

火砕流ダイナミクスに関する数値的研究：浅水波方程式に基づく2層密度流モデルの開発 A numerical study of pyroclastic flow dynamics: Development of a two-layer model based on Shallow-Water equations

志水 宏行^{1*}; 小屋口 剛博¹; 鈴木 雄治郎¹
SHIMIZU, Hiroyuki^{1*}; KOYAGUCHI, Takehiro¹; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

火山噴火でしばしば発生する火砕流は、火砕物粒子と火山ガスから成る混相流が周囲大気との密度差を駆動力に流動する密度流であり、幅広い密度比 ρ/ρ_a ($\sim 10^0$ - 10^3) をもつという特徴がある (ここで ρ は火砕流の密度、 ρ_a は周囲大気の密度)。また、その伝播速度などのダイナミクスは、火砕流内における火砕物粒子の沈降、周囲大気の取り込み (エントレインメント) などの様々な物理過程の影響を受ける。本研究の目的は、火砕流ダイナミクスにおけるこれらの効果を理解することである。そのために、浅水波方程式を基にした火砕流モデルを開発し、そのモデルを解析解や自己相似解が知られているダム・ブレイク問題に適用することによって、上述した効果を評価した。

幅広い ρ/ρ_a をもつ火砕流を浅水波方程式で正しく解くためには、先端における駆動力と周囲抵抗の力学的バランスを表す先端条件を正しく解く必要がある。先行研究では、先端条件の取り扱いに関する数値手法として、先端条件を境界条件として解く Boundary-Condition (BC) タイプモデルと、先端よりも先の領域に静止した微小な仮想流体層を置いて先端の計算を行う Artificial-Bed (AB) タイプモデルが提案されている。本研究では、ダム・ブレイク問題の解析解を用いた検証によって、 $\rho/\rho_a \geq 100$ では AB タイプモデルを用いることができ、 $\rho/\rho_a \leq 100$ では BC タイプモデルを用いるべきであることを明らかにした。さらに、これまでの BC タイプモデルを改善し、先端において保存則を数理的に正しく解く信頼性の高いアルゴリズムを開発した。

確立した数値手法を用い、ダム・ブレイク問題における流れの時間発展に対する ρ/ρ_a の影響、特に粒子沈降とエントレインメントの効果を含まない系において ρ/ρ_a の影響がどのように変化するかを調べた。粒子沈降には、先端の伝播速度を減衰させ、流れを不連続によって頭部と尾部に分離させる効果があり、その不連続の形成は ρ/ρ_a が大きくなるに従って早まる。エントレインメントには、先端の伝播速度を減衰させ、頭部と尾部の分離を抑制する効果があり、また、エントレインメントの激しさは ρ/ρ_a が大きくなるに従って激しくなる。粒子沈降とエントレインメントの両方の影響がある場合、それぞれのもたらす効果の競合によって、頭部・尾部境界の不連続の形成など、流れの様相にバリエーションが生じると考えられる。

火砕流は、一般には上部の低濃度部 ($10^0 \leq \rho/\rho_a \leq 10^1$) と下部の高濃度部 ($\rho/\rho_a \sim 10^3$) から成り、それによって大きな密度勾配をもつ。そのような密度勾配を持つ火砕流のダイナミクスを再現するためには、低濃度部を BC タイプモデル、高濃度部を AB タイプモデルで解く 2層流モデルを適用する必要がある。本研究では、より現実的な火砕流ダイナミクスの再現を目指し、低濃度部には粒子沈降とエントレインメントの効果を、高濃度部には粒子沈降や底面抵抗の効果を導入した 2層流モデルの定式化と実装を行い、低濃度部・高濃度部・堆積物の時間発展について予察的結果を得た。

キーワード: 火砕流, 密度流, 重力流, 浅水波方程式, 2層流モデル

Keywords: pyroclastic flows, density currents, gravity currents, Shallow-Water equations, two-layer model