

ハワイ キラウエア火山の 東リフト・ゾーンと最近の噴火

須藤 茂 (地殻熱部)

Shigeru Suzo

1. はじめに

1983年10月3日 三宅島で21年ぶりに噴火が起きました。この噴火は山腹の約4 km にわたる割れ目火口から生じ 我々はテレビや写真など多くの映像で火のカーテンを見ました。そして記憶も生々しい1986年11月伊豆大島でも噴火が起こり 特に11月21日にはカルデラの内側と外側とで割れ目噴火が発生し 再び火のカーテンが出現しました。幸いこの噴火では溶岩流は住宅にまで達することなく止まりました。大島の一連の噴火のニュースが続く中 11月下旬にハワイのキラウエア火山では溶岩流が住宅を襲い その先端が海岸にまで達したことが報道されました。これらの火山の噴火とその災害は 火山の存在を私達に強烈に印象づけました。また伊豆大島の噴火は 火山を知ることがいかに重要であるか つまり私達は火山についてまだどれだけわかっていないかを痛切に感じさせるものでした。

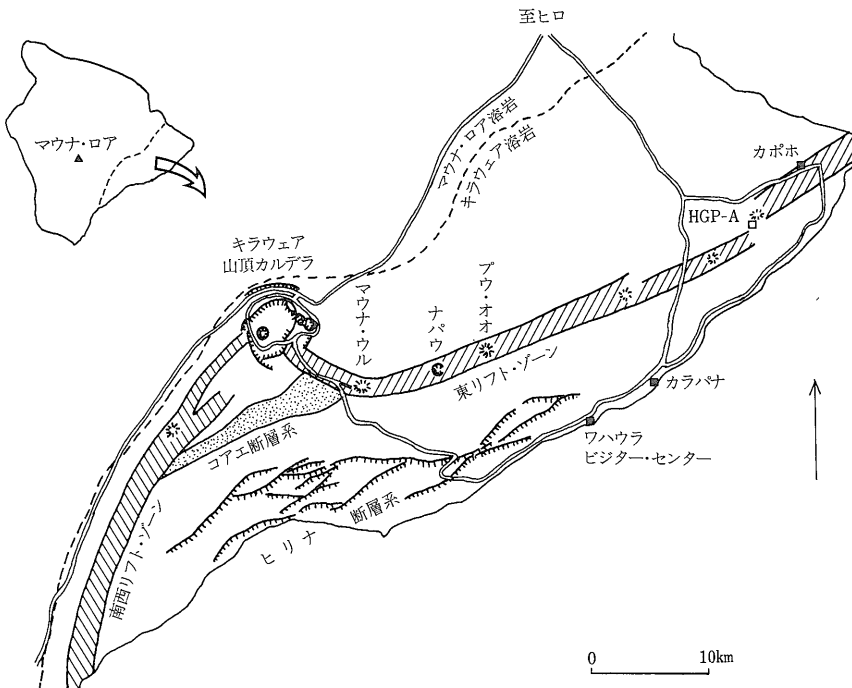
キラウエア火山では1983年1月から比較的規模の大き

い活動が始まり その活動は少なくとも1987年12月までは続いています。つまりキラウエアでは三宅島の噴火前から今回の大島の一連の噴火の時点まで活動が続いているのです。「火のカーテン」の本場キラウエア火山の活動を知ることは それがそっくりそのまま日本の火山の噴火に適用できるものではないとしても意義のあることだと思います。

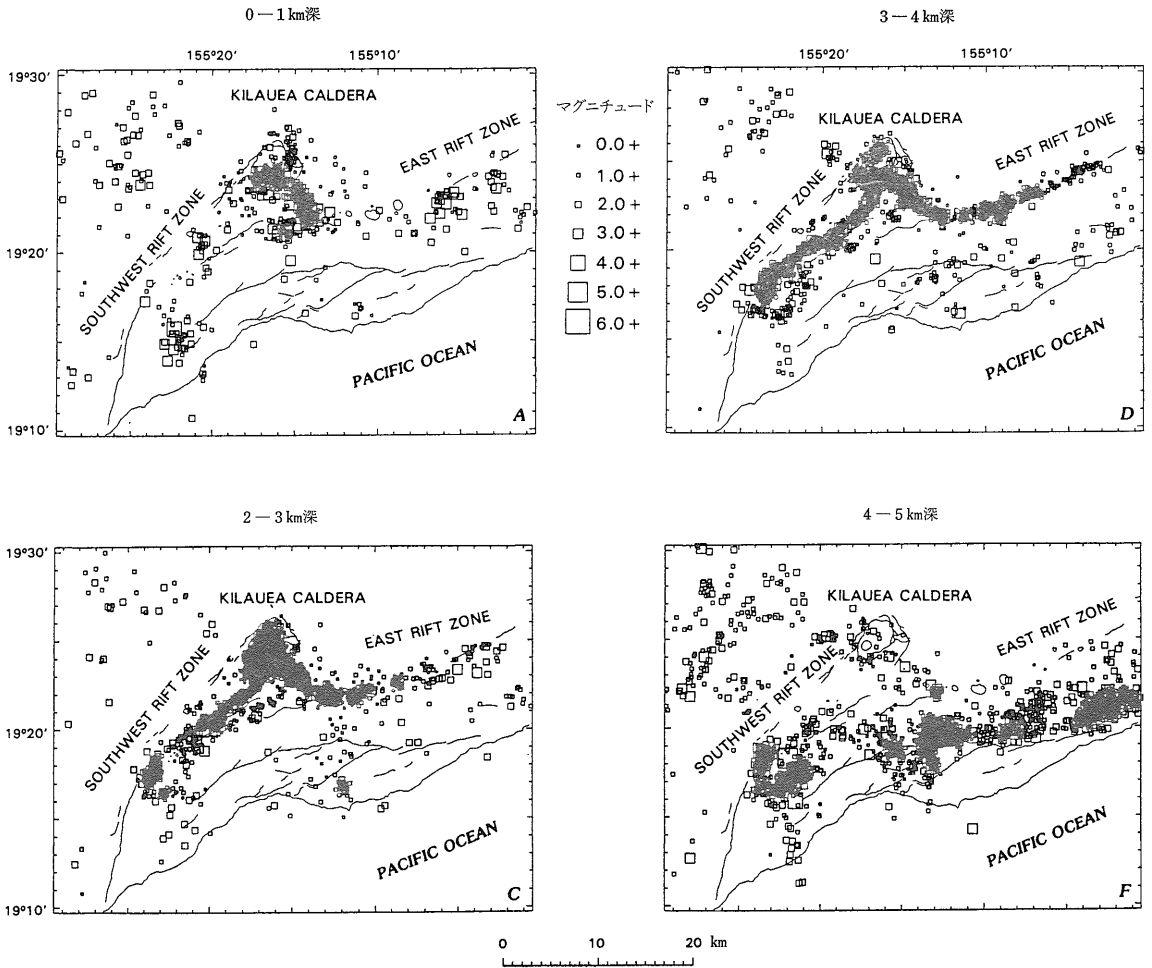
ハワイの火山については既に本誌の第310, 312, 314, 315, 316号に 1979年時点での紹介記事が掲載されています(曾屋・三村・松久・須藤執筆)。またハワイ島の最近の情報は本誌の第399号に紹介してあります。そこで本稿では今回の一連の噴火が起きているキラウエア火山の East Rift Zone (本文では東リフト・ゾーンとします) について主に紹介することにします。

2. キラウエア火山とリフト・ゾーン

キラウエアはハワイ島の南東部を占める活動的な火山



第1図
キラウエア火山概念図
HAZLETT (1987) を簡略化



第2図 キラウエア山頂付近の各深度ごとの震源分布。1970—1983年のデータ。リフト・ゾーンの地下の深さ2—4kmで地震が多発していることがわかります。

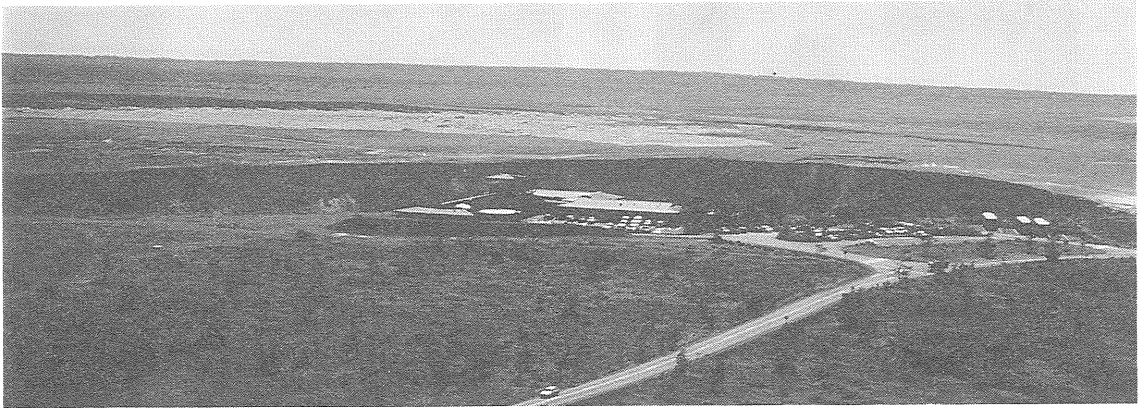
KLEIN ほか (1987) より引用

です。山頂部には長径4.75km 短径3.25kmのカルデラがあります。リフト・ゾーンはそのカルデラから南西方向に1本 東方に1本認められます(第1図)。

キラウエアの噴火は山頂部と2つのリフト・ゾーン上からのみ起こっています。リフト・ゾーンでは正の重力異常(KINOSHITA ほか 1963)及び強い磁気異常が認められ(FLANIGAN ほか 1987) P波速度は大きく(THURBER, 1978)地震が多発し(KLEIN ほか 1987) また測量結果によれば拡大する傾向が認められています(SWANSON ほか 1976)。これらのことからリフト・ゾーンとはほぼ垂直な密度が大きな岩脈が密集したゾーンであると考えられています。またキラウエアではしばしば山頂の噴火に引き続いてリフト・ゾーン上で噴火が起きることがあります。地震観測結果によればキラウエア山頂カルデラの南端付近の地下に位置するマグマ

溜りからリフト・ゾーンにマグマの連絡口が開いておりマグマはリフト・ゾーンの深さ2-4kmの通路内を移動し地表に噴出すると考えられています(KLEIN ほか 1987)(第2図)。リフト・ゾーン上での噴火と山頂部の地下のマグマ溜りの関係は山頂部の歪みと傾斜測量によりよくわかるようになりました(第11章参照)。

リフト・ゾーンの内部構造がどうなっているのかはより開析された古い火山を調べればわかります。たとえばオアフ島のクーラウ(Koolau)火山には7400の貫入岩が認められます。そのうち3550の岩脈が調べられました。岩脈の幅は5cm—670cmでありその90%は150cmより薄くリフト・ゾーン中では全体の体積の50-70%を占めています。またこれらの岩脈群は重いのでたわんで沈降し中心部にカルデラができたのではないかと考えられています(WALKER 1987)。



第5図 北西からみた H. V. O. ハレマウマウ火口(黒い部分)とキラウエア・カルデラ。

るので一概にどうと言いきれませんが、パイロットの反対側の座席の方が良いようです。座席は体重のバランスなどを考慮して決めるのだと説明してくれましたが、かけひきは微妙です。

見学には案内者 案内書が欠かせません。キラウエアの国立公園には、山頂部(第3図参照)と南の海岸のワハウラ(Wahaula)(第4図)にビジター・センターがあります。しかし、今まで観光客には素気なかった米国地質調査所(U. S. G. S.)のハワイ火山観測所(H. V. O.)が変身しました。

4. 改装なった H. V. O.

ハワイの火山の探險的調査が始まったのは19世紀ですが、今世紀に入ると火山の研究には現場で長期にわたって観測を継続することが不可欠であると考え実行する人が現れました。マサチューセッツ工科大学の教授であった Thomas A. Jagger, Jr. (1871-1953) は1912年キラウエア・カルデラの北縁に火山観測所を建設しました。資金援助者はホノルルの実業家 弁護士 L. A. Thurston。キラウエア・イキの東の溶岩トンネルにその名を残している人でしょうか。観測所はキラウエア山頂域唯一のホテル ボルケイノ・ハウスの傍(第3図参照)に建てられました。

Jaggerはまず火山観測には地震計が不可欠だと考えました。当時の観測所の写真には大きな大森式の地震計がいくつか映っています。火山に関することは何でもやってみるタイプの人らしく、溶融溶岩の温度測定や溶岩の掘削なども試みました。火山災害の軽減に関しては、溶岩流を途中で分岐させる試みや津波の警報システムについて努力しました。彼は1940年まで所長を勤

めました。

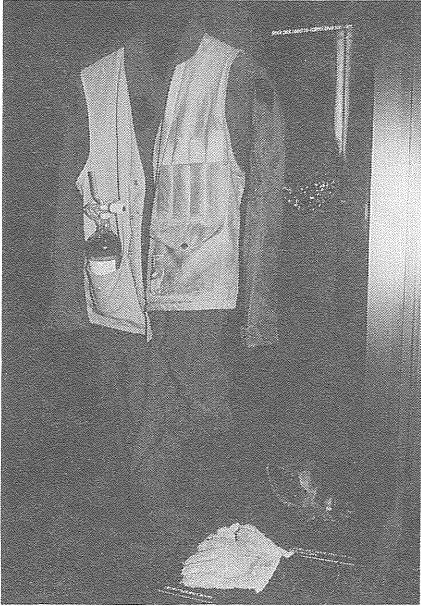
1948年 H. V. O. は現在地のウエカフナ(Uwekahuna)に移築されました。H. V. O. の所属は、それまで何度か変わりましたが、結局1947年からは U. S. G. S. に属し1986年大改装され、現在に至っています。改装前の様子は既に紹介されていますので(三村ほか、1980)ここでは、その後変わった所だけ紹介します。外見で目立つのは四周がガラス張りの塔屋の部屋です(第5図)。

H. V. O. は平屋(新しい建物には広い地下室があります)ですので、この部屋からはマウナ・ロア、キラウエア・カルデラなどが実に良く見渡せます。また計算機の端末も置かれ、室内に居ながらにして噴火する火山そのものと地震などのデータとを検討することができるようになっていました。またカルデラに最も近い建物は、一般に開放された展示室になりました(第6, 7図)。ガイド・ブックには Jagger's Museum と記されています。ここには火山とは何か、そこでどういふ現象が起こり、H. V. O. でどう観測し、噴火予知などに役立っているかが示されています。筆者が訪れた際にも観光客がひっきりなしに出入していました。火山学の普及と U. S. G. S. H. V. O. の宣伝に絶大な効果があることは間違いないありません。

山頂域には国立公園のビジター・センターがあり、ここでも様々な資料や情報が得られますが、H. V. O. の方が文字通り、より hot であるという印象を受けました。

5. キラウエア山頂カルデラ

H. V. O. からカルデラを見ると、反対側の南西のカルデラ縁はほとんど落差がありません(第8図)。ウエカフナ付近は逆に最も落差が大きく、現在でも135mあり



第6図 H. V. O. 展示室内の調査用具。耐熱調査服の右上のハンマーには採取した溶融溶岩のかげらが付いています。



第7図 H. V. O. 内展示室の一部。静止している岩石標本もなぜかダイナミクスを感じさせます。

ます。これはキラウエアの山頂が現在のカルデラの北縁の H. V. O. 付近及び東縁のキラウエア・イキ付近に位置していたためです。

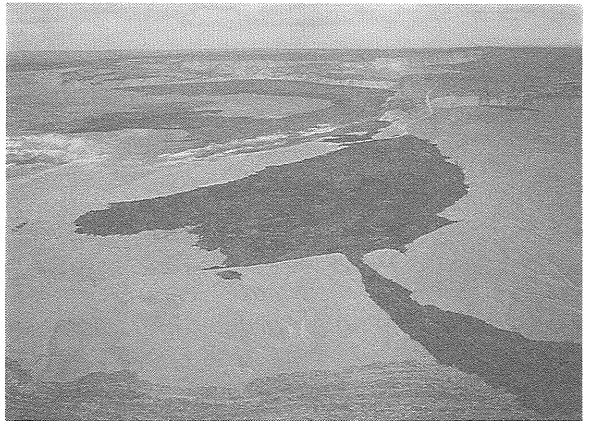
日本の玄武岩—安山岩からなる成層火山でもよく山頂にカルデラができています(岩手山 秋田駒ヶ岳など)。それらのカルデラは成層火山形成期とは噴火のタイプを異にする大噴火によってできたと考えられます。ところがハワイではたとえば盾状火山形成の初期の段階にあるロイヒ火山にも既にカルデラができています。つまりハワイの盾状火山はその生成の過程で頻繁にカルデラができていたと考えた方が良さそうです。山頂は最も活動的ですからカルデラはすぐに噴出した溶岩で埋められるでしょう。リフト・ゾーンは岩脈密集ゾーンですがオアフ島のクーラウ火山でも(WALKER 1987) キラウエア山頂カルデラでも(CASADEVALL and DZURISIN 1987a) なぜかカルデラ域では岩脈は少ないのです。これは山頂カルデラが生成しては次にすぐ新たな噴出物によって充填されてしまう過程を繰り返しているためと考えられます。現在のキラウエアの山頂カルデラもそのサイクルのある1時期にすぎないのです。

カルデラの底は真平ではありません。たとえば1971・1974年溶岩はカルデラ内の東の低所を埋めるように流れました(第3図)。つまりハレマウマウ火口を中心

とする盾状火山体ができているのです。1823年にはカルデラの深さは現在の約2倍ありましたが1924年までの約100年間はカルデラ内の火山活動が連続しカルデラ底は噴出物で埋められ浅くなりました。その活動もだいぶおとなしくなっています。

6. ハレマウマウ火口

ハレマウマウ(Halemaumau=House of the amaumau fern)火口(第9 10図)は1924年のマグマ水蒸気爆発による崩落のために直径が430mから920mに広がり深さも410mとなりました。その後の火山活動により火口底の深さは変化し1967年には深さ約40mと最も



第8図 キラウエア・カルデラ南部。カルデラ壁が最も低い部分からは1982年溶岩が流出しています。この辺の地下にマグマ溜りがあります。



第9図 キラウエア・カルデラ西北部。中央の凹みはハレマウマウ火口。M：マウナ・ロアの東リフト・ゾーン。K：マウナ・ケア。P：駐車場。



第10図 ハレマウマウ火口。火口底の大部分は1974年溶岩。現在深さ85m。矢印の段は1967年の溶岩の痕跡で、当時の深さは40m。中央上の崖が Uwekahuna Bluff。H：H.V.O. (左上)。

浅くなりました。その当時の溶岩湖の高さは、現在の火口壁に残されています(第10図)。現在は火口底の大部分は1974年溶岩で占められており、火口縁からの深さは約85mです。

Uwekahuna Bluff は H. V. O. の北東のカルデラ壁です(第10図)。この高さ 135m の露頭では63枚の溶岩流が確認され、岩石学的検討がなされました(CASADEVALL and DZURISIN 1987b)。最下部の溶岩は約2800年前のもので、溶岩の噴出口はハレマウマウ火口北東のカルデラ内と考えられています。Uwekahuna Bluff を含むカルデラ壁には、岩脈が18枚しか認められません(CASADEVALL and DZURISIN 1987a)。これらの岩脈を合計しても

その幅は15mにしかならず、カルデラ域の1%以下を占めるにすぎません。カルデラ域は頻りに沈降し、常に新しい溶岩で満たされているという考えは正しいようです。

さてこれらの岩脈は北東—南西方向に伸びています。この方向は南西リフト・ゾーン(第11図)の伸びの方向と同じです。これから見る Chain of Craters Road は南東方向に走りますが、その方向と同じ走向の岩脈はありません。

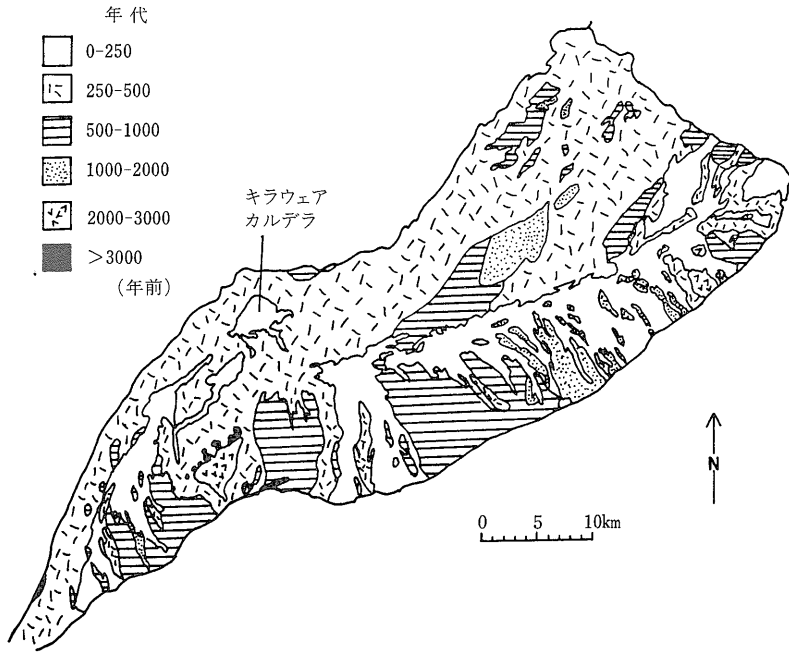
7. キラウエア・イキ

キラウエア・カルデラの東隣には、キラウエア・イキ(Kilauea Iki=Little Kilauea)が位置しています(第3図)。HOLCOMB (1987)によれば、キラウエア・イキの東端付近を噴出中心とする Ai laau の大規模な火山活動が約 500-350 年前にあり、その後キラウエア・イキが陥没しました。この Ai laau からの溶岩は、東に流下し、キラウエアの東リフト・ゾーンの北側の大部分を覆っています(第12図参照)。Thurston lava tube (溶岩トンネル)は、その活動時に、溶岩を遠方まで流下させた通路のなごりです。

キラウエア・イキは、1959年11月の噴火とそれによってできた溶岩湖で有名です。噴火の様子は RICHTER ほか(1970)に詳述されています。11月14日にキラウエア・イキ南縁のいくつかの割れ目から噴火が始まりました。その後噴火の場所は1ヶ所のみになりました。このような経過はハワイの噴火にはしばしば認められま



第11図 キラウエアの南西リフト・ゾーン。左上はハレマウマウ火口。多くの割れ目の一部からは溶岩も噴出しています。左下は1971年溶岩。



第12図

キラウエア火山の地表の溶岩流の年代. HOLCOMB (1981) より引用. HOLCOMB (1987) には より精緻な図面がカラーで示されています.

す. 噴火口から最高1900フィートと観測史上最高の溶岩噴泉が吹き上げられ スパターやスコリアは北東貿易風に流されて主に南西側に堆積し 火口の周囲には小山ができました. プウ・プアイ (Puu Puai=fountain hill) です (第13図). 噴火は12月21日に終わりましたが その続きはまた後に記します.

キラウエア・イキの溶岩湖は 岩石学や地球物理学の天然の実験室として重宝されました. 何本もの試錐が実施され 溶岩の冷却と結晶成長の過程が追跡されまし



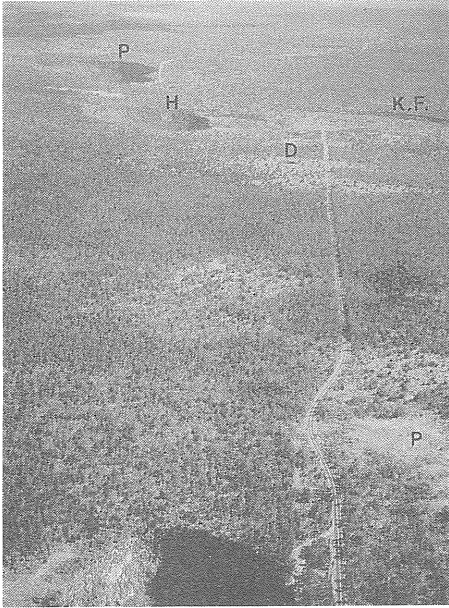
第13図 プウ・プアイ キラウエア・イキ1959年噴火でできた噴石丘. 噴火後 マグマの一部は中央の噴出口から地下に逆流しました.

た. 1981年の試錐では ついに完全な溶融溶岩は見つからなくなりました. それでも湖内の温度は1150℃以上ありました. 1985年の試錐でも約60m 深の岩石は赤熱状態であったそうです. またこの溶岩はキラウエアの溶岩としてはかんらん石を非常に多く含むのが特徴的で 試錐コアの中からは 直径何と2 cm にも達する巨斑晶が見つかりました (HELZ 1987). また1976年12月の試錐孔内の比抵抗値測定によれば (ANDERSON 1987) 溶融マグマ:10Ωm その直上の乾燥高温岩体:100000Ωm その上の約100℃の水や蒸気で満たされたゾーン800-8000Ωmの値がそれぞれ得られました. 岩石の状態や温度 水の有無といった点での比較検討は 地熱資源探査の上からも 興味があります.

8. Chain of Craters Road に沿って

キラウエア・カルデラの南東縁からクレイターが南東方向に並んでいます (第14図). これらは いずれも爆発で吹き飛ばされてできた火口ではなく 地下の岩石が何からの理由で欠損したために崩落してできた ピット・クレイター (pit crater) です. 大部分が道路の傍にあり見学できますので簡単に紹介します.

ケアナコイ (第15図) 直径450m 深さ35m. クレイターの底から 石器として利用された tachylite と呼ばれる玄武岩ガラスを産する地であることが命名の由来ですが それは1877 1974年溶岩に覆われてしまいました



第14図 北東から見たピット・クレイターの列。

手前プヒマウ・クレイター P: プヒマウ地熱異常地 K: コクーラウ・クレイター D: Devils throat H: ヒイアカ・クレイター P: パウアヒ・クレイター K.F.: コアエ断層系のうちの1つの断層崖。

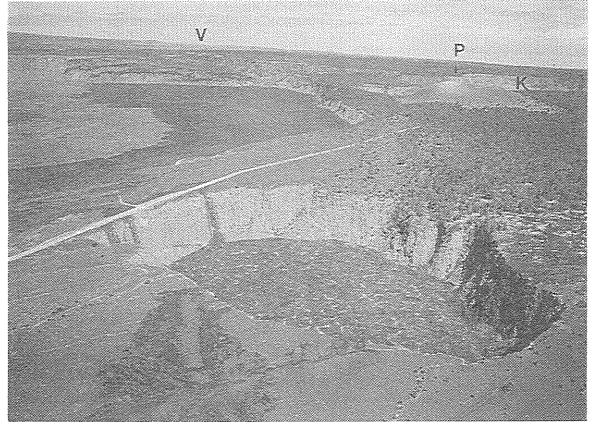
た。1790年の大爆発による降下堆積物 Keanakakoi Ash Member の模式地です。

ルア・マヌ (Lua Manu 第16図) 直径約100m 深さ15mの小さい穴で 1974年溶岩に覆われるまでは 樹林



第16図 ルア・マヌ (Lua Manu) クレイター (中央下) と1974年溶岩。右下へ伸びるのがChain of Craters Road。

1988年1月号



第15図 ケアナカコイ (Keanakakoi) クレイター。

底に見えるのは1974年溶岩。左上はキラウエア・カルデラ東部で 黒いのは1974年溶岩。V: ボルケイノ・ハウス P: プウ・プアイ K: キラウエア・イキ

に覆われて目立たなかったそうです。

プヒマウ (Puhimau 第14図) 直径約200m 深さ160mと深い穴で 最近の溶岩の流入がないために 底は崖錐に覆われています。これが典型的なピット・クレイターです。

プヒマウ地熱異常地 (第14図) 1937-38地熱活動で植物が枯れた地域です。地表には到達せず 途中で上昇が止まったマグマにより 地熱異常地が形成されたと考えられています。

コクーラウ (Kokoolau 第14図) 樹木に覆われた静かなクレイターです。

Devil's throat (第14図) こわい名前です。この穴はどんどん大きくなっていった過程がわかっています。19世紀はじめには 人が跳んで渡れる程度の穴でした。1923年には地表で径10m 深さ80mで 下へ行く程 径が大きくなっていました。1926年には径15m 深さ76m。最近の地震でも崩落が起り 現在の径は約50mあります。このピット・クレイターは今後も成長を続けることが予想されており 近づかない方が良さそうです。

ヒイアカ (Hiika ベレーの妹の名前に由来)。ベレーに似ず 妹ヒイアカは穏やかな気質であったと言われていました。1973年噴火は 1日以内の短期間で終わりました。溶岩湖に溜った溶岩の一部は 噴火後噴出口から地下に逆流した様子が 黒く跡になって残っているのでわかります (第17図)。

パウアヒ (Pauahi 第18図)。長径500m 深さ110m 最近では1968 1973 1979年に噴火が起りました。



第17図 ヒアカ・クレイター. 直径400m. 深さ80-100m. 1973年にクレイターの中と外とで割れ目噴火が起きました. 右下はChain of Craters Road.



第18図 バウアヒ・クレイター. つながった2つのクレイターの向こうにも小さなクレイターがあります. M: マウナ・ウル P: プウ・フルフル.

いずれも短い噴火ですが そのたびにクレイターの底の様子は変わってしまいました. ヒアカとバウアヒの1973年噴火は マウナ・ウルの1972年-1974年の活動が一休みしたときに起こりました.

第14図の右上の断層崖が手前(北)側を向いていることを不審に思う方もいるでしょう. なぜなら第1図の概略図に示してあるように キラウエアの北側はマウナ・ロアの山体に押さえられているため キラウエアは成長するたびに 山体の南部が南(海)側に落ちる断層で特徴づけられているはずで. この北側が落ちる正断層系は Koae Fault System と呼ばれています. 数多くの断層の分布とその成因モデルは DUFFIELD (1975)

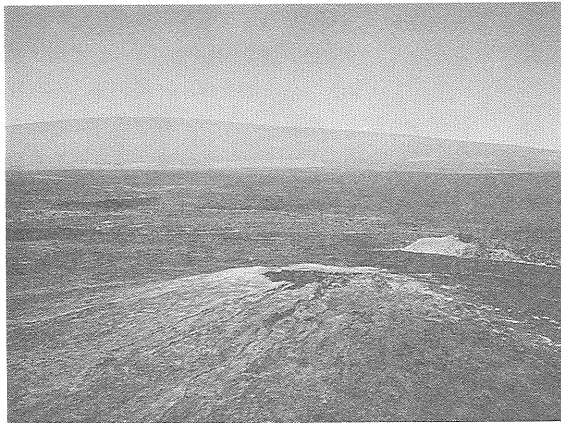
に詳述されています.

9. マウナ・ウルの活動

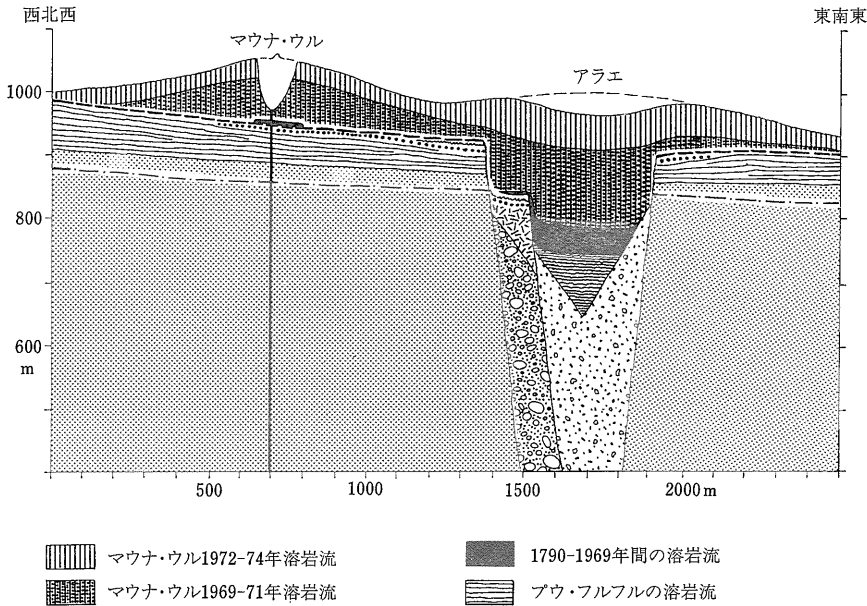
Mauna Ulu とは growing mountain の意であり 1969年5月から1974年7月までの噴火でできた小盾状火山です(第19図). 一連の噴火の経緯は1969-1971年の活動は SWANSON ほか(1979)に 1972-1974年は TILLING ほか(1987)に分けて記してあります. いずれの報告中にも これらの一連の活動に関する他の公表文献が 内容別にまとめて 一覧表に示されて便利です. 噴火終了から報告書出版までの間隔が いささか長過ぎるところが気にはなりますが.

この噴火は キラウエアの山腹の噴火のうち それまで人間が目撃記録したものとしては最大級の噴火でした. 噴火の場所がほとんどマウナ・ウルに限られていたこと 噴出量が期間中かなり一定であったことなどが特徴として挙げられます.

1969年5月24日 バウアヒ アロイ アラエの各クレイター間に拡がるいくつかの割れ目から 噴火が始まりました. 噴火は次第にアロイとアラエのクレイターの間的一点に集中するようになりました. これがマウナ・ウル生成の始まりです. 噴火の勢いは激しく アロイ アラエの2つのクレイターは溶岩流により埋められてしまいました. マウナ・ウルの山頂には溶岩池ができ ここから溶岩が溢流するたびに盾状火山が高く成長しました. アラエの火口を埋めた溶岩とマウナ・ウルの火道とは溶岩トンネルでつながっており アラエにできた溶岩湖から更に遠方に溶岩が流出しました(第20図).



第19図 南東から見たマウナ・ウル(手前)とマウナ・ロア(遠景). 規模は異なりますが共に盾状の火山です. 右中はプウ・フルフル.

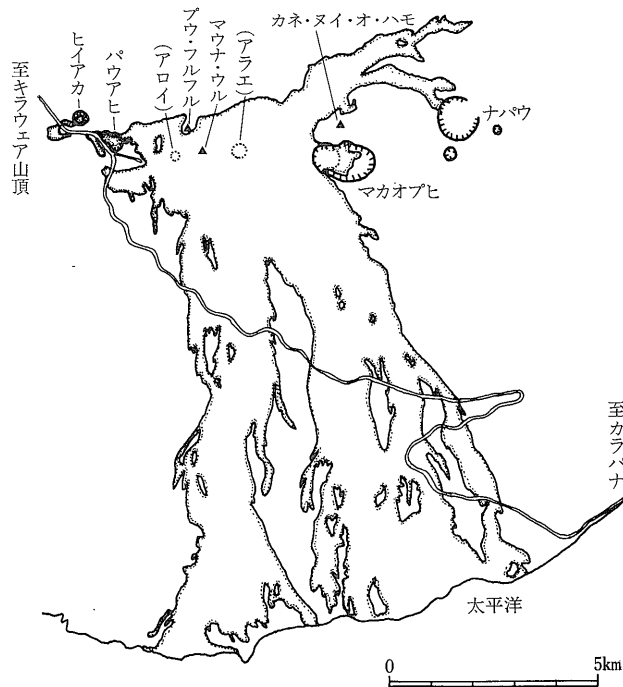


第20図
マウナ・ウルーアラエの断面図
HOLCOMB (1987) を簡略化.

溶岩流は 約 12km 南に流下して海中に入りました。
このとき枕状溶岩 (pillow lava) が生成する様子が 初

めてカメラに収められました。

マウナ・ウルの火口内の溶岩池の高さは1971年10月から1972年2月まで 及び1973年のパウアヒとヒイアカの噴火時には下がりました。その後活動は断続し マウナ・ウルの高さは121mに またアラエにできた盾状火山の高さは90mになりました。1974年7月19日 キラウエアの山頂部でハーモニック・トレマーが観測され マウナ・ウルのマグマは地下に戻りました。同日山頂カルデラ内とケアナカヨイで噴火が起きました (第3図)。これでマウナ・ウルの噴火活動は終わりました。この5年以上にわたる一連の噴火により0.347 km³の溶岩が噴出しました (第21図)。

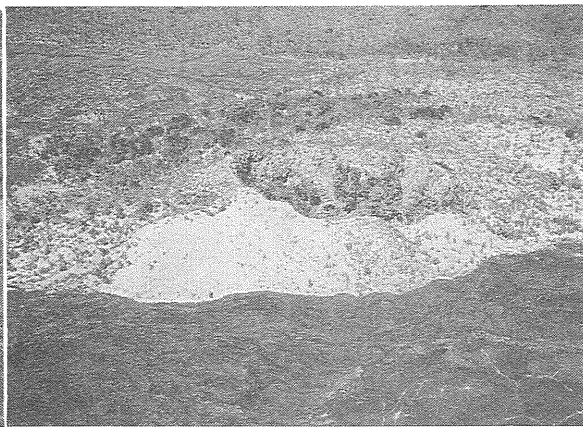


第21図 マウナ・ウル付近の略図と1969-1974年溶岩の分布。
U. S. G. S. (1986) の地図等より作成。

1971年10月までの活動では キラウエア山頂部が大きく膨らみ その後急激に収縮すると マウナ・ウルで激しい噴火が起こるといふ一連の経過が確認されました。それに比べると 1972年2月以降の活動では キラウエア山頂部の地形変動の量が小さく マグマはかなり一定してマウナ・ウルに供給されるようになりました。TILLING ほか (1987) は これを quasi-steady-state magma transfer と表現しました。この様式の変化は1983年1月からの東リフト・ゾーン上での噴火では 更に極端になります。



第22図 マウナ・ウル頂上の穴。山体表面の模様はマグマが火口からあふれ出たときのもの。穴は爆発ではなくマグマの水位が低下したことによってできました。



第23図 プウ・フルフル。山頂には深さ約50mの急崖で囲まれた陥没口があります。手前はマウナ・ウルの溶岩。

10. マウナ・ウルからプウ・オオへ

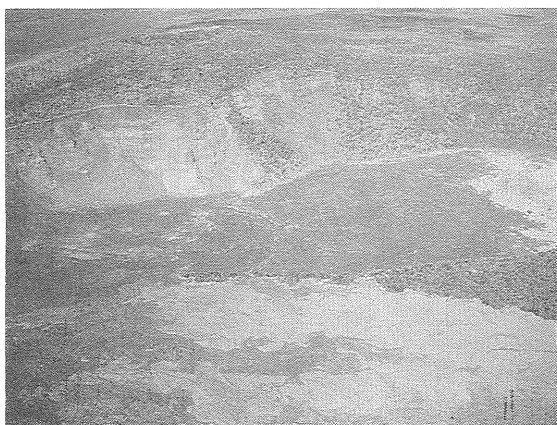
マウナ・ウルの山頂には 現在円型に近い穴があいています(第22図)。マウナ・ウルの北西方約600mにはプウ・フルフル(Puu Huluhulu)があります(第23図)。約500年前の活動でできた高さ約60mの小山です。この山頂からは東リフト・ゾーンの展望が良く 晴れた日には その東端にある燈台(第30図参照)まで見渡せるそうです。また H. V. O. の研究者達は マウナ・ウルの最高540mにも達した溶岩噴泉を始めとする一連の活動をここから良く観察することができました。

マカオプヒ(Makaopuhi)は 東リフト・ゾーン上では最大級のクレイターです(第24図)。このクレイターの形成史は複雑です(第25図)。1965年以前には東側のクレイターの深さは約100mであるのに対し 西側のそれは約300mもありましたので 東側のクレイターを埋めたかつての溶岩湖の壮大な断面が露出していました。そのため溶岩湖の岩石学を 試錐なしに行うことができました(MOORE and EVANS 1967)。1965年噴火により西側のクレイター中に新たに溶岩湖ができました。今度は熱い溶岩湖の研究が始まりました(WRIGHT and OKAMURA 1977など)。ところがその後のマウナ・ウルの活動により 1972-73年にかけて西側のクレイター全部と東側の一部は第24-25図のように覆われてしまいました。

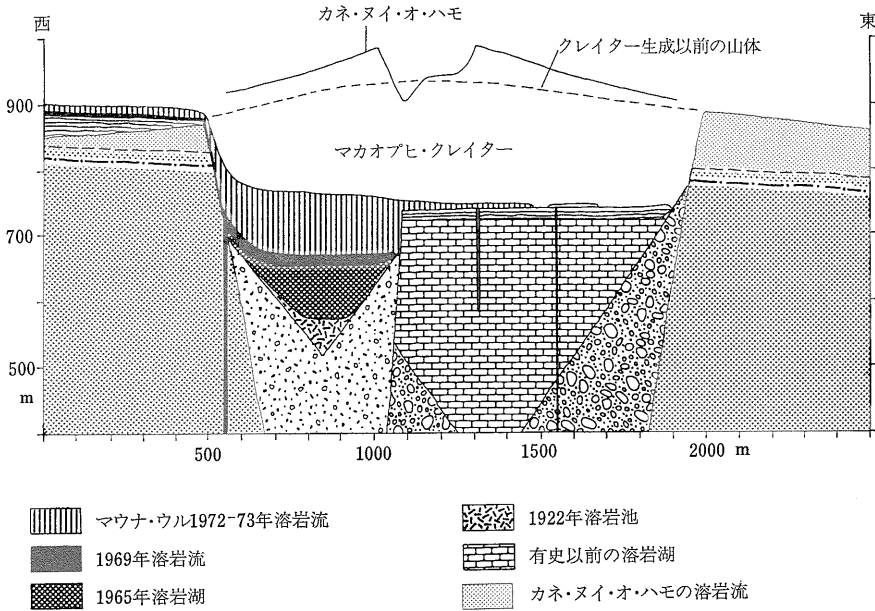
マカオプヒに接して その北側には盾状火山カネ・ヌイ・オ・ハモ(Kane Nui o Hamo)が位置しています(第24図)。この火山は約600年前に生成しました。ここから流出した溶岩は広く東リフト・ゾーンの南斜面を

覆い 海岸にまで達しています。山頂には陥没穴があります。その形態はマウナ・ウルそっくりであり その噴火様式も互いに似ていたのでしょう。ただしカネ・ヌイ・オ・ハモの方が盾状火山体及び噴出溶岩とも規模は大きいです。

ナバウ(Napau)。径は大きいのですが 度重なる噴火による溶岩で埋められ 南西の縁では崖の高さは30mありますが 北東部では落差がなく 1968年溶岩はクレイターの外側へも平らに続いています(第26図)。1983年1月に始まった一連の活動の最初の噴火割れ目は このナバウ・クレイター北西壁付近に位置しました。またマウナ・ウルから東に伸びている歩道(Napau Crater



第24図 マカオプヒ・クレイター。東西2つのクレイターがつながっています。西側のより深かったクレイターの輪郭がかすかに見えます。上方(北)に見える盾状の山はカネ・ヌイ・オ・ハモ。手前は1972年溶岩。



第25図 マカオプヒ・クレイターの断面図
HOLCOMB (1987) を簡略化

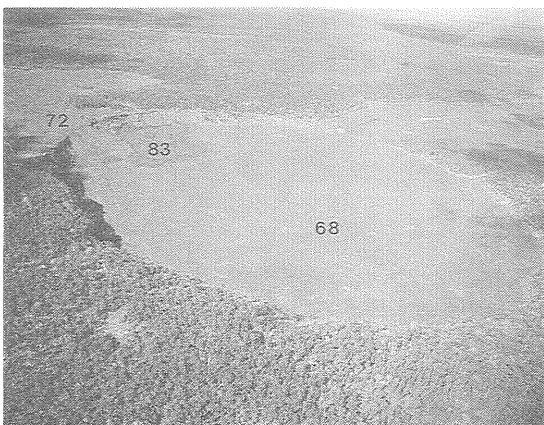
Trail) はここで終わっています。ここから先は一般者立ち入り禁止であり 1983年以降の噴火活動が起こっている場所なのです。

11. プウ・オオの噴火

1970年代の後半 つまりマウナ・ウルの活動の後 キラウェアの東リフト・ゾーンに大量のマグマが貫入したと考えられました。特に1975年12月のカラパナ大地震後は マグマはほとんど地表へは噴出せず 主に貫入活動が続きました (DZURISIN ほか 1984)。東リフト・ゾ

ーンの間部 つまりナパウ・クレイターより東方は森林に覆われており 地表での測量は困難でした。1977年に同地で噴火が起こり 新たな測量網が構築されました。その結果 東リフト・ゾーン中部は大きく膨張していることがわかりました。1981-82年には南西リフト・ゾーンで貫入活動が起こり 東リフト・ゾーンへの貫入は中断しました。1982年9月には山頂カルデラで小噴火が起こりました (第8図)。1982年末には 東リフト・ゾーンへのマグマの貫入が断続的に続きました。この貫入岩 (まだ固結していませんから「岩」とするべきではありませんが) はほぼ垂直でその体積は 地震の震源及び南北方向に広がる地形変動の観測から 長さ8km 高さ3.5km 厚さ2.2m で $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ (WOLFE ほか 1987) あるいは 長さ11.4km 高さ2.4km 厚さ3.6m で $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ (DVORAK ほか 印刷中) と見積もられています。

1983年1月2日 マカオプヒ・クレイターの1km西方でハーモニック・トレマーが観測され始め その1時間後にはキラウェア山頂部が収縮を開始しました。地震の震源はおよそ時速0.7kmでリフト・ゾーンに沿って北東方向に移動し ナパウ・クレイター付近に達しました。このマグマが貫入していく様子は 東リフト・ゾーンに沿って設置してあるいくつかの歪計でも次々に観測されました。1983年1月3日午前0時31分ナパウ・クレイター北西縁で噴火が始まりました (第26図)。割れ目火口は次第に東方に伸び7時40分には東北東-西南西方向に伸びる割れ目火口群全体の長さは約6kmになりました。当初の活動では最大の長さ数100mの割れ目



第26図 ナパウ・クレイター。1965 1968 (68) 1972 (72) 1983年 (83) の溶岩で埋められています。直径約1 km

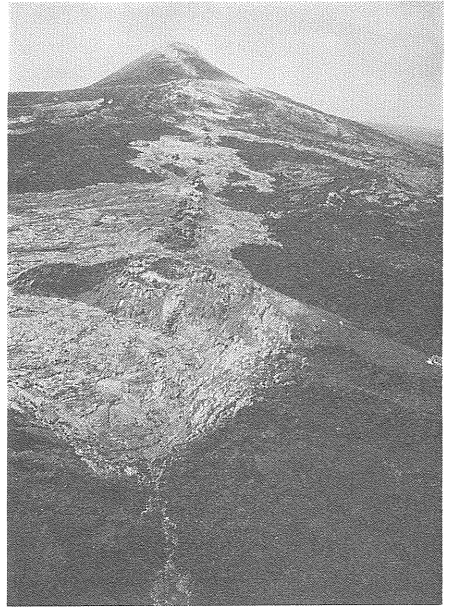
(グラビア写真1)から低い溶岩噴泉が噴出し 火のカーテンを造り出しました。その後 活動の場所が1点に集中するようになりました。これは薄い岩脈よりも円筒状の火道の方が運動エネルギー 熱エネルギーとも損失が小さいためと考えられています。噴火活動は約3週間にわたり断続的に起こりました。この一連の活動はエピソード1と呼ばれています。

エピソード2と3の期間中に大きく成長したのが1123コーンです(第27図)。1123とは11月23日の略ではなく1月5日の11時23分に開口した噴出口のことだそうです。この先エピソード(episode)という語が出てきますがこれは噴出活動の区切りとしてつけられたものです。激しい噴出活動に対してエピソードの番号がつけられ 休止期を挟んだ活動に次の番号がつけられます。

エピソード4からの噴出中心は1123コーンの1.5km西方に移りました。その後の活動は大部分がこの噴出口から起こり 噴出するスパターと溶岩により コーンは成長を続けました。1986年6月のエピソード47までの間にこの山の高さは255mになりました。プウ・オオ(Puu Oo)です(グラビア写真2)。Puuはhillの意です。Ooはハワイにかつて生息していた鳥の名です。黄と黒の鳥だそうです。このプウ・オオという名は全く別な古い文献にも登場しています。1935年のマウナ・ロアの溶岩流に関する報告中に出ています(H. V. O. 1936)。地図を捜してみると ありました。マウナ・ケア南東斜面にあるコーンの1つです。命名の由来はよくわかりませんでした。

プウ・オオの火孔の直径は約10mあります(グラビア写真3)。溶岩噴泉となって空中高く噴出したマグマ片はスパターとなり火口の周囲に堆積しましたが一部は根無し溶岩流(rootless lava flow)となって流下しました。軽いスパターはこの地方に卓越する北東貿易風のために火口の南西側に多く堆積しました。プウ・オオの下半部は緩やかな斜面からなる盾状火山ですがその上部は急斜面からなるシンダー スパター・コーンでありキラウエア・イキのプウ・パイ(第13図)とよく似ています。またキラウエアの東リフト・ゾーン上にはこのような大きな突出地形はほかになく 遠くからもよく目立って見えそれは偉容でもありまたキラウエアの火山地形としては異様でもあります。

またプウ・オオの山頂部は白いもので覆われており山全体の形が富士山型をしているため あたかも雪を頂いたハワイ富士 キラウエア富士といった趣きがあります(グラビア写真2)。もちろんできたての火山体の表面に付いているのは雪ではありません。堆積したスパターなどの降下火砕物からの脱ガス作用でできた昇華物で

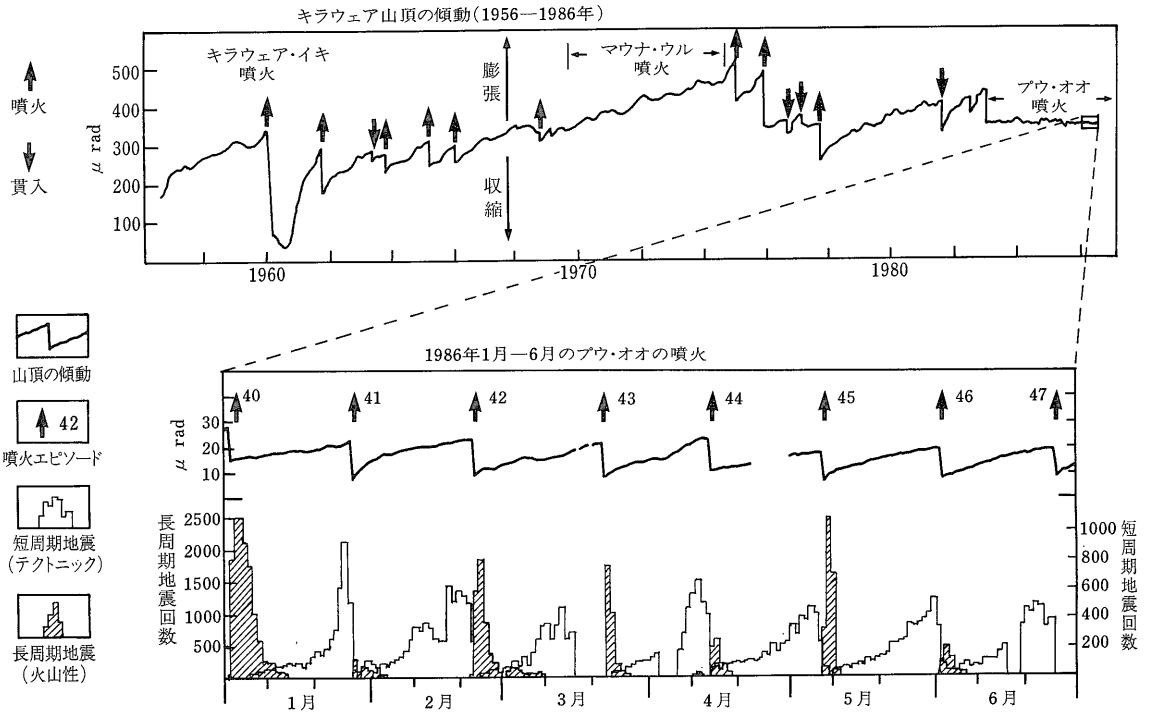


第27図 手前1123火口 向こうプウ・オオ。写真中右端の小屋は1984年に建てられた H. V. O. の臨時観測施設。T. V. カメラなどがセットされ無人状態でもプウ・オオの活動の監視が続けられました。

主にマグネシウムの硫化物からなります。

また一般に 噴出口付近ではパホイホイ溶岩として流下したものが途中でアア溶岩に変わることが多く観察されています(PETERSON and TILLING 1980)。プウ・オオの噴出口からはパホイホイ溶岩もアア溶岩も共に噴出しました。そのため火口周辺でもパホイホイとアア溶岩が複雑に分布しています。両者は空から見ると灰銀(パホイホイ)と黒(アア)で極立って色調が異なります(第28図)。

プウ・オオ噴火ではエピソードの間隔が比較的一定していました。周期の平均は $3\frac{1}{2}$ 週で 標準偏差は12日でした。各噴火の期間は次第に短くなるようになり1983年には3-4日続くことが多かったので 1985-86年には1日以内で終わることが多くなりました。ただし各エピソードの噴出量は約1,000万 m^3 で殆んど一定だったので 単位時間当たりの噴出量は多くなる傾向がみられました。エピソード47では高さ550mの溶岩噴泉が観測されました。キラウエア山頂部の傾斜計や歪計の観測により 山頂部が沈降(収縮)すると プウ・オオの噴出エピソードが起こり 噴出エピソードが終わると山頂部が隆起(膨張)し始める関係が認められました(第29図)。この一連の変化はマウナ・ウル噴火活動時にも報告されています。この噴出エピソードは1986年6



第29図 キラウエア山頂域の傾動(膨縮)と噴火活動(上図)及び山頂域の膨縮—プウ・オオの噴出エピソード—地震回数
の相関(下図) TILLING ほか(1987)より作成

月まで47回を数え 既に噴出量はマウナ・ウル噴火時の2倍に達しました。

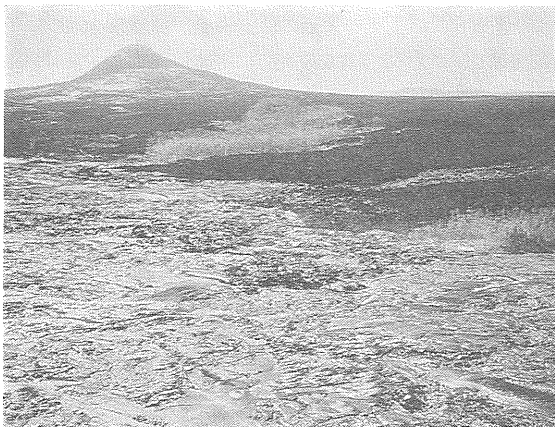
プウ・オオは東リフト・ゾーンの中部に位置しており(第30図) この周囲は前にも紹介したように森林地帯です。 噴火後しばらくは森林被害だけで済みました。

ところでプウ・オオは丁度国立公園の境界に位置しています。 公園の外側の東リフト・ゾーンの南斜面には別荘分譲地 Royal Gardens が開かれていました。 リフト・ゾーンから流下した溶岩は1983年から85年にかけて約20戸の別荘を飲みこみ アア溶岩流が道路に至る所で分断しました(第31図)。

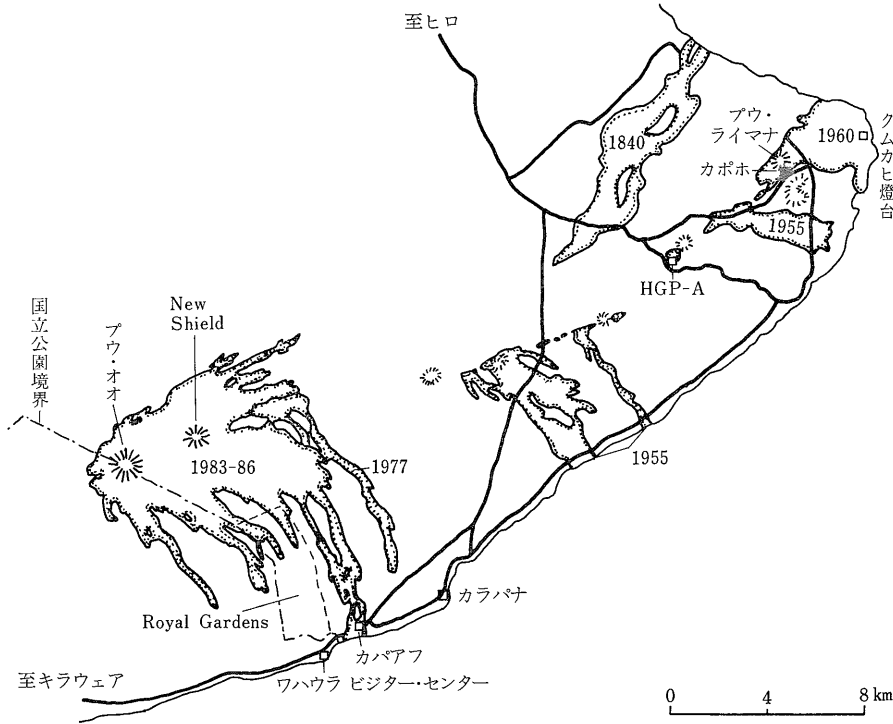
このアア溶岩の進行速度は常に一定ではありませんでした。 溶岩流の先端部は数時間ごとに厚く 高くなりそれが崩れるときはかなりの速さで流下し危険でした。 また変わった災害も発生しました。 溶岩の熱により植物の根が焼け メタンガスが生成しました。 このガスは地表に激しく噴出することもあり 溶岩から100mも離れた所でも爆発により火口ができたそうです。

12. エピソード48の噴火

1986年7月18日 エピソード48の噴火が始まりました。 この噴火はプウ・オオの東方の割れ目火口からの噴出で始まり ここでも噴出口は次第に中にまとまるようになりました。 このプウ・オオの東方約3kmにできた新しい火口の周囲には次第に盾状火山が成長し その山頂部には溶岩池が出現しました。 溶岩がこの池から



第28図 東方から見たプウ・オオ(左上)と溶岩流。
手前の灰色はパホイホイ溶岩 右上の黒いのはアア溶岩
残された森林部はキプカ(kipuka)と呼ばれています。



第30図
キラウエア火山東リフト・ゾーン中・下部略図。
HAZLETT (1987) より作成。図中の数字は1840年以降の溶岩流の年代。

溢れ出るたびに盾状火山は高くなりました。このエピソード48は、それまでの噴火とは全く活動のタイプが異なるものです。1987年5月現在盾状火山の高さは52mとなり、まだ活動は続いています。噴出量は1日当たり50万m³で一定です。このためエピソード47までは認められていた山頂カルデラ付近の傾斜や歪みの変化は認められなくなりました。溶岩は溶岩池から溢れ出るだけでなく、溶岩トンネルを通じて大量に流下しました(グ

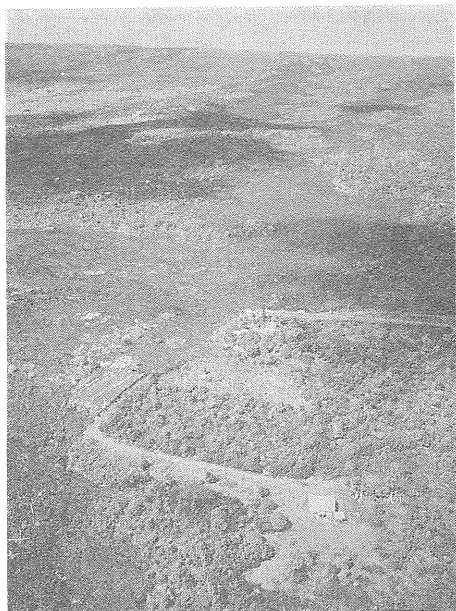
ラビア写真45)。1986年11月末には海岸付近の集落に達し、住宅が飲み込まれました。11月28日、ついに溶岩は火口から約13km流下し、海中に流入し始めました。

さてこの新しい盾状火山(New Shield)にはまだ名前がついていないようです。火山体の基底部の直径は約1.5km、山頂の溶岩池はほぼ円型の部分とそれから南に伸びた溝とからなり、長径250m、短径150mです。H. V. O. の観測者達は、ヘリコプターでこの山に通って溶岩池の高さの測量や溶岩の試料採取を継続しています。

New Shield 山頂の溶岩池を1987年1月に見ることができました。その表面には縞模様が認められました(表紙及びグラビア写真6参照)。本誌の表紙とグラビア中の写真を比べればわかるように、この縞模様は動いています。溶岩池内には対流が生じているのです。表面の様子は地球規模のプレートのものとそっくりです。DUFFIELD (1972) はマウナ・ウル山頂溶岩池表面のプレート・テクトニクスについて報告しましたが、この新しい溶岩池内でも同様の現象が起こっているのです。空からの観察では動きを把握するのは難しいのですが、対流の上昇部は溶岩池の中央部付近にあります。そこでは赤い溶融溶岩が見えますが(表紙とグラビア写真では角度の関係で赤い部分は見えません) 空気に触れるとすぐに黒色の殻ができてしまいます。固結した表面の殻は池の縁で中に沈み込みます。沈み込む時には殻が壊れ、そこでも赤い溶融溶岩が顔を出し、しぶきが飛び散りま



第31図 ブウ・オオの南東の別荘地 Royal Gardens。幾筋ものアア溶岩流に覆われました(写真左下から右上へ流下)。1983年から覆われ始めたので、既に溶岩流の上に道を造り直した人もいます。1987年1月23日撮影。



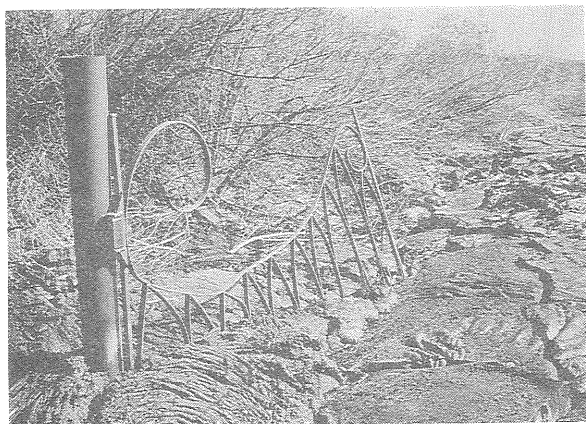
第32図 東リフト・ゾーン（スカイライン）から流下してきた溶岩は、海岸近くのカパアフ集落（建物は疎らです）や国道を埋めました。1987年1月20日撮影。



第33図 カパアフの被災家屋の一部。木材等は焼けて残っていませんが、トタンや溶融ガラスが見られます。溶岩の厚さは1-2mしかありません。

す。表紙とグラビアの写真ではあまり明瞭ではありませんが、溶岩池の縁のあたかも噴出口のように見える部分が沈み込み帯なのです。

1986年11月の溶岩流は、黒砂海岸で有名なカラパナ（Kalapana）の西方のカパアフ（Kapaahu）という集落を襲いました（第32-34図）。ここまで到達したのはNew Shieldから溶岩トンネルを経て流下してきたパホイホイ溶岩です。溶岩流はわずか1-2mの厚さしかありません。



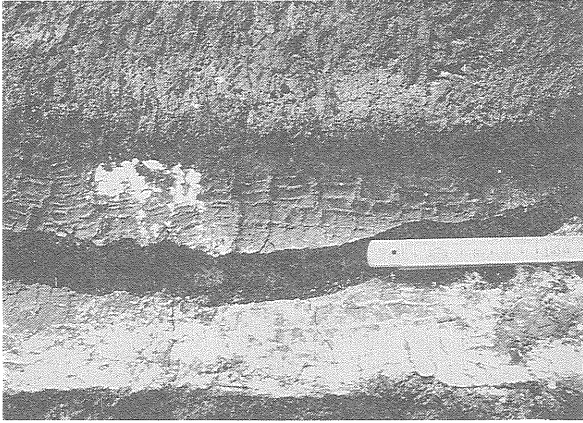
第34図 カパアフの民家の門をこじあけて侵入した溶岩流。

1988年1月号

んが、建造物に対しては破壊的でした。死傷者はなく、住民は家財道具を運び出すゆとりもありましたが、溶岩の流れを変えることはできませんでした。1987年10月1日までに計55戸の家屋が溶岩流により破壊されました。

1987年1月にヒロで開催されたハワイ・シンポジウム（須藤 1987）の巡検で、筆者も同地を訪れる機会がありました。現場に至る国道には立入禁止の柵がありました。シンポジウムの参加者だけでなく、一般の観光客も、どんどん立ち入っていました（グラビア写真7）。避難することは可能なはずの多くの自動車が放置され、焼け焦げていたのが気になりましたが（グラビア写真8）その理由はわかりません。この集落及び樹林を覆ったパホイホイ溶岩の表面は、かなり柔らかかったようで、溶岩樹型（第35図）や、やしの実痕？（第36図）などが認められました。また一方溶岩の形態で印象的だったことは、表面がブロック化して至る所に割れ目や段差があることです（第33-37図）。割れ目は幅30cm程度開いていることもあり、冷却のみによる節理とは考えられません。また内部の溶岩はつながっており、この表面の割れ目ができるたびに内部はまだ流動的だったと考えられます。したがって筆者はこの割れ目は、表面が固結後もまだ溶岩の内部は流動的であったときに力が加わり大きく開いたものと推定しました。

溶岩流は低い所を求めて流下し、道路を通って海岸方面に進みましたが（第38図）、ここでは海岸付近は少し高くなっていたために、主流は西方に流路を変え、林を焼き払いながら海岸に向いました（第39図）。海岸には海食崖が発達していたため、溶岩は滝となって海中に流入しました。そして0.07km²のnew landが形成されたのです（第40図）。海中に流入した溶岩の模式的な断

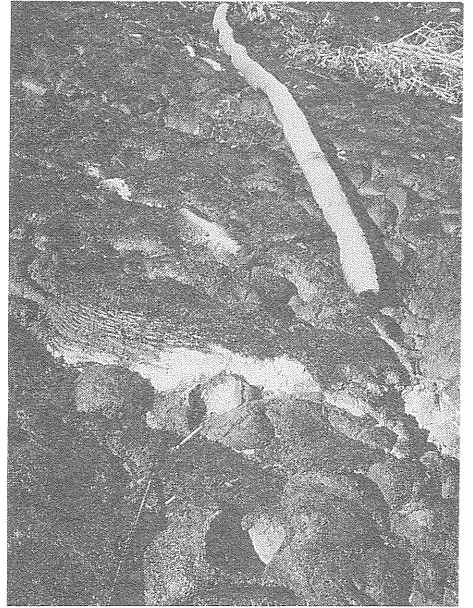


第35図 溶岩流の表面に倒れた樹木の表面構造の跡。溶岩が流動的であったからできたのでしょう。

面の例を第41図に示します。

海岸にまで達したのは溶岩トンネルを経て供給されたパホイホイ溶岩 (tube fed pahoehoe) です。これは溶岩を遠方まで効率良く運搬するシステムです。シンポジウムの巡検時にはリーダーの1人 U. S. G. S. の Peterson 氏がパホイホイとアア溶岩との関係について説明してくれました (第42図)。パホイホイ溶岩からアア溶岩への変化は大変面白い問題なのですが、実はあまり簡単には説明できませんので、興味のある方は Peterson and Tilling (1980) を参照して下さい。

かつての海岸線付近の溶岩流の表面にはスパターが付着しているのが認められました (第43図)。スパターはマグマ片が空中に放出されてできたものです。あまり



第36図 写真中央下の鉛筆の先と その手前に穴があり向こうから樹が倒れてきています。おそらくヤシの実の跡が溶岩に付けられたものでしょう。

発泡はしていません。このスパターは分布が昔の海岸線付近に限られていることから、小さな水蒸気爆発により飛散したマグマ片と筆者は推定しました。

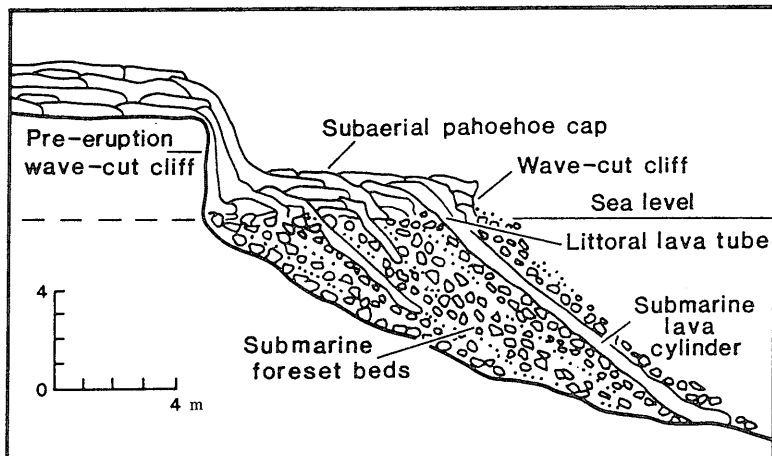
海岸沿いの国道は1986年11月に溶岩流に覆われましたが、翌年の2月には開通しました。ところが4月にはまた新たな溶岩流に覆われ、4月9日に溶岩流は86年



第37図 カバアフの集落を覆った溶岩の表面には縄状の模様も見られます。中央の割れ目は表面固結後も内部が流動するためにできたものと推定しました。



第38図 道路沿いに海(手前方向)に向かう途中で停止した溶岩流。溶岩流は少しでも低い道路に沿って流下してきましたが、この辺では海岸付近が少し高くなっているため、溶岩の主流は横に拡がり海岸に達しました。



第41図

海中に流入したパホイホイ溶岩の模式断面図。MOORE ほか (1973) に PETERSON (1976) が修正加筆したもの。後者では噴火前の海食崖の様子などがよりリアルに描かれ今回のカバアフの溶岩流とそっくりです。

11月溶岩流の西隣で再び海中に流入しました。

前にも書きましたように エピソード48の噴火の間にキラウエア山頂部の地形の変化がないことから山頂部の地下深部から供給されたマグマはカルデラ下のマグマ溜りをスムーズに通過し東リフト・ゾーンの下を通過して New Shield から噴出していると推定されます。その噴出量 50万 m^3 /日はキラウエア火山の長期連続噴火としては最大級の多さです。エピソード48の噴火はいつ終わるのでしょうか。これはキラウエアのマグマ生成と噴出のバランスを考える上で興味のあることです。

13. キラウエア火山の長期的な火山活動の変化

ブウ・オオ及びその東方の New Shield の噴火活動

はキラウエアの火山観測史上最大級の山腹噴火です。また一方山頂では1924年までの約100年間にわたってほぼ活動が連続して起こっていました。山頂噴火と山腹噴火 それらの活動の時間的關係は長期的にはどうなっているのでしょうか。

キラウエア火山の地質調査の結果 HOLCOMB (1981 1987) はそのモデルの一つを示しました (第44図)。HOLCOMB (1987) の図はカラーですのでここでは HOLCOMB (1981) の図を引用します。両者の細部は異なりますが大要は以下の通りです。

第1期：マグマの大部分は山頂下に貯えられ山頂カルデラ内で長期的な噴火が続きます。マグマの頂部が上昇すると側方のリフト・ゾーン中に貫入が起こります。



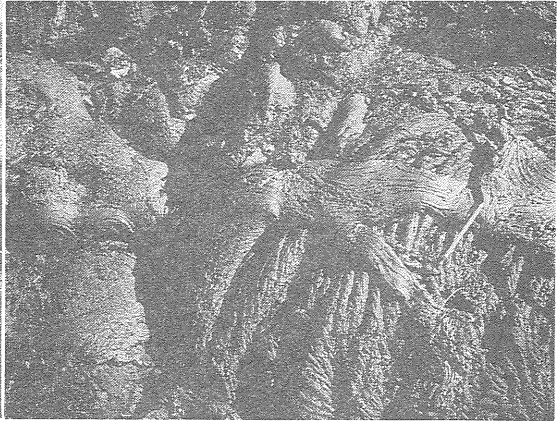
第39図 西方から見たカバアフ集落付近。分断されているのは国道。手前右の倒木のない溶岩流部が new land. 1987年4月には手前左の部分も新たな溶岩流に覆われてしまいました。1987年1月23日撮影。



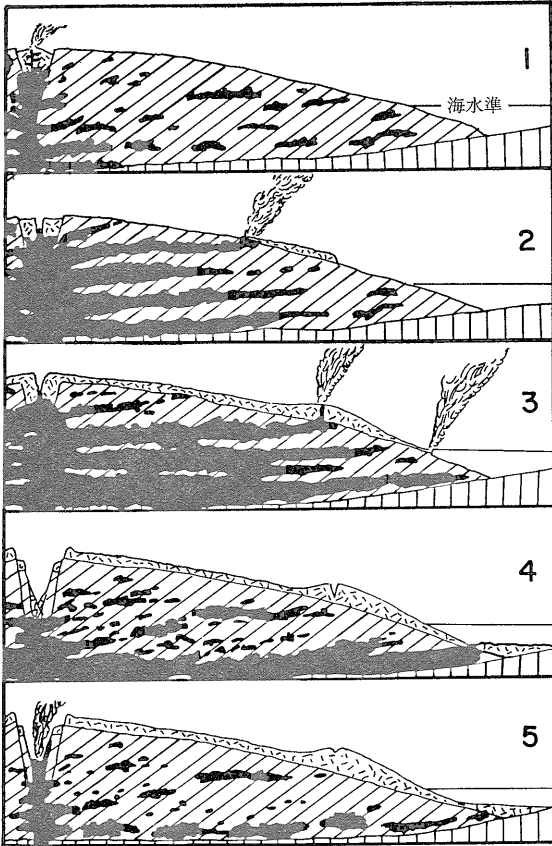
第40図 海に達した1986年11月溶岩流。海岸には溶岩の海食崖と玄武岩溶岩の急冷砕屑片からなる black sand ができています。



第42図 ハワイ・シンポジウムの参加者達が立っているのは1986年11月溶岩流が海に流入してできた new land です。中央帽子姿はパホイホイ溶岩とアア溶岩について説明する U.S.G.S. の Peterson 氏。



第43図 溶岩流の表面に附着するスパター。1986年11月溶岩が海に流入した地点でのみ見られました。小水蒸気爆発の生成物と判断しました。



|||| 基盤 ■ マグマ [△] 新しい溶岩流 ▨ 火山体

第44図 キラウェア火山の長期的噴火活動周期。HOLCOMB (1981) より。本文参照。

第2期：山頂カルデラ内の噴火は少なくなり リフト・ゾーンへのマグマの貫入と リフト・ゾーン上での噴火が多くなります。

第3期：リフト・ゾーンでの噴火が多く起こり 特に山頂から離れた地域で長期的噴火が発生します。マグマが標高が低い所から噴出するようになると 山頂カルデラ内の溶融マグマの頂部は下がり カルデラ内の溶岩は固結します。

第4期：リフト・ゾーンの先端の海面下からも大量のマグマが噴出し 山頂カルデラでは大崩壊が起きます。リフト・ゾーン上部の噴火も少なくなります。

第5期：山頂カルデラ内に再びマグマが噴出を開始します。リフト・ゾーンの地下に貫入していたマグマは固結し始め リフト・ゾーン上の活動は沈静下します。

約1500年前から約200年前までは 長期的な活動の1周期に相当し 約200年前からは別な短かい周期に入っていると考えられます。HOLCOMB (1987) によれば 現在は第2期か第3期に属しているのだそうです。

14. 東リフト・ゾーン下部

東リフト・ゾーンの下部では1840年以来115年間 噴火がありませんでした。そのため多くの家屋が建てられ パパイヤや蘭栽培の農地が拓かれました。1955年2月1日当たり数百回の地震が起こり 後で述べる地熱発電所付近に割れ目が発生しました。噴火割れ目の総延長は14kmにも達し 88日間で0.1km³の溶岩が噴出し農地を含む16km²を覆い(第30図)家屋21戸を破壊しました。またリフト・ゾーンから南に流下した溶岩の

一部は海中に入りました(第45図)。この噴火については MACDONALD and EATON (1964) に詳しく報告されています。

1959年末のキラウエア・イキの噴火後 東リフト・ゾーン沿いに 地震の震源が東方に移動してきました。翌年の1月12日になると カポホ (Kapoho) 地区では立ってられない程の地震が起きるようになり 翌13日には リフト・ゾーンの方向に沿った地割れができました。地割れは集落の南と北にでき 集落はその中に落ち込みグラベンができてしまいました。Kapoho とは “sunken place” という意味だそうです。昔から何度もグラベンができたことがあるのです。さて13日昼過ぎにはハーモニック・トレマーが観測され 19時30分 砂糖キビ畑から噴火が始まりました。噴火割れ目は約半マイルの長さに伸びました。ここでは地下水面が地表下20数mに位置しているため マグマと水が接触し 溶岩噴泉と白煙黒煙が同時に立ち登るすさまじい噴火になりました。1月15日には溶岩は海中に流入しました。溶岩は次々とカポホ集落の家屋を飲み込み グラベンを埋め 応急的に岩塊と土砂で造った堤防も越えて拡がりました。2月19日までの36日間の噴火で 0.155km^3 の溶岩が噴出して 約 10km^2 の土地を覆い 約 2km^2 の新領土が形成されました。また噴出中心には高さ約110mのシンダー・スパターの小山プウ・ライマナ (Puu Laimana 第46図) ができました。噴火の様子は RICHTER ほかに (1970) に 溶岩流に対する障壁については MACDONALD (1962) に記されています。

この噴火の初期に噴出した溶岩の温度は 後に噴出したものと比べて低く MURATA and RICHTER (1966) は 最初に噴出したものは 1955年噴火をもたらしたマグマの残りで 後に出てきたのが1960年活動のマグマであろうと推定しました。また噴火初期の噴出物は 長期間マグマ溜りに滞留していたために分化し 後期(主期)の噴出物とは化学組成が異なります。このような現象は1969年からのマウナ・ウレ及び1983年からのプウ・オオの活動時にも認められ 山頂部だけでなくリフト・ゾーン下にも液体マグマがしばらくは残存していることが裏付けられています。噴出する溶岩の温度を繰り返し測定したり 溶融溶岩を時間を追って採取して分析したりすることは 現在進行中の New Shield の活動でも行われています。そのような作業の結果火山活動の新しいモデルが提出され 火山体深部の実体や噴出メカニズムの解明がなされていくのです。



第45図 海中に流入した1955年溶岩(中央の黒色部とその両側の灰色部)。

別荘地が造成され 既に何戸か建設されていますが ここは溶岩流のハザード・ゾーン2 あまり安全な所ではありません。

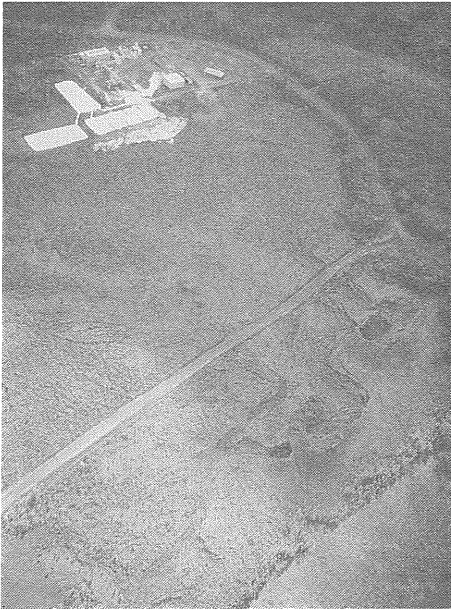
15. 地熱発電所

東リフト・ゾーンを山頂から東に順に紹介しましたが ともすれば災害の面ばかりが強調されたきらいがあります。最後にその恩恵の一部として地熱発電所を紹介します。東リフト・ゾーンの東端付近では1962年に 地熱調査を目的として最深210mの4本の浅井戸が掘削されました。最高120℃を記録しましたが あまり成果はありませんでした。1972年から深部試錐の計画が練られ1975年12月から HGP (Hawaii Geothermal Project)



第46図 カポホの1960年噴火でできたシンダー スパター・コーン プウ・ライマナ。

かつての集落の中心付近です。山体表面のひび割れは 下部の溶融部が流出したためにできたものと考えられています。



第47図 東リフト・ゾーン下部(第1図のHGP-A)にある地熱発電所。中央右下の穴は1955年火口の一部でそこから出た溶岩原上に発電所が建設されました。

-A井が掘削され 翌年深度1967mで358℃を記録し 噴出テストの結果 50t/時間の塩熱水と蒸気が得られました。東リフト・ゾーンの東端付近では この HGP-A 号井のほかに 深さ1,900m以上の坑井が6本掘削されました。そのうち1本を除くと坑底温度はいずれも300℃以上でした。あまり詳しいデータは公表されていませんが HGP-A 号井を上回る蒸気は得られていないようです。HGP-A 号井から約500m南に離れた地点の坑井では最高温度が149℃しかなく 地熱水は東リフト・ゾーンに沿った岩脈群で仕切られた狭い貯留部にのみ存在しているものと考えられます。

HGP-A 号井では1981年まで5年間にわたって噴出テストが継続され 同年6月から3,000kWの商業発電が開始されました(第47図)。地熱調査結果の簡単なまとめは THOMAS (1987) に また日本の雑誌では古本・山崎(1985)及び戸田(1986)に紹介があります。

本稿中のキラウエア火山に関する一般的な地質の紹介には主に HOLCOMB (1987) 及び HAZLETT (1987) を参照しました。ブウ・オオの噴火については WOLFE ほか(1987)にエピソード20までの記載があり参照しましたが 原著者によればこれは要約だそうで 詳細は別な U. S. G. S. の Professional Paper に掲載されるそうです。エピソード21から48までの活動については 米国 Smithsonian Institution から毎月発行されている SEAN

Bulletinなどを参照しました。

本稿執筆に際し 当所物理探査部 駒澤正夫氏には大変御世話になりました。記して謝意を表します。

文 献

- ANDERSON, L. A. (1987) Geoelectric character of Kilauea Iki lava lake crust. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 1345-1355.
- CASADEVALL, T. J. and DZURISIN, D. (1987a) Stratigraphy and petrology of the Uwekahuna Bluff section, Kilauea caldera. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 351-375.
- CASADEVALL, T. J. and DZURISIN, D. (1987b) Intrusive rocks of Kilauea caldera. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 377-394.
- DECKER, R. W. (1987) Dynamics of Hawaiian volcanoes: An overview. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 997-1018.
- DUFFIELD, W. A. (1972) A naturally occurring model of global plate tectonics. Jour. Geophys. Res., vol. 77, p. 2543-2555.
- DUFFIELD, W. A. (1975) Structure and origin of the Koaie fault system, Kilauea Volcano, Hawaii. U. S. G. S. Prof. Pap., 856, p. 1-12.
- DZURISIN, D., KOYANAGI, R. Y. and ENGLISH, T. T. (1984) Magma supply and storage at Kilauea Volcano, Hawaii, 1956-1983. Jour. Volc. Geotherm. Res., vol. 21, p. 177-216.
- FLANIGAN, V. J. and LONG, C. L. (1987) Aeromagnetic and near-surface electrical expression of Kilauea and Mauna Loa volcanic rift systems. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 935-946.
- 古本 定・山崎達雄(1985) 新編・ハワイ火山学概論(下)。地熱, Vol. 22, p. 293-315.
- HAZLETT, R. W. (1987) Geological field guide, Kilauea volcano. Univ. Hawaii at Hilo, p. 1-112.
- HELZ, R. S. (1987) Diverse olivine types in lava of the 1959 eruption of Kilauea Volcano and their bearing on eruption dynamics. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 691-722.
- HOLCOMB, R. T. (1981) Kilauea volcano, Hawaii: Chronology and morphology of the surficial lava flows. U. S. G. S. Open File, 81-354, p. 1-321.
- HOLCOMB, R. T. (1987) Eruptive history and long-term behavior of Kilauea volcano. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 261-350.
- H. V. O. (1936) Volcano Letter, No. 431. p. 1-8.
- KINOSHITA, W. K., KRIVOV, H. L., MABEY, D. R. and MACDONALD, R. R. (1963) Gravity Survey of the Island of Hawaii. U. S. G. S. Prof. Pap., 475-C, p. C114-C116.
- KLEIN, F. W., KOYANAGI, R. Y., NAKATA, J. S. and TANIGAWA, W. R. (1987) The seismicity of Kilauea's magma system. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 1019-1185.

- MACDOALD, C. A. (1962) The 1959 and 1960 eruptions of Kilauea volcano, Hawaii, and the construction of walls to restrict the spread of the lava flows. Bull. Volcanologique, ser-2, vol. 24, p. 249-294.
- 松久幸敬・三村弘二・須藤 茂・曾屋龍典 (1980) ハワイ・キラウエア火山 (その1). 地質ニュース 310号 p. 32-41.
- 三村弘二・須藤 茂・曾屋龍典・松久幸敬 (1980) ハワイ・キラウエア火山 (その2). 地質ニュース 312号 p. 49-57.
- MOORE, J. G. and EVANS, B. W. (1967) The role of olivine in the crystallization of the prehistoric Makaopuhi tholeiitic lava lake, Hawaii. Contr. Miner. and Petrol., vol. 15, p. 202-223.
- MOORE, J. G., PHILLIPS, R. L., GRIGG, R. W., PETERSON, D. W. and SWANSON, D. A. (1973) Flow of lava into the sea, 1969-1971, Kilauea Volcano, Hawaii. Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 84, p. 537-546.
- PETERSON, D. W. (1976) Processes of volcanic island growth, Kilauea Volcano, Hawaii, 1969-1973. IAVCEI Symposium on Andean and Antarctic volcanology Problems, Proceedings, p. 172-189.
- PETERSON, D. W. and TILLING, R. I. (1980) Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea volcano, Hawaii: field observations and key factors. Jour. Volc. Geotherm. Res., vol. 7, p. 271-293.
- RIGHTER, D. H., EATON, J. P., MURATA, K. J., AULT, W. U. and KRIVOV, H. L. (1970) Chronological narrative of the 1959-60 eruption of Kilauea Volcano, Hawaii. U. S. G. S. Prof. Pap., 537-E, p. 1-73.
- 曾屋龍典・須藤 茂・三村弘二・松久幸敬 (1980) ハワイ・キラウエア火山 (その3). 地質ニュース 341号 p. 34-45.
- 須藤 茂 (1980a) ハワイ・キラウエア火山 (その5). 地質ニュース 316号 p. 32-37.
- 須藤 茂 (1980b) ハワイの火山噴出物—その2—. 地質ニュース 316号 p. 1-4.
- 須藤 茂 (1987) H. V. O. 75周年記念ハワイ・シンポジウムと最近のハワイ. 地質ニュース 399号 p. 38-58.
- 須藤 茂・三村弘二・曾屋龍典・松久幸敬 (1980) ハワイ・キラウエア火山 (その4). 地質ニュース 315号 p. 55-63.
- 須藤 茂・曾屋龍典・三村弘二・松久幸敬 (1980a) ハワイの火山噴出物—その1—. 地質ニュース 315号 p. 1-4.
- SWANSON, D. A., DUFFIELD, W. A., JACKSON, D. B. and PETERSON, D. W. (1979) Chronological narrative of the 1969-1971 Mauna Ulu eruption of Kilauea Volcano, Hawaii. U. S. G. S. Prof. Pap., 1056, p. 1-55.
- SWANSON, D. A., DUFFIELD, W. A. and FISKE, R. S. (1976) Displacement of the South Flank of Kilauea Volcano: The result of forceful intrusion of magma into the rift zone. U. S. G. S. Prof. Pap., 963, p. 1-39.
- THOMAS, D. (1987) A geochemical model of the Kilauea east rift zone. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 1507-1525.
- THURBER, C. H. (1987) Seismic structure and tectonics of Kilauea Volcano. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 919-934.
- TILLING, R. I., CHRISTIANSEN, R. L., DUFFIELD, W. A., ENDO, E. T., HOLCOMB, R. T., KOYANAGI, R. Y., PETERSON, D. W. and UNGER, J. D. (1987) The 1972-1974 Mauna Ulu eruption, Kilauea Volcano: an example of quasi-steady-state magma transfer. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 405-469.
- TILLING, R. I., HELIKER, C. and WRIGHT, T. L. (1987) Eruptions of Hawaiian Volcanoes: past, present, and future. U. S. G. S. p. 1-54.
- 戸田久良 (1986) ハワイの地熱開発. 地熱, vol. 22, p. 461-467.
- U. S. G. S. (1986) Hawaii Volcanoes, National Park and vicinity, Hawaii, 1: 100,000-scale topographic map.
- WALKER, G. P. L. (1987) The dike complex of a Hawaiian rift zone. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 961-993.
- WOLFE, E. W., GARCIA, M. O., JACKSON, D. B., KOYANAGI, R. Y., NEAL, C. A. and OKAMURA, A. T. (1987) The Puu Oo eruption of Kilauea Volcano, episodes 1-20, January 3, 1983, to June 8, 1984. U. S. G. S. Prof. Pap., 1350, p. 471-508.
- WRIGHT, T. L. and OKAMURA, R. T. (1977) Cooling and crystallization of tholeiitic basalt, 1965 Makaopuhi lava lake, Hawaii. U. S. G. S. Prof. Pap., 1004, p. 1-78.

追記

キラウエア火山の東リフト・ゾーンの1983年からの噴火活動は本報告脱稿後も継続しています。溶岩流による家屋の被災と溶岩の海中への流入も断続しています。海岸付近の低地では溶岩流は次第に西方の宅地を覆うようになり国立公園の境界付近も罹災しています。一方プウ・オオの火孔では1987年6月25日に壁岩が崩落し火孔の直径は10mから30—40mに拡大しました。このためグラビア写真3に見られた赤熱部分は埋没し見えなくなりました。