

土砂堆積域における流路の形成過程

Processes of Stream Formation in a Sedimentation Area

京都大学防災研究所

芦田 和 男 Kazuo ASHIDA

京都大学防災研究所

江頭 進 治 Shinji EGASHIRA

農林水産省農業工学研究所

樽屋 啓 之 Hiroyuki TARUYA

Some difficulties arise in predicting the stream morphology and sediment runoff, in and from a sediment deposited area typical in mountain streams, because a stream channel often forms in the restricted region and changes its course. This paper describes the mechanism of a stream formation and the relation between the sediment runoff and the process of a stream change. A mathematical model, which is useful for a regime criterion of channel formation as well as for calculating the cross-sectional shape of a stream, is presented, and applies to the flume tests. Numerical predictions are made with modified one-dimensional model for the sediment runoff and channel variation, and compared with data obtained from a flume experiment.

Keywords: mountain stream, channel erosion, stream formation, sediment yield

1. 序論

山地河道においては、狭窄部や河道屈曲部の上流域、あるいは砂防ダム上流域には顕著な土砂堆積域がみられる。これらは異常な土砂流出によって形成されたものであるが、その後の出水によって侵食を受けて流出する。この過程においては、水みち侵食現象が重要であるが、これに関する知見が十分でなく、土砂堆積域における流路変動や侵食・流送される土砂量を適切に推定するのは、極めて困難な状況にある。

水みち侵食は、①流れの集中、②主流路の形成、③形成流路の発達・変動、といった過程を経て進むものと考えられる。したがって、2次元あるいは3次元流れの運動方程式と、2次元河床位方程式を解くことができれば、水みちの形成過程とそれに伴う流出土砂量の予測は可能である。ところが、上述の過程は非線形性の強い現象に支配されており、十分な解が得られる段階にはない。

そこで、本研究においては、流路の形成とそれに伴う流出土砂量の予測に関する見通しを得るため、次のように単純な問題を扱っている。すなわち、水みちの形成領域や水みちの平衡横断形状については、侵食現象の卓越した領域を対象として検討する。ついで、これを参考にして1次元支配方程式を改良し、それを用いて流路変動過程及び流出土砂量の予測を試みる。

2. 水みちの形成条件と平衡横断形状

水みちの形成条件を検討するために、ここでは現象を次のように単純化する。①河床位の擾乱として、流れに垂直方向の(y方向)のみの有限振幅調和波を考える。②水みちの形成は、砂れきの侵食と堆積の不均衡によって起こるが、ここでは、その極限として、砂れきの侵食現象のみを考える。このとき、侵食速度は、掃流力と河床の横断傾斜角に依存する。③掃流力の横断分布(y方向)は、法線分割面積法にしたがうものとし、2次流の影響は考慮しない。さらに侵食に伴い、河床の縦断勾配は変化しないものとする。これらの事項を考慮して、水みちの発達あるいは減衰の過程を模式的に示せば、Fig.1のようである。すなわち、図中の上段の条件では、河床の凹凸が発達して水みちが形成されるが、下段の条件では、河床擾乱が減衰する。上述の仮定を行えば、河床位方程式は、次式のように表される。

$$\partial z / \partial t + 1 / (1 - \lambda) \cdot E(y) = 0 \quad \dots(1)$$

ここに、E(y)は侵食速度あるいは侵食率であって、中川・辻本のpick-up rateに関する成果を横断勾配

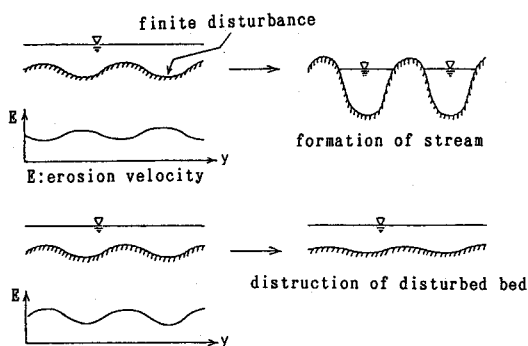


Fig.1 Schematics of stream formation.

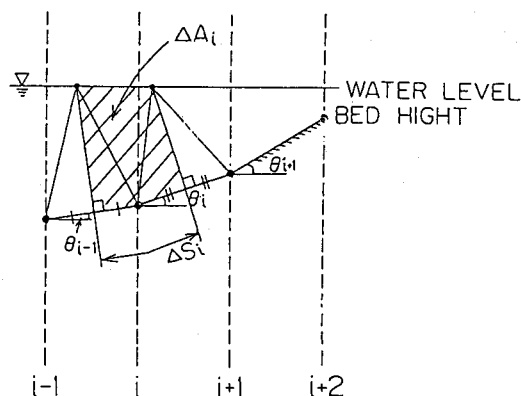


Fig.2 Scheme to calculate cross-sectional shape of stream.

を有する場に拡張すれば、次式のように表される。¹⁾²⁾

$$E(y) = k_3/k_2 \cdot F_0 \cdot \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} \cdot \tau_{*0} \cdot (1 - \tau_{*0}/\tau_{*c})^3 \quad \dots(2)$$

ここに $k_2 = \pi/4$, $k_3 = \pi/6$, $F_0 = 0.035$, σ は砂粒子密度, g は重力加速度, d は平均粒径である。また, τ_{*0} は斜面上の無次元掃流力で、法線分割面積法³⁾によれば、次のようである。

$$\tau_{*0} = \frac{gI_0 d A_n / ds}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{g\ell(1 - \ell/2r)I_0}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad \dots(3)$$

ここに、 ρ は水の密度, I_0 はエネルギー勾配, A_n は法線による分割面積, ℓ は分割線長, r は河床面の曲率半径である。 τ_{*0} は斜面上の無次元境界掃流力であり、Lane & Carsonの式により、次のように与えられる。

$$\tau_{*0} = \tau_{*c} \cdot \cos \theta_1 \sqrt{1 - (\tan \theta_1 / \mu)^2} \quad \dots(4)$$

ここに、 θ_1 は水平面から測った斜面の横断勾配である。河床の横断方向には次のような有限振幅の初期擾乱を与える。

$$z = \Lambda \cos(n(2\pi y/B - \delta)) + z_0 \quad (0 \leq y \leq B) \quad \dots(5)$$

ここに、 Λ は振幅, n は波数, δ は位相のずれである。

式(1)~(5)を用いて、河床の横断形状の発達・減衰過程を追跡し、水みちの形成・非形成を判定する。計算を行うに際して必要なパラメータや係数の値は $\sigma/\rho = 2.65$, $d = 0.3\text{cm}$, 河幅 $B = 50\text{cm}$, $\delta = \pi/2n$, 砂の摩擦角 $\phi = 37.4^\circ$ などである。また、分割面積と分割両辺は、それぞれFig.2の様にとり、式(3)において $dA_n/dS = \Delta A_i/\Delta S_i$ とし、分割数を100とした。水面より上方の側岸の勾配は、 $|\theta| < \phi$ となるようにした。

水みち形成の判定条件として、1.河床位の極大値が水面より上方に現れ、2.水面幅 B_w と最深部の水深 $h_{\max}$ との比 $B_w/h_{\max}$ が替

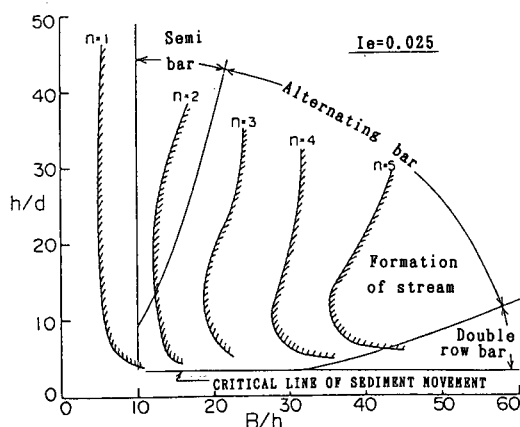


Fig.3 Domain predicted by present method for the stream formation.

通になる、という2つの条件を考え、これらが同時に満たされたときに、水みちが形成されたと判定することにし、モード $n=1, 2, \dots, 7$ 、エネルギー勾配 $1/20 \sim 1/80$ 、流量 $Q=1.0 \sim 60.0 \text{ l/s}$ の範囲において式(1)~(5)を解き、計算結果を次の3通りに整理した。

- ①与えられたモード数に対応した水みちが形成された。
- ②与えられたモード数よりも少ない本数の水みちが形成された。
- ③水みちが形成されない。

ただし、②については、検討すべき問題が残されており、ここでは非形成と見なしている。Fig.3は、水みちの形成・非形成領域に関する計算結果を示したものである。こ

こで、縦軸に水深-粒径比(h/d)、横軸に、幅-水深比(B/h)をとっているのは、これらが中規模河床形態の主要なパラメータであることを考慮しているからである。図中には、参考のため、村本・藤田の河床形態に関する領域区分も示している。さて、水みちの形成領域に関する計算結果についてみよう。各モードに対応する曲線の右側は、水みちの形成領域であり、水みち数は、 B/h に大きく依存するが、 h/d にはそれほど依存していない。しかしモードが大きくなるにしたがって、 h/d の影響も現れてくるようである。

Fig.4は、平衡横断形が達成されたときの水面幅と流量との関係を示したものである。流量及び水みち幅ともに一本の水みちのものである。これによれば、エネルギー勾配が大きくなるに伴い水面幅は微かに小さくなる。また、計算水面幅は、レジーム幅 $B_w=5Q^{1/2}$ よりも小さくなるが、波数には依存していない。

3. 水みち侵食過程の実験的検討

長さ21m、幅50.0cmの水路に、ダム高20.0cm、水通し幅25.0cmの砂防ダムを設置し、これより上流13.0m区間に、平均粒径0.3cmのほぼ一様な砂を勾配0.0252に敷ならした。ここに、給砂なしの条件で、流量3.0 l/sを定常的に給水し、30分~1時間毎に水位・河床位を計測した。通水は下流端における流砂量がほとんど無くなるまで通算40時間継続し、下流端では流砂量を連続計測した。初期の無次元掃流力は $\tau^*=0.076$ であって、砂粒子の移動限界を少し越えたところにある。

Fig.5は横断平均河床位の縦断形の時間変化を示したものである。上流部で強い侵食傾向、中流部でやや緩やかな侵食傾向、下流部では、侵食・堆積が繰り返されていることが分る。このことを調べるために砂州の挙動に着目して河床位を見たものがFig.6である。これは、下流部($x=1.0\text{m}$)、中流部($x=6.0\text{m}$)、及び上流部($x=8.5\text{m}$)の各断面における水路中心から左岸側及び右岸側の横断平均河床位である。 $x=8.5\text{m}$ のデータについて見ると、通水初期には砂州の形成と移動がみられるが、次第に流れは左岸側に集中し、河床低下が進むと共に河床波や砂州などの形成は認められない。一方、 $x=1.0\text{m}$ のデータを見ると、

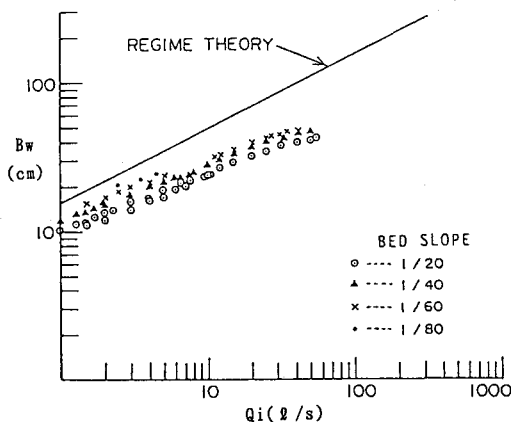


Fig.4 Relation between flow discharge and stream width predicted with the present method, in which the discharge is chosen for that in a stream.

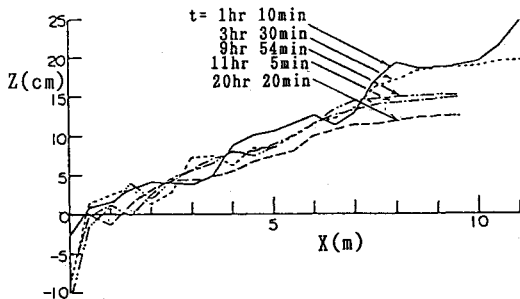


Fig.5 Temporal variation of the profile of bed elevation averaged laterally.

通水後10時間を経過するまでは、砂州の移動に伴い流路は左右岸に変動している。その後、流路は左岸側に偏り、河床は周期的に変動するが、その振幅はかなり小さくなっているのが分る。また、中流部においては、これらの中間的な変動がみられる。

Fig.7は、水面幅の時間変化を示したものである。これによれば、Fig.5およびFig.6の結果に対応して、上流から順次水面幅が決定されている状況が理解される。

流出土砂量は、ダム上流域における流路形態や水みちの形成過程などと密接な関係を持ち、絶えず変動している。Fig.8に $x=0.0\text{m}$ 地点における流砂量の変化を示す。これによれば、通水後40～50分を経過するまでは流砂量は殆ど無い。これはダム袖部によって流れがせき上げられ、下流端近傍の掃流力が小さくなっているためか、あるいは流れの集中が起こっていないためであろう。その後、流砂量は図示のように変動するがこれは、Fig.6に示す様な砂州の移動に対応したものと考えられる。流路が比較的安定した $t=12\text{hr}$ 以降も、 $x=0.0\text{m}$ 地点での流砂量は減衰しながら変動するのは主流の水みち沿いに形成される砂州の移動によるものである。

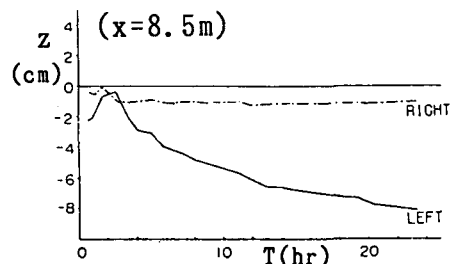
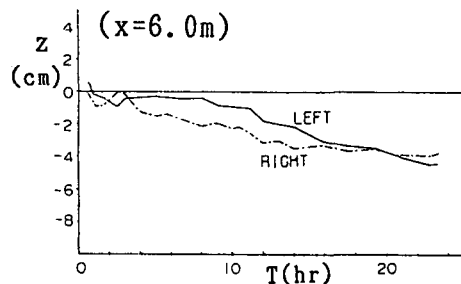
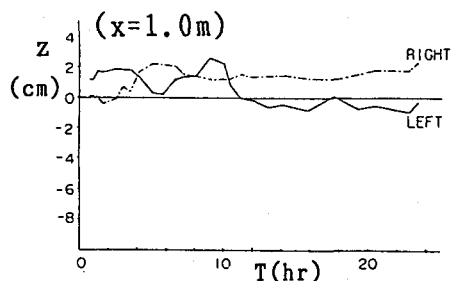


Fig.6 Temporal variation of right side or left side bed elevation.

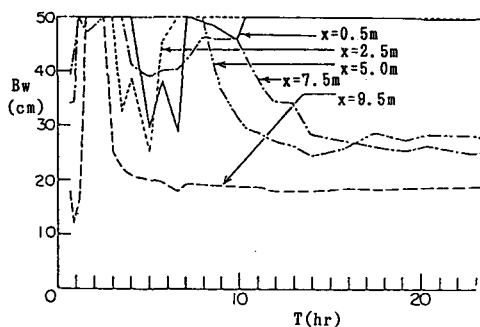


Fig.7 Temporal variation of stream width.

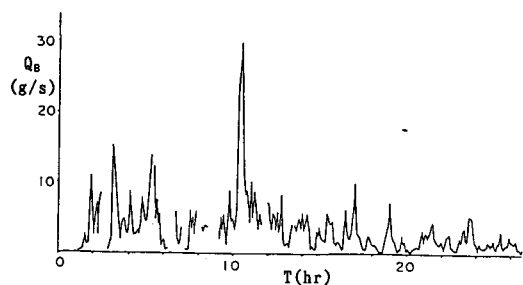


Fig.8 Temporal variation in the sediment discharge through dam.

4. 水みちの形成過程を考慮した1次元解析法

水みち幅を適切に与えれば、1次元解析によって、上述の現象をある程度評価できる⁴⁾ことが分っている。そこで、水みちの形成過程を考慮した1次元解析法を考える。すなわち1次元解析によって予め水流の断面平均値を求め、これを基準にして掃流力の横断分布と河床横断形状の変化を追跡するような方法である。このようなモデル化を図れば、1次元の支配方程式のうち、流れの連続式と運動方程式は従来のものがそのまま適用され、流砂の連続式(河床位方程式)は次のように与えられる。

$$\partial z / \partial t = 1 / (1 - \lambda) \cdot \{ D(t, x, y) - E(t, x, y) \} \quad \dots(6)$$

ここに、 $E(x, y)$ は、式(2)と同じであり、 $D(x, y)$ は堆積速度である。

$$D(t, x, y) = E(t, x, y) - \delta \cdot \partial E / \partial x \quad \dots(7)$$

すなわち、 (x, y) 地点よりも δ だけ上流の地点 $(x - \delta, y)$ から輸送されてきた砂粒子は (x, y) 地点に堆積すると近似している。 δ はstep lengthである。なお、掃流力の横断分布は式(3)に従うものとする。

計算の手順は次のようである。1.水路流下方向にx軸、横断方向にy軸をとり、2.水面形の追跡を行い、断面平均掃流力の縦断分布を求める。3.掃流力の横断分布、 E 、 D の算定…などである。

Fig.8は、上述のようにして計算した平均河床の縦断変化を示したものである。上流から侵食の進行してくる過程が明確であり、これはFig.5に示した実験値とも似た傾向を持っている。特に、上流部、中流部での河床変動の違いがかなり良く表現されている。

Fig.10には、地点別の水面幅の時間変化を示す(但し、図中のx座標は、Fig.6のx座標と同じである)。Fig.6と比較すると、水面幅あるいは水みちが上流側から順次決定されていく過程が、よく表わされている。

Fig.11には、流出土砂量の計算値と実験値を示す。図示の結果が示すように、実験値はこの計算によって、かなり良く説明されていることがわかる。

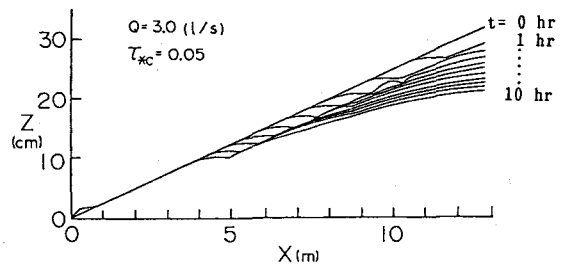


Fig.9 Profiles of mean elevation predicted with present method.

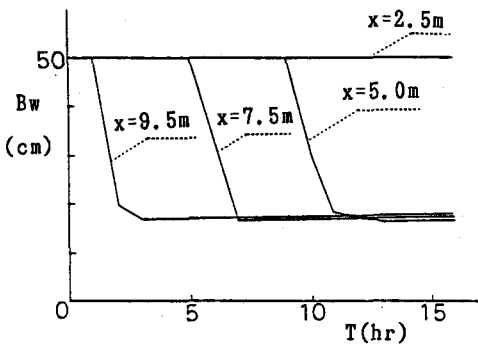


Fig.10 Width of stream calculated with the modified one dimensional method.

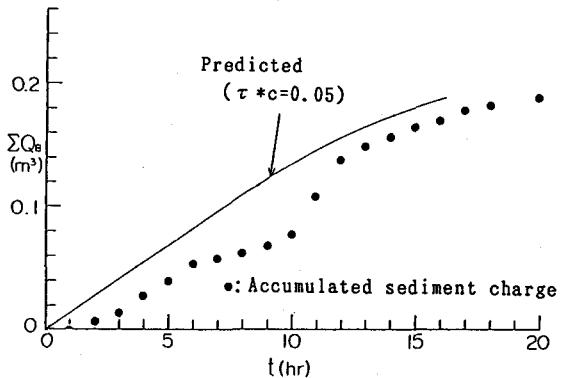


Fig.11 Comparison between calculated and experimental results pertaining to the accumulated sediment discharge.

5. 結語

土砂堆積域における水みちの形成条件と形成過程について、理論解析と水路実験を通して検討した。本研究によって得られた主要な成果ならびに問題点を要約する。

(1) 掃流力及び侵食速度の横断分布式を用いて、種々のモードをもつ有限振幅河床擾乱の発達・減衰条件を数値解析によって求め、これをもとに水みちの形成領域に関する考察を行った。これによれば、形成される水みち数は $h/d-B/h$ 平面上に示され、とくに、 B/h に強く依存することが判明した。

(2) (1)と同様の手法を用いて、種々の流量条件のもとにおける1本の流路の平衡横断形状並びに水面幅を計算し、レジーム則によるものと比較した。その結果、水面幅はレジーム則のものよりも少し狭く推定されるが、ほぼ $Q^{1/2}$ に従うことが示された。

(3) 下流端流砂量は、流れのせき上げ効果のために、初期には殆ど無いが、流れの集中が進むに伴って増加し、その後長時間にわたって変動する。この変動は、種々の要因に支配されているが、下流端近傍における砂州の移動(水みちの変動)に最も依存している。

(4) 水みちの形成過程を考慮した解析法を提案した。これは、1次元解析によって平均掃流力の縦断分布を推定し、これに掃流力の横断分布式と侵食・堆積速度の横断分布式とを導入することにより、流砂の縦横断分布や、流路の横断形状を追跡する方法である。この方法によって数値解析を行い、それと実験値とを比較した結果、流出土砂量については勿論のこと、流路の横断形状、水面幅など、ほぼ推定できることが判明した。

以上示すように、興味あるいくつかの知見が得られたが、序論にも述べたように、今後に究明すべき問題点も多い。今後、これらの問題の解明に努めたい。

＜参考文献＞

- 1) 中川博次・辻本哲郎: 水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 244号, 1975.
- 2) 芦田和男・江頭進治・加本実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2), 京大防災研究所年報, 第26号B-2, 1983.
- 3) 江頭進治・黒木幹男・澤井健二・山坂昌成: 開水路における河床せん断力の推定法, 水理講演会論文集, 1988.
- 4) 芦田和男・江頭進治・樽屋啓之・里深好文・高村裕平: 砂防ダム堆砂域の侵食と流路の形成機構, 京大防災研究所年報, 第31号B-2, 1988.
- 5) 藤田裕一郎: 沖積河道の流路変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1980.