

ピナツボ火山噴火後 10 年間の地形変化と土砂災害

GEOMORPHOLOGICAL CHANGES AND DISASTERS AFTER THE ERUPTION IN THE EASTERN SLOPES OF MT.PINATUBO, IN CENTRAL LUZON, PHILIPPINES

広瀬典昭*・井上公夫**・井上美公***大畑英夫****

Noriaki HIROSE, Kimio INOUE, Yoshikimi INOUE and Hideo OHATA

On 15 June 1991, Mt.Pinatubo, located in central Luzon, Philippines, awoke with a climactic eruption after 500 years dormancy. The eruption produced a remarkable volume of ashfall deposits and pyroclastic flow deposits over the surrounding areas. The volume of pyroclastic flow deposits along the slopes of Mt.Pinatubo was estimated at 6.7 billion cubic meters with deposits as much as 200 meters in thickness.

Lahar generated by heavy rain falling on the pyroclastic flow deposits pose a grave danger in the low-lying areas. They heavily filled up the river courses and eventually intruded into farm lands and inhabited areas. The Government of the Philippines has constructed both urgent sediment control structures and warning system since 1991 and is executing the construction of permanent sediment control structures.

This paper describes overall information on structural and non-structural measures around Mt.Pinatubo and large-scale sediment transport in alluvial fan located in the eastern river basin of Mt.Pinatubo including the fluctuation of lake water level in the crater of Mt.Pinatubo. Observations were made over a period of ten years following the eruption.

Key Words : Mt.Pinatubo, pyroclastic flow, secondary explosion, lahar, piracy

1. はじめに

フィリピンにはタール火山やマヨン火山を始めとして活火山が 22 あり、噴火のたびに大きな火山被害を受けてきた。ここで紹介するピナツボ火山は 1991 年に大規模な噴火を起こした。世界各国の政府、機関がフィリピン政府の要請により災害救援を行い、この中で、国際協力事業団(JICA)では火山防災調査を実施してきた。本稿では JICA による調査とその後日本の有償資金協力で実施されてきた対策工事における施工管理等を経て明らかとなった火山噴火に伴う地形変化と土砂災害、およびその後の対応策について報告する。

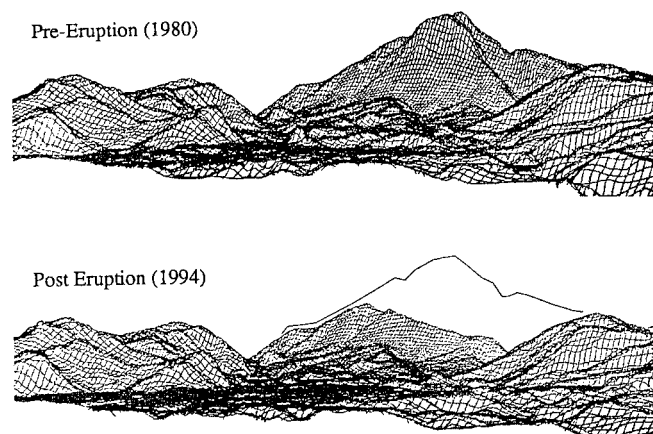
2. ピナツボ火山噴火後の土砂災害対策の概要

フィリピン国ルソン島中部のピナツボ火山は、1991 年 6 月に 20 世紀最大規模の噴火を起こし、近隣諸国にまで大量の火山灰を降下・堆積させた。6 月 15 日の最大噴火時には、山頂部を吹き飛ばし(図-1、写真-1)、高温の火砕流が周囲の山麓部に厚く堆積した(図-2)。上流部に厚く堆積した降下火山灰や火砕流堆積

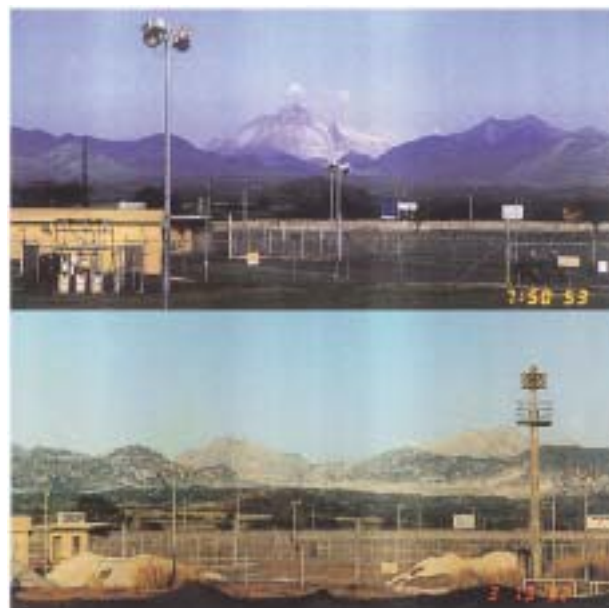
物は、雨季に泥流(Lahar)となって、下流域に流下・堆積した。このため、1994 年末までに死者 700 人以上、建物被害 10 万棟以上、噴火時の避難住民 247 万人以上という大災害になった。不幸中の幸いは火山活動の観測により、噴火が予測されて適切な避難勧告が出され、住民の多くが避難したため、噴火による死者が少なかった事である。

一方、ピナツボ火山周辺の被害を大きくしてきたものは、噴火後の火砕流堆積物の二次移動、ラハールの流下、堆積にあると言える。1991 年の雨季では、約 300km² の地域がラハールに埋まった。例えばバシグ/ポトレロ川沿いにあるバコロール市では街のほとんどがラハールに埋まり、人口が 1990 年の 67,259 人から 1995 年の 13,097 人に減少した。現在は、噴火直後に比較するとかなり穏やかになってきたが、約 10 年を経過した今でもなおラハールは発生している。また、細粒土砂がより下流のデルタ地帯に流出し、排水不良のため浸水期間が長期化するなど、被害を受ける地域は拡大しており、今後数十年間はこのような状態が続くものと思われる。

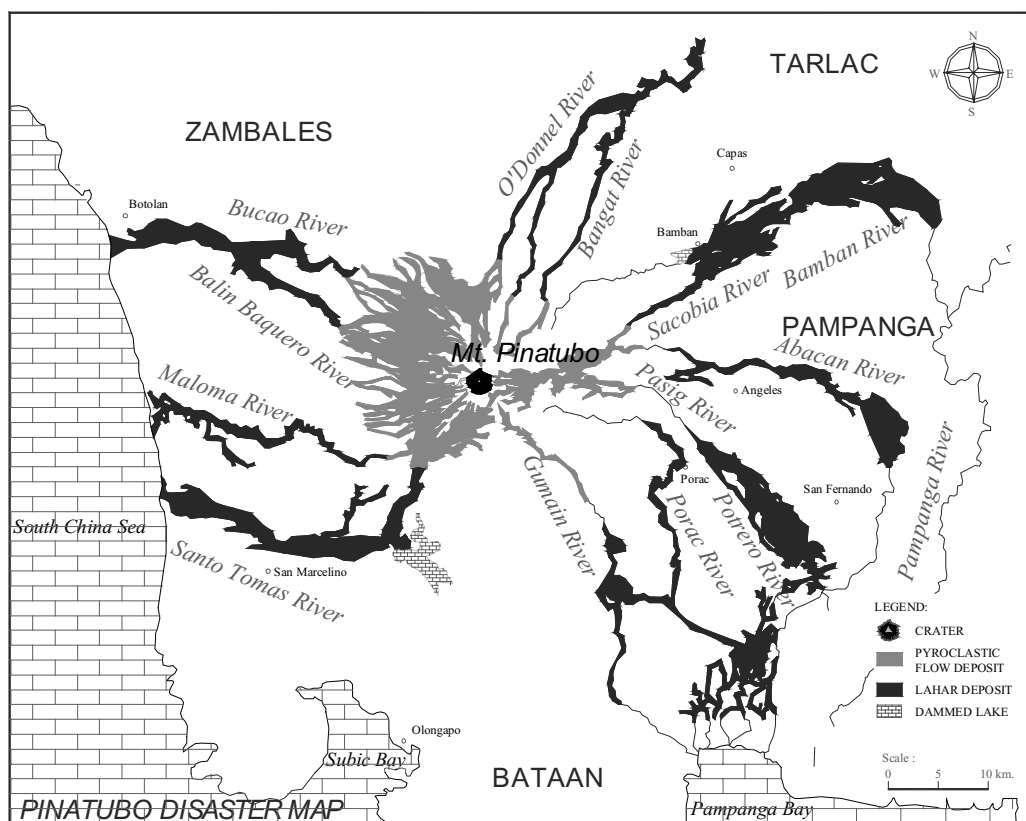
* 事業開発本部
** コンサルタント国内事業本部
*** コンサルタント国際事業本部 開発計画部
**** 首都圏事業部 国土保全部



図ー1 パシグ川・Delta-5 観測点からみたピナツボ火山の鳥瞰図
(噴火前と噴火後)



写真ー1 噴火前後のピナツボ火山(1991 年 6 月 14 日、
1992 年 3 月 13 日)USGS R.P.Hoblitt 博士撮影



図ー2 ピナツボ火山周辺の噴火災害図(PHIVOLCS、1991)

フィリピン政府は、総数 60 万人と推定された被災者救済を主目的とし、

- ① 約 1 万世帯の高地民アエタ族、および下流域ラハール氾濫域に住んでいた住民の再定住地の整備
 - ② 被災地や再定住地における雇用機会の創出や農業生産の改善
 - ③ 住民からの要求に対して適切な社会福祉対策の実施
 - ④ 社会基盤の復旧改善、および災害によって移住を余儀なくされた数千の家族を通常の生活に戻すためのインフラ整備
- の方針を立て、国連機関や日本を含む各国はこれを支援してきた。

日本からは災害緊急援助、医療、再定住地での給水対策、農作物栽培研究など広範囲に渡る救援がなされてきた。このような中で、土砂災害防止対策として、国際協力事業団(JICA)等は噴火直後の 1991 年から火山災害対策専門家チーム等(4 回計 17 名)、砂防分野の長期個別専門家(1993 年 1 月～2001 年 7 月)を派遣し、

- (a) ラハールに対する避難体制を整備するため、ラハール予警報システムの整備
- (b) 復旧・復興のための物資輸送の交通路を確保するため、土砂掘削用建設重機の配置
- (c) 土砂を監視・調節するため、砂防ダム・沈砂地(Sand Pocket)の設置

などを助言し、いずれもフィリピン政府の要請を受け日本政府の無償資金協力、技術協力等により実施されてきた。

さらに、フィリピン政府による洪水および泥流制御の調査・計画策定の要請に基づいて、日本政府と国際協力事業団は、ピナツボ火山東部地域のサコピア／バンバン川とアバカン川流域について、「ピナツボ火山東部地域洪水および泥流制御調査」を 1993 年 11 月から 96 年 4 月まで実施した。そして、この調査結果に基づき、1995 年フィリピン政府は OECF(現在 JBIC)円借款を要請し、緊急対策工事を実施してきた。また、1995 年にアメリカ合衆国の調査団が引上げてからは、パシグ／ポトレロ川流域についても調査と対策工事を実施している。オドンネル川流域についての対策検討が 2001 年から JBIC の資金で、また、西部流域について 2002 年には JICA による計画調査が始まった。

図-3 は、サコピア／バンバン、アバカン、パシグ／ポトレロ川流域の概要図である。なお、図-3 にはこれらの流域で施工された砂防施設の概要を示した。

3. ラハール／洪水観測警報システムの整備

火山の噴火が雨季の始まる時期であったので、噴火直後から大雨によりラハールが発生した。これに対して、火山災害対策専門家チームの助言を受けて、ラハール／洪水観測警報システムが供与・整備された(図-4)。モニタリングを行う機関としては、フィリピン国家警察が河川沿いに監視台を設置し、ラハールの発

生を監視した。火山地震研究所、気象観測所は各観測所のデータを無線で通報できるようにした。一方、公共事業道路省は JICA の協力でラハール予警報用のテレメータ雨量観測所を設置し、国防省市民防衛局がこれを管理している。これらの情報は無線により、第三地方局の災害調整委員会に通報され、各州・各市町村、そしてバランガイと呼ばれる各地区に通報される。

1999 年時点ではラハールによる被害が想定される住民はパンパガ州だけで 26,000 世帯、13 万人におよんでおり、毎年学校を中心に避難訓練が実施されている。

4. ピナツボ火山の地形特性

ピナツボ火山は、ルソン島北部からミンドロ島に達する西ルソン弧の火山帯に位置しており、ルソン島西部の南北に伸びたザンパレス山地に存在し、マニラから北西に 90km の距離にある。図-1 と写真-1 に示したように、噴火前の山頂高度は 1745m であったが、1991 年の噴火で山頂部が吹き飛び、山頂部は 900m 低くなった。そして、直径 2km のカルデラ(底の標高 850m)が形成され、最高標高も南縁で 1527m と低くなった。

PHIVOLCS-USGS(Newhall & Punongbayan,1996)は、火砕流やラハールの堆積状況や放射性炭素による堆積物の形成年代の測定結果から、5 万年前からの新期ピナツボ火山の噴火時期を

- Inararo 期(35000 年より前)ー最大噴火、今回の 5 倍以上
- Crow Valley 期(5000～6000 年前)ー今回の噴火の 2～3 倍
- Maraunot 期(2500～3000 年前)ー今回の噴火の 2～3 倍
- Buag 期(500 年前)ー今回の噴火とほぼ同じか、少し小さい

の 4 時期に大きく分けている。

1991 年の噴火以前の山頂部は前回(Buag 期)の噴火後に形成された溶岩ドームであり、周辺には標高 1500m 前後の溶岩ドームが多く存在する。ピナツボ火山は、過去に何回もの噴火(成長と陥没、溶岩ドームとカルデラの形成)を繰り返し、その度に大量の降下火砕物を噴出させるとともに、大規模な火砕流を周辺地域に流下・堆積させた。この火山帯の全体は、西方に開いた直径 8km の巨大なカルデラからなる。この巨大なカルデラの中にはさらに大小 4 つ以上の西方に開いたカルデラが形成されている。今回の噴火前の山頂部は、これらのカルデラの中央火口丘として形成された溶岩ドームである。

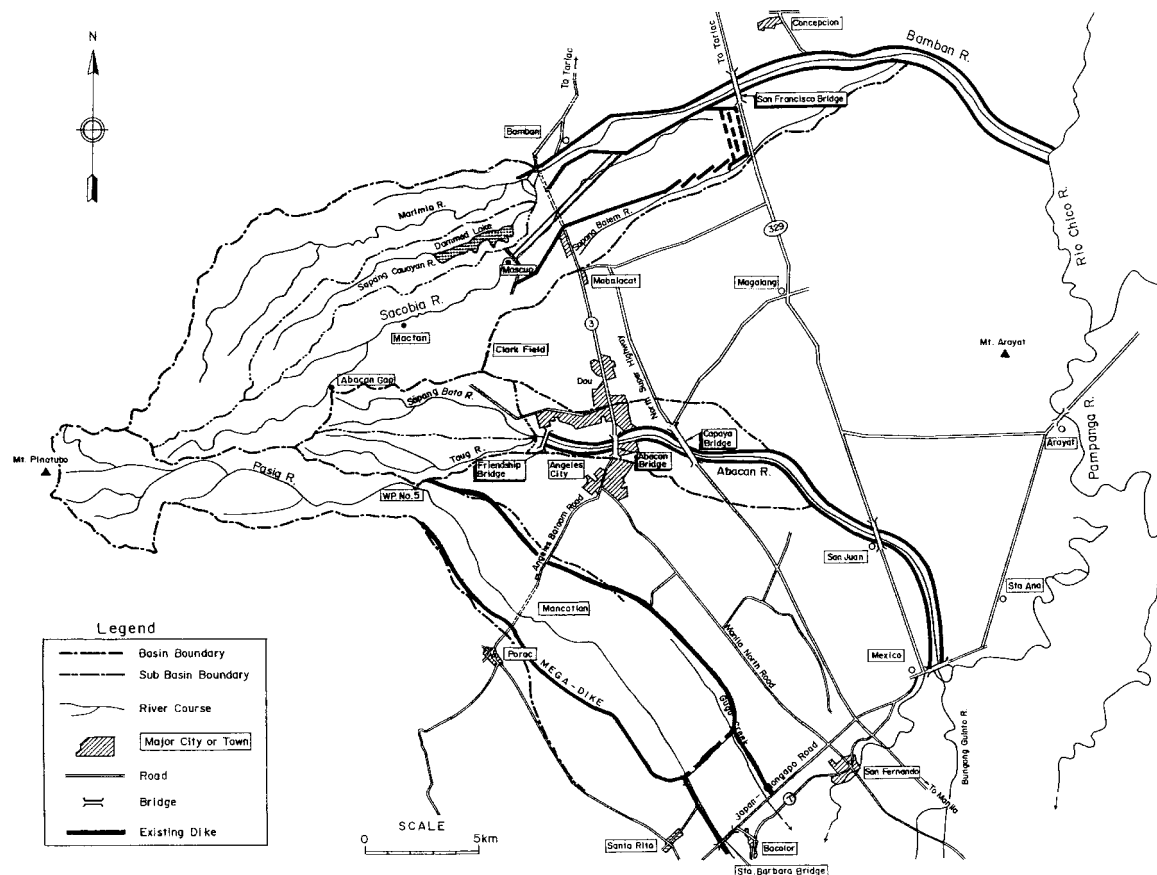


図-3 サコビア/バンバン、アバカン、パシグ/ポトレロ川流域の概要

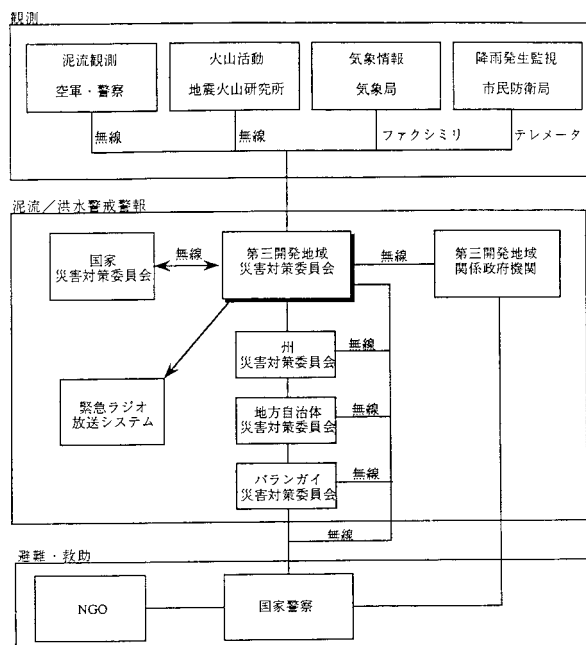
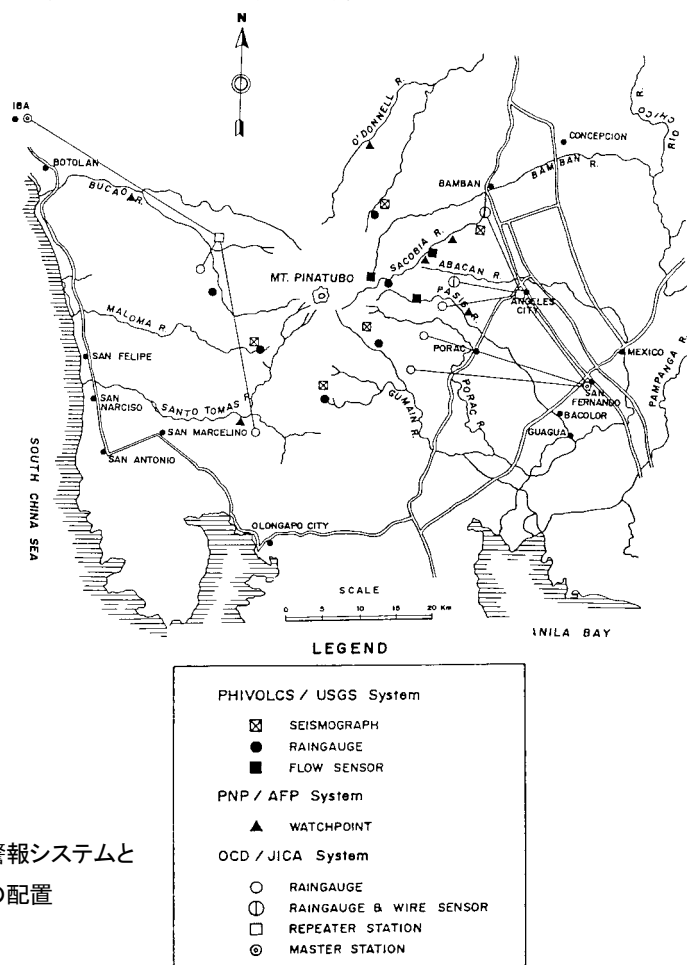


図-4 ラハール/洪水観測警報システムと
ラハール予警報機器の配置



噴火のたびごとに、大規模な火砕流が周辺の谷地形の中を何回も流下し、谷地形を埋積して平坦な火砕流堆積面が形成された。これらの火砕流堆積物は、溶結しておらず浸食に対して弱い。ため、豪雨時にラハールとなって下流の平野部に流下した。ラハールは土砂運搬力が弱くなると堆積し、いくつもの広大な扇状地を形成した。その後、火山活動が休止し上流からの土砂流出が減少すると、周囲の河川は再び下刻するようになり、扇状地は広大な段丘面になった。旧クラーク基地のある平坦面は、このようにして 2700 年前頃形成されたと考えられている。

数百年から数千年の休止期を経てピナツボ火山が噴火すると、同じような地形変化現象が繰り返され、それまでに形成された地形は浸食されて、さらに複雑な地形が形成された。また後述するように、火砕流堆積面の形成に伴う河川争奪と流域面積の変更が繰り返されたため、当流域周辺の地形をさらに複雑なものとした。

Buag 期の噴火時にも今回と同様、大規模な火砕流が発生し、山頂部は爆発によって吹き飛ばされ、小規模なカルデラが形成されたものと考えられる。しかし、この時に形成されたカルデラは、その後の溶岩ドームの成長に伴い完全に埋められて、溶岩ドームからなる山頂部が形成された。1991 年の噴火直前には、標高 1745m にも達する釣針状の急傾斜な山頂部となっていた(ピナツボとは原住民アエタの言葉で成長する山を意味する)。

5. ピナツボ火山東部地域の地形変化

当初の日本の援助対象河川は、東部地域のサコビア／バンバン川とアバカン川流域で、アメリカ合衆国のそれはパング／ポトレロ川流域であった。これらの河川の上流域はピナツボ火山東部火砕流堆積域(EPPFF, East Pinatubo Pyroclastic Flow Field)と呼ばれる地域である。この地域は、1991 年の噴火で高温の火砕流堆積物が最大層厚 200m、14.0 億 m³も堆積したため、その後の水蒸気爆発(二次爆発)と河川争奪によって、流域面積がめまぐるしく変化した地区である(図-5)。

(1) 1 年目(1991 年)－流出土砂量 2.5 億 m³

今回の大噴火によって、EPPFF の河谷は 200m も埋積されて平坦になり、従来の水系網は消されてしまった。火砕流堆積物は非常に高温であるため、当初地表面に降った降雨は蒸発して流水とはならなかった。周辺の山腹から流入した河川水や地下水などは、高温の火砕流堆積物に接触すると、水蒸気爆発(二次爆発)を起こしながら、以前とは異なる水系網を徐々に形成していった。航空写真やヘリコプターからの観察によれば、規模の異なる水蒸気爆発の跡が無数に存在し、これらの爆発によって火砕物が飛散し、二次火砕流が発生していた。噴火直後から 10 月末までの雨季には、サコビア川やアバカン川では何回もラハールが発生し、下流域に大きな被害が発生した。1 年目のラハールは、細かい降下火山灰が比較的多かったため、山頂から 50km 下流まで

流下し、広い範囲に氾濫した。

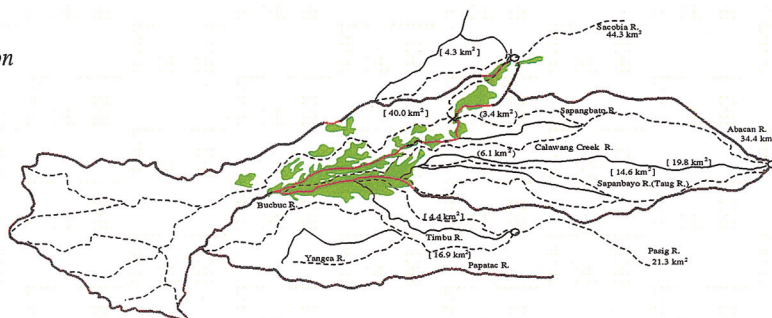
また、サコビア川とアバカン川では、山頂から 12km 下流の地点(Abacan gap と呼ばれている)で、何回も河川争奪(Piracy)を起こしていたと考えられる。500 年前の Buag 期の噴火時にも今回と同じような平坦面ができ、一時的にサコビア川の上流部はアバカン川方向に流れていた。その後の河川浸食により Abacan gap の地点で河川争奪が起こり、上流部はサコビア川方向に流れるようになった。このため、旧クラーク基地の北側に続く幅 1km、長さ 9km の紡錘形凹地に土砂が堆積した。

今回の噴火以前の Abacan gap は、落差 20～30m の風隙(Wind gap)となっており、30～50m の幅広い谷地形が残されていた。このため、アバカン川にはほとんど水は流れず、噴火前のアバカン川の川沿いにはサバンバトの集落やアンヘレスの市街地が続いていた。しかし、ラハールがアバカン川を何回も流下したため、上記の集落や市街地は大きな被害を受け、多くの人家や橋が流された。

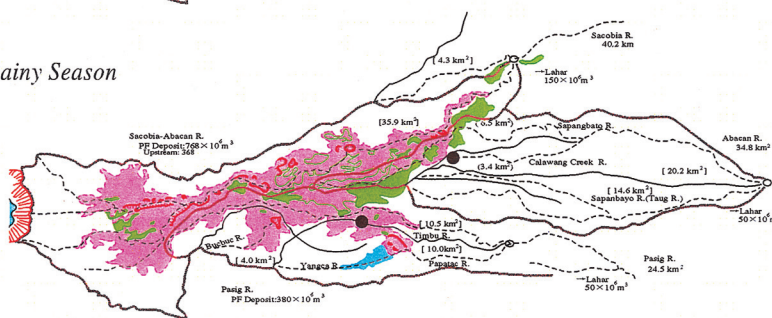
サコビア川は、噴火前には前記の紡錘形凹地を通過後、北に大きく曲流し、サパンカウヤン川やマリムラ川と合流してバンバン川となり、東北東方向に流下していた。しかし、噴火直後からラハールがサコビア川からバンバン川の堤防を越えて直進するようになり、堤内地への氾濫が頻繁に発生した。このため、マリムラ川との合流点付近では河床が数 m 上昇し、マリムラ川などの支川では出口が閉塞され、いくつかの天然ダム(堰き止め湖)が形成された。しかし、8 月 21 日の豪雨時にマリムラ川の出口付近の堰き止め湖が決壊し、この時の洪水によって、国道 3 号線のバンバン橋が流され、この付近の河床が 10～20m 上昇した。

11 月以降の乾季になると、サコビア川やアバカン川ではラハールの発生はほとんどなくなったため、フィリピン政府公共道路事業省(DPWH)では大規模な災害復旧工事を実施した。特に、11 月 15 日から翌年の 3 月 30 日頃までに、サコビア川で 2 基、アバカン川の本支川で 8 基の砂防ダム(高さ 3～10m でふとん簞製が多い)を建設した。また、バンバン川では翌年の雨季前にリオチコ川との合流点までの全区間にわたって、ラハール堆積物を利用して堤防を建設した。

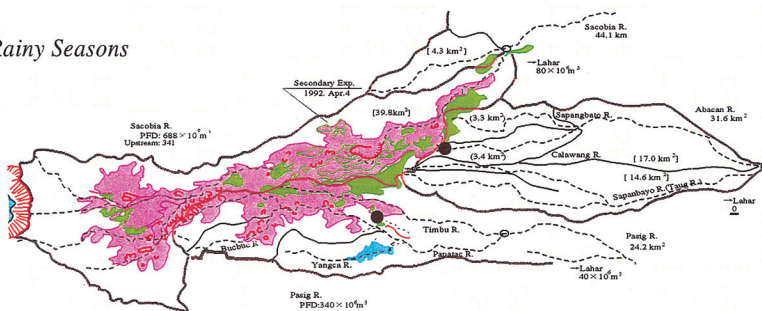
(1) Pre-Eruption



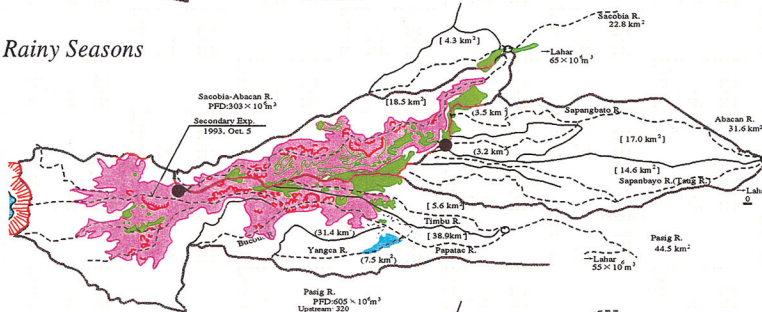
(2) After One Rainy Season



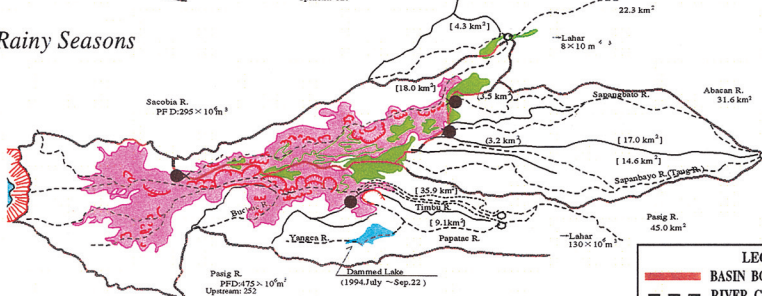
(3) After Two Rainy Seasons



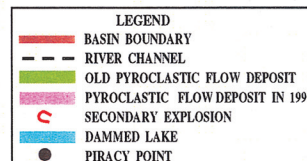
(4) After Three Rainy Seasons



(5) After Four Rainy Seasons



Geomorphologic Change in the Eastern Slope of Mt. Pinatubo



(2) 2 年目(1992 年)－流出土砂量 1.2 億 m³

前述の砂防ダムが完成してまもなくの 4 月 4 日(1 週間程強い雨が降り続いていた)に、Abacan gap の約 1km 上流のサコビア川で大規模な二次爆発が発生した。この時には、まだ近くに工事関係者がいたが、ほとんど音が聞こえないうちに高さ 1.0～1.5km の噴煙柱が上がり、東側斜面に降灰した。この二次爆発を起因として大規模なホットラハールが発生し、サコビア川とアバカン川の河谷を流下した。このため、完成したばかりの砂防ダム(サコビア川で 2 基、アバカン川で 4 基)をほぼ完全に埋積し、5m 程河床を上昇させた。しかし、これらの砂防ダムの効果により、それより下流にはラハールがあまり流下せず、大きな被害は発生しなかった。その後、Abacan gap で河川争奪が起こってサコビア川方向にすべての流水やラハールが流れるようになった(この時以降、アバカン川ではラハールが発生していないー2000 年 10 月に再発生、後述)。

その後、2 年目の雨季になると、サコビア川上流部で再び二次爆発が活発に発生し、それに伴ってラハールが何回も発生するようになった。そして、ラハール堆積物は国道 3 号線を越えてバンバン川右岸側の 2,000ha の地区に氾濫し、多くの人家が埋積した。しかし、この時期以降の堆積物は比較的粒子の大きな軽石(水より軽いものも多い)が多く、前年ほど下流に流下しなかった(図-6)。

DPWH では、乾季になると 1993 年の雨季までにサコビア川の右岸側にコンクリートで保護した高さ 5m の堤防を長さ 6km の区間に建設したため、それ以降右岸側の土砂氾濫はなくなった。左岸側では、バンバン川の市街地付近の堤防を補強するためにコンクリート護岸を建設した。

なお、この時期までのパシグ川のラハールは、比較的規模が小さく、山頂から 15km の扇頂部では、むしろ下刻しており、20km 下流の地点から氾濫していたが、それ程大きな被害は発生していなかった。しかし、上流部の右支川は本川からの流出土砂によって堰き止められて、かなり大きな天然ダムが一時的に形成され、豪雨時にこれが決壊することによって、ラハールが何回か発生した。

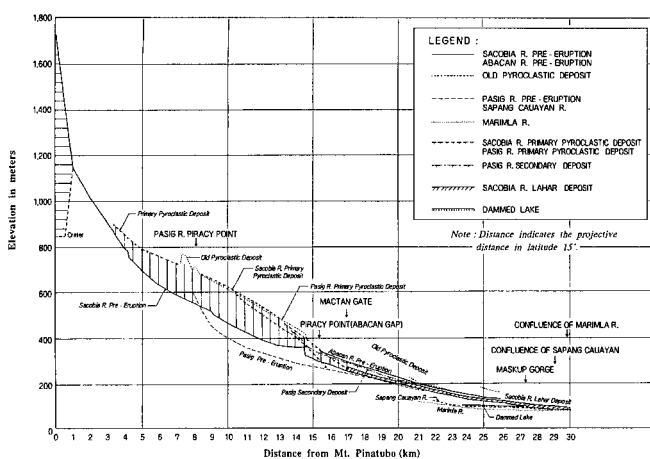


図-6 サコビア、アバカン、パシグ川流域の河床縦断面図

(3) 3 年目(1993 年)－流出土砂量 1.2 億 m³

3 年目の雨季になっても、サコビア川上流部で二次爆発が活発に発生し、それに伴ってラハールが何回も発生した。そして、堤防の中にラハールが堆積するとともに、補強された堤防より下流の地区でかなり広範囲に氾濫した。特に、10 月 4、5 日の台風 Kadiang の襲来によって、サコビア川とパシグ川で大規模な二次爆発に伴う二次火砕流とラハールが発生した。ラハールはバンバン川右岸側の氾濫地帯を越えて国道 329 号線に達し、その一部は 329 号線を越えて 1km 程流下した。また、国道 3 号線から 3.8km 下流のサバンバレンの集落も埋積してしまった。しかし、この時の堆積土砂は、むしろパシグ川の方が大きく、国道 3 号線の付近では多くの人家が 5～10m の堆積物で埋没し、国道橋も流されてしまった。PHIVOLCS のヘリコプターからの観察によれば、サコビア川の最上流部で大規模な二次爆発が発生し、それより下流の河谷が埋積されたため、サコビア川の上流部がパシグ川の方へに流れるようになった。JICA 調査団の 1994 年 2 月 7 日の観察によれば、上記の河川争奪によって、パシグ川の河谷が非常に深くなっていることがわかった。

11 月以降の乾季になると、二次爆発やラハールの発生がなくなり、被災地では復旧作業が本格化した。DPWH では、被災した砂防ダムや堤防の補修工事を行った。また、私たち JICA 調査団の調査も 11 月から開始された。その後、JICA 調査団の提案を受けて、沈砂地(Sand Pocket)などの緊急工事が 1994 年 3 月頃から開始された。

(4) 4 年目(1994 年)－流出土砂量 1.37 億 m³

4 年目の雨季にはサコビア川からのラハールの発生はほとんどなくなった。しかし、パシグ川では雨季が始まった 6 月頃から上流部で大規模な二次爆発が何回も発生し、二次火砕流がパシグ川の河谷を 50～100m もの深さで埋めてしまった。このため、パシグ川の中流部は、6 月末頃から流域変更して左支川の方へに流下するようになった(図-7)。

その後も豪雨の度ごとに、二次爆発(水蒸気爆発)と二次火砕流が繰り返され、大量の土砂が新しいパシグ川本川を埋めて堆積した。そこから、豪雨の度ごとに高温(50 度以上)のラハールとなって流下し、下流部に多大な被害を与えた。湯気を上げながら流下するため、Steaming Lahar と呼ばれている。

1994 年 8 月末には、パシグ川の河床が最も上昇し、広範囲に土砂が堆積した。特に、8 月末の豪雨に伴うラハールは、パシグ川の左岸側の堤防を乗り越え、一部の土砂がアンヘレスの市街地方向に流下し出した。しかし、ラハール堆積物は堤防から下流部の平坦部に堆積しただけで大きな被害は発生しなかった。元のパシグ川本川を流下した二次火砕流は右支川を堰止め、再び大きな堰き止め湖を形成した。この湖はヘリコプターの写真から 8 月の末頃最大となったと考えられる。しかし、9 月 22 日の台風襲来による

豪雨により、堰き止め湖は決壊し、多量の土砂と水がラハールとなって流下した。このラハールはパシグ川の下流 30km の範囲まで広範囲に氾濫・堆積し、多大の被害を与えた。

その後、10 月 21 日の台風襲来に伴う豪雨により、非常に大規模な水蒸気爆発とラハールが発生した(写真-2)。この時の水蒸気爆発は、一次火砕流堆積物が存在するパシグ川やサコビア川の上流部ではほとんど発生しておらず、河川争奪地点より下流で盛んに噴煙が上昇していることが判明した。1994 年 4 月時点の地形分類図によれば、噴煙が上昇している地区には一次火砕流の堆積物は流出してほとんど存在しなかった。この地区は、今年の雨季に上流部の二次爆発によって、流出してきた二次火砕流が 50~100m の厚さで堆積した地区である。したがって、この地域では、二次火砕流の堆積物が水蒸気爆発を繰り返しているわけで(写真-3)、いわば三次爆発を起こしていると考えられる。それだけ、3 年半経過したにもかかわらず、一次火砕流だけでなく、二次火砕流の堆積物も非常に高温であることを示している。

4 年目の乾季に入ると、水蒸気爆発やラハールの発生もなく、土砂氾濫地域も落ち着きを取り戻した。また、DPWH によって復旧工事が積極的に進められた。

部のアンヘレスーポーラック道路付近では、噴火前の河床より 10m も低下した(崖面に噴火前の旧地表面が見える)。この付近のラハール堆積物が下流に運搬され、二次堤防や三次堤防を破壊し、オロンガボ道路やバコロールの市街地付近に氾濫・堆積した。



写真-2 最大規模の二次爆発(1994.10.22)



写真-3 連続して発生した二次爆発(1994.10.22)

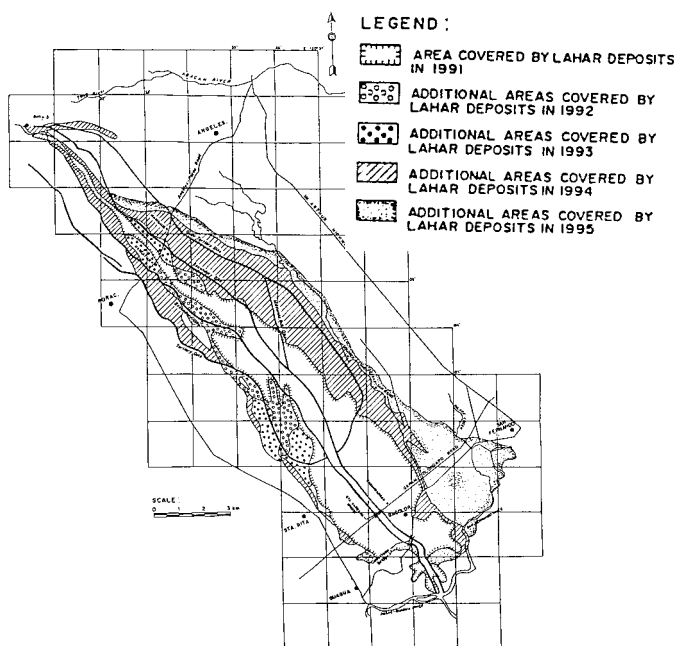


図-7 パシグ川流域のラハール氾濫域の変化

(5) 5 年目(1995 年)ー流出土砂量 0.45 億 m³

5 年目の雨季にはサコビア川からのラハールの発生はほとんどなくなったが、パシグ川では河川争奪による土砂運搬力が増大したため、二次爆発と天然ダムの決壊によりラハールが多発した。このため、現在の本流であるチンブ川に本流が移り、Delta-5 付近のホットラハール堆積物を浸食し、河床は低下し始めた。ホットラハール堆積物は、高温の二次火砕流堆積物も混じっており、豪雨時に三次爆発を起こしている箇所もあった。1995 年末には、中流

(6) 6 年目(1996 年)ー流出土砂量 0.33 億 m³

1996 年には、世界的な異常気象現象の原因とされたエルニーニョの影響からか、ピナツボ周辺で集中豪雨はほとんど無く、火砕流堆積地域より発生した泥流は、中下流域へ到達しなかった。したがって、これまでに中流域に堆積していた泥流堆積物の小規模な二次浸食が顕著となった。サコビア川では国際協力銀行(JBIC)融資による泥流・洪水制御施設の建設が開始されるとともに、パシグ川中下流域では、大規模堤防(Mega-Dike:総延長 47km)がフィリピン政府自国資金により建設された。大規模堤防は高さ 12m の左右岸堤防と下流部の横堤(延長 3km)からなり、沈砂地(堤外地)の面積は 80km²である。

(7) 7 年目(1997 年)－流出土砂量 0.31 億 m^3

1997 年 8 月中旬には、太平洋上の台風に引き寄せられたモンスーン性降雨(3 日雨量 425mm)により、サコビア川では泥流が発生し、右岸側既設堤防が越流破堤した。堤内地と泥流堆積面(沈砂地)には 5m 程度の比高があり、破堤地点より上流 8km 区間に堆積していた泥流堆積物(河床勾配 1/140)が、幅 150m にわたって浸食された。土砂移動量(二次浸食量)は 600 万 m^3 と推定された。一方、パシグ川上中流域では、1995 年から河床低下の傾向にあったため、顕著な地形変化は起こらず、河道を広げながら谷地形が形成された。特に、中流部アンヘレスーポーラック道路付近での河床低下の傾向は強まり、泥流堆積面は段丘化していった。この際、上中流域で二次浸食された泥流堆積物は、下流域に建設された大規模堤防の横堤付近に氾濫・堆積(2,800 万 m^3)した。この際、横堤による二次移動土砂の土砂捕捉率は約 8 割となり、土砂氾濫域の拡大はなかった。

(8) 8 年目(1998 年)と 9 年目(1999 年)

1998 年雨季には 2 回および 1999 年には 3 回の中規模台風が襲来したものの、いずれも降雨量は少なく大規模土砂移動は発生しなかった。しかし、中下流域における二次移動土砂堆積物からの微少土砂粒子の断続的な流出が顕著となり、サコビア川下流域の河床上昇およびパシグ川下流域から河口に至る河床上昇および河口閉塞が発生した。このため、パシグ川下流域デルタ地帯での洪水氾濫が長期化している。なお、ラハールの発生は少なく比較的穏やかな年であったため、砂防施設やバンバン橋の建設など、円借款事業は順調に進んだ。

(9) 地形変化のまとめ

図-8 は、サコビア川流域とパシグ川流域別に、ピナツボ火山東部地域の火砕流堆積物、ラハールによる流出土砂量、EPPFF 流域における二次爆発、年降水量、ラハールの規模別発生件数を一覧図としてまとめたものである。

Pierson・他(1992)は、インドネシアのガルングン火山や米国のセントヘレンズ火山での経験をもとに、ピナツボ火山の将来予測を行っている。それによれば、ピナツボ火山の周辺に供給された火砕流堆積物(67 億 m^3)のうち、噴火後 10 年間に流出する土砂量は 25 億 m^3 で、その大部分が扇状地に堆積すると推定した。

図-8 によれば、ピナツボ火山東部地域の地形変化は、Pierson・他(1992)の推定よりも浸食速度が速く、東部地域に堆積した火砕流堆積物(14 億 m^3)のうち、噴火後 7 年間で半分以上の 7.4 億 m^3 (53%)が流下し、広大な堆積面(扇状地)を形成した。1997 年末で 6.6 億 m^3 (47%)の火砕流堆積物が残っているが、二次爆発(水蒸気爆発)や三次爆発を引き起こせるような高温状態ではなくなりつつある。

サコビア川やパシグ川では、次第に河床が低下して蛇行するよ

うになり、より下流で氾濫・堆積を繰り返すようになった。ただし 10 年間の地形変化の状況を見ると、変化の幅は次第に小さくなっている。

噴火前の地形分類図は、今後の地形変化の将来予測に大役役に立つ。なぜならば、この地形分類図は前回の噴火から 500 年後の地形状況を示しているからである。また、日本でもピナツボ火山と同じような噴火(火砕流を大量に噴出するタイプ)をした火山は多くこれらの火山の周辺には多量の火砕流堆積物が認められる。未固結の堆積物は、シラスと呼ばれることが多いが、火山から直接噴出した一次堆積物であるか、その後の二次堆積物であるか、詳細に分析する必要がある。

ピナツボ火山の周辺で見る限り、火砕流の一次堆積物と二次堆積物やラハール堆積物との区別はかなり難しい。現地の露頭で見る限り、二次堆積物でもほとんど層理が発達せず、上流部では一次の火砕流堆積物と区別がつかないほど、厚く堆積している。二次堆積物が三次爆発できるほど高温の場合もある。一度に 5m 以上の層厚で堆積したラハール堆積物も、詳細に観察しないと区別しにくい。ましてや、古い時代の堆積物が一次堆積物が二次堆積物を肉眼だけで識別するのは難しい。

日本で今までシラスや火砕流堆積物と呼ばれた堆積物の中にも、このような二次堆積物やラハール堆積物が含まれている可能性もある。

6. 10 年目以降(2000 年以降)の状況

(1) サコビアーバンバン川流域の状況

2000 年の雨季には、台風 Reming(10 月 28~31 日)と台風 Seniang(11 月 3 日)の襲来により、20 年確率以上の豪雨によるラハールのため、サコビア／バンバン川流域では、円借款事業として完成直後だった砂防施設のうちサコビア川流路工(延長 5.3km)とバンバン川との合流点付近がほとんど埋積してしまった。サコビア川流路工より上流部に堆積した土砂量は 420 万 m^3 にもおよび、流路工内に堆積した土砂量は 330 万 m^3 である。しかし、ラハール堆積物はほぼサコビア川流路内に留まったため、新たな氾濫域の拡大にはならず、1998 年に完成していた国道 3 号線の交通(日交通量 15,000 台)にも影響はなかった。

もし、これらの砂防施設が完成していなかったら、1991~94 年当時のような土砂氾濫・堆積(750 万 m^3 の土砂)が起り、大きな被害を受けていたはずである。つまり、これらの砂防施設(ラハール／洪水対策施設)の効果が発揮されたと考えられる。

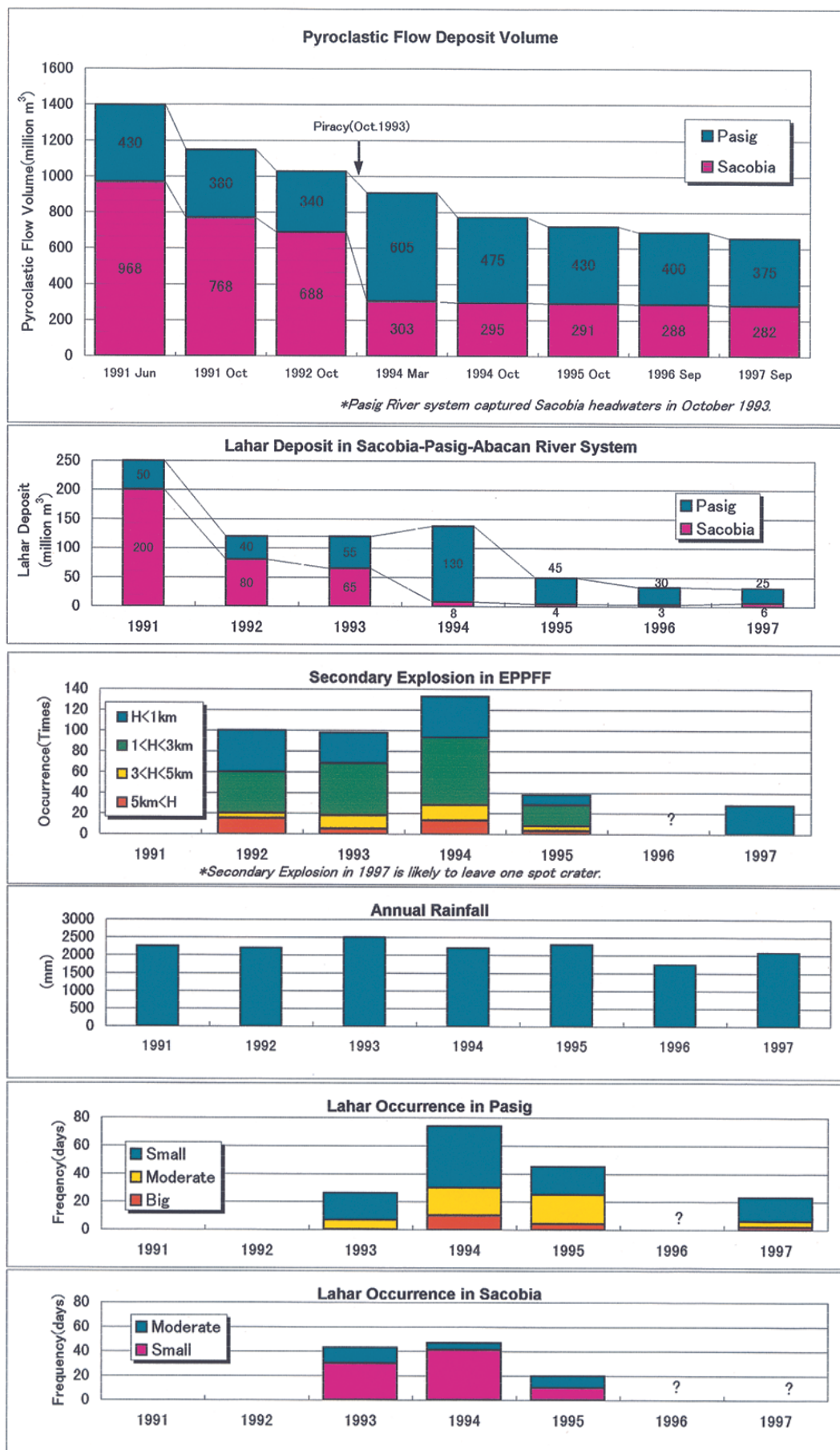


図-8 ピナツボ火山東部流域の火砕流堆積物と二次爆発、ラハールの経年変化

2000 年 12 月のヘリコプターからの視察によれば、サコビア川上流部の火砕流堆積地域は浸食が進み、深い谷地形が多く作られている。しかしながら、サコビア川上流域には、まだ 2 億 8 千万 m^3 もの火砕流堆積物が残っている。堆積原面は植生が回復し緑色になっているが、谷壁斜面は急傾斜で植生がつかず、白色の火砕流堆積物が露出しており、崩壊が続いている。この火砕流堆積物はほとんど常温となり二次爆発を起こすことはなくなったが、今後とも 20 年確率以上の降雨があれば、上記程度のラハールは繰り返される可能性がある。なお、バンバン川上流域では河床低下傾向にありこの傾向は徐々に下流へ伸展している。この河床低下現象がサコビア流路工との合流点まで進めば、サコビア川流路工では一転して河床低下に転じ、ラハールの堆積も減少すると推定されている。

一方、ラハールはサコビア川導流堤とバンバン川との合流点付近で堆積を終了しており、下流のサンフランシスコ橋付近には到達していない。しかし、次の出水期には、上記のラハール堆積物は再移動し、より下流に再堆積する可能性が高い。このため、早急にサコビア川導流堤内とバンバン川のラハール堆積物を掘削し、導流堤としての機能を復活させる必要がある。

(2) 火口湖の水位上昇対策

一方、ピナツボ火山噴火時に形成された火口湖においては水位上昇が顕著であり、PHIVOLCS は警戒情報を発している。図 9 に示したように、噴火直後の火口底の標高は 845m であったが、2000 年 11 月の観測では、湖水の水位は 950m 付近と 100 ~ 110m 上昇し、2 億 m^3 の水がカルデラ内に溜まっていると考えられる(写真-4、5)。カルデラ壁で一番低いのは、ブカオ川(北西)方向の Maraunot Notch である。噴火前の 1/5 万地形図によれば、ブカオ川の支流マロノト川の上流部がこの付近にあり、1991 年噴火によるカルデラ形成後、Maraunot Notch が最も低い鞍部(Notch)となっていた。次に低いのが O'donnell Notch であるが、前者より 18m 高い。したがって、今後湖水が溢れるとすれば、Maraunot Notch からマロノト川を経てブカオ川方向へラハールや洪水流が流下するであろう。

PHIVOLCS の観測によれば、1998 年 5 月 7 日に Maraunot Notch の余裕(Freeboard)は 45m であったが、1999 年 4 月 27 日には 27m、2000 年 3 月 10 日には 18m、6 月 28 日には 16m、8 月 5 日には 14.3m、8 月 16 日には 14.1m、9 月 16 日には 11.6m、10 月 13 日には 11.35m、11 月 23 日には 10.35m と、1 雨季毎に 10m 以上上昇している。このままの水位の上昇が続けば、1 年ないし 2 年後の雨季には Maraunot Notch を越流する可能性が高い。

カルデラ内の流域面積は 10 km^2 程度であるので、年間降水量を 3,000mm とすれば、年間流入量は 3,000 万 m^3 で、9.5 年間の総流入量は 2.9 億 m^3 である。このうち、蒸発散量を 1/3 程度とすれば、上記の貯留水量は妥当な数字である。

カルデラ壁で大規模な崩壊や地すべりが発生し、大量の土砂が湖水に一度に流入した場合、段波が発生し、Maraunot Notch を越流する危険性がある。また、Maraunot Notch 付近に湧水点があれば、パイピングによってカルデラの外側から崩壊が始まり、一気に湖水が大量に流下する危険性がある。マロノト川やブカオ川には、火砕流堆積物やラハール堆積物が大量に残っているので、湖水から溢れた洪水流は途中でこれらの堆積物を取り込み、大規模なラハールとなってブカオ川下流を襲う危険性が高い。このため、来年雨季までの乾季に早急な対応が必要である。



写真-4 ピナツボ火山山頂火口部の湛水状況(1995 年)



写真-5 ピナツボ火山山頂火口部の湛水状況(2000 年 12 月)

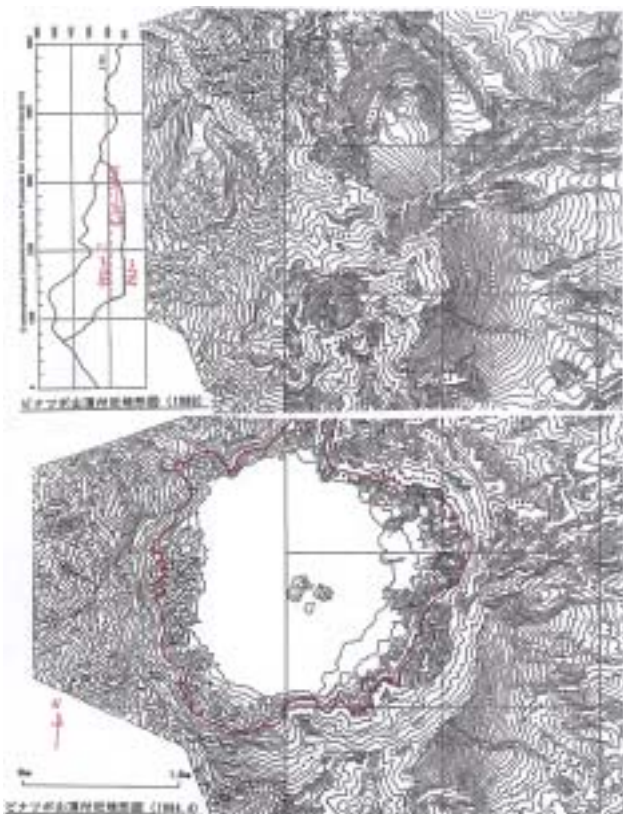


図-9 ピナツボ火山山頂部の地形変化図

Maraunot Notch では、2000 年 11 月現在 10.35m の余裕 (Freeboard) があるが、さらに水位が上昇すれば、鞍部がパイピングによって崩壊する危険性がある。10m 以下になれば、サイフォンによって自然流下させることが出来る。年間の流入量が 3000 万 m^3 程度であるので、 $1\text{m}^3/\text{秒}$ (1 年 = $60 \times 60 \times 24 \times 365$ 秒 = 3000 万秒) 程度の湖水をサイフォンで排水するような対策が考えられる。

図-10 に示したブカオ川の河床縦断面図によれば、噴火以前からブカオ川の上流部のマロト川が山頂まで伸びていた。

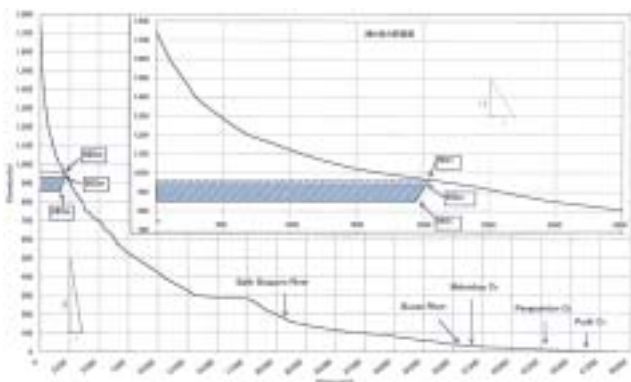


図-10 ブカオ川の河床縦断面図

噴火後もこの部分が Maraunot Notch として残り、標高 960m

前後の鞍部となっていたと考えられる。したがって、Maraunot Notch より下流にもマロト川の河道が残っており、火口湖の水が溢れても急激に火口の水位が下がる可能性は、比較的少なくなったと判断される。しかし、マロト川の河道の地質状況によっては、浸食が急激に進み、河床低下が進行する可能性がある。地質調査等詳細な調査が必要であろう。

その後、2002 年 7 月上旬に発生した台風 Gloria の影響により、PHIVOLCS Quick Response Team の 2002 年 8 月 3 日の報告 (インターネット公開) によると、9 日間で 740mm という豪雨になり、火口湖が決壊してラハールが発生し下流堤防を越流したが、大きな被害はでなかった。今回の豪雨で、かねてから指摘されていた部分が崩壊し新たに U 字谷が形成された。その結果、23m も火口湖の水位が下がり、6,500 万 m^3 の湖水が流出した。土砂と水の比率を 3:2 とするとラハールの体積は 1 億 6 千万 m^3 と推定される。

7. むすび

以上、ピナツボ火山噴火後 10 年間の地形変化、土砂災害とその対策の概要を述べた。大局的に見れば、噴火に伴う火砕流堆積物の二次移動現象であるラハールは規模を縮小し、移動土砂量は減少していくものと考えられる。また、ラハール/洪水対策施設も設置されてきており、道路・橋梁などの社会施設も整備されつつある。

しかしながら、問題がなくなったわけではない。ピナツボ火山の東部地域では、下流のデルタ地帯へ細粒土砂が流出し、河床掘削しているものの浸水期間が長期化している。

また、西麓斜面側では恒常的に土砂が河口部の市街地、主要国道付近まで流出し、橋桁までのクリアランスはほとんどない。西側地域には噴火時の火砕流堆積物の 2/3 が堆積し、土砂量的には東側地域より格段に多いにもかかわらず、費用対効果が小さいという理由で地域開発、防災対策の優先度が低く、これまであまり投資されてこなかった。基盤整備がなされなければ住民の生活が安定せず、開発からますます取り残され、現状維持すら出来ない可能性がある。このような悪循環を打ち切るために、どのような対策が考えられるのかが課題である。さらに、ピナツボ火口湖の水位が上昇していることで、一気に溢れれば、大災害が予想される。

一方、地域に住む住民から見れば、地域の復興は最大の関心である。火山噴火、ラハール災害、そしてアメリカのクラーク空軍基地、スービックの海軍基地が相次いで閉鎖されたことにより地元経済は大きな打撃を受けた。防災対策を基盤として地域がこれまで以上に復興することを期待しているところである。

1999 年 10 月には、日本の活火山を抱える市町村長の集まりである「火山砂防フォーラム」がピナツボ火山で開催された。日本からは委員長である吉岡庭二郎島原市長を始めとして 19 名の市町村長など、100 名の砂防防災関係者が参加し、また小野英男 JICA フィリピン事務所長にも出席頂いた。フィリピン側からは、ピ

ナツボ、マヨン火山周辺の市町村長、公共事業道路省 (DPWH) 職員など 100 名が参加した。「火山との共生」をメインテーマに被災地での復興対策について意見を交換し、技術的な面だけでなく、火山噴火観測の体制、避難勧告の責任者、再定住地の造成、市町村財源減収対策、災害保険など防災・地域復興に係わる広い分野での発表、意見交換があり、非常に有意義であった。

最後に、本報告をまとめるに当たっては、米国地質調査所 (USGS) やフィリピン火山地震研究所 (PHIVOLCS) の調査担当者から多くの参考文献を頂くとともに、貴重な観測資料を借用して解析させて頂いた。このような貴重な調査の機会を与えて頂いたフィリピン政府や日本政府、国際協力事業団の関係各位に御礼申し上げる。

なお、本論文は、平成 12 年度科学研究費補助金(基礎研究(C)(1))研究成果報告書「活火山地域の人間のための工学—火山工学の確立—(課題番号:12895012)」(研究代表者北村良介・鹿児島大工学部教授)で公表したものを一部修正したものである。

参考文献

- 1) 原義文、渡辺正幸、中矢弘明:ピナツボ山噴火にともなう土砂流出災害について、平成 4 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.332-335、1992
- 2) 原義文:ピナツボ山噴火後の土砂流出、新砂防、44 巻 6 号、pp.29-34、1992
- 3) 広瀬典昭、井上公夫:ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂災害、地形、20 巻 4 号、pp.431-448、1999
- 4) 井上公夫、大野宏之、渡辺正幸、大石道夫、広瀬典昭、井上美公:ピナツボ火山噴火後の地形変化と防災計画調査、新砂防、47 巻 2 号、pp.52-60、1994
- 5) 井上公夫、大野宏之、長井義樹、渡辺正幸、大石道夫、広瀬典昭、井上美公、白石眞之、深澤浩:ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂流出(1)、(2)、(3)、(4)、平成 6、7、8、10 年度砂防学会研究発表会概要集、6 年度、pp.169-172、7 年度、pp.71-74、8 年度、pp.213-214、10 年度、pp.328-329.1994、95、96、98
- 6) 井上公夫:ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂災害、1996 年度日本地質学会関東支部講演会、pp.1-28、1996
- 7) 井上公夫:ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂災害、平成 10 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.12-13、1996
- 8) 井上美公、広瀬典昭:ピナツボ火山東部河川流域における大規模土砂移動現象と対策、水工学論文集、45 巻、pp.704-714、2001
- 9) 金子隆之、安田敦:Energy cone モデルによるピナツボ火山 1991 年火砕流の解析(Frothing 型噴火の可能性とマルチフローユニット型火砕流のMobility)、火山、38 巻 5 号、pp.157-165、1993
- 10) 小宮学:ピナツボ火山の噴火、気象年鑑 1992 年版、pp.160-164、1992
- 11) 小屋口剛博、徳野正巳、Listanco,E.:フィリピン、ピナツボ山の噴火、1991 年 6 月 15 日、火山、36 巻 4 号、pp.447-451、1991
- 12) Newhall,C.G. and Punongbayan,R.S.:FIRE and MUD, Eruption and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, University of Washington Press,p.1126,1996
- 13) Nippon Koei co.,Ltd.: Recommendation note on Urgent Countermeasures for Mount Pinatubo Eruption,1991
- 14) 日本工営㈱、㈱建設技術研究所:フィリピン共和国ピナツボ火山東部河川流域洪水および泥流制御計画調査報告書、国際協力事業団、1996
- 15) Ono,H.:Mount Pinatubo: Challenge and Response.JICA, p.28,1994
- 16) Ono,H.: Sabo Works: Challenge and Response. JICA, p.128,1995

- 17) PHIVOLCS:Distribution of active and inactive volcanoes in the Philippines,1988
- 18) PHIVOLCS:Mudflow Hazard Map,1991
- 19) PHIVOLCS Quick Response Team : Summary REPORT Investigation of Pinatubo Crater Lake and the Bucao River System, 03 August 2002:by Internet
- 20) Pierson,T.C., Janda,R.J., Umval,J.V.and Daag,A.S.: Immediate and longterm hazards from lahars and excess sedimentation in rivers draining Mt.Pinatubo,Philippines. U.S.G.S Water-Resouces Investigation Report,92-4039, p.37, 1992
- 21) Rodolfo,K.S.,: Pinatubo and the Politics of Lahar: Eruption and Aftermath,1991, University of the Philippines Press, p.341,1995
- 22) 酒谷幸彦・広瀬典昭・井上公夫・井上美公:ピナツボ火山噴火後 10 年間の地形変化と土砂災害、平成 12 年度科学研究費補助金(基礎研究(C)(1))研究成果報告書、「活火山地域の人間のための工学—火山工学の確立—(課題番号:12895012)」(研究代表者 北村良介・鹿児島大工学部教授),pp.89-110,2001
- 23) Watanabe,M., Ono,H., Hirose,N., Inoue,K., Inoue,Y. : Geomorphological Changes after the Eruption in the Eastern Slope of Mt. Pinatubo, in Central Luzon, Philippines. Proceeding of the International Sabo Symposium, Tokyo, Japan, pp.487-494,1995
- 24) (社)全国治水砂防協会:特集:'99 火山砂防フォーラム in フィリピン、131 号、pp.8-19、1999