	<h1 style="color: blue;">レポート</h1> <h2 style="color: blue;">火山噴火規模の指標考察</h2> <h3 style="color: blue;">SCE・Net 鹿子島達志</h3>	<p style="font-size: 1.2em; font-weight: bold;">R-78</p> <p>発行日 2022年 8月5日</p>
---	--	--

1. はじめに

先に「SCE・Net の窓」で『気候変動・火山噴火・古代史』E-160、E-161、E-163 を発表させて頂いた。その中で火山噴火について、『火山爆発指数 VEI』と『噴火 M』を紹介したが、古代史をメインにしたエッセイでもあり、簡単にしか触れなかった。本報では、『火山噴火』に焦点を絞り、新たに『噴煙高さ』や『噴火エネルギー』などを加えて詳しく考察した。そのため理論的側面も多くなり、レポートとして以下に報告する。なお参考文献は次稿で一括記載する。

2. 火山噴火の規模は求められるのか？

自然災害の規模については、死傷者数や構築物の損傷以外も、通常は大きさや強さについて数値で表わされている。地震なら大きさとしてマグニチュードや震度であり、台風はその強さを最大風速で表わし、大きさはある風速以上の範囲で表している。しかし、火山噴火については京大火山活動研究センターも言う様に「噴火の大きさや強さを表す指標は確立していないのである。より正確に言えば一応定義はあるのだが、その測定手段が確立していないのである」。本報では測定手段については簡単にしか触れない。専ら、定義されている VEI と噴火 M につき、噴煙高さや、噴火エネルギーなどを加えて文献上のデータを基に考察した。

[噴火規模の指標]

VEI と噴火 M については『気候変動・火山噴火・古代史－3』E-163 で簡単に概説しているので同じ内容は省略する。以下に一般的な指標について概説する。この中で第 2 項の噴出率と噴火物の広さは、詳しくは扱わない。なお第 7 項 DVI も次稿で説明する予定である。なお噴煙高さやエネルギーについては、詳しく考察した。また各々の指標間の関係も考察している。

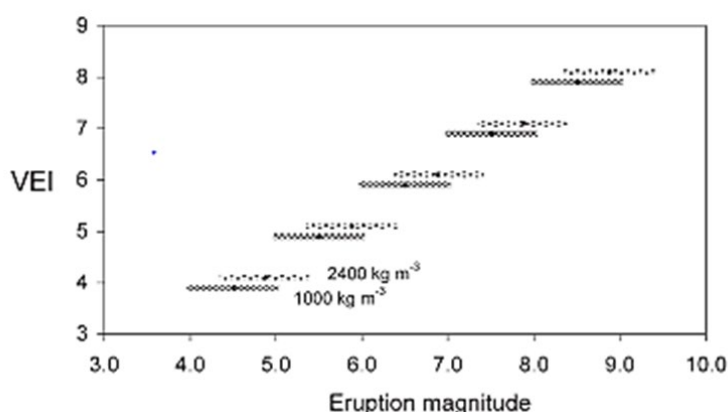
- 1) 噴火の規模を噴出物の質量(kg)もしくは体積(m³または km³)で表す。
- 2) 噴火の強度を単位時間あたり噴出率(質量 kg/s、体積 m³/s)で表す。
- 3) 噴出物の体積の桁で指数化した VEI(火山爆発指標)を用いる。
- 4) 噴出マグマの総質量(kg)から算出した噴火 M を用いる。質量には固形分のみ用いる。 $M = \log m - 7$ 、 $m = \text{噴出物の質量 (kg)}$ により求める。
- 5) 噴煙の高さ(km)と噴火物の分布広さ(km²)で表す。後者に噴火物の平均厚みを掛ければ体積が、そこに平均比重を乗じれば質量が求まる。
- 6) 噴出物の質量から、もしくは噴煙高さから換算したエネルギーで表す。エネルギーを TNT トンの換算や広島型原爆の何倍とする評価法もある。
- 7) 噴煙の大きさを火山噴煙指数 DVI(Dust veil index)で表す。今回は省いた。

3. 各指標について

3-1. VEI と噴火 M

前報「窓 E-163」では、VEI が定性的で、噴火 M は定量的としたが、その関係には相関性があるとしてグラフでも説明した。すなわち、VEI は主に噴出物体積の指数化であるため、体積値を推定密度から質量換算し、噴火 M の式に入力すれば当然であるが、相関性は出てくる。例を前報とは異なる原典のグラフで示す。

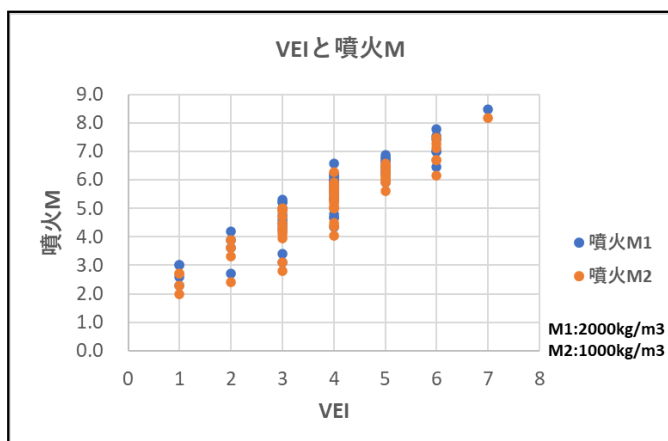
1) Ben G. Mason · David M. Pyle(2004) Fig.-1



左図：縦軸は VEI 指数、横軸は噴火 M 値。
嵩比重 1,000 と 2,400 kg/m³ の堆積物における噴火規模 M と火山爆發指数 VEI の関係。火山データは 47 個。
※VEI と M の相関性を示した先駆的な論文。

VEI の問題は体積からの質量換算なので噴火 M が嵩密度により変化する点である。火山灰から溶岩流・火砕硫まで約 600kg/m³～約 2500kg/m³まで幅があり、かつ同じ火山でも時間経過で噴火物密度は変化する。噴火 M の提唱者早川は約 700kg/m³および 2000kg/m³を用い、同じ提唱者の Pyle は上図で 1000kg/m³と 2400kg/m³を比較している。

2) VEI と噴火 M 関係図 Fig.-2 (筆者作成分)



左図：縦軸は噴火 M、横軸は VEI。Fig.-1 とは作図上の問題で縦横逆に表示。嵩比重 1,000 と 2,000kg/m³の堆積物における噴火規模 M と火山爆發指数 VEI の関係を示す。
※63 個の収集データ(火山名と噴火年は重複有、重複していても多くはデータが異なっている。

Fig.1 の火山例と Fig.2 の火山例とは共通性が全くないが、よく似た傾向となった。すなわち、定義からも当然の相関性があり、VEI 値は M 値に比例する。

3) マグマ噴出量 (DRE km³) について

DRE(Dense Rock Equivalent)とは、マグマ噴火およびマグマ水蒸気噴火による総噴出物を、マグマの容積に換算したものであり、次式で表示される。

$$\underline{DRE = [\text{テフラ容積}(\text{m}^3) \times \text{テフラ密度}(\text{kg}/\text{m}^3)] / \text{マグマ密度}(\text{kg}/\text{m}^3)}$$

ここで、テフラは火山の噴出物（火山岩塊、火山礫、火山灰）の堆積物の総称を指す。またマグマは周知のように地中の熔融した岩石である。ここで注意すべきは、VEI 区分でいう噴出量（m³）はテフラ量であり、DRE ではない。しかし文献データでは DRE 値が多い。またテフラの密度は、特に明示されていない限り、1000 kg/m³ と仮定されている。マグマの密度はマグマの種類によって異なる。なお、マグマ密度 > テフラ密度であり、差異はほぼ 2 倍である。

4) 測定方法の簡単な説明

早川由紀夫の『テフラとレスからみた火山の噴火と噴火史 1991』によると、マグマの鉱物結晶から、噴出した結晶の全量を実測することができる。なお、題名の「レス」とは、テフラを原物質とした堆積した細粒物質を特に指す。関東ローム層がそうである。1~2mm の結晶だけに注目すると、結晶のほとんどは通常の気象条件下では火山から 100km 以内の地点に落下し、地表調査によって噴出した結晶の重量を知ることができる。一方、十分大きな軽石を粉砕すればマグマの中の結晶の含有率を調べることができ、結晶全量が得られれば噴出したマグマの重量を計算することができる。これは WALKER(1980)によって初めて試みられた方法であり、*crystalconcentration study* (結晶法)という。すなわち同一層厚での面積比あるいは逆に同一面積での層厚比によって、任意の降下テフラの体積を決定することができる。さらに、積 TS(厚み×面積)がひとつの降下テフラでは層厚によらずほぼ一定である。この性質を利用して、早川 (1985) は降下テフラの体積 V を簡便に計算することのできる式 $V=12.2 \text{ TS}$ を導いている。

5) テフラ容積、テフラ比重、マグマ比重

下表は噴出物密度(ステラ)、噴出物体積 DRE、噴火 M の関係を例示したもので VEI 8 噴火 (バルク体積 1000~10000km³) の噴出量、噴出質量と噴火規模との関係を示す。Pyle は体積 1000~10,000km³ を、マグマ密度を 2400 kg/m³ と仮定して、バルク堆積物密度の関数として示したものである。噴火 M は、前に記載した様に $M=\log(\text{噴出質量, kg})-7.0$ である (Pyle, 2004)。

Bulk deposit density (kg m ⁻³)	Dense rock equivalent volume (km ³)	Erupted mass (kg)	Magnitude, M
1,000	417-4,170	1-10×10 ¹⁵	8.0-9.0
1,500	612-6,120	1.5-15×10 ¹⁵	8.2-9.2
2,000	816-8,160	2-20×10 ¹⁵	8.3-9.3
2,400	1,000-10,000	2.4-24×10 ¹⁵	8.4-9.4

上表は前頁の Fig-1 に対応している。

3-2. 噴煙の高さ H

[噴煙高さ H と体積流量 (噴火率) との関係]

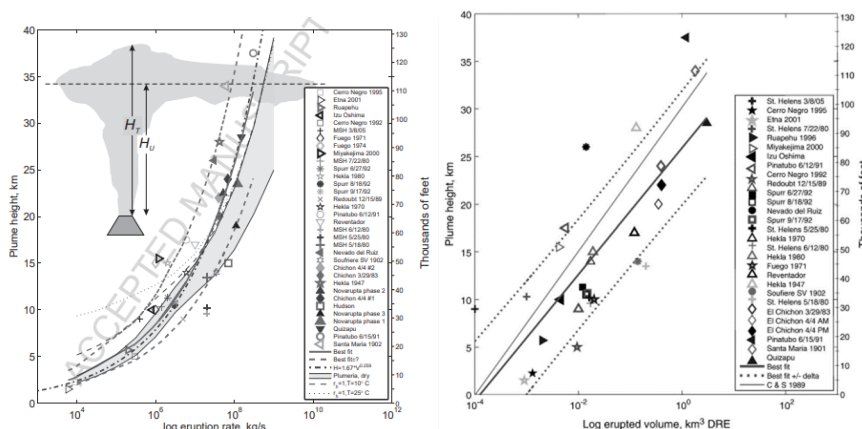
ロンドン VAAC(Volcanic Ash Advisory Centre)の現在の火山灰モデリング設定は、Mastin ら (2009) によって提示された噴火高さと噴火率の間の観測された次の関係式から取られている。ここでは、このまま採用する。

$$\underline{H = 2.00 V^{0.241}}$$

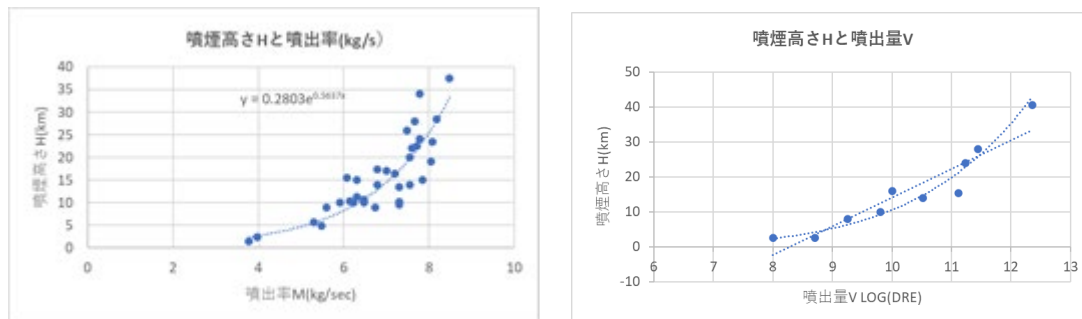
ここで、 H は山頂からの噴煙上昇高さ (km)、 \dot{V} は体積流量 ($\text{m}^3 \text{DRE/s}$) である。体積流量 \dot{V} は、Mastin ら (2009) により、密度 2500kg/m^3 を用いて報告された大量噴出速度 \dot{M} (kg/s) から求められた。これによって、質量噴出率が得られる。 $(1/2)^{(1/0.241)} \times 2500 = 140.84$ なので

$$\dot{M} = 140.84 H^{1/0.241} \text{ kg s}^{-1} \rightarrow H = 0.3035 \dot{M}^{0.241} \text{ と換算される。}$$

下図は、縦軸は $H(\text{km})$ 、横軸は左図が $\dot{M} (\text{kg/s})$ で右図は DRE の LOG 値 (km^3)。



筆者は文献データ 35 件から独自に作図し検討した。結果は左図は係数は 0.280 と式の 0.304 と近いが指数が合わない、右図は上右図のように線形にならないが、両図とも上図と各々傾向としては似ているので、データの誤差範囲と考える。



4. 噴火エネルギーについて

1) 火山学から

火山噴火の原因はマグマに溶け込んでいる揮発性ガスが応力場の変化でマグマ溜りが圧縮や膨張することで、生成した減圧によって発泡し、その結果体積が膨張して地表に噴出することによる。火山は 1 種の熱機関であり、燃料はマグマである。熱機関としての高温熱源はマグマであり低温熱源は地表の気温である。この熱機関を正確には計算できない。火山噴火による放出熱エネルギーは、高温からのメルトの冷却と、より小さい範囲での凝固から生じる。噴火に伴うマグマからの放出エンタルピーは、噴火時の潜熱 (L) の 10% 程度の放出を考慮すると、およそ次の式で与えられる。なお 10% の熱放出のない文献も存在する。

$$E = (C_p \Delta T + 0.1L) \times m$$

ここで、 C_p は比熱容量、 ΔT はマグマとその周囲の温度差、 L は潜熱、 m は噴

出した質量である。ここで $\Delta T=800^{\circ}\text{C}$ 、 $C_p=1.3\times 10^3\text{J/kgK}$ 、 $L=2.1\times 10^5\text{J/kg}$ とすれば噴火に伴う放出エンタルピーは約 1.06 MJ/kg であり、Peyle(1995)のいう約 1.05MJ/kg に近い。一方、局所音速（埃っぽいガスでは約 300 m/s ）での物質の噴出を仮定した運動エネルギーは約 0.045 MJ/kg である。もう一つの要因は、マグマの水蒸気の凝縮であり、これは放出される溶存水 $1\text{wt}\%$ につき岩石 1kg あたり $\sim 0.02\text{MJ}$ の潜熱を放出し、水に富むマグマでは合計 $\sim 0.1\text{MJ/kg}$ の潜熱を放出する。したがって、噴火の総エネルギー量は、 $\sim 1\sim 1.2\text{ MJ/kg}$ となるが通常 1MJ/kg を用いる。すなわち 熱エネルギー $E = m\text{ kg} \times 1\text{MJ/kg}$ (MJ) となる。

2) H とエネルギーの関係

噴煙の高さ H は熱エネルギーの放出率 Q の $1/4$ 乗に比例する。定常状態の噴煙の場合は、 $H=8.2Q^{1/4}$ の関係が成り立つ(MORTON et al, 1956; WILSON et 1978)。ただし、単位は $H(\text{m})$ 、 $Q(\text{W})$ である。なお、標準大気中の環境温度効果率が $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、断熱条件が $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ の場合である。 H はふつう 1km から 50km までの間の値をとるから、対応する Q は $10^8\sim 10^{15}\text{W}$ ($3.6\times 10^{11}\sim 3.6\times 10^{18}\text{J}$) の間にある。

3) 主な火山噴火とその規模の検証 事前準備

検証のために、以上の考察および前回の SCE・Net の窓への投稿分の式も含め、噴火エネルギーを算出目的とする式を筆者判断でまとめると下表のようになる。

・原爆換算、TNT 換算表

広島型原爆	15-20kton	4.18E+12	J
1MTNT	100 万 TNT	4.18E+15	J
1TNT		4.18E+09	J
1 erg		1.00E-07	J
1cal		4.184	J

・セントヘレンズ：24MTNT ($1\times 10^{17}\text{J}$)
 ・トンガ火山：10MTNT トン ($4.2\times 10^{16}\text{J}$)
 広島型原爆 500 発以上相当
 ・クラカトア噴火：200MTNT ($8.4\times 10^{17}\text{J}$)、 $1.4\times 10^{24}\text{erg}$ ($1.4\times 10^{17}\text{J}$)
 広島型原爆 10000 発相当

・噴煙高さからエネルギー量を求める

噴煙高さ H (m)	データ H' (km)
熱エネルギー放出率 Q (W)	
$H = 8.2 \times Q^{1/4}$	$Q = (H' \times 1000 / 8.2)^4 \times 3600$ (J)
1kWh = 3600kJ	
早川： $\log E = M + 13.2$	左の M は噴火 M に同じ
$H = (\dot{M}(\text{kg}/\text{sec}) / 140.84)^{0.241}$	左の \dot{M} は噴火 M ではない

左表で M は噴火 M であり $M = \log_{10}(m\text{ kg}) - 7$ である。また $\log E = M + 13.2$ は早川由紀夫の概算の提案式である(1996)。次項で示す様によく合っている。

・噴出量容積 $V(\text{m}^3)$ と噴出量質量 $m(\text{kg})$ および DRE の換算

$$\text{DRE}(\text{m}^3) = [\text{テフラ容積}(\text{m}^3) \times \text{テフラ密度}(\text{kg}/\text{m}^3)] / \text{マグマ密度}(\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$m(\text{kg}) = \text{テフラ容積} V(\text{m}^3) \times \text{密度}(\text{kg}/\text{m}^3) = \text{DRE}(\text{m}^3) \times \text{マグマ密度}(\text{kg}/\text{m}^3)$$

4) 検証結果

次表に収集したデータ(対象火山数計 50、データ総数計 93)から算出し検証したも

のを主要な火山の結果を2段に分けて示す。結果は下表の考察欄に記載した。
結論として、噴火エネルギーの諸推算式の算出結果は、データと略合っていた。

火山について				文献・データ						
火山名	噴火年	VEI	噴火M	TNT換算	総合エネルギー	噴出量V	噴出量m	噴煙高さH	密度	噴出流量
				百万トン	Joule	km ³	kg	km	kg/m ³	kg/sec
タンボラ	1815	7	7.3		2×10^{20}	150、41	2.4×10^{14}	>40、(45)	636	2.8×10^8
Tambora					8×10^{19}		10×10^{13}		2000	
セントヘレンズ	1980	2-4		24	1.0×10^{17}	0.016	4.9×10^{11}	13.5、17.3	1000	2×10^7
St.Helens				26	1.09×10^{17}	0.3		24		
トンガ	2022	5~6		100	4.18×10^{16}	6.5	(3.9×10^{15})kg	18-20	600	—
Tonga-Hunga				>原爆の 500倍						
クラカトア	1883	6		200		17	1.0×10^{12} kg	70-80、(27)	約600	—
Krakatau				原爆の1万 倍	8.36×10^{17}					
ベツィミヤミ	1956	5			2.2×10^{18}	0.414		36-45	2000	($230\text{m}^3/\text{sec}$)
Beziminanny						2.8			2000	

計算および検証						考察
計算噴火 M	噴出量V から	噴出流量 から	噴煙高 から	噴火M から	計算噴煙 高さ	
	Joule	Joule	Joule	Joule	km	
7.38	8.2×10^{19}	2.4×10^{20}	3.27×10^{18}	$1 \times 10^{20.6}$	33	エネルギーは噴煙高さHからのエネルギーは低く出た。他のエネルギー値は 10^{20} 台でほぼ合っておりデータとかなり近い。これはデータが算出値である可能性も示す。なお比重換算で容積と質量は量はよく合っている。
3.2	3×10^{17}	4.9×10^{17}	2.64×10^{17}	$1 \times 10^{16.4}$	17.4	エネルギーは噴煙高さHからの計算はやはり低い。他の計算値は 10^{17} 台でほぼ合っている。Hデータの17kmと計算値Hが合うのはデータも計算値かも知れない。セントヘレンズのデータは多く、VEIもさまざまな値である。
4.48				$1 \times 10^{17.7}$		
4.59	1.6×10^{17}	3.9×10^{17}	1.27×10^{17}	$1 \times 10^{17.8}$		噴煙高さは20km高さで計算。エネルギー値は総合エネルギーEの 10^{16} 台を除けばデータも含め噴煙高さからもどの数値も 10^{17} 台でほぼ合っている。これは測定技術の進歩でこの火山が最近であることも影響があるのではないか。
5	1.0×10^{18}	1.0×10^{18}	1.91×10^{19}	$1 \times 10^{18.2}$		噴煙高さは70kmと27kmで計算したが他の計算方法からの値が揃って 10^{18} 台だが上下に10倍振れている。噴出量のV(m ³ /sec)とM(kg/sec)からのエネルギーの値が合うのは密度換算が正当であれば当然である。
4.92		4.3×10^{17}	3.27×10^{18}	$1 \times 10^{18.1}$		データの噴出量(km ³)の値が違いすぎる。経緯が不明なのでそのまま評価した。
5.75		5.6×10^{18}		1×10^{19}		噴煙高さは45km高さとした。エネルギーの各数値は噴出量やデータを高い方を取れば、ほぼ 10^{18} 台で合っている。

5. まとめ

火山学で定義され公用されている主な指標のVEIおよび噴火M、更に噴煙高さHを基に、一部噴出率も用いて、その妥当性を独自に収集した文献からのデータに適用し噴火エネルギーに集約して検証した。結果は、複数のデータ、式による相互関連の確認も含め、概ね妥当であった。この総合的検討手法は筆者による。次稿は、本題に戻り火山活動の気候変動について、特にオゾン濃度との関係について、主に火山噴煙指数DVI(Dust veil index)を用いて考察した結果を報告する。

以上