

火山ダイナミクスの数値シミュレーション

小屋口 剛博（東京大学地震研究所）

1. はじめに

火山現象は固体地球と大気海洋にまたがるダイナミックな地学現象であり、特に、噴火現象は重大な自然災害を引き起こす可能性がある。そのため、火山現象の物理過程の理解が防災上喫緊の課題となっている。本課題では、相変化・相分離・熱輸送・乱流を伴う噴火ダイナミクスに関する数値モデルの開発を行い、大規模数値計算によって火山現象を支配する物理過程の理解を進める。また、火山噴火に伴う災害範囲・規模を定量的に正しく再現・予測することを目指す。

噴煙の上昇・拡大が特徴的な爆発的噴火は、最も危険な火山現象のひとつである。爆発的噴火が発生すると、地中で破碎されたマグマ（火山灰や軽石などの「火砕物」）と火山ガス（主に水蒸気）が火口から高速で噴出する。この噴出物は、周囲の大気を取り込み、その熱によって取り込んだ大気を急激に膨張させる。その結果、噴出物と混合大気からなる噴煙は周囲の大気よりも軽くなり、対流圏上部や成層圏まで浮力によって上昇する。噴煙が成層大気の密度と釣り合う「浮力中立高度」に達すると、水平方向に拡大し、傘型噴煙が形成する。火砕物は噴煙によって上空に運搬され、傘型噴煙や周囲大気の風によって遠方へ運ばれる。大気中に滞留する火砕物は航空路の障害となり、地表に堆積した火砕物はインフラの破壊や農作物へのダメージにつながる。

噴煙高度（最高高度と傘型噴煙高度）が火砕物の滞留高度や堆積分布を支配するため、火口での噴出条件と噴煙高度の関係を正しく見積もる必要がある。これまでに提案された噴煙ダイナミクスの1次元モデルによって、噴火強度を代表する噴出率 [kg/s] が大きくなるほど噴煙高度は高くなることが示された。ただし、1次元モデルでは、噴煙内の物理量水平分布や大気を取り込み効率に関して単純なモデル化が施されている。本課題では、このような単純化を用いず、物理量水平分布や

大気混合効率を直接計算できる3次元シミュレーションを用い、噴煙の再現を試みている。本課題のこれまでの研究（平成23年度など）で、噴煙下部の物理量水平分布や大気混合率が火口での噴出条件によって大きく変化することが明らかになった。本年度は、噴火条件による噴煙下部構造の変化が噴煙高度に与える影響に注目し、3次元シミュレーション結果に基づいた研究を推進した。

2. 噴煙の3次元モデル

これまでに、任意の大気条件・噴出条件に対し噴煙挙動を再現できる3次元モデルを開発した。このモデルでは、地表にある円形の火口から火砕物と火山ガスの混合物が高速で成層大気中に噴出させる。火砕物と気相（火山ガス＋混合大気）の温度差や速度差は無視し、噴煙（火砕物＋火山ガス＋混合大気）を一つの流体として扱う。この仮定は、火砕物の粒径が小さい場合に成り立つ。噴出物と大気が混合したときに噴煙全体が軽くなる様子は、噴出物と大気の混合比によって噴煙の比熱費を変化させることで再現する。

実際の数値計算は、火口付近の細かな噴煙構造を再現しつつ、水平方向に大きく広がる傘型噴煙を再現しなければならないため、10億格子程度の大規模計算が必要となる。十分な計算精度を保つため、空間3次精度の計算スキームを用いた。効率的に計算を行うため、一般座標を用い、火口から離れるとともに計算グリッドが大きくなるようにした。地球シミュレータの128ノードを用い、計算を実行した。

3. 計算結果

噴出率を 2×10^7 kg/s から 4×10^8 kg/s の間で5種類変えた場合の噴煙シミュレーションを行った。その結果、噴出率によって噴煙下部の構造が大きく変わる様子が観察された。噴出率が 4×10^7 kg/s より小さい場合、高速ジェットのような構造を持ち、噴出物の質量分率

や速度分布は高度とともに連続的に変化した（図2）．一方、噴出率が $1 \times 10^8 \text{ kg/s}$ よりも大きい場合、高度 3 km 付近で噴煙は上昇速度を下げ、横方向に広がり、噴水のような構造を持った（図3）．この噴水構造の頂部で大量の大気を取り込み、軽くなって再び上昇した．その結果、噴水構造の頂部で噴出物の質量分率や速度に不連続が生じた．噴出率が $4 \times 10^7 \text{ kg/s}$ から $1 \times 10^8 \text{ kg/s}$ の間では、遷移状態の流れとなった．

噴出率に対する噴煙最高高度と傘型噴煙高度をプロットした（図4）．その結果、噴出率が $4 \times 10^7 \text{ kg/s}$ より小さい場合と $1 \times 10^8 \text{ kg/s}$ よりも大きい場合には、噴出率とともに噴煙高度は高くなった．しかし、噴出率が $4 \times 10^7 \text{ kg/s}$ から $1 \times 10^8 \text{ kg/s}$ の間では、噴煙高度はあまり変化しない、もしくは低下することが分かった．噴煙高度のこの傾向は、火口付近の流れの構造と対応付けられる．

以上より、噴出条件と噴煙高度の関係を正確に見積もるためには、火口付近の流れのパターンを考慮しなければならないことが明ら

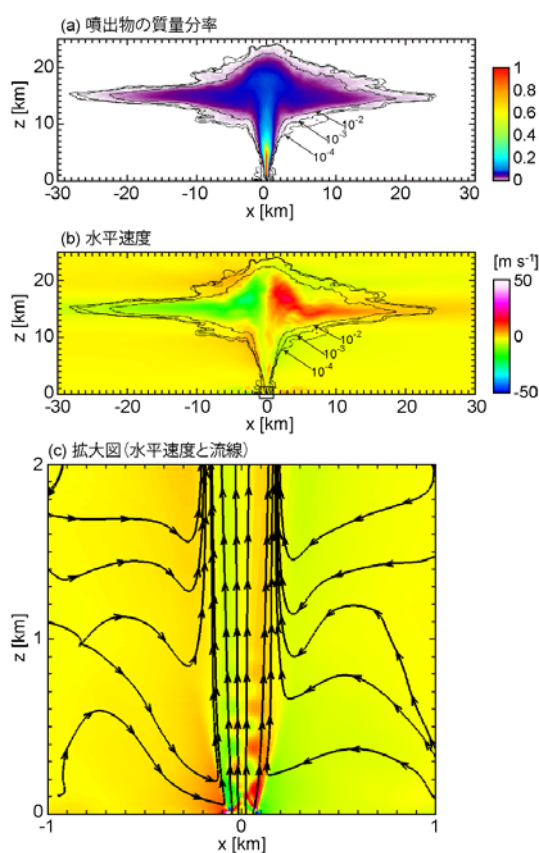


図2：噴出率 $2 \times 10^7 \text{ kg/s}$ の噴煙シミュレーション結果．

かになった．この結果は、噴煙高度を観測して火口の状態を推定する場合や、噴火強度を与えた場合に噴煙がどこまで上昇するかを予測する防災利用における重要性を示唆する．

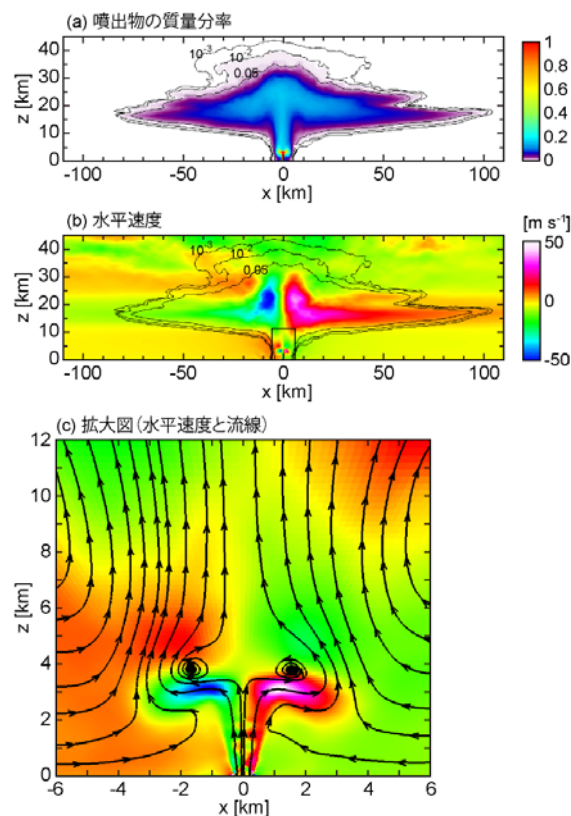


図3：噴出率 $4 \times 10^8 \text{ kg/s}$ の噴煙シミュレーション結果．

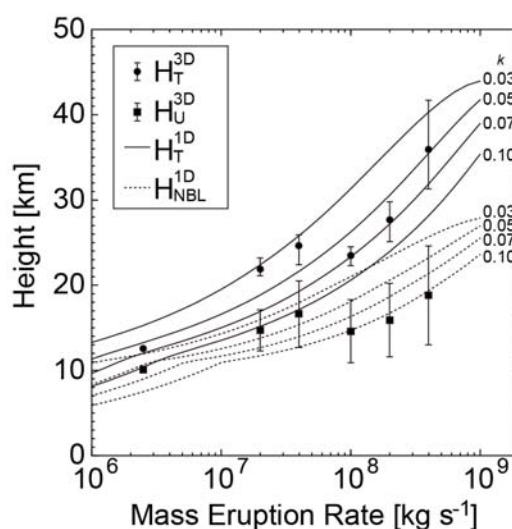


図4：噴出率をパラメータとしたときの噴煙の最高高度 H_T と傘型噴煙高度 H_U ．