

## 50 水系一貫した土砂の平衡からみた 砂防計画

立命館大学理工学部 大同 淳之

### 1. まえがき

河川の水系一貫とは、水と共に土砂量の水系を通じての平衡（その河道が維持する海岸を含めて）をはかる必要がある。現在、上流部では生産源から供給される土砂の処理に悩み、一方、下流部では産業用の土砂の不足と海岸侵食を起こしている。これらの不均衡は、現在の河道計画あるいは設けられた河川工作物が、治水、利水の面でその効用を果たしているといえども、土砂量の水系一貫については、若干問題を残しているためといえる。

本文では、土砂量の水系一貫の基本則に、さきに著者が提案した、一洪水期間中に移動する土砂量の総和が河道の上下流を通じて同じであるという連続の関係を用いる。すなわち、連続式

$$\frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^T Q_T dt \right) = 0, \quad \text{ただし } \frac{\partial Z}{\partial t} = 0, \text{ をはかるため, } \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^T Q_T dt \right) = 0$$

を保つ必要がある、というものである。この考え方では洪水期間中にそれぞれの箇所で時間的に河床変動は生じるが、全体としてはある平均値のまわりでの変動であると考えている。

もとより提案した基本則を不備なく条件づけてしまうためには、流砂量、抵抗則等、多くの基礎的研究が必要である。特に、水系全体について土砂量の平衡を議論するためには、流域の生産土砂量の推定あるいは海岸の維持に必要な土砂量等、現在まだ正確な算定が難しいものがいくつかある。ここでは、基本的な考え方方が実際に成立するかを検査し、細部については今後つめていくつもりである。

### 2. 洪水期間中の全流砂量が一水系内で等しい平衡こう配と流砂量

#### 2-1. 洪水中の全流砂量

洪水曲線を図1によってあらわし、ピーク流量  $Q_p$  はラショナル式で表されるとするとこの期間中の全流砂量  $Q_s$  は

$$Q_s = \int_0^T B q_s dt = \frac{2}{5} B \alpha'' (g s)^{\frac{3}{2}} T \cdot h_p^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 - \frac{5}{4} \left( \frac{h_{cs}}{h_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha'' = \{\rho / (\sigma - \rho) g\} \phi$  、  $h_{cs}$  は砂流が動き始める水深、  $h_p$  はピーク水深である。

この流砂量  $Q_B$  は、粗度係数を  $n$  で表わしたとき

$$Q_B = \frac{4}{5} \alpha'' g^{\frac{3}{2}} R_r (0.278 r_n)^{-0.1} B^{0.1} S^{1.05} A_1^{0.9} n^{0.9} \times \left\{ 1 - \frac{5}{4} (k_c^{0.5} g^{-0.5} d_s^{0.5} S^{-0.35} A_1^{-0.3} n^{-0.3} B^{-0.3}) \right\} \quad (2)$$

{} 内は限界掃流力下の掃流力の項

となる。 $Q_s$  がどこでも等しいとき、基準点の位置の流砂量を  $Q_{s0}$  とすると、 $Q_{s0} = Q_s$  より任意点の勾配  $S_0$  に対して任意点の勾配  $S$  を

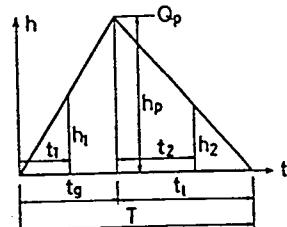


図1  $\tau_{c1}/\tau_{c0}$  と  $d_1/d_0$  の関係

$$S = S_0 (R_r/R_{r0}) (r_m/r_{m0})^{-0.1} (B_0/B)^{0.0951} \times (A_{10}/A_1)^{0.855} (n_0/n)^{0.855} (\Gamma_0/\Gamma)^{0.951} \quad (3)$$

と表した。ここに、 $R_r$ ；一降雨中の全有効雨量、 $r_m$ ；有効雨量の到達時間内の平均値、 $B$ ；河道幅、 $A$ ；流域面積、 $n$ ；Manning係数、 $\Gamma$ ；掃流力中の限界掃流力に相当する部分の補正項、である。

河床勾配を最も支配するものは、抵抗則で、ここで取り上げている流砂量一定の条件より、抵抗則の適否が計算と実際との一致を支配する。

$$\text{抵抗則として、 } \frac{u_m}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k_s} \quad (4)$$

を変形して、つぎのように表わす。

$$k_s = 11.05 R / (10^{\phi/5.75}) \quad (5)$$

とおく。そして、 $Z = 10^{\phi/5.75} = 10^{\xi}$  とし、通例の沖積河床面上の流れに現れる  $\phi$  の変動範囲8~18に対応する  $Z$  と  $\xi$  との関係を描くと図2が得られ、 $z = a\xi^b$  (6) とし、図中の2点A,B間の曲線を上式のように近似すると、 $a=4.82, b=4.193$  となり、したがって、式(5)は、

$$k_s = \frac{11.05 R}{a\xi^b} \quad (7)$$

となる。図3は国内・国外の河川資料について  $k_s/d_m$  と  $\tau_s$  との関係を示したものであるが、 $k_s/d_m$  と

$\tau_s$  の関係は、各群に属する各河川の資料はそれぞれ群ごとに、水平にほぼ45°の傾きをもつ右上がりの4本の平行線の周囲に集中する傾向があり、河床面形態ごとに、

$$\frac{k_s}{d_m} = m \tau_s^n \quad (8)$$

が成立するから、式(5)と、式(7)より  $k_s$  を消去し、 $\phi = u_m/u_*$  を代入すれば、

$$u_m = k R^{0.5 - \frac{n-1}{b}} i^{0.5 - \frac{n}{b}} d_m^{\frac{n-1}{b}}, K = 5.75 \sqrt{g} \left\{ \frac{11.05 s^n}{a m} \right\}^{1/b} \quad (9)$$

と变形できる。式(9)における  $n$  と  $m$  を図3に示されるように  $n=1.10, m=4.913$  とおけば、平均流速  $u_m$  は次のように表せる。

$$u_m = K R^{0.48} i^{0.27} d_m^{0.02} \quad (10)$$

式(11)を用いて、式(2)と同様に一洪水中の流砂量を求めると

$$\int_0^t q_B dt = 229.18 \times g^{-0.007} R_m^{-0.014} s^{-1.227} m^{0.206} R_r^{1.227} A^{1.014} B^{-0.014} d_m^{-0.021} \sum_{i=1}^n P_s F(\tau_s / \tau_{ci}) \quad (11)$$

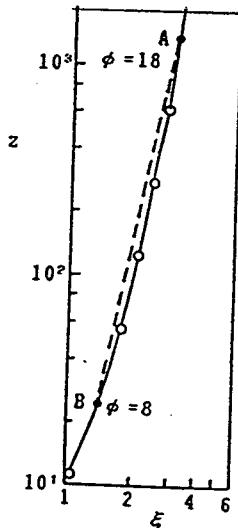


図2  $z$  と  $\xi$  の関係

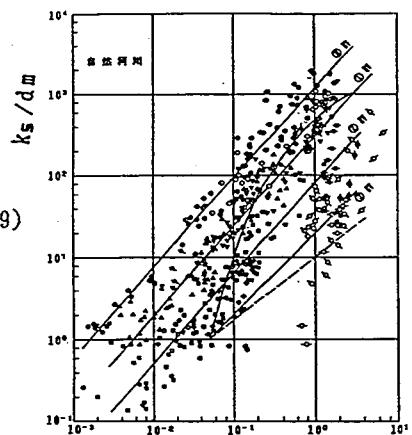


図3 河床形態ごとの  $k_s/d_m$  と  $\tau_s$  との関係

ここに、 $F(\tau_0/\tau_{c1})$  は個々の粒径についての限界掃流力以下で動かない砂の補正である。

## 2-2. 平衡こう配

先に述べた動的平衡の条件より、河道の任意の点の $Q_T$ を等しいとおけば、平衡こう配 $i$ が求まるが、式(11)は $i$ について、容易に解きうる形になっていないので、実際には数値計算を行う必要がある。

ただし、式(11)の流砂量式における $F(\tau_0/\tau_{c1})$ の項は、通常の河川では、 $\tau_0/\tau_{c1}$ に値が非常に大きく、 $F(\tau_0/\tau_{c1}) = 1.0$ となることから、式はある程度簡単になる。基準点諸量に0をつけて表現すると、任意の点の勾配は、

$$i_B = i_0 \left( \frac{A_0}{A} \right)^{0.826} \left( \frac{B_0}{B} \right)^{-0.011} \left( \frac{d_{m0}}{d_m} \right)^{-0.017} \left( \frac{m_0}{m} \right)^{0.168} \quad (12)$$

となる。この $i$ を積分すると河床高を計算できる。よって河床高 $z$ は次のように表せる。

$$z_B = \int_0^L i_B dx = \sum i_B L_i \quad (13)$$

## 3. 横断方向の平衡形状を考慮したときの平衡こう配

河床変動を少なくするために、2に述べた縦断方向の平衡だけでなく、横断方向の平衡も考慮する必要である。河床幅が横断方向の平衡幅より非常に広いときは、河床の断面形によって形成され、逆に横断方向の幅が人工で狭く規制されているときは、ここで予測する形状とはずれてくると予想される。

横断方向の平衡がなりたつとき、流量と流路幅の関係は

$$B = \alpha Q^{1/2} \quad (14) \quad \text{または} \quad B = \alpha Q \quad (15)$$

と表せる。この条件をいれたときの式(3)に相当するのは、式(14)、(15)のいづれについても

$$S = S_0 (A_0/A)^{0.1744} (d_0/d)^{-0.048} \quad (16)$$

となり、横断方向の平衡を考慮しないときより、勾配は緩くなる。

## 4. 各河道の計画流砂量(許容流砂量)の決定

### (1) 許容流砂量の配分

水系一貫の河道を作るためには、上下流を通じて、余分の堆積、洗掘を生じさせないように河道を作ればよい。このためには、河道の各地点で許容流砂量を定め、この流砂量を達成するように式(4.1)から流路幅、こう配を決めていけばよい。

#### a) 河口での許容流砂量 $Q_{T0}$

この川が受け持つ海岸線の維持に必要な年間許容流砂量または河口に放出して差し支えのない年間許容流砂量より定める。

$$Q_{T0} = \frac{\text{年間の許容河口流砂量}}{\text{年間洪水数}} \quad (17)$$

b) 最初の支川合流点での許容流砂量  $Q_{T1}$

$$Q_{T1} = \frac{\text{年間河口許容流砂量} + (\text{0} \sim \text{1} \text{の区間で採取される土砂量})}{\text{年間洪水数}} \quad (18)$$

c) 2の点における  $Q_{T2}$

$$Q_{T1} - \text{支川の許容流砂量 } Q_{TB} = Q_{T2} \quad (19)$$

このようにして順次上流端まで許容流砂量を決めることができる。これによって、流砂量に見合った平衡こう配、流路幅を見いだすことができ、現状が平衡なのか、あるいは平衡よりずれており、将来どう動くのかが予想できる。

### 5. 適用例

この考え方は、水源近くで一つの雨域に含まれた、流域面積の変化がはげしい区間のかどうを想定している。雨域の外にあると考えられる下流河道では、本文で考へている条件は必ずしも合わないと思われる。図4の天塩川の下流部はそのような条件にあると考えられる。この川の河口から5Kmの地点より25Kmの地点までの20Kmの区間にについて計算し実際の高さと比較する。この流域に  $\int Q dt = \text{一定}$  の条件で河床高を求めると、図中の鎖線のようになる。定常流のもとでは、下流になるほど流砂量が大きいとして、計算の常流端では、下流の0.82倍とすると図中の点線のようになる。ただ、いくつかの河川について計算した結果では、的確に粗土係数を評価して、それを計算にとり入れる必要があることが示された。したがって、式(11)でなく、式(12)の形で、補正項を計算にとり入れる必要がある。

#### 流砂量の制御法

河道は自然の力で形成され、人工で制御できる余地は極めて少ないと予想される。輸送能力より多くの土砂が供給されるときこう配が増し、逆の場合はこう配が減る。源流部でこう配が不連続の場合には、人工的に流砂量を減らしてやらなくては、平衡はあり得ないということも予想される。砂防ダムがここに役立つと考えられ、この砂防ダムの評価は後日発表する。

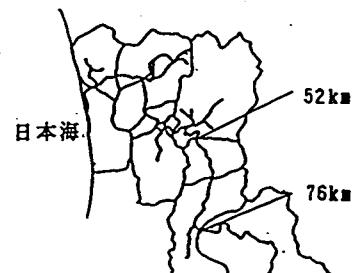


図4-1 天塩川の流域図

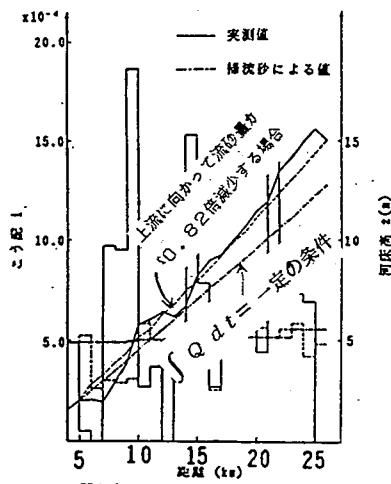


図4-2 天塩川の実測値と計算値