

終端速度から推定された凝集テフラ粒子の密度
Density of Aggregated Volcanic Tephra Particles Estimated from Their Terminal Speeds

○真木雅之・井口正人

○Masayuki MAKI・Masato IGUCHI

The density of aggregated volcanic tephra particles is estimated from the center of mass flux (CMF) on the terminal speed and particle diameter diagram. Disdrometer data acquired from a total of five volcanic eruptions occurred from Sakurajima volcano are analyzed. Estimated densities are from approximately 600 kg m^{-3} to 1100 kgm^{-3} , which is 1/2 to 1/4 of the density expected to solid tephra particles. The results of the present study suggest that the quantitative radar estimation of tephra amount (a so-called *Za-R* relationship) is variable due to the variation of particle density. Statistical analyses on aggregated tephra particles acquired from number of eruption events are necessary to improve the accuracy of *Za-R* relationship.

1. はじめに

近年、国内外の研究から気象レーダによる降灰モニタリングの有効性が示されている。降灰モニタリングで使用されている重要な関係式に Z_A - R_A 関係式がある。 Z_A - R_A 関係式とは降灰強度 R_A とレーダ観測から求まるレーダ反射因子 Z_A の間の関係式である。真木・井口 (2022) は 2018 年から 2020 年の間に発生した噴火の際にディストロメータで収集された粒径分布データ (計 203 噴火事例, 計 4741 サンプル) を用いて Z_A - R_A 関係式を導き出した。その際、火山灰粒子の密度を固体粒子の密度と仮定して 2500 kgm^{-3} を用いた。しかしながら、実際の降灰粒子は小さな火山灰粒子が静電気や水によってくっつき合った凝集粒子であることが多い。凝集粒子の密度は固体粒子の密度よりも小さいので、提案された Z_A - R_A 関係式は降灰強度を過大評価していると考えられる。固体のテフラ粒子の密度は地上に堆積した粒子のサンプルの質量と体積から求められるが、凝集したテフラ粒子は地表面に衝突した際に分離してしまうために密度を求めることは困難である。本研究では Ishizaka et al. (2013) が降雪粒子の密度を推定するために提案した質量フラックスセンター (Center of Mass Flux: CMF) を参考に、ディストロメータにより測定されたテフラ凝集粒子の落下速度から密度を推定する方法を提案する。

2. 方法

落下するテフラ粒子の終端速度は粒子に働く重

力と空気抵抗力が釣り合う時の速度である。

$$V_p \rho_p g = 1/2 \rho_a C_d A_p w^2 \quad (1)$$

ここで、 V_p , ρ_p , g はそれぞれ粒子の体積, 密度, 重力加速度, ρ_a , C_d , A_p , w はそれぞれ空気の密度, 抵抗係数, 粒子の有効断面積, 落下速度である。テフラ粒子は模型粒子のように単純ではなく終端速度と粒径の関係式を理論的に決定することは困難である。Wilson and Huang (1979; *Earth. Sci. Lett.* 44) は過去におきた 3 回の噴火により形成されたテフラ層から採取したサンプル粒子の形状と密度の解析からテフラ粒子の抵抗係数が次式で表されることを見出した。

$$C_d = \frac{24}{Re} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (2)$$

ここで、 Re , F はそれぞれレイノルズ数, 形状ファクターである。 Re は空気の粘性力係数 η と粒子の球相当直径 d_e を用いて

$$Re = d_e \rho_a w / \eta \quad (3)$$

で定義される。(1), (2), (3) より粒子の終端速度から密度を推定する次式が得られる。

$$\rho_p = 0.6973 \times \rho_a^{0.9209} g^{-1} \eta^{0.07914} F^{-1.6} d_e^{-1.0791} w^{1.9209} \quad (4)$$

(4) の形状ファクター F は二次元ビデオディストロメータ (2DVD) によるテフラ粒子の観測から得られた次式を仮定する。

$$F = 1.04 - 1.21 \exp(-4.02 d_e) \quad (5)$$

(4) から個々の粒子の終端速度から個々の粒子の密度を推定できるが、得られた密度は粒子の凝集の程度により変動した。そのために何らかの平

均化処理が必要である。単純な平均化から得られる密度は観測された粒子の個数で重み付けられたものとなる。質量フラックスの観点からは粒子の個数よりも終端速度に重み付けした平均化が妥当である。Ishizaka et al. (2013; *J. Meteorol. Soc. Japan*, 91) は凝集した降雪粒子の密度を推定するために質量フラックスセンター (CMF) を提案した。本研究は凝集テフラ粒子の落下速度分布から CMF を求め、(4)から噴火事例毎のテフラ粒子の密度を計算した。

3. データ

Maki et al. (2021, *Atmosphere*, 12) が解析した 5 つの噴火事例について調べた。具体的には、桜島に設置されたディストロメータにより 1 分毎に測定されたテフラ粒子の粒径分布と落下速度のデータを解析した。

4. 結果

図 1 に国土交通省の垂水 XMP レーダがとらえた 2018 年 6 月 16 日 07:19 の噴火 (噴煙高度 4700m) の噴煙量の時間積算分布を示す。噴煙は火口から南西方向に流れ柴立 (SBT) 上空を通過した。図 2 は SBT に設置したディストロメータで観測された $w-d_e$ 分布 (観測時間は 7:35 から 8:34 の計 61 分間) である。CMF の位置は直径が約 1.2 mm, 落下速度が約 4.2 ms^{-1} にある。(4)から CMF の密度は 841 kgm^{-2} と推定された。参考のために図には凝集粒子がとり得る最大と最小の密度として 2500 kgm^{-2} と 500 kgm^{-2} の曲線を示す。また、CMF の他に最頻値点および面積重心も示した。

表 1 に 5 つの噴火事例の解析結果をまとめた。テフラ粒子の密度は $600 \sim 1100 \text{ kgm}^{-3}$ であった。表には事例毎に推定された密度の値を用いた R_A-Z 関係式も示した。

5. まとめ

落下速度から凝集テフラ粒子の密度を求める方法を提案した。2018 年に観測された 5 つの顕著な噴火事例の解析結果によれば、推定した凝集テフラ粒子の密度は $600 \sim 1100 \text{ kgm}^{-3}$ で、これまで筆者が R_A-Z 関係式で仮定していた密度 2500 kgm^{-3} の 1/2 から 1/4 であった。従って、従来の R_A-Z 関係式はテフラ量を過大評価していたことになる。今後、 R_A-Z 関係式の精度向上のために多くの噴火噴火事例について密度の変動特性を明らかにする

必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (課題 22K03760) および文科省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト (課題 J005391)」の助成を受けた。

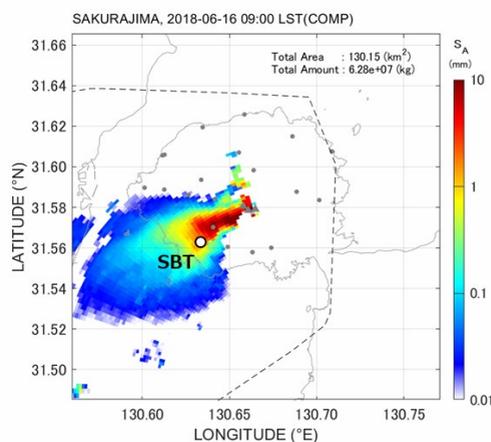


図 1 垂水に設置された XMP レーダ観測から求めたテフラ量の時間積算分布。2018 年 6 月 16 日 07:19 の噴火。

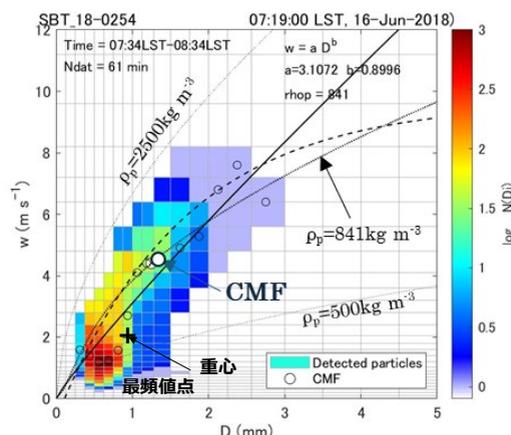


図 2 柴立地点 (SBT) に設置されたディストロメータにより観測された $w-d_e$ 分布図と CMF (○印)。破線は雨滴の終端速度。

表 1 推定されたテフラ粒子の密度と R_A-Z 関係式。

噴火日時	地点	ND	密度	R_A-Z 関係式
08:08, May 15, 2018	NAB	26	658	$R_A=0.0227 Z^{0.809}$
19:48, May 22, 2018	HIK	21	1078	$R_A=0.0131 Z^{0.826}$
	HAR	13	645	$R_A=0.0140 Z^{0.595}$
08:01, May 30, 2018	KUR	15	949	$R_A=0.0554 Z^{0.522}$
11:35, Jun. 30, 2018	HAR	22	935	$R_A=0.0945 Z^{0.568}$
07:19, Jun. 16, 2018	SBT	61	841	$R_A=0.0119 Z^{0.778}$