

メラピ火山における火砕流シミュレーション

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 ○松吉 晴可, 宮本 邦明
株式会社 地圏総合コンサルタント 山下 伸太郎

1 はじめに

インドネシア、ジャワ島中部に位置するメラピ火山は、2010年10月26日、噴火活動を再開した。連日のように火砕流が発生し、11月5日には今回の噴火で最大規模の火砕流が発生した。一連の噴火による火山噴出物は約15000万 m^3 と推定されている(植野, 2011)。

噴火開始後、我々は、10月26日の噴火状況をもとに噴火シナリオを作成し、そのシナリオを基に複数のケースを想定し火砕流数値シミュレーションを行った。このうちいくつかのシミュレーション結果は11月5日に発生した火砕流とよく似た傾向を示した。ここでその結果を報告する。

2 火砕流シミュレーションモデルの概要

火砕流は、Fig. 1に示すように、下層の粗い粒子からなる重力流動層と、上層の微細粒子と火山ガスや水蒸気などの気体からなる固・気混相流層からなると考えられている。

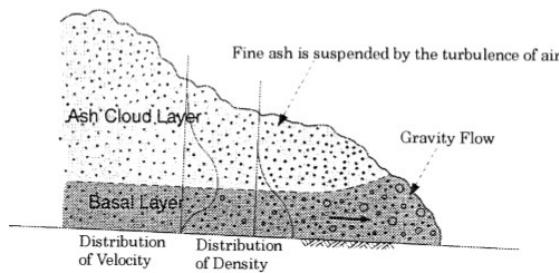


Fig. 1 火砕流の流動モデル(Yamashita and Miyamoto, 1993).

今回、火砕流モデルとして Yamashita and Miyamoto (1993)を用いた。このモデルは、金谷(1979)の構成方程式を基に、重力流動層を粒子流として扱ったモデルである。

2.1 支配方程式

支配方程式として、以下に示す2次元浅水流方程式が用いられている。

流れの体積の保存則(連続の式);

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

火砕物の体積保存則;

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + c^* \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial(cM)}{\partial x} + \frac{\partial(cN)}{\partial y} = 0$$

運動量保存則 (x軸方向);

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + fu \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

運動量保存則 (y軸方向);

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + fv \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

h は流動深, u, v は平均流速の x, y 成分, M, N はそれぞれ

uh, vh, c は流体中の火砕物の体積濃度, c^* は流動停止時における火砕物の体積濃度, z_b は路床標高, H は流動層上部標高, β は運動量補正係数, g は重力加速度, f は Weisbach の摩擦係数である。 f は火砕流に適した構成方程式から導く必要がある。

2.2 構成方程式

金谷(1979)は、回転や衝突による不規則な変動をする完全弾性体の粒子からなり、エネルギー消費機関として粒子間摩擦を考慮した粒子流モデルにおける構成方程式を導いた。金谷の構成方程式をせん断流れに適応すると次の式を得る。

$$p = \frac{1}{200} \frac{c}{1 - (c/c^*)^{1/3}} T_e \sigma d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{200\sqrt{10}} \frac{c^{4/3}}{1 - (c/c^*)^{1/3}} T_e \mu \sigma d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$c = \left(\frac{\sqrt{10}}{3} \frac{i_e}{\mu} \right)^3, \quad i_e = \frac{\tau}{p} \quad (7)$$

p は流れの圧力, τ はせん断応力, T_e は流れの状態を表す定数, σ は粒子密度, d は粒子直径, μ は粒子間の摩擦係数である。

上の式から、Weisbach の摩擦係数 f が以下のように求まる。

$$f = \frac{3}{32\sqrt{10}} \frac{c^{1/3}}{1 - (c/c^*)^{1/3}} T_e \mu \left(\frac{d}{h} \right)^2 \quad (8)$$

3 火砕流数値シミュレーション

3.1 2010年10月26日噴火の概要と噴火シナリオ

2010年10月26日にメラピ火山で発生した火砕流はメラピ型ではなかった。この火砕流ではメラピ型火砕流の供給源である溶岩ドームが形成されなかったことから、噴火口内側からの爆発がきっかけとなり火砕流が発生したと推測される。この爆発の発生場所が深さ数百m、噴火口の面積が数万 m^2 であることから、この火砕流の規模は数百万 m^3 と推定される。また、この爆発では火道は開いていないものと推測される。

以上のことより、10月26日以降、火道が開くような大きな爆発が発生し、その爆発を引き金に大規模な火砕流が発生すると考えられる。その火砕流の規模は10月26日の火砕流よりも1オーダー以上大きいことが予想され、ここでは5千万～1億 m^3 を火砕流の規模とした。また、噴火口が開いてる方向から、火砕流はGendol川や西側に隣接するBoyong川に沿って流下する可能性が高い。火砕流の継続時間は少なくとも数分以上継続することが予想される一方、数時間以上継続することは考え難い。そのため継続時間は火砕流規模に合わせて、20分から60分を想定した。

3.2 シミュレーション条件

3.1 の噴火シナリオより, Gendol 川方向へ流下し, 火砕流規模は 1 億 m^3 で継続時間を 20 分, 40 分, 60 分, 規模 5 千万 m^3 で継続時間を 20 分, 40 分とした 5 ケースの火砕流シミュレーションを行った. また Boyong 川方向へ流下し, 規模 5 千万 m^3 , 継続時間 20 分, 40 分とした 2 ケースのシミュレーションも行った. その他のパラメータについては, 火砕物の直径 d を 10cm, 内部摩擦係数 μ を 0.5, 火砕物密度 σ を $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 火砕堆積物の体積濃度 c^* を 0.6, 流れの状態を表す定数 T_c を 1.0 とした. また初期地形として, インドネシア, National Coordinating Agency for Survey and Mapping が配布している 25000 分の 1 地形図の等高線から作成した 50m メッシュの DEM を用いた.

3.3 シミュレーション結果と実際の火砕流の比較と考察

Gendol 川方向へ流下する 5 ケースの火砕流シミュレーション結果は同様の氾濫範囲を示した. 一例として, Fig. 2 に規模 5 千万 m^3 , 継続時間 20 分のシミュレーション結果を示す. Fig. 2 は火砕流の堆積厚分布を示した図である. Fig. 2 より, 火砕流は Gendol 川に沿って噴火口から 12~13km 下流にまで流下することが見て取れる. また, Fig. 2 中の Kaliadem 村の上流側(地点 A)と氾濫域の下流端(地点 B)に火砕流が厚く堆積していることが分かる. 他のケースにおいても, Fig. 2 と同様の場所に厚く堆積する結果を示した.

Fig. 3 に実際の火砕流の氾濫範囲を示す. Fig. 3 は 2010 年 11 月 15 日に ASTER センサーにより撮影された衛星写真であり, 白っぽく見える場所が火砕流の氾濫範囲である. この氾濫範囲は 11 月 5 日の火砕流によるものと考えられる. Fig. 2, 3 を比較すると, シミュレーション結果は, 実際の火砕流の流下経路や主な堆積場所など基本的な特徴を良く再現してい

と言える. しかし, Fig. 2 中の地点 B より下流川への火砕流の流下は再現できていない. この原因として, シミュレーションに必要な DEM などのデータの制限や, シミュレーションモデルが混合粒径の火砕物や火砕流上層の固・気混相流を考慮していないことがあげられる.

一方, Boyong 川方向へ流下するシミュレーション結果は 2 ケースとも同様な火砕流の氾濫範囲を示した. Fig. 4 に火砕流規模 5 千万 m^3 , 継続時間 20 分のシミュレーション結果の火砕流堆積厚分布を示す. Fig. 4 と Itoh *et al.* (2000) の 360 万 m^3 規模のシミュレーションの結果を比較し, Boyong 川における火砕流到達距離に大きな違いは見られなかった. 加えて, Boyong 川では今回のシミュレーション結果より下流側に火砕流が到達した形跡がないという現地調査結果があることから, Boyong 川には到達距離約 10km 以上の規模の火砕流は流入し難いと考えられる. また, Fig. 4 より, Boyong 川だけではなく Kuning 川にも火砕流が流入していることが見て取れる. これより, 5 千万 m^3 以上の規模の火砕流が Boyong 川方向へ発生した場合, Boyong 川に流れ込めない火砕流が隣接する Kuning 川に沿って流下する危険性があると考えられる.

4 おわりに

今回のシミュレーション結果は 11 月 5 日に発生した火砕流の特徴を再現することができた. 再現性を向上させるためには, シミュレーションモデルの改良や, 精度の良い DEM などシミュレーションに有用なデータの蓄積が必要である.

また, 今回シミュレーションを行う上で, DEM などシミュレーションに必要なデータの準備に多くの時間を費やした. この様なシミュレーション結果は, 災害対策を立てる上で重要である. 災害時に迅速にシミュレーションを行えるように, シミュレーションに必要なデータの整備が求められる.

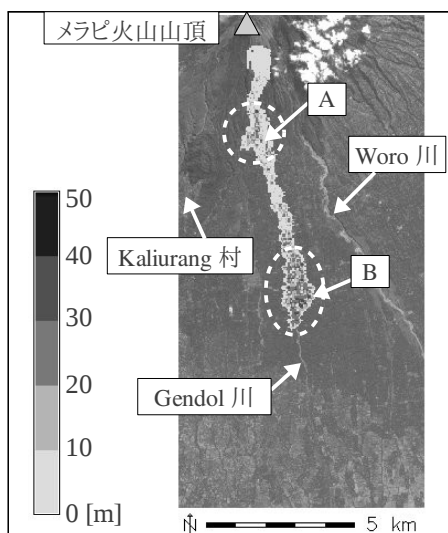


Fig. 2 シミュレーション結果, Gendol 川方向への火砕流堆積厚分布図

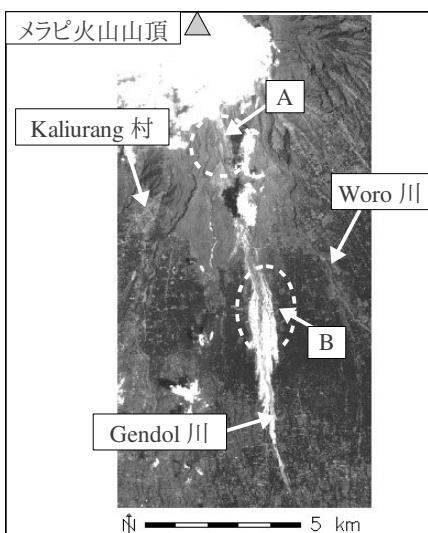


Fig. 3 実際の火砕流氾濫範囲 (2010/11/5, ASTER センサー撮影)

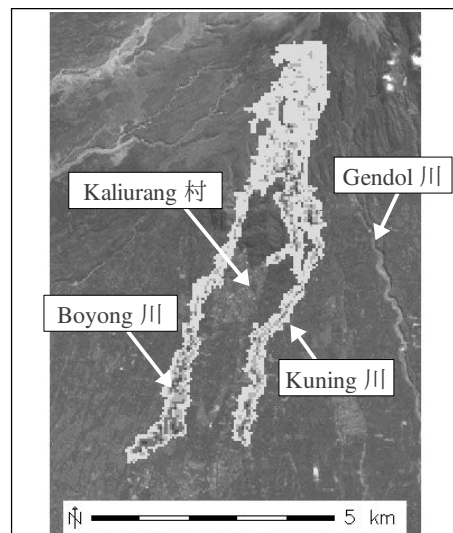


Fig. 4 シミュレーション結果, Boyong 川方向への火砕流堆積厚分布図

<引用文献> Itoh, H., Takahama, J., Takahashi, M., Miyamoto, K. (2000); Hazard estimation of the possible pyroclastic flow disasters using numerical simulation related the 1994 activity at Merapi. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 100, pp. 503-516

金谷 健一 (1979); “粒状体の流動の基礎理論(第 2 報, 発達した流れ)”, 日本機械学会論文集(B), Vol. 45, No. 392, pp. 515-522

植野 利康 (2011); “インドネシア・メラピ山 2010 年噴火災害報告(速報)”, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 5, pp. 47-51

Yamashita, S., Miyamoto, K. (1993); “Model of pyroclastic flow and its numerical simulation”, Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Predication and Control (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993). IAHS Publ., No. 217, pp. 67-74