

大規模土砂生産による流域水系河床変化の伝播特性について

On Propagation Characteristics of River Bed Variation due to Large Scale Sediment Yield

砂田憲吾*・塩沢みゆき**・加藤克夫***

By Kengo SUNADA, Miyuki SHIOZAWA, Katsuo KATOH

This study deals with the effects of the sediment yield on topography of stream or river channels. In this paper, the result of study on propagation characteristics of river bed variation due to large scale sediment yield by using a synthetic sediment routine model in a mountainous river system is presented. After validating the model using the field measurement data, the result of some sets of computer simulations of river bed variation in the conditions of idealized severe sediment yields were carried out. The effects of various conditions of the simulations such as treatment of debris flow and location of observation point, and tendencies of river bed variation are discussed.

Keywords: sediment yield, river bed variation, computer simulation

1. はじめに

斜面や山腹の崩壊による土砂生産に関する研究は、現象の複雑さを反映して現地の調査・観測から実験的理論的研究までさまざまなアプローチがとられてきている。これまでに土砂生産の形態や分類、発生メカニズムや発生条件の解明に関わる基礎的な研究が続けられており、多くの重要な成果が得られている¹⁾。一方、生産された土砂は、それら生産地域より下流の河道や河床に供給土砂量として決定的な条件を与える。その観点から、土砂生産そのもののメカニズムの解明と共に、土砂生産が及ぼす下流域への広範な影響が明らかにされる必要がある。下流への影響を主に河床の変化と考えるなら、その変化の規模や伝播または時間遅れなどの特徴を調べるのが重要となる。この場合、現実的な議論は土砂生産が発生する地域を含めた溪流・支川河川水系全体の関連のもとに進められなければならない。

本研究は、著者らが検討してきている水系土砂動態モデルを用いて、特徴的な大規模土砂生産の設定のもとで支川・本川河床変動に関するシミュレーションを行い、河床変動の伝播特性を中心に検討したものである。はじめに、国土数値情報による擬河道網を基本とした土砂動態モデルの検証を行ったのち、流送土砂形態の違い、支川観察区間の違いによる下流河川の土砂動態の規模や時間的な変化を考察する。

* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

** 学生員 山梨大学大学院 工学研究科土木工学専攻
(同 上)

*** 正会員 建設省富士川砂防工事事務所
(〒400 甲府市富士見2-12-16)

2. 土砂動態モデルの概要²⁾

2. 1 流域地形のモデル化

検討対象としたのは富士川支川早川水系(流域面積 509.1 km²)である。早川水系は中央部を糸魚川-静岡構造線が通り、脆弱な地質に伴う多数の崩壊地が分布し、多量の土砂を富士川に供給している。

流域内における各種分布情報を直接考慮するため、国土数値情報の標高データ(KS-110-1)を用い、落水線により流域斜面特性と擬河道網を近似的に表現する(図-1に擬河道網を示す)。擬河道は幅広矩形断面として河道を構成し流域面積 A(km²)より推定河幅 B(m)を与える²⁾。

$$B = B_0 \cdot A^k \quad \dots \dots (1)$$

ただし、B₀、k はパラメータで、ここでは B₀=10.0、k=0.5 とした。

2. 2 モデルの基本構成

時間単位の降雨強度とその時系列を与え河床変動を計算していく。顕著な河床変動は日雨量 100 mm 以上の降雨に対して起こるとしてその期間を抽出し、流域内 3 ヶ所の時間降雨データを用いて流出関数法により流量を算定して、区間等流の近似により掃流力等を計算する。単位面積当たりの土砂生産量 V(m³/km²/hr)を降雨強度 r(mm/hr)と斜面勾配 θ の関数として現地資料³⁾を参考に次式で与えた。

$$V = \beta \cdot \theta^{0.5} \cdot r^2 \quad \dots \dots (2)$$

β(hr/m)は崩壊の程度を表す係数として計算結果から逆推定し、β=0.01 を用いた。流水による土砂輸送は河床勾配による土砂輸送形態区分により流砂量を計算し、各河道で連続式により河床変動計算を行う。河床勾配の変化は実河道に相当する擬河道で起こるとし、その変化を時間単位で考慮する。

2. 3 連続型流砂量式の導入と取り扱い

土砂輸送を河床の傾きによる土石流、掃流、浮遊などの土砂輸送形態区分を考えず、まずその量だけを全ての範囲にわたり時間的に連続的に表すことができないかを考え、Brown 型の流砂量式(以降連続型と呼ぶ)の適用を仮定した。土石流などの間欠的な現象を連続的に扱ってよいかどうかについては後に検討する。

ところで、実際に流送され得る土砂は土砂生産に影響され、流水の輸送能力により定まる、いわゆる平衡流砂量は河床での十分な土砂堆積量が前提となる。土砂流送過程は個々の河道区間の土砂生産量と河道区間の持つ輸送力との関係において捉えられるべきものであり、例えば、堆積土砂や生産土砂など河床に存在する土砂が輸送力を超えた場合、生産された土砂は流水の輸送能力に応じて流送されるとしてよい。一方、超えない場合は河床は侵食されていくことになるが、上流端ではしばしば岩盤露出であると考えられるため侵食が起こらないように流送土砂を制限し、存在する土砂だけを流送するとして扱う必要がある。支川下流や本川では、岩盤の上に土砂が十分堆積しているとして平衡流砂量の扱いができよう。つまり、地形により流送する土砂量を制限する係数：流送係数 K (0 ≤ K ≤ 1) を考え、流送される土砂量を算定していく。ここでは K は簡易に流域面積により定義することにした。

2. 4 検証

連続型流砂量式を導入したモデルで、まずは流域内の土砂動態が再現されているかを検討し、その上で大規模土砂生産によるシミュレーションを行うことにする。「モデルの検証」としては本川の一部の約 36km の測量結果と計算値を比較してきたが、流域全体にわたる土砂動態現象を本川の河床変動だけで評価するのは十分とはいえない。それは、これまでの研究⁴⁾により短期間では上流の土砂の影響は本川にまで現れないこと、資料不足から他の区間や支川での実測による検証は考えにくいこと、さらに計算過程においても河床変動は河床勾配、標高などの地形条件の初期設定の影響が大きく、モデルが同期していない国土数値情報に

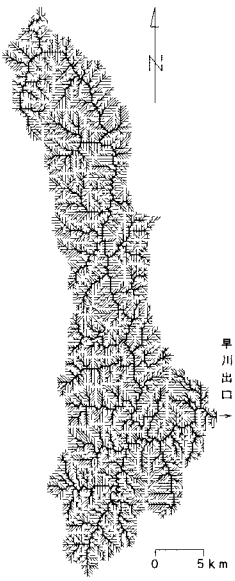


図-1 擬河道網

に基づいていることなどによる。そこで、支川単位毎の早川流域の実測による流出土砂量との比較、他河川の比流砂量との比較を行い、全体的にみても支川単位に細かく見ても整合性がとれているかを検証した。

(a)本川での河床変動計算結果と測量結果の比較による検証

早川水系に連続型流砂量式を導入した土砂動態モデルを適用し、富士川との合流点付近の早川橋から西山ダムまでの本川(約 36 km)を対象に河床変動測量の結果と比較した。対象期間は昭和 56 年 3 月から昭和 58 年 2 月である。図-2 に計算結果を示す。これより計算値の 3、9 区間の河床低下など、実測値に比べて 1 区間のずれがあるものの比較的良く再現されており、多少計算値の上昇・低下の程度の激しい区間もあるがその傾向は実測に類似している。計算は擬河道で行っているため、実際の河道との距離、位置のずれは止むを得ず、測量結果との比較では、区間ごとに一致しているかではなく距離方向における河床の上昇・低下の傾向を判断の基準に考えれば、本川においてはおおむね妥当な河床変動計算結果が得られていると考えられる。

(b)流出土砂量による検証

流出土砂量と流域面積の関係は図-3 のようになる。実測値は昭和 57 年の台風 10 号、18 号の流出土砂量を空中写真判読、実測河床縦横断面測量、現地踏査などにより推計されたもの⁹⁾である。また一般に洪水時の一地点における wash load を含む浮遊砂量 Q_s は河川流量の 2 乗にはほぼ比例することが得られていて次式で表される。

$$Q_s = \alpha \cdot Q^2 \cdots \cdots (3)$$

ここに、 Q_s : wash load を含む浮遊砂量 (m^3/s)、 Q : 河川流量 (m^3/s)、 $\alpha = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$ である。 $Q_{s,m}$ は $\alpha = 10^{-7}$ 、 $Q_{s,max}$ は $\alpha = 6 \times 10^{-6}$ として計算流量から推定したものを参考程度にプロットした。流域面積が大きくなると流出土砂量は多くなる傾向があるが、量は実測値に比べて 1 オーダー以上の差がある。一方、浮遊砂量の推定値はかなり大きい。浮遊砂量の大部分が河床構成に関係しない wash load によって占められているという点があり、計算値には wash load が含まれていないのでその量の影響があることが考えられる。水山ら⁹⁾によれば、流出土砂の粒度構成はそのかなりの部分が wash load で残りの半分以上が浮遊砂、そしてその残りが掃流砂で構成されているのが一般的であるとされているので計算値と実測値の違いは納得される。

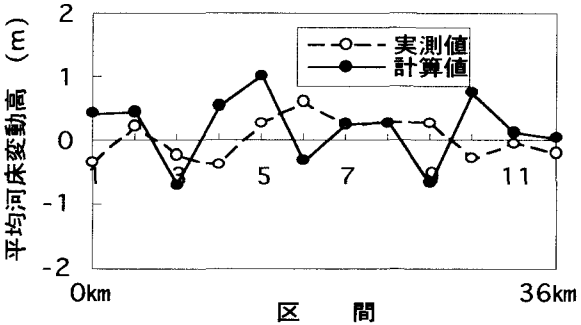


図-2 河床変動計算結果

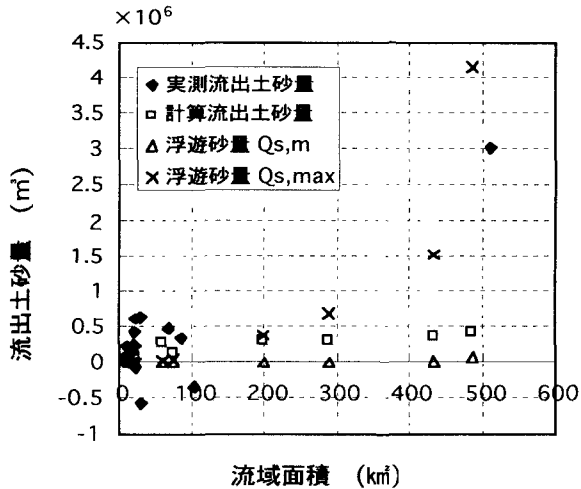


図-3 流出土砂量と流域面積の関係

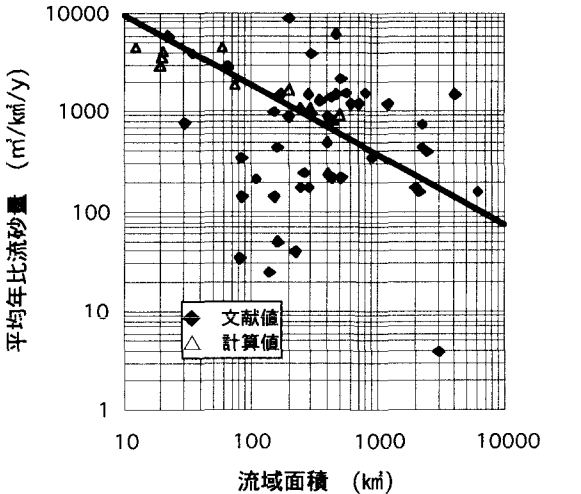


図-4 平均年比流砂量と流域面積の関係

(c)比流砂量による検証

全国の貯水池堆砂資料から主要河川、水系ごとに各流域の流域面積と平均年比流砂量の関係を示した図⁷⁾上に早川流域における支川や本川の計算値をプロットしたのが図-4である。従来から $q_s \propto A^{-0.7}$ の関係が指摘されているが図中の直線はこの関係により与えられ、計算値がほぼ従っていることが認められる。

3. 土砂生産の河床変動への伝播シミュレーション

3. 1 検討方針

流域内の土砂動態の基本的な特性の把握のためにシミュレーションを行い、山地大規模土砂生産の河床変動への伝播特性について検討した。方法は土砂生産域で仮想的な降雨による大規模な土砂生産を初期段階で起こし、その土砂の影響が年月を経て支川、本川にどのように伝播していくかを考察した。全川でシミュレーションを実行し、ここでは特に特徴が顕著に現れた図-5の(a)に示す春木川と内河内川を考察の対象とした。大規模土砂生産は、全2649(hr)のうち初期の51~93(hr)の一雨のみに発生するとして、(2)式の β を通常は $\beta=0.01$ とするが $\beta=50.0$ として算定する。ここで土砂生産域とは図-5の(b)に示すような本川から2km以上上流の地域と仮定し、土砂生産が実際にこの場所に限定されているというわけではないが模擬的に設定した。また現象を長期的に眺めるため、シミュレーションでの降雨入力は昭和56年から63年までの実際の降雨について日雨量100mm以上のものだけを抜き出し、これを3回繰り返すことにより21年間分のデータとして仮想的に設定した。計算の対象とするのは図-6に示す支川上流、中流、下流域、本川の4箇所である。それぞれ4区間平均とした。

特にここでは土石流のような突発的・間欠的な現象を連続的に滑らかに近似して扱うことが可能であるかどうか、両者を比較して検討するために、連続型シミュレーションと間欠型シミュレーションを行った。連続型とはすべての範囲にわたり土砂輸送を流水の掃流力に応じて連続的な流砂量として取り扱うもので、間欠型とは連続型の場合とはほぼ同等な総流砂量を時間的に間欠的に与えるものである。ただし、仮定としてこの現象は河床勾配 $\theta \geq 15^\circ$ の場所で発生し、一雨ごとに連続型で算定される流砂量とを最大降雨強度時に数時間に集中して与えるとする。

3. 2 シミュレーションの結果

図-7、8にそれぞれ春木川、内河内川の連続型シミュレーション結果を、図-9、10に春木川、内河内川の間欠型シミュレーション結果を示す。図-7によると連続型の春木川の(a)は土砂生産域であるため集中的な土砂生産の影響が直接現れており、その後は常に河床低下を示す。(b)は(a)と比べ規模は小さいが数時間遅れて著しく上昇し、その後は(a)と同様常に河床低下を示す。(a)から(b)へは土砂の影響が比較的早く顕著に現れており、上流で生産された土砂の影響がその規模を減少させながら下流に伝播している様相が認められる。(a)、(b)のような支川上・中流では急上昇し、後はゆっくり低下するという傾向にある。(c)、(d)では(a)、(b)と変化の傾向が異なっており河床変化が長期化し、土砂の影響による上昇が続いている。また、オーダーも1オーダーずつ減少している。(c)については800~1000hrで不明瞭ながら土砂の影響によるピークが認められる。他の支川についても同様に1000hr以上にピークが見られるものもあった。仮に年数に換算すると、類

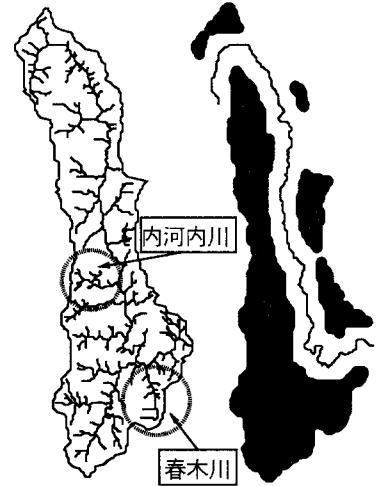


図-5 考察対象支川と土砂生産域の設定

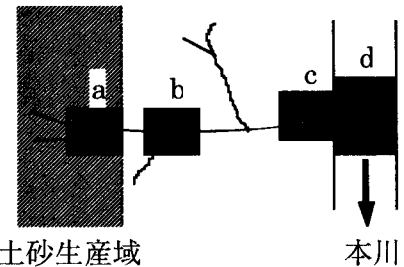


図-6 計算対象地域

似の降雨パターンが継続するとして8年程度と見ることが出来る。本川の(d)については河床上昇の傾向は認められるものの、(c)で見られたようなピーク、減衰の傾向は現れていない。これは土砂生産域より下流であるため他からの土砂供給が多く含まれる、ピークは下流ほど規模が小さくなるために変化が現れにくいなどの理由が考えられる。図-8の連続型の内河内川と比較してみると、基本的な伝播パターンは春木川と同様であるが本川(d)で若干の違いがある。これは河床変動が局所的に差があるからと考えられる。また、土砂生産の規模を変化させてみたが(a)、(b)ではそれに応じて上昇する変化が見られたが(c)、(d)ではほとんど変化がなかった。

図-9、10の間欠型では、(a)は傾向だけみると連続型と同様に顕著に上昇しその後ゆっくり低下しているが、上昇の程度が小さくなっている。これは(a)が急勾配の地形条件にあり、連続的に

扱った場合に比べて間欠的に与えられる流砂量の方がはるかに多量で、集中的な大規模土砂生産時にもそれを流し得るだけの輸送能力を持っているためと考えられる。両者に量的な差はあるが傾向パターンが似ている点は興味深い。(c)、(d)は連続型の場合と類似の傾向がある。特に(d)はほとんど同じで、これは支川下流、本川では連続型、間欠型に依らないと考えられる。ここで注目したいのは(b)で、(a)、(c)、(d)に比べて傾向が明らかに異なる点である。図-9の春木川では比較的連続型の傾向に類似しているが、図-10の内河内川はこれと異なる。これは連続性に従う区間と間欠性に従う区間とが混在し、連続型では多量の土砂供給があった場合は時間毎に与えられる輸送能力に応じた量だけで流送される土砂が決まっていたが、間欠型の場合は連続性の区間もあるが短期間に多量の土砂を輸送する間欠性に従う区間もあるため、いわば流砂量式の適用の接続点付近を含む区間で流砂の挙動を支配するメカニズムに差が生じていると考えられる。逆にいうと生産域とした支川上流、支川下流、本川では連続型の流砂量式を用いることが許されそうである。

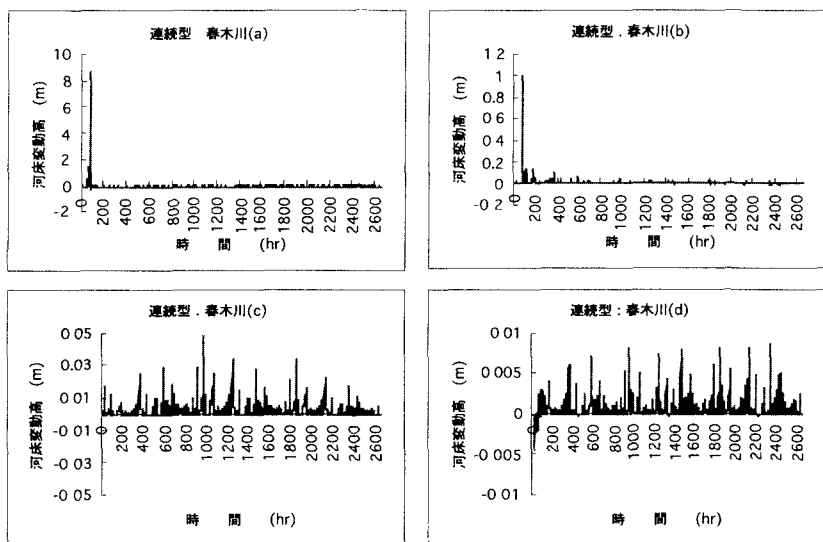


図-7 連続型流砂量の設定による春木川のシミュレーション結果

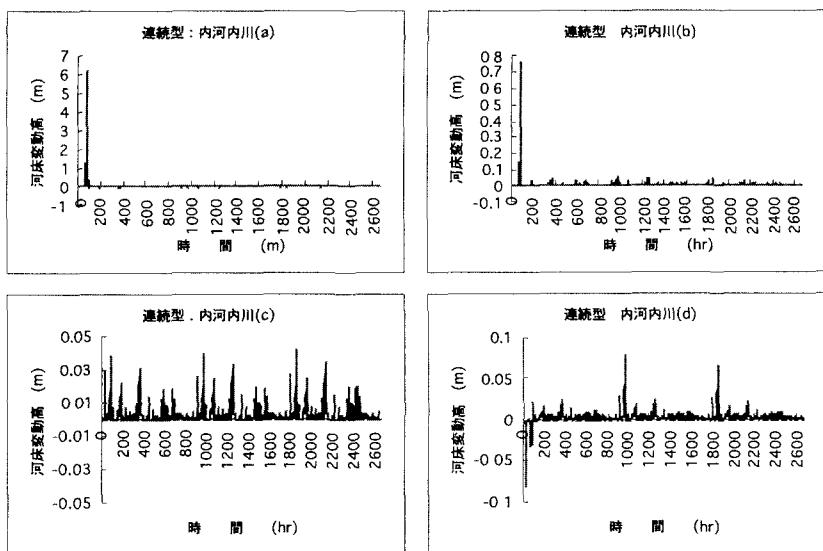


図-8 連続型流砂量の設定による内河内川のシミュレーション結果

4. おわりに

水系土砂動態モデルを用い、大規模土砂生産の河床変動への伝播特性について長期間にわたって同じ降雨パターンが継続すると仮定して検討した。結果を要約すると、(1)上流で生産された土砂の影響は、支川では類似の伝播パターンを示すが、上流、下流の位置により変化の傾向は異なる、(2)仮定的な降雨により、河床変動の伝播速度は推定できそうである、(3)土砂生産域とした支川上流、支川下流、本川においては連続型流砂量式を用いることが可能であるが、支川中流のような流砂量式の適用の境界では注意が必要である、などである。

上流で生産された土砂の影響による変化について最も基本的な方法で考察してきたが、場所の特定、平均的に見るか局所的にみるかも議論の余地のあるところである。生産域の設定を変えてさらにシミュレーションを重ねると共に土砂の影響を抽出して評価する方法を検討する必要がある。

【参考文献】

- 1)たとえば、沢田豊明・芦田和男：裸地斜面における土砂生産、水工学論文集、Vol.34, pp.355～360, 1990.
- 2)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/Ⅱ・26, pp.37～44, 1994.
- 3)高秀秀信・九津見生哲・藤沢 寛：水系における土砂動態システムについて、第27回水理講演会論文集、pp.767～772, 1983.
- 4)塩沢みゆき・砂田憲吾：山地流域における土砂生産の支川・本川河床変動への伝播、土木学会第50回年講概要集Ⅱ, pp.436～437, 1995.
- 5)建設省関東地方建設局富士川砂防工事事務所：昭和58年度災害調査業務委託報告書, 1984.
- 6)池谷浩・水山高久・安養寺信夫：大洪水時における土砂流出に伴う下流河道の河床変動と被害の算定手法、新砂防、Vol.40, No.1, pp.14～18, 1987.
- 7)芦田和男・奥村武信：ダム堆砂に関する研究、京大防災研究所年報, 第17号B, pp.555～570, 1974.

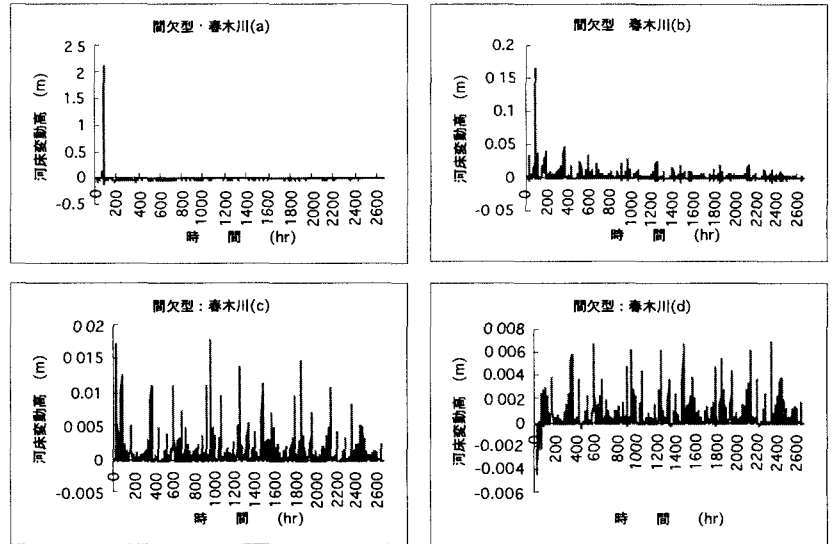


図-9 間欠型流砂量の設定による春木川のシミュレーション結果

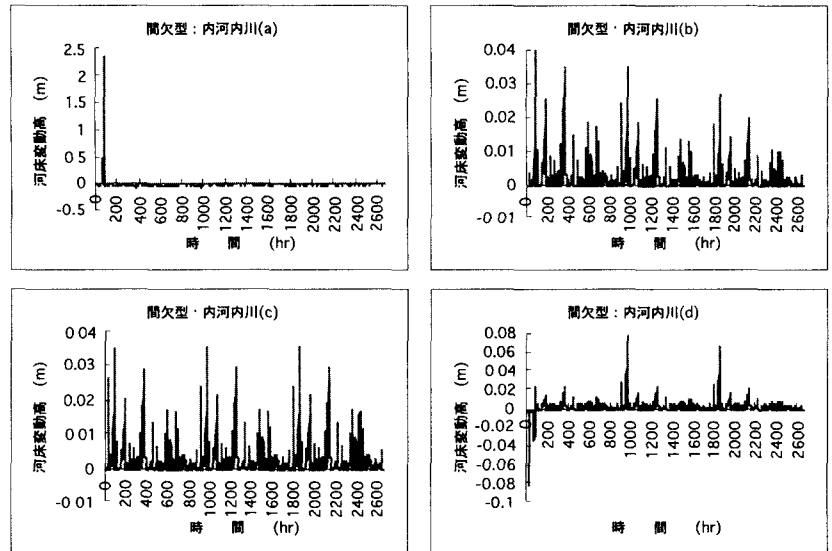


図-10 間欠型流砂量の設定による内河内川のシミュレーション結果