タール火山 1965 年の岩漿性水蒸気爆発

中 村 一 明*

The Magmatophreatic Eruption of Taal Volcano in 1965, Philippines

By

Kazuaki NAKAMURA

Abstract

Taal Volcano, situated at SW part of Luzon Island, Philippines, erupted during 28th to 30th, September 1965 after fifty-four years of quiescence.

As an example of a magmatophreatic eruption of basaltic volcano, this paper deals with the course and the ejecta of the eruption with special reference to the horizontal blasts, based both on a paper by MOORE et al. and on the writers field observation. Topography of the island and historical records of eruption are examined from the same viewpoint by literature survey.

Taal Volcano is an island in Taal Lake and is 25 km² in area with a summit crater 2 km in diameter. The volcano island is composed almost of pyroclastic materials which are the product of past magmatophreatic eruptions. Sixteen craters are found on the slope of the main flat cone and they are wide in proportion to their height suggesting their origin to be explosive eruptions.

No historical record describes quiet effusion of lava flows, but it indicates explosive nature of eruption.

Essential materials responsible for the present eruption was titanaugie-olivine-basalt. The eruption continued for about 60 hours and no lava flow issued. The area of about 60 km² was covered by new pyroclastic ejecta more than 25 cm thick. New elongate explosion crater was opened by the present fissure explosion on the southwestern slope of the main cone.

From the base of explosively rising eruption clouds, horizontal blasts spread out in all directions. The blast is turbulent mixture of mud, lapilli, blocks and crept on the surface of the ground with hurricane velocity and near the crater it spilled over a ridge of 300 m in relative height (summit crater rim). But it tended to spread on lower places as it proceeded further away from the crater. Parts of the blast crossed the lake surface over 2 km and caused much damage to the villages at opposite lakeside. The blasts left giant ripples on the surface of the deposits within 2 km from the crater. The wave-length of the ripples decreases regularly from 15 m to 3 m as the distance from the crater increases.

The blasts are regarded to be a low temperature pyroclastic flows. The mobility of the

* 東京大学地震研究所, Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

flow is thought to be maintained only by the initial formation of a fluidized system. Because, no delayed vesiculation is expected since the essential material is basaltic in composition, and also because the internal turbulence caused by envelopment of cold air is not great enough, since the temperature of the flow was only about 100°C or below. Magmatophreatic explosion through layers of pyroclastics seems to have been a favourable condition for the initial formation of the fluidized system.

I ま え が き

1965年9月28日早朝から30日にかけて、フィリピン・ルソン島の南西部にあるタール火山島で噴火がおこった。噴火をおこしたマグマはチタン輝石・カンラン石玄武岩(久野の分類による IVb 型)であつた。したがつて、マグマの化学組成だけから考えると、穏やかないわゆるハワイ式の噴火が期待されるが、実際には溶岩の流出はなく、噴出物はすべて破片状のものであつた。その結果 60 km² におよぶ地域が 25 cm 以上の火砕堆積物(主として火山灰)におおわれた。

爆発に伴つて、上昇する噴煙柱の下部からは、1種の火砕流(ただし低温)である強力な横なぐり噴煙(horizontal blast)が発生したことも今回の噴火の著しい特徴であつた。この横なぐり噴煙は多量の火山灰・礫を懸濁しており、高速で噴火地点からすべての方向に広がり、一部は湖面上を 2 km 以上も走り、対岸の部落に大きな被害を与えた。死者は 150 人にも達したという。噴火がこのような様式をとつたのは、今回の噴火が岩漿性水蒸気爆発(magmatophreatic explosion)であつたためと考えられる。

私は噴火後、約1週間(10月7日~13日)の現地調査を行なう機会をえたので、この調査および他の報告¹⁾に基づいて今回の噴火のあらまし*を記し、玄武岩質火山の水蒸気爆発の例として参考に供したいと思う。同じ観点から、主として文献²⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾によつてタール火山の地形・過去の噴火なども概観してみる。また低温の火砕流の流動機構についても議論する。

噴火直後の困難な事情下にあつたにもかかわらず、フィリピン火山委員会の諸氏、特に Chief の Arturo ALCARAZ 教授、委員の Rogelio T. DATUIN 氏は私の調査に多大の便宜を与えて下さつた。また U. S. Geol. Surv. の James G. MOORE 氏は私に今回の調査のきつかけを与えられ、現地でも2日間同氏と共同で調査を行なうことができた。マニラの日本大使館の方々、特に竹内春海大使・木村康弘一等書記官にも便宜を計つていただいた。出発にあたっては、国会図書館の坪井忠二氏、地震研究所の萩原尊礼・水上武・森本良平の諸先生にお世話になった。また原稿は地震研究所の村井勇・松田時彦のお2人に読んでいただいた。以上の方々に厚くお礼申しあげたい。

なお費用の大部分は学術振興会から支給された。

II 調査の経過

9月28日朝、日本の新聞にもタール火山の噴火が報じられ、死者は数千人にも達するのではないかといわれた。ニュースによつて判断するかぎり、この噴火は相当な規模のものと考えられた。この火山の過去の噴火では、さして高温でない横なぐりの噴煙が発生しており、また火山豆石の降下も知られている。したがつて今回の噴火でも同様のことがおこつた可能性があり、また死者の多さから考えて何かよく知られていない現象がおこつたのではないかとも思われ、すみやかな調査の必要が感じられた。

同日午後、水上教授よりタールへ行く意志の有無を問われた。費用は日米科学協力の1つである、太平洋地域の火山研究から支出され、在日中の J. G. MOORE 氏も行く予定とのことであつた。

* 詳しい報告はいずれ火山委員会 (Commission on Volcanology, National Research Council of the Philippines) からだされるものと期待される。

29日朝、タールへ行く決心をし、直ちに出発の手続きを始めた。実際には10月4日に出発が可能であったが、航空機の手配を10月6日にしてあつたので、マニラに着いたのは6日午後であつた。6日はマニラに1泊して日本大使館と連絡をとり、7日朝 Bureau of Mines* の車で現地に向かい、同日午後にはタール火山島につき新噴出物をみる事ができた。以後13日の午前までタール湖南西岸の San Nicolas という小部落の民家に、火山委員会のスタッフとともに起居して調査を行なつた。この間、火山委員会は行政的な仕事や後に記す山頂火口湖の温度測定などにあたり、新噴出物の調査・観察には特に分担のとりきめをしたわけではないが、MOORE 氏と私があつた。

1人で他国に、しかも招かれもしないのにとびこんだにもかかわらず順調に調査を行なうことができたのは、まったく火山委員会のご好意によつてゐる。対日感情も予期に反してよいように思われた。しかしフィリピン人の私に対する待遇の大部分は、日本の先輩火山学者の業績のおかげであり、少なくとも火山研究の面でのアジアの先進国としての日本に対する期待が大きいことにあらためて驚かされた。

先に記した MOORE 氏がすでに10月1日から調査を行なつてゐたことも幸いであつた。当初共同調査を予定していたものが、突然大統領命令によつて9月30日に、軍用機で東京をたつたのである。

残念だつた点は、日米科学協力という枠でしかこうした場合の費用がでなかつたことである。UNESCO の緊急委員会が早く形を整えて動きだすことが期待される。

III 火山島および周辺の地形

タール火山島はタール湖の中央やや北西よりに位置し、面積は約 25 km² である。タール湖はマニラの南約 60 km にある面積約 250 km² の淡水湖で、最深部は湖の南東部にあつて 97 m である** (第1図)。

湖の周囲の、北方の Tagaytay ridge と南東方の Mt. Macolod 付近には、いかにもカルデラ壁を思わせる急崖があり、外側から湖に向かってゆるやかに高まつてきた地形がスパッと断たれている。崖を湖側からみると、上端はほぼ平らで、壁には上面に平行な2・3の成層がみえる。特に Tagaytay ridge の北には2°以下の緩斜面が、ほとんどマニラ湾の近くまで 30 km 近くも続いている。またタール湖の周辺には浅い水底堆積物と思われる火砕岩 (Taal tuff?) が分布している。おそらくこ

れらの理由からタール湖の凹地をカルデラだとする考え⁶⁾もある。しかし、もしカルデラだとしても単純なものではないだろう。それはもつともカルデラ壁らしくみえる Tagaytay ridge が凹地の外にまで伸びていること (第1図) からもうかがわれる。

湖水は南西部から Pancipit 川を通じて Balayan Bay に排水されている。湖岸の大部分、特に北東部と南西部は高さ 200 m 以下の丘陵地である。湖岸にのぞむ山脚も入りこんでいてリアス海岸を思わせる。一方湖水面高度は海拔 2~3 m にすぎない (同様な関係はタール湖北東の湖、Laguna de Bay についてもみられる)。湖水が海水より軽いこと・湖の深さなどを考慮すると、この高度差は地下で湖水と海水と通じているとしても十分説明できる。したがつてもしそうであれば、この付近一帯の0m前後の高度を占める岩石はかなり透水性の高いものと考えられる。タール湖岸のリアス式山脚は、後水期の海進と同時に進行

第1図 位置図。破線はタール湖をかこむ稜線。点線は新噴出物 (主として火山灰) の1cmの等厚線。

* 鉱山局。この組織などについては次の報文に詳しい。高柳洋吉 (1965) : フィリピン の 地 質 学 —— そ の 研 究 体 制 と 現 状 —— 地 学 雑 誌, 74, 42-49

** The Board of Technical Survey and Maps 発行の5万分の1地形図による。

したであろう湖面の上昇によつて生じたものと考えられる。もしそうならば、タール湖の凹地はそれ以前に生じていたと考えなければならない。

タール火山島も、新爆裂火口壁その他でみるかぎり、ほとんど中粒～細粒の火砕物質からできている。すなわち explosivity はほとんど 100 に近い。本質物質が粘性の小さい玄武岩であり、マグマに溶けていた水だけではとうていこのような爆発性の噴火は期待できないことを考えると、過去においても今回と同様に、マグマに溶けていた以外の水(地下水など)と接触したための水蒸気爆発が卓越していたものと考えられる。このことはIVでのべる噴火の記録からもわかるが、火山島の地形からも推定される。

島には今回新たにできたものを加えて 17 個の火口があり、主火口を含めていずれも比高のわりに火口の直径が著しく大きい*。これは、これらの火口を生じた噴火が爆発性であつたことを語っている。その地

第2図 タール火山島の地形図⁶⁾。等高線間隔 25 m。空中写真(10月8日 U. S. Navy 撮影, 縮尺 360 分の1)から読みとつた側火口を破線で示した。タール湖の入り江となつた新爆裂火口とその中の碎屑丘も示してある。

1) 溶岩の流出したという記録はなく、噴出物はすべて碎屑性のものであつた。また噴火はかなり爆発的で、地震や大きな爆発音を伴つたようである。これらはマグマが玄武岩質であることを考えると水蒸気爆発が卓越していたことを示すのであろう。

2) 2回ずつ組になつて起こっている噴火が多いようにみえる。組になつておこる2回の噴火の間隔はとりよにもよるが1～9年である。したがつて、もしこのことが今回の噴火にもあてはまるとすると、今後数年のうちにもう一度噴火が期待されることになる。

また同じような大きさの噴火がつづいて2回おこるということは、地下に蓄積されたマグマが一度に効果的に出さつてしまわない機構があることを示しているのではないだろうか。そのような機構として、水

形はオアフ島のダイヤモンドヘッドなどを想起させる。火口の面積は計約 7 km² で、実に島の面積の 27 % に達する。

島は全体として皿をふせたような形をしており、山頂(最高点海拔 300 m)には径約 2 km の主火口がある。火口内には大きな湖がある。この火口湖と外側のタール湖も地下で結ばれているらしい。それは両湖水面がほぼ等しい高さであることのほか、1911 年の噴火で深くなつた山頂火口内にその噴火後タール湖の水が島の下を通つて流入した³⁾ことからわかる。

したがつて、島全体もタール湖水面のレベル以下は水でひたされたような状態になつており過去において水蒸気爆発がおこつたのも当然と思われる。全く同じことが今回の噴火についてもいえるであろう。

IV 過去の噴火

文書による噴火の記録は 16 世紀の後半から残されている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が、たしかな噴火記録は 18 世紀以後のものようである。第 1 表に、それらの噴火の年代・継続日数・場所などを示す。これらの記録には不十分な点も多いが、つぎの江となつた新爆裂火口とその中の碎屑丘も示してある。 ような諸点がよみとられる。

* 北西端にある凝灰岩丘 (Binintiang Malaqui) だけが例外である。

第 1 表 過去の噴火の年代・継続日数・場所など。

Date	Duration (day)	Site, etc.
1965	3	flank (fissure)
1911	4	summit
1904	10+?	"
1903	?	" (solfatic activity)
1878	4	?
1874	1?	?
(1873)	?	
(1842)	?	
(1825)	?	summit ?
1808	?	summit
(1790)	?	" ?
1754 Nov.1~Dec.3	33	summit
Mar.15~Sept.25	130	"
1749	2	" and flank (fissure)
1731	2~3	flank (lake)
1729	?	?
1716	4	flank (fissure in SE~E lake)
1715	?	?
1709	?	?
1707	?	flank (Binintiang Malaqui)
1645	?	?)
1641	?	?)
(1635)	?	?)
(1634)	?	?)
(1605~11)	?	?
1591	?	?
1572	?	?

による火道上部のすみやかな冷却固化ということも考えられる。

3) 今回の噴火もそうであつたように、噴煙柱に稲妻を伴つたものが多い。また大雨が噴火中～後に多い。これは多量の水蒸気と十分細かい火山灰を含んだ噴煙のためかもしれない。

4) 継続日数だけから判断すると今回の噴火の規模は、歴史時代の噴火の中程度の大きさのように思われる。

5) 過去 200 年間は山頂火口からの噴火のみであつたが、今回の噴火は 216 年ぶりの側噴火であつた。

6) 過去に起こつた 4 回の側噴火のうち少なくとも 2 回は割れ目噴火であつた。今回の側噴火も割れ目噴火であつた。したがって割れ目噴火はタール火山の側噴火の様式としては普通のものなのであろう。

V 噴火の経緯*

今回の噴火は 1911 年の噴火以来 54 年ぶりである。噴火前の異常現象としては、タール火山山頂火口

* 特にこの章は文献 1) による部分が多い。

湖の温度上昇があげられる。湖水の平均温度は1964年には 30°C で、外側のタール湖水温よりわずかに高い程度であつた。1965年に入るとしだいに上昇し、6月には 33°C 、7月21日には 45°C に達した。以後はこの温度を保っていたが噴火前の最後の測定である9月25日の測定では 43°C とやや下降した。噴火後の10月5日にはやはり 43°C であつた。新火口北西1.5 kmの火山島の湖岸には火山委員会の観測所があり、明石製作所の3成分の煤書き地震計(倍率250)があり observer* が常駐していたが、湖水面などによる傾斜変化・地震活動の異常等は知られていない。

今回の噴火は約60時間継続し、全体の経過はおだやかな噴火で始まり(1~1.5時間)、最盛期をむかえ(約8時間)、しだいにおとろえていく(約50時間)という比較的単純なものであつた。

噴火地点は南西山腹に1列に並んでおり、割れ目噴火であつた。最初の噴火は9月28日午前2時ごろ、割れ目のうち最も山頂に近いあたりからおこつた。

最初の1~1.5時間は、比較のおだやかな、ストロンボリ式に近い噴火であつたらしい。しかしスコリア~火山弾はオレンジ色ではなく、赤色に見えたという。すでに水に接触したためにいくらか温度が下がっていたものと思われる。

つづく約8時間(0325~1100)が噴火の最盛期であつた。非常に爆発的で、噴煙の最高は15~20 kmに達した。噴煙中にはたえず稲妻がみられた。この上昇する噴煙柱の下部から、それとは別に、放射状に水平方向に広がる高速の横なぐり噴煙があり(口絵写真)、この噴煙も多量の噴出物を運んだ。人畜の被害や家屋の倒潰、樹木の折れ、葉・小枝のはたきおとされなど、被害のかんりの部分はこの横なぐり噴煙によって生じている。

この最盛期の爆発的噴火によつて、火口列の位置に細長い爆裂火口ができ、そこにタール湖水が入りこんで細長い入り江となつた。この火口は11時にパイロットによつて最初に確認された。したがつて少なくともこれ以後の噴火は浅い水底でおこつたわけである。

28日11時から噴火の終了30日15時50分まで、爆発は徐々におとろえていった。もはやごく小規模なもの(口絵写真)のをぞいて横なぐりの噴煙を伴うことはなかつた。この期間に新火口の中にスコリア・火山弾等よりなる小さな破屑丘ができた、30日16時以後は新破屑丘の火口湖から水蒸気が立ちのぼるのみで、湖水温も徐々に下がつていった。しかし10月12日になつても爆裂火口内の各所、特に破屑丘の内外には多数のあわが連続的に水面に達しているところがあつた。あわのガスは無色無臭であつた。

VI 新 噴 火 口

噴火の最盛期に生じた爆裂火口の大きさは約 $1.5\text{ km} \times 0.3\text{ km}$ である。火口はタール湖とつながつて細長い入り江になつた。火口壁は火口のいちばん奥で最も高く、150 mに達する。火口壁には、今回および過去の噴火による成層した凝灰岩~火山礫凝灰岩層が露出している。

火口の容積——すなわち噴火によつて吹きとばされた旧山体の体積は次のようにして約 $4.8 \times 10^7\text{ m}^3$ と算定された。まず湖面上の火口壁の高さを平均50 mとみなす。火口内の新噴出物の厚さを等層厚線図(第3図)から15 mと見積もる。火口の湖水面下の深さは、噴火後のフィリピン海軍の測定によると最深50 mであるので、平均30 mとみなす。以上の値の和に火口の面積(0.5 km^2)をかけると $4.8 \times 10^7\text{ m}^3$ が得られる。

新噴火口の北東隅には、噴火の末期にできた小破屑丘がある。湖面での底面の径は約250 m、湖面からの高さは18.5 mである。破屑丘の中央には径約150 mの火口がある。破屑丘の体積は約 $1 \times 10^6\text{ m}^3$ と推定される。

* Mr. Conrado ANDAL. 噴火の初期の様子は主として彼の談話による。彼は、風向き・噴火位置などを考慮し、火山委員会のボートを使つて付近の島民を安全にひなんさせた。

VII 噴出物

今回の噴出物はすべて破片物質であり、溶岩は流出しなかった。破片物質の過半は類質（～異質）岩片で、すでに火山体を構成していたもの、およびその下位の（おそらく付近一帯の基盤をなしている）凝灰岩～火山礫凝灰岩であつた。噴火をもたらしたマグマの破片一本質物質は全噴出物量の半分以下であつた。

これらの破片物質の運搬された様式には、本質・類質を問わず次の3つが認められる。

- 1) 弾道曲線を描いて着地した大きな岩塊。
- 2) 上昇する噴煙によつて高空に達し、風によつて吹き流され徐々に降下したもの（降下堆積物）。
- 3) 上昇せずに、地面をはつて高速で四方に広がる噴煙（横なぐり噴煙）によつて運ばれたもの。

運搬様式のいかに問わず、噴出物の分布を厚さで示したのが第3図である。これらの噴出物は、噴火前の地表面を指示する土壌の上に堆積している。

本質物質の噴出は噴火の初期と末期、特に末期に多かったことが堆積物の断面から知られる。初期のものは赤色破片の目撃からも知られるが、火山島西岸の新火口入り江の北1～1.5 km 付近の堆積物最下部にも存在する。ここでは最大径8 cm の、下面がもとの地表面と平行にのびた spatter がみられる。

末期のものは主として火口内に落下して碎屑丘をつつている。大きさは最大 50 cm までであり、不規則な形をした牛糞状火山弾やその破片が多いが、通常のスコリア丘のように agglutinate していない。ごくまれに紡錘形に近いものもある。表面は凹凸が多く、一部パン皮様の割れ目を持つものもある。もとの表面には急冷縁がよく発達していて外部ほど緻密である。表面から5 mm 以内くらいはみがくとき黒褐色のつやがあり、1 mm 以下の割れ目がこまかく入っている。表面から1 cm より内側では気泡の数も大きさもぐつと増す。大きなものの内部は陸上噴火のスコリアと同じ組織をしている。

岩質は玄武岩質、斑晶は斜長石・チタン輝石・橄欖石で20%くらいである。発泡度は上記のように部分によつて異なるが、特によいものは湖水に浮いて流れた。噴火後約2週間たつても、湖水表面にところどころ群をなしていた。

類質岩片がかなり多いことは、山体が $4.8 \times 10^7 \text{m}^3$ も吹きとばされている事から明らかであるが、本質物質に対する量比を堆積物から直接きめるのはむずかしい。半分以上という推定は、全噴出物量（約 $9 \times 10^7 \text{m}^3$ ）とそれぞれの密度比から算出されたもので、各地で断面を観察して得た印象と矛盾しない。かりに測定後地層化するまでに新噴出物が2割だけ体積を減ずるものとする（ $(9 \times 4/5 - 4.8) \times 10^7 = 2.4 \times 10^7 \text{m}^3$ ）が本質物質の体積となる。

異質岩片とみられるものは少ないが、黄鉄鉱を含む青緑色の泥岩・火山礫凝灰岩（最大径3 m）などがある。泥岩には細かな成層があり、湖底の堆積物と思われる火山礫凝灰岩は岩片として、黒曜石・軽石・溶岩・炭化木片などを含み、ALCARAZ 氏によれば、湖岸一帯に分布するものとよく似ているという。おそらく火山島の基盤をなす、IIIで推定した多孔質岩の一部に当たるものであろう。

火口から約3 km 以内では大部分の噴出物が横なぐり噴煙で運ばれたものと推定される。この範囲内で

第3図¹⁾ 新噴出物の厚さ (cm)。
黒点は測定点

は横なぐり噴煙で運ばれたと思われる堆積物が露頭観察でも主部を占めており、第3図の等層厚線も著しく地形の支配をうけていることがそれを示している。

横なぐり噴煙堆積物と考えられるものは、数m~数十 cm の明瞭な成層を示し、各層は淘汰不良であるが、弱い grading を示し、上部では細粒火山灰が多く下部では火山礫の多い傾向がみられる。このような特徴は、大小さまざまな岩片・火山灰が一团となつて運ばれ、速度のおとろえとともに重いものから順に定着していったことを示している。

成層面は数~数十 m の波長でうねっている(口絵参照)。その振幅は1 m 程度である。所によつては成層面を下位の堆積物がわずかに侵蝕されている。これらは後述の横なぐり噴煙による巨大な砂紋が次々に重なつたための形態である。

火口から2~3 km 以内の、横なぐり噴煙堆積物の多い範囲では、明瞭な降下堆積物は新噴出物の上部と下部、特に上部に多い。降下堆積物は横なぐり噴煙の堆積物とちがつて下位の堆積物を侵蝕することなく平行に堆積し、多量の火山豆石を含んでいる。豆石は径1 cm くらいのものが普通であるが最大のものは径2 cm に達する。豆石は球形のものばかりでなく、その破片も多い。また球状でも多少とも上下方向につぶれたものが多い。

噴火時の風向は低空では東北東、高空では東であつたために、降灰地域は長く西にのび(第1図)、1 cm の等厚線は東方へは火口から6 km であるのに対し、西方へは35 km に達している。

VIII 横なぐり噴煙

今回の噴火に伴つた横なぐり噴煙についてはすでに簡単に報告されている^{1,2)}が、噴火現象としてはいわゆる“熱雲”との類似点が多く興味あるものなので、多少観点をかえてもう一度のべることにする。

ここでいう横なぐり噴煙の性質を噴火後の野外観察・目撃者の談話・写真などによつてまとめてみると次のようである。

1) 単なるガス体ではなく、その中に多量の火山灰・火山礫、少量の火山岩塊などを懸濁しており、強風というよりはむしろ濃い砂嵐に近いものであつた。

2) 爆発に伴つて上昇する噴煙柱の下部から発生し(口絵参照)、全体として空気より重い別の流体のようにふるまつた。すなわち最大速度20~30 m/sec 程度で四方に流出し、地形の起伏に忠実に沿い火口近くでは比高300 m の山も越えたが、速度を減ずるにしたがい低い方へ流れていった。障害物のないタール湖面上を渡つた場合にもつとも遠方(5 km)にまで達している。

3) 火口のごく近くをのぞき100°C 以下で非常に湿つていた。また本質物質は懸濁していた破片の半分以下であつた。この2点では“熱雲”とは著しく異なる。

つぎにこのような横なぐり噴煙の性質を指示する実際の観察をのべる。

横なぐり噴煙の影響の及んだ全域にわたつて、炭化したり燃えたりした跡はまったくみられない。したがつて噴煙の温度は約300°C より低かつたと判断される。

新噴出物におおわれた地域は、噴火前は高さ10 m 以上のココナツ椰子その他の植物で大部分おおわれていた。しかし噴火後は火口から0.5~1 km の範囲では植物はいつさい見ることができなくなつた(口絵参照)。これはたとえ幹の下部が直立して残されたとしても、数 m 以上の噴出物におおわれてしまつたためである。

その外側の最も火口近くに残されている立ち木は、枝の部分はすべて失われ、残された幹も火口側の皮はぎとられているばかりでなく、はなだしい場合は太さの半分までもけずり取られている。

火口から1~3 km (方向によつて異なる)離れた所では火口側の皮が一部けずりとられた上に泥のおおいがかぶつているのがみられる。泥が張りつくためには相当湿つていることが必要であり、少なくともこれより外側では噴煙の温度は100°C 以下であつたと思われる。泥は幹の火口側にだけ高さ10 m 以上の

部分まで張りついており（写真1）、その水平断面は半月形でいちばん厚い部分は 40 cm にも達する。泥のおおいをナイフでけずって平らな断面をつくってみると、年輪状の成層がみられる（写真2）。各層はそれぞれ半月形で、砂粒大の灰褐色の火山灰ではじまり、細粒の桃褐色火山灰で終わる。層ごとに多少最大厚の方向が異なるのは、噴火地点が1カ所でなく、割れ目上の各所で起こったことに応ずる。各層はおそらく1回の横なぐり噴煙に対応している。

写真1 葉をはたき落とされ、泥をかぶったココナツ椰子。火口は右手約 2 km。地表面には波打った砂紋が見られる。黒い斑点は踏み跡のへこみ。

火口から 2~5 km の範囲では、泥のおおいも薄くなり、皮をけずり取られているのもより細い枝だけになる。噴煙の影響のみられる最も外側では、細い若枝の火口側の皮がさけているだけとなる。

第4図はこれらの資料によつて、各地点における噴煙の方向を示したものである。家屋が倒れたり傾い

写真2 樹幹に厚く張りついた泥のおおいをナイフで切りこみ、その面を火口方向から見たもの。年輪様の成層はすべて火山灰。樹幹の太さはみかけの約半分。火口は左手前約 1.5 km。

第4図 横なぐり噴煙の進行方向（矢印）¹⁾と空中写真から読みとった砂紋の峰の方向の方向を連ねた線。両者は直交している。

たりしている方向もこれと一致している。この図から、火口から 4~5 km の範囲に横なぐり噴煙の影響が及んでいること、地形の支配を著しく受けているが火口からすべての方向に吹いたことがよみとられる。地形の支配は、山頂火口縁のある北~北東方向へは 2 km 程度しか及んでいないのに、低く開いている北西~西へは 5 km も及んでいることや、島の北部では方向が海岸線に沿って曲がっていることなどにもみられる。このような知識は、この種の噴火から人命などを守る場合に役立つ。

火口から 2 km くらいの範囲内には、横なぐり噴煙によつて一面に巨大な砂紋が生じている(口絵および写真 1 参照)。砂紋は地表面ばかりでなく、Ⅶでのべたように堆積物の中にも埋められている。したがつて地表でみられる砂紋は最後の噴煙を記録しているわけである。砂紋の峰の方向は横なぐり噴煙の進行方向とほぼ直交してのびている。波長は 5~13 m、高さは 1 m くらいであり、堆積物中のものと同じ規模である。峰の長さは約 10 m で、峰の稜線は火口方向に凸にやや湾曲している。

砂紋の分布は空中写真によつても知られる。第 4 図には写真からよみとつた砂紋の峰の方向を連ねた線も記入してある。線の間隔は適当にとつてあり意味はない。噴煙の進行方向と峰の方向が直交していること、火口のほぼ中央から水面を波紋が伝わるように広がっていることなどがわかる。

第 5 図 砂紋の平均波長(空中写真からの読みとり)の新爆裂火口からの距離による変化。

同じ空中写真から砂紋の平均波長を小区域ごとによみとり、火口からの距離との関係を示したのが第 5 図である。波長は距離が増すとともに減少している。波長を決める要素には速度・密度などいろいろ考えられるが、最もよくきくのはおそらく噴煙の速度であろう。

実際の噴煙の平均速度は、折れた幹の太さなどから判断して火口から 1 km ほどの場所で風力 9 (平均風速約 20 m/sec) あるいはそれ以上と考えられ、5 km ではほとんど 0 に近い。砂紋の方は 3 km で波長 0 になつてしまうから平均風速と波長の関係は簡単なものではない。一方噴煙の横方向の初速は、上昇する噴煙柱の下部から発生し、すべての方向にひろがっている

ことから判断して、0 ではないにしても小さいものであつたろう。したがつて火口からある距離のところで最大速度に達し、以後は一方的に衰えていつたものと考えられる。砂紋は少なくとも 0.5 km までは火口に近づくほど大きくなっているから、最大速度に達するのは 0.5 km 以内であり、その大きさは約 3.0 m/sec くらいと推定される。

横なぐり噴煙は 1911 年の噴火に際しても発生している。さらに WORCESTER⁹⁾ の p. 338 と 356 の写真を注意してみると、記載はないが砂紋も生じているように見える。バリ島の Agung 火山 1963 年の噴火では高温の火砕流が流出した⁸⁾がこの際にも砂紋が生じたという*。1902 年の Soufrière の噴火の際にも砂紋が生じている⁹⁾。しかしこの砂紋がこの噴火の際発生した横なぐり噴煙——いわゆる St. Vincent type の火砕流——によつて生じたかどうかは明記されていない。また噴火ではないが、砂漠の沖積層下 173 m における 100 kiloton の熱核爆発によつても横なぐりの砂嵐が発生し、砂紋を作つたとの事である**。

このように横なぐり噴煙によつて砂紋が発生する事はそれほど珍しいことではないらしい。もしそうだとすると、砂紋はよく保存される方向指示者として過去の堆積物の研究に役だつのではなからうか。

IX 火砕流としての横なぐり噴煙

Ⅶでのべたような諸点から、今回の横なぐり噴煙は一種の流動化した粉体流であると考えられる。この点で、広義の“熱雲”と同じ様式の噴火現象といえる。しかし“熱雲”はその字のごとく比較的高温で数百度以上であり、構成破片も大部分本質物質である。今回のタールの場合は 100°C あるいはそれ以下であり、本質物質は半分以下である。この点では“熱雲”とはたいへんちがつている。

しかしいずれにせよこのような様式の噴火は、火口から重力の作用のみで液体が流れだすもの(溶岩の流出)と、爆発によつて火口から破片状物質が上空に投げ出され、それが風下に落下するものとの中間的

* D. HADIKUSUMO 氏の個人談話による。

** J. G. MOORE 氏の私信による。

様式の噴火現象である。そしてそのような意味では火(山)砕(屑)流の 1 つに含ませうるものである。

ところで、火砕流なる語には荒牧¹⁰⁾によつて“高温の本質破片物質の流れ”という定義が与えられている。この定義のままではタールのものは含まれないことになるので、本稿では直接噴火によつて生じた、ガスを媒質とするすべての火山碎屑物の流れを火砕流とよぶことにする。このよび方によると、荒牧の定義した火砕流は高温本質火砕流となる。同様のいい方をすればタールのものは低温(類質)火砕流ということになる。その起源を重視すれば水蒸気爆発火砕流とよんでもよいだろう。

かつては火砕流の流動性は、流動中の本質物質からのガスの発生によつて生じ、維持されると考えられてきた。その後、高温火砕流の前面で冷たい空気がとりこまれた際の熱膨張も流動性の維持に役だつ¹¹⁾ことがわかつた。ところがタールの低温火砕流の場合には、本質物質は遅延発泡のおこりにくい低粘性のものであるし、温度も空気の体積をせいぜい数割かた膨張させる程度でしかないので、上記の両方の機構とも流動化の発生・維持に十分なものとは考えられない。

しかし実際に火砕流が流れたのであるから流動化の第 3 の原因とでもいうべきものが必要である。それは小野¹²⁾が解説しているような、何かの原因でいつたん流動化が起これば、あとは間隙のガスを上に追いつ出す過程そのものが流動化を維持するということであろう。このような原因だけで流動化が維持される火砕流は流れうる距離が当然小さい。

以上のように考えると、火砕流という様式の噴火現象を理解するためにはこれまで以上に、どのようにして最初に流動化した粉体が生じたかを理解することが必要となる。

タール火山の場合、“最初の流動化した粉体”の生じた原因は、過去において水蒸気爆発がくり返された場所に起こつた「水蒸気爆発」にある。すなわち ① 玄武岩マグマであるのに爆発を起こしたこと、② 爆発が中程度のものであつたこと、③ 爆発により細粒子が一時に多量に供給されたことにあつたことと考える。以下この点を具体的に説明する。くりかえしのべたように、低粘性の玄武岩マグマが爆発を起こしたのは、V・VII で述べた噴火の経緯や、噴出物のぎんみ、他の火山の例などから考えても明らかなように、地下で水と接触し、その気化の時の体積増加による。

また今回の噴火が割れ目噴火であつたことから地下のかなり浅所まで玄武岩マグマが上昇してきたと考えられる。このことは、水と接触して爆発が起こつたのも地下浅所であることを意味している。したがつて爆発の圧力もあり大きくなかつたと思われる。

さらにタール火山島は、III・IV のべたようにほとんど火山碎屑物だけから構成されている。これは火山島が岩漿性水蒸気爆発をくりかえして成長してきたためである。したがつて今回の噴火のように爆発的に山体がふきとばされると、溶岩の多い山体とちがつてみな容易に細かな破片になりやすいのであろう。

したがつて、新火口のすぐ上空には爆発のたびに多量の細かな破片を懸濁した、上昇する能力の小さい一団の“流体”が生じたものとみられる。そしてこれが“最初の流動化した粉体”にあたるのであろう。このような“流体”の生成には St. Vincent 式とよばれているような機構¹³⁾——いつたん上昇した噴煙柱のまわりから次々と重い破片が降下してくる——も寄与しているであろう。

上記のような 3 つの条件による火砕流の発生が、おそらく玄武岩質火山におこりうる唯一の場合なのではなからうか。

以上の議論は玄武岩質の(タール火山の)低温火砕流についての議論であつた。しかし VIII で記したように Agung や Soufrière などの高温火砕流も移動時の様式は今回と同じような横なぐり噴煙ではなかつたかと思われる。したがつて高温火砕流も水面のように地形的抵抗のもつとも少ないところが移動に都合なような、bulk density の小さいものではないかと考えられる。

X おわりに

以上のようにタール火山 1965 年の噴火は同火山が過去においてくり返してきたと同様な岩漿性水蒸気

爆発であった。この噴火によつてもちだされた熱エネルギーはおよそ 4×10^{23} erg であり、1962 年三宅島・十勝岳、1950~51 年伊豆大島などの噴火とほぼ同じである。

多量の火山豆石が降下したこと、 100°C 以下の火砕流がくりかえし発生したことなどは著しい点であった。またこの低温火砕流によつて火口の周囲数 km^2 以上にわたつて巨大な砂紋が生じた。このような砂紋は過去の火砕流堆積物にも発見が期待されるもので、流れの方向を知る上に有用な手がかりとなる可能性がある。

日本における類似の噴火としては、玄武岩質火山の岩漿性水蒸気爆発という意味で、伊豆大島の波浮港・イマサキ、三宅島の三池・古滞など¹³⁾の噴火があげられる。当然噴出物や火口の地形などもよく似ている。しかしこれらの噴火に伴つて火砕流の発生は知られていない。

引用文献

- 1) Moore, J. G., Nakamura, K. and Alcaraz, A. (1966): The September 28-30, 1965 Eruption of Taal Volcano, Philippines, *Science*, 151, 955-960
- 2) 中村一明(1966): 低温・横なぐりの噴煙—タール火山の水蒸気爆発, 科学, 36, 85-87
- 3) Pratt, W. E. (1911): The Eruption of Taal Volcano, January 30, 1911, *Phil. Jour. Sci. A.*, 6, 63-86
- 4) Maso, S. J. M. S. (1911): The Eruption of Taal Volcano, January 30, 1911, Dept. of the Interior Weather Bureau, Manila
- 5) Worcester, D. C. (1912): Taal Volcano and Its Recent Destructive Eruption, *Nation. Geogr. Mag.* 23, 313-367
- 6) Van Padang, M. N. (1953): Philippine Islands and Cochin China, *Catalog. Act. Volc. World*, Pt II, 32-37
- 7) Corby, G. W. (1951): Geology and Oil Possibilities of the Philippines, *Technical Bulletin*, No. 21, Dept. Agric. Nat. Res.
- 8) K. (1964): The Eruption of the Agung Volcano in Bali in 1963, *Bull. Geol. Surv. Indonesia*, 1, 12-15
- 9) Hovey, E. O. (1902): Observations on the Eruption of 1902 of La Soufrière, St. Vincent, and Mt. Pelée, Martinique, *Amer. Jour. Sci.*, 14, 319-358
- 10) 荒牧重雄(1957): Pyroclastic flow の分類, 火山第2集, 1, 47-57
- 11) McTaggart (1960): The Mobility of Nuées Ardentes, *Amer. Jour. Sci.*, 258, 369-382
- 12) 小野晃司(1963): 火砕流の流動機構に関する研究の紹介, 火山第2集, 8, 129-132
- 13) Hay, R. L. (1959): Formation of the Crystal-rich Glowing Avalanche Deposits of St. Vincent, B.W.I., *Jour. Geol.* 67, 540-562
- 14) 一色直記(1960): 三宅島, 5万分の1地質図幅説明書