

## 第 2 章 火山ハザード評価手法に関する調査

### 2.1 調査の対象とする評価手法

2015 年 3 月に仙台で開催された「第 3 回 国連防災世界会議」において発表された(1)および(2)、論文検索プラットフォーム ScienceDirect および Springer による火山ハザード評価に関する論文数上位の組織の(3)～(6)および(8)の手法、日本国内を対象とした神戸大学研究チームによる(7)の手法、あわせて表 2.1.1 に示す 8 つの評価手法を調査の対象とした。表中の各手法が評価対象としている噴火確率と到達確率については、表 2.1.2 にその定義を示す。

表 2.1.1 火山ハザード評価に関する調査対象手法一覧

手 法 名 (英語表記)	手法の 評価対象	研究機関 (国籍)
(1)PVAHA 手法による降灰超過確率評価 (Probabilistic Volcanic Ash Hazard Assessment)	降灰 ①噴火確率 ②到達確率	GeoScience Australia (オーストラリア)
(2)世界規模での降灰超過確率評価 (Global probabilistic ash fall hazard assessment)	降灰 ①噴火確率 ②到達確率	Global Volcanic Model (国際共同研究組織)
(3)ベイジアンイベントツリーによる包括的ハザード評価 (Bayesian event tree)	任意 ①噴火確率 ②到達確率	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (イタリア)
(4)更新過程モデルによる降灰年超過確率評価 (Renewal model and tephra assessment)	降灰 ①噴火確率 ②到達確率	Massey University (ニュージーランド)
(5)ベイズ推定による新規火道形成確率評価 (Probability hazard map of future vent opening)	火道形成位置 ①噴火確率	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (イタリア)
(6)点過程、カーネル密度推定による時空間的噴火確率評価 (Spatio - temporal eruption forecasts)	噴火位置 ①噴火確率	Massey University (ニュージーランド)
(7)噴火規模－頻度のワイブル関数評価 (Eruption forecasting by weibull function)	噴火規模別 頻度 ①噴火確率	神戸大学 (日本)
(8)降灰シミュレーションによる降灰年超過確率評価 (Probabilistic model of tephra dispersal)	降灰 ②到達確率	University of South Florida etc. (アメリカなど)

表 2.1.2 手法の評価対象とする確率の定義

評価対象とする確率	定 義
①噴火確率	任意の火山において、ある火山現象が発生する確率 (火山現象の前提となる噴火や火道形成を含む)
②到達確率	任意の地点に対して、ある火山現象が到達する確率

## 2.2 調査結果

### 2.2.1 PVAHA 手法による降灰超過確率評価 (PVAHA 手法)

#### (1) 概要

2015 年 3 月仙台で行われた国連防災世界会議における世界防災白書 2015 (GAR15) の中で提示された降灰のハザード評価手法の一つで、オーストラリアの研究機関 Geoscience Australia で開発された。その評価内容一覧を表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	降灰 (噴火確率、到達確率)
出力情報	評価対象地点における降灰荷重の年超過確率
評価可能時間	100 年～10,000 年
評価最小単位	1×1 km
使用データベース	GVP カタログ <sup>注</sup>
評価事例	アジア太平洋地域

注：GVP カタログとは、スミソニアン博物館による完新世（約 1 万 2 千年前）以降の噴火記録がまとめられているデータベースである。

本評価手法では、次の 4 つの手順により、火山噴火による降灰荷重の年超過確率を広域的に評価するとともに、任意の地点に対して最も影響を及ぼす火山を評価する。ここで、降灰荷重の年超過確率とは、評価対象の地点に対し 1 年間のうちに、ある定まった値の重さまで火山灰が堆積する確率を意味する。

- 手順 1. GVP カタログデータベースから噴火確率算出に使用するデータを抽出
- 手順 2. 噴火の規模—頻度データの統計分析による年噴火確率評価
- 手順 3. 降灰シミュレーションから得られた降灰荷重分布を定式化 (ALPE の作成)
- 手順 4. 評価対象地域の降灰荷重とその年超過確率の計算

上記手順のイメージを図 2.2.1 に示す。まず手順 1 において、評価に用いる火山のデータを収集する。手順 2 では年噴火確率を算出する。このとき算出される噴火確率は個別の火山の噴火確率ではなく、火山をその形態（溶岩ドーム、楯状火山など）で分類し、その形態ごとの噴火規模 VEI（火山爆発指数：次頁注参照）別の年噴火確率である。手順 3 では、あらかじめ設定した分岐ツリーごとに降灰シミュレーション計算を行い、それによって得られる、給源火山からの降灰荷重の距離減衰を数式として表現する。この

数式は風向、評価対象地点の関数として表される。最終的に手順 4 で、評価対象とする火山および地点を設定し、繰り返し計算を行う。これにより得られた降灰荷重とその噴火確率値を重ね合わせ、対象地域あるいは地点における降灰荷重年超過確率を評価する。図 2.2.2 はその評価例であり、図中右上に示されている数値は再現期間を示している（たとえば東京において  $2.07 \text{ kg/m}^2$  以上の降灰は 500 年に一度発生する）。

注：VEI (Volcanic Explosivity Index : 火山爆発指数) とは、噴火の爆発度を 0~8 の 9 段階に評価するもので、GVP カタログデータベースに採用されている（下表参照）。

VEI	噴出物の量	状況	噴煙の高さ	発生頻度	例
0	$< 10,000 \text{ m}^3$	非爆発性の噴火 (nonexplosive)	$< 100 \text{ m}$	毎日	キラウエア (ハワイ)
1	$> 10,000 \text{ m}^3$	優しい噴火 (gentle)	100-1,000 m	毎日	有珠山 (2000)
2	$> 1,000,000 \text{ m}^3$	爆発的な噴火 (explosive)	1-5 km	毎週	焼岳 (1962~63)
3	$> 10,000,000 \text{ m}^3$	猛烈な噴火 (severe)	3-15 km	毎年	有珠山 (1977~78)
4	$> 0.1 \text{ km}^3$	大噴火 (cataclysmic)	10-25 km	$\geq 10$ 年	ガルングン山 (1982)
5	$> 1 \text{ km}^3$	超大噴火 (paroxysmal)	$> 25 \text{ km}$	$\geq 50$ 年	富士山 (1707)
6	$> 10 \text{ km}^3$	巨大噴火 (colossal)	$> 25 \text{ km}$	$\geq 100$ 年	ピナツボ山 (1991)
7	$> 100 \text{ km}^3$	超巨大噴火 (super-colossal)	$> 25 \text{ km}$	$\geq 1,000$ 年	タンボラ山 (1815)
8	$> 1,000 \text{ km}^3$	超々巨大噴火 (mega-colossal)	$> 25 \text{ km}$	$\geq 10,000$ 年	イエローストーン (200 万年前)

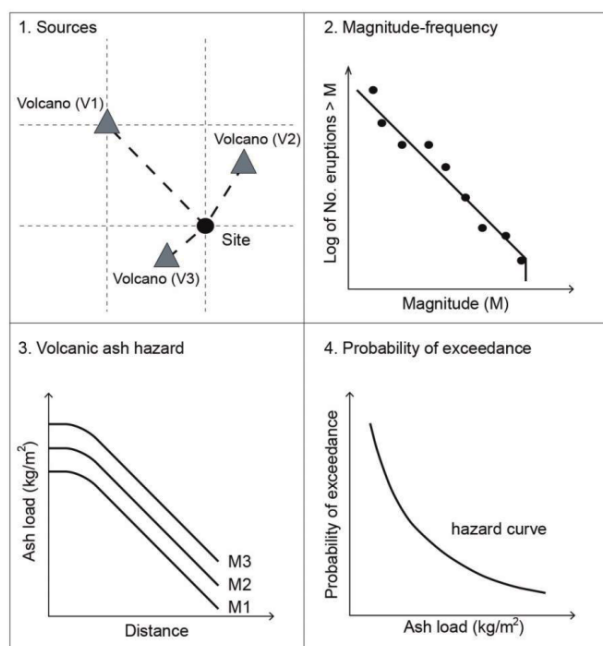


図 2.2.1 PVAHA 手法イメージ  
(Bear-Crozier et al., 2014)

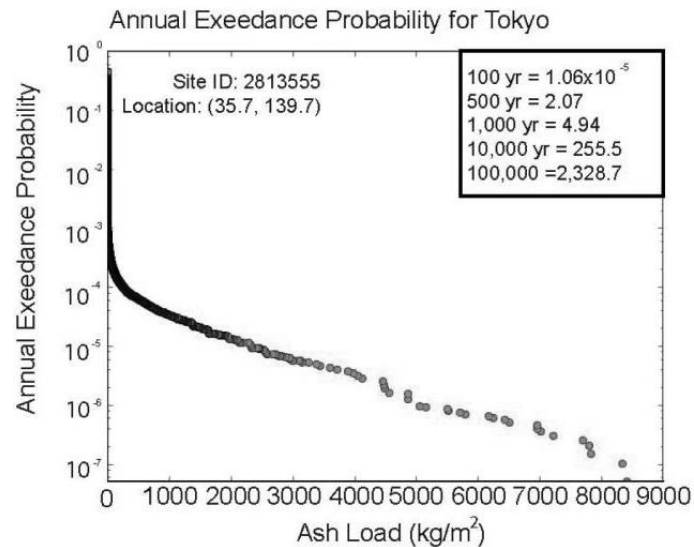


図 2.2.2 降灰荷重一年超過確率グラフ（東京を評価対象とした例）  
(Bear-Crozier et al., 2014)

## (2) 内容

### 1) 噴火確率

Jenkins et al., (2012)の手法に準拠しており、ある地域における、形態別（成層火山や溶岩ドームなど地形的分類）火山の、任意の VEI の噴火が発生する確率（たとえば、インドネシアの楯状火山が VEI6 の噴火を発生させる確率）を算出する。算出手順を以下に示す。

- 手順 1. ROC (Record of Completeness) 評価
- 手順 2. 噴火の規模 (VEI 等) を考慮しない噴火確率の計算
- 手順 3. 任意の VEI における噴火確率の計算
- 手順 4. 個々の火山 (形態別) における VEI ごとの噴火確率の計算

噴火確率の算出に使用するデータは、時間と累積噴火回数との関係が一定の相関（図 2.2.3）を示す年代以降の噴火イベントのものを採用する。このプロセスを ROC 評価と呼ぶ。火山噴火では、年代が古く、小規模な噴火ほど記録に残りづらく、そのような認知されない不確実な噴火イベントの存在を扱うのは統計学上好ましくない。そこで ROC 評価によって噴火記録の不確実性を取り除く。

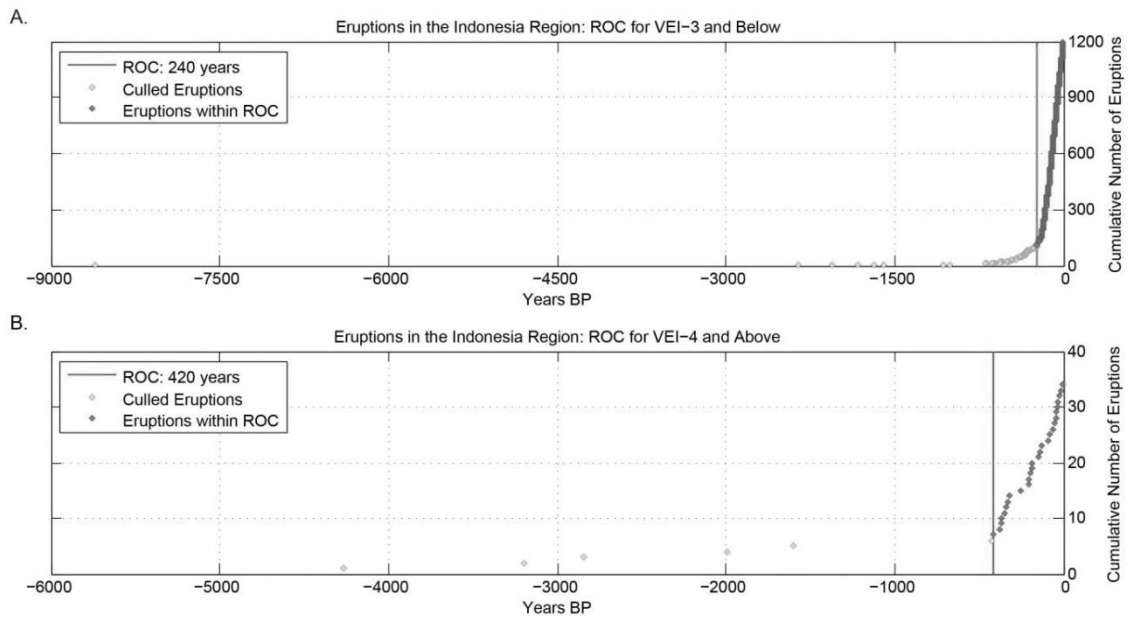


図 2.2.3 ROC 評価例 (年と過去からの累積噴火回数の関係)  
(Bear-Crozier et al., 2014)

## 2) 到達確率

FALL3D (火山灰の拡散と降下を数値計算により推定する移流拡散モデルの一つ) を用いてシミュレーションを行う。このシミュレーションへの入力情報は、噴火規模 (volcano explosivity index, VEI)、噴煙柱高度 (eruption column height)、噴火継続時間 (eruption duration)、噴火のタイプ (eruption style, ストロンボリ式やブルカノ式など)、風速 (wind speed) の 5 項目でありこれらを組み合わせた 1,056 パターンの分岐ツリー (図 2.2.4) についてシミュレーションを行う。

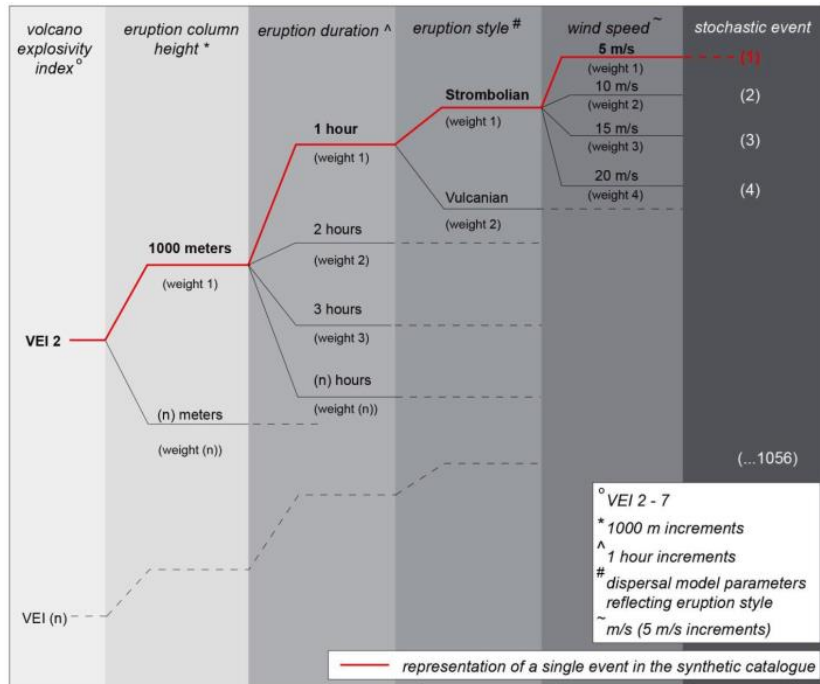


図 2.2.4 分岐ツリーのイメージ (Bear-Crozier et al., 2014)

シミュレーションの結果得られた降灰範囲は数式 (Ash Load Prediction Equation, ALPE) 化される。ALPE は降灰荷重の距離減衰を、風向と評価対象地点-給源火山との位置の関数として表現した推定式である (式(2.2.1)および図 2.2.5)。

$$\text{降灰荷重} = a \cdot e^{((x(b(y^2)+cy+d)+ey+f)gz)}$$

(2.2.1)

$x$  = 風速 (m/s),  $y$  = 風向きと評価対象地域の位置がなす角度のコサイン,  
 $z$  = 給源から評価対象地域までの距離

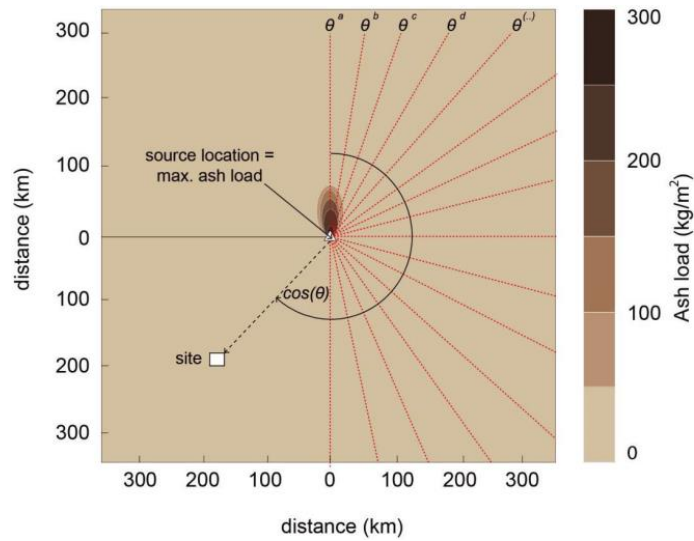


図 2.2.5 FALL3D による降灰シミュレーション結果 (Bear-Crozier et al., 2014)

最後に、降灰によるハザードの影響を評価する対象の火山および地点を設定することにより、ALPE の  $z$  が決定され、得られた降灰荷重とそのときの噴火確率値を重ね合わせることで (図 2.2.6)、対象地域あるいは地点における降灰荷重年超過確率を評価する。図 2.2.7 に、日本において再現期間を 1,000 年としたときの火山灰の堆積量の評価例を示す。

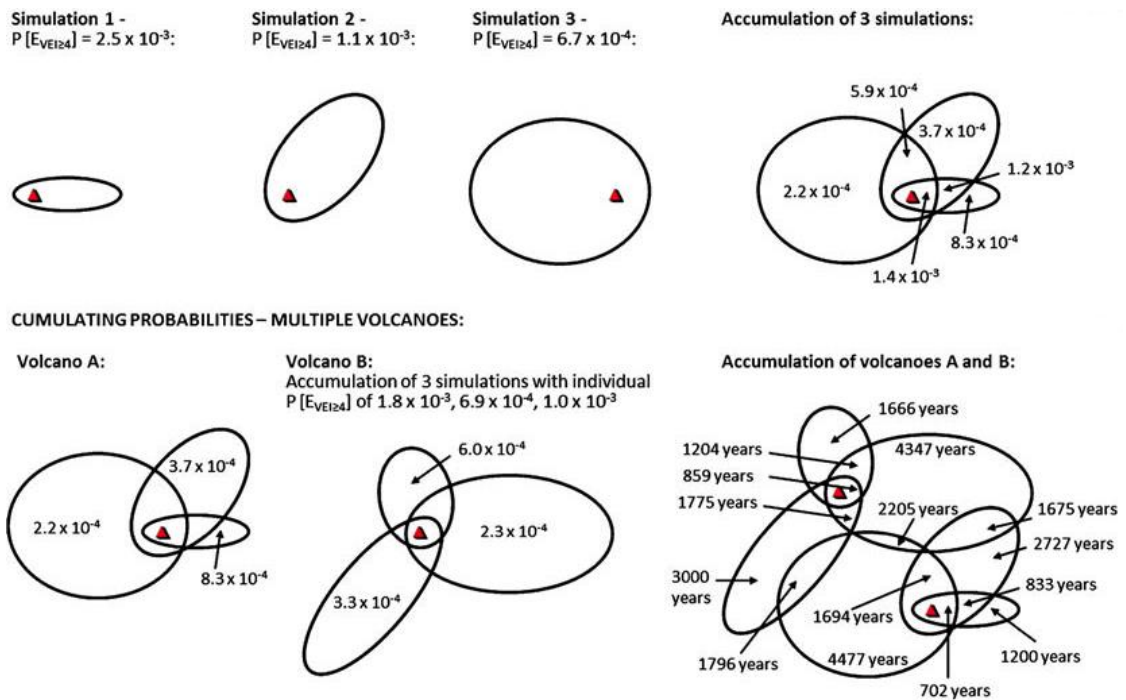


図 2.2.6 降灰荷重年超過確率のイメージ (Jenkins et al., 2012)

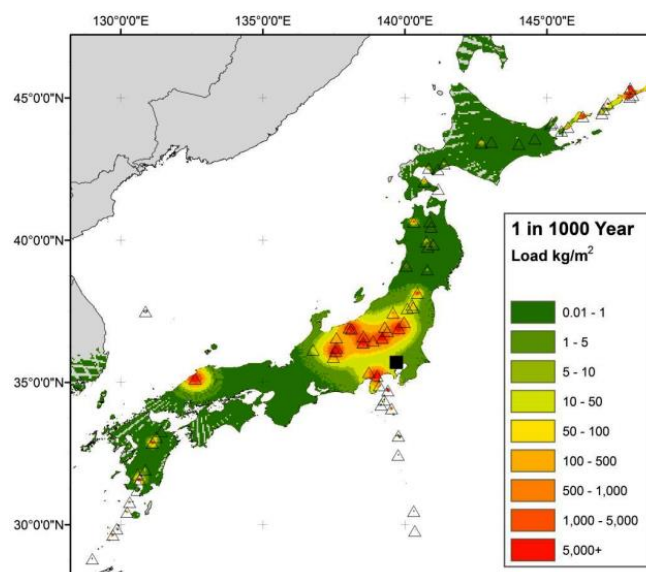


図 2.2.7 PVAHA 手法による評価例  
(Bear-Crozier et al., 2014)

### (3) 評価に必要な情報

本評価手法における評価に必要な情報を表 2.2.2 および表 2.2.3 に示す。

表 2.2.2 噴火確率入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	火山名*	火山の名前	—
	火山ID*	火山のID	—
	地域*	火山が位置する地域の大区分	—
	サブ地域*	火山が位置する地域の小区分	—
	緯度*	火山体の緯度	—
	経度*	火山体の経度	—
	火山の形態*	楕状火山 成層火山 カルデラなど	—
	噴火年*	噴火が発生した年代	—
	VEI*	噴火現象のVEI	—

\*: GVP カタログより取得



表 2.2.3 到達確率入力項目一覧

項目	入力データ	入力範囲	備考
到達確率	VEI*	2~7	—
	噴煙柱高度**	1,000~40,000m	1,000m刻み
	噴火継続時間**	—	1時間単位
	噴火のタイプ**	ストロンボリ式 ブルカノ式 サブプリニー式 プリニー式	—
	風速**	5、10、15、20 m/s	5m/s 刻み
	風向**	360度	VAPHR ツールで刻み角度を設定する

\*: GVP カタログより取得。 \*\*: 任意に設定

#### (4) 長所・短所

##### 1) 長所

- ・ ハザードに寄与する要因（給源火山、VEI など）を容易に抽出することができ、より具体性をもった防災・減災対策の考案が可能

##### 2) 短所

- ・ 広範囲を対象とする手法であり、局所的な地形的特徴や気象条件を十分考慮した評価は行うことができない。
- ・ 確率イベントは一つ一つが独立であり、前の火山活動による影響が考慮されていない。
- ・ 火山の形態は時間の経過とともに変化するため、本評価に用いた形態分類が本来の火山活動の結果と必ずしも対応しているとは限らない。

#### (5) 参考文献

- ・ Bear-Crozier, A. N. Newey, V., Horspool, N. and Weber, R (2015), Emulating volcanic ash fall for multi-scale analysis: Development of the VAPHR tool and application to the Asia-Pacific region for the United Nations Global Assessment Report 2015. Geoscience Australia.

## 2.2.2 世界規模での降灰超過確率評価（GVM 手法）

### (1) 概要

2015年3月仙台で行われた国連防災世界会議における世界防災白書2015（GAR15）の中で提示された降灰のハザード評価手法の一つで、Jenkins et al., (2012)による手法を基に、GVM（Global Volcano Model, 火山活動に関するデータベース作成やハザード・リスクモデル開発などを行う国際共同研究組織）が世界スケールでの火山灰の降灰厚に関するハザード評価が可能なツールに改良したものである。その評価内容一覧を表2.2.4に示す。

表 2.2.4 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	降灰（噴火確率、到達確率）
出力情報	評価対象地域における任意の降灰厚の年超過確率
評価可能時間	100年～10,000年
評価最小単位	10 × 10 km
使用データベース	GVP カタログ（スミソニアン博物館）
評価事例	世界規模、アジア太平洋地域

本評価手法では、火山噴火による降灰厚年超過確率を世界規模で算出する他、任意の地点における降灰厚と再現期間の関数として表現したハザード曲線が作成可能である。本評価手法は以下に示す手順（図 2.2.8）でハザード評価を行う。

- 手順 1. 評価対象火山の選定および使用する噴火イベントデータの抽出
- 手順 2. 地域ごとの年噴火確率算出
- 手順 3. 火山の分類ごとの任意の VEI の噴火確率の算出
- 手順 4. 降灰シミュレーションに基づく降灰厚年超過確率の評価

手順 1 では、評価対象となる火山および噴火イベントの抽出を実施する。対象とする火山は完新世（約 1 万 2 千年前）以降の噴火記録がまとめられている GVP カタログデータベースを参照し、少なくとも 1 回以上の噴火記録がある火山を対象とする。噴火イベントは Date Completeness を評価することで抽出する（前述の ROC 評価と同様のプロセス）。次に手順 2 で年噴火確率を算出する。噴火確率の算出は個別の火山の噴火確率ではなく、ある地域ごとの噴火確率を算出する。次に手順 3 で任意の VEI における噴火確率を算出する。そして最後に手順 4 で火山灰の降灰をシミュレーションし、降灰範囲を

評価する。降灰評価結果は噴火確率と結合し、結果同士の重ね合わせにより降灰厚年超過確率を評価する。

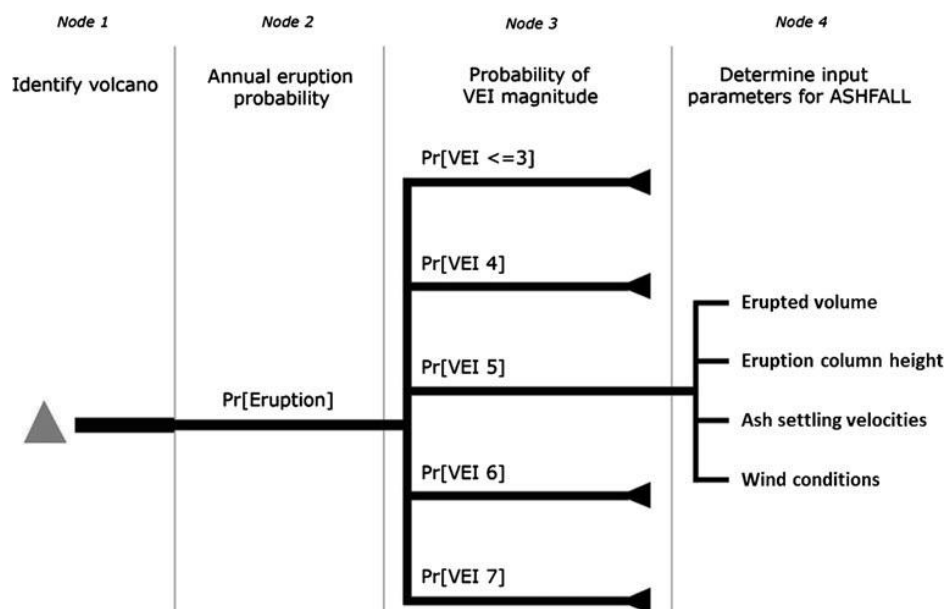


図 2.2.8 評価プロセス (Jenkins et al., 2012)

## (2) 内容

### 1) 噴火確率

噴火確率の計算は 2.2.1 (P4) に記した PVAHA 手法と同様に、Jenkins et al., (2012) の手法に準拠している。ある地域における、形態別火山(成層火山や溶岩ドームなど地形的分類)の、任意の VEI の噴火確率を算出する噴火確率の算出手順を以下に示す。

- 手順 1. Data Completeness 評価
- 手順 2. 噴火の規模 (VEI 等) を考慮しない噴火確率の計算
- 手順 3. 火山の分類・VEI ごとの噴火確率の算出
- 手順 4. 任意の火山の VEI ごとの年噴火確率の算出

噴火確率の算出に使用するデータは Data Completeness 評価により選定する (図 2.2.9)。この評価手法は、前述の ROC 評価とほぼ同じであり、時間と累積噴火回数との関係が一定の相関を示す年代以降の噴火イベントを採用する。この評価は地域ごとに噴火イベントを VEI の規模ごとに分けて実施する。

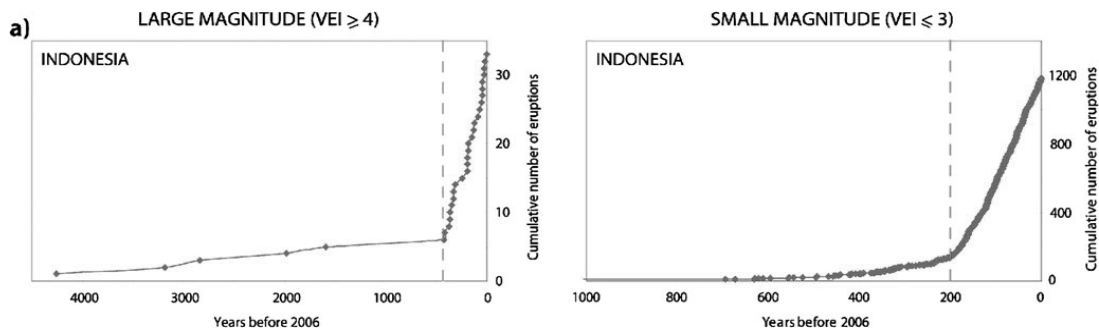


図 2.2.9 Data Completeness 評価例 (GVM, 2014)

地域ごとの噴火確率 ( $\lambda$ ) は噴火回数 ( $N$ ) を期間 ( $T$ ) で除することで求める。この  $T$  は噴火規模ごとに算出されているため、噴火規模によらない期間に規格化<sup>注</sup>を行う (下の例では、小規模噴火の期間  $T_1=100$  年の発生回数  $N_1=4$  回を大規模噴火の期間  $T_2=2000$  年で規格化 ( $T_2/T_1=20$  倍) している)。

例：小規模噴火の値を大規模噴火の値に規格化<sup>注</sup>

火山 A

小規模噴火:  $N_1=4$ 、 $T_1=100$

$$N_{1N} = 4 \times 20 = 80$$

大規模噴火:  $N_2=3$ 、 $T_2=2000$

$$N_{ALL} = N_{1N} + N_2 = 80 + 3 = 83$$

火山Aの年噴火確率  $\lambda_A = 83/2000$

$$= 0.041$$

再現期間 =  $1/0.041 \approx 24$ 年

注：火山の研究分野ではこの操作を「規格化」と呼んでいる。

データが少ない火山の噴火確率を概算するために、表 2.2.5 に示す火山の分類 (①Caldera, ②Large Cone, ③Shield, ④lava dome, ⑤Small cone) ごと、VEI ごとの噴火確率を計算する。これから得られた値を掛け合わせることで、ある地域における火山の分類別の任意の VEI の噴火確率を算出する。

表 2.2.5 火山の分類と VEI ごとの噴火確率の例 (Jenkins et al., 2012)

Volcano type category	Data ( $n$ )	Probabilities, conditional upon an eruption of any magnitude				
		VEI $\leq$ 3	VEI 4	VEI 5	VEI 6	VEI 7
Caldera	642	0.85	0.08	0.04	0.02	$4.8 \times 10^{-3}$
Large cone	4,825	0.91	0.07	0.02	$4.8 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-4}$
Shield	733	0.96	0.03	$6.2 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
Lava dome	58	0.74	0.21	0.04	0.01	0
Small cone	117	0.94	0.05	$8.0 \times 10^{-3}$	0	0

## 2) 到達確率

本評価手法では評価対象範囲が全球規模になっており莫大なシミュレーション計算を行う必要がある。そのため、到達確率評価には比較的処理速度が速い 2 次元移流拡散モデルである ASHFALL を使用する。

ASHFALL へ入力するパラメーターは VEI、噴出量、噴煙柱高度、火山灰粒子降下時の終端速度、風向・風速である。

シミュレーションによって得られた降灰範囲は各噴火イベントの確率を掛け合わせるにより、ある規模の噴火により任意の厚さ以上に火山灰が堆積する範囲を確率的に表現することが可能となっている。具体的には、個々の火山で、VEI ごと、風向・風速ごとの確率付き降灰範囲を重ね合わせるにより、一つの火山における降灰年超過確率を算出できる。そして複数の火山での結果を重ね合わせるにより、複合的な降灰厚確率評価が可能となっている（図 2.2.10、図 2.2.11）。

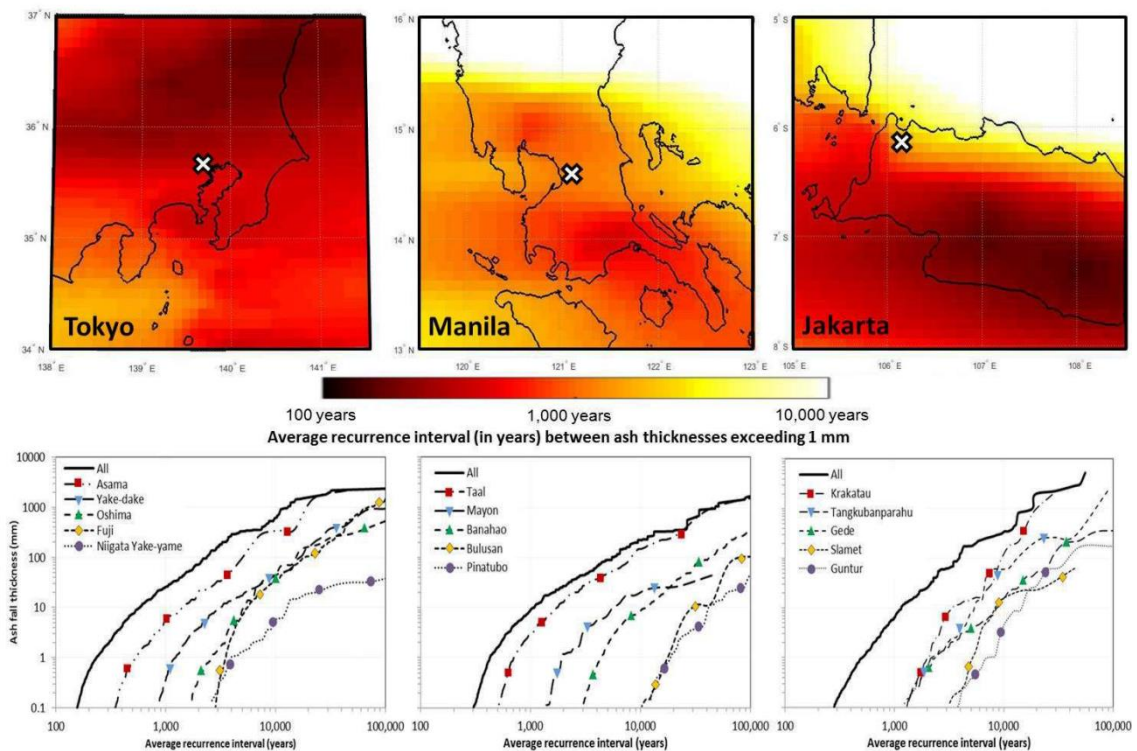


図 2.2.10 GVM 手法による評価例 (GVM, 2014)

上段：各地域における 1mm 以上の降灰厚年超過確率

下段：上段の白い印で示した地点における降灰厚のハザード曲線

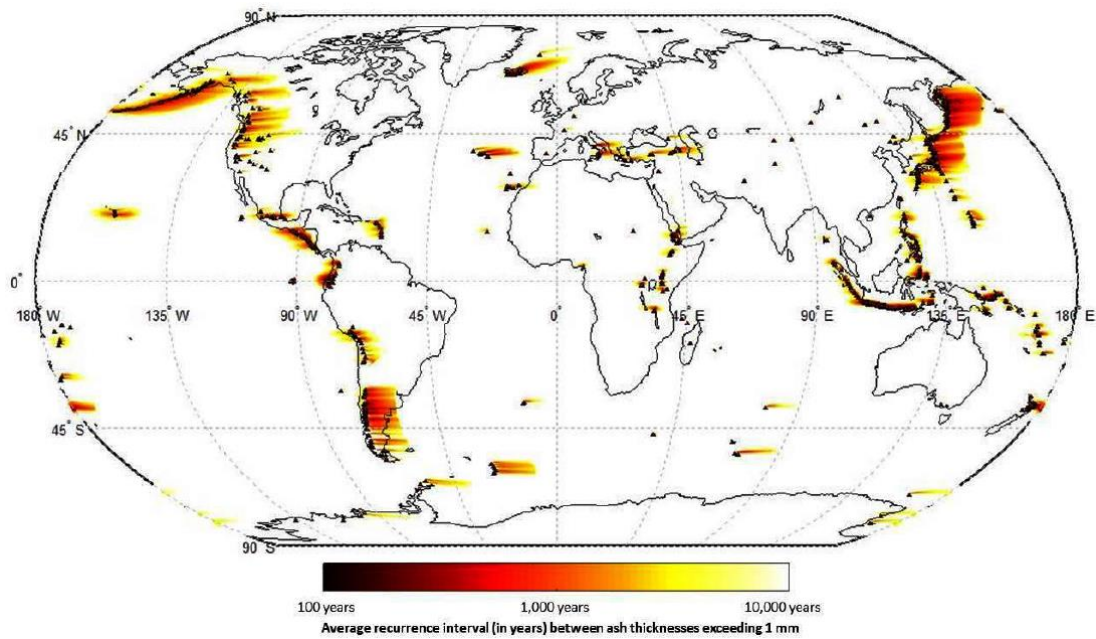


図 2.2.11 GVM 手法による評価 (GAR, 2014)

### (3) 評価に必要な情報

本評価手法における評価に必要な情報を表 2.2.6 および表 2.2.7 に示す。

表 2.2.6 噴火確率入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	火山名*	火山の名前	—
	地域*	火山が位置する地域の大区分	—
	緯度*	火山体の緯度	—
	経度*	火山体の経度	—
	火山タイプ*	楕状火山 成層火山 カルデラなど	—
	噴火年*	噴火が発生した年代	—
	VEI*	噴火現象の VEI	—

\*: GVP カタログより取得

表 2.2.7 到達確率入力項目一覧

項目	入力データ	入力範囲	備考
到達確率	VEI	4~7	(Newhall and Self, 1982 参照)
	噴出量 (V)	0.1~1,000 (km <sup>3</sup> )	VEI に依存 (Newhall and Self, 1982 参照)
	噴煙柱高度 (Z)	11,500~46,000 (m)	噴出量に依存し以下で表す。 $Z=8.671\log_{10}(V)+20.2$ (Carey and Sigurdsson, 1989; Jenkins et al., 1992 参照)
	降灰終端速度	0.3~9.5 (m/s)	粒径分布の平均、標準偏差より (Walker, 1981; Woods and Bursik, 1991; Sparks et al., 1992 参照)
	風向・風速	40 年間分の 風データを使用	European Centre for Medium range Weather Forecasting global re- analysis project より
	水平拡散係数	6000 (m <sup>2</sup> /s)	(Hurst, 1994 参照)

#### (4) 長所・短所

##### 1) 長所

- ・ 2次元移流拡散モデル ASHFALL を用いた計算により、世界規模での降灰ハザード評価が可能
- ・ 観測風向・風速等のデータを用いているため、より実際の現象に近いハザード評価を行うことが可能

##### 2) 短所

- ・ 広範囲を対象とする手法であり、局所的な地形的特徴や気象条件を十分考慮した評価は行うことができない。
- ・ 火山灰の噴出源の風向・風速のみが考慮されており、大気中を移流拡散する火山灰が通過する各地域の地形に起因する風への影響は考慮されない。
- ・ VEI4~7 の噴火事象を対象に評価しており、VEI3 以下の噴火による降灰被害や、VEI8 の噴火により引き起こされる大規模な降灰被害は評価できない。
- ・ 確率イベントは一つ一つが独立であり、前の噴火活動による影響が考慮されていない。
- ・ 火山の形態は時間の経過とともに変化するため、本評価に用いた形態分類が本来の火山活動の結果と必ずしも対応しているとは限らない。

(5) 参考文献

- GVM, (2014), Volcanic ash fall hazard and risk; Technical background paper for the UN-ISDR Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015.
- Susanna Jenkins, C. Magill, J. McAneney and R. Blong (2012), Regional ash fall hazard: a probabilistic assessment methodology, Bull Volcanol 74:1699-1712



### 2.2.3 ベイジアンイベントツリーによる包括的ハザード評価（BET 手法）

#### (1) 概要

ベイジアンイベントツリー（Bayesian Event Tree）による包括的ハザード評価は、イタリア国立地球物理学火山学研究所およびボローニャ大学が中心となり開発を進めている手法である。BET 手法はベイズ統計理論に基づきハザード評価を行うもので、短期的な噴火予測を目的とした BET\_EF（Eruption Forecasting）手法と、長期的なハザード評価のための BET\_VH（Volcanic Hazard）手法の 2 つがある。その評価内容一覧を表 2.2.8 に示す。

表 2.2.8 評価内容一覧

項 目	諸 元
手法の評価対象 （対象とする確率）	降灰、火砕流、火山泥流、溶岩流等 （噴火確率、到達確率）
出力情報	評価対象地域における任意の規模の火山現象の 発生確率、被害発生の有無
評価可能時間	数年（最適期間 1 年）
評価最小単位	任意（計算能力による。）
使用データベース	過去の噴火活動、地震・断層運動に関する文献
評価事例	サウス・シェトランド諸島（デセプション島）

BET 手法の基本概念は、イベントツリーによるものである（図 2.2.12）。イベントツリーは火山活動に係る異常発生を出発点として、どのように事象が分岐していく可能性があるかを系統的にまとめたものである。各事象の分岐点を“ノード”と呼び、各ノードにおいて可能性のある組み合わせを選択し確率評価を行う。各ノードで取り扱うパラメーターは表 2.2.9 に示すとおりである。

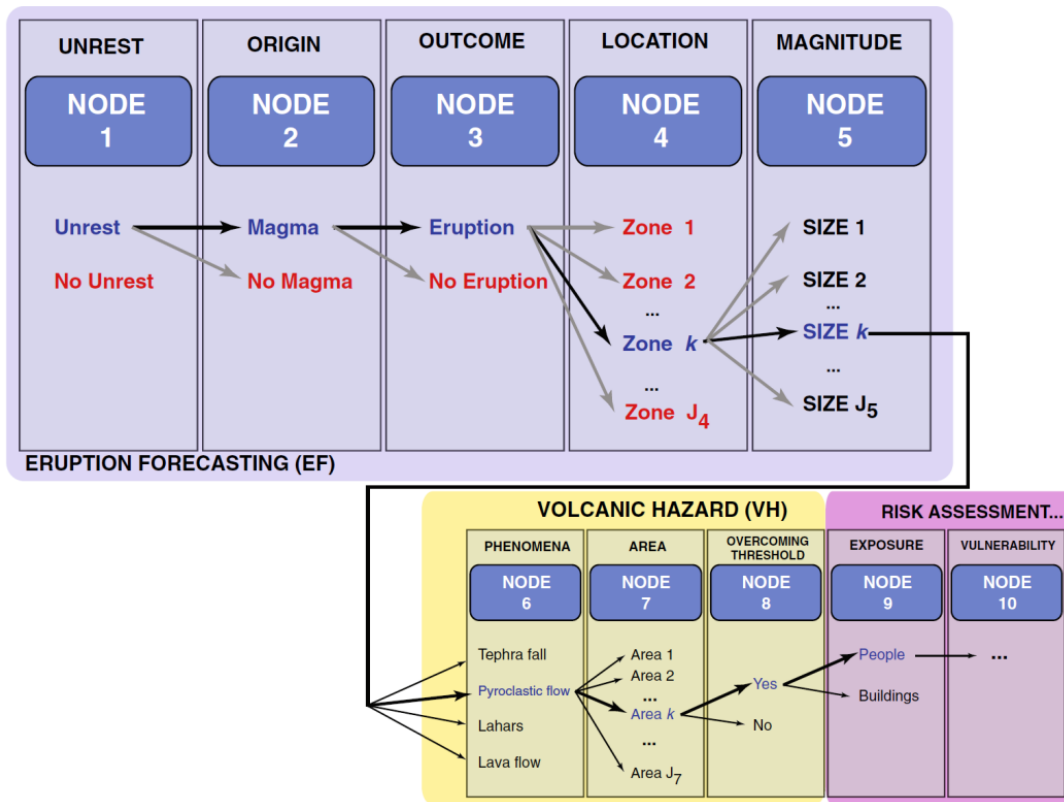


図 2.2.12 BET 手法の手順 (Marzocchi and Bebbington, 2012)

表 2.2.9 BET\_EF 手法、BET\_VH 手法入力項目一覧

	Node	1	2	3	4	5		
BET_EF	Node	1	2	3	4	5		
	評価対象	火山不安定状態における異常性の有無	マグマ活動関与の有無	噴火の有無	火口形成位置	噴火規模		
BET_VH	Node	1	2	3	4	5	6	7
	評価対象	火山不安定状態における異常性の有無	マグマ活動関与の有無	噴火の有無	火口形成位置	噴火規模	発生事象	到達地域

BET 手法では、火山不安定状態から噴火に至る確率および噴火が生じた場合に任意の火山現象が発生する確率（噴火確率）、また、発生した火山現象が任意の地域に影響を及ぼす確率（到達確率）を総括的に評価可能である。ただし到達確率についてはイベントツリー内で指定した範囲であり、シミュレーションに基づく到達範囲ではない。本評価手法による被災範囲の推定例を図 2.2.13 に示す。

なお、BET 手法ではノード 1～3 に、地殻変動や熱量変化などの観測機器による最新のモニタリング情報を取り込むことで、最新の情報を加味した確率予測をすることができる。

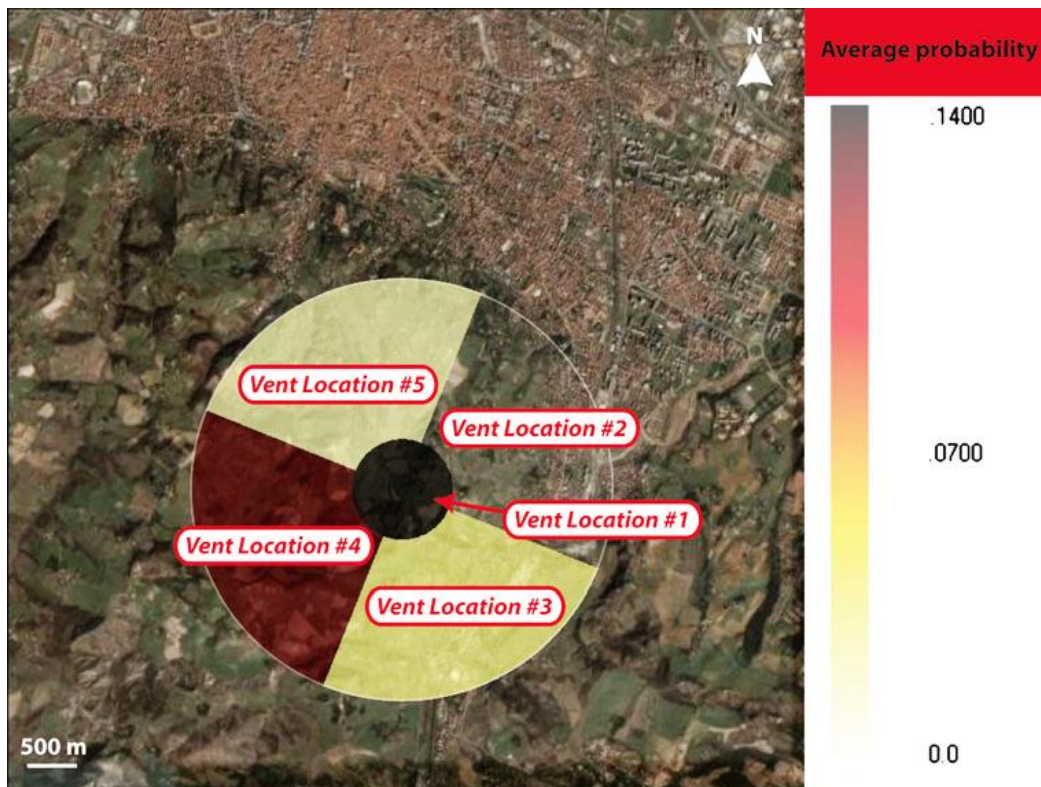


図 2.2.13 BET 手法による被災範囲の推定 (Marzocchi et al., 2010)

## (2) 内容

BET 手法では、噴火確率・到達確率を総括的に評価することが可能である。BET 手法の中核となるのはベイズ理論であり、本評価手法にはベイズ推定が使用される。以下ではベイズ推定がどのようなものかを簡潔に説明した上で、本評価手法の確率評価手法について説明する。

### 1) ベイズ推定

尤度関数の概念に、理論モデルや知見に基づく情報を取り込んだ事前確率を導入し、事後確率を評価する手法である。事前確率とは、ある事象が発現する前に入手した情報を指し、事後確率とは何かのデータを前提とした上である事象が発現する確率である (図 2.2.14)。

ベイズ推定において事後確率は事前確率と尤度関数の積で表現することができる。理論モデルや専門家の意見のような知見、これまで蓄えられてきたあらゆる地質学・火山学的データを基に確率評価を行うことが可能である。

## BAYESIAN INFERENCE

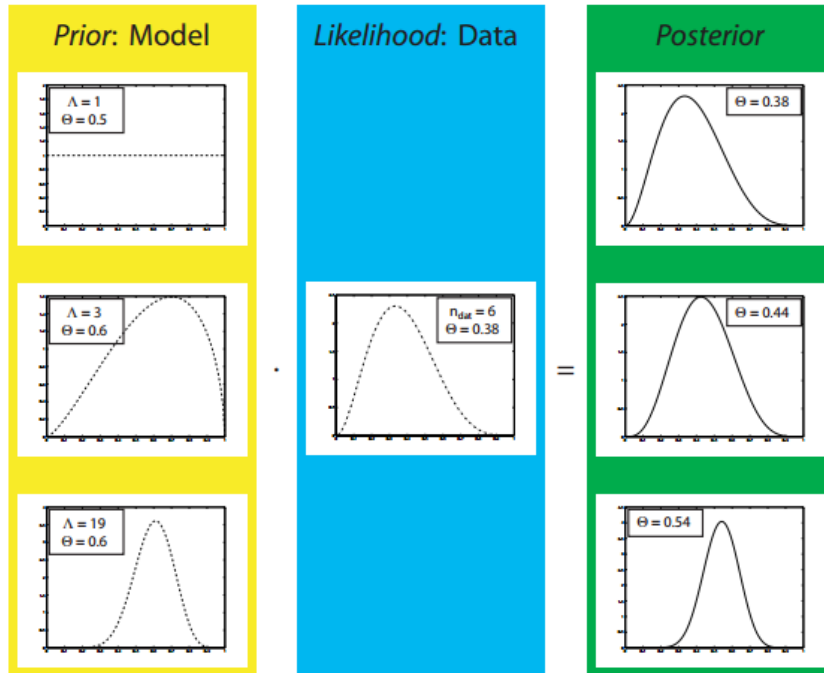


図 2.2.14 ベイズ推定概念図 (Marzzochi et al., 2008)

ベイズの定理は、以下の式により表される。

$$[\theta_k^{(j)\{\}}] \equiv [\theta_k^{(j)\{\}} | y] = \frac{[\theta_k^{(j)\{\}}]_{prior} [y | \theta_k^{(j)\{\}}]}{[y]} \quad (2.2.2)$$

$[\theta_k^{(j)\{\}}]$  : データセット  $y$  を与えた場合の【事後主観確率】

$[\theta_k^{(j)\{\}}]_{prior}$  : 理論モデルや知見に基づく情報を取り込んだ【事前主観確率】

$[y | \theta_k^{(j)\{\}}]$  : 仮説  $\theta_k^{(j)\{\}}$  のもとでデータ  $y$  が発生する確率分布【尤度関数】

ここで事前主観確率は  $\Gamma$  関数で定義されるディリクレ分布を仮定してモデル化される。

$$[\theta_k^{\{\bar{M}\}}]_{prior} \equiv Di_{j_k}(\alpha_k^{(1)}, \dots, \alpha_k^{(j_k)}) = \frac{\Gamma(\alpha_1 + \dots + \alpha_{j_k})}{\Gamma(\alpha_1) \dots \Gamma(\alpha_{j_k})} [\theta_k^{(1)\{\bar{M}\}}]^{\alpha_1 - 1} \dots [\theta_k^{(j_k)\{\bar{M}\}}]^{\alpha_{j_k} - 1} \quad (2.2.3)$$

$J_k$ はノード $k$ での事象の数、 $\alpha_k^{(1)}, \dots, \alpha_k^{(J_k)}$ はノード $k$ での分布関数のパラメーターである。この式の信頼度のパラメーターとして下記を導入する。

$$\Lambda_k^{\{\bar{M}\}} = \alpha_k^{(0)} - J_k + 1 \quad (2.2.4)$$

$\alpha_k^{(0)}$ は $\alpha_k^{(j)}$ の和である。この $\Lambda_k^{\{\bar{M}\}}$ を等価データ数と呼ぶ。この等価データ数が多いほど信頼度が高く、確率分布関数は平均値の周りにシャープなピークを持つ分布となる。このとき、事象が二つの場合はベータ分布となる。

ここで尤度関数は多項分布を用いて以下のように表す。

$$[y | \theta_k^{(j)\{\bar{M}\}}] \equiv \text{Mu}_{J_k}(y_k^{(1)}, \dots, y_k^{(J_k)}; \theta_k^{\{\bar{M}\}} = \left( \sum_{j=1}^{J_k} y^{(j)} \right)_{y^{(1)} \dots y^{(J_k)}} (\theta_k^{(1)\{\bar{M}\}})_{y^{(1)}} \dots (\theta_k^{(J_k)\{\bar{M}\}})_{y^{(J_k)}} \quad (2.2.5)$$

事後主観確率はディリクレ分布と多項分布の組み合わせで以下の式で表せる。

$$[\theta_k^{\{\bar{M}\}}] \equiv [\theta_k^{\{\bar{M}\}} | y_k] = \text{Di}_{J_k}(\alpha_k^{(j)} + y_k^{(j)}; j = 1, \dots, J_k) \quad (2.2.6)$$

事象が2つの場合はベータ分布を用いて下記の式で与えられる。

$$[\theta_k^{\{\bar{M}\}}] \equiv [\theta_k^{\{\bar{M}\}} | y_k] = \text{Beta}(\alpha_k + y_k, \beta_k + n_k - y_k) \quad (2.2.7)$$

以上のことから、ベイズ推定において事後確率は、事前確率の信頼度（データ数などに依存）と過去の観測データ $y$ を用いて表現することができ、したがってベイズ推定における確率評価は、モデルの信頼度と観測データにのみ依存することとなる。

## 2) 噴火確率、到達確率

BET 手法では、噴火の推移を系統樹的に表したイベントツリーとベイズ推定を用いて、火山不安定状態から噴火、そして噴火シナリオがどのように推移して、どのような被害を及ぼすかまでを一括して評価する（図 2.2.12）。イベントツリーの分岐点に当たる各ノードにおいて、各々確率を算出し、それらを掛け合わせることで、任意の噴火シナリオに至る確率が求められる。

### ① ノード1、2、3

ノード1、2、3は火山不安定状態の有無から、マグマ性の有無、そして噴火の発生までを評価する。これらノードの確率は主にモニタリングによる観測データから導出される。

ノード1では現在  $t_0$  からある期間  $\tau$  において、地殻変動や噴気孔温度上昇などの火山不安定状態が観測されたかどうかを評価する。ノード2ではノード1で発生した火山不安定状態が、マグマの活動によるものなのか、熱水活動によるものか、構造地質的な要因によるものなのかを評価する。そしてノード3では  $t_0 \sim (t_0 + \tau)$  の期間 ( $\tau$  の最適期間は1年) にマグマが地表面に到達するか否かを評価する。これらノードには地殻歪み速度や、月別地震回数、噴気孔の温度、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  ガス濃度等が入力される。

### ② ノード4

火道が形成される位置を評価するノードである。基本的な前提条件として、一度の噴火で形成される火道数は一つである。そのため評価結果は互いに独立であり、評価者が設定した分だけ多様性が生じる。任意に設定した火道形成箇所における過去の噴火実績データがあれば、それを入力することで、事前確率の精度を向上させることができる。

### ③ ノード5

噴火の規模やタイプを決定するノードである。このノードで評価する項目はVEIや噴火タイプ(爆発的噴火、溶岩流出、水蒸気爆発など)等、目的に応じて評価者が任意で定めることができる。確率の算出方法はノード4と同様で、事前確率の信頼度に依存する。過去の観測データ(たとえば、ある火道からある規模の噴火が生じた等)が存在する場合は、その値を入力することで事前確率の精度を向上させることができる。

### ④ ノード6

ノード6ではそれぞれの火山現象について、噴火規模による発生の可能性を閾値として評価者が定めることにより各火山現象の発生確率を評価する。この値はノード5で評価した噴火規模に大きく依存する。

### ⑤ ノード7、8

ノード7、8はお互いに関連しあったノードである。ノード7では火山の火口を中心とした周囲を任意のエリアへ分割し、火山現象がエリアに到達するか否かを評価する。ノード8は、ノード7で設定した各エリアについて、ある火山現象が到達したときの被害の有無を示す。

### (3) 評価に必要な情報

本評価手法における評価に必要な情報を表 2.2.10 に示す。

表 2.2.10 入力項目一覧

ノード 1		
入力データ	諸 元	備 考
月間地震回数	月間の地震発生回数	—
最大マグニチュード	月間での最大マグニチュード	—
月間低周波地震回数	月間の低周波地震回数	—
S02 量放出量	二酸化硫黄の放出の有無	—
日 CO2 放出率	日ごとの二酸化炭素放出率	—
地殻膨張率	1 日あたりの地殻膨張率	—
噴気孔温度	火口内の噴気孔の温度	—
ノード 2		
入力データ	諸 元	備 考
S02 量放出量	二酸化硫黄の放出の有無	—
地殻膨張率	1 日あたりの地殻膨張率	—
地震の平均卓越周波数	地震の平均卓越周波数	—
震源の深度の平均と分散の比	震源の深度の平均と分散の比	—
噴気孔温度	火口内の噴気孔の温度	—
ノード 3		
入力データ	諸 元	備 考
水蒸気爆発の有無	水蒸気爆発の有無	—
地震の平均周波数の時間変化	日ごとの地震の平均卓越周波数	—
震源の深度の平均と分散の比	震源の深度の平均と分散の比	—
地震により放出されるエネルギーの加速度減少の有無	地震により放出されるエネルギーの加速度減少の有無	—
歪み加速度	歪み加速度	—
累積歪み変化量	累積歪み変化量	—
ガス成分比の変化	HCl/SO <sub>2</sub> 、HF/SO <sub>2</sub> の成分比変化	—
上記項目の 1 つ以上での急激な変化の有無	—	—
ノード 4、5、6		
入力データ	諸 元	備 考
火道形成位置情報	過去に火道が形成された位置	ノード 4 に使用
噴火規模情報	過去に発生した噴火の規模	ノード 5 に使用
噴火規模別火山現象発生可能性	過去に発生した噴火の火山現象	ノード 6 に使用
専門家による意見	専門家の意見を集約したもの	信頼度評価に使用

#### (4) 長所・短所

##### 1) 長所

- ・ 地質学的データ（噴火年、降灰分布など）、構造地質学的データ（地殻変動量、歪み速度、過去の断層・火口位置など）、モニタリングにより得られる最新の観測データ、専門家による意見など、あらゆるデータを取り込んで確率評価を行うことが可能
- ・ モニタリングデータを使用することでリアルタイムに近いハザード評価が可能
- ・ ベイズ理論に基づいた確率評価であるため、偶然のおよび認識論的不確実性を考慮した評価が可能

##### 2) 短所

- ・ 観測網や歴史記録が充実した火山のみが対象となり、広域的なハザード評価には不向き
- ・ 火山現象の到達確率評価では、対象地域の地形や気候条件の考慮が困難
- ・ 評価可能時間が短い。

#### (5) 参考文献

- ・ Jacopo Selva, Antonio Costa, Warner Marzocchi, Laura Sandri, (2010), BET\_VH: exploring the influence of natural uncertainties on long-term hazard from tephra fallout at Campi Flegrei (Italy), Bulletin of Volcanol, Volume 72, Issue 6, pp 717-733
- ・ Jacopo Selva, Warner Marzocchi, Laura Sandri, Antonio Costa, (2015), Chapter 9 - Operational Short-term Volcanic Hazard Analysis: Methods and Perspectives, Volcanic Hazards, Risks and Disasters, Pages 233-259
- ・ Jacopo Selva, Warner Marzocchi, Paolo Papale, Laura Sandri, (2012), Operational eruption forecasting at high-risk volcanoes: the case of Campi Flegrei, Naples, Journal of Applied Volcanol, 1:5
- ・ Warner Marzocchi, Laura Sandri, Jacopo Selva, (2010), BET\_VH: a probabilistic tool for long-term volcanic hazard assessment, Bulletin of Volcanol, Volume 72, Issue 6, pp 705-716
- ・ Warner Marzocchi, Laura Sandri, Jacopo Selva, (2008), BET\_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting, Bulletin of Volcanol, Volume 70, Issue 5, pp 623-632
- ・ Rosa Sobradelo, Stefania Bartolini, Joan Martí, (2014), HASSET: a probability event tree tool to evaluate future volcanic scenarios using Bayesian inference Presented as a plug-in for QGIS, Bull Volcanol 76:770



- Alexander Garcia-Aristizabal, Jacopo Selva, Eisuke Fujita, (2013),  
Integration of stochastic models for long-term eruption forecasting into  
a Bayesian event tree scheme: a basis method to estimate the probability  
of volcanic unrest, *Bull Volcanol* 75:689
- Tom Sheldrake, (2014), Long-term forecasting of eruption hazards:  
A hierarchical approach to merge analogous eruptive histories, *Journal of  
Volcanology and Geothermal Research* 286 15-23
- S. Bartolini , A. Geyer a, J.Martí, D. Pedrazzi, G. Aguirre-Díaz, (2014),  
Volcanic hazard on Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica),  
*Journal of Volcanology and Geothermal Research* 285 150-168

## 2.2.4 更新過程モデルによる降灰年超過確率評価

### (1) 概要

ニュージーランド Massey 大学 Volcanic Risk Solution グループらにより検討された評価手法である。更新モデルによる噴火確率評価と、過去の降灰実績に基づいた降灰範囲を評価し、任意の地点における降灰厚年超過確率を評価するものである。

まず、更新過程により前の噴火から次に起こる噴火までの時間間隔を評価する（噴火確率の評価）。次に、既存研究により得られる噴火規模と降灰厚の実績から求めた分布に基づいて、降灰厚さ分布を評価する（到達確率の評価）。最後にこの 2 つの結果を組み合わせることで、対象地点における降灰厚さの年超過確率を評価する。その評価内容一覧を表 2.2.11 に示す。

表 2.2.11 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	降灰（噴火確率、到達確率）
出力情報	評価対象地点におけるある降灰厚の年超過確率
評価可能時間	現在から 200 年先まで（任意に変更可能）
評価最小単位	指定した地点の降灰厚超過確率を評価する
使用データベース	降灰厚さ、噴火年代を報告している文献
評価事例	ニュージーランド（タラナキ山）

### (2) 内容

本評価手法では噴火確率および到達確率を算出している。

#### 1) 噴火確率

噴火確率の算出は更新過程を用いる。式で示した更新過程のこの例（2008 年時点）では、前回の 154 年前（1854 年）のタラナキ山の噴火から今後  $t$  年間に噴火が発生しない確率（式(2.2.8)）を求め、1 から減ずることで噴火確率を算出している（図 2.2.15、図 2.2.16）。

$$\Pr(\tau > 154 + t | \tau > 154) = \frac{\int_{154+t}^{\infty} f(\tau) d\tau}{\int_{154}^{\infty} f(\tau) d\tau} \quad (2.2.8)$$

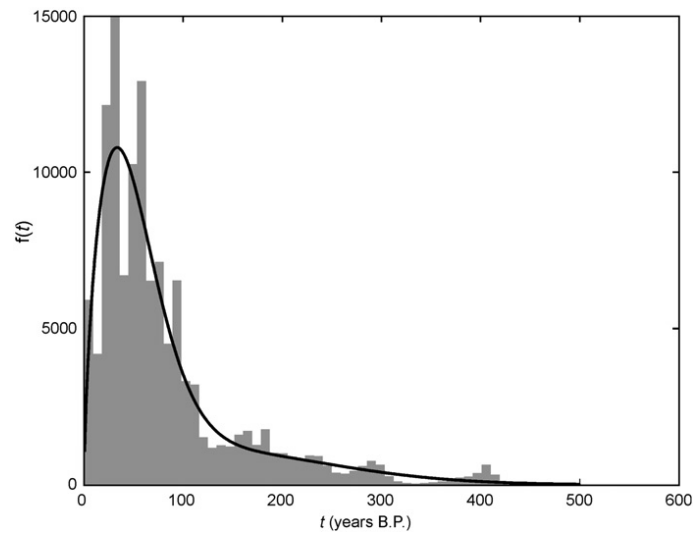


図 2.2.15 噴火イベントのヒストグラム (Bebbington et al., 2008)  
(混合ワイブル分布 (近似曲線) に最も適合)

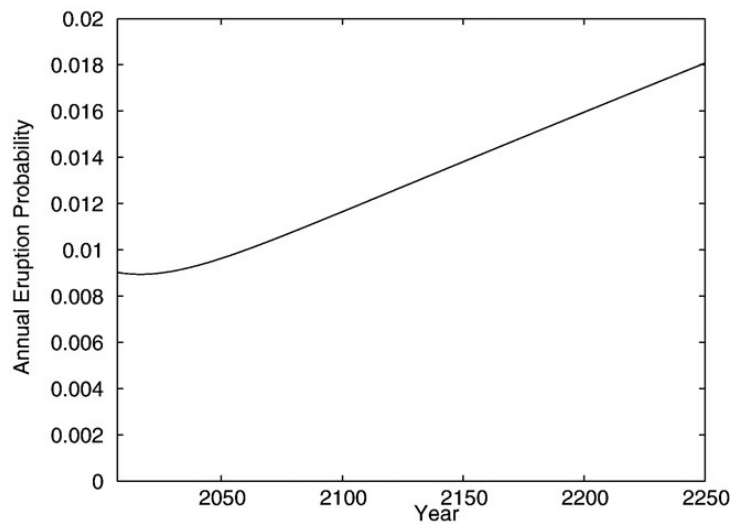


図 2.2.16 経過年数に応じた噴火確率 (Bebbington et al., 2008)

## 2) 到達確率

ある地点における降灰厚さ  $T$  は、Rhoades et al., (2002) で使用される式によって以下のように示される。

$$\begin{aligned} \log T = & 8.67 + 1.13 \log V - 2.38 \log(R + 1.85V^{1/3}) + 1.28 \cos \theta \\ & + 0.28 \sin 2\theta + 0.22 \cos 2\theta \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

式(2.2.9)は降灰厚さ  $T$  を、噴出量  $V$  と給源からの距離  $R$ 、風向き  $\theta$  の関数として表現している。ここでは風向  $\theta$  は、既往の降灰の等層厚線図の分布を参考に決定する。

等層厚線図から判断した最適な風向  $\theta$  を代入すると次式が得られる。

$$\log T = 8.67 + 1.13 \log V - 2.38 \log(R + 1.85V^{1/3}) + 0.933 \quad (2.2.10)$$

式(2.2.10)へフィールド調査により得られた降灰厚さ  $T$  と距離  $R$  を代入することで次式を得る。

$$P(V > v) = 0.016v^{-0.9971} \quad (2.2.11)$$

ここで噴火当時の風向がランダムであると仮定し、以下の式により風向のランダムさを考慮した降灰厚  $T$  を算出する。風向  $\theta$  は真東から変化させる。

$$\log T = a + b \log V - c \log(R + d V^{1/3}) + \beta_1 \cos \theta + \alpha_2 \sin 2\theta + \beta_2 \cos 2\theta, \quad (2.2.12)$$

式(2.2.11)の頻度-噴出量関係式のために、式(2.2.12)により得られた結果に対しランダムモンテカルロサンプリングを行う。任意の閾値以上の降灰が発生する確率は、任意の閾値よりも大きい値を示したサンプルの割合で表現される。

最終的に上記の噴火確率と到達確率を組み合わせた式(2.2.13)により降灰超過確率を評価する(表2.2.14)。

$$EP(y) = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \Pr(i \text{ eruptions occur in } y \text{ years}) \Pr(T < T_0 | \text{an eruption occurs})^i \quad (2.2.13)$$

### (3) 評価に必要な情報

確率評価に必要な情報について表 2.2.12 および表 2.2.13 にまとめた。

表 2.2.12 噴火確率評価入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	噴火履歴	噴火が発生した年代	これを基に噴火イベント間のインターバルを求める

表 2.2.13 到達確率評価入力項目一覧

項目	入力データ	入力範囲	備考
到達確率	風向	360°	—
	距離 (R)	—	給源火山と対象地点までの距離

表 2.2.14 各評価対象地点における厚さ別年超過確率一覧 (Bebbington et al., 2008)

Site	Exceedence probability given an eruption				Annual exceedence probability at present				50-year exceedence probability from present			
	0.5 mm	1 mm	2 mm	5 mm	0.5 mm	1 mm	2 mm	5 mm	0.5 mm	1 mm	2 mm	5 mm
Whareroa	0.457	0.354	0.261	0.162	0.004	0.003	0.002	0.002	0.188	0.149	0.112	0.070
<b>Kapuni</b>	<b>0.694</b>	<b>0.588</b>	<b>0.476</b>	<b>0.337</b>	<b>0.006</b>	<b>0.005</b>	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>	<b>0.272</b>	<b>0.235</b>	<b>0.195</b>	<b>0.142</b>
Oaonui	0.358	0.263	0.183	0.104	0.003	0.002	0.002	0.001	0.150	0.112	0.079	0.046
Pohakura	0.462	0.359	0.262	0.161	0.004	0.003	0.002	0.002	0.190	0.150	0.112	0.070
Opunake GXP	0.515	0.410	0.311	0.202	0.005	0.004	0.003	0.002	0.209	0.170	0.132	0.087
Moturoa GXP	0.497	0.387	0.285	0.175	0.005	0.004	0.003	0.002	0.203	0.162	0.121	0.076
Carrington GXP	0.561	0.450	0.344	0.226	0.005	0.004	0.003	0.002	0.226	0.185	0.145	0.098
Hurrangi GXP	0.483	0.382	0.288	0.185	0.004	0.004	0.003	0.002	0.198	0.160	0.122	0.080
<b>Stratford GXP</b>	<b>0.791</b>	<b>0.709</b>	<b>0.612</b>	<b>0.471</b>	<b>0.007</b>	<b>0.006</b>	<b>0.006</b>	<b>0.004</b>	<b>0.304</b>	<b>0.277</b>	<b>0.244</b>	<b>0.193</b>
Hawera GXP	0.505	0.403	0.308	0.200	0.005	0.004	0.003	0.002	0.206	0.168	0.131	0.087

### (4) 長所・短所

#### 1) 長所

- ・ 入力パラメーターが少なく、評価のための準備が比較的容易にできる
- ・ 任意の地点の降灰厚が評価可能である。

#### 2) 短所

- ・ 降灰に限定した手法であり、他の火山現象の評価には現段階では転用できない。

### (5) 参考文献

- ・ Mark Bebbington, Shane J. Cronin, Ian Chapman, Michael B. Turner (2008), Quantifying volcanic ash fall hazard to electricity infrastructure, Journal of Volcanology and Geothermal Research 177 1055-1062
- ・ D. A. Rhoades, D. J. Dowrick and C. J. N. Wilson, (2002), Volcanic Hazard in New Zealand: Scaling and Attenuation Relations for Tephra fall deposits from Taupo Volcano, Natural Hazards 26: 147-174.

## 2.2.5 ベイズ推定による新規火道形成確率評価

### (1) 概要

本評価手法はイタリア国立地球物理学研究所（INGV）で考案された手法であり、次の火道形成位置を確率論的に評価する。評価結果は地図上に示され、火道形成される確率が高い場所を視覚的に把握することができる（図 2.2.17）。

評価にはベイズ推定を用いる。ベイズ推定は専門家の意見や、火山学的データ、地質学的データ等、さまざまな情報を統合して扱うことができる手法である。評価に際して入力するパラメーターは過去の火口位置、過去の構造地質学的イベント（断層、破砕帯）形成位置である。

本評価手法は対象地域をメッシュ（格子）に分割し、そのメッシュごとに事前確率を設定し、事後確率を算出する。事前確率の設定にはその対象メッシュ内において過去に発生した構造地質学的イベント（断層形成・破砕帯形成）や火山噴火イベントの位置情報を入力する。メッシュごとに求められた結果を統合し、地図上に表記することで次の噴火が生じる可能性のある場所を評価することができる。その評価内容一覧を表 2.2.15 に示す。

表 2.2.15 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	火道形成位置（噴火確率）
出力情報	対象地域（メッシュ別）火道形成確率
評価可能時間	数年～数十年以内
評価最小単位	0.5 × 0.5km
使用データベース	過去の噴火活動、地震・断層運動に関する文献
評価事例	イタリア（キャンピ・フレグレイ火山）

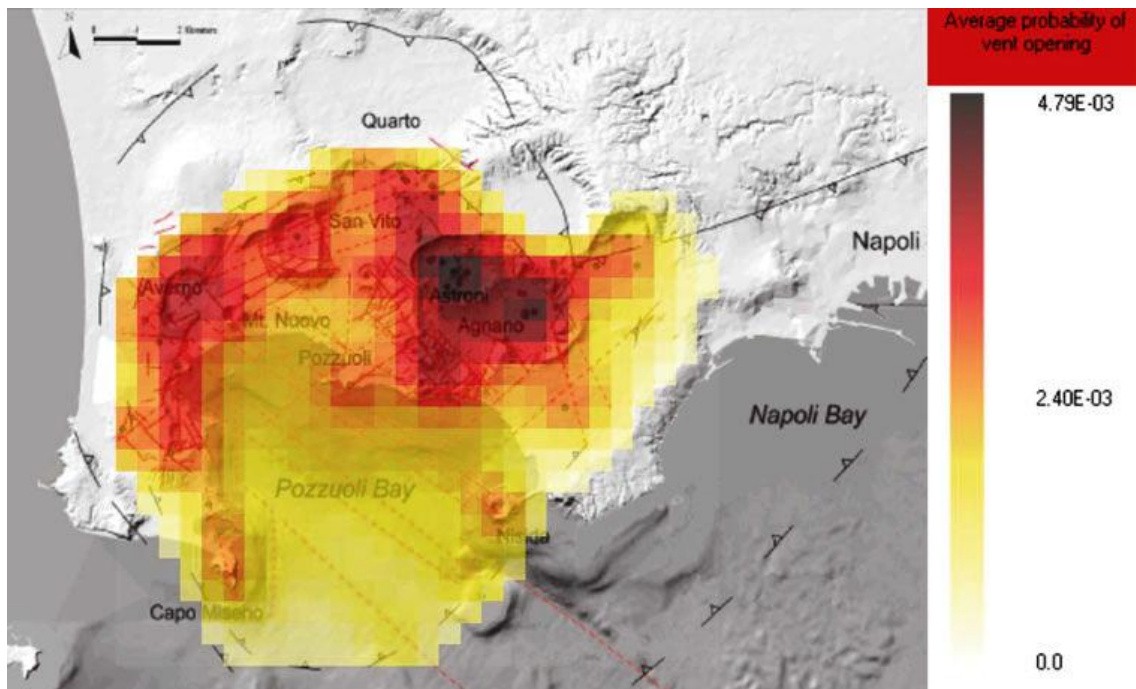


図 2.2.17 キャンピ・フレグレイ火山における火道形成確率  
(Selva et al., 2012)

## (2) 内容

本評価手法では火道形成確率を評価している。なお、本評価手法では、噴火が生じる可能性のある場所を評価している。火道形成確率の評価手順を以下に示す。

- 手順 1. 対象地域のメッシュ (Sub-Area : SA[500m メッシュ]) の作成
- 手順 2. 事前モデルの準備 ( $\theta$ 、 $\Lambda$ の決定)
- 手順 3. 設定したメッシュごとに事前分布パラメーター ( $\theta$ 、 $\Lambda$ ) と過去の観測データ ( $y$ ) を統合し計算

任意のメッシュにおける火道形成確率の事前分布  $\theta_{prior}$  モデルはディリクレ分布でモデル化する。また、任意のメッシュにおける火道形成確率  $\theta$  は多項分布でモデル化される。

この2つのモデルを結合することで火道形成確率  $\theta$  は事前分布のパラメーター ( $\theta$ 、 $\Lambda$ ) および過去の観測データ ( $y$ ) を用いて表現することができ、モデルの計算はこれらパラメーターの評価にのみ依存することとなる。上記内容を式で示すと次のように表される。

$$[\theta] = [\theta|y] = [\theta]_{\text{prior}} [y|\theta]/[y] \quad (2.2.14)$$

$[\theta]$  : 火道形成確率  
 $[\theta|y]$  :  $y$ を前提とした事後分布  
 $[\theta]_{\text{prior}}$  : 事前分布  
 $[y|\theta]$  : 尤度関数  
 $[y]$  : 観測データ

$$\begin{aligned}
 [\theta] &= Di_N(\alpha_1 + y_1, \dots, \alpha_N + y_N) \\
 &= Di_N(\theta_1(\Lambda + N - 1) + y_1, \dots, \theta_N(\Lambda + N - 1) + y_N)
 \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

$Di$  : ディリクレ分布の確率密度関数  
 $\theta$  : 中央値。この平均が **best guess** 確率値  
 $\Lambda$  :  $\theta$ の分散指標。 **best guess** 確率値の信頼度の指標を表す。  
 $N$  : 対象となるメッシュの番号 (1, 2, . . . N)

また上記評価手順の 2. において、構造地質学的要因との関係を考慮するため、各メッシュに対し構造地質学的特徴を数値指標として表現した重み  $W$  を割り当てる。以下にその指標を示す。

- ・ カルデラ底にある : 重み 1
- ・ カルデラ底にあり、断層などの構造をメッシュ内に含む : 重み 2
- ・ メッシュ内に火道を含む : 重み 3

重み割り当て例 :

メッシュ番号  $k$  のメッシュがカルデラ底に位置し(重み +1)、その中に火道が存在する場合(重み +3)の同メッシュの重み  $W_k$  は4となり、

$$\theta_k = \frac{W_k}{\sum_{j=1}^N W_j} = \frac{4}{\sum_{j=1}^N W_j} \quad (2.2.16)$$

となる。



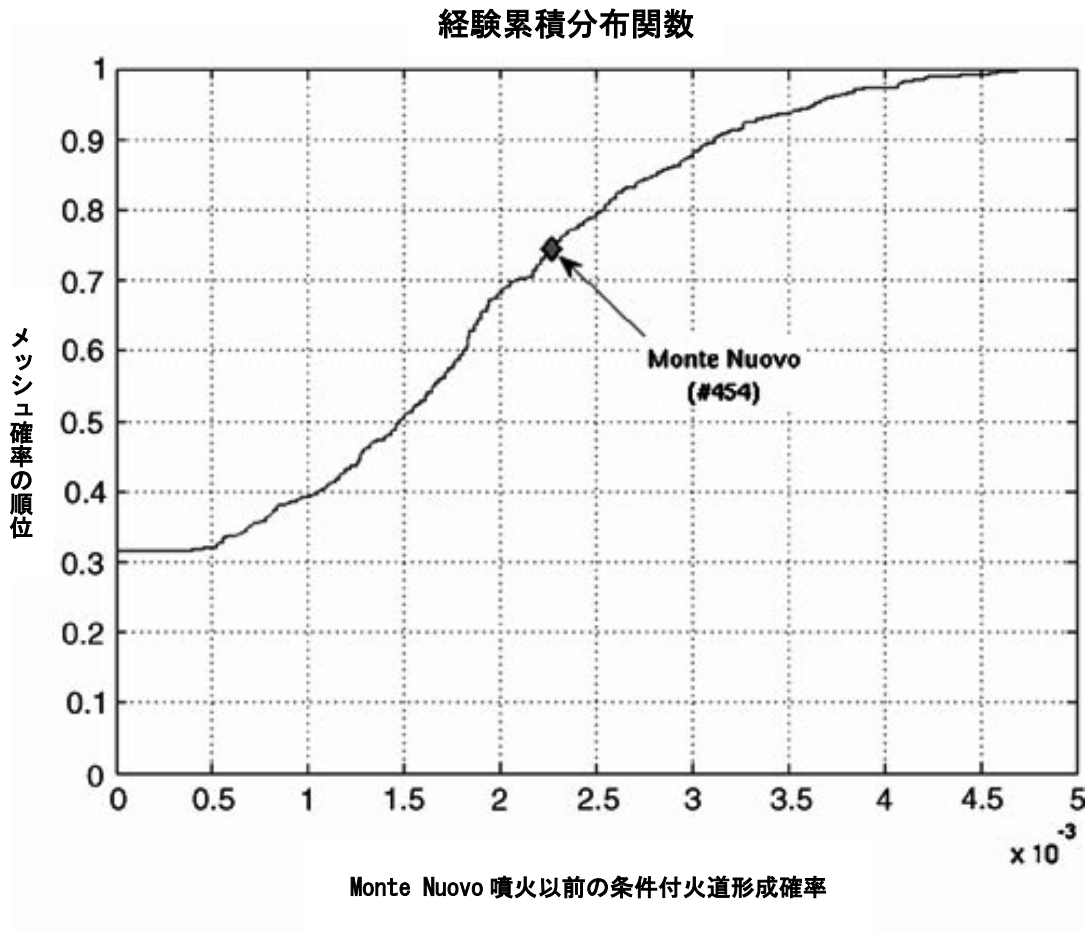


図 2.2.18 過去の噴火イベントを用いたモデル検証 (Selva et al., 2012)

図 2.2.18 は、本評価手法の精度を過去の噴火事例に遡り検証した結果である。この検証ではキャンピ・フレグレイカルデラで 1538 年に起きた噴火イベントである Monte Nuovo 噴火を検討材料とし、Monte Nuovo 噴火が発生する直前までのデータを用いて各メッシュにおける火道形成確率を計算した。Monte Nuovo 噴火の際に実際に火道が形成された#454 メッシュにおける火道形成確率の順位はメッシュ数の約 75%の値を得ている。

### (3) 評価に必要な情報

確率評価に必要な情報については表 2. 2. 16 にまとめ、具体例を図 2. 2. 19 に示す。

表 2. 2. 16 噴火確率入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	過去の噴火イベント発生位置	噴火が生じた位置の座標	—
	過去の断層形成位置	断層が形成された位置の座標	—
	過去の破砕帯形成位置	破砕帯が形成された位置座標	—

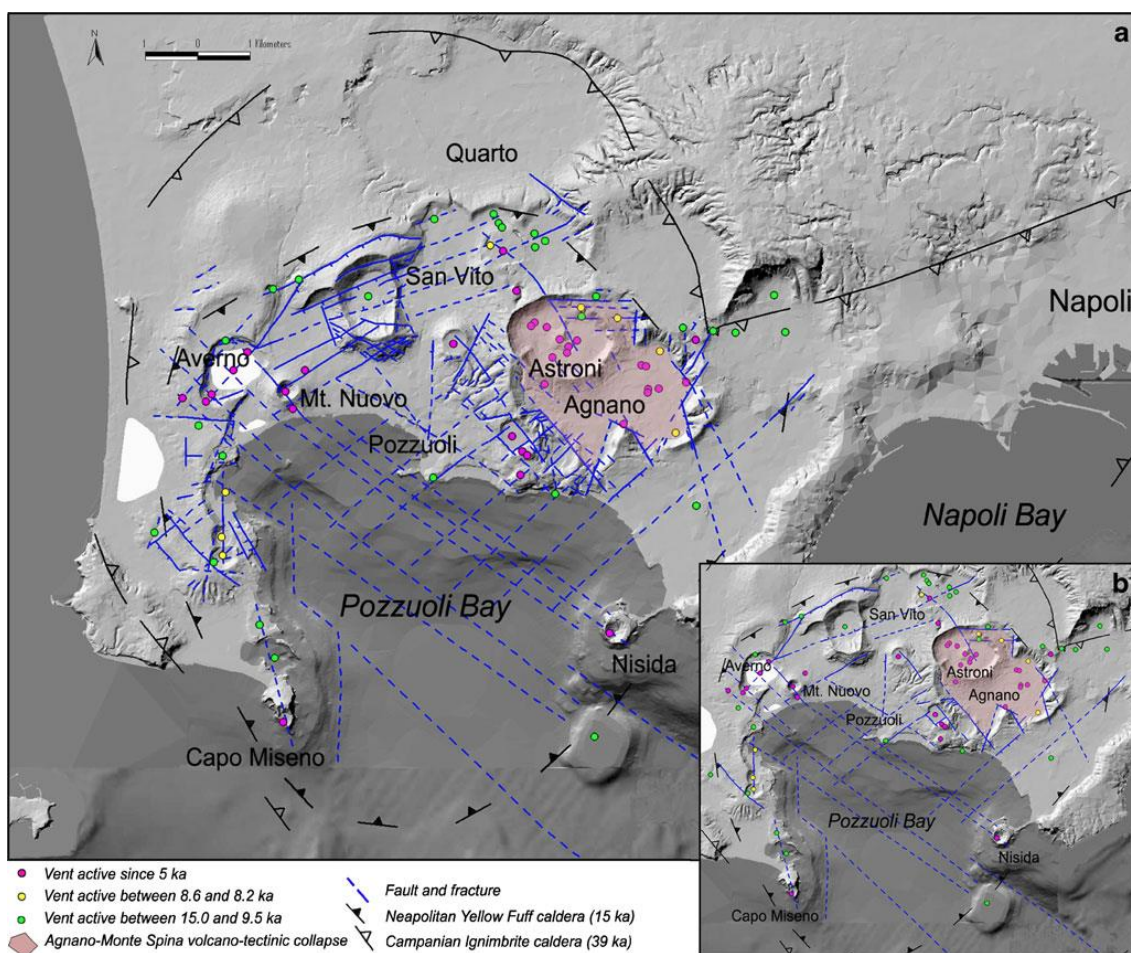


図 2. 2. 19 キャンピ・フレグレイ火山周辺の断層、火道位置図 (Selva et al., 2012)

#### (4) 長所・短所

##### 1) 長所

- ・ 入力するパラメーターを少なくすることで、不確実なデータによる未知のバイアスが発生する可能性を減少させることができる。
- ・ この手法で出力した結果をベイジアンイベントツリー(BET)におけるノード 4 に転用し、より詳細な評価を実施することができる。
- ・ 危険の高い場所を視覚的に把握することができる。

##### 2) 短所

- ・ 評価対象期間が数年～数十年と比較的短く長期的評価には不向きである。
- ・ カルデラ内にある地域など、本評価手法を適応できる場所に制限がある。

#### (5) 参考文献

- ・ Jacopo Selva, Giovanni Orsi, Mauro Antonio Di Vito, Warner Marzocchi and Laura Sandri (2012), Probability hazard map for future vent opening at the Campi Flegrei caldera, Italy. Bull Volcanol 74:497-510

## 2.2.6 点過程およびカーネル密度推定による時空間的噴火確率評価

### (1) 概要

本評価手法はニュージーランドの Massey 大学の Volcanic Risk Solution グループが主となり開発した手法である。ある対象地域において、いつ、どこで噴火が発生するか噴火確率の時空間的評価を行う。単成火山地域のような次の噴火の発生場所がハザード上で特筆すべき課題となっている地域を対象に適応される手法である。

本評価手法で使用する確率論的評価モデルは点過程とカーネル密度推定である。点過程では次の噴火が生じる時間的確率を算出し、カーネル密度推定では次の噴火が起こる場所の空間的分布確率を評価する。時間的評価と空間的評価は、噴火データが不足しているため、それぞれの関係性が説明できないので、それぞれを独立な要素として考えるものとする。その評価内容一覧を表 2.2.17 に示す。

表 2.2.17 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	噴火位置 (噴火確率)
出力情報	対象地域において次の噴火が起きるまでの時間間隔、 噴火が発生する場所の空間的確率密度分布
評価可能時間	次回噴火が起きるまでの期間を評価
評価最小単位	1 × 1km
使用データベース	過去の噴火活動に関するデータベース全般
評価事例	ニュージーランド (オークランド単成火山群)

### (2) 内容

求める確率は時間-空間の両方を考慮した噴火確率である。

本評価手法における時空間ハザード評価モデルは次の式により表現される。

$$\lambda(x,t) = \lambda(t)f(x) \tag{2.2.17}$$

ここで、 $\lambda(t)$ は噴火までの再現期間を時間の変数  $t$  で表したものであり、 $f(x)$ は位置情報に関する情報  $x$  をカーネル密度関数で表したものである。

## 1) 時間的噴火確率評価

本評価手法の時間的噴火確率評価には点過程の一つ、ポアソン過程が用いられている。

点過程とは、ある事象が起きた時間を、時間軸上にプロットしていき、その時間間隔を基にして、突然に発生する事象の生起確率メカニズムを表現する確率過程である。

たとえば、火山噴火を考えた場合に、前回生じた事象からある時点まで事象が生じていない場合、時点が進むごとに事象が生じる確率は高まる。このように表現できるものを更新過程と呼び、その中でも、時間間隔が指数分布に従う場合をポアソン過程と呼ぶ（図 2.2.20）。

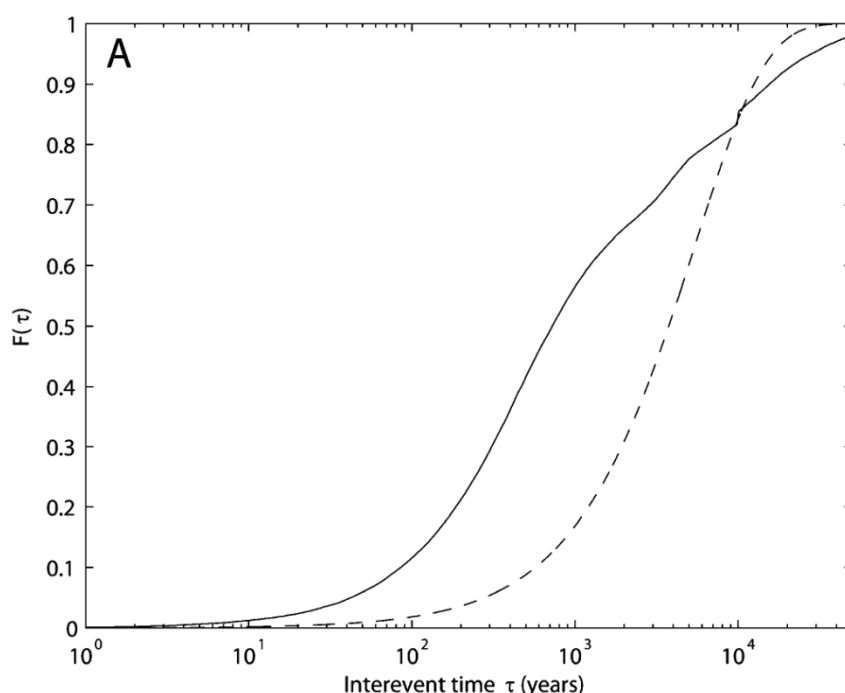


図 2.2.20 ポアソン過程による噴火確率評価 (Bebbington and Cronin, 2010)

## 2) 空間的噴火確率評価

本評価手法の空間的噴火確率評価にはカーネル密度推定が用いられている。

カーネル密度推定とは、各観測値にバンド幅と呼ばれるウェイトを割り振り、各観測値によるウェイトを累積して、その観測データの分布の特徴を分析する手法である。これにより、どの観測値が分布のピークに最も影響を与えるのか、また、その周辺にはどのように観測値が分布しているのかを視覚的に把握することができる。カーネル密度推定をより高次のハザード空間に射影することで、観測値の空間的な分布を評価することができる（図 2.2.21）。

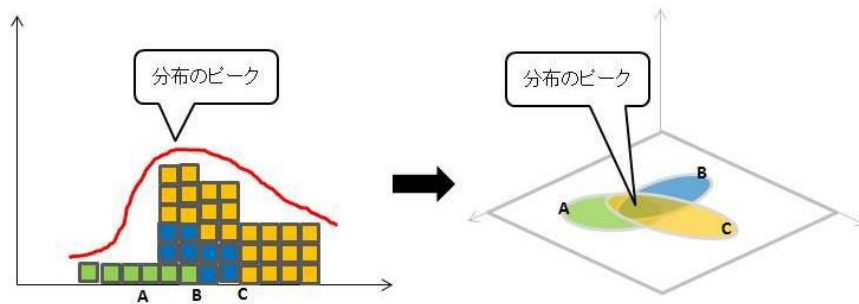


図 2.2.21 カーネル密度推定の概念図

カーネル密度推定においてはバンド幅の設定が評価結果に大きな影響を及ぼすため、その設定には注意が必要である。バンド幅の主な求め方としては、最小二乗クロスバリデーション等を用いるのが一般的である (Duong, 2007)。

本評価手法では以下に示すカーネル関数により時空間分布  $x$  の分布密度を推定する。

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|H|}} \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{1}{2}(x - x_i)^T H^{-1}(x - x_i)\right) \quad (2.2.18)$$

ここで、 $H$  はバンド幅を表す。

最終的に上記 2 つの評価結果から時間的、空間的噴火確率を評価する。

### (3) 評価に必要な情報

表 2.2.18 に確率評価を実施する上で必要な入力パラメーターをまとめた。

表 2.2.18 噴火確率入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	過去の噴火イベント発生位置	噴火が生じた位置の座標	空間的評価に使用
	過去の噴火履歴	噴火が生じた年代	時間的評価に使用

#### (4) 長所・短所

##### 1) 長所

- ・ 次の噴火がいつ生じるかだけでなく、どこで生じるか、時空間的な評価が必要となる単成火山群のような場所では、カーネル密度推定のような高次元に応用可能な表現方法が有効である。
- ・ 火山群地域等の数 10 km 四方程度の地域を評価できる。

##### 2) 短所

- ・ 同じ火道から複数回噴火が生じるような複成火山に対しては適用できない。
- ・ 空間的評価に関してはバンド幅の設定で結果が大きく異なるため、注意が必要である。

#### (5) 参考文献

- ・ Mark. S. Bebbington and Shane. J. Cronin, (2010), Spatio - temporal hazard estimation in the Auckland Volcanic Field, New Zealand, with new event - order model. Bull Volcanol 73:55-72
- ・ Chuck Connor, Mark Bebbington, Warner Marzocchi , (2015), Probabilistic Volcanic Hazard Assessment. The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition), Pages 897-910
- ・ Mark S. Bebbington, (2013), Assessing spatio-temporal eruption forecasts in a monogenetic volcanic field. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 252, Pages 14-28
- ・ M.A. El Difrawy, M.G. Runge, M.R. Moufti, S.J. Cronin, M. Bebbington, (2013), A first hazard analysis of the Quaternary Harrat Al-Madinah volcanic field, Saudi Arabia, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 267, Pages 39-46

## 2.2.7 噴火規模—頻度のワイブル関数評価

### (1) 概要

本評価手法は巽好幸教授（神戸大学）らによって用いられた手法（評価内容は表 2.2.19 参照）である。過去の噴火イベントを極値理論の一つであるワイブル関数を用いて統計学的に解析し、噴火規模と頻度の関係を検討することで、巨大カルデラ噴火のような「低頻度大規模災害」が今後 100 年間に発生する確率を表 2.2.20 のように評価している。使用する指標は噴火の規模を表す噴火マグニチュードであり、評価に用いた噴火イベントは日本における 12 万年前以降の噴火マグニチュード 4 以上の噴火イベント 447 個である。その評価内容一覧を表 2.2.19 に示す。

表 2.2.19 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	噴火規模・頻度（噴火確率）
出力情報	噴火マグニチュード別の噴火が発生する確率
評価可能時間	100 年間
評価最小単位	空間的評価なし
使用データベース	噴出量が見積もられている過去の噴火活動に関するデータベース全般
評価事例	日本

表 2.2.20 日本列島における巨大カルデラ噴火の確率 (Tatsumi and Suzuki, 2014)

Magnitude	Mass (kg)	DRE* volume (km <sup>3</sup> )	Tephra volume (km <sup>3</sup> )	Cumulative frequency (/ky)	Probability in the next 100y (%)	Calculated cumulative frequency (/ky)	Probability in the next 100y (%)
7	$1.0 \times 10^{14}$	40	100	0.10	1.0	0.073	0.73
8	$1.0 \times 10^{15}$	400	1000	0.025	0.25	0.026	0.26

\*Dense rock equivalent volume calculated assuming an uniform density of 2500 kg/m<sup>3</sup>.

### (2) 内容

求める確率は巨大カルデラ噴火の噴火確率である。

本評価手法で用いられる噴火マグニチュード  $M$  は噴出物の総重量を用いて表現される（早川の式）。

$$M = \log_{10}[\text{噴出物の総重量 (kg)}] - 7 \quad (2.2.19)$$



本評価手法の確率計算には極値理論の一種である、ワイブル関数を用いる。  
ワイブル関数は次式で表現される。

$$p(S) = \frac{\beta}{\tau} \left(\frac{S}{\tau}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{S}{\tau}\right)^\beta\right] \quad (2.2.20)$$

ここで  $S$  は確率密度関数の振幅、 $\tau$ 、 $\beta$  はフィッティングパラメーターである。  
火山噴火の確率を評価する場合、噴火マグニチュード  $M$  を超える噴火の相対頻度  $F(M)$  は以下の式で表される。なお、相対頻度は観察期間中の全観測数で特定  $M$  以上の観測数を除した値である。

$$F(M) = \exp(-aM^b) \quad (2.2.21)$$

$$M \leq 5.7 : a = 2.81 \times 10^{-7}, b = 9.44 \quad (a)$$

$$M \geq 7 : a = 1.55 \times 10^{-13}, b = 14.4 \quad (b)$$

$5.7 < M < 7$  : 上記 (a) を式(2.2.21)に代入して得られた結果から算出した頻度と (b) を代入して得られた結果から算出した頻度の合計値

本研究事例では噴火マグニチュードを  $M \leq 5.7$  と  $M \geq 7$  に分けて取り扱っている。  
この閾値は噴火様式の転換点を参照としており、 $M \leq 5.7$  は山頂噴火、 $M \geq 7$  は巨大カルデラ噴火、 $5.7 < M < 7$  は両者の混合噴火である (図 2.2.22)。

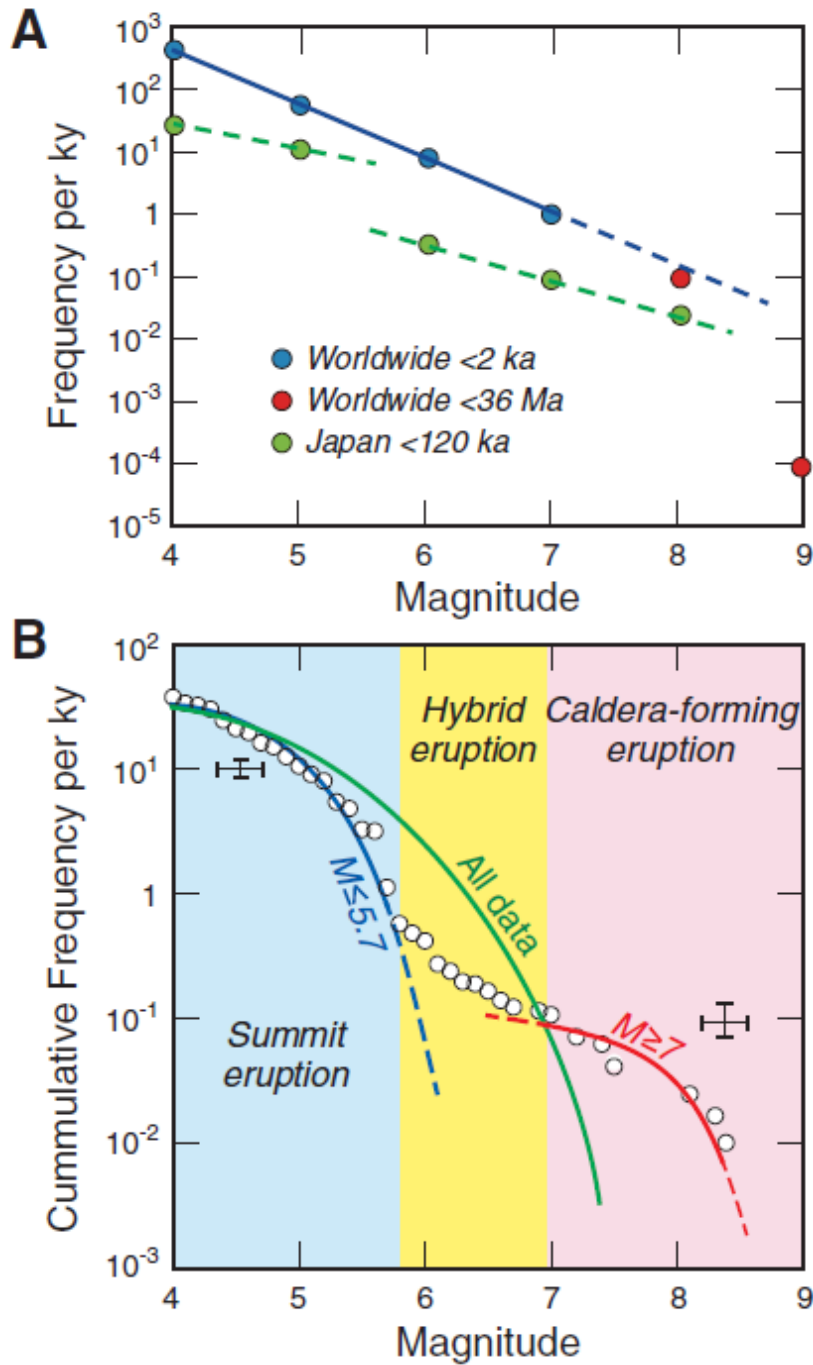


図 2.2.22 噴火の規模と頻度のワイブルプロット (Tatsumi and Suzuki, 2014)

- A : Frequency per ky … 頻度/1,000 年  
 Worldwide <2 ka … 世界: 2 千年前以降  
 Worldwide <36 Ma … 世界: 36 百万年前以降  
 Japan <120 ka … 日本: 12 万年前以降
- B : Cumulative Frequency per ky … 累積頻度/1,000 年  
 Summit eruption … 頂上噴火  
 Hybrid eruption … 混合噴火  
 Caldera-forming eruption … 巨大カルデラ噴火

### (3) 評価に必要な情報

本確率評価に必要な情報を表 2.2.21 に示す。

表 2.2.21 噴火確率入力項目一覧

項目	入力データ	諸元	備考
噴火確率	過去の噴火イベントの噴出量	噴火時の噴出物の量	-
	過去の噴火イベントの噴火年代	噴火が生じた年代	-

### (4) 長所・短所

#### 1) 長所

- ・ 噴火マグニチュード 5.7 以下（山頂噴火）と M7 以上（巨大カルデラ噴火）の累積頻度を別々のワイブル関数でよく再現できており、それぞれ噴火様式が異なる結果と理解される。

#### 2) 短所

- ・ 噴火マグニチュードの算出が必要
- ・ 噴火マグニチュードは、VEI に比べると一般的に情報が乏しいため汎用性に欠ける可能性がある。

### (5) 参考文献

- ・ Yoshiyuki Tatsumi and Keiko Suzuki-Kamata, (2014), Cause and risk of catastrophic eruptions the Japanese Archipelago, Proc. Jpn. Acad., Ser. B 90

## 2.2.8 降灰シミュレーションによる降灰年超過確率評価

### (1) 概要

空気中に放出された火山灰の拡散を、移流拡散モデルによりシミュレーションし、ハザード評価を試みる研究は数多くなされている。本評価手法は、シミュレーションにより得られた降灰分布を重ね合わせることで、ある地点に降灰が到達する確率を空間的に評価することが可能である。さらにこの到達確率に噴火確率および降灰被害発生確率を乗じることで噴火確率を考慮した降灰ハザード評価が可能となる。その評価内容一覧を表 2.2.22 に示す。

表 2.2.22 評価内容一覧

項目	諸元
手法の評価対象 (対象とする確率)	降灰 (到達確率)
出力情報	評価対象地点におけるある降灰厚 (mm) の年超過確率
評価可能時間	制限なし
評価最小単位	指定した地点の降灰超過確率を評価
使用データベース	噴火規模が明記される文献、風向・風速データ
評価事例	各地の火山

### (2) 内容

本評価手法では到達確率のみを評価している。

#### 1) 到達確率

到達確率は降灰シミュレーションにより得られた降灰分布を重ね合わせることで評価する (図 2.2.23)。

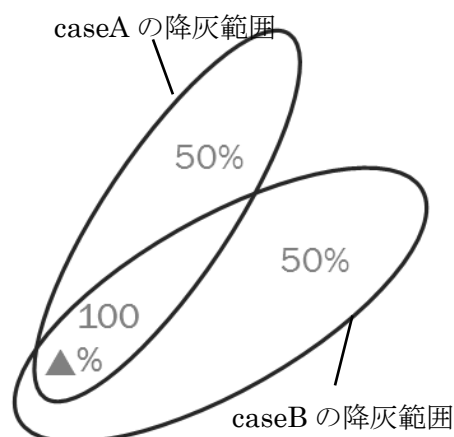


図 2.2.23 重ね合わせによる到達確率評価イメージ

降灰の移流拡散挙動を支配する要因の一つは風向・風速である。この風向・風速パラメーターに過去数年から数十年分の日別観測データを使用してシミュレーション計算を行うことで、噴火発生時の降灰分布をその土地の気象条件を反映した高い精度で再現可能である。降灰シミュレーションでは噴煙柱高度や火山灰粒径などの情報も入力するため、それらパラメーターを変更することで、噴火規模ごとの降灰分布とその到達確率が評価可能である。

### (3) 評価に必要な情報

シミュレーション計算を行う計算ツールはこれまでに数多くが開発されている。本手法では Bonadonna et al., (2005) で使用される“TEPHRA”を使用した場合を想定し、確率評価にあたり必要となる情報を表 2.2.23 にまとめた。

表 2.2.23 到達確率入力項目一覧

項目	入力データ	入力範囲	備考
到達確率	火口位置*	想定する火口の位置座標	—
	火口標高*	想定する火口の標高(m)	噴火を想定する火口の標高
	噴煙柱高度*	—	想定規模に合わせて設定 Mustin et al., (2009) 参照
	マグマ噴出量*	—	想定規模に合わせて過去の研究などを参考に設定
	粒径分布*	—	想定規模に合わせて過去の研究などを参考に設定
	噴出物質密度*	—	過去の研究などを参考に設定
	風向**	—	過去の観測データを基に入力
	風速**	—	過去の観測データを基に入力

\*: 既往文献等を基に任意に設定。 \*\*: 気象観測所の観測データを使用

### (4) 長所・短所

#### 1) 長所

- ・ 実際の気候条件などを考慮した到達確率が評価可能である。

#### 2) 短所

- ・ 到達確率評価に必要な入力データが多い。

## (5) 参考文献

- C. Bonadonna, C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing and T. K. Hincks, (2005), Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of geophysical research*, Vol. 110, B03203
- Susanna Jenkins, C. Magill, J. McAneney and R. Blong (2012), Regional ash fall hazard: a probabilistic assessment methodology, *Bull Volcanol* 74:1699-1712
- GVM, (2014), Volcanic ash fall hazard and risk; Technical background paper for the UN-ISDR Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015.
- Bear-Crozier, A. N. Newey, V., Horspool, N. and Weber, R (2015), Emulating volcanic ash fall for multi-scale analysis: Development of the VAPHR tool and application to the Asia-Pacific region for the United Nations Global Assessment Report 2015. Geoscience Australia.
- C.R. Magill, A.W. Hurst, L.J. Hunter, R.J. Blong, (2006), Probabilistic tephra fall simulation for the Auckland Region, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 153, Issues 3-4, Pages 370-386

## 2.3 第2章のまとめ

### 2.3.1 各火山ハザード評価手法の内容・特徴

第2章で分類した8種類の火山ハザード評価手法の評価内容および特徴を一覧として表2.3.1に整理した。各評価手法のそれぞれの火山現象に対する適用性については、噴火確率および到達確率別に次項で示す。

表 2.3.1 火山ハザード評価手法一覧

評価手法名	評価内容・特徴
(1) PVAHA手法による 降灰超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点において、ある荷重または厚さまで降灰が及ぶ確率を評価する。</li> <li>過去の噴火データを基に算出される噴火確率にシミュレーションにより得られた到達確率を乗じて降灰超過確率を評価する。</li> <li>降灰のみが評価対象である。</li> </ul>
(2) 世界規模での 降灰超過確率評価 (GVM手法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点において、ある荷重または厚さまで降灰が及ぶ確率を評価する。</li> <li>過去の噴火データを基に算出される噴火確率に、過去の風データを用いた降灰シミュレーションによって得られた到達確率を乗じて求めた降灰超過確率を評価する。</li> <li>降灰のみが評価対象である。</li> </ul>
(3) ベジアンイベント ツリー(BET)による 包括的ハザード評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>火山性異常の発生から噴火が生じるまでの確率、噴火時に任意の火山現象が発生する確率、その火山現象が被害を及ぼす範囲を評価する。</li> <li>モニタリング環境が整った火山、過去の噴火記録が豊富な火山での使用に向いている。</li> <li>到達確率は、災害が到達するエリアを広域的に評価するのみであり、評価解像度は低い。</li> </ul>
(4) 更新過程モデルによる 降灰年超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>前の噴火から次の噴火が発生するまでの期間を点過程で評価する。</li> <li>さらに降灰等層厚線図から読み取れる降灰分布を定式化し、対象地点における降灰量を評価する。</li> <li>降灰のみが評価対象である。</li> </ul>
(5) ベイズ推定による 新規火道形成確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象地域において次に噴火が生じた時に火道が形成される位置の確率密度分布を評価する。</li> <li>次回噴火が発生する場所が大きな課題である単成火山地域やカルデラ内の地域で使用される。</li> <li>適用できる火山が限られる。</li> </ul>
(6) 点過程、カーネル密度 推定による 時空間的噴火確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>次回噴火がいつ発生するのか、またどこで生じる可能性が高いのか評価する。</li> <li>単成火山地域やカルデラ内の地域で使用される。</li> <li>噴火確率のみを評価しており、また、適用できる地域が限定される。</li> </ul>
(7) 噴火規模－頻度の ワイブル関数評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>噴火マグニチュードを基にワイブル関数を用いて噴火規模別に評価する。</li> <li>今後100年間における巨大カルデラ噴火の噴火確率を評価している。</li> <li>巨大噴火が生じる噴火確率のみを評価しており、個々の火山の噴火確率は評価できない。</li> </ul>
(8) 降灰シミュレーション による降灰超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>降灰シミュレーションの計算結果を噴火確率と組み合わせることによって、任意の地点においてある荷重または厚さとなる降灰年超過確率を評価する。</li> <li>降灰のみが評価対象である。</li> </ul>

### 2.3.2 噴火確率評価手法と各火山現象への適用性

各ハザード評価手法における噴火確率評価手法に関して、噴火記録等の火山活動に関する情報量の異なる火山への適用性、他の火山現象への適用性および規模別火山現象への適用性について表 2.3.2 にまとめた。この結果、PVAHA 手法および世界規模での降灰超過確率評価手法（GVM 手法）、次いでベイジアンイベントツリーによる包括的ハザード評価（BET 手法）の適用性が高いと考えられる。ただし、PVAHA 手法、GVM 手法では降灰に対する評価実績しかないため、多様な火山現象への適用には課題が残る。一方 BET 手法ではその評価対象となる火山が、噴火記録に富み、観測体制の整った活動的な火山が主な対象であることから、条件の異なる火山への適用性の面で劣ると言えよう。

しかしながら、PVAHA 手法、GVM 手法と BET 手法は評価対象とする火山により使い分けることも考えられる。たとえば、BET 手法は桜島や浅間山のような現在も活動的であり観測網も整備されている火山に対して適用し、PVAHA 手法や GVM 手法は噴火データが乏しい火山を含む日本全国の各火山を対象とした広域的な評価に用いる等である。

また、噴火確率評価に関して、本来ならば現在活発に活動している火山は、そうでない火山に比べ噴火する頻度は高いと考えられる（例：桜島）。しかし、本調査の範囲では噴火確率の算出において、そのような火山の活動状況も考慮した噴火確率を評価する研究は見当たらなかった。

表 2.3.2 噴火確率評価手法と各火山現象への適用性

評価手法名	噴火確率評価手法	条件*の異なる火山への適用性**	他の火山現象への適用性**	規模別火山現象への適用性**
(1) PVAHA 手法による降灰超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>ある地域のある形態の火山が任意の VEI 噴火を起こす確率を評価（＝降灰が発生する確率）</li> <li>評価対象とする地域の過去の噴火データを参照し、噴火データが少ない火山でも噴火確率を算出することが可能</li> <li>噴火規模を VEI 4～7 まで想定</li> </ul>	○	降灰のみを対象としているが他火山現象への適用可能性あり	○
(2) 世界規模での降灰超過確率評価（GVM 手法）	<ul style="list-style-type: none"> <li>ある地域のある形態の火山が任意の VEI 噴火を起こす確率を評価（＝降灰が発生する確率）</li> <li>評価対象とする地域の過去の噴火データを参照し、噴火データが少ない火山でも噴火確率を算出することが可能</li> <li>噴火規模を VEI 4～7 まで想定</li> </ul>	○	降灰のみを対象としているが他火山現象への適用可能性あり	○
(3) ベイジアンイベントツリー(BET)による包括的ハザード評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>ある一つの火山において、火山性異常の発生から噴火が生じ、どのような火山現象が発生するまでの確率を評価</li> <li>過去の噴火記録、観測によるリアルタイムなモニタリングデータ等を使用</li> <li>ユーザーで任意に設定した噴火規模(VEI など)に対して評価可能</li> </ul>	×	○	○
(4) 更新過程モデルによる降灰年超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>ある一つの火山において、前の噴火から次の噴火が発生するまでの期間、再現確率を評価</li> <li>対象火山の過去の噴火記録を用いる。</li> <li>噴火の規模は評価しない。</li> </ul>	×	×	×



評価手法名	噴火確率評価手法	条件*の異なる火山への適用性**	他の火山現象への適用性**	規模別火山現象への適用性**
(5) ベイズ推定による新規火道形成確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象地域において火道が形成されやすい場所の確率を地図上で評価</li> <li>単成火山地域やカルデラ内地域での使用に向く</li> <li>過去の噴火記録、断層位置等の構造地質学的データを使用</li> <li>噴火の規模は評価しない。</li> </ul>	○	○	○
(6) 点過程、カーネル密度推定による時空間的噴火確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>次の噴火がいつどこで生じる可能性が高いのか時空間的噴火確率を評価</li> <li>単成火山地域やカルデラ内地域での使用に向く。</li> <li>過去の噴火記録（年代、噴火場所等）を使用</li> <li>噴火の規模は評価しない。</li> </ul>	×	×	×
(7) 噴火規模－頻度のワイブル関数評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内で巨大カルデラ噴火（噴火マグニチュード 7 相当）が起きる確率を評価</li> <li>日本全国の噴火年代と噴出量を使用</li> <li>評価規模は噴火マグニチュードごとを想定</li> </ul>	×	×	噴火マグニチュードをより一般的な単位へ変換する必要あり
(8) 降灰シミュレーションによる降灰超過確率評価	噴火確率の評価は行っていない。	－	－	－

\*：条件とは観測体制の充実度、噴火記録の数および質、火山の活動様式等を指す。

\*\*：「○」は適用性有り、「×」はなし、「－」は評価対象としていないことを表す。

### 2.3.3 到達確率評価手法と各火山現象への適用性

各ハザード評価手法における到達確率評価手法に関して、噴火記録等の火山活動に関する情報量の異なる火山への適用性、他の火山現象への適用性および規模別火山現象への適用性ならびに評価可能な空間的解像度について表 2.3.3 にまとめた。この結果、PVAHA 手法および世界規模での降灰超過確率評価手法（GVM 手法）の適用性が高いと考えられる。ただし、噴火確率同様 PVAHA 手法および GVM 手法では、降灰に対する評価実績しかないため、多様な火山現象への適用には課題が残る。

これに関しては降灰以外のシミュレーションツールを用いることで、他の火山現象にも適用できる可能性が考えられる。しかし、この場合、溶岩流や火砕流など地形によりその挙動が制御される火山現象に関しては、火口が形成される位置に関する評価も検討が必要であるが、(5)ベイズ推定による新規火道形成確率評価による新規火道形成を適用することでハザード評価が可能となる。

また、到達確率評価に関して、広域を評価対象とする場合は考慮すべき局所的な地形・気候条件を加味した評価を行うことは難しい。ただし、評価対象範囲を狭め、評価解像度をより細かくすることで、ある程度対応可能である。

表 2.3.3 到達確率評価手法と各火山現象への適用性

評価手法名	到達確率評価手法	条件*の異なる火山への適用性**	他の火山現象への適用性**	規模別火山現象への適用性**	評価可能解像度
(1) PVAHA 手法による降灰超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点において、ある荷重あるいは厚さまで降灰が達する年超過確率を評価</li> <li>降灰シミュレーションツールにより到達範囲を計算し、計算結果の重ね合わせで確率を評価</li> <li>噴火規模を VEI 2~7 まで想定</li> <li>評価解像度は 1×1km メッシュ</li> </ul>	○	降灰のみを対象としているがツールを変えることで他の火山現象へ適用できる可能性あり	○	高
(2) 世界規模での降灰超過確率評価 (GVM 手法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点において、ある荷重あるいは厚さまで降灰が達する年超過確率を評価</li> <li>実測の風データに基づき、降灰シミュレーションツールで到達範囲を計算し、計算結果の重ね合わせで確率を評価</li> <li>噴火規模を VEI 4~7 まで想定</li> <li>評価解像度は 10×10km メッシュ</li> </ul>	○	降灰のみを対象としているがツールを変えることで他の火山現象へ適用できる可能性あり	○	中
(3) ベジアンイベントツリー (BET) による包括的ハザード評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>火口を中心とした円を分割し、その分割された円を被災エリアとして指定</li> <li>過去の噴火時の火山現象到達記録を参照</li> <li>ユーザーで任意に設定した噴火規模 (VEI など) に対して評価可能</li> <li>評価解像度は分割した円弧を一つの単位とする。</li> </ul>	×	○	○	低
(4) 更新過程モデルによる降灰年超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点における降灰厚さを評価</li> <li>降灰等厚線図から読み取れる等厚線を定式化し、式に任意の地点の位置情報を代入し、降灰厚さを算出</li> <li>過去の噴火規模の範囲内で想定</li> <li>評価解像度は任意の地点</li> </ul>	×	×	×	高
(5) バイズ推定による新規火道形成確率評価	到達確率の評価はなし	-	-	-	-
(6) 点過程、カーネル密度推定による時空間的噴火確率評価	到達確率の評価はなし	-	-	-	-
(7) 噴火規模-頻度のワイブル関数評価	到達確率の評価はなし	-	-	-	-
(8) 降灰シミュレーションによる降灰超過確率評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>任意の地点において、ある荷重あるいは厚さまで降灰が達する年超過確率を評価</li> <li>実測の風データに基づき、降灰シミュレーションツールで到達範囲を計算し、計算結果の重ね合わせで確率を評価</li> <li>噴火規模は任意に設定</li> <li>評価解像度は使用するシミュレーションツールに依存</li> </ul>	-	-	-	高

\* : 条件とは観測体制の充実度、噴火記録の数および質、火山の活動様式等を指す。

\*\* : 「○」は適用性有り、「×」はなし、「-」は評価対象としていないことを表す。