

流砂観測データに基づいた流量と流砂量関係の分析および河床変動計算手法の検討

(一財)砂防・地すべり技術センター： ○鈴木 拓郎, 小林 拓也, 吉田 圭佐, 菊井 稔宏
 国土技術政策総合研究所： 内田 太郎, 利根川水系砂防事務所： 神野 忠広

1. 背景及び目的

山地河川の土砂移動について、河床変動計算による再現や予測が実施されている。掃流砂については、一般的に流砂量式を用いた計算手法が用いられているが、結果として得られる流出土砂量等が実態と整合しない場合がある。山地河川における土砂移動実態については、その観測の難しさから、未解明な点が多いこともその一因である。

一方、山地河川の掃流砂を計測する手法として、ハイドロフォンが提案されてきている。筆者ら¹⁾が提案した解析手法では、掃流砂量の時間変動を概ね定量的に計測可能であることが示されている。

そこで、本研究では富士川水系釜無川流域大武川の第50床固工における流砂観測所を対象地として、まず流砂量の実態を分析する。その上で、その実態を再現可能な河床変動計算手法について検討する。

2. 対象地

対象箇所の富士川水系釜無川流域大武川は流域面積72.0km²である。第50床固工観測所は釜無川への合流点から300mほど上流に位置する。河床勾配は約0.95°である。

本観測箇所では、水位計、濁度計、ハイドロフォンによる観測が実施されており、本研究では水位計、ハイドロフォンによる観測データを用いる。

3. 流砂観測データの分析

2011年から2012年の2年間のデータを用いた。2011年の9月には、紀伊山地で大きな災害をもたらした台風12、15号が発生しており、富士川流域においても大きな出水現象が発生している。特に台風15号で顕著であり、その前後の土砂移動特性を分析した。

図-1は、最大水位が0.3m以上の出水を抽出し、無次元掃流力と無次元流砂量の関係を示した図である。図には芦田・水山・高橋式の流砂量式²⁾を同時に示している。台風15号の発生前には、流砂量式が示す平衡流砂量よりも2オーダー程度小さい流砂量しか流下していなかったが、台風15号の発生時にはほぼ平衡流砂量と同等の流砂量となっていることがわかる。すなわち、台風15号時に大きな土砂生産現象が発生したことが推定される。それ以降、台風15号前の状態よりも流砂量の多い状態が継続しているが、時間の経過とともに少しずつ流砂量が減少していつていることがわかる。さらに時間が経過すれば台風15号前の状態へと戻っていくことが想定される。

以上のように、台風15号のような大きな土砂生産現象の前後では、その供給土砂量状態の違いにより流砂量に大きな違いが生じることがわかった。このことは、大武川流域のほぼ下流端に存在する観測所近傍の流砂量が、上流域の土砂生産場の状態に大きく支配されていることを示してい

る。そこで、流砂量の伝播状況を検証するため、図-2に2012年6月の出水時の流量と流砂量の時間変化を示す。図より流量の1つのピークに対して、流砂量のピークは2つ（流量ピークと同時に1つ、遅れて1つ）が存在することが分かる。このような流砂量の波形はパルス法による流砂量観測でも報告されている（中谷ら³⁾）。この流砂波形が生じたのは、当該地点での流砂量が地点近傍の河床材料と上流域からの伝播の両者で構成されるからであると考えられる。水位（掃流力）の上昇に伴って近傍の河床材料を侵食して形成される流砂波形は流量波形とほぼ追従すると考えられる。それに対して、上流域で生産・侵食された流砂量が出水によって下流に伝播することになるが、掃流砂は河床近傍で移動するため、移動速度は洪水の移動速度に比べて遅くなる。つまり、流量の伝播速度と流砂量の伝播速度に違いが生じることになる。この伝播速度の違いが2つめのピークが発生する要因だと考えられる。

したがって、このような流砂の伝播特性を再現するには河床変動計算において、流量と流砂量の伝播特性を考慮しなければならないと考えられる。

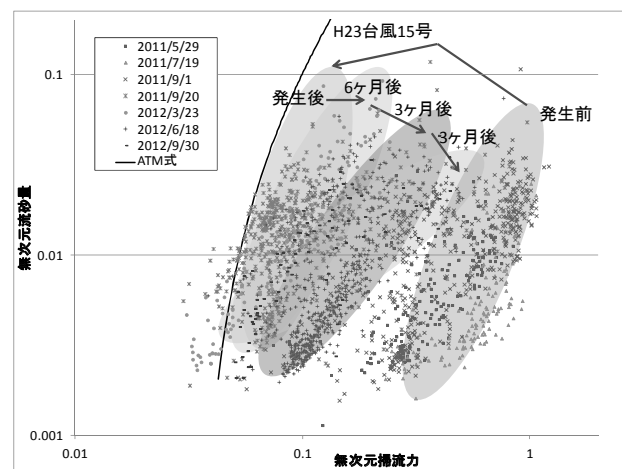


図-1 無次元掃流力と無次元流砂量の変化



図-2 2012年6月出水の流量と流砂量の時間変化

4. 河床変動計算

4.1 河床変動計算手法

上流域からの流砂の伝播を計算するために、土石流・掃流状集合流動・掃流砂の領域を連結した高橋ら⁴⁾の手法に準拠した手法を用いた。本研究では、高橋らの手法の不連続性を修正した鈴木ら⁵⁾の手法を基本とする。

本研究の手法では、上記手法の中、砂礫の連続式、侵食・堆積速度式における濃度の考え方を修正した。高橋らの手法では土石流、掃流状集合流動、掃流砂のそれぞれの領域の平衡濃度式を侵食・堆積速度式に適用しているが、掃流状集合流動、掃流砂の領域で高橋らの手法で用いられている平衡濃度式で算出される平衡濃度は、実は平衡体積濃度ではなく、平衡輸送濃度である。一方、侵食・堆積速度式に用いるのは、平衡体積濃度であると考えられる。また、連続式において体積濃度と輸送濃度は区別されていないが、本来は、区別して取り扱うべきである。そこで、高橋らの手法における平衡輸送濃度が正しいものとして取り扱った上で、その輸送濃度 c_t を満たすための体積濃度 c を、砂礫層に土石流の構成則、水流層にマニング則を適用する鈴木らの考え方をを用いて、次の関係から算出した。

$$\varphi_s = \frac{2}{3} r_s^{-2} \left[r^{\frac{3}{2}} (r - r_w) + \frac{2}{5} \left(r_w^{\frac{5}{2}} - r^{\frac{5}{2}} \right) \right] \cdots (1)$$

$$\varphi_i = \frac{2}{3} r_s^{-2} \left(r^{\frac{3}{2}} - r_w^{\frac{3}{2}} \right) (r_s - r + r_w) \cdots (2)$$

$$\varphi_w = \sqrt{\frac{K(c_s)}{g} \frac{h^6}{n} r_w^{\frac{5}{3}} \left(\frac{h}{d} \right)^{-1}} \cdots (3)$$

$$r = 1 + c \frac{\sigma}{\rho} \cdots (4) \quad r_s = 1 + c_s \frac{\sigma}{\rho} \cdots (5) \quad r_w = 1 - \frac{c}{c_s} \cdots (6)$$

$$c_t = c_s \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \cdots (7)$$

ここで、 $K(c_s)$ は抵抗を示す係数、 g は重量加速度、 n は粗度係数、 d は平均粒径、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 c_s は砂礫層濃度である。任意の c_t に対する c を解析的に算出し、侵食・堆積速度式 E 、砂礫の連続式に適用した。後者は下記のように体積濃度と輸送濃度を区別した形式になる。

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(c_t q)}{\partial x} = E c_s \cdots (8)$$

ここで、 q はフラックス、 c_s は堆積層濃度である。

4.2 河床変動計算結果

本計算は流砂の伝播状況のみを検証することを目的とした。対象現象は2012年6月出水の前半部である。上流の土石流生産域を計算開始点とし、流砂観測所で観測された水位観測結果から、流量に換算してそれを計算開始点から与えた。また、実際に流下した流砂量の総量を侵食可能深として計算河道全体に一律に設定した。

計算結果を図-3、4に示す。体積濃度と輸送濃度を区別しない従来の手法では、流砂量が水位のピーク付近に集中し、観測結果の波形とはかけ離れている。一方、本研究で用いた体積濃度と輸送濃度を区別したモデルでは、水位に追従するピーク波形が複雑な時間変化をした上に、観測結果と同じくらいのタイミングで2つめのピークが発生している。しかしながら、観測結果では1回目のピークの後、流砂量が大きく減少しているが、計算結果ではあまり減少せず、後半部の流砂量は全体的に大きくなった。

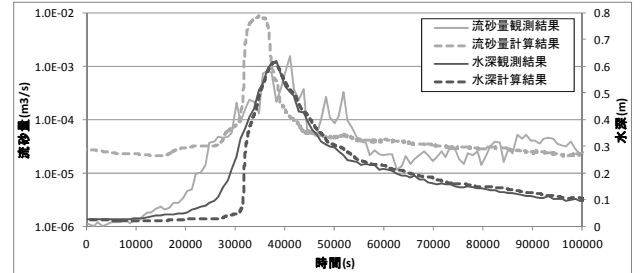


図-3 体積濃度と輸送濃度を区別しない従来手法の結果

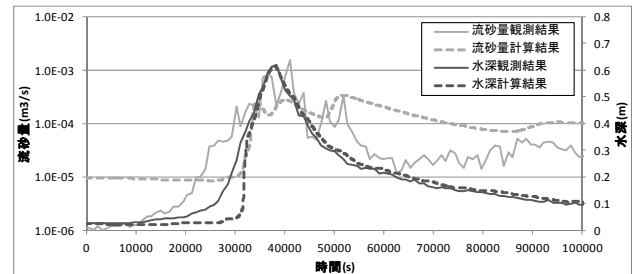


図-4 体積濃度と輸送濃度を区別する本研究手法の結果

5. 考察

土砂供給条件等、実際の山地河川での土砂流出現象は複雑である。本計算では、土砂の供給条件、粒径条件などの計算条件を単純に与えているので、本研究のモデルでも再現しきれない部分は存在した。しかし、観測結果で見られるような流砂量ピークが複数現れるような流砂波形は、従来の手法では不可能であるが、本研究のモデルでは再現可能であることが示された。計算条件の与え方には課題が残るが、土砂移動の再現計算には本モデルのように体積濃度と輸送濃度を区別することが必須であると考えられる。

6. 参考文献

- 鈴木ら：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証，砂防学会誌，Vol.66，No.1，p.4-14，2013
- 芦田ら：山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防，107号，p.9-17，1978
- 中谷ら：手取川上流域でのハイドロフォンを用いた流砂量観測及び解析，砂防学会誌，Vol.60，No.3，p.20-25，2007
- 高橋・中川：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，新砂防，Vol.44，No.3，p.47-52，1991
- 鈴木ら：土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究，新砂防，Vol.66，No.2，p.21-30，2013