

桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤーモデルによる検討

飯野 直子*・木下 紀正*

(1995年10月16日 受理)

Investigation of a Vertical Shear Model for the Satellite Images
on the Dispersion of Volcanic Clouds from Mt. Sakurajima

Naoko IINO and Kisei KINOSHITA

Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University, Kagoshima, 890 Japan

Abstract

Various patterns of the volcanic clouds from Mt. Sakurajima in satellite images are compared with the streaklines of a vertical shear model, which are computed at constant atmospheric pressures from the data on upper winds. This model is found to be able to explain gross features of various types of advection and dispersion of the volcanic clouds seen in the satellite data.

1. はじめに

桜島は1955年の南岳山頂火口の爆発以来、長期間にわたって活発な噴煙活動を続けている。桜島からの数十～数百kmにわたる噴煙の移流拡散は衛星データにも数多くの記録があり、これらは上空の大気拡散の貴重な情報と考えられる。現在、日本上空を定期的に観測している衛星はLANDSAT-5, NOAA-11, 12, 14, MOS-1, 1b, SPOT-1～3, JERS-1 およびGMS-5等があり、それぞれ異なる軌道や観測周期、地上分解能などの特性がある。特に気象衛星NOAAは、毎日観測しているのでデータも豊富で広範囲にわたっているため、大規模な噴煙の移流もとらえている。また、1995年8月末には3年ぶりといわれる活発な桜島火山活動による降灰が島原や福岡でも確認されている。噴煙に含まれる微粒の火山灰やSO₂の酸化によって生じた硫酸エアロゾルは長時間大気中を漂い、南九州や、時には九州北部での酸性雨の原因ともなっている。

*鹿児島大学教育学部物理学教室

噴煙の到達高度は噴出強度に依存し、その形態は上層の風速・大気安定度によって規定されるが、噴出源から数kmで水平移流の状態となり、鉛直方向にはあまり拡散せず下流に行くにつれて水平拡散が主となる。そして、噴煙流の水平拡散の形態は風の鉛直シヤーに強く支配されることが地上観測や高層データと衛星画像との対比から示唆されている。噴煙の形態の典型例として、およそ風速10m/s以上の強風で鉛直シヤーが小さい場合の線状移流、5-9 m/sの並風で顕著な鉛直シヤーがない場合の帯状拡散、0-4 m/sの弱風で鉛直シヤーが大きい場合の扇状拡散がみられる。また上空が無風状態では平板状に滞留した様な拡散がみられる¹⁻⁴⁾。

このような桜島噴煙の移流拡散の様相の解明は、高度1000-3000mにおける大気の運動や大気汚染・拡散を研究する上で有用であると考えられる。これまで、関係する流跡線解析の研究として文献5, 6) や、桜島起源のSO₂地表濃度の拡散方程式による数値シミュレーション^{7, 8)}などがある。最近、衛星データにみられる水平拡散の諸形態を簡単なコンピュータシミュレーションで理解するために、著者らは噴煙拡散の鉛直シヤーモデルを構築し、線状移流を主とする1992年のNOAA画像7例について、対応する流脈線との簡単な比較・検討を行った⁹⁾。このモデルでは、高層データを基に内挿を行って得られた風データから流脈線を出力する。ここでは、様々な形態の噴煙拡散を示す衛星データと照らし合わせて、このモデルの妥当性を詳しく検討する。また、先に挙げた流跡線解析との比較や、南九州地域のSO₂高濃度事象との検討も行う。本モデルは流跡線の出力も可能であるが、衛星データとの対比には流脈線の形での出力が適当である。また、高層データとして今回はおもに鹿児島を使用するが、福岡の高層風も一部検討する。

以下では、2節で衛星および高層風データについて述べ、3節では鉛直シヤーモデルと高層風データの処理および流脈線解析の方法について述べる。4節では結果と考察を議論し、5節で結論と今後の課題を述べる。

2. データについて

2-1 衛星データと噴煙検出

2-1-1 衛星データとセンサの種類

噴煙検出に用いられる最近の極軌道衛星は表1のとおりである。NOAAの昼間のデータのうち気象庁気象衛星センターで受信し、日本気象協会で処理・提供されているものは92.6.17までは11号、92.6.18~95.6.6は12号、95.6.7からは14号によるものである。表1で取り上げた噴煙検出に適したセンサの波長領域を図1に示す。

なお、JERS-1に搭載しているSARセンサは、波長23.56cmのマイクロ波を自ら放出してその反射波をとらえるアクティブ方式のセンサである。このマイクロ波は、密度の小さい雲や噴煙は透過するので、地表面の解析や地下資源の探索には有用であるが¹⁰⁾、ここでは取りあげない。

飯野, 木下: 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤ-モデルによる検討

表1. 最近の極軌道衛星(昼間)の特徴.

衛星	センサ	時刻(JST)	観測周期	地上分解能
LANDSAT-5	TM MSS	~10:10	16日	30m (TM-6は120m) 80m
NOAA-11, 14 -12	AVHRR	~14:00 ~8:00	1日 〃	1.1km (軌道直下)
MOS-1, 1b	MESSR	~11:00	各34日	50m
SPOT-1~3	HRV-XS -P	~11:20	各26日	20m 10m
JERS-1	OPS	~11:10	44日	18×24m

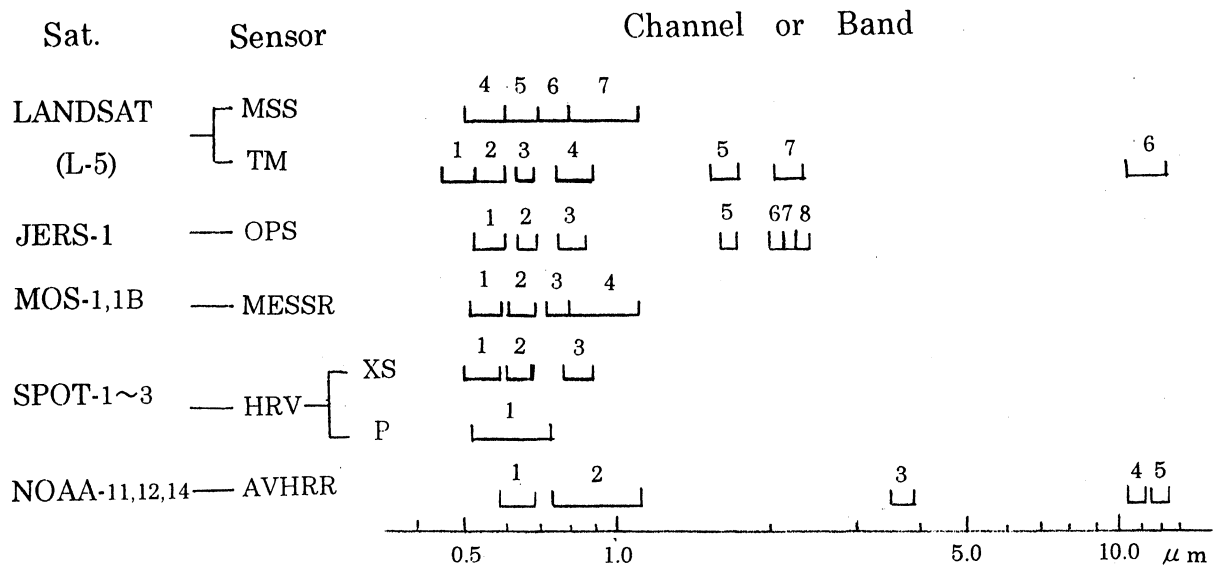


図1. 各衛星のセンサの波長域.

衛星の軌道は南北方向と少しずれている。昼間の観測は南行軌道であり、九州付近では真北を基準として東へLANDSATが 12.5° 、MOS-1, 1bが 13.6° 、JERS-1が 11.6° である。これらの衛星データは科学技術庁地球観測センターで受信処理されたもので、幾何補正された画像の上下方向は九州付近で、それぞれ 9.0° 、 10.4° 、 8.3° 東よりとなっている。なお、SPOTは 10.5° 東よりである。

2-1-2 噴煙検出の方法

NOAAのデータは地上分解能が軌道直下でも1.1kmと粗いが、広範囲にわたっており、かなり大規模な噴煙の移流も下流まで収まっている。図1に示すように、NOAAに搭載されているAVHRRセンサはch.1・2が可視・近赤外で、ch.3・4, 5が中間・熱赤外域である。ch.1は可視光の反射強度により雲や噴煙を見るのに適しているが、単チャンネルの白黒表示による解析では雲と噴煙の区別が付きにくい。そこでch.4, 5の差画像(ch.0とよぶ)を作成し、ch.1, 4と合わせて三色合成で表示すると雲と噴煙が色調の違いとして明らかになる¹¹⁾。文献11)ではch.3, 4,

0をR, G, Bに配色しているが, ch. 3の代わりにch. 1を割り当てても同様に噴煙が朱色に表示される。

そのほかの衛星はLANDSAT-5 (TM-6)を除いて可視～短波赤外域のバンドしか持っていないので, 雲と噴煙の区別は形態からの判断が必要である。噴煙流は周辺部が薄く, 連続的で海上にも伸びているのに対して, 積雲は周辺部が鮮明で主に陸上でみられることから比較的容易に区別できる。しかし層状雲の場合は広い範囲にわたるため噴煙流と重なっていると区別は困難である。ただし, 噴煙流の上流と下流が見えていたり, 噴煙流と層状雲の高度が異なり, 風の鉛直シヤーから移流の方向が異なる場合などは区別できる。

この論文ではモノクロ出力で衛星画像を示す。LANDSAT-5 および MOS-1 については可視域の最短波長のバンドで噴煙を検出し, 近赤外域バンドで海陸の区別をした。NOAA-11については, ch. 0で噴煙を検出し, 遠赤外域チャンネルで海陸の温度差による区別を行った。ただし, この方法による NOAA 画像では, ネガポジ反転を行い, 噴煙を白く表示し, 海陸の温度の高い方を黒く表示した。

2-2 高層風データ

2-2-1 高層気象資料

高層気象観測は世界各地で毎日2回の定時(グリニッジ標準時の0hと12h(hは時刻);日本標準時(JST)では9hと21hにあたる)に高層大気の気圧・気温・湿度と風を測定するレーウインゾンデ観測が行われている。さらに日本では3hと15hにも風だけを測定するレーウイン観測が行われている。観測では, 定時の約30分前に地上から放球され, 上昇中の気球から次々に送信される気圧・温度・湿度の値から, 静水圧平衡の式を使って高度が計算できることから, 気圧・気温・湿度の高度分布が求められる。また, 上昇中の気球の位置を地上の無線方向高度探知機で追跡して, 各高度の風向, 風速が求められている^{12, 13)}。

高層風データは, JSTで3h, 9h, 15h, 21h(以後観測定時と記す)の地表(吉野283mただし'94年2月末に東郡元へ移転)と指定気圧面の925hPa('91.11以降), 900hPa, 850hPa, 800hPa, 700hPa, 600hPa, 500hPa, ..., 100hPaにおける風向と風速がある。ここでは, 各観測定時の900~700hPaを主に使用する。

2-2-2 高層観測点とその範囲

日本国内に高層観測点は18ヶ所あり, 九州およびその周辺では, 福岡(大濠公園), 鹿児島(吉野/東郡元), 奄美大島(本茶峠)および米子, 潮岬などにある。鹿児島が最短距離になる範囲は, 図2に示すように, 北は天草-延岡ライン, 南は口之島あたりまでである。一応これを鹿児島の高層データの適用範囲の目安と考える。

飯野, 木下: 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤーモデルによる検討

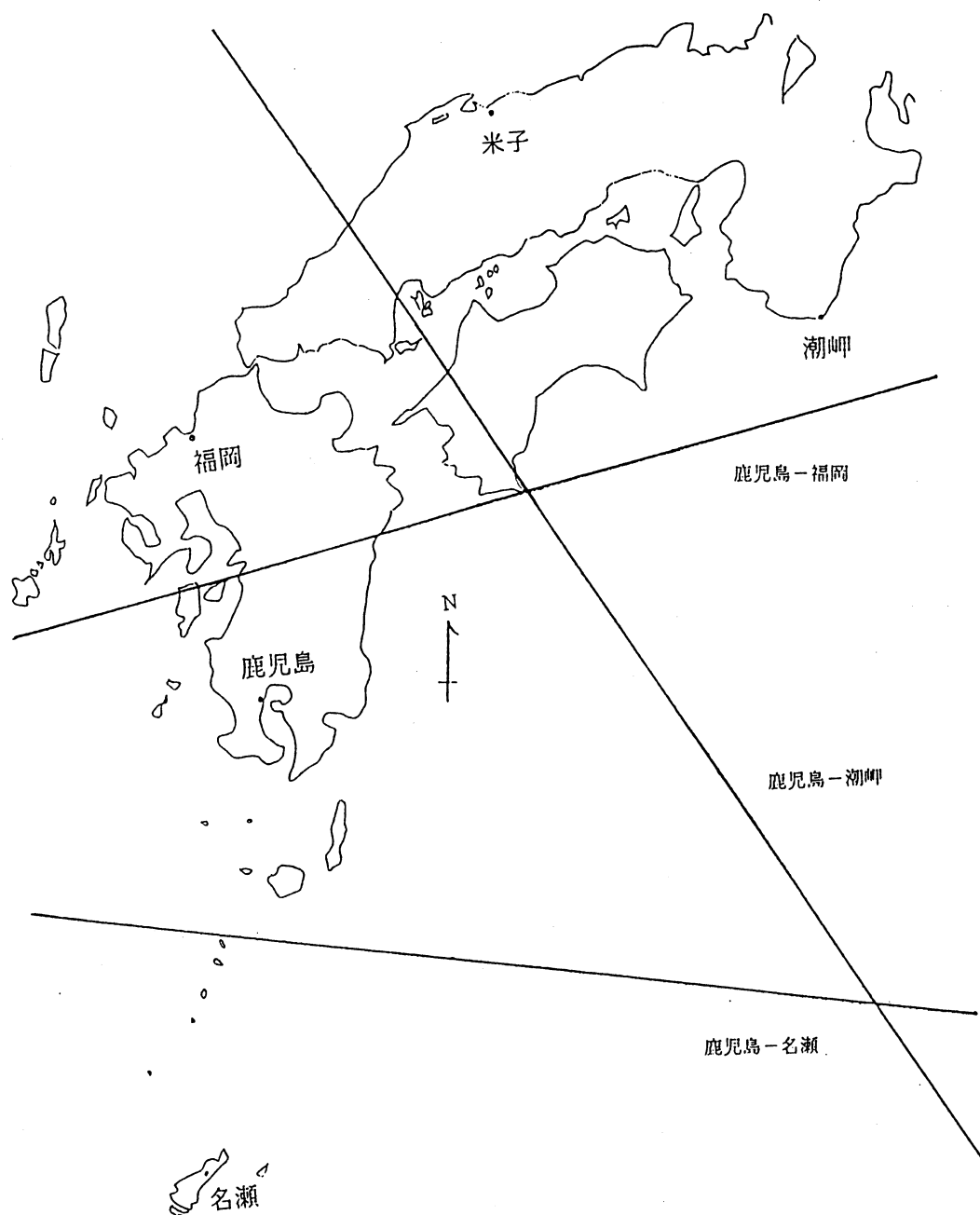


図2. 西日本の高層観測点とそれぞれが最短距離になる範囲.

2-3 地上観測データ

衛星データと同日に撮影された垂水フェリー鴨池港付近からのビデオカメラによる噴煙観測のインターバル記録や、ビデオプリンタによるアウトプットを噴煙の放出強度と移流高度の評価に利用する。ビデオカメラによる噴煙観測の方法と結果の特徴については、文献1-4)に記されている。

3. 鉛直シャーモデルによる流脈線

3-1 流跡線と流脈線

流跡線 (trajectory または path line) は、流れの場において、ある流体要素が時間を追って描く軌跡である。流脈線 (streak line) は、流れの場のなかのある一点を通過した全流体要素の、通過後のある時刻におけるそれぞれの流体要素の位置を連ねた線である。したがって、これらは定常流の場合は一致するが、非定常流の場合は異なる¹⁴⁾。

衛星画像は、ある一点 (火口) から放出された噴煙の、ある時刻 (衛星の観測時刻) における移流形態をとらえたものである。流脈線にあたる。

3-2 モデルについて

モデルは桜島上空のある範囲の高度に放出された理想粒子の、それぞれの等圧面上における風向と風速データに基づいた、一定時間ごとの位置から流脈線を示す。理想粒子は重さを持たず、いったん上空に放出されたら同じ等圧面上にとどまり、風と共に移流し続けると仮定する。また、放出は一定時間続く場合を考える⁹⁾。しかし、実際には放出強度の時間変化や、冷却による気塊降下と灰の落下など垂直変化、乱流拡散の効果などが問題となる。なお、分子拡散は乱流拡散に比べて無視できることが知られている。

また、地上約 1 km までの境界層内の大気の運動は、煙突からの煙の概観といった汚染物質の拡散の研究などでよく知られているように、大気安定度の状態によって変化する。特に逆転層の出現による大気汚染の現象は深刻な社会問題であった。一方、桜島 (南岳 1,040 m) の噴煙が移流拡散する自由大気は一般に安定である。激しい爆発に始まる噴煙流について別途検討する以外は、これらの鉛直拡散の問題には、ここではこれ以上立ち入らない。

3-3 高層風データの取扱い

高層風は一般に安定であるので、かなり広範囲にわたって等圧面上で一様であると仮定し、北方へかなり移流する場合の他は鹿児島の高層データだけを使用する。

ここでは指定気圧面の 6 時間おきの観測定時、高度に換算して約 1,000 m, 1,500 m, 2,000 m, 3,100 m に対応する指定気圧面 900 hPa, 850 hPa, 800 hPa, 700 hPa における風向と風速データから 1 時間、10 hPa 毎にデータの内挿を行う。また、データに欠測がある場合 (おもに 15 h) は、前後の時間のデータより内挿する。ただし、長時間の内挿になるので、結果の妥当性には注意しなければならない。

3-4 内挿の方法

内挿は風向と風速を別々に処理する。風速は単純に線形内挿を行う。風向については、ベクトル

飯野, 木下: 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤーモデルによる検討

による方法と角度による方法の2つを試みた。ベクトルによる線形近似では、風向を x , y 成分で扱って内挿したが、風速の過小評価の傾向や内挿に使用するデータの風向の変化量が大きい場合に内挿中央部付近での風向の急激な変化がみられる。そこで角度による内挿を行うが、角度の大きさ(一般角)は動径が原点のまわりをどちら向きに何回転してその位置に重なったかによって、いろいろな値が考えられるので注意が必要である。まず、 180° を越える大まわりの内挿にならないための前処理を施してから、線形近似の内挿を行い、これを高層風データ(以後、風データと略す)として使用する。

風向に関する内挿の手順は、まず各観測定時における指定気圧面データ値を指定気圧面間の角度差が、 180° 以下になる表現に処理した後、10hPa 毎の内挿値を求める。次に、先に求めた各気圧面の風向を時間に沿った変化として求めるために、観測定時の間の角度差が 180° 以下になる表現にして、1時間の変化量を求める。そして、先に求めた各観測定時のそれぞれの気圧面の風向に、それぞれの変化量を加えることで1時間毎の値を求める。

また、900hPa の風速が0または欠けている場合が数例ある。これらは地表データは用いないで、高さ方向での外挿からその時刻の風向を求め、欠測の場合は、前後の時間の平均から求める。

一般に、風向・風速の変化がなめらかな場合はあまり問題ないが、急激な変化があるときは内挿によってそれをとらえることはできない。

3-5 解析の手順

解析に先立って、衛星の種類および衛星画像による出力時間の評価と、地上観測データによる煙流軸高度と移流高度の上下幅の評価を行う。解析では、表計算ソフトで内挿の処理を行って得た風データを1日毎にテキスト形式のデータファイルとして、Quick BASIC のプログラムに読み込んで使用する。次に、プログラムを実行して、風データのドライブ指定とファイル名、九州地図の倍率入力の後、流脈線の開始と終了時刻、気圧面の上下値を入力すると、流脈線がモニターに出力される。出力する時刻や気圧面の変更、九州地図の倍率調整、他の日の解析も連続して行うことができる。

4. 結果と考察

4-1 噴煙の形態と流脈線

今回使用した衛星データリストと流脈線の出力条件を表2に示す。高層データについては、欠測の無い日をF、15hに欠測のあった日をLと記す。また、衛星とセンサの種類や噴煙の形態なども併せて示す。これらのうち代表的な衛星画像を図3~12のaに示し、処理パラメータは後で表3に記す。それぞれに対応する流脈線は図3~10のbに示し、図11, 12では流跡線についても議論する。

表2. データリストと流脈線の条件.

日付	衛星	噴煙の形態	高層データ	評価時間	上下幅	備考
89. 1.21	L5	中角	L	9-10h	890-810hPa	
3.10	L5	扇状	F	8-10	880-800	図8
10.18	M1	滞留	F	9-11	850-800	図10
12. 7	L5	線状	F	6-10	880-830	図3
90. 3.13	L5	線状	F	8-10	830-770	図4
	N11	長流		10-14	890-820	
3.26	N11	扇状	L	8-13	880-800	PL
4. 2	N11	扇状	L	7-14	890-820	図9
4. 6	M1	扇状	F	9-11	850-800	
4. 9	N11	線状	L	9-14	820-800	
4.27	N11	带状	F	3-14	860-840	図11, PL
5. 6	N11	中角	F	3-14	850-830	PL
5. 9	N11	長流	F	5-14	830-780	
5.21	N11	線状	L	8-13	840-820	
6.11	N11	扇状	L	9-14	850-800	
7. 9	M1b	爆発	L	8-11	850-750	6 : 46爆発, PL
	N11			7-14	850-750	
7.19	L5	小幅	F	7-11	900-850	
	N11	長流		3-14	870-820	
7.22	N11	長流	F	4-14	900-850	図12, PL
10.27	M1	小幅	F	8-11	880-840	
12.10	L5	小幅	L	9-10	880-840	9 : 35爆発
91. 4.15	M1	小角	F	10-11	870-860	
7.18	M1b	小角	F	7-11	880-850	
7.22	L5	小幅	F	8-10	900-850	
10. 2	M1	带状	F	9-11	900-800	図7
92. 5.21	L5	小幅	F	8-11	850-750	図5
	N11	小幅		10-15	870-840	図6
10.20	N12	爆発	L	4- 8	700-600	4 : 45爆発
11. 7	N12	線状	F	5- 8	890-860	
	J1	带状		9-11	900-850	

高層データの F は欠測無し, L は15h 欠測, 備考の PL は流跡線との比較。

4-1-1 線状

89.12. 7, 90. 3.13 (L5, N11), 90. 4. 9, 90. 5.21, 92.11. 7 (N12) の6例について検討する。衛星画像はいずれも線状の移流がみられる。本モデルでは、地上観測から評価した、煙流軸高度を中心とする初期幅（以後、評価幅と記す）の2倍程度の気圧面の上下幅（以後、上下幅と記す）ではほぼ再現できる。特に図3に示す89.12. 7は東へのやや弓状の形態が衛星画像とよく一致する。図4の90. 3.13では直線状の移流がよく再現される。90. 4. 9は方向が少し（10-20°）ずれるが、この日は15hの高層データが欠測のため、内挿ではその間の変化がとらえられなかったためと考えられる。90. 5.21は噴煙の下流部が折れまがっているが、この部分は煙流主軸よりも上空を移

