

火山爆発指数 (VEI) から見た噴火の規則性

中田 節也*

(2015年1月30日受付, 2015年4月10日受理)

Regularity of Volcanic Eruptions in Terms of Volcanic Explosivity Index (VEI)

Setsuya NAKADA*

Statistical treatment of volcanic eruptions clearly shows the regularity of power law between the frequencies and the scales not only in the global scale but also in regional and individual volcano scales. However, ancient smaller eruption events tend to be not recorded, compared with recent data. In the log frequency-VEI plot, incompletely normalized frequency which ignores the time-dependent nature of the database, provides a gentler regression line than when the data time-dependence is considered; that is, the former reflects low numbers of small eruptions insufficiently recorded. The slopes of the regression lines are similar, irrespective of area scales. This regularity may help our understanding about the potential of future large eruptions in not only individual volcanoes but also caldera regions. Volcanic activity in Japan has been quiet recently; no VEI 4 eruptions occurred after the early 20th Century, and no VEI 5 eruptions did since the middle 18th Century. Considering the regularity of volcanic eruptions in the arc scale, it is likely that Japan will experience these large eruptions near future.

Key words: power-law distribution, frequency of eruptions, VEI, caldera region

1. ま え が き

噴火の規則性については、火山毎に噴火の間隔、噴出物の積算量と噴出時期の関係、規模と頻度などを検討した研究が古くからある。特に、火山噴火の規模と頻度との関係は、火山爆発指数 (Volcanic Explosivity Index: VEI) を提案した Newhall and Self (1982) 以来、その規則性がより定量的に意識され始め、スミソニアン (Smithsonian Institution) が世界中の噴火データを取りまとめた “Volcanoes of the World” の編集過程でより明確に示された (Simkin, 1993)。すなわち、世界の噴火を VEI 毎に頻度を取ると、片対数表示で明瞭な負となるべき乗則が認められる (例えば、Simkin, 1993 の Fig. 4)。これは地震学で古くからいわれて来た、地震のマグニチュードと頻度との関係 (Gutenberg-Richter 則) と類似している (例えば、Gutenberg and Richter, 1954)。VEI と同様に噴火の規模を示す指標としてマグニチュード (M) も早川 (1993)、さらには、Pyle (2000) によって導入され、より定量的な扱いがなされるようになってきている。VEI が爆発的噴火の規模 (テフラの総量) を対数オーダーで示すのに対して、

M は爆発的か非爆発的かの噴火様式を問わず、噴出したマグマの総量を定量的に表示するために、両者には内容にも表示される数値の精度にも違いがある。ただし、爆発的噴火だけを比べると VEI と M はほぼ似た値 (規模) を与える (Croweller *et al.*, 2012; Pyle, 2000)。VEI は基本的にはテフラの体積見積もりに基づくが、地質学的に十分な体積見積もりがない場合でも、目撃された噴煙高度、噴火のタイプ、継続時間などの情報を参考にしてその規模が与えられていることがある。そのため、より多くの地域の爆発的噴火の規模や頻度をオーダーで比較するには便利な指標である。また、最近では将来の噴火のシナリオや地下マグマのシステムを考慮する際にもこのような噴火の規模別頻度分布が用いられている (例えば、Neri *et al.*, 2008; Tatsumi and Suzuki-Kamata, 2014)。

本論文では、噴火の規模 (VEI) 別頻度分布にみられるこのべき乗則の関係が、世界規模だけでなく、より小さいスケール (火山帯、火山地域、さらには火山) においても存在することを示し、それらの回帰線の勾配が示す意味についても考察する。

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,

1-1-1 yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

e-mail: nakada@eri.u-tokyo.ac.jp

2. 噴火の発生頻度の取り扱い

本研究で扱った噴火のデータは主にスミソニアン(Global Volcanism Program)の“Volcanoes of the World” database 4.22*によっているが、ベスピオについては Scandone *et al.* (1993), 阿寒-屈斜路地域については, Hasegawa *et al.* (2012), 南九州については Nagaoka (1988), 長岡 (1988), 長岡・他 (2001) を使用した。また、富士山については、宮地 (2011) の図 6 の 2,200 年前以後の活動から読み取った溶岩換算噴出量 (DRE) を 1.5 倍してテフラ量に換算して使用した。そのため、富士山の規模と頻度の関係は爆発的噴火に限られるデータではないので注意を要する。Table 1 に今回取り扱った地域や火山毎のデータ数を示した。

すでに Simkin (1993) が指摘しているように、古い噴火ほど記録される数が少なくなる。逆に、VEI の小さな噴火は新しい時代の記録しか存在しない。これは、規模の大きい噴火であれば堆積物として保存されたり、古記録として残されやすいのに対して、小さな噴火の堆積物は侵食により失われやすいことや、より新しい堆積物に埋もれてしまって見つかりにくいことを反映しているだろう。また、Kiyosugi *et al.* (2010) は、大規模噴火のデータベース (LaMEVE) の VEI と M4 以上噴火を検討し、時間とともに失われている噴火記録の個数を見積もっている。

Fig. 1 には、世界と日本の噴火の VEI 毎の噴火回数を過去から現在まで累積した確率分布をそれぞれ示している。確率表現をここで用いる理由は、通常のプロットでは、より規模の小さな噴火のデータが近年に集中し、過去のデータの存在率が見えにくいためである。これは堆積物の粒度分析の結果を示す累積度数曲線と同じ原理である。ただし、ここでは X 座標を反転し、 ϕ の代わりに年代値である。平均的に噴火が起こっておれば、つまり粒度が無限に悪い淘汰度であると、積分記号のインテグラを横にしたような形になる。例えば、Fig. 1 の世界噴火データでは VEI 7 の噴火がこれに近い。つまり VEI 7 の噴火はほぼ取りこぼしなく記録されていることを示している。

ここでは、作図ソフト KaleidaGraph (Synergy Software, v.4.5) の確率プロットを使用し、データ点を線で結んで示した。すなわち、VEI ごとに噴出年代順に過去からデータを並べ替え、存在率 $y(i)$ を以下の式で算出している。

$$y(i) = 100 \times P(i)$$

$$P(i) = (i - 0.5) / n$$

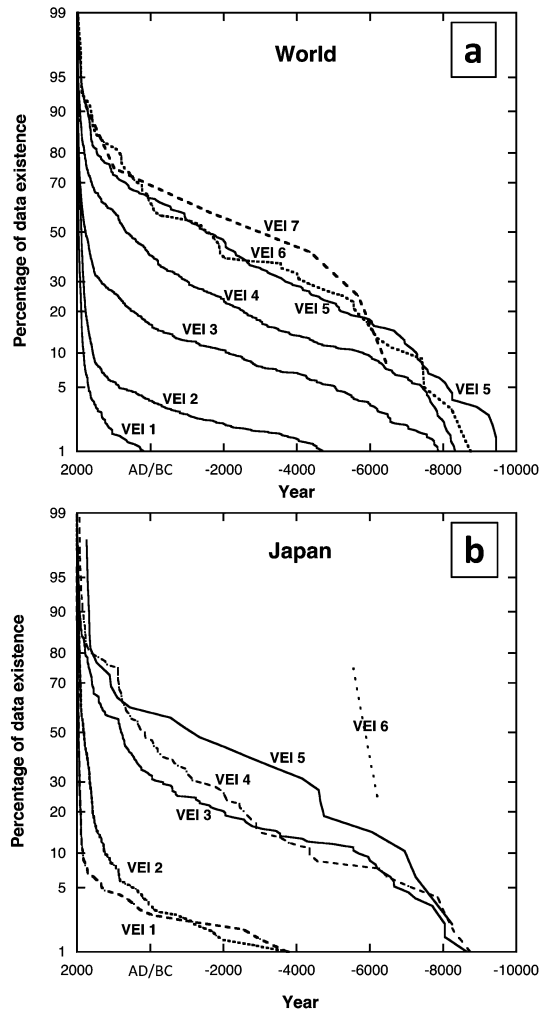


Fig. 1. Time-cumulative distribution of eruptions with different Volcanic Explosivity Indices in the world (a) and Japan (b), where eruptions were added up from the past to the present. Monotonous increase in data preservation with time is clear for every VEI in the world, while the patterns of increasing of the VEI 3 and 2 eruptions are different in Japan. Though the reason is not clear, this suggests that relatively abundant events of VEI 3 have been reported and events of VEI 2 eruptions are less.

i: 古い年代から数えた噴火数で 1 と n の間の値をとる。
n: 噴火の総数

そのため、噴火記録数が少ない大きな規模の噴火の場合にはデータ点は 100 や 0 軸から離れて示される。

噴火の存在率が年代を遡ると少なくなるのは世界でも日本でも共通している。日本の VEI 6 以上の噴火は数が

* <http://www.volcano.si.edu/>

Table 1. Numbers of eruption events treated in this study

	Total*	VEI 7	VEI 6	VEI 5	VEI 4	VEI 3	VEI 2	VEI 1
World	9,025	6	50	172	484	1,183	3,859	3,271
Indonesia	1,185	2	1	7	26	135	813	201
Japan	1,071	1	2	24	87	166	545	246
Chile	365	0	3	17	17	35	234	59
Volcanoes								
Vesuvius	92	0	0	0	2	23	(67)	- since AD1632
Merapi	57	0	0	10 ^o	2	5	(40)	- since AD1800 (^o past 10 ka)
Mayon	55	0	0	0	2	14	23	16
Izu-Oshima	68	0	0	0	6	19	18	25
Fuji	44	0	0	2	3	14	25	- since 2200 yrs ago
Volcanic areas								
East Hokkaido	116	3	18	31	58	6	-	-
South Kyushu	14	4	5	5	-	-	-	-
Taupo v.z.	23	0	2	3	10	8	-	-

* does not include VEI 0. Numbers in parenthesis are for VEI 1 and 2.

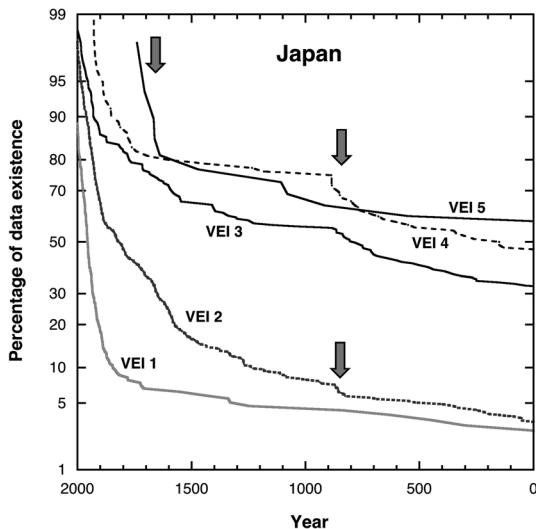


Fig. 2. Time-cumulative distribution of eruptions with different Volcano Explosivity Indices in Japan for the last two thousand years. Arrows imply high volcanic activities in the 9th Century for VEI 2-4 and around the 18th Century for VEI 5.

限られるので統計的には有意でないが、世界の VEI 頻度毎の存在数の減衰の仕方と、日本のそれとは違いが認められる。すなわち、世界のデータは VEI 毎に存在率が年代を遡ると、小さい噴火ほど大きく減衰するのに対し、日本では VEI 2 と 3 の存在率の減衰の仕方が異なる (Fig. 1)。すなわち、VEI 3 の存在率の減衰が小さく VEI 2 で大きい。日本の VEI 2 と 3 の噴火のここ数千年間の噴火データには偏りがあるのかもしれない。

3. 噴火記録の存在率効果

Simkin (1993) は噴火頻度と規模の図を作成する際に、噴火記録の時代による存在率を意識し、VEI 2~3 の頻度には最近 30 年のデータを使用し、VEI 4~5 の頻度には 200 年、VEI 6~7 の頻度には 1000 年のデータを使用した。Fig. 3 は、スミソニアンの世界の噴火データから、千年当たりに規格化した噴火頻度と噴火規模の関係を、異なる存在率毎に示したものである。すなわち、噴火の規模毎に年代をさかのぼって、存在率が 50%、70%、80% となる年代値を求め、さかのぼった期間に発生した噴火数をその期間で割ることで、平均的な千年当たりの頻度を算出した。ただし、ここでは、頻度は各規模以上の噴火頻度の累積 (累積頻度あるいは超過頻度) で示した。そのまま頻度をもちいた場合と累積頻度をもちいた場合とは、両方のプロットで計算される回帰線 (厳密には指数曲線) の勾配や切片にあまり大きな違いは生じない。

存在率を考慮せずに全てのデータを使用した場合には、古い年代ほど、小さな噴火が大きな噴火に対して記録されていないので、より緩い勾配の相関が得られる。それに対して、存在率 50% 以上のデータを扱えば、存在率によらず、ほぼ類似の勾配と切片の回帰線が得られる。すなわち、存在率を考慮した噴火規模別頻度を議論しなければ、データの密度の偏りに依存した見かけ上のものが得られることになる。なお、Fig. 4 以降では VEI 1 を除いた回帰線を描いている。VEI 1 の噴火数はスミソニアンのデータでは VEI 2 の噴火数より少なく (Table 1)、VEI 1 からそれ以上の規模のデータを結ぶ直線的回帰は一般に得られないので VEI 2 以上を対象とした。

具体的な作業としては、上述の検討結果を考慮し、VEI 毎に、噴火の記録を現在からさかのぼり、似たような年代間隔で噴火が発生している期間とそれまでさかのぼ

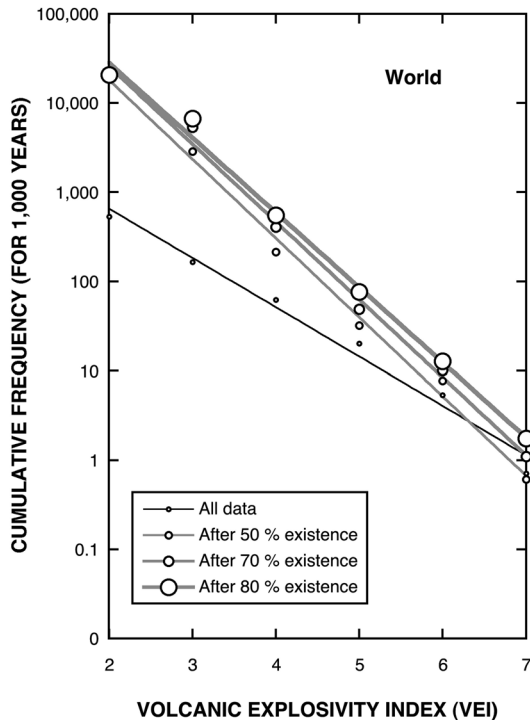


Fig. 3. Log cumulative frequency and the Volcanic Explosivity Index plot for total eruptions in the world in terms of different preservation ratios. When all data are plotted, the slope of the regression line is gentle, while it becomes similar for data sets of more than 50 % preservation for each VEI. This suggests that the frequency normalization considering the data preservation effect is essential to discuss the regularity of eruption frequency and scale.

た噴火回数を用いて、千年当たりの噴火頻度を算出した。具体的な例として、伊豆大島について頻度計算の手続きを Table 2 に示す。この際、規模の大きい噴火程噴火間隔が長くなることを考慮している。ただし、VEI 7 の噴火は記録的に最も残りやすいものと考え、それぞれの対象地域にある噴火データの最古年代を下限値として、その頻度を計算した。例えば、インドネシアでは、VEI7 の噴火が 13 世紀 (Lavigne *et al.*, 2013) と 19 世紀に起きている。また、スミソニアン噴火データベースに残るインドネシアの最古の年代は紀元前約 1200 年であるので、約 3200 年間に 2 回起こったものとしてその頻度を計算した。

4. 火山弧、火山、火山地域毎ごとの規則性

Fig. 4 には日本、インドネシア、チリの発生頻度と VEI

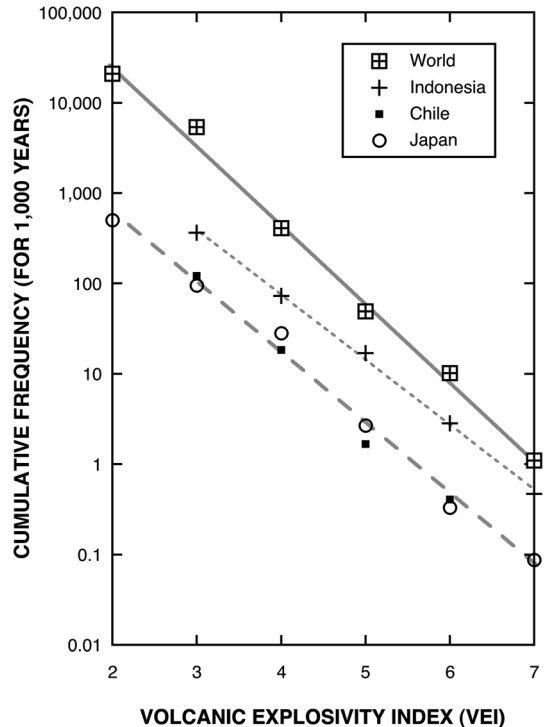


Fig. 4. Log cumulative frequency and the Volcanic Explosivity Index plot for Japan, Indonesia and Chile. The world data also are shown for the reference. Considering different lengths of volcanic belts in those countries, Indonesia is most active and Chile is least. The total lengths of volcanic belts are about 3000 km, 2500 km and 4000 km for Indonesia, Japan and Chile, respectively.

の関係を示した。いずれも勾配の良く似た負の回帰線、すなわち、べき乗則が認められる。インドネシアが世界と日本、チリの間にプロットされる。勾配が同じであれば、噴火の総数が多いほどより大きな切片を持つことになる。それぞれの火山弧において、火山地域の面積当たりの噴火回数が同じであるとすれば、火山弧の面積が大きいほど（火山弧の幅が同じであれば長いほど）噴火回数は多くなり、切片が大きくなると考えられる。インドネシアの火山弧の長さは、スダ弧と背後のスラウェシ弧も含んでおり約 3000 km の長さになる。また、日本は約 2500 km、チリは 4000 km 近くになる。そのため、日本とインドネシアとは極端に火山弧の長さが変わらないので、単位面積当たりでもインドネシアで噴火回数が多い（噴火密度が高い）ことを意味しているだろう。一方、チリと日本を比べた場合は、逆の理由で、日本の噴火密度の方が高いことになる。

Table 2. Example of data processing for Izu-Oshima Volcano

	VEI 1	VEI 2	VEI 3	VEI 4	
Age of eruption start	1974	1990	1986	1421	
	1971	1987	1821 (?)	1183 (?)	
	1970	1950	1777	0886 (?)	
	1970	1928	1684	0854 (?)	
	1969	1915	1552	0680 (?)	
	1968	1914	1338	0340 ± 200	
	1968	1876	1307 (?)		
	1967	1870	0838 (?)		
	1965	1846	0822 (?)		
	1962	1837	0713 (?)		
	1959	1822	0700 (?)		
	Data from Smithsonian database.	1959	1803	0654 (?)	
		1958	1792	0625 (?)	
		1957	1789	0600 (?)	
		1956	1783	0580 (?)	
		1956	1471 (?)	0250 ± 100	
		1953	1416	0150 ± 50	
		1940	0900 BC	0150 BC (?)	
		1939		0600 BC ± 500	
		1939			
1938					
1922					
1912					
1910					
1245					
N of events concerned	24	17	7	6	
The oldest age concerned	1910	1416	1307	340	
Frequency for 1000 years	229	28.4	9.9	3.6	

ある程度の時期にわたって噴火記録が多い火山では、多くの場合、頻度と規模にべき乗則を見いだすことができる。例えば、Fig. 5 には伊豆大島、インドネシアのメラビ、フィリピンのマヨン火山、イタリアのベスビオ火山の例を示した。ベスビオ火山の噴火の規模別頻度分布は Neri *et al.* (2008) が既に報告している。Fig. 5 に示した富士山に見られる回帰線は、切片が小さく勾配が緩くなる。これは富士山については、Table 2 に示すような、規模の小さい噴火についてデータ量が少なく存在率の考察ができていないためであり、より小さい規模の噴火がデータから抜け落ちているためであると考えられる。一方、メラビ、ベスビオ、伊豆大島火山においては、回帰線の勾配が良く似ており、Fig. 4 に示される火山弧の回帰線の勾配ともほぼ同じであり、データが十分に揃っておればスケールや地域による違いがなく、類似した勾配の回帰線を持つように見える。

Fig. 6 には、カルデラ地域の噴火の規模別頻度分布を示す。阿寒-屈斜路地域、南九州地域、ニュージーランドのタウポ地域でも、火山帯や個々の火山と同様の噴火の規模別頻度分布が認められる。ここでは、阿寒-屈斜路地域の回帰線の勾配は伊豆大島に近く、南九州地域やタウポの回帰線はより緩やかとなる。個々の火山における

噴火の規模別頻度分布で述べたように、南九州地域やタウポ地域では、Table 1 に示すようにデータ量が少なく、より小さな規模の噴火のデータが欠如している可能性が考えられる。

5. 議 論

5-1 噴火の規模別頻度分布の回帰線勾配

まだ多くの火山や火山地域で噴火の規模別頻度分布を調べる必要があるが、代表的な火山弧、火山地域、火山のいずれにおいてもべき乗則があることが認められた。火山噴火は地球内部エネルギーの効果的な輸送手段であると考えられるので、それぞれのスケールで熱輸送が規則的に起こっていることを示しているようだ。ここで見たべき乗則は、地震の Gutenberg-Richter 則と類似しており、地震の頻度とマグニチュードの関係では、回帰線の勾配 (b 値) は地域や時期によってやや異なり、地殻の歪みなどの不均質性を表していると考えられている (例えば、Mogi, 1962; Scholtz, 1968)。火山地域においても、テクニクな違いや地殻の強度などに依存し、地域毎に異なる勾配を示す可能性がありうる。しかし、地震よりはるかに発生頻度が少ない火山噴火においては、地震の b 値のように、頻度と規模の勾配の違いを厳密に議論で

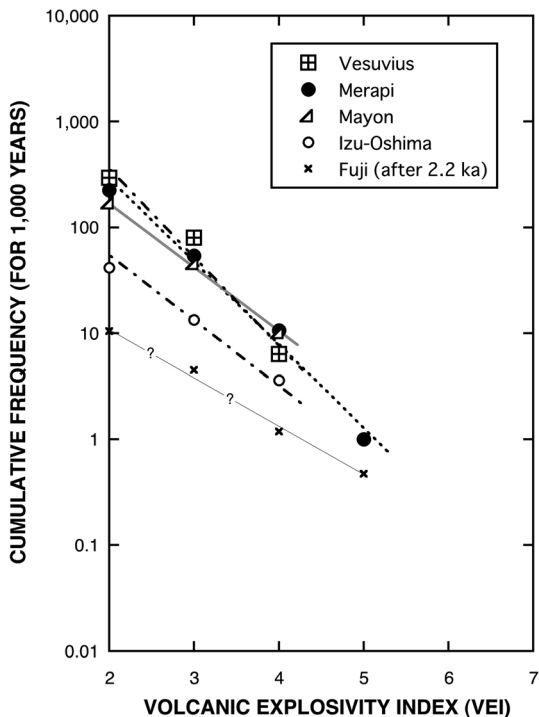


Fig. 5. Log cumulative frequency and the Volcanic Explosivity Index plot for representative volcanoes. Mount Fuji is shown just as a reference, in which the frequencies were not normalized in terms of data preservation, so that the slope of the correlation line is gentler than other volcanoes, suggesting missing data for smaller-scale eruptions.

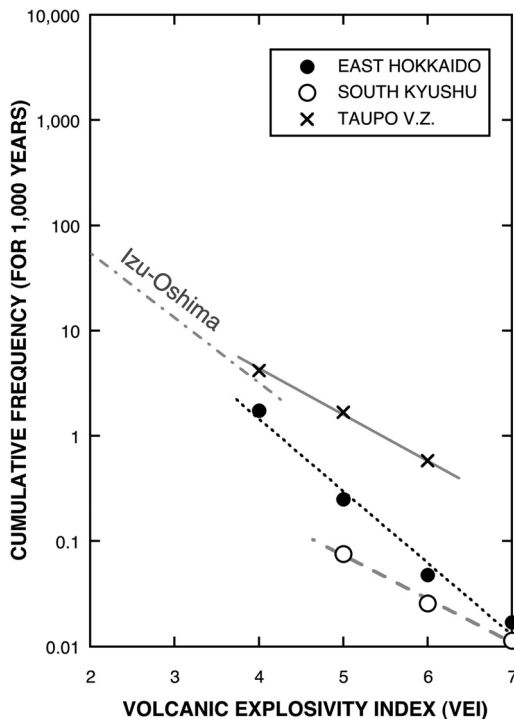


Fig. 6. Log cumulative frequency and the Volcanic Explosivity Index plot for caldera regions. A reference line with “Izu-Oshima” is the regression line in Fig. 5. The slopes of the regression lines for the South Kyushu and Taupo are gentler than that of East Hokkaido, possibly suggesting missing data for smaller-scale eruptions in the South Kyushu and Taupo regions.

きるまでのデータが揃っていないように思われる。すなわち、Fig. 3 に示されるように、回帰線の勾配は年代に関するデータの存在率を強く反映している。そのため、噴火の存在率を考慮しないデータセットでは緩い勾配で小さい切片が得られる。また、存在率を考慮した後であっても、南九州やタウポ火山地域のように緩い勾配を示す場合がある。この緩い勾配自身に意味があるのかもしれないが、データ量の多い世界全体、火山帯、阿寒-屈斜路地域、および、メラビや伊豆大島などの火山において得られる回帰線では類似の勾配を与えている。

5-2 噴火発生頻度の時間関係

最近、2000年間の日本のデータ (Fig. 2) を見ると、9世紀に VEI 2 から 4 の噴火の存在率がやや高くなる。これは津久井・他 (2006) が指摘する、地震活動と連動した火山活動の活発化に相当すると思われる。また、VEI 5 は17世紀頃に急増しており、これは富士山の宝永噴火や北海道の樽前山、有珠山の噴火が集中して発生したこ

とを反映している。

Fig. 7 は、日本、インドネシア、およびチリの噴火の規模と噴火年代の関係を示している。そこでは、日本で18世紀半ば以降に VEI 5 の噴火が、20世紀半ば以降は VEI 4 の噴火がおこっていない。すなわち、VEI 5 では富士山の1707年噴火と樽前山の1739年噴火以降、VEI 4 では北海道駒ヶ岳の1929年噴火以降に起きていない。それに比べてインドネシアやチリでは特に偏りなく、これらの規模やそれ以上の噴火が起きている。日本の火山弧がおかれているテクトクスな背景がこの間大きな変化を示していないことから考えても、日本でこの数百年間に規模の大きな噴火が少なくなる要因が見あたらない。長期的に地球内部からの熱エネルギー輸送が地域によらず長期的に一定であると仮定すれば、大きな噴火の少ない現在の日本では一時的なものと考えられる。あるいは、マントルで生産されたマグマが噴出せずに地殻中に蓄積

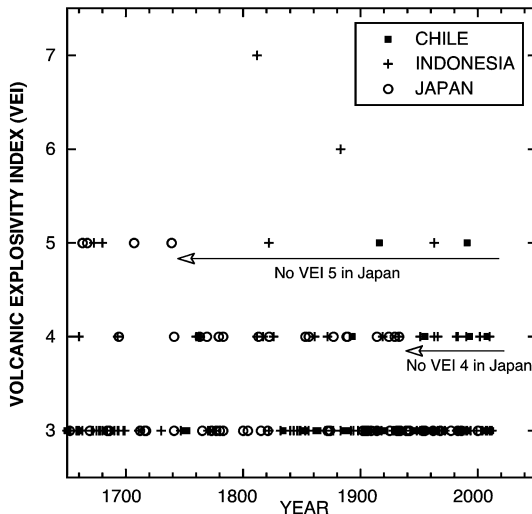


Fig. 7. Volcanic Explosivity Indices (VEI's) of eruptions plotted against the eruption times for Japan, Indonesia and Chile. Japan has been quiet since the middle 18th Century for VEI 5 and since the middle 20th Century for VEI 4.

され続けていると考えることもできる。そのため、近い将来日本でもこれらの規模の噴火が現在より起きやすくなっていると考えられる。

このような様々なスケールで噴火の頻度と規模にべき乗則があることを利用して、将来の噴火発生頻度について言及することはある程度可能であると思われる。しかし、Fig. 7に見られるように、短期間では火山活動が活発な時期とそうでない時期が繰り返されているものと考えられる。そのため、対象とする期間によっては統計的に扱うのに十分な回数の噴火が起きていないことがあるので、噴火データの統計的な取り扱いには注意することが必要であろう。

5-3 カルデラ噴火に対する制約

VEI 6 以上の巨大・超巨大噴火(カルデラ噴火)については、今回調べた火山帯や火山地域 (Fig. 6 と 4) において、VEI 6 未満の勾配と異なる傾向は認められなかった。地下の熱エネルギー放出の仕方が特にカルデラ噴火において異常という訳ではないように思われる。つまり、より小さな規模の噴火が起こるシステムの延長上でカルデラ噴火が発生しているように見える。最近、噴火前のマグマの滞留時間が、噴出物中の結晶の年代や組成的な拡散パターンから、数多く見積もられており、そこでは、カルデラ噴火も含んで、結晶の滞留時間が数十年から数百年程度であるとされる (例えば、Cooper and Kent, 2014 のまとめ)。これらの結果から算出されるマグマの蓄積

率は、カルデラ噴火のような規模の大きい噴火において特に高いことが指摘された (例えば、Costa, 2008 のまとめ)。しかし、ここで見た噴火の規模別頻度分布の特徴 (回帰線の勾配) は共通しており、規模の大きい噴火において、特に、蓄積率が高かったことを支持するようには読み取れない。かえって、小さな噴火を起さずに長い期間マグマが蓄積され続ければカルデラ噴火が起きやすくなるという単純なモデルが受け入れやすいように思える。噴火前に結晶中に刻まれる短い滞留時間が示すマグマ溜まりのプロセスと、噴火の頻度と規模の規則性で示される熱輸送のプロセスとでは見ている次元が異なるのかもしれない。

6. まとめ

火山爆発指数毎の噴火頻度を検討した結果、頻度と規模の間にべき乗則が、火山弧、火山地域、個々の火山という異なるスケールでも認められた。噴火記録の存在率を考慮した噴火頻度の規格化を行うことによって、得られる回帰線の勾配や切片が異なる。存在率を考慮しない場合や不十分な量のデータセットでは緩い勾配の関係が得られ、発生確率の厳密な議論はできない。日本では、18 世紀半ば以降 VEI 5 の噴火が、20 世紀半ば以降 VEI 4 の噴火が発生しておらず、近い将来、この規模の噴火が日本で発生する可能性が高い。

謝 辞

本稿に対して西村太志博士と清杉孝司博士には貴重なコメントをいただき、本稿を改善する上で大変有益であった。また、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進」の研究グループ参加者との議論は有意義であった。本研究を進めるに当たり、長谷川 健博士からは阿寒-屈斜路地域のデータを提供いただいた。奥野充博士には発表の機会を与えていただいた。本研究には、科研費基盤研究 C (課題番号 25350493) を使用した。ここに記して感謝します。

引用文献

- Cooper, K. M. and Kent, A. J. R. (2014) Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. *Nature*, **506**, 480-483, doi: 10.1038/nature12991.
- Costa, F. (2008) Residence times of silicic magmas associated with calderas. In: Gottsmann, J. and Marti, J. (Eds) "Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response". Development in volcanology, Vol. 10, Elsevier, 1-55.
- Croweller, H. S., Arora, B., Brown, S. K., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Lowndes, J., Nayemil, M., Siebert, L., Sparks, R. S. J., Takarada, S. and Venzke, E. (2012) Global database on

- large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE). *J. Applied Volcanol.*, **1**, doi: 10.1186/2191-50401-4.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1954) **Seismicity of the Earth and associated phenomena**. 2nd. ed. Princeton University Press.
- Hasegawa, T., Nakagawa, M. and Kishimoto, H. (2012) The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **107**, 39-43.
- 早川由紀夫 (1993) 噴火マグニチュードの提唱. 火山, **38**, 223-226.
- Kiyosugi, K., Connor, C.B., Sparks, R.S.J., Croweller, H.S., Siebert, L. and Takarada, S. (2010) How many explosive eruptions are missing from the geologic record? Analysis of the Quaternary record of large magnitude explosive eruptions in Japan. Abstract of 2010 AGU fall meeting, V13C-2374.
- Lavigne, F., Degeai, J-P., Komorowski, J-C., Guillet, S., Robert, V., Lahitte, P., Oppenheimer, C., Stoffel, M., Vidal, C.M., Surono, Pratomo, I., Wassmer, P., Hajdas, I., Sri Hadmoko, D. and de Belizal, E. (2013) Source of the great A.D. 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani volcanic complex, Indonesia. *PNAS*, **110**, 16742-16747, doi.10.1073/pnas.1307520110.
- 宮地直道 (2011) 過去 1 万 1000 年間の富士火山の噴火史と噴出率, 噴出規模の推移. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編「富士火山」, 日本火山学会, 79-95.
- Mogi, K. (1962) Magnitude frequency relations for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **40**, 831-853.
- Nagaoka, S. (1988) The Late Quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima Bay, Southern Kyushu, Japan. *Geogr. Rep. Tokyo Metropolitan Univ.*, **23**, 49-122.
- 長岡信治 (1988) 最終間氷期に起きた鬼界カルデラの珪長質火砕流噴火と火砕サージの形成. 地学雑, **97**, 32-45.
- 長岡信治・奥野 充・新井房夫 (2001) 10 万~3 万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史. 地質雑, **107**, 432-450.
- Neri, A., Aspinall, W.P., Cioni, R., Bertagnini, A., Baxter, P. J., Zuccaro, G., Andronico, D., Sarsotti, S., Cole, P.D., Esposti Ongaro, T., Hincks, T.K., Macedonio, G., Papale, P., Rosi, M., Santacroce, R. and Wo, G. (2008) Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 397-415.
- Newhall, C.G. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, **87**, 1231-1238.
- Pyle, D.M. (2000) Sizes of volcanic eruptions. In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. eds), 263-269, Academic Press, London.
- Scandone, R., Giacomelli, L. and Gasparini, P. (1993) Mt. Vesuvius: 2000 years of volcanological observations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 5-26.
- Scholtz, C. (1968) Microfractures, aftershocks, and seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **58**, 1117-1130.
- Simkin, T. (1993) Terrestrial volcanism in space and time. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **21**, 427-452.
- Tatsumi, Y. and Suzuki-Kamata, K. (2014) Cause and risk of catastrophic eruptions in the Japanese Archipelago. *Proc. Japan Acad., Ser. B*, **90**, 347-352.
- 津久井雅志・齋藤公一滝・林幸一郎 (2006) 伊豆諸島における 9 世紀の活発な噴火活動について—テフラと歴史史料による層序の改訂—. 火山, **51**, 327-338.

(編集担当 奥野 充)