

# 山地河川における土砂流出特性のエネルギー的考察

岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 学生会員 伊原一樹  
 岐阜大学工学部社会基盤工学科 正会員 大橋慶介  
 岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 学生会員 安田真悟

## 1. 背景と目的

従来の研究では、山地河川における砂防堰堤堆砂量調査によって、降水の位置エネルギー  $P$  と年平均堆砂量  $Q_s$  が  $Q_s \propto P^{-0.8}$  の関係<sup>1)</sup> となることが明らかになっているが、その物理的な理由の説明ができていない。その理由は、降水の位置エネルギーに起因する流出の運動エネルギーと流出土砂の運動エネルギーとの比である効率  $e_b$  が不明なためである。そこで、流砂量計算によって  $e_b$  を求めることを目的とする。

## 2. 研究方法

対象流域は図-1 に示す揖斐川上流域とその砂防堰堤とし、流出解析によって得られる流量を基に、芦田・道上の粒径別平衡流砂量式を用いて土砂流出量  $q_B$  を推算した。その後、芦田らの平衡流砂量式と Bagnold の stream power を用いた流砂量式とを等置し、各砂防堰堤集水域の効率  $e_b$  を求めた。

流出解析 Canadian Hydraulics Centre の流出解析ソフト Ensim Hydrologic の HBV-EC モデル<sup>2)</sup> を用いた。まず、計算値と揖斐川本川にある横山ダムの観測流量とを比較し、対象流域に最適なパラメータを決定した。そして、図-1 の赤線で示す揖斐川、関ヶ原、今庄、樽見の気候区分に、各々のアメダス観測地点の時間降水量を与え、各砂防堰堤での流量を求めた。

流砂量計算 ここでは、掃流砂を対象とし、流出解析で求められた流量を基に、以下に示す芦田らの平衡流砂量式を用いて土砂流出量を推算した。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sg}d_i^3} = p_i 17 \tau_{*i}'^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $d_i$  は粒径、 $q_{Bi}$  は粒径別単位幅掃流砂量、 $s$  は土砂の水中比重、 $g$  は重力加速度、 $p_i$  は粒径  $d_i$  の粒子が河床に存在する割合、 $\tau_{*i}$  は粒径別無次元掃流力、 $\tau_{*i}'$  は粒径別無次元有効掃流力、 $\tau_{*ci}$  は粒径別無次元限界掃流力である。 $d_i$ 、 $p_i$  は砂防堰堤堆砂域での現

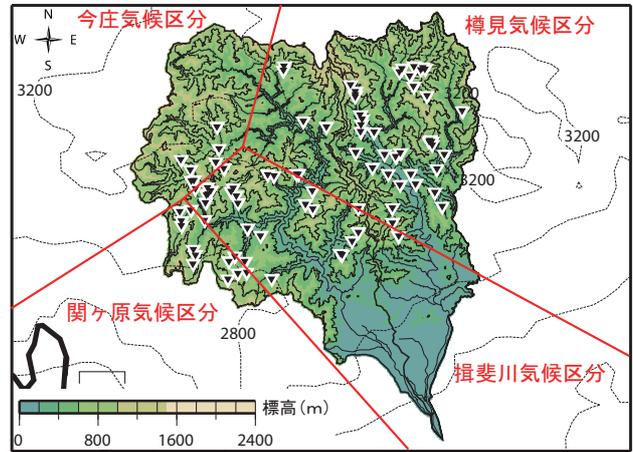


図-1 揖斐川上流域概要(標高、河道網、等降水量線)、対象の砂防堰堤位置、および、流出解析での気候区分。

地調査の値を用いた。粒度分布は鉛直方向にも異なるが、ここでは表面サンプリングによるものを与えた。堆砂に伴う流路幅の増加、河床勾配の緩和を考慮した計算とし、必要な河道断面形状、元河床勾配、堰堤高は既存資料から得た。計算期間は堰堤完成年から調査日までとし、アメダスの時間降水量データが存在しない1980年以前のは便宜的に1980年の流量を繰り返し与え計算した。

エネルギー的考察 Bagnold の stream power を用いた流砂量式は

$$q_B = \frac{1}{(\sigma - \rho) g \mu_R} e_b \tau_0 U \quad (2)$$

となる。ここで、 $q_B$  は単位幅掃流砂量、 $\mu_R$  は土砂と河床の動摩擦係数、 $\sigma$  は土砂の密度、 $\rho$  は水の密度、 $\tau_0 U$  は土砂流出により流水が損失するエネルギー(stream power)、 $e_b$  は stream power のうち土砂の移動に利用されるエネルギーの効率であり、さらに stream power は以下の式で与えられる。

$$\tau_0 U = \rho g q l \quad (3)$$

ここで、 $q$  は単位幅流量、 $I$  は河床勾配である。以上の結果を用いて、式 1, 2 の  $q_b$  を等置し、 $e_b$  を求めた。

3. 結果と考察

流砂量計算によって求めた堆砂量推算値  $V_{s_{calc}}$  と既存資料の計画貯砂量と堆砂率から求めた堆砂量実測値  $V_{s_{obs}}$  との比を図-2 に示す。これによると  $V_{s_{calc}}$  が

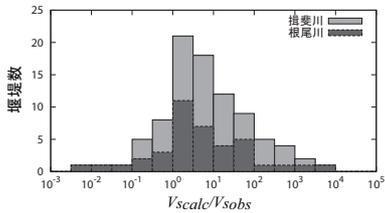


図-2 堆砂量推算値  $V_{s_{calc}}$  と堆砂量実測値  $V_{s_{obs}}$  との比。

$V_{s_{obs}}$  より大きい堰堤が多いことがわかる。それらは、満砂状態の堰堤では土砂が下流に流れている可能性があるため、計算の間違いと決めつけることはできない。これについては今後検証する必要がある。計算結果の中で  $V_{s_{calc}}$  と  $V_{s_{obs}}$  との比が  $10^{-0.5} \sim 10^{0.5}$  に収まるもので、下流への流出が少ないと考えられる未満砂状態のものを妥当な計算結果とし、それらの例を図-3 に示す。流路幅の増加、河床勾配の緩和が考慮されているため、堆砂に伴い土砂流出量は減少していき、累積堆砂量の増加も減少する傾向がみられる。図-4 は  $e_b$  と無次元 stream power  $q^* I_*$  との関係である。ここで、 $q^* = q_* \sqrt{\sigma/\rho - 1}$ 、 $q_* = q / \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d^3}$ 、 $I_* = I(\sigma/\rho - 1)$  である。これらのプロットは流量、粒径、断面形、勾配といった土砂流出特性因子を  $e_b$  に内包することで簡易に説明されることを表している。一番右側の線が最終年の応答を示しており、堆砂が進行するにつれ、 $e_b$  を大きくするためには堆砂初期段階と比べより大きな stream power が必要となるのがわかる。図-5 は調査資料に基づいた各砂防堰堤集水域の比堆砂量  $q_s$  と、 $e_b$  を堆砂期間で時間積分したものを堆砂期間で除した平均効率  $\bar{e}_b$  との比較である。ここでは、 $V_{s_{calc}}$  と  $V_{s_{obs}}$  との比が  $10^{-0.5} \sim 10^{0.5}$  に収まる堰堤について調べた。多くの堰堤で  $q_s$  と  $\bar{e}_b$  との間に対応がみられ、このことから、流砂量の計算が妥当であれば、 $e_b$  から  $q_s$  の予測が可能であることが示された。

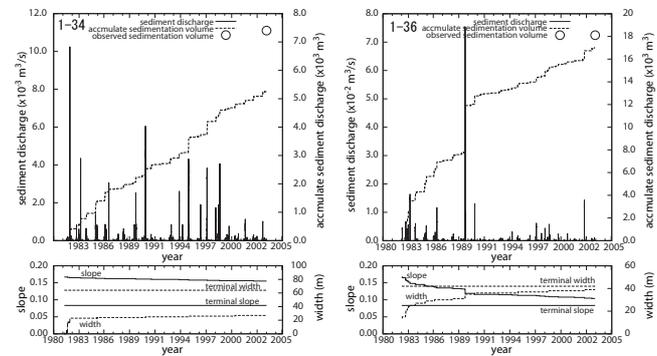


図-3 各砂防堰堤における計算による土砂流出量・累積堆砂量、堆砂量実測値  $V_{s_{obs}}$ 、および、流路幅・河床勾配の変化。

図-4 は  $e_b$  と無次元 stream power  $q^* I_*$  との関係である。ここで、 $q^* = q_* \sqrt{\sigma/\rho - 1}$ 、 $q_* = q / \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d^3}$ 、 $I_* = I(\sigma/\rho - 1)$  である。これらのプロットは流量、粒径、断面形、勾配といった土砂流出特性因子を  $e_b$  に内包することで簡易に説明されることを表している。一番右側の線が最終年の応答を示しており、堆砂が進行するにつれ、 $e_b$  を大きくするためには堆砂初期段階と比べより大きな stream power が必要となるのがわかる。図-5 は調査資料に基づいた各砂防堰堤集水域の比堆砂量  $q_s$  と、 $e_b$  を堆砂期間で時間積分したものを堆砂期間で除した平均効率  $\bar{e}_b$  との比較である。ここでは、 $V_{s_{calc}}$  と  $V_{s_{obs}}$  との比が  $10^{-0.5} \sim 10^{0.5}$  に収まる堰堤について調べた。多くの堰堤で  $q_s$  と  $\bar{e}_b$  との間に対応がみられ、このことから、流砂量の計算が妥当であれば、 $e_b$  から  $q_s$  の予測が可能であることが示された。

4. まとめ

堆砂過程が不明であった砂防堰堤集水域の比堆砂量を流出解析・流砂量計算によって推定した。さらに、この結果を基に、降水の位置エネルギーに起因する流出の運動エネルギーと流出土砂の運動エネルギーとの比である効率  $e_b$  を求め、流量、粒径、断面形、勾配といった土砂流出特性因子を内包させた。そして、平均効率  $\bar{e}_b$  と実測値に基づいた比堆砂量  $q_s$  との関係性を示し、流砂量計算が妥当であれば、 $e_b$  から  $q_s$  の予測ができる可能性を示した。

参考文献

- 1) 大橋慶介・都築恭子・藤田裕一郎：山地河川における土砂流出ポテンシャルパワーを用いた流出土砂量予測，河川技術論文集，第15巻，2009。
- 2) G. Lindstrom, B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, S. Bergstrom : Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, Journal of Hydrology, No201, pp. 272-288, 1997.
- 3) 中川博次・辻本哲郎：新体系土木工学移動床流れの水力，技術堂出版，p. 174, 1986.

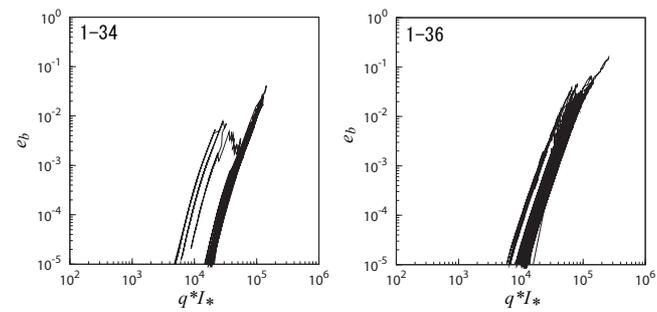


図-4 各砂防堰堤における  $e_b$  と無次元 stream power  $q^* I_*$  との関係。

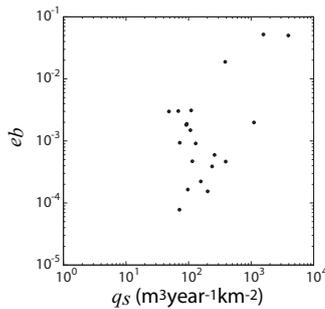


図-5 調査資料に基づいた砂防堰堤集水域の比堆砂量  $q_s$  と平均効率  $\bar{e}_b$  との比較。