

阿蘇山中岳第1火口湯溜り水位の測定* (1980 - 1984)

中禮正明,** 下村雅直,*** 松田健助**

Water - level Measurement of The 1st Crater Lake in Mt. Naka - dake, Aso
Volcano, 1980 - 1984.

MASAAKI CHIUREI
(Meteorological Research Institute, JMA)

MASANAO SHIMOMURA and KENSUKE MATSUDA
(Asosan Weather Station)

A crater lake was discovered in the 1st Crater of Mt. Naka-dake, Aso Volcano, on March 20, 1980, and it continued to exist about 5 years since that time.

To study the relation between the volume change of the lake water and the activity of the volcano, its water-level was repeatedly measured by triangulation and photo analysis.

The major results obtained from these measurements are as follows;

- i) The volume of sediments which flowed into the lake during the 5 years is estimated as about $4 \times 10^5 \text{ m}^3$.
- ii) Half or more of the precipitation on and around the 1st Crater flows into the lake.
- iii) The remarkable volume decrease of the lake water occurred in the periods from January to May 1983 and from April to September 1984. During the above periods, the volcanic activity increased gradually. It is suggested that the observation of the volume change of the lake water is useful for monitoring the activity of the volcano.

§ 1. はじめに

1980年2月20日に発見された阿蘇山中岳第1火口の湯溜りは、1985年4月16日に消滅が確認されるまで5年余り継続した。今回のように1年以上湯溜りが継続したことは、最近では1962年7月から1964年11月頃までの2年余り継続(阿蘇山測候所, 1967)して以来のことであり、又、火口底全面大きな湯溜り状態で継続したのは、少なくとも1928年以降初めてのことであった。

一般に、火口湖の水温、水質、水位等の観測は、

火山の活動状況を把握する1つの有効な方法である(例えば、小坂・平林; 1985, Hurst and Dibble; 1981, 等)。中岳第1火口湯溜りについても、火山活動が活発化した時には湯溜り表面の温度がやや上昇したり(須藤他, 1984)、湯溜りの消滅後には、火口底の赤熱や火炎あるいは降灰などがしばしば観測されている(阿蘇山測候所, 1976)。このようなことは湯溜りの挙動が火山の活動度を知る上で貴重な指標と成り得ることを示している。

筆者等は、湯溜りの消長を量的に知り、火山活動との関連を明らかにする目的で、三角測量と写真解

* Received February 25, 1986

** 気象研究所

*** 阿蘇山測候所

**** 阿蘇山測候所(現熊本地方気象台)

析により、中岳第1火口湯溜りの水位を測定・追跡した。本稿では、測定方法および測定結果について報告し、湯溜り消長の要因を若干考察する。

§ 2. 測定方法と誤差

湯溜りはスリバチ状をした中岳第1火口底にあるので、直接その水位を測定することは困難であり危険である。そこで、三角測量で中岳第1火口壁の特徴的な地点（以後、基準点と呼ぶ）の高さを測定し、それを基準として写真解析から湯溜りの水位を求めることとした。

2.1 三角測量による基準点の高度測定とその誤差

三角測量による基準点の高さの測定原理は次の通りである。Fig.1に湯溜りおよび火口縁の位置を模式的に示す。まず、基線ABを水平に設ける。測定

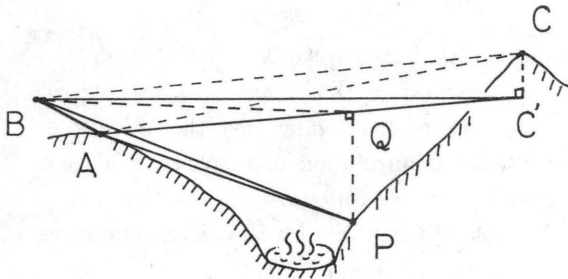


Fig.1 Schematic representation of datum level survey by triangulation. AB is the datum datum line which length is 28.01m

対象とする点をP、基線ABを含む水平面にPから下した垂線の足をQとする。ここで $\angle BAQ$ と $\angle ABQ$ がわかれば、 AQ が求められ、次にPの伏角すなわち $\angle QAP$ がわかれば PQ を求めることができる。なお、A、Bを含む水平面は、 AC 、 BC の辺長測量とC点の三角測量とを併行し設定した。

測量は1981年11月29日と12月3日に行った。Fig.2に測量の様子を示す。測角および基線の測量にはそれぞれ測機舎製デジタル読みセオドライトTM6とAGA社製ジオジメーター6BLを使用した。両測器の仕様をTable 1とTable 2に示す。まず、中岳第1火口南西側火口縁に28.01mの基線を設けた。基線の一方の基点には火口縁に打ち込んである杭を利用した（Fig.2参照、以後この基点をA点とよぶ）。後で述べる写真解析に使用した写真はほぼこの杭付近から撮影したものである。基準点はA点と北東側火口縁の出っぱり（Fig.2の矢印で示した所、以後C

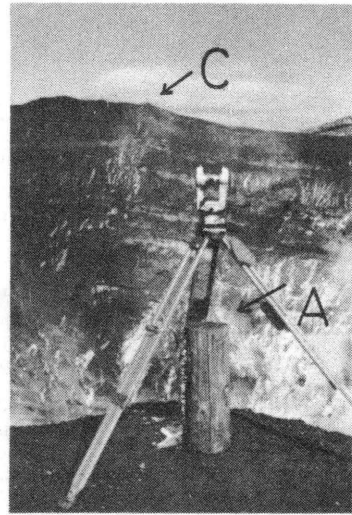
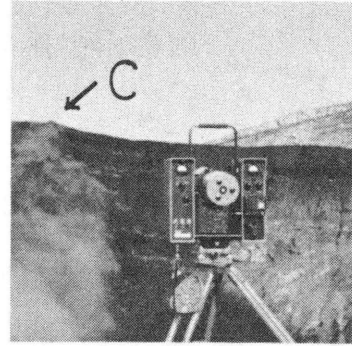


Fig.2 View of triangulation survey. Arrows A and C show datum point A and C, respectively.

機 種	デジタル読みセオドライト TM6 (測器舎製)
望 遠 鏡	正像, 倍率; 30倍, 分解力; 3" 視界; 1° 30' (2.6m/100m) スタジア乗数; 100, スタジア加数; 0
水平目盛盤	最小読取値; 6" (デジタル) 推読; 3"
高度目盛盤	最小読取値; 6" (デジタル) 推読; 3"
高度自動補償機構	精度; $\pm 0.5''$, 範囲; $\pm 5'$
気泡管感度	横気泡管; 30"/2mm 円形気泡管; 10"/2mm
求心望遠鏡	像; 正像, 倍率; 2倍 最短合焦距離; 0.5m
重 量	5.3kg

Table1. Specifications of the theodolite used for triangulation.

機種	AGA Geodimeter 6BL
測定距離	15m~25km
精度	平均自乗誤差；5mm±1mm/km
光源	HeNe レーザー
電源	12V D. C. バッテリー
重量	15kg

Table 2. Specifications of AGA-Geodimeter 6BL used for distance measurement.

点と呼ぶ)を含む鉛直面が北東側火口壁を切る線上に設けた。これは、後日の観測の再現性を保つためである。Fig.3はA点から見た北東側火口壁と湯溜りで、設定した基準点を黒丸(P₁, P₂, P₃)で示す。Table 3に基準点の測定結果とこの時の湯溜りの水位を示す。但し、国土地理院で作成した地形図(1981年10月12日撮影, 土肥・大田, 1984)と今回の測量から、A点の海拔高度(丸太の頂部)を1,277.5mと推定し、求めている。

この測量の精度について次に述べる。Fig.4は、A点とC点を結ぶ中岳第1火口の断面図(前出の地形図による)上に、測定した基準点をプロットしたものである。A点と基準点との距離は290~350m、方位角は最大24°であるので、測器による測定誤差は±1cm以下である。しかし、実際の測量では対象物を特定する時に誤差が見込まれ、今回の観測ではこの誤差は±2'以内と考えられるので、A点と測定点との相対的な高さの差の誤差は高々±20cm以下と推定される。

2.2 写真解析による水位の推定とその誤差

解析には、一部を除いて、阿蘇山測候所で火口観測時に撮影した写真を使用した。火口観測は、1980年から1984年には平均すると、2日に約1回行われているが、中岳第1火口の写真撮影は、5回に1回程度である。野帳に記載された火口の状況から判断すると、この理由の1つは、火口が噴気や湯気でよ

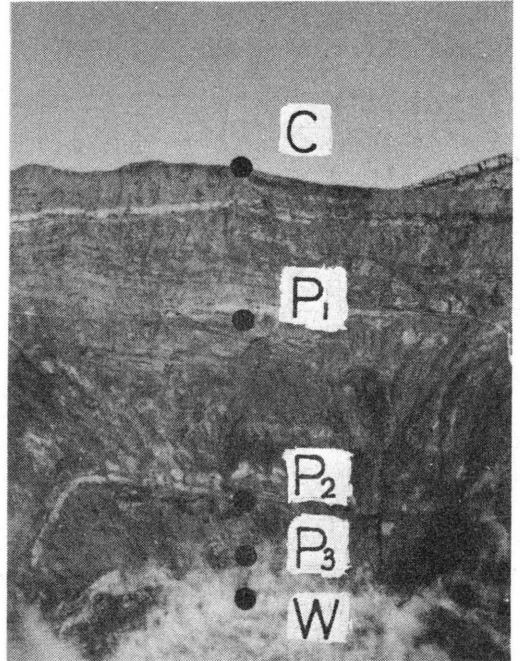


Fig. 3 View of the northeastern wall and the Crater Lake of the 1st Crater in Naka-dake from the datum point A. C, P₁, P₂ and P₃: datum points surveyed by triangulation.

く見えなかったためである。阿蘇山測候所による写真撮影は、中岳第1火口の南西側、北側あるいは東側のある決まった地点からほとんど行われている。今回の解析には、南西側A点付近から標準レンズで撮影した写真だけを使用した。実際解析に使用できた写真は全部で95日分であったので、次節で示すデータは、平均すると20日に1回サンプリングしたデータということになる。従って、数日というような短いタイムスケールの水位の変動はわからないが、2カ月程度あるいはそれ以上の水位の変動について

Datum point	Site A		Site B		Δh	Altitude	Remarks
	<BAQ _i	QAP _i	<ABQ _i	<P _i BQ _i			
C	99° 02' 06"	4° 46' 21"	77° 08' 39"	4° 42' 39"	34.2m	1,311.7m	rim
P ₁	"	5 30 30	76 27 54	5 25 24	33.5	1,244.0	white stratum
P ₂	"	17 58 00	75 30 27	17 38 03	92.5	1,185.0	" "
P ₃	"	21 17 51	75 20 21	20 54 03	107.8	1,169.7	" "
W	"	24 18 36	75 14 39	23 51 24	122.7	1,154.8	waterside

Table 3. Surveyed results of datum points by triangulation.

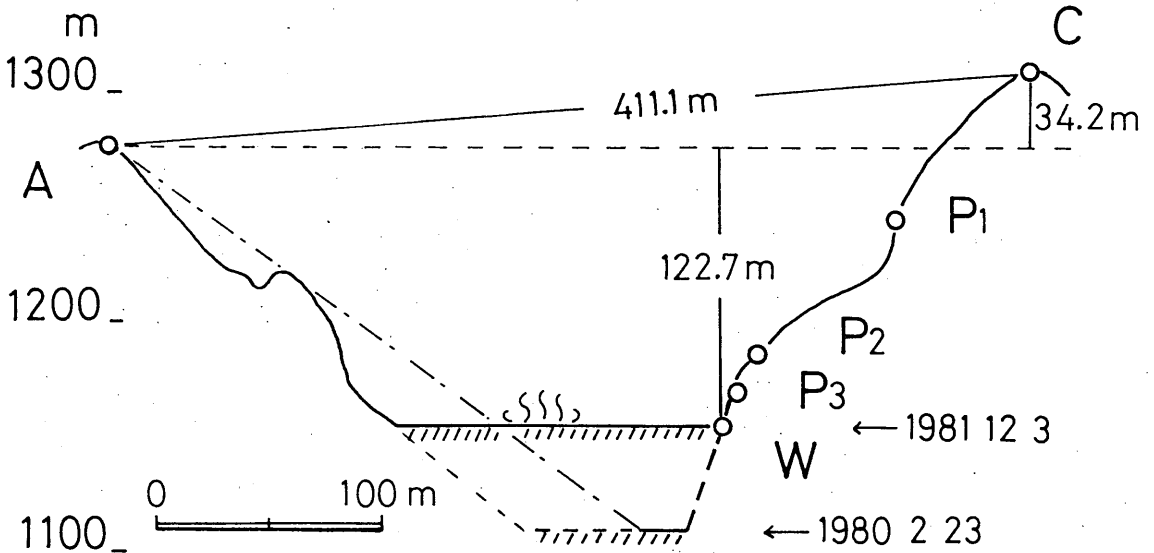


Fig.4 Cross section of the 1st Crater Lake in Naka-dake along datum point A and C (see Fig.2). P₁, P₂, P₃, : datum point. W: water side.

は有効なデータといえる。

解析は、サービスサイズにプリントした写真で行った。まず、写真上 (Fig.3 参照) で P₂ と P₃ および P₃ と W の相対的な距離を測る。次に、三角測量で得た P₂ と P₃ の高さの差を用いて P₃ と W の高さの差を計算する。P₃ と W との距離は、写真上 ± 0.1 mm の精度で読み取った。Fig.4 に示すように、写真撮影地点と P₃ ないし W までの距離は約 290 m、前者から見て P₃ と W のある火口壁はほぼ垂直な関係にあるので、今、1 m の水位変化があったとすると、写真上での水位の相対的な変化は約 0.7 mm となる。従って、写真解析から推定した写真上の基準点 (P₃) と湯溜り表面との相対的な高さの差の誤差は、± 30 cm 以下と考えられる。なお、国土地理院の地形図 (前出) に示されていない海拔 1,154.7 m 以下の部分の北東側火口壁の地形断面は、Fig.4 の点線のようになっていると仮定し、上述と同様にして水位を求めた。1980 年 3 月 23 日の写真を見ると、北東側火口壁の 1,140 m 付近より下は、Fig.4 の点線より垂直に落ちており、求めた値は少し浅目 (北東側火口壁と鉛直線とのなす角が 10° とすると、1,130 m 付近で約 1 m, 1,120 m 付近で約 2 m 浅目) と推定される。

以上まとめると、海拔 1,154.7 m 以上の湯溜り水位の相対的な差の誤差は、± 30 cm 以下である。一方、海拔 1,154.7 m 以下の部分は、1,130 m 付近で約 1 m, 1,120 m 付近で約 2 m 浅目に推定されている。なお、

海拔高度には、A 点と基準点との相対的な高さの差の誤差 ± 20 cm がさらに含まれることになる。

§ 3. 測定結果と水位の消長

Fig.5 に解析に使用した湯溜り写真の例を、またその測定結果を Table 4 に示す。Fig.6 には、湯溜りの水位と阿蘇山測候所の月降水量の時間的な変化を示す。水位は 1980 年 2 月 20 日に湯溜りが発見されて以来ぐんぐん上昇し、同年 12 月 21 日までに約 40 m 上がり海拔 1,152.5 m に達した。その後、1982 年 6 月まではほぼ安定していたが、同年 7, 8 月の多量の降水で再び上昇し、1982 年 10 月 13 日には最高水位 1,163.0 m に達した。1983 年にはいると、1 月頃から水位は下降し始め、5 月 26 日には 1,151.1 m となった。6, 7 月の梅雨時の降水で水位は再び上昇し、7 月 18 日には 1,157.8 m となった。1984 年にはいると、4 月頃から水位の減少がみられ、6 月の多量の降水で一時的に水位はやや上昇したものの、減少は続き、Fig.5 に見られるように 9 月 16 日には火口底の一部が露出するに至った。その後も湯溜りの減少は続き、1985 年 4 月 16 日には、部分的に残っていた湯溜りも消滅しているのが確認された。

§ 4. 水位変化の要因

湯溜りの水位の変化が火山活動とどのような関連があるかということは興味のあるところである。湯

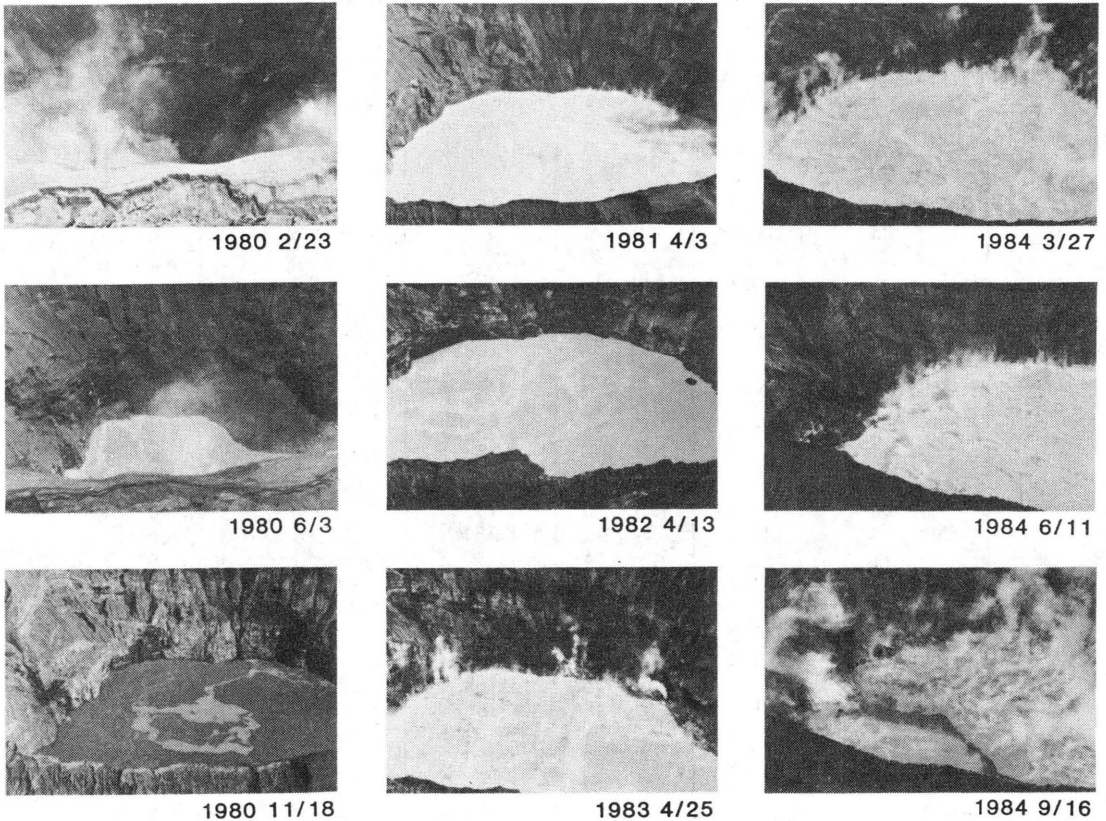


Fig. 5 Examples of photographs of the 1st Crater Lake in Naka-dake used for estimating water level.

溜りの水位を変動させる要因は、火山活動と関連したものとはそれ以外のものの2つに分けられる。前者には、例えば、

- イ) 火山体内部から供給される水蒸気
- ロ) 火山体内部から供給される熱による蒸発
- ハ) 火山活動に伴う火口の地殻変動

等が考えられる。後者には、

- ニ) 降水による雨水の流入
- ホ) 地下水の流入
- ヘ) 地下への漏水

といった水収支的なものと、

- ト) 湯溜りへの土砂の流入や火口壁の崩壊等による火口の変形

等があげられる。湯溜りの消長と火山活動との関連を知るためには、これらすべての要因についてその寄与を知る必要がある。しかし、それは現実には不可能であるので、ここでは明らかに寄与したと考えられる次の2つの要因、すなわち、降水と湯溜りへ

の土砂の堆積について検討しておく。

4.1 降水により流入する雨水量

Fig.6をみると、多量の降水のある梅雨時に水位が上昇しており、当然のことながら、降水は水位の変動に重要な役割を持っている。今、面積降水量を $P(\text{mm})$ 、中岳第1火口の流域面積を $S(\text{m}^2)$ 、流出係数を α とすると、該火口に流れ込む雨水の量 $V(\text{m}^3)$ は

$$V = \alpha \cdot P \cdot S \times 10^{-3} \quad \dots\dots (1)$$

と表わせる。ここで、面積降水量は中岳第1火口の西約1.2kmにある阿蘇山測候所の降水量で代表でき、また、流域面積は中岳火口の地形図あるいは火口底の雨水の流れた跡の観察などから、Fig.7に示す中岳第1火口、第2火口および第3火口を含む地域と推定される。この地域の面積を求めると約23万 m^2 となる。なお、流域面積は正確には湯溜りの面積を差し引いたものであるが、本論では湯溜りを含めた面積を流域面積とみなして議論を進める。湯溜りの表

Date	Height	Date	Height	Date	Height
1980		Apr. 7	1,155.7 m	Nov. 13	1,162.7 m
Feb. 23	1,112.8 m	11	1,155.6	Dec. 4	1,162.3
25	1,114.2	18	1,156.0	1983	
Mar. 19	1,120.9	27	1,155.2	Jan. 11	1,161.8
27	1,121.6	May 1	1,155.2	26	1,160.5
30	1,121.6	8	1,155.0	Apr. 2	1,155.6
Apr. 8	1,124.3	June 6	1,155.2	3	1,155.6
23	1,126.0	24	1,154.0	18	1,153.4
26	1,126.7	July 28	1,153.5	23	1,155.6
May 28	1,129.2	Aug. 10	1,154.4	24	1,155.6
31	1,129.7	20	1,153.8	25	1,155.6
June 3	1,130.4	24	1,153.7	30	1,155.6
10	1,130.7	Sept. 1	1,153.7	May 9	1,153.4
21	1,133.4	5	1,153.8	26	1,151.1
28	1,133.7	Oct. 12	1,154.7	June 3	1,151.9
July 4	1,136.7	14	1,154.7	22	1,153.4
5	1,136.7	Dec. 3	1,154.8	July 18	1,157.8
16	1,137.9	1982		Aug. 20	1,157.8
20	1,137.9	Jan. 3	1,154.8	Sept. 3	1,157.4
Aug. 6	1,140.0	11	1,154.8	Oct. 1	1,157.0
11	1,140.0	Apr. 1	1,156.3	Nov. 21	1,156.5
Sept. 1	1,146.1	11	1,156.3	1984	
9	1,145.9	13	1,156.3	Feb. 21	1,159.1
Oct. 15	1,148.9	23	1,156.3	Mar. 13	1,160.1
Nov. 14	1,151.9	May 18	1,156.6	27	1,159.4
15	1,151.9	June 5	1,156.3	Apr. 15	1,160.1
18	1,151.8	15	1,156.3	May 30	1,156.8
Dec. 21	1,152.5	21	1,159.4	June 11	1,157.1
1981		22	1,159.3	27	1,157.1
Jan. 23	1,154.7	26	1,161.9	July 31	1,154.6
Mar. 17	1,155.3	27	1,161.9	Aug. 8	1,152.4
22	1,155.4	28	1,161.9	Sept. 16	1,151.4
23	1,155.4	Sept. 6	1,161.9		
Apr. 3	1,155.6	Oct. 13	1,163.0		

Table 4. Results of water level of the 1st Crater Lake in Naka-dake estimated by photo analysis.

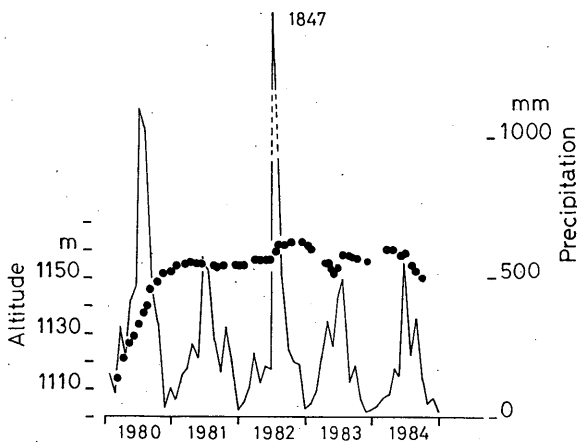


Fig. 6 Water level changes of the 1st Crater Lake (closed circle) and monthly precipitation observed at Asosan Weather Station.

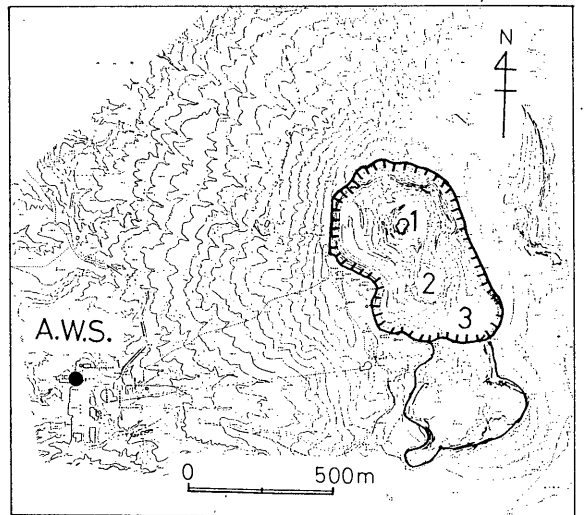



Fig. 7 Topographical map of Naka-dake.  show drainage area of the 1st Crater Lake in Naka-dake.

面積は大部分の期間約2万 m^2 であったので、 α の値は $0.1 \leq \alpha \leq 1.0$ の範囲にあることになる。(1)よりVは

$$V = 2.3 \times 10^2 \cdot \alpha \cdot P \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わせる。流出係数 α は、流域の地形や植生あるいは降水強度などによりかなりバラツキがあり、一概には定められない。しかし、例えばひと雨で多量の降水があり、その前後の水位と表面積がわかれば流出係数 α を経験的に推定できる。今回の場合、適当な例は1982年7月22日と26日の水位とこの間の降水量543mmの1例だけであったが、これから α を求めると約0.5となる。ただ、多量の降水があった時には、その後湯溜りへ地下水が流れ込んでいるのが観測されているので、長期的な流出係数はもう少し大きいと推定される。

今、100mmの降水があった場合の中岳第1火口へ流れ込む雨水の量は、 $\alpha = 0.8$ のとき約1万8千 m^3 、 $\alpha = 0.5$ のとき約1万2千 m^3 となり、湯溜りの水位が1,155mとすると、表面積は約2万 m^2 (土肥・大田, 1984)であるので、それぞれ約0.9m, 0.6mの水位変化をもたらすことになる。

4.2 湯溜りへ流れ込んだ土砂の量

1980年2月23日の写真と1984年9月16日の写真(Fig.5参照)を比較すると、中岳第1火口には多量の土砂が堆積したことがわかる。1984年11月6日の火口写真から、火口底の海拔高度は約1,145mと推定され、1980年2月23日の火口底と比べると約32m浅くなっている。1980年2月23日頃の中岳第1火口はFig.4の破線のようなすりばち型をしていたと仮定し、堆積した土砂の量を見積ると約40万 m^3 となる。土肥・大田(1984)によれば、1979年9月6日の爆発で消失した中岳第1火口の体積は87.8万 m^3 で、これと比較するとその約半分の量が埋め戻されたことになる。

§ 5. 考察

Fig.8は、湯溜りの量(中岳第1火口はFig.4の破線のようなすりばち型をしていたと仮定して湯溜りの水位から求めたもの、堆積した土砂の量を含む)と降水により流れ込んだ雨水量の積算($\alpha = 0.5$ と0.8の場合の推定量)を示したものである。もし、中岳第1火口で、漏水と湯溜り表面からの蒸発がなければ、湯溜りの量は流入する雨水の積算曲線以上に増加するはずである。湯溜り生成初期の1980年から1981年半前には、湯溜りの量の増加はほぼ $\alpha = 0.5$

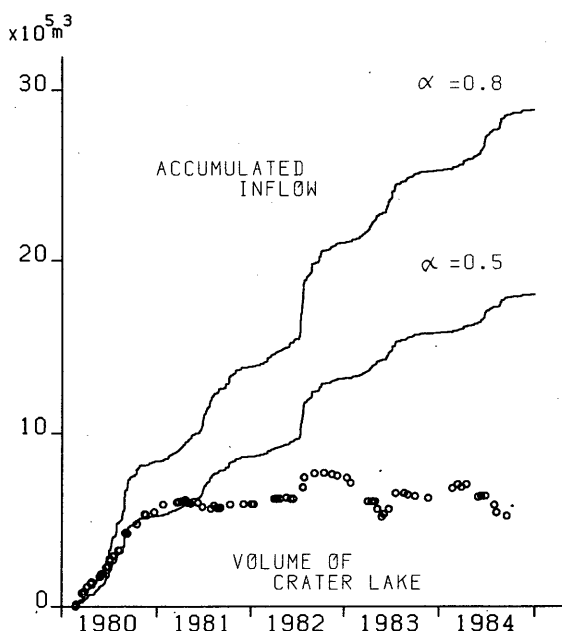


Fig.8 Lake water mass changes (open circle) and the cumulative surface inflow (solid line) estimated by the precipitation at Asosan Weather Station.

の積算曲線と一致している。しかし、その後は湯溜りの量は大局的には一定しており、単純に降水だけから湯溜りの量の変化を説明することはできない。

Fig.9には、湯溜り水位、阿蘇山測候所の日降水量、土砂噴出活動の有無、湯溜り表面温度および孤立微動の日別発生回数を示す。湯溜りの表面温度は、湯溜りが発見された直後の1980年3月27日にはすでに50 $^{\circ}\text{C}$ で(気象研究所; 1984)、その後も数10 $^{\circ}\text{C}$ の高温であった。中禮(1985)によれば、この高温の湯溜り表面からの蒸発量は約3~20 $\text{cc}/\text{cm}^2 \cdot \text{day}$ で、通常の湖沼からの蒸発量に比べて約1~2桁大きく(詳細は「火山」に投稿準備中)、この量は降水量と同等の影響を湯溜り水位にもたらす。すなわち、降水量と蒸発量の収支が湯溜り水位の変動を支配する最も大きな要因と推定される。

湯溜りを高温に保つためには、火口底から湯溜りへ多量の熱エネルギーが供給される必要があり、また、蒸発量の増減すなわち湯溜り水位の変動は、この熱エネルギー量を反映したものが期待される。第3節で述べたように、1983年1月頃から6月頃にかけてと1984年4月頃から9月頃にかけて急激な水位の低下があった。Fig.9をみると、前者は湯溜り表

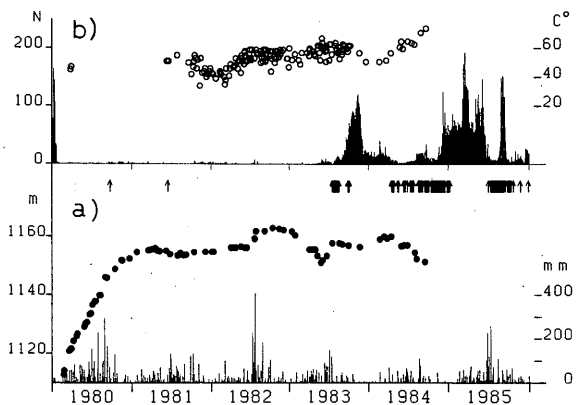


Fig. 9 a) Water level changes of the 1st Crater Lake (closed circle) and daily precipitation observed at Asosan Weather Station. ↑ : Mud ejection.
b) Surface temperatures of the 1st Crater Lake water measured by infrared radiation thermometer (open circle) and daily number of isolated volcanic tremor observed at Asosan Weather Station.

面温度がそれ以前に比べてやや上昇した時期に相当し、後者は湯溜り表面温度の上昇や連日のような土砂噴出活動の発生など、明らかに火山活動が活発化していった時期に相当する。これらのことは、火口底から湯溜りへ供給される熱エネルギー量の増加、すなわち、火山活動の活発化に伴い湯溜りの温度が上昇し、蒸発が盛んとなり、その結果、水位の低下をもたらしたことを示唆する。又、この2回の急激な水位の低下が、いずれもその後の孤立型微動の群発にそれぞれ前駆しているようにみえることは興味深い。

以上、述べて来たように、中岳第1火口湯溜りの消長は、火山活動、特に火口底から湯溜りへ供給される熱エネルギー量を如実に反映していると推定される。湯溜り水位の観測は、表面温度の観測とあいまって、火山体内部から放出される熱エネルギー量

を評価する有効な方法であるばかりでなく、火山活動を予測する上でも貴重な情報である。

謝 辞

解析をすすめるにあたり、阿蘇山測候所の貴重な火口観測写真と野帳を使用させて頂きました。記して高橋計所長および職員の皆様に心より感謝致します。

参考文献

- 阿蘇山測候所(1967):昭和40年10月下旬~41年5月上旬阿蘇火山調査報告,福岡管区気象台要報,第22号,1~26.
- 阿蘇山測候所(1976):九州地方の火山活動状況報告,福岡管区気象台要報,第31号,5~44.
- 小坂丈予・平林順一(1985):草津白根火山1982~1983年の活動と火山ガス,湖水,湧水の化学成分変化,第2回草津白根火山集中総合観測報告書(1984年9月~10月),3~17.
- Hurst, A. W. and R. R. Dibble(1981): Bathymetry, Heat Output and Convection in Ruapehu Crater Lake, New Zealand, J. Volcanol. Geotherm. Res., 9, 215~236.
- 土肥規男・大田安雄(1984):-1979年9月の噴火前後に作成された地形図の比較による-阿蘇山中岳第1火口の地形変化,阿蘇火山の集中総合観測(第2回)報告(1981年8~12月),71~81.
- 中禮正明(1985):阿蘇山中岳第1火口湯溜りの消長と放熱量,火山第2集,30,94.
- 気象研究所(1984):阿蘇山の1979,1980年の熱的状态と火山活動,気象研究所技術報告,第12号,145~157.
- 須藤靖明・山田年広・西潔・井口正人・高山鉄朗(1984):阿蘇山測候所火山中岳火口内の熱的調査-地上赤外熱映像装置による観測-,阿蘇山測候所火山の集中総合観測(第2回)報告(1981年8~12月),57~64.