

山地流域における微細土砂の生産場と 流出過程に関する研究

江 頭 進 治・芦 田 和 男

THE PRODUCTIVE AREAS AND TRANSPORTING PROCESS OF WASH LOAD IN MOUNTAINOUS DRAINAGE BASINS

By Shinji EGASHIRA and Kazuo ASHIDA

Synopsis

There are the following important factors in treating the problems of wash load in mountainous drainage basins. First, where are the production areas of wash load? Secondly, what is the mechanics of erosion in the area under consideration? Thirdly, How can we evaluate the distribution of discharge all over drainage basin? This paper concerns the first subject of the three.

The range of particle sizes of wash load is discussed first with theoretical backgrounds and many field studies. We propose it is enough for us to take the finer particles into consideration than $100\mu\text{m}$ diameter in the study of wash load. It is clarified from various field investigations that the wash load is mainly produced in stream channels and on bare slopes. The eroding processes at the production areas of wash load are also discussed on the basis of data.

1. 緒 言

1930年代の流砂観測¹⁾において、その地点の河道条件と水理条件より定まらない流砂、すなわち、wash load の存在が確認された。国内外を問わず、その後の多くの流砂観測において、流砂全体に占める wash load の比率が高く、浮遊砂の大部分は、wash load のような微細土砂から構成されていることが明らかにされている。

wash load の濃度や輸送量に関する研究は、古くは、貯水池堆砂や各種用水路の維持管理などの問題との関連性より進められてきたが、最近では、貯水池による濁水問題などに代表されるように、水質と環境問題との関連性からも重要な研究課題となってきた。しかしながら、wash load の濃度あるいは輸送量は、上流域の降雨流出特性および土砂生産場の特性によって支配されるため、その推定に関する水理水文学的な取り扱いについてはかなり困難なものであると見なされ、殆んどの場合、河道流量と流砂濃度との間の経験的な関係によってその予測が行われてきた。ところが、最近になって、ようやく土砂水理学および水文学的知見に基づいて、数理モデルを作成し、これによって流砂濃度を予測しようとする試みがなされ、現在、村本・道上・下島²⁾、Williams³⁾ および著者^{4),5)}らの予測法が提案されるに至っている。

これらの予測法は、いずれも土砂生産場における流量と侵食量との関係より、流水濃度や輸送量を推定しようとするものである。したがって、流域におらる土砂生産場の分布、流量分布および流量と侵食量との関係が、予測モデルの中でいかに取り扱われているかが、その予測法の一般性を左右する重要な問題となる。本研究においては、山地流域における微細土砂の生産場に関連する問題を対象として、微細土砂の粒径範囲およびその含有率、山地流域における微細土砂の生産場の分布、および生産場の形成過程と微細土砂の流出過程について、巨視的な観点より検討する。

2. 微細土砂の粒径範囲

2.1 流水中の微細土砂の粒径範囲

微細土砂の生産場やその流出過程を考察するに先がけて、wash load としてどのような範囲の微細土砂を対象にするかを明らかにしよう。流水の作用下にある土粒子は、流体力と粒子の抵抗力に応じて、静止、掃流および浮遊の運動形態をとり、粒子がどの運動形態をとるかは、粒子の掃流限界および浮遊限界によって定まる。Fig.1 は、動粘性係数 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ 、粒子比重 $\rho_s/\rho=2.65$ として求められる掃流限界摩擦速度 u_{*c} および沈降速度 ω_s と粒径との関係を示したものである。いま、着目する粒子の浮遊限界摩擦速度を u_{*c} とおき、 $u_{*c} \div \omega_s$ とすると、Fig.1 よりつぎのことがわかる。すなわち、 $u_{*c} < u_{*c}$ の範囲にある土粒子は、その運動過程において、作用する流体力に応じて、

静止 $\rightarrow$ 掃流 $\rightarrow$ 浮遊

といった運動形態をとり、逆に、 $u_{*c} > u_{*c}$ の粒子は、

静止 $\rightarrow$ 浮遊

の運動形態をとる。このように、土粒子がどちらの遷移をするかは、 $u_{*c} = u_{*c}$ となる粒子を境にして定まる。この限界となる粒子径は、粒子の物理的特性や流体の物性などによっても変化するが、Fig.1 から明らかにように、

$$d_c \div 0.1\text{mm}$$

程度になる。

さて、上述の限界粒径と wash load の最大粒径とは密接な関係があることが推察される。なぜならば d_c よりも細かい土粒子は、静止 $\rightarrow$ 浮遊の運動形態をとるため、一旦、流水中に浮遊すると、流水とほぼ同じ速度で輸送され、短時間のうちに生産源からかなり遠方へ流出するからである。そこで、従来の wash load に関する調査研究において、その粒径がどのような範囲にあるかをみると、Table 1 のようである。ここに、 d_{max} は、wash load の最大径であって、Einstein・Anderson・Johnson⁶⁾、村本・道上・下島²⁾、および金屋敷・芦田・江頭¹⁾ のデータは、河道流水中の浮遊砂の粒度分布と河床材料調査結果の比較より考察されたもので、Einstien・Ning Chien¹⁾ のものは水路実験より検討されたものである。Rendon-Herrero⁷⁾ および

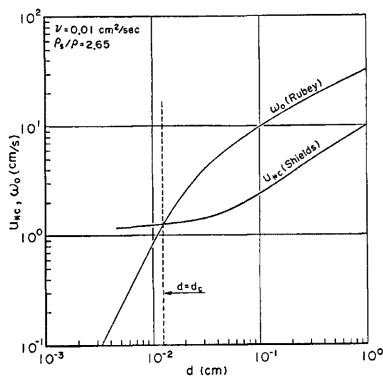


Fig. 1. The critical states of particles in flowing water.

Table 1 Particle sizes of wash load.

investigators	maximum diameter (mm)	notation
Einstein・Anderson・Johnson	0.351	Enoree River
Heidel	0.062	Bighorn River
Einstein・Ning Chien	0.06 ~ 0.1	Experimental Flume
Muramoto・Michiue・Shimajima	0.2	Daido River
Rendon-Herrero	0.1	Bixler Run Watershed
Jansen et al	0.05 ~ 0.07	
Kanayashiki・Ashida・Egashira	0.1	Totsu River

Heidel⁹⁾のものは、彼らが提示した浮遊砂の粒度分布を参考にして、著者らが設定したもので、Jansen⁹⁾のものは、多くの研究資料から検討されたものである。さて、これらの調査結果についてみると、それぞれの研究者によって、wash load の最大径は若干異なっている。これは、調査流域、調査条件、河道および水理条件の違いや観測誤差などによるものと思われるが、先に提示した限界粒径 d_e と Table 1 の d_{max} とを比較すると、ほとんどの場合、 d_e よりも小さい範囲の土砂は、wash load とみなせることが明らかである。さらに、出水時の浮遊砂に関する粒度分布調査資料によると、 d_e よりも大きい土粒子が含まれていても、全体に占めるこの割合は小さいことが認められている。

これらのことを総合し、また、wash load に関する議論をより簡単に行うため、本研究においては、上述の限界粒径よりも小さい範囲の土砂を微細土砂と定義し、以下これを対象に議論する。

2.2 裸地および河道堆積物の微細土砂含有率

まず、微細土砂の含有率に関する調査法について若干の私見を述べておく。従来、粒度分析法として、採取資料を炉乾燥した後、各種の篩を用いて調べる方法が一般によく用いられている。しかし、これによると、飛沫や粗い粒子への付着などにより、微細土砂の含有率が正しく評価されない欠点がある。これに代わる方法として、ある篩目上に資料をのせて水洗いを行い、通過した成分ととどまった成分とを別々に乾燥させて調べる方法が考えられる。Fig. 2 は、微細土砂含有率に関し、水洗い法によって調べた結果 (p_f) と従来の乾燥法によるもの (p_{fd}) とを比較したもので、用いられた資料は、川原樋川流域⁴⁾において採取されたものである。同図の比較より明らかなように、 p_{fd} は p_f の約1/2程度になっており、従来よく用いられている方法によって微細土砂の含有率を的確に評価することは、かなり困難であって、微細土砂に関する粒度分布

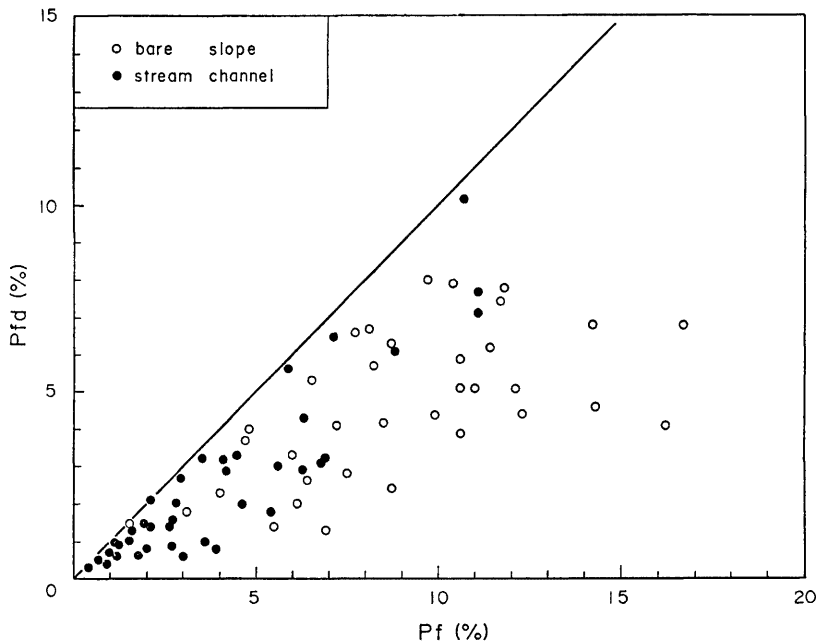


Fig. 2. Comparison between p_f and p_{fd} . p_f is the composition rate of fine sediments obtained from the new method and p_{fd} that from a traditional one. The fine sediments are defined as the finer particles than $100\mu\text{m}$ diameter.

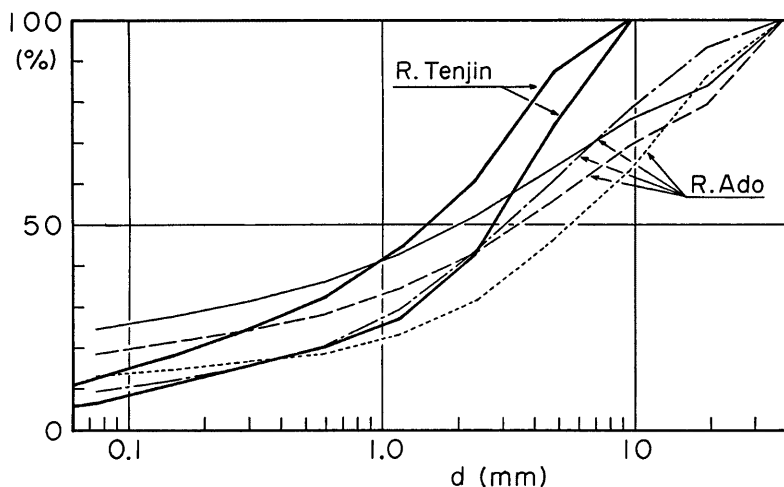


Fig. 3. Grain size accumulation curves of materials sampled at bare slopes in drainage basins of the Tenjin and Ado Rivers.

調査においては、上述の水洗い法による分析がより望ましいように思われる。以下、ここで提示する粒度分析結果は、全て、水洗い法によって調べられたものである。

つぎに、崩壊地や林道などの裸地表面および河道堆積物において、微細土砂の含有率がどの程度になっているか、若干の調査結果に基づいて検討してみよう。**Fig. 3**には、大戸川支川の天神川流域および安曇川上流域における崩壊裸地の粒度分布が示され、**Fig. 4**には、那賀川本川上流域 (①, ②, ③) および支川坂州木頭川流域 (④, ⑤, ⑥) の崩壊地の粒度分布¹⁰⁾が示されている。また、**Fig. 5**⁴⁾には、十津川上流の川原樋川右支川の赤谷川における崩壊地 (slope)、溪岸 (terrace) および河床 (bed) の堆積物の粒度分布が示されており、それぞれの分布曲線は、十数個の資料の平均である。なお、**Fig. 3**~**Fig. 5**の資料は、すべて表面を一粒径程度はぎ取り、その下層を採取したものである。これらの資料を地質的にみると、**Fig. 3**のものは、風化花こう岩地帯、**Fig. 4**のものは、①, ②, ③が中生層の砂岩、④, ⑤, ⑥は古生層の砂質泥岩地帯、**Fig. 5**のものは、中生層の砂岩および頁岩地帯に属している。

まず、崩壊裸地の微細土砂含有率についてみると、安曇川10~25%、天神川8~15%、那賀川10~18%、坂州木頭川18~25%、および赤谷川11%程度になっている。微細土砂の含有率は、風化の程度によって左右されるものと思われるが、これについての情報が十分でないので、地質の違いに着目してみると、古生層地帯における含有率が最も大きいように思われる。なお、微細土砂含有率を一般的に推定するのは、現時点においてかなり困難であるが、これらの図の結果や流域特性の異なる他の粒度分布資料を参考にとすると、崩壊裸地における微細土砂の含有率は、おおむね、 $p_{75} = 0.1 \sim$

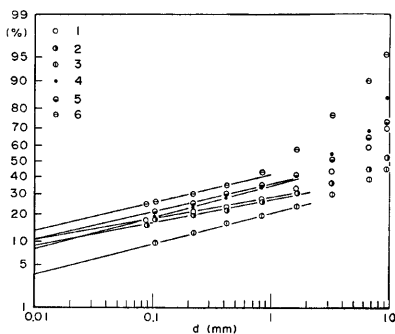


Fig. 4. Grain size accumulation curves of materials sampled in the Naka River basin.

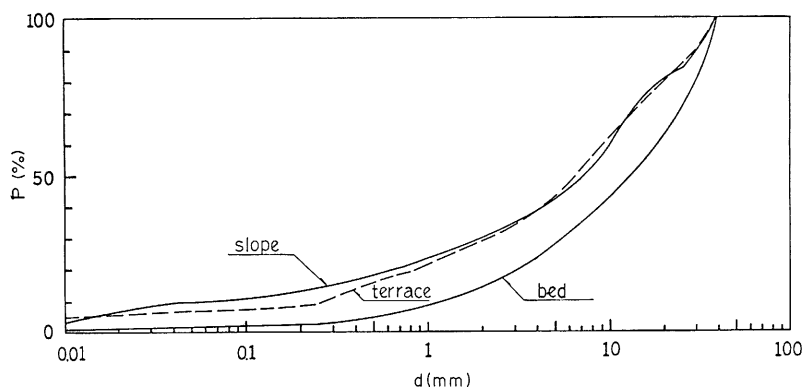


Fig. 5. Grain size accumulation curves of materials sampled in the Akadani River basin. The curves labelled as "slope", "terrace" and "bed" are of the materials sampled at bare slope, stream banks and bed, respectively.

0.2 程度になっているようである。ついで、**Fig. 5** に示す採取場所の違い、すなわち、崩壊裸地、溪岸堆積物および河床堆積物における微細土砂含有率についてみると、それぞれ、11、7 および 2 % 程度になっており、過去において水流の作用をどの程度受けているかによって含有率の大きさが定まるようである。

3. 微細土砂の生産場

photo 1, 2, 3, 4 は、川原樋川流域において撮影されたものであって、山地流域における微細土砂の生産場であると思われる箇所の一例を示したものである。すなわち、**photo 1** および **photo 2** は、それぞれ崩



Photo. 1. A surface pattern of a land slide.



Photo. 2. A surface pattern of a road.

で検討しておく必要がある。しかし、このことを直接的な測定によって検討するのは、かなり困難である。そこで、出水前後における河床堆積物の微細土砂の含有率に関する調査に基づいて調べてみよう。**Fig. 6** は、川原樋川河床の水際12点において、出水前にコアサンプルを行い、これに含まれる微細土砂の含有率を調べ、さらに、採取した資料の代わりにレンガくずを埋め込み、出水中の河床変動によって再び土砂礫に置き換わった部分に含まれる微細土砂の含有率を調べ、両者を比較したものである。同図によると、含有率は、出水後において逆に増加しているものもあり、また、減少しているものもあって、出水前後の系統的な変化はみられず、河床堆積物からの微細土砂の出入は無視できる程度の量であることが推察される。したがって、(1) 式は、つぎのように簡略化される。

$$q_f = q_{fm} + q_{fi} \dots\dots\dots (3)$$

溪岸堆積物からの微細土砂の流出 q_{fi} に関しても、河床堆積物と同様、従来、殆んど着目されてなかった。そこで、溪岸堆積物および裸地からの流出について検討してみよう。いま、流域面積 A 、裸地面積 A_b 、年平均裸地侵食深 d_m 、裸地の空隙率および微細土砂含有率をそれぞれ λ_m 、 p_{fm} とする。さらに、土石流発生勾配よりも勾配の小さい河道区間の総延長 l 、そこにおける溪岸堆積物の存在区間の長さ l_n 、溪岸高 D 、年平均拉幅量 d_n 、堆積物の空隙率および微細土砂含有率をそれぞれ λ_n 、 p_{fn} とおく。すると、(3) 式は、次のように変形される。

$$Aq_f = (1 - \lambda_m)p_{fm}A_b d_m + (1 - \lambda_n)p_{fn}f_n l D d_n \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 f_n は、溪岸堆積物の分布密度⁵⁾ $f_n = l_n/l$ である。ここで、裸地面積が大きいほど、流域における土砂生産が活発であることを考えて、次式を仮定する。

$$d(f_n l D)/dA_b > 0 \dots\dots\dots (5)$$

さらに、簡単のため、 $f_n l D \propto A_b$ とし、これを (4) 式に代入すると、 Aq_f は、つぎのように表示される。

$$Aq_f = F_b(A_b) = F_i(f_n l) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 F_b および F_i は関数である。

さて、このような観点に立つと、 F_b および F_i が、ともに増加関数であれば、 $f_n l D \propto A_b$ であって、しかも、 A_b および $f_n l D$ も、微細土砂の主要な生産場であるものと見なしてもよいであろう。そこで、川原樋川流域における1979年6月の梅雨出水時の観測資料⁵⁾ を用いてこれらの関係をみてみよう。この出水は、二山型の出水であって、前半(27日～28日)と後半の出水(29～30日)について、流出微細土砂量と A_b および $f_n l$ との関係をみたのが、それぞれ **Fig. 7** および **Fig. 8** である。なお、これらの図の縦軸には、 Aq_f の代わりに一出水中の流出量 (ton) が用いられている。さて、これらの図より明らかなように、裸地面積 A_b および溪岸堆積物の堆積長 $f_n l$ と流出微細土砂量との相関は明瞭であって、 A_b および $f_n l$ の増加につれて、流出量も増加するのがわかる。

著者⁵⁾ らは、別の観点より年平均流出微細土砂量と裸地侵食深に関する調査結果に基づいて微細土砂の生産場に関する検討を行ったが、その結果と **Fig. 7** および **Fig. 8** の結果を総合すると、山地流域において、裸地および溪岸堆積物は、微細土砂の主要な生産場であると言える。

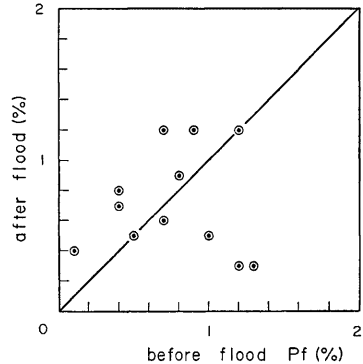


Fig. 6. The comparison between the composition rates of the fine sediments in bed materials before and after a flood.

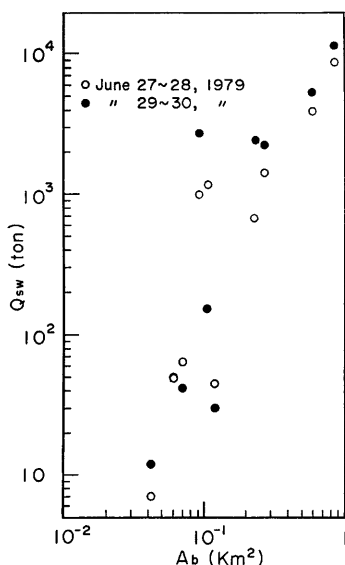


Fig. 7. The relation between bare slope area and discharge of fine sediments.

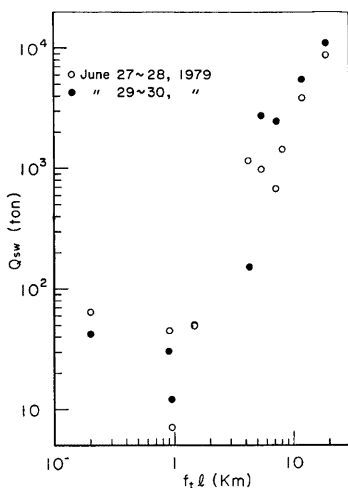


Fig. 8. The relation between the length of erodible stream bank and discharge of fine sediments.

4. 微細土砂の流出過程

ここでは、微細土砂の生産場の形成過程および微細土砂の流出過程について、巨視的な観点より検討する。

Fig. 9 は、山地流域における微細土砂の生産場の形成と流出過程を表示したものである。すなわち、ある流域に対し、表面流や建設工事などの自然のおよび人為的な外力が作用すると、流域の抵抗特性と加えられた外力に応じて、崩壊、土石流および人為的な擾乱などの現象が発生し、崩壊や人為的な擾乱によって裸地が形成されるとともに、これらによって生産された土砂は、河道堆積物として流域に貯留される。また、土石流によって生産された土砂は、その堆積条件がみたされる領域まで輸送されて、河道堆積物となる。

このような過程を経て形成された微細土砂の生産場に対し、流水が作用すると、その侵食力や生産場の受食性に応じて生産場は侵食を受け、侵食された土砂に含まれる微細土砂は、流水とともに流出する。これらのことを数理モデルによって表示すると、形式的には、つぎのように書ける。裸地においては、単位時間単位面積当たり、

$$w_{fs} = \rho_s (1 - \lambda_b) p_{fs} E_1 \dots\dots\dots (7)$$

および河道においては、単位時間単位河道長当たりに、

$$w_{ft} = \rho_s (1 - \lambda_t) p_{ft} D \partial B / \partial t \dots\dots\dots (8)$$

の微細土砂が生産・流出する。ここに、 ρ_s ：微細土砂の密度、 E_1 ：裸地侵食速度、 $\partial B / \partial t$ ：河道の拡幅速度である。(7)、(8)式において、 E_1 および $\partial B / \partial t$ は、土砂生産場の受食性と流水の侵食力から定まる水理変数である。

つぎに、こうした微細土砂の生産場の形成過程と流出過程のうち、“土石流→河道(溪岸)堆積物→

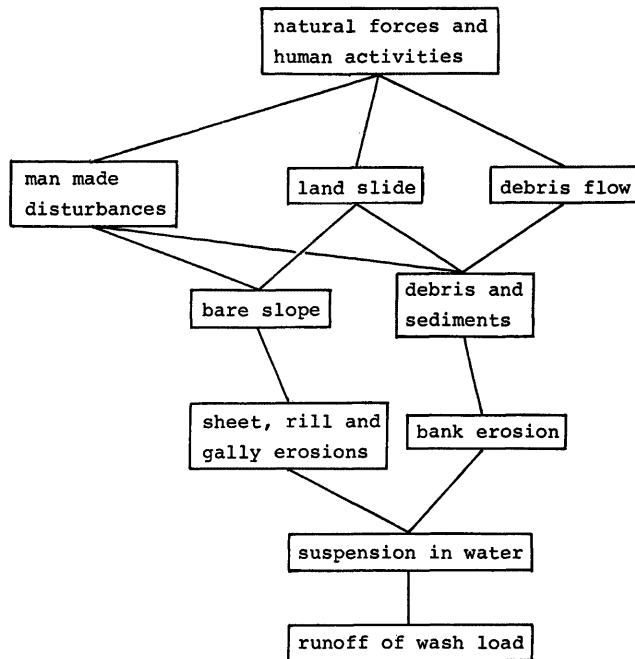


Fig. 9. The yield and transport process of fine sediments like wash load in mountainous drainage basins.

溪岸侵食による微細土砂の流出”の経路を示す典型的な観測例を呈示しよう。Fig.10⁽¹⁾は、木曽山系に源流を發する王滝川本川松原橋地点および支川濁川における流水濁度と流出微細土砂量の累加分布、御岳湖牧尾ダム地点の雨量、水位、流入・流出流量を示したものである。それぞれの観測点の流域面積は、それぞれ、濁川 9.07km²、松原橋 223km²、牧尾ダム 304km²である。ここで、微細土砂の生産場の形成について、その概要を示すとつぎのようである。1979年10月28日の木曽御岳山の噴火により濁川上流域に多量の火山噴出物をもたらし、これが土石流および泥流となって流下し、濁川合流点より下流域の本川沿いに堆積し、微細土砂の生産場が形成された。なお、濁川上流域には、その後の噴火活動によって、噴出物を含む泥水が継続的に供給されている事実が確認されている。

Fig.10において、まず、降雨と流水濁度との関係についてみると、松原橋においては降雨と濁度の波形はかなりよく対応しているが、濁川においては、必ずしもそうではなく、8、14および15日の観測にみられるように無降雨日においても濁度が急に上昇する場合もある。この違いは、濁度変化が、噴火口からの継続的な泥水の供給と降雨による流量増加に伴う火山灰堆積物の侵食とによって支配されているのに対し、松原橋地点の濁度変化は、流量増加に伴う堆積物の侵食のみによって規定されていることに起因するものと推察される。つぎに、流出微細土砂量についてみると、濁川においては、降雨日におけるものが無降雨日より若干多い程度であるが、松原橋地点においては、降雨によって流量が増加した5日および18日の流出量が非常に多くなっている。また、二つの観測点における流出微細土砂量を比較すると、松原橋地点においては、濁川の5～6倍程度の流出量を示している。

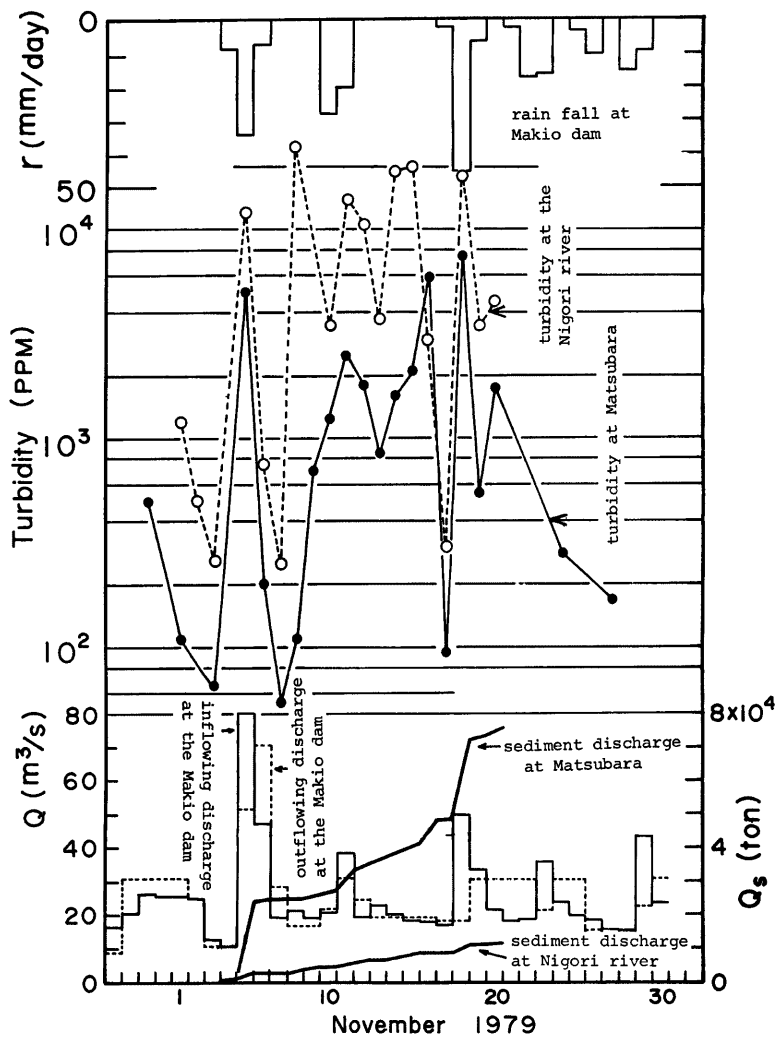


Fig. 10. The turbidity of flowing water and fine sediments discharge observed at two station; the one of them is situated at the Nigori River (9.07km²) which is a tributary of the Otaki River and the other at the Matsubara bridge station (223km²) of the Otaki River.

以上のように、この流域においては、主として、濁川下流の本川沿いに形成された土石流あるいは泥流堆積物の侵食によって、微細土砂が流出していることがわかる。

5. 結 語

本論文においては、山地流域における微細土砂の生産・流出に関する水理水文学的考察を行うに当たり、その基礎となる微細土砂の主要な生産場およびその流出過程について巨視的な観点より考察し、以下のような結果を得た。

(1) 土粒子の運動形態に関する水理学的考察および wash load に関する国内外の調査研究成果を参考に、wash load の粒径範囲に関する検討を加え、掃流限界と浮遊限界とが等しくなる $100\mu\text{m}$ 程度の土粒子よりも小さい範囲の土砂は、ほとんど wash load と見なせることを述べるとともに、これらを微細土砂と定義した。そして、wash load に関連する土砂問題の取り扱いにおいて、このように定義された微細土砂を対象にすれば、十分その目的が達成されることを述べた。

(2) 微細土砂に関連して粒度分布調査を行うに際し、採取した資料を直接炉乾燥して篩分析を行うと、著しく精度が低下することを示し、これに代わるものとして、採取した資料を篩目上において水洗いし、微細土砂とこれよりも大きい成分とを予め分離する方法を提案した。ついで、いくつかの山地流域における粒度分布調査結果に基づいて、微細土砂の含有率に関する検討を加え、古生層地帯の崩壊裸地における含有率が最も大きい値を示すことを述べた。また、採取場所別に含有率の大小をみると、裸地、溪岸および河床堆積物の順に小さくなっていることを示した。

(3) 山地流域における微細土砂の生産場として、まず、(a)裸地、(b)溪岸堆積物および(c)河床堆積物を考え、出水前後における堆積物の粒度分布調査より、(c)は微細土砂の主要な生産場にはならないことを示した。ついで、出水中の流出微細土砂量と裸地面積および溪岸堆積物の堆積区間長との関係について検討し、山地流域においては、(a)および(b)とも微細土砂の主要な生産場になることを示した。

(4) 山地流域における微細土砂の生産場の形成と微細土砂の流出過程をフローシートに示し、“土石流→河道(溪岸)堆積物→溪岸侵食による流出”といった経路を示す典型的な観測例について検討を行い、結論(3)の妥当性を裏付けた。

最後に、本研究において使用した資料は、一部建設省近畿地方建設局、同紀南工事業務所および水資源開発公団中部支社より提供していただいたものである。ここに記して感謝するとともに、資料整理や図面作成などに御協力願った京都大学防災研究所技官吉田義則氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Einstein, H. A. and Ning Chien: Can the rate of wash load be predicted from the bed load function?, Trans. A. G. U., Vol. 36, No. 6, 1953, pp. 876~882. (この文献より引用した)
- 2) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一: 大戸川における微細土砂の流送過程について, 京大防災研究所年報, 16号 B, 1973, pp. 433~447.
- 3) Williams, J. R.: A sediment graph model based on an instantaneous unit sediment graph, Water Resources Res., Vol. 14, No. 4, 1978, pp. 659~664.
- 4) 金屋敷忠儀・芦田和男・江頭進治: 山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究, 第24回水理講演会論文集, 1980, pp. 143~151.
- 5) 江頭進治・芦田和男・金屋敷忠儀: 微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究, 第25回水理講演会論文集, 1981, pp. 481~487.
- 6) Einstein, H. A., A. G. Anderson and J. W. Johnson: A distinction between bed load and suspended load in natural streams, Trans. A. G. U. reports and papers, hydrology, 1940, pp. 628~633.

- 7) Rendon-Herrero, O.: Estimation of wash load produced on certain small watersheds, Proc. ASCE, Vol. 100, Hy 7, 1974, pp. 835~848.
- 8) Heidel, S. G.: The progressive lag of sediment concentration with flood waves, Trans. A. G. U., Vol. 37, No. 1, 1956, pp. 56~66.
- 9) Jansen, P. Ph. et al: Principles of river engineering, Pitman, 1979, p. 90.
- 10) 芦田和男: 流域の土砂生産と濁水源, 徳島県那賀川河口養殖ヒトエグサ等原因調査報告書, 日本水産源保護協会, 1877, pp. 133~158.
- 11) 芦田和男・江頭進治: 火山灰の流出および御岳湖における土砂の挙動に関する研究, 御岳山1979年火山活動および災害の調査報告 (代表者青木治三), No B-54-3, 1980, pp. 115~123.