

火 山 噴 火 予 知 連 絡 会

富士山ワーキンググループ

富士山に類似した活火山についての調査資料

2003 年 5 月

気 象 庁

平成 14 年度

富士山に類似した活火山についての調査

目 次

1. 休止期間が短い火山	1
1. 1 ヘクラ火山	1
1. 2 エトナ火山	4
1. 3 クリチョフスコイ火山	21
1. 4 マウナロア火山	25
1. 5 スフリエール火山	33
1. 6 ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山	35
2. 休止期間が長い火山	40
2. 1 ラ・パルマ火山	41
2. 2 セントヘレンズ火山	43
2. 3 サンタマリア火山 グアテマラ	47

1. 休止期間が短い火山

平成 13 年度の調査結果も活用しながら、以下の条件の火山についての調査を行った。これらの噴火について (a) 噴火前の現象の近代観測例、(b) 観測結果から推定されたマグマ供給系モデルに関する文献を収集し、近代的な観測の下で噴火が発生した事例について、噴火前に生じた現象と(それが存在する場合には)推定されているマグマ供給系モデルを整理した。

- 玄武岩を主体とする火山
- プレーートの沈み込みに伴って形成されている火山でなくてもよい

この条件を満たす火山として、以下の 8 火山について調査した。

- ① ヘクラ火山
- ② エトナ火山
- ③ クリチョフスコイ火山
- ④ マウナロア火山
- ⑤ スフリエール火山
- ⑥ ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山

1. 1 ヘクラ火山 アイスランド(図 1.1-1)

レイキャビクの東 120km にある標高 1491m の火山。1104 年の最初の大噴火以来、少なくとも 20 回噴火した。過去 7 千年間にヘクラは 5 回の大割れ目噴火を起こしている。最大規模の噴火は 4000 年前と 2800 年前の噴火で、北部と北西部の土壌の中に往時の痕跡が残っている。1947 年 3 月の噴火では、噴火煙が上空 30,000m まで達し、溶岩流は 40km² を覆い尽くした。この噴火は 13 か月も続いた。1991 年 5 月には、ヘクラの無数の小クレーターが噴火し、2 ヶ月間溶岩を流出した。ヘクラ火山はその後、1980、1981、1991、2000 年に噴火した。最近では 2000 年 2 月 26 日 18:00 頃に始まった。同日夜半には、山頂に沿って 6-7km の亀裂が走り、円柱状になった水蒸気が 15km の高さまで立ち込め、火山灰はアイスランドで最も北に位置するグリーンズエイ島にまで達した。



図 1.1-1 ヘクラ火山の位置

1) 1991年噴火

ヘクラ火山では、体積歪み計の変化や微小な群発地震が噴火の0.5-1.0時間前に見られる程度しか通常、前兆は観測されていない。

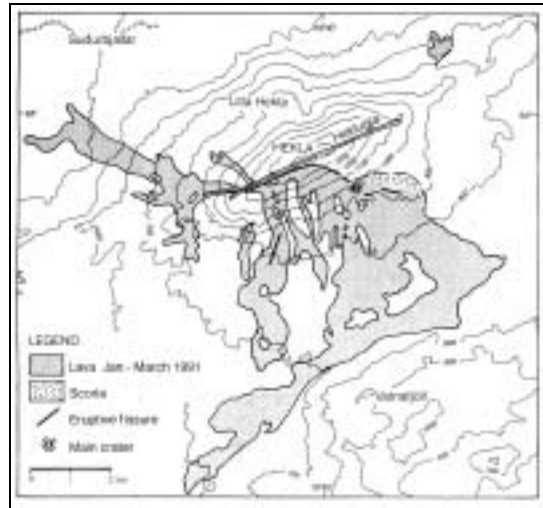


図1.1-2 噴出物の分布 (Gudmundsson et.al,1992)

1990年6月のSIL(South Iceland Lowland)デジタル観測網観測開始から1991年1月16日(噴火開始前日)までの間にローカルマグニチュード $ML0.5-2.1$ の地震22個しか観測されなかった。この期間の震央分布を図1.1-3に示す。ヘクラは噴火前の半年間地震活動を見せなかった。

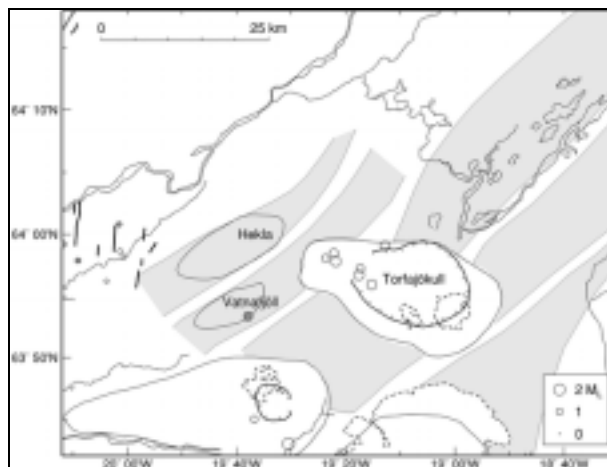


図1.1-3 噴火前のヘクラ地域の地震活動(1990年6月~1991年1月16日)

(Soosalu and Einarsson,2002)

震源決定が行われた地震 ($rms\ 0.2 \leq s$, $erh\ 1.0 \leq km$, $erz\ 2.0 \leq km$ and $gap \leq 180^\circ$) は灰色の丸で、やや劣る地震 ($rms\ 0.2 \leq s$, $erh\ 2.0 \leq km$, $erz\ 5.0 \leq km$, $gap\ 230^\circ$) は白丸で示す。

ヘクラの地殻が前兆を示したのは噴火開始が目撃されるほんの30分程前だった。最初の地震は16:30GMTに観測され、歪計観測網がヘクラ直下に貫入が起きつつあることを示した。噴火は17:00に始まった(図1.1-4)。

噴火開始前16:30-17:00の初期の地震は小さかったが、次第に大きくなっていった。

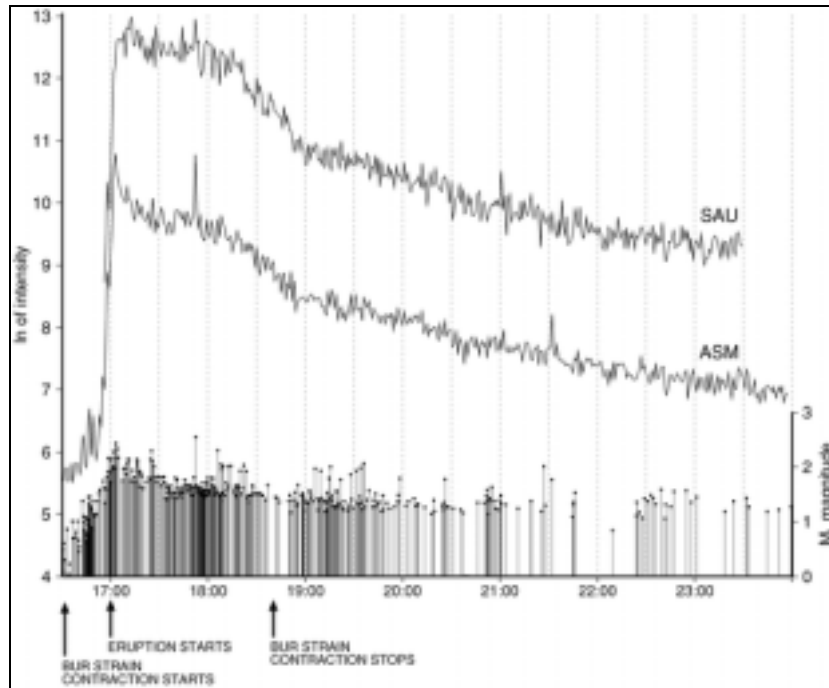


図 1.1-4 ヘクラ火山 1991 年噴火の地震発生の推移

(Soosalu and Einarsson, 2002)

しかし震源は決まらず、深さがどのように変化したのかはわからない。マグマの地表にむけての貫入を記録したのかもしれないが、この局所的な応力場の変化を反映したとも考えられる。1970 年の噴火では 25 分前、1980 年噴火では 20 分前に地震が記録された。

噴火の最初の 1 時間は噴火割れ目が開口し、拡大していった。噴火活動に伴って、激しい微動と地震活動が起きた。

20:00 までに 308 回の地震が記録されたが、そのうち 60 回が噴火に先立つものだった。20:00 以降、地震活動は次第に弱まり、発生間隔が長くなり、規模も小さくなっていった。

識別できる限り、17 日の地震は S 波が明瞭な脆性破壊による高周波地震に分類される。実際には連続低周波微動から目視で抜き出した高周波成分を使用した。独立した低周波地震は発生しなかったか、微動に隠れて検出できなかった。

1. 2 エトナ火山 イタリア(図1.2-1)

エトナ火山は、イタリア南部のシチリア島東部に位置するヨーロッパ最大の火山である。標高は 3350m、山体直径は約 40km あり、富士山に似た規模である。有史以来、多数の噴火活動が記録されており、2002 年 10 月にも火山活動が活発化し、溶岩流が標高 2200m 付近にまで達している。

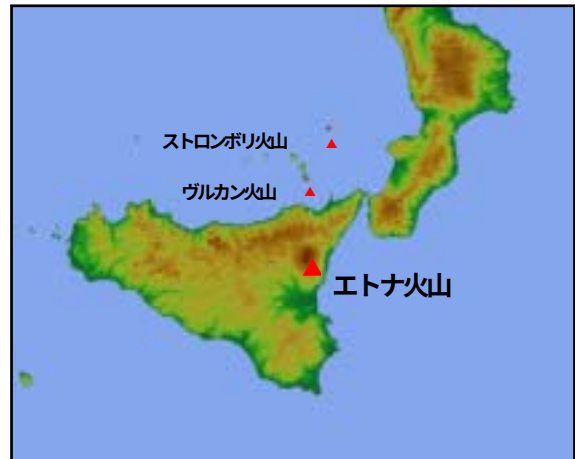


図1.2-1 エトナ火山の位置

1974 年-1991 年間の火山噴火と前兆現象をまとめると表 1.2-1 のようになる。噴火年が赤字の噴火は、後に述べる。

表 1.2-1 エトナ火山 1974-1991 年の火山噴火と前兆現象のまとめ

噴火年	いつごろ	現象の種類	どこで	特徴
1974	2週間前	地震活動 地震活動	S-W山腹 南に7km (serra la nave)	
	1月30日のおそろ く午後遅く 3月29日終息	山腹噴火開始	西側山麓山頂から6 km/W-1974噴火、山頂と無関係/標高1680m	
	9月	山頂活動再開		
1975	2.24	山腹噴火開始	北側斜面/標高3000-2600m (bocca)	
	7月中旬	山腹噴火開始	NE火口	
1977	7.16	山腹噴火開始	NE火口	爆発的噴火、山頂にしては長い溶岩
	9月	山腹噴火開始	火口の180m下/南東方向75度	岩脈検出
1978	4.29	山腹噴火開始	南東山腹/標高3000-2600 (1650) m	割れ目北端と山頂でマグマ水蒸気爆発、SE火口
	8.29	山腹噴火開始	東北東山腹/標高2300m	
1979	6.22	山頂噴火開始	CCV再開	爆発的噴火
	7.16	山腹噴火開始	NE火口活動開始	
	8.3	山腹噴火開始	南東山腹/標高2800-2700m	
	8.4	山腹噴火開始	東山腹/標高1800-1600m	
	8.5	山腹噴火開始	北東-東北東山腹/標高2800-2600m, 2300-2100m	
	8.3~5 9.12	山腹噴火開始 山頂噴火開始	SE火口 BN水蒸気爆発	火山灰放出
1980	3ヶ月前から	NW-SE方向の地震群	山頂火口群活動	
	9月	山頂噴火開始	山頂NE火口	爆発的噴火
	8-9月	重力増加	山頂を含む北北西-南南東方向	山体内浅部への岩脈貫入
	10月以降	噴火停止	山頂	
	10月以降	群発地震	北山腹	
1981	1.7	山頂噴火開始	山頂NE火口	爆発的噴火
	2.3ヶ月前	膨張	山頂方向	
	2日前	強い群発地震		
	3.17 3.22	山腹噴火開始 山腹噴火開始	北-北北西山腹/標高2550-1120m NE火口噴泉, BN火口水蒸気爆発	岩脈貫入速度1100m/h 噴泉、水蒸気爆発
1982		山頂噴火開始	BN火口	おもにガスと火山灰の放出
1983	3月上旬	山頂噴火開始	BN火口内	マグマレベル上昇、爆発的噴火
	3.23		SE火口	ガス噴出圧、温度増大
	3.26-28	強い群発地震	南山腹の浅い所	
	3.27?	山腹噴火開始	南山腹/標高3000-2250m	岩脈貫入速度150m/h, BN火口類質火山灰の放出、時々ブルカニアン的
1989	1988-1989初頭	重力増大	南山腹を中心とする北北西-南南東方向の地域	数km以深への岩脈貫入
	1989早春	膨張開始		
	3ヶ月前	浅い地震活動		
	少なくとも数日前	山頂部の膨張		
	までに開始			
	1989年夏	山頂噴火開始	山頂火口群活動開始	
	9.1	山腹噴火開始	SE火口活動開始	
	9.24	山腹噴火開始	南南東山腹/標高3000-1500m	
	噴火を伴わない部分の開口時	地震活動活発		
	9.24	山腹噴火開始	北東山腹/標高3000-2600m	
	開口時	地震活動微弱		貫入速度大 爆発的噴火・火山灰放出
1991	10.2	山頂部の膨張 小規模な地震	SE火口 山頂方向の膨張 南側の割れ目火口末端部	
	9ヶ月前	山体膨張		
	1月	山体膨張、火山性微動の振幅増大		
	数日前	急激な膨張		
	11.26-12.9	かなりの群発地震		
	12.14	山腹噴火開始	南南東山腹/標高3100-2400m 山頂東側に北北東走向/標高3200-3000m	1989年割れ目再活動 同時期にBN火口激しいストロンボリ式噴火

凡 例	
	火山噴火
	地震現象
	重力異常・膨張

1) 火口分布

山頂から北東、南-南東、西方向に密集域が認められる。山体に認められる北西-南東、北東-南西走向の断裂系と良い相関を示す(図1.2-2)。



図1.2-2

(a) エトナ地域の構造性リニアメントの走向(b)東山腹ボーベ渓谷に露出する岩脈群の走向(c) 4km² 当たりの火口数密度。(Ferrucci et. al, 1993)

2) 構造

周辺地域には北東-南西、東北東-西南西、北北西-東南東、北西-南東方向の構造や断層がみられる。山体内の割れ目や断層、震央分布等から火山構造はこれらの影響を受けていると考えられる(図1.2-3)。

馬蹄形のボーベ渓谷は山体崩壊によって形成した可能性が指摘されている。これを含む東山腹は東のイオニア海側へ地滑りの移動をしているとみられ、山頂から北東、南東山腹の噴火割れ目のパターン形成に強い影響を与えている。



図1.2-3

エトナ東部での最大水平圧縮応力軸(実線)・最小水平圧縮応力軸(破線付き実線)の軌跡。側火口分布、火口の形状、開口割れ目や噴火割れ目、岩脈群、主要な活断層から作成。西の凸に彎曲した圧縮軸軌跡は東山腹の地滑りの移動に起因する。

(Ferrucci et. al, 1993)

3) 噴火履歴

階段図では、400 年で 5 km³ のマグマが噴出(0.0125 km³/y) したことがわかる。1669 年噴火が歴史時代最大で(1 km³)、1991-93 年噴火はそれに次ぐ規模(0.25 km³)であった(図1.2-4)。

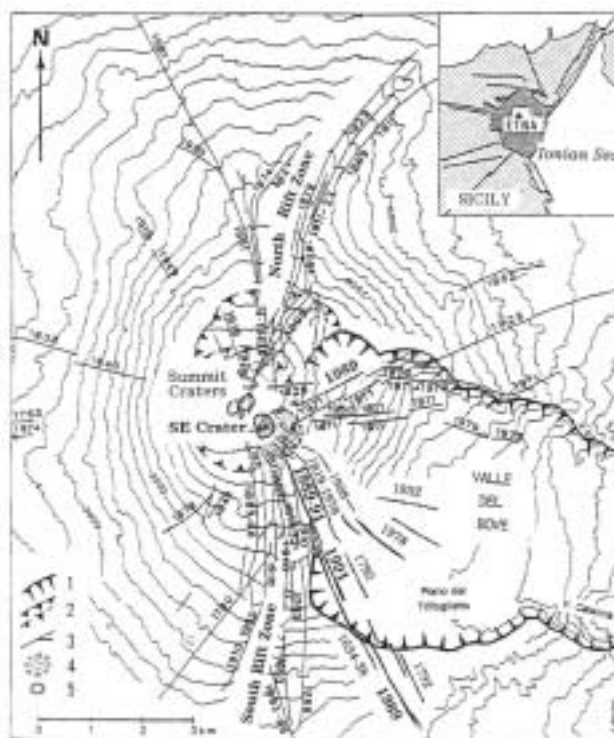


図1.2-4 1603-1993 年までの積算噴出量(DRE m³)
(Tanguy et. al, 1996)

4) 割れ目火口分布

山頂の火口群（北東火口、ボッカヌーボ火口、ラ・ヴォラジーネ火口、南東火口）を中心とする放射状のパターンを示すが、南北方向、北東方向に多く分布する(図1.2-5)。

図1.2-5
山頂付近に分布する歴史時代の噴火割れ目。
最近の噴火割れ目は南東火口付近（4の打点
領域）に収斂する傾向がある。
(Tanguy et. al, 1996)



5) 噴火の特徴

噴火は以下のように分類できる。

○山頂噴火

定常的な噴火活動が山頂火口群で見られ、Terminal eruption と呼ばれている。マグマ柱頭部の比較的低温、高粘性のマグマが、低噴出率で長期間にわたり噴出する。噴火様式は溶岩噴泉、ストロンボリ式噴火、火山灰放出等である。溶岩流は小規模なものをしばしば流出する。

○山腹噴火(Lateral eruption)

中央のマグマ柱から派生する放射状岩脈によって生じ、山頂火口群の活動活発時に起こる。発生間隔は数ヶ月から20年程で、特に規則性は認められていない。ガス成分に富み比較的高温、低粘性のマグマが、比較的高噴出率で噴出する。爆発的に噴火し、火砕丘や火口を形成する。同一割れ目系の山頂側で爆発的、山麓側で流出的な噴火が起きることもある。数時間から数ヶ月で終了することが多い。

○孤立噴火(Eccentric eruption)

山腹噴火であるが山頂噴火を伴わず、中央のマグマ柱から派生した証拠がない噴火で、事例は少ない。中央のマグマ柱と隔絶は噴出物の岩石学的特徴から少なくとも地下数kmの範囲におよぶと考えられている。

6) 噴出率による分類

山腹噴火で 1 回の噴火中に噴出率の変化がみられ、初期に大きい値であることが知られている(図1.2-6)。平均した場合の噴出率にも

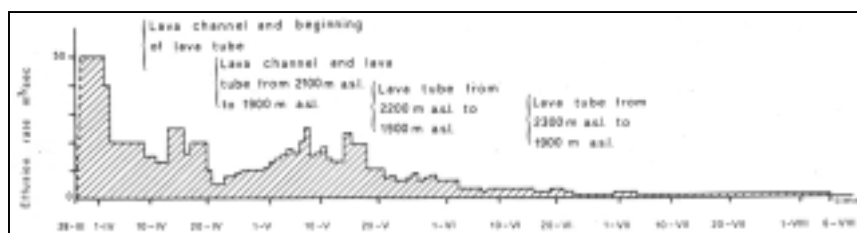
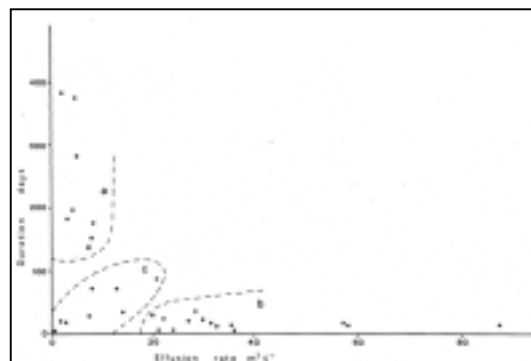


図1.2-6 1983年噴火の噴出率変化(Frazzetta et. al, 1984)

幅があり、高い噴出率の噴火は短期間で終了し、低噴出率の噴火は長期にわたる傾向がある(図1.2-7)。

図1.2-7
エトナ火山の歴史時代の噴火について噴火期間(日、縦軸)、噴出率(m^3/s 、横軸)をとったもの。領域a(低噴出率長期間)はquiet、b(高噴出率短期間)はparoxysmal、c(低噴出率短期間)はintermediate.
(Frazzetta et. al, 1984)



7) 観測網

観測網は1970年代後半から整備されている。近年では活動頻度の高い北東-南東山腹に高密度な観測体制が布かれている(図1.2-8)。

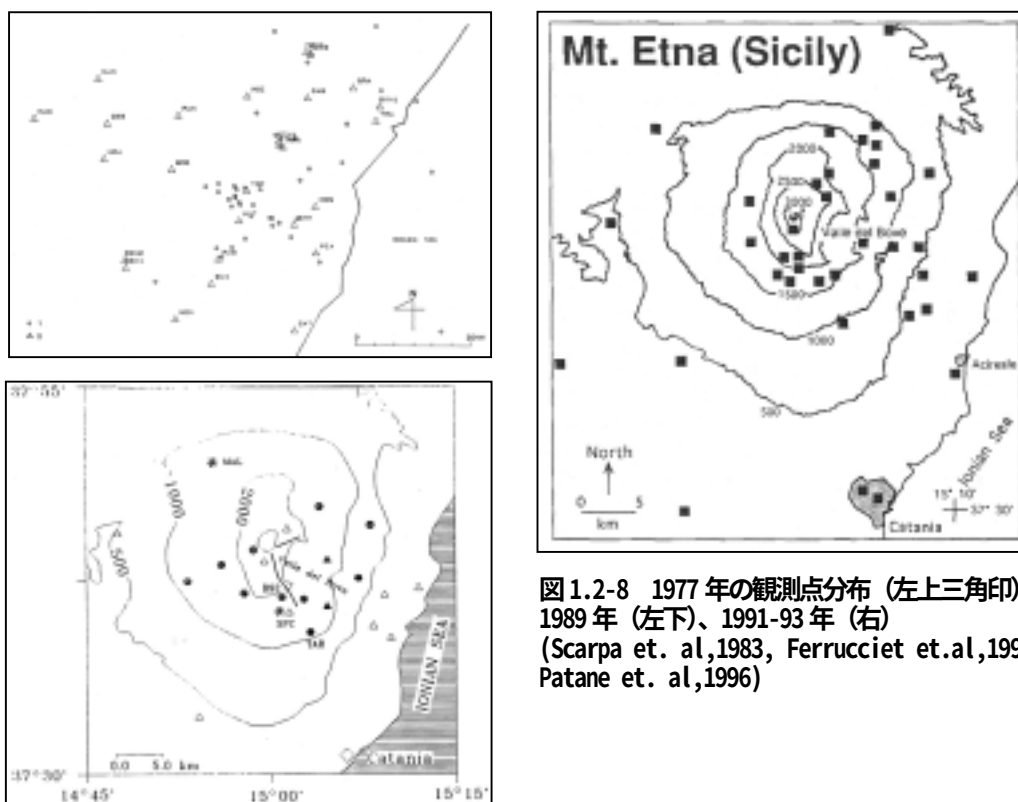


図1.2-8 1977年の観測点分布(左上三角印)、1989年(左下)、1991-93年(右)
(Scarpa et. al, 1983, Ferrucci et. al, 1993, Patane et. al, 1996)

現在の観測網を図1.2-9に示す。

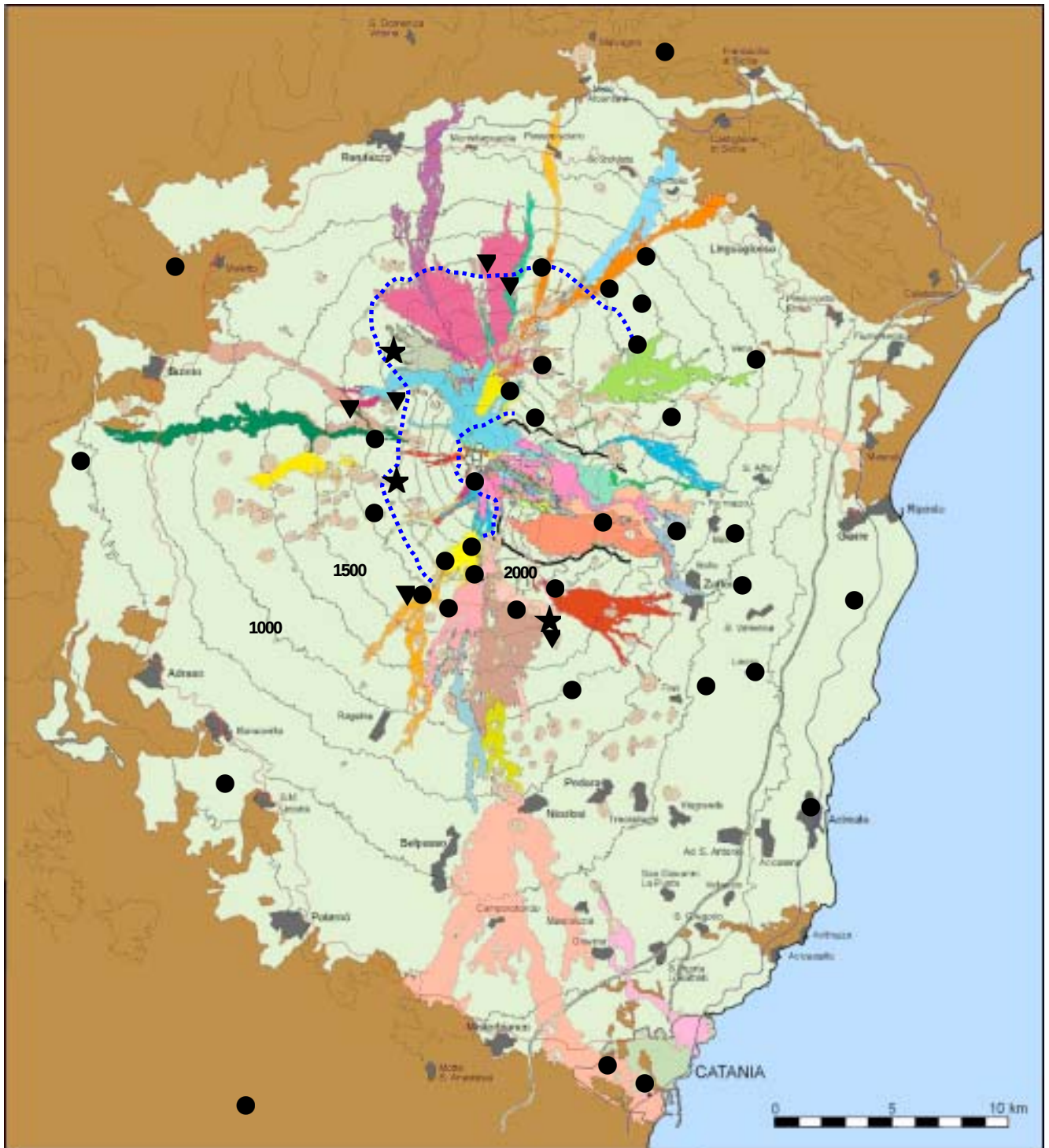


図1.2-9 エトナ山の監視・観測体制

凡例：●地震計，★GPS，▼傾斜計 破線は、水準測量の測線を示す

※エトナ山における地震計の位置は、G.Patane,A.Montalto,S.Vinciguerra,J.C.Tanguy (1996) A model of the onset of the 1991-1993 eruption of Etna(Italy) :*Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **97**, 231-245. による。また、GPS・傾斜計の位置は、Bonaccorso (2001) Mt Etna volcano: modelling of ground deformation patterns of recent eruptions and considerations on the associated precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **109**, 99-108.に掲載された1991年噴火当時のものである。

8) 噴火事例の紹介

■1974 年噴火 (1981.3.17-23) (図 1.2-10)

◎主な特徴

- ・ 南-西山腹で 2 週間にわたる先行地震活動を観測。
 - ・ 山頂火口群の活動伴わず西山腹に短い噴火割れ目形成 (図 1.2-11)。
 - ・ 爆発的噴火による比高 100m の火砕丘形成。
 - ・ 山頂火口の噴出物と異なる無斑晶質玄武岩噴出
- ⇒ 孤立噴火(Eccentric eruption)に相当



図 1.2-10 1974 年の噴火地点 (×印)
(Tanguy and Kieffer, 1976)

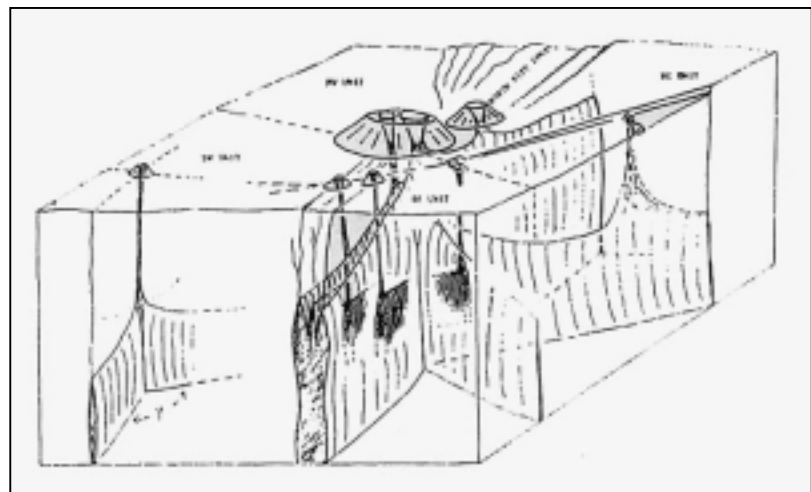


図 1.2-11 エトナ火山の内部構造(推定)
(Tanguy and Kieffer, 1976)

■1981 年噴火 (1981.3.17-23) (図 1.2-12)

◎主な特徴

- ・ 北東火口の噴火が先行。
- ・ およそ 7km に達する長い割れ目火口が、0.36m/s という速い速度で拡大した。
- ・ 溶岩流の噴出率が、主溶岩流で平均 $128\text{m}^3/\text{s}$ 最大 $300\text{m}^3/\text{s}$ 以上と高かった。
- ・ 光波測距や水準測量結果、傾斜計に変化が見られた。
- ・ 水平変位量が、垂直変位量より大きかった。

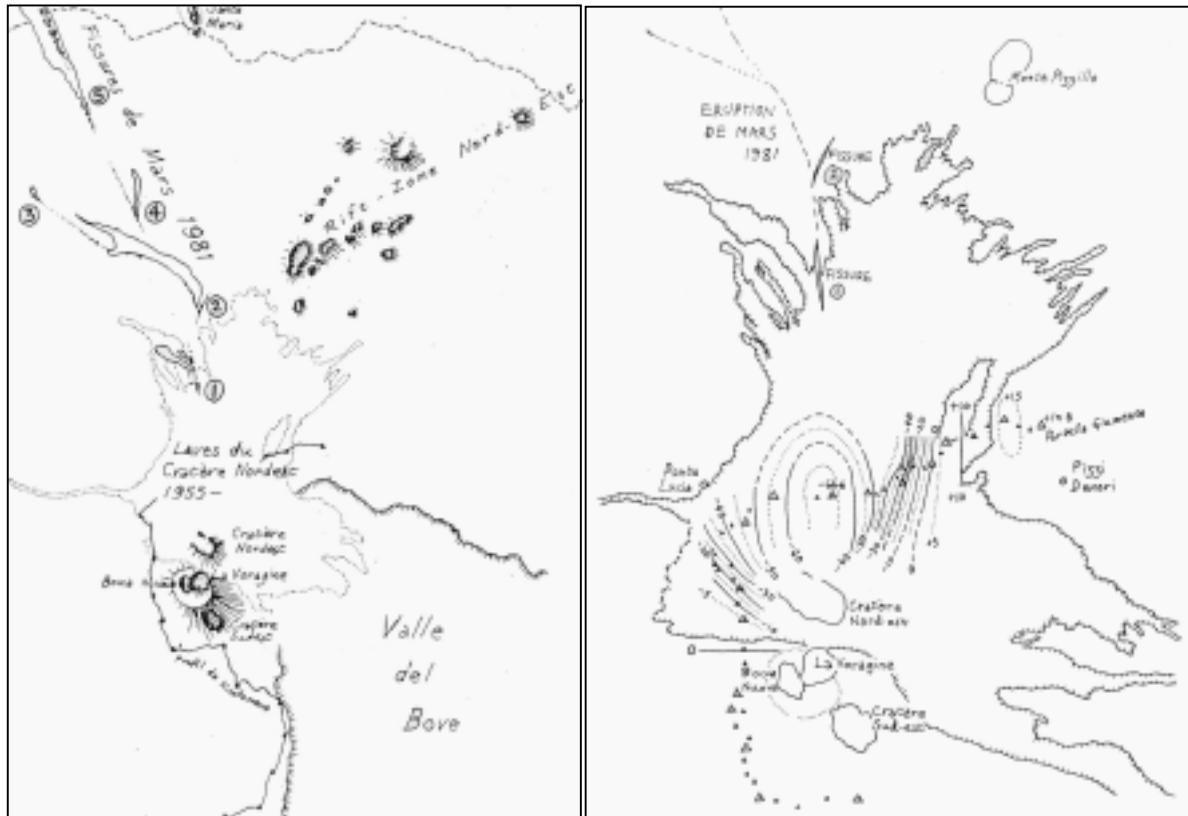


図 1.2-12 1980-81 にかけて割れ目火口最上部-山頂間で沈降が観測されている

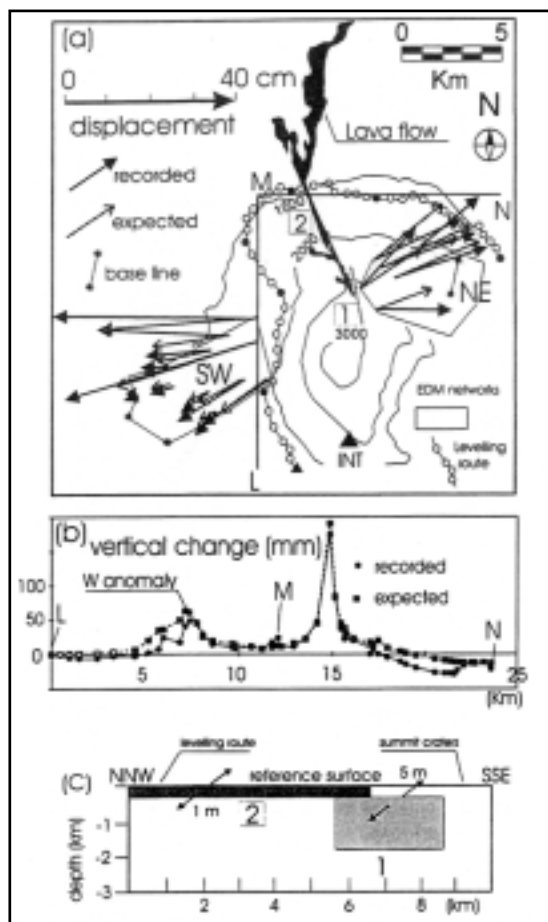
(Murray, 1981)

○地表での変位量とマグマの貫入モデル

光波測距によって、中腹部で 40cm 以上の変動（距離の拡大）が確認された。また、水準測量、重力測定では、割れ目火口の周辺と西側山腹での隆起と重力増大が測定された。垂直方向の最大変位（17.5cm）を記録している箇所については、浅い部分の岩脈形成によるものと考えられるが、西麓の広い範囲で記録されている最大 3-4cm の隆起は、岩脈形成ではなく、より深い部分での岩脈形成によるものと考えられる。実際の変位量から推定されるモデルは、マグマの貫入によって海面下 300-1700m 付近に長さ約 3km、開口幅約 5m の割れ目火口（NNW 方向）が形成された。その亀裂は地表から 500m 付近で急速に北方に広がって、2 番目の割れ目火口が形成されたと考えられている（図 1.2-13）。

図 1.2-13

- (a) 噴火によって形成された割れ目火口の位置と溶岩流の位置。矢印は、山頂を挟んで東西で計測された噴火時の水平変位量と(c)のモデルから推測される変位量。図中にグレーの線で示されているのが、想定した深部での岩脈の位置
- (b) 実際の垂直変位量とモデルから推測される変位量
- (c) 地表の変位量から推定される 2 つの岩脈モデル（矢印は、岩脈による水平方向の開口量）
(Bonaccorso, 2001)



○傾斜計の挙動

山頂の南方に設置されているボアホールタイプの傾斜計には、噴火の 2~3 ヶ月前から山頂方向が膨らむ変動が捕らえられている。また噴火直後には、割れ目噴火に伴う急激な収縮が発生している（図 1.2-14）。

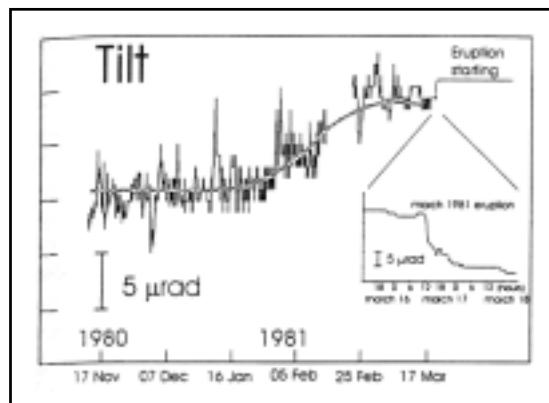
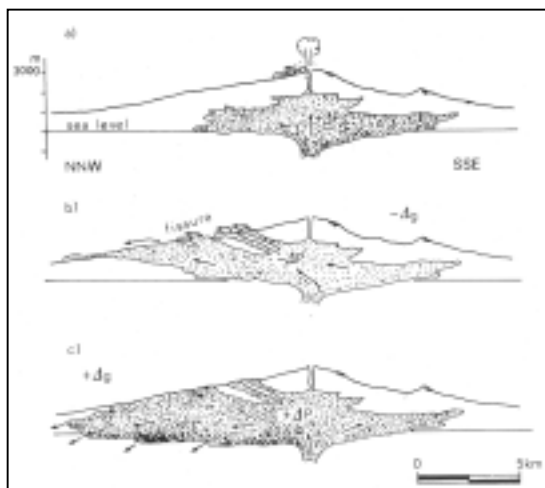


図 1.2-14 上 2-13(a)中の INT 点で計測された、傾斜計の変動量 (Bonaccorso, 2001)
左 主に垂直変位、重力変化から導かれたモデル。(a) 山頂下にマグマが上昇し、北西-南東走向の岩脈形成、重力が増加。(b)北山腹浅所に岩脈貫入、噴火。南山腹ではマグマが移動したため重力減少。(c)北山腹の岩脈、引き続き重いマグマの貫入で深度増大し重力が増加。(Sanderson et.al, 1983)

■1989 年噴火 (1989.9-10)

◎主な特徴

- ・ 山頂火口群の活発化で始まった。
- ・ 山頂付近を挟んで、北東-南西方向と北北西-南南東方向に2本の割れ目火口が出現した。
- ・ 北東-南西方向の割れ目火口（長さ約2km, 9/24に形成）からは溶岩が流出したが、北北西方向-南南東に延びた割れ目（長さ約7km, 9/28~10/3に形成）からは、山頂付近を除いて溶岩が流出しなかった（図1.2-15-(a)）。
- ・ 溶岩が流出しなかった割れ目の末端部の深さ2-3km付近で、小規模な地震が600回発生した（図1.2-15-(b)）。

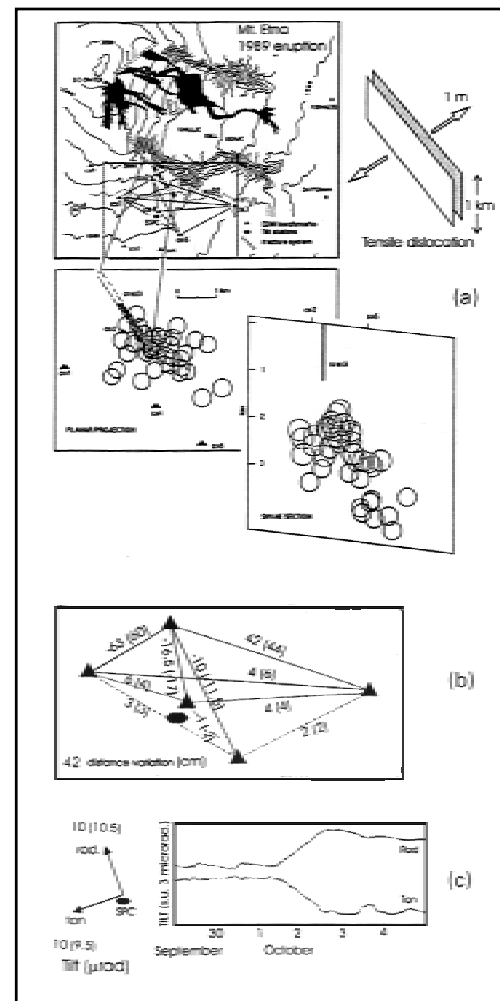
図 1.2-15

(a) 平面図は、噴火によって形成された割れ目火口の位置と溶岩流の位置。断面は、小規模地震の震源位置。右側は、観測データから推定されたマグマの貫入モデル

(b) 光波測距による地表部の変位量

(c) 傾斜計の観測データ

(観測位置は、(a) 中の SPC 地点) (Bonaccorso, 2001)



○観測計器の変動状況

1988-89年初頭にかけて南山腹を中心とする北北西-南南東方向の領域で重力の増加が観測された(図1.2-16)。

傾斜変動観測から噴火7-8ヶ月前の1989年初頭には山頂側の膨張が始まっていた。また噴火数ヶ月前から山体直下の地震発生領域が浅くなっていた。

噴火開始後は山頂の南側山腹での光波測距によって、割れ目火口を挟む測線で拡大、火口の外側では収縮が計測された(図1.2-15-(b))。同じく山頂の南側山腹に設置されていた傾斜計は、噴火の初期には変化が現われていなかったが、南側の割れ目火口の形成が終わりに近づいた10/2頃から山頂方向が膨張する変動が見られた(図1.2-15-(c))。南側の割れ目火口の末端部で多発した小規模な地震は、マグマ貫入による岩脈の拡大が停止したことによる圧力増加で発生したものと考えられる(図1.2-17)。1981年の噴火と違い、山麓部での水平変位が少なかったことから、この時の岩脈は地表付近にのみ形成されたと考えられる(深さ約1km, 開口量約1m)(図1.2-18)。

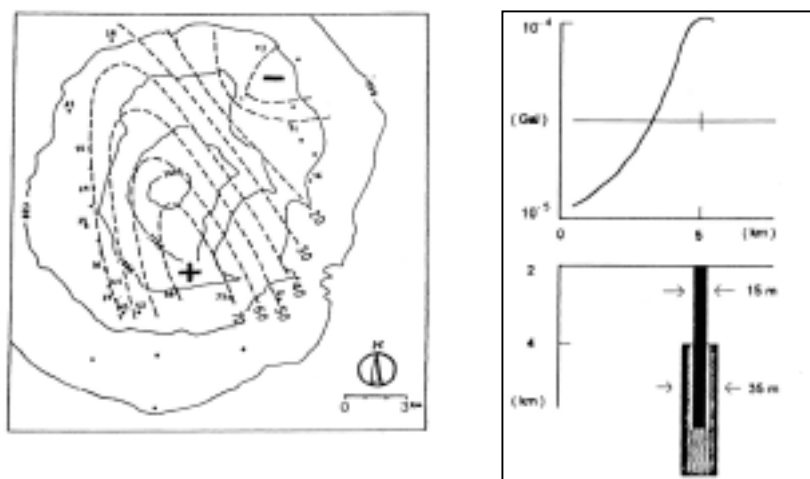


図 1.2-16 1988 年-1989 年初頭にかけての重力変化。(a)重力異常の分布 (b)WSW-ENE 方向の部分断面と岩脈モデル。マグマの密度を 2800kg/m³, 母岩との密度差 400kg/m³ とすると、計算される岩脈の頂部の深さ 2km, 厚さ 15m あるいは深さ 4km, 厚さ 35m である。モデル岩脈の頂部は 9 月 30 日から 10 月 3 日までの群発地震の領域に重なる。(Ferrucci et. al,1993)

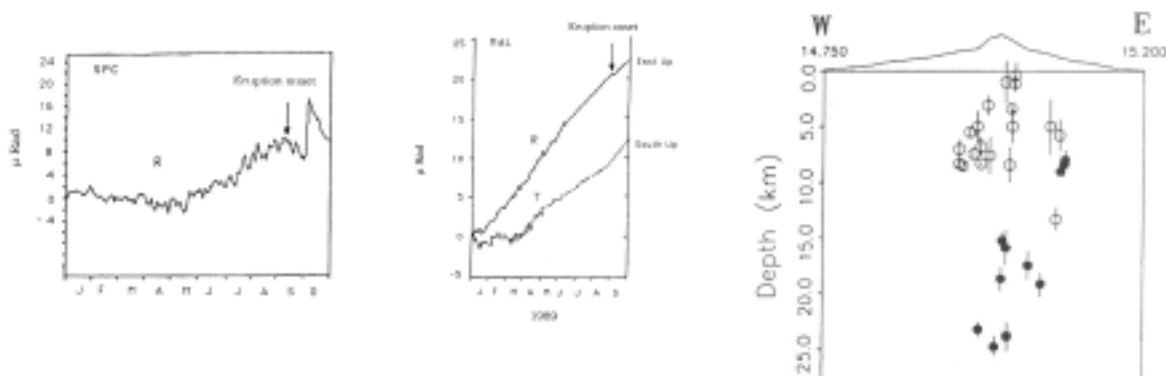


図1.2-17 (左図) 2-16 図の MAL (北山腹) および SPC (南山腹) 観測点の傾斜計の記録。矢印は噴火の開始時点を表わす。

(右図) 1989 年噴火の 3 ヶ月以内の震源 (白丸) はそれまでの 2 年間の震源 (黒丸) よりも浅い。(Ferrucci et. al,1993)

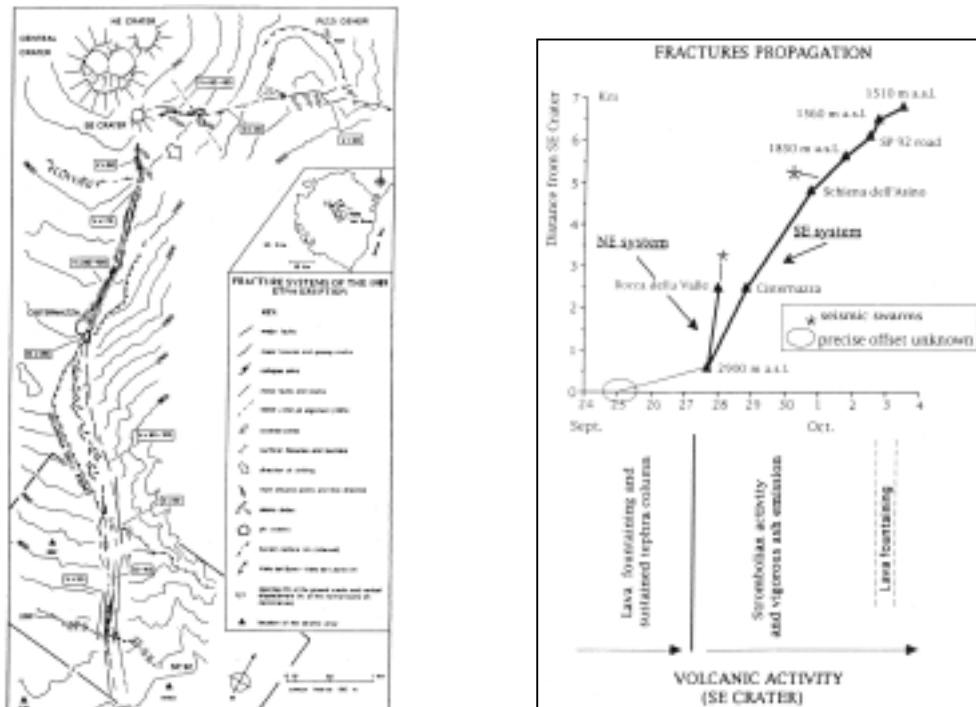


図1.2-18 左 噴火期間に発生し発達した割れ目の分布。南東火口付近から発達した。
 右 二つの断層帯の伝播速度と並行する南東火口の噴火活動。活発にマグマを噴出したNE 割れ目は伝播が早い、SE 割れ目では遅く、伸びるに従い伝播速度が低下した。伝播中はSE 火口では火山灰を噴出する活動が続いた。(Ferrucci et. al,1993)

○噴火のモデル

重力変化から 1988 年から南山腹の比較的深い所に北西-南東走向の岩脈が貫入した。これにより東側の山体はより不安定になった。89 年になり中央火道のマグマ柱の圧力が増大し、東側山体を東へ押しやるように岩脈が北東と南西方向に派生した。この間マグマ柱の頭位は下がったが、岩脈が進展しなくなると再び頭位は上昇した。

■1991-93 年噴火 (1991.10-1993.3) (図 1.2-19)

◎主な特徴

- ・過去 3 世紀の中で、最大の噴火である。
- ・1989 年噴火で南側に形成された割れ目火口付近で活動が起こった。
- ・472 日間にわたって噴火が続き、 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ の溶岩流が流出した。噴出率は最大で $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 、平均で $5 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。
- ・光波測距、GPS、傾斜計に明瞭な変化が見られた。

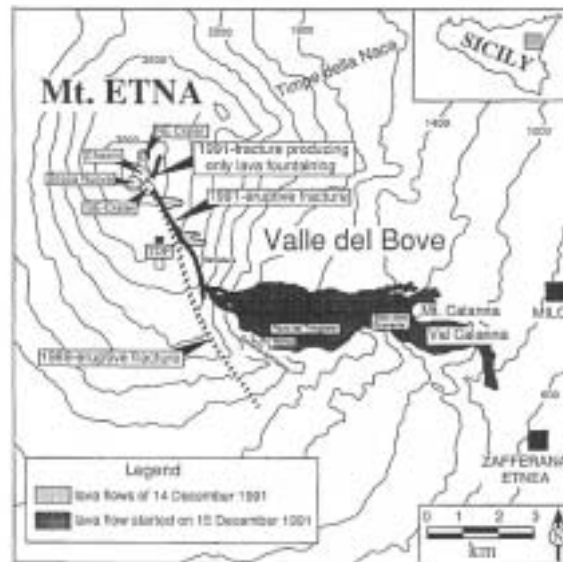


図 1.2-19

1991-93 年噴火の噴火割れ目、溶岩流の分布。灰色は 12 月 14 日の溶岩流。黒色は 12 月 15 日の溶岩流(Patane et. al,1996)

○観測計器の変動状況

噴火に先立ち火山性微動の振幅が増大していた。また数週間前の 11/26 から山体の広い範囲で地震活動が活発になっていた (図 1.2-20)。

噴火活動に呼応して傾斜計に変動が見られた。噴火開始直後の地震メカニズム解は伸張を示しているが、溶岩噴出の停滞と同時期に圧縮を示す期間があり、山体内の正断層形成により一時的に深部からのマグマの上昇が阻害されたと推定されている (図 1.2-21)。

光波測距や GPS の観測データ、さらに合成開口レーダーの計測結果から、山体の広い範囲で収縮が起こったことが明らかになっている。これらの観測データは、図 1.2-22 に示したように、山頂直下の 8-9km 付近で脱圧が起きたというモデルでうまく説明できる (図 1.2-23 における括弧内の数値は、このモデルから求めた変動量である)。

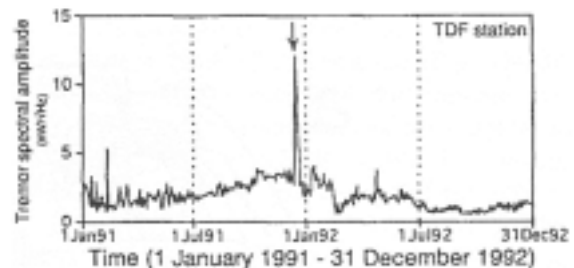


図 1.2-20

南東火口南側の TDF 点(図 1.2-19 参照)における火山性微動の振幅の変化 (Patane et. al,1996)

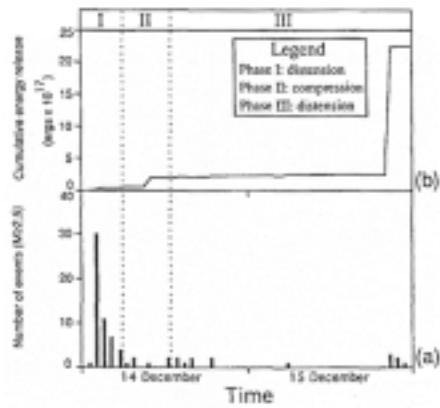


図 1.2-21 12 月 14-15 日の M2.5 以上の地震回数とエネルギー放出量 (左), 地震メカニズム解の水平成分 (中央). Phase I, IIIは伸張的, IIは圧縮的. (Patane et. al,1996)

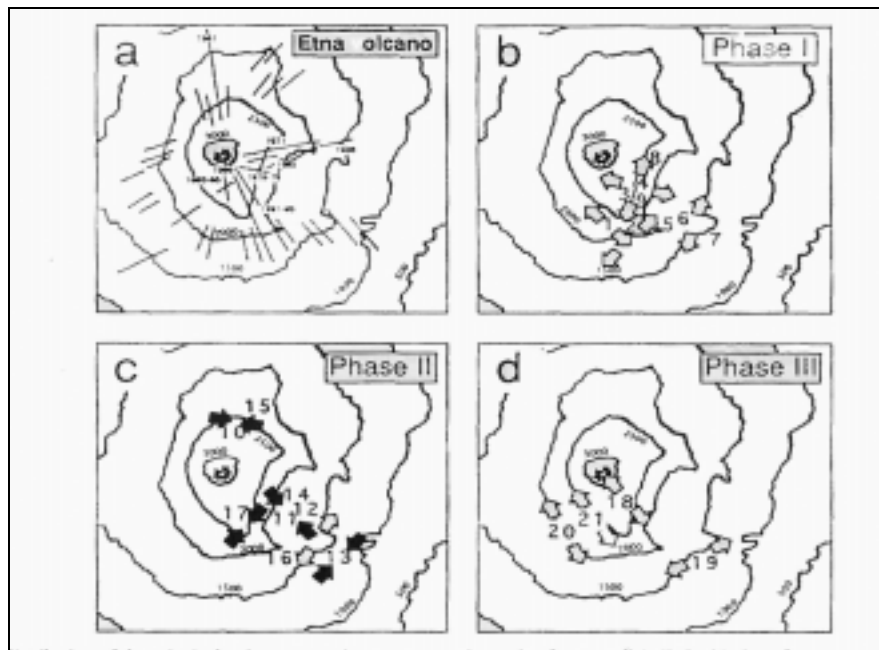


図 1.2-22 1991-93 年噴火に伴う観測データから推定された噴火メカニズム (減圧源) (Patane et. al,1996)

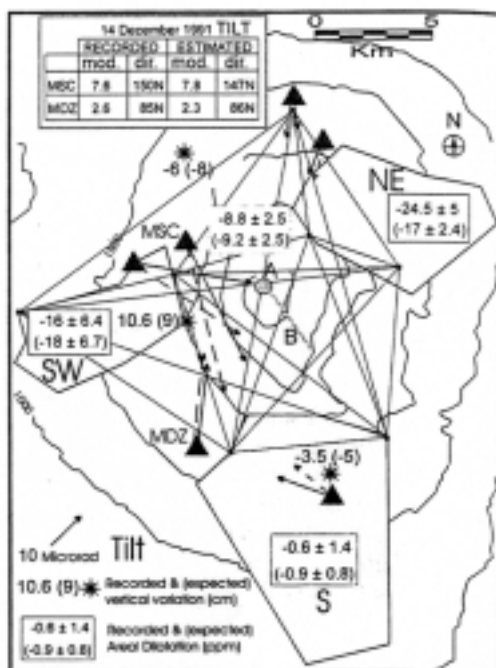


図 1.2-23 1991-93 年噴火に伴う観測計器の変動量。黒三角から延びた実線の矢印は、傾斜計のデータ、星印に示されているデータは、GPS の観測データによる垂直変位量である。四角で囲まれたデータは、光波測距に基づいて計算された歪み量である (Bonaccorso,2001)

○1979-1999 年までの平面歪みの推移

光波測距データに基づいた平面的な歪み率の推移を見ると、それぞれの噴火によって歪み
が変化しているが、特に1991-93年の噴火活動で、歪み率が大きく変化している(図1.2-24)。

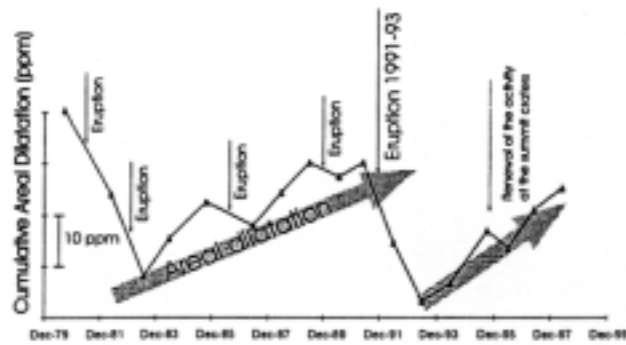


図1.2-24 歪み率の変化 (Bonaccorso,2001)

9) 1971 年以降、山頂火口での噴火を伴わなかった噴火の概要

■1974 年 1 月 30 日～3 月 29 日 (図 1.2-25)

1843 年以来、およそ 130 年ぶりに西麓（標高 1670m-1650m 付近）で起こった噴火である。

最初の活動は、山頂から約 6km 離れた標高 1670m の地点で始まった。単一火口からの噴火で、240 万 m^3 の溶岩と 200 万 m^3 の火砕物が噴出した。この時の噴出レートは、1.63 m^3/s であった。次の活動は、3 月 11 日～29

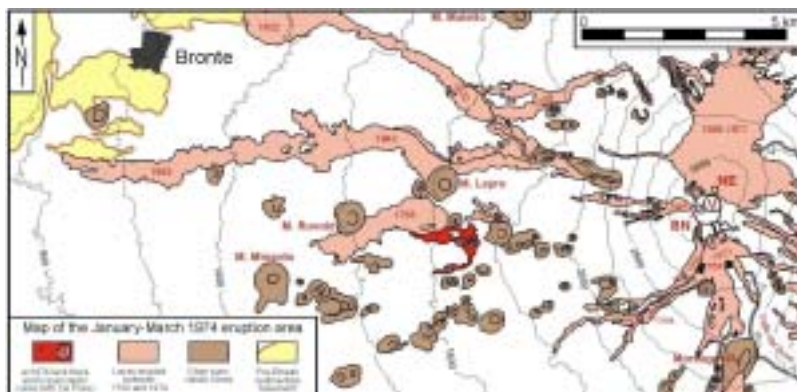


図 1.2-25 1974 年 1 月噴火による溶岩の分布
(<http://boris.vulcanoetna.com/ETNA-1974.html>)

日にかけて起こり、最初の活動でできた火口から、西に 200m ほど離れた標高 1650m 付近に新たな噴火口が形成された。活発なストロンボリ式噴火が続いたが、同時に溶岩も流出したため、火口付近には西側が開いた馬蹄形の火砕丘が形成された。このときの溶岩流は、標高 1400m 付近まで約 1.3km 流下した。2 回目の活動で流出した溶岩流は 210 万 m^3 で、同時に 110 万 m^3 の火砕物も噴出した。この時の噴出レートは、1.34 m^3/s であった。

■1981 年 3 月 17 日～3 月 23 日 (図 1.2-26)

多数の前兆地震の後、1981 年 3 月 17 日に山頂北側斜面の標高 2625m-2500m 付近で、割れ目火口を形成しながら噴火が開始した。噴火の進行に伴って割れ目火口は北北西方向に拡大し、標高 1800m 付近からは多量の溶岩が流出した。溶岩は、時速 1km 以上という速さで北に向かって流れ、Randazzo の町に近づいた。翌 3 月 18 日朝には、より低い場所にまで割れ目火口が拡大し、そこに小さな火砕丘を形成した。18 日の昼前には、標高 1400m 付近が溶岩の主な流出地点となった。午後には、割れ目火口が標高 1250m-1150m 付近にまで達し、ここからも小規模な溶岩が流出した。この頃になると噴火も次第に弱くなり、その後は 3 月 23 日までストロンボリ式噴火を続けて、小さな火砕丘を形成した。この活動では、1800 万 m^3 の溶岩と 100 万 m^3 の火砕物が噴出したが、大部分は最初の 2 日間で生産されたものである。

この活動では、ピーク時の噴出レートが 200-300 m^3/s と例外的に高いのが特徴である（活動全体での噴出レートは、35-55 m^3/s ）。

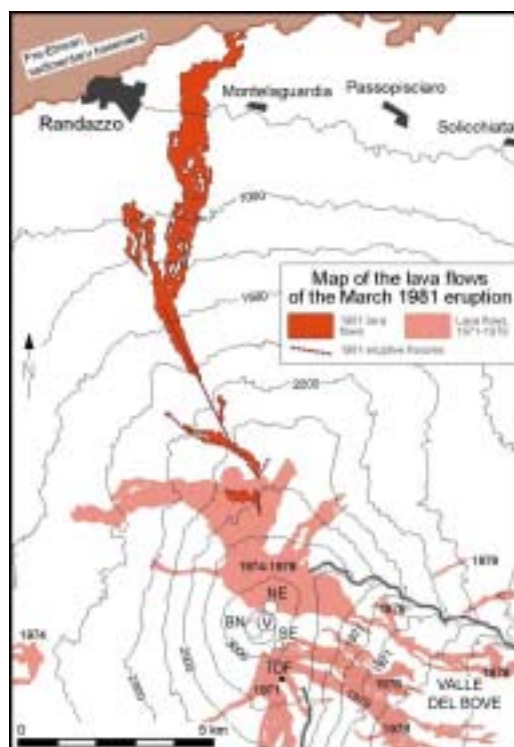


図 1.2-26 1981 年 3 月噴火による溶岩の分布
(<http://boris.vulcanoetna.com/ETNA-1974.html>)

■1991 年 12 月 14 日～1993 年 3 月 30 日 (図 1.2-27)

多数の微小地震を伴って 1991 年 12 月 14 日に、VALLE DEL BOVE 西壁上部の標高 3000m-2700m 付近と、山頂の南東火口の北側斜面に短い割れ目火口が形成され、噴火が開始した。この活動は小規模で、各火口から数時間にわたって溶岩泉と溶岩を流出した程度であった。その後、VALLE DEL BOVE の南西壁にあたる標高 2340m-2210m 付近に火口が形成され、ここで活発なストロンボリ式噴火と溶岩の流出が起こった。溶岩は、VALLE DEL BOVE の底に拡がりながら東に向かって流下し、1991 年の終わりには、火口から 5km 離れた標高 1000m 付近にまで達した。翌 1992 年の 1 月中旬には、噴火の初期に形成された割れ目火口での活動は停止した。VALLE DEL BOVE での活動は、その後 1993 年の 3 月まで 1 年以上にわたって継続した。473 日にもおよぶ山腹噴火は、記録が残っているエトナの噴火の中でも最長である。この噴火には、合計 2 億 3500 万 m^3 の溶岩が流出したが、この量は 1669 年以降最大である。溶岩の噴出レートは、ピーク時には $30m^3/s$ に達したものの、活動全体では $5-6m^3/s$ 程度であった。なお、この噴火によって山頂火口での陥没が発生した。

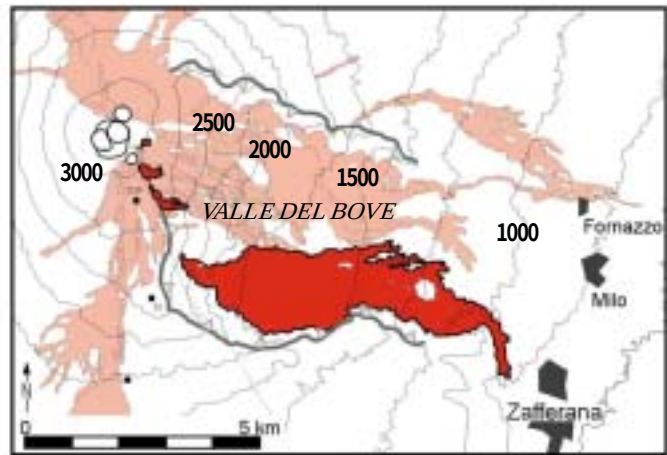


図 1.2-27 1991 年～1993 年噴火による溶岩の分布
(<http://boris.vulcanoetna.com/ETNA-1986-87.html>)

■2002 年 10 月 27 日～2003 年 1 月下旬
(図 1.2-28)

前兆現象が数時間前から始まった地震のみという状況の中、2002 年 10 月 27 日に山頂を挟んで、南側(標高 2750m 付近)と北東側(標高 2500m-1850m)の 2 ヶ所の割れ目火口から噴火が開始した。南側火口からの噴火は爆発的で、多量のテフラを周辺に降下させた。2002 年 11 月中旬までに、およそ 1000 万 m^3 の溶岩と 2000 万 m^3 の火砕物を放出したが、この 2000 万 m^3 という火砕物の量は、ここ 1669 年以降最大である。今回の噴火は、2003 年の 1 月下旬に終息したが、南側に出来た火口周辺には、比高 150m 以上の新しい火砕丘が形成された。

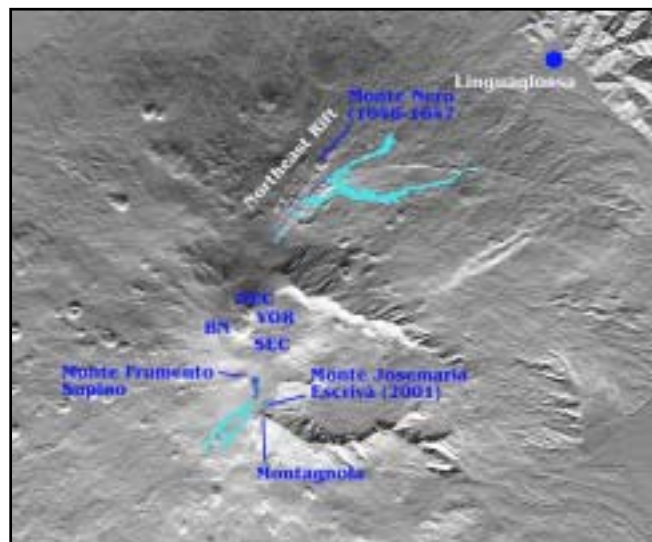


図 1.2-28 2002 年 10 月からの噴火による溶岩の分布
(初期)

1. 3 クリチョフスコイ火山 カムチャッカ(図1.3-1)

クリチョフスコイ火山はカムチャッカ半島中部に位置する、標高 4750m の火山である。毎年のように噴火を繰り返している活動的な火山である。

1) 噴火事例の紹介

■1983 年山腹噴火

1980 年山腹噴火の後は山頂で穏やかなブルカノ式ないしストロンボリ式噴火を定期的に繰り返してきた。

発作的爆発（山頂で時折起こる爆発的噴火、山頂火口内の火砕丘が破壊される、最後は 1945）活動間の噴火で直径 400m の火砕丘ができていた。

1982 年 10-11 月には、穏やかな噴気活動がみられ、1982 年 12 月 20-21 日に爆発が始まり、断続的な火山性微動が観測された。1982 年 12 月 22 日から 1983 年 2 月 14 日まで火口上に火映現象が見られ、ブルカノ式ないしストロンボリ式噴火を起こしていた。爆発音（鳴動）は 15km 先まで聞こえた。火山灰噴煙は 300-500m 上昇し、時に 1000m に達した。周期 0.5-0.8sec 火山性微動は 15m 離れた観測点で時折振幅が $1\mu\text{m}$ に達した。

1982 年 12 月 25 日の航空観測では火砕丘の中央に直径 250m 深さ 100-200m の火口が生じており、中央から火山灰を 1-3 分おきに静かに 200-300m 程吹き上げていた。この火口は 12 月 20-25 日の爆発で撓む（※sagging）か噴出物の累積で生じたように見えた。

1983 年 2 月 15 日以降、山頂火口の活動は活発になった。火山灰噴煙は 3km まで上昇し、火山弾は 600m まで上昇した。爆発地震が増え連続微動の振幅は $1.5\mu\text{m}$ になった。2 月 28 日 4:07(GMT)に $K=8.6$ ($K=\log E$ J) の地震が発生し、15km 離れたところで震度 3 を記録した。

この地震の後、火山性微動の振幅と噴火の強度は急減した。火山灰噴煙の放出のみとなりそれもすぐに終息した。

3 月 11 日の航空観測では穏やかな噴気活動が認められた。火砕丘は雪に被われ、数日間には噴火が無かったと思われた。しかし悪天候のため正確な終了時刻は不明である。

○群発地震

群発地震活動は 2 月 28 日 4:07 の地震で始まった。この震源は山頂から北東の 70° の方向に 3km、深さ 10km であった。引き続き 3 月 1 日から 6 日まで $K=6$ 以上 9.8 までの地震が 18 回生じた。この期間に小地震は 400 回が観測された。多くは小さいイベントであったため少数のみが震源決定された。カムチャッカ走時曲線で計算された震源は火口から北東 1-7km、深さは海水準以上から 10km の範囲に分布していた。本地域の走時曲線で決定した 2 月 28 日から 3 月 2 日の 7 つの震央を図 1.3-2 に示す。3 月 1-2 日のすべての地震は海面上上の火山

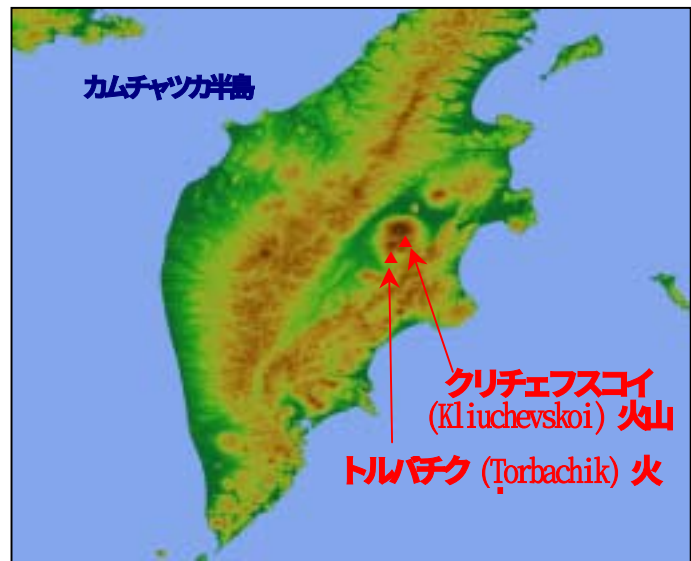


図1.3-1 クリチョフスコイ火山の位置

体内で生じていた。3月3-4日はこの地域だけでなく山頂火口周辺でも6個が震源決定された。

地震活動は5つのフェーズに区別される(図1.3-3)。

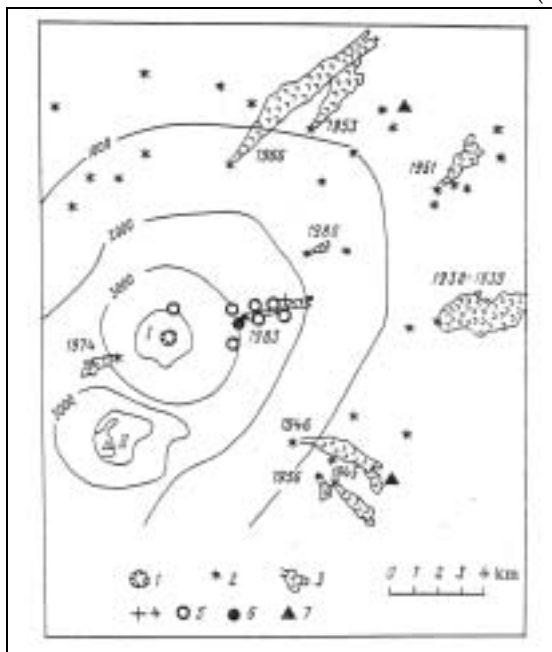


図1.3-2 クリチョフスコイ火山の寄生火山の火口と1983年3月の噴火による地震震央の位置 I クリチョフスコイ火山、IIカメン火山、1 クリチョフスコイ火山の中央火口、2,3 寄生火口とそれらの溶岩流(番号は噴火年を示す)、4 噴火予測場所、5 火山性地震の震央、6 1983年2月28日から3月2日の地震群の中心、7 観測所(Tokarev,1987)

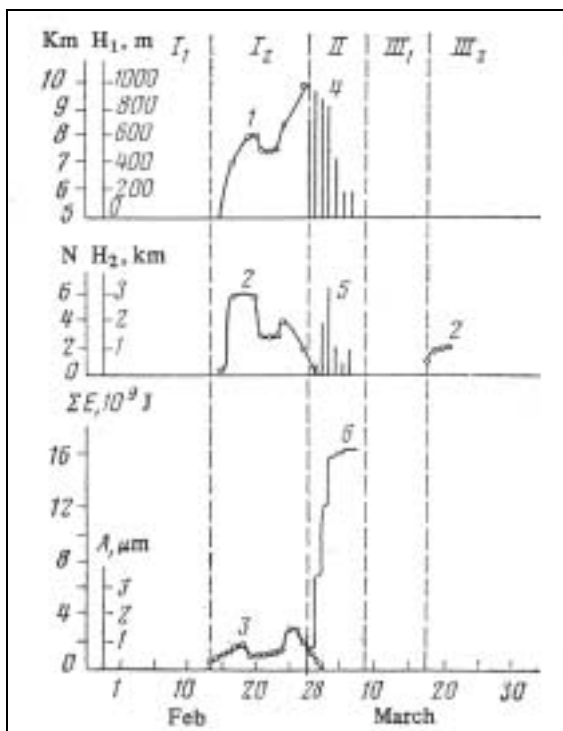


図1.3-3
クリチョフスコイ火山1983年1月から3月の状態と地震活動
山頂火口：1-火山弾到達高度 H1 2-火山灰噴煙の最大到達高度 H2 3-火山性微動の平均振幅 A (12km 離れた観測点)
山腹火口：4-最大地震エネルギーKm 5-K≥6.0の地震の日回数 N 6-放出地震エネルギーの累積曲線 ΣE (Tokarev,1987)

Phase 1(2月1-14日)

山頂火口の穏やかな噴気活動、低周波の火山性微動(12km離れた観測点で周期0.5-1.0sec 振幅0.2μm以下)

Phase 2(2月14-28日)

山頂火口の活動度の増加、火山性微動の振幅増大(0.2-1.5μm)

Phase 3(2月28日-3月8日)

”噴火の準備”群発地震活動の開始。同時に山頂火口と火山性微動の活動低下(2月28日)、終息(3月2日)。3月1-2日は頻度とエネルギー放出量は増大し3月3日9時に急速に沈静化する。最大地震($K=9.8$)は群発開始後36時間で発生した。 $K=6$ 以上の地震は3月6日20時13分まで計19回生じた。トータルのエネルギーは $1.6 \times 10^6 \text{J}$ 。2月27日-3月8日までの群発地震の平均的エネルギー放出量は $2.4 \times 10^9 \text{J/日} = 3 \times 10^4 \text{watts}$ であった。

Phase 4(3月8日-3月17日)

山腹での噴火、山頂火口の静穏期間

3月8日に山頂火口から3.5km、海拔3000mの山腹に火口が生じ爆発を伴わずに溶岩流が流出しはじめた。火口は氷河分布域に開いたため溶岩流は氷河を通過し水蒸気爆発を伴った。3月11日までに溶岩流は1000m流下し先端から泥流が数km峡谷にそって流下した。

山頂では噴気活動のみ認められた。 $0.2 \mu\text{m}$ 以上の平均振幅の微動は観測されず、これはストロンボリ式ストロンボリ式噴火が起こっていないことを示している。

Phase 5(3月17日以降)

山腹火口での静かな溶岩流出と山頂火口の穏やかな噴火活動

溶岩流は火口から3kmまで達し、前進は止まったが幅と厚みを増した。山頂火口では火山灰を含んだ噴煙が火口上、1kmまで上昇した。

■1984 年山頂噴火

1983 年の Predskazannyi 噴火以来、山頂火口は噴気活動を除いて静穏だった。

1984 年 3 月 10 日から連続的な火山性微動（14km はなれた観測点で周期 0.4-0.5sec、振幅 0.2 μm ）が発生した。水蒸気噴煙および灰を含む噴煙が数百m上昇した。3 月 12 日から夜間に火映現象がみられた。噴火の勢いはしだいに強くなった。4 月 10 日には火山性微動の振幅は 4-5 μm になった。

4 月 10 日から 5 月 15 日にかけて激しい爆発的噴火を繰り返した。火山弾が 300-1000m 噴き上がり爆発音は 10-30km 離れたところまで聞こえた。明瞭な火映現象がみられ赤熱した火山弾が飛び交った。10-30km 離れた観測点で爆発地震が 1 日に 200-1200 回観測された。

5 月 22 日から最も低い火口縁となっている北斜面の谷に溶岩流が流下し始めた。5 月 31 日には 1.8km 流下し、Erman 氷河に到達、さらにラハールが 4km 流下した。

溶岩の流出と平行して爆発が続いた。火山弾は 400-800m 噴き上がり爆発音はしばしば 10-14km 離れた Apakhonchich や Podkova で聞こえた。32km 離れた Klyuchi でさえ聞こえた。火砕丘が成長ししだいに山頂火口を埋めていった。6 月 25 日には溶岩流が西斜面と東斜面の谷にも流れるようになった。

観測終了（※6 月 25 日？ 噴火の終了？他文献では断続的に 1987 まで継続したらしい）前の数日間には火山弾と火山灰を 2-3km 吹き上げ、火山性微動の振幅も増大した。14-32km 離れた観測点に設置された微気圧計は 1 日に 10000-15000 回の爆発を記録した。

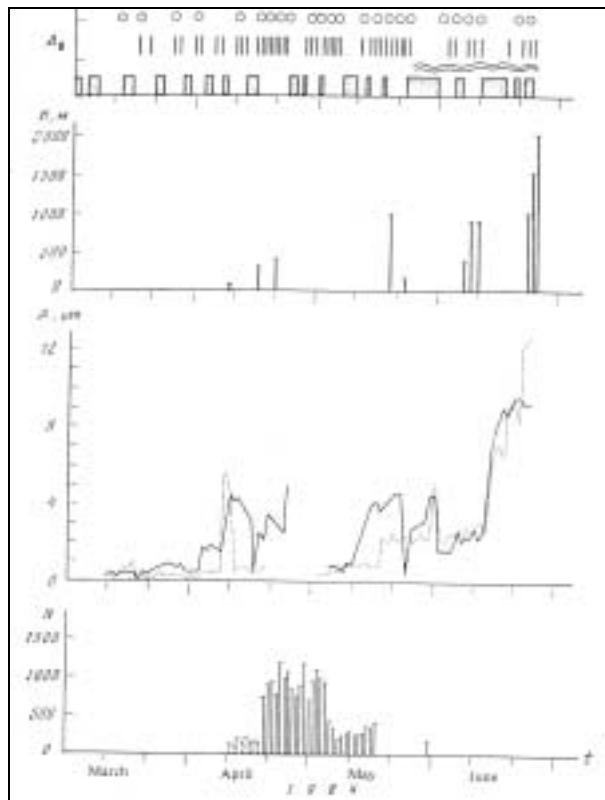


図 1.3-4 1984 年 3 月 1 日から 6 月 25 日までのクリチヨフスコイ山頂火口の活動

Av(註 AB) - colcanic 噴煙活動? 1-火映現象 2-火山弾や火山灰の放出活動 3-溶岩流流出 4-目視不可期間

H-火山灰噴煙や火山弾の高度

A-火山性微動の振幅 (5-Apakhonchich, 6-Podkova 観測点)

N-爆発地震の日別発生回数 (3月-4月の間のみ、破線は Klyuchi, 実線は Apakhonchich 観測点) (Tokarev, 1988)

1.4 マウナロア火山 ハワイ(図1.4- 1)

マウナロアは、標高 4169m でマウナケア火山に次ぐ高さである。1800 年代を通じてたびたび噴火した。マウナロア火山では 1832 年以來 32 回の噴火をしているが、そのほとんどは標高 3,000m 以上の高さから活動を開始している。山頂噴火だけで終わった噴火は 15 回で、残りの 17 の噴火は側噴火(割れ目噴火)を伴った。側噴火にも空間的特徴があり、北西麓へ 2 回、南西の地割れ地帯で 7 回、北東の地割れ地帯で 8 回噴火している。



図 1.4-1 マウナロア火山の位置

1975 年および 1984 年の噴火では、1942 年の割れ目噴火のわずかな知見を元に測地学に基づく様々な観察や計測・解析によって、噴火プロセスに関する多くの知見が得られた。以下に代表的観測結果の事例を示す。



図 1.4-2 1975 年 7 月 5 - 6 日噴火の火口と溶岩分布 (Lockwood et.al,1987)

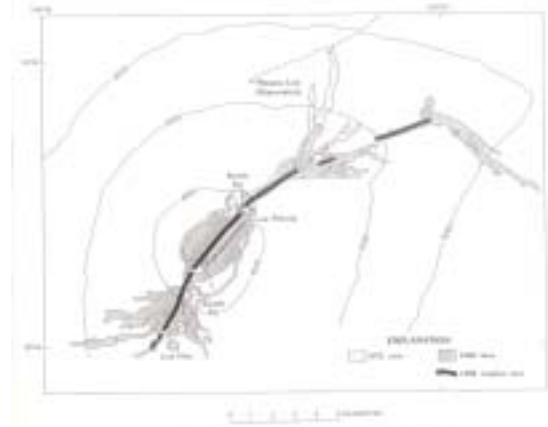
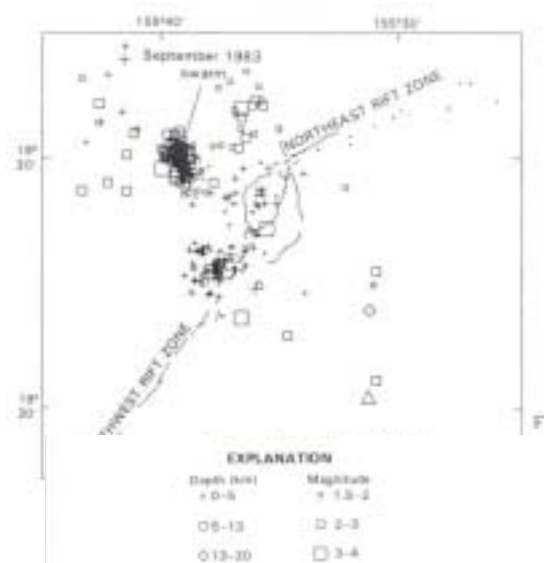


図 1.4-3 1984 年 3 月 25 日噴火の火口と溶岩分布 (Lockwood et.al,1987)



図 1.4-4(左) 1975 年 7 月 1 - 31 日の地震記録
カルデラ付近の地震は噴火前に発生し、5 日以降の地震は東側で発生していた
図 1.4-5(右) 1984 年噴火の 16 ヶ月前の山頂付近での地震記録 (Lockwood et.al,1987)



1983 年群発地震

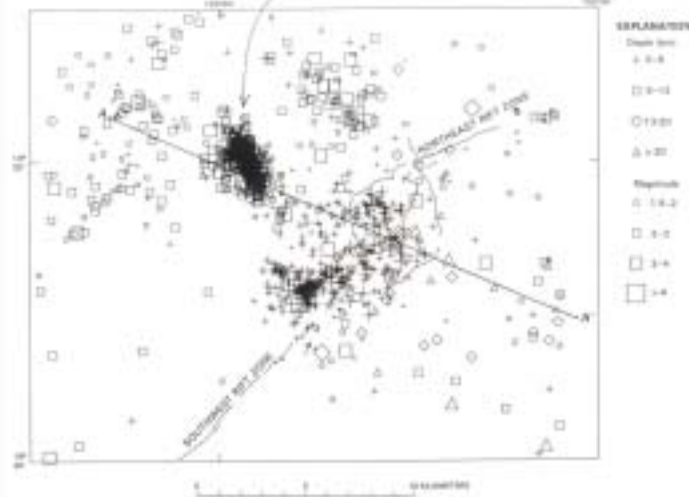


図 1.4-6(上) 1961 年 1 月-1984 年 12 月の間のマウナロア山頂部における地震記録 (平面) 図中の A-A' 断面が右図 (図 1.4-7) (Lockwood et.al,1987)
震源は概ね、面的に 1.5km 以上の範囲、深度方向に 2km 以内の範囲にある。

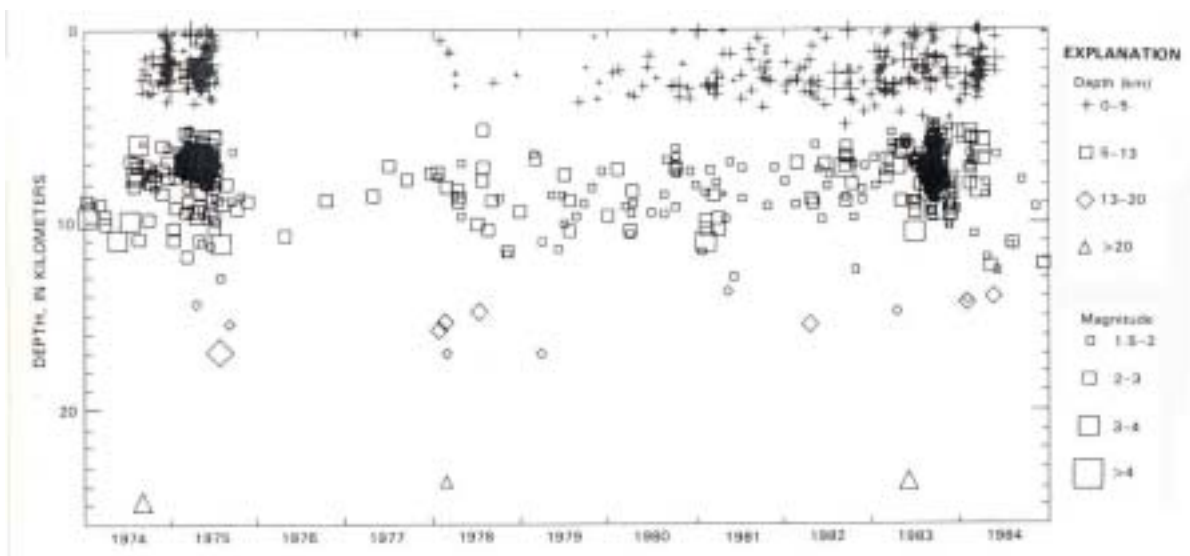
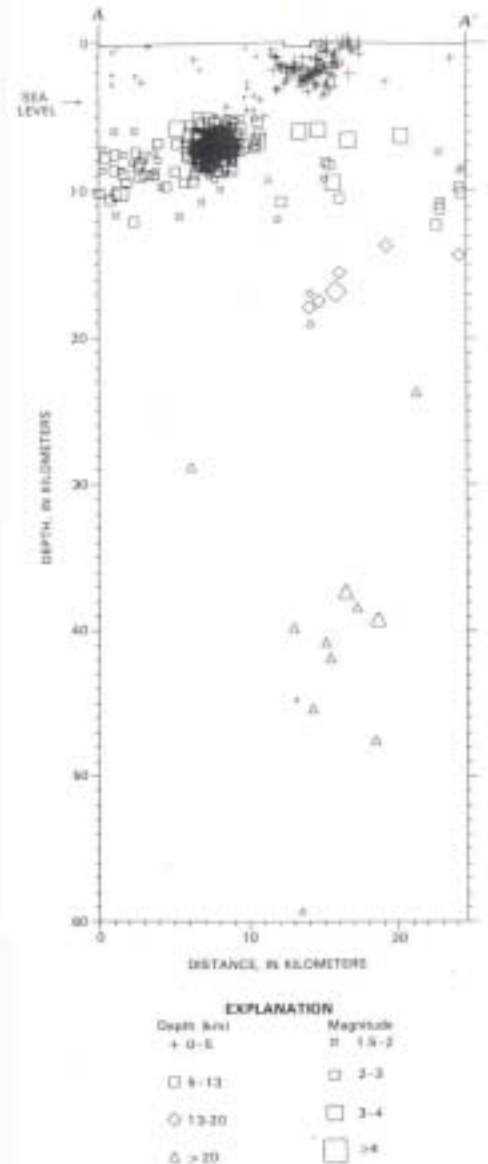


図 1.4-8 1974 年 1 月-1984 年 12 月の間の山頂部付近の震源深度の経時変化 (Lockwood et.al,1987)

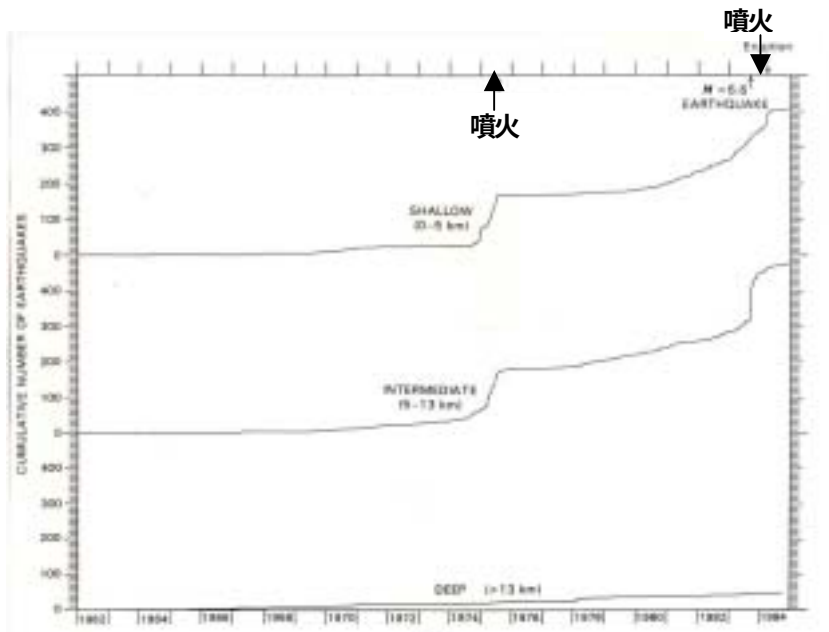


図 1.4-9 1962 年 1 月-1984 年 12 月の間の浅部地震と深層地震の発生数の累積グラフ (Lockwood et.al,1987)

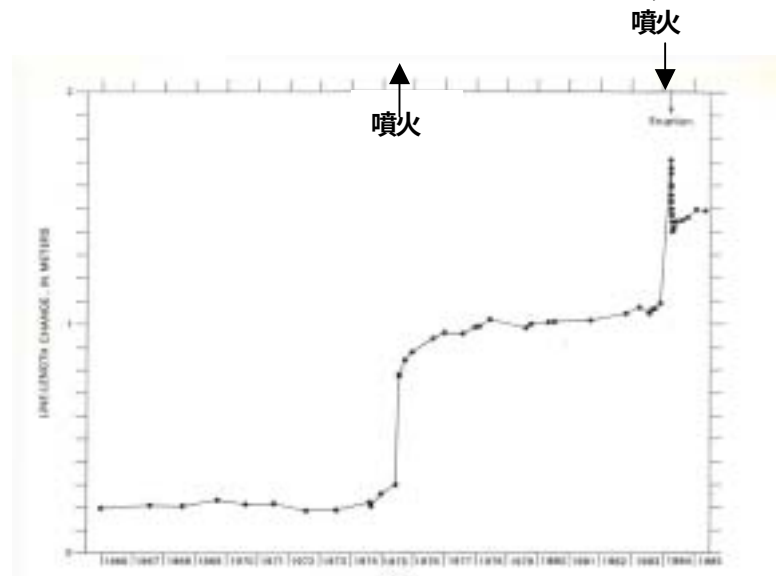
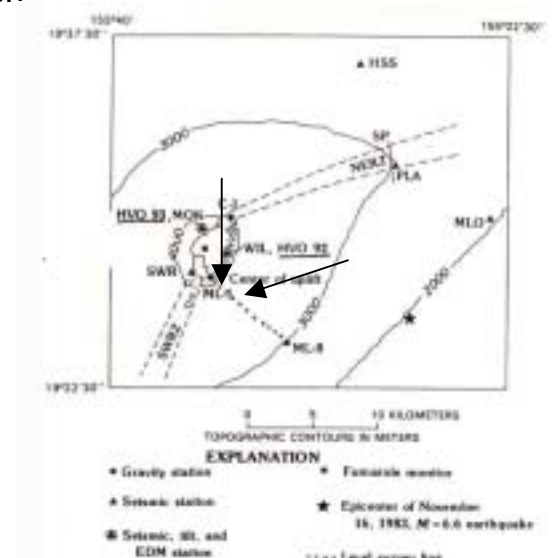


図 1.4-10 1965 年 12 月-1984 年 5 月の間の三角測量による火口付近の測線長の経時変化 (Lockwood et.al,1987)

図 1.4-11 測定点位置 (Lockwood et.al,1987)



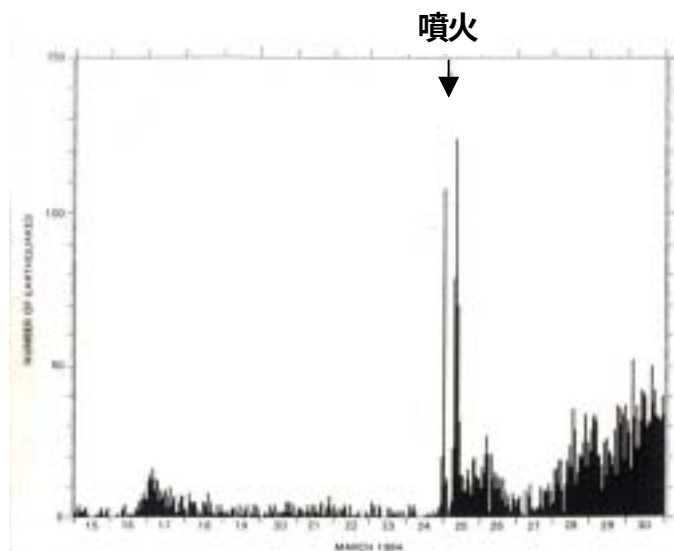


図 1.4-12 1984 年 3 月の時間あたり地震発生回数の経時変化
噴火の日の朝は微動が多すぎてとれていない
(Lockwood et.al,1987)

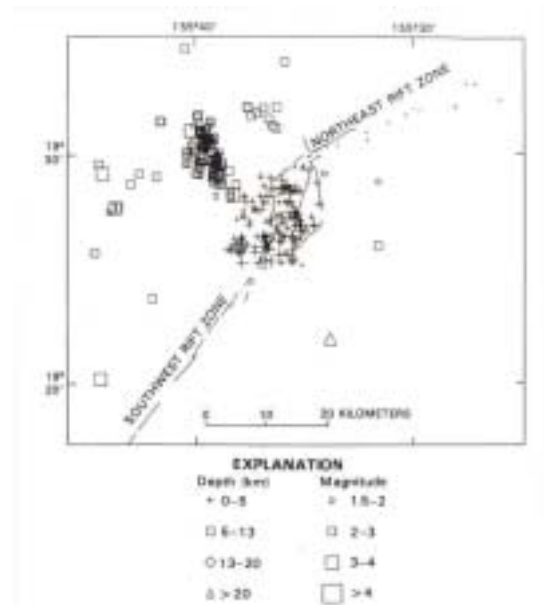


図 1.4-13 1975 年噴火の噴火前 18 ヶ月間の地震分布 (Lockwood et.al,1987)

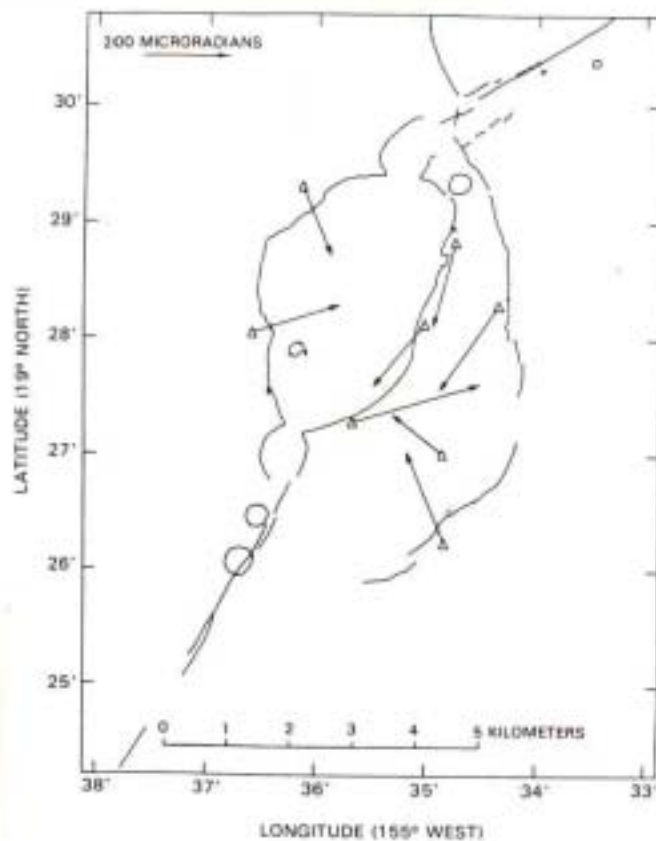


図 1.4-14 1984 年噴火前後の山頂付近の傾斜変動量
(Lockwood et.al,1985)

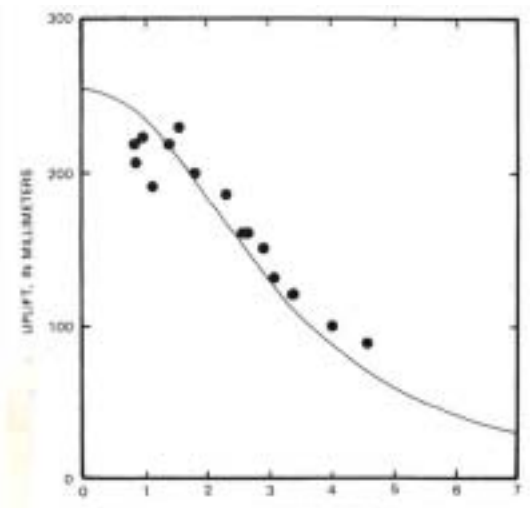


図 1.4-15 山頂付近の 1977 年-1981 年間の隆起量と中央火口からの距離との関係
(茂木モデルの検証) (Lockwood et.al,1987)

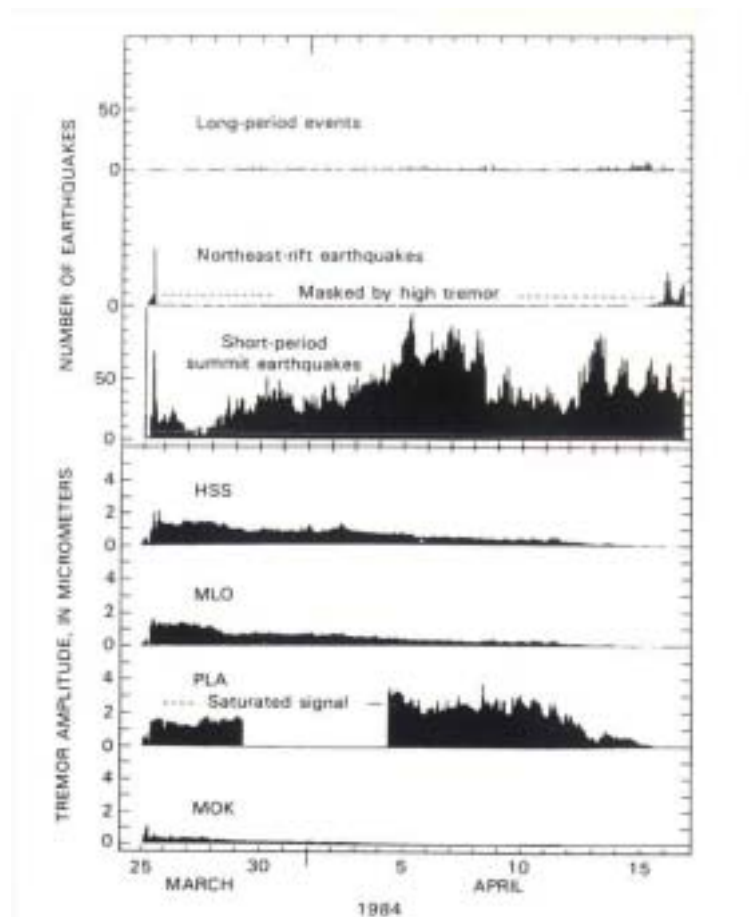


図 1.4-16 1984 年噴火後の、火口に近い観測機器(PL0)と火口から離れた観測機器(HSS、MLO)における振動観測結果によるピークの違い
(Lockwood et.al,1985)

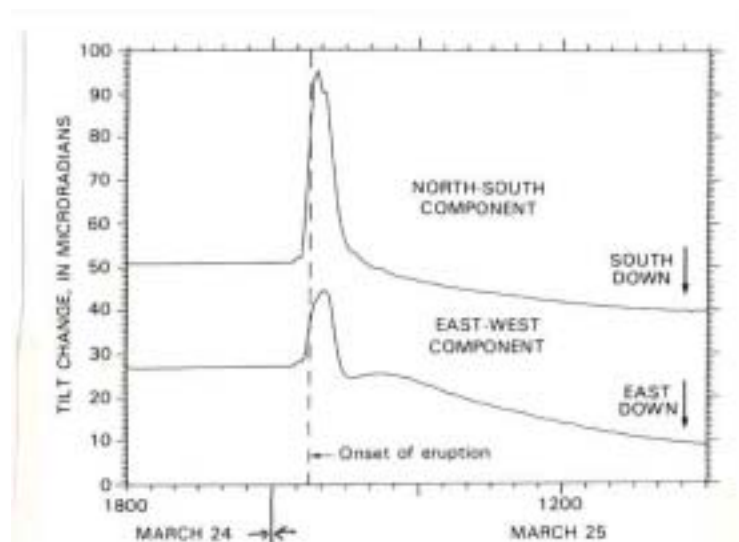


図 1.4-17 1984 年噴火開始前後の傾斜変動の経時変化
(Lockwood et.al,1987)

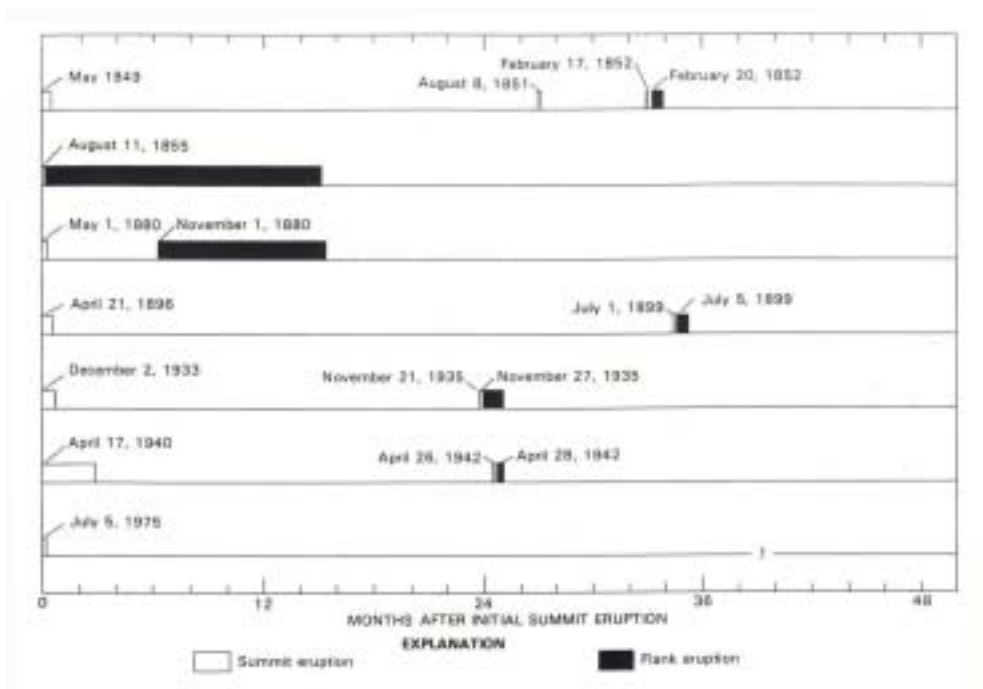


図 1.4-18 山頂噴火 (□) と割れ目噴火 (■) の発生時期の違い

(Lockwood et.al,1987)

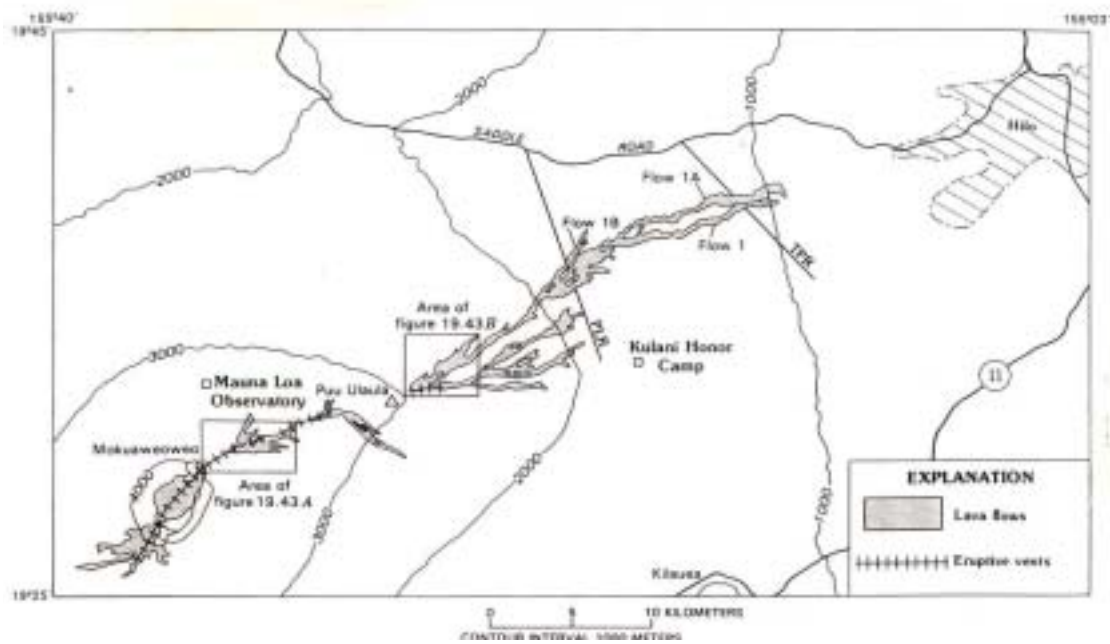


図 1.4-19 1984 年噴火の火口および溶岩分布の全容 (Lockwood et.al,1987)

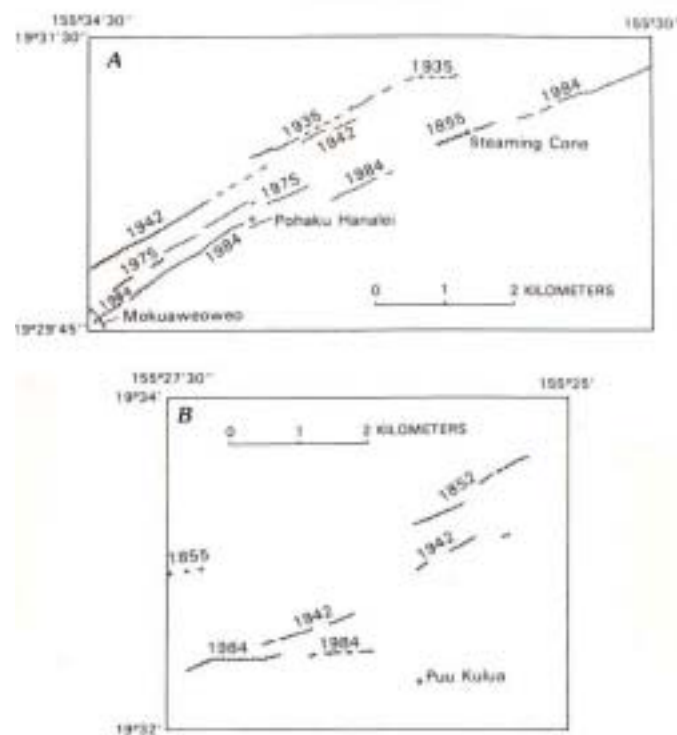


図 1.4-20 19 図の枠囲み範囲の拡大。2箇所の割れ目集中地域
(Lockwood et.al,1987)

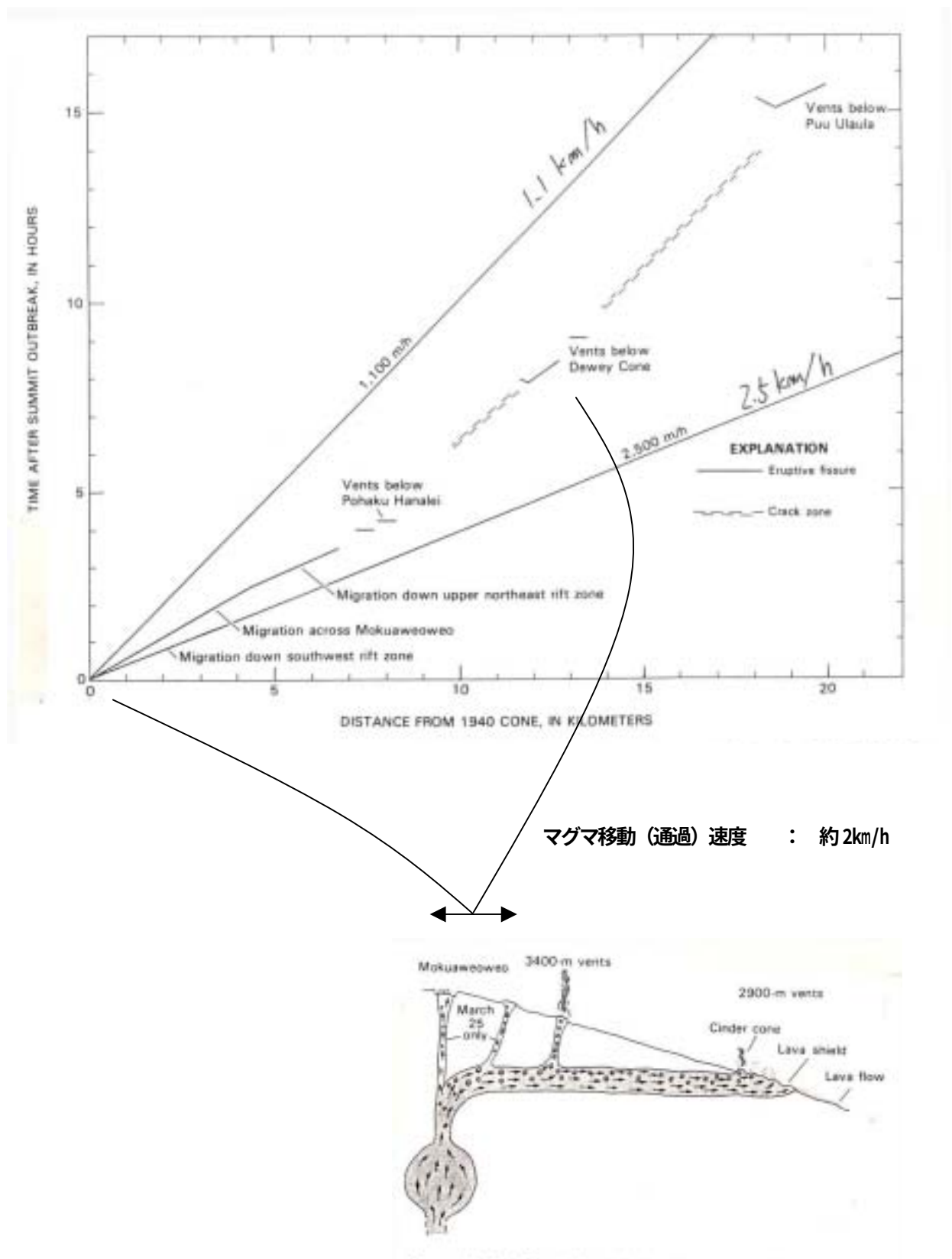


図1.4-21 マグマ移動速度 (Lockwood et.al,1987)

1. 5 スフリエール火山 セントビンセント島 (図1.5-1)

セントビンセント島は、南アメリカ大陸北方の西インド諸島を構成する島の1つで、島の北部に標高1220mのスフリエール火山が存在する。

スフリエール火山は、1718、1812、1902、1971-72、1979年に噴火が起きており、このうち1902年の噴火では1600名の死者が出ている。

1) 噴火事例の紹介

■1971-1972年噴火

1971年からの噴火活動で、これまで山頂に存在していた最大直径1.2kmの火口湖中に、玄武岩質安山岩の溶岩ドームが形成された(ドームの体積は、 $8.0 \times 10^7 \text{km}^3$) (図1.5-2)。

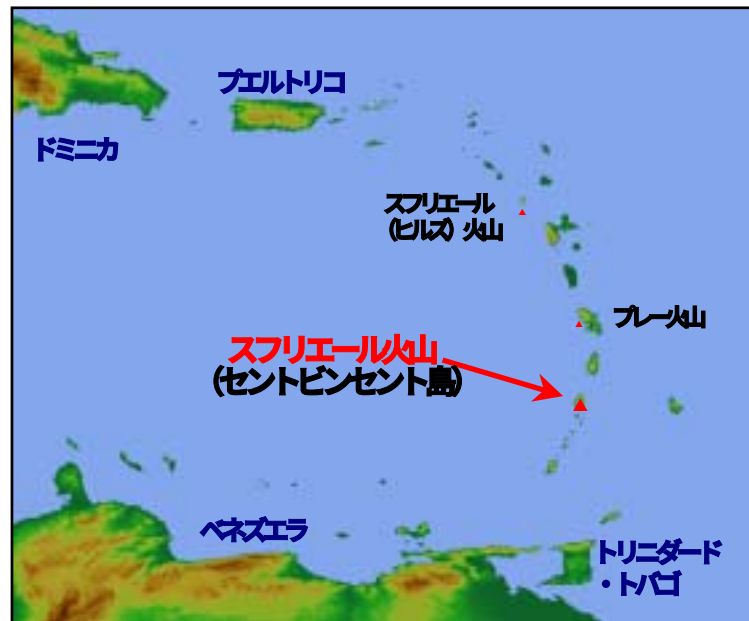


図1.5-1 マウナロア火山の位置

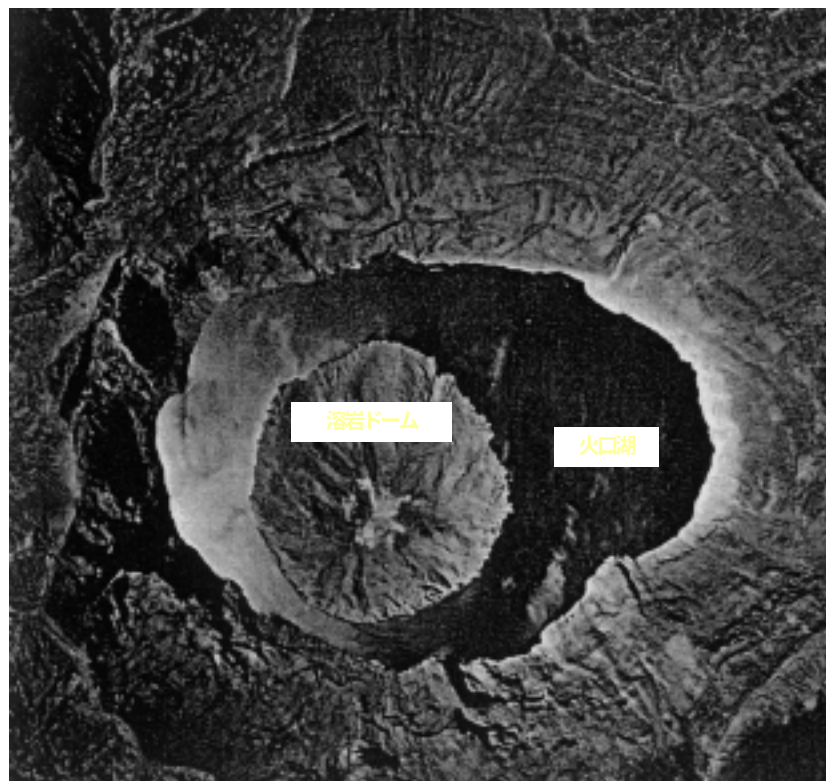


図1.5-2 1971-1972年噴火後の山頂火口湖 (1977.4撮影)

■1979 年噴火 (1979.4.13～)

(1) 前兆現象

- ・1978 年の初めから 10 ヶ月以上にわたって、火口湖の表面温度が 5～7℃上昇した。
(Fiske and Shepherd, 1979)
- ・火口底直下の非常に浅い所で発生する小規模な地震が増加した。
(Shepherd and Aspinal, 1982)
- ・小規模な地震は 1979 年 4 月 11 日から急激に増加し、翌 12 日には火山性地震が発生した。

(2) 噴火の推移 (図 1.5-3)

1979 年 4 月 13 日の朝から噴火が始まり、噴火開始から 48 時間の間、4 月 17 日、22 日、26 日に、合計 8 回主だった噴火が発生した。これらの噴火前には火山性地震が爆発的に増加し、噴火後数時間で減少した。また、噴火中は火口底直下の浅いところで、毎時 30～150 回の小さな地震が発生した。4 月 30 日からは地震活動が急速に衰え、小さな爆発が火口で起こる程度になった。その後、火口中で溶岩ドームの形成が始まり、ドームは 1979 年 10 月までに、 $4.7 \times 10^7 \text{m}^3$ の大きさとなった (図 1.5-4)。

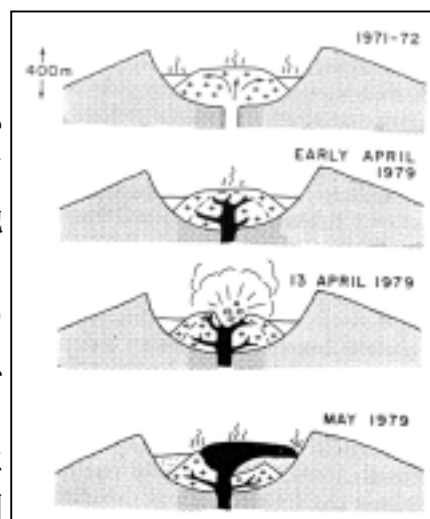


図 1.5-3 1979 年噴火の推移
(Shepherd and Sigurdsson, 1982)



図 1.5-4 1979 年 4 月 21 日の火口の様子
(1971-72 年の活動で形成された溶岩ドームの中央部に、新たな火口が形成されている。溶岩ドームは大きく破壊され、火口周辺に残丘として残っている程度である) (Shepherd and Sigurdsson, 1982)

※ 引用がない記述は、

Shepherd and Sigurdsson (1982) Mechanism of the 1979 explosive eruption of Soufriere volcano, St.Vincent.
Journal of Volcanology and Geothermal Research, **13**, 119-130.

1. 6 ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山 レユニオン (図1.6-1)

レユニオン島はインド洋のマダガスカル島の東約700kmに位置する長径70km程の火山島である。ホットスポットによって形成したと考えられる盾状火山で、海底からの標高は7km、山体の基底直径は約200km程ある。

島の北西側はピトン・デ・ネージュ火山(200万年以上前~2 万年前)、南東側はピトン・デ・ラ・フルネーズ火山(50 万年前以降)からなる。

ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山には東に開いた数重のカルデラ地形があり、インド洋側への重力崩壊と山体の形成を繰り返したと考えられている。最新のカルデラ（フーケカルデラ）内には偏平な中央火口丘があり頂上には長径1kmのドロミュー火口がある。

リフトゾーンはドロミュー火口を中心に北東・南東および北西に形成している。歴史時代の噴火はフーケカルデラ内か北東・南東リフトゾーンで発生している（図1.6-2）。

ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山は多数の噴火活動が記録されており、正確な記録が残るようになった1930年以降平均1年に1回程度噴火している。噴出率はほぼ一定で $0.34\text{m}^3/\text{sec}$ と計算されている。最近では2002年11-12月に中央火口丘東山腹で割れ目噴火があり溶岩流が海岸に達している。

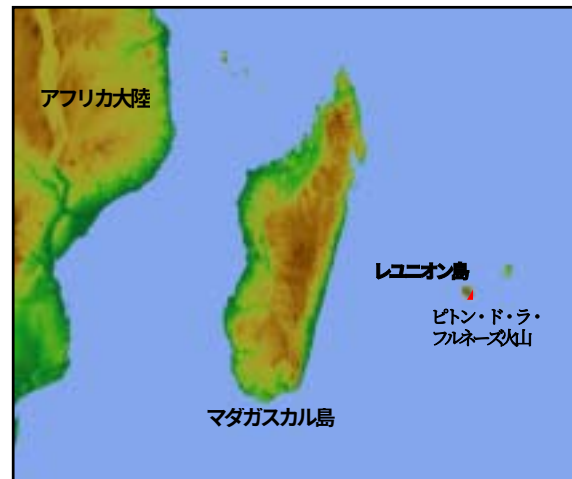


図1.6-1 レユニオン火山の位置

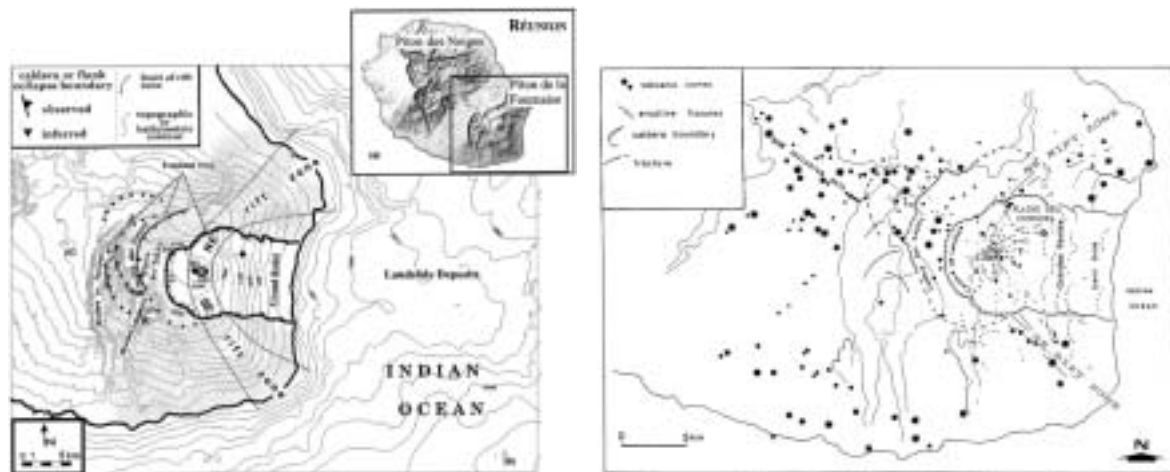


図1.6-2 ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山の(左)地形 (右)火口・割れ目火口の分布
(Lenat, 1989)

1) 噴火事例の紹介

■1981、83-84、85-87、90 年噴火

◎主な特徴

- ・ 噴火サイクルは複数回の噴火・貫入フェーズからなり、複数の噴火割れ目の形成が普通(図 1.6-3,5)。
- ・ 噴火前の静穏期は地震がほとんどない。広範囲でのインフレーションもみられていない(図 1.6-4,6)。
- ・ 噴火イベント開始に先行する地震活動は2週間から1ヶ月程前から始まる。ドロミュー火口直下 1-2km で発生。顕著な地殻変動は伴わないが、山頂域のインフレーションで始まることもある(1985 年噴火)(図 1.6-7)。
- ・ 噴火サイクル開始までの総地震エネルギー量はほぼ一定で $10^{14.5-15}$ ergs である。
- ・ 噴火・貫入フェーズ 1 から数時間前から激しい地震活動や局所的地殻変動が始まる(貫入時地震活動)。地殻変動はドロミュー火口付近のインフレーションで開始し、その後中心は噴火地点に向けて移動する(図 1.6-8,9)。
- ・ 噴火前に地中ガス組成や地熱に変動が生じる。

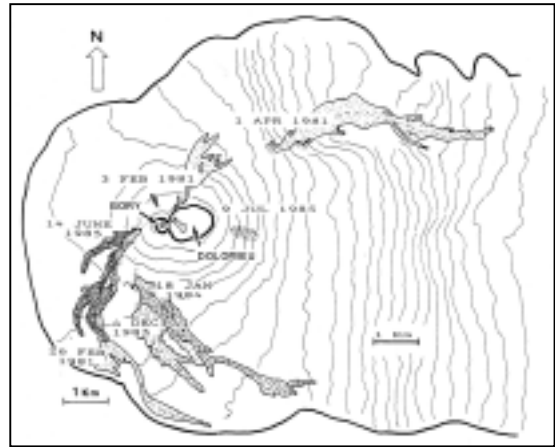


図 1.6-3
1981 年から 85 年までの溶岩流の分布。85 年 7 月 9 日の貫入領域(ドロミュー火口東方)も示す。(Lenat, 1989)

図 1.6-4

3 回の噴火に先行する地震活動。上段は累積地震エネルギー放出量(log(E)ergs)、下段は $M > 0$ の地震日回数と継続時間(矩形の厚さがドロミュー火口南西縁の BOR 観測点での個々の地震の継続時間を表す)。E は噴火開始時点。(Lenat, 1989)

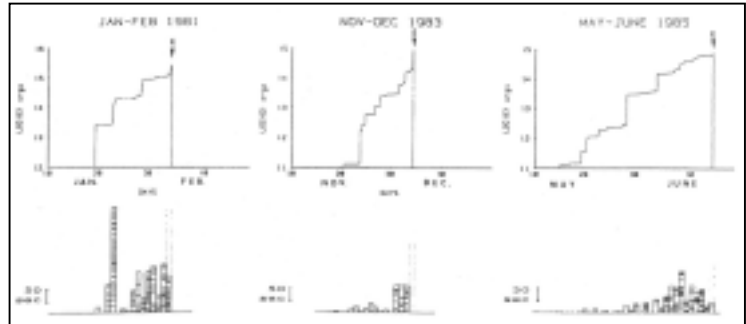


図 1.6-5

1981-85 年の 3 回の噴火サイクル中の各噴火／貫入フェーズの貫入時地震活動のまとめ。
5 分間ごとの地震エネルギー放出量(1 段目)及び $M > 0$ の地震回数(2 段目)の変化と各観測点へ先行するインフレーション(3 段目)、休止期間(4 段目)、地震活動(5 段目)及び噴火継続時間(6 段目)と噴出量(7 段目)。噴火イベント途中の噴火フェーズでは先行する地震活動がみられないことが多い。(Lenat, 1989)

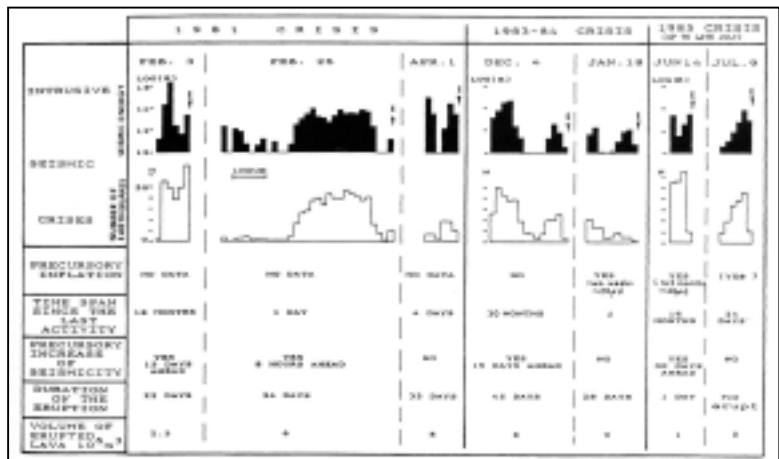


図1.6-6

1985/6/14 噴火フェーズに先立つ地震の分布。

四角印は6/10まで、三角印は6/10-14の震源、星印は貫入時地震活動(6/14 11:27-12:01)の震源を表わす。雁行する太線は噴火割れ目。ハッチは貫入による変形が著しいと思われる領域。震源分布の範囲はインフレーションの中心と一致している。期間を通じて分布域にほとんど変化がない。

貫入時地震活動の震源はNE-SW走向でSEに傾斜する面上に分布する。メカニズム解析からは左ずれ成分を持った正断層解が得られている。(Lenat,1989)

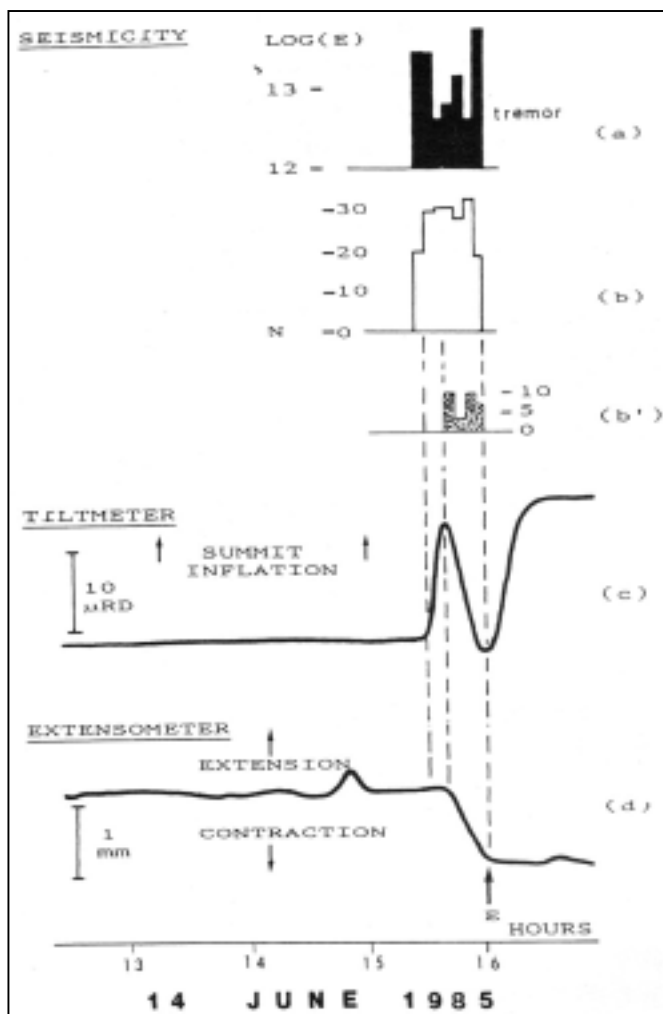
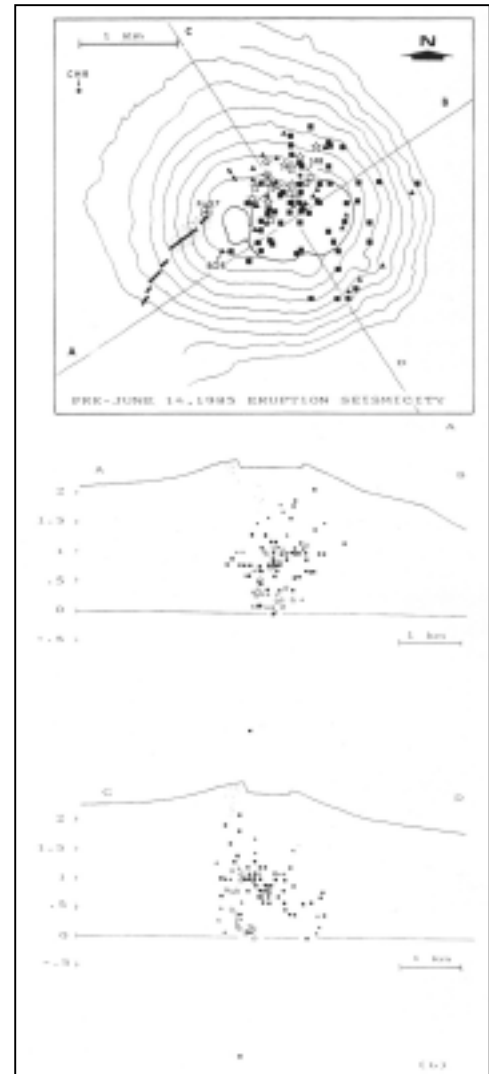


図1.6-7

1985/6/14 噴火フェーズに先立つ地震と地殻変動。(a)5分間ごとの地震エネルギー放出量及び(b) $M > 0$ の地震回数、(b')噴火割れ目直近のBOR点でのみ記録された地震の回数、(c)BORでの傾斜変動、および近傍の開口割れ目(山頂火口縁に平行)での伸縮変化(d)。地震発生と同時に山頂直下の貫入によるインフレーションが開始している。観測点西側への浅い岩脈貫入に伴い微小な地震活動とみかけ山頂収縮の変動が生じている。噴火開始後のインフレーションは岩脈のマグマ圧の減少による収縮が続く山頂直下へのマグマ貫入を示すインフレーションと考えられるが、他点で観測されていないため不明。(Lenat,1989)

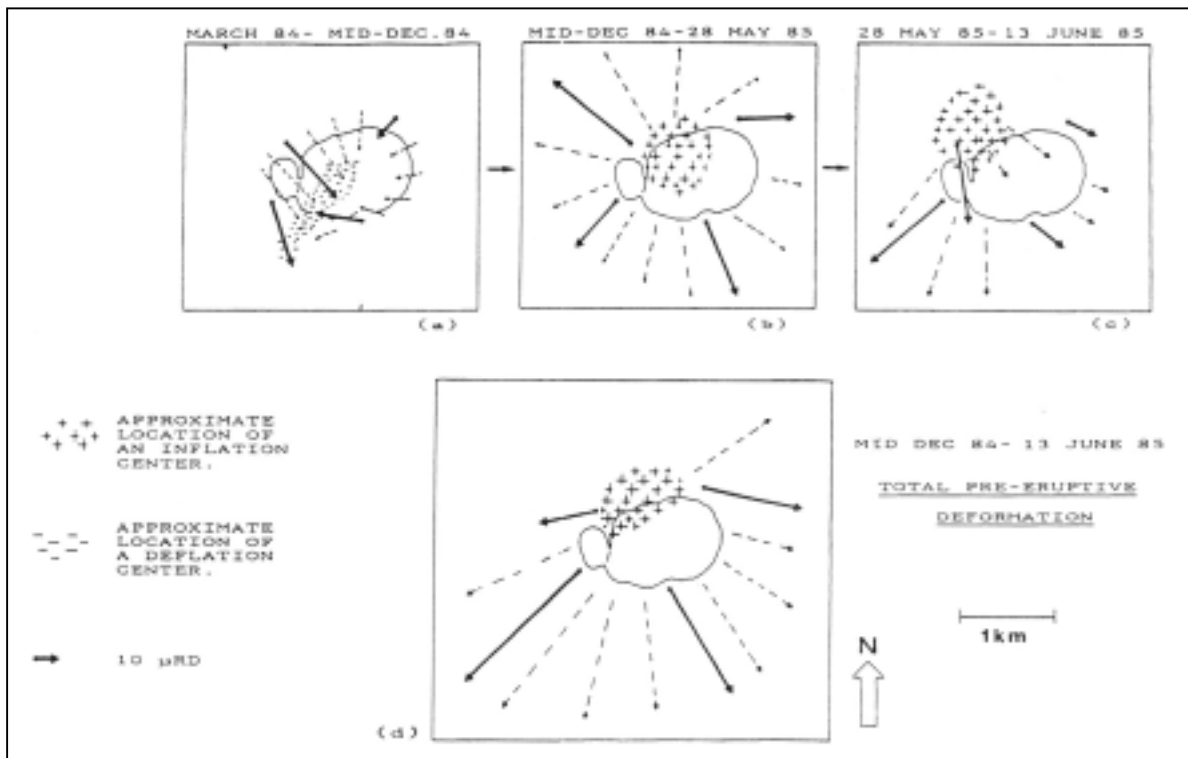


图 1.6-8

ドライティルト観測による 1985/6/14 の噴火フェーズに先立つ傾斜変動。+はインフレーション、-はデフレーションの中心領域。(a)は静穏期における前回のイベントの貫入体周辺部の余効変動、(b)は地震を伴わないインフレーション、(c)は先行地震活動時のインフレーションを表わしている、(d)この期間全体では北西部を中心としたインフレーションとなっている。(Lenat, 1989)

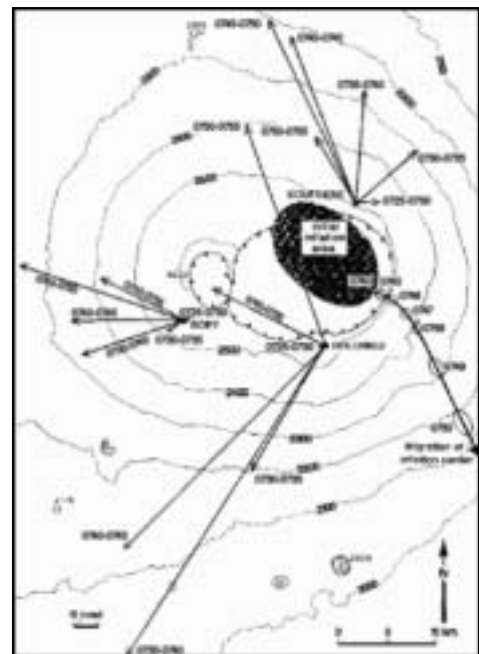


图 1.6-9

電子傾斜計観測による1990/4/18の噴火フェーズに先立つリアルタイム傾斜変動。山頂部で出現したインフレーション領域は南東に移動した。このうち南東山腹で割れ目噴火。岩脈の貫入による変動とした場合、移動速度は山頂部での垂直上昇は2m/sec、山腹への水平方向の移動は最大2.3m/sec、平均で0.21m/secと計算される。(Toutain et. al, 1982)

○噴火のモデル (1981-85 年) (図1.6-10)

ラ・フルネーズ火山は火山体の東部がインド洋側へ滑りつつあるため、山体内に東西に伸張する応力場が存在する。ドロミュー火口周辺は度重なる貫入や断層活動で破壊され強度が低下している。

浅部マグマだまりの上限はドロミュー火口直下1.5kmにあるとみられる。おそらく岩脈・岩床の複雑な複合体からなる。静穏期に広範囲のインフレーションがないこと、岩石学的見地からみて地下深部からのマグマの供給は間欠的であり、この期間にはなかったと推定されている。

噴火サイクルに先立つ地震活動の放出エネルギー量が定まっているのはマグマないし流体の圧力が一定の増加率で同じ深度・媒体中で生じており、一定の閾値が存在するためと考えられる。

上昇を開始したマグマは地震を伴いつつ破壊の進んだ山体内を短期間(2.5 時間以下)で速やかに上昇し (2m/sec 程度)、山頂域でインフレーションがみられる。

浅所では水平方向に移動する岩脈が形成され、速やかに移動する (2m/sec 程度)。この際、局所的な地震活動とインフレーションを伴う。山体東側が西側より変形しやすいため貫入方向は横ずれ構造を持った断層-切れ目系に規制される。

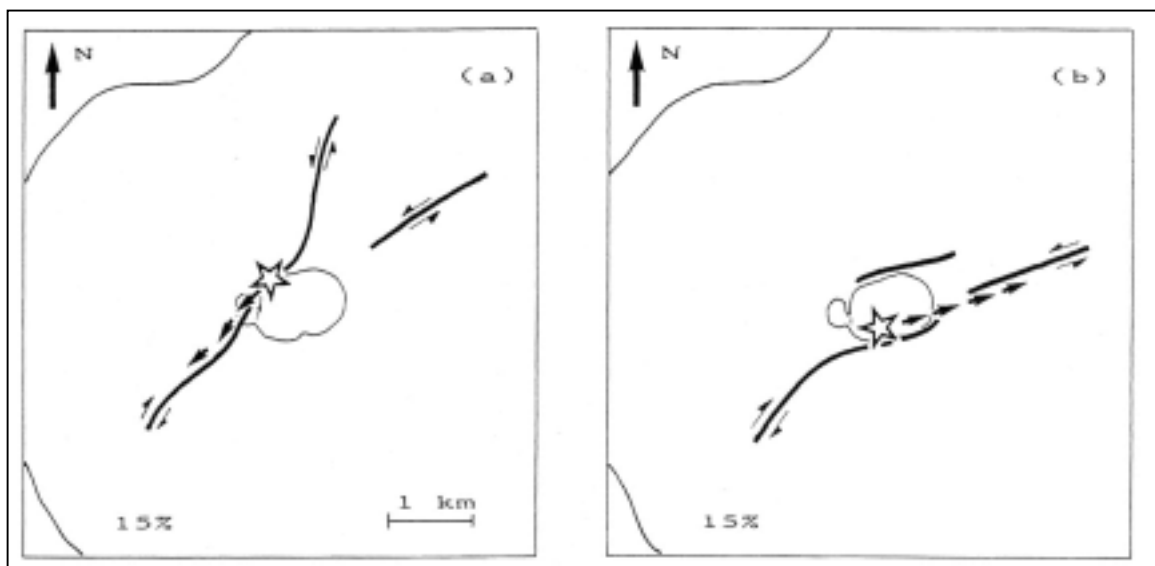


図1.6-10

火山 構造モデル。(a)1985/6/14、(b)1985/7/9 の場合

太線は横ずれ構造を示す切れ目のパターンから推定した“active eruptive system”、星印は震源域(岩脈の上昇経路を表わす)、矢印は浅部での岩脈貫入経路。

断層-切れ目系の形成は変形しやすい山体東部の東方への移動に起因する。上昇して来た岩脈はこれにそって水平方向へ貫入する。(Lenat,1989)

2. 休止期間が長い火山

平成13年度の調査結果も活用しながら、以下の条件の火山の調査を行った。これらの噴火について (a) 噴火前の現象の近代観測例、(b) 観測結果から推定されたマグマ供給系モデルに関する文献を収集し、近代的な観測の下で噴火が発生した事例について、噴火前に生じた現象と(それが存在する場合には)推定されているマグマ供給系モデルを整理した。

- 玄武岩を主体とする火山にこだわらない
- プレーートの沈み込みに伴って形成されている火山でなくてもよい

この条件を満たす火山として、以下の火山について調査した。

- ① ラ・パルマ火山
- ② セントヘレンズ火山
- ③ サンタマリア火山

2.1 ラ・パルマ火山 カナリア諸島 (図2.1-1)

ラ・パルマは、カナリア諸島のほぼ西端にある標高 2426m の火山で、歴史時代に多くの噴火記録がある。1712 年から 237 年の休止期間を持ち、1949 年に発生したのが最後の噴火である。この噴火は溶岩流が山頂から海岸まで流出した (図 2.1-2)。

1) 噴火事例の紹介

■噴火の前兆現象

○地震活動

- ・広域での地震活動

噴火の 13 年前の 1936 年 7 月 23 日に Caldera de Taburiente の南縁周辺で地震があった。その後 2 日間、Valle de Aridane で 9 回の地震活動があった。1 年後、地震はラ・パルマ火山の南の住民を起こすほどの地震があった。その後、12 年間、散発的に地震活動が起こった。

- ・ラ・パルマ火山周辺での地震活動と地殻変動

1949 年 2 月 22 日 強い地震が起こる。

1949 年 3 月 7 日 Fuencaliente で多くの建物への被害と壁の崩壊を伴う地震。50m 程度の亀裂が発生(東西方向)。

1949 年 6 月 24 日朝 強い地震と共に、地響きと Montana Duraznero(Fuencaliente の 10km 北)で亀裂が発生。

1949 年 6 月 24 日 8:30 San Juan が噴火。

他の前兆として Llano del Banco で陥没があり、2 年前から地温が上昇していた。

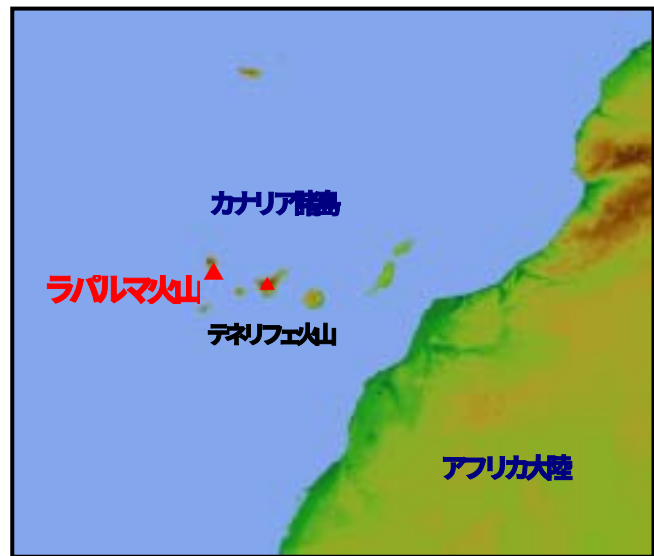


図2.1-1 ラ・パルマ火山の位置

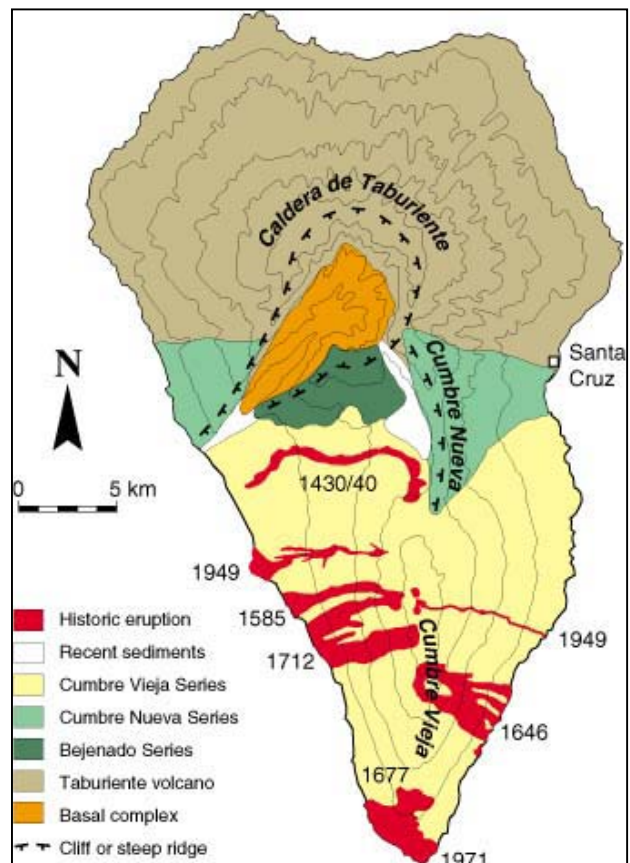


図2.1-2 ラ・パルマ火山の地質
(Schmincke et.al,1999)

■ラ・パルマ火山の噴火の時間経過

Phase 1(6月24日-7月8日)

Duraznero クレーターの北で水蒸気マグマ爆発から噴火が開始。火山灰、スコリアなどが数時間の間、数分間隔で噴出した。その後12日間で、活動は南北方向に伸びた長さ400mの亀裂の開口(6月27日、7月5-6日)へと遷移していった。Duraznero クレーターの南での開口は、暗い噴煙柱とクレーターをより大きくする強い爆発を伴った。Duraznero での活動は地震を伴い Las Manchas と Jedey のビルを破壊させた。さらにほぼ南北走行の断層を形成した。

Phase 2(7月8日-12日)

Llano del Banco(Duraznero の3km北西)における長さ60mの亀裂の開口で始まる。新たな噴気口から多くの岩片を含んだ多量の溶岩を噴出した。7月10日に溶岩は海へと達した。新たな溶岩の多くは小さな lava tube を利用して直接海へ流れ込んだ(速度は10m/s)。約100m程度の亀裂の開口と断層運動によるグラーベンで噴気口が形成された。

Phase3(7月12-30日)

Llano del Banco に溶岩流が到達した2日後、古い Hoyo Negro クレーター(Duraznero の700m北)で突然噴気口が形成され、地震が再開した。Llano del Banco では大量に溶岩を出し続けた。Hoyo Negro では、数分間隔発生する水蒸気マグマ爆発によって古いクレーターが拡大、高密度な噴煙柱をあげ、広範囲に火山灰を降らせた。

最も大きな噴火は7月19日に起こった。Hoyo Negro と Llano del Banco で30mの高さまで溶岩が噴き出した。Hoyo Negro の活動は7月20日以後衰え、7月22日で終息した。Llano del Banco での噴火の割合は、7月26日に突然活動が終了するまで徐々に収まっていった。

Phase4(7月30日)

全ての噴気停止の3日後、Hoyo Negro と Duraznero で水蒸気マグマ爆発が再開し、両方のクレーターに断層運動が起こった。Hoyo Negro の活動は10:30に停止し、Duraznero は12時間大量の溶岩流を出し続けた。この時、溶岩は高さ100mまで噴き上がった。溶岩は急速に東海岸へと向かい、昼には主要高速道路を横切り、その後、速度を落とし海の30m手前で停止した。

2.2 セントヘレンズ火山 アメリカ (図2.2-1)

セントヘレンズ火山は、アメリカ西海岸のカスケード火山地域の北に位置する島弧型の成層火山で、最近600年間少なくとも3つのデイスイトドームの活動をしている活火山である (図2.2-2)。

1980年5月18日の噴火で山体が大きく崩壊し、岩屑なだれやブラストが発生し、周辺の森林に多大な被害を与えた。噴火後は、治山工事などを行わず、"Volcanic Monument"として保存されており、地形変化や植生回復に関する貴重なデータが得られている。

この噴火前の標高は2949m、噴火後は2549mであり、1980年5月18日の以前の活動は1857年で、その間の休止期間は123年であった。

1) 噴火事例の紹介

■噴火の前兆現象

○地震活動

1980年3月15日ごろからセントヘレンズ山付近で地震が発生。3月20日から地震が増加 (1975年-1980年までの地震は、5年間で44個)。

3月20日にはM4.2の地震が発生し、その後さらに地震が増加。

3月27日に123年ぶりとなる小規模な噴火が発生。この後、小規模な噴火は5月15日まで続いた (図2.2-3,4,5)。



図2.2-1 セントヘレンズ火山の位置



図2.2-2 噴火前のセントヘレンズ火山 (USGS HP)

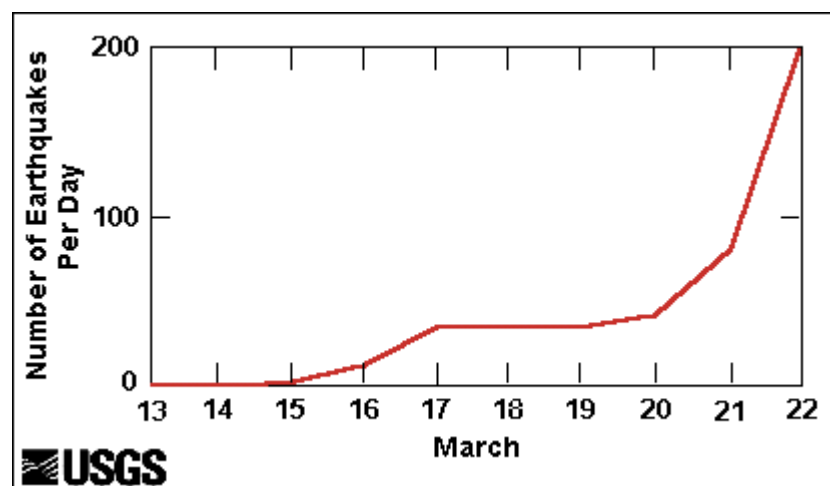


図2.2-3 3月の地震回数の変化 (USGS HP)

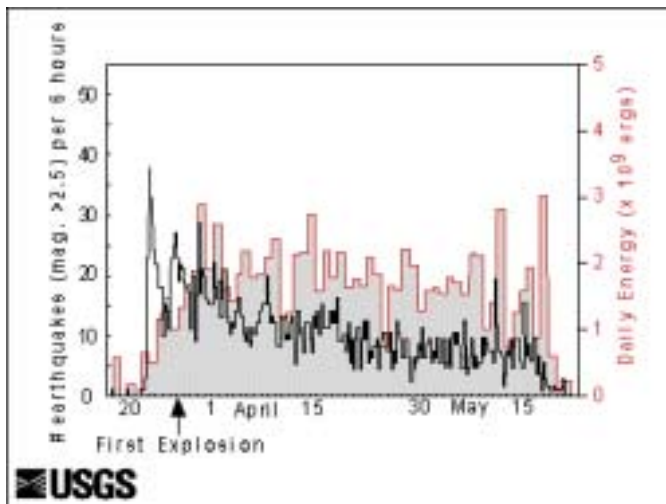


図2.2-4 地震の回放出エネルギー (USGS HP)

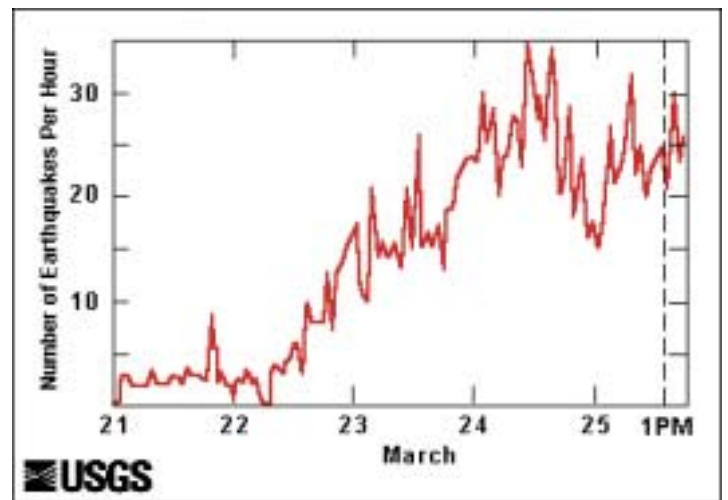


図2.2-5 地震の回数 (USGS HP)

○地形の変化

セントヘレンズ山の肉眼的な変化を時系列の写真（図2.2-6）に示す。

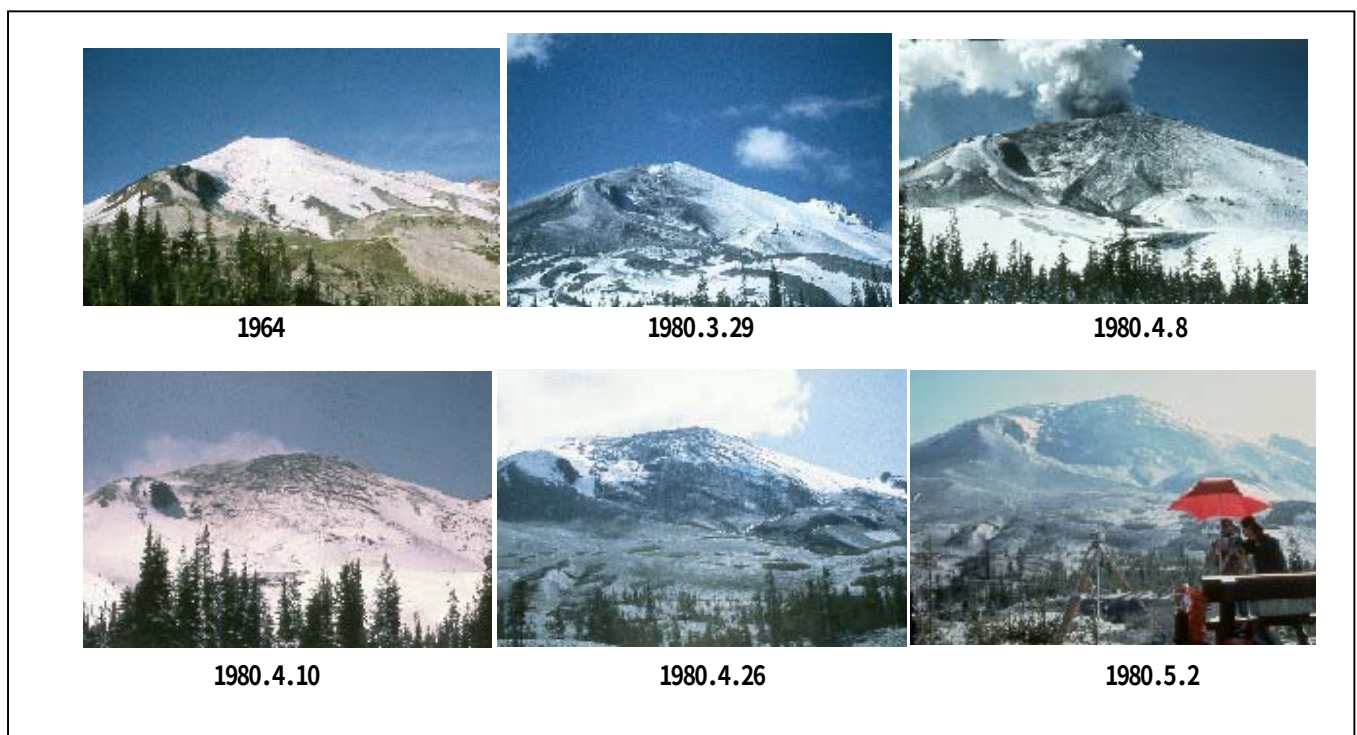


図2.2-6 地形の時系列変化 (USGS HP)

空中写真の比較で求められた地殻変動を示す (図2.2-7,8,9,10)。

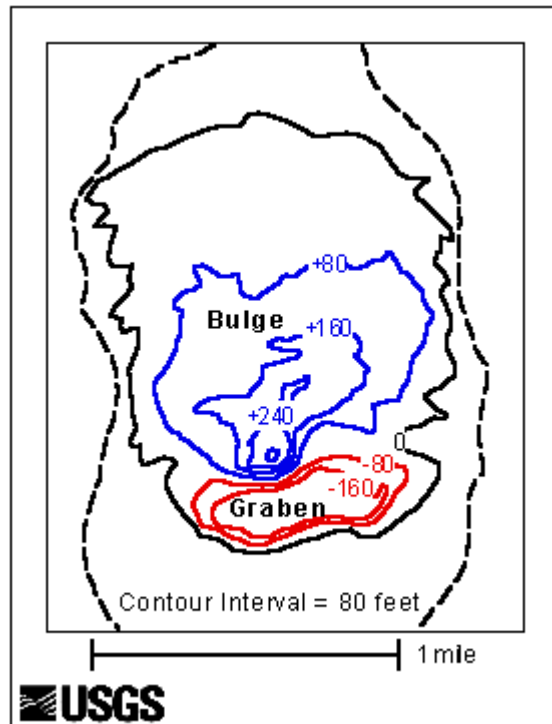


図2.2-7 79.8- 80.4.7の地形変化(USGS HP)

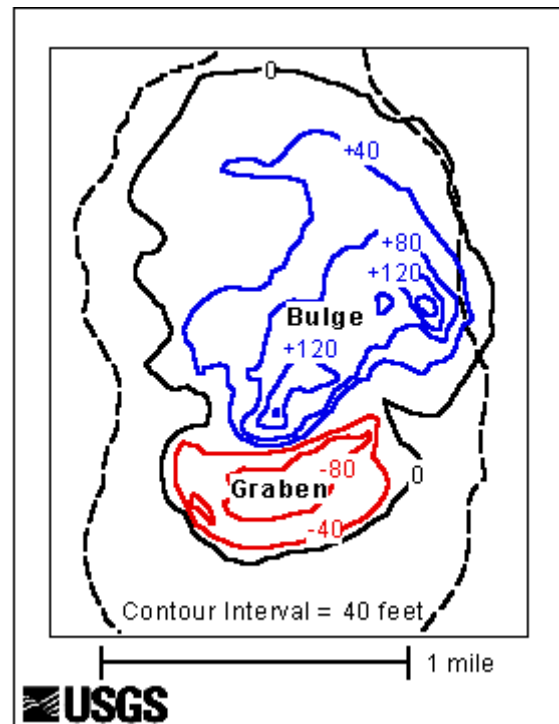


図2.2-8 80.4.12- 80.5.1の地形変化(USGS HP)

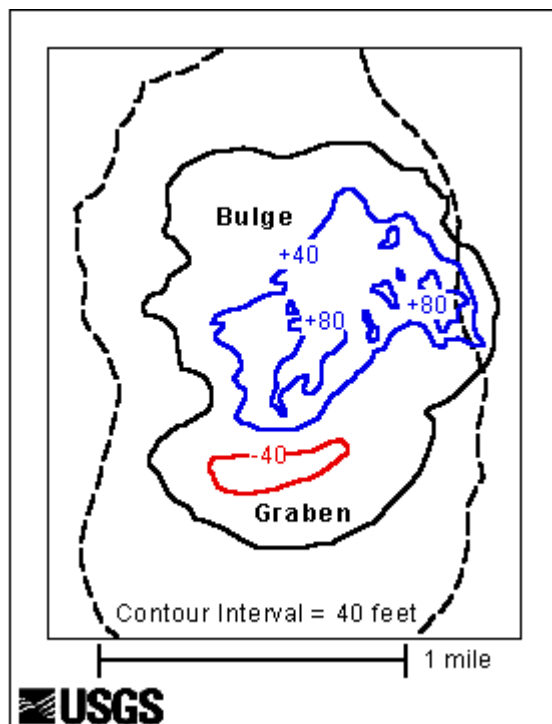


図2.2-9 80.5.1- 80.5.12の地形変化(USGS HP)

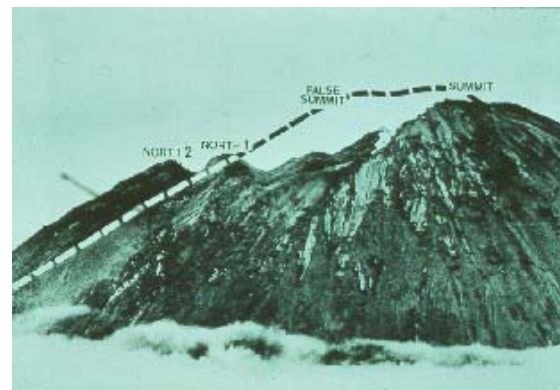


図2.2-10 噴火前と1980.5の地形比較(USGS HP)

電子的な測距で計測された地形変動を以下に示す（図2.2-11,12,13）。

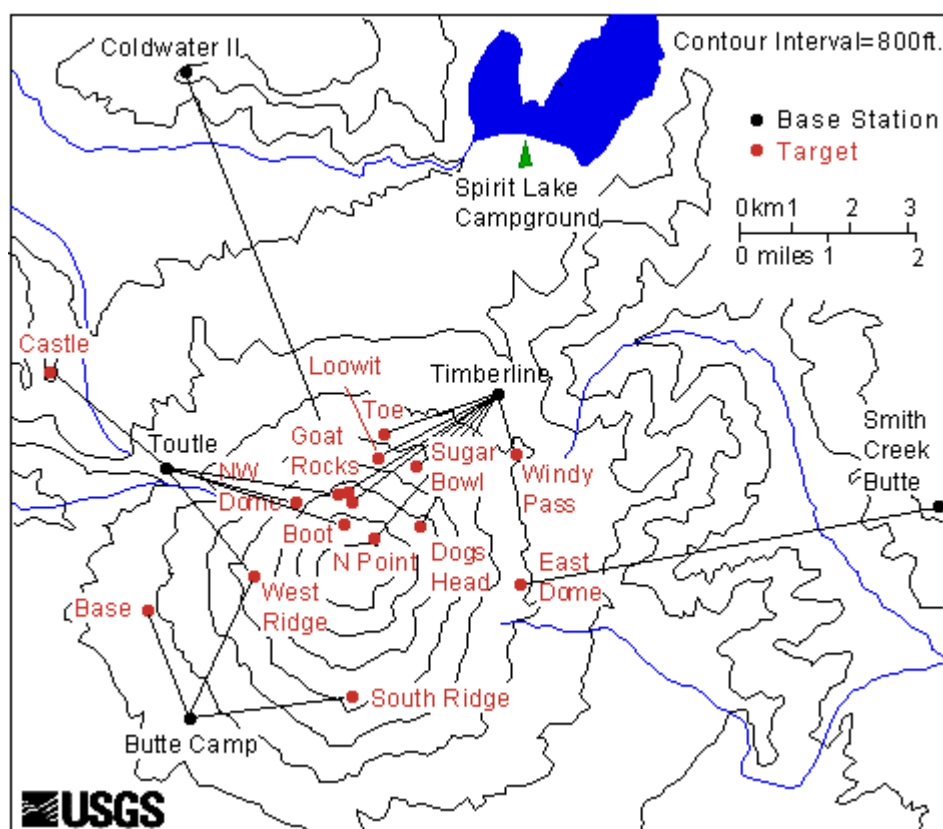


図2.2-11 山体周辺に設置された観測基準点(Base Station)と観測点(Target) (USGS HP)

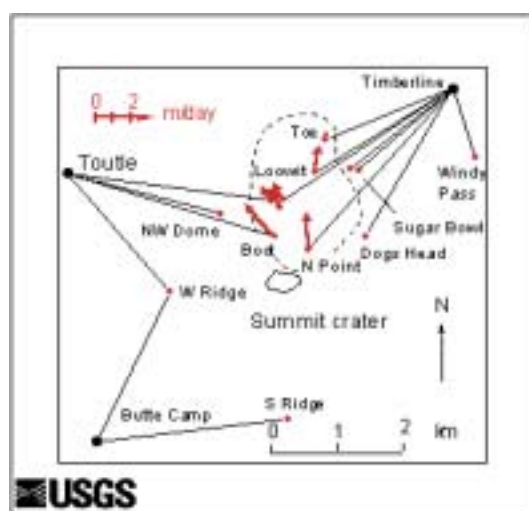


図2.2-12 4.25-4.28 に計測された変動
(USGS HP)

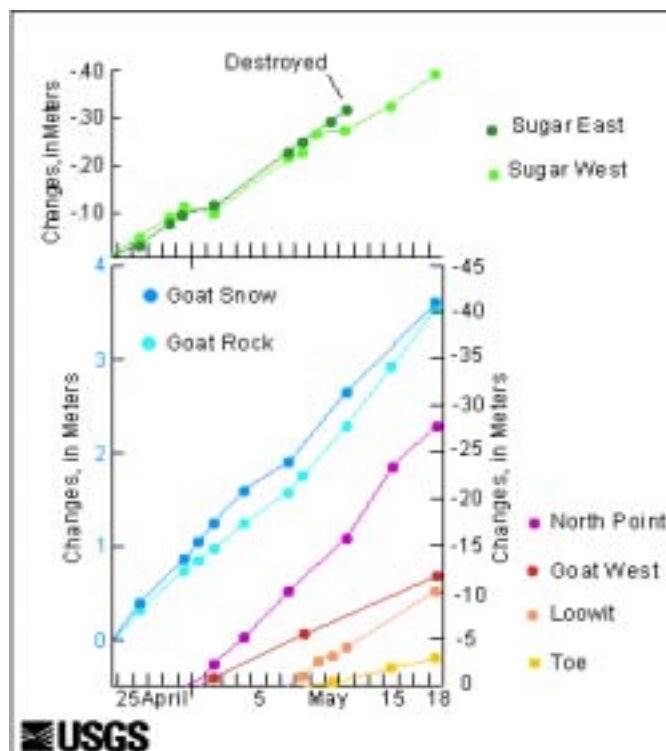


図2.2-13 4.25 以降の変動(USGS HP)

2.3 サンタマリア火山 グアテマラ (図2.3-1)

サンタマリア火山は、標高 3772m で、最近の噴火は 1902 年 10 月 24 日からである。これ以前の噴火との休止間隔は 500 年以上あるとされる。

1) 噴火事例の紹介

■噴火の前兆現象

○ 周辺火山の挙動(1902 年)

1902 年 5 月 7-8 日 Soufriere, St.Vincent, Mt.Peleee が噴火

1902 年 5 月 15 日 El Salvado が噴火

1902 年 6 月 Izalco 火山, El Salvador, Masaya 火山(ニカラグア)が噴火



図2.3-1 サンタマリア火山の位置

○ 広域的な地震活動

1902 年 1 月 6 日 Chilpancingo(メキシコ、サンタマリア火山の北西 900km)で大地震

1902 年 1 月 16 日 サンタマリア火山の南西 13km で地震発生

1902 年 4 月 19 日 西グアテマラ断層の中央部で地震 (M8.3)

これらの地震は過去数年、例がなく 10,000km² 以上の範囲に影響を及ぼしている。1902 年と 1903 年に中央アメリカで巨大地震が 4 月に生じて、西グアテマラ構造線の破壊を引き起こした。

1902 年 9 月 23 日 サンタマリア火山の北西 210km で地震 (M8.3)

10 月の噴火活動に伴う地震が連続的に生じる前に、1 ヶ月当たりの地震数は 45 回へと急激に増加した。

○ 噴火活動の推移

- 1902 年 10 月 24 日 午後 サンタマリア火山の南西山腹で蒸気が上がる
- 1902 年 10 月 24 日 17:00 サンタマリア火山周辺で地響き
- 1902 年 10 月 24 日 18:15 風が南から東へ、細粒の火山灰が Finca Helvetia(サンタマリア火山の西 14km)で降る。
- 1902 年 10 月 24 日 20:00 大きな雲が観測され、閃光を確認。
- 1902 年 10 月 25 日 1:00 サンタマリア火山の南斜面に大きな岩片が降りはじめ、プリニー式噴火が始まる。噴煙柱は、船からの観測(目測?)で、27-29km もしくは 48km 程度であった。また 18-20 時間後に終息。
- 1902 年 10 月 25 日 3:00 Quezaltenago で Lapilli サイズの灰が降り、風が南西へ変わる。Finca Helvetia での堆積物は冷えた岩と軽石から大きな岩と軽石へと変わった。このころ、地震活動ピーク
- 1902 年 10 月 25 日 6:00 メキシコの Motocintla(サンタマリア火山の北西 104km)で降灰 (8.3ms^{-1})。
- 1902 年 10 月 25 日 7:30 地震活動の再開(11:00 に終了)。
- 1902 年 10 月 26 日 早朝 黒っぽく茶色い火山灰が蒸気と共に噴出。10 月 29 日に終息。
- 1902 年 12 月 東西に 1km、南北に 700-800m で深度は 250m のクレーターが始めて観測された。
- 1903 年にこの噴火により形成されたクレーターに湖が形成され、Santiaguito ドームが 1922 年にできた。



図2.3-2 サンタマリア火山

参考文献リスト

対象火山名	本文中の図表	著者	発行年	タイトル	掲載	Vol.	No.	p
ヘクラ	図1.1-2	Agust Gudmundsson,Niels Oskarsson,Karl Gronvold,Kristjan Saemundsson,Oddur Sigurdsson,Ragnar Stefansson,Sigurdur R.Gislason,Pall Einarsson,Bryndis Brandsdottir,Gudrun Larsen,Haukul Johannesson and Thorvaldur Thordarson	1992	The 1991 eruption of Hekla,Iceland	Bull.Volcanol	54		238-246
	図1.1-3,4	Heidi Soosalu,Pall Einarsson	2002	Earthquake activity related to the 1991 eruption of the Hekla volcano,Iceland	Bull.Volcanol	63		536-544
エトナ	図1.2-1,2,3,16,17,18(左),18(右)	F.Ferrucci,R.Rasa,G.Gaudiosi,R.Azzaro and S.Imposa	1993	Mt.Etna:a model for the1989 eruption	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	56		35-56
	図1.2-4,5	J.C.Tanguy,G.Kieffer,G.Patane	1996	Dynamics,lava volume and effusion rate during the 1991-1993 eruption of Mount Etna	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	71		259-265
	図1.2-6,7	G.Frazzetta,R.romano	1984	The 1983 Etna Eruption:Event Chronology and Morphological Evolution of the Lava Flow	Bull.Volcanol	47	4	1079-1096
	図1.2-8(左上)	R.Scarpa,G.Patane and G.Lombardo	1983	Space-time evolution of seismic activity at Mount Etna furing 1974-1982	Annales Geophysicae			451-461
	図1.2-8,19,20,21,22	G.Patane,A.Montalto,S.Vinciguerra,J.C.Tanguy	1996	A model of the onset of the 1991-1993 eruption of Etna(Italy)	Physics of the Earth and Planetary Interiors 97			231-245
	図1.2-9,13,14(左),15,23,24	Bonaccorso	2001	Mt Etna volcano: modelling of ground deformation patterns of recent eruptions and considerations on the associated precursors	Journal of Volcanology and Geothermal Research	109		99-108
	図1.2-10,11	J.C.Tanguy,G.Kieffer	1976-77	The 1974 Eruption of Mount Etna	Bull.Volcanol	40	4	239-252
	図1.2-12	John B.Murray	1981	Les Deformations de l'Etna A La Suite de l'eruption de mars 1981	Bulletin Pirpsev			1-30
	図1.2-14(上)	T.J.O.Sanderson,G.Berrino,G.Corrado and M.Grimaldi	1983	Ground deformation and gravity changes accompanying the March 1981 eruption of Mount Etna	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	16		299-315
クリチョフスコイ	図1.3-2,3	P.I.Tokarev	1987	Prediction of the Klyuchevskoi parastic eruption in March 1983	Volc.Seis.	5		491-496
	図1.3-4	P.I.Tokarev	1988	The March-June 1984 Eruption of Klyuchvskoi and Its Present State as Estimated from Ongoing Observations	Volc.Seis.	7		143-148
マウナロア	図1.4-2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,15,17,18,19,20,21	Lockwood,J.P., Dvorak,J.J., English, T.T., Koyanagi,R.Y., Okamura, A.T., Summers, M.L., and Tanigawa, W.R.	1987	Mauna Loa 1974-1984:A decade of intrusive and extrusive activity, in Decker,R.W., Wright,T.L., and Stauffer,P.H., eds., Volcanism in Hawaii, Washington:	U.S.Geological Survey Professional Paper	1350		537-570
	図1.4-14,16	Lockwood,J.P., Banks,N.G., English,T.T., Greenland,L.P., Jackson,D.B., Johnson,D.J., Koyanagi,R.Y., McGee,K.A.,Okamura,A.T., and Rhodes,J.M.	1985	The 1984 eruption of Mauna Loa Volcano, Hawaii	American Geophysical Union transactions,Eos	66		169-171
スフリエール	図1.5-2,3,4	Shepherd and Sigurdsson	1982	Mechanism of the 1979 explosive eruption of Soufriere volcano, St.Vincent.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	13		119-130
		Fiske and Shepherd	1979					
		Shepherd and Aspinall	1982					
ピトン・デ・ラ・フルネーズ	図1.6-2,3,4,5,6,7,8	Jean Francois Lenat	1989	Patterns of Volcanic Activity of Piton de la Fournaise(Reunion Island,Indian Ocean).A Synthesis Based on Monitoring Data Between 1980 and July 1985,and on Historic Records Since 1930	Volcanic Hazards			312-338
	図1.6-10	Jean Francois Lenat,Patrick Bachelery,Alain Bonneville and Alfred Hirn	1989	The Beginning of The 1985-1987 Eruptive Cycle at Piton de la Fournaise(La Reunion):New Insights in The Magmatic and Volcano-Tectonic System	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	36		209-232
	図1.6-9	Jean Paul Toutain,Patrick Bachelery,Pierre Antoine Blum,Jean Louis Cheminee,Hugues Delorme,Laurent Fontaine,Philippe Kowalski and Philippe Taouky	1992	Real Time Monitoring of Vertical Ground Deformations During Eruptions at Piton de la Fournaise	Geophysical Research Letters	19	6	553-556
ラ・パルマ	図2.1-2	Klugel,A., Schmincke, H. U., White, J. D. L. & Hoernle, K. A.	1999	Chronology and volcanology of the 1949 multi-vent rift-zone eruption on La Palma (Canary Island).	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	94		267-282
セントヘレンズ	図2.2-2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	USGSホームページ			http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/May18/framework.html			
サンタマリア		Williams, S. N. & Self, S.	1983	The October 1902 plinian eruption of Santa Maria volcano, Guatemala.	Journal of Volcanology and Geothermal Reserch	16		33-35