

	<h1>レポート</h1> <h2>火山噴火・気候変動・オゾン</h2> <h3>SCE・Net 鹿子島達志</h3>	<h2>R-79</h2> <p>発行日 2022年8月 5日</p>
---	---	---

### 1. 概要

先にエッセイ『気候変動・火山噴火・古代史』E-160、E-161、E-163 および、レポート『火山噴火規模の指標考察』R-78 を発表した。今回は一連の考察の最終回として『火山噴火・気候変動・オゾン』を報告する。火山の噴火も気候変動もどちらも自然現象であり、不確定要因が多いため単純には扱えない。また歴史的な事件の要因としては、反論として時間的な偶然であり、因果関係はないとする意見が多い。そこで筆者は、歴史事例は参考とし、気候変動の要因を人為的なものも配慮しながら、内外の諸文献に予断を加えず検証して以下の結論を導いた。

- 1) 火山噴煙指数『DVI(Dust veil index)』は火山噴火と気候変動を考察する際の必須指標とされている。DVI はマグマ噴出量や SO<sub>2</sub> 量と高い相関性があった。
- 2) 気候変動への CO<sub>2</sub> の影響は、人為的な発生量に比べ、火山性の CO<sub>2</sub> 量は通常は無視小である。一定の影響があることは各種資料から検証した。
- 3) 火山噴出ガスの気候変動へは SO<sub>2</sub> や HCl などのハロゲンの影響が大きい。また、その影響は大規模噴火時期と一致していることを諸文献から確認した。
- 4) SO<sub>2</sub> や HCl などのハロゲンの影響は成層圏オゾンの生成および減少に影響を及ぼし、オゾンの増減が気候変動に関係していることを示唆している。

### 2. DVI について

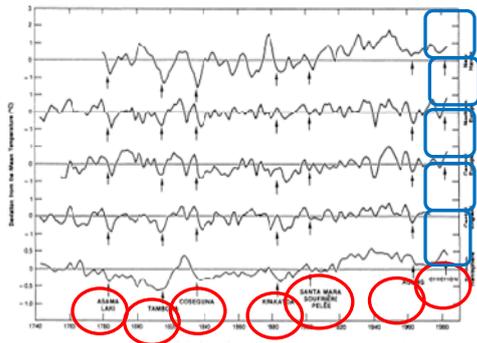
火山噴煙指数『DVI(Dust veil index)』は、「太陽から地上に直接届く直達日射量の減少量」と「噴煙の拡がり」と「その継続時間」の相乗積に比例する量で定義される。1970 年に H.H.Lamb が提唱し、1883 年のクラカトア火山噴火の DVI を 1,000 とし、過去 500 年間の主要な火山噴火に対して算定した。その数値には気候変動の効果が前提で含まれているため、問題視されている。式は割愛した。

#### 1) RoBock の研究

これに対し Alan RoBocK は、火山噴火に基く成層圏エアロゾルの太陽放射遮蔽効果の時間的変化を推定するために DVI を用いたモデルを考案した (1980)。このモデルに基いた数値計算により得た結果は 1870～1959 の北半球平均気温の変動とかなりよく一致している。図表は割愛した。

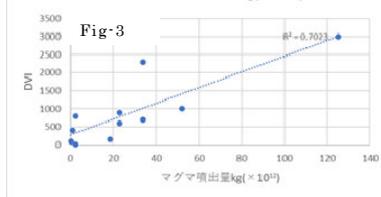
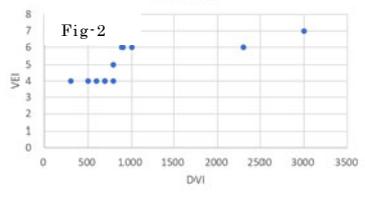
#### 2) Angell と Korshover の研究

Angell と Korshover は、Lamb の DVI をもとに 1780 年以降に起こった 7 つの大規模火山噴火後の北半球の気温変化を統計的に分析した(1985、Fig-1 参照)。Fig-1 に示すように、大規模噴火の直後の 2～3 年間に気温の低下傾向が認められるとしているが、その結果は火山の位置(緯度)や噴火の規模に大きく影響される。



左図 Fig-1 : 火山噴火と気温変化  
 左縦軸は平均気温からの偏差値  
 右縦軸は上から米国ニューヘイブン、北欧、中央ヨーロッパ、英国、北半球全体、横軸は時間軸で 1740～1990 年。矢印は噴火火山名で左から ASAMA & LAKI、TAMBORA、COSEGUINA、KRAKATAOA、SANTA MARIA & PELEE、AGUNG、CHICHON である。

次図 Fig-2、3 は筆者が収集した文献データから独自に作成した DVI 関連の相関図である。VEI は火山爆発指数であり、火山噴火の爆発性の相対的な尺度である。この VEI と DVI の関係は明確ではないが、マグマ噴出量とは明確な比例関係がある。VEI はエッセイ E-163 を参照のこと。



### 3. 歴史的事例

#### 3-1. フランクリンのもう一つのエピソード

ベンジャミン・フランクリンは 18 世紀のアメリカの政治家であるが、有名な「雷は電気である」発見のエピソードを持つ科学者でもある。1783 年の欧州は夏季に猛暑となり、続いて非常に厳冬となった。当時の駐仏アメリカ大使だったフランクリンは、自分の観察に基づき、アイスランドのヘクラ火山(事実はラキ火山)の噴火灰が天を覆い太陽放射を散乱して寒冷化した可能性(日傘効果)を指摘した。そのため火山噴火と気候変動の関係に初めて言及した先駆者の栄誉を有する。

#### 3-2. ナポレオンの歴史的敗北

1815 年 4 月に起きたインドネシア・タンボラ火山の噴火の 2 カ月後、遠く離れた欧州で、荒天(雨天)が続いたことによる作戦の失敗によりナポレオンが戦史に名高いワーテルローの戦い(1815 年 6 月)に敗北した。ナポレオン軍は行軍や大砲の設置を阻むぬかるんだ地面の乾燥を待ち続けて、勝機を逸したのである。

#### 3-3 ラキ火山とタンボラ火山の噴火

##### 1) ラキ火山

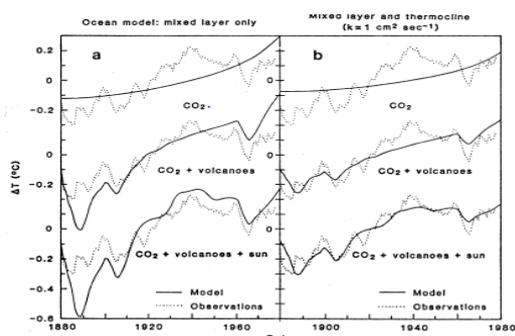
1783 年 6 月から 8 ヶ月間続いた噴火は、過去 1,000 年間で最大であった。その年の欧州の 7 月の気温は平均を 3℃以上も上回った。一方、1783 年から 1784 年の冬は平均より 3℃低い寒さであった。噴出した硫酸エアロゾルは現在のグリーンランドの氷床に顕著な硫酸痕を残し、多くの SO<sub>2</sub>(約 1 億 2,200 万トン)を噴出していた。ちなみに VEI は 4、噴火 M は 6.4 であり、DVI は 2300 である。

##### 2) タンボラ火山

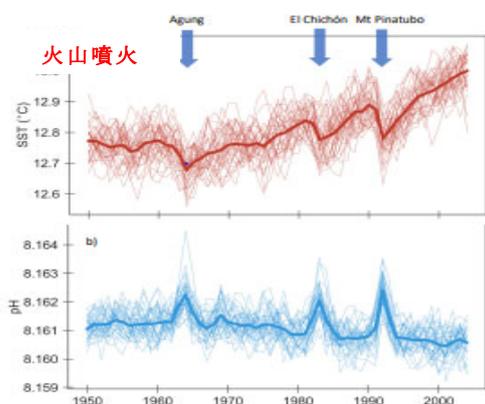
1815 年のタンボラ火山の噴火は、大気圏に供給された SO<sub>2</sub> 量は 4 億トン におよぶ歴史時代最大規模の噴火であった。噴煙は、太陽光を遮って広がり、数年間漂



る。過去の全球平均気温変化は CO<sub>2</sub> の増加のみでは説明できず、火山噴火の影響が無視できない要因であるとした。また、海洋 pH は海水中 CO<sub>2</sub> の溶解度と密接な関係があり、Olivarez は気候シミュレータにより火山噴火ガス CO<sub>2</sub> の海洋への影響、海面水温低下と pH 値の上昇を明らかにした(Fig-7、2018)。しかし、火山性 CO<sub>2</sub> ガス量は、年間数億トンであり、人為性の CO<sub>2</sub> の約 350 億トンに比べ、約 100 分の 1 以下である。噴火時の CO<sub>2</sub> 量は、20 世紀最大規模であるピナツボ火山の噴火 (1991 年) でも、約 0.5 億トンに過ぎない。この微量の火山性 CO<sub>2</sub> がなぜ影響を及ぼすのか、筆者は前述の海洋への影響理論からと推定している。



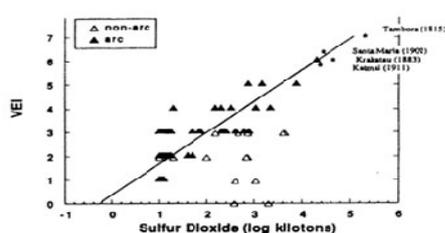
左図 Fig-6 : Ohasen(1981)  
 点線の地球規模の表面温度平均値と Hansen 等 (1981) による計算値 (実線) の比較。b が a よりマッチしている。海洋の影響は、100m 混合層の熱容量と 1000m までの熱の拡散を考慮している。(拡散係数  $k=1\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 a : mixed layer(海洋混合層)のみ  
 b : mixed layer and thermocline(温度躍層)の影響考慮



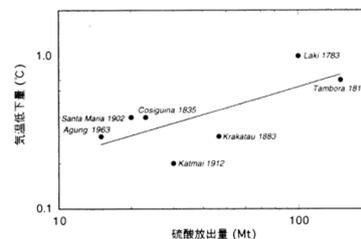
左図 : Fig-7 地球システムモデル (1950-2005)  
 a) 全球平均海面水温 (SST、海面直下水温)  
 SST : Sea Surface Temperature  
 b) 自然 (産業革命前) の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度 (280ppm) を用いた全球平均表面 pH 値。各細線は各 36 データの年平均値、太線は全データの年平均値を表す。  
 1963 年 (アグン山)、1982 年 (エル・チヨン山)、1991 年 (ピナツボ山) の 3 つの火山噴火で海面水温が低下し pH 値が上昇した。

## 6. SO<sub>2</sub> の影響

硫酸エアロゾル量の衛星による噴煙観測は 1978 年からであり、1993 年までの 15 年間に起こった噴火に伴う SO<sub>2</sub> の放出量と VEI の関係を Fig-8 に示す。



上図 Fig-8 : 1979 年以降 1993 年まで 15 年間に起こった噴火に伴う SO<sub>2</sub> の放出量 (LOG) と VEI の関係を示す (Bluth 他、1997)



上図 Fig-9 : 縦軸は気温低下°C、横軸は硫酸放出量 Mt(百万トン)。(Palais and Sigurdsson, 1989) ピナツボの例は合う。

現在までの大規模な噴火事例はエルチヨン火山 1982 年およびピナツボ火山 1991 年噴火の 2 例だけである。ピナツボ火山による 2 千万トンの SO<sub>2</sub> は 20 世紀

最大のエアロゾルとなり、噴火後3年間0.72℃低下させた(Fig-9 参考)。

硫酸エアロゾルと気温およびSO<sub>2</sub>量の関係性資料をFig-10、11、12にて示す。

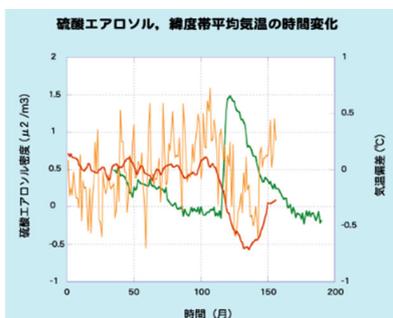


Fig-10: 「硫酸エアロゾル密度と気温低下」  
 橙色は温度偏差℃、赤色は移動平均気温℃、  
 緑色は硫酸エアロゾル密度(μ<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)。横軸は  
 月。エアロゾル密度は、ピナツボ噴火直後  
 から急速に増加して、1991年12月から1992  
 年1月ころにかけて最大値に達した。九大総  
 合研究博物館「地球惑星科学への招待」

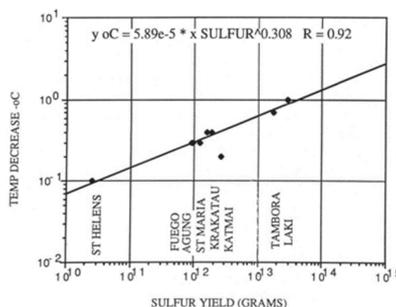
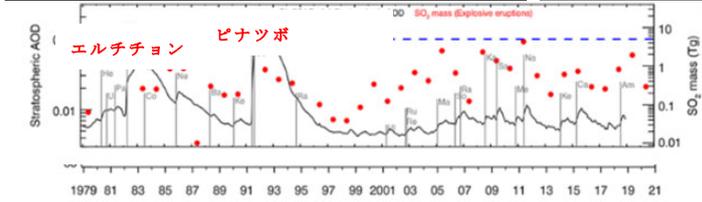
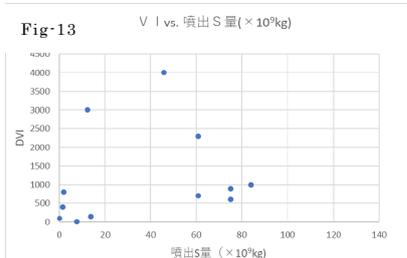


Fig-11:大規模な火山噴火の際の硫黄の大気中へ  
 の排出量と、噴火後の北半球の気温低下の関係  
 大噴火後の北半球の気温低下との関係。硫黄収量の  
 データは、Sigurdsson (1982), Devine and others  
 (1984), Palais and Sigurdsson (1989)による硫黄  
 収量データ。Rampino and Self (1982)による気  
 候学的データ。この式は、相関係数 0.92。



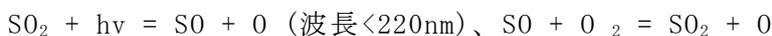
左図 Fig-12 はエアロゾルの量の  
 指標となる光学深度(AOD)-黒線  
 と火山噴火 SO<sub>2</sub> の排出量テラグ  
 ラム(Tg)-赤点を示す。青い破線の  
 水平線は 5-Tg SO<sub>2</sub> を示す。二つ  
 の曲線は同期している。  
 Science News by AGU2021.8.31

次に、SO<sub>2</sub>(もしくは S)と諸要因について筆者が考察した関係図を以下に示す。



7. オゾンについて

SO<sub>2</sub>はまた、次の式によって示されるように、成層圏オゾン濃度を増加させる。  
 このSO<sub>2</sub>は、紫外光との反応により、触媒的にオゾン前駆体(O)を生成する。



光分解低減効果と触媒効果は互いに打ち消し合うが、雲のすぐ下では、SO<sub>2</sub>による  
 吸収のためにO<sub>2</sub>の光分解が減少しオゾンが減少する。しかし、2ヶ月後、ほとん  
 どのSO<sub>2</sub>はヒドロキシルラジカル(OH)との反応によって硫酸に変換され大気中で  
 エアロゾルに凝縮する。窒素酸化物は、エアロゾルの表面と反応して硝酸(HNO<sub>3</sub>)  
 を形成する。通常、NO<sub>x</sub>はオゾン層破壊性C1およびC10と反応して、オゾン層破  
 壊性の低い化合物を形成するが、硫酸エアロゾルはNO<sub>x</sub>を除去するので、オゾン  
 層はC1およびC10に対してより敏感になる。この場合、オゾン濃度は低下する。  
 なお、オゾン濃度の増減による気温変動への影響度はCO<sub>2</sub>に比べ極めて小さい。

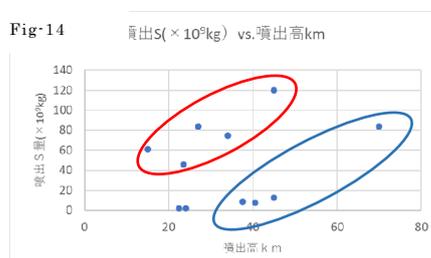
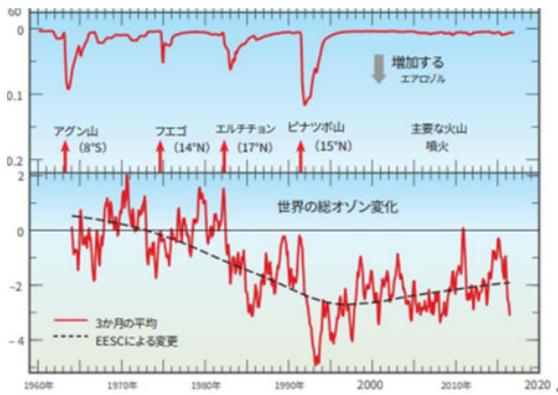


Fig-13: DVI と S  
 量の相関性は  
 FIG-8 とは違っ  
 て薄い。  
 Fig-14: 噴出量 S  
 と噴出高は VEI  
 区分では相関性  
 がみとれる。赤  
 が VEI  
 が 5 以上。



**Fig-15 : 火山噴火とオゾン量の変化**  
 縦軸上段は成層圏エアロゾルの光学厚さであり硫黄含有粒子の太陽光遮蔽効果を示す。下段は1964年から1980年の平均値からの全球全オゾン濃度の偏差を示す。  
 横軸は時間軸で1960~2020の目盛になる。大規模な火山噴火の後、成層圏で新たに形成される大量の硫黄含有粒子によって、地表への太陽放射の透過率が低下する。  
 大規模噴火は太陽放射の透過率を一時的に低下させ、火山性粒子(硫黄分)は成層圏から除去されるまでの2-3年だけオゾン層破壊を増加させる。

なお、上図のEESCは等価有効成層圏塩素 (Equivalent effective stratospheric chlorine) であり、塩素および臭素含有化学物質である化合物による成層圏オゾン層破壊の量を推定するパラメータである。

### 8. 参考文献 (実際は30近くの文献を精読したが、主要論文のみ記載する)

- ・ The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical eruptions January 1982, Journal of Geophysical Research Atmospheres 87  
 Authors: Chris Newhall ほか
- ・ The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth, Ben G. Mason David M. Pyle, Clive Oppenheimer Bull Volcanol (2004) 66:735-748, Published online: 7 May 2004
- ・ 噴火マグニチュードの提唱火山 早川由紀夫、38巻(1993)第6号 223-226頁(1993年9月14日受付、1993年12月16日受理)
- ・ テフラとレスからみた火山の噴火と噴火史、早川由紀夫、第四紀研究(The Quaternary Research) 30(5) p. 391-398 Dec. 1991
- ・ 火山噴火のエネルギーと災害、下鶴大輔、エネルギー・資源 特集「自然災害とエネルギー」 Vol.14 No.4(1993)
- ・ The current volcanic ash modelling set up at the London VAAC, Technical Summary (v1.5), August 2019, Claire Witham, Matthew Hort, David Thomson ほか
- ・ レーザーレーダによりとらえられた火山噴火、広野求和・柴田隆、火山第2集第2B巻(1983) 第4号 337-356頁
- ・ A LATITUDINALLY DEPENDENT VOLCANIC DUST VEIL INDEX, AND ITS EFFECT ON CLIMATE SIMULATIONS, ALAN ROBOCK, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 11(1981)7-80
- ・ 氷床コアに保存された火山起源物質、河野美香、日本雪氷学会誌雪氷 62巻3号(2000年5月) 197-213頁
- ・ 火山噴火と気候変動、三上岳彦、第四紀研究(The Quaternary Research) 30(5) p. 409-417)
- ・ Volcanic Loading: The Dust Veil Index, H.H.Lamb, Climatic Research Unit University of East Anglia Norwich, UNITED KINGDOM, September 1985
- ・ VOLCANIC ERUPTIONS AND CLIMATE: Alan Robock, Department of Environmental Sciences Rutgers University, Reviews of Geophysics, 38, 2 May 2000 New Brunswick, New Jersey

以上