

山地河道の変動と砂礫の流出に関する研究

Variation on stream channel and sediment transport in mountain region

京都大学防災研究所	正員	沢	田	豊	明
"	正員	青	田	和	男
"	正員	高	橋		保

1. ま え が き

河川における土砂輸送および河道の安定などの問題を解明しようとする際、常に未知の量として残るのが河川上流部から流出する土砂量である。山地流域における土砂流出は、山腹斜面からの土砂生産、河道における輸送および貯留からなる時間的・空間的システムであって、土砂流出現象をどのような時間的・空間的スケールでみるかによって、そのとりあつかい方は非常に異なる。ここでは、土砂流出を山地河道における輸送および貯留に限定し、一洪水による河道の変動と砂礫の流出に関して検討を行っている。

山地河道の形態は非常に複雑で、しかもその変動が激しいために、流量が予測されても、従来の流砂量式を用いて流砂現象を予測することは困難である。本文では、現地観測^{1)~18)}によって得られた山地河道の特性と流砂の実態に基づいて、従来の流砂量式の山地河道への適用に関して考察を行っている。

2. 山 地 河 道 の 形 態

山地河道は勾配が急であること、土砂生産源が近いこと、土砂礫の粒径が広い範囲におよんでいることなどから非常に複雑な形態を示している。このような河道形態の領域区分については、従来より多くの見解¹⁴⁾が発表されているが、流量と河道勾配を用いた経験式、無次元パラメーターによる区分など、いずれの場合も河道形状（局所的な河床勾配など）、水深（主流部）、砂礫の代表粒径、流砂量などの諸量をどのように評価するかという点に問題を残している。ここでは、以上のような観点から河道の縦断形状について、若干の検討を行ってみよう。河川の縦断形状については、例えば地形学分野においては、マクロな二次曲線で表現されている。一方、砂礫の輸送場として河道をみた場合、河道縦断の局所的形状である階段状のシュート・プールが重要な役割をはたしている¹⁸⁾。このシュート・プールは、砂州や砂堆によって形成されるものと、巨礫の堆積によって形成されるものに大別される。なお、このようなシュート・プールは堆積を伴わないで侵食のみの場合でも形成されるが、ここでは対象から除いている。シュート・プールの間隔は、前者では砂州や砂堆の規模にほぼ一致しており、後者では小規模なものは礫の数倍程度の規模で形成されている。図1は巨礫の堆積によって形成されたシュート・プールの縦断形の一例である。河床平均勾配は20 m以上の区間では約 $\frac{1}{10}$ であるのに対して、10 m程度の区間では約 $\frac{1}{20}$ 以下に減少している。さらに、2~3 mの区間における平均勾配は河床礫の影響を受けて凹凸が著しく、流れの状態を大きく支配している。また、このような凹凸は細粒の砂礫を一時的に捕捉する効果を有している。

このような河道の縦断形状は巨礫を含む混合砂礫床に発達するアーマコートの礫の露出高の分布に支配され、その分布の一例は図2に示すとおりである。一方、アーマコートが形成されていない堆積物の粒径について、直径20 cm以上のものを無作為にとり出し、図3に示すように隣接する

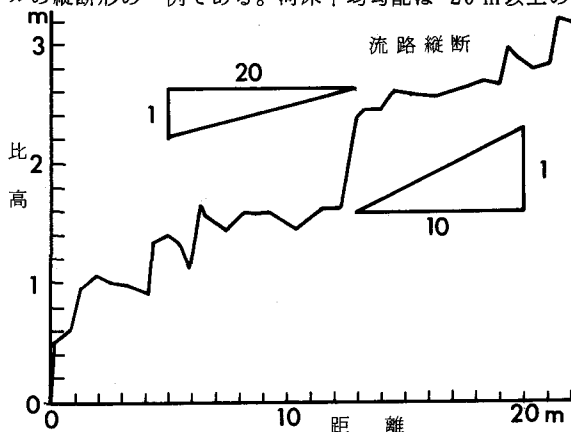


図-1 河道の局所的縦断形状

礫からの露出高 H の分布を調べると、図-2に示すようになる。この図から明らかなように、両者の露出高 H の分布が良く一致しており、対象とした河床から直径20 cm程度の礫が流出してアーマコートが形成されたことが分かる。

ついで、さらに規模の大きな砂堆や砂州に支配される河道の縦断形状について検討してみよう。図-4は足洗谷本川の河道縦断形状の変化の一例を示したものである。図に示された測定区間の上下流端に砂防ダムが設けられており、とくに下流端の河床高はダムの水通しの高さに支配されている。河道の大きな変動は、土石流によるもので、1975年7月13日および1976年6月11日の土石流の発生に伴って大きく河床が低下している。河床低下の状態は測線番号9の地点を中心として上・下流が大きく変動している。とくに、上流側のダム直下流では、約4 mの河床低下が認められる。下流端は砂防ダムによって低下が止められているが、下流ダムと中間点の間で大きく変動しており、下流ダムと中間点に節を有するスケールの大きな波状の変動を示している。

一方、各時点における縦断形状の特徴として、前者の $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{1}{4}$ のスケールで波状の変動が発生しているのが認められる。前者に比較して規模の小さな変動は土石流発生後の中・小洪水によって形成されたものと考えられる。

図-5は河道形態の平面形状の一例を示している。これは図-4に示す区間の平面形状である。この谷の横断形状は模式的に図-5のようになっており、Aは土石流の流路範囲、Bは洪水時の流路範囲、Cは平水時の流路範囲を示している。Aの流路はこの区間で約1波長の蛇行を示すのに対し、Cの流路では約10波長の蛇行が認められる。

一方、レジーム論で説明される流路幅 B と流量 Q の関係は、この河道において、 $B = 3.5 Q^{\frac{1}{3}}$ となっている。また、流路幅 B と蛇行半波長 L との間には、 $L = 5 B$ 、の関係が認められる。したがって、これらの関係から、Aの流路について、 $B = 40$ m、 $L = 200$ m、Cの流路について、 $B = 4$ m、 $L = 20$ mとなっており、それぞれの流量 Q を求めると、Aは約 $130 \text{ m}^3/\text{s}$ 、Cは約 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。これらの値は土石流の流量および平水時の流量の規模に近いことから、このような河道形状に関して流量が支配的な役割を演じていることが理解される。

3. 山地河道の変動

山地河道は河床勾配が急であるために土石流などの流動・堆積域となることが多く、土石流の発生によって河道の形態が一変する。山地河道の実態を明らかにするために、調査観測を行っている足洗谷は土石流の発生が非常に多い溪流であって、流路変動が著しいことが特徴となっている。図-6は1974年から1977年までの流路変動の状態を示したものである。土石流の発生は1972年7月、1975年7月、1976年6月および1977年8月に発生している。足洗谷はU字型の断面を有しており、図-6に示される河道は垂直に近

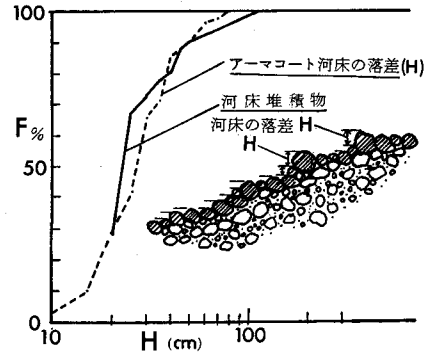


図-2 アーマコート河床の落差と河床礫の露出高



図-3 礫の露出高(H)の測定

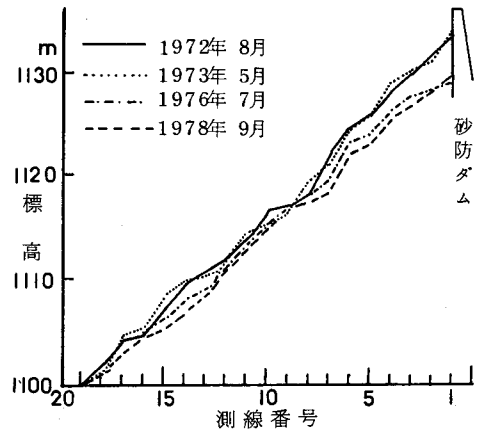


図-4 河道の縦断形状とその変動

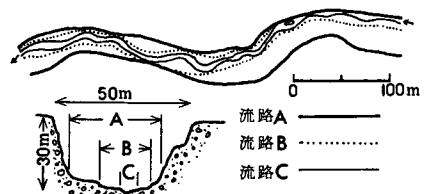


図-5 河道の平面形状

い溪岸で固定されており、通常の洪水における流路はその範囲内で変動している。図中の数字は測線番号を示し、実線で示す測線が消えている部分は最大痕跡の範囲を表わしており、それを破線で結び最大流量発生時の流路を示している。黒く塗った部分は平水時の流路を示している。土石流による流路変動は大きく、土石流発生前の流路がほとんどなくなっているのが、図-6の(3)と(4)および(6)と(7)を比較することによって知ることができる。土石流の後に発生する洪水によって新しく流路が形成されるが、その位置は元の流路にほぼ一致していることが分かる。しかし、細部について流路の形状をみると、蛇行波長や振幅に相異が認められるが、これは土砂流出の形態や流量の規模に支配されるものと考ええる。このような流路の変動と砂礫の流出に関する実態を明らかにするために、テレビカメラによる自然流路の連続録画を行うとともに、下流に設けられたコンクリート製水路においても移動礫の連続録画が実施されている。コンクリート水路を移動する礫は、直径が水深以上のものであれば、録画から個数を読みとることができる。

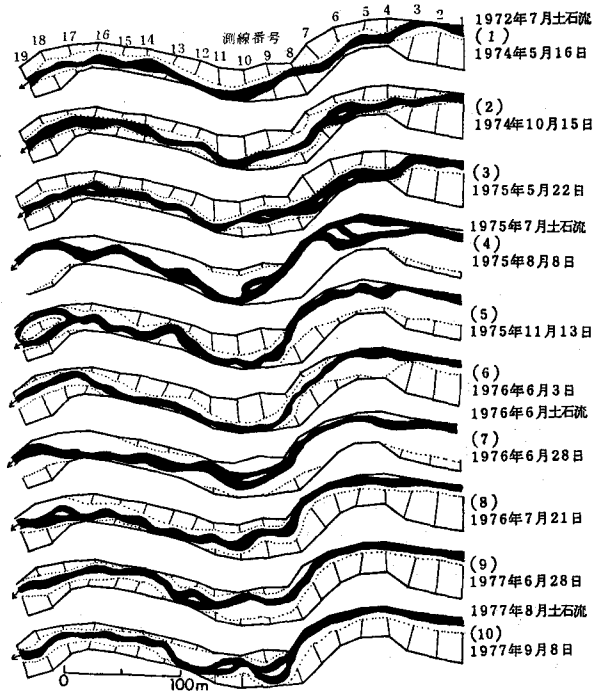


図-6 足洗谷の流路変動

流路変動の実態は図-7に示すとおりで、図中の実線は水面幅を表している。また、図中のA-B、C-D、A-CおよびB-Dの距離は10mとなっている。

観測結果は次のように要約される。

- (1) 流量の増加によって水面幅が拡大しても河床変動がなければ、主流路の位置は変化しない〔図中の(1)(2)(3), (10)(11)(12)〕。ただし、主流路はVTRの映像から周囲に比較して流速の早いことによって判定した。
- (2) 主流路の変化は砂礫堆の形成による場合〔図中の(4)(5)〕と砂礫堆の侵食による場合〔(7)(8)(9)〕が認められる。
- (3) 蛇行波長の変化は小さいが振幅の変化は比較的大きい〔(1), (10), (18)〕。
- (4) 洪水後に生ずる平水時の流路は洪水時の主流路にほぼ一致している〔(9)(10), (16)(17)(18)〕。
- (5) 流砂量の多い時、河床は比較的平坦になっている〔(2), (4), (13), (14)〕。
- (6) 主流部に沿って階段状のシュート・プールが形成されやすい〔(3), (4), (5), (6), (12)〕。
- (7) 流量が減少するとシュート・プールの個数が多くなる〔(5)(6), (7)(8), (16)(17)〕。
- (8) 巨礫の堆積部に砂礫が堆積しやすい〔(5), (14)〕。
- (9) 流量が多いとき主流路は直線的になる〔(14)〕。
- (10) レジーム論で説明される流量 Q と河幅 B の関係、 $B = aQ^{\frac{1}{3}}$ が図8のように認められる。ただし、河幅を水面幅としたとき $a = 3.5$ 、主流幅としたとき $a = 1.2$ となる。

さらに、流路形態と流砂の関連についてはつぎのような場合がある。

- (I) アーマコートの破壊や局所的な溪岸侵食は生じていないが、砂礫の移動がある。
- (II) アーマコートが破壊され、河床砂礫が移動する。
- (III) 溪岸侵食によって砂礫が移動する。
- (IV) 流路変動によって新しい河床の砂礫が移動する。

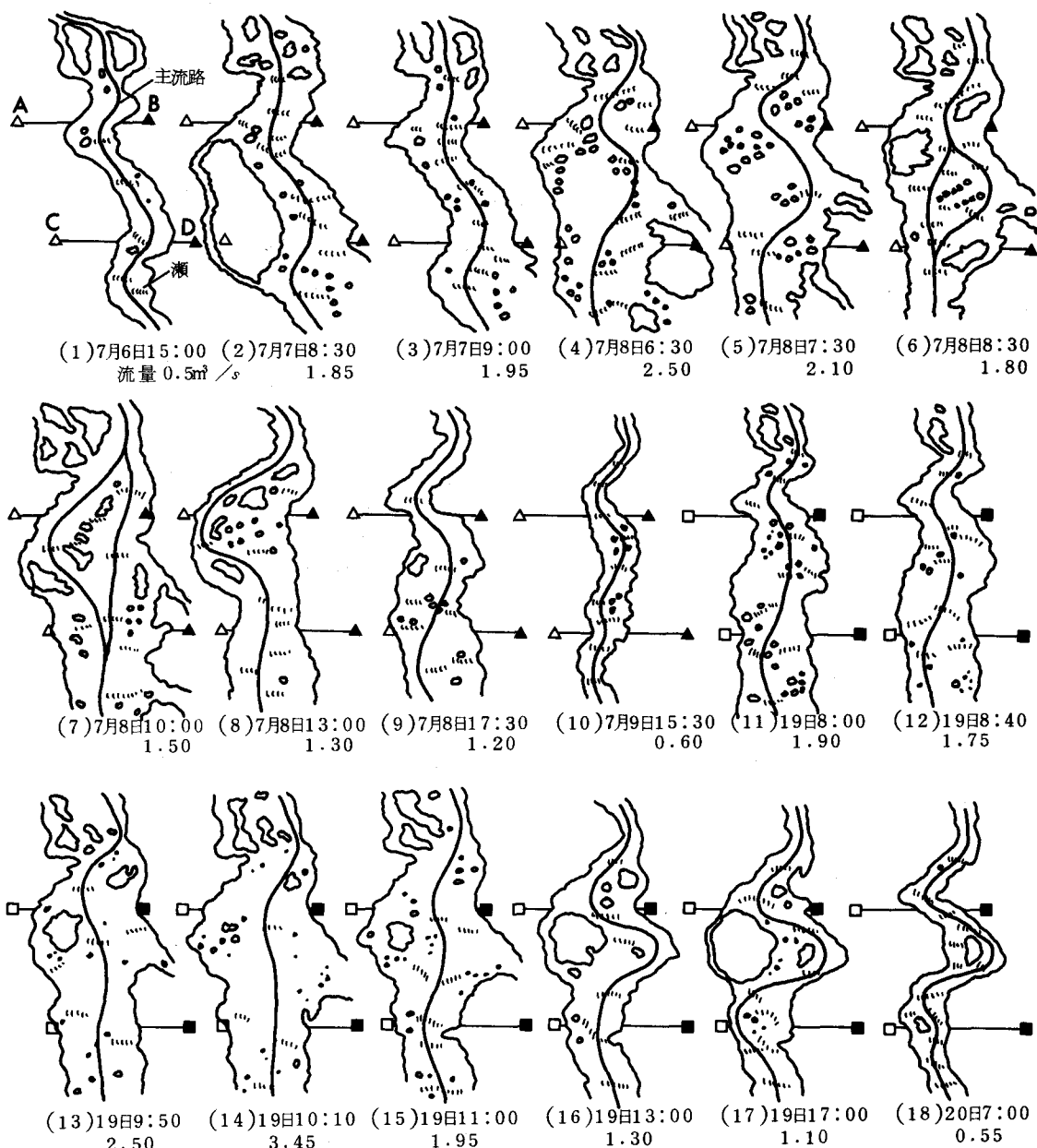


図-7 洪水時の流路変動

以上のような流路形態と流砂機構は流量の変動や上流からの流砂によって、図-9に示すように変化するものとする。

4. 山地河道における砂礫の流出

流路変動が著しい山地河道において、流砂量を予測することは非常に困難である。とくに、砂礫の移動現象を議論するためには、河道の局所的形状を考慮した河床勾配、河床砂礫の粒径、流量、主流路幅、水深、および上流からの流砂に関する資料が必要である。しかし、自然流路において、これらの資料を得ることは困難であるが、現在得られている資料の範囲で従来の流砂量式の実河川への適用性を検討してみよう。

流砂に関する観測および調査は次のとおりである。流量はコンクリート製水路（幅5m、長さ15m、深さ

0.8 m)において、水深と流速が連続して測定されており、これらの値から求められている。流砂量はコンクリート水路において水深以上の粒径については、VTRの録画からその個数を測定することによって測定されている。河床勾配は図1に示すように、通常の洪水では階段状のシュート・プールの影響を受けており、 $I = 0.05$ で一定と考える。河床堆積物および河床のアーマコートの粒径分布については、図-10に示すような値が得られている。

そこで、以上のような観測調査結果について、芦田・高橋・水山¹⁵⁾による急勾配水路を対象とした研究成果に基づいて、流砂現象の検討を行ってみよう。

観測された流砂量 q_b は、粒径が10cm以上のもので、それらの粒径分布は図-10のように表わすことができる。この図において、 $f_a(d)$ は河床のアーマコート、 $f_d(d)$ は河床堆積物、 $f_b(d)$ は流砂の粒径分布を示している。なお、 $f_b(d)$ は最大粒径の他は測定されていないので、ここでは河床堆積物 $f_d(d)$ の db_{max} 以下と同様の粒径分布を有するものと仮定する。

全掃流砂量 Q_b に対する観測によって求められた流砂の割合 F_1 は、

$$F(db_{max}) - F(db_1) = F_1 \quad (1)$$

のように表わすことができ、全流砂量 Q_b は、

$$Q_b \cdot F_1 = q_b \quad (2)$$

で表わすことができる。表-1には流砂量式によって求められた流砂量 Q_{bm} および観測値が示されている。

観測値を補正して得られた流砂量 Q_b と流出砂礫の最大粒径 db_{max} から推定される粒径分布 d_m を用いて計算された流量 Q_{bm} を比較すると、7月7日の流砂ではほぼ同様の値を示すが、その他については、計算値が非常に大きな値を示しているのが分かる。これは、計算に用いられた平均粒径 d_m がアーマコートの形成されていない河床の粒径分布 $f_d(d)$ から得られていることによるものと考えられる。つまり、7月7日には流路変動が局所的な沿岸侵食によって多量の土砂が輸送されたが〔図9のⅢかⅣ〕、その後、流路が安定してアーマコートの形成過程が進行し、7月8日に観測された流砂はほとんどアーマコートの形成の完了直前の状態にあったために〔図-9の(I)の状態〕、非常に少なくなったものと解釈される。

以上のことから、図-11に示すように流量と流砂量の関係は各洪水ごとにはほぼ一定の関係を示すものの、洪水ケースが異なると全く異なった

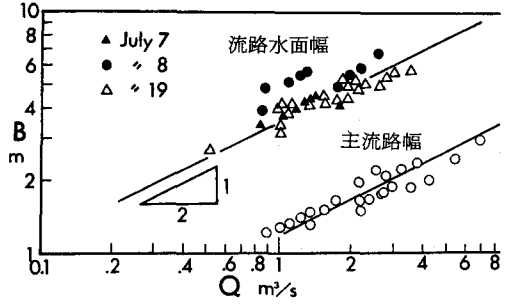


図-8 流路幅(B)と流量(Q)の関係

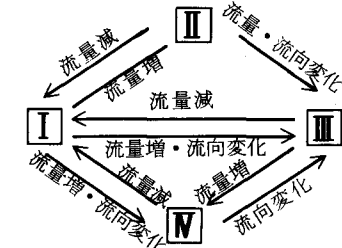


図-9 流路および流砂形態の変動過程

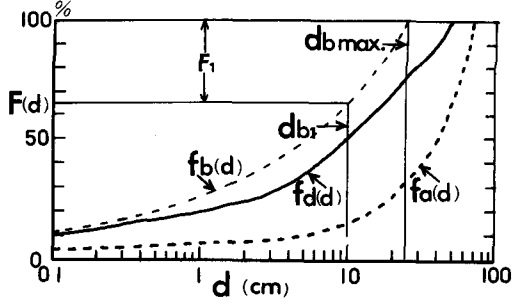


図-10 河道および流出砂礫の粒径分布

表-1 流砂量の観測結果と計算結果

	Q	db_{max}	d_m	q_b	F_1	Q_b	Q_{bm}
	m³/sec	m	m	kg/sec		kg/sec	kg/sec
7月6日 15:00	0.50	—	—	—	—	—	—
7月7日 8:30	1.85	0.3	0.11	13.0	0.40	32.5	48.1
9:00	1.90	0.3	0.11	12.0	0.40	30.0	48.1
7月8日 6:30	2.50	▲0.4	0.15	4.5	0.48	9.4	79.5
7:30	2.10	▲0.1	0.02	—	—	—	—
8:30	1.80	▲0.1	0.02	—	—	—	—
10:00	1.50	▲0.05	0.01	—	—	—	—
13:00	1.30	▲0.05	0.01	—	—	—	—
17:30	1.20	—	—	—	—	—	—
7月9日 15:30	0.60	—	—	—	—	—	—
7月19日 8:00	1.90	0.05	0.01	—	—	—	—
8:40	1.75	0.15	0.05	1.5	0.20	7.5	110.5
9:50	2.50	0.30	0.11	4.1	0.40	10.3	82.6
10:10	3.45	▲0.40	0.15	2.4	0.48	5.0	103.2
11:00	1.95	0.25	0.08	3.6	0.30	12.0	79.2
13:00	1.30	▲0.15	0.03	—	—	—	—
7月20日 7:00	0.55	—	—	—	—	—	—

(▲:数は非常に少ない)

関係になって、ほとんど従来の流砂量式に関する知識が意味をもたないように見える現象であっても、河床砂礫の粒径分布や流路の安定性の評価を適切に行うことができるならば、従来の流砂量式によっても流砂現象が予測できるようになる可能性のあることがわかる。

5. 結 語

以上、本文においては、観測結果をもとに流砂現象を予測するために必要な河道の局所的形状や河床砂礫の粒径分布をどのように評価するかという点に関して考察を行った。山地河道のように流路変動が著しいところでは河床におけるアーマコートの形成と破壊による河床表面の砂礫の粒径変化が流砂現象を大きく支配していることが明らかとなった。

一方、従来の流砂量式の適用に際して、河床表面の砂礫の粒径分布と河道の安定性をどのようにして予測するかという点が今後の大きな課題として残されている。

最後に、本研究は昭和56年度文部省科学研究費（一般研究B）「山地河道の変動と流砂機構に関する研究」の一環として行われたものであり、ここに、関係各位に謝意を表する。

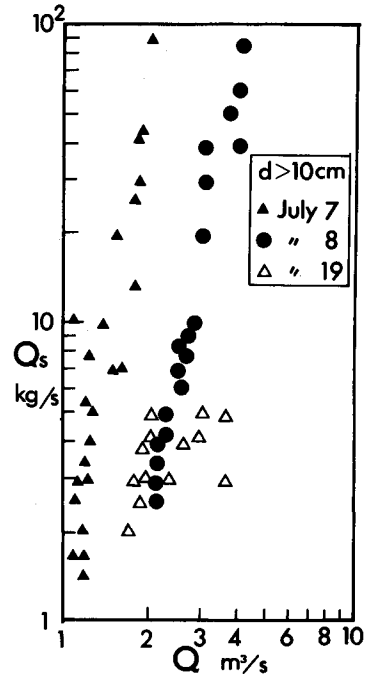


図-11 流砂量 (Q_s) と流量 (Q) の関係

考 考 文 献

- 1) 芦田和男・高橋 保・奥村武信・道上正規・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出 — 穂高砂防観測所の観測結果一，京都大学防災研究所年報第15号B，1972，pp. 349-361.
- 2) 芦田和男・高橋 保・奥村武信・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(2)，京都大学防災研究所年報第16号B，1973，pp. 401-409.
- 3)~5) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(3)~(5)，京都大学防災研究所年報第17号B，1974，pp. 547-553，18号B，1975，pp. 529-540，19号B-2，1976，pp. 345-360.
- 6) Ashida, K., Takahashi, T. and Sawada, T. : Sediment Yield and Transport on a Mountainous Small Watershed, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Vol. 26, Part 3, No. 240, 1976, pp. 119-144.
- 7)~9) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(6)~(8)，京都大学防災研究所年報第20号B-2，1977，pp. 387-403，21号B-2，1978，pp. 467-483，22号B-2，1979，pp. 301-314.
- 10) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における土砂流出の観測研究，第23回 水理講演会論文集，1979，pp. 61-69.
- 11), 12) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(9), (10)，京都大学防災研究所年報第23号B-2，1980，pp. 301-314，24号B-2，1981，pp. 223-237.
- 13) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地河道における掃流砂の流送過程，第25回 水理講演会論文集，1981，pp. 507-514.
- 14) 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文集，第210号，1973，pp. 6-13.
- 15) 芦田和男・高橋 保・水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防，107，1978，pp. 9-17.