

国際協力事業団(JICA) 大野宏之 渡辺正幸
JICA調査団 広瀬典昭 大石道夫 ○井上公夫

はじめに

フィリピン国ルソン島中部のピナツボ火山は、1991年6月に世界でも今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、高温の火砕流が周囲の山麓部に厚く堆積した。上流部に厚く堆積した降下火山灰や火砕流堆積物は、雨期に泥流(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、避難住民247万人以上という大災害になった。噴火後4年を経過した現在でもなお、Laharの氾濫地域は拡大しており、今後数年間はこのような状態が続くものと思われる。

フィリピン政府の要請に基づいて、国際協力事業団(JICA)はピナツボ火山東部地域のSacobia/Bamban川とAbacan川流域について、「洪水及び泥流制御計画調査」を計画し、JICA調査団(日本工営株式会社と株式会社建設技術研究所の共同企業体)が1993年11月より調査を実施している。93年度の調査結果は前年の砂防学会と新砂防47巻2号で報告したが、94年度の調査結果がまとまったので報告する。

1 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バレス山地に存在し、マニラから北西に90kmの距離にある。図1の旧クラーク基地上空から見た鳥瞰図に示したように、噴火前の山頂高度は1745mであったが、今回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は、火砕流やLahar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。この火山体の全体は、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。

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、溶結していなければ侵食に対して弱いため、豪雨時にLaharとなって下流の平野部に流下した。Laharは土砂運搬力がなくなると堆積し、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。旧クラーク基地の載る平坦面は、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修飾されて、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にも達する釣り鐘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)。

2 ピナツボ火山東部地域の地形変化

日本の援助対象河川は、東部地域のSacobia/Bamban川とAbacan川流域で、アメリカ合衆国のそれはPasig川流域である。しかし、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、高温の火砕流堆積物が最大200m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、図2. 二次爆発と流域変化に示したように、流域面積がめまぐるしく変化した地区である。

2.1 1年目(1991年)

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月末までの雨期には、Sacobia川やAbacan川では何回もLaharが発生し、下流域に大きな被害が発生した。1年目のLahar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、Sacobia川とAbacan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Sacobia川の上流部はAbacan川方向に流れていた。その後の河川侵食によりAbacan gapの地点で河川争奪が起こり、上流部はSacobia川方向に流れるようになった。このため、旧Clark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、Abacan川にはほとんど水は流れず、30～50mの幅広い谷地形が残されていた。このため、噴火前のAbacan川の川沿いにはSapang batoの集落やAngelesの市街地が続いていた。しかし、LaharがAbacan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。

Sacobia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、Sapang Cauayan川やMalimla川と合流してBamban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LaharがSacobia川からBamban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、Malimla川との合流点付近では河床が数m上昇し、Malimla川などの支川では出口が閉塞され、いくつかの天然ダムが形成された。しかし、8月21日の豪雨時にMalimla川の出口付近の天然ダムが決壊し、この時の洪水によって国道3号線のBamban橋が流され、この付近の河床が10～20m上昇した。

11月以降の乾期になると、Sacobia川やAbacan川ではLaharの発生はほとんどなくなったため、比国公共道路事業省（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、Sacobia川で2基、Abacan川の本支川で8基の砂防ダム（高さ3～10mでふとん籠製が多い）を建設した。また、Bamban川では翌年の雨期前にRio Chico川との合流点までの全区間にわたって、Lahar堆積物を利用して堤防を建設した。

2.2 2年目（1992年）

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Sacobia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1.0～1.5kmの噴煙中が上がり、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Hot Laharが発生し、Sacobia川とAbacan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（Sacobia川で2基、Abacan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Laharはあまり流下せず、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、Sacobia川方向にすべての流水やLaharが流れるようになった（この時以降、Abacan川ではLaharは発生していない）。

その後、2年目の雨期になると、Sacobia川上流部で再び二次爆発が活発に発生し、それに伴ってLaharが何回も発生するようになった。そして、Lahar堆積物は国道3号線を越えてBamban川右岸側の2000ha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。

DPWHでは、乾期になると1993年の雨期までにSacobia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、Bamban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Pasig川のLahar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せき止められて、かなり大きなせき止め湖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、Laharが何回か発生した。

2.3 3年目（1993年）

3年目の雨期になっても、Sacobia川上流部で二次爆発が活発に発生し、それに伴ってLaharが何回も発生した。そして、堤防の中にLahar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、Sacobia川とPasig川で大規模な二次爆発に伴う二次火砕流とLaharが発生した。LaharはBamban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Sapang Balemの集落も2～3mの層厚で埋積してしまった。しかし、この時の堆積土砂はむしろPasig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の堆積物で埋積し、国道橋も流されてしまった。災害直後のPHIVOLCSのヘリコプターからの観察によれば、Sacobia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、Sacobia川の上流部がPasig川の方に流れるようになった。私たちの1994年2月7日の観察によれば、上記の河川争奪によって、Pasig川の河谷が非常に深くなっていることがわかった。

11月以降の乾期になると、二次爆発やLahar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、Sand Pocketなどの緊急工事が1994年3月頃から開始された。

2.4 4年目 (1994年)

4年目の雨期にはSacobia川からのLaharの発生はほとんどなくなった。しかし、Pasig川では雨期が始まった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Pasig川の河谷を50mから100mもの深さで埋めてしまった。このため、Pasig川の中流部は、6月末頃から流域変更して左支川の方に流下するようになった。

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Pasig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Laharとなって流下し、下流部に多大の被害を与えた。湯気を上げながら流下するため、Steaming Laharとも呼ばれている。

1994年8月末には、Pasig川の河床が最も上昇し、広範囲に土砂が堆積した。特に、8月末の豪雨に伴って発生したLaharは、Pasig川の左岸側の堤防を乗り越え一部の土砂がAngelesの市街地方面に流下し出した。しかし、Lahar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Pasig川本川を流下した二次火砕流は右支川をせき止め、再び大きなせき止め湖を形成した。

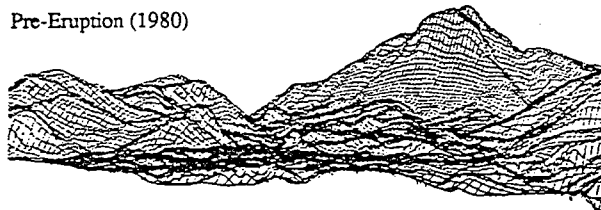
この湖はヘリコプターの写真から8月の末頃最大となったと考えられるが、9月22日の台風襲来による豪雨により、せき止め湖は決壊し再びRaharとなって流下した。このRaharは、Pasig川の下流30kmの範囲まで広範囲に堆積し、多大の被害を与えた。

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Raharが発生した。この時の水蒸気爆発はPasig川の上流部やSacobia川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年の4月の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、今年の雨期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。従って、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、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。

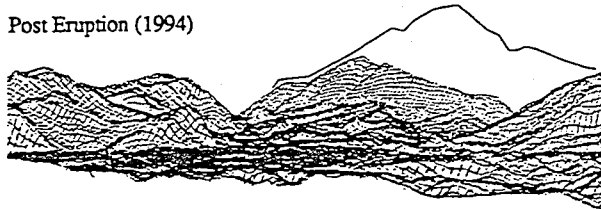
3 むすび

4年目の乾期に入ると、水蒸気爆発やLaharの発生もなく、土砂氾濫地域も落ち着きを取り戻している。また、DPWHによって復旧工事が積極的に進められている。当地区の防災対策のマスタープランは、JICA調査団によって作成中であり、詳細をここで述べられないが、以上述べたような急激な地形変化を充分に考慮して、フィリピンの国情に合った対策を立案中である。

Pre-Eruption (1980)



Post Eruption (1994)



(a) View from Clark Field

図1 旧クラーク基地からみた鳥瞰図

Pyroclastic Flow Deposit Volume in the Eastern Slope of Mt. Pinatubo

River Basin	C.A. (km ²)	Pyroclastic Flow Deposit Volume (million m ³) and Remaining Ratio (%)					
		1991 June	1991 October	1992 October	1994 March	1994 October	
Sacobia-Abacan		968	768 79%	688 71%	303 31%	295 30%	
Sacobia-Abacan upstream	18	550	400 73%	347 63%	303 55%	295 54%	
Sacobia-Abacan uppermost reach	22	418	368 88%	341 82%	Annexed to Pasig River 320 77%	252 60%	
Pasig upstream	23	430	380 88%	340 79%	285 66%	223 52%	
Pasig		430	380 88%	340 79%	605 141%	475 110%	
Total	63	1,398	1,148 82%	1,028 74%	908 65%	770 55%	

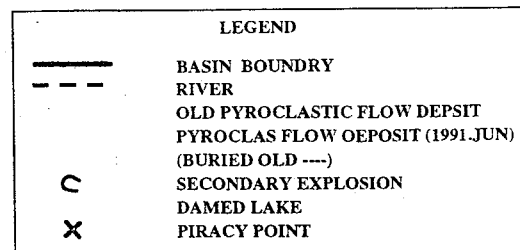
▲ Piracy

Annual Lahar Delivered Volume in the Eastern Drainage of Mt. Pinatubo

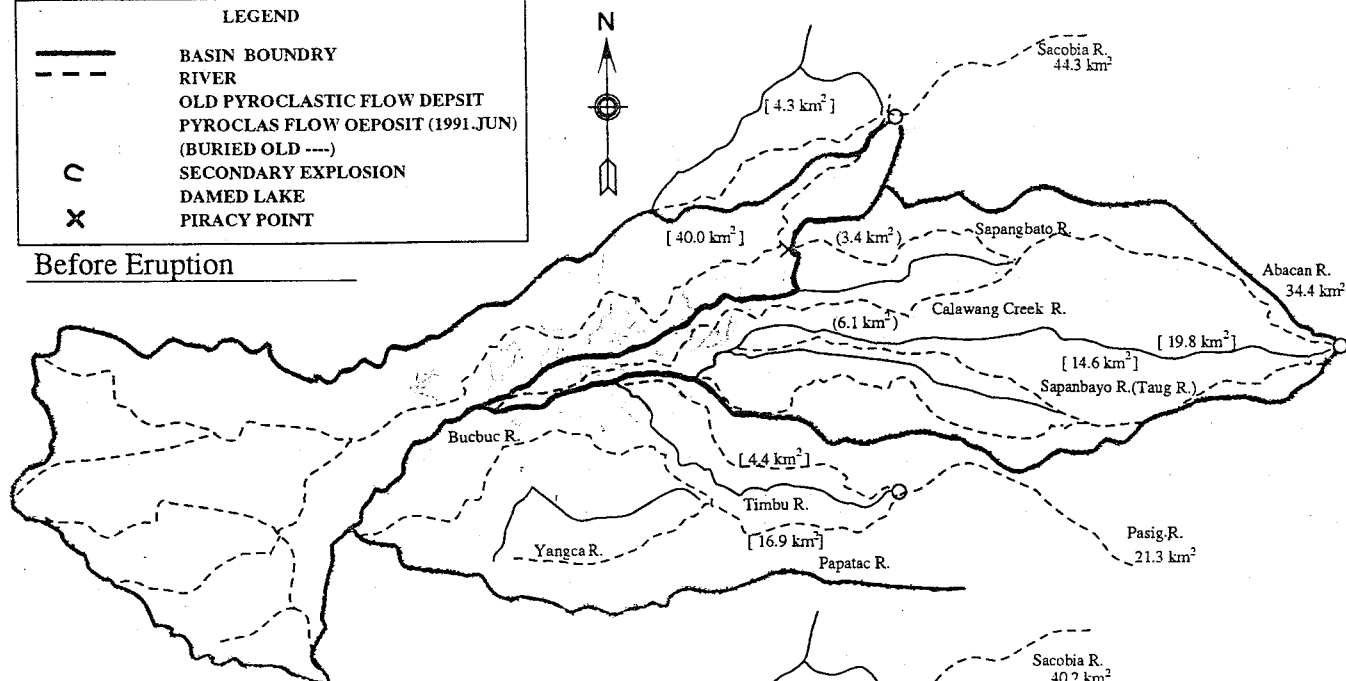
River Basin	Lahar Delivered Volume (million m ³)				
	1991	1992	1993	1994	Total
Sacobia-Bamban	150	80	65	8	303
Abacan	50	0	0	0	50
Pasig	50	40	55	130	275
TOTAL	250	120	120	138	628

Comments: The Pyroclastic Deposit volume for 1994 March was estimated using the GIS database created from the DTM for 1991, 1992, 1994 with a contour interval of 5m mapped to a scale of 1:10,000 from Aerial photographs. The Sacobia uppermost stream was annexed to the Pasig in 1993 October. Lahar deposition volumes are based on PHIVOLCS for 1991 to 1993 and JICA for 1994.

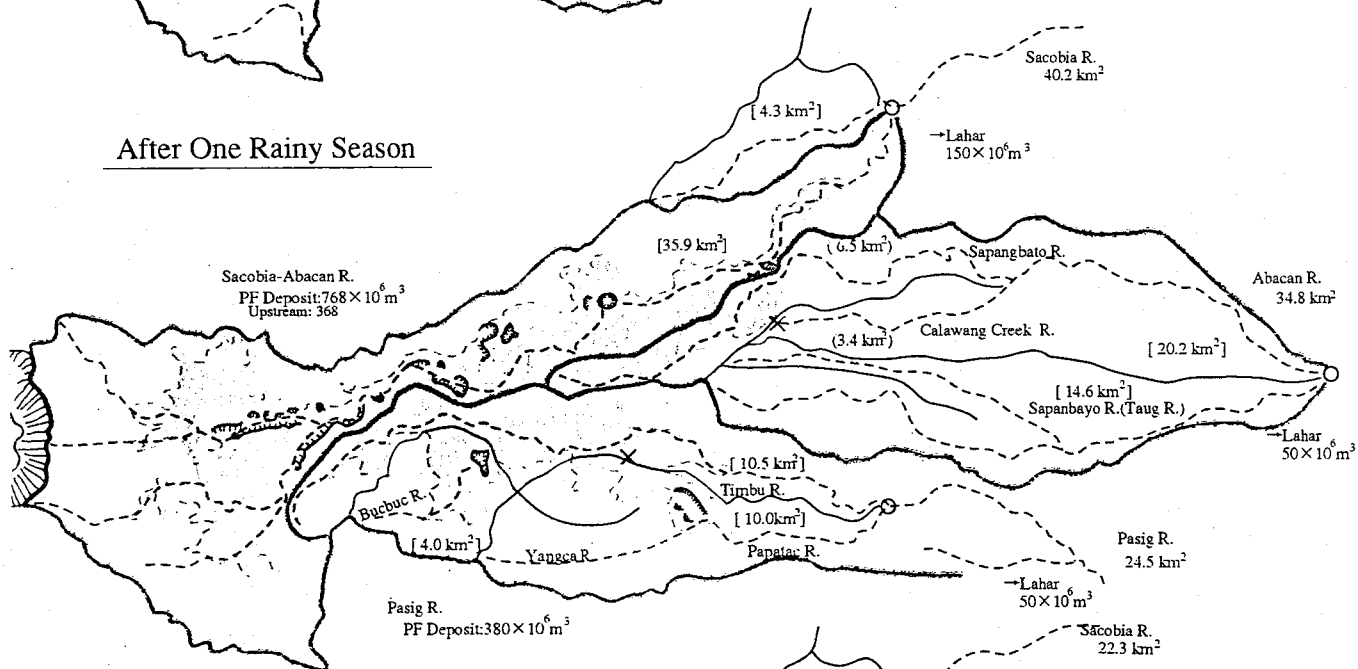
表1 火砕流堆積物と泥流氾濫量の推移



Before Eruption



After One Rainy Season



After Four Rainy Seasons

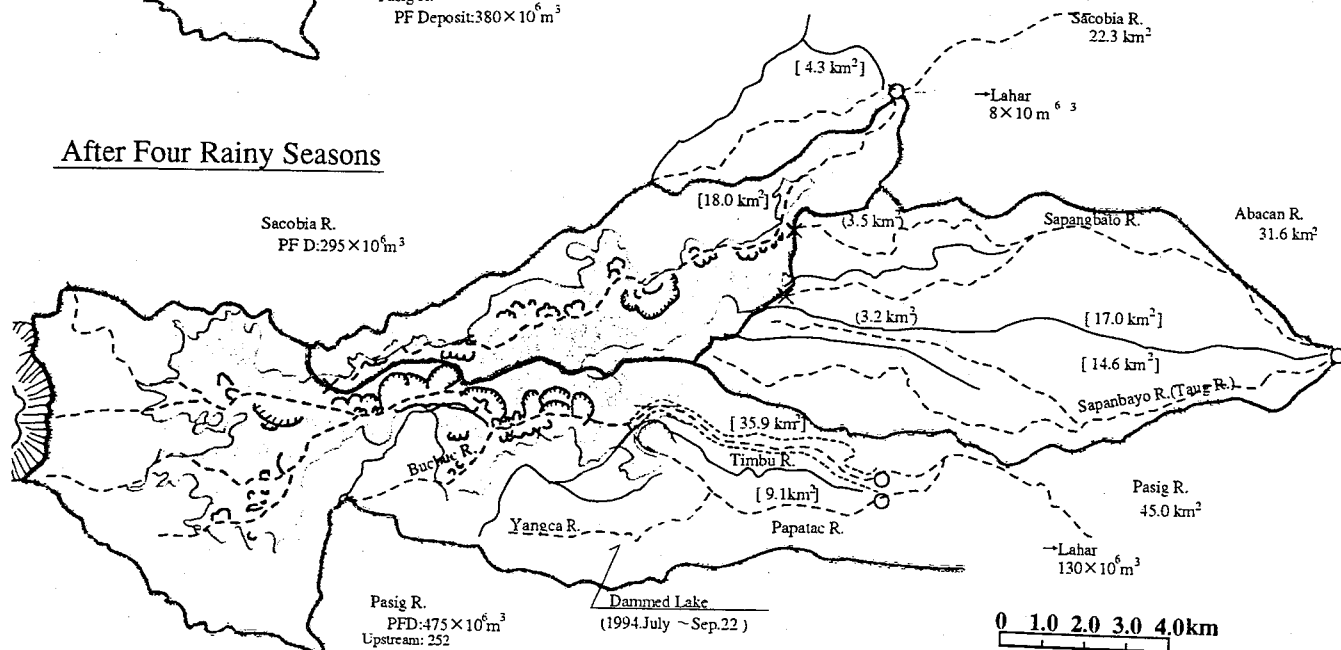


図2 二次爆発と流域変化