

# 桜島噴煙上昇の観測と解析

木下 紀正, 戸高 聖子\*

(1994年10月15日 受理)

## Observation and Analysis of the Rise of Volcanic Clouds from Mt. Sakurajima

Kisei KINOSHITA and Kiyoko TODAKA  
Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University

### Abstract

Video records of eruption columns from Mt. Sakurajima were taken and analyzed phenomenologically, so as to understand their developments. The second polynomial fit in time was found to describe fairly well the rises of them and also stationary plumes, except for a few seconds at the beginning of the eruption.

### § 1. はじめに

日本はプレートの沈み込み帯に位置し、多くの火山が存在する国である。中でも九州は活火山のショーウィンドウの観があり、最近の各種衛星データからも桜島・阿蘇・雲仙普賢岳の噴煙・火砕流煙や南西島弧に点在する薩摩硫黄島・諏訪之瀬島などの火山噴煙が検出されている<sup>1)</sup>。これらの中で、山頂から500~1000mの高さの噴煙は桜島では珍しくないが、他の火山では阿蘇中岳・雲仙普賢岳・諏訪之瀬島御岳の非常に活発な活動期に限られている。

桜島噴煙の移流と拡散については、これまで地上観測や衛星データを素材に各種の解析を行ってきた<sup>2-4)</sup>。また、噴煙と共に放出される大量の火山ガスの指標であるSO<sub>2</sub>の長距離移流<sup>5)</sup>や山麓への吹き降ろし<sup>6)</sup>について気象条件との関連を解析し、下流での対流混合についても検討が進みつつある<sup>7,8)</sup>。これらは、地表に近い大気境界層とその上部の自由大気にわたる大気拡散の様相についてのユニークな基礎資料として、大気汚染や酸性雨など地球環境問題の解明に資すると考えられる<sup>9)</sup>。

他方、桜島南岳からの噴煙放出と上昇発達については文献<sup>2)</sup>で部分的検討を行ったのみであり、そこでまとめた様に、これまでの火山研究者の成果を併せても全容の解明には到っていない。類似の課題として、人工煙源からの排煙上昇については大気汚染との関連で多くの研究があるが、煙源の高さは300m以下に限られ、煙流高度も殆ど混合層内に留まっている<sup>10)</sup>。その初期の研究を出発点に、火山大爆発で成層圏に貫入する様なプリニー式噴火の巨大噴煙柱の上昇発達の研究がなされているが、観測の機会が少ないために事例が極めて限られている<sup>11)</sup>。そこで、この稿ではブルカノ式噴火とされる桜島南岳の爆発的噴煙の1990年の観測データを主に、1993年の若干のデータを加え、

噴煙の上昇発達の現象論的解析について報告し、定常噴煙との比較検討も行う。§ 2 で噴煙の分類、観測と解析の方法、取り扱うデータの範囲などを述べる。解析結果は§ 3 にまとめ、統計的考察などを行う。結論と残された課題については§ 4 に述べる。

## § 2. 噴煙の様相と観測・解析の方法

### 2-1. 噴煙の分類

京大防災研究所桜島火山観測所では、空気振動0.1hPa以上で地震最大振幅 $10\mu\text{m}$ の噴火活動を爆発と定義し、鹿児島地方気象台では爆発地震と爆発音・体感空振・噴石の飛散・空振計記録から爆発を定義し、爆発に達しない強度だが中量以上の噴煙を伴う場合を噴火と呼ぶ。これらの定義は活動の激しい桜島に対するもので、全国の火山に共通ではない。そこで、ここでは遠望観測による噴煙放出の時間変化の違いによる定義として、噴火も含めて、時間的に孤立した爆発的噴出によるものを広義の爆発噴煙と呼ぶことにする<sup>2)</sup>。他方、連続的に放出される噴煙は、噴出強度の時間変化の程度により、さらに定常噴煙と断続噴煙に分類する。定常噴煙は噴出強度がほぼ一定であるため、煙の形が時間的にあまり変化しない。断続噴煙は小規模の爆発の断続的活動により、幾つかの噴煙が並びながら風に流されて変化して行く場合などがあり、下流で拡散すると定常噴煙との区別は困難になる。噴煙放出の形態についての典型的な例を図1に示す。これらは後で述べる解析の対象であるが、爆発の噴煙柱と定常噴煙の水平移流が噴煙の特徴的な形態といえるだろう。

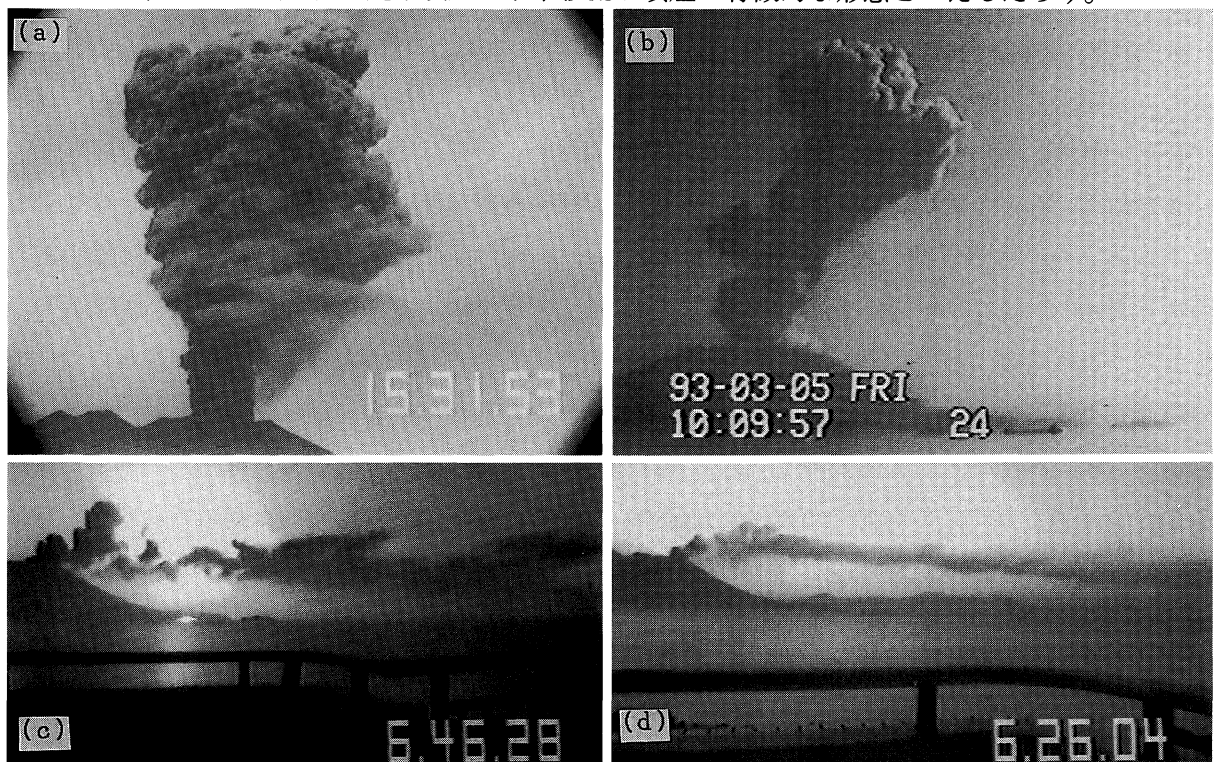


図1. 噴煙放出の基本形態. 爆発噴煙(a)90-06-10B, (b)93-03-06 ;  
断続噴煙(c)90-04-02 : 定常噴煙(d)90-03-13.

## 2-2. 噴煙の様相

桜島の様なブルカノ式噴火では、高温高压で溶岩中に溶け込んでいた火山ガスが火道内を上昇すると共に圧力低下で急激に発泡し、山頂近くの火口底または火道内で固化しかけた溶岩を吹き飛ばして起こると考えられている。噴煙は上空数千メートルまで上がり、砕けた溶岩の破片が弾道を描いて火口周辺の数 km 内に落下し、火山礫・火山砂も放出される。爆発噴煙は大量の粗粒・細粒の火山灰を含むので黒っぽいが、水分を主とする火山ガスも気体状で放出され、CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl や様々な化学物質を含んでいる。断続噴煙は小規模の爆発噴煙のような性質で黒灰色の場合が多いが、定常噴煙では火山灰の量によって様々な明度を呈する。雲の様な白色噴煙の場合でも、種々の化学物質や火山灰の微粒子を含んでおり、下流では SO<sub>2</sub> が酸化され水分を捕捉して硫酸エアロゾルとなって数百 km も移流しているのが衛星画像で認められる場合がある。図 1 (b) ではちょうど爆発時の噴煙が LANDSAT-5 に捉えられ、図 1 (c), (d) の場合はそれぞれ 14 時の NOAA-11, 10 時の LANDSAT-5 の衛星画像に移流・拡散した状態で捉えられている<sup>4)</sup>。

この稿では、爆発噴煙柱の高度の時間変化に絞って検討する。爆発初期には噴煙の放出速度が重要であるが、噴煙上昇の支配的要因は初期の高温と水蒸気の潜熱放出による浮力であると考えられる。上昇過程で周辺大気を取り込み、粒の大きい火山灰から離脱が始まる。爆発噴煙の表面は細かい模様からぼんやりした輪郭に変化することから、乱流の発達と衰退が良く判る。図 1 (a), (b) は噴煙が良く発達し最高到達高度に達する前後の状態である。

桜島の爆発噴煙の到達高度は、海拔 1040m の南岳山頂からさらに 1000~3000m であり、4000m 前後にまで上昇する事は年に数回程度である。爆発噴煙は強風時でも急速に上昇することから、上層の風速・大気状態よりも放出熱量が支配的要因であると考えられる。

## 2-3. 観測方法

爆発噴煙の急速な発達を記録するのにビデオカメラは適しており、本稿では爆発時のビデオ映像を元に噴煙柱の解析を行う。写真と異なり、ビデオ撮影では運動の様子を連続的に捉えることが出来る。後の解析に必要な、秒までの時刻表示も可能である。日付の表示も出来るが、これは撮影の前後に記録しておけばデータの整理に便利である。こうして撮影したテープは、何度でも繰り返して再生出来る。早送りサーチ、スローモーション、コマ送りの機能は、解析に非常に役立つ。連続撮影では 30 画面/秒の時間分解能で、火山雷や噴石の運動を写し込むことも出来る。但し、テープの量が膨大になる前に、保存する場面だけを取り出す編集作業が必要である。噴煙の放出から最高高度に発達するまでの動態の把握には、インターバル録画によって時間変化を圧縮して記録するのも良い。この稿で解析したデータの大部分はインターバル録画によるもので、中には時間間隔が空き過ぎて爆発初期の詳細な解析には適さない事例もある。それでも、発達の途中から最高点に達するまでの情報を得ることは出来る。一日多くて数個で、全く無いかも知れない爆発事象を整理するには、連続撮影では多大の時間と労力を要する。信頼性の高い噴火の予知情報により爆発時だけ

撮影すれば、連続記録でも良いであろう。また、普通の写真撮影では、時刻を写し込み年月日は別途メモして置けば、ランダムファイルとしてビデオ記録の検索の助けとなる。

撮影では、噴煙の高さがわかるように画面から空間的スケールやビデオの方向が読み取れるものが写し込まれている事が望ましく、桜島では海岸線と山頂が噴煙の全景とともに一画面に収まるようにする。スケールになる物を写し込めなくても、撮影位置とレンズの焦点距離がわかっているならばスケールを割り出すことが出来る。連続ズームで焦点距離が不明にならない様に、幾つかの決まったf値の切り替えに限り、カメラの向きやズームを動かす回数を少なくしておくことは解析を容易にする。爆発初期の記録にはクローズアップが良いが、海岸線がフレームの外ならば山頂部の輪郭から空間的スケールを判読する。噴煙の映像観測の諸問題については別稿(12)で議論している。

#### 2-4. 撮影機材とシステム

解析したデータの大部分は観測定点B(鴨池港近傍建物, 海拔約26m, 南岳は方位角 $71^\circ$ , 距離9.8 km)からの1990年1年間の記録である。この期間の定常噴煙については気象衛星NOAA-11画像との対応などで集中的に解析している。<sup>4)</sup>ビデオカメラは主にSONY HVC-2800(2/3インチ, 焦点距離 $f=10.5-84\text{ mm}$  F1.4)を使用し、レンズには0.5倍のワイドコンバータ(シグマVW-05)をつけ、ビデオデッキSONY SL-B5に接続し、カメラコントロールタイマー(SONY HVR-100 T)を使用してインターバル撮影した。このカメラは大型で解像度は最近のものより劣る1982年製で、撮像管方式のため太陽を写し込む危険を避けねばならないが、定点観測の為の基本的機能は備えており、1992年1月まで持ちこたえた。他に、小型のビデオカメラSONY CCD-TR 55(1/2インチ,  $f=11-66\text{ mm}$  F2.0)に0.54倍のワイドコンバータ(SONY VCL-0537)をつけ、リモートコントローラー(SONY RMT-155)を使用してインターバル撮影した記録も用いた。B点からのデータでは、他に1993年3月5日のLANDSAT-5観測時の爆発の詳しい記録を解析した。これはビデオカメラSONY CCD-V 88(1/2インチ,  $f=12-72\text{ mm}$  F1.6)にワイドコンバータ(シグマVW-05)をつけ、タイムラプスビデオデッキ(SONY SVT-5000)で記録したものである。さらに、定点A(鹿大教育学部理系棟屋上, 海拔約30m, 南岳は方位角 $82^\circ$ , 距離10.8 km)からの1993年12月の若干の撮影記録も解析した。これはビデオカメラSONY CCD-TR75(1/2インチ,  $f=8.5-68\text{ mm}$  F2.0)を使用しRMT-155によってインターバル撮影したものである。

#### 2-5. 計測方法

撮影した噴煙の画像はテレビプリンター(三菱SCT-P50)で感熱紙にハードコピーをとった。ビデオ画像は、 $100\times 84\text{ mm}$ のサイズに白黒でプリントされる。噴煙が初めて認められた時刻から上昇して減衰を始めた頃までの画像を、データとして扱った。10秒程の細かい間隔でプリントしてみたが、グラフを書いてみると20~30秒程度の間隔で十分なようだった。ただし、噴煙の出始めの上昇速度の速い段階や、爆発の瞬間、直後から撮影できているものについては、細かくプリントすることにした。

計測には、前に定常噴煙の解析に用いたプログラム<sup>3)</sup>を、噴煙流の代わりに桜島南岳から風下方向に向かう鉛直面のメッシュを描くように改造して用いた。これはメッシュのスケールと範囲、風向とカメラの向き及びワイドコンバータの効果を含む有効焦点  $f$  を入力して図2の様なコンピュータグラフィックを描き、パラメーターを容易に変更できる様にしたものである。ビデオ画面とのスーパーインポーズは、ビデオのポーズが同期信号を乱して困難なので用いず、パソコン画面をトレーシングペーパーにプリントし、画像プリントを重ねて比較した。山頂、海岸線と風向が一致すれば、爆発噴煙はその頂上を、定常噴煙は上昇する特徴的な一部分を計測した。白黒のプリントでは噴煙と空との境界が分かりづらい場合があるが、明け方の撮影では噴煙のシルエットがはっきり写るので計測し易い。モニター画面に比べハードコピー範囲は少し狭く、左に偏っていたので、図2の点線枠に対する実線枠を重ね合わせに用いた。

南岳は標高1040mであるが火口縁は高低があり海拔1000m前後であるので、噴煙高度は海拔1000mの煙源高度からの高さとして表現する。なお、現在活動している南岳の火口はA・B 2つあり、A火口は、直径500~600m、深さ200mのすり鉢状である<sup>13)</sup>。B火口はその南東の縁に存在し、深さ200~300mの円筒状で、火口底は海拔700~800mにある。A火口底の高度830mと比較すると、B火口の方がやや深い。この解析では2つの火口の区別はしていない。山頂に雲がかかって火口の位置が分からない時など、大きな爆発の初期状態が判らない場合もある。

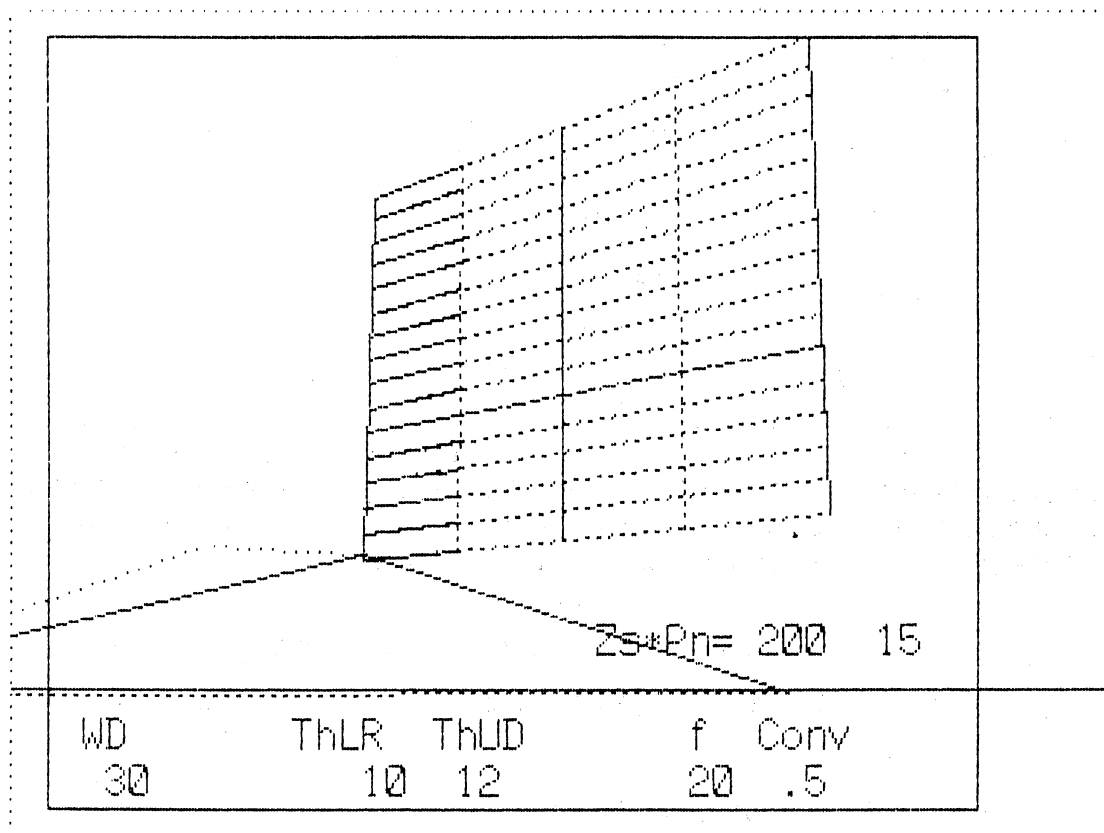


図2. 桜島南岳から風下に向かう鉛直面のメッシュ図形の例。格子間隔は鉛直方向200m, 水平方向1 km. その他のパラメータについては文献3)を参照。

## § 3. 解析結果と考察

## 3-1. 各事象の取り扱い

爆発噴煙がビデオ記録で初めて認められた時刻を  $t=0$  とし、海拔1000mからの噴煙高度  $h(t)$  の実測値をグラフ化する。大部分のデータはインターバル記録なので  $h(0) > 0$  であり、噴煙の出た直後から撮影しているものだけでなく、噴煙が幾らか上昇してから撮影しているものが多い。 $t=0$  に最も近く爆発噴煙の認められない時刻を直前時刻  $t_-$  としてメモしておく。噴煙頂部の上昇速度  $v(t)$  は、簡単に

$$v(t_k) = (h(t_{k+1}) - h(t_k)) / (t_{k+1} - t_k) \quad (1)$$

として求める。スケールを合わせるため、これに100秒をかけた量  $v[\text{m/s}] \cdot 100 \text{ s}$  を  $h[\text{m}]$  と同じグラフに描き、現象の特徴をつかむ。データの例として、噴煙上昇のグラフを図3に示す。

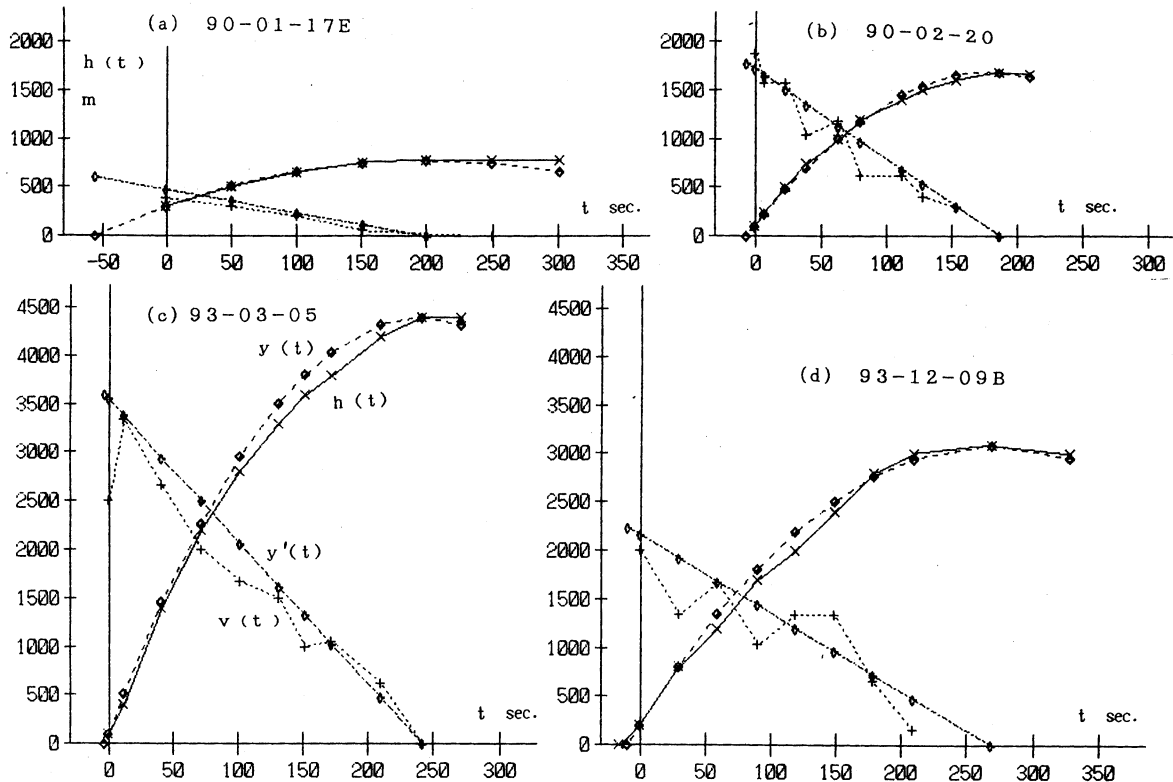


図3. 噴煙上昇の時間依存性の例。定常噴煙(a)と、爆発噴煙(b), (c)及び(d)。実線は計測した煙頂高度  $h(t)$ 、破線は二次曲線による近似式  $y(t)$ 。  $h(t)$  から差分で求めた速度  $v(t)$  と  $y'(t) = dy/dt$  は100 s の間の上昇距離に換算して点線と一点鎖線で表示。(d)では  $t < 0$  の直前時刻  $t_-$  も表示。

一般に、爆発噴煙の上昇は段々と減速し、最高点  $h = H_{\max}$  に達する。解析したデータの  $h(t)$  の実測値のグラフの多くは二次曲線で良く近似できることがわかった。そこで、 $t=0$  と最高点で実測値  $h(t)$  に一致する二次曲線

$$y(t) = -a(t-t_0)^2 + c, \quad c = H_{\max}, \quad a = (c - h(0)) / t_0^2 \quad (2)$$

を求める。図3では、 $y(t)$  を破線のグラフで示す。また、これから求めた速度

$$y'(t) = dy/dt = 2a(t_0 - t) \quad (3)$$

のグラフも100 sをかけて m 単位で示してある。

$y(t)$  を  $t < 0$  に外挿して,  $y=0$  の時刻  $t_i$  と, その時の速度  $v_i$  を

$$t_i = t_0 - \sqrt{c/a}, \quad (4)$$

$$v_i = 2a(t_0 - t_i) = 2\sqrt{ac} \quad (5)$$

から求めた。直前時刻  $t_-$  との前後関係  $t_- < t_i < 0$  を満たしている事は, この外挿の必要条件として確認しておく。なお,  $y=0$  は海拔1000mの火口縁であり, 火口底はこれより200mあまり低いので, 厳密に云えば火口底における爆発時刻と放出速度はこれらと区別される。

上述の二次曲線による噴煙上昇の表現が妥当であるとすれば, 初速度  $v_i$  と減速率  $a$  がダイナミカルなパラメーターで, 最高高度  $c$  と到達時間  $t_m = t_0 - t_i$  が

$$c = v_i^2/4a, \quad t_m = \sqrt{c/a} \quad (6)$$

によって決まるという関係にある。これは近似的表現であることに留意しつつ, これらのパラメーターを用いて以下の検討を進める。

### 3-2. データのリスト

表1に計測した爆発噴煙52例のリストを示す。1990年については記録した全データから解析できる事象を選んだ。結果として,  $H_{\max}$  がほとんど1200m以上の爆発噴煙である。1993年については顕著なもの4例である。一日に複数個ある場合はアルファベットを付けて区別する。計測は秒単位で整理しているが, 表では  $t=0$  の時刻を時分で示し, 各事象の最高到達高度  $H_{\max}$ , 二次曲線として求めた  $h=0$  の速度  $v_i$ , 減速率  $a$  を示す。記号#をつけた事象31例は,  $h(0) < H_{\max}/3$  の条件を満たし, ある程度短い間隔で撮影記録がなされているものである。

爆発噴煙と比較するため, 定常噴煙13例につい

表1. 爆発噴煙上昇のパラメーターリスト

Event/Date (# = Selected)	Time	$H_{\max}$ m	$v_i$ m/s	$a$ m/s <sup>2</sup>
90-01-08 #	7:59	1900	14.6	0.028
90-01-11 #	10:04	2900	23.8	0.049
90-02-20 #	17:19	1700	17.6	0.046
90-02-24	17:00	2950	33.9	0.097
90-03-17 #	7:08	1600	21.3	0.071
90-04-02 #	7:15	2000	13.8	0.024
90-04-26A	9:04	1600	13.5	0.028
90-04-26B #	9:09	2000	13.0	0.019
90-04-26C #	9:16	2600	25.5	0.062
90-04-26D #	13:26	2600	15.3	0.023
90-04-27 #	11:08	3500	31.2	0.070
90-04-29	11:46	1800	10.9	0.017
90-05-01A	12:21	1900	17.3	0.040
90-05-01B #	13:36	2600	24.9	0.060
90-05-05	17:28	1600	15.5	0.070
90-05-06A #	9:05	1800	15.0	0.031
90-05-06B #	10:02	2500	17.2	0.030
90-05-06C #	10:47	1800	21.2	0.062
90-05-06D	13:54	2100	22.8	0.062
90-05-06E #	14:36	1850	19.5	0.051
90-05-06F #	15:54	1200	12.8	0.034
90-05-22 #	12:07	1200	31.5	0.207
90-05-25 #	10:11	3800	25.9	0.044
90-05-27	17:14	3200	28.8	0.065
90-06-10A #	9:08	1300	13.2	0.034
90-06-10B	15:24	3300	13.5	0.014
90-08-18 #	5:40	3800	21.0	0.029
90-09-15	17:09	1600	32.0	0.160
90-10-01A #	17:00	1250	7.6	0.012
90-10-01B	17:05	1200	6.7	0.009
90-10-02A #	7:17	2000	21.5	0.058
90-10-02B	10:01	3800	31.3	0.064
90-10-28 #	6:44	2000	19.6	0.048
90-11-12A	6:11	1050	8.8	0.019
90-11-12B #	6:57	1450	15.8	0.043
90-11-12C	8:30	1600	23.6	0.087
90-11-13	15:12	1600	4.2	0.003
90-11-23A	15:13	1600	11.1	0.019
90-11-23B #	16:42	2600	21.8	0.046
90-11-24	12:48	1800	17.9	0.045
90-11-25	9:18	1400	21.1	0.079
90-11-30 #	8:58	2550	16.6	0.027
90-12-07A	16:11	1200	11.9	0.029
90-12-07B #	16:22	1600	16.9	0.045
90-12-07C	16:46	1450	3.1	0.002
90-12-07D	16:58	1700	17.2	0.043
90-12-10 #	11:12	1400	14.1	0.035
90-12-24	12:44	2600	34.4	0.113
93-03-05 #	10:04	4400	36.0	0.073
93-12-09A #	12:51	2400	24.5	0.062
93-12-09B #	13:36	3100	22.3	0.040
93-12-12 #	9:01	2800	30.1	0.081

て解析したリストを表2に示す。これらは適度にクローズアップした逆光のシーンで、1990年の記録から選んだものである。定常といっても若干の脈動があり、突起部が次々と上昇するので、表2で事象として区別していても時間的には重なっているものが多い。着目した部分の高度変化を爆発噴煙と同様に二次曲線に対応させて3つのパラメーターを求めた。90-7-20では風が弱くて噴煙がかなり鉛直に上昇しているが、90-1-17と90-3-13では6-9m/sの上層風があり、斜めに上昇している。

爆発噴煙のグラフ全体を通して言えることは、噴煙柱は始めは急速に上昇し、 $H_{\max}$  付近でゆるやかに上昇することである。二次曲線のグラフを重ねて描くと、実測値によく合っている場合が多い。特に噴煙が立ちのぼって行く始めの部分が、よく合っている。ただ $H_{\max}$  付近では上昇がゆるやかになるために、実測値が二次曲線の値をやや下まわる傾向がある。また噴煙の立ちのぼった時間については、初めて認められた噴煙の高さ  $h(0)$  が高いものほど、実際の値と外れていると思われる。 $h(0)$  と  $H_{\max}$  の2点をとって二次曲線を書いたので、 $h(0)$  と  $H_{\max}$  の差が小さいとゆるやかな曲線になる。始めは割合に急な角度で上って行くはずである。

全体として上昇速度  $v(t)$  は次第に落ちて行くが、実測値は一定した割合で減速していない。噴煙が一定の噴出割合を持つかは分からないので、むしろこれは自然現象らしいのであろう。グラフでは、二次曲線から導いた  $y'(t)$  によく沿っているものもあった。定常噴煙についての事例は少ないが、同様に二次曲線のグラフで近似されると考えられる。

表2. 定常噴煙の上昇パラメーターリスト

Event/Date	Time	$H_{\max}$ m	$v_i$ m/s	$a$ m/s <sup>2</sup>
90-01-17A	7:06	800	10.6	0.035
90-01-17B	7:08	700	4.7	0.008
90-01-17C	7:12	850	9.5	0.027
90-01-17D	7:17	850	8.4	0.022
90-01-17E	7:18	780	6.1	0.012
90-03-13A	7:33	1075	12.9	0.039
90-03-13B	7:35	1075	12.3	0.035
90-03-13C	7:40	1000	9.3	0.021
90-03-13D	7:41	1100	12.5	0.036
90-03-13E	7:43	975	11.6	0.034
90-03-13F	8:19	1025	12.0	0.035
90-07-20A	5:56	800	6.9	0.015
90-07-20B	5:58	1000	6.2	0.010

### 3-3. 噴煙上昇の平均的特徴

解析した爆発噴煙と定常噴煙についての統計量を表3に示す。爆発噴煙については解析した全事例52例 (Erup/All) と、その中の詳細データ31例 (Erup/Sel) とは平均的にはあまり変わらなくて、 $v_i=20\text{m/s}$  程度で放出され、 $H_{\max}=2000\text{m}$  余りに達するが、個々の爆発による違いは大きい。これは、爆発の規模や性格の違いと、周辺大気の状態の違いが影響するためと考えられる。定常噴煙 (Stationary) は3日についてだけのデータで事例数が少なく、様々な場合を尽くしている訳ではないが、この範囲ではバラつきが少なく、 $v_i$  は爆発

表3. 噴煙上昇パラメーターの統計量

Samples	Erup/All 52	Erup/Sel 31	Stationary 13	
Hmax m	Av.	2139	2265	925
	S.D.	802	816	128
	Max.	4400	4400	1100
	Min.	1050	1200	700
$v_i$ m/s	Av.	19.3	20.2	9.4
	S.D.	7.8	6.4	2.7
	Max.	36.0	36.0	12.9
	Min.	3.1	7.6	4.7
$a$ m/s <sup>2</sup>	Av.	0.0501	0.0498	0.0252
	S.D.	0.0361	0.0334	0.0108
	Max.	0.2066	0.2066	0.0389
	Min.	0.0016	0.0115	0.0079



噴煙の約半分、 $H_{max}$  は1000m 程度である。図4に火口縁で  $t_i=0$  と置いた時の爆発噴煙と定常噴煙の平均的な振舞いを二次関数  $y = -a(t-t_m)^2 + c$  で表したグラフを示す。平均値の  $a$ ,  $c$  から求めた最高高度への到達時間  $t_m$  は、それぞれ

$$t_m = 207, 213, 192 \text{ [sec.] for Erup/All, Erup/Sel, Stationary}$$

となっており、あまり変わらない。ところで、一定の風速の横風に流されながらこの式に従って上昇するのであれば、噴煙頂部の軌跡は空間的にも二次曲線を描くことになる。爆発噴煙の形は時々刻々変化するので軌跡をイメージするのは困難であるが、定常噴煙はこれに近い振舞いがしばしば見られる。

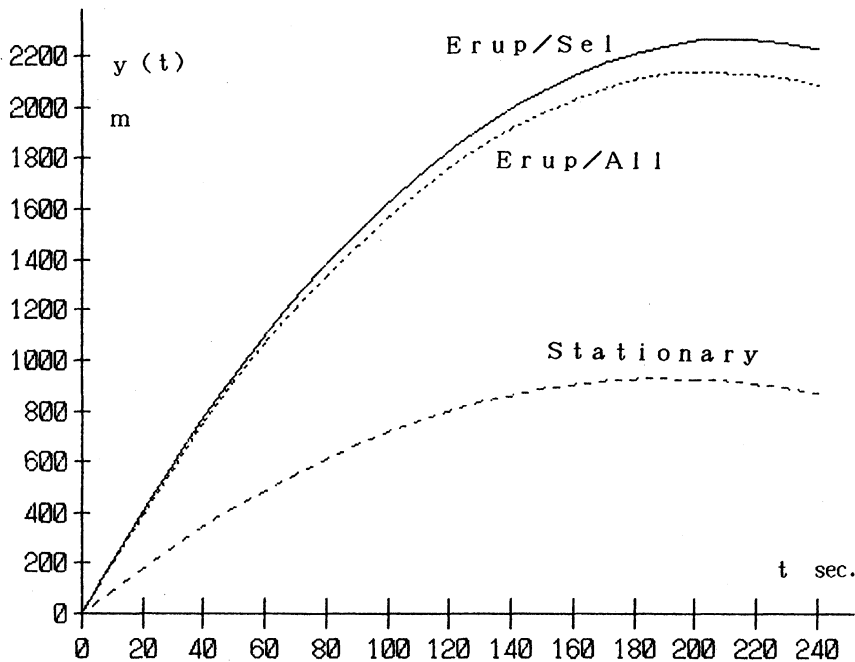


図4. 噴煙上昇の平均的振舞い。パラメーターは表3に示す平均値による。

### 3-4. 上昇パラメーターの相関

次に、最高到達高度と減衰率・初期の速度の相関を検討する。爆発噴煙のうち、表1で#をつけたもの31例について、 $H_{max}$  と  $v_i$ ,  $a$  の間の相関分布を図5に示す。図中の実線は回帰直線である。最高到達高度  $H_{max}$  は実測値であるが、 $h=0$  の速度  $v_i$  と減衰率  $a$  は二次曲線として求めた量であるので、比較的詳しい記録の得られた事象に限ってグラフに示したが、相関係数は表4に示す様に測定した全事象52例についても同様である。 $a$  の値は、ほとんどが0.01から0.10の範囲にあると言える。詳しく見ると、噴煙が同じ高さだけ上昇していても、 $a$  の値にはバラつきがある。高く上昇した噴煙柱の  $a$  の値の方が大きいとも考えられるが、図3で見られるように、3000m 台でも  $a$  が小さかったり、1000m 台でも  $a$  が大きかったりしており、 $H_{max}$  と  $a$  はほとんど相関がない。しかし、 $v_i$  は  $H_{max}$ ,  $a$  それぞれとかなりの正の相関がある事が図5及び表4から判る。これらは非常に強い相関ではないので、 $H_{max}$  と  $a$  の無相関と矛盾しない。

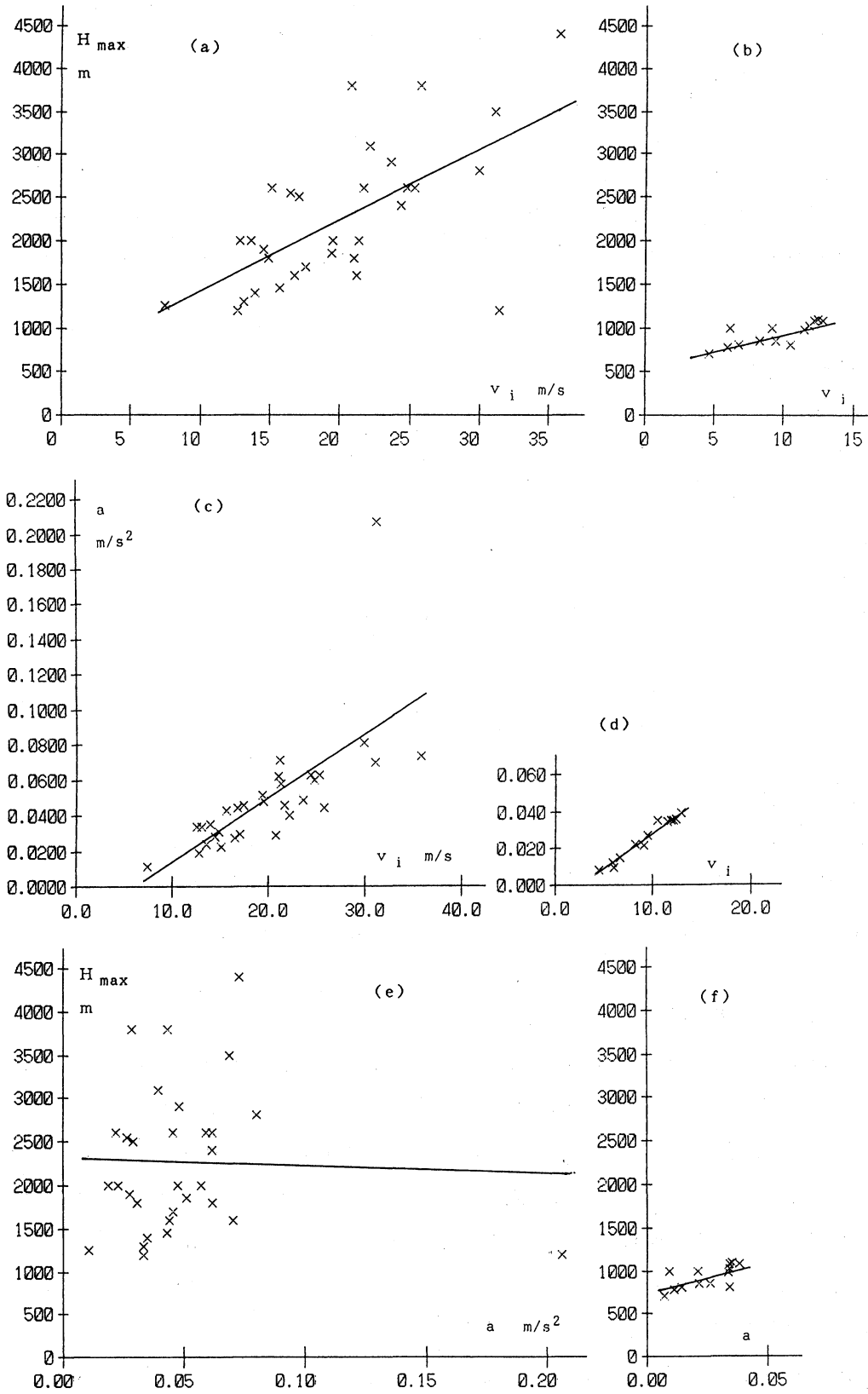


図5. 爆発噴煙# (a, c, e) と定常噴煙 (b, d, f) についての相関分布と回帰直線。

(a), (b)は $H_{max}$  と  $v_i$ , (c), (d)は  $a$  と  $v_i$ , (e), (f)は  $H_{max}$  と  $a$ 。

ここで得られた相関関係は、物理的意味を次の様に考えることが出来る。大規模で  $v_i$  の大きな爆発噴煙は当然  $H_{max}$  が大きい。また、 $v_i$  が大きいと周辺大気との混合による減速が大きく、 $a$  との正相関が得られる。しかし、噴煙上昇過程における周辺大気との混合は上層風の高度による変化に強く影響される。また、爆発噴煙のエネルギーと持続性、水蒸気量と温度、固形成分の比率など、個々の事象についての違いも問題である。これらの要因で相関関係にバラつきが生じ、 $H_{max}$  と  $a$  とは相関が見られない程になる。

表 4. 噴煙上昇パラメーターの相関係数

	$H_{max}, v_i$	$a, v_i$	$H_{max}, a$
Erup/All	0.62	0.78	0.08
Erup/Sel	0.64	0.69	-0.04
Stationary	0.76	0.98	0.63

爆発事象の個性を考える資料として、減速率の特に大きい90-5-22を見よう。この事例では  $v_i$  も大きいにも拘らず、 $H_{max}$  は僅か1200mであり、小規模の割りに激しい爆発であったことを窺わせる。実際、これは鹿児島地方気象台の観測によると年初以来の最も激しい爆発で、噴石を5合目まで飛ばしている。ビデオ記録では、強風で斜めに上昇しながら吹き流されている。この爆発の前後の9, 15時の高層観測では、山頂から500-1000mにあたる850-800 hPaでは15m/s前後の強風となっている。他方、強い上層風にも拘らず2000m以上に達する事例もあり、放出熱量が大きいためと考えられる。

爆発と高層観測の時刻は一般に異なり、その間に上層風がかなり変化する場合がある。また、山頂から爆発噴煙の到達高度までの間の風向・風速の高度依存性は大きいのが一般的である。ここでは最も簡単に、爆発の3時間以内の高層観測資料の得られた50例について、山頂から約500m上空の850 hPaの風速との相関を図6に示す。強風ほど上昇が抑えられるという傾向は見られるが、爆発の個性によるバラつきは大きく、相関係数は-0.10である。なお、この中では上に述べた90-5-22は10 m/sに対応しているが800 hPaでは20 m/sの強風が続いており、850 hPaの代表性はあまり良くない。気象条件による周辺大気との混合の影響の取り扱いは今後の課題である。

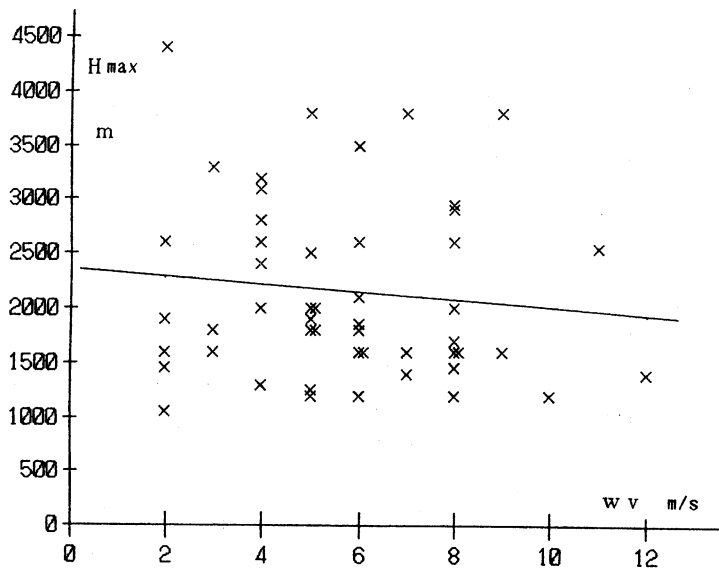


図 6. 爆発噴煙の到達高度と上層風速 WV (850 hPa, 最近接時間) の相関分布と回帰直線.

## 3-5. 爆発の初期

爆発の瞬間が撮影できているものはほとんど無く、また、火口の深さも200~300mあるため、爆発時刻の確定は難しい。よって、爆発の初速度  $v_i$  は真の意味での初速度ではない。初速度を調べることは、桜島の爆発噴煙における浮力よりも爆発の運動量が支配的なガス推進域 gas thrust region があるか、ということの手掛かりになる。そこで爆発初期が撮影できた1993-3-5と、同じく爆発の瞬間を捕らえていた1990-5-25, 1990-5-27のNHK ニュース映像を、ビデオデッキのコマ送りの機能を使って細かい時間間隔で解析し、 $h(t)$ 、 $v(t)$ を求めた。 $t=0$ で $h(0)=0$ として、結果を図7に示す。更に、 $y(t)$ をインターバル撮影の解析から求めた表1のパラメーター  $a$ 、 $H_{\max}$ を用いた二次曲線の外挿として、 $t=13\sim 16$  [sec.] で $y(t) \cong h(t)$ となるようにして $t_0$ を定めた $y(t)$ 、 $y'(t)$ も図7に示す。上昇速度 $v(t)$ と $y'(t)$ は、スケールを同程度にするため、10秒間の上昇距離に換算して表示している。

結果は、爆発の初めはどれも二次曲線の $y=0$ への外挿よりも急速な上昇を示しているが、5~10秒後には $h=300\sim 600$ mで二次曲線の結果と殆ど一致する。外挿による $y=0$ の時刻は $t_i=-2\sim -5$ 秒であり、噴煙が最高点に到達するまでの約200秒に比べれば僅かである。(b)、(c)では初速度 $v_i=191, 300$ m/sが得られ、(a)の60m/sはもっと詳しく見ればこれらに近いと思われる。何れに

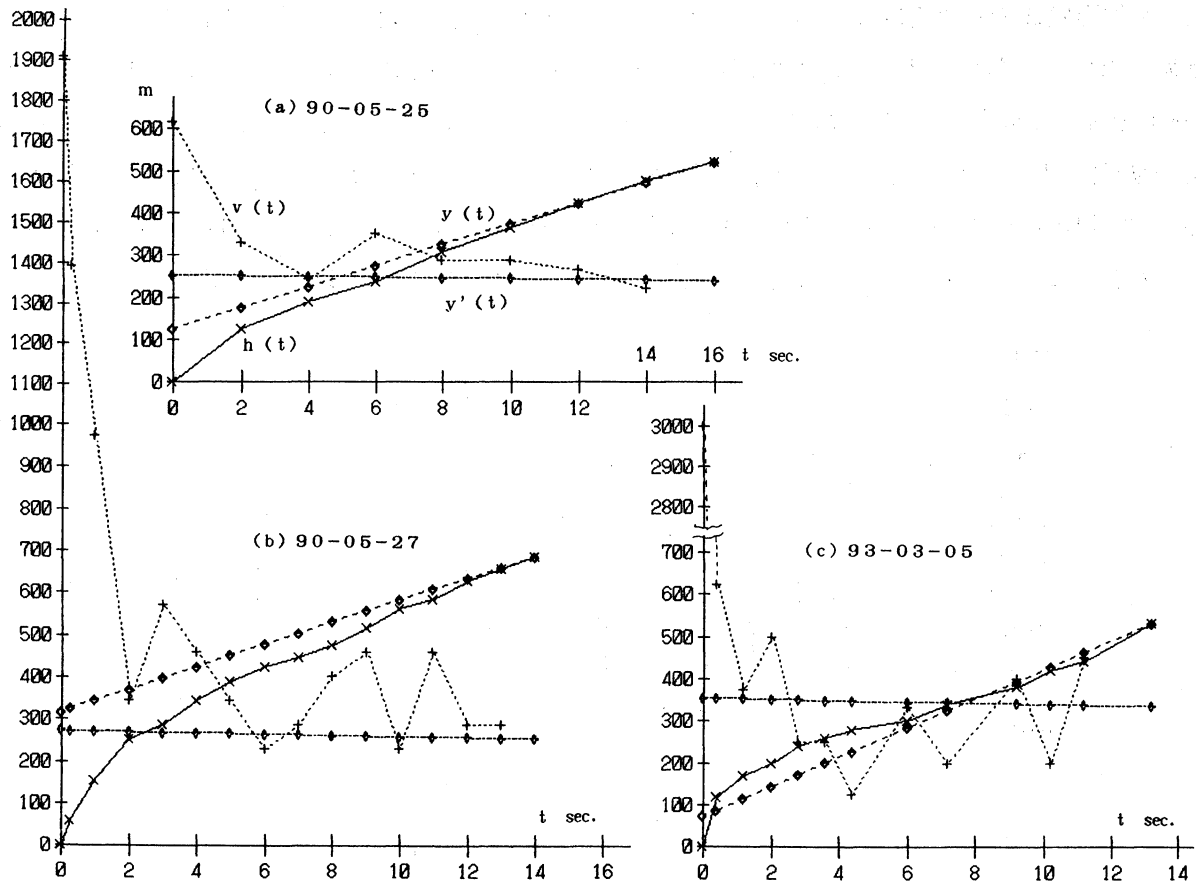


図7. 爆発初期の爆発上昇。実線は計測した煙頂高度  $h(t)$ 、破線は二次曲線による近似式  $y(t)$ 、 $h(t)$  から差分で求めた速度  $v(t)$  と  $y'(t)=dy/dt$  は10s の間の上昇距離に換算して点線と一点鎖線で表示。

せよ, 二次曲線の外挿からの30m/s程度の $y'(0)$ よりもかなり大きい, 急激に減少し $y'(t)$ に近づいている。これらの結果を, これまでの報告と比較しよう。

南岳山頂火口の西約5.5 kmの京大火山観測所の爆発地震のトリガー信号によるビデオカメラによる連続記録では, 爆発噴煙の上昇速度は, 火口底からある高さ $H_c$ までは大体火口底からの高さに反比例して減少し, それ以後はほぼ一定の $V_t$ となるとして, 1982年の7例の解析から,

$$H_c = 250 \sim 750 \text{m}, \quad V_t = 20 \sim 30 \text{ m/s}$$

を報告している<sup>14)</sup>。また, 火山弾の写真解析から, その最大初速度は110-160 m/sが報告されている<sup>15)</sup>。前に報告した1987-12-19, 6:45の爆発噴煙の場合は火口縁での初速が120 m/sあり, 急速に減少して $V_t=15 \sim 20 \text{m/s}$ に近づいている<sup>2)</sup>。この稿でインターバル撮影を外挿して求めた初速度 $v_i$ は, これらの $V_t$ に近い。激しい爆発の場合はガス推進域の存在は確かであるが, 一般的にどれだけ重要であるかは連続撮影による爆発初期の解析を更に多くの事例について進める必要がある。

#### § 4. おわりに

この稿では, 桜島の爆発噴煙のインターバル撮影によるビデオ映像から噴煙柱の高さの時間変化を測定し, 速度を求めた。火口縁からの最高到達高度1050~4400mの52例の平均的特徴は,  $v_i=20 \text{m/s}$ 程度で放出され, 約200sで $H_{\max}=2000 \text{m}$ 余りに達するが, 個々の爆発による違いは大きい。この結果は, その中の詳細データ31例に絞って検討しても同様であり, 噴煙の上昇の様子は初めに観測された高度と最高到達高度の2点を通る二次曲線でかなり良く表される。定常噴煙13例についての同様な解析では, 同じくらいの時間で緩やかに上昇して約1000mに達しているが, 同様に二次曲線でかなり良く表される。

二次曲線から求めた噴煙の初速度は噴煙の最高高度 $H_{\max}$ 及び減速率 $a$ それぞれと正の相関があるが, バラつきは大きく,  $H_{\max}$ と $a$ の間は無相関である。

爆発の初めから噴煙上昇途中までの連続撮影記録3例をインターバル撮影から求めた二次曲線と比較すると, 爆発初期はどれも二次曲線の $y=0$ への外挿よりも急速に上昇しているが, 5~10秒後には $h=300 \sim 600 \text{m}$ で二次曲線の結果と殆ど一致する。 $h=0$ の時刻は2~5秒程度外挿とずれるが, 噴煙上昇の大局的特徴は二次曲線でかなり表されており, 浮力よりも爆発の運動量が支配的なガス推進域は初期の立上りの数秒間に限られていると考えられる。但し, 立上りの詳細な解析にはもっと事例を増やす必要がある。

既に触れた様に, 多くの残された問題がある。簡単にまとめれば,

1. 噴煙放出機構とガス推進域, 放出熱量と浮力, 爆発のタイプ
  2. 噴煙上昇における周辺大気との混合のダイナミクス, 爆発噴煙の形態の時間変化と上層風の関係
- である。

謝辞： 火山噴火について鹿児島地方気象台火山係の坂井孝行氏の様々な御教示と、データ処理について物理教室諸氏の御助力に感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) 木下紀正, 衛星画像にみる九州の火山噴煙, 平成3年度報告書「宇宙科学技術と開発に関する研究」, 鹿児島大学, 1992, p.5; (2), 平成4年度同報告書, 1993, p.19. 最近の雲仙普賢岳については中山祐則, 衛星データ一覧, 雲仙岳の火山災害—その土質工学的課題をさぐる—, 日本土質工学会, 1993, p.170.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 木下紀正・細山田三郎, 桜島噴煙拡散の衛星画像と地上観測, 鹿大教育学部研究紀要 自然科学編, **43**, 1, 1991.  
K. Kinoshita, T. Masumizu and K. Tsutsumi, Analysis of Satellite Images on the Dispersion of Volcanic Ash Clouds from Mt. Sakurajima, 18th Int. Symposium on Space Technology and Science, Kagoshima, 1992, p.2003.  
細山田三郎・木下紀正・斉藤誠一・後藤あずみ, 気象衛星ノアの赤外画像からの火山噴煙検出, 日本リモートセンシング学会九州支部 第2回研究発表会論文集, 1994, p.21, 及び引用文献.
- 5) 直江寛明・木下紀正・池辺伸一郎・九州における火山ガス長距離輸送の解析, 天気, **40**, 1993, 671.
- 6) 木下紀正・今村和樹・金柿主税, 桜島山麓における二氧化硫黄高濃時の風系, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994, p.79; 桜島における火山ガス降下の気象条件, 日本気象学会1994年秋季大会講演予稿集, p.231.
- 7) 石川誠一・大倉光志・富田雄一郎・斉藤信弘・藤田芳和, 宮崎県南部地域におけるSO<sub>2</sub>高濃度事象の解析, 宮崎大工学部研究報告, **40**, 1, 1994.
- 8) 石川誠一・大倉光志・金丸正将・出口近士・木下紀正, 桜島噴煙の衛星画像とSO<sub>2</sub>地表濃度の関係—宮崎県地域の場合—, 日本リモートセンシング学会九州支部第2回研究発表会論文集, 1994, p.13.
- 9) 藤田慎一, 火山活動と環境の酸性化, 大気汚染学会誌, **28**, 72, 1993.
- 10) 岡本真一・岡西祥太郎, 大気汚染濃度予測のための調査研究報告書, 一排煙上昇高度の推定方法について—, 早稲田大学理工学研・産業公害防止協会, 1985, 及び引用文献.
- 11) R. S. J. Sparks, The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns, Bull. Volc. **48**, 3, 1986.  
A. W. Woods, The Fluid Dynamics and thermodynamics of eruption columns, Bull. Volc. **50**, 169, 1988.  
小屋口剛博, 火山噴煙のダイナミックス, 科学, **61**, 324, 1991.
- 12) 木下紀正, 火山噴煙の観測と解析, 気象利用研究, **5**, 51, 1992.  
K. Kinoshita, Video Monitoring of Ejection and Dispersion of Volcanic Ash Clouds from Mt. Sakurajima, Proc. 3rd. Asian Symp. on Visualization, Chiba, 1994, p.416.
- 13) 石川秀雄, 桜島, 共立出版, 1992.
- 14) 石原和弘他, 火山の爆発過程における噴煙および火山ガスの放出について, 京大防災研究所年報, **26**, B-1, 1, 1983.
- 15) 加茂幸介他, 噴石の到達範囲の考察, 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, **2**, 1984, p.68;  
井口正人他, 火山弾の飛跡の解析, 京大防災研究所年報, **26**, B-1, 9, 1983.