

山地河道における掃流砂の流送過程

Bed load transport in mountain stream channels

京都大学防災研究所 正会員 ○ 沢田豊明
京都大学防災研究所 正会員 芦田和男
京都大学防災研究所 正会員 高橋 保

1. まえがき

山地流域からの土砂流出は、その過程において多種多様に自然環境を変化させ多くの問題を引き起している。そして、その問題解決のためには、流出過程を構成している生産→貯留→輸送の各段階における機構の理解が必要である。しかしながら、流出過程の一部を構成する河道における砂礫の流送過程をとってみても、流送の場である河道が生産および貯留の場にも変化すること、河道の特性が流下方向に異った分布を示していることなどから、流砂現象は非常に複雑である。著者らは、このように複雑な土砂流出の実態を明らかにするために、現地観測を多年継続して行い、土石流、掃流、浮流といった広範囲な砂礫の移動形態について、種々の新しい知見を得ている。¹⁻¹¹⁾本研究は、そのような観測研究の一環として行われたもので、土砂生産量が比較的少なく、通常の洪水によっては破壊されないプールとシュートからなるアーマーコートによって形成された河道における掃流砂の流送過程について、従来の流砂量式では十分説明できないプール内の流砂機構の重要性に着目し、プールの形状およびプール内部における水理条件を組み込んだ新しいモデルを確立しようとするものである。

2. 山地流域における土砂流出のシステムと土砂流出の形態

山地流域における土砂流出は、河床勾配が急であること、砂礫の粒径分布が広い範囲におよんでいること、砂礫の生産源が河床近くに存在するため土砂生産の特性に支配されやすいこと、および降雨出水による流量変動が大きいことなどによって、その形態が非常に複雑となっている。さらに、土砂流出システムの場の特性が場所によって異なること、また、それらの特性が履歴性を有することから、このような山地流域の土砂流出システムを明らかにするためには、土砂流出過程に関する各部分システムの内部機構の力学的・確率的とりあつかいが必要である。土砂流出システムは図-1に示すように、ある外力のもとに、土砂礫が生産される過程、流水によって砂礫が輸送される過程、輸送能力の低下による砂礫の堆積過程からなっている。河道のある地点を流送される土砂量を予測するためには、これらの部分システムの全てについて、その内部機構を確率的・力学的に解明することが必要である。

しかし、土砂礫の輸送過程における砂礫の移動に限定しても、現象は河床勾配と流量および砂礫の粒径などを含む無次元量によって種々のものが現われる。従来の研究成果^{12,13)}のもとに、これらの諸量によって、粘着力のない均一な砂礫からなる堆積層上の砂礫の各移動形態の発生領域は図-2に示すように区分される。

本文においては、このうち各個運搬の移動形態領域での土砂流送過程について、とくに、プールとシュートを形成する河道が破壊されない範囲について考察を行っている。

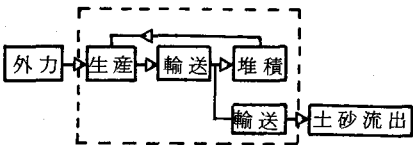


図-1 土砂流出のシステム

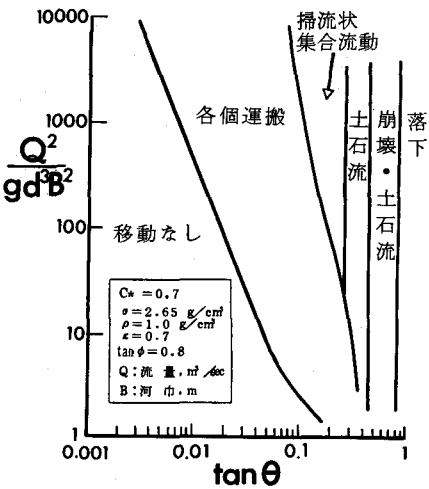


図-2 砂礫の各種移動形態の発生領域

3. 山地河道における土砂流出の実態

3-1. 流砂観測流域の概要と観測および調査

流砂の現地観測は、神通川水系蒲田川支流足洗谷流域のヒル谷（ 0.85 km^2 ）において、昭和41年より継続して行われている。ヒル谷は土砂生産量が比較的少なく、流域出口の試験ダムの堆砂量から求められた年間平均流出土砂量は約 80 m^3 である。これらの流出土砂の大半は、ヒル谷支流の崩壊地から流出したもので、平均粒径が約 0.8 cm となっている。ヒル谷流域は、図-3に示されるように、支川上流からの土砂は花崗斑岩からなっており、ヒル谷本川上流や本川の溪岸から流出する古生層や安山岩からなる砂礫と岩種によって流出経路を区別することができる。

観測装置は、図-3に示すように配置され、雨量、水位は有線で信号が送られてきている。流砂量の測定および流出土砂の採集はヒル谷本川出口で、5分から15分間毎に行われている。本川河床のプールの堆砂量の測定は洪水の前後に行われている。

3-2 河道形態と河道貯留土砂量

ヒル谷本川においては、巨礫が河床表面を構成し、それらが組合ってシュートとプールからなる階段状の河道が形成されている。図-4はヒル谷本川の河床縦断を示しているが、この図に示されている区間の平均勾配は約 $\frac{1}{5}$ となっている。しかし、プールの部分では勾配が非常に緩くなっており、河道の砂礫の輸送能力と貯留能力が、このようなプールによって支配されるものと考えられる。そこで、砂礫の貯留能力に関係すると考えられるプールの容積を、図-4に示される区間について調査した結果、その総数は約200で平均容積が約 0.19 m^3 であった。さらに、プール内の堆砂量の調査結果は、図-5に示すとおりで、出水ごとに堆砂量に変化し、堆砂量の増減が上流のプールから下流へと伝播しているようである。なお、常に堆砂量の多い区間が認められるが、それはプールの規模が大きいために常に侵食されずに砂礫が残っているためであろう。

3-3 流砂の実態

ヒル谷出口において観測される土砂流出の主な特性として、流量と流砂量の関係が出水ごとに大きく異なること、および流量が多くなると流砂が発生しない場合があることなどが上げられる。図-6は、流量と流砂量の関係を出水ごとに比較したもので、一連の出水においては、比較的一定の関係が認められ、流量の変動に対して流砂量の変動量が非常に大きいことが特徴である。

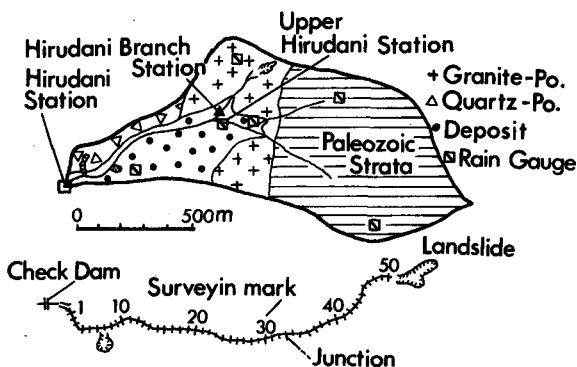


図-3 ヒル谷流河の概要

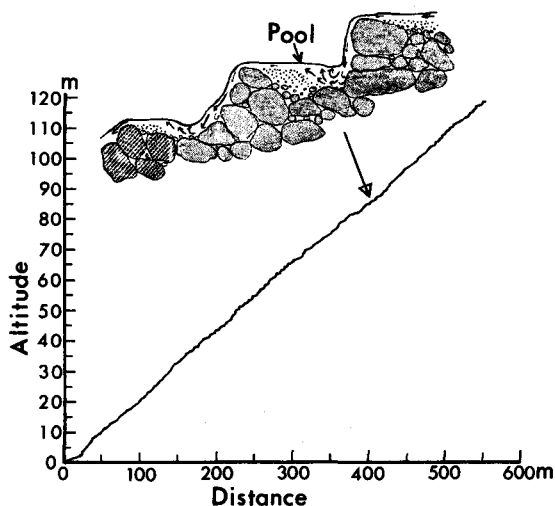


図-4 ヒル谷本川河床縦断とプールの形状

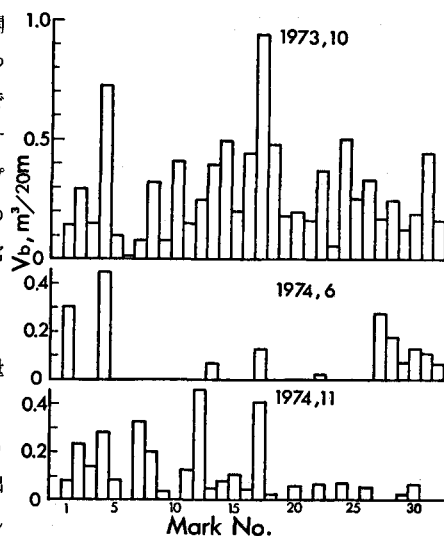


図-5 プールの堆砂量の変化

さらに、流量と流砂量の関係で流砂量が最も多い傾向を示すのが1979年6月30日の出水で、逆に流砂量が最も少ない傾向を示すのが1978年6月25日の出水であった。この原因の一つとして前述した河床堆砂量の影響が考えられるが、流出砂礫の平均粒径を比較したところ、前者が約2mm、後者が約5mmと粒度の違いも影響していると考えられる。

以上のような流量と流砂量の関係を時間的に表わした一例が図-7である。この図からも明らかなように、7月5日の出水において、濁りのような微細な成分を除いた砂礫の流出は流量の立上りから約10時間も遅れている。しかし、その後の7月7日の出水では、流量変動に対する流砂量の変動の遅れは、ほとんど認められない。また、7月6日の出水において、流量がほぼ一定であるにもかかわらず流砂量が、比較的規則的な周期で変動している。

このような土砂流出現象が生ずる原因として、前に述べたような河道のプールにおける堆砂量や河道に沿って分布するプールの特性が支配的な役割をはたしているものと考えられる。

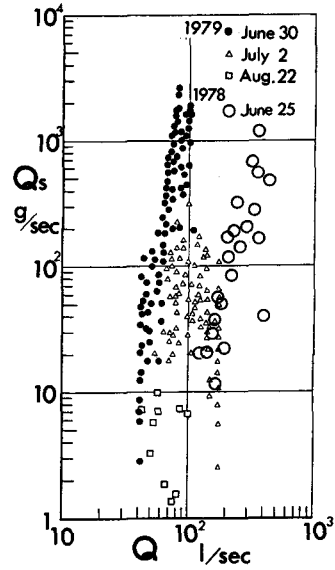


図-6 流量と流砂量の関係

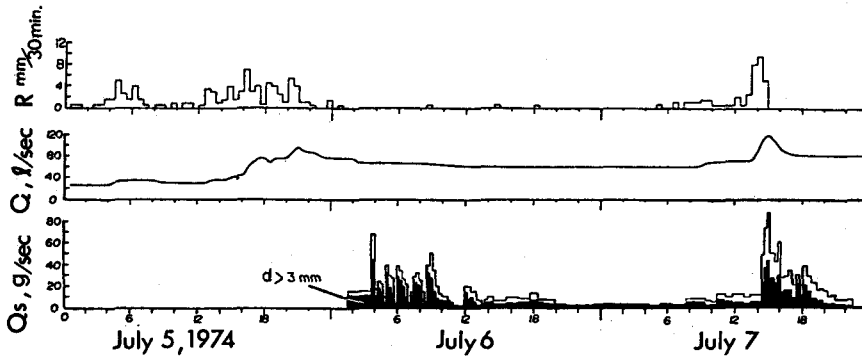


図-7 ヒル谷出口における流砂の観測例

3-4 ヒル谷流域における土砂流出システムの検討

ヒル谷流域では、土砂流出システムとしての生産-流送-貯留が比較的単純な形態で現われており、土砂生産は主として支流の崩壊地から、土砂の流送-貯留は主として本川河道において行われている。ここでは、土砂礫の流送-貯留過程を中心に、ヒル谷河道における掃流砂の流送過程を考察しよう。ヒル谷流域における砂礫の流出過程は、砂礫の生産源とプールとプールが連続する河道の組合せによって、図-8に示すような分布系システムで表わすことができる。前述したように、プールとシュートからなる河道において、砂礫の流送-貯留はプールにおける流砂能力に支配され、プール内での流砂機構がこの土砂流出システムにおいて最も重要な役割を演じている。そこで、プールの堆砂資料に基づいて、プールの土砂流送と貯留機能を検討した結果、ヒル谷本川のプールの総容積が約36m³であるのに対して、プールの総堆砂量が最も多い時点で約24m³となっており、プールの堆砂量の上限がプールの容積の約70%と考えられる。

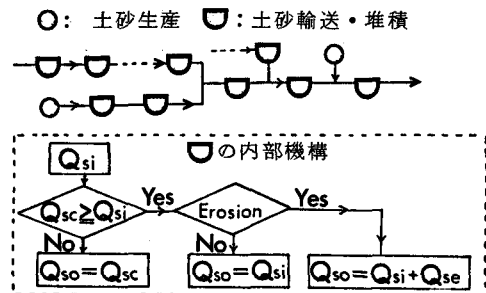


図-8 ヒル谷流域における土砂流出過程

3-5 プールの堆砂形状と土砂流出の特性

プールとシュートからなる河道における土砂礫の流出が、プール内における流砂機構に支配されていることについては、ヒル谷本川の出口における流砂観測と出水前後のプールの堆砂形状から推察される。しかし、ヒル谷本川出口における流砂量を予測するためには、プール内部での現象を明らかにする必要がある。

そこで、現地河道においてプールの堆砂形状とプールの下流の流量、流砂量、および流出砂礫の粒径の測定を行った。その結果は図-9に示すとおりで、測定の対象としたプールはヒル谷出口直上流にあるもので長さが約2m、幅が約1m、プール出口の幅が約0.5m、落下水脈の落差が約0.5mのものであった。この図は1979年6月30日から7月10日までのプール内の水面および堆砂縦断面形状の変動を時間的に示したもので、図中の流量 Q は測定時間内の最大流量、流砂量 Q_s は各測定時刻の間の平均値を示している。プール内の未堆砂容積 V_w はプール出口の高さより下にある部分で、単位幅当りの面積で示している。この図からも明らかなように、流量が47 l/secから43 l/secに減少するにつれて、流砂量が減少するが、プールの堆砂量は逆に増加している。その後、流量が67 l/sec、80 l/sec、72 l/secと変化するにつれ再び流砂量が増加する。そして、プールの侵食も徐々に進行している。流量が123 l/secに増加すると、プールの侵食量は大きくなり、未堆砂容積は初期の4倍程度となるが、流砂量が初期のものとはほぼ同様の値を示している。その後、流量が減少するが未堆砂容積は減少せず、流砂もなくなる。

以上のように、河道がプールとシュートによって構成されている場合、河道を流送される土砂量は、流量のみではなく、プールの未堆砂容積と上流からの流砂量に支配されていることが明らかとなった。このようなプールの堆砂状態を考慮することによって、従来の観測結果における流量と流砂量の関係の出水

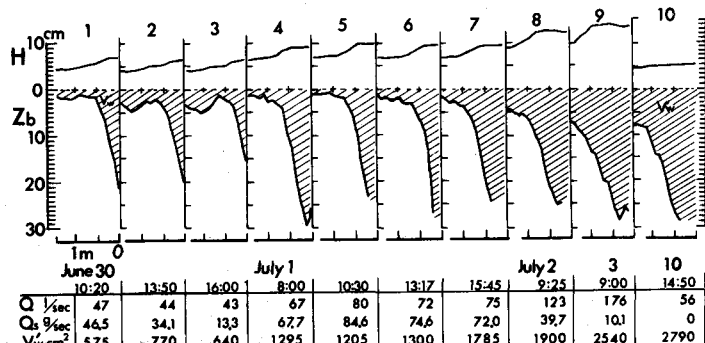


図-9 ヒル谷本川のプールにおける堆砂形状と流砂量の時間的変動

4. 掃流砂の流送過程

4-1 プール内部の流砂機構

前述したように、山地河道を流送される土砂礫の流出過程において、河道のプールが支配的な役割をもつことが明らかとなった。ここでは、プールにおける流砂機構を明らかにするために透明なアクリル製水路において、流砂とプールの堆砂に関する実験を行った。プールの形状は現地河道をモデル化し、縮尺は1/3としている。流量は観測された出水の中で、比較的発生率の高い

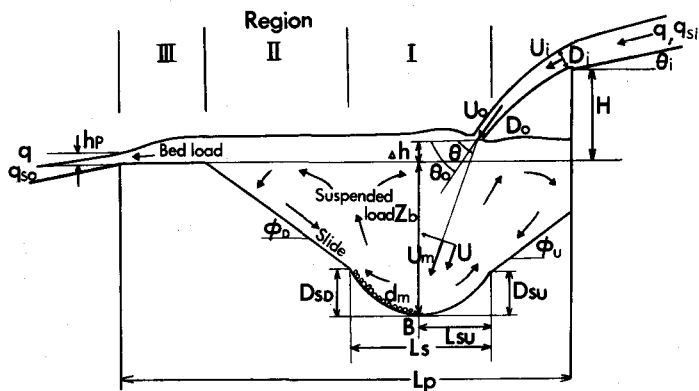


図-10 プールの形状と砂礫の各運動形態の発生領域

範囲とし、単位幅流量33~340 cm²/secで与えている。河床材料は平均粒径1.06 mmの比較的均一な砂を用いた。なお、シュート部にはフルード数が現地のものと一致するように粗度を取りつけている。実験において砂礫の挙動を観察した結果、プールにおける砂礫の運動形態は図-10に示すような各領域に分けることができる。領域Iでは落下水脈が河床面に

衝突し、河床底面の砂礫をまき上げている。領域Ⅱでは河床からまき上げられた砂礫が浮流し、その一部が領域Ⅲへ運ばれて、その残りの砂礫が沈降して安息角に近い斜面を形成するが、その斜面の下部が領域Ⅰによって侵食されるために安定を失って斜面の表層が滑動したり、斜面に沈降した砂礫が転動しながら領域Ⅰに帰っている。領域Ⅲでは領域Ⅱから流出してきた砂礫が堆積・流送されて平坦な堆積面が形成されている。なお、このような砂礫の運動に関する各領域は、プールの容積が有限であるために、実際には十分に発達しない場合も多い。

さらに、プール内の堆砂形状とプールから流出する土砂量を明らかにするために、表-1に示すような水理条件のもとに各種の実験が行われた。

プールからの単位幅当りの流砂量 q_{s0} が河床底面Bにおける流速 u_b に支配されるものとして、

$$\frac{q_{s0}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_m^3}} = f\left(\frac{u_b^2}{(\sigma/\rho-1)gd_{m1}}\right) \dots\dots\dots (1)$$

の形で表わされるものとする。

また、潜り噴流の流速減衰の関係から、 u_b と u_0 の間には次のような関係が成立するものと考えられる。

$$u_b = \kappa u_0 / \sqrt{\xi_b / D_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\xi_b = (Z_b + \Delta h) / \sin \theta$ 、 κ ：定数とする。(2)式を(1)式に代入して、実験値により、その関係を求めると、図-11に示すとおりとなり、(3)式で表わすことができる。

$$\frac{q_{s0}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_m^3}} = 2.015 \times 10^{-6} \times \left\{ \frac{u_0^2}{(\sigma/\rho-1)gd_m} \cdot \frac{D_0 \sin \theta}{(Z_b + \Delta h)} \right\}^{0.62} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、実験の範囲は、
$$2.5 < \frac{u_0^2}{(\sigma/\rho-1)gd_m} \cdot \frac{D_0 \sin \theta}{(Z_b + \Delta h)} < 10, \frac{\sqrt{gd_m^3}}{\nu} = 87.12$$

また、堆積過程についても図-11に同様の関係が示されているが、その関係は(3)式から大きくずれている。これは堆積の初期の形状が洗掘過程のものと異なることによるもので、堆積が進行して堆砂形状が洗掘過程のそれに等しくなると(3)式に近づくようになる。

したがって、プールからの流砂量 q_{s0} は水理条件 u_0 、 D_0 、 Δh 、 Z_b 、 d_m などが与えられれば、(3)式を用いて計算によって求めることができる。

表-1 実験条件

Case	q (cm ² /s)	q_{st} (g/s·cm)	D_t (cm)	U_t (cm/s)	D_0 (cm)	U_0 (cm/s)	$\sin \theta_0$	$\sin \theta$	Δh (cm)	h_p (cm)
A-1	33	0	0.31	107	0.226	146	0.829	0.921	1.60	1.40
A-2	79	0	0.72	110	0.543	146	0.819	0.899	2.40	2.20
A-3	167	0	1.43	117	1.150	145	0.788	0.883	4.05	3.60
A-4	338	0	3.15	107	2.160	156	0.719	0.819	7.27	7.45
A-5	251	0	2.10	120	1.720	146	0.755	0.848	5.11	5.12
A-6	87	0	0.92	94.6	0.645	135	0.866	0.899	3.08	2.31
A-7	131	0	1.32	99.5	0.964	136	0.829	0.906	3.71	3.12
A-8	200	0	1.69	119	1.400	143	0.819	0.866	4.89	5.12
B-1	165	1.08	1.37	121	1.110	148	0.766	0.839	3.76	3.47
B-2	78	1.08	0.77	101	0.550	141	0.809	0.875	2.40	2.36
B-3	251	1.08	2.04	123	1.730	145	0.766	0.857	5.39	6.12
B-4	174	1.92	1.51	116	1.170	149	0.777	0.848	3.21	3.62
B-5	174	0.57	1.46	119	1.160	150	0.777	0.839	3.38	4.04
C	131	0	1.11	181	0.900	146	0.788	0.848	4.30	3.80

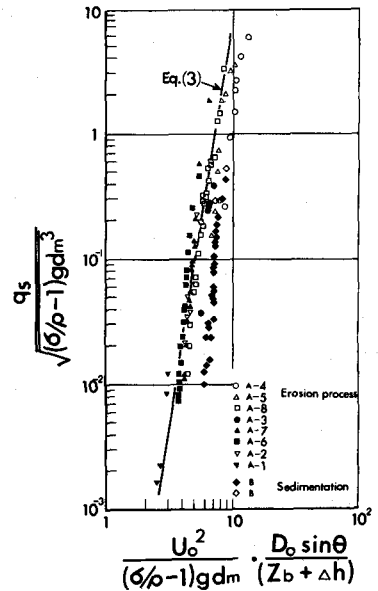
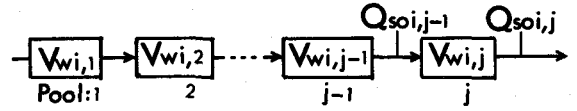


図-11 q_s と u_b/κ の関係

4-2. プール・シュートからなる河道における砂礫の流送過程のモデル

プール・シュートが連続する河道における砂礫の流送過程は、これらのプールの特性に支配され、プールは土砂流送および貯留場として重要な役割をはたしている。さらに、プールの堆砂量は、砂礫の供給源として、あるいはプールの Z_b の大きさを支配するものとして重要な意味をもっている。



i : 時刻 Q_{so} : プールからの流砂量
 j : プールの番号 V_w : プールの未堆砂容積

また、単位幅当りのプールの堆砂量 V_b はプールの容積 V からプールの未堆砂容積 V_w を差し引いたもの $(V - V_w)$ として表わされるが、プールの Z_b と未堆砂容積 V_w との間に、 $V_w = a Z_b^2$ (a : 定数) の関係が認められ、(3)式の関係から、プールからの流砂量 Q_{so} は、流量 Q と未堆砂容積 V_w について、(4)式のような形で表わすことができる。

$$Q_{so} = f(Q, V_w) \dots \dots \dots (4)$$

また、連続するプールにおける砂礫の流出過程は、図-12に示すとおりで、 i 時刻における j 番目のプールの未堆砂容積 $V_{wi,j}$ 、およびプールからの流砂量 $Q_{soi,j}$ に関して、(5)および(6)式が得られる。

$$\begin{cases} Q_{soi,j} = f(Q_{i,j}, V_{wi,j}) \dots \dots \dots (5) \\ V_{wi+1,j} = V_{wi,j} - \frac{1}{1-\lambda} (Q_{soi,j-1} - Q_{soi,j}) \Delta t \dots \dots \dots (6) \end{cases}$$

したがって、河道プールからの流砂量 Q_{so} は、初期条件としての V_w の値と流量 Q および砂礫の粒径が与えられれば、(4)、(5)および(6)式によって求められ、さらに、それらのくり返し計算によって流砂量の時間追跡が可能であり、上流のプールから下流のプールへと順を追って計算することによって、連続するプールからの砂礫の流出過程を明らかにすることができるはずである。

4-3. ヒル谷本川河道へのモデルの適用

ヒル谷本川出口において観測された流砂量の時間的変動を上記のモデルによって検討してみよう。まず、計算に先だって、(3)式を(7)式のような実用式に書きかえて計算を行った。

$$q_{soi,j} = 2.015 \times 10^{-6} \times \sqrt{(\sigma/\rho-1)gd} m^3 \left\{ \frac{q_{i,j}^{\frac{4}{3}}}{(\sigma/\rho-1)gd m (0.745 V_{wi,j}^{\frac{1}{2}} + 0.08 q_{i,j}^{\frac{4}{3}})} \right\}^{6.62} \dots \dots (7)$$

ただし、実験結果から、 $Z_b = 0.745 \sqrt{V_w}$ 、 $\Delta h = 3D_0$ および $\sin \theta = 0.8$ とした。さらに、単位幅流量 q と Δh との間に、 $\Delta h = 0.08 q^{\frac{4}{3}}$ ($I = 0.05$, $f = 0.2$ とする) の関係が成り立つものとした。

なお、(7)式における q_{so} 、 q および V_w は単位幅当りのものである。

計算の条件としては、プールのアーマーコートが露出した時点で、プールの侵食による流砂量を0とし、上流のプールからの流砂量だけが、プールの流砂能力に応じて流出するものとする。さらに、プールでの堆砂が進行して、未堆砂容積が0とならないものとする。計算時間間隔 Δt は15分としている。

計算における流量は下流端ではヒル谷出口で観測されたものを用いたが、上流から下流へと流量が増加しているので、観測結果を参考として本川に沿って一定の割合で増加させて与えている。プールの大きさは、本川を上流から下流へと32区間に等分し、各区間に存在するプールの平均を用い、そのプールが各区間を代表するものとして、各区間にプールが1つとしている。さらに、プールの未堆砂容積、堆砂量についても各区間の平均値を用いている。また、上流端からの流砂量は観測資料が不十分なので、7月5日16時から6日12時までのヒル谷出口の流砂量の平均値を用い、単位幅流砂量 $0.25 g/s \cdot cm$ として20時間一定で与えている。砂礫の粒径は平均粒径 $0.3 cm$ としている。

以上のような計算条件と資料をもとに、連続する32個のプールからの流砂量を計算し、ヒル谷出口での流砂量に関して、図-13に示すような計算結果を得た。なお、この図には、プールの未堆砂容積の初期値として調査による値を与えたものと、未堆砂容積が最大、つまりプールの堆砂量が0という条件を与えたものが示されている。この図からも明らかなように、流砂量そのものは、ほぼ正しく計算されているようであるが、

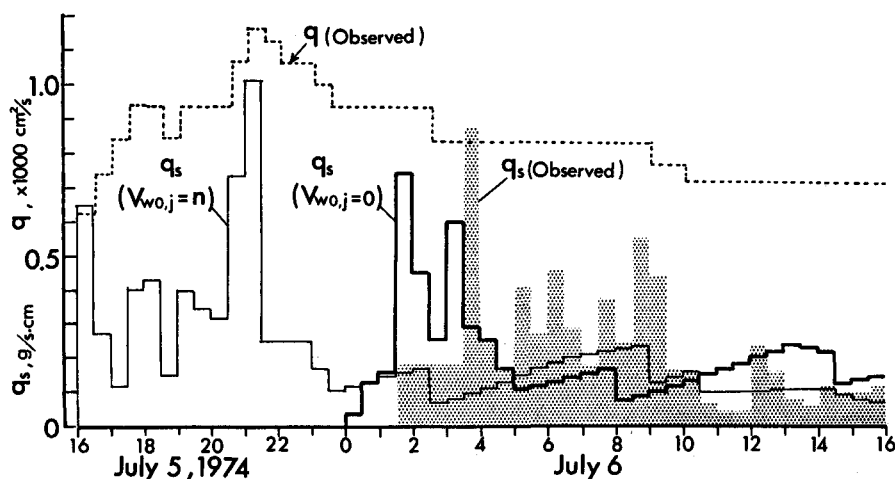


図-13 ヒル谷出口における流出土砂量の計算結果

流量と流砂量との時間のおくれの傾向が、観測値に近くなるのは、初期条件としてプールに堆砂量を与えない方で、初期条件として図-5に示されるような堆砂量を与えた方は、出水の初期と流量のピーク時に流砂量が増加しており、流砂の遅れが認められない。しかし、流量および給砂量が一定しているにもかかわらず、流砂量が変動するという特性は、いずれの場合も認められる。

さらに、図-14で各プールの堆砂量の変動をみると、約1時間で初期条件として与えた堆砂が流出してしまっている。図-13の流量の立上りとともに流砂量が増加しているのは、この時点におけるプールの堆砂の流出による結果であろう。その後、大きなプールから順に、徐々に堆砂が進行するが、7月6日12時で給砂が停止された結果、上流のプールから侵食が進み、堆砂量が減少していつていることがわかる。このような現象は、ヒル谷本川における観測結果においても認められ、大規模な洪水の後半によく現われることがある。

以上の計算結果は、ここで導入したようなプールでの貯留と流出機構にもとづくモデルが、ほぼ従来の観測結果に現われている土砂流出の特性を説明するものであることを示しているが、実地調査にもとづいて初期条件としてプールに貯留土砂量を与えた方が、時間遅れをうまく説明しないという矛盾した結果が出ている。この原因としては、本川河道の各区間を代表するプールの容積として、その平均値を用いたこと、さらに、プールの貯留土砂量もその区間の平均値を用いたために、実際には大きなプールにしか貯留されていない土砂量を平均値を示すプールに配分することになり、土砂礫が流出しやすい傾向になったためと考えられる。また、プールの個数を各区間に1個としたことも、流出土砂の遅れを短くする傾向に作用したものと考えられる。

5. 結 語

以上、本文において、現地観測によって明らかとなった砂礫の流出の実態を説明するために、内在する流砂機構を実験などによって検討し、プールとシュートからなる河道特性が重要な役割を演じていることを明らかにした。また、プール内の流砂機構と河道の特性をとり入れた土砂流出モデルを提案し、観測資料を用いて、このモデルの妥当性を検討した。その結果、従来の流砂量式では十分説明することが困難であった土

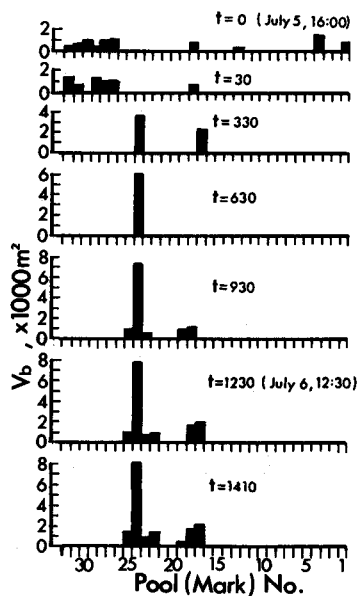


図-14 プールの堆砂量の変動

砂流出の特性を明らかにすることが可能となった。しかし、実河川へのモデルの適用に関して、河道特性としてのプールの容積、プールの個数、およびプールの分布状態をどのように評価し、モデルに取り入れるかが今後の課題である。

なお、本研究での計算機による流砂量の計算に関して、砂防研究部門の江頭進治助手の協力があったことを記し、感謝の意を表する。また、本研究は昭和55年度文部省科学研究費一般研究「山地河川における流砂量の予知に関する研究」の一部である。

参考文献

- 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, 京都大学防災研究所年報, 15号B, 1972, pp. 349 - 361
- 2) 芦田和男, 高橋 保, 奥村武信, 沢田豊明: 同上(2), 同16号B, 1973, pp. 401 - 409.
- 3) 芦田和男, 高橋 保, 沢田豊明: 同上(3), 同17号B, 1974, pp. 547 - 553.
- 4) 芦田和男, 高橋 保, 沢田豊明: 同上(4), 同18号B, 1975, pp. 529 - 540.
- 5) 芦田和男, 高橋 保, 沢田豊明: 同上(5), 同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, 1970, pp. 119 - 144.
- 7) 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), 京都大学防災研究所年報, 20号B-2, 1977, pp. 387 - 403
- 8) 芦田和男, 高橋 保, 沢田豊明: 同上(7), 同21号B-2, 1978, pp. 467 - 483.
- 9) 芦田和男, 高橋 保, 沢田豊明: 同上(8), 同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) 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), 京都大学防災研究所年報, 23号B-2, 1980, pp. 393 - 412
- 12) Takahashi, T.: Mechanical characteristics of Debris Flow, Proc. ASCE, HY8, 1978, pp. 1153-1169.
- 13) 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.