

# 地球物理学者によるハワイ島の火山見学案内

## はしもと じょーじ<sup>1</sup>

(要旨) 地球物理学的な視点でまとめたハワイ島の火山見学案内である。本稿は無保証である<sup>2</sup>。本稿に関連していかなる損害が発生したとしても、筆者は一切責任をとらない。

## 1. 地球物理学者による火山見学案内

表題は早川由起夫先生の「ハワイ島の火山見学案内」[1]にちなんでつけさせていただいた。筆者はハワイに行くたび、早川先生のハワイ見学案内を読み直している。この文書は早川先生の見学案内を上書きするものではなく、地球物理学的な視点で早川先生の見学案内を補完するものと思っていただきたい<sup>3</sup>。なお、ハワイ訪問にかかわる基本事項はここでは述べない。各種の旅行ガイドブックを参考にしてください。

筆者はここ10年の間に6回ハワイ火山国立公園[2]を訪れた。うち2回(2009年6月, 2012年7月)はマウナ・ケア(Mauna Kea)山頂で天文観測をおこなった後の天文学者を相手に火山の説明をおこない、4回(2013年3月, 2014年3月, 2015年3月, 2018年3月)は巡検で岡山大学理学部(物理学科, 化学科, 生物学科, 地球科学科)の1~2年生を相手に火山の説明をおこなった<sup>4</sup>。筆者は火山については素人であるが、ハワイの火山はわかりやすく、地球物理学の練習問題として解

いてみたくなるものがたくさん見つかる。以下、筆者がハワイで見たいくつかのものについて述べる。

## 2. キラウエア・カルデラとその周辺

キラウエア(Kilauea)の標高は1,247 m、山頂には5 km × 3 kmの大きさのカルデラがあり<sup>5</sup>、カルデラ内には直径1 kmのハレマウマウ(Halemaumau)火口がある(図1)。2018年3月現在、ハレマウマウ火口の一部は溶岩湖になっていて、溶岩湖の表面でバブルがはじける際に空中へ跳ね飛ばされる溶岩は、ジャッガー博物館(Jaggar Museum)から見ることできる(溶岩湖の頭位が低いときは見えないこともある)。

以前には、キラウエア・カルデラ内に降りるトレイル(Halemaumau Trail)を使ってハレマウマウのすぐ横まで行くことができたが、現在は火口から立ち昇る噴煙のためキラウエア・カルデラ内は立入り禁止になっている。また、キラウエア・カルデラを一周するクレーター・リム・ドライブ(Crater Rim Drive)とクレーター・リム・トレイル(Crater Rim Trail)も、カルデラの南西側は立入り禁止になっている、一周りすることはできない。これは火山ガスが北東貿易風<sup>6</sup>によって南西側に流されるためである。

1. 岡山大学理学部地球科学科  
george@gfd-dennou.org

2. このような文章を掲載するという決定をした遊星人編集部との判断は英断なのか蛮勇なのか、その判定は読者に任されている。

3. 「はしもとを地球物理学者と認めることはできない」という意見は正しいかもしれないが、それに対しては「野暮なことは言わないで」とだけ答える。

4. 岡山大学理学部のハワイ実習は地球科学巡検と生物学実習を混ぜ合わせた内容で実施されている。過去4回の実施内容はウェブ(<http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/%7Efrontier/hawaii.htm>)で見ることができる。

5. 大きさだけなら阿蘇カルデラの方がずっと大きい。

## 2.1 ビジター・センター

ハワイ火山国立公園の入口で入場料を払って中に入ったら、まずキラウエア・ビジター・センター(Kilauea Visitor Center)に行く。噴火に関する情報、立入禁止区域の設定、レンジャーによる解説の時間、などを確認し、地図や書籍を入手する。あと、ここにはまともなトイレがある<sup>7</sup>。

ビジター・センター前の屋根の下に、よくできたハワイ島の立体模型がある(図2)。海底地形も表現されていて、海面上と海面下で山体の傾斜が異なっていることがわかる。また、ハワイ島の火山は、ロイヒ(Loihi)<sup>8</sup>、マウナ・ロア(Mauna Loa)、フアラライ(Hualalai)、と続くロア・トレンド(Loa trend)<sup>9</sup>と、キラウエア、マウナ・ケア、コハラ(Kohala)、と続くケア・トレンド(Kea trend)<sup>10</sup>という、ほぼ平行な2つの曲線に沿って並んでいることも、立体模型から見とれる。

時間があるなら、ビジター・センターから道を渡って反対側に行ってみる。森を抜けると、ボルケーノ・ハウス(Volcano House)の正面玄関前が出る。そのまま直進して建物を通り抜けると<sup>11</sup>、キラウエア・カルデラのへりに出る(図1)。正面にハレマウマウがあり、噴煙が立ち上っているのが見える。右の方にはハワイ火山観測所(HVO)も見える。

## 2.2 キラウエア・イキ

キラウエア・イキ(Kilauea Iki)はキラウエア・カルデラのすぐ隣にあるピット・クレーターである。ピット・クレーターは地下にできた空洞の天井が崩落することで形成される。キラウエア・イキ・クレーターは1959年11月にクレーター壁から溶岩が噴き出て溶岩湖になった。現在、溶岩湖は冷えて固まっており、溶

岩湖の上を歩くことができる。溶岩湖の上に降りるには、キラウエア・イキ・トレイルと呼ばれる一周6.4 kmのトレイルを利用する。トレイルを歩き始める前に、ハワイ火山国立公園が発行しているトレイル・ガイド(Kilauea Iki Trail Guide)[3]をビジター・センターなどで入手しておくといよい。

### 2.2.1 キラウエア・イキ・トレイル

この節の記述は主にトレイル・ガイド[3]に基づいている。

キラウエア・イキ・トレイルの起点はクレーターの北東にあるキラウエア・イキ展望台で、ここからはクレーターの全景を見ることができる。1959年の噴火前、クレーターの底は森林で覆われていて、クレーターの深さは現在の約2倍の244 mであった。クレーター壁から流れ出た溶岩は、クレーターを半分の深さまで溶岩で満たし、噴出口は溶岩湖の下に埋もれた。溶岩の噴出時の温度は1490 K。噴出口から噴き上げられた溶岩は580 mの高さまであがり、これはハワイで観測された最も高い溶岩噴泉となった。現在のクレーターの底はとても平坦で、かつては液体で満たされていたことを実感することができる。また、上から見るとトレイルは白い筋として認識される<sup>12</sup>。

トレイルの起点から出発して反時計回りにクレーターのへりを進んでいくと、クレーターの向こう側(南側))にある丘(プウ・プアイ, Puu Puai)がよく見えるところになる。この丘はスコリア丘で、1959年の噴火で噴き上げられたスコリアが堆積して形成したものである。クレーターの底には噴出口の跡が見え、噴出口に接するクレーター壁面は噴出口からの噴気にさらされたことで周囲とは異なる赤茶けた色になっている。

さらにトレイルを進んでクレーターの底への降り口に着いたら、階段になっているトレイルを降りる。

6. 貿易風(trade wind)はいつも変わらず同じ方向に吹く。風向きがくると変わるようなら南西側だけでなく火口のまわり360°を立ち入り禁止にしなければならなかったはずである。ちなみに、trade windにおいてtradeが示すのは「貿易」ではなく「いつも同じ」である。大航海時代には貿易風を利用して貿易がおこなわれたが、trade windは貿易に利用されたからtradeなのではなく、いつも同じ方向に吹くからtradeなのである。

7. 公園内にトイレがある場所は限られているので、行けるときに行っておく。

8. ハワイ島の南東沖にある海底火山。現在の山頂は海面下約1,000m。

9. ロア・トレンドは、マフコナ(Mahukona)、カホオラウエ(Kahoolawe)、ラナイ(Lanai)、ウェスト・モロカイ(West Molokai)、と続く。

10. ケア・トレンドは、ハレアカラ(Haleakala)、ウェスト・マウイ(West Maui)、イースト・モロカイ(East Molokai)、と続く。

11. ボルケーノ・ハウスは1877年開業の由緒正しいホテル。正面玄関から入ってただ通り抜けるだけというのは気後れしてしまうかもしれないが、筆者は今まで一度も止められたことがないので多分大丈夫なはず。うちの学生さんに言わせると、売店の土産物の品質はピカイチとのこと。

12. トレイルが周囲よりも白く見えるのは、ハイカーが踏みつけることでトレイル上の粒子が周囲にある粒子よりも細かくなっているためと思われる。

1959年の噴火では、溶岩の噴出が止まった後、溶岩湖に貯まった溶岩の一部が噴出口から排出されて溶岩湖の表面は約15 m下がった<sup>13</sup>。溶岩湖の表面を覆っていたクラストの一部は、かつて表面があった位置に取り残されて現在はテラスを作っている(lava subsidence terrace)。クレーターの底に降りるときにテラスの位置を同定できれば、そこがかつての溶岩湖の表面ということになる。

クレーターの底に降りて岩石を見ると、緑色をしたカンラン石の結晶を見つけることができる(図3)<sup>14</sup>。トレイルを少し進んで、1959年の噴火で溶岩を噴き出した噴出口に近づく。噴出口とその周辺は、崩落した岩石で覆われており足場が悪い。足下の岩石は崩れやすく危険であるが、柵などはないので、噴出口を覗き込むところまで移動することができる<sup>15</sup>。また、噴出口から振り返って反対側を見ると、クレーター壁に植生のない部分があるのを見つけることができる。これは噴出口から放出されたスコリアが積もった場所である。

噴出口を過ぎて少し進むと、トレイルの左右に高くなった場所が現れる。これらの高まりは、プウ・プアイから崩れ落ちたもので<sup>16</sup>、溶岩湖が固まる前に移動して現在の位置に落ち着いたとのこと。また、周囲には蒸気が噴き出している場所をいくつか確認することができる。地中にしみ込んだ雨水が、内部にあるまだ高温の岩石によって加熱されて蒸気になったもので、うっかり近づくとやけどする熱さである。蒸気が噴き出している場所の周囲は、噴気から析出したCaSO<sub>4</sub>やSiO<sub>2</sub>によって白く見える。

左右の高くなった場所の間を抜けると、広く平坦な表面が現れる。平坦なのはかつてクレーターが液体の溶岩で満たされていたためである。トレイル・ガイドの13番の標識の左側には、ドリル・コア採取<sup>17</sup>をお

こなった場所をいくつか見つけることができる<sup>18</sup>。いくつかの穴には蓋が付けてあり、高温の蒸気が噴き出しているものもある<sup>19</sup>。ドリル・コアを最後に採取したのは1988年で、そのときは地下73-100 mにメルトがわずかに残っていただけであった。1990年代の半ばまでに溶岩湖は完全に固化したと考えられている。ドリル・コアの採取によって、もともとのクレーターの底が噴火前に比べて沈んでいることも明らかにされた。溶岩湖の深さは135 mと推定されている。

クレーターの底を横断し終えた後は、森の中のトレイルを登ってクレーターのへりまで上がる。クレーターの底から出る前に振り返ると、目の前には周囲を急な崖で囲まれたキラウエア・イキ・クレーターの平坦な地面が広がっている(図4)。そしてその先の遠くにはマウナ・ロアのなだらかな山体が見える。マウナ・ロアの山頂は海拔4,000 m以上、キラウエアからでも3,000 m 近い標高差があるのだが、なだらかすぎて山であるように見えない。それでも季節によっては山頂付近が雪で白くなるので、亜熱帯でも雪が積もるくらいに高い山なのである。

## 2.2.2 溶岩湖冷却にまつわる考察

キラウエア・イキでは、溶岩の噴出による溶岩湖の形成から冷却・固化に至る一連の過程が様々な方法で観測されている。ここでは、溶岩湖表面の沈降速度、溶岩湖内部の温度がキュリー温度になる深さ、溶岩湖表面の温度偏差(溶岩湖周辺の地表温度との差)、という3つの観測量について、Turcotte and Schubertの教科書[4]を参照しながらその整合性を確認する。

溶岩湖表面の現在の沈降速度は $dh/dt = -2 \text{ cm/year}$ である[3]。溶岩湖の内部が現在も冷え続けており、冷えて体積が小さくなることを反映していると考えられている。溶岩湖の表面が下がるのは全て冷却による収縮によるものとして、沈降速度から溶岩湖の冷却速度 $dT/dt$ を見積もる。

$$\frac{1}{D} \frac{dh}{dt} = a \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

ここで $D$ は溶岩湖の深さ、 $a = (1/V)(dV/dT)$ は岩石の体積熱膨張率である。表1にある値を用いると、溶

13. 火道は湧き出し口と排出口のどちらにもなる。  
 14. 目で見える大きさのカンラン石の結晶は、クレーターの西側では簡単に見つかるが、クレーターの東側に行くが見つからない(筆者調べ)。クレーターの西と東で差がある理由は筆者は知らない。  
 15. 踏み跡があるので近づく人はある程度の数いると思われるが、トレイルなのかどうかは不明。何があっても筆者は責任をとりません。  
 16. 降り積もったスコリア丘の重さによって、クレーター壁が崩れたのだろうか？  
 17. 穴は、溶岩湖の冷却過程を調べるために開けられた。  
 18. トレイルのすぐ近くから、かなり遠く(壁の近く)まで、探してみると穴はたくさん見つかる。

19. 穴から蒸気が噴き出しているということは、穴を開けたことで局所的に熱流量が変わったということである。場を乱さずに熱流量を計測するのはいかに難しくそうである。

表1：溶岩湖のパラメタ.

|               | 値   | 文献  |
|---------------|---|-----|
| 溶岩湖の深さ        | $D = 135 \text{ m}$                                     | [3] |
| 溶岩湖表面の沈降速度    | $dh/dt = -2 \text{ cm/year}$                            | [3] |
| 溶岩湖周囲の地表温度    | $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$                       | [5] |
| 岩石の密度         | $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$                            | [6] |
| 岩石の比熱         | $C_p = 1000 \text{ J/K/kg}$                             | [4] |
| 岩石の体積熱膨張率     | $\alpha = 3 \times 10^{-5}$                             | [4] |
| 岩石の熱伝導率       | $k = 2.5 \text{ W/m/K}$                                 | [4] |
| キュリー温度        | $T_c = 580 \text{ }^\circ\text{C}$                      | [7] |
| ステファン・ボルツマン定数 | $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ |     |

岩湖の冷却速度は5 K/yearになる.

冷却は溶岩湖の表面からおこなわれているとすると、冷却速度から熱流量  $q$  を求めることができる.

$$q = -\rho D C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

ここで  $\rho$  は岩石の密度、 $C_p$  は岩石の比熱である. 表1にある値を用いると、熱流量は  $30 \text{ W/m}^2$  となる.

溶岩湖の表面は、溶岩湖の冷却による熱流量がない周囲の表面に対して、冷却による熱流量  $q$  だけ余計に表面から大気へ熱を輸送しなければならない. この余計な熱の輸送は地表面が射出する熱放射が増えることでおこなわれていると仮定して、溶岩湖表面の温度偏差  $\Delta T_s$  を求める. 温度偏差は、溶岩湖表面の温度  $T_s$  の溶岩湖周辺の表面温度  $T_0$  に対するずれとして、以下のように定義する.

$$\Delta T_s = T_s - T_0 \quad (3)$$

地表面が射出する熱放射  $F$  は、地表温度を  $T$  とすると

$$F = \sigma T^4 \quad (4)$$

ここで  $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数である. 温度偏差  $\Delta T$  と溶岩湖の冷却による熱流量  $q$  の関係は

$$q = \left( \frac{dF}{dT} \right)_{T_0} \Delta T_s \quad (5)$$

表1にある値を用いると、 $q = 30 (\text{W/m}^2)$  のとき  $\Delta T_s = 6 \text{ K}$  となる. 地球観測衛星 TERRA に搭載された ASTER の観測によると、キラウエア・イキの表面温度は周辺地域に比べて  $3 \text{ K}$  程度高温になっている [5]. 熱放射以外に潜熱や顕熱の形で輸送される熱もあることを考えると、先の温度偏差の見積りは ASTER の観測と整合的である.

熱流量からは溶岩湖内部の温度勾配を見積もることもできる. 溶岩湖内部で熱は熱伝導によって輸送されるなら、熱流量と温度勾配の関係は次のようになる.

$$q = -k \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

ここで  $k$  は熱伝導率、 $z$  は地表を0とした高度/深度、熱流量  $q$  は地表から大気に向かう向きを正とした. 表1にある値を用いると、溶岩湖内部の温度勾配は  $-10 \text{ K/m}$  となる (地中に潜るほど高温になるので、温度勾配は負になる).

磁気測定によって溶岩湖内部の温度がキュリー温度になる深さの推定がなされており、その深さは  $50 \text{ m}$  とされている [7]. 熱流量から見積もった温度勾配を用いると、溶岩湖内部の温度がキュリー温度  $T_c$  になる深さ  $z_c$  は

$$T_c = T_s + \frac{dT}{dz} z_c \quad (7)$$

表1にある値を用いると地下  $40 \text{ m}$  と計算される. これは磁気測定によって推定された深さにほぼ一致している.

### 2.3 サーストン溶岩チューブ

キラウエア・イキのすぐ横には、中に入ることでできるサーストン溶岩チューブ (Thurston Lave Tube) がある. キラウエア・イキ・トレイルを歩いたら、ついでに溶岩チューブに寄り道して中を歩いてみるとよい. ちなみに、この溶岩チューブはキラウエア・イキの溶岩湖より高い位置にあり、1959年の噴火とは無関係である<sup>20</sup>.

トレイルの順路に従ってピット・クレーターの中を

20. サーストン溶岩チューブの発見は1913年.



図1: ボルケーノ・ハウスから見たキラウエア・カルデラ。中央左にあるハレマウマウ火山口から噴煙があがっている。右奥でなだらかに裾をひいているのはマウナ・ロア。



図6: ブウ・ブアイとデバステーション・トレイル。

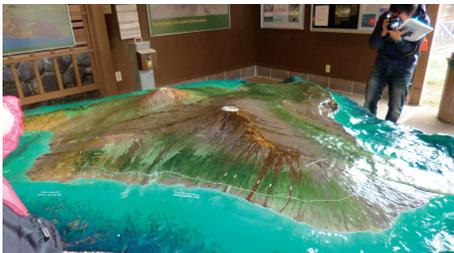


図2: キラウエア・ビジター・センターにあるハワイ島の立体模型。(撮影者: 奥永明音)

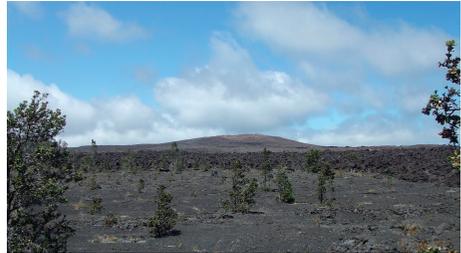


図7: マウナ・ウルと1969-1974年の噴火で噴き出した溶岩。手前はパホイホイだが、その奥にアアがあり、さらにその奥はまたパホイホイ。



図3: 緑色をしたオリビンの結晶を含む岩石。(撮影者: 高木聖子)



図8: 溶岩ツアー。目の前で溶岩がひだを作りながらゆっくりと流れていく。



図4: キラウエア・イキ・クレーター。いちばん手前は溶岩湖の沈降で生じた段丘 (lava subsidence terrace) の上面で、右に写っている人々は段丘の崖を登っているところ。その奥は平坦なクレーターの底で植生がほとんど見られないのに対し、クレーターの壁は植生で覆われている。写真中央を奥に向かって伸びるぼんやりとした白い帯はトレイル。左の壁の上にはブウ・ブアイ(スコリア丘)があり、さらにその奥にはマウナ・ロアが見える。この写真が撮影されたのは7月で、マウナ・ロア山頂に雪はない。



図9: 飛行機から撮影したマウナ・ケア。マウナ・ロア(図4)と違って見た目がギザギザしている。この写真を撮影したとき、下層には雲が広がっているが、山頂は雲の上に出ている。

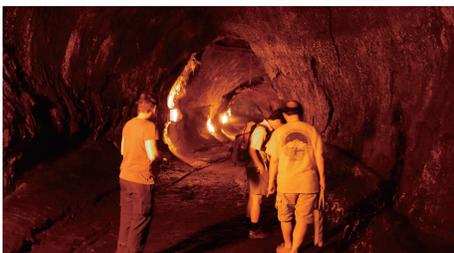


図5: サーストン溶岩チューブ。(撮影者: 高木聖子)



図10: マウナ・ケア山頂で日の出の時間に西を向いて撮影した写真。手前の丸い2つのドームはケック天文台、その後ろにある銀色のドームはすばる望遠鏡。左に見える2つの黒いこぶはスコリア丘。その奥にある濃青と茜色の境界で区切られた上に凸の青黒い三角はマウナ・ケアの影。

降りていって、溶岩チューブの入口に到着したら、かつて赤熱した溶岩が流れていた溶岩チューブの中に入る。照明が設置されているので、懐中電灯を持たずとも溶岩チューブの通行に問題はないが、壁面や天井を観察するなら懐中電灯があるとよい(図5)。

壁を見ると、かつてここを流れた溶岩流の表面がどの高さにあったのかわかる。溶岩チューブの天井には、したたり落ちる途中の溶岩が固まってできるつらら石(溶岩鍾乳)が形成されるらしいが、現在のサーストン溶岩チューブの天井に溶岩鍾乳は見られない。もともとは天井一面に溶岩鍾乳がぶら下がっていたのだが、溶岩鍾乳は折り取られて持ち去られてしまったらしい<sup>21</sup>。

順路に従って進み、溶岩チューブの天井が崩落したところから地上に出る。溶岩チューブはここから先にも続いているが、立入禁止になっている<sup>22</sup>。

サーストン溶岩チューブ前の駐車場は駐車できる台数が少ないこともあり、いつも混雑していて駐車スペースを見つけるのが難しい。そのためか、この駐車場は駐車時間に30分の制限が付けられている<sup>23</sup>。それでも混雑しているので、サーストン溶岩チューブ前の駐車場に車を駐車したいなら、混雑する前の時間に行くのがよい。

## 2.4 プウ・プアイ(スコリア丘)

1959年の噴火で形成されたスコリア丘であるプウ・プアイには、デバステーション・トレイル(Devastation Trail)を利用してアプローチする。トレイルの起点となるデバステーション・トレイル駐車場では、ネネ(nene)をよく見かける。ネネはハワイ州の州鳥で、ハワイの固有種である<sup>24</sup>。駐車場ではネネを躑ねないように気をつけなければならない<sup>25</sup>。また、ネネに餌をやってもいけない。

### 2.4.1 デバステーション・トレイル

背の高い木に囲まれたデバステーション・トレイル駐車場から森の中に続くトレイルを歩いていくと、あるところで周囲にある木の樹高が急に低くなり、さらに進むと植生はだんだんとまばらになっていく。終には植生はなくなって地面はスコリアで埋め尽くされ、目の前にプウ・プアイが現れる(図6)。降下したスコリアでもともとあった森が焼かれた後、スコリアの降下量が少なかった地域では植生が回復しつつあるのに対し、スコリアの降下量が多かった地域では未だ植生が回復していないのだと思われる。降下スコリアが火口から南西方向に向かって分布していることは、Google マップで航空写真を見るとよくわかる。スコリアが南西方向に分布しているのは、貿易風が北東から吹いているからである。

トレイルはプウ・プアイをまくように右に曲がる。ここでは舗装されたトレイルの外に出るはいけないことになっていて、プウ・プアイに登ることは禁止されている。トレイルに沿ってプウ・プアイを左に見ながら進む途中では、トレイルの左右に溶岩樹型(樹木が燃え尽きたあとの空洞)をいくつか見つけることができる。やがてトレイルはキラウエア・イキ・クレターへのり、キラウエア・イキ展望台のほぼ対角に位置するところに突き当たる。ここからリムに沿って左に延びる道はスコリアに埋もれて通行止めになっている。リムに沿って右に伸びる道のすぐ先は、トレイルの終点プウ・プアイ駐車場である。キラウエア・イキを覗き込んだら、車に戻るため来た道を引き返す。

帰りは足下にあるスコリアの大きさに注意してみる。国立公園が発行しているトレイル・ガイドには「手に取って観察してみよう。観察し終わったら、元あったように戻すこと」と書いてあるので、遠慮なくスコリアを手にとって観察する(終わったら元に戻す)。トレイル脇のスコリアを見ていくと、噴出口からの距離に応じてスコリアの大きさが変わる[8]ことを確認することができる<sup>26</sup>。

### 2.4.2 降下スコリアにまつわる考察

噴出口から吹き上げられた粒子の運動を考える。粒

21. 言うまでもないことだが、国立公園内の物を破壊してはいけないし、持ち帰ってもいけない。

22. 以前は立入可能だった(「懐中電灯を持って、気をつけて入るように」と書かれた看板があった)が、現在(2018年3月)は閉鎖されている。

23. キラウエア・イキ・トレイルの一周を30分で走破することはできないので、サーストン溶岩チューブ前に駐車してキラウエア・イキ・トレイルを歩くことはできない。

24. 筆者はネネの鳴き声を聞いたことはないが、「ネーネ」と鳴くらしい(ネネという名前は鳴き声に由来するらしい)。

25. ネネを躑ねたら100 USDの罰金を科せられる、という話を聞いた。

26. トレイルを外れてスコリア丘に近づくことができれば、もっとよく大きさの変化を確認することができるはずであるが、トレイルを外れることは禁止されている。

子に働く力として重力と抵抗力を考えると、粒子の鉛直方向の運動方程式は、

$$m \frac{dw}{dt} = -mg + \rho_a C A \frac{(W-w)^2}{2} \quad (8)$$

ここで  $m$  は粒子の質量、 $w$  は粒子の鉛直速度、 $g$  は重力加速度、 $\rho_a$  は大気密度、 $C$  は抵抗係数、 $A$  は粒子の断面積、 $W$  は大気鉛直速度である。簡単のため粒子は球形であることにすると、粒子の質量と断面積は粒子のバルク密度  $\rho_s$  と半径  $r$  を用いて  $m = 4\pi r^3 \rho_s / 3$ 、 $A = \pi r^2$  と書くことができ、運動方程式は

$$\frac{dw}{dt} = -g + \frac{3\rho_a C}{8r\rho_s} (W-w)^2 \quad (9)$$

となる。この式の中に、粒子の特性を表わすパラメータは  $r\rho_s$  の形で入っていることから、 $r\rho_s$  が同じ値となる粒子は同じ運動をすることがわかる[9]。

大気鉛直速度  $W$  は 0 として運動方程式を積分すると

$$w(t) = -w_\infty \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (10)$$

ここで  $w_\infty = \sqrt{8gr\rho_s/3\rho_a C}$ 、 $\tau = \sqrt{8r\rho_s/3g\rho_a C}$  で、粒子の初速は  $w(t=0) = 0$  とした。  $w_\infty$  は終端速度で、重力と空気抵抗がつり合う速度である。粒子の速度は  $\tau$  くらいの時間スケールで終端速度に落ち着く。表2にある数値を用いて計算すると、直径2 cmのスコリアの終端速度は19 m/s、時間スケールは1.9 sとなる。数100 mの高さから落下する直径2 cmのスコリアは速やかに終端速度に達すると考えてよい<sup>27</sup>。

ガスが上向き速度を持たないとき ( $W = 0$ )、上向きに打ち上げられた粒子が到達する高度  $z_{\max}$  は終端速度を使っておおよそ

$$z_{\max} \sim \frac{w_\infty^2}{2g} \quad (11)$$

と見積られる。すなわち、直径2 cmのスコリア ( $w_\infty = 19$  m/s) はせいぜい数10 m程度までしか上がらない<sup>28</sup>。小さく軽い粒子は空気抵抗の影響を強く受

表2: 降下スコリアのパラメータ。

|            | 値  | 文献  |
|------------|--|-----|
| スコリアの半径    | $r = 1$ cm                                   |     |
| スコリアのバルク密度 | $\rho_s = 650$ kg/m <sup>3</sup>             | [8] |
| スコリアの熱拡散係数 | $\kappa = 1 \times 10^{-6}$ s/m <sup>2</sup> | [4] |
| 溶岩噴泉の高さ    | $H = 580$ m                                  | [3] |
| 水平風速       | $U = 5$ m/s                                  |     |
| 抵抗係数       | $C = 0.4$                                    |     |
| 大気密度       | $\rho_a = 1.2$ kg/m <sup>3</sup>             |     |
| 重力加速度      | $g = 9.8$ m/s <sup>2</sup>                   |     |

けるため、ガスが上向きの速度を持たないと高く上がることができない。

次にスコリアの滞空時間を考える。粒子は噴出口で上向きに噴き出すガスによって速やかに最高高度  $H$  まで持ち上がり、その後、終端速度で落下するとしたら、滞空時間  $T$  は

$$T \simeq \frac{H}{w_\infty} \quad (12)$$

となる。直径2 cmのスコリアが580 mの高さから落ちるのにかかる時間は約30 sである。この落下の間に、スコリアは冷却して表面にクラストが形成される。クラストの厚さ  $l$  を熱拡散係数  $\kappa$  から見積もると、

$$l \simeq \sqrt{\kappa T} = \left( \frac{3\kappa^2 \rho_a C H^2}{8gr\rho_s} \right)^{1/4} \quad (13)$$

直径2 cmのスコリアでは5 mmくらいの厚さのクラストが形成されるので、落下したスコリアは固体として振る舞うと考えてよいだろう。固体のスコリアは落下した後に転がって、スコリア丘をつくる。スコリア丘の形(傾斜)は安息角<sup>29</sup>で決まる。

もうひとつ、粒子が水平風で流される距離を見積もる。直径2 cm程度のスコリアは空気抵抗によって速やかに大気速度に馴染むと考えられるので、水平方向の輸送距離  $L$  は水平風速  $U$  に滞空時間  $T$  をかけ算したものとして見積もると、

$$L \simeq UT = UH \sqrt{\frac{3\rho_a C}{8gr\rho_s}} \quad (14)$$

表2にある数値を用いると、水平方向の輸送距離は

27. 積分するのは楽しいのでつい積分してしまっただが、積分しないでもだいたいことはわかる。終端速度は運動方程式に  $dw/dt = 0$  を代入することで簡単に求まり、時間スケールは  $\tau \sim w_\infty/g$  として見積もればよい。

28. 速い速度で打ち上げればより高くまで上がるが、そんなに高くは上がらない。運動方程式を2回積分して初速度と到達高度の関係を解析的に導けば、ここに示した雑な見積りでも十分であることがわかる。

29. 安息角は30°くらいだが、プウ・ブアイの傾斜は30°よりはきつように見える。

表3：アアとパホイホイの比較\*。

|             | アア            | パホイホイ          |
|-------------|---------------|----------------|
| 溶岩噴出率       | 大             | 小              |
| 溶岩流の前進速度    | 速(>10 m/hour) | 遅(1-10 m/hour) |
| 流路          | チャンネルをつくる     | チューブをつくる       |
| フロー・ユニットの厚さ | 厚い(2-10 m)    | 薄い(0.2-2 m)    |
| 温度          | 低め            | 高め             |
| 粘性          | 高め            | 低め             |

\* Volcano World (<http://volcano.oregonstate.edu/lava-flows>)[11]を一部改変。

150 mとなる<sup>30</sup>。これは噴出口からプウ・プアイのピークまでの距離とほぼ同じである。

### 3. チェイン・オブ・クレーターズ・ロード

チェイン・オブ・クレーターズ・ロード(Chain of Craters Road)は東リフト・ゾーン上に生じた多数のピット・クレーターのそばを通過して海岸まで下る道路。1969年から1974年にかけての噴火で道路の一部が溶岩で覆われたため、現在の道路は新しくルートを変えて作り直されたものである。かつては海岸沿いにカラパナ(Kalapana)までつながっていたが、現在はプウ・オオ(Puu Oo)から噴き出した溶岩によって分断され通り抜けることはできなくなっている<sup>31</sup>。

#### 3.1 ナパウ・トレイル

かつてのチェイン・オブ・クレーターズ・ロードが溶岩流で埋められて行き止まりになったところはマウナ・ウル(Mauna Ulu)駐車場として整備され、ナパウ・トレイル(Napau Trail)の起点となっている。トレイルをプウ・フルフル(Puu Huluhulu)まで歩くなら、トレイル・ガイド(Mauna Ulu Eruption Guide) [10]を入手しておくといい。

まず最初は、トレイルヘッドから森の中を南に延びるトレイルに入って、1969年に噴火した割れ目を見に行く。森を抜けると、割れ目噴火でつくられたスパター・ランパート(spatter rampart)の裏に出る。スパター・ランパートはスパターがへばりつくことで形成される。割れ目の側からスパター・ランパートを見

ると、へばりついた溶岩が重力で垂れる途中に冷えて固まったことがよくわかる。スパターは壁面に付着するくらいには軟らかかったが、流れ落ちるほどには軟らかくなかったことから、スパター・ランパートを形成した溶岩噴泉の高さが制約される(高い溶岩噴泉は落下中に冷えて固まるのでスコリアとなり、低い溶岩噴泉は落下時の溶岩が高温で軟らかいので流れてしまう)。

トレイルの目印となっているアフ(ahu, 積み石)に従って、ランパートを左に見ながら少し移動してから、割れ目を飛び越える。かつて、ここら辺は現在よりも高い位置まで溶岩で埋め尽くされていたが、溶岩の噴出が止まった後、溶岩を噴き出した割れ目が排出口となって固化する前の溶岩を吸い込んで、地表は現在の高さまで下がった。マッシュルーム状になって残った溶岩樹型から、溶岩がどの高さまであったのかを知ることができる<sup>32</sup>。また、割れ目を見るといかにも吸い込まれる途中の溶岩が固まったような模様が見える。

トレイル・ガイド[10]には、トレイルの脇に堆積したスコリアをどかしてみるとペレの涙(Pele's tear)やペレの髪の毛(Pele's hair)を見つけることもできる、とある<sup>33</sup>。どちらも溶岩が空中で固まったもので、ペレの涙は滑らかな表面を持つ雫状の形、ペレの髪の毛は細長い糸状の形である。

割れ目を離れてトレイルをプウ・フルフルに向かって進む。周辺を覆っている溶岩はだいたいパホイホイ(pahoehoe)だが、一部にアア(aa)も見られる(図7)。表面をがさがさのクリンカー(clinker)で覆われているのがアア、表面が滑らかなのがパホイホイである(表

30. 解析的に積分して見積もっても結果はたいして変わらない。

31. 一般車両の通行は許可されていない緊急避難用の未舗装道路が建設されているが、貫通はしていない。

32. 樹木に接した溶岩は冷やされて固化するため、溶けた溶岩が排出された後も頭位が保存される。

33. ペレの涙はデバステーション・トレイルの方が見つけやすいと思う。

3). トレイルはアアを避けて<sup>34</sup>キプカ(Kipuka, 周囲を溶岩流で囲まれているが溶岩流に覆われることなく島状に植生が残った場所)の中を抜ける。アアとパホイホイに化学組成の違いはなく、溶岩噴出率や温度の違いによって同じ溶岩がアアになったりパホイホイになったりする。表面はがさがさのアア溶岩も、内部はみっちり詰まっている。クリンカーの厚さは通常1-2 mであるが、10 mになる厚いものもある。

パホイホイ上につけられたトレイルを移動してプウ・フルフルの登り口にたどり着く、ちょっときつい登りをがんばって上に上がると、マウナ・ウルから噴き出した溶岩で埋め尽くされた大地を一望することができる。すぐ南東に見える丘がマウナ・ウルである。

噴火前に存在したピット・クレーターいくつかはマウナ・ウルの溶岩で周囲と同じ高さまで埋められたが、現在はわずかな凹みになっているとのこと。溶岩で一度は完全に埋められたクレーターがまた凹んでいるのは、クレーターを埋めた熱い溶岩が冷却して収縮したためである(周囲も冷却によって収縮するが、クレーターは厚みがある分だけ収縮による沈降量が多い)。また、クレーター内部を埋めた熱い溶岩がまだ十分に冷えていないため、クレーターのあった場所からは噴気も見られるとのこと。冷却の時間スケールは、厚さ $D$ と熱拡散係数 $\kappa$ を使って $D^2/\kappa$ と見積もることができる。熱拡散係数はおよそ $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ の大きさなので、10 mの厚さの溶岩流は約3年で冷えるが、深さ100 mのピット・クレーターを埋めた溶岩が冷えるには約300年かかる。

### 3.2 溶岩チャネル

チェイン・オブ・クレーターズ・ロードの起点から7.4 mileの地点で、道路は溶岩チャネル[12]を横切る。溶岩チャネルを観察する展望台が設置されているので、溶岩チャネルを上から見るができる。この溶岩チャネルをつくった溶岩はマウナ・ウルから噴出したもので、チェイン・オブ・クレーターズ・ロードと交わるのは噴出口から4.4 km地点。溶岩流がこの地点に到着したのは噴火開始から8時間後ということなので、溶岩流先端の平均前進速度は9 m/minということに

なる。堤防をつくっている溶岩は80-150 mの幅で広がっていて、その中に深さ $\sim 2$  mで幅 $\sim 11$  mのチャネルがある。溶岩噴出率の見積り $35 \text{ m}^3/\text{s}$ を使うと、このチャネルを流れた溶岩の流速はおおよそ $100 \text{ m}/\text{min}$ となる。これはチャネルがないときの前進速度の約10倍の速度である。冷却速度(硬くなって流れなくなるまでの時間)は変わらないとしたら、溶岩はチャネルを流れることで10倍遠くまで流れることができるようになったことになる。

### 3.3 オーシャン・エントリー

崖をくだって海まで出ると道路は左に曲がってしばらく海沿いに進む。そしてプウ・オオから流れてきた溶岩流にぶつかったところでチェイン・オブ・クレーターズ・ロードは終点となる。駐車場はなく、道の片側に縦列駐車する。

現在、プウ・オオから噴き出した溶岩のほとんどは、溶岩トンネルを通過して海まで運ばれる。溶岩トンネルの天井にはところどころ崩落して穴が開いているところがあり、暗くなると穴を赤い輝点として見ることができる。これはトンネルを流れる高温の溶岩が出す熱放射が穴から外に漏れだしたもので、点をつなげることで現在溶岩が流れている溶岩トンネルの経路を推測することができる。

溶岩が海に流れ込む流入口(ocean entry)の位置は定まっておらず時折場所を変えるが、溶岩で熱せられて蒸発した海水が大気中で凝結してできる白い雲がもくもくと立ち上がっているの、流入口があればそれがどこにあるのかすぐにわかる<sup>35</sup>。

立ち入り禁止にはなっていないので道路の終点に車を停めて歩いていけば流入口に近づくこともできるが、安易な気持ちで流入口を見に行くのはやめた方がよいと思う。筆者は昔、流入口の近くまで歩いて行ってパトロール中のレンジャーに捕まり、「こんな危険なところにいたらダメだ、すぐに立ち去れ」と叱られました。溶岩ベンチが崩落したりすると本当に死にます<sup>36</sup>。それでも流入口に近づきたい人は、危険であることを理解して、しっかり準備(飲料水、懐中電灯<sup>37</sup>、など)を整えた上で出発してください。

34. アア溶岩を踏むとガサガサして痛いので「アア」って言うちゃう。パホイホイ溶岩の上はホイホイ歩ける、と大学の先輩に教えられた。

35. 2018年3月は溶岩が海に流れ落ちておらず、陸と海の境界から立ち上がる白い雲はなかった。

36. 今も無知だが、当時はもっと無知だった。

37. 陽が落ちると真っ暗になる。

## 4. 溶岩ツアー

溶岩が地表を流れているところまで連れていってくれるツアーがある。連れていってくれるの意味は「道案内してくれる」<sup>38</sup>であり、移動は自分の足で歩く。溶岩が地表を流れる場所は日々変わるので、歩く距離<sup>39</sup>は出発直前までわからない。また、出発地が変更になることもある。筆者が参加した3回のツアーのうち2回はカラパナから溶岩の上を歩くルート、もう1回はプウ・オオの北側からジャングルを通り抜けるルートであった。溶岩の上を歩くルートは比較的歩きやすいが、陽が出ると日差しの中を延々と歩くことになるのできつい<sup>40</sup>。もう一方のジャングルを通り抜けるルートは、強い日差しで痛めつけられることはないが、必ずしも楽であるとは限らない。筆者が参加したときは一部で腰まで泥水に浸かるような道を片道2時間近く行くことになり、めちゃくちゃきつかった<sup>41</sup>。

誰でも参加できるとは思わないし、考えようによっては危険なツアーであるようにも思うのだが、覚悟のある人<sup>42</sup>には強くお勧めする。目の前で溶岩が流れていくところを見るのは、ちょっと感動してしまう体験だった(図8)。筆者が見たのは3回ともパホイホイ溶岩で、トウ(toe)の一部が破れては新しいトウが形成されるという過程が目前でくり返された。表面が固まりつつあるロープの内部が流れることで縄状模様がつくられていく。溶岩流の向こう側の景色は、溶岩から発せられる熱のために揺らいで見える。赤熱した溶岩に近づくと猛烈な熱さを感じる。熱いのを我慢して近づいて、木の棒で赤い溶岩を突いてみると木の棒の先端に火がつく。軽く押しただけだと棒は刺さらない

38. 溶岩が駐車場のすぐ近くを流れている場合を除いて、ガイドなしで溶岩が流れている場所にたどり着くのは難しいと思う。

39. 昨日は往復5マイルだったが、今日は往復15マイルになる、ということもあるとのこと。

40. 出発前に1人につき2リットル以上の飲料水を持つように指示された。また、途中にトイレはなく、見渡す限り溶岩がただ広がっているだけなので隠れるところもない。

41. 還暦をすぎた生物学科の教授は往路で体力を使い果たしたように見えた。筆者は「彼は生きて帰れないのではないか」と思った(が、ガイドさんと学生さんに助けられて無事生還しました)。このツアー中、筆者はリタイアしたいと思いついてきたが、終わってみるとこれがいちばん楽しいツアーだった。生還した教授も「一生の思い出(冥土の土産?)になる素晴らしい体験でした」と言っている。

42. 参加は自己責任です。筆者は一切の責任をとりません。

が、もうちょっと力を加えるとそこからはズブズブと潜っていくので、表面にクラストができていことがわかる。溶岩に刺した棒を横方向に動かして、溶岩の粘り気を感じる<sup>43</sup>。「だから何?」と言われると返す言葉はないが、筆者は機会があればまた行きたいと思っている。

## 5. マウナ・ロアとマウナ・ケア

マウナ・ロアとマウナ・ケアの鞍部を抜けてハワイ島を東西に横断するサドル・ロード(Saddle Road)<sup>44</sup>は、1998年の「ハワイ島の火山見学案内」以降に大幅な改修がおこなわれ、現在はレンタカーも通行できるようになっている<sup>45</sup>。サドル・ロードから分岐してマウナ・ケアの山頂までつながるマウナ・ケア・アクセス・ロード(Mauna Kea Access Road)も、MKVIS(Mauna Kea Visitor Information Station)までは普通の車で行ける。その先のマウナ・ケア山頂まで登るには、末舗装区間があるので四輪駆動車を必要とする[13]<sup>46</sup>。

### 5.1 マウナ・ロア

マウナ・ロアは地球最大の火山と言われている。山頂の標高は海拔だと4 kmほどだが、ハワイ島周辺の海の深さは約5 kmなので、そこから測ると山頂の高さは約9 kmとなる。また、噴き出している玄武岩質の溶岩の粘性が小さいため山体の傾斜はととてもゆるやかで、富士山のような円錐形の成層火山に比べると高さのわりに山体の体積は圧倒的に大きい。頂上にはカルデラがあるが、のっぺりとした外形をしている。中腹には大気CO<sub>2</sub>濃度を長期にわたって測定していることで有名な観測所(Mauna Loa Observatory)がある。1843年以降に33回の噴火、最後の噴火は1984年、またいつ噴火してもおかしくない。

43. ちょっと力を入れても動かないが、もうちょっと力を入れると動き出す。溶岩はニュートン流体よりはビンガム流体で近似するべきと実感される。

44. 改修後はダニエル・K・イノウエ・ハイウェイ(Daniel K. Inouye Highway)という名称に変更された。

45. レンタカー会社によって対応が異なることもあるので、借りる前に確認が必要。

46. レンタカーの保険が適用されるかどうかは要確認。MKVISより上でロード・サービスを使うとざっくり1万ドルの支払いになるという話を聞いた。また、保険が適用される場合でも、免責金額が5千ドルであったりするらしい。

## 5.2 マウナ・ケア

マウナ・ケアは山頂にある天文台群で有名な山である。たくさんのスコリア丘があり、マウナ・ロアに比べると見た目はギザギザしている(図9)。山頂にカルデラがないのは、スコリアで埋められたためであると考えられている。また、山頂付近には氷河堆積物が見られることから、気候が寒冷な時期には氷帽で覆われていたことがわかる(マウナ・ロアには氷河の痕跡は見られない)。マウナ・ケアの最後の噴火は6,000–4,500年前とされていて、ここしばらくは噴火していない<sup>47</sup>。

富士山より高いマウナ・ケアであるが、山頂まで車で登ることができる。ヒロ(Hilo)の町からだとして1時間程度のドライブで、標高2,800 mにあるMKVISに到着する。山頂に上がる人は、高地に体を慣らすためMKVISで1時間以上休憩することになっている[13]<sup>48</sup>。標高は既に十分に高いので、MKVISで高山病の症状が出ることは普通にある。あんまり油断しない方がよい。

MKVISの北には山頂で観測する人のための宿泊施設(Hale Pohaku Lodge)があるが、一般人は立ち入ることはできない。南南東の方角にあるキラウエアの方を見ると、空模様によっては火口から立ち上る噴煙を見ることができる。夜間であれば、火口の溶岩湖が

発する赤い光で照らされた噴煙が見える。それ以外には、絶滅が危惧されている固有種の銀剣草(silver sword)<sup>49</sup>が柵の中で育てられているのを見学したり、MKVISで土産物<sup>50</sup>を物色したりする。

山頂へあがる道路は積雪の状況や強風などによって閉鎖されることもあるが、問題がなければMKVISから約30分で山頂まで行くことができる<sup>51</sup>。MKVISからちょっとあがると植物の生育限界を超え、植物は見られなくなる。途中にある駐車場に車を停めて、氷河によって削られて運搬された堆積物を見る。氷河は大きさに関係なく物を運ぶので、堆積物は粒度が揃っておらず、また角張っている<sup>52</sup>。山頂付近には、アメリカ合衆国でもっとも高い位置にある湖と言われるワイアウ湖(Lake Waiau)がある<sup>53</sup>。水はけが良さそうな場所なのに、なぜここに水が溜まるのか不思議である<sup>54</sup>。

日本のすばる望遠鏡は、予約制で一般の人の見学を受け付けていて、ガイド付きで望遠鏡施設を見学することができる[14]。すばる望遠鏡の隣にあるケック天文台(Keck Observatory)には見学室が設けられていて、見学室が開いている時間であればガラス越しに望遠鏡を見ることができる。主鏡の大きさだけで比べるとケック望遠鏡の方がすばる望遠鏡よりも大きい。すばる望遠鏡の主鏡は一枚鏡であるのに対し、ケック望遠鏡の主鏡は36枚の六角形の鏡を組み合わせてつくられている<sup>55</sup>。

47. これからしばらくも噴火しないかどうかはわからないと思う。
48. 山頂にあがって観測する人は、山頂にあがる前に24時間以上をここで過ごすことになっている。
49. 銀剣草が花を咲かせるときは、茎がよろよろと2 m 近く伸びて、そこに無数の花が咲くらしい(筆者は、花が咲いた後の枯れた銀剣草を見たことはあるが、花を見たことはない)。
50. 筆者のお勧めはマウナ・ケアに設置された9つの望遠鏡の主鏡をプリントしたTシャツ。主鏡は蓄光塗料でプリントされており、暗いところでぼんやりと光る。それはそれとして、マウナ・ケア・天文台(Mauna Kea Observatories)のかわいいロゴが描かれた土産物がたくさんあるが、このロゴには矛盾があると岩上直幹氏が指摘している。ロゴに描かれた山はマウナ・ケアで、その中腹に描かれている建物はハレ・ボハク・ロッジであると考えるのが自然である。そうであるとしたら山の南側から北を向いて山を見ていることになるが、空には南にあるはずの南十字星とおぼしき星が描かれている。
51. 筆者が参加したツアーでは、ガイドさんが「MKVISより上では眠らないようにしてください。眠ると呼吸が浅くなって高山病が悪化します」と言っていた。また、MKVISから上へ上がる途中では、高山病予防のため5分毎に1口ずつ水を飲むように、と言われた。根拠があるのかなのか、筆者は知らない。
52. 未舗装道路が終わって舗装道路になってすぐ、道路の脇(登りなら道路の右側)に少し開けた場所がある。ここはアポロ計画で月に着陸する宇宙飛行士が訓練をおこなった場所との

- こと。訓練終了後にきちんと原状復帰されたらしく、月着陸の訓練をした痕跡は残っていない。月着陸の訓練がおこなわれたのは、マウナ・ケアの氷河堆積物が月の表面のアナログになると考えられたからと思うが、そう考えられた根拠を筆者は知らない。また、筆者が天文観測でハレ・ボハク・ロッジに宿泊していたとき、火星探査車の試験をおこなっている人々がハレ・ボハク・ロッジに出入りしていた。試験の場所は「あの尾根の向こう側」と言っていたので、おそらくハレ・ボハクの近所なのだと思う。マウナ・ケアは火星のアナログでもあるらしい。世の中には、火星模擬砂(Martian soil simulant)というものがある。その材料はマウナ・ケアとマウナ・ロアの間にあるスコリア丘で採取されたものである。筆者が千葉工業大学で見た火星模擬砂(JSC Mars-1A)には植物の根っことおぼしき物が入っていたが、細かいことを気にするものではないのかもしれない。一方で、火星模擬砂の細かい砂は吸い込むと体に良くないと言われているので、やっぱり細かいことを気にした方がよいのかもしれないと思う。
53. へその緒を湖に投げ込んで子供の健康を折るという風習があるらしい。筆者が「へそ」に過剰反応する理由を知りたい人は直接に訊いてください。
54. ハレ・ボハク・ロッジで「湖の底は永久凍土になっているから水が溜まるのだ」と言う話を聞いたが、裏はとっていない。
55. 見学室のトイレの床には六角形のタイルが使われている。

ちなみに、一般の人が山頂エリアに入ってよい時間帯は日の出30分前から日没後30分までとなっている[13]。日の出と日没は山頂で見ること可能(図10)だが、星を見たい人はMKVISで開かれている観望会(stargazing program)に参加させてもらうのがよいだろう。

山頂からの帰りはスピードの出し過ぎに気をつける。観測所の車を運転して山頂にあがるときは、「末舗装道路はローギアを使う」という規則があった<sup>56</sup>。

## 6. 白と黒と緑の砂浜

ハワイ島にはいろいろな色の砂浜がある。ハワイ島の北西にあるハプナ・ビーチ(Hapuna Beach)は白い砂浜。白い砂はサンゴ礁が砕けてできたものである<sup>57</sup>。ハワイ島の南東にあるプナルウ・ビーチ(Punaluu Beach)は黒い砂浜。黒い砂は海に流れ込んだ溶岩が急冷されて真っ黒なガラスになって砕けた水冷破碎岩である。サンゴ礁や水冷破碎岩はハワイ以外にもあるので、白い砂や黒い砂のビーチは、行くところに行けばハワイでなくても存在している。

もうひとつ、ハワイ島の南の端には緑色の砂のビーチ(Green Sand Beach)がある<sup>58</sup>。緑色はMgを多く含むカンラン石によるもので、カンラン石を含むハワイ岩(hawaiite)が風化して砂になった後、流水で砂が分別され密度の大きいカンラン石の割合が多くなることで緑色の砂浜がつくられたと言われている。

グリーン・サンド・ビーチに行くには、とにかく南に向かって車を走らせてアメリカ合衆国最南端のサウス・ポイント(South Point)を目指す。グリーン・サンド・ビーチ・トレイルヘッド(Green Sand Beach

Trailhead)に車を停めたら、そこから先は海岸沿いに草原の中を片道1時間くらい歩く<sup>59</sup>。風は強いが、天気良ければ草原の中の道を歩くのは気持ちよい<sup>60</sup>。2015年3月に歩いたときは、海にクジラとおぼしきものが見えた。最後はかなり急な岩場を下って入り江まで降りる。入り江の中の砂はたしかに他とは違う色をしている<sup>61</sup>。

## 7. ハワイに行く前に

同じものを見ていても、知らない人には見えないものが、知っている人には見えることがある<sup>62</sup>。きちんと予習しておくことは重要である。

ハワイ火山国立公園の現況は、公園のウェブページ[2]で確認することができる。立入禁止区域、道路の閉鎖、噴火の状態、などの情報がある。火山の活動度が変わると立入禁止区域の設定が変更になったりすることもあるので、出発前にチェックしておくとうい。公園内のキラウエア・ビジター・センター他各所で販売されているトレイル・ガイド[3, 10]は、ウェブ上で閲覧することができる。Hazlett博士の2015年版の巡検ガイド[15]も、オンライン・ストアで購入可能<sup>63</sup>。

マウナ・ケアに出かけるなら、MKVIS[13]のページを参照する。観望会(stargazing program)の予定、MKVISに設置されたライブ・カメラの映像、マウナ・ケア山頂にアクセスする道路の状況、マウナ・ケアの天気予報のページへのリンク、などがある。上にあがる人は「高山病に対する注意事項」を前もって読んでおくべきである<sup>64</sup>。

日本語の情報源は寡聞にして知らないが<sup>65</sup>、とりあえず筆者の本棚でハワイの火山に関連した記述がある

56. ハレ・ポハク・ロッジの掲示板には天文学者が起こしたいくつかの事故の写真が貼ってあり、運転者に注意を促している。同じくロッジに貼られているマウナケア山頂の航空写真には、フランスの天文学者がスピードの出し過ぎで道からとびだした場所に“Frog's Leap”と書かれている。それを見た誰かが「日本の天文学者が事故をおこしたら“Kamikaze Jump”とか書かれちゃうのかな」と言っていた(ような気がする)。

57. 白い砂浜の生成にはパロット・フィッシュ(parrot fish)が関係しているらしい。パロット・フィッシュは、サンゴをガリガリと齧ってサンゴに住まう藻類をサンゴごと食べ、消化しなかったサンゴを排泄物として出す。1匹のパロット・フィッシュが1年間に排泄する砂は360 kgになる(<https://www.wired.com/2014/08/absurd-creature-of-the-week-parrotfish/>)。

58. 緑色の砂のビーチは世界に数カ所しかないらしい。

59. 使ったことはないが、四輪駆動車で入り江の近くまで運んでくれるサービスがあるらしい。

60. とにかく風は強い。樹木は風で変形して偏形樹になっている。足下は火山灰が風化したものが積もっていて、関東ROOM層のような感じ。溶岩と違って歩きやすいと思ったが、雨が降ったらベタベタになるかもしれない。

61. 鮮やかな緑色を期待していると、少しがっかりするかもしれない。

62. 一生に一度しかできない簡単に面白い月観察実験 [http://gate.main.jp/saiki\\_lab/moon/moon\\_obs.html](http://gate.main.jp/saiki_lab/moon/moon_obs.html)

63. <https://shop.hawaiiipacificparks.org/collections/geology/products/explore-geology-of-kilauea>

64. 16歳未満の人は高度による影響を受けやすいため、MKVISより上へ上がるべきではないとされている。

65. 謙遜ではなく本当に知らない。いいものがあれば教えてください。

ものを探すと、中村(1978)[16]、町田・白尾(1998)[17]、などが見つかる。あと、池澤(2000)[18]は火山の本ではないが、ハワイ<sup>66</sup>についてちょっと深く知りたかった人にお勧めの本である。

ハワイに行く行かないとは関係ないが、ハワイの火山について何か知りたいことが出てきたときに筆者が最初に見るのは、Characteristics of Hawaiian Volcanoes(US Geol. Surv. Prof. Paper 1801) [6]である。ハワイの火山についてのだいたいはこちらに書かれているのではないと思う。あと、火山全般について調べるときはVolcano World [11]をよく利用している。

## 8. 楽しい遊び場

筆者を最初にハワイに連れていったのは栗田敬氏である。楽しい遊び場を教えてくださいと心から感謝する。次にハワイに行ったのは、岩上直幹氏とマウナ・ケア山頂で金星の観測をするためであった<sup>67</sup>。マウナ・ケア山頂で素晴らしい景色を見ることができたのは観測に参加させてもらったおかげである。また、観測終了後の火山巡検で案内人を務めるために勉強したことは、後のハワイ実習の企画へとつながった。岡山大学理学部においては、筆者が思いつきで口に出したことを実習という形にして実現してくれた同僚の教員<sup>68</sup>に感謝するとともに、実習に参加した学生と教員、そして実習の後方支援をしてくれた事務室の皆様にも感謝するものである。

本稿で示した計算をおこなっているとき、筆者は自分が大学院生だった頃を思い出していた。夜な夜な、教員や先輩や後輩たちとホワイトボードの前に集まるとは、その時々気になる問題についてオーダーを見積もる計算をおこない、つじつまが合うとか合わないとか、そんな話をくり返していた。筆者にとってはとても幸せな時間であった。そして、今の自分が研究者としてやっていけているのはあの頃に鍛えてもらった

おかげであることが、時間の経過とともにじわじわと実感されてくる。あの楽しい遊び場に参加していた全ての人に対して、お礼を言いたいと思う<sup>69</sup>。

## 参考文献

- [1] 早川由紀夫, 1998, 地学雑誌 107, 444.
- [2] Hawaii Volcanoes National Park, <https://www.nps.gov/havo/index.htm>
- [3] Kilauea Iki Trail Guide, <https://www.nps.gov/havo/planyourvisit/upload/Kilauea-Iki-Trail-Guide-2013.pdf>
- [4] Turcotte, D. L. and Schubert, G., 2002, Geodynamics 2nd ed. (Cambridge Univ. Press)
- [5] Patrick, M. R. and Witzke, C.-N., 2011, US Geol. Surv. Sci. Investig. Rep. 2011-5110, <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5110/>
- [6] Poland, M. P. et al. eds., 2014, US Geol. Surv. Prof. Paper 1801, <http://dx.doi.org/10.3133/pp1801>
- [7] Gailler, L. and Kauahikaua, J., 2017, Bull. Volcanol 79, 40.
- [8] Parfitt, E. A., 1998, J. Volcanol. Geotherm. Res. 84, 197.
- [9] Wilson, L., 1976, Geophys. J. R. astr. Soc. 45, 543.
- [10] Mauna Ulu Eruption Guide, [https://www.nps.gov/havo/planyourvisit/upload/mauna\\_ulu\\_trail\\_guide.pdf](https://www.nps.gov/havo/planyourvisit/upload/mauna_ulu_trail_guide.pdf)
- [11] Volcano World, <http://volcano.oregonstate.edu>
- [12] Harris, A. J. et al., 2009, Bull. Volcanol. 71, 459.
- [13] Mauna Kea Visitor Information Station, <http://www.ifa.hawaii.edu/info/vis/>
- [14] すばる望遠鏡 一般見学案内, [https://subarutelescope.org/Information/Tour/Summit/j\\_index.html](https://subarutelescope.org/Information/Tour/Summit/j_index.html)
- [15] Hazlett, R. W., 2015, Explore the Geology of Kilauea Volcano, Hawaii Pacific Parks.
- [16] 中村一明, 1978, 火山の話, 岩波新書.
- [17] 町田洋・白尾元理, 1998, 写真で見る火山の自然史, 東京大学出版会.
- [18] 池澤夏樹, 2000, ハワイイ紀行 完全版, 新潮文庫.

66. Hawaiiは島本来の言葉では「ハワイイ」と発音するとのこと。池澤氏の作品には、火山学者が主人公の小説「真昼のプリニウス」(中公文庫)もある。

67. ハレ・ボハクと山頂の間の移動では運転手として十二分に活躍したと思う。

68. 実習の実施にかかる予算は、はしもとではない誰かが用立てている。

69. 筆者が一番お礼を言いたい人にお礼を言うことができなくなってしまったことは、とても残念なことである。