

火砕流の発生・流動・堆積・停止に対する観測・実験的事実および数値モデルのレビュー： モデル予測結果の信頼性はいかに担保されるべきか？

砂防・地すべり技術センター 砂防技術総合研究所 ○志水 宏行

1. はじめに

火砕流は、高温の火山砕屑物粒子とガスから成る土砂移動現象であり、爆発的／非爆発的噴火といった噴火様式に関わらず発生し得るため、そのハザード評価は幅広い噴火シナリオに対し実施される。火砕流は内部に粒子濃度の成層構造を有し、一般に上部の低濃度乱流懸濁流（粒子体積分率 $\leq 10^{-2}$ ）と下部の高濃度粒子流（粒子体積分率 $\geq 10^{-1}$ ）から成る¹⁾。それぞれは異なる複数の物理素過程に支配され、上下領域間で質量・運動量・エネルギーを交換することから、火砕流全体の流動・堆積・停止過程は非線形性の強い複雑な挙動を呈し、その実態は未だ十分に解明されていない。

火山砂防事業では、想定シナリオに応じて設定された発生条件に対し、火砕流の流動・堆積・停止が、数値シミュレーションに基づき評価される。本発表は、これまで見過ごされがちであった砂防分野外での火砕流の発生・流動・堆積・停止に対する最新の知見を概観し、火山砂防事業に活用されている火砕流シミュレーションに対する今後の信頼性評価・高度化の一助となる知識基盤の整備を目指す。

2. 観測・実験的事実に基づく概念モデル

2.1. 発生

爆発的噴火での火砕流は、主に、噴煙柱の崩壊により発生する。噴煙柱は主に低粒子濃度の混合物であることから、崩壊噴煙柱から低濃度流が直接形成され得る。下部高濃度流は、崩壊噴煙柱の底での粒子の濃集によって形成され流動する過程、および、低濃度流底面での粒子沈降に伴う質量・運動量輸送により二次的に形成され流動する過程が考えられている^{2,3)}。

非爆発的噴火による火砕流は、主に、溶岩ドームの崩落により発生する。発生直後の火砕流は、高濃度流として流動するが、上面での粒子の上方輸送過程により、上部低濃度流が二次的に形成される^{2,4)}。

2.2. 流動・堆積・停止

2.2.1. 上部低濃度流

低濃度流の流動・堆積・停止は、これまで主に水・懸濁粒子系の室内水槽実験により調べられてきた。流動構造の大局を規定する要素は、流れ先端で周囲流体の抵抗により形成される厚く低速な頭部、その後続の本体部、上部の周囲流体との乱流混合部である^{5,6)}。

一方、この構造を保ったまま流れがどこで地表流としての拡大を停止するかを決める主要因は、底面での粒子沈降（堆積）と上面での周囲大気の取り込みによる密度低下である^{6,7)}。さらに、大気・懸濁粒子系実験により、取り込まれた大気の熱膨張も密度低下を促進することが示されている⁸⁾。従って、低濃度流は、粒子

沈降と周囲大気の取り込み・その熱膨張の競合によりバルク密度が低下し、最終的に周囲大気より軽くなって上向きの浮力を獲得し、二次的な噴煙柱（灰神楽）として地表面から離陸する。この挙動は観測・実験の双方で広く認識されており、低濃度流の拡大停止機構の中核とみなされている⁶⁻⁸⁾。

2.2.2. 下部高濃度流

下部高濃度流の流動・堆積・停止は、これまで主に、箱の中で流動化した高濃度粒子群を側壁から解放するダムブレイク型室内実験により調べられてきた。その流動構造は、侵食を生じ得る先頭部と、その後続で累進堆積を生じ得る本体部からなる^{9,10)}。この構造は流れ内部の間隙流体圧に強く支配される。先頭部では、流れ底面の間隙流体圧が地形面側より低いことにより上向き圧力勾配が生じ、基盤侵食が駆動される¹⁰⁾。これに対し本体部では、高い間隙流体圧によって粒子重量の多くが支持されるため底面摩擦が低減し、流れは非粘性流体のような慣性流動を示しつつ、その底で累進埋積的な堆積が進行する⁹⁾。さらに近年の大規模実験では、底面近傍の強せん断による圧力勾配により空気が底面側へ集積し、空気潤滑底層が形成されることで、底面摩擦が著しく低下し、累進堆積が抑制されることが示された¹¹⁾。

高濃度流の停止は、上記の流動・堆積過程を支配する二つの要因、すなわち、(i) 過剰間隙流体圧の散逸と空気潤滑底層の弱化による底面摩擦の増加、および(ii) 累進堆積による流動方向の質量流量（流動層厚）の減少、が結びついて進む複合過程として理解できる。

2.2.3. 上下二流動領域間の相互作用

上部低濃度流と下部高濃度流の存在や、地形に応じた分離・再形成の現象は野外観測に基づき広く認識されている一方で、領域間粒子輸送の物理過程は、個別領域における物理過程に比べてなお十分には理解されていない。上部低濃度流から下部高濃度流への質量輸送は、第一近似として粒子沈降により表現されることが多く、沈降した粒子は二次的な高濃度流を形成するだけでなく、条件によっては堆積物を直接形成しうると考えられている¹²⁾。一方、下部高濃度流から上部低濃度流への粒子輸送は、ガス流に伴う細粒の選択的上方分離として捉えられる¹³⁾。この過程の駆動要因としては、乱流、ガス放出・減圧、加熱大気の取り込み、粒子衝突などが従来提案されているが、それらの相対的重要性はなお明確ではない¹⁴⁾。近年は、中間濃度領域や粒子クラスターの役割も示されており、領域間結合の理解は依然として重要課題である^{1,15)}。このような領域間相互作用と各領域の個別ダイナミクスの組合せ

として、火砕流全体の流動・堆積・停止過程は決定される。

3. 数値モデル

上記で整理した火砕流の発生・流動・堆積・停止における各過程の効果を評価するために、微視的過程に対しても直接的な解析対象とする3次元多相流体方程式系モデルが主要なアプローチとして採用されている^{3,16,17}。一方、上記過程全てを評価するミニマルモデルとして、厚さ積分された浅水流方程式系に基づく二層モデルも近年開発・活用が進んでいる^{4,14,18,19,20}。火山砂防事業を含む防災実務では、浅水流型数値モデルが主に活用されているため、以下では、一層モデルも含めた浅水流方程式系に焦点を絞り整理する。

3.1. 発生

噴煙柱崩壊型・溶岩ドーム崩落型のいずれについても、発生過程全体を物理に基づき逐次記述するというより、火砕流本体へ与える流入境界条件を簡約的に与える扱いが基本となっている。噴煙柱崩壊型については、崩壊噴煙柱の外縁から供給される低濃度火砕流を出発点とし、火口起源物質（マグマおよび地下水・湖水・海水などの外来水）と崩壊時に取り込まれた周囲大気との熱力学的関係に基づいて、噴煙柱端での温度・ガス質量分率・密度などを評価したうえで流動を記述する枠組みが示されている^{20,21}。ただし、噴煙柱崩壊時の周囲大気混合率や、崩壊噴煙柱端でのリチャードソン数、厚さと半径のアスペクト比といった供給条件の一部は外生的に与える必要がある。さらに、噴煙柱崩壊から噴煙柱端に至る過程で、低濃度流と高濃度流の間にどのような質量分配が生じるかについても、経験的に与えざるを得ない。溶岩ドーム崩落型についても、ドームの成長・不安定化・崩落開始を物理に基づき一体として記述するモデルは一般的ではなく、崩落体積、崩落継続時間、崩落位置・形状、パルス数、初期速度などを独立に設定することで、多様な崩落供給条件の表現が試みられている²²。

3.2. 流動・堆積・停止

3.2.1. 上部低濃度流

実験結果に基づく低濃度流の流動・堆積・停止過程の大局は、質量・運動量・エネルギー保存則と、流れの密度や温度などの熱力学的変数を関係付ける状態方程式により定式化される¹⁹⁻²¹。保存則に、底面での粒子沈降、および、上面での周囲大気流入を考慮することで、それらの競合が停止機構である離陸にもたらす影響を評価できる。さらに、重力流の浅水流理論に基づき、流れ先端における周囲流体抵抗を移動境界条件として評価することにより、低濃度流の流動過程を特徴づける厚く低速な頭部とその後続の本体部を表現できる²³。

3.2.2. 下部高濃度流

下部高濃度流については、粒子濃度・温度を一定と

した乾燥粒状体近似に基づく質量・運動量保存則により、実験結果に基づく流動・堆積・停止過程の大局が定式化される^{24,25}。高濃度流の数値モデルとしては、定性的に異なる2種類がこれまで提案されている。一つは、運動量保存式にクーロン型摩擦則を適用し、底面での過剰間隙流体圧の拡散方程式を連立することにより、過剰間隙流体圧の維持による底面摩擦の低減効果をモデル化する^{4,26}。このモデルでは、慣性流動状態から過剰間隙流体圧の拡散に伴う底面摩擦増大による停止過程が評価される一方、累進堆積による堆積物形成は扱われない。もう一つのモデルは、運動量保存式にシェジ型摩擦則のみを適用し、質量・運動量保存式に底面堆積を考慮することにより、流動中の流れの進行方向の質量流量の減少効果をモデル化する^{19,23}。このモデルでは、慣性流動、底面での累進堆積、質量流量損失による停止過程が表現される一方、過剰間隙流体圧拡散による底面摩擦の増加は扱われない。また、両モデルとも、流れ先頭部での侵食過程や本体部での空気潤滑底層の効果は評価対象外となる。

3.2.3. 上下二流動領域間の相互作用

上部低濃度流から下部高濃度流に対しては、終端速度に基づく粒子沈降による二層間質量交換がモデル化される^{4,14,18,19,20}。下部高濃度流から上部低濃度流への粒子輸送については、急斜面・凹凸地形上での粒子群の跳躍・再落下に伴う空気取り込みと、再衝突時の圧密による空気排出が、高濃度流の流動化と細粒の選択的上方分離を同時に生じさせる機構としてモデル化される⁴。

4. おわりに：モデル予測の信頼性担保に向けて

個別イベントの堆積物や到達範囲への適合に基づく較正が、これまでのモデル評価の中心であった。今後はこれに加え、上記で整理したような観測・実験的知見に照らして、活用目的に対し必要な物理過程が過不足なく表現されているかを定性的にも点検することが重要である。さらに、供給条件・地形条件・到達範囲などが制約された複数事例を統一的に説明できるかを検証の対象に広げることが、防災実務上の信頼性向上だけでなく、火砕流現象そのものの理解にも有効である。

引用文献

- 1) Lube et al. 2020; 2) Druitt 1998; 3) Valentine 2020; 4) Kelfoun & Gueugneau 2022; 5) Bonnetcaze et al. 1993; 6) Sparks et al. 1993; 7) Woods & Bursik 1994; 8) Andrews & Manga 2012; 9) Roche 2012; 10) Roche et al. 2013; 11) Lube et al. 2019; 12) Branney & Kokelaar 2002; 13) Fisher 1979; 14) Kelfoun 2017; 15) Breard et al. 2016; 16) Dufek & Bergantz 2007; 17) Esposti Ongaro et al. 2008; 18) Doyle et al. 2008; 19) Shimizu et al. 2019; 20) Shimizu et al. 2023; 21) Bursik & Woods 1996; 22) Ogburn & Calder 2017; 23) Shimizu et al. 2021; 24) Patra et al. 2005; 25) Kelfoun & Druitt 2005; 26) Gueugneau et al. 2017