

山地流域における土砂流出

——土砂濃度と粒径特性——

矢野 勝正・奥村 武信

SEDIMENT YIELD IN MOUNTAIN STREAM

——concentration and size characteristics of sediment——

By *Katsumasa YANO* and *Takenobu OKUMURA*

Synopsis

The authors have been observing the sediment yield in a mountain stream, Hirudani Experimental Watershed, at Hodaka Sedimentation Observatory.

Present year, a more reliable facilities was used for picking considerably coarse gravels contained in running water. Therefore following facts were proved:

1. Sediment concentration decreases even while water discharge is constant after the peak discharge.
2. In some cases, the maximum size of sediments which is caught happens fairly before and after the peak of sediment concentration are attained.
3. The maximum of sediment concentration in a flood is likely to depend on the ratio of peak discharge to base flow or the increasing rate of discharge than on the peak discharge itself of the flood.

これまで観測例の少なかった山地流域における土砂生産・流出の実態を知るための観測を、穂高砂防観測所ヒル谷試験流域において1966年以来行なっている。本文では、そのうち出水時の流水中の土砂濃度およびその粒度特性の変化についての観測結果を示すとともに、二、三の考察を行ないたいと思う。

1. 掃流砂観測装置

67年までの土砂採取方法についてはすでに書いてあるとおりであったが、この方法によると観測者の問題に対する意識の差から、また採水瓶を水中に挿入・抽出する際の各人の巧妙さ、その時々やり方によっても、観測結果にかなり変動をおよぼすおそれがあった。さらに、採水瓶の口の大きさが採取される土砂の粒径を制限することや、どうしても河床近くを流れる土砂が採取しにくいことなど種々の欠点が見出される。そこで67年12月に、少なくとも個人差を小さくおさえる、また掃流状態で流送される土砂をも採取できうるものという考えから、新しく掃流砂観測装置なるものを設置し、68年の観測から使用をはじめた。ここにその概略を述べておくことにする。

本装置は、既設の観測用堰堤の上流約 30 m にあった高さ約 2 m の滝を利用してつくったものである。この箇所から上流 6.8 m の間をもとの溪床勾配 (1/3.3) で溪床巾 3.5 m にわたってコンクリートで巻いた水路を作製し、この水路の先端に 20 mm×40 mm の軽みぞ型鋼 7 本を植えこんだ。この型鋼の勾配はコンクリート水路の勾配と同一とした。これに流れ込んだ水と土砂を下流に導くのであるが、その土砂の最大

粒径は型鋼のサイズによって限定される。というのは、この型鋼と導水のためのパイプの接続に際し、パイプの側面にうがつた孔のサイズを型鋼のサイズと同一としたためである。それは、流れが、このパイプに入る際にほとんど直角におれることや、地形上このパイプおよび下流のパイプの勾配を1/10程度までにおえねばならなかったことから、型鋼のサイズ以上の土砂を取り入れても下流への流送はほとんど不可能であると考えたからである。さて、この最初のパイプには三方コックを取設し、観測時のみ下流のパイプへ送水できるかたちとした。これからえん堤の下流までは 175 mm の鋼管路で送水する。この管水路端にはさきと同じ目的で三方コックを取設し、一方を集水タンクに向わし流量を測定する。この集水タンクの大きさは、たて 1.2 m、横 1 m、深さ 0.8 m である。土砂はこのタンクに取り付けた20メッシュの金網を張ったバケットですくい取ることにし、さらにこの網を通過する土砂についてはポリバケツでタンクの水を汲み上げて採取することにした。

この装置の設計の規準として、観測開始後の最大流量、最大土砂濃度を用いたのであるが、この規準値に

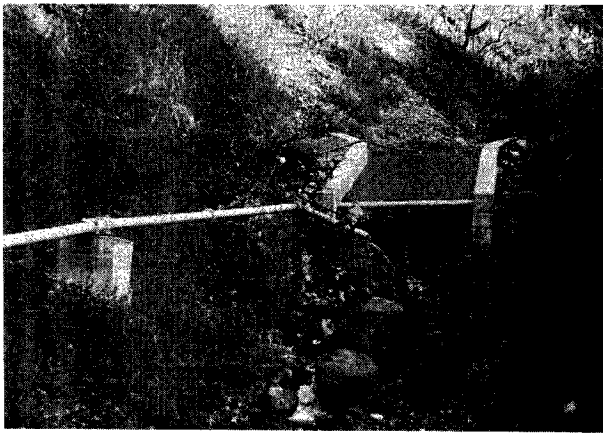


Photo. 1 Chute made of concrete and pipe line of the facilities.

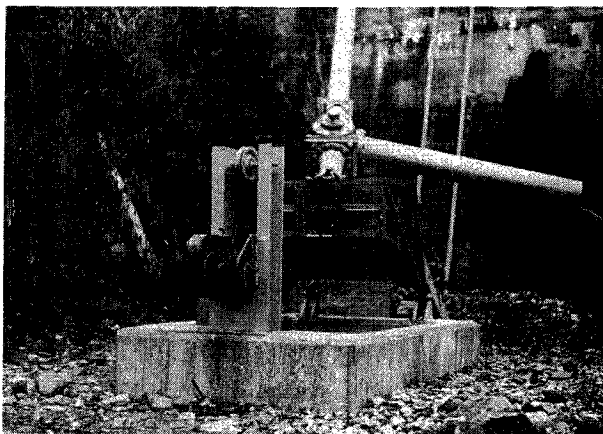


Photo. 2 Storing tank and bucket for screening sediments.

達することはほとんどなく、また三方コック、バケツの操作およびバケツに付着した土砂の集収にかなりの労力と時間を要するため、今夏におけるようにあまり大きな出水のない時には十分使いこなせないこともあるが、各コックからの排出管においてポリバケツを用いて採水することにより、従来のように 1 l の採水瓶を水中に没入させて採水するよりはよほど信頼のおけるサンプルを得られるものと考ええる。もっとも、この方法による場合と従来の方法による場合との比較検討は行なっていないので、この点に関して明確なことはいえないが。

したがって、今夏の方法はつぎのように三段階の使い分けをした。まず、コンクリート水路上の流水中に大きな礫をみとめず、またさほどのにごりもみとめられないときは、コンクリート水路わきの三方コックからの排出管口において 1 l の採水瓶を使用して採水する。つぎに、にごりはかなり強いが、未だ大きな礫がみとめられないときには、下流の三方コックからの排出管口において 15 l のポリバケツを使用して採水する。そして、大きな礫もみとめられるようになったときには、この装置の本来の使用法によって採水、採砂する。

2. 出水時における土砂濃度および粒径の変化についての観測結果

6月末から7月中旬まで、および8月28日の出水時に土砂濃度およびその土砂の粒径がどのように変化するものかについて観測を行なった。ここにその観測結果をならべてみる。

これらの図に示される数字はつぎのような性質をもつものである。

1. 雨量 P ；流域内六ヶ所における観測データよりティーセン法によって求めた流域平均30分雨量。
2. 流量 Q ；試験流域の谷口に設けた観測用えん堤に取設した水位データより計算式によって求めた流量。その検定は行なっていない。
3. 土砂濃度 C ；前節において述べた三段階の方法によって採取した水および土砂を実験室に持ち帰り、濾過乾燥秤量して求めた土砂量を、土砂を含めた水の重量で除したもの。
4. 95%粒径 ϕ_{95} ；上の土砂を土質試験用標準網ふるいを用いてふるいわけた結果から得られる粒径加積曲線より読みとったもの。図中、土砂濃度が示されているのにもかかわらずこの数字が示されないものは、ふるい分けるべき土砂量があまりにも少なすぎたものか、あるいは標準網ふるいの最小目開き 0.074 mm 以下に95%粒径があるものである。

・ 6月29日～30日の場合 (Fig. 1-a)

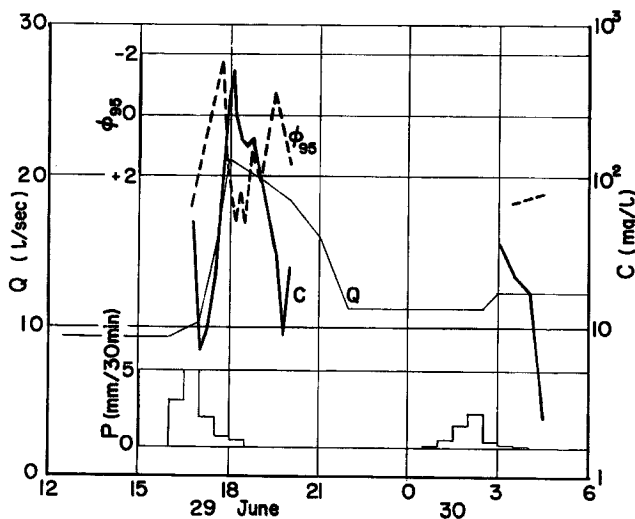


Fig. 1-a Variation of sediment concentration C and sediment size ϕ_{95} defined from size frequency distribution curve, with water discharge Q and precipitation per thirty minutes P , during the flood on 29 to 30 June.

この図でまず注目をうながされるのは、 C と ϕ_{95} とがある程度逆相関の形をとることであろう。すなわち、 C のピークに近いとき ϕ_{95} は小さく、ピークよりある時間おいた前後において ϕ_{95} が大きいく。このことは前年あるいは前々年の観測においても、数字としてはあらわれなかったが、観察されていることであり、つぎのような説明をするのは未だ早計だろうか。すなわち、いわゆる wash load, suspended load は水の流れに近い速さで運搬されるであろうから、粒径の小さいものは、流量のピーク時に集中する。そして、粒径の大きい土砂の流速は水流の速さに劣るから、この粒径の示す濃度は当然流量のピークよりおくれる。流量が増大する過程での流送土砂の粒径が大きいくことについては、たとえば移動床での実験において流量を与えた場合、その先端に土砂の集中することがみられることがあるが、このような状態が起っているように思

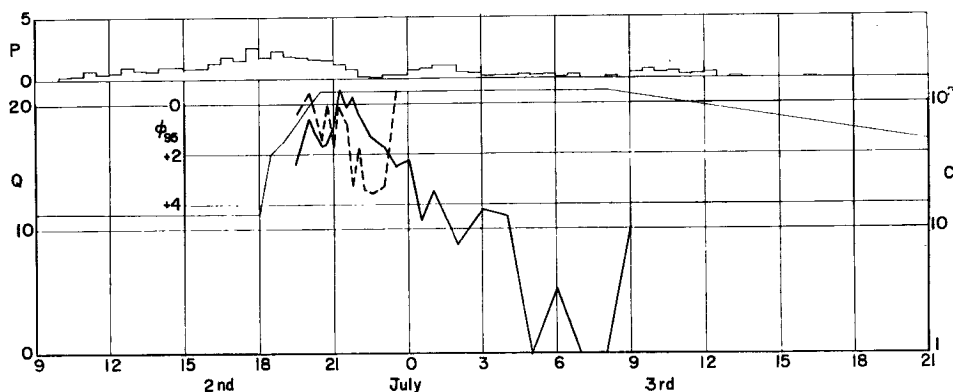


Fig. 1—b In case of the flood on 2 to 3 July.

われる。このような状態は、増水が急激であるほど、また先行する出水からの時間が長いほど大きくあらわれてくるのではないかと考える。

○ 7月2日～3日の場合 (Fig. 1—b)

この図でも、さきの場合に注目されたことが多少みられる。それにもまして注意を喚起されるのは、2日20時30分以後観測終了のときまで、流量はほぼ一定値を保持しているにもかかわらず、Cは2日21時15分のピーク時から次第に減衰していること。しかもその減衰の様相が指数的であることである。

ここにおいて、従来言われてきている、山地流域における土砂輸送はかならずしも流量とは対応しないという議論が、一出水中ででも言えるのであるということが明確に示されるのである。この状況の説明として考えられるのは、流送されうる砂量に限度があるからであるとするのであろう。すなわち、流送されうる土砂量が流砂の実験において連続して給砂されるように無限に存在するならば、QとCは一对一に対応するであろう。しかし、Qのもつ輸送力をみただけの土砂量が流路に存在せずまた山腹から与えられないならば、この時に発現するCは存在する土砂および与えられる土砂によって制限されるはずである。また、たとえ存在したとしても、流水にさらされる層が流水の作用をうけた結果、掃流力以上の大きさの土砂が被覆層を作ることすら多く説明されてきているところである。この、Qが一定を保った際にもCが減衰することについては、後節でもうすこし考察を加えてみたいと考える。

○ 7月6日の場合 (Fig. 1—c)

この場合でも、Cと ϕ_{ss} との関係における前述のような傾向は多少不明確ではあるがみとめられる。またQが一定値を維持している時にもCが減衰することも明確にあらわれている。しかもQが減衰をはじめると、Cの減衰の度合いが強まることが示される。この原因としては、さきの存在する土砂量が有限であるということだけでは十分でないように考える。なぜなら、もしある流量での掃流力に相当する土砂量が存在しなかったとしても、流量が存在する土砂量に相当する掃流力をもつ流量に減衰するまでは、流水は同じ土砂量を輸送しうるわけであって、土砂濃度もその流量が保持できうる大きさまでは増大してもいいわけである。そこで、さらにつぎのような要因を加えてみる必要があると考える。すなわち、流量が減衰することによって水にさらされる土砂面が減少するために、輸送されうる土砂量がさらに減少するのである。このことは、ヒル谷試験流域のように、十分はぐされた花崗岩系あるいは斑岩系の土砂が堆積する溪床を通過する過程をふむ溪流においては十分に考えられることであろう。

○ 7月11日～12日の場合、および7月12日～13日の場合 (Fig. 1—d, e)

この2つの例は、短時間の比較的強度の大きい雨にとまなう出水の際の挙動を如実に示すものである。このうちとくに注目されるのは、7月11日22時45分にも多少みられるが、7月12日23時00分に流量ピークに先

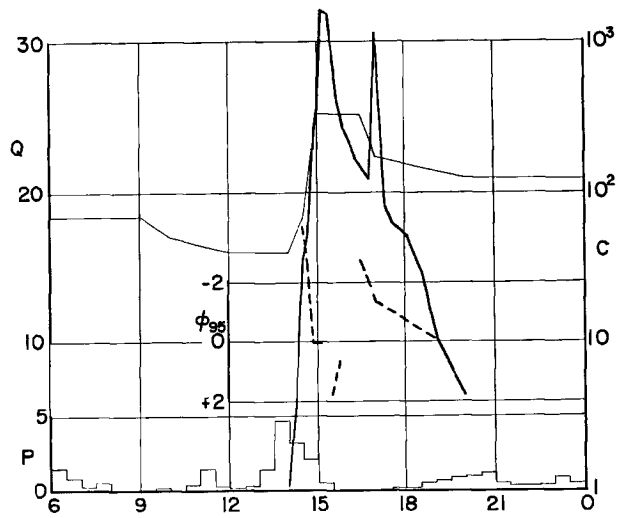


Fig. 1—c In case of the flood on 6 July.

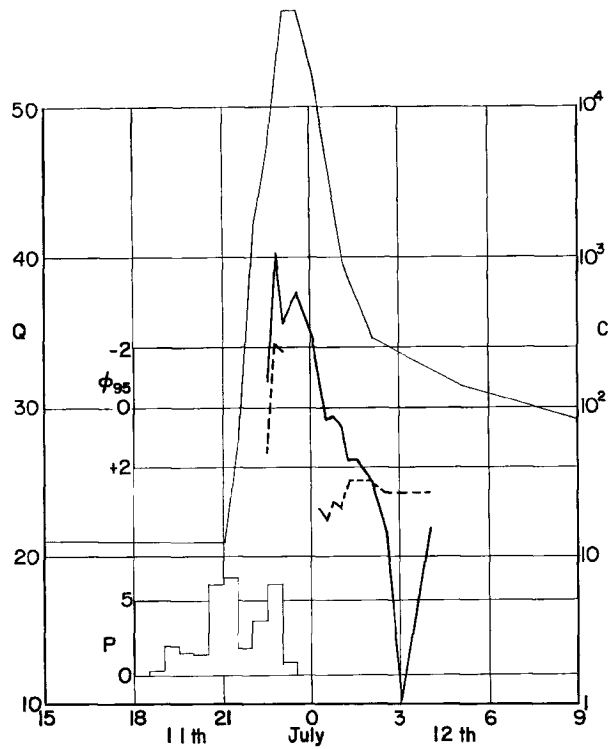


Fig. 1—d In the case of flood on 11 to 12 July.

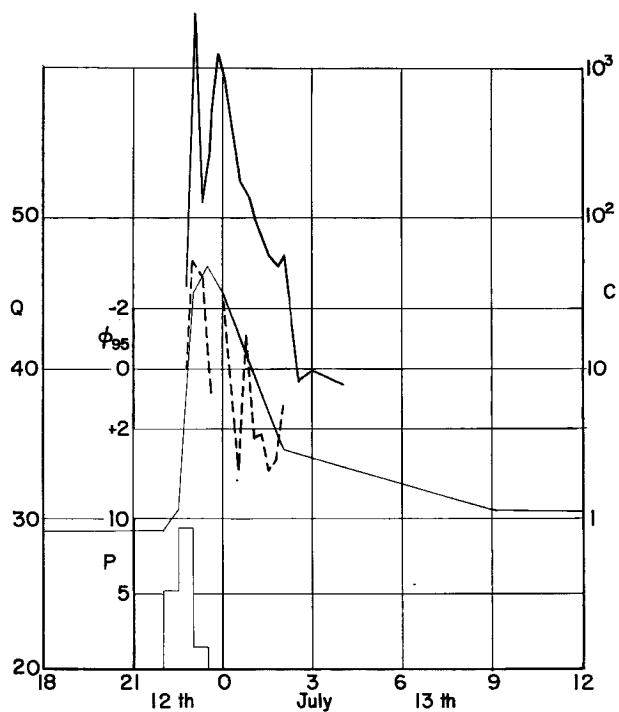


Fig. 1—e In case of the flood on 12 to 13 July.

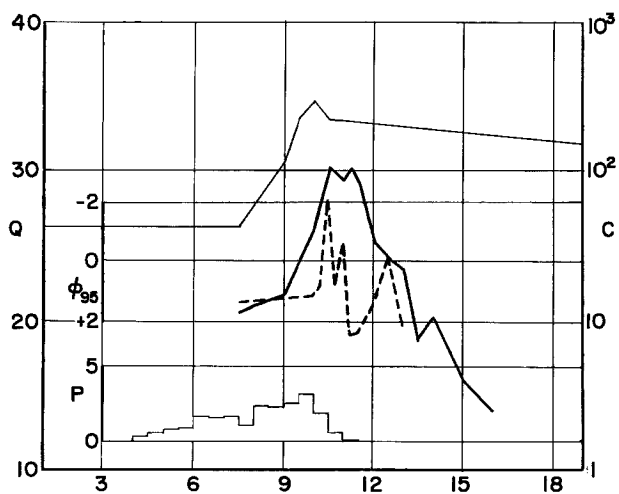


Fig. 1—f In case of the flood on 17 July.

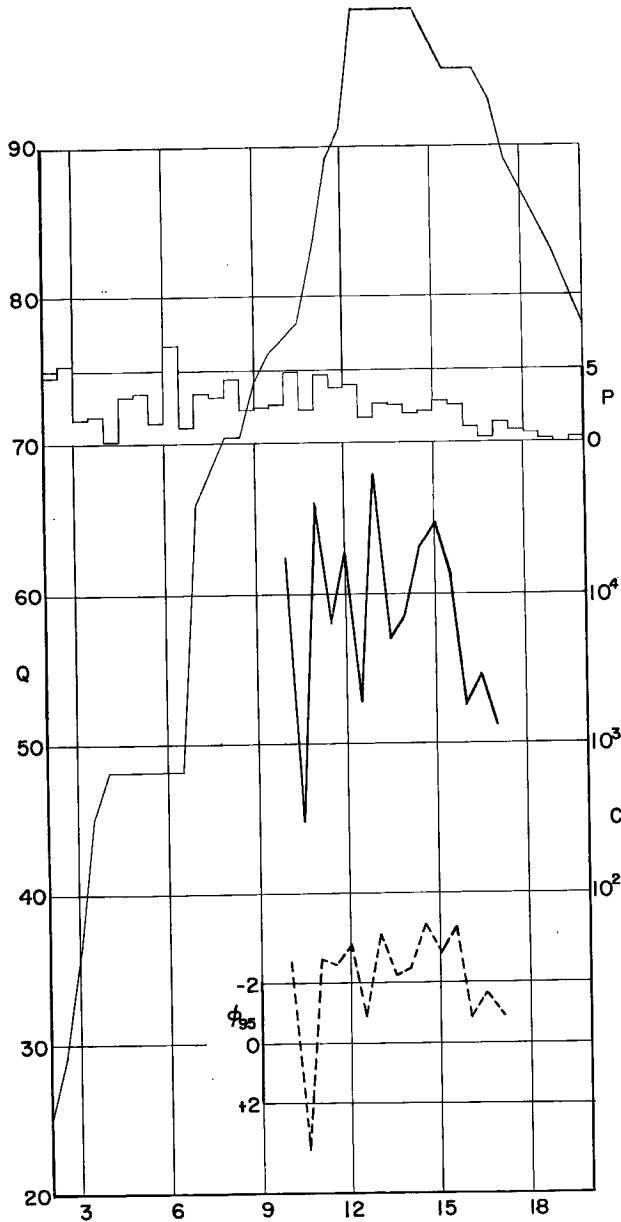


Fig. 1—g In the case of the flood on 28 August.

行する強濃度がみられることであろう。このことについては、さきの論文でも書いたように、観測地点近くに生産源となる崩壊があり、この時の雨による土砂生産がかなり卓越するものであったためであろうことが考えられる。この崩壊からの土砂の粒径は上流から流送されるものにくらべて大きいのであるが、このことが ϕ_{95} の変遷に如実にあらわれていると考える。すなわち、12日23時のときはさほどではないが、11日22時45分のときには他と比較してかなり大きな数値を与えていることでもわかる。この状況がさきに述べた C の

ピークに先行する ϕ_{95} の極大にも多少の関与をしていることは考えられるところである。 C に影響するほどではなかったが、さきの場合にもこの崩壊から多少の土砂は与えられたものであると判定してさしつかえないだろう。このような事実がいわゆる山地河川における土砂輸送が流量に対応しない理由の第一の根拠として従来あげられていたものであろう。

また、12日～13日の場合、 ϕ_{95} の変化のうち極大値をむすぶと Q と何か関係がないだろうかと思わせるところがあるが、極大値のみをむすんで何かを検討しても無意味ではないかと考えるので、ここではかかる事実があったということにとどめておく。

・7月17日の場合 (Fig. 1-f)

さきの例にみられたような C のピークに先行する ϕ_{95} の極大はみられないが、 C のピークからかなりおくれたものは明確にみとめられる。流量の増大が比較的緩慢であったために、 C のピークの Q のピークからのおくれが他と比較して多少大きいように思われる。また、 C が増大する様相も緩慢であるようにみえる。したがって、7月6日の例に比較して流量そのものは大きいにもかかわらず、 C はそれほど上昇していない。ここに、 C を支配するものとして流量の増大する様相が挙げられるようだ。

・8月28日の場合 (Fig. 1-g)

この出水は、今までの例にみられないほど長時間にわたる比較的強度の大きい降雨にともなうものであり、流量の増大も卓越している。しかし、流量増加の初期から観測をはじめていなかったことや、出水の継続時間に比較して観測時間が短かったこと、大きい砂礫が多くみとめられたにもかかわらず、さきの三段階の採砂方法のうち第一段階のものでしか行っていないことなどで、他の例に比較してその信頼度が多少劣ることになってしまった。したがって、ここでは第一の採砂方法をとった場合にどのような欠陥があらわれてくるかについて多少述べてみたい。

この図でまずみとめられるのは、 C と ϕ_{95} との相関が他の例にくらべて強いものになっているようであるということである。それでこの二つの関係をプロットすると、Fig. 2 のように他の例ではかならずしも両者の関係が一定でないにもかかわらず、この8月28日の場合のみ明確な相関がみられる。これはおそらくつぎの理由によるのであろう。すなわち、採水量が 1 l という少量のため実際の採水時間は 1 秒以下の短かさ

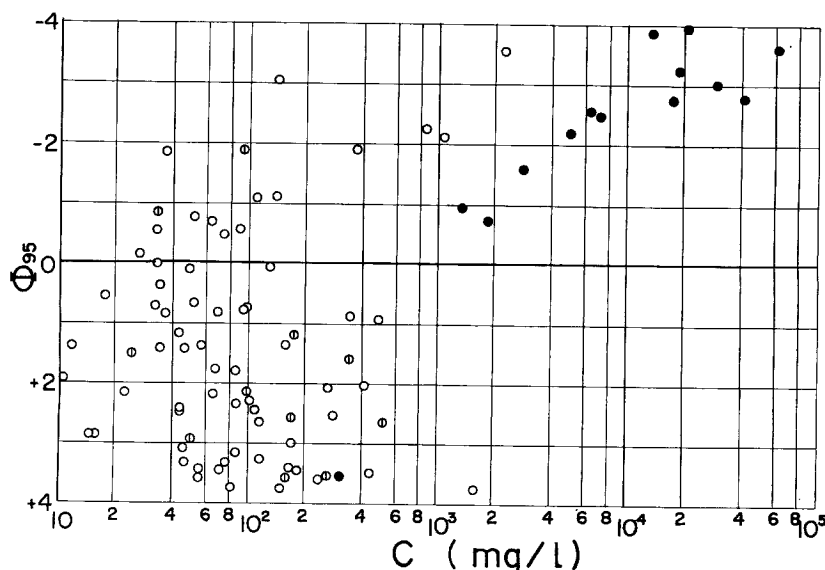


Fig. 2 Relation between Cand ϕ_{95} . Darkened circles are data on 8 August and halbed on 29 June.

である。したがって、その瞬時に大きい砂礫が偶然つかまえられたとすれば、その試料における濃度は一挙に数倍ないしは数十倍になりうる。だから、もし数分の1秒ないしは1秒間隔の濃度変化といったミクロなものをするための観測を行なっているのならまだしも、本観測のように比較的長時間にわたっての変化を知るためのものである際には、このような微小時間の変動を消去してしまい数秒ないし数十秒の平均値を得る必要があり、そのためにはこの第一の分法は砂礫が大きくなった場合には不適当であるということになる。ここに採水採砂の時間をどのようにとるかが大きな問題としてうかびあがってくるが、この点については今後さらに多くの観測を行ない比較研究していきたい。

なお、Fig. 2 には6月29日の場合の関係もプロットしたが、さきにみられた逆相関という関係は明確に示されない。やはり時間の経過の要素が Fig. 1-a でみられたものを生み出すことになったのであろう。

3. 二、三の考察

観測例の全体的にみられる傾向について多少の考察を加えてみる。

まず、Fig. 1 の全体をみると一出水時における濃度の最大値はその出水のピーク流量そのものよりも、その出水がどのような性格を有しているかに多く関係しているように思われる。すなわち、増水がどの程度のものであったのか、また増水が何時間ぐらい継続したのかによって土砂濃度の最大値が規定されてくるように思われる。このことはピーク流量 Q_{max} あるいは流量の増分 ΔQ と出水時の最大土砂濃度 C_{max} をプロットしてみてもその点はばらつくばかりで、一つの傾向を見出すことはできないことによっても裏づけられているところである。

したがって、まず量的な性格について検討するために、 Q_{max} を基底流量 Q_0 で除したものと C_{max} との関係に従来のデータを加えてプロットしてみた。これを Fig. 3 に示す。これによると Q_{max}/Q_0 が一出水中の C_{max} の存在しえる上限をある程度規定するように思われる。すなわち、図中細く描いた線のようなものがあってそれ以上の C_{max} は存在しえないと規定しうるのはないだろうか考える。これは流量 Q_0 の状態で渓床が安定しているときに、さらに $\Delta Q (=Q_{max}-Q_0)$ が加えられることによって輸送される土砂量を与え、この土砂量はその時の流量のもつ輸送能力以上のものでないかぎりその濃度を規定するという仮定にたてば、十分説明される。しかしここに与えられる輸送される土砂量が輸送能力以上のものである時には、その濃度が流量そのものに規定されるであろうことはもちろんである。したがってこの図が意味をもつのは、これらの観測を行なった際に渓床に与えられた輸送しうる土砂量が流量のもつ輸送能力に満たなかったと考える場合に限る。

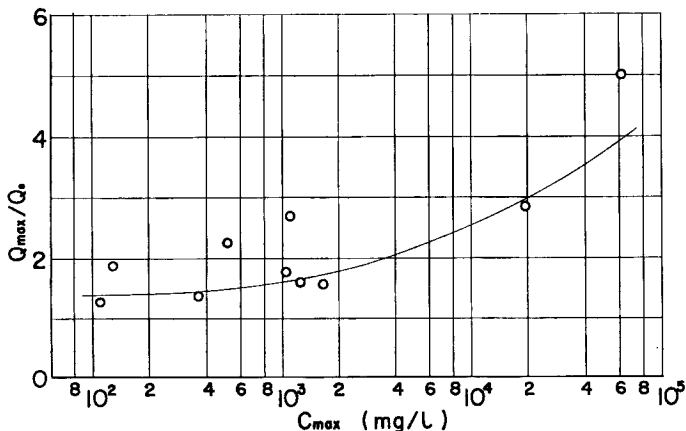


Fig. 3 Relation between ratio of peak discharge to base flow and maximum of sediment concentration during a flood.

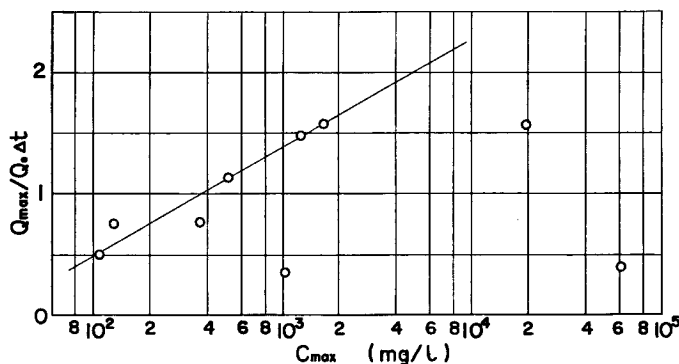


Fig. 4 Relation between the increasing rate of discharge and maximum of sediment concentration during a flood.

さらに、増水の継続時間あるいは増水の時間的な割合を考慮する意味で、増水を始めてからピーク流量に達するまでの時間 Δt を加えた $Q_{max}/Q_0 \Delta t$ と C_{max} との関係をプロットし、Fig. 4 に示す。この図中に細い線で示したようなものを考えると、2, 3 これより大きくはなれるものがあることになるが、これらは Δt の大きいものであった。したがって、この図をつぎのように説明することができそうである。この2, 3の例では増水時間 Δt が長くしかも Q_{max}/Q_0 が大きかった。これはそれだけ雨が長く降り続いたわけで、山腹から与えられる土砂量も当然大きいことになる。したがって C_{max} もさきの Q_{max}/Q_0 で規定される以上のものになるであろう。このことから、ここに描いた線から下にはなれるものほど山腹から与えられた土砂量が大きかったと判定しうるであろう。くりかえすと、 Q_0 が AQ_0 なるピーク流量になった時の最大濃度は A によって規定される $C_{max}(A)$ までになることを示したのが Fig. 3 であり、この Q_0 が AQ_0 になる時間が Δt_1 のときよりも、短い Δt_2 のときの方が C_{max} は大きくなりうることを示したのが Fig. 4 の線である。すなわち降雨強度の強いほど C_{max} が大きくなることを考慮したものがこの線になる。ところが、 Δt_1 よりも長い時間 Δt_3 を要して Q_0 が AQ_0 になったにもかかわらず C_{max} が Δt_1 のときと変化しないということは、山腹から与えられた土砂量が大きくそのために C が大きいことになる。このように、この図にプロットすることによってある出水時の流出土砂がどの部分に多くおっているかが判定できるであろう。ただ $Q_{max}/Q_0 \Delta t$ という表示の方法の適当性についてはさらに検討する余地が残されている。

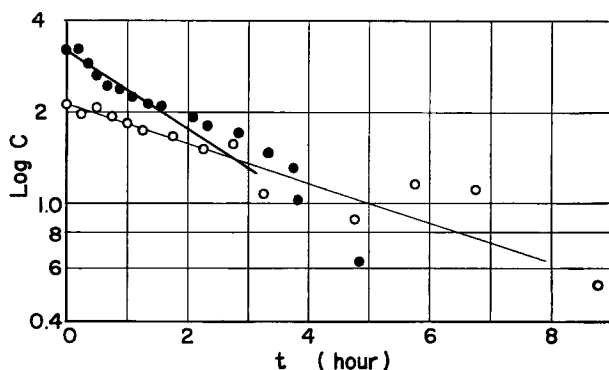


Fig. 5 Decrease of sediment concentration after the maximum, while discharge is constant, in case of the flood on 2 to 3 July and on 6 July (darkened).

つぎに、前節で流量が一定値を保持した際の C の減衰の様相が指数函数的であると述べたが、検討するために7月2日～3日と7月6日の出水について C の対数値と C の極値を得た後の経過時間 t とを片対数紙にプロットしなおすと、Fig. 5 のように後者についてはもちろんのこと前者についてもかなり線的な関係を示すことが明らかになった。この図で7月6日の場合、1時間20分後に Q が減衰しはじめると C が幾分上昇することも示される。これはすでに述べたような状況がありえることを示しているものであると考える。

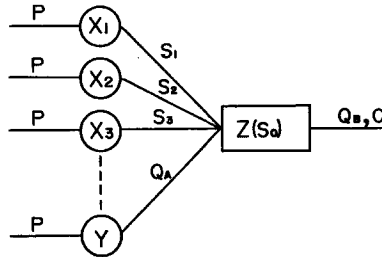


Fig. 6 A model for thinking on sediment yielding in a mountain stream.

- $X_{1,2}, \dots$; field for exchange of precipitation P to sediment supply $S_{1,2}, \dots$ to stream, as individual scar, areal bared slope, and so far.
 Y ; field for exchange of precipitation to water discharge Q_A , including all X_i , that is watershed.
 Z ; field for refection of sediment supplied from X_i , discharge Q_A and sediment S_0 deposited in itself, that is stream.

ところで、山地流域での土砂流出について考えていくばあい、つぎのようなモデルを設定してみてもどうかと考える。すなわち Fig. 6 で $X_1, X_2, \dots$ は降雨 P を土砂量 $S_1, S_2, \dots$ に変換して流路 Z に与える場であり、個々の崩壊、裸地斜面、草地、伐開地、林地というような、あるいは急斜地、緩斜地もしくは地質などのちがひによる土砂生産能力の差によって多くに細分される個々のあるいは圏的なものである。 X_i では考慮しなかった降雨 P の流量 Q への変換を Y で考える。この Y も X_i と同じように種々に区分するべきであると思われるが、地域的には X_i を包括した流域斜面がこれにあたる。そして X_i および Y から与えられた土砂 $\sum S_i$ および流量 Q_A さらに Z そのものに存在する土砂 S_0 が相互に作用しあって、最終的な結果として土砂濃度 C の流量 Q_B を与える場として流路 Z を規定する。現在行なっている観測ではこの C と Q_B のみを対象としているわけである。したがって、このモデルを十分に説明するためには、 X_i, Y, Z での $P \rightarrow S_i, P \rightarrow Q_A, Q_A, (Q_A, \sum S_i, S_0) \rightarrow (Q_B, C)$ の変換の個々の機構を十分に知る必要があると思う。 $P \rightarrow Q_A$ の変換および $Q_A \rightarrow Q_B$ の変換については水文学の分野ですでに多く議論されているところであり、 $Q_A, S_0 \rightarrow C$ についても多少なりとも解明されていると考える。しかし、この $Q_A, S_0 \rightarrow C$ でも本文の観測例に示されたように、山地流域では必ずしも一つの形ではあらわされないものであることは確かであり、現状では多くの推理をはたらかせる必要があることはいなめないだろう。それでも $P \rightarrow S_i$ を限定し、 P, S_0 を任意に与えて、 C, Q_B について検討することは思想的にも実験的にも可能であると考えるので、今後さらに実際観測をすすめていくとともに、とくにかかる場合についての実験を行ない、このモデルを解明する方向にすすみたいと思う。

最後になったが、観測補助をしてくれた、穂高砂防観測所の志田技官ならびに滝沢梅雄氏に謝意を表したい。

参 考 文 献

矢野・土屋・奥村：山岳小流域における土砂流出に関する 2, 3 の観測結果について：京大防災研年報，第10号，昭42，pp.81—96.