

# 筑波山の山口川流域における 浮流土砂の流出量について

Suspended Sediment Yield at Yamaguchi River Basin  
in Mt. Tsukuba

朴 鍾瑄\*

Jong Kwan PARK\*

## I はじめに

日本は山地面積が全国土の約70%を占める山地国であると言われている。しかしながら、急斜面を持つ自然の山地流域での浮流土砂（以下、浮流砂と呼ぶことにする）の流出については、現在の所、綿密な調査があまり行われていない実情である。そこで、本研究では、筑波山北麓の急斜面の山地流域からの浮流砂流出量について考察した。ここでは、その結果を報告する。

## II 調査流域及び観測方法

### 1) 調査流域

上述の目的を達成するために、精度の良い流量観測が行われている筑波山の北麓の山口川流域を選んだ（第1図）。本流域は自然流域の降雨・流出現象を研究するために、建設省土木研究所が1969年（昭和44年）に設立した面積3.12km<sup>2</sup>の山地流出試験地（通称、裏筑波流出試験地）である。試験地流域は細かい谷の多い壮年地形を呈し、流域の中央を県道が縦断するほかは、大部分が森林で構成されている典型的な山地自然小流域である。本研究流域が位置している筑波山の北麓斜面は、鶴見・野上（1965）によると、いわゆる筑波山下部の山麓緩斜面に続く急斜面で構成されている部分に該当する。流域の概要を

第1表に示す。

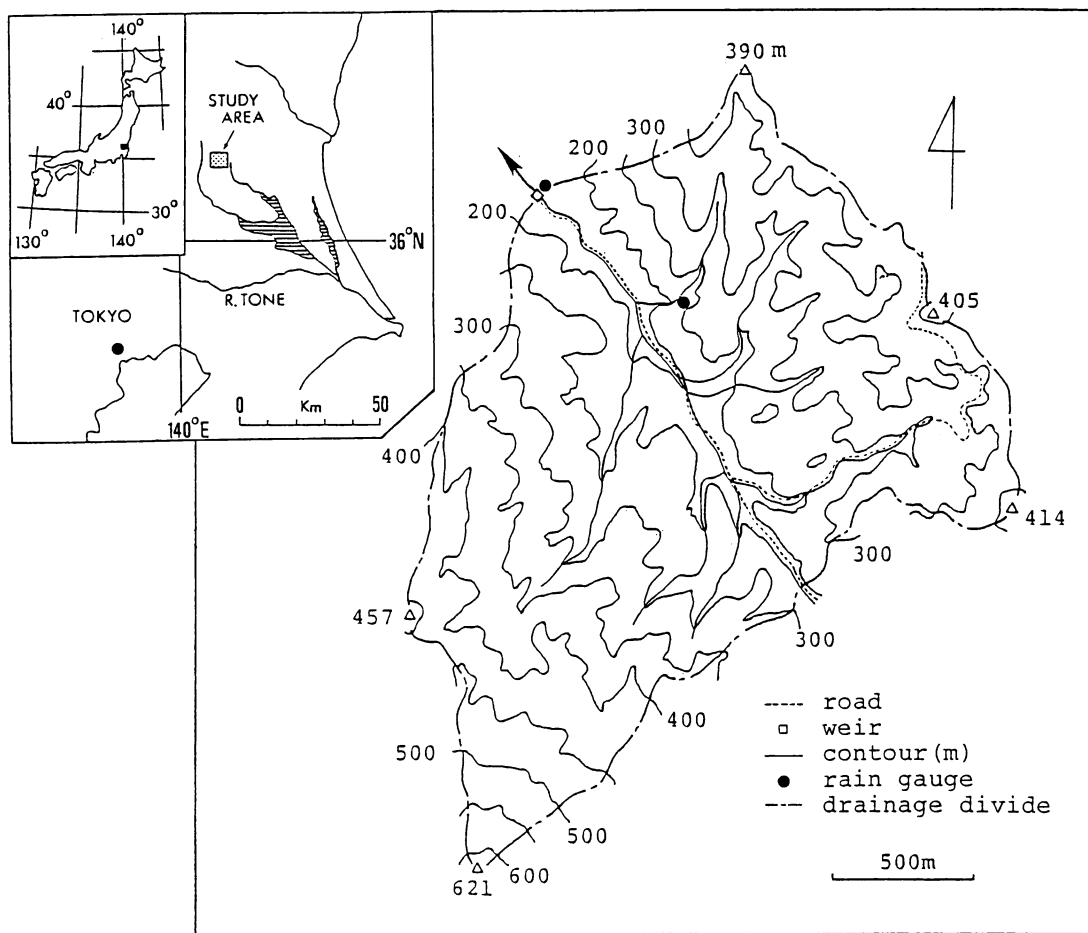
流域斜面は主として花崗岩から成り、その上を風化岩屑と関東ローム層が被覆しているため、雨水の浸透性が高い（建設省土木研究所、1978）。したがって、洪水流出量が比較的小さく、低水流出量が多いことが調査流域の水文学的特徴である。流域の植生はアカマツ・ヒノキを主とする国有林（林令10—80年の人工林）が流域の約6割を占め、国有林以外ではスギ・ヒノキなどで被覆されている（建設省土木研究所、1988）。

### 2) 観測方法

本研究流域での出水時の流量と浮流砂量の変化を調べるために、1989年1月から9月にかけて総計16回の観測を行った（第2表）。山口川流域における観測期間中の日降雨量と日流量の時系列的変化を第2図に示す。

流量は、調査流域の下流部に設置されている四角堰での観測データを使用した。堰にはデジタル水位計が2台、アナログ水位計が1台設置されており、高精度の流量データが継続的に観測されている。一方、浮流砂濃度を求めるために1ℓポリビンを用いて降雨開始前あるいは直後から試水を堰の出口の所で採取した。採水した試料は実験室に持ち帰り、沈澱させた後に炉乾燥し、重量法に基づいて浮流砂濃度を算出した。採水は基本的に15分毎に行った。

\*筑波大学・院・地球科学研究科



第1図 研究流域図

第1表 研究流域の概要

Size of the catchment area	3.12km <sup>2</sup>
Maximum altitude	621m
Minimum altitude	135m
Mean altitude	325m
Basin shape factor	0.41
Main channel gradient	0.18
Mean slope degree	22.9°
Mean annual temperature	14.1°C
Mean annual precipitation	1450mm

降水量は流域内に設置されている2台の転倒マス型雨量計を利用した。本流域で観測された1989年度の1年間の降雨量は約1,891mmであり、年平均降水量(昭和45—52年平均)より約440mm多い値となっている。なお、1989年の年流出率は57.8%であった。第2図中の矢印は観測した出水を表す。

### III 観測結果

#### 1) 流量と浮流砂量の関係

観測期間中の流量と浮流砂濃度との関係を第3図に示す。浮流砂濃度と流量の積で浮流砂量を求めると、第4図になる。第4図は増水時(黒丸)と

第2表 観測期間中の水文特性

1989年

No.	Event	T. R. (mm)	Max R. I. (mm/30min)	Rain Input (t)	Output		T. H. (hr)	D. R. (%)
					$\Sigma Q$ (t)	$\Sigma Q_s$ (kg)		
1	Jan. 8	9.0	1.5	28,080	5,836	108	18.0	20.8
2	Jan. 23	31.5	3.5	98,280	13,586	765	25.0	15.3
3	Feb. 17	32.0	3.0	99,840	14,758	283	33.0	14.8
4	Apr. 8	51.5	5.0	160,680	29,671	3,486	47.0	18.5
5	Apr. 15	31.0	4.0	96,720	13,004	766	26.5	13.4
6	May 7	11.5	1.5	35,880	7,346	178	19.0	20.5
7	May 19	8.0	2.5	24,960	4,780	105	12.0	19.2
8	June 16	89.0	8.5	227,680	37,412	11,675	44.5	13.5
9	June 23	60.0	3.5	187,200	38,764	2,661	62.0	20.7
10	June 28	31.5	3.5	98,280	19,332	908	28.0	19.7
11	July 13	30.5	3.5	95,160	19,834	796	38.5	20.8
12	July 16	36.0	6.0	112,320	21,326	1,912	37.5	18.9
13	Aug. 6	150.0	12.5	468,000	108,215	43,222	69.0	23.1
14	Aug. 27	89.5	16.0	279,240	39,953	20,922	31.0	14.3
15	Sep. 20	65.5	27.0	204,360	35,186	25,366	33.0	17.2
16	Sep. 22	15.5	4.5	48,360	10,061	465	11.5	20.8

T. R. ; Total Rainfall

R. I. ; Rainfall Intensity

 $\Sigma Q$  ; Total water discharge $\Sigma Q_s$  ; Total suspended sediment discharge

T. H. ; Total Hour

D. R. ; Discharge Ratio

減水時（白丸）に分けられているが、同一流量に対して増水時の浮流砂量が減水時のそれより多い。このことは、浮流砂濃度のヒステリシス現象をそのまま反映した結果であると考えられる。これらの増水・減水位別の浮流砂量を回帰線で表すと第5図になる。Aはすべてのデータを、Rは増水時、Fは減水時のデータを意味する。各々の相関係数を見ると、Aが0.949、Rが0.950、Fが0.961となり、いずれも高い相関を見せている（第3表）。浮流砂量（ $Q_s$ ）と流量（ $Q$ ）との関係は経験的に  $Q_s = kQ^n$  という関係が成立するが（ $k, n$  ; 常数）、本研究流域における  $n$  の値（ $n=2.76$ ）は、長沢ら（1986）が整理した他の河川の  $n$ （例えば、斐伊川；1.92、十勝川；1.53—2.34、多摩川；2.5）と比べて大きい。  $n$  の値が大きい理由は、本流域が河床勾配が急な山地流域である為であると考えられる。

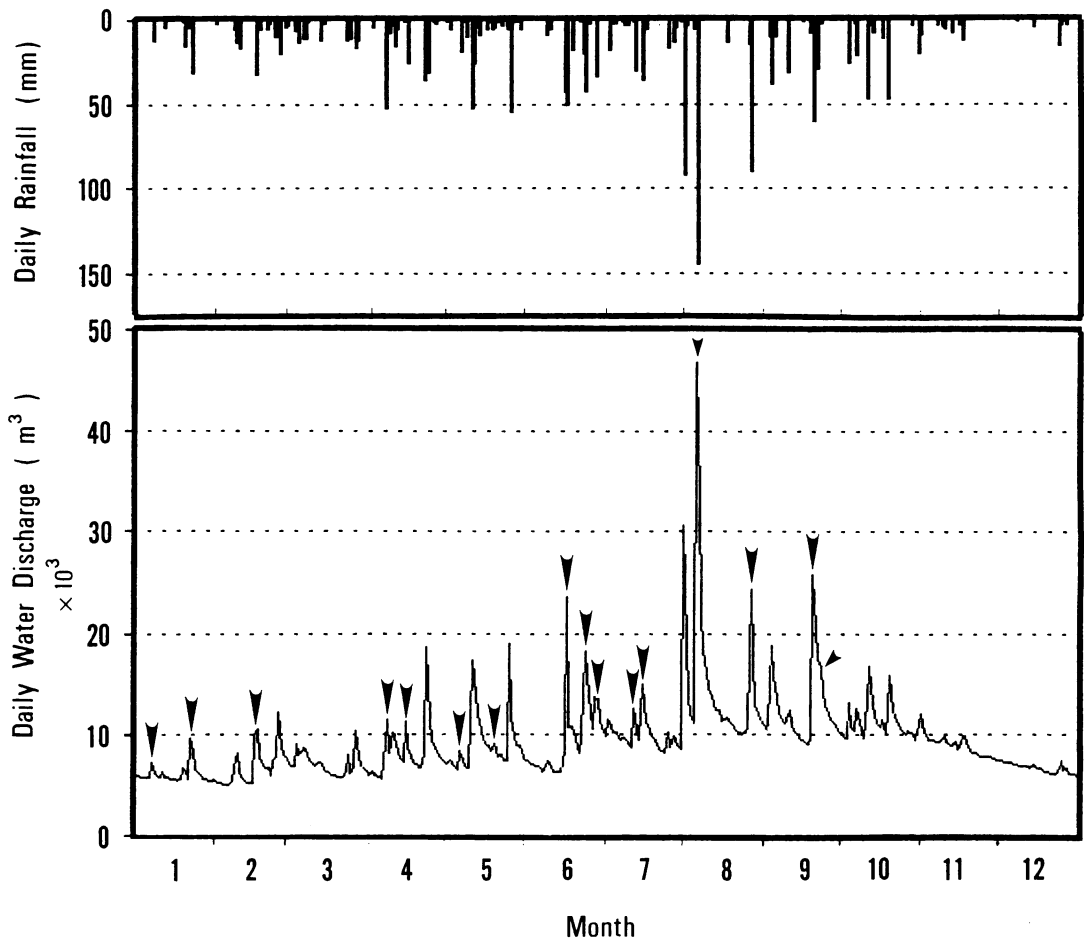
出水別の流量と浮流砂量の関係を第6図に示す。

これらの図を見ると、上記のヒステリシス現象が現れており、大雨による出水であるほど同一流量時の増水時と減水時の浮流砂量には差が大きくなることがわかる。

一出水中における流量変化に伴う浮流砂量の変化も重要であるが、出水を一つの単位とした出水毎の比較も興味深い。そこで、観測した出水別に流出量（X軸）と浮流砂流出量（Y軸）との関係をプロットした（第7図）。この図から、各々の出水時に存在する降雨パターンの個別性を考慮しなくても、流出量と浮流砂流出量の両者には良い相関が見られることがわかる（ $R^2=0.87$ ）。

## 2) 降雨量と浮流砂量との関係

第8図は、出水別の浮流砂流出量と総降雨量の関係をプロットしたものである。X軸は出水ごとの総降雨量を、Y軸は浮流砂流出量を表す。これらの両者にも相関の良い関係が認められる（ $R^2=0.89$ ）。こ



第2図 研究流域における観測期間（1989年）中の日降雨量と日流量の変化

のことを第7図の結果と合わせて考えて見ると、出水に伴う浮流砂の流出には、ある一定の規則性が存在していると推測される。これらの関係をまとめたのが第9図である。X軸は流域全体に入力された面積雨量を、Y軸は流出量と浮流砂流出量を示す。流出量の回帰線の傾き（0.96）は浮流砂流出量の傾き（2.16）より小さい。このことから、面積雨量が多くなるほど流出量に比べ、浮流砂流出量は急増すると言えよう。

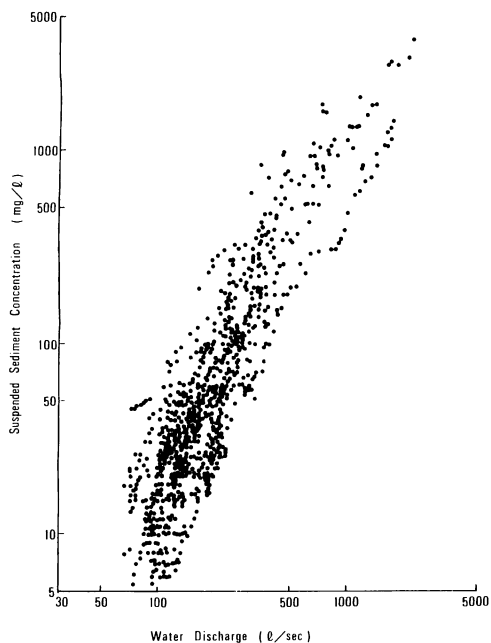
#### IV 考 察

##### 1) 年浮流砂流出量

筑波山の山口川流域における浮流砂の流出量は、1989年1月から9月まで観測した総計16回のイベントだけで約114tonに達する。出水に伴う浮流砂の流出量は第9図に示したように、次の回帰式で表される。

$$Y = (2.0 \times 10^{-8}) X^{2.16} \quad (R^2 = 0.88) \quad (1)$$

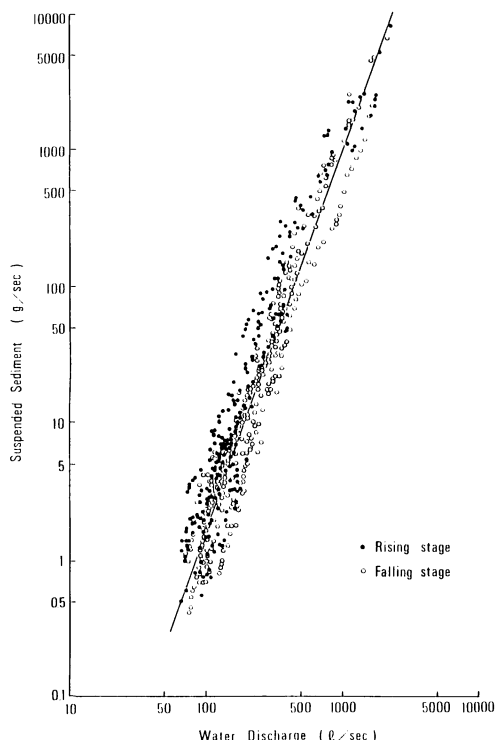
ここで、Xは全流域に入力された面積雨量（ $m^3$ ）、Yは浮流砂流出量（kg）。この回帰式を使って観測が出



第3図 流量と浮流砂濃度との関係

来なかった出水時の浮流砂の流出量を計算すると、約40ton になり、出水による1989年の1年間の浮流砂流出量は合計154ton となる。無降雨時にも低濃度（2-3 mg/l）ではあるが浮流砂の流出があるものと考えられる。しかし、無降雨時に流出した年間の浮流砂流出量は約5 ton 内外の小さい値であると推測される為、本稿では出水時の浮流砂の流出量のみをもって議論することにする。

1989年度の総降雨量1,891mm 中、観測された降雨量が742mm であり、年降雨量の約40%に当たる出水が観測されたことになるが(第2図)、観測期間中の浮流砂流出量は年浮流砂流出量に対して約74%にもよる。その理由として、観測された降雨データの中に、総降雨量や降雨強度の大きい出水が含まれていることが考えられる。一例として、8月の降雨量は年降雨量の19.3%、流量の年流出比は14.2%に過ぎないが、浮流砂の年流出比は約50%である(第4表)。また、年降雨量に対する月別の降水量の百分比に注目して見ると、例えば、5月の11.4%に比べ、9月は10.2%という低い値になるが、浮流砂流出量



第4図 流量と浮流砂量との関係

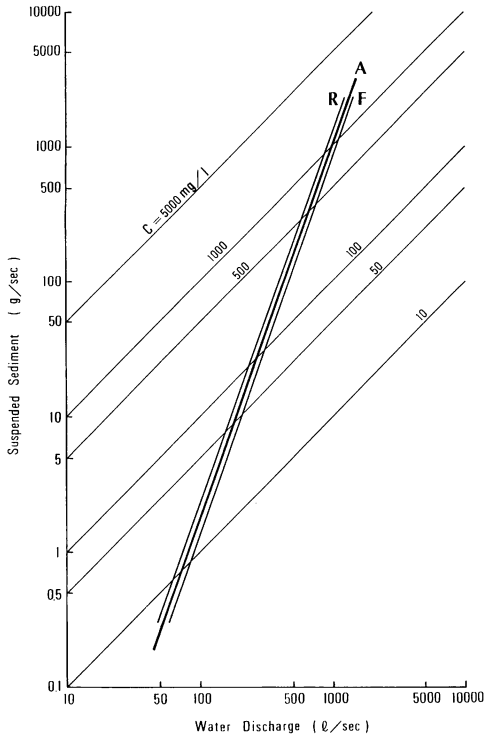
は逆に9月の方が5月の浮流砂流出量より13%も多い。このことから、浮流砂流出には総降雨量より雨の降り方、つまり降雨強度が重要であることが考えられる。なお、6月、8月、9月の3ヶ月の浮流砂流出比は合計79%に達しており、梅雨と台風などの大雨の出水時の浮流砂流出は、年間浮流砂流出量に対して大きな比重を示していることを示唆する。

## 2) 浮流砂及び掃流砂の流出量

山地では基盤岩石の風化、土壌の侵食など様々なメカニズムによって侵食が行われている。侵食産物は斜面プロセスや河道プロセスなどを通じて流域外へ流出される。流水による侵食率の指標としては浮流砂量が重要な要素になる。本稿では侵食を発生させるメカニズムやプロセスより、浮流砂量から見た侵食量について主に考察する。

本研究流域の比浮流砂量を計算して見ると、約50 t/km<sup>2</sup>/y となる。これを年間の侵食率に換算すると

第3表 流量と浮流砂量との回帰式



第5図 流量と浮流砂量との回帰線 (凡例は第3表と同一)

約0.05mm/yに相当するが、一般に比浮流砂量という定義が流域全体の侵食率を意味することから、浮流砂の供給源を考慮する時、流域の面的侵食率である0.05mm/yという値はあまり意味がないと思われる。その理由として、浮流砂の供給が流域全体の面的侵食による結果であるとは考えられない為である。言い替えると、本研究流域における出水時の浮流砂の供給源は、観察による定性的な議論ではあるが、主に河道とその周辺の植生のない所や急斜面に存在する林道であると推定されるからである。本研究流域の斜面には大部分が厚さ10cm内外のhumusで覆われており、また、canopyの密度が高いことから降雨時の雨滴による斜面侵食は考えにくい。したがって、本研究流域における浮流砂流出量である154tonは大雨の時に供給源として考えられる林道を除けば、主に河道とその周辺の侵食によって流出

(A) All data

$$\text{Log S. S.} = 2.76 \text{Log} Q - 5.28$$

N = 994

r = 0.949

r<sup>2</sup> = 0.901

(R) Rising stage data

$$\text{Log S. S.} = 2.74 \text{Log} Q - 5.12$$

N = 366

r = 0.950

r<sup>2</sup> = 0.903

(F) Falling stage data

$$\text{Log S. S.} = 2.79 \text{Log} Q - 5.44$$

N = 628

r = 0.961

r<sup>2</sup> = 0.923

S. S. = Instantaneous suspended sediment (g/sec)

Q = Instantaneous discharge (l/sec)

N = Number of observations

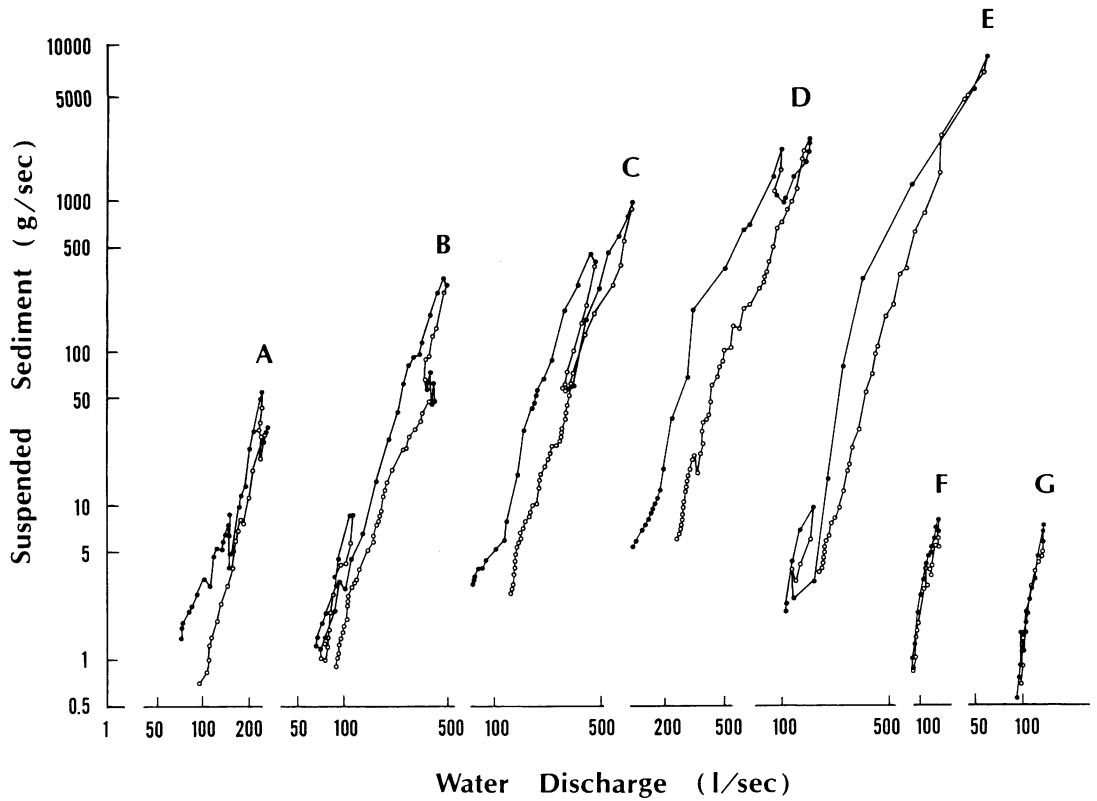
されている可能性が高い。

一方、出水時に流出される浮流砂量の収支変化について考える。上流から下流に行くほど浮流砂量は多くなると思われることから、河川次数の増加に伴う浮流砂量の増加パターンを考えることにする。水系網の階級区分においては、Strahler方式を利用した。河川次数の増え方は、それを増やすのに必要な最小限のことを用いる。いま、1次河川の流量を $Q_1$ 、浮流砂濃度を $C_{b1}$ とすると、浮流砂量は流量と浮流砂濃度との積であることから、1次河川における浮流砂量( $Q_{s1}$ )は次のようになる。

$$Q_{s1} = Q_1 C_{b1} \quad (2)$$

一方、2次河川は二つの1次河川によって構成されることから、2次河川の浮流砂量を単純に考えれば $2Q_{s1}$ となる。しかし、2次河川の末端部を通過する時の浮流砂量は、二倍の1次河川流量( $2Q_1$ )と2次河川に供給された地下水量( $\Delta Q_2$ )を足した2次河川の流量、

$$Q_2 = 2Q_1 + \Delta Q_2 \quad (3)$$



第6図 出水別の流量と浮流砂量との関係 (Aは1月23日, Bは4月8日, Cは6月16日, Dは8月6日, Eは9月20日, Fは5月7日, Gは5月19日の出水を各々示す。黒丸は増水時を, 白丸は減水時を表す。)

によってもたらした2次河川内の浮流砂量の増加分  $(2Q_1 + \Delta Q_2) C_{b2}$  を考慮しなければならない。従って、2次河川における浮流砂流出量は、

$$Q_{S2} = 2Q_{S1} + (2Q_1 + \Delta Q_2) C_{b2} \quad (4)$$

となる。ここで、 $C_{b2}$  : 2次河川内で発生した浮流砂濃度。以上のことから3次河川、4次河川、5次河川における浮流砂流出量は各々、

$$Q_{S3} = 4Q_{S1} + 2(2Q_1 + \Delta Q_2) C_{b2} + (4Q_1 + \Delta Q_3) C_{b3} \quad (5)$$

$$Q_{S4} = 8Q_{S1} + 4(2Q_1 + \Delta Q_2) C_{b2} + 2(4Q_1 + \Delta Q_3) C_{b3} + (8Q_1 + \Delta Q_4) C_{b4} \quad (6)$$

$$Q_{S5} = 16Q_{S1} + 8(2Q_1 + \Delta Q_2) C_{b2} + 4(4Q_1 + \Delta Q_3) C_{b3} + 2(8Q_1 + \Delta Q_4) C_{b4} +$$

$$(16Q_1 + \Delta Q_5) C_{b5} \quad (7)$$

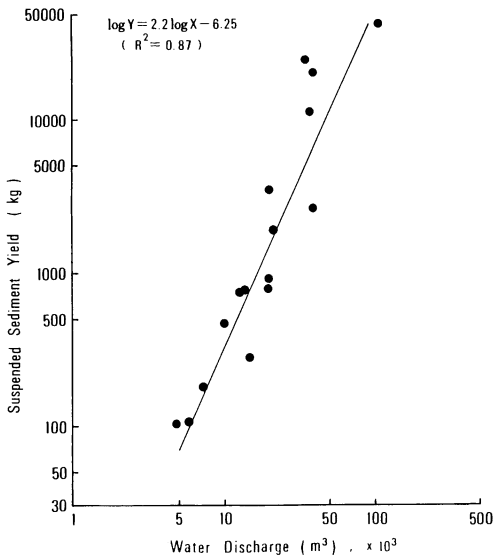
となる。一般項  $n$ 、つまり、 $n$ 次河川からの浮流砂の流出量は、

$$Q_{Sn} = 2Q_{S_{n-1}} + (2^{n-1}Q_1 + \Delta Q_n) C_{bn} \quad (8)$$

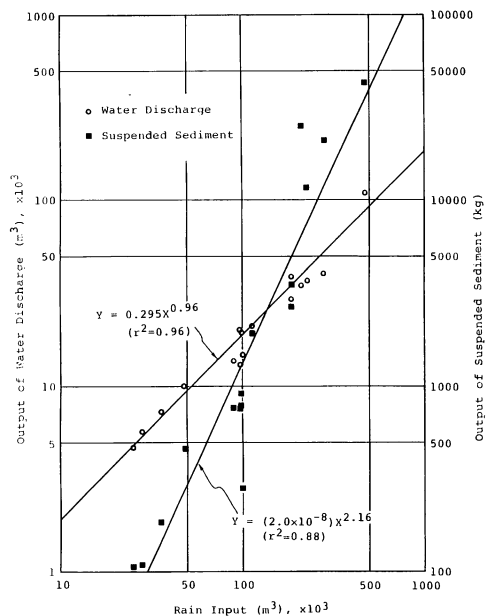
となる。ここで、 $Q_{Sn}$  :  $n$ 次河道における浮流砂流出量、 $\Delta Q_n$  :  $n$ 次河道に供給される地下水量、 $C_{bn}$  :  $n$ 次河道内で河床及び河岸侵食によって生産される浮流砂濃度。一方、第(3)式から、 $n$ 次河川における流量は、

$$Q_n = 2Q_{n-1} + \Delta Q_n \quad (9)$$

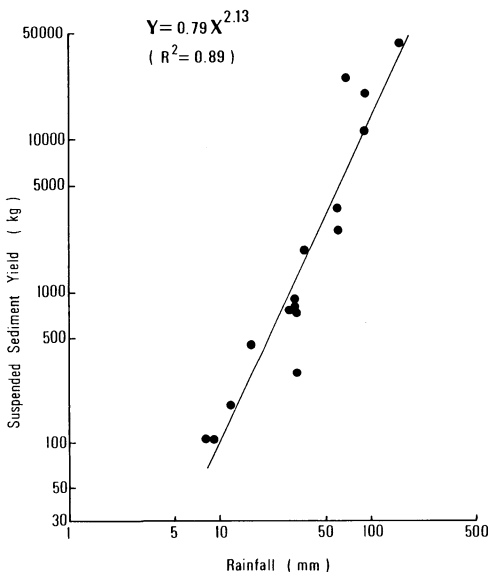
ここで、 $Q_n$  :  $n$ 次河道における流量、 $\Delta Q_n$  :  $n$ 次河道内からの地下水流出量。第(8)式から、浮流砂流出量は下流に行くほど莫大に増加することがわかる。



第7図 出水別の流出量と浮流砂流出量



第9図 面積雨量と流出量と浮流砂流出量



第8図 出水別の総降雨量と浮流砂流出量

本流域の水系を1万分の1の地形図から読み取ってその長さを調べた結果、1次支流が約21km、2次支流が7km、3次支流が6km、4次支流が2km、5次本流が0.9kmであり、流域面積に対する河道面積の比は0.64%である。そこに現地で測量された平均の河床堆積物の厚さを考慮して流域全体の河床堆積物の量を推定して見ると、約3,000tonになる。この河床堆積物にはもちろん多量の粗粒物質も存在しているため、3,000tonという量がすべて浮流砂として扱うことはできない。

一方、掃流砂量は、精密横断測量によって調査された流量観測用の四角堰上流に堆砂した平均日堆砂データから(建設省土木研究所の砂防研究室の資料、第5表)約0.8t/dayとなる。測量期間中の日堆砂量は台風などの大雨があった時期の出水によるものである為、他の時期の日堆砂量よりは多いと思われる。1989年8月から10月までの浮流砂流出量を見ても(第4表)、他の月の浮流砂流出量よりは圧倒的に多くなっている。このことから、あまり根拠はないが、0.8t/dayの半分、つまり0.4t/dayという日堆砂量を想定して年間の掃流砂流出量を計算すると、約150tonに達する。この掃流砂と浮流砂の供給源が河床堆積



第4表 1989年度山口川流域における年降雨量と年流出量, 年浮流砂流出量との関係

month	$\Sigma R$ (mm/month)	$\Sigma R/\Sigma R_t$ (%)	$\Sigma Q, \times 10^3$ (m <sup>3</sup> /month)	$\Sigma Q/\Sigma Q_t$ (%)	$\Sigma Q_s$ (t/month)	$\Sigma Q_s/\Sigma Q_{ts}$ (%)
1	67.5	3.6	187.8	5.5	1.2	0.8
2	126.0	6.6	187.0	5.5	1.5	1.0
3	114.0	6.0	219.0	6.4	1.4	0.9
4	186.0	9.8	247.4	7.3	7.3	4.7
5	215.0	11.4	286.1	8.4	9.0	5.8
6	224.0	11.9	287.2	8.4	15.7	10.2
7	138.0	7.3	307.8	9.0	3.6	2.4
8	364.5	19.3	485.4	14.2	76.9	49.9
9	193.5	10.2	379.9	11.1	29.1	18.9
10	187.0	9.9	350.2	10.3	7.6	4.9
11	45.5	2.4	265.4	7.8	0.4	0.3
12	30.0	1.6	207.7	6.1	0.3	0.2
total	1891.0	100	3410.9	100	154.0	100

$\Sigma R$  ; Monthly rainfall

$\Sigma R_t$  ; Annual rainfall

$\Sigma Q_s$  ; Monthly suspended sediment discharge

$\Sigma Q_{ts}$  ; Annual suspended sediment discharge

$\Sigma Q$  ; Monthly discharge

$\Sigma Q_t$  ; Annual discharge

第5表 1988年8月から10月までの山口川流域における掃流砂流出量 (建設省土木研究所砂防研究室の資料による。)

Sampling date	deposit duration	sediment volume	daily mean deposition
8.24	8.4 - 8.23	16.52m <sup>3</sup>	1.101m <sup>3</sup> /day
9.13	8.24- 9.12	14.86m <sup>3</sup>	0.743m <sup>3</sup> /day
10.4	9.13-10.3	13.01m <sup>3</sup>	0.624m <sup>3</sup> /day
10.28	10.4 -10.27	13.91m <sup>3</sup>	0.606m <sup>3</sup> /day
total	75 days	58.30m <sup>3</sup>	0.777m <sup>3</sup> /day

物のみによって供給されると仮定すれば, 現在の河床堆積物は今後10年間で全部流出することになる。しかも, 1次支流の河床堆積物が出水時の水流によって侵食されることは考えにくいことから, 2次支流以上, 本流までの河床侵食はより激しくなる。しかし, 本研究流域の河床には多量の堆積物が存在し, また基盤があまり露出していないことから, 掃流砂と浮流砂の供給源が河床だけになるとは考えられない。以上の土砂収支の観点から, 出水時には河床の

侵食と共に河岸の侵食が盛んに行われていることが裏付けられる。河床と河岸の侵食は結局, 流域の谷を形成し, いわゆる谷の開析地形を発達させる一つのプロセスになると考えられる。

## V おわりに

筑波山の山口川流域における浮流砂流出について, 主に浮流砂量を中心に考察した結果, 以下のことが明らかになった。

- 1) 本研究流域の流量と浮流砂量との相関は極めて高い ( $R=0.95$ )。また、降雨量が多い出水であるほど増水時と減水時の間にはヒステリシス効果が強くなり、浮流砂量のバラツキは大きくなる。なお、出水別の流出量と浮流砂流出量、そして降雨量と浮流砂流出量の間にも良い相関が認められた。
- 2) 本流域における1989年の浮流砂の流出は6月、8月、9月の3ヶ月に集中され、その流出量は年流出量のおよそ80%に及ぶ。
- 3) 浮流砂の流出に影響を与える降雨条件としては総降雨量より降雨強度が重要である。
- 4) 浮流砂の供給源が主に河道であると考えられることから、浮流砂流出による河床と河岸の侵食は、谷の開析地形を発達させる重要なプロセスであるとする。

#### 謝 辞

本研究を進めるに当たり、ご指導を頂いた筑波大学

地球科学系の高山茂美教授に深く感謝致します。また、本研究の為に、快く流域を提供して下さいった建設省土木研究所、元河川部水文研究室の吉野文雄室長、元砂防部砂防研究室の水山高久室長（現京都大学農学部）に深く感謝致します。なお、いろいろな資料を提供して下さいった水文研究室の堀内輝亮氏にもお礼を申し上げます。

#### 文 献

- 建設省土木研究所(1978)：『裏筑波試験地水文観測資料』土木研究所資料，603p.
- 建設省土木研究所(1988)：『水文研究室の研究概要』建設省土木研究所水文研究室，22p.
- 鶴見英策・野上道男(1965)：筑波山・加波山周辺の山麓緩斜面．地理評，38—8，42—46.
- 長沢徹明・片岡隆四・梅田安治・桜田純司(1986)：濁度計による河川浮流土砂量の推定．農土論集，125，81—87.