

1次元浅水波方程式による火砕流モデリングにおける流れの先端部の数値的取り扱い Numerical treatment of dry bed problem in the model of pyroclastic flows based on the 1-D 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

爆発的火山噴火において、火口から噴出する火砕物と火山ガスの混合物は、初期鉛直運動量を失う高さで大気よりも高密度の場合、火砕流となって地表を流動する。火砕流のダイナミクスは近似的に非粘性重力流として定式化が可能である。非粘性重力流は、先端部で流れの駆動圧（浮力による圧力）と周囲の流体からの抵抗圧（動圧）がほぼバランスする（先端条件）という特徴をもつ（例えば、Benjamin, 1968）。この先端条件から、非粘性重力流のダイナミクスは流れの密度（ ρ_c ）と周囲の密度（ ρ_a ）の比 ρ_c/ρ_a によって特徴づけられることがわかっている（例えば、Ungarish, 2009）。 $\rho_c/\rho_a \sim 1$ の場合には、流れの先端部は大きな高さを持って流動する。そして、 ρ_c/ρ_a が 1 から大きくなるに従って、流れの先端部の持つ高さは徐々に小さくなる。火砕流内部では ρ_c/ρ_a は幅広い時空間的なバリエーションを持つため、火砕流のダイナミクスの定量的振る舞いを単純な重力流モデルで記述することが難しい。そのため、火砕流の到達距離や時間発展を予測することは未だにできない。本研究は様々な ρ_c/ρ_a に対する非粘性重力流の統一モデルの開発を目的とする。

厚さの薄い非粘性重力流に対する単純化された基礎方程式は浅水波方程式として知られている。非粘性重力流の浅水波方程式を解く数値的モデルには、大きく見て 2 種類ある。1 つめを shock front condition model (SFC model) と呼び、もう 1 つを artificial bed-wetting model (ABW model) と呼ぶ。SFC model は、先端部に境界条件として先端条件を適用するモデルであり、先端部で常に浅水波方程式と先端条件を連立して流れの時間発展を計算する。このモデルでは、 ρ_c/ρ_a を先端条件に関するパラメータとして扱う（例えば、Ungarish, 2009）。ABW model は、先端部より先の領域に高さ ϵh_0 の仮想流体を設置し、それを先端部が受ける周囲からの抵抗（動圧を生み出すソース）の代替物とするモデルである。ここで h_0 は特徴的な高さスケールである。このモデルでは、先端条件に関する唯一のパラメータはこの ϵ である（例えば、Toro, 2001; Larrieu et al., 2006; Doyle et al., 2007）。本来ならば SFC model のように先端部に ρ_c/ρ_a の関数として先端条件を課すべきところを、ABW model ではパラメータ ϵ を与えるということで非常に単純化し、先端部でも浅水波方程式のみを解くだけで流れの時間発展を簡単に安定して解くことを可能にしている。しかし、ABW model のパラメータ ϵ がどれくらいの大さの ρ_c/ρ_a の先端条件に相当するのかわかっていない。また、ABW model の ρ_c/ρ_a に関する適用範囲も明らかではない。従って本研究では、これらの問題を解決するために、2 つのモデルで単純な 1 次元のダム・ブレイク問題を解き、広範囲なパラメータ・スタディを行った。

本研究では、SFC model と ABW model の数値計算結果を系統的に比較することによって、 $\epsilon \sim 8.62 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho_c/\rho_a)^{-1.87}$ という ρ_c/ρ_a と ϵ の対応関係を得た。また、ABW model は、 $15 < \rho_c/\rho_a$ の場合に適用できることもわかった。一方、 $1 < \rho_c/\rho_a < 15$ では、先端部の前の仮想流体上を非物理的な衝撃波が伝播してしまうことがわかった。このことから、ABW model には、密度比が比較的小さい重力流に対して流れのプロファイルに関する正しい解を示さないという適用限界があることがわかった。

キーワード: 火砕流, 重力流, 浅水波方程式, 数値シミュレーション, 火山防災

Keywords: pyroclastic flows, gravity currents, shallow-water equations, numerical simulation, volcanic disaster prevention