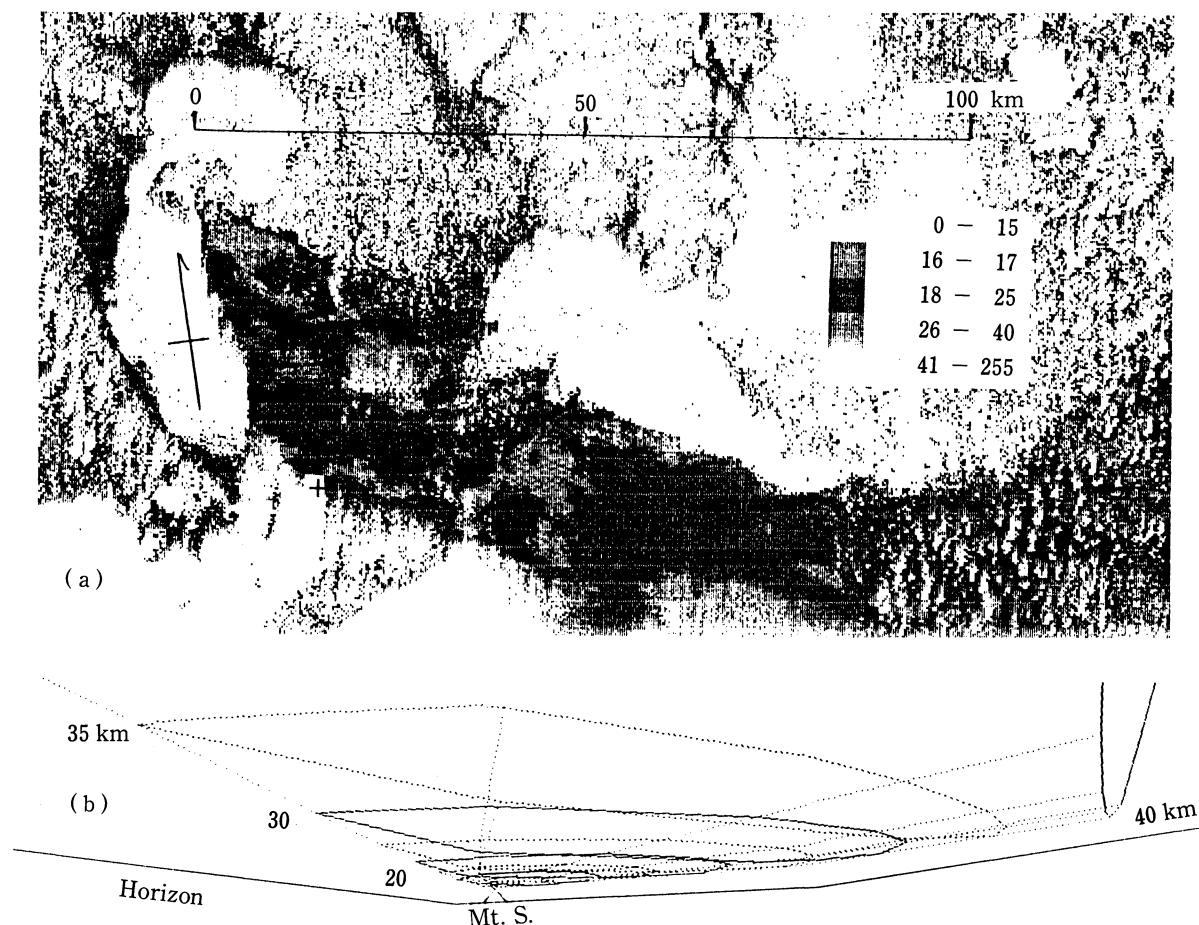


図11. (a) 90.2.9. 10:09の MSS Bd. 4 の輝度レベルスライスで、中間輝度を黒く強調。
 (b) 根占港 ((a) の+, 南岳は 40.75km, 方位角 346°) から見た90.2.9. 10:33の噴煙の輪郭図。風向331°, 煙流軸高度 1500m, 輪郭パラメータ $a=3$, $b=0.1$, $c=300$, $p=q=0.8$, $f=28\text{mm}$ の写真を3枚つないだものに対応。水平線の屈折は大きな仰角のため。

ですばまり、テニスラケットの様な形の水平分布が見られると期待される。図9に示す89.1.21はこれに近いが、噴煙放出強度の時間的変動による濃淡がある。やや弱い白煙の89.10.20は9時頃に上空の風向が急に変化したために煙流軸が約 10km で屈折しているが、20km 前後下流からは陸上にかかっていて薄いために判読困難である (図10)。

(vi) 広い帯状拡散

図 11a に示す90.2.9は大隅半島南部を越え中角度で拡がってから下流ですばまらず、横幅約 20km で煙流長は 100km を越えて日向灘を流れている。これは、初めの横広がりをもたらしたシヤーが大域的なものではなく、中・下流では大体そろった方向の風に乗って、それ以上広がらないからと考えられる。図 11b に根占港から見た90.2.9. 10:33の噴煙の輪郭図を示す。

(vii) 中幅の帯状拡散

弱風あるいは並風で、煙流高度に安定した顕著な鉛直シヤーがない場合、噴煙は支配的な風向に沿って流れるが、不安定な風向のゆらぎや弱いシヤーによって上流部からある程度の幅を持って、それがあまり広がらずに流れる場合がある。SPOT 画像の89.9.26, 89.10.6などがこれに当

たる。

4-3 上層風データ

今までの議論で, 観測例として図3~11に取り上げた衛星観測時刻に近い定時観測の高層気象データのうち,¹⁷⁾ 高度が約1000, 1500, 2000m に対応する900, 850, 800mb 面の風ベクトルを図12に示す。煙流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それぞれ実線,

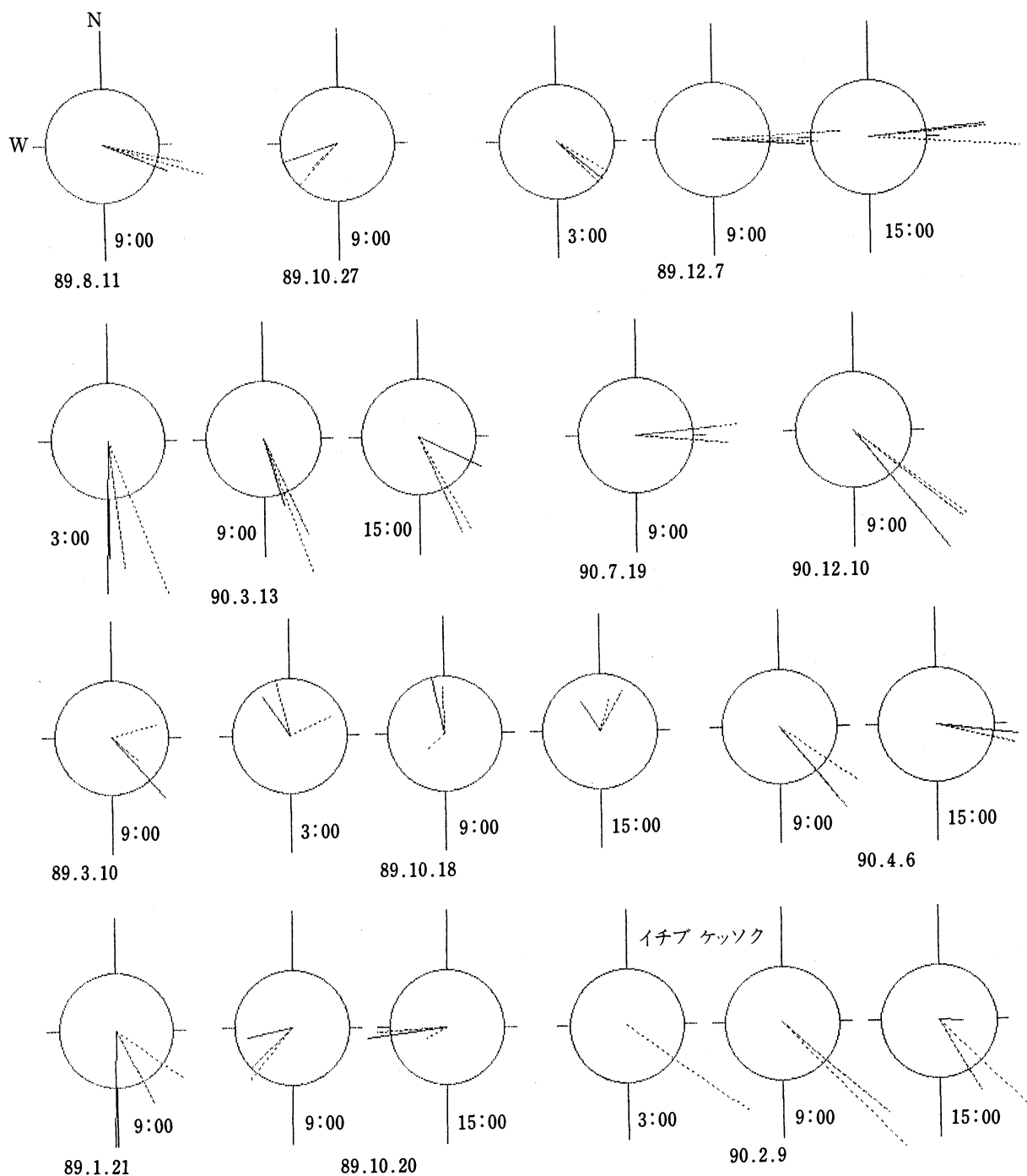


図12. 上層風のベクトル図. 風速 5m/s を表す円の中心からの実線, 破線, 点線はそれぞれ900, 850, 800mb 面の風速. 上2段は長流, 小幅, 小角度の場合をまとめて年月日順に示す. 第3段は大角度と滞留の場合. 第4段は中角度と広幅の場合.

破線、点線で表示する。サークルは風速 5m/s に対応し、弱風の指標である。南北方向の軸の先端は10m/s で、強風の目安となる。スケールの大きい噴煙流に対して3時や15時のデータも示してある。

上層風データの様相と4-2で議論した噴煙の拡散形態はかなり良く対応する。図12の上2段の9時のデータのうち、89.10.27は900mbと850mbの鉛直シヤーは中角度に近いが、他は風向が良く揃っており、強風かそれに近い。

第3段は弱風で鉛直シヤーが大きく、大角度や滞留の場合である。しかし、90.4.6の場合、9時と15時のゾンデ観測データでは、衛星画像に見られるような大角度の拡散に対応する鉛直シヤーははっきりしない。気圧配置によっては、上層風の様相が時間的に安定している場合と、6時間間隔では捉えきれない急激な変化がある場合を判別していく必要があるであろう。

第4段は中角度と広幅の場合であるが、後者の90.2.9は900mb等のデータが一部欠けているのが残念である。

4-4 濃度分布について

水平濃度分布が2-2で述べたような幅が単調増大する正規分布に適合するかどうか、簡単に議論しよう。強風の時は風向もそろっている場合が多く、89.12.7, 90.3.13など煙流軸に垂直な断面の輝度は、中央のピークがはっきりしており、定性的には正規分布に近い。これらでは煙流の中心軸上の濃度はゆるかな単調減少を示しているが、煙流の下流端で急に途切れる場合が90.12.10などある。後者では爆発噴煙に始まる連続的放出の結果である。

弱風や並風の場合、噴煙の鉛直幅の範囲での風向の違いによって、水平拡散の左右対称性が破れる事が多い。特に著しいのは図7などの大角度の場合であるが、小角度の図3cでも濃度の片方への偏りが見られる。水平拡散を支配するのはミクロな分子拡散や小さなスケールの乱流拡散よりも、さらに大きなスケールでの風向・風速の揺らぎや鉛直シヤーであると考えられる。しかし、正規拡散公式による分布形はこの問題を検討するツールとして有用である。一般に、噴煙拡散の空間的スケールに対応する長さの時間に、火口からの放出強度がほぼ一定で上層風の様相が変わらないという条件はかなり厳しく、正規拡散公式による取扱いは粗い近似となる場合が多い。濃度分布の詳細な統計的検討は別の機会に行う。

4-5 雲と噴煙の識別

衛星画像には快晴で噴煙だけが見られる事例も多いが、気象現象としての雲と共存するシーンでは、その識別が問題である。

夏期に多い一つのパターンは陸上で発生する積雲群で、900mb前後の高度の風向にそって沢山の雲の点列が平行に並ぶ。図3b, cの90.7.19, 89.8.11がこれに該当する。他に、91.7.18, 91.7.22, 91.7.26なども同様である。これらでは、噴煙流は桜島から始まる連続的な流れで、周辺部は薄くばやけている場合が多く、積雲が対流セルを反映してくっきりした斑状のパターンを示すのに対し区別しやすい。これは積雲の場合の分光反射輝度は最高部が殆ど飽和したフラット

木下, 細山田: 桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測

な分布を示すことに照応する。¹³⁾ また, 図 3b の LANDSAT 画像では風下の東方海上で積雲はほとんど消えているのに, 噴煙によると思われる非常に薄い広がりが見られる。これは 91.7.22 も同様で, エアロゾルが残るからと推測される。積雲の点列は, 90.3.3 など他の季節にも部分的に見られる。積雲が列状にならずに散在する場合も 91.4.15 などに見られる。

他方, 層雲の場合は面積が広く, 噴煙と重なると形態だけでは区別困難な場合が多い。例えば 89.6.4, 90.3.3 などがあるが, 91.8.7 の場合は中層雲の下を流れる噴煙の上流と下流が見え, 同じ画面の他の細長い形の雲とは方向が異なるから識別出来る。噴煙と層雲との区別が数値画像解析でどれだけ出来るか, さらに検討を要する。

雲が出来易い気象条件の時, 桜島の地形のために山頂付近で山雲が積雲状に発達することがしばしば見られる。朝夕は晴れていても, 衛星観測時刻の頃には山頂が雲で覆われて, 風上からは噴煙が判らない場合があり, 88.12.14, 88.12.19, 91.7.18, 91.7.22, 91.7.26 がこれに該当する。これらは別の方向から噴煙流を見るか, 近い時刻での状態から煙流高度を推測することによって表 3 のパラメータを得た。

5. 終 り に

衛星データから噴煙流の大きなスケールでの水平拡散が判る。これに地上観測と上層風のデータを併せ, その立体構造と拡散機構を解明することが出来る。LANDSAT, MOS に SPOT データも加わり, 既にかかなりの事例が蓄積されている。但し, 前 2 者は観測の日程が決まっているが, SPOT は狭い視野をどこに向けるかは可変でスケジュールは予告されておらず, 対応する地上データは十分ではなかった。しかし, 下流が視野からはみ出たものや山頂が雲で覆われているものも何らかの情報を含むものとして扱うことが出来た。

噴煙の拡散形態は, 典型的な場合としての①強風でシヤーが小さい場合の細く長い移流, ②弱風でシヤーが大きい場合の大角度拡散, ③安定した顕著なシヤーがない場合の広い帯状の拡散の他に, 中間的な形態についても 4-2 で類別を行った。また, 噴煙の放出強度も表 1 のレベル分けを行ったが, このような定性的分類の妥当性は, 更に多くの事例による検討が必要である。

噴煙の拡散機構は噴煙の鉛直幅の範囲での上層風の様相に支配されることが判ったが, 鹿児島湾岸からの視野を越えた遠方でも水平移流高度が変わらないのか, 鉛直幅はどう変化するかなど問題として残っている。また, 長距離移流の場合, 鹿児島でのゾンデ観測データの代表性も検討を要する。スカイラブからの同じ噴煙の 2 点撮影による立体写真データはこれらの問題に手がかりを与えるが,¹⁸⁾ 現在の無人衛星のリモートセンシングデータは変化する対象の立体観測には利用出来ない。遠赤外の数値画像解析による煙流高度推定の研究を進めることや, 噴煙下流の陸海空からの直接観測が有意義であろう。この稿では多くの事例の簡単な検討結果をまとめたが, 個々の事例について濃度分布など突っ込んだ定量的検討も重要であり, 別稿で順次報告して行きたい。

謝辞 齊藤誠一氏・白沢あずみ氏（日本気象協会気象情報本部）に、NOAA データ解析の共同研究に感謝します。また、研究過程での鹿児島リモートセンシング研究会の諸氏の助言と激励に感謝します。本研究は1990年度鹿児島大学南科研総合研究A「桜島に関する総合的研究」の一部であることを付記します。

参 考 文 献

- 1) First Int. Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, Seattle, Washington, July 8-12, 1991, Program and Abstracts, ed. by T. J. Casadevall.
- 2) 田中総太郎他, クウェート油田火災の煙, 日本リモートセンシング学会誌, **11**, 401, 1991.
重久陽亮, クウェート油田火災による環境汚染, 天気, **38**, No. 9, カラーページ, 1991.
- 3) 木下紀正, 桜島火山噴煙と大気拡散—序論的考察—, 鹿大教育学部研究紀要自然科学編, **41**, 1, 1989.
- 4) 木下紀正, 吉田潔, 桜島噴煙流の写真解析, 鹿大教育学部研究紀要自然科学編, **42**, 1, 1990.
- 5) 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.
- 6) 木下紀正, 細山田三郎, 齊藤誠一, 白沢あずみ, NOAA-AVHRR 画像にみる桜島噴煙拡散の地上観測との対比, 第11回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, p. 149, 1991.
- 7) Kisei KINOSHITA, Saburō HOSOYAMADA, Seiichi SAITOH and Azumi SHIRASAWA, Overwater Atmospheric Dispersion of Volcanic Smokes from Mt. Sakurajima observed in NOAA-AVHRR Data, Contribution to 1st. Pacific Ocean Remote Sensing Conference, Okinawa, August 1992.
- 8) 細山田三郎, 木下紀正, 塚田公彦, 桜島火山噴煙の移流と拡散, 鹿児島大学南方科学研究資料センター報告, 特別号第4号「桜島」, 1991.
- 9) 木下紀正, 坂本進悟, 超広角撮影の光学, 日本理科教育学会九州支部紀要, 19, A-5, 1991.
- 10) 最近の広角・超広角カメラについては, アサヒカメラ, 1991-6, p. 205.
- 11) 沢田可洋, 人工衛星画像における桜島火山の噴煙の特性, 第5回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, p. 31, 1985; 静止気象衛星「ひまわり」画像の噴火噴煙データにもとづく噴火活動の解析に関する研究, 気象研究所技術報告, **22**, 1987.
内藤恵吉, 沢田可洋, 衛星観測に基づく火山噴煙流の情報, 第8回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, p. 137, 1988.
- 12) 堤毅一, 増水紀勝, ランドサット画像に見る桜島噴煙の拡散, 日本リモートセンシング学会誌, **9**, 175, 1989, 及び引用文献.
- 13) 増水紀勝, 堤毅一, 人工衛星画像解析による桜島火山灰の分光特性, 第一工業大学研究報告, **2**, 11, 1990.
- 14) 石黒悦爾他, LANDSAT と MOS-1 データによる桜島噴煙とその降灰地域の検出, 第10回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, p. 197, 1990.
- 15) 徳野正巳, 松田学, 土屋清, 衛星赤外線データによる火山灰を含んだ雲の検出, 第9回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, p. 153, 1989.
- 16) 脇田安彦他, リモートセンシングデータによる鹿児島湾の水質評価への試み (第Ⅱ報), 県環境センター所報, **5**, 37, 1989.
- 17) 高層気象資料, 鹿児島地方気象台, 1987-1991.
- 18) J. D. Friedman et al., Observations of eruption clouds from Sakura-zima volcano, Kyushu, Japan from Skylab 4, J. Volcanol. Geotherm. Res. **1**, 305, 1976.