

□火山噴火がもたらす気候への影響

東北大学大学院理学研究科・教授／JAXA 地球観測研究センター・参与

早坂忠裕

1. はじめに

今年(2022年)1月15日に南太平洋、トンガ王国のフンガトンガ・フンガハーパイ火山が噴火した。海底火山の噴火で規模も比較的大きく、人工衛星の観測によれば噴煙は高度約30kmの成層圏まで到達したことが確認されている。また、今回の噴火によって今までとは違うメカニズムの“津波”が発生し、日本各地においても潮位の変化が観測されたことは記憶に新しいところである。

火山噴火は噴石、火砕流、火山泥流、溶岩流などにより近傍の地域や住民に大きな被害をもたらす。一方で、大規模な火山噴火によって気候が影響を受けることも昔から指摘されている。これは、火山噴火によって成層圏のエアロゾル(大気中の浮遊微粒子)が増加し、太陽放射を遮るために地表に到達する日射量が減少することに起因する。古くは1815年のインドネシア・タンボラ火山の例が有名である。この時には噴火の翌年に北米や欧州で記録的な冷夏となり、「夏のない年」と言われた¹⁾。その結果、農作物に大きな被害が出たことも知られている。また最近では、1991年6月に噴火したフィリピンのピナツボ火山の噴火の影響で地表気温が最大で約0.5℃低下した。ちなみに火山噴火は温室効果ガスである二酸化炭素も放出するが、1750年以降の火山噴火起源の二酸化炭素の放出量は同じ時期の人為起源による二酸化炭素

排出量の100分の1以下であり、その気候への影響はほとんどないと考えて良い²⁾。

本稿では、火山噴火とその気候への影響について、歴史的な事例を紹介し、そのメカニズムと複雑な気候影響の実態についてピナツボ火山を例に解説する。

2. 火山噴火と気候にまつわる歴史的事例

人間は長い歴史の中で、火山噴火によって日射量が減少し、気温の低下につながることを経験的に知っていたと思われる。南極やグリーンランドの氷床コアには硫酸塩濃度が異常に高い年の記録があり、気温変化を反映する木の年輪などとも照らし合わせた結果、大きな火山噴火が過去に何度もあり、気候へ何らかの影響があったことが推定されている。

その因果関係について、古くは1784年のB. フランクリンによる考察がある¹⁾。それによると、「1783年の夏から数ヶ月にわたって、ヨーロッパや北アメリカの大部分はずっと濃い霧に覆われていた。この霧は乾燥していて太陽の輝きもこれを消散させることはできない。この霧のために太陽の光は弱められ、夏の間に地上を熱するという効果は著しく減少させられた。1783年から1784年の冬は、これまでにない厳しい冬になった。その原因は隕石による煙か、あるいは夏の間にアイスラ

ンドのヘクラ火山から大量の噴煙が長い間噴出され続けたか、または、この島の近くの海底火山が噴火し、その噴煙が北半球に拡散したのかもしれない」とのことである。このように、必ずしも火山噴火の影響と特定したわけではないが、理論的には可能性があるということが指摘されている。

その後も火山噴火が全球規模で気候に影響を及ぼした例として、いずれもインドネシアで噴火した、1815年のタンボラ火山、1883年のクラカトア火山、1963年のアグン火山などがある。さらに1982年にはメキシコでエル・チチョン火山が噴火し、1991年のピナツボ火山が続いた。それ以降は全球規模で気候に大きな影響を及ぼすような大噴火は今のところ発生していない。先日のトンガにおける火山噴火も後述するように気候に影響することはほとんどないと考えられている。

3. タンボラ火山の大噴火と「夏のない年」

近年における最大規模の噴火であり、かつ様々な記録が残っている事例は1815年4月10日から12日にかけて噴火したインドネシアのタンボラ火山である。この噴火によりピナツボ火山より一桁多い150km³以上の噴出物があったと推定されており、約4000mの高さの山頂が2850mになった。噴煙は43kmまで到達し、成層圏に注入された亜硫酸ガスは56Mtと報告されている³⁾。これはピナツボ火山起源の亜硫酸ガスの約3倍の量にあたる。2013年のIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書²⁾によれば、タンボラ火山の噴火で全球平均日

射量が最大で3%近く減少したと推定されている。

H. ストンメルとE. ストンメルによる「火山と冷夏物語」¹⁾によると、タンボラ火山の気候変化を通じた欧米への影響が極めて大きなものであったことがわかる。噴火の翌年1816年には、北アメリカ大陸北東部で記録的な冷夏になった。ハーバード大学やエール大学の気象観測データに加えて、新聞記事や日記等でも様々な異常気象が見られたことが記録されている。6月6日から11日にかけて最初の寒波が襲い、ニューイングランド地方北部で吹雪になり、7.5~15cmの積雪が記録された。7月9日にはメイン州ブランズウィックで朝の最低気温が0.8℃を記録し、霜が観測された。さらにバーモント州、コネチカット州、ニューハンプシャー州でも霜が観測された。8月21日にはマサチューセッツ州ボストンでも霜が降りている。このような冷夏の状況により、ニューイングランド地方ではトウモロコシをはじめとする農作物のほとんどが全滅したと伝えられている（図1）。

この年はヨーロッパにおいても冷夏となり、飢

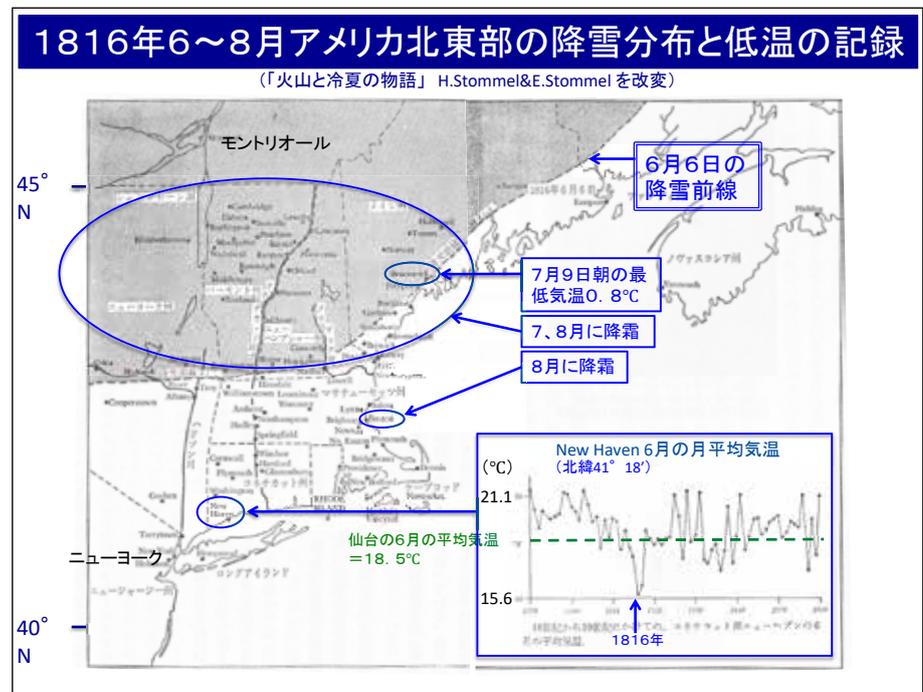


図1 タンボラ火山の噴火によるアメリカ北東部への影響。
 (H. ストンメル、E. ストンメル著「火山と冷夏物語」中の図を改変)

饑が発生した。ジュネーブでは夏の気温が1753年以降で最低を記録した。ドイツ、オランダ、スイスの新聞記事には「このような季節は人間の知限りでは初めて」と記録され、トウモロコシ等の穀物が不作になったことなどが伝えられている。翌1817年にはスイスで穀物の価格が3倍に高騰した。フランスでは政治的混乱の中で凶作のため食糧不足となり、群衆が市役所に押し入り穀物を略奪するなど各地で暴動が発生した。

4. 噴火と気候影響をつなぐメカニズム

さて、それでは火山噴火による気候への影響は、どのようなメカニズムによってもたらされるのだろうか。大規模な火山噴火においては噴石などとともに大量の火山灰が噴出され、大きさが数ミクロン以下の火山灰は対流圏上部から成層圏まで達する。ここで、成層圏まで到達するということが重要である。対流圏内では降水により洗い流されてしまい1週間程度で除去される。これに対し

成層圏まで届いた火山灰は雲や降水が無いために長く滞留する。しかしながら、微粒子とはいえ周りの気圧が地上の10分の1から100分の1で空気が薄いためいずれは重力で落下し、1～2か月程度で除去される。

一方、火山が噴火すると火山灰に加えて亜硫酸ガスなどの硫黄を含む気体も放出され、これも成層圏まで到達する。成層圏では亜硫酸ガスが酸化されて硫酸の液滴（硫酸エアロゾル）に変化する。このように前駆物質の気体から変化して形成されるエアロゾルを2次生成粒子と呼ぶ。成層圏において亜硫酸ガスから硫酸エアロゾルに変化するには約1～2ヶ月かかり、直径0.1～0.2ミクロン程度のエアロゾルが形成されて滞留する。硫酸粒子は火山灰よりも極めて小さいので、その後1～2年、長い時には数年にわたって滞留することになる（図2）⁴⁾。硫酸エアロゾルは太陽放射をほとんど吸収せず散乱する効果が強い。したがって、このようなエアロゾルが長期間にわたり滞留すると地表に届く太陽放射（日射）を減少させることに

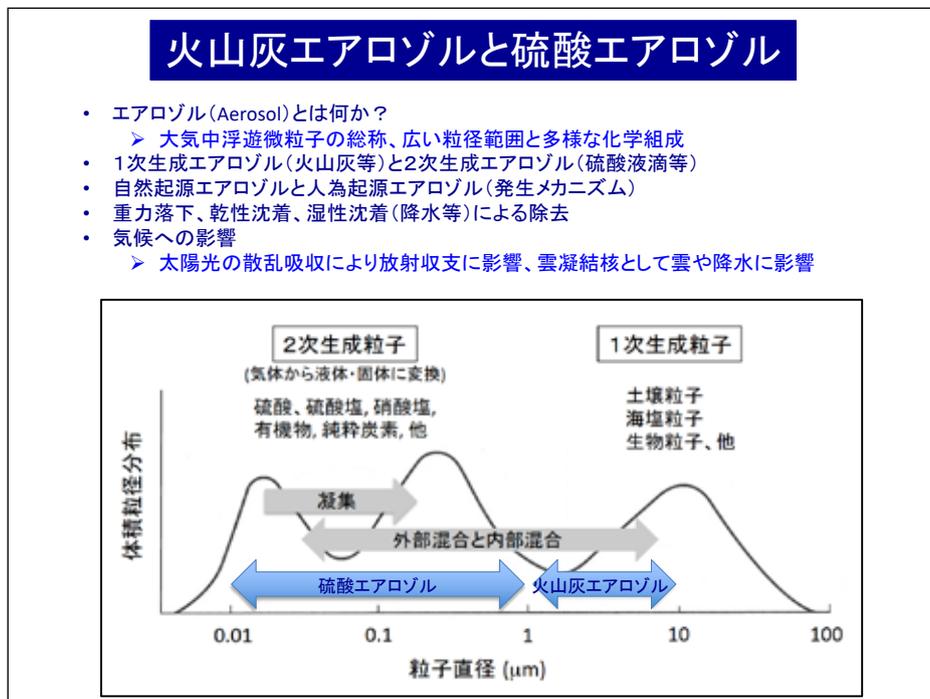


図2 火山灰エアロゾルと硫酸エアロゾル

固体または液体の粒子の形で大気中に放出され、そのまま滞留するものを1次生成粒子、前駆物質である気体が反応して粒子状の物質に変化したものを2次生成粒子と呼ぶ。

なる。

地球の表層すなわち大気、海洋、陸面のエネルギー源は99.9%以上が太陽放射によるものである。地球全体で平均すると、大気上端に入射した太陽放射は約30%が宇宙空間に反射され、約23%が大気で吸収、残りの約47%が地表面に到達する。これらの値は地球上の地域や季節により変化するので、そのアンバランスを解消すべく、風が吹き、海流が流れ、雲ができて雨が降ることによってエネルギーが輸送される。大きな火山噴火による成層圏のエアロゾルは、この地球表層のエネルギー源である地表に届く太陽放射の値を変化させることになり、その結果、気候を変化させることになるのである。

成層圏の硫酸エアロゾルが気候に及ぼす影響を考える際に、もう一つ注目すべき点がある。それは、成層圏内におけるエアロゾルの輸送である。成層圏においても基本的には対流圏上層と同様に東西方向の風が卓越しており、火山灰エアロゾルや亜硫酸ガス、徐々に生成される硫酸エアロゾルは噴火後2～3週間程度で地球を東西方向に1周する。その後、数ヶ月から1年程度の間にはブリュワー・ドブソン循環と呼ばれる成層圏内の南北方向の輸送メカニズムによって硫酸エアロゾルが全球に広がる。ここで重要なことは、噴火する火山の緯度である。ブリュワー・ドブソン循環では基本的に赤道から極域に物質が輸送されるので、熱帯で火山が噴火するとエアロゾルが全球に広がり地球全体を覆うことになる。したがってその影響も全球規模になる。一方で、高緯度にある火山が噴火した場合は、それよりもさらに緯度の高い地域には影響するが、低緯度や反対側の半球には輸送されにくく影響を受ける地域は限定的になる。

5. 複雑な気候への影響～ピナツボ火山の例

日射量が減少すると、陸地や海洋が受け取るエ

ネルギーが減少するので、地球の温度が下がることは容易に想像できよう。ただし、海洋の熱容量は極めて大きく、大気の約1000倍もあるため、吸収する太陽放射エネルギーの変化は海面の温度変化には現れにくい。一方で、陸地は比較的影響を受けやすく、陸地の地表気温が下がる。また、下層大気の気温の低下により、大気中の水蒸気量も減少し、降水量も減少することになる。さらに成層圏内ではオゾンが硫酸エアロゾルの表面で塩素と反応、分解し、南極のオゾンホールと類似のメカニズムで減少することも報告されている⁵⁾。

1991年6月のピナツボ火山の噴火の場合には、陸地の平均で最大約0.5℃気温が低下したことが観測されている⁶⁾。しかしながら、気候影響の地理的な分布と時間変化は複雑で、噴火後半年程度の間には、地表気温が低下する地域と逆に上昇する地域も見られた。たとえば、1991年の冬には北アメリカ、北ヨーロッパ、シベリア東部、および南極地域で大気下層の気温上昇が観測されている^{5,6)}。

一方で、数年に一度ペルー沖の東部熱帯太平洋の海面水温が上昇するエルニーニョ現象のように地球自身が持つ自然変動のリズムもいくつかあり、ある程度大きな火山噴火でないと、その影響を正確に評価することは難しい。先に述べたタンボラ火山のように極めて大きな噴火の場合にはより気候影響が明確に現れるが、ピナツボ火山の場合にはエルニーニョも発生していたことが知られており、火山噴火の規模も相俟って地域的な気候影響の評価には限界がある。すなわち、火山噴火による成層圏エアロゾルの変化、そして日射量の変化までは因果関係を追求することができるが、さらに気温や降水量の変化、そしてそれらの各地域における変化との関係性を正確に解明することは難しい。冒頭で紹介した今年1月のトンガの火山噴火においては、人工衛星の観測から、成層圏に運ばれた亜硫酸ガスの量はピナツボ火山のときの約20分の1と推定されており、気候への影響は極め

て小さいものと考えられる。

6. まとめ

大規模な火山噴火はある条件が揃うと地球全体の気候に大きな影響を及ぼすことがある。その条件とは、大量の火山灰や亜硫酸ガスが成層圏まで届くこと、そして、火山が赤道付近の緯度帯に位置することである。成層圏に入った火山灰は1～2ヶ月で重力落下により除去されるが、同時に注入された亜硫酸ガスは成層圏内で酸化され硫酸エアロゾルに変化する。硫酸エアロゾルは極めて小さな微粒子であり、成層圏内に1～2年あるいはそれ以上滞留する。さらに成層圏内の南北循環により赤道から南北両半球の極域まで広がり地球全体を覆うことになる。その結果、日射量が減少し、地表気温が下がるなど地球全体の気候に影響を及ぼすことになる。しかしながら、その影響はエルニーニョなど他の気候変動要因と区別することが難しい場合もあり、地域ごとの影響を評価するには限界がある。今後、特に地球温暖化が進む中で大きな火山噴火が発生した場合、その気候への影響を正確に評価するためにはさらなる研究の進展が望まれる。

【参考文献】

- 1) H. ストンメル、E. ストンメル、1985: 「火山と冷夏物語」、地人書館、238pp.
- 2) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 3) Toohey, M. and M. Sigl, 2017: Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500BCE to 1900CE. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 809–831, <https://doi.org/10.5194/essd-9-809-2017>
- 4) Nakajima, T., M. Tanaka, T. Hayasaka, Y. Miyake, Y. Nakanishi, and K. Sasamoto, 1986: Airborne measurements of the optical stratification of aerosols in turbid atmospheres. *Appl. Opt.*, 25, 4374–4381.
- 5) Robock, A., 2002: The Climatic Aftermath. *Science*, 295, 1242–1244.
- 6) Kirchner, I., G. L. Stenchikov, H.-F. Graf. A. Robock, and J. C. Antuna, 1999: Climate model simulation of winter warming and summer cooling following the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. *J. Geophys. Res.*, 104, 19039–19055.