

火山噴火直後に降下火砕物の堆積量を推定する手法 —Windy Tephra2 のパラメータの感度分析と適用性の検証—

国立研究開発法人土木研究所 ○山本望*1・清水武志・石井靖雄

*1 現 応用地質株式会社

1. はじめに

噴火後に土石流発生の危険性が高まった溪流を抽出するためには、降下火砕物の堆積厚分布の迅速な把握が重要となる。しかし、噴火直後に取得可能な情報は限られる。そのような状況下で降下火砕物の堆積厚を把握するための手法は複数あり、利用可能な条件が異なることから、適用性の評価を行った（山本ら，2021）。物理モデルを用いたシミュレーションによる手法のうち、Tephra2 (Bonadonna et al., 2005) や Windy Tephra2 (Mannen et al., 2020)（以降 WT と呼ぶ）は、いずれも噴出物を移流させるモデルである。そのうち、WT は実際の噴火においては新燃岳 2011 年噴火に適用された事例があるが、他の事例への適用は報告されていない（Mannen et al., 2020）。そこで他の火山噴火事例により WT の適用性を確認した。また、噴火直後の利用におけるパラメータの設定について考察を行った。

2. 研究手法と対象噴火

2.1. 降灰量を推定するモデル

降灰予報（新堀，2016）は膨大な計算資源を用いてリアルタイムで高精度な推定を行った結果が公表され、堆積厚 0.1 mm と 1 mm の範囲を把握することが可能であるが、土石流発生への影響が大きい数 cm 程度の降下火砕物の堆積厚の範囲（田村ら，2010；門村ら，1988）は直接的には得られない。そこで、簡易なモデルとは異なるが、以下の 7 つの観点から降灰モデルの特徴、必要な入力情報を整理したところ、Windy Tephra2（以下、WT）及び Tephra2 が 7 つの条件を満たした。

- ① 堆積厚数 cm 以上の範囲を推定可能
- ② 計算資源が小さい（スーパーコンピュータ等の利用を前提としない）
- ③ 少数地点の現地調査結果（実測堆積量）が不要
- ④ 高度別の大気場（風速場）を反映
- ⑤ 地形の反映
- ⑥ 噴出物の調査結果の反映
- ⑦ 迅速な堆積厚分布取得

2.2. 対象噴火と適用性の検証

多数の実績がある Tephra2 を風速場でも利用できるように変更した WT が学術文献で利用された実績は、開発者である Mannen et al. (2020) による 2011 年新燃岳噴火のみである。そのため、様々な噴火様式（形態）における適用性を確認するため、有珠山 1977 年、伊豆大

島 1986 年、三宅島 2000 年を対象として実績と推定の堆積厚分布を比較した。この 3 噴火を選択した理由は次の通りである。有珠山 1977 年は、遠方も陸域であるため堆積厚の推定結果を実測堆積量と比較でき、かつ、堆積物の詳細な粒度分布から、粒度特性の特徴を確認できる。伊豆大島 1986 年は、噴火後の調査結果が豊富であるから、火口近傍（島内）の堆積厚の推定結果を実測堆積量と比較できる。三宅島 2000 年は、風速が小さい気象条件下で噴火したことから、風の影響を確認できる。

2.3. 感度分析

WT に入力するパラメータのうち、6 つ（中央粒径、粗粒粒子（軽石）密度、マグマ温度、粒径標準偏差、細粒粒子（岩片）密度、初期含水量）は噴火後の調査等によって得られる可能性があるが、噴火後に即時に得ることは難しいと想定される。そこで、各パラメータの感度分析を行い、パラメータの値により、計算結果に与える影響を評価する。感度分析は次の手順で実施する。

1. パラメータが取りうると考えられる値の最大値・最小値を入力し、堆積量を計算
2. (WT の) 計算領域内の計算点をランダムに 1000 地点抽出
3. F 検定（有意水準 5%）：抽出 1000 地点
4. 等分散：スチューデントの t 検定
不等分散：ウェルチの t 検定
5. t 検定（有意水準 5%）：抽出 1000 地点

ここで、1. のパラメータが取りうる最大値・最小値は、文献調査を行い整理する。3. の F 検定は 2 組のデータの等分散性を評価する統計的検定、4. の等分散のスチューデントの t 検定は、2 組のデータ間に対応がなくかつ分散に等分散性が仮定できるときに、平均値の差を評価する統計的検定、一方、不等分散のウェルチの t 検定は、2 組のデータの母分散が等しいとは限らないときに、データ間の平均値の差を評価する統計的検定である。WT による推定堆積量の平均値に差があるパラメータを感度が高い、平均値に差がないパラメータを感度が低いと評価する。

2.4. WT の適用性の評価方法

伊豆大島 1986 年噴火及び三宅島 2000 年噴火の場合は、評価基準を堆積厚 3.2cm 以上の



図 1 評価方法模式図

範囲、有珠山 1977 年噴火の場合は、評価基準を 4cm 以上の範囲とする。文献における実績降灰分布図 (A) とモデルで推定した計算分布範囲 (B) を比較する (図 1)。A と B の範囲の重複部分を C と呼ぶ (図 1)。

評価方法は、砂防における深層崩壊の判定や機械学習の評価に利用される 3 つの指標で実施する。

再現率は、推定分布範囲がどれくらいの実績分布範囲をカバーしたかを示す割合で C/A と計算する。

適合率は、推定分布範囲がどれくらい実績と一致したかを表現する計算精度を表す指標で C/B と計算する。

F 値は、再現率と適合率を総合的に評価する指標で 1 に近いほど評価が高く、次の式 (1) で計算する。

$$F \text{ 値} = \frac{2 \text{ 再現率} \times \text{適合率}}{\text{再現率} + \text{適合率}} \quad (1)$$

ただし、それぞれの面積を算出するにあたり、海域の堆積厚分布は無視し評価した (図 2)。

3. 結果と考察

3.1. WT の適用性評価

今回検証した 3 噴火では、適合率は 0.549–0.630 といずれも文献に示された実測分布範囲よりも推定分布範囲が広がったが、その面積比で約 2 倍以内に収まった (表 1)。再現率は 0.982–1.000 となり、推定分布範囲は実測分布範囲を概ね網羅できた。有珠山 1977 年のように陸域でも、三宅島 2000 年のように海域まで達し風速が小さい条件下でも、適合し再現性があった。

3.2. 感度分析結果

様々な噴火様式 (形態) を限定せずに文献で報告されたパラメータの最大値・最小値を整理した (表 2)。

パラメータの感度は t 検定の結果から判定した (表 3)。感度の高いパラメータは、粗粒粒子密度、中央粒径であった。感度の低いパラメータは、細粒粒子密度、粒径標準偏差、初期含水量、マグマ温度であった。

感度の高いパラメータは可能な限り噴火初期に情報を得るとよいと判断できる。感度の高いパラメータは、調査結果が得られれば、降灰分布の推定結果を更新することが可能である。いくつかの地点で実施された粒度調査結果をもとにパラメータ (中央粒径) をキャリブレーションすることで、推定堆積厚分布をより精度の良い結果に更新できる可能性がある。

4. 結論

本稿では、土石流が発生しやすい数 cm オーダーの堆積厚の分布形状を評価基準として、WT による 3 つの噴火事例 (有珠山 1977 年、伊豆大島 1986 年、三宅島 2000 年) の堆積厚分布推定結果と、文献による堆積厚分布実績とを比較し、適合率、再現率、F 値で評価したところ、WT は適用可能であった。また、噴出規模と噴火時の大気以外のパラメータについて、感度分析を行い計算によって得られる堆積量の平均値が等しいか統計的検定

(t 検定) で評価したところ、粗粒粒子密度、中央粒径を変化させたときの堆積量の平均値は統計的に異なる結果となり、有珠山 1977 年の事例によれば、堆積物の調査結果を用いると推定の適合率が上昇した。

参考文献

Bonadonna et al.(2005): JGR, 110, B03203
 土質工学会(1974): 岩の工学的性質と設計・施工への応用, p.10
 門村ら(1988): 有珠山—その変動と災害, 北海道大学図書刊行会, pp. 249
 小屋口(2005): 火山, Vol. 50, pp. S151-S166
 Mannen et al. (2020): JGR Solid Earth, Vol. 125, Issue 6, e2019JB018902
 下鶴ら(2008): 火山の事典第 2 版, 朝倉書店, pp.1-592
 新堀ら(2016): 火山, Vol. 61, pp. 399-427
 Shipley et al. (1982): USGS Numbered Series, 1435, pp.1-27
 Takeuchi (2011): JGR Solid Earth, Vol. 116, B10201
 田村ら(2010): 土木技術資料, 52-3, pp. 34–39
 山本ら(2021): 令和 3 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 311–312

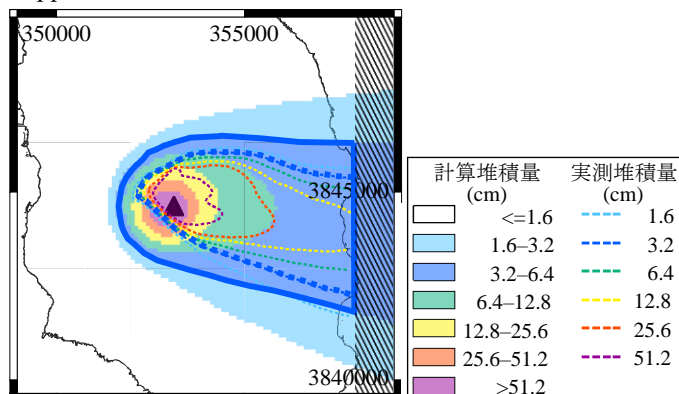


図 2 伊豆大島 1986 年噴火降灰分布推定結果

表 1 WT の適用性評価結果

	伊豆大島 1986 年噴火	有珠山 1977 年噴火	三宅島 2000 年噴火
再現率 (C/A)	1.00	0.98	0.98
適合率 (C/B)	0.63	0.55	0.60
F 値	0.77	0.70	0.74

表 2 文献にもとづくパラメータの最大値・最小値

感度分析	根拠
初期含水量	Takeuchi(2011)より, 多くの噴火では 0.01–0.07
マグマ温度	火山の事典より, 約 1000–1500K
粗粒粒子密度	Shipley et al.(1982)より, 一般的には 700–1200kg/m ³
細粒粒子密度	土質工学(1974)より, 岩石の密度の中央値 2550kg/m ³
中央粒径	小屋口(2005)より, -5.31–5.00φ. 砂/シルト境界: 4.00φ
粒径標準偏差	小屋口(2005)より, 1.28–4.36

表 3 t 検定による感度分析結果

ケース	t 検定 : p 値	感度
中央粒径	< 2.2e-16	高
粗粒粒子密度	3.377e-07	高
マグマ温度	0.7804	低
粒径標準偏差	0.1321	低
細粒粒子密度	0.9384	低
初期含水量	0.9962	低