

溶岩による地形形成の数値シミュレーション

水流 綾子 (指導教員: 河村哲也)

1 はじめに

日本は110の活火山がある世界有数の火山大国である。火山活動によって新たな地殻変動がおき、様々な地形がみられる。日本の活火山として有名なものとしては、鹿児島県の桜島や、長崎県にある雲仙普賢岳、また、富士山も300年ほど噴火はしていないが、活火山である。

ここで溶岩流について説明しておく。溶岩流とは溶けたマグマが地表に噴出したものである。高温の液体状でその温度は800~1200度ほどある。粘度が低く重力によって火口から山麓に向かって流れるが、その速度は最大でも時速30km程度で、溶岩自体によって死者が出ることはほとんどないが、時間経過とともに放熱し固形物に変化することで地形変動には大きな影響を及ぼす。

溶岩による地形変動には、高温の溶岩により山体の構成物質の温度が上がり耐熱温度を超えたことにより地表が溶け出すというものと、時間が経過し溶岩が固化したものが堆積していくことによる地形変動の2種類が考えられる。そこで本研究では、地形の溶融モデルと溶岩固化モデルを作成し、形成される地形の違いを数値シミュレーションを行い、検証する。

2 モデル化・格子生成

2.1 格子

直方体の領域を用いる。地形の形状をマスクで表現するとして、各方向の比率が $x : y : z = 81 : 81 : 40$ である直交等間隔格子を用いる。

2.2 地形モデル

case1. 尾根、case2. 谷、case3. 山の3種類の地形を考えた。溶融の実験ではこのうちcase1. 尾根を用いて岩石の耐熱温度による地形の溶融を観察する。溶岩の固化実験では3つのcaseについて実験する。山部分のマスク0、それ以外の部分のマスクを1としている。

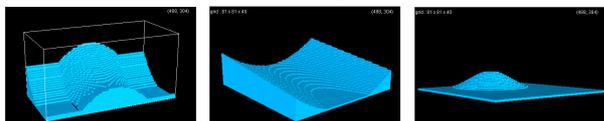


図 1: case1 尾根 図 2: case1 谷 図 3: case3 山

2.3 溶岩モデル

溶岩は地面を溶かすため温度の高い流体として表現する。そして、噴出口から与えられた速度で噴出させる。ただし、重力の方向を逆にとって密度が高いことを温度で表現する。

2.4 境界条件と初期条件

- 境界条件

温度を断熱条件、地面を粘着条件、その他の面を自由流出とした。

- 初期条件

圧力: 0 速度: 0

マスク変化用カウンター (ICT): 0

温度: 以下の図のように case1,2,3 に噴出口を設置
赤が温度 $T=1.0$ を表し、青が $T=0.0$ を表している。

case1 尾根: 奥に噴出口を配置した。溶岩は奥から手前に向かって流れる。

case2 谷: 高いところから低いところへ流れる。

case3 山: 頂上に噴火口を設置、溶岩は右に向かって流れていく。

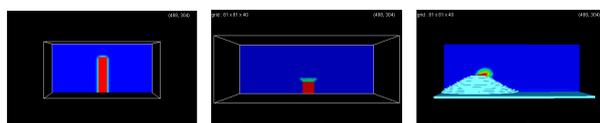


図 4: 尾根噴出口 図 5: 谷噴出口 図 6: 山噴出口

3 計算方法

3.1 基礎方程式

3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と温度方程式を使用する

連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} + \alpha \mathbf{TK}$$

温度方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \beta \Delta T$$

\mathbf{V} : 速度, P : 圧力, Re : レイノルズ数,
 α : 浮力パラメータ, \mathbf{K} : Z方向の単位ベクトル,
 T : 温度, β : 温度の無次元拡散係数

3.2 解法

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法を用いて解き、2次精度中心差分を適用した。

3.3 マスクの計算について

物質はそれぞれの耐熱温度以上になると溶融する。それを考慮し、山体に高温の溶岩が流れ出すと地表面の温度が上がり、溶け出すことがわかっている。そこで溶岩による地形の溶融モデルの作成を目指す。

地形の溶融モデリングの仕組みは、1ステップごとに山の表面の温度によってカウンター ICT を動かし、山体表面温度 T が $T \geq 0.5$ のとき、その格子の ICT を 1 増やす。 $ICT \geq 200$ となったら、新たに表面のマスク 0 をマスク 1 に変更することにより、ICT を 0 に戻す。図 4 から図 5 に変わったように、山体表面が溶けたとわかる。

| | | |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 |



| | | |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |

図 7: 温度変化前

図 8: 温度変化後

次に、溶岩がある温度まで下がったときに地表面で固まることを考える。この溶岩固化モデリングの仕組みは、溶融モデルの逆で温度 T が $T < 0.5$ になり、カウンター ICT が 1 増えて $ICT \geq 200$ となると、山体表面のマスクが 1 から 0 に変わる。これは溶岩が固化して地表につつまがっていることを表している。

4 結果と考察

4.1 地形溶融モデル

火山を構成する主要な岩石の耐熱温度を以下の表 4.1 に示す。この 2 タイプの岩石でできた地形モデルとして、また噴出直後の溶岩の温度を 1200 度として溶融実験をする。

岩石の耐熱温度

| 岩石の種類 | 花崗岩 | 安山岩 |
|-------|--------|---------|
| 耐熱温度 | 570 °C | 1000 °C |

実験結果は以下の図の通り、花崗岩では地形の溶融が速い段階で進み、安山岩では噴出口の周辺以外ほとんど溶けていないことがわかる。溶融モデルから地表面の物質の耐熱温度が高く、溶岩の温度による溶融が少ない地形のほうが、火山噴火によってより高い山体が出来上がると考えられる。

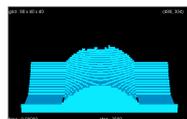
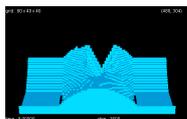


図 9: 花崗岩の場合 図 10: 安山岩の場合

4.2 地形固化モデル

溶岩がしばらく時間がたち、固化して地表に堆積することを考える。ここでは粘性の違いにより、出来上がる地形に差が起きると考え、2つのレイノルズ数で実験比較してみた。

case1. 尾根

3600step 経過後、レイノルズ数 25 で粘性が高いほうが尾根の高い位置で溶岩流が止まっている。逆にレイノルズ数 100 で粘性が低いものは山裾の方まで溶岩流が広がっている。

case2. 谷

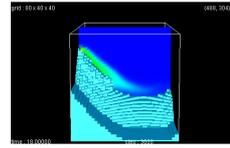


図 11: $Re = 25$

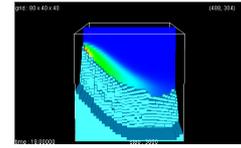


図 12: $Re = 100$

1250step 経過後、レイノルズ数 25 で粘性が高い図 13 のほうは谷の中間ほどで溶岩流が止まっている。一方レイノルズ数 100 で粘性が低いものは谷の下まで溶岩流が滞りなく流れている。

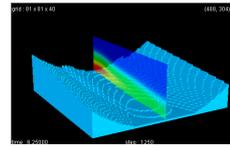


図 13: $Re = 20$

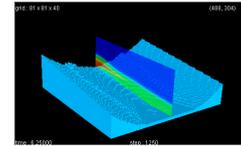


図 14: $Re = 100$

case3. 山

2000step 経過後、図 15 のように粘性の高い溶岩流は山の下まで流れはするが、それ以上は溶岩が広がっていない。一方、図 16 に見られる粘性の低い溶岩流の広がりには溶岩流が山を下りきった後に顕著に見られ、ももとの山体と一体となり山麓が広がり、なだらかな山体が新たにできていることがわかる。

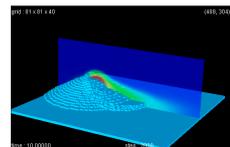


図 15: $Re = 25$

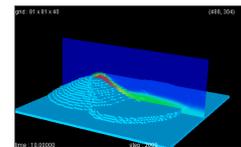


図 16: $Re = 100$

5 まとめと今後の課題

火山噴火による地形変動を、地形溶融と溶岩固化の側面から、さまざまな条件で数値シミュレーションを行い検証することができた。まとめとして、高温の溶岩流では地形溶融が見られ、粘性が低い溶岩流であれば流れの速度が速く、薄く山体に広がっていくため、なだらかな地形ができると考えられる。これはハワイ島のマウナ・ロア山などの山裾が広大で稜線がなだらかな山の特徴とその火山から出てくる溶岩の性質と一致している。

今後は、溶融モデルから溶岩の重力による山体崩壊のシミュレーションをしてみたり、出てきた溶岩の急速な温度変化が考えられる海底火山の固化モデルを検証してみることで、地球の自然現象ダイナミズムに迫っていきたい。

参考文献

- [1] 河村哲也. 数値シミュレーション入門. サイエンス社, 2006.
- [2] 三國産業株式会社ホームページ <http://www.mikunisangyo.co.jp/stone3.html>