

14. 火山噴火によるエアロゾルの気候影響

柿崎 圭亮^{1*}・村尾 直人¹・太田幸雄¹・山形定¹

¹北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-0813北海道札幌市北区北13条西8丁目)

* E-mail: ks_if5a@ec.hokudai.ac.jp

火山噴火によって成層圏に形成される硫酸エアロゾル層は、大気上端で太陽放射を散乱・反射することにより地球の放射収支を変化させ、地表気温の低下を招く。本研究では、一次元放射収支モデルであるエネルギーバランス気候モデルによるモデル計算を行い、どの程度正確な気温低下の再現が可能であるかという点に着目し、その妥当性を評価する。

エネルギーバランス気候モデルにおける係数の再設定・検証を行った上で、3つの火山噴火のケースにおいてモデル計算を行った。その結果、2つのケースにおいては実際の気温観測値に近い傾向を示したが、1つのケースにおいては観測値とのずれが生じる結果となった。

Key Words : aerosol, volcanic eruption, climate model, climate impact, climate sensitivity

1. 研究背景と目的

火山噴火により放出される亜硫酸ガス(SO_2)から生成される硫酸エアロゾル(硫酸塩微粒子)は、成層圏下部に滞留して硫酸エアロゾル層を形成し、大気上端において太陽放射を散乱・反射する。これにより、地球の放射収支の状態(エネルギーバランス)を変化させ、地表気温の低下を招く。このような火山噴火に起因するエアロゾルの気候影響を、エネルギーバランス気候モデルという簡易的放射収支モデルを用いたモデル計算によって評価する。この際、どの程度正確な気温低下の再現が可能であるかという点に着目し、その妥当性を評価する。

過去の気候を全球気候モデル(GCM)で再現する場合、火山噴火による気温低下の分布や時間変化をモデルに与える必要がある。これにより、自然現象起因の気候要因である火山噴火による気候低下を除いた、人為起源のみによる地球温暖化の気温上昇傾向をとらえることができる。また火山噴火に対する計算は、気候変動予測の不確実性の主要因である気候感度の検証にもなる。このように、将来の気候変動を予測する場合に、火山噴火による気候影響の研究成果は不可欠なものである。

2. 研究方法

(1) 計算プログラム及びモデル

硫酸エアロゾルが成層圏に滞留して形成される成層圏エアロゾル層により、大気の光学的厚さが増加する。本研究では、NASA GISSの成層圏エアロゾルデータセット¹⁾²⁾から得た光学的厚さを放射伝達計算プログラム(Delta-P3)に入力し、その出力結果である緯度10°ごとのプラネタリーアルベド(大気上端での太陽放射の反射率)をエネルギーバランス気候モデルに入力することにより、年平均地表気温を算出した。

本研究で使用したエネルギーバランス気候モデルは、太陽放射エネルギーと地球から放出される赤外放射エネルギーの収支に緯度帯間の南北熱輸送項を与え、緯度帯ごとの地表気温を算出する放射収支モデルである。

このエネルギーバランス気候モデルに、放射伝達計算プログラムにより出力される緯度10°ごとのプラネタリーアルベドを入力することで、全球平均及び緯度10°ごとの年平均地表気温を算出した。このようなモデル計算により、火山噴火前年及び1年目～4年目までの年平均地表気温を算出し、噴火1年目～4年目までの年平均気温をそれぞれ噴火前年の年平均気温と比較することで、噴火1年目～4年目(=噴火1年後～3年後)における年平均気温変化の全球平均値及び緯度10°ごとの値を算出した。

算出した全球平均気温変化を実際の気温観測値と比較することにより、モデル計算結果の評価を行った。(図-1)

比較対象の気温観測値には火山噴火以外の気候変動要因(エルニーニョ/ラニーニャ現象等)が含まれるため、観測値をそのまま用いて比較を行うことはできない。特に、エルニーニョ現象による気温上昇は火山噴火による気温低下を打ち消す場合があるため、この影響を除外した気温観測値³⁾を用いて比較を行った。この他にも、太陽活動の変化、気象条件等の様々な気候変動要因が存在することに加え、年代による気温観測点の数や分布の違いといった定量化できない不確実性要素が気温観測値には含まれる。

(2) エネルギーバランス気候モデルの修正

エネルギーバランス気候モデルにおいて、地表面からの赤外放射を表す式の係数の妥当性が問題となる。この係数には、「水蒸気の正のフィードバック効果」が含まれており、火山噴火のような過渡的な現象ではそのような効果は小さいと考えられる。そこで、火山噴火の影響のみをモデルによって評価するための赤外放射式の係数の設定を検討した。係数の設定には、成層圏エアロゾルの観測精度が高く、近年最も大規模な噴火であった1991年のPinatubo(ピナツボ)火山噴火における成層圏エアロゾルの観測結果を用いた。さらにその設定を、1982年のEl Chichon(エルチチョン)火山噴火の観測結果を用いて検証した。

(3) 計算対象の火山

設定した赤外放射式の係数を用い、以下の火山噴火のケースにおいてモデル計算を行った。

- ①Agung(アグン)火山(1963年 インドネシア・バリ島)
- ②Katmai(カトマイ)火山(1912年 アメリカ・アラスカ州)
- ③Krakatau(クラカタウ)火山(1883年 インドネシア)

3. 結果と考察

(1) 赤外放射式の係数設定と検証

Pinatubo火山噴火の観測結果を用いた計算によって得た赤外放射式の係数は、温室効果気体に対して従来用いられてきた係数よりも小さくなり、この係数の設定によって、プラネタリーアルベドの変化に対する気温応答は小さくなった。この係数をEl Chichon火山噴火のケースに適用し、モデル計算によって実際の気温観測値に近い気温変化を再現できるか検証を行った。図-2に、El Chichon火山噴火のケースにおけるモデル計算結果(全球平均気温)と気温観測値との比較を示す。

1983, 84年については観測値と一致した計算結果が得られていることがわかる。一方、1982年と1985年においてはモデル計算値と観測値との間に差が生じている。1982年においては、1980年に噴火した別の火山による気温低下影響が残っているために、前年(1981年)との気温変化の観測値が低い値となり、観測値とモデル計算値に差が生じたと考えた。また1985年においては、前述した火山噴火以外の気候変動要因、特にラニーニャ現象による気温低下影響によって気温観測値が低い値となり、観測値とモデル計算値に差が生じる結果となった可能性が大きいと考えた。

以上で述べた要因を考慮すると、モデル計算値は概ね実際の気温低下に近い傾向を示している。したがって、赤外放射式の係数の設定に問題はないと考え、他の火山噴火の際の気温変動について検討することとした。

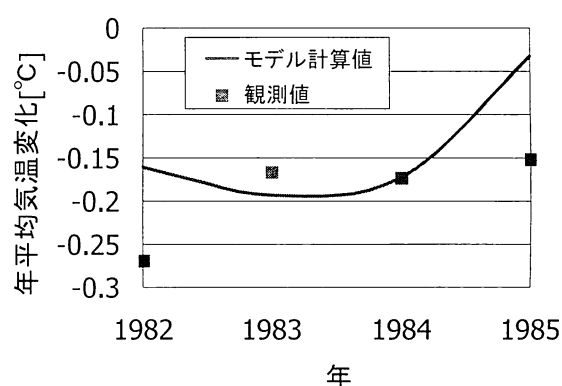


図-2. El Chichon火山噴火のケースにおける全球平均気温変化と年平均気温観測値との比較

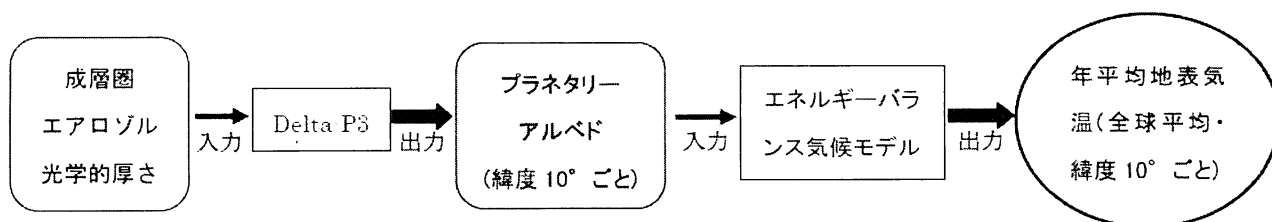


図-1. 本研究におけるモデル計算手順

(2) 各火山噴火のケースにおけるモデル計算結果・考察

エアロゾル観測精度が比較的高い1960年代、エアロゾル分布の推測が不確実な1910年代、実際の気温観測値の不確実性が大きくなる1880年代という3つの年代における火山噴火のケースでモデル計算を行った。

a) Agung火山

Agung火山噴火のケースにおけるモデル計算結果とその考察を示す。モデル計算によって算出した全球平均気温変化と気温観測値との比較を図-3に示す。

全球平均気温は噴火2年後に気温低下量が最大(約0.26℃)となっている。1964年はラニーニャ現象が発生していた年であり、その気温低下影響があったために、モデル計算値と観測値との間に差が生じた可能性が大きいと考えた。さらに、モデル計算値を各月の気温観測値の3ヶ月平均値と比較した。(図-4)

1964年はラ・ニーニャ現象の影響による気温低下があったことを考慮すると、1964年における火山噴火による気温低下値は図に示された値よりも小さい値であると考えられ、この年における気温観測値がモデル計算によって算出された気温低下値に近づくような変動になると考える。

以上より、モデル計算によって算出した年平均気温変化値は、噴火2年後に気温低下のピークが生じ、その後徐々に気温低下量が小さくなっていく、という実際の気温観測値の変動に近い傾向を示したと言える。

b) Katmai火山

Katmai火山は北緯58°に位置しているため、北半球のみに気温低下が顕著に表れる結果となった。このため、北緯90°～24°における気温観測値を用いて比較を行った。(図-5)

1913年～1915年においては、モデル計算値は実際の気温観測値に近い変動傾向を示したことがわかる。しかし、1912年においてはモデル計算値と気温観測値との間に差が生じた。この差は、太陽活動の変化による気温変化の影響によるものであると考える。太陽活動と気候に関する文献⁴⁾によると、1900年～1910年頃にかけて太陽活動が極小となり、それに伴い北半球の気温低下値が大きくなっていることが示されている。このような太陽活動の変化による気温変化が要因となり、1912年の北半球における気温観測値は低い値となっていると考える。

以上より、モデル計算値は1912年を除き、噴火1年後～3年後における気温観測値の変動に近い気温低下の傾向を示したと言える。

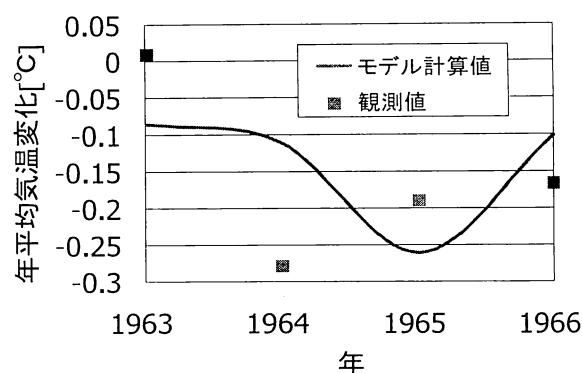


図-3. Agung火山噴火のケースにおける全球平均気温変化と年平均気温観測値との比較

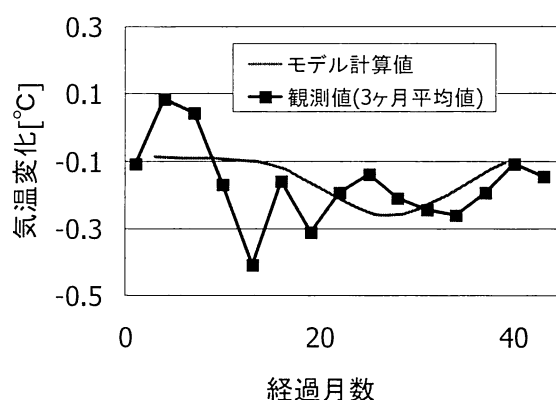


図-4 Agung火山噴火のケースにおける全球平均気温変化と気温観測値(3ヶ月平均値)との比較

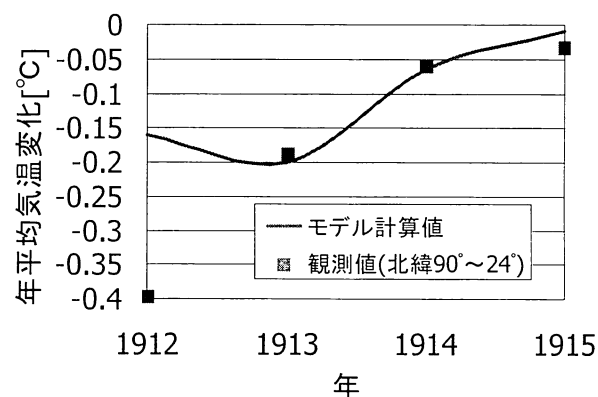


図-5 Katmai火山噴火のケースにおける全球平均気温変化と年平均気温観測値(北緯90°～24°)との比較

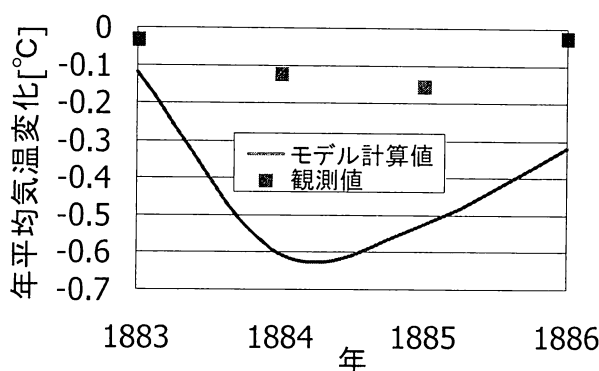


図-6 Krakatau火山噴火のケースにおける全球平均気温変化と年平均気温観測値との比較

c) Krakatau火山

モデル計算によって算出した全球平均気温変化と気温観測値との比較を図-6に示す。

噴火1年後～3年後にかけての全球平均気温低下量が大きくなり、実際の気温観測値との間に大きく差が生じる結果となった。この要因として、成層圏エアロゾルの観測精度の問題、気温観測値の不確実性の問題の2つを考える。

1883年～1886年の期間は南半球にエアロゾル観測点が存在せず、北半球に1ヶ所しか存在しない観測点で得られた値のみを用いて全球的硫酸エアロゾル分布を推測している。このように、エアロゾル観測点が1ヶ所しか存在しないために全球的に一樣に硫酸エアロゾルが分布した、という不正確な推測が原因で、全球的に気温低下量が大きくなり、観測値と比較して気温低下を過大評価してしまったと考える。さらに、この時代の気温観測値の精度にも問題がある。1880年代は気温観測地点数が少なく、南半球における観測地点数が北半球と比較して少ない⁵⁾。このため、1883年～1886年の期間における気温観測値は、Agung火山、El Chichon火山噴火のケースで用いた気温観測値と比べて精度が高いとは言えない。

以上の2つの要因のため、Krakatau火山噴火のケースにおけるモデル計算値は、観測値と比較して気温低下を過大評価しており、観測地点数が少ないという不確実性要素を含む実際の気温観測値の変動に近い傾向を示さなかったと考える。

4. 結論

エネルギーバランス気候モデルにおいて、赤外放射式の係数を再設定することにより、実際の気温観測値の変動傾向に近い、火山噴火のみによる気温低下傾向の再現が可能となった。

エアロゾル観測精度が比較的高い1960年代、エアロゾル分布の推測が不確実な1910年代、実際の気温観測値の不確実性が大きくなる1880年代という3つの年代における火山噴火のケースでモデル計算を行い、その結果の妥当性を評価した。年代が新しい2つの火山噴火のケース(Agung火山、Katmai火山)におけるモデル計算では、噴火1～2年後に気温低下のピークが表れ、その翌年にかけて徐々に気温低下量が小さくなり、噴火前年の水準に戻っていく傾向が共通して見られた。この傾向は、両ケースにおいて実際の気温観測値の変動に近いものであった。一方、1900年以前の火山噴火でのモデル計算値と実際の気温観測値との間には大きく差が生じる結果となった。

これより、1900年代の火山噴火のケースを対象とする場合、複雑で計算時間が長い全球気候モデル(GCM)を用いなくとも、本研究で用いたエネルギーバランス気候モデルによる簡易的(=計算時間が短い)モデル計算により、「火山噴火によるエアロゾルの気候影響」を定量的に評価することが可能である。しかし、1800年代あるいはさらに古い年代の火山噴火のケースを対象とする場合は、赤外放射式の係数設定の方法を変更するなどの改良が必要であることが、本研究により明らかとなった。

参考文献

- 1) Makiko Sato, James E. Hansen, M. Patrick McCormick, James B. Pollack, : Stratospheric aerosol optical depth, 1850-1990, *Journal of Geophysical Research*, vol.98, No.D12, pp.22987-22994(1993)
- 2) Data.GISS: Forcings in GISS Climate Model: Stratospheric Aerosol Optical Thickness <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer/>
- 3) Real climate - Climate science from climate scientists, Global trends and ENSO <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2008/07/global-trends-and-ens/> (4 July 2008)
- 4) E. Friis-Christensen and K. Lassen : Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate, *Science*, New Series, Vol.254, No.5032, pp.698-700(1991)
- 5) Hansen, J.E. , and S. Lebedeff : Global trends of measured surface air temperature, *Journal of Geophysical Research*, vol.92, NO.D11, pp.13345-13372(1987)