

山地流域の土砂生産・供給・輸送過程を考慮した土砂流出モデル

京都大学大学院
京都大学防災研究所

○山野井一輝
藤田正治

1. はじめに

山地流域における土砂の移動は、土砂が新たに生産され堆積する土砂生産過程、それが河道に侵入し流送可能な状態に変化する土砂供給過程、最後に様々なモードで河道内を移動する土砂輸送過程の3過程に分類することができる。これまで、流域全体に適用が可能な土砂流出モデルは数多くの研究者より提案されている（例えば砂田・長谷川¹⁾、江頭・松木²⁾、高橋ら³⁾など）。これらのモデルでは、土砂輸送過程については詳細に検討されているものの、河道外部からの土砂の供給、および新たな土砂生産については、統計的な扱いに留まることがほとんどである。しかし、山地流域の上流部の土砂流出は土砂生産や土砂供給に支配され、河道の状態のみの情報からは土砂流出を再現することが困難であることが以前より指摘されている⁴⁾。そこで本研究では山地流域の土砂生産・供給・輸送過程を考慮した土砂流出モデルを提案し、岐阜県神通川水系足洗谷に適用した。

2. 土砂生産・供給モデル・輸送モデルとその結合

山地流域の土砂生産は、基岩が多様な外力を受けながら風化し様々な質の土砂に変化するという複雑な現象である。しかし、我が国の比較的標高の高い山地流域では風化の最後のステップとして凍結融解作用が支配的となることが知られている。そこで本研究では泉山⁵⁾の提案している地質毎の基岩土砂化モデルを用いて流域内の土砂生産量および生産タイミングの推定を行うものとした。本研究では地質図を参考に風化花崗岩等からなる軟らかい岩域と、風化砂岩、風化流紋岩等からなる硬い岩域、火砕流堆積物からなるガリー発達域とに分類し、それぞれに含まれる裸地およびガリー壁面に対して以下の式を適用し、年間の単位面積あたりの土砂生産量 D を求めた。

$$D = \begin{cases} f^{-1}(10) & \text{(Soft bedrock)} \\ d \cdot m & \text{(Hard bedrock)} \\ 0.01H & \text{(Deposition of pyroclastic flow)} \end{cases} \quad (1)$$

ここに $f(z)$ は凍結融解回数の深度分布を表す関数であり、 $f^{-1}(10)$ はその逆関数を用いて年間10回の凍結融解を経験する深度を表す。 d は生産土砂の粒径程度の定数、 m は基岩表面の年間凍結融解回数、 H はガリー壁面の比高である。本研究では全ての土砂生産が生産タイミングは、いずれの地質でも、表面が融解した時点とした。温度変化の計算には泉山⁵⁾と同様の方法を用いるものとした。生産された土砂はすぐに重力等の作用によって河道の脇部に落下し、裸地やガリーの幅と同じ幅を持つ三角柱形の崖錐を形成するものとした（図1）。このとき、崖錐の

断面積 $S_g(t)$ は以下の式で表される。

$$S_g(t) = \frac{1}{l} \int_0^t (Q_{pro}(t) - Q_{sup}(t)) dt + S_{g0} \quad (2)$$

ここに、 l は崖錐の幅、 $Q_{pro}(t)$ は土砂生産量、 $Q_{sup}(t)$ は土砂供給量であり、崖錐の侵食量に一致する。侵食量は下式から算出する。 S_{g0} は崖錐断面積の初期値である。

$$Q_{sup}(t) = \begin{cases} lH_s(t) \frac{dL}{dt} & \text{when } L > 0 \\ 0 & \text{when } L \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $H_s(t)$ は崖錐の高さ、 L は $L = B_s(t) + B_c(t) - B_v$ で表わされる関数であり、 $B_s(t)$ 、 $B_c(t)$ 、 B_v はそれぞれ崖錐、河道、谷の河道横断方向の幅である。河道幅はレジーム則に従うものとし、流量に応じて決定する。

土砂輸送モデルには、流域を単位河道および単位斜面網として表現する、江頭、松木¹⁾の河道貯留土砂モデルを用いるものとした。供給土砂は河床上昇量として扱い、Liu⁶⁾の交換層・遷移層・堆積層モデルを用いて混合するものとした。河道の流量は、表面流・中間流統合型 Kinematic wave 法による降雨流出解析によって算出した。各モデルは図2に示すように統合的に計算するものとし、データの変形・やりとりには GRASS-GIS を用いるものとした。

3. モデルの適用

本研究では岐阜県神通川水系を対象として適用を行なった。2012年の4月1日から12月1日までの流出期を対象として、土砂生産の計算は凍結融解の性質上、前年の秋から実施した。河床交換層の粒度分布は2012年と同程度の土砂生産が継続的に起こると仮定した上で2007年～2011年の降雨を用いてならし計算を実施して決定した。生産土砂には地質毎に3種類の粒度分布を与え、初期河床の粒度分布は現地観測⁴⁾を参考に決定した。

適用の結果として、任意の生産場における土砂生産量、任意の地点における流量・流砂量・河床変動量・河床材料の粒度分布・崖錐堆積土砂量を得ることができる。流域内の土砂生産量は8268m³、比土砂生産量に直すと約1200m³/m²/yearとなり、我が国の土砂生産が活発な地域の比流砂量の一般値⁷⁾（1000～2000程度）の範囲内になった。対象流域下流地点の計算結果と観測値との比較を図3に示す。本モデルでは融雪出水の表現ができないために期間前半は流量が過小評価されているが、主な土砂流出が起こる7月～8月の時期はある程度の精度で流量が評価されている。掃流砂量は観測値（ハイドロフォンによる定量観測）と比較すると過小評価となっているが、

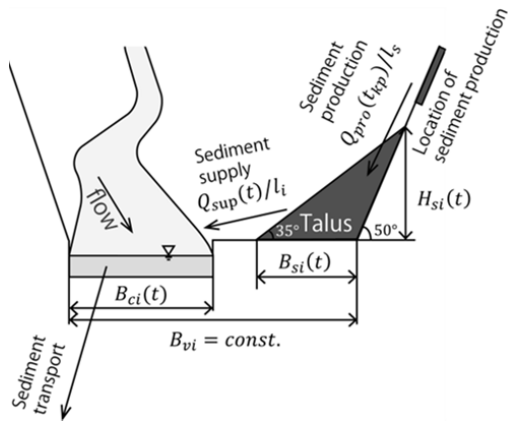


図1 土砂生産・供給・輸送の概要

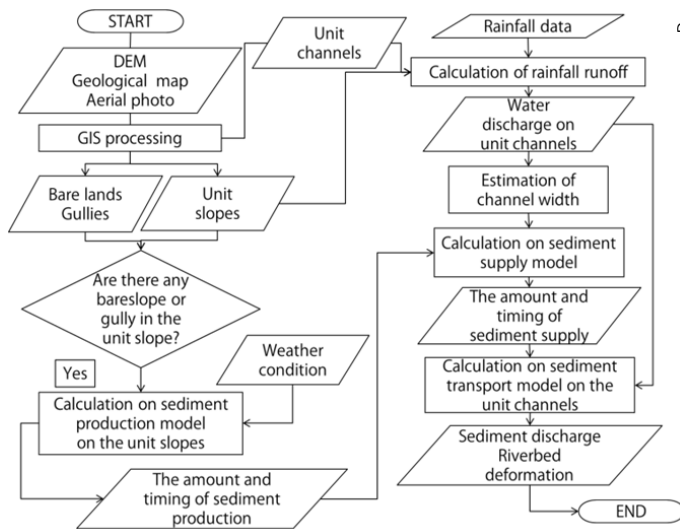


図2 モデルの統合化手法

観測精度が発展途上であることを鑑みて妥当な範囲内であると考えられる。本モデルでは、土砂生産・供給過程を考慮したため、土砂の供給による流域の流出特性の長期的な変動を考察することができる。図4は流域下流端における流量に対する流砂量の季節的な変動を月ごとにプロットした図である。4月から6月の間は顕著な土砂供給が起きないために流量に対する流砂量は減少するものの、7月の出水で土砂が供給されて増加することが分かる。さらに、その後の出水では顕著な供給が発生せず、徐々に流量・流砂量ともに減少していくことが示される。この結果は、山地河道の土砂流出に季節的な変動が生じるという既知の知見に一致していると考えられる。

5.おわりに

本モデルによって山地流域の土砂流出の各過程を考慮した流出モデルが提案された。これにより、山地流域の土砂流出が定量的に計算され、山地流域特有の流出特性が定性的に表現されることが確認された。現段階では定常的な土砂生産のみを対象としたモデルであるが、本手法を応用し、既存のいくつかの数値モデルと組み合わせ

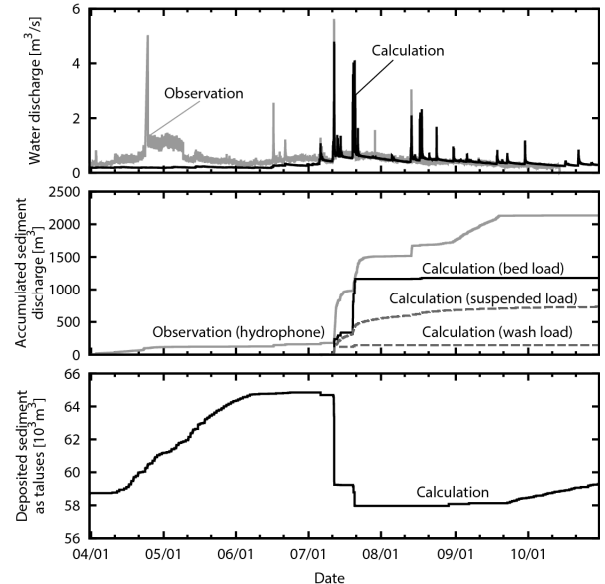


図3 計算結果（流量・累積流砂量・堆積土砂量）

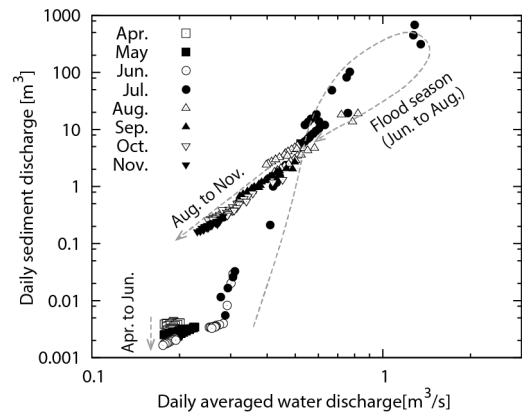


図4 下流端における流量—流砂量の季節変動

ることで、斜面崩壊等の突発的な現象を考慮することのできるモデルが構築可能であると期待される。

【参考文献】

- 1)砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.485, pp.37-44, 1994
- 2)江頭進治, 松木敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740, 2000
- 3)高橋保, 井上素行, 中川一, 里深好文: 山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測, 水工学論文集, 第45巻, pp.841-846, 2001
- 4)澤田豊明: 山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学学位論文, 1985
- 5)泉山寛明: 風化基岩における凍結融解による土砂生産プロセスとそのモデル化に関する研究, 京都大学学位論文, pp.99-149, 2012
- 6)B. Y. Liu: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels. Thesis presented to Kyoto University, 1991.
- 7)芦田和男, 江頭進治, 中川一: 21世紀の河川学, 京都大学学術出版会, 2008