

セント・ヘレンズ火山の噴火に伴う災害現象と対応

高橋 保

1. 緒 言

1980年5月18日午前8時32分(現地時間)、アメリカ合衆国ワシントン州南西部にある St. Helens 火山(Fig. 1)が大爆発を起した。この噴火は今世紀最大と言われるほど規模が大きく、約 1 km^3 と見積られている噴出物を出し、大気中に拡散した火山灰や火山ガスの影響が全世界に及び、日本でも6月初旬に影響が及んでいることが確認されたことは周知のとおりである。

この噴火では上記にとどまらず、眠らんでいた山の北側斜面がすべり出し、それに伴って生じた水蒸気爆発で崩壊土塊が粉々に粉砕され、その間から立ち昇った微細粒子を多量に含む真黒の雲が暴風 (blast) となって

流れ出した。この暴風は山の北側 20 km、東西方向約 30 km の範囲を破壊しつくした。とくに、その内部の、山頂から 10 km 以内の地域は、20 m を越える大木も根こそぎ、あるいは根本からひきちぎられて、表土もろとも吹き飛ばされ、跡には一面に灰で覆われた裸の地面以外何も残されておらず、その外側でも、すべての樹木が枝を取り払われて丸太のようになって横たわっているような状態となり、遠くから見るとまるでマッチ箱をぶちあげたような光景である。

一方、崩壊した山体 ($1\sim 2\text{ km}^3$) は流動化して土石なだれ (debris avalanche) となり、山の北斜面を約 8 km 流れ下り、山麓に達して、前面に立ちほだかる比高 350~500 m の山塊に衝突した。その後、その大部分は西方向へ向きを変え、 2° 以下の緩い河床勾配をもった North Fork Toutle 川を埋めながら、さらに約 23 km も流下して停止したのである。堆積厚きは、土石なだれが山塊に衝突した付近では 100 m を越え、最先端部で

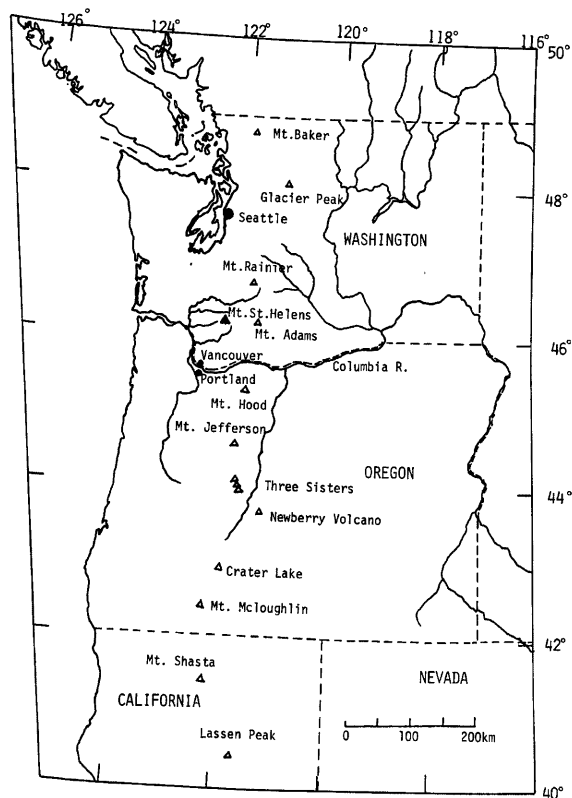


Fig. 1 Mt. St. Helens and other Cascade volcanoes.

は約15mとなっており、堆積幅は1~2kmである。

土石なだれが鎮静化すると間もなく、その堆積物の表面を大規模な洪水が流れた。この洪水は流量がNorth Fork Toutle川の既往最大洪水をはるかに上回っていたのみならず、多量の火山灰を含んで、密度が 1.7g/cm^3 にも達していた。その結果、下流のCowlitz川およびさらに下流のColumbia川の河床が4.5mから8mも上昇した。洪水はToutle川にかかった20ヶ所にも及ぶ橋を落し、下流部では氾濫による災害を起した。さらに航路を閉塞して、わが国の貿易にも支障を生じたほどである。泥流洪水および土石流はSt. Helens火山に源をもつ他の河川にも発生している。

以上の現象の影響範囲をまとめて示すと、Fig. 2 のようである。その他に、土石なだれの終了後には火口から軽石流(Pyroclastic flow)の流出も見ており、熔岩流以外のすべての噴火に伴う現象が、それも極めて大規模に生じたものと言える。

このような天変地異のわりには、失われた人命は行方不明を合せて72名と比較的少なかった。これは山の周囲がほとんど森林で、住民が少なかったことも幸いしているが、事前に適切な処置がとられていたことも大いに関係している。なお、森林の損失は、荒廃域の約半分を占める国有林の部分だけで拾億ドルと見積られ、その他の種々の損害を入れると30億ドル程度にのぼると言われている。

本文は著者が参加した大爆發の1ヶ月後の6月17日から27日までの現地調査と、その際に収集した資料とによって、著者なりの現象分析を試み、さらに災害に対してとられた種々の対応について整理し、問題点を明らかにしようとするものである。まだ噴火活動が継続中の調査であり、種々の規制やヘリコプターでなければ山に近づけないという不便等のため、現地調査はごく概括的なものにとどまったが、火山国であるわが国で、今後の防災を考えて行く上に何らかの参考になれば幸いである。

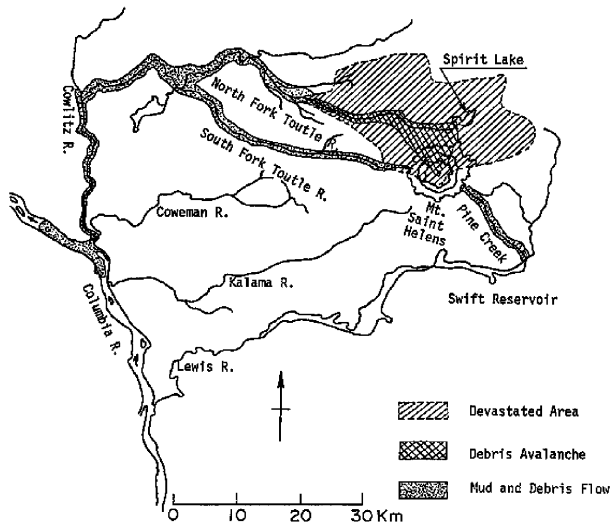


Fig. 2 Mapping of the devastated area (except ash fall).



Photo 1 Mt. St. Helens before the eruption, which is reflecting on the Spirit Lake.

2. St. Hellens 火山およびその1980年の噴火経過の概要

St. Helens 火山は Fig. 1 に示したように、日本列島らとともに、環太平洋火山帯を形成する Cascade 山地の一角を占め、成層してはほぼ完全な円錐形となった、標高 2,949 m の火山であった。このため西の富士山とも呼ばれていた (Photo 1)。この山は、Fig. 3 に示すように、過去何度も噴火を繰返し、熔岩流、火砕流、泥石流を Fig. 4 に示す水系網に沿って発生させてきた。Photo 1 に写っている Spirit 湖 (水面積 5.1 km²) も火山泥流によって North Fork Toutle 川が堰止められた天然ダム湖である。火山周辺一帯は大規模な森林で、Spirit 湖周辺は有名な保養地となっていた。

さて、1980年の火山活動は、123年の休眠期から突然3月20日にマグニチュード4の地震とともに覚めたことから始まる。その後、地震の頻度および強度は増減を繰り返していたが、3月27日の正午すぎ、最初の水蒸気爆発が起り、小さい噴火口が形成された。この噴火は規模の小さいものであったが、その後も灰を噴出し続け、28日には第1火口のすぐ隣りに第2火口が生まれた。4月2日には二つの火口の隔壁が崩れて一つになっていることが観察されている。この火口は4月3日には直径420m以上に成長しており、4月4日にはマグマが上昇してきていることを示す長い脈動が感じられるようになった。これは4月7日頃まで続いたが、その後は

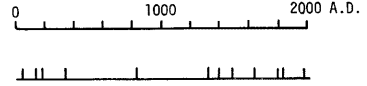


Fig. 3 Eruptions and dormant intervals at Mt. St. Helens.

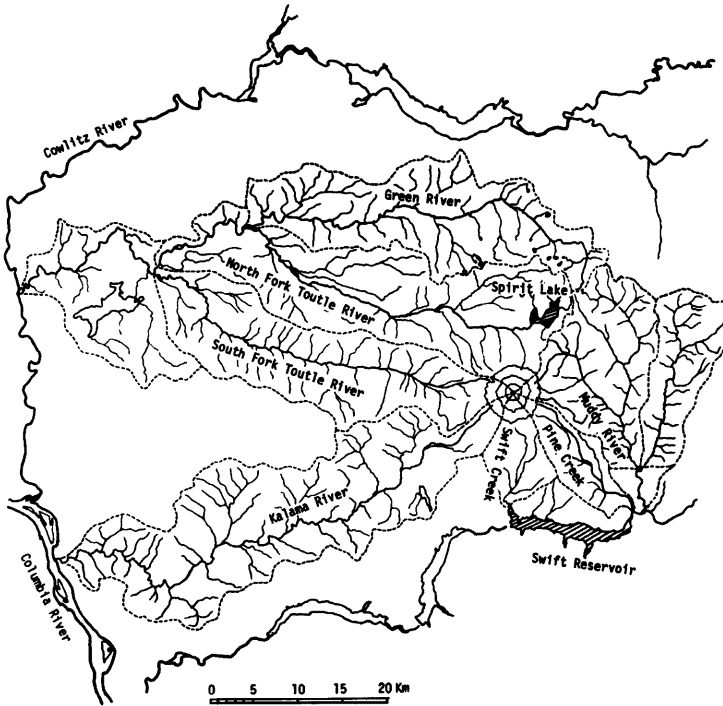


Fig. 4 River system around the volcano.

活動が弱まり、4月12日以後は噴火は全く治まってしまった。このような状態は5月初めまで続いたが、その間4月30日には頂上付近の北斜面が約100mも脹らんでいることが確認され、1日約1.5mの速度で膨脹を続けていることがわかった。5月7日には再び灰を噴出し始め、5月12日には地山の脹らみによって緩められた雪と水が、地震をきっかけとして雪崩となった。そして、5月18日の朝マグニチュード5と推定される地震とともに大爆発を起したのである。

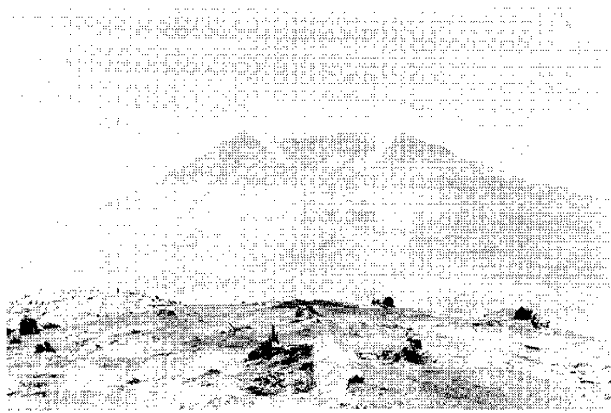


Photo 2 Mt. St. Helens after the eruption.

地震と大爆発とは、ほんの数秒の間に前後して生じたが、その間、まず最初に地震によって噴火口の壁に雪崩が発生し、次いで脹らんでいた北斜面がすべり出した。このときに至って、上方の滑落崖付近や下方の流動土塊の間から真黒の煙が吹き出し、煙は北東から北西の広い角度に拡がりながら、崩壊土塊は土石なだれとなって北方向へと流れ出したのである。その後、以前の頂上付近にあった火口の位置から、鉛直の噴煙の柱が立ち昇り、10分以内に20km以上の高さに達した。この噴煙は西風に乗って東方へ流れ、ほとんどアメリカ大陸を横断して降灰をもたらした。この爆発によって形成された火口は東西方向が1.5km、南北が3kmで、北に向かって口を開けたような状態となっており、山の高さが約360m低くなった(Photo 2)。この噴火は18日の午後5時半頃には下火となったが、それまでに、火口から軽石流を出している。

5月21日以後は間歇的に噴火を繰返す程度となっていたが、5月25日には第2回目の大爆発を起し、さらに、6月12日に第3回目の大爆発を起した。この爆発では、前2回の場合と違って、火山灰を南方向へまき散らしたのが特徴である。6月15日には火口に熔岩ドームが発見され、7m/dayの割合でせり上がっていることが確認された。この頃から顕著な地震動も観測されなくなって、さしもの大規模な火山活動も終息状態に至ったかの感があったが、6月22日、またも大爆発を生じてドームも飛び散ってしまい、8月7日にも噴火している。その後はさしたる活動もなく、再びドームが成長しているとのことである。

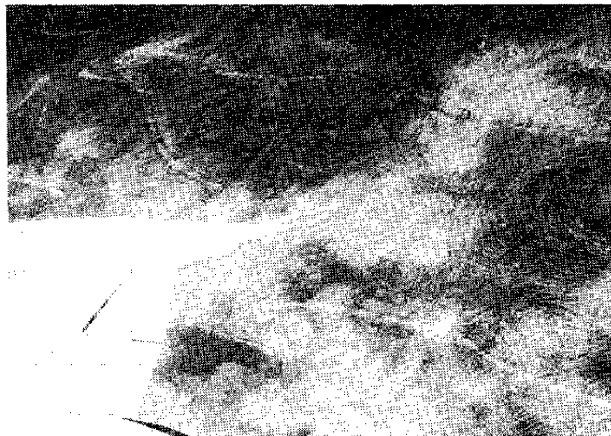


Photo 3 Blowndown trees.

3. 災害現象の分析

3.1 微細粒子による突風

約400km²以上の範囲にわたって木が吹き飛んだり倒れたりした

(Photo 3) 原因については、横向きの爆発のために生じた空気のショックウェーブであるとする考えもあるが、前節でも述べたように、噴火の順序としては、まず崩壊が生じて、いわば蓋がとれたような状態で水蒸気爆発が起っており、強い横向きのショックウェーブが発生するような状況ではなかったように推察される。また、山の近くの木が持ち運ばれており、倒れている木も山かけ等では渦巻きのような形状を呈していること、その外側の立っている木が焼けており、実際に熱い物質が運ばれて来たこと、さらに、真黒の波打つ煙がおし寄せて来るところを撮影した写真があるが、その前面では樹木は平常時のように立っていることから、黒煙を構成している微細粒子群が風と一緒に運ばれていると考えられること、樹木の倒れた領域内には、火山の山体を構成していたとみられる比較的粗い粒子成分 (Lapilli) や木くずが下層に堆積し、その上に空中を沈降してきたとみられる火山灰が覆っていること、等から、高濃度に粒子を含んだ空気が数 100 m という厚い層を形成したために、密度流となって斜面に沿って流れ出したために生じた現象であると考えられる。密度流の流動状況を時間を追って模式的に示せば、Fig. 5 のようになるであろう。ただし、この図は山頂を通る南北方向の断面を示しており、この断面では図に示した Minnie Peak が荒廃域の北端となっている。もちろん、密度流はこの方向だけでなく、北東から北西の広い範囲に拡散しながら流れた。

火山噴火時にかぎらず、大規模崩壊に伴って、このような突風が生ずることはいくつかの例で指摘されている。例えば、ペルーの Nevados Huascarán の土石なだれでは、本体の通過幅よりも数 km 広い幅で泥を含んだ強い風が起り、樹木が倒れたり、葉がひきちぎられたりしている²⁾。

このような密度流がどのような力学機構によって生ずるのかが問題であるが、ここでは Bagnold の auto-

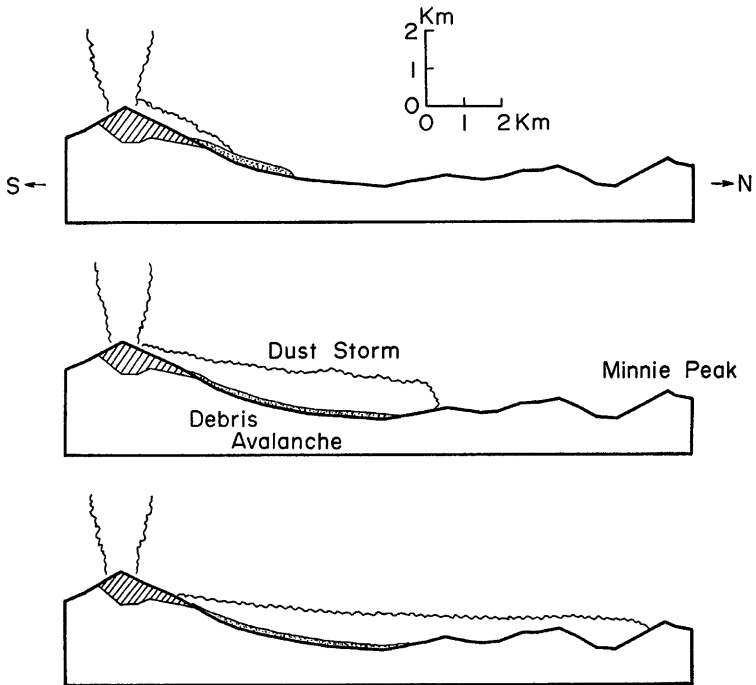


Fig. 5 Density current concept of the blast.

suspension の概念³⁾を適用してみよう。彼によれば、底面勾配 $\sin \theta$ が v/\bar{U} を越えるとき、流れの中に浮遊している粒子に作用する重力成分によるパワーが、粒子の浮遊状態を保持し、かつ流れを保持するのに必要なパワーよりも大きくなり、流れは外部からの何らのエネルギー補給もなしに流動を続けられる。ただし、 v は粒子の沈降速度、 \bar{U} は粒子の流れ方向の速度である。

いま、流れの厚さを h 、平均濃度を σ 、粒子の密度を σ 、空気の密度を ρ とすれば、粒子群によってもたらされるパワーは

$$(\sigma - \rho)gch\bar{U} \sin \theta$$

であり、このうち、 $(\sigma - \rho)gchv$ が粒子を浮遊するのに費される。したがって、 $(\sigma - \rho)gch(\bar{U} \sin \theta - v)$ が流れを保持するのに十分の大きさでなければならない。

流れを保持するのに必要なパワーは、流れの平均流速を \bar{u} 、底面におけるせん断応力を τ_0 とすると、 $\tau_0\bar{u}$ である。流れの上層における抵抗を無視して、河川の流れと同様に取扱うことができるものと仮定すれば、

$$\bar{u} = \frac{2.3}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma c}} \log_{10} \frac{13.2h}{k} \quad (1)$$

のように書ける。ここに、 k は底面の粗度高さ、 κ はカルマン定数である。

(1)式から、

$$\tau_0\bar{u} = \frac{\kappa^2}{5.29} \sigma c \bar{u}^3 \log_{10}^{-2} \frac{13.2h}{k} \quad (2)$$

を得る。

以上から、浮遊粒子による余分のパワーと流れに費されるパワーとが均合う条件は、 \bar{U} が \bar{u} に等しいとして、

$$(\sigma - \rho)gch(\bar{u} \sin \theta - v) = \frac{\kappa^2}{5.29} \sigma c \bar{u}^3 \log_{10}^{-2} \frac{13.2h}{k} \quad (3)$$

となる。これから、 v を \bar{u} に比して無視すると、そのような場合の流速として、

$$\bar{u} = \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma} g h \sin \theta \right)^{1/2} \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \frac{13.2h}{k} \quad (4)$$

を得る。 ρ は σ に比してほとんど無視でき、また、 $\sigma \leq 1\%$ では $\kappa \approx 0.4$ となるから、

$$\bar{u} = 5.75 (gh \sin \theta)^{1/2} \log_{10} \frac{13.2h}{k} \quad (5)$$

のように書ける。

いま、 $h=200$ m、 $k=10$ m、 $\theta=8^\circ$ とすれば、(5)式は $\bar{u}=230$ m/s を与える。この密度流を構成していた粒子が 2 mm であったと仮定すれば、沈降速度 v は 11 m/s 程度であるので、 v が \bar{u} に比して無視できるという仮定は十分成立している。また、レイノルズ数 $\bar{u}h/\nu$ は約 2.5×10^9 で流れは十分乱れており、 $v/u_* = 0.66$ となって、浮遊条件も満足している。

流れの中に粒子が容積濃度で 0.5% 含まれていたものとして。この風が直径 1 m、高さ 10 m の樹木の幹に及ぼす力を求めると、

$$F = \frac{1}{2} C_D (\sigma c) \bar{u}^2 A \quad (6)$$

であるから、抗力係数 C_D を 0.6、 $\sigma = 2.65$ g/cm³ として、 $F=214$ t 重となり、木が飛散してしまうほどの力が十分に働いたことになる。木に作用する力は空気が粒子を多量に含んでいることによって大きくなり、この数値計算例では、同一風速に対して、空気のみの場合の約 12 倍となっている。

実際には流れの厚さや濃度がどの程度であったか不明であるが、密度流の原因となった粒子が 1 m 程度以下で堆積していることから、オーダー的には、ここで採用した値程度でなかったかと想像される。なお、流れはここで考えたような単純な一次元的なものではなかったし、勾配が場所的に変化すること、 k の値が妥当かどうかといった問題もあるが、ともかく auto-suspension の概念によれば、ほぼ現象が説明されることがわかる。ただし、この概念については、未だ実験的な検証も行われておらず、今後、この点に焦点をあてて研究を進め

る必要がある。

3.2 土石なだれ

脹らんでいた山頂に近い北側斜面は、崩壊して下方の山腹を流れ下り、正面に壁のように立ちはだかっている比高350~500mの山塊に衝突した後、一部分はそれを持ち越えて、North Fork Toutle川の一支流である Coldwater creek 内に堆積したが、大部分は二つに分れて、一方は西へ方向を転じ、約23km流れて停止した。もう一方（この量は西へ流れたものよりもかなり少ない）は山塊の東端をまわって、Spirit湖の西岸を北へ約7km流れ、湖の北端を少し越えた付近まで到達して停止した（Photo 4）。このため、Spirit

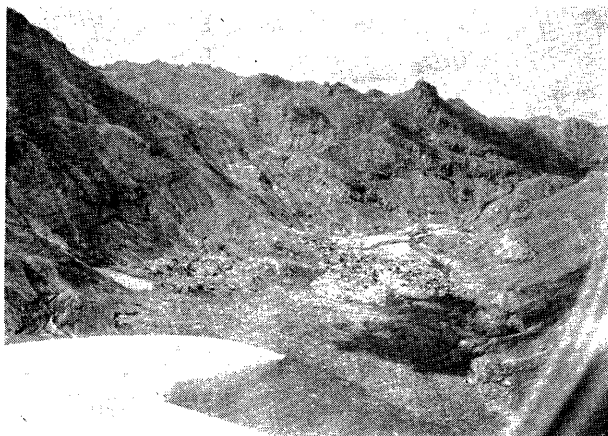


Photo. 4 North end of the Spirit lake. Note the flow mounds across the water surface and blown-down trees on the water.

湖自身はかなり北方へ移動し、しかも水面が約60m上昇した。この付近の土砂の堆積厚さは、湖面からさらに60mに達している。山塊に衝突してから西方へ流れて堆積した先端部の堆積厚さは約15mであり、堆積のおよその縦断面を描くと、Fig. 6のようである。図中に矢印で示した位置において著者が行った概略の横断測量の結果をFig. 7に示す。これを参考とし、平均の堆積厚さを50mとすれば、堆積表面積が約40km²であるので、堆積上量は約2km³に達することになる。なお、山体の新旧の等高線比較と、崩壊前の山体の脹らみ量を勘案しても、崩壊による生産土砂量は1~2km³に達していたことがわかり、両者はほぼ一致する。

堆積物表面の形態はFig. 7に示されているように、極めて凹凸に富んでいる。この凸出した部分は、もともと成層して山体を構成していたものがブロック状に破壊されて流れ出したもので、大規模崩壊に特有であるとされている、いわゆる流れ山である。その立体的な形状はPhoto 5でわかる。この流れ山は大きいものでは高さ30mに達するが、その構成物質はたまたま岩塊であることもあるが、大部分はシャベルで簡単につき崩すことができるほど軟いもので、そのようにして採取した試料の粒度分析結果をFig. 8に示す。おそらくFig. 8に示したような粒径分布を

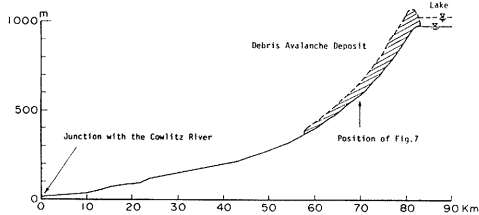


Fig. 6 Longitudinal profile of the debris avalanche deposit along the North Fork Toute River.

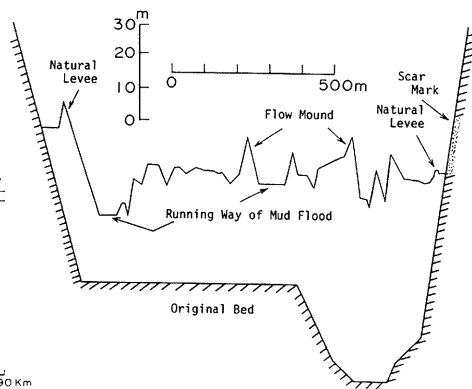


Fig. 7 One cross-section of the debris avalanche deposit.

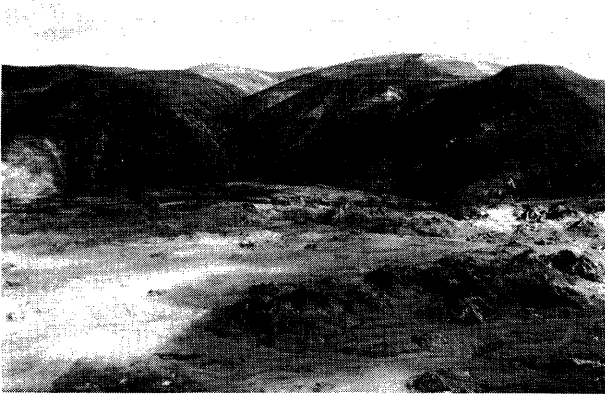


Photo. 5

Hummocky topography of the debris avalanche deposit. Note the scar mark on the slope of the hill (extreme right) and the natural levee along the margin of the flow behind the low ridge of the hill (back center).

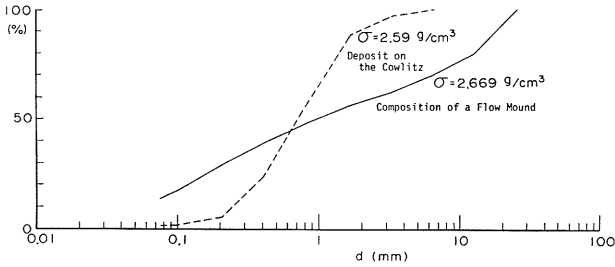


Fig. 8

Sediment size distributions of the samples collected from a flow mound and the deposit on the Cowlitz river bed.

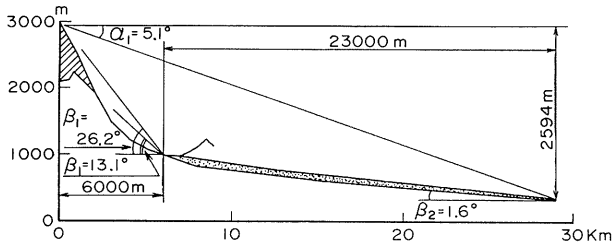


Fig. 9

Profile of the debris avalanche

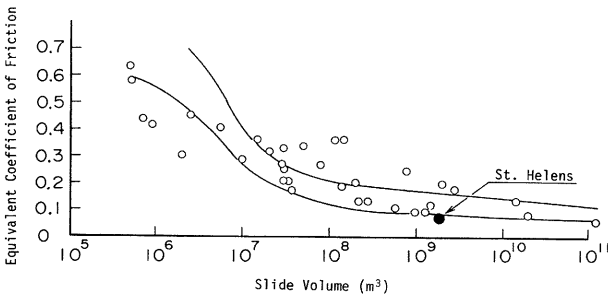


Fig. 10

Equivalent coefficient of friction related to the slide volume.

持つ土砂や流れ山および氷河の砕けたものなどが混り合った流れであったものと推定され、土石流と違って水があまり含まれていなかったはずである。ここではこのような流れをとくに土石流と区別するために土石なだれと呼ぶことにしたが、USGS 等では debris avalanche とか debris flow と呼んでいる。著者は debris flow は土石流に対して使うのが適当と考えているので、英語では debris avalanche がよいと思う。

このような土石なだれがいかんして流動できるのか、その力学的機構について検討を加える。Fig. 9 は土石なだれの縦断面図である。図の左側の斜線の部分が崩れ、点描したような堆積に遷移したのである。ただし、実際には流れは谷底部分で直角に折れ曲って流下したのであるが、これを一直線に描いている。図で谷底部から右上へ引かれた曲線が真北方向の縦断面図である。

Hsü⁴⁾ は堆積の前縁と崩壊の頂点とを結ぶ線の正接をとって、これを等価摩擦係数と呼び、これが Fig. 10 のように、崩壊体積の大きいものほど小さくなる傾向のあることを示している。St. Helens 火山の場合も、図に示したとおり、もっとも流動性に富んだ土石なだれの線上に乗っている。

斜面の下端における速度を見積るために質点力学を適用すると、Fig. 9 中の記号を参照し、崩壊質量を M 、崩壊土塊の加速度を a 、動摩擦係数を μ とし、

$$Mg \sin \beta_1 = Ma + \mu Mg \cos \beta_1 \quad (6)$$

を得る。 μ が等価摩擦係数に等しいとして、 $\mu = \tan \alpha_1 = 0.089$ とすれば、(6)式から a が求まる。斜面下端における速度は、崩壊の下端から斜面の下端までの斜距離を s とすれば、初速を 0 とし、(崩壊の発生状況からこの仮定は妥当であると思われる)、

$$v^2 = 2as \quad (7)$$

で求まる。 β_1 として崩壊下端を見通した角度 13.1° を用い、 $s = 4,100 \text{ m}$ とすると、(6)、(7)式から、 $v = 106 \text{ m/s}$ を得る。

このようにして求めた谷底での速度 v を初速とした場合に、谷に沿って流下する距離 x_L は

$$x_L = \frac{\{v \cos(\beta_1 - \beta_2)\}^2}{g \mu \cos \beta_2 - g \sin \beta_2} \quad (8)$$

から求まり、 $\beta_2 = 1.6^\circ$ であるから、 $x_L = 18 \text{ km}$ となる。実際の x_L は 23 km であるから、このようにして求めた結果は現象を比較的良好に説明しているかに見えるが、見かたを変えれば、ここで用いた等価摩擦係数のような小さな摩擦係数を用いなければ、質点力学あるいはすべりとしての解析では説明できない現象であると言える。ちなみに、摩擦角として通常の安息角程度を考えて、 $\mu = 0.6$ とすると、崩壊土塊は斜面下端にも達することができなくなってしまう。 μ が非常に小さくなることについては、空気クッション説⁵⁾も一時よく用いられたが、最近では否定的意見も多く、また、一塊のマスとして考える質点力学的な概念では、そのかたまりが 23 km にもわたって帯状の堆積になったというような大きな変形の過程を説明することもできない。

ここでは、Hsü⁴⁾ も言っているように、流動層中の空気に、例えば 1 mm 以下といった微細粒子が極めて高濃度に浮遊して、全体が一種の高密度の連続流体ようになっており、これが砂礫塊や流れ山に浮力を及ぼすものとする。砂礫塊や流れ山は、この流体中で、互いに衝突しながら、お互いがある程度自由に運動できるような距離を保持しつつ流動しているものと考えよう。これは Bagnold や著者の考えている土石流の流動機構に他ならず、土石流では浮力を与える流体は水であるが、土石なだれではそのかわりに高濃度に粒子を浮遊させた流体の存在を考えた点だけが異なっている。

流動層中の空気に含まれている微細粒子の密度が $\sigma = 2.65 \text{ g/cm}^3$ であり、これが容積濃度で 50% を占めていたとすれば、 $\rho_m = 1.325 \text{ g/cm}^3$ という密度をもった流体が砂礫塊や流れ山の空隙を満たして流動したことになる。土石なだれ堆積物は直径 30 m 以上の大ブロックから、 1 mm 以下の微細粉までを含んで、極めて広い粒度分布を持っているが、Fig. 8 の粒度分布の傾向から、ほぼ均等に種々の粒径のものが混合していたとして、その代表粒径を 1 m と仮定する。この直径 1 m の粒子は、Fig. 8 に示したような粒径分布を持つ粒子群が団子状に固まったものであるから、その見掛上の密度は $\sigma_0 = 2.0 \text{ g/cm}^3$ であったと仮定する。

North Fork Toutle 川の両岸の山腹斜面の所々には、Fig. 7 や Photo 5 に見える擦過痕跡があり、流動中に

はこの高さまで脹らんで流れていたことを示唆している。この痕跡の高さと現在の堆積高さとを参考として、流動中の砂礫塊や流れ山の容積濃度 C_{d0} が0.4であったと仮定する。

崩壊の発生とほとんど同時に、全体がばらばらになって流動化し、山麓部に達したときにはすでに平衡状態に達して流動していたものとして、その流動厚さが $h=35\text{ m}$ であったものとする。このとき、流速 u は

$$u = \frac{2}{5d} \left[\frac{g \sin \beta_1}{0.042 \sin \alpha} \left\{ c_{d0} + (1 - c_{d0}) \frac{\rho_m}{\sigma_0} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{c_{*0}}{c_{d0}} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (9)$$

で与えられる⁶⁾。ここに、 d : 代表粒径、 C_{*0} : 堆積物中のマトリックス部分(浮遊して流体とみなされた部分)を除いた砂礫や流れ山の容積濃度、 α : 動摩擦角である。 $\sin \alpha = 0.515$, $C_{*0} = 0.65$, $\beta_1 = 13.1^\circ$ とすると、 $u = 132\text{ m/s}$ となる。

このような機構による流れがはたして発生できるかどうかは、空隙を満す流体がここで考えたほど高濃度になり得るかどうかにかかっている。それには、浮遊する微細粒子が十分な量存在するかどうかということ、粒子が浮遊できるかどうかという二つの問題点がある。前者に対しては、ここでは十分にあったものと仮定し、後者について検討する。粒子流れにおいては、流れの底面における全せん断力は粒子同士の衝突によるものと、空隙を満す流体の乱れによるものによって受けもたれられる。全せん断力と、粒子の衝突によるせん断力とは、それぞれ

$$\tau = \{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0} + \rho_m\} gh \sin \beta_1 \quad (10)$$

$$T = (\sigma_0 - \rho_m) gh c_{d0} \cos \beta_1 \tan \alpha \quad (11)$$

のように示されるから⁶⁾、空隙を満す流体によって受けもたれるせん断力 τ' は

$$\tau' = gh \sin \beta_1 \{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0}(1 - \tan \alpha / \tan \beta_1) + \rho_m\} \quad (12)$$

のように表わされる。したがって、摩擦速度 u'_* は

$$u'_* = \sqrt{\frac{\tau'}{\rho_m}} = \left[\frac{\{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0}(1 - \tan \alpha / \tan \beta_1) + \rho_m\} gh \sin \beta_1}{\rho_m} \right]^{1/2} \quad (13)$$

である。上記の数値を代入すると、 $u'_* = 7.26\text{ m/s}$ となる。この値は空気中を直径 1 mm の単粒子が沈降する速度とほぼ同じであり、高濃度流体中では、粒子の衝突等によって沈降速度はもっと遅いであろうから、 1 mm 以下の粒子は十分浮遊するものと考えられる。さらに、空隙を満した流体は u とほぼ同じ速度で移動するから、 $\bar{U} \sin \beta_1$ は 30 m/s となり、沈降速度よりも十分に大きく、前述の autosuspension の条件も満足している。すなわち、ここで考えたような粒子流れは十分に発生可能であったと結論される。

土石なだれが 132 m/s の速度で東西に走る壁に衝突したものとすれば、流れは最高 $1.7(u^2/2g) \approx 1,500\text{ m}$ (1.7 は粒子流れのエネルギー補正係数)程度まで達することができることになるが、衝突によるエネルギー損失や壁になめめに衝突した可能性(壁に直角の速度成分しかもっていなかったとすれば、壁とほぼ直角に 23 km も流れたことを説明できなくなる。また、衝突のごく初期に壁の前面に楔状の凸出した堆積部が生じ、以後の流れが比較的スムーズに流向を変化させたことも十分考えられる)を考慮すれば、 $350 \sim 500\text{ m}$ の比高の壁を一部しか乗り越えなかったことも理解できる。

上に求めた u を初速とする土石なだれが、North Fork Toutle 川に沿って、西方向へ向って供給されたものと考え、時々刻々、Fig. 11のような形状をとりながら流下して行くとするれば、先端部が停止するまでに流下する距離 x_L は

$$x_L = \frac{V^2}{G} \quad (14)$$

で求まる⁷⁾。ただし、

$$V = u \cos(\beta_1 - \beta_2) \left[1 + \frac{\{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0}k_a + \rho_m\} \cos \beta_1}{2\{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0} + \rho_m\}} \frac{gh}{u^2} \right] \quad (15a)$$

$$G = \frac{(\sigma_0 - \rho_m)gc_{d0} \cos \beta_1 \tan \alpha}{(\sigma_0 - \rho_m)c_{d0} + \rho_m} - g \sin \beta_1 \quad (15b)$$

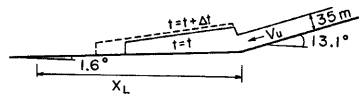


Fig. 11 Flowage of the debris avalanche along the North Fork Toutle River.

である。ここに、 k_0 は主働土圧係数に相当するものである。(4)式に先に求めた数値を代入して、 $x_L=23.6$ kmを得る。また、停止までの時間は $2V/G=362$ sec となる。これから、崩壊が発生して、それが North Fork Toutle 川まで到達するのに要する約 40 sec、先端が停止してからも後続部分が流れて堆積する時間を約 3 分と見積っても、崩壊が発生して土石なだれが完全に停止してしまうまでには約 10 分程度しか要しなかったものと推定される。実際にも、その位の時間土石なだれが流れるような大きな音がしていたという説がある⁸⁾。

以上のように、粒子流れとして現象がほぼ説明できることがわかったが、採用された諸数値は調査にもとづいて現実に近いという推定から得られたものではあるが、仮定や推測による部分が多く、基礎的な流動機構について、さらに研究を進める必要がある。

3.3 泥流洪水

大爆発が生じた約 4 時間後に、Spirit 湖から約 10 km 下流の土石なだれ堆積物上で、先端部に火山灰をまき上げながら流下して行く洪水が確認された。大塵の火山灰と土石なだれ中の細かい成分とを含んだ洪水は極めて高濃度で、流況を空中から記録したビデオテープで見ると、表面は非常に滑かであり、わずかに、隣接する流れ山間の狭窄部を通過する地点で激しく波立っているだけである。

この洪水が通過した後の土石なだれ堆積物表面は、あたかもグレーダーで均した砂利道のように平滑化されており、流路側岸には、おそらく水位の段階的な変化を示唆する、幾重にも重なった轍のような跡が残っている (Photo 6, 7)。また、ところどころには、Photo 8 のような耳朶状の典型的な泥流堆積物が見られる。しかし、この構成物質は流れ山のそれとほぼ同じである。

泥流は縦々と流れ、野積されていた大量の木材を洗い流し、道路、橋、家屋等を流失させた。Toutle 川が Cowlitz 川に合流した地点より少し下流の Castle Rock という地点で採用された泥水の密度は 1.7 g/cm^3 であって、セメントペースト状に見えたというから、土石なだれの終端から約 64 km 流れ下った地点で、まだ固体分の容積が約 42% にも達していたことになる。Photo 9 は Toutle 川に残されていた洪水痕跡であるが、木の周辺には泥が 10 cm 程度の厚さにもなっておりついている。

このような高濃度の洪水が流出した結果、Cowlitz 川では Toutle

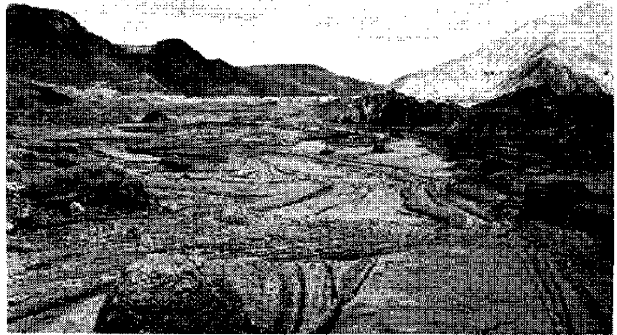


Photo. 6 Traces of mud flood on the deposit of the debris avalanche.



Photo 7 Mud flow levees.

川合流点から6km上流からColumbia川までの延長約40kmにわたって、Fig. 12に示されているように、河床が約4.5m上昇し、さらに、Columbia川では、Fig. 13のように、Cowlitz川の合流点からむしろ上流方向へ向って堆積した。堆積土量はCowlitz川に 0.031 km^3 、Columbia川に 0.04 km^3 である。Toutle川やNorth Fork Toutle川の堆積土砂量は不明であるが、ヘリコプターからの観察や、下流部数地点での調査によれば、堆積はあまり顕著ではない。流出土砂量 0.071 km^3 は、わが国最大の流出土砂量で知られる天龍川佐久間ダムの流出土砂量の約10年分に相当しており、また、わが国最大級の豪雨災害である昭和36年の小波川流域における流出土砂量は約 0.025 km^3 であることを見れば、これだけでもいかに大量の土砂であるかがわかる。

Cowlitz川に堆積している土砂試料を分析してみると、Fig. 8のようで、泥流洪水によって運ばれた土砂は $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 程度のものが多かったと見られる。なお、Toutle川の河床には30cm程度の礫がかなり堆積している部分がある。このような粒径の粒子は泥流によって掃流状態で輸送されたのであろう。

一方、South Fork Toutle川では、噴火とほぼ同時に洪水が始まり、North Fork Toutle川のそれよりも早く流出した。この洪水は最初のうちは夥しい流木を流していたが、水はかなり澄んでいたという。水はそのうち急激に濁ったが、洪水は間もなく終了した。

つぎに、North Fork Toutle川を流れた洪水のハイドログラフを

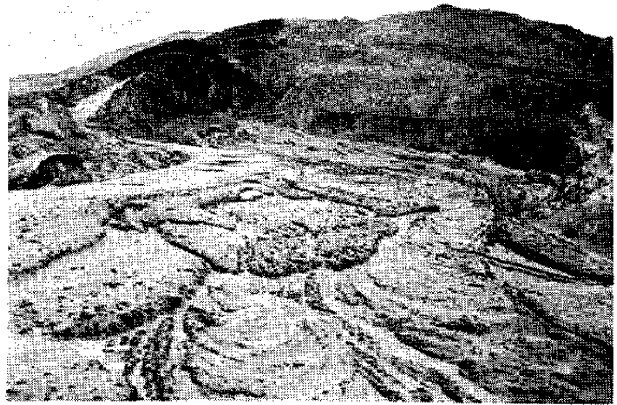


Photo. 8 Lobe deposit of the mud flow.



Photo. 9 Flood marks on the trees.

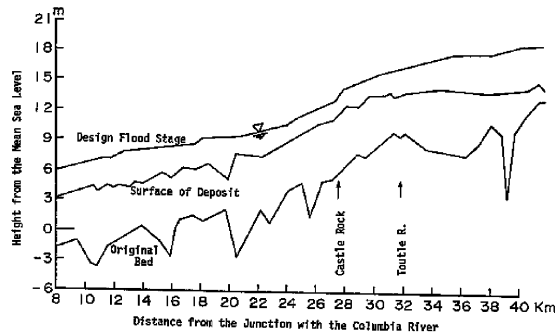


Fig. 12 Aggradation of the river bed of the Cowlitz River.

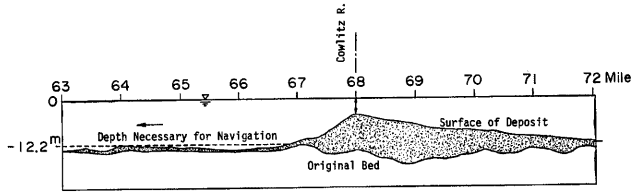


Fig. 13 Aggradation of the Columbia River.

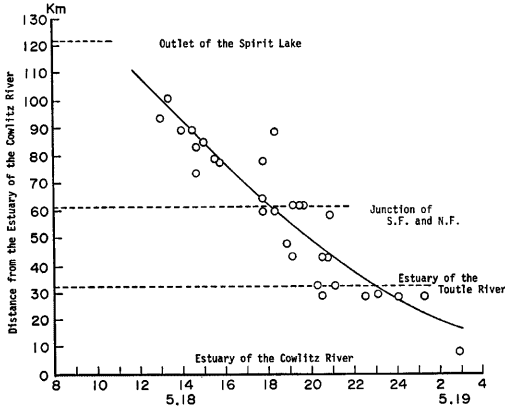


Fig. 14 Flood arrival time along the course of the mud flood.

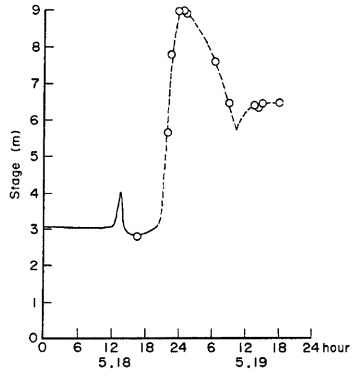


Fig. 15 Water Stage variation at Dastle Rock.

推定してみよう。河川沿岸各地点における洪水の目撃時刻および水位記録がUSGSのTacoma District Officeによって集められている。Fig. 14は泥流洪水の走時曲線である。また、Fig. 15はCowlitz川とToutle川の合流点より約4.3km下流のCastle Rockにおける水位記録である。実線部分は自記記録によるもので、破線部分は橋梁上からおもりを吊下げて測定した水位である。5月19日の12時頃には洪水が終了して、もとの流量に戻ったのであるが、河床が約3m上昇したために水位は大きいままになっている。なお、5月18日の12時頃から始まる小さいピークはSouth Fork Toutle川に流出した洪水によるものである。

さて、North Fork Toutle川を流下してきた洪水に対して、Castle Rockでは、ピーク生起時刻までは河床堆積がほとんどなかったものと仮定する。Cowlitz川での洪水ピークの伝播速度は、Fig. 14からわかるように、ほぼ1.4 m/sであるが、これはFig. 16に示したように、かなり広い範囲にはらんで流れたために遅くなったもので、主流路内の流速はもっと速かったはずである。図から、平均的には主流路幅の約4倍に氾濫しながら流下したものとすれば、主流路内での流速は、氾濫域のある場合の洪水伝播速度と流速の関係⁹⁾。

$$w = \frac{B_m}{B_d + B_m} \cdot \frac{5}{3} v \quad (16)$$

から、 $v = 3.4 \text{ m/s}$ を得る。ただし、(16)式において、 w : 洪水の伝播速度、 v : 主流路内の流速、 B_d : 氾濫幅、 B_m : 主流路幅であって、流れには Manning式が適用できるものとしている。Castle Rockにおける主流路の通水断面積は 984 m^2 であったので、これと流速とを乗じて、洪水ピーク流量が約 $3,346 \text{ m}^3/\text{s}$ と計算される。この値は、洪水前のこの地点における水位～流量曲線をそのままあてはめて求めた値 $3,680 \text{ m}^3/\text{s}$ に近い。以上

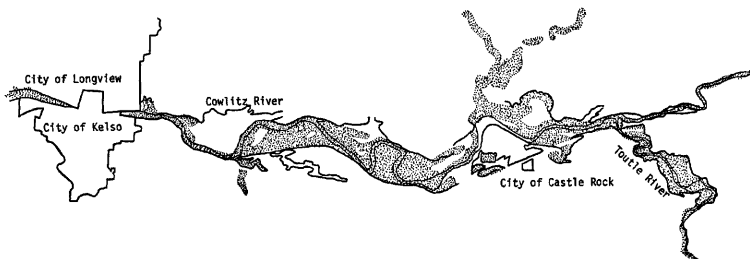


Fig. 16 Inundation area on the flood plain of the Cowlitz River.

から、Castle Rock における洪水ハイドログラフの大略の形状を再現すると、Fig. 17 のようになる。図ではSouth Fork Toutle川から流出した洪水についても同様の方法で流量を見積った結果も示している。なお、Toutle 川およびCowlitz 川の既往最大洪水は、それぞれ、1,223 m³/s および 3,936 m³/s であり、Toutle 川には既往最大の約2.7倍の洪水が流出したことになる。

ここで、流れの機構について検討してみると、平均流速に対して Manning 式が成立するものとして、 $v=3.4$ m/s, $h=8$ m, $i=0.00075$ から粗度係数を求めると、 $n=0.032$ となる。また、高濃度に粒子を含む場合の比粘度を与える大同の式¹⁰⁾

$$\mu_r = \left(1 + \frac{3}{\frac{1}{c_f} - 1} \right) \quad (17)$$

において、 $d=0.5$ mm 程度でフロックは形成されず、 $C_f=0.42$ であったものとすれば、 $\mu_r=7.55$ となる。 $\rho=1.7$ g/cm³ であったから、 $\nu=0.044$ cm²/s となり、流れのレイノルズ数は約 6×10^6 となり、十分に乱れていたと考えられる。ところが、いま、Lane-Kalinske 式を用いて平衡浮遊砂濃度を計算すると、約 200 ppm となり、42%にも達していたとい

う濃度を説明することができない。実際には非平衡で大量の沈降を生じたのであるが、それでもなおこのような非常に高濃度で流れる機構は従来の浮遊砂機構の説明で用いられるものとは異なっていることを示しており、研究して行かなければならない。

Cowlitz 川および Columbia 川に堆積している土砂量は前述のように、計 0.071 km³ であるが、微細成分が多く、しかも水中に堆積していることを考慮して、 $C_*=0.5$ で堆積しているものとすれば、実質容積は 0.0355 km³ ということになる。この土砂のほとんど全てが North Fork Toutle 川から供給されたものと考え、その洪水に対応する 5月18日21時から19日9時までの洪水総流量が Fig. 17 から 0.0761 km³ と見積られるので、洪水の平均土砂濃度は 0.466 となり、Castle Rock で採取された泥水の密度が約 1.7 g/cm³ であったことを対応している。

一方、North Fork Toutle 川から流出した水の総量は約 0.04 km³ ということになる。このような大量の水がどこから来たのであろうか。泥流は土石なだれ堆積物上から発生しており、土石なだれ堆積物のあちこちには Photo 10 のような大小の陥没孔があいている。これは山頂付近を覆っていた水原が山体の崩壊と一緒に崩

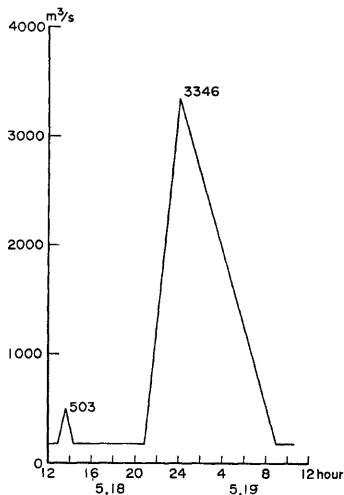


Fig. 17 Estimated hydrograph at Castle Rock.



Photo. 10 The depression holes on the debris avalanche deposit.

33℃であったことや、著者の現地調査時にも、土石なだれ堆積物を少し掘ると熱い部分が出て来たことなどから、土石なだれ自身がかなり高温であったものと推定される。

3.4 Pine Creek の土石流

Pine Creek および Muddy 川ではかなり大規模な土石流が発生した。しかし、Muddy 川は下流部に広い平坦部があり、また、約 2 km にわたって流木が川を塞いでいる部分があって、その部分でほとんど堆積してしまい、Swift 貯水池まで流入したのは、Pine Creek の土石流だけであると考えられる (Pine Creek での落橋のため、Muddy 川までは踏査できなかったため、このことは確かめられてはいない)。

Pine Creek が Lewis 川と合流する地点に橋が架っていたが流失してしまっている。この橋は Pine Creek の河幅が道路の高さでは約 125 m と広いために、これを盛土によって、約 80 m 幅に狭めて架けていた。道路面と現河床面とは約 12 m の高低差がある。この道路面から上流へ、ほぼ水平に、Toutle 川で見られたのと同様の、厚い泥による洪水痕跡が認められるが、平均 20 cm 程度の隙は道路盛土の上流部分に、現河床面から約 3 m の高さまで堆積している。このことから、North Fork Toutle 川と同様の泥流洪水の発生によって土石流が発生し、その先端部は約 3 m の高さで流下して来たが、橋梁部分の狭窄によって堰き止められ、一部は停止した。その後も泥流は続いて流出してきたが、やはりこの部分で堰き上げられ、落橋によって流木による閉塞等の障害がなくなって、Lewis 川へと流出して行ったものと推定される。橋梁の取付部の道路には、Photo 11 のような、長径 3 m 程度の巨石が打上げられており、土石流先端部を流下して来たこの石が、道路に衝突して、流動の表面から約 10 m も



Photo. 11 Big stone which jumped from the debris flow.

壊し、ブロック状になって堆積物中に混合されていたものが溶けたため生じたものであると解釈される。崩壊した水の量は 0.14 km³ と見積られており⁴⁾、その他に積雪もかなりあったところから、土石なだれ堆積物をほぼ半分飽和し、かつ下流へ 0.04 km³ の水を流出させるのに必要な約 0.2 km³ 程度の水量は水と雪から補給される可能性があったと言える。問題は崩壊後 2～3 時間で大きな氷のブロックが溶けることができるかどうかということであろうが、洪水期間中を通じて、水温 29℃～

跳び上がったことを示している。

Pine Creek と Lewis 川との合流点のすぐ下流から Swift 貯水池が始まる。本貯水池の水位変化が記録されており、これから求めた流入流量は、5月18日の9時~10時の平均が1,699 m³/s、10時~11時の平均が1,557 m³/s、11時~12時は340 m³/s となっおいる。また、貯水池の流入部から下流約1.6 km に亘って土砂堆積をみており、その総堆積量は約640万 m³ と推定される。C_{*}=0.65 とすれば、実質部分の量は約416万 m³ で、平均30%の土砂濃度で流入したとみなせる。そこで、Pine Creek の土石流を C_d=0.3、σ=2.65 g/cm³、ρ_m=2.0 g/cm³、tan α=0.6、d=0.2 m、h=3 m、β=2° として、(9)式から平均流速を求めると、u=11.0 m/s となる。したがって、土石流先端部の流量は約2,650 m³/s となる。

道路に乗り上げている巨石は、道路の盛土勾配が川の上流に向っているので、土石流の速度水頭がさしたる損失もなく位置水頭に変換されて運ばれたと考え、1.7(u²/2g)=10 m として u を求めると、u=10.7 m/s となって、先の計算とはほぼ一致する。

以上から、Pine Creek における土石流のハイドログラフを推定すれば、Fig. 18 の A のようであり、これが橋梁部分で堰上げられて多少変形し、B のようになったのであろう。

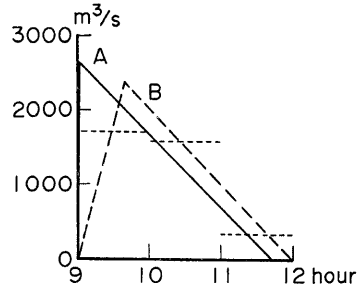


Fig. 18 Estimated hydrograph of the Pine Creek debris flow.

4. 災害に対する対応

4.1 大噴火以前

St. Helens 火山に源を発する各河川について、過去4,500年にわたる火砕流および泥流(土石流)の発生状況が地質学的に詳細に調べられていた¹¹⁾。それによれば、North Fork Toutle 川流域には泥流(土石流)、火砕流とも5回が確認されており、B.C. 1,200年頃に発生した最大の土石流では、70 km 以上流れて Cowlitz 川にも流出している。また、A.D. 1,000年前後の噴火では、今回のように、土石なだれが6 km 以上にわたって流れ出している。Smith Creek, Pine Creek および Muddy 川流域にもやはり5回の主要な土石流と4回の火砕流が認められている。とくに、Pine Creek には土石流、火砕流が多く生じており、18 km 以上流下している。Swift Creek と Kalama 川の流域にも、同様に、土石流、火砕流が発生しており、B.C. 1200年頃の噴火では、Kalama 川に沿って45 km 以上流下している。このような度重なる噴火による土石流や火砕流の発生により、1857年以来、休眠状態にあると

は言え、その危険性が着目され、過去の最大級の現象(噴出物の総量約3 km³)¹²⁾をもとに、Fig. 19のようなハザードマップが作られていた。これと Fig. 2 とを比較すると、突風による荒唐など予想されなかった現象もあるが、比較的良好に対応していることが注目される。

このハザードマップを背景として3月20日に火山活動が始まるや、3月26日には Forest Service が森林限界以上の部分

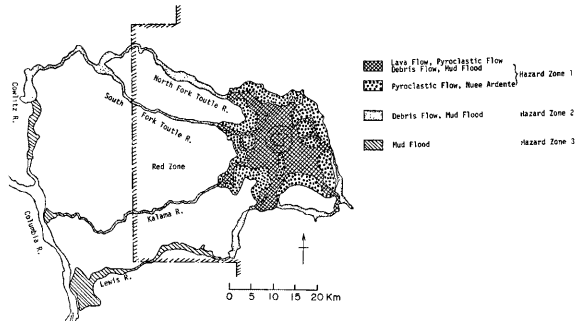


Fig. 19 Hazard map due to the eruption of Mt. St. Helens after Crandel and Mullinaux¹¹⁾.

への入山を禁止し、State Transportation Department は Spirit 湖へ通ずる 国道 504 号線 沿いにある Camp Baker に雪崩の危険を伝える検問所を設けた。この Camp Baker は今回土石なだれが到達した先端付近にあり、ここで何人かの人命が失われている。3月27日には付近の住民数10名がもっと安全な場所へ疎開した。一方では、30日の日曜など、珍らしい噴火の様子を見ようとする観光客が押寄せて来た。しかし、観光飛行では頂上から20マイル以上接近することは禁止された。この頃から、山の南側を流れる Lewis 川に三つの発電用貯水池をもつ Pacific Power & Light Co は大規模な泥流が流出することを予想して、貯水位を下げはじめた。火山に最も近い Swift 貯水池(総容量 9 億 2,000 万 m^3) は 5 月 18 日には 1 億 4,660 万 m^3 の空容量をもっていた。これは過去の泥流による流出が 1 億 2,500 万 m^3 を越えていないことを根拠としている。4 月 4 日に至り、火山活動が活発となったので、国道 504 号線の検問所が山頂から 20 マイルの位置へ移され、Toutle 川沿いの住民と、この内部に職場を持つ人達だけがそこを通過することができるようになった。その際には、噴火や雪崩にあった場合の心得を書いたピラが手渡され、危険性が警告されている。検問所の設置位置を山頂から 20 マイルとしたのは、過去の噴火時に人を傷つけるような大きい粒径のテフラの落下が、ほほこれより山側にかざられていたことによる。4 月 5 日には Pine Creek に住んでいた住民を強制疎開させた。その後数週間は活動が休息したかのようであったが、山体が異常に脹らんでいることが発見され、5 月 7 日には、半径 20 マイルのレッドゾーン内には、特別に許可された科学者だけしか立入れないこととした。その外側のブルーゾーンにも、かざられた人だけが日中だけ入ってもよいこととした。しかしながら、観光客はひきもきらず、付近は森林地帯で無数の道路が縦横に通じており、どの路を通れば検問所にかからずに山に近づけるかを示した地図が売られるほどになった。このように、禁を犯して立入るものが絶えず、それらの者によって荒されるのではないかという懸念が立入禁止区域内に財産を持っている人達をいらだたせた。そして、5 月 17 日には、このような人達 35 人が警官に付添われて Spirit 湖まで入り、翌 18 日にも午前 10 時から約 50 名の者が入る予定になっていたところ、噴火の方が先に起ったのである。

上記のような経過は、いかにハザードマップが有効に用いられたか、また、立入禁止措置が長びき、その間に災害現象が遠のいたのではないかと思われる場合の避難対策の困難さをよく示している。なお、死者の大部分は不法侵入者であった。また、疎開勧告を聞き入れなかった老人も含まれている。

4.2 大噴火以後

噴火後、直ちに飛行機やヘリコプターによる視察が行われ、泥流洪水が土石なだれ堆積物上を流下して行くのが目撃されるや、その情報は下流住民に伝達され、避難が行われた。Cowlitz 川では洪水ピークが生じたのは夜中であったが、これによって犠牲者は出ていない。

North Fork Toutle 川が土石なだれによる天然ダムで堰止められ、もしこれが切れると、spirit 湖の 3 億 m^3 の水による大洪水が発生し、下流住民 60,000 人が被災すると情報がもたらされた。これによって、川沿いの低地に住む人々は避難し、学校も休校となった。しかし、やがて天然ダムは長さ 20 km 以上にわたる堆積物で、急激に欠陥するような性質のものでないことが判明した。

危険地域への立入禁止措置は以前にも増して厳しく、Forest Service では山の周辺部を飛行機によって 24 時間監視し、不法侵入の自家用機の摘発を行っている。この飛行機には USGS のスタッフが適宜同乗し、噴火前徴の把握に努めている。

Cowlitz 川の堤防高さは 1948 年の Columbia 川の 28,600 m^3/s の大洪水時の背水位に合わせて築造されており、その後、Columbia 川には多くのダムが築造されて、最大流量が 17,000 m^3/s におさえられていることもあって、Cowlitz 川自身の 100 年確率洪水の 2,000 m^3/s は十分安全に疎通できる状態であったが、今回の河床上昇により、疎通能力は約 212 m^3/s となってしまった。工兵隊による浚渫工事が行われているが、当分の間は洪水の危険が大きく、浸水危険地域を示すとともに、水害保険への加入が勧められている。

North Fork Toutle 川に存在する 1~2 億 m^3 の堆積土砂は今後もひき続いて流出する危険があり、これを防ぐために早速砂防ダムも築造されたが、小出水があって埋設し、破壊したということである⁹⁾。

アメリカには全土を 10 ブロックを分け、州政府だけでは対応できないような大規模な災害が生じた際に支援す

る FEMA (Federal Emergency Management Agency) という組織がある。これは、連邦政府のあらゆる関係機関や赤十字のような民間機関から派遣された人達で構成されている大統領直轄の機関である。今回の災害に対しても、これが Washington 州の Vancouver に事務所を置いて、補助金の決定等の仕事を行ったが、その他に、Mount St. Helens Technical Information Network という広報紙を発行した。これは、St. Helens 火山の噴火に関して、あるいは噴火が人やその環境に及ぼす影響に関して、広く情報を伝達することを目的として発行されたもので、7月1日まで、33集に及ぶ広報が発行され、配布された。その内容はわかり易い火山噴火災害に対する記事や、火山灰が自動車その他の機械器具に与える影響と対策、珪肺症発生の危険性の検討など多岐にわたっている。このように、一般が知りたいと思う情報が速く、広く伝達されるという行政サービスもまた重要であろう。

5. わが国における問題

大規模な土石なだれは、わが国でもいくつか確認されている。これらの到達距離を前述の等価摩擦係数の形で示すと Fig. 20 のようになり、他の土石なだれと同じ傾向をもっていることがわかる。ここに示した稗田山崩壊と眉山崩壊とは火山の噴火が原因ではなく、雨水の浸透や地震が原因であると言われており、その他に火山噴出以外の原因による大崩壊として、立山の嵩崩れ ($4.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)、安倍川の大谷崩れ ($1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$) や富士山の大沢崩れ ($0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$) 等が知られており、諸外国でも地震による大規模崩壊は数多く知られている。すなわち、このような大規模崩壊は決して例外的な現象ではなく、火山国であり、地震の頻発するわが国であれば、近い将来に起る可能性はないとは言えない。地震等火山噴火以外の原因で生ずる土石なだれについて、予めその到達可能範囲などを調べておくことは、どこに発生するかもわからないので、至難のわざと言わなければならないが、火山については、場所も対象とする山の周辺部に限定され、地質学的、あるいは考古学的調査によって、過去の実績を根拠としたハザードマップを用意することは可能であろう。現在このような調査は進行中であると聞いているが、もう一つのアプローチとして、あるいは上記ハザードマップを補うものとして、土石なだれの力学的な機構をもとにしたハザードマップの作成も、将来可能になるのではないかと考える。

いま、仮定の問題として、富士山の西斜面に St. Helens の場合と全く同一規模の大崩壊が発生したときの状態を想定してみるとどのようになるであろうか。Fig. 21 は富士山の東西方向の断面図と、それが天子山地を切る位置からは、その麓を南流する芝川に沿う縦断面を示したもので、Fig. 9 との類似性が

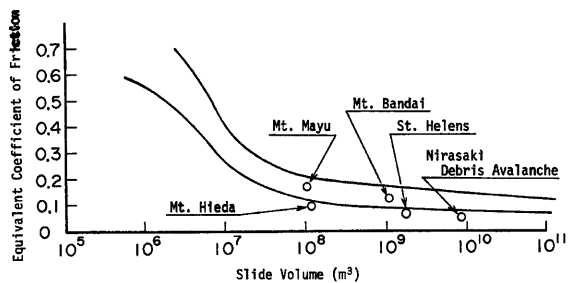


Fig. 20 Equivalent coefficient of friction for some Japanese debris avalanches.

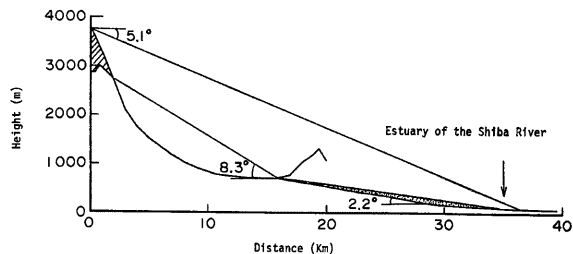


Fig. 21 A hypothetical debris avalanche on Mt. Fuji.

注目される。Fig. 21 にハッチで示した崩壊部分は山頂付近の両者の断面形がほとんど合同であるので、St. Helens の場合と同一となっている。(9)式の適用にあたって、 β_1 として 8.3° をとる以外はSt. Helens 山の場合と同じ値を用いることにすれば、斜面上端の流速として、 $u=105$ m/sを得る。つぎに、この速度を初速として、 $\beta_1=8.3^\circ$ 、 $\beta_2=2.2^\circ$ として、(8)式を適用して到達距離を求めると、 $x_L=18.1$ kmとなる。これから、土石なだれの先端部はほとんど芝川と富士川との合流点にまで及ぶことになる。同様の考察は他の方向についても行うことができ、St. Helens と同じ現象が起こった場合のハザードマップを作成できることになる。もとより、富士山が噴出するかどうか、噴出するとしてもどのような規模の噴出を起し、どのような規模の崩壊が発生するのか、その崩壊に対して、ここで用いたような理論がはたしてあてはまるのかどうか、適合するとしても諸変数がどのような値をとるのか、等多数の問題点が存在し、研究を進めて行かなければならないことは言うまでもない。

St. Helens の噴火に際しては、大規模な泥流洪水が発生したのが特徴であるが、これは氷河が山体と一緒に崩れて、それが溶けたことによっている。わが国には氷河はないが、北日本では冬期の積雪はかなりの量に達し、これが噴火に伴って泥流あるいは土石流を発生することは、すでに十勝岳の例で知られている。その他、火山灰によって地表面が覆われる結果、流出形態が変化し、土石流が頻発するようになることは、桜島や有珠山で現在生じている現象であり周知のところである。

火山山麓はしばしば風光明媚で絶好の観光地となる。昨今の観光開発の波に乗って訪れる人も多い。このような場所で一旦噴火活動が始まった場合、どのような対応をするべきか、常に考えておく必要がある。

6. 結 語

大規模な火山噴火によって生起する種々の災害現象について、わずかの期間の現地調査をもとに、できるだけその機構を分析することを心がけて行った研究の結果を述べた。生じた現象があまりにも大きく、しかも起った現象は著者にとって未経験のものばかりであり、いわば素人考えの羅列に終始し、また、あまりにも推量による部分が多い。しかしながら、従来火山災害について、このような立場からの研究はほとんど行われていないようであって、現象の解釈の上で何らかの参考になるものと考えている。

生じた現象の他に、それに直面した人々の行動や防災のためにとられた措置など、他の災害現象に対しても参考になると思われる事実もいくつか見ることができ、著者にとっては誠に得がたい経験であった。

St. Helens 山の噴火はわが国の防災を考えて行く上にも種々の参考になる事柄を与えたが、同時に大きな宿題を課したとも言えよう。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費、自然災害特別研究「セント・ヘレンズ火山の噴火活動とそれに伴う災害の研究」(代表：下鶴大輔東大地震研究所教授)の研究の一環として行われたものである。著者が研究分担者として派遣されるのについては、自然災害総合研究班、文部省の関係各位に多大のお世話になった。また、現地では、USGS, FEMA, FS 等アメリカ合衆国諸機関の多くの人々には色々な便宜供与や資料提供など暖かい援助を受け、日本領事館の方々にもお世話になった。衷心より感謝申し上げる次第である。さらに、研究代表者の下鶴教授には研究費の申請段階から現地調査まで種々御面倒をかけ、下鶴教授、荒牧重雄教授、宇井忠英助教授には火山学には素人である著者に多大の御教示をいただいた。有難く厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Mullineaux, D. R. and D. R. Crandell: Recent Lahars from Mount St. Helens, Washington, Geological Society of America Bulletin, Vol. 73, 1962, pp. 855—870.
- 2) Plafker, G. and G. E. Erickson: Nevados Huascarán Avalanches, Peru, Chap. 8 of the Rockslide, ed. by B. Voight, Elsevier, 1978, pp. 277—314.
- 3) Bagnold, R. A.: Auto-suspension of Transported Sediment; Turbidity Currents, Proc. Royal Society of London, A, No. 1322, 1962, pp. 315—319.

- 4) Hsü, K. J.: Catastrophic Debris Streams (Sturzströms) Generated by Rockfalls, Geological Society of America Bulletin, Vol. 86, 1975, pp. 129—140.
- 5) Shreve, R. L.: Sherman Landslide, Alaska, Science, Vol. 154, 1966, pp. 1639—1643.
- 6) Takahashi, T.: Debris Flow on Prismatic Open Channel, Jour. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY3, 1980, pp. 381—396.
- 7) 高橋 保: 土石流の力学的機構, 水工学シリーズ, 80-A-1, 土木学会水理委員会, 1980, pp. A-1-1-A-1-17.
- 8) Janda, R. J. and K. M. Nolan: Panel discussion at Christchurch Symposium on Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, 1981.
- 9) 高橋 保: 不規則断面水路の洪水流(1), 京大防災研究所年報, 第10号B, 1967, pp. 199—207.
- 10) 大同淳之: 土石流に関する基礎的研究, 京大学位論文, 1970, p. 178.
- 11) Crandell, D. R. and D. R. Mullineaux: Potential Hazards from Future Eruptions of Mount St. Helens Volcano, Washington, Geological Survey Bulletin 1383—C, 1978, pp. C1—C26.
- 12) Crandell, D. R. and D. R. Mullineaux: Mount St. Helens Volcano; Recent and Future Behavior, Science, Vol. 187, No. 4175, pp. 438—441.

VOLCANIC HAZARD PHENOMENA AND RESPONSE OF PEOPLE DUE TO THE ERUPTION OF MOUNT ST. HELENS

By *Tamotsu* TAKAHASHI

Synopsis

On Sunday, May 18, 1980, Mount Saint Helens in the Cascade Range, Washington State tremendously exploded. This eruption not only interested the volcanologists due to its uncommon explosion type in the United States, but also offered many problems to all scientists who are concerned with volcanic hazard. The blast leveled over 400 km² of the forest on the north side of the mountain. One or two km³ of the debris avalanche flowed down about 30 km. Mud flood of over 3,000 m³/s flowed as far as the distance of 110 km to the Cowlitz River and the Columbia River. The debris flows occurred in other rivers. The ash and gas circulated around the earth and some scientists are anxious about the effect on the climate of the world.

This paper tries the fluid mechanical explanation of these phenomena on the basis of the data of the field survey, and further tries to learn some lessons from the response of the governments and people to the hazard.