

不足膨張噴流が形成する内部構造と乱流混合過程に与える影響についての3次元数値モデルを用いた研究

Numerical study on internal structure and turbulent mixing of overpressured jets

稲川 聡^{1*}, 小屋口 剛博¹, 鈴木 雄治郎¹

Satoshi Inagawa^{1*}, Takehiro Koyaguchi¹, Yujiro Suzuki¹

¹ 東京大学 地震研

¹ ERI University of Tokyo

爆発的火山噴火において、噴煙が安定した噴煙柱を形成するか、崩壊して火砕流を形成するかを予測することは、火山学上のみならず防災上も重要な課題である。火砕流の発生条件は乱流混合過程と火口直上の上昇速度によって決定される。一般に、火砕物と火山ガスで構成される火口からの噴出物は、周囲の大気より高密度であり、初期運動量を失うと火砕流として流れ下る。一方、火口から噴出物が高速度で上昇した場合、初期運動量を失う前に周囲の大気を効率よく取り込み、取り込んだ大気が火砕物の熱で膨張するため、噴出物と大気の混合物は大気より低密度になり、噴煙柱として上昇する。近年、噴出する火砕物と火山ガスの混合物が圧縮性を持つという事実が火砕流の発生条件に影響を与えるということが指摘されている（例えば、Koyaguchi et al., 2010）。圧縮性を持つ噴出物が大気圧以上の圧力で火口から放出されると、噴煙は膨張波や衝撃波を含む複雑な内部構造を形成して加速し、その内部構造は噴煙と大気の乱流混合に影響を与える。本研究では大気圧以上の圧力を持って音速で火口から放出される噴煙に焦点を絞って、その火口直上での乱流混合過程、および圧縮性流体としての振る舞いについて3次元数値モデル (Suzuki et al., 2005) を用いて解析した。

圧縮性流体が大気圧以上の圧力を持って音速でノズルから放出されると、噴出後の膨張によって加速され、超音速流となる。この超音速流はノズル直上に流れにほぼ垂直なマッハディスク衝撃波を形成する。軸部の超音速上昇流はマッハディスクを通過すると急減速し亜音速流となる。一方、軸部を囲んで樽状にパレルショックが形成され、その外側に噴流境界が形成される。パレルショックと噴流境界に挟まれたジェット周縁部では、軸部の上昇流がマッハディスクで減速した後もマッハ2程度の高速度を保って上昇する。Solovitz et al. (2011) は、このような複雑な内部構造が噴流の乱流混合に与える影響について実験的に調べた。この実験結果によると、マッハディスクより上部における超音速乱流ジェットの混合効率は、火口から直接亜音速流れとして噴出する乱流ジェットの混合効率に比べて最大40%程度減少する。我々は、実験において観察された圧縮性流体の振る舞いやジェット周縁部の高速度領域の混合過程を数値的に再現することを目的とした。

本研究の数値計算結果は、従来の実験的研究によって明らかにされた内部構造を半定量的に再現できた。具体的な例として、Solovitzらの実験条件、すなわち温度258 Kの空気が圧力2.55 atmの条件かつ音速で大気中にノズルから放出されるとして数値計算を行ったところ、実験の観察結果と計算結果が半定量的に一致した。ノズル直上にマッハディスクが形成され、上昇速度がマッハ2.5程度からマッハ0.5程度に急減速した。軸部を囲むようにパレルショックが形成され、ジェット周縁部に高速度領域が筒状に形成された。このジェット周縁部の高速度領域は、マッハ2程度の高速度を持ち、ノズル半径の20倍程度の高さまで維持された。

今回得られた数値計算結果について、さらに詳細に解析したところ、噴流境界に渦構造が形成され、それがジェット周縁部の高速度領域と大気との混合過程を著しく促進していることが分かった。Solovitz et al. (2011)の実験結果に対する混合効率の解析は、ある高さにおけるジェットの断面全体の平均的な混合効率を求めたものであり、数値計算で観察されたジェット周縁部の局所的混合効率を求めたものではない。爆発的火山噴火においては、ジェット周縁部の局所的混合が、噴煙柱の安定化をもたらす可能性がある。

キーワード: 火山, 噴煙, 数値シミュレーション, 火砕流

Keywords: volcano, eruption cloud, numerical simulation, pyroclastic flow