

## メラピ型火砕流の準リアルタイムハザード情報作成システムの構築 Development of Quasi-Real Time Hazard Information System for Merapi Type Pyroclastic Flow

○下村 誠・井口正人・中道治久・宮本邦明

○Makoto SHIMOMURA, Masato IGUCHI, Haruhisa NAKAMICHI, Kuniaki, MIYAMOTO

Pyroclastic flow is one of the most dangerous hazardous phenomena in volcanic eruption. To safely evacuate from the pyroclastic flow, it must be moved away from possible hazardous zone before the pyroclastic flow happens. Therefore, forecasting of possible inundation area of pyroclastic flow is important. We have developed a system for analyzing quasi-real time hazard information for Merapi type pyroclastic flow by integration of analysis result of seismic observation and pre-analysis database as numerical simulation results of basal part of pyroclastic flow subjected to possible simulation cases. The system was demonstrated in case of Merapi pyroclastic flow in 2010. The hazard information obtained by the system would be strongly supported to decision making for the evacuation.

### 1. はじめに

火砕流（ここでは噴火に伴い放出された火砕物やガスが流動化し地表面を移動する現象を指す）は火山噴火に伴う一連の現象で最も危険なものである。1991年の雲仙普賢岳では、火砕流の速度は50-100m/s以上、温度は流れの末端部でも300-400℃以上と報告されている（石川ほか, 1993; Yamamoto et al., 1993）。このような高温高速の火砕流に人体が曝された場合の致死率は極めて高く（杉本・長井, 2009）、被害から逃れるためにはその影響範囲からの事前に避難することが不可欠である。即ち、火砕流の到達範囲予測が必要である。

物理現象を予測するためには、対象とする場の時間発展を近似する支配方程式系とその方程式を数値的に解くための諸条件（初期条件、境界条件、物理定数係数）を適切に与える必要がある。火砕流のシミュレーション手法については、流れを粒子流として近似する手法が提案されている（e.g. 宮本ら, 1992; Dorban and Neri, 1993; Takahashi and Tsujimoto, 2000）。特に、宮本ら（1992）の手法は、溶岩ドーム崩壊による流動化するメラピ型火砕流に適用され、体積密度の大きな本体部の到達範囲を良く再現できる（e.g. Yamashita and Miyamoto, 1993; Shimomura et al., 2019）。一方、Dorban and Neri（1993）や Takahashi and Tsujimoto（2000）の手法は火砕流本体部だけでなく体積密度の小さなサージ部も取り扱えるが、境界条件が複雑で実現象との比較も少ないことから予測に用いるには多くの課題が残る。

火砕流本体部の運動量は重力ポテンシャルにより供給される。この作用により流れは基本的に谷筋に沿う。ただし、流量が河道の容量を越える場合や十分な運動量があれば流れは氾濫・越流し得る。つまり、初期条件である地形（Digital Elevation Model: DEM）と境界条件である上流端の流量と継続時間を規定する火砕流体積は重要な条件であるといえる。一方、火砕流体積については、火砕流発生後の現地調査や衛生観測により評価することはできるが、予測の場合はこれらの方法は適用できない。さらに、観測結果の不確実性も条件に考慮する必要がある。これらの条件は時間空間的に変化するため、ハザードマップは条件に対応して適宜更新されなければならない。

そこで、ここでは火砕流の影響範囲を予測する試みとして、観測による火砕流体積を準リアルタイムで予測するサブシステムを、可能な条件を網羅したシミュレーション結果データベースに統合し、メラピ型火砕流の本体部到達範囲を準リアルタイムで評価するシステムを構築した。本システムを2010年のメラピ山の火砕流に適用し、事前避難への有効性を検討した。

### 2. 火砕流シミュレーション結果データベース

火砕流本体部の宮本ら（1992）の火砕流シミュレーション手法を用いて、可能な条件のシミュレーション結果を事前に評価した。宮本ら（1992）は金谷（1979）の力学的な考察から求めた粒子流のエネルギー散逸モデルを用いて、粒子間摩擦に

特徴づけられる粒子流の構成則を導き火砕流シミュレーションに適用している。この手法では流れの停止を堆積により説明することができる

2010年のメラピ火砕流の可能な条件として、初期条件にALOS-AW3D(5mメッシュ)のDEMを15mメッシュに補完して用いた。このDEMは2006-2011年に撮影されたステレオペアから作成され当時の地形として使用できる。境界条件は $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ から $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ までの9段階の火砕流体積と火口周辺に同心円上に9点(=9方向)の上流端位置を考慮した。その他の物理定数係数はShimomura et al. (2019)と同じ値を用いた。以上より、計81ケースを設定した。

得られたシミュレーション結果はデータベースに格納する。データベースは場(線形空間)の時間発展を集合論的に整理して得られるデータ構造に基づいてファイルシステム(物理データベース)を構築した。また、効率的な検索を行うため物理データベースと諸条件を関連づけるリスト(論理データベース)を構築した。

### 3. 火砕流規模の準リアルタイム評価

Iguchi et al. (2019)は噴火に先行する火山性地震(VTA, VTB, MP)に着目し、その積算エネルギー $E_s$ [J]と最大噴出物体積 $V_p$ [ $\text{m}^3$ ]が以下の関係にあることを示した。

$$\text{Log}V_p = 2\text{Log}E_s - 13.7$$

ここでは、最大噴出物体積の1/4が噴出・流動化し得ると仮定し火砕流体積を地震観測から準リアルタイムに評価した。

### 4. 火砕流の準リアルタイムハザード情報の作成

必要なインターフェースを開発しシミュレーション結果データベースと火砕流体積予測サブシステムを統合した。このシステムにより、シミュレーションの実行、データベース化、地震観測データの収集解析、到達範囲マップ作成等の処理が自動化される。

2010年のメラピ山噴火の時系列を以下に示す。火山活動の活発化を受けて9月22日に警戒レベル(4段階、最高4)が1から2に、10月21日には2から3に、10月25日には最高レベルの4にそれぞれ引き上げられている。10月26日には最初の噴火が発生し、火砕流が火口から南側のGendol河道を約5 km流下し35名の犠牲者を出した。11月5日にはGendol河道に沿って最大規模の火砕

流が約16 km流下(Chronin et al., 2013)し、60名以上の犠牲者を出した。総噴出量は0.03-0.06  $\text{km}^3$  (Suruno et al., 2010)、堆積した火砕流は $20-45 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった(Suruno et al., 2012; Solikhin et al., 2015)。

当時、本システムが存在していたならば、火口周辺の地形から火砕流はGendol方向に流下することは初期段階で特定でき、警戒レベル3の段階(10月21日)でFig. 1の警戒情報を、警戒レベル4の段階(10月25日)でFig. 2の警戒情報をそれぞれ出力できたことになる。これらの結果をもとに避難誘導を行っていたら、10月26日、11月5日の火砕流の発生前に安全に避難できた可能性は十分にあったと考えられる。

今後の課題は、火砕流サージも含めた火砕流到達範囲予測や、火道内外の流動化過程の明確化が挙げられる。

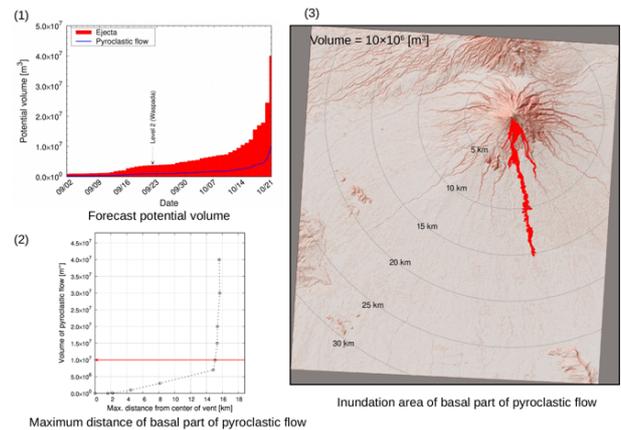


Fig. 1 Hazard information of pyroclastic flow at 21th Oct. 2010 at Mt. Merapi. (1) Potential volume (2) Maximum travel distance (3) Inundation area of basal part of pyroclastic flow.

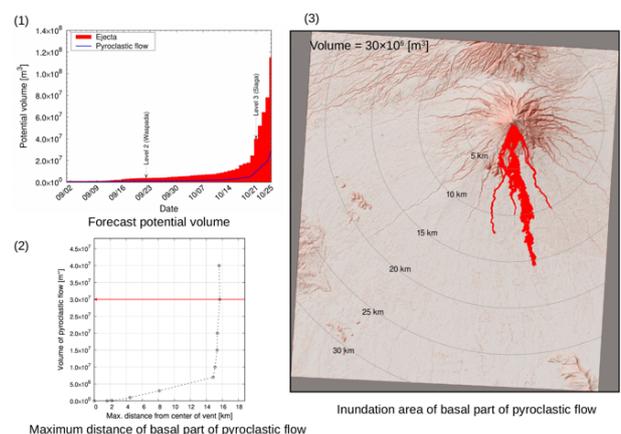


Fig. 1 Hazard information of pyroclastic flow at 25th Oct. 2010 at Mt. Merap