

# 論文の内容の要旨

## 論文題目 A study of volcanic eruption clouds by multi-dimensional numerical models (2次元・3次元数値モデルによる 火山噴煙ダイナミクスの研究)

氏名 鈴木 雄治郎

### 1. イントロダクション

爆発的火山噴火では、マグマは上昇途中に破碎され、高温のマグマの破片と火山ガスからなる噴煙が大気より重い状態で火口から噴出する。噴煙は上昇中に乱流混合によって大気を取り込み、大気は火砕物の熱で膨張する。この時、噴煙は十分な大気を取り込めば軽くなって噴煙柱となるが、十分な大気を取り込むことができなければ重いまま高温の火砕流として地表を流れる。噴煙柱と火砕流の遷移状態や様々な噴煙挙動を予測することは、災害予測や火山堆積物の理解をする上で重要な課題である。これら噴煙挙動の多様性は、乱流による多次元的な混合によるものと考えられる。しかし、これまでのところ多次元的な乱流混合に注目して噴煙挙動の多様性を議論した研究はほとんどない。そこで、噴煙の乱流混合を正確に再現できる多次元数値モデルを構築し、噴煙柱と火砕流の中間状態を含む噴煙挙動の多様性を明らかにすることを、本研究の目的とした。

### 2. 数値モデル

モデルは、平坦な地表にある円形の火口から噴煙が成層大気中に高速噴出するとした。噴煙は火砕物と火山ガスから構成されているが、それらの速度差は無く、熱平衡にあると仮定し、単一流体として扱った。このとき、噴煙の状態方程式は次のように表現される。

$$\frac{1}{\rho_{mgm}} = \frac{n_s}{\sigma} + \frac{(1-n_s)R_w T}{P}$$

ここで、 $\rho_{mgm}$  は噴煙全体の密度、 $n_s$  は火砕物の質量分率、 $\sigma$  は火砕物の密度、 $R_w$  は火山ガス（水蒸気）の気

体定数,  $T$  は温度,  $P$  は圧力である. 右辺第一項は火砕物の単位質量の占める体積を表すが, 火砕物の密度  $\sigma$  が非常に大きく第二項に比べ第一項は無視できる. すると上式は理想気体の状態方程式,

$$P = \rho_{mgm} (1 - n_s) R_w T \equiv \rho_{mgm} R_{mgm} T$$

で近似できる. つまり, 噴煙は気体定数の非常に小さい ( $R_{mgm} \sim 23 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$ ) 理想気体として表現

できる. さらに, 高温の噴煙と大気が混合する場合, 火砕物の熱による膨張の影響で密度変化に非線形性が見られる (図 1). この噴煙・大気の混合流体に対して, 気体定数を変化させることで単一の理想気体として扱った.

以上のように噴煙, 及び噴煙と大気の混合流体を理想気体として扱い, 圧縮性 Euler 方程式を支配方程式とした. 乱流を構成するような小さな渦や 3 次元的なゆらぎを性格に記述するために, 空間 3 次精度のスキームを用い, 50m 以下の細かなグリッドサイズを適用し 3 次元空間で数値計算を行った.

### 3. 計算結果・考察

#### 3-1. 噴煙挙動の多様性

計算の結果, 噴煙柱・火砕流の中間状態 (噴煙柱の「部分崩壊」現象) と, これまでに記載されなかった特徴的な噴煙構造 (「Fountain 構造」) の存在が明らかになった.

##### (1) 部分崩壊

噴煙柱と火砕流の中間状態として, 噴煙柱と火砕流が同時に形成するような部分崩壊のレジームが存在した. これは, 計算において流れに影響を与えないマーカー粒子の軌跡を追うことで明確に区別することができる. 噴煙柱が形成する場合には粒子は噴煙柱とともにすべて上昇し (図 2 (A)), 火砕流が発生する場合にはほとんどすべての粒子が火砕流とともに地表に流れ落ちるが (図 2 (C)), それらの中間的な状態では水平方向の不均一性から一部の粒子は噴煙柱とともに上昇し, それと同時に一部の粒子は火砕流として流れ落ちる (図 2 (B)). この噴煙挙動は, ピナツボ 1991 年噴火で見られたような, 降下堆積物が火砕流堆積物と互層するという観察事実に適合する.

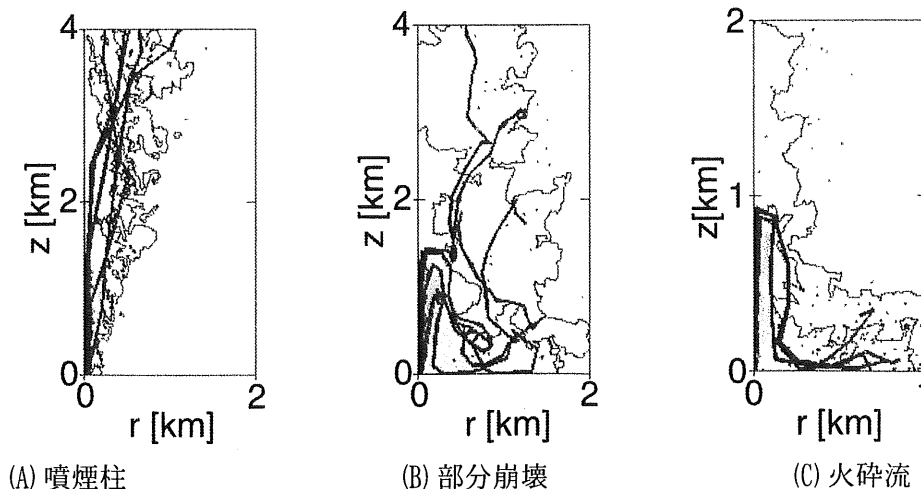


図 2. 火口付近における噴煙の質量分率分布とマーカー粒子の軌跡

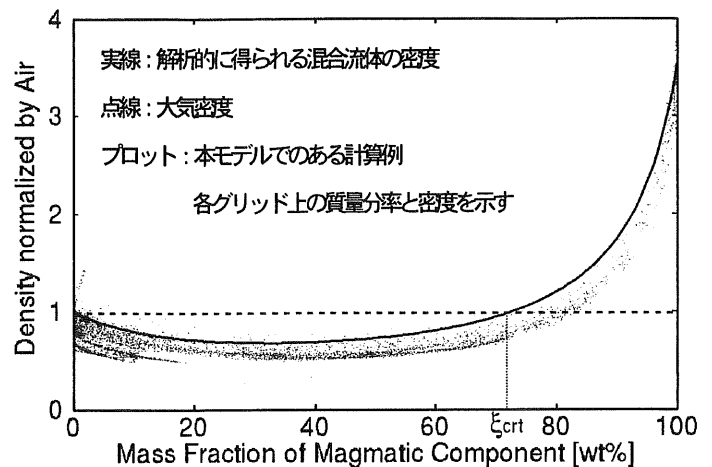


図 1. 噴煙と大気の混合比に対する混合流体の密度変化

## (2) Fountain 構造

半径方向の不均一性に関して、一般に、噴煙のような高速ジェットでは中心軸付近の高濃度領域とそれを取り囲む乱流混合の領域が観察される。出口からの距離とともにこの混合領域は中心軸に向かって拡大していき、ポテンシャルコアと呼ばれる中心軸周り的高濃度噴煙の領域を浸食していく。噴煙では、初期運動量を失う前に混合領域が中心軸まで達すればポテンシャルコアは消滅し、達しなければその高さにおいてもポテンシャルコアが残ると予想される。つまり、初期運動量を失う高さ ( $H$ ) と、ポテンシャルコアの長さ ( $L$ ) の比によって噴煙構造に多様性が生じることが考えられる。実際、計算の結果、図3の模式図で示すような高濃度噴煙の構造が観察された。火口から伸びるポテンシャルコアは  $H$  まで達し、大気より重く下からの供給も続くので半径方向に広がろうとする。そしてその頂部側方から正に落ちようとするとき、局所的に大気を取り込みを行う(図3の矢印)。この構造を Fountain と呼ぶ。したがって、噴煙柱は Fountain が存在するレジームと存在しないレジームに分類でき(図4 (A), (B))、火砕流においても同様に Fountain が存在する場合としない場合にレジームは分類される(図4 (C), (D))。噴煙柱内の Fountain から大量の火砕物が降下することで火口付近に火砕丘が形成する場合や、Fountain から生じる高濃度の火砕流からは massive な火砕流堆積物が形成することが予想される。

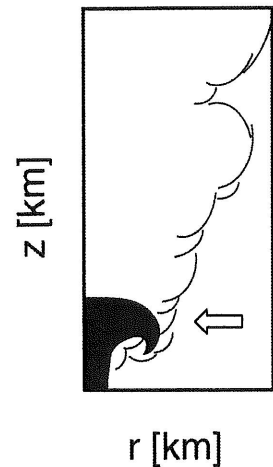


図3. Fountain の模式図

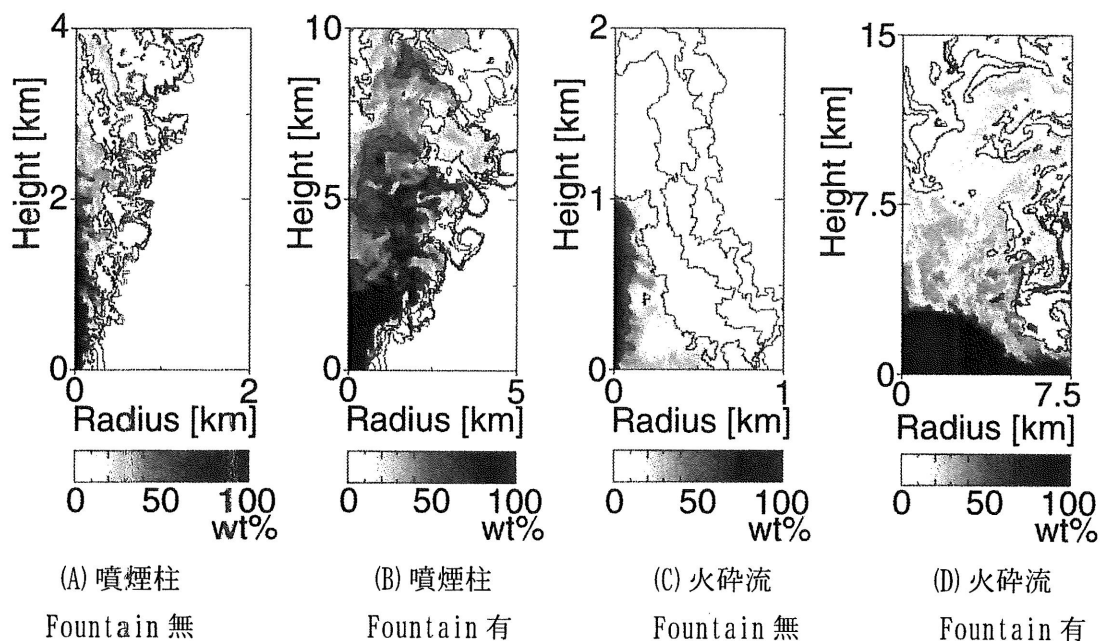


図4. 火口付近における噴煙の質量分率分布

### 3-2. 噴煙挙動の予測

ここで、Fountainの有無、噴煙柱・部分崩壊・および火砕流の観点からレジームを分類し、マグマ物性と噴煙挙動の多様性の関係を調べた(図5)。さらに、マグマの物性(温度、水蒸気量)と火口での噴出条件(噴出率、噴出速度)から Fountain の形成条件と火砕流の発生条件を単純なモデルによって理解することを試みた。

#### Fountain の形成条件

先に Fountain の形成条件として  $H/L$  比を提案した。初期運動量を失う高さ ( $H$ ) は初速、密度差、重力加速度から解析的に求められる。また、ポテンシャルコアの長さ ( $L$ ) は亜音速であればノズル半径に、超音速であればノズル半径と初速に比例するということがジェットの室内実験から示されている [Nagamatsu et al., 1969]。したがって  $H/L$  比は、噴出率 ( $\dot{m}$ ) と噴出速度 ( $u_0$ ) を用い次のように表すことができる。

$$\frac{H}{L} = \begin{cases} C_1 \dot{m}^{-\frac{1}{2}} u_0^{\frac{5}{2}} (M < 1) \\ C_2 \dot{m}^{-\frac{1}{2}} u_0^{\frac{3}{2}} (M > 1) \end{cases}$$

ここで、 $M$  はマッハ数である。噴煙の密度を含む係数  $C_1, C_2$  は温度や水蒸気量が変化してもあまり変わらない。そのため、レジーム図における  $H/L = \text{constant}$  の線は温度や水蒸気量にほとんど依存しない (図 5 (A) (B) の青線)。数値計算結果ともよく一致する。

### 火砕流の発生条件

火砕流の発生は、初期運動量を失う高さ ( $H$ ) に噴煙が達した時の平均的な質量分率と、 $\xi_{crit}$  (混合流体の密度が大気密度と等しくなる質量分率, 図 1) の大小で決まる。そこで、半径が火口半径  $R_0$  に等しく、高さが  $H$  である円筒を考え、その側面から噴出速度  $u_0$  に比例して大気を取り込むことを想定する。円筒頂部での質量分率は、critical な状態で  $\xi_{crit}$  に等しくなるので、 $\xi_{crit}$  は噴出率 ( $\dot{m}$ ) と噴出速度 ( $u_0$ ) と次の関係を持つ。

$$\frac{\xi_{crit}}{1 - \xi_{crit}} = C_3 \dot{m}^{-\frac{1}{2}} u_0^{\frac{5}{2}}$$

温度や揮発成分量が小さい場合、噴煙の密度が大きくなることから  $\xi_{crit}$  は小さくなる。実際、 $\xi_{crit}$  を表す線と数値計算の火砕流の発生条件は非常によく一致し (図 5 (A) の赤線), 温度や揮発成分量が低い場合は (図 5 (B) の赤線),  $\xi_{crit}$  を表す線は低噴出率側に移動し、数値計算の結果をよく表している。

### 3-3. Transition type の多様性

以上より、マグマ物性 (温度, 水蒸気量) によって Fountain の形成と火砕流の発生条件の相対的位置が変化することが分かった。特に、高温のマグマ噴火では Fountain 有りの噴煙柱が遷移状態として存在するが、マグマ水蒸気噴火では Fountain の無い火砕流が遷移状態として存在する。本計算から予測されるそれぞれの遷移タイプは、ピナツボ 1991 年噴火と三宅島 2000 年噴火などの観測事実とも適合した。

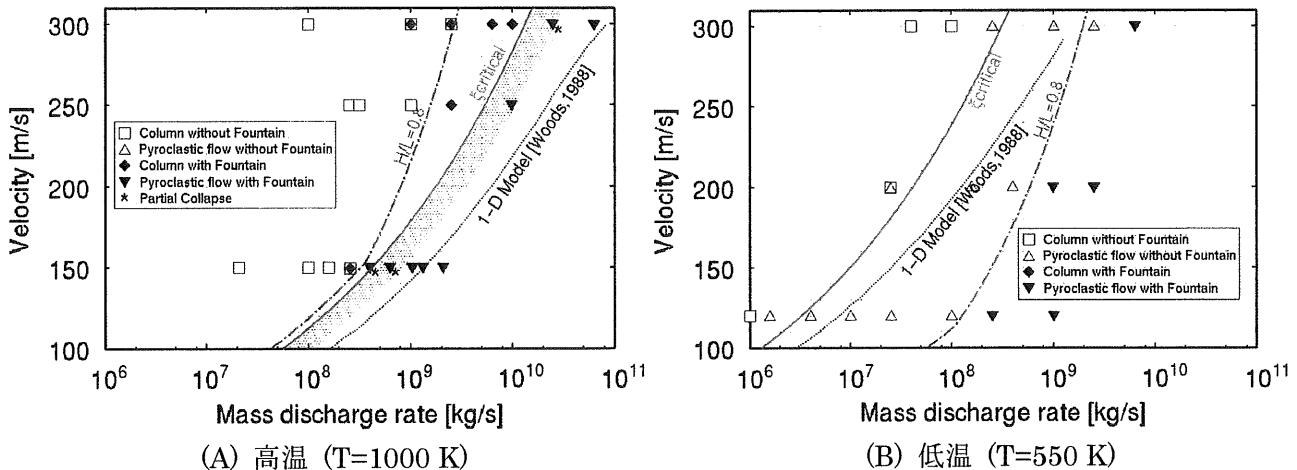


図 5. 初期条件のレジームによる分類。青線・赤線は単純化モデルで予測した Fountain の形成条件 (青線) と火砕流の発生条件 (赤線)。

## 5. 結論

- ・乱流混合に注目した噴煙の多次元モデルを構築することで、部分崩壊という噴煙柱・火砕流の中間状態と、Fountain という形状に特徴的な構造が存在することが分かった。
- ・Fountain の形成条件はポテンシャルコアの長さ ( $L$ ) と初期運動量を失う高さ ( $H$ ) の競合から、火砕流の発生条件は critical な質量分率 ( $\xi_{crit}$ ) によって理解することができる。
- ・Fountain の形成条件と火砕流の発生条件は、温度や揮発成分量によってその相対的位置が変化し、噴煙挙動の遷移状態に多様性が生まれる。