

## 火山噴煙の3次元シミュレーション：風による噴煙と大気の乱流混合効率の見積り 3-D numerical simulations of eruption clouds: Efficiency of turbulent mixing caused by environmental wind

鈴木 雄治郎<sup>1\*</sup>, 小屋口 剛博<sup>1</sup>Yujiro Suzuki<sup>1\*</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>1</sup><sup>1</sup> 東京大学地震研究所<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo

爆発的火山噴火において、噴煙の高度は単位時間にマグマから大気に供給される熱エネルギーの直接的指標であり、爆発的噴火過程や噴火強度を推定する上で貴重な情報源となる。したがって、実際の気象場での噴煙高度と火口での噴出条件を定量的に正しく関係付けることが、火山学上・防災上に強く要請されている。火山ガスと火砕物からなる火口からの噴出物は、上昇中に周囲の大気を取込み火砕物の熱で膨張させる。この膨張によって獲得された浮力が、噴煙上昇の原動力となる。したがって、上昇中の噴煙がどれだけ周囲の大気と混合するかが噴煙高度を決定する重要な要因となる。本研究では、噴煙の3次元数値シミュレーションによって、噴煙と大気の混合過程を明らかにすることを目的とする。

噴煙と大気の混合は、乱流ジェットや乱流ブルームでの乱流混合のアナロジーとして捉えることができる。一般に、周囲に風のない場合の乱流ジェット・ブルームでは、平均上昇速度 $U$ が増加するほど周囲流体を取込む速度 $U_e$ が増加する(Morton et al., 1956);  $U_e = kU$ 。ここに、 $k$ は混合効率を表し、エントレインメント係数と呼ばれる。密度成層のない流体中での乱流ジェットや乱流ブルームは自己相似性を持ち、 $k$ は一定値をとることが知られている(0.10)。一方、周囲に風がある場合の乱流ジェット・ブルームでは、風速 $U_w$ が増加するにしたがって周囲流体を取込む速度が増加する項が付け加わる(Hewett et al., 1971);  $U_e = kU + bU_w$ 。風によって促進される混合の効率 $b$ は、単純な系での室内実験から0.3-1.0であると指摘されている。自己相似性を持たず、大気が成層構造を持ち、非線形な密度変化をする噴煙の場合では、混合効率 $k$ 、 $b$ が室内実験から得られた値と等しい保証はない。そこで、周囲に風が無い場合とある場合の噴煙を3次元シミュレーションで再現し、その噴煙高度を $k$ 、 $b$ の値を仮定した定常1次元噴煙モデル(Bursik, 2001)の予測と比較することで、噴煙における実効的な混合効率の値を決定した。

噴煙再現のための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成層大気に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。非線形な噴煙の密度変化は、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ることで再現した。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。一般座標格子を用い、火口近傍と遠方の渦構造を高精度・高計算効率で再現した。

本3次元数値モデルについては、静止流体中に噴出する乱流ジェット・ブルーム室内実験における乱流混合の効率を定量的に再現することが確認されている(e.g., Suzuki and Koyaguchi, 2010)。また、風の影響が強い条件下の火山噴火(例えば新燃岳2011年噴火)に対しても、数値計算結果は、噴出率と噴煙高度の関係や噴煙の形状に関する観測結果と良い一致を示し、乱流混合を精度よく再現していると考えられる。周囲に風が無い場合の噴煙高度に対する3次元数値モデルの計算結果は、混合効率 $k$ の値を0.1と仮定した定常1次元モデルの結果と一致する。このことは、室内実験で得られた自己相似性をもつ乱流ジェット・ブルームに対する混合効率 $k$ の値が鉛直に上昇する噴煙には適用可能であることを表す。一方、周囲に風がある場合の噴煙高度に対する3次元数値モデルの計算結果は、混合効率 $b$ の値を0.2-0.3と仮定した定常1次元モデル結果と一致する。この実効的な混合効率 $k$ の値は、室内実験から得られた値よりも有意に小さい。このことは、風の影響が強い条件下の噴煙に対するこれまでの定常1次元モデルの噴煙高度見積りが過小評価であった可能性を示している。

キーワード: 火山噴煙, 降灰モデル, 乱流混合, 火山防災

Keywords: eruption cloud, tephra dispersal, turbulent mixing, volcanic disaster prevention