

オアフ島ホノルル火山活動による タフリングの地形分析

磯 望・黒田圭介¹⁾・安永典代²⁾

Topographical Analysis of Tuff-Rings Formed by
Honolulu Volcanic Activity on Oahu

Nozomi Iso, Keisuke Kuroda¹⁾, and Noriyo Yasunaga²⁾

I. はじめに

ハワイ列島 (Hawaiian Chain) は北大西洋の中央部に北西～南東方向に約 2500km にわたって延びる火山島群である。ハワイ列島はホットスポットの影響によるマグマの噴出によって形成された火山島群であるが、南東部に位置するハワイ諸島 (Hawaiian Islands) の島々を除くと、島の表面は火山の沈水後に成長した珊瑚礁に覆われている。ハワイ列島では、北西部の島ほど火山岩が陸上で噴出開始した形成年代が古く、南東に向かうほど、等速的に火山島の形成年代が新しくなることが知られている。この事実から、太平洋プレートより深所に存在しているホットスポット仮説とプレートの移動速度や移動方向が明らかにされたことで知られる (Clague, D. A. & Dalrymple, G.B., 1987 など)。

ハワイ列島東部を構成するハワイ諸島は、北西端のニイハウ (Niihau) 島から南東端のハワイ (Hawai'i) 島まで、8つの火山島からなり、周辺は珊瑚礁がこれを囲んでいる (図1)。現在活動中の火山は最東端のハワイ島にあり、キラウエア (Kilawea) 火山の東方にあるプウオウ (Puu Oo) 火口では、20

1) 西南学院大学人間科学部非常勤講師・福岡市史編さん室調査補助員

2) 岩田屋(株)・2007年児童教育学科磯ゼミナール卒業生

年以上も活発に溶岩を噴出し続けている。また、ハワイ島の約50km 東南方沖には、ロイヒ (Loihi) 海底火山の存在が知られ、その頂上は海面下969mにまで達していることが確認されており、将来新たな島の誕生をもたらす可能性が大きい (Malahoff, A.,1987)。

ハワイ諸島は、このようにホットスポット上の火山島として形成され、規模の大きな楕状火山を形成した。Stearns, H.T. (1946) は、ハワイ諸島の火山島の発達過程を検討し、主要な楕状火山形成 (主活動期) 後、大規模な海底地すべりを伴う浸食期を経て、新たな回春期 (後浸食期) の火山活動が生じることを模式的に示した。

本稿では、オアフ (Oahu) 島に見られる回春期 (後浸食期) の火山活動であるホノルル (Honolulu) 火山活動によって形成された水蒸気爆発と関連したタフリング (Tuff-ring) 地形の計測を行い、その結果を示すとともに、これらのタフリング形成後の浸食や噴出物体積から推定できる噴火規模等について、解析することを目的とする。

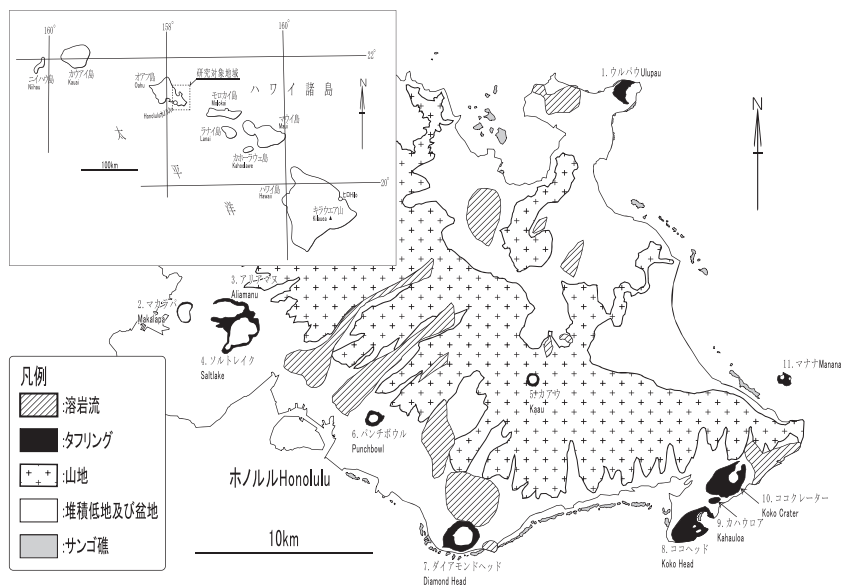


図1 研究対象地域の地形概観図
(溶岩流とタフリングはホノルル火山活動による)

II. オアフ島の地形とホノルル火山活動による地形

研究対象地域であるオアフ島は、前述した主活動期と回春期の両方の火山活動によって形成された島である（図1）。現在のオアフ島の概形は、主活動期にワイアナエ（Waianae）楯状火山とコーラウ（Koolau）楯状火山の2つの火山が形成され、溶岩流出によりこの2つの楯状火山の低地が陸化して形づくられたものである。もちろん当時の楯状火山は既に浸食されており、現在は当時溶岩の火道となっていたリフトゾーン（Rift Zone）付近が、浸食への抵抗性を示した結果、現在も2列の山体を残しているものである。2つの火山帯の間は中央低地を形成し、その南部は真珠湾の沈水地形が見られる（Hazlett and Hyndman 1996）。

ワイアナエ楯状火山は、オアフ島の西側に位置するコーラウ楯状火山よりも古い楯状火山である。ワイアナエ楯状火山から噴出した溶岩は約380万年～約240万年前のもので、主にソレライト質玄武岩のパホエホエ溶岩流からなる。コーラウ楯状火山はワイアナエ楯状火山よりも新しく、オアフ島の面積の約3分の2を占める島内最大規模の山地を形成している。この火山が陸化した後に噴出した溶岩は約270万年前以前で、最も新しい溶岩は170万年前のものである。コーラウ火山から噴出した溶岩は全てソレライト質玄武岩である。この、コーラウ楯状火山の形成が終了し、約100万年の休止期を経て、ホノルル火山活動と呼ばれる後浸食期の火山活動が始まった。この後浸食期の火山活動は、1）主活動期の活動後約100万年の休止期を経ておこる、2）独立単成火山群を作る、3）主活動期よりもマグマはアルカリ質で噴出物量は桁違いに小さい、4）北西方向（火山島列）方向の最小主圧縮応力軸を持つ引張応力場で起こる、5）主活動期の山頂を中心とする地域で起こる、という性格で特徴づけられている（中村一明, 1989）。

この後浸食期の段階の火山活動はマウイ（Maui）島からカウアイ（Kauai）島にかけて見られるが、その代表例がオアフ島のホノルル火山活動である。このホノルル火山活動により、ダイヤモンドヘッド（Diamond Head）、ココヘッド（Coco Head）などの小型の火山が形成された。ホノルル火山活動によって

形成された一連の火山群は約 40 ヶ所以上にも及ぶ (図 1)。これらの形成年代は、約 86 万年前以降とされている (Self and Moberly, 1997)。なお、この火山群の噴火の平均間隔は 4 万年～5 万年で、最新の活動期と考えられる Koko Fissure が 3 万年前頃であることを考慮すると、過去の噴火の間隔と比べて必ずしも長いとは言えず、将来新たな噴火が生ずる可能性は否定できないと考えられている。

ホノルル火山活動は、単性火山群一般に見られるように、タフリングや、タフコーンから流出した溶岩流などの火山地形で知られるが、特徴的な火山地形として、水蒸気爆発に特有のタフリングも少なくない。ここでは、コーラウ山地とその周辺に分布するタフリングを中心に地形計測を行った。

研究対象地域に分布するタフリングの成因は、火山活動によって形成された火山灰丘である。タフリングは、一般に水蒸気爆発に伴う爆発的噴火活動によって形成される。タフリングは (図 2)、内部の平らな部分のクレーター底、タフリングの周囲を取り囲む盛り上がった部分のリム、そして、クレーター底から外部へ向かう立ち上がり斜面のクレーター壁から形成されている。オアフ島に分布するタフリングは、大部分が波打ち際に上昇したマグマが、海水や地下水に接触し、激しい爆発によって形成されたものと考えられており、これはいわゆるマグマ水蒸気爆発に伴って形成されたものである。タフリングの形状を特徴付ける環状のリムは、激しい水蒸気爆発によって噴き上げられた多量の火山灰や火山岩片を火口周辺に堆積して形成した環状の破碎丘である。ホノルル火山活動のタフリングには、赤色や黒色の噴石にまじって、白色の珊瑚礁石灰岩の破片が大量に混じることが多く、浅い海底から珊瑚礁を吹き飛ばして火山が噴出したことが一目で判別できる。

III. 地形分析の方法

1. 地形区分

U. S. Geological Survey (USGS) 発行の 1/24,000 地形図と、Google Earth より取得した空中写真を用いて、オアフ島南東部の地形区分を行った。本研究では地形を、タフリング、溶岩流、山地、堆積低地及び盆地に分類した (図 1)。

ホノルル火山活動ではカIMUMキ（Kaimuki）火山のような小規模なシールド（楕状火山）のほか、溶岩流も大規模に噴出したことがわかる。ここでは、地形から概形を推定しやすいタフリングに注目して、地形を検討する。

2. タフリングの計測

タフリングの形状を把握するために、NASA 発行の 30mメッシュの DEM データ（SRTM）とカシミール 3D を用いて、クレーターの断面図を作成した。断面の測線は、できるだけタフリングの標高の最高地点と最低地点を通るように設定した。

また、USGS 発行の 1/24,000 地形図と NASA 発行の DEM データ（SRTM）、及びカシミール 3D を用いて、タフリングの比高、深さ、直径、面積を計測した。なお、体積については直径と比高を用いて算出した（図 9, 10）。タフリングの各部名称と計測箇所を、図 2 に示す。

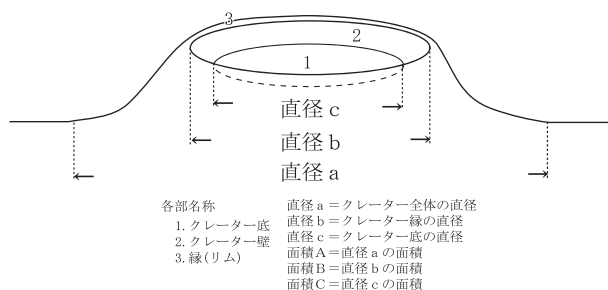


図 2 タフリングの模式図と各部名称

3. タフリングの浸食度合いの推定

本研究では、接峰面図から地形の浸食前の状況を復元し、画像処理ソフトを用いて浸食状況を推定した。まず、USGS 発行の 1/24,000 地形図を用いて、接峰面図を作成した。谷埋めの間隔は、1000m, 100m とした。さらに、接峰面図をデジタルデータ化して、浸食度合いを定量的に算出した。その詳しい方法については、第 V 章にて述べる。

4. 噴火規模の推定

タフリングの体積から、火山爆発指数（Volcanic Explosive Index 以下 VEI 値）を推定した。この VEI は一回の噴火の総噴出量をよりどころとして火山爆

発の大きさを示す尺度として用いられる指数である。VEI 値の算出のためには、遠方へ飛散した火山灰量も見積もる必要がある。しかし、ここでは遠方での情報が得にくいこと、また水蒸気爆発を伴う噴火では、一般に遠方まで火山灰が飛散しにくい事実が認められるところから、タフリングの体積と火山灰総噴出量とは近似するものと見なして、VEI 値を求めている。詳しい体積と VEI 値の求め方については、第VI章に示す。

IV. タフリングの地形分析結果

本章では、研究対象地域に分布するタフリングの地形的特徴を記載する。研究対象地域の地形区分図を図1に、各タフリングの地形図と地形断面図を図3に、各タフリングの地形計測結果を表1に示す。

1. タフリングの分布の特徴

研究対象地域（図1）に分布するタフリングは、Ulupau（ウルパウ）、Makalapa（マカラパ）、Aliamanu（アリアマヌ）、Salt Lake（ソルトレイク）、Kaau（カアウ）、Punchbowl（パンチボウル）、Diamond Head（ダイヤモンドヘッド）、Koko Head（ココヘッド）、Kahauloa（カハウロア）、Koko Head（ココヘッド）、そしてManana（マナナ）の計11個が判読できた。これらタフリングの立地場所を見てみると、Ulupau、Makalapa、Diamond Head、Koko Head、Kahauloa、Koko、Manana は海に面した海岸沿いに分布しており、Aliamanu、Salt Lake、Punchbowl は海岸近くの平地に分布している。また、Kaau は山地に分布している唯一のクレーターである。従って、オアフ島南東部に分布するタフリングのほとんどは海岸沿いに分布してことが分かるが、Kaau のみは、典型的な水蒸気爆発の地形は呈しているものの、水の供給源は判然としない。

2. タフリングの形状と地形断面概観

1) Ulupau

Ulupau は、Mokapu Peninsula の北端に位置するタフリングである。地形的には Ulupau Head と呼ばれる火山体と Ulupau Crater と呼ばれる凹地で構成されている。本研究ではこの両者をまとめて Ulupau と呼ぶ。図3-1を見て

みると、Ulupau はリング状ではなく、馬蹄形カルデラのような形状をしている。断面図を見てみると、Ulupau の断面はほぼ三角形に近い形をしており、東側に形成されていたリムは、浸食されているものと推定される。

2) Makalapa

Makalapa は Pearl Harbor の東に位置するタフリングである。地形的には環状の火山体と Makalapa Crater と呼ばれる凹地で構成されている。本研究では Makalapa と呼ぶ。図 3-2 の地形図と空中写真を見てみると、タフリングの形は不明瞭で判読が困難である。

3) Aliamanu

Aliamanu は Pearl Harbor の東、Makalapa の東に位置するタフリングである。図 3-3 の地形図を見てみると、Aliamanu 全体は長軸方向が東西方向の楕円形であるが、タフリング内部を見てみると、少なくとも 3 対のタフリングが複合して一つのタフリングを形成しているように見える。また、タフリング西端部の一部はリングが切れている。

4) Salt Lake

Salt Lake は Pearl Harbor の東、Aliamanu の南に位置するタフリングである。地形的にはほぼリング状をした火山体と Salt Lake Crater と呼ばれる凹地で構成されている。図 3-4 の地形図を見てみると、タフリングの形状は人工改変が進んでいるためと、Aliamanu とほとんど接してしまっているため、リムを判読するのが難しい。断面図を見てみると、Aliamanu と同じく、鞍を横から見たような形をしている。

5) Kaau

Kaau は Palalo Vally の北に位置するタフリングである。Kaau の分布標高は 549m と高い。図 3-5 の地形図を見てみると、Kaau はほぼ真円の形状をしている。水蒸気爆発により形成されたタフリングではあるが、海から離れた位置にあり、噴火当時の水蒸気の供給源としては、コーラウ火山体中の地下水または、地表付近の湿地の存在などが推定される。

6) Punchbowl

Punchbowl は Honolulu の中心に位置するタフリングである。Punchbowl

の標高は153mである。図3-6の地形図を見てみると、Kaauと同じように真円の形状をしている。断面は台形で、クレーター底は他のタフリングに比べて火山体の比高の割に浅い。このクレーターをKaauと同様水蒸気の供給源は海水でなかった可能性がある。

7) Diamond Head

Diamond HeadはWaikikiの東方に位置するタフリングでオアフ島の代表的な景観の一つとして知られる。Diamond Headの標高は232mである。図3-7の地形図を見てみると、その形状は、Kaau, Punchbowlと同じく等高線の閉じた環状である。断面は皿を伏せたような形をしている。

8) Koko Head

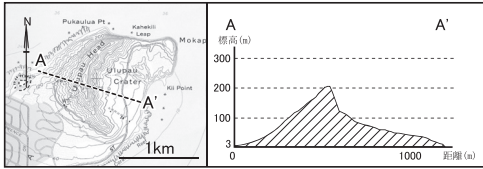
Koko HeadはMaunaloa地区の南に位置するタフリングである。地形的にはKuamookaneと呼ばれる火山体と、Nonoula, Iheihelaukakea, Hanauma Bayを含む複数のタフリングから構成されている。本研究ではこれらをまとめて、Koko Headと呼称する。図3-8の地形図を見てみるとその形状は複雑

表1 タフリングの計測結果

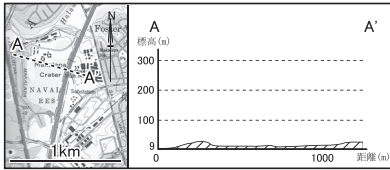
	高さ (m)		直径 (m)			面積 (㎡)		
	比高	深さ	a	b	c	A	B	C
1. Ulupau	210	159	1,478.5	929.0	469.0	1,731,000	756,000	398,000
2. Makalapa	28	20	907.5	789.5	617.5	660,000	512,000	341,000
3. Aliamanu	113	125	1,581.0	1,519.5	1,109.5	1,823,000	1,644,000	1,029,000
4. Salt Lake	93	108	2,163.5	1,855.0	1,617.0	3,755,000	3,234,000	1,866,000
5. Kaau	80	80	870.0	639.5	424.0	505,000	380,000	147,000
6. Punchbowl	107	24	1,068.0	499.0	372.5	1,072,000	203,000	121,000
7. Diamond Head	232	147	1,735.5	1,121	733.0	2,444,000	952,000	516,000
8. Koko Head	196	112	2,206.5	1,562.5	1,039.0	3,195,000	1,447,000	640,000
9. Kahauloa	32	32	439.0	336.5	214.5	200,000	94,000	36,000
10. Koko Crater	368	271	1,970.5	855.5	731.0	2,910,000	711,000	248,000
11. Manana	110	92	406.5	291.0	151.5	137,000	85,000	16,000

※計測部位は図2に示す

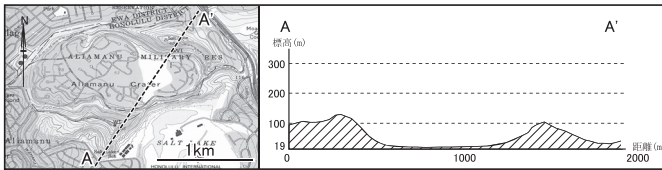
3-1. ウルパウUlupau



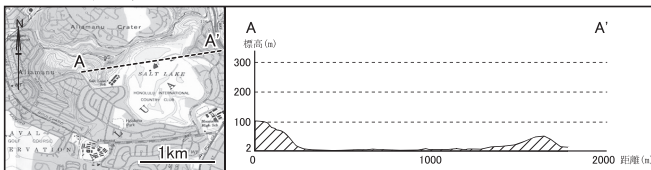
3-2. マカラパMakalapa



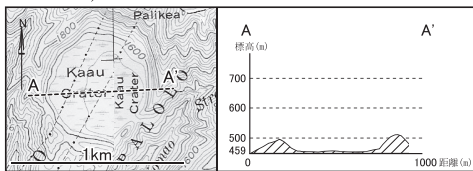
3-3. アリアマヌAliamanu



3-4. ソルトレイクSaltlake



3-5. カアウKaau



3-6. パンチボウルPunchbowl

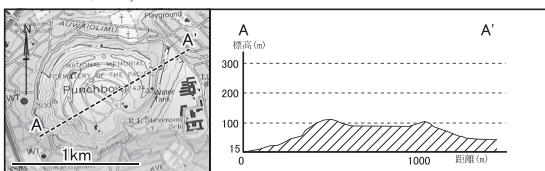
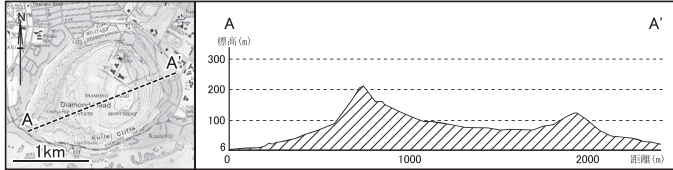
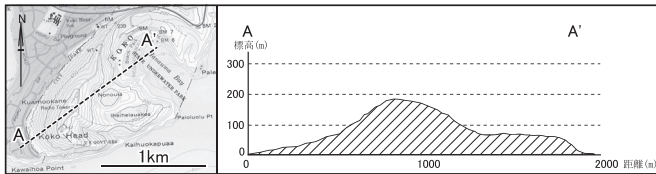


図3 タフリングの地形図と地形断面

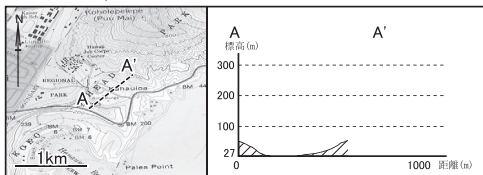
3-7. ダイヤモンドヘッド Diamond Head



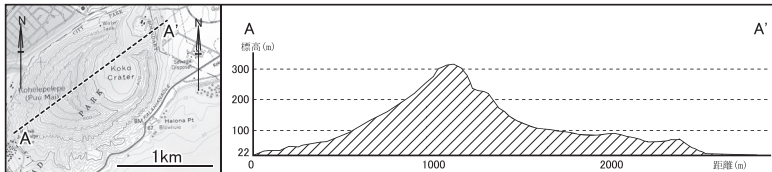
3-8. ココヘッド Koko Head



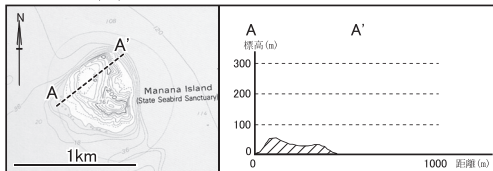
3-9. カハウロア Kahauloa



3-10. コクレーター Koko Crater



3-11. マナナ Manana



で、Koko Head の断面は大きい火山体と小さい火山体が連なっているような形をしている。

9) Kahauloa

Kahauloa は Maunaloa 地区の南、Koko Head と Koko Crater の間に位置するタフリングである。Kahauloa の標高は 32m である。図 3-9 の地形図を見

てみると、楕円形をした環状のタフリングである。断面は鞍のような形をしている。

10) Koko Crater

Koko Crater は Maunaloa 地区の南東、Koko Head の北東に位置するタフリングである。地形的には、Kohelepelepe (Puu Mai) と呼ばれる火山体と、Koko Crater と呼ばれるタフリングから構成されている。本研究では両者をまとめて Koko Crater と呼称する。図 3-10 の地形図を見ると、ひょうたんのような形をしており、断面を見ると三角形に近い形をしている。

11) Manana

Manana は、Manana Island の西側に位置するタフリングである。標高は約 110m である。Manana は、今回研究対象としたタフリングの中で唯一の島であり、海面下にもタフリングの火山体が存在すると考えられる。図 3-11 を見ると、Manana の断面は、浸食されて三角形に近い形をしている。

V. タフリングの浸食状況

1. 画像処理ソフトを用いた解析方法

本研究では、画像処理ソフトを用いることによって簡単かつ定量的に浸食状況を推定する方法を提案するものである。その手法の概念を示したものを図 4 に示す。

一般に地形の浸食前の状況を推定することは困難であるが、尾根は浸食に対して低下しにくい性質を有することから、浸食前の地形を近似的に復元する手法として、接峰面図の作成が挙げられる。接峰面とは、山頂部や尾根部を原地形と想定し、この仮定のもとに山頂部に接するような仮想面を仮想的な等高線

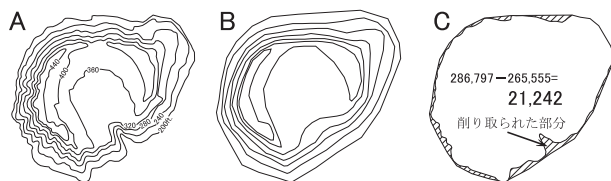


図 4 浸食状況の算出方法概念図

を利用して示したものである。ここでは谷埋法による接峰面図を作成し、タフリング形成時の地形を想定した。なお谷埋幅を大きくすると、より包括的な地形となるため、一般的には浸食前の地形をよく復元すると考えられている。

図4 AはPunchbowlの現在の地形、図4 Bは接峰面図である。図4 Cは、PunchbowlのAとBの200フィート等高線だけを抜き出して重ね合わせたもので、この図の網掛けした部分は浸食を受けて削り取られたと考えられる部分である。そこで、この網掛け部分を定量的に算出するために、AとBをデジタル画像データに変換し、それぞれのピクセル（画素）を画像処理ソフトで数えた。なお、解析に用いた描画ソフトは、Adobe社Photoshop7.0（以下、Photoshop）であるが、ピクセルを数える機能が装備されたものであれば解析可能であると考えられる。また、今回等高線をトレースするために、Adobe社Illustrator9.0（以下、Illustrator）を用いたが、同様の作業はPhotoshopでも可能である。

まず、USGS発行の1/24,000地形図を用いて、接峰面図を描く（図5-1）。今回は100mと1000m谷埋め接峰面を描いた。

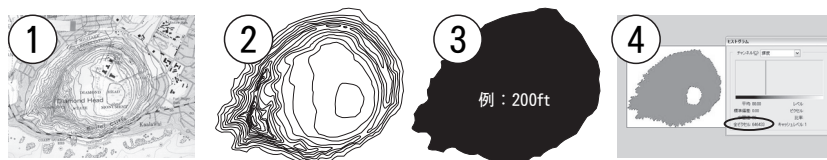


図5 Photoshopを用いた具体的な浸食状況解析方法

なお、浸食度合いを推定できたタフリングは、Ulupau, Punchbowl, Diamond Head, Koko Head, Koko CraterそしてMananaの計6つである。これらの現地地形等高線と1000m谷埋め接峰面図及び100m谷埋め接峰面図を図6に示す。

なお、ここではUSGS発行の地形図の制約上、40フィート毎に接峰面図を作成した。Salt Lake, Aliamanu, Makalapaについては、人工改変の影響が大きく、また等高線が全て明瞭には地形図上に描画されていないため、解析対象から除外した。KaauとKahauloaについては、リムが不明瞭で、解析が困難

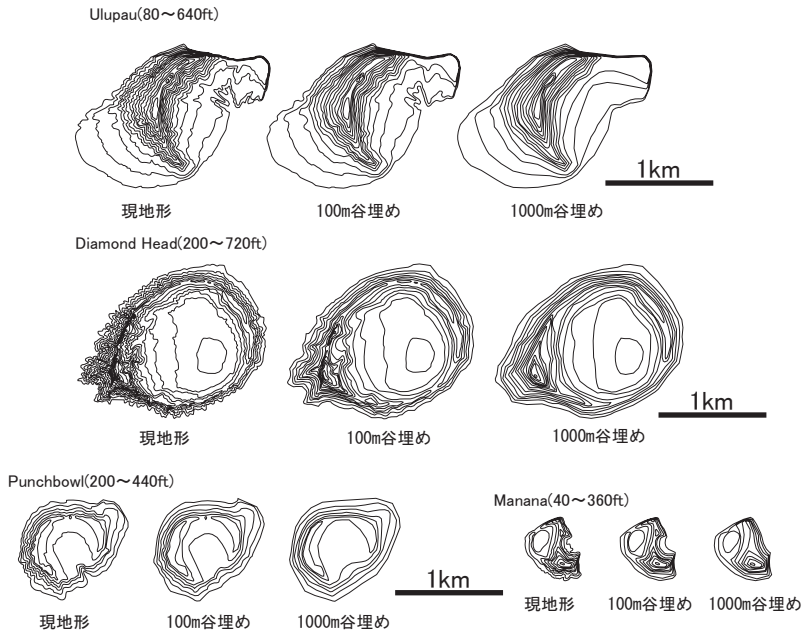


図6 タフリングの接峰面図と現地形の比較例

であった。今回解析できなかったタフリングについては、今後の課題としたい。

この接峰面図をスキャナーでパソコンに取り込み、デジタル画像データに変換した。今回デジタル画像の圧縮形式はJPEGとしたが、Photoshopで加工可能な形式であれば他形式でもよい。また、今回接峰面図は地形図上で作図したが、直接Photoshopで描画しても問題はない。むしろ、作業簡略化の観点からみれば、接峰面図はPhotoshop上で直接作図した方が効率がよいと思われる。

次に、デジタル画像に変換した接峰面図をIllustratorで開き、ペンツールを用いて等高線を正確にトレースし(図5-2)、等高線毎に塗りつぶした(図5-3)。Photoshopでピクセル数を数えるためのJPEG保存形式は、最高画質で統一した。

JPEG画像のピクセル数は、PhotoShopのヒストグラムで数えることができる(図5-4)。図5-3は、Diamond Headの200フィート等高線であるが、

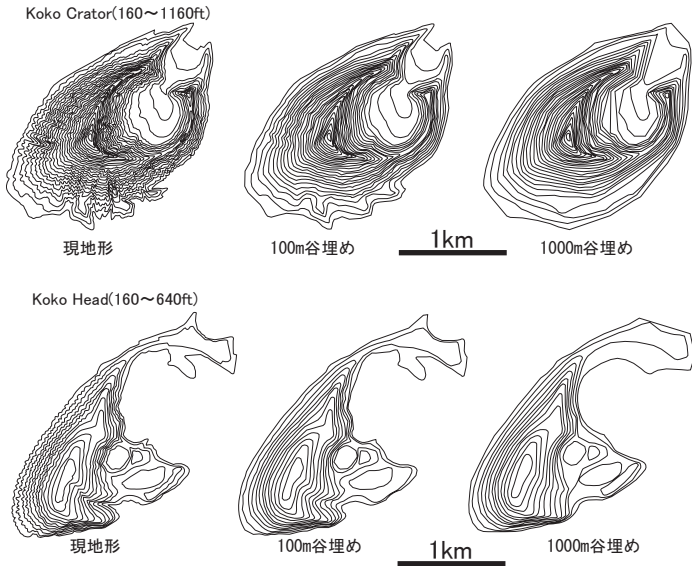


図6 タフリングの接峰面図と現地形の比較例

これを自動選択ツールで選択し、ヒストグラム画面を開くと、そこに選択したピクセル数が表示される(図5-4)。この作業を等高線毎に行い、表計算ソフトで集計し、同高度の等高線で囲まれた面積をピクセル数で示した(表2)。

2. 浸食状況と形成年代の関係

タフリングの原地形形成後に浸食による地形開析が次第に進行すると推定されるので、浸食量(比率)が増加するほどタフリングの形成年代が古くなる可能性がある。タフリングの原地形が接峰面図によって復元されると仮定すると、接峰面のピクセル数と比べて、現地地形面のピクセル数がより少なくなっているタフリングほど起源が古い地形であると一般には考えられる。

このことを検討するために、ホノルル火山活動の各タフリングの形成年代と接峰面図の等値線で囲まれる面積(ピクセル数)と現地形の等高線で囲まれる面積(ピクセル数)をそれぞれ比べて、同高度の等高線で囲まれたピクセル数が、原地形から浸食された割合を各等高線の作業を総計してグラフで示した(図7)。図中の棒グラフの斜線部分は、1000m谷埋め接峰面の全ピクセル数

表 2 各タフリングの 1000m 接峰面, 100m 接峰面及び現地地形面の標高毎のピクセル数と浸食状況

表 2-1 Diamond Head

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
200	640,930	658,700	673,979
240	445,363	464,594	488,025
280	318,668	339,280	358,892
320	230,387	248,546	266,607
360	160,017	175,093	190,117
400	106,904	126,046	140,412
440	59,352	72,691	82,064
480	34,814	40,115	52,172
520	24,134	26,530	38,870
560	15,847	17,192	23,675
600	10,266	11,253	16,211
640	6,234	6,872	9,922
680	2,555	2,934	6,021
720	599	728	2,424
計	2,056,070	2,190,574	2,349,391

表 2-3 Koko Head

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
160	662,833	676,379	727,785
200	508,966	523,115	544,151
240	359,963	368,056	399,175
280	303,159	310,747	318,103
320	258,915	265,677	270,891
360	221,837	227,469	232,648
400	187,193	193,173	199,361
440	154,536	158,477	163,933
480	121,232	123,227	131,105
520	83,765	85,246	89,217
560	55,930	57,579	60,919
600	34,290	35,707	38,145
640	13,041	13,228	14,424
計	2,965,660	3,038,080	3,189,857

表 2-5 Ulupau

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
80	584,814	591,118	604,905
120	459,788	465,085	488,284
160	317,443	324,173	350,906
200	231,865	240,281	263,058
240	182,886	188,289	193,275
280	150,912	155,664	160,871
320	123,101	126,749	131,610
360	101,264	105,835	108,785
400	82,356	88,019	91,518
440	65,289	69,021	71,780
480	50,556	53,225	55,486
520	35,654	36,899	39,340
560	22,490	23,280	25,030
600	11,518	12,969	13,929
640	3,220	3,715	4,833
計	2,423,156	2,484,322	2,603,610

表 2-2 Manana

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
40	79,330	81,532	85,359
80	47,985	50,472	62,286
120	31,125	32,882	43,504
160	21,170	21,872	32,601
200	12,871	12,948	20,334
240	7,986	8,158	9,998
280	4,859	4,903	5,457
320	2,348	2,553	2,680
360	205	213	265
計	207,879	215,533	262,484

表 2-4 Koko Crator

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
160	928,256	943,004	990,224
200	812,399	833,924	895,970
240	703,291	725,735	779,480
280	604,337	621,006	649,098
320	516,536	530,967	548,028
360	440,721	455,665	473,793
400	381,117	396,545	412,699
440	333,752	344,319	356,023
480	292,772	302,240	311,665
520	253,683	261,938	269,864
560	212,585	219,593	224,987
600	186,406	193,651	197,954
640	159,369	165,981	170,234
680	135,157	139,602	144,361
720	114,158	117,749	120,741
760	93,559	96,574	99,344
800	78,182	80,755	82,861
840	62,321	66,023	67,182
880	49,857	52,671	54,567
920	38,431	40,308	41,709
960	29,848	31,566	32,071
1000	22,589	23,616	23,851
1040	15,294	16,053	16,330
1080	10,148	10,724	10,853
1120	5,952	6,309	7,052
1160	2,966	2,993	3,022
計	6,483,686	6,679,511	6,983,963

表 2-6 Punchbowl

標高 (フィート)	ピクセル数		
	現地地形	100m	1000m
200	265,555	275,111	286,797
240	224,302	232,836	236,841
280	184,371	192,092	194,380
320	154,689	160,024	161,656
360	94,025	98,470	132,499
400	37,132	40,782	45,126
440	8,954	11,764	13,878
計	969,028	1,011,079	1,071,177

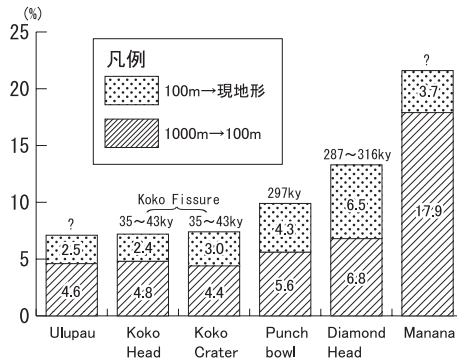


図7 タフリングの浸食率と形成年代の関係

から 100m 谷埋め接峰面の差分値が、1000m 谷埋め接峰面の全ピクセル数に占める割合を%で示したものである。また、棒グラフのドット部分は 100m 接峰面図の等値線で閉曲する面積と現地形の差分値が、100m 谷埋め接峰面の全ピクセル数に占める割合を%で示している。

これら二つを加算した棒グラフが、1000m 谷埋め接峰面図の各等値線で囲まれる範囲の総面積の全ピクセル数から現地形図の各等高線までの閉曲される面積のそれを引いた値が、1000m 谷埋め接峰面の全ピクセル数の何%にあたるかを示したものである。これらの割合は原地形と比べて何%浸食されたかという浸食率（浸食の度合い）を示している。

1000m 谷埋め接峰面図と現地形図を比較すると、Manana が群を抜いて浸食された割合が大きい。これは、Manana はタフリング自体が小さな火山島であるため、海食の影響が他の陸部にあるタフリングよりも大きいためと考えられる。Manana を除く 5 つのクレーターは、1000m 谷埋め接峰面図の等高線で囲まれた面積と 100m 谷埋め接峰面図の等高線で囲まれた面積の縮小率と、100m 谷埋め接峰面図の等高線で囲まれた面積と地形図の等高線で囲まれた面積の縮小率は、各クレーターでそれぞれ 5 %前後である。Self and Moberly (1997) により形成年代順にタフリングを並べると、Diamond Head (28.7~31.6 万年前)、Punchbowl (29.7 万年前)、Koko Head と Koko Crater は 3.5~4.3 万年前に形成されており、浸食率と形成年代にはある程度の相関

が得られた。なお、Ulupau の形成年代は未詳であるが、火山体が海成層の上に乗るという層位関係などから、地質学的には最終間氷期より古い時代の形成であると考えられている。100m 谷埋め接峰面と現地形の浸食割合を見てみると、Ulupau と Koko Head の順序が入れ替わるだけで、1000m 谷埋めと 100m 谷埋めの、浸食割合とほぼ調和的な結果となった。

次に、1000m 谷埋め接峰面と現地形面を見てみると、Diamond Head と Punchbowl の形成年代は、Koko Crater と Koko Head の形成年代と一桁違うが、浸食度合いも 2～3% 違う。また、Koko Crater と Koko Head は、Koko Fissure と呼ばれる一連の火山群であり、形成年代もほとんど同時期（約 35,000～43,000 年前）と考えられている。Koko Head の浸食率と Koko Crater のそれは値が近く、形成年代と浸食率の値が調和的な結果となった。以上より、形成年代の古さとピクセルの概念を用いた浸食状況には、ある程度相関関係が見られるように思える。しかし、ホノルル火山活動によって形成されたタフリングは、通常の火砕丘の火山灰層とは異なり、パラゴナイト化作用を伴ったきわめて固結度の大きいテフラ（火山灰を主体とする噴出物）から形成されており、形成年代が古くても浸食はそれ程進まない事例が少なくない。浸食率から見ると、Ulupau の形成年代は Koko Fissure と同時期か、少し新しいということになるが、地質学的には Ulupau の形成期は最終間氷期以前と考えられている。

3. タフリングの標高毎の浸食状況

図 8 は、タフリングの標高毎に浸食状況を算出したグラフである。右のグラフは 1000m 谷埋め接峰面図の等高線毎のピクセル数から現地形のそれを引いた値が、1000m 谷埋め接峰面の等高線毎のピクセル数の比率を%で示したグラフで、左は同じく 100m 谷埋め接峰面図と現地形のものである。前者を 1000m 接峰面グラフ、後者を 100m 接峰面グラフと呼ぶ。

タフリング毎に見ていくと、形成年代が最も新しい Koko Head と Koko Crater は、1000m と 100m 接峰面のグラフ双方で高度別の浸食率の変化は少なく、顕著な浸食のピークとなる高度は見られない。接峰面図を見ても（図 6）、他のタフリングに比べて開析谷が顕著ではなく、小さな谷と尾根が連続するよ

うな特徴があり、あまり浸食が進んでいないように見える。

形成年代が他に比べて古い Punchbowl と Diamond Head の 1000m 接峰面グラフのは、標高が高くなればなるほど浸食率が高くなる傾向にある。一方、Diamond Head の 100m 接峰面グラフでは、360~440 フィート付近と 680~720 フィート付近の二度浸食率のピークがある。これらピークはいずれも Diamond Head 南西部分の Leahi 峰とよばれる火山体の突出部分で出現し(図 3-8)、図 6 の現地地形を見てみると等高線が複雑に入り組んでおり、開析を顕著に受けている様子が見てとれる。

Ulupau は、1000m と 100m 接峰面のグラフ両方で 560 フィート付近に浸食度合いのピークがあるが、560 フィート以下では Koko Head と Koko Crater と同じようにはほぼ一定の比率で推移する。

Manana は、1000m と 100m 接峰面のグラフ両方で 200 フィート以下での浸食率が高くなっており、1000m 接峰面グラフではその状況が一層顕著で、概ね標高が高くなるにつれて浸食率が高くなる傾向にある他のクレーターとは性格を異にしている。これは、海食の影響が他のタフリングに比べて顕著であった可能性が高い。

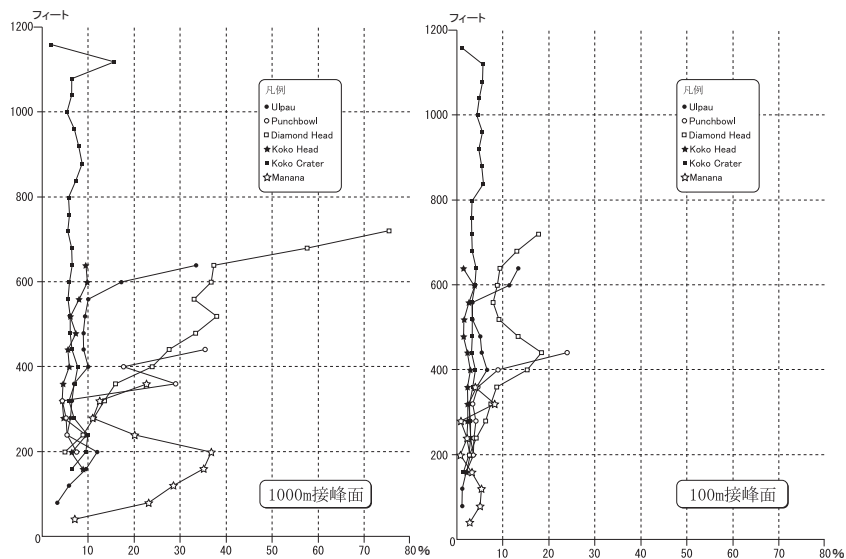


図 8 タフリングの標高毎の浸食率

VI. タフリングの噴火規模の推定

1. 火山爆発指数 (VEI)

VEI 値は一回の噴火の総出量をよりどころとして噴火の大きさを示す尺度として用いられ、噴火で噴出した火山砕屑物の総量の体積によって決められる値で、0 から 8 までの整数で示され、0 が非爆発的噴火、1 が小規模、2 が中規模、3 がやや大規模、4 が大規模、5 が非常に大規模と階級区分される (Simkin & Siebert, 1994)。この VEI 値は、 K_{VEI} 値と M_{VEI} 値の 2 つの算出方法がある。噴出物の総量を、火山砕屑物の $A \times 10^6 m^3$ とするとき、 $K_{VEI} = i - 4$ で算出できる。また、 $M_{VEI} = i - 4 + \log A$ で算出される。図 11 の VEI 値は M_{VEI} 値で示したものである (Pyle, 1995)。

本研究では、火山噴出物 (テフラ) を面的に追跡し噴出物の総量を推定することはできない。そこで、噴出物総量 (体積) の近似値として、タフリングの接峰面図を描き、これから得られた滑らかな円錐台にモデル化してその体積を求めることで、タフリングを構成する火山噴出物総量の近似値として取り扱う手法を採用した。タフリングは水蒸気爆発に伴って形成されており、一般的に水蒸気爆発に伴う火山噴出物は遠方まで飛散しにくい性質を持つこと、また VEI 値は体積の対数を尺度とするので、大幅に結果がずれることはないと考えられる。

2. タフリングの体積の求め方

前節で述べたように、タフリングを円錐台にモデル化して体積を算出する。その算出方法を図 9 に示す。まず、直径 a の半径と直径 b の半径と比高を用いて、クレーター全体の体積 (V_1) を算出する。 V_1 はタフリングのクレーター部分にも火山灰等の物質が充填していると仮定した場合の体積である。次に、直径 b の半径と直径 c の半径とクレーターの深さを用いて、クレーター内部の体積 (V_2) を算出し、 V_1 から V_2 を引いた値をクレーターの体積とした (図 9)。

円錐台の体積の求め方は積分計算によってできるが、本研究では、円錐を底辺に平行な平面で切り、小円錐台の部分を除くという幾何学的な方法で計算した (図 10)。円錐台の上底の半径を r_1 、下底の半径を r_2 、円錐台の高さを h と

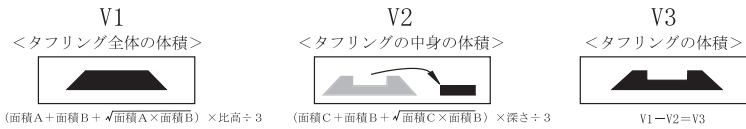


図9 タフリングの体積の求め方

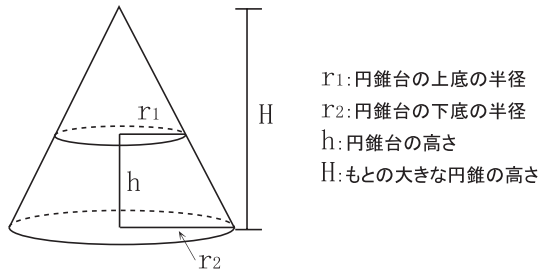


図10 円錐台概念図

すると、もとの大きな円錐の高さ H は、 $r_1/r_2=(H-h)/H$ を満たす。これを H について解くと、 $H=r_2h/(r_2-r_1)$ となる。円錐台の体積 V は $V=\frac{1}{3}\pi r_2^2H-\frac{1}{3}\pi r_1^2(H-h)$ なので、 H を代入して整理すると、 $V=\frac{\pi r_1^2}{3}(r_1^2+r_1r_2+r_2^2)$ となる。これは、上底の面積を S_1 、下底の面積を S_2 とすると、 $V=\frac{h}{3}(S_1+\sqrt{S_1S_2}+S_2)$ と表すことが出来る。このようにして求めた各クレーターの体積と VEI を表3に示す。

3. タフリングの爆発規模

算出した VEI 値から、Simkin & Siebert (1994) の定義で噴火の規模を表現すると、研究対象地域に分布するタフリングの VEI 値 (M_{VEI} 値) は 2.3~4.6 である (図 11, 表 3)。このことから、中規模~大規模な噴火活動によってこれらの火山地形が形成されたことが推定される。雲仙平成噴火に伴う溶岩ドームが、すべて火砕流となって噴出したものと仮定した場合は、約 2 倍 m^3 の溶岩ドームが崩れ、全て密度が半分のテラフに変化するものとして換算すると、 M_{VEI} 値は 4.3 程度と推定される。このことから、ホノルル火山活動で形成されたタフリングの VEI 値は、規模の大きいもので雲仙平成噴火相当の火山活動によって形成されたことがわかる。次に、図 11 を見ると、グラフ横軸はタフリングの全体の面積である面積 A (図 2 参照) であるが、面積 A が大

表3 タフリングの体積と VEI 値

クレーター	体積 (m ³)			VEI
	全体 (V1)	クレーター内部 (V2)	クレーターの体積	
1. Ulpau	979,777,128	252,742,553	727,034,575	4.3
2. Makalapa	63,400,218	31,235,312	32,164,906	2.9
3. Aliamanu	943,409,173	683,703,044	259,706,129	3.8
4. Salt Lake	1,371,746,024	1,023,605,347	348,140,677	3.9
5. Kaau	144,207,661	72,000,975	72,206,686	3.3
6. Punchbowl	215,313,567	14,409,705	200,903,862	3.7
7. Diamond Head	1,508,948,400	402,439,755	1,106,508,645	4.4
8. Koko Head	2,206,907,270	603,056,739	1,603,850,539	4.6
9. Kahauloa	15,195,147	7,751,086	7,444,061	2.3
10. Koko Crater	2,426,789,690	454,421,532	1,972,368,159	4.7
11. Manana	42,393,792	14,609,600	27,784,191	2.8

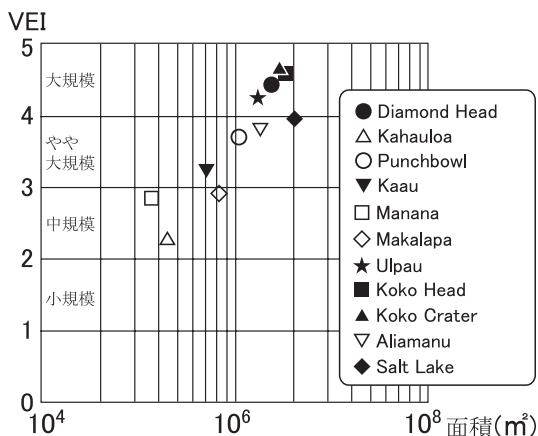


図11 VEI とタフリングの面積の関係

きくなればなるほど VEI も大きくなる。同じように、比高、直径の規模と VEI 値との関係を見ても、面積と同様規模が大きければ大きいほど VEI が大きくなるという傾向がある (表1, 3)。

Ⅶ. まとめ

本研究では、ホノルル火山活動によって形成されたタフリングの爆発の規模の推定と浸食状況について、画像処理ソフト Photoshop を用いて解析を行っ

た。以下にその結果を簡単にまとめる。

1. クレーターの接峰面を描き、それをデジタルデータに変換することで、タフリングの浸食状況を推定できた。その結果、浸食をより受けていればいるほど、タフリングの形成年代が古いという相関関係は多少見られた。しかし、Ulupau は、今のところこの相関からは大きくずれている。研究対象地域すべてのタフリングの解析を行っていないので、これらは今後の課題としたい。

2. タフリングの体積を、円錐台にモデル化して算出した。この体積から火山爆発指数 (VEI) を求めた結果、研究対象地域に分布するクレーターは VEI2.3~4.6 の範囲にあり、中規模から大規模の噴火指数であることが分かった。なお、小規模と非爆発的噴火の噴火指数と、非常に大規模な噴火指数のクレーターは存在しない。また、研究対象地域におけるタフリングの VEI は、クレーターの地形的規模に左右され、比高、直径、面積のいずれにおいてもその値が大きければ大きいほど VEI が大きくなるという傾向があることが分かった。

おわりに

本研究のきっかけは、磯が 1998 年度西南学院大学学術研究所在外研究 A により、米国ハワイ州立大学海洋地質工学部の研究員としてオアフ島の調査を行ったことにある。当時火山学の主任教授であった Stephen Self 教授により、様々な指導を受けた。とりわけ同教授によるオアフ島の火山地質の巡検には、大きな影響を受けた。黒田は Photoshop による地形分析の方法について主として分担した。また、福岡教育大学教育学部の黒木貴一准教授と長崎大学熱帯医学研究所の後藤健介助教には、研究の手法や技術的な問題に関してサポートしていただいた。校正では論集編集委員の松村敬治教授の適切なアドバイスをいただいた。以上関係の方々に厚く御礼申し上げます。

なお、本論文は、磯ゼミナールの安永が西南学院大学人間科学部児童教育学科 2007 年卒業論文としてまとめ、その結果を 2006 年度日本地理学会春季大会で発表したものを基礎に、新たな検討結果を含め加筆したものである。

参考文献

- Clague, D.A. and Dalrymple, G.A.(1987) The Hawaiian-Emperor volcanic chain, Part 1, Geologic Evolution In Volcanism in Hawaii, US Geological Survey Professional Paper, No.1350, p.5-54.
- Malahoff, A. (1987) Geology of the summit of Loihi submarine volcano. US Geological Survey Professional Paper No.1350, p.133-144.
- Stearns, H. T. (1946) Geology of the Hawaiian Islands. Hawaii Division of Hydrography, Bulletin 8, 106p.
- Self, S. and Moberly R. (1997) Phretomagmatic Volcanism and Geology of Southeast O'ahu, Cordilleran Section Meeting of the Geological Society of America, Kailua-Kona, Mau21-23, 1997.
Post-meeting Field Trip13, May23-25, 1997.
- Gordon A. Macdonald, Agatin T.Abbott, Frank L.Peterson (1983) Volcano in the sea, 2nd ed. University of Hawaii Press, 517p.
- Hazlett, R.W. and Hyndman D.W. (1996) Roadside Geology of Hawai'i, Mountain Press Publishing Company, 307p.
- 宇井忠夫 (1997) 火山噴火と災害. 東京大学出版会, 44p-45p.
- 中村一明 (1989) 火山とプレートテクトニクス. 東京大学出版会, 324p.
- 清水善和 (1998) ハワイの自然-3000 万年の楽園. 古今書院, 184p.