

3次元数値モデルによる傘型噴煙形成のシミュレーション その3: ピナツボ1991年噴火への適用

3-D numerical simulation of umbrella clouds (3): Application to the Pinatubo 1991 eruption

鈴木 雄治郎 [1]; 小屋口 剛博 [2]

Yujiro Suzuki[1]; Takehiro Koyaguchi[2]

[1] JAMSTEC,IFREE; [2] 東大・地震研

[1] JAMSTEC,IFREE; [2] ERI, Univ Tokyo

噴煙の到達高度や傘型噴煙の高度・拡大速度は、爆発的噴火の規模を知るうえで数少ない情報源となる。火口から出た噴煙は固体粒子の火山灰を多く含むため周囲の大気よりも重い。しかし、乱流混合によって大気を取り込むと火山灰の熱で取り込んだ大気を急激に膨張させ、噴煙全体の密度は周囲の大気よりも低下する。浮力を得た噴煙柱や灰かぐらは高度数十 km まで上昇する。噴煙柱・灰かぐらは密度が成層大気と釣り合う中立高度になっても余分な運動量を持つためさらに上昇し、最高到達点で運動量を失うと重力流として流れ下り、中立高度で水平方向に傘型噴煙として拡大する。Woods [1988] は、噴煙柱が水平方向に均質であると仮定した鉛直 1 次元モデルを構築し、火口での噴出率が与えられた時の傘型噴煙高度とそこでの体積流量、噴煙到達高度などを予想した。Sparks et al.[1997] は、傘型噴煙が厚さ方向に均質であると仮定した水平 1 次元モデルを構築し、鉛直 1 次元モデルで得られるような噴煙柱からの体積流量が与えられた時の傘型噴煙の半径拡大率を予想した。しかし、鉛直 1 次元モデルにはエントレインメント係数 k 、水平 1 次元モデルにはフルード数 Fr といった経験的に決定しなければならない定数が含まれている。そこで、3 次元数値モデルによって噴煙柱・傘型噴煙を再現し、1 次元モデルの定数を決定した。また、観測データが豊富なピナツボ 1991 年噴火の事例に、決定した定数で 1 次元モデルを適用した。

3 次元数値モデルは Suzuki et al. [2005] に従い、平坦な地表面にある円形の火口から噴煙が高速噴出する場合を想定した。噴煙内の火砕物と火山ガスの速度差はゼロとし、噴煙は一つ流体として振舞うと仮定した。噴煙と大気が混合した場合については、その混合比によって比熱比を変化させて、噴煙と大気の混合流体を新たに一つの流体として状態方程式・エネルギー式を与えた。これにより、火口では大気密度より大きい噴煙密度が大気を取り込み膨張することによって大気密度よりも小さくなる性質を再現することができる。支配方程式は圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式を適用し、計算スキームは一般的な圧縮性流体解析法の一つである Roe 法を用いた。計算精度を上げるためグリッド間の流束計算には MUSCL 法を適用した。時間積分は時間分割法を用いた。噴煙内外で生じる乱流混合を正確に再現するために十分に細かなグリッドサイズを用い、噴煙と大気の混合が数値粘性に依存しないことを確認した。

大気が熱帯大気構造もしくは中緯度大気構造を持つ場合について、噴出率 10^8 - 10^9 kg/s の噴出条件で計算した結果、噴煙柱・火砕流・灰かぐら・傘型噴煙が形成する様子を噴火開始後約 3600 秒まで再現できた。火口から出た噴煙は周囲の大気よりも重く、運動量を失う高さで噴水のような構造を持ち、そこで大きな渦によって大気を取り込む。軽くなった噴煙は噴煙柱として上昇し、上部で振動する。上昇した噴煙柱は成層大気中で周囲の大気と釣り合い傘型噴煙として水平方向に拡大した。噴出速度が遅い場合には火砕流が発生し、その上面で大気と混合して軽くなった噴煙が灰かぐらとして上昇した。上昇した灰かぐらは噴煙柱の場合と同様に傘型噴煙として水平方向に拡大した。複数の噴出条件を変えた計算の結果、次のことが分かった (1) 3 次元数値モデルによる傘型噴煙高度はエントレインメント係数 $k=0.1$ を用いた鉛直 1 次元モデルの予想と一致した (2) 3 次元数値モデルによる傘型噴煙の半径拡大率はフルード数 $Fr=0.1$ を用いた水平 1 次元モデルの予想と一致した。

以上の定数で 1 次元モデルをピナツボ 1991 年噴火に適用した。観察された傘型噴煙の半径拡大率より水平 1 次元モデル求まる噴煙柱からの体積流量は $1.6 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{s}$ となり、さらに体積流量より鉛直 1 次元モデルで逆算される噴出率は $1.8 \times 10^9 \text{ kg/s}$ となる。一方、観察された傘型噴煙高度 (25 km) より鉛直 1 次元モデルで求まる噴出率は $1.7 \times 10^9 \text{ kg/s}$ となり、傘型噴煙の半径拡大率から求めた噴出率とほぼ一致した。また、この噴出率は Koyaguchi and Ohno [2001] が火砕物の空間的な堆積分布から独立に見積もった噴出率 (0.6 - $1.1 \times 10^9 \text{ kg/s}$) のほぼ上限値に相当する。