

数値地形情報に基づく水系土砂動態の モデル化とその問題点

Study on Development of the Sediment Routing Model based on Digital Elevation Map

砂田憲吾¹・柴田高教²・杉浦信男³

Kengo SUNADA, Takayuki SHIBATA and Nobuo SUGIURA

1. はじめに¹⁾

河川・土砂災害の防止、河川環境の整備、海岸の保全のために、水と土砂の流出について水系一貫の立場からより合理的に計画・管理する、いわゆる流域の総合的な管理が求められている。河道に注目すれば、従来からの区間的な河床変動解析の精度向上と共に、本支川からなる水系全体の土砂動態を一括して評価・予測する手法の開発をめざす必要がある。この問題は従来から指摘され^{2), 3), 4)}、主に河川上流支川流域を対象として土砂移動の実態把握が行われてきた⁵⁾。最近では、橋本ら⁶⁾や高秀ら⁷⁾が現地資料をもとに支川流域単位での土砂動態の把握を試みている。これらの研究では従来からの土砂輸送式を総合的に適用することにより、妥当な土砂収支の算定が可能であることが示されている。しかしながら、こうした方法では支川水系間相互の関係が考慮されにくく、出水履歴の時間的な経過の考慮が必ずしも十分ではないために、下流区間もしくは水系全体への接続や将来予測の点から課題も残されている。土砂動態に関わる土砂生産、輸送、堆積過程に関する現象や条件は多く、それらは流域内の斜面、植生、表層地質、河道などの特性とその分布状態に支配されるため、各条件の適切な評価方法が必要となる。

近年の国土数値情報をはじめとするGIS(Geographic Information System : 地理情報システム)の進展と共に、流域特性の分布情報を直接考慮しながら、中小流域規模での山腹斜面特性の評価に関していくつかの研究が進められている^{8), 9)}。筆者らも流域の土砂の管理と計画のために、これらの分布情報を用いたメッシュベースの物理モデルを基本として水系全体における土砂動態のモデル化を検討してきた^{1), 10)}。土砂動態に関係する現象は微細な過程を含む多様な時空間スケールで生じている。降雨強度やその空間分布、土砂の生産・流送過程やその間欠性さらには表層地質・地被状況の変化過程など厳密な記述が困難な現象が少なくない。水系のマクロ的な土砂動態の把握と詳細な現象記述とを敢えて結合させる立場からモデルを構成する場合、いくつかの問題が生ずる。たとえば、河道網の等価性、河道の諸パラメータの設定、解析時間スケール、平均化のための空間スケールなどであり、水理・水文条件に同期しない河床高についてのモデルの検証方法そのものなどである。本論文では、単なるモデルの提示ではなくモデル化の進め方を議論する立場から、これまでの基本モデルにおけるパラメータの感度、解析時間間隔、平均生産土砂量などの考察の上に立って、擬河道網の要素スケールの影響、河道の横断面形状、土砂生産域の分布の効果について検討した。

キーワード：河川管理、水系土砂動態、数値地形情報、擬河道網

¹ 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11 sunada@mail.yamanashi.ac.jp)

² 愛知県土木部 技師 (〒460-0001 名古屋市中区三の丸 3-1-2)

³ 建設省関東地方建設局富士川砂防工事事務所 所長 (〒400-0027 甲府市富士見 2-12-16)



図-1 早川水系擬河道網

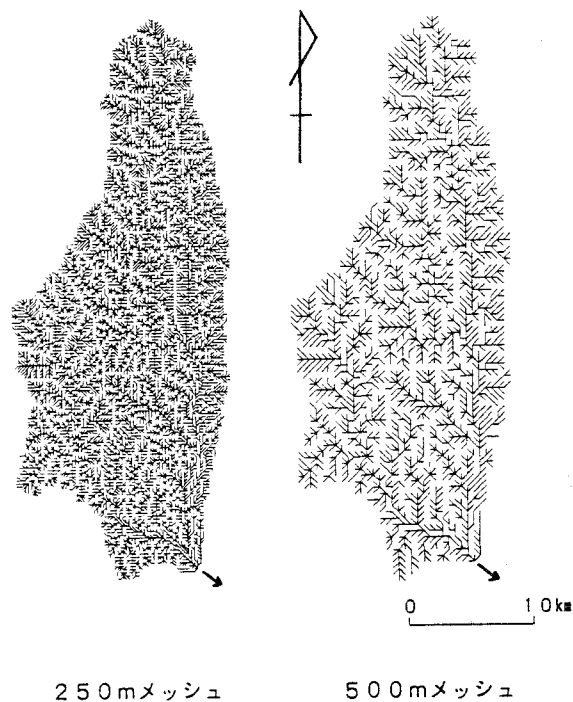


図-2 安倍川水系擬河道網

2. 土砂動態モデルの概要

2.1 流域地形のモデル化

対象としたのは富士川支川早川水系(流域面積509.1km²)と安倍川水系(流域面積518.1km²)であり、両水系とも糸魚川-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、多量の土砂を流出している。

流域内の各種地形情報を考慮するために国土数値情報の標高データ(KS-110-1)を用い、落水線理論により擬河道網を作成する(図-1、図-2に早川と安倍川の擬河道網を示す)。擬河道は幅広矩形断面とし流域面積 $A(\text{km}^2)$ (各格子点での集水面積)より推定河幅 $B(\text{m})$ を次式¹¹⁾で与える。

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

ただし、 B_0 、 k はパラメータで $B_0=10.0$ 、 $k=0.5$ とした。

2.2 モデルの構成

顕著な河床変動は日雨量100mm以上の降雨に対して起こるとし、その期間の降雨強度(時間単位)を抽出して流出関数法により流量を算定し区間等流の近似により掃流力等を計算する。各メッシュ点付近の単位面積あたりの土砂生産量 $V(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{hr})$ は現地資料⁷⁾をもとに次式で与える。

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

ここに、 r : 降雨強度(mm/hr)、 θ : 斜面勾配、 β : 土砂生産の程度を表す係数であり、早川流域での計算結果から逆推定した $\beta=0.01$ を用いた。土砂輸送にはBrown型の流砂量式を用い、図-3を参照しながら各河道区間格子点で連続式(3)により河床変動高を求める。

$$\Delta z = \frac{Q_{Bin} - Q_{Bout}}{A_t(1-\lambda)} \Delta t \quad (3)$$

ここに、 Q_{Bin} : 単位時間当たりの流入土砂量($\text{m}^3/$

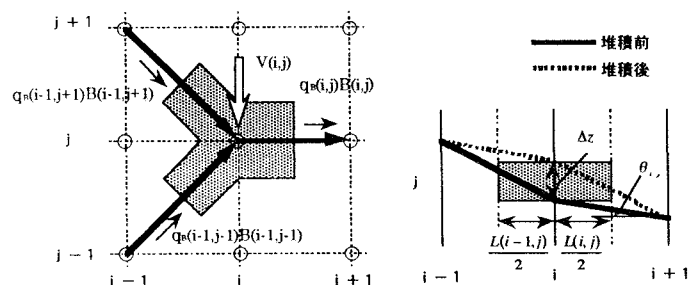


図-3 メッシュ点での土砂収支

s), Q_{out} : 単位時間当たりの流出土砂量 (m^3/s),
 A_t : 土砂堆積面積 (km^2), λ : 河床空隙率である。

3. 早川水系におけるモデルの検証

3.1 早川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

早川水系に土砂動態モデルを適用した。対象期間は昭和56年3月から昭和58年2月であり、その間の強雨のみの降雨時系列は図-4に示される。図-5は河床変動計算結果であり、本川下流区間約36kmを対象に河床変動測量の結果と比較されている。これより計算値の3, 9区間の河床低下は実測値に比べて1区間のずれがあるものの比較的良く再現されており、計算値の上昇・低下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、妥当な結果と考えられる。

3.2 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-6のようなになる。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, 実測河床縦横断測量, 現地踏査などにより推計されたもの¹²⁾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 (m^3/s) は河川流量 Q (m^3/s) を用いて $Q_s = \alpha Q^2$ ($\alpha = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$) のように経験的表される。 $Q_{s,m}$ に $\alpha = 10^{-7}$, $Q_{s,max}$ に $\alpha = 6 \times 10^{-6}$ として計算流量からの推定値は図中のプロットのようなになる。浮遊砂量の推定値はかなり大きい。池谷ら¹³⁾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。

3.3 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¹⁴⁾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-7である。従来から関係が指摘されている $q_s \propto A^{0.7}$ の直線にここでの計算値がほぼ乗っており, 妥当な結果となっている。

「モデルの検証」のために早川本川区間の測量結果と計算値とが比較されたが, 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¹⁵⁾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道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基づいていることなどによる。このため, 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

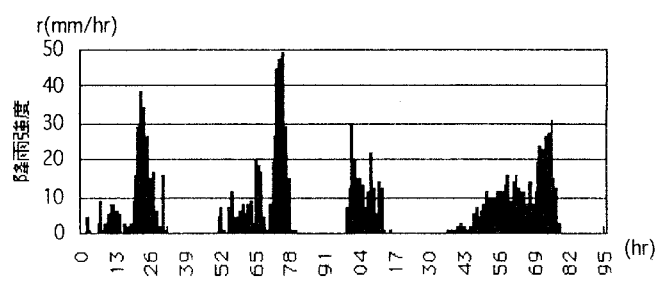


図-4 降雨強度時系列 (s.56.3~s.58.2)

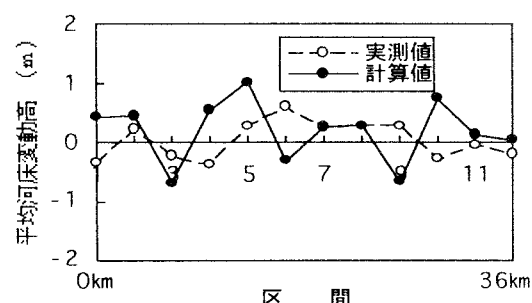


図-5 河床変動計算結果

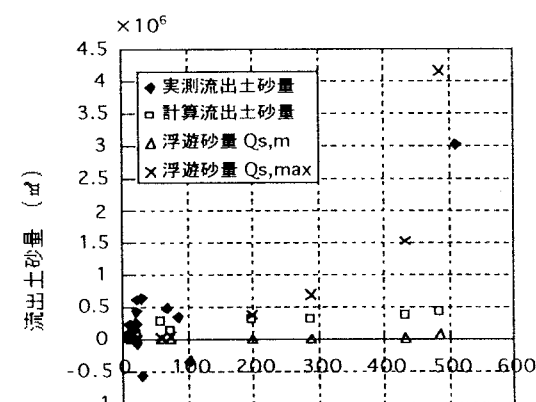


図-6 流出土砂量と流域面積との関係

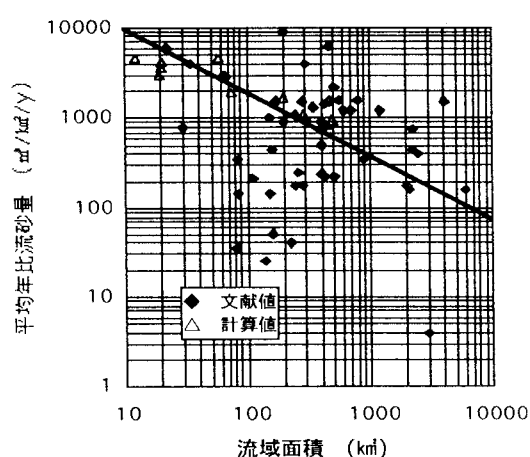
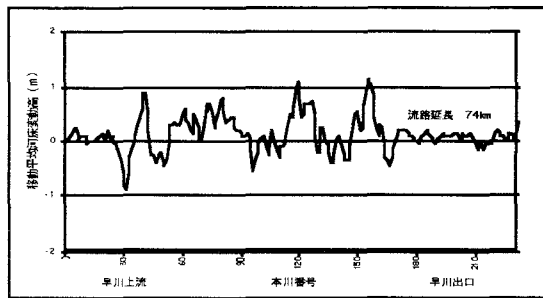
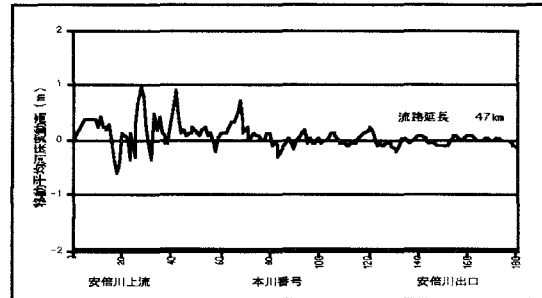


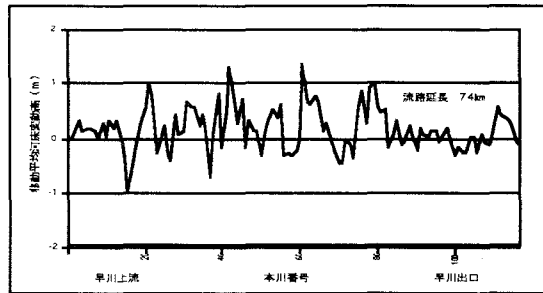
図-7 平均年比流砂量と流域面積の関係



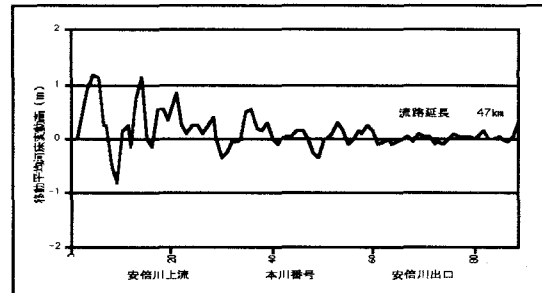
早川250mメッシュ (10点平均)



安倍川250mメッシュ (10点平均)



早川500mメッシュ (5点平均)



安倍川500mメッシュ (5点平均)

図-8 本川に沿う河床変動計算結果 (移動平均値)

量との比較も行い、流域の内部および流域全体での間接的な妥当性を得たが、これはいわば、“状況証拠”であり、さらに有効な検証方法を得る必要がある。

4. モデルの基本設定の違いによる河床変動への影響

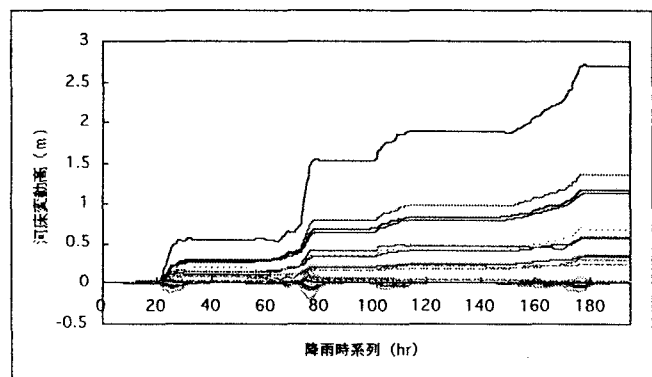
早川水系と安倍川水系において、水系土砂動態モデルにより河床変動計算を行った。早川水系での降雨強度時系列データ (昭和56年3月～昭和58年2月：図-4) を用いて検討した。以下では安倍川流域での結果を中心に考察する。

4.1 河道網スケールの違いによる河床変動計算結果の比較

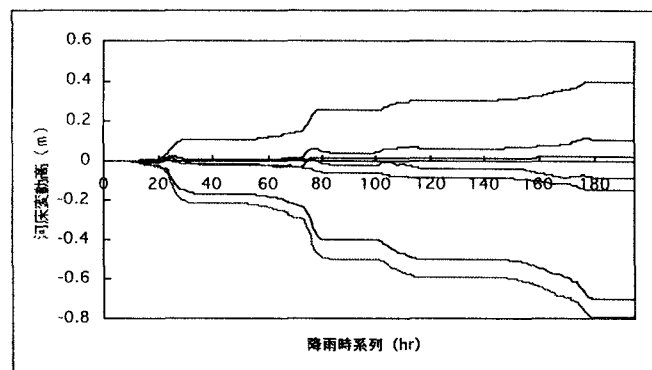
図-8は250mメッシュと500mメッシュの擬河道網による早川本川、安倍川本川の河床変動高を表したものである。各メッシュサイズによる結果を直接比較するのではなく、それぞれのサイズで2.5kmに相当する区間の移動平均で比べた。両河川とも一部に不一致の点も見られるが、変動高もその本川に沿う変動区間もメッシュサイズにより顕著な差はなく、この程度のスケールではモデル化にメッシュスケールの影響は小さい。

4.2 集水面積別による河床変動の検討

本川における河床変動については、平均化の傾向の強まる下流域ではあまり変化や差が見られなかった。そこで、主な土砂生産が起きている上流域



集水面積2km²の河床変動高の変化



集水面積10km²の河床変動高の変化

図-9 集水面積別河床変動高の変化 (安倍川)

(集水面積約10km²以下のメッシュ点)に着目し、河床変動高の時間経過の傾向について検討した。

図-9は集水面積 2km², 10 km²を持つ任意に抽出したいくつかのメッシュ点での降雨時間内(195hr)の河床変動を表している。河床はいずれの場合も時間が経過に伴って単調に上昇・低下を示し、現実の河床変動過程を示していないように見える。これは、擬河道網の河幅が集水面積により与えられており、流下に伴って順次増大することや、河幅が区間で一定であること、土砂生産量も単調な供給であることにより、顕著な河床の変動が再現されていないためと考えられる。なお、図-9の2km²の場合においては、上流端付近では河床が岩盤であることが多いことを考慮し、河床の洗掘・低下に制限を与えている。

4.3 河道断面形状の違いによる河床変動の検討

実際の山地河川では不規則な河幅が河床変動に大きく影響すると考えられる。本モデルでは区間一様、流下方向に河幅を漸増させているために現実の河幅を反映しにくい、多少とも河幅変化の効果を考慮するために、河道の形状をこれまで用いてきた長方形断面から(等脚)台形断面に変更し、河幅を時間的に変化させることによって河床変動にどのような影響が表れるかを検討した。

図-10では、河床変動に多少ではあるが河床の上下動が見られたが、全体的な様子はほとんど変わらず変動幅が若干増加したに過ぎなかった。本研究では経験的に側岸角度60°程度の設定で行ったものであるが、この程度の角度では長方形断面との差が出なかったためと考えられる。

4.4 土砂生産域の変化による河床変動の検討

ここでは、地域的に不均一な土砂生産量を設定することによって河床変動にどのような影響があるかを模擬的に検討した。土砂生産量については(2)式における土砂生産係数 β を次式で与える。

$$\beta = 0.01 \times 100^p, \quad p = \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \quad (4)$$

ここに、 x, y : 擬河道網における座標(m)、 a, b は土砂生産域の分布波長である。図-11は模擬的に与えた土砂生産量の分布を示す。この場合の計算結果図-12ではこれまでとは違い、明確な河床の変化が見られ土砂生産域の影響が顕著に現れている。 $a=1500\text{m}$, $b=2500\text{m}$ とすると、集水面積2km²のメッシュ点についてはその範囲が土砂生産域内であるためにこれまでと同様な河床高の変化を示すが、集水面積10km²では集水区域内に突出した土砂生産量の供給が反映された河床変動高となる。懸案地点の集水

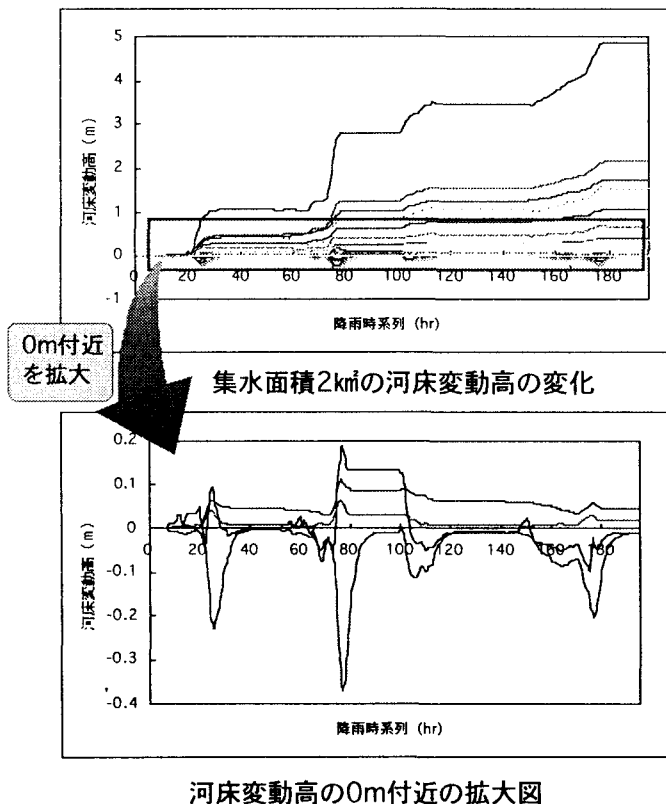
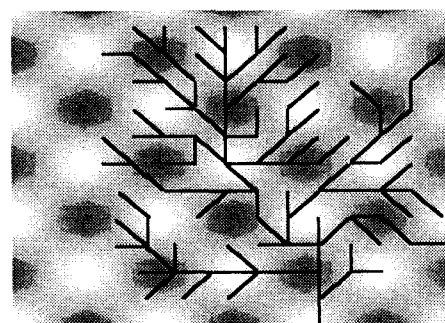
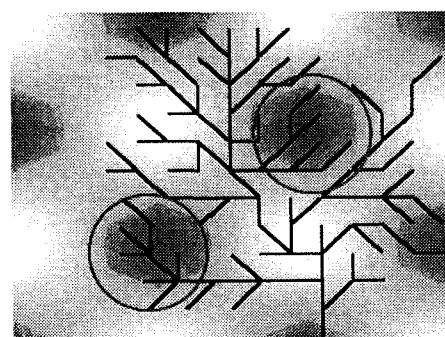


図-10 河床変動高の変化(河道：台形断面)



$a \times b$ が集水面積規模程度の場合



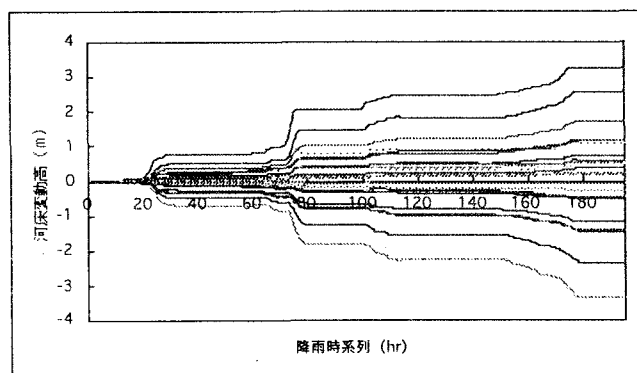
$a \times b$ が集水面積規模より大きい場合

図-11 土砂生産域分布スケールと集水面積の規模(式(4))

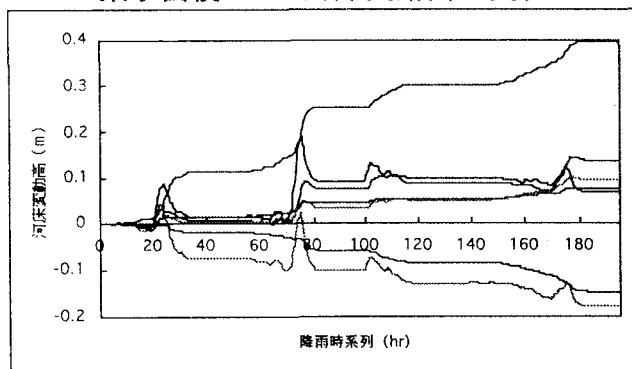
面積と土砂生産域規模との相対的な大きさが、河床変動の時間変化に大きく関係することが知れるが、現実はこのことをモデルに組み込むためには新たな検討が必要となる。

5. おわりに

早川流域で開発された土砂動態モデルは、安倍川に対しても基本的に妥当と考えられる河床変動の計算値を示し、1) 250m, 500mメッシュサイズの河道網を用いる場合、両者はほぼ同様な変動計算結果を示すこと、2) 河道断面形状を台形断面にすることによっては、計算法の顕著な改善が望めないこと、3) 土砂動態モデルは、土砂生産の多少域の設定に対応する河床変動を再現しうること、などが得られた。さらに完備したモデルのためには、不規則河幅の河道と“等価な河道”が得られる手法の開発、土砂生産域の分布の考慮が必要であり、土砂動態モデルとしての適切な検証方法の確立が不可欠である。



集水面積2km²の河床変動高の変化



集水面積10km²の河床変動高の変化

図-12 河床変動高の変化（土砂生産域の分布の場合）

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/Ⅱ-26，pp. 37-44，1994.
- 2) 矢野義男：新砂防計画論（予報），新砂防，Vol. 36，No. 3，PP. 2-9，1983.
- 3) 砂田憲吾：河川中流部における土砂の諸問題（1），（2），新砂防，Vol. 42，No. 6，PP. 4-10，Vol. 43，No. 1，PP. 54-59，1990.
- 4) 芦田和男：土砂移動現象の予測・制御概説，土砂移動現象に関するシンポジウム論文集，PP. 1-8，1992.
- 5) たとえば，建設省河川局・土木研究所：砂防河川の土砂動態に関する研究，建設省，技術研究会報告，PP. 525-565，1979，pp. 641-678，1980，pp. 563-582，1981.
- 6) 橋本 明・板口哲夫・野島博次：土砂移動モデルの作成について，第36回建設省技術研究会報告，PP. 855-860，1982.
- 7) 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.
- 8) 沖村 孝・中川雅勝：数値地形モデルのみによる表層崩壊発生位置予知の一手法，新砂防，Vol. 41，No. 1，1988.
- 9) 久保田哲也・正務 章・板垣昭彦：流域の任意地点における短時間降雨予測手法と土石流発生危険度判定図の開発，新砂防，Vol. 42，No. 6（167），pp. 11-17，1990.
- 10) 砂田憲吾・塩沢みゆき・加藤克夫：大規模土砂生産による流域水系河床変動の伝播特性について，水工学論文集，Vol. 40，pp. 843-848，1996.
- 11) 睦 旻校・小池俊雄・早川典生：分布形水文情報に対応する流出モデルの開発，土木学会論文集，第411号/Ⅱ-12，pp. 135-142，1989.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 芦田和男・奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，pp. 555-570，1974.
- 15) 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.