地球物理学者によるハワイ島の火山見学案内3

はしもと じょーじ1

(要旨)毎度おなじみ無保証の原稿である².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. キラウエア・アップデート

2018年5月上旬に始まったキラウエア(Kilauea) 東 リフトゾーンでの噴火は、2018年8月上旬に溶岩を地 上に噴き出すのを止めた. 先々号(2018年6月25日発 行)の遊星人³ではハワイ火山国立公園の見所を紹介 した[1]のだが、原稿提出締切(4月末)直後の5月上旬 に東リフトゾーンで噴火が始まり、原稿が掲載される 前にハワイ火山国立公園は閉鎖されてしまった。先号 (2018年9月25日発行)の遊星人では溶岩がばんばん 出ていると書いた[2]のだが、原稿提出締切(7月末)直 後の8月上旬に東リフトゾーンの噴火は止まり、原稿 が掲載される前に溶岩を噴き上げて溶岩チャネルをつ くるような噴火は終わってしまった。とても間の悪い ことではあるが4,8月2日にアメリカ地質調査所ハワ イ火山観測所が出したVolcano Watch (2018-08-02) [3] にも, "Based on past eruptions and current geophysical monitoring, it could continue for many months to a few years."と書かれており、噴火が止ま

るとは予想していなかったようである.

一方で、噴火の開始については、噴火の約2週間前 に出た Volcano Watch (2018-04-19) [3] に"current circumstances indicate an increased likelihood of changes at Puu Oo in the coming weeks"と書かれて いて、数週間以内に噴火が始まる可能性があると考え られていたことがわかる⁵. プウ・オオ (Puu Oo)はキ ラウエアの東リフトゾーンにある火口である、プウ・ オオに設置された傾斜計とGPSは、3月半ば以降に山 体が急速に膨張していることを示していて[4],これ はプウ・オオの地下にあるマグマ溜まりの圧力が高ま っていることを示唆すると考えられた.過去5年間に おいて同様の現象が見られた2014年6月と2016年5月 には、山体の膨張が観測された後、プウ・オオの山腹 に新しい火口が開いて溶岩が噴き出した。そして今回 (2018年)もまた山体の膨張が観測された後、新しい 火口が(プウ・オオからは20 km ほど離れた場所に)開 いて溶岩が噴き出した.

キラウエアのように噴火頻度が高い場所においては, 繰り返し観測することで噴火前に現れるパターンを同 定し,ある程度の噴火予測をすることが可能であると 言える⁶. もちろん,全てがわかっているわけではな いので,予想外のことは起こりえるし,噴火を期待し

^{1.} 岡山大学理学部地球科学科

george@gfd-dennou.org

^{2.} 前編[2]の最後の節「次回予告?」は、編集長の指示によって 追加されたものである(筆者が作成した最初の原稿にはなかっ た).本稿(その3)によって遊星人のページ数が増えたことの 責任は編集長にある。

^{3.} 表紙に書かれた見出しは「地球科学者によるハワイ島の火山見 学案内」となっていた、遊星人編集部は、筆者を"地球物理学者" ではなく"地球科学者"と分類したようである。

^{4.}間が悪いのは全て遊星人の編集スケジュールのせいなのだが、 これだけタイミングを計ったように裏目のイベントが発生してしまったのは、やはり筆者の日頃の行いが悪いせいなのかもしれないと少し弱気になる。

^{5.} いちおう続きも書いておくと, "It is possible that the current inflationary trend could end with no result."

^{6.} 噴火リスクの評価ができることは、火山見学の安全性を確保 する上で重要なことである.ただし噴火リスクの全てを評価 できているという保証はないので、不意打ちでいきなり噴火 に遭遇する可能性はゼロではない.

て火山見学に行ってみたけど空振りに終わる,という ことは十分にありえる.火山見学は,予定通りにはな らない可能性があることを理解した上で,ハプニング を楽しむくらいの気持ちで行くのがよいと思う⁷.

2018年5月11日から閉鎖されていたハワイ火山国 立公園であるが,約4ヶ月ぶりの2018年9月22日に再 開園し入場できるようになった[5]. ジャッガー博物 館(Jagger Museum),サーストン溶岩チューブ (Thurston Lave Tube),キラウエア・イキ・トレイ ル(Kilauea Iki Trail),などなど,9月22日現在で閉 鎖・通行不可になっている場所もあるが,公園内のか なりの部分に入ることができる.溶岩の噴出が止まっ てから2ヶ月も経過していないのに再開園しているの は、すごいことであると思う⁸.

2. キラウエア・カルデラの陥没

カルデラ⁹は火山の山頂部にある火口より大きい凹 地地形である[6].火口は大きくても直径1 km くらい ということで,直径2 km 以上の凹地地形をカルデラ と呼ぶらしい¹⁰.凹地地形を形成する要因はひとつで はなく,大きな爆発で物が吹き飛ばされて形成される カルデラもあれば,大きな爆発がなく形成されるカル デラもある.キラウエアとマウナ・ロア(Mauna Loa)のカルデラは後者である.

2.1 マグマ溜まりの大きさ

今回(2018年)の東リフトゾーンの噴火でも,噴火 に合わせてキラウエア山頂のカルデラ内で陥没が生じ, キラウエア山頂のカルデラは大きくなった(水平方向 には広がらなかったが,部分的により深くなったので 陥没部分の体積は増加した).この陥没は,山頂の下 にあるマグマ溜まりから東リフトゾーンにマグマが運 ばれて、山頂下のマグマ溜まりの体積が減少したこと で引き起こされたと考えられている.実際に東リフト ゾーンで溶岩の噴出が止まってから後、キラウエア山 頂のカルデラは陥没していない(Volcano Watch 2018-08-16[3]).

陥没は連続的に進行するのではなく,がたっと落ち て、しばらく止まり、またがたっと落ちて、しばらく 止まり、ということくり返す.2018年5月半ばから8 月頭にかけて、キラウエア・カルデラ内では62回の 崩落があり、崩落と崩落の間の時間間隔はだいたい 24-32時間¹¹であった.

陥没が段階的に生じる現象は2000年の三宅島の噴 火でも観測されていて¹²,段階的な陥没を説明する物 理モデルが提案されている[8].そのモデルでは、マ グマ溜まりとそれに接続する火道があって、火道は一 塊の固体物質(ピストン)で塞がれていると考える、火 道を塞ぐピストンの運動方程式は

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = mg - F - pS \tag{1}$$

ここで, *z*はピストンの変位, *t*は時刻, *m*はピストン の質量, *g*は重力加速度, *F*はピストンに働く摩擦力, *p*はマグマ溜まりの圧力, *S*はピストン(火道)の断面積, である.

最初にピストンは静止していて、マグマ溜まりから 徐々にマグマが排出される状況を考える.マグマ溜ま りからマグマが排出されるとマグマ溜まりの圧力pは 下がり、静止摩擦で支えきれなくなったところでピス トンはマグマ溜まりに向かって落ちる(崩落).ピスト ンが落ちると、ピストンが落ち込んだ分だけマグマ溜 まりの体積が減少して、マグマ溜まりの圧力は上昇す るが、落ち始めたピストンに働く摩擦は動摩擦¹³にな るので、ピストンはすぐには止まらない.ピストンが 落ちるに従ってマグマ溜まりの圧力は上昇し、マグマ 溜まりの圧力と動摩擦でピストンの自重を支えられる ようになったところでピストンは止まる¹⁴.ピストン が止まった後、マグマ溜まりから溶岩が排出されると

^{7.「}期待してたのと違う」と言って筆者を責めてはいけません.

筆者がこのようなことを書くと裏があるのではないかと勘ぐ る人がいるかもしれないが、これには裏などない、裏がある と疑った人は、少し反省してください。

^{9.} カルデラ(caldera)はスペイン語で「鍋」を意味する.

火口とカルデラは大きさで分けられているが、その境目に 意味はない、例えば、アメリカでは直径1 mile(1.6 km)以上 をカルデラと呼ぶらしい[7]. 1 mileを境目としているのは、 もちろん切りがいいからである、ちなみに、火星のオリン ポス山(Olympus Mons)の山頂にあるカルデラの直径は約70 km. これだけ大きさが違うものを同じカルデラと呼んでよい のか、素人さんは疑問に感じる。

Volcano Watch (2018-06-28) [3]によると、陥没の時間間隔は8 時間から64時間、平均すると28時間。

^{12.2000}年の三宅島では、海面下で生じた溶岩の噴出が山頂の陥 没を引き起こしたとされている。

^{13.}一般に、動摩擦は静止摩擦よりも小さい.

^{14.}慣性があるので、マグマ溜まりの圧力と動摩擦と自重が平衡 に達してもピストンはすぐには止まらない。もうちょっと落 ちてから止まる。

表1: カルテフの形成

	2000年 三宅島	2018 年 キラウエア	文献
崩落の時間間隔 T	24 hour	28 hour	[8], [3] 2018-06-28
マグマ溜まりからの排出流量 α	$45 \text{ m}^3/\text{s}$	50–100 m ³ /s *1	[8], [3] 2018-08-02
マグマ溜まりの体積 V ₀	$4{\times}10^{10}~\mathrm{m}^3$	$510{\times}10^{10}~{\rm m}^3$	[8]
ピストンの密度 <i>ρ</i>	$2500~\rm kg/m^3$		[8]
ピストンの長さ <i>H</i>		3000 m *2	[9]

*1 東リフトゾーンから噴出した溶岩の流量.

*2 マグマ溜まりの深さをピストンの長さとした.

マグマ溜まりの圧力は低下するが,静止したピストン には静止摩擦が働くので,しばらくはピストンが落ち ることはない.すなわち,このモデルでは静止摩擦と 動摩擦の差によって陥没が段階的に生じることを説明 する.陥没が生じる時間間隔*T*は次のようになる[8].

$$T = \frac{2\left(F_s - F_d\right)V_0}{\kappa\alpha S}\tag{2}$$

ここで、 F_s は静止摩擦、 F_d は動摩擦、 V_0 はマグマ溜 まりの体積、 κ はマグマの体積弾性率、 α はマグマ 溜まりから排出される溶岩の流量、である。

この式2を使って、キラウエアのマグマ溜まりの体 積を推定してみる.表1に示したように、崩落の時間 間隔Tは2000年三宅島と2018年キラウエアでほぼ同 じになっている.2018年キラウエアで、マグマ溜ま りから排出されたマグマの流量αは不明だが、東リ フトゾーンから噴き出した溶岩の量50-100 m³/s ([3]2018-08-02)に等しいとすると、これもまた2000 年三宅島とほぼ同じになる.マグマの体積弾性率κは. どちらも玄武岩質マグマなので同じと思ってよいだろ う.火道の断面積Sとピストンに働く摩擦(静止摩擦 と動摩擦の差)の大きさ $(F_s - F_d)$ の推定は難しいが. ここではざっくり2000年三宅島と2018年キラウエア は同じであったと仮定してみる、そうすると、キラウ エアのマグマ溜まりの体積は5-10×10¹⁰ m³と計算さ れる、キラウエア・カルデラの下やや南にあるとされ るマグマ溜まりの大きさは、いくつかの方法によって 0.3-2×10¹⁰ m³ [9]と推定されている.この推定に比べ ると式2を使った見積りはやや大きい値になっている

が,かなり乱暴なことをやっていることを考えると, こんなやり方で大外れとも言えない値が出たことは驚 きである¹⁵.

2.2 地震

キラウエア・カルデラ内で崩落が生じたときには、 マグニチュードは5かそれ以上の地震が記録された. 地震のマグニチュードMと地震波として放出された エネルギー E_aの関係は、Gutenberg-Richterの式より

$$\log_{10} E_q = 4.8 + 1.5M \tag{3}$$

崩落で発生した地震のマグニチュードを5.2とすると、 そのエネルギーは4×10¹² Jになる.

一方で、段階的な陥没を説明する物理モデルにおいて、ピストンが落ち込むときに解放される重力エネル ギー E_aは

$$E_g = mg \cdot \Delta z \tag{4}$$

ここで、Δzは1回の崩落におけるピストンの変位で

^{15.}一部(少数,多数,大多数?)の読者にとっては、1桁くらいずれているのに大外れと思ってないことが驚き、であるかもしれない、筆者は推定に用いたいくつかの不確定を考慮して「1桁しかずれてない」と評価したのだが、これは評価基準(目的)に依存するので、同じ1桁でも「1桁もずれちゃって全然ダメ」という評価になることもある。これくらいはいい、あれくらいはダメ、そういう感覚をどこで身につけたのか思い出せないが、おそらくは大学院生のときに周囲の人々と会話しているうちに身についたのだと思う、大学院に行くことで得られる最も大事なものは、知らないうちに身についてしまうものの中にあるような気がする、京都大学の高橋淑子教授は「皮膚呼吸で入ってくる」という言い方をしているが、たぶん同じものを指しているのだと思う。

ある.1回の崩落におけるマグマ溜まりの体積変化は SΔzで,これは崩落と崩落の間に排出されたマグマの 体積 α*T*に等しいので,

$$S\Delta z = \alpha T \tag{5}$$

また, ピストンの密度と断面積と長さをそれぞれ p, S, Hとすると, ピストンの質量は

$$m = \rho S H \tag{6}$$

と書くことができるので,解放される重力エネルギー の大きさは

$$E_q = \rho g H \alpha T \tag{7}$$

である.表1にある値を使って計算してみると、 E_g はおよそ4-8×10¹⁴Jとなる.

爆発または衝突によって発生する地震の規模につい て調べた研究[10]によると、爆発・衝突等のエネルギ ーのうち地震動に変換されるエネルギーの割合は0.1-10%である。先に求めた2つのエネルギーの大きさ *EgとEq*から変換効率を計算すると0.5-1%になる。こ の値は爆発または衝突によって発生する地震として予 想される変換効率の値の範囲に入っており、キラウエ ア・カルデラ内の崩落で発生した地震の規模はピスト ンがマグマ溜まりへ落ち込むときに解放される重力エ ネルギーの大きさで説明することができそうである。

3. キラウエアの火山ガス放出

火山ガスの成分は場所によって違うし、同じ場所で あっても時間的に変化するが、主成分はいつもH₂Oで、 その次に多いのはCO₂である.H₂OとCO₂はどこにで もある気体なので、火山ガスの放出として問題になる のは3番目の成分であるSO₂であることが多い¹⁶.SO₂ は人体に有害¹⁷であり大気汚染の原因¹⁸にもなる. SO₂は植物にも悪い影響を及ぼす¹⁹. Googleマップで キラウエア周辺の航空写真を見ると、山頂(火口)の風 下(南西)側は周囲に比べて植生がまばらになっている が、これは火山ガスの影響である.

キラウエアから放出される火山ガスの量とその放出 口は、噴火活動にともなって大きく変化してきた、表 2は1ヶ月程度の時間で平均してみたSO2放出率であ る. 1986年以前は主に山頂で数百トン/日ほどのSO2 が放出されていただけだったが、1983年に東リフト ゾーンのプウ・オオで噴火が始まり、それから数年後 にはプウ・オオでの火山ガス放出が目立つようになる. 2008年以降、山頂のハレマウマウ(Halemaumau)に溶 岩湖が見られるようになると、山頂からの放出が他を 圧倒するようになる。2018年5月に東リフトゾーンで 噴火が始まると、再び東リフトゾーンでの火山ガス放 出が増加し、6月から8月頭にかけてはそれ以前のお よそ10倍にあたる50.000トン/日という. これまでに 記録されたことのない大量のSO2が放出された(ちな みに、2000年の三宅島の噴火では40,000トン/日の SO2放出が観測されており、この量もまた2018年キラ ウエアとほぼ同程度になっている) 東リフトゾーン での噴火が止まって以降. キラウエア全域のSO₂放出 率は1.000トン/日を下回るようになり、噴火中とは 一転してここ数十年でもっとも少ない放出率となって いる.

火口周辺における大気中のSO2濃度を見積もってみ る.大気中に放出されたSO2は、OHなどと反応して も失われるが、その反応の時間スケールは1日程度で あり、放出源の近傍ではそれよりも風で流されたり拡 散したりして薄められる効果の方が大きい²⁰.ここで は簡単に、大気中の拡散を以下のように仮定すること にする.まず風向に沿っては、風に従ってただ流され るとする.風向に直交する水平方向には、放出源から

^{16.} CO₂も濃度が高くなれば人体に影響を及ぼすことがあり、CO₂が問題にならないということではない.カメルーンのニオス湖(Lake Nyos)では、高濃度CO₂に曝されて人や家畜が死亡する災害が発生している.ニオス湖で高濃度のCO₂環境が発生したのは、湖の底で放出されたCO₂が湖水に溶け込んで蓄積し、時間をかけて蓄積したCO₂が短時間で大気に放出されたことによる.

日本が定めているSO₂の環境基準は「1時間値の1日平均値が 0.04 ppm以下であり,かつ,1時間値が0.1 ppm以下であること」 (環境省, https://www.env.go.jp/kijun/taiki.html).

^{18.} 火山ガスによってつくられるスモッグはvolcanic smog, 略してvogと呼ばれる.

^{19.} SO₂が植物に及ぼす影響について、[11]には"ノリリスクという場所は、ニューヨークの環境NGO団体「ブラックスミス・インスティチュート」が作成した「世界でもっとも汚染された都市トップ10に栄えあるランクインを果たしたことで、今や多くの人に親しまれている(あるいは親しまれていない).ニッケル鉱石の溶錬は施設内で行われているけど、その行程で発生する二酸化硫黄の噴煙が原因で、溶錬施設から5キロメートル以内の地域には、1本の木も育たないと言われている."と書かれている。ノリリスク(Norilsk)はロシア連邦クラスノヤルスク地方の都市、閉鎖都市に指定されていて、訪問は規制されている。

^{20.5} m/sの風があると1日で400 km以上流される.

表2:キラウエアのSO2放出率(トン/日)*1.

	山頂付近	東リフトゾーン*2	
1986年以前			プウ・オオ噴火 (1983-) ^{*3}
1986年 - 2008年		2,000	
2008年-2018年4月	5,000		ハレマウマウ溶岩湖 (2008-)
2018年5月		5,000	東リフトゾーン噴火* ⁴
2018年6月-2018年8月頭		50,000	東リフトゾーン噴火
2018年8月以降			

*1 放出率は Volcano Watch 2018-08-23 [3] による. 1,000 トン/日を下回るものは空欄とした.

*3 プウ・オオ噴火で溶岩噴泉が現れた時は瞬間的に30,000 トン/日の放出.

*4 山頂で火山灰を大量に巻き上げる爆発をした時は瞬間的に10,000トン/日の放出.

の距離に比例して広がる.そして鉛直方向には,境界 層に万遍なく広がる.以上のように仮定すると,放出 源から風下に*x*だけ離れた場所におけるSO₂濃度*c*は 以下のようになる.

$$c = 0.25 \text{ ppmv} \left(\frac{a}{0.2}\right)^{-1} \left(\frac{\sigma}{0.2 \times 10^4 \text{ kg/m}^2}\right)^{-1} \left(\frac{v}{5 \text{ m/s}}\right)^{-1} \left(\frac{\Phi}{1000 \text{ ton/day}}\right) \left(\frac{x}{10 \text{ km}}\right)^{-1} \quad (8)$$

ここで、aは風向に直交する水平方向の広がりを表わ すパラメタ(水平方向にはaxの範囲に広がる)、 σ は境 界層に含まれる単位面積あたりの大気質量、vは風速、 Φ はSO₂放出率、である。

ハワイで定常的に吹いている北東貿易風の風速はお およそ5 m/sである. 5,000トン/日の放出(2008年か ら2018年(東リフトゾーン噴火前)にハレマウマウか ら放出されていた量)があると,火口から10 km下流 におけるSO2濃度は1.25 ppmvになる.人間は0.5-1.0 ppmvの濃度のSO2があるとその臭いを感じるという ことなので,10 km下流の濃度はその限界よりちょっ と上ということになる.放出率が10,000トン/日にな ると10 km下流の濃度は2.5 ppmvとなり,これは明 らかな刺激臭として感じられる.2018年の噴火の最 大にあたる50,000トン/日の放出率では10 km下流で 12.5 ppmvとなるが,拡散の仕方によってはこの数倍 程度の濃度になることもあるだろうと思うと,10 km 離れていても呼吸困難を引き起こすレベルの濃度(30 ppmv)になる可能性があると考えられる.

4. ハワイ-天皇海山列

ハワイ諸島はホットスポットから北西の方向に連な っているが,ハワイ諸島の8つの大きな島のさらに北 西には北西ハワイ諸島が連なり,さらにその先には海 中に没したかつての火山島である海山が(途中で北西 から北に向きを変えて)連なっている.これらハワイ から6100 kmにわたって連なる火山島と海山の列は, ひとつのホットスポットが異なる時代に形成した一連 の火山であり,ハワイ-天皇海山列(Hawaiian-Emperor seamount chain)と呼ばれる.

ホットスポットによる火山島の形成は、100-200万 年という比較的に短い時間の間におこなわれる²¹. そ の後、プレート運動によってホットスポット上から外 れた火山島では火山活動が停止し、溶岩を噴き出すの を止めた火山島は成長から転じて縮小に向かう. 特に、 海面から上に出ている部分は激しい侵食にさらされる ため、火山島は海面より上が削られて卓状の形になる. また、時間の経過とともに海洋底が沈降することによ って、火山島は海中に沈んで海山となる²². 平らな頂 上部をもつ平頂海山(ギョー, guyot)は、侵食されて 卓状の形になった火山島が海中に沈んだものである、 と考えられている.

^{*2} 東リフトゾーンはプウ・オオを含む.

^{21.} 全期間(前楯状火山期から回春火山期まで)を通じて噴出する 溶岩の総量のうち,80-95 %が楯状火山期の100-200万年の期 間に噴出する[9].

^{22.}ハワイ - 天皇海山列は129以上の火山で構成されているが、 このうち頂上が海上に出るとろこまで大きくならなかった火



図1:ハワイ諸島および北西ハワイ諸島における火山の標高と噴 火年代.データは[9]と[14]を使用.四角は火山岩が地表に 出ているもの,丸は地表がサンゴ礁で覆われていて火山は 海面下にあるものを標高0mとして描いた.

火山島が侵食と沈降によって海面下に没するまでの 時間スケールは、ハワイ諸島の場合ではおよそ1500 万年である(図1).北西ハワイ諸島は、ホットスポッ トに近い方から、ニホア島(Nihoa)、ネッカー島 (Necker)、フレンチフリゲート瀬(French Frigate Shoals)、ガードナー尖礁(Gardner Pinnacles)、レイ サン島(Lavsan)、リシアンスキー島(Lisianski)、パ ール・アンド・ハーミーズ環礁(Pearl and Hermes Atoll), ミッドウェー環礁(Midway Atoll), クレ環礁 (Kure Atoll),の順番に並んでいる.このうち、ガー ドナー尖礁までは、火山岩が地表に出ているが、その 先のレイサン島から先はサンゴ礁の島となっていて火 山岩は地表に出ていない[12]. ガードナー尖礁とレイ サン島の火山岩の年代はそれぞれ1230万年と1990万 年となっていることから、サンゴ礁が発達しない場合、 火山島は形成から1230万年までは島としての残りう るが、形成後1990万年までに水没すると考えられる。

4.1 海洋底の冷却による沈降

ミッドウェー環礁ではドリルコアの採取がおこなわ れていて、火山島の本体を構成する玄武岩は地表から 157 mの厚さの炭酸塩岩を掘り抜いた下にあることが 確認された[12]²³. すなわち、サンゴ礁が形成されず



図2: 天皇海山におけるギョー頂部の水深. 横軸は海底地形に基 づいて推定したギョー頂部の水深(d),縦軸は海洋底の冷 却モデルから計算されるギョー頂部の水深(Δw)と海底地 形に基づいて推定したギョー頂部の水深(d)との差.海底 地形と年代に関するデータは[14]を使用.

炭酸塩岩が堆積しなかったならば,現在のミッドウェ ーは最高点が海面下157mに沈んでいるということで ある²⁴.海面上にあるときは侵食によって削られるが, 海面下に沈んだ後の侵食作用は無視できるので²⁵,海 面下に沈んだ後に生じた157mの変位は全て沈降によ るものとして,沈降速度の推定をおこなうことができ る.

ドリルコアで採取された炭酸塩岩直下の火山岩の年 代は2770万年であったので,火山島の形成を2770万 年前として,形成から1230万-1990万年かけて侵食と 沈降によって火山島は海面まで沈み,そこからさらに 780万-1540万年かけて海面下157 mまで沈降したと 考えることにする.そうすると,ここ1000万年くら いのミッドウェーの沈降速度は0.01-0.02 mm/yrとな る²⁶

プレートの冷却による熱収縮で海洋底が沈降するモ デルは, Geodynamics [13]に詳しく記述されている.

25.海面下でも浅いところは侵食されるが、波食台は一般に-10 mより浅いところに作られるので、10mよりも深くなったら ほとんど侵食されないと考えてよい。

山は24とされている[9]. なぜだか知らないが, ハワイ-天皇 海山を構成する火山の多くは海底火山では終わらず火山島に なったということである.

^{23.}サンゴ礁の上で堀ったドリルコアでは、玄武岩の上に384 m の厚さの炭酸塩岩が堆積していた.火山島の頂上が海中に沈 む前のミッドウェーは、周囲をサンゴ礁で囲まれた堡礁に なっていたと考えられる。

^{24.} ミッドウェーは海抜3mくらいなので、最高点は海面下154mとするのがより正確かもしれないが、誤差の範囲であろう、ドリルコアを採取した場所の真下に火山岩の最高点があるとは限らないので、最高点はもうちょっと上かもしれないが、 侵食によって島は平坦になっていると思われるので、157mからは大きくは違わないはずである。

表3:海洋底の熱モデルに関するパラメタ.

	値	文献
中央海嶺における水深	$w_0 = 2600~\mathrm{m}$	[13]
マントルの密度	$\rho_m = 3300 \ \rm kg/m^3$	[13]
海水の密度	$\rho_w = 1000~\rm kg/m^3$	[13]
プレートの体積熱膨張率	$\alpha_v = 3\times 10^{-5}~{\rm K}^{-1}$	[13]
プレートの熱拡散係数	$\kappa = 1.0 \times 10^{-6} \ \mathrm{m^2/s}$	[13]
プレートの厚さ	$y_{L0} = 125 \text{ km}$	[13]
プレート下面と海洋底の温度差	$T_1 - T_0 = 1300 \text{ K}$	[13]

観測される海洋底の地形と年代の関係は、プレートの 下面で加熱(basal heating)があるとするモデルでよく 説明され、海面から測った海洋底の深さwは海洋底の 年代tの関数として、

$$w(t) = w_0 + \frac{\rho_m \alpha_v (T_1 - T_0) y_{L0}}{(\rho_m - \rho_w)} \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\kappa \pi^2 t}{y_{L0}^2}\right) \right]$$
(9)

で与えられる.ここで、 w_0 は中央海嶺における水深、 ρ_m はマントルの密度、 ρ_w は海水の密度、 α_v はプレートの体積熱膨張率、 κ はプレートの熱拡散係数、 y_{L0} はプレートの厚さ、 $T_1 - T_0$ はプレート下面(海洋底 から y_{L0} の深さ)と海洋底の温度差、である、海洋底 の沈降速度 - dw/dtは、

$$-\frac{dw}{dt} = -\frac{4\rho_m \kappa \alpha_v \left(T_1 - T_0\right)}{\left(\rho_m - \rho_w\right) y_{L0}} \exp\left(-\frac{\kappa \pi^2 t}{y_{L0}^2}\right)$$
(10)

ミッドウェー島が載っているのは1億1800万年前の海 洋底²⁷で、その他のパラメタは表3の値を使うと、沈 降速度はおよそ0.005 mm/yrとなる.この沈降速度は ドリルコアに基づいて推定した沈降速度の1/4から 1/2程度で、惑星科学者の感覚²⁸ではそれほど悪くな いようにも見えるが、後述するように天皇海山(ギョ ー)の頂部の水深と整合しないと言われている[14].

海中に沈んだ火山島はほとんど侵食されることがな いので²⁹,海洋底からギョー頂部までの高さは、ギョ ーが海面下に沈んだときの海の深さを記録することに なる.そして、現在の海面からギョー頂部までの水深 は、ギョーが海面下に沈んだときから現在までの海洋 底の沈降量を表わすことになる.海洋底の深さが式9 で表わされるとしたら、ギョーが海面下に沈んだとき から現在までの海洋底の沈降量Δwは

$$\Delta w = w\left(t_g\right) - w\left(t_s\right) \tag{11}$$

ここで, t_gはギョーが海面下に沈んだ年代, t_sはギョ ーの下にある海洋底の年代, である.

図2はいくつかの天皇海山について,現在の海面からギョー頂部までの水深*d*と,年代から推定されるギョー頂部の水深Δ*w*を描いたものである.ギョーの形成年代*t*_aは不明なので,ここでは火山の年代を用いて

^{26.} ミッドウェーの火山が水没した年代は、火山岩直上にある炭酸塩(化石)の年代を見たらよいのかもしれないが、ここでは手を抜いて、水没年代は1230万年(ガードナー尖礁、水没前)と1990万年(レイサン島、サンゴ礁がなければ水没)の間にあるとした。

^{27.}古い火山ほど古い海洋底の上に載っている、というのは必ず 成り立つものではない.ホットスポットに対して中央海嶺が 遠ざかる場合には、新しい火山ほど古い海洋底の上に載って

いるということが起こりえる.また、ホットスポットが断裂 帯(fracture zone)をまたぐと海洋底の年代は不連続に変化す る.断裂帯をまたぐときに生じる年代の不連続な変化は、新 しくなる場合と古くなる場合の両方がありえる.

^{28.}筆者の周囲には「桁(オーダー)があってるからいいんじゃない」と言う人が多いのだが、これは観測バイアスかもしれない、サンプル数が少ないという批判に対しては、「友達が少なくてどうもすみません」としか答えられない。

^{29.}一般に、海中に沈んだ後は侵食よりも堆積が優勢となる.水 没時のギョーの高さを推定するためには、現在の海底地形から、水没後にギョーの上に堆積した堆積物の厚さを補正する 必要がある.

いる³⁰.火山島が形成されてから海面下に沈むまでに はある程度の時間がかかるので,ギョーの形成年代は 実際よりも古く仮定されたことになり,水深Δwを過 大評価したことになる.しかし図2では,現在観測さ れるギョー頂部の水深dは,過大評価したはずの水深 Δwよりも,1000 mほど深くなっている.この差は, 海洋底の冷却を考えるだけでは説明することができな い.[14]は,海洋底がホットスポットの上を通過する ときに,ホットスポットによって加熱を受けることを 考慮することによって,説明することができるとして いる.

4.2 火山島の荷重よる沈降と隆起

火山島の沈降は、海洋底の冷却だけでなく、火山島 の荷重によるリソフフェアの変形によっても生じる. リソスフェアが変形する時間スケールはおよそ100万 年で、これは火山島が成長する時間スケール100-200 万年とほぼ同程度である.すなわち、火山島が形成さ れるのとほぼ同時進行でリソスフェアは変形し、火山 島の形成が終わった後にリソスフェアはあまり変形し ない.ハワイ島の下のリソスフェアは周囲に比べてお よそ4 kmほど凹んでいる.200万年で4 kmとすると、 沈降速度は2 mm/yrとなり、これはハワイ島の北西 沖の海面下に沈んだサンゴ礁の年代から推定された沈 降速度2.6 mm/yrと整合的な値である³¹.

火山島の荷重によるリソスフェアの変形は、火山島 の近傍では沈降となるが、火山島から数100 km離れ た場所においてはバルジ(膨らみ)をつくって隆起を生 じさせる[13]. バルジの隆起量 w_bは火山島直下の沈降 量 w₀に比例する[13].

 $w_b = -w_0 e^{-\pi} = -0.0432w_0 \tag{12}$

したがって、ハワイ島の荷重によってハワイ島が2 mm/yrの速度で沈降しているとしたら、バルジの隆 起速度はその0.0432倍の0.08 mm/yrということになる. これはプレート冷却による沈降速度~0.01 mm/ yrよりも十分に大きいので, ハワイ島の周辺地域で はハワイ島の荷重による隆起が観測されるはずである.

実際に、オアフ島(Oahu)は隆起している³².オア フ島ではサンゴ礁が島のいたるところに見られ、それ らはオアフ島の隆起によって陸上にあがったものと考 えられている³³.海抜21 mの場所に~33.4万年前のサ ンゴ礁があるので、それを使ってオアフ島の隆起速度 を推定すると0.06 mm/yrになる.これはハワイ島の 荷重によってもたらされる隆起速度の推定(0.08 mm/ yr)と整合的であり、オアフ島の隆起はハワイ島の荷 重によるものと考えられている.

4.3 侵食

火山島が1500万年くらいの時間スケールで海中に 没することを使って、侵食速度を見積もる、火山島の 標高が下がるのは、沈降と侵食の作用による、沈降は 4.1節と4.2節で整理したように、プレートの冷却によ る熱収縮と、火山島の荷重によるリソスフェアの変形 の、2つの過程によって生じる、プレート冷却の熱収 縮による沈降の速度は、ミッドウェーのドリルコアに 基づいて0.02 mm/yrであるとすると、1500万年間の 沈降量は300 mになる、火山島の荷重による沈降の速 度は、冷却による沈降に比べると2桁程度大きいが、 継続期間は100万年程度なので沈降量としては2000 m程度となる³⁴.

ここで,標高4500 mの火山島が1500万年で海中に 沈む場合を考える.4500 mのうち,2300 mは沈降に よって標高が低下するのだとすると,残り2200 mは 侵食によって削られなければならない.1500万年で 2200 m削るとしたら,その侵食速度は約0.15 mm/yr である.

カウアイ島(Kauai)の侵食速度を調べた研究[16]に よると、侵食速度は降水量に強く依存し、100万年の 時間スケールで見た侵食速度は地域の降水量の多寡に

^{30.6}つの天皇海山の11カ所で採取したコアを調べると、11カ所の全てにおいてかつて温暖な浅海にあった証拠が見つかるが、造礁サンゴがあるのは光孝海山(Koko)のみで、それ以外の5つの海山に造礁サンゴは見つからない[15].コア中に造礁サンゴが見つからないのは、サンプリングの問題ではなく本当に造礁サンゴがないからであると[15]は言っている、天皇海山列(光孝海山を除く)に造礁サンゴがない理由は解明されていないらしい.

^{31.} 海洋底の冷却による沈降も同時におこってはいるが、その沈 降速度は~0.01 mm/yrであり、100万年程度の時間スケール では無視できる。

^{32.} 筆者は、ハワイ諸島はみんな沈降しているんだろうと思い込んでいた、と正直に告白しておく.

^{33.} 海面より上にあるサンゴのなかには、津波によって運ばれた ものもある. ラナイ島とモロカイ島では、海抜155 mにサン ゴと溶岩の角礫岩(breccia)が見つかり、それは津波によって 運ばれたものとされている.

^{34.} リソスフェアの変形量は火山島の荷重に比例する[13]. 2000 mはハワイ島のような大きな火山島の沈降量である.

よって0.003-0.1 mm/yrの範囲でばらつくとされる³⁵. 速い侵食速度(~0.1 mm/yr)は,1500万年程度で島が 沈むことと整合的であるが,現在のカウアイ島で最も 雨が降る地域の年降水量は9000 mmを超えるとされ ており,0.1 mm/yrの侵食速度を維持するのに9000 mmという年降水量が必要であるのなら,1500万年と いう期間で平均して0.1 mm/yrの侵食速度を達成す ることは困難かもしれない³⁶. 侵食速度は削られる岩 盤の状態にも強く依存し,新しい溶岩よりは古い溶岩 の方が侵食されやすい.カウアイ島では,これから時 間が経過するにつれて,侵食速度は速くなっていくの かもしれない³⁷.

侵食に並行して生じるであろう隆起についても考え ておく.アイソスタシーが成り立っているとき,侵食 によって削られると,荷重が減った分のバランスをと るために隆起が生じる.火山島の海面より上に出てい る部分の体積は,海中にある部分も含めた火山島全体 の10%くらいであると思うと,火山島の海面より上 に出ている部分が侵食で削られると火山島の荷重は 10%減ることになる.火山島の荷重によってリソス フェアが4kmくらい凹んでいるとすると,火山島の 荷重が10%減ったときリソスフェアの変形量も10% 減って,ざっくり400mくらいの隆起が生じることに なる.もっとも,侵食で削られた岩石が島の近傍に堆 積するのであれば,大局的に見て火山島の荷重は変わ らないので,侵食による隆起は考えなくてもよいのか もしれない.

35.[16]において侵食速度は8-335 ton/km²/yrと与えられているので,岩石の密度として3000 kg/m³を用いて単位を変換した.

- 36.全球平均の年降水量は1000 mm くらい.日本の年降水量は 1500 mm くらい.年降水量9000 mm というのは、めちゃく ちゃ多い.
- 37.日本の侵食速度は場所によって異なるが、比較的標高が高い山地では1 mm/yrを超え、中部山岳地帯の高山部では3-5 mm/yrに達する[17].これはカウアイ島に比べるとかなり大きい、この日本の速い侵食速度は、日本がテクトニクスの活発な地域にあることによると考えられている。
- 38. 筆者がサンゴについて知っていることの多くは[18]による.
- 39.サンゴに褐虫藻が共生していることは、川口四郎(岡山大学 名誉教授)によって1944年に発見された。サンゴ礁の豊かな 生態系を支える一次生産者は、サンゴに共生する褐虫藻であ る。オアフ島のハナウマ湾(Hanauma Bay)では、シュノーケ リングによってサンゴ礁生態系をお手軽に観察することがで きる。
- 40.サンゴ礁が発達するのは冬の表面水温が18℃以上の場所とされる.造礁サンゴ自体は冬に14℃まで下がる場所にも生息し, 千葉県の館山には小さな造礁サンゴの群落がある.

サンゴは刺胞動物門に属する動物で、炭酸カルシウ ムからなる固い骨格をつくる³⁸.大きな骨格をつくっ てサンゴ礁を形成する造礁サンゴは、体内に共生させ た褐虫藻から提供される光合成産物を利用して、速い 速度で骨格形成をおこなう³⁹.褐虫藻が光合成をする には光が必要なため、造礁サンゴは熱帯・亜熱帯の浅 い海にのみ生息する⁴⁰.造礁サンゴは、深い海に沈む と共生している褐虫藻が抜けてしまって死んでしま う⁴¹.

造礁サンゴは上に向かって成長することができるの で、島が沈降していたとしても、サンゴ礁の成長速度 が沈降速度よりも速ければ、サンゴ礁は深海⁴²に沈む ことなく海面下すれすれの位置を維持する.ハワイ諸 島(北西ハワイ諸島を含む)においてサンゴ礁の成長速 度を調べた結果[15]によると、サンゴ礁の成長速度は 緯度に依存し、いちばん南のハワイ島では11 mm/yr、 いちばん北のクレ環礁では0.2 mm/yrである⁴³.これ らの成長速度は、プレート冷却による沈降速度~0.02 mm/yr(4.1節)よりも十分に速いので、プレート冷 却による沈降でこれらのサンゴ礁が海の深くに沈むこ とは(プレート運動でもっと北に移動してサンゴ礁の 成長速度が1桁以上遅くならない限り)なさそうであ る^{44.45}.

サンゴ礁は海水準変動からも大きな影響を受ける. 海水準は気候変動にともなって変化することが知られ ている⁴⁶.例えば,最終氷期最盛期(約18000年前)か

- 41. 英語では、造礁サンゴが深い海に沈んで死ぬことを "drowned (溺れた)"と表現するようである.
- 42.ここでは、ざっくり100 m(サンゴ礁が成長できなくなる深さ) より深い海を「深海」と呼ぶことにする.水深100 mにおける 太陽光量は海面直下に比べると大幅に減っているので、サン ゴ礁の成長速度は海面下のそれに比べたらかなり遅くなって いるはずである.造礁サンゴが溺れる深さはもうちょっと深 い(~150 m)らしい[9].
- 43. 礁としての成長速度はサンゴそのものの成長速度に比べるとだいぶ遅い.サンゴには200 mm/yr に達するような速い成長速度をもつものもあるが,打ち寄せる波によって破壊されたり,生物によって破壊されたりする(生物侵食).サンゴ礁周辺の海底を埋めている白い砂は主にサンゴの破片であり,サンゴが砕かれていることを示す証拠である.
- 44.サンゴ礁の成長が島の沈降速度よりも遅くなってサンゴ礁 が沈む限界をダーウィン・ポイント(Darwin Point)と呼ぶ らしい[15].ダーウィンは進化論を提唱したあのダーウィン (Charles Darwin)である、ダーウィンは、サンゴ礁の形成と 発達を島の沈降によって説明する沈降説を提唱した。

ら6000年前にかけて,海水準は120 m以上上昇,そ の間の上昇速度は平均でも10 mm/yr,短期間にはそ れ以上にもなる.この海水準の上昇に見合うだけの成 長ができなかったサンゴ礁は,深海に沈むことになる.

気候変動の時間スケールは10万年程度⁴⁷なので,海 水準変動で深海に沈んでもしばらく待てばまた浅海に 戻る.しかし,沈んでいる間にサンゴ礁を載せた海洋 底が沈降すると,海水準が元に戻ってもサンゴ礁の水 深は元に戻らない.例えば,ハワイ島の荷重による海 洋底の沈降は~3 mm/yr,10万年あれば~300 mも沈 む.海水準変動によって溺れたサンゴ礁は,溺れてい る期間が長くなると,海水準が元に戻っても浅海(水 深100 m以内)に戻らないということが起こりえる.

10 mm/yrに達する速い成長速度をもつハワイ島にお いてサンゴ礁が海中に沈んでいること(4.2節)は,海 洋底の沈降(~3 mm/yr)だけでは説明するのが難し いが,海洋底の沈降と海水準変動を組み合わせると説 明することが可能となる.

サンゴは海水中でないと生育しないため、サンゴ礁 が海面上に出ている場所においては、過去に現在より も海面が高い位置にあった時代があったことになる. すなわち,隆起しているか,海水準が今よりも高かっ たか,いずれかである.オアフ島で陸上にみつかるサ ンゴ礁は,前者(隆起)によるものである⁴⁸.ミッドウ ェー環礁やクレ環礁は,後者(海水準変動)によって海 面上に出たものである⁴⁹.

6. 火山見学案内はネタ切れである

もはや「火山見学案内」ではないだろうという指摘 は全く正しい. 最初[1]は正しくハワイ島の火山見学 案内であった. その2[2]はオアフ島の火山見学案内で あった(表題が「ハワイ島の」になっていることには目 をつぶってもらいたい). 本稿(その3)に火山見学案 内がないのは, ネタ切れだからである. マウイ島 (Maui)やカウアイ島など, ハワイ諸島にはまだまだ 見所があるのだが, 筆者は行ったことがない. 機会が あれば行ってみたい(火山見学案内を書いてみたい)と 思っているので,マウイ島やカウアイ島でフィールド ワークをする人がいたらぜひ声をかけて欲しいと思っ ている.

筆者は雑食なので,目的地は火山島でなくてもよい. サンゴ礁の島も好物である⁵⁰.本稿に出てきた⁵¹,ミ ッドウェー環礁,エニウェトク環礁⁵²,大東諸島,な どなど,調査に行く人がいたら筆者を連れていって欲 しいと思う.

- 48.南大東島と北大東島は環礁が隆起してできた島(隆起環礁) で、中央部が凹んで周辺部が高くなった形をしている.北 大東島で1936年におこなわれた深層ボーリングでは、深さ 431.7 mまで炭酸塩岩であることが明らかにされた[20].大東 隆起環礁は「日本の地質百選」に選ばれている.
- 49. 筆者が大学院生のとき、先輩から「サンゴ礁には3つのアップ がある」と教えられた、島の沈降に合わせてサンゴ礁が成長 して海面下すれすれを維持しているkeep up、サンゴ礁が海 面上に出てしまったcatch up. そして溺れてしまったサンゴ 礁 give up. 出典を探してみたけど見つけられなかった、出典 を知っている人がいたら教えてください。
- 50. 筆者が大学院生のとき、キリスィマスィ島(Kiritimati)に地 震計を設置する話があって、現地に行って地震計設置の手 伝いをする人の募集があった. なにか用事があって見送っ たのだが、行かなかったことをとても後悔している. キリ スィマスィ島は、ハワイ諸島とほぼ同じ経度にあるが、標 準時はUTC+14 を採用している(ハワイ諸島はUTC-10). UTC+14の採用は、キリバス共和国の領土が日付変更線をま たいで散らばっており、国の東西で日付が変わらないように するためのものである(結果として、キリスィマスィ島は世 界で最も早く新しい一日が始まる場所となった).
- 51.エニウェトク環礁と大東諸島がどこに出てきたかわからない 人は、脚注を調べてみよう.

^{45.} 中部太平洋にあるエニウェトク環礁(Enewetak Atoll)では 2カ所で深い穴が掘られ、基盤となる火山岩の上にそれぞれ 1405 mと1287 mの厚さの石灰岩が堆積していることが明ら かにされた[12]. 火山岩の年代は7590万年,火山島の形成か ら水没まで1500万年かかるすると、石灰岩の堆積速度は0.02 mm/yrである.ハワイ諸島におけるサンゴ礁の成長速度(1-10 mm/yr)を考えると、0.02 mm/yrの速度で石灰岩を堆積 させることは十分可能であるように思われるが、それを6000 万年もの期間にわたって継続するというのは、なかなかすご いことのように思える.それはそれとして、エニウェトクは どう綴るのが正解なのかわからない。"Enewetak"はGoogle マップが採用する表記であるが、[12]は"Eniwetok"、[14] は "Anawetok"、[19]は"Anewetak"である.Wikipediaには "Enewetak"、"Eniwetok", "Eniewetok"の3つが書かれている.

^{46.} 海水準変動の主な原因は、100万年の時間スケールで考える なら、海水量と海水温の変化である.地球の表面にある水の 量はほとんど変わらないとすると、海水量の変化は主に陸上 にある氷の量の変化によって引き起こされる.海から蒸発し て陸上に降った水が雪や氷となって陸上に固定されると海水 量は減り、陸上にある氷が融けて水となって海に流れ込むと 海水量は増える.また、海水温が変わると熱膨張によって海 水の体積が変化して、海水準が変化する.

^{47.} ミランコビッチ・サイクル(Milankovitch cycles). 20年くらい前に、「ミランコビッチ・サイクルに合わない年代データは間違ってるとか精度が悪いとか言われて、ミランコビッチ・サイクルに合うように年代の書き換えがおこなわれることがあるんだ.それはおかしいだろ」と言っていた人がいた、筆者はその真偽を知らないが、ミランコビッチ先生の理論が偉大であることを示すエビソードとして記憶している. ミランコビッチ先生の肖像は、セルビアで発行されている2000ディナール紙幣に使われている.

参考文献

- [1] はしもとじょーじ, 2018, 遊星人, 27, 66.
- [2] はしもとじょーじ, 2018, 遊星人, 27, 246.
- [3] Hawaiian Volcano Observatory, U.S. Geological Survey, Volcano Watch, https://volcanoes.usgs.gov/ observatories/hvo/hvo_volcano_watch.html
- Kilauea, Tilt and GPS Deformation Data, https:// volcanoes.usgs.gov/volcanoes/kilauea/monitoring_ deformation.html
- [5] Hawaii Volcanoes National Park, https://www.nps.gov/ havo/index.htm
- [6] 中村一明, 1978, 火山の話, 岩波新書, 228p.
- [7] Volcano World, http://volcano.oregonstate.edu
- [8] Kumagai, H. et al., 2001, Science 293, 687.
- [9] Poland, M.P. et al. eds., 2014, US Geol. Surv. Prof. Paper 1801, 428p., http://dx.doi.org/10.3133/pp1801
- [10] 武藤大介, 2017, 験震時報, 81, 1.
- [11] トーマス・トウェイツ(著), 村井理子(訳), 2015, ゼロからトースターを作ってみた結果,新潮文庫, 211p.
- [12] Ladd, H.S. et al., 1970, US Geol. Surv. Prof. Paper 680-A, 29p., http://dx.doi.org/10.3133/pp680A
- [13] Turcotte, D.L. and Schubert, G., 2002, Geodynamics 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 456p.
- [14] Caplan-Auerbach, J. et al., 2000, JGR 105, 2679.
- [15] Grigg, R.W., 1997, Coral Reefs 16, S33.
- [16] Ferrier, K.L., 2013, GSA Bulletin 125, 1146.
- [17] 藤原治ほか, 1999, サイクル機構技報 5, 85.
- [18]本川達雄、サンゴとサンゴ礁のはなし-南の海の

ふしぎな生態系,中公新書, 273p.

- [19] Clouard, V., and A. Bonneville, (2004) http:// www.mantleplumes.org/WebDocuments/ PacificSeamountAges.pdf
- [20] 井龍康文, 2013, 地学雑誌 122 (2), p.iii.

^{52.}エニウェトク環礁はビキニ環礁(Bikini Atoll)の隣にある。ビ キニ環礁は世界遺産にも登録されている有名な核実験場(水 着のビキニはその破壊的威力を原子爆弾になぞらえて命名さ れた)であるが、エニウェトク環礁もまた核実験場であり世 界で最初の水素爆弾の実験がおこなわれた場所として知られ ている. 核実験をおこなったアメリカ政府は実験終了後に島 の除染をおこなったが、放射能汚染のレベルは高いままに なっている.国際原子力機関(IAEA)が1998年に出した報告 書は、ビキニ環礁について「現状の放射能汚染の状況は永住 に適さない」としている. また、エニウェトク環礁に建設さ れたルニット・ドーム(Runit Dome)は、放射能汚染物質を コンクリートで固めて格納しているのだが、コンクリートの 劣化によりプルトニウムなど放射性物質の漏出が懸念されて いる.エニウェトクは無邪気に行きたいと言ってよい場所で はないのかもしれない. [19] によると"ビキニ(Bikini)"ではな く "ピキンニ(Pikinni)" であるらしい.