

数値地形情報に基づく水系土砂動態モデル の構成に関する検討

STUDY ON DEVELOPMENT OF THE SEDIMENT ROUTING MODEL BASED ON THE DIGITAL ELEVATION MAP

砂田憲吾¹・小松勝彦²・柴田高教³・杉浦信男⁴

Kengo SUNADA, Takayuki SHIBATA and Nobuo SUGIURA

¹正会員 工博 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)

²学生会員 山梨大学大学院工学研究科 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

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

⁴正会員 建設省関東地方建設局富士川砂防工事事務所 (〒400-0027 甲府市富士見 2-12-16)

In order to assess the sediment transport in a whole water system, a synthetic sediment routing model based on the river channel networks obtained from the digital elevation map was examined. The sediment routing model was applied to the Haya River basin and the Abe River basin. Through the application using two kinds of scale of channel network element, and the different catchment area, effects of these elements on the simulation of river bed variation were discussed. The results show that the river bed variation in the two kinds of scale, 250m mesh and 500m mesh, shows about the same behavior except upper part of the basin, and the model has a possibility to be applicable.

Key Words : sediment routing model, digital elevation map, pseudo channel network,
river system, river planning

1. はじめに

河川の管理においては河道のみならず、広く流域全体を眺めた視点が必要とされるようになってきている。河道に限っても山地から中下流、海岸に至る水と土砂の水系を一貫した管理が求められている。降水量の時間・空間的な偏在、多様な地表面条件、大小の人工的な施設は河道の基本的な条件、特に土砂の生産・流送・堆積の過程にさまざまな状況を生み出してきた。地球規模・地域規模の環境の変化も考慮しつつ、将来にわたるより合理的な土砂動態の把握と予測の手法を確立する必要がある。この問題は従来から指摘され¹⁾²⁾、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⁴⁾⁵⁾。橋本ら⁷⁾や高秀ら⁸⁾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。高秀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、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対への接続や将来予測の点から課題も残されている。

最近のGIS(Geographic Information System : 地理情報システム)技術の進歩と共に、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⁹⁾¹⁰⁾。これらの情報によれば流域内の斜面、植生、表層地質、河道などの特性とその分布状態を直接考慮できる適切な評価が可能となる。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¹¹⁾¹²⁾。この方法が確立されれば、今後さらに進展が予想される細密な地表面情報をもとに、既存資料の不十分な地域での土砂流出問題や、災害予測に有効な方策が得られることが期待される。

しかしながら、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おり、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あえて結合させる立場からモデルを構成する場合、いくつかの課題が生ずる。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等の取り扱いが問題となる。著者らはこれまでに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について検討してきた¹¹⁾¹²⁾。本論文ではさらに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、不規則な川幅の影響について考察を加えた。

2. 土砂動態モデルの概要

(1) 流域地形のモデル化

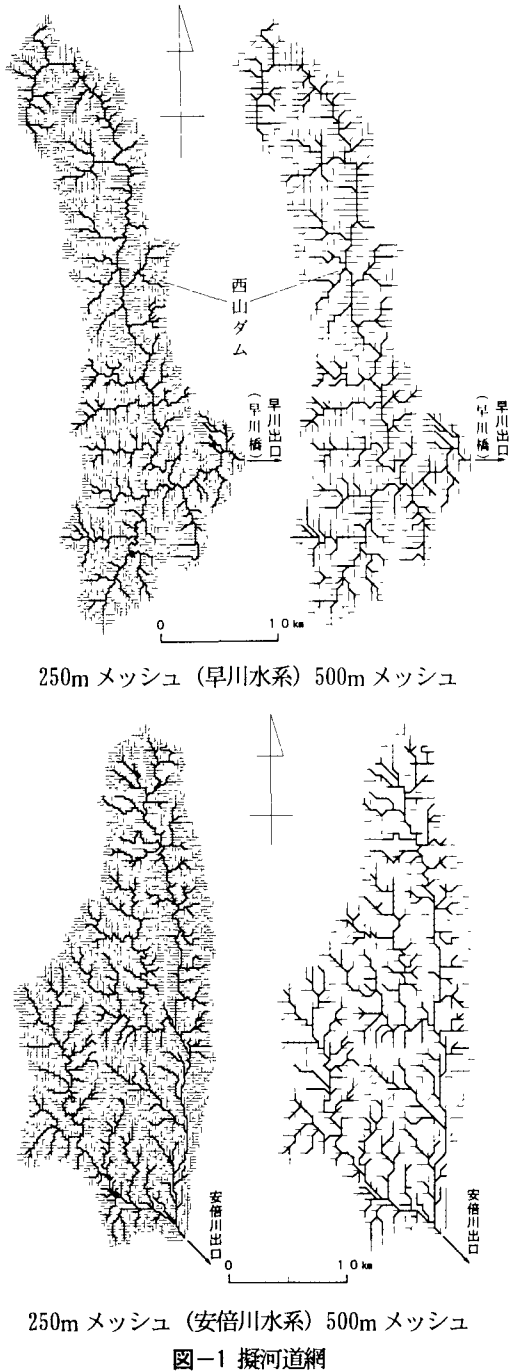


図-1 擬河道網

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、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)より推定川幅 $B(\text{m})$ を次式¹³⁾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) 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。土砂輸送には掃流砂および浮遊砂の一部が含まれるとされるBrown型の流砂量式を用い、図-2を参照しながら各河道区間格子点で連続式(4)により河床変動高を求める。土砂粒径 $d(\text{cm})$ は区間ごとの一様砂として扱い、Sternberg-物部の式をもとに次式で与える。

$$d = d_0 \theta^{2/3} \quad (3)$$

ただし、 d_0 はパラメータで実測値をもとに $d_0=18.3$ とした。

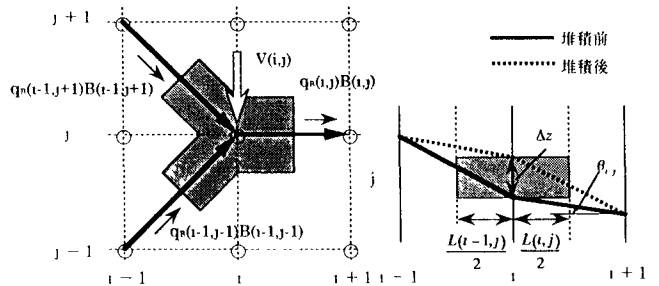


図-2 メッシュ点での土砂収支

$$\Delta z = \frac{Q_{Bin} - Q_{Bout}}{A_t (1 - \lambda)} \Delta t \quad (4)$$

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

(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

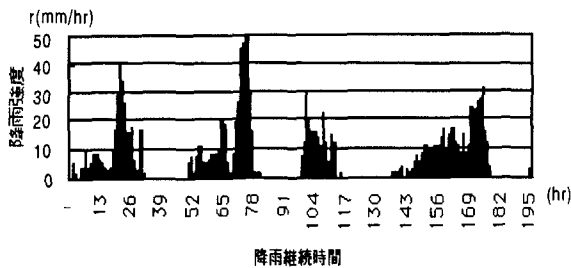


図-3 降雨強度時系列 (s. 56. 3~s58. 2)

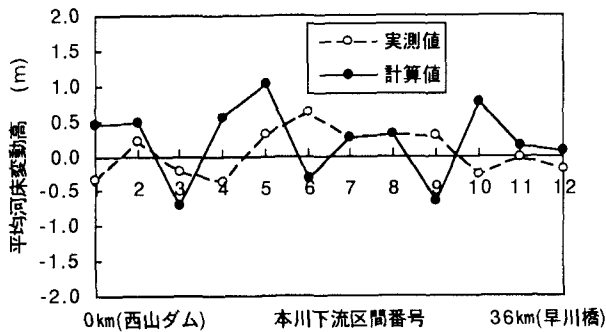


図-4 河床変動計算結果

早川水系に土砂動態モデルを適用し、モデルの基本的構成を検証している¹²⁾。ここではその結果を要約しておく。対象期間は昭和56年3月から昭和58年2月であり、その間の日雨量100mmを越える降雨時系列は図-3に示されるとおりである。この場合、一雨間の間隔の影響を調べるため、長期(20日間相当の)無降雨日を加えて計算を行った。結果は図-3の場合と大きな差がなく、洪水減水期間の影響は小さいことが知れた。なお一連の計算では野呂川の雨量観測所の観測値を流域全体に一樣に用いている。図-4は河床変動計算結果であり、図-1に示した早川の擬河道網で早川橋から西山橋までの本川下流区間約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。

(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-5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¹⁴⁾である。また一般に洪水時の一地点における浮遊砂量 Q_s (m^3/s) は河川流量 Q (m^3/s) を用いて $Q_s = \alpha Q^2$ ($\alpha = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$) のように経験的に表される。 $Q_{s,m}$ に中間値 $\alpha = 10^{-7}$ 、 $Q_{s,max}$ に最大値 $\alpha = 6 \times 10^{-6}$ として計算流量からの推定値を参考程度に示すと図中のプロットのようになる。浮遊砂量の推定値はかなり大きい。池谷ら¹⁵⁾によれば、流出土砂の粒度構成はそのかなりの

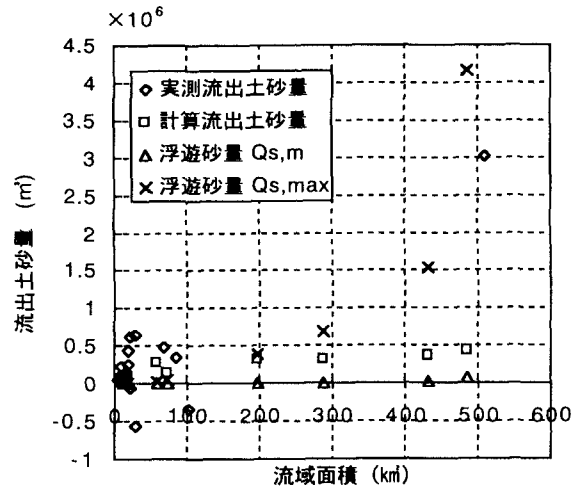


図-5 流出土砂量と流域面積との関係

部分がwash loadで残りの半分以上が浮遊砂、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。ここでいう実測流出土砂量とは、それらすべてを含めた全流砂量に対応する土砂量であるが、先に述べたように、土砂輸送にはBrownの流砂量式を用いており、計算値には掃流砂と浮遊砂の一部しか含まれない。したがってこれらの違いは、計算値に含まれない浮遊砂の残りとはwash loadが流出したと考えると納得できる。

「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¹⁷⁾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。実流域では容易ではないことかもしれないが、リモートセンシングほかの新技術を用いて、同時全域もしくは多点での土砂動態調査が望まれる。

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-3)を模擬的に用いて検討した。河床変動は降雨強度に強く依存される。2つの流域での適用結果を比較するため早川水系の降雨強度を安倍川水系にも適用した。以下では安倍川流域での結果を中心に考察する。

(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

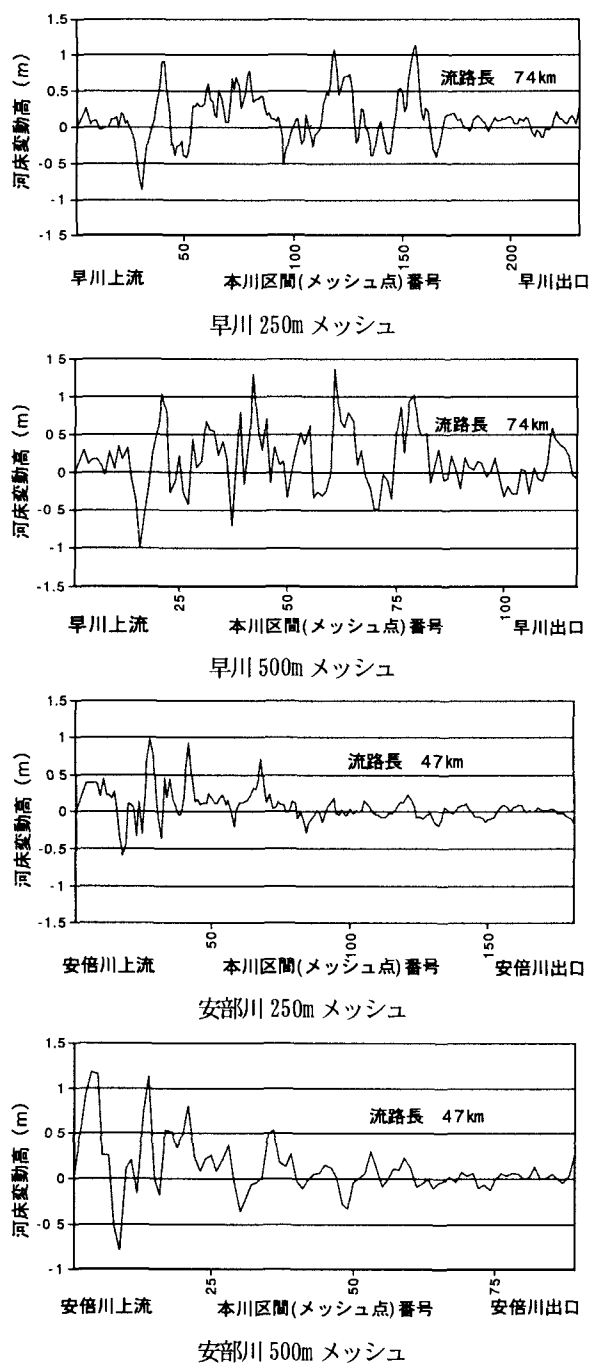


図-6 本川に沿う河床変動計算結果(移動平均)

図-6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。両河川とも局地的に不一致の点も見られるが、スケールアップの際に地形条件が変化することは止むを得ず、河床変動絶対値、および区間ごとのパターンなどに顕著な差はなく、モデル化における250mか500mかのメッシュスケールの影響は小さい。

(2) 集水面積別による河床変動の検討

本川に沿う河床変動については、平均化の傾向の強ま

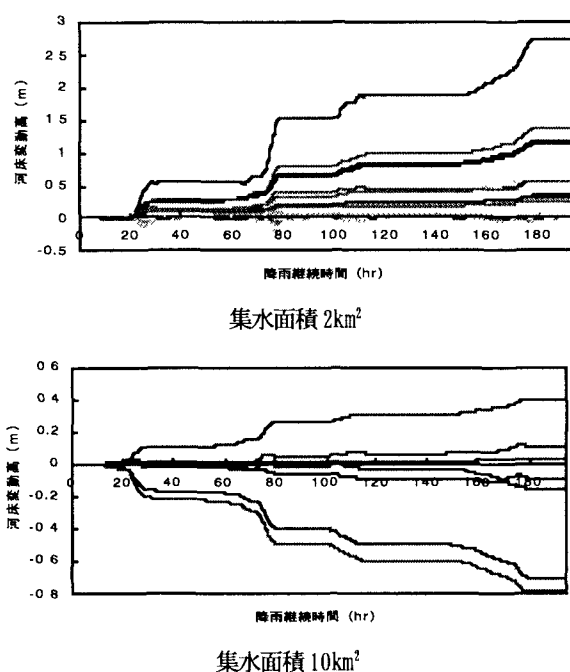


図-7 集水面積ごとの河床変動高の変化(安倍川)

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-7は集水面積2km²、10km²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の経過に伴い単調な上昇・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、川幅の単調な設定、土砂生産量の平均供給によることが原因と考えられる。なお、図-7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ためである。

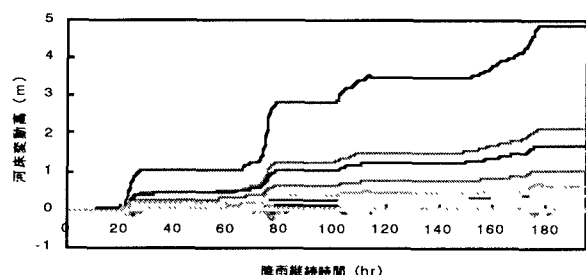
(3) 河道断面形状の違いによる河床変動の検討

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、川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まず検討した。

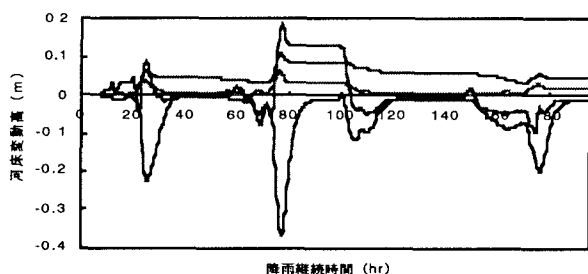
図-8では、河床変動に多少ではあるが河床の上下動が見られたが、全体的な様子はほとんど変わらず変動幅が若干増加したに過ぎなかった。本研究では経験的に側岸角度60°程度の設定で行ったものであるが、この程度の角度では長方形断面との差が出なかったためと考えられる。

(4) 土砂生産域の変化による河床変動の検討

これまで土砂生産量は、式(2)で示すように河床勾配の関数で表し地域的に単調な供給であったが、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



集水面積 2 km² の河床変動高の変化



河床変動高 0m 付近の拡大図

図-8 河床変動高の変化 (河道：台形断面)

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。

$$\beta = 0.01 \times 100^p, \quad p = \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \quad (5)$$

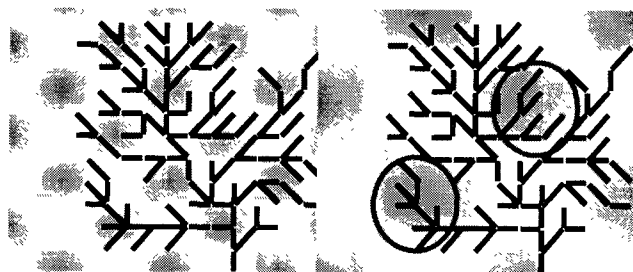
ここに、 x, y : 擬河道網における座標(m), a, b は土砂生産域の分布波長である。

図-9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-10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、現実に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) 不規則川幅を用いた河床変動の検討

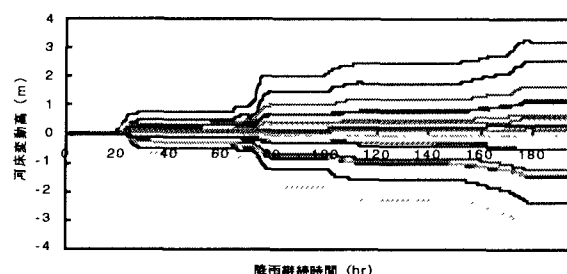
実際の山地河川では不規則な川幅が河床変動に影響すると考えられる。本モデルでは区間一様で、流下方向に川幅を漸増させているために現実の不規則な川幅を反映しにくい。

そこで長方形断面のまま不規則川幅を砂防ダムの水通し幅を参考に設定し早川流域に適用して河床変動にどのような影響が表れるかを検討した。水通し幅は元溪床幅を考慮して定められており、実際の川幅を反映し得ると考えられることからこれらのデータを用いることとした。

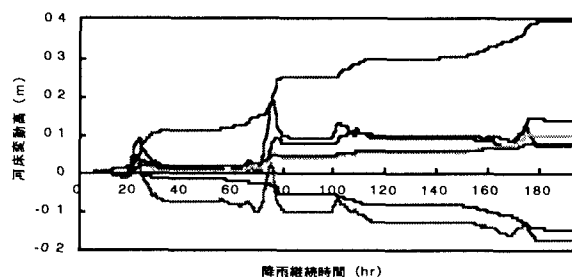


a×b が集水面積規模程度 a×b が集水面積規模より大

図-9 土砂生産域分布スケールと集水面積の規模



集水面積 2 km² の河床変動高の変化



集水面積 10 km² の河床変動高の変化

図-10 河床変動高の変化 (土砂生産域分布の場合)

一連の考察は安倍川流域で行ってきたが、入手できる資料の関係上早川流域のみの結果を例示する。

a) 不規則川幅の設定方法

富士川砂防工事事務所管内図(縮尺 1 : 100,000), 及び個々の砂防ダム設計図を用いて、早川流域の砂防ダム(全 78 個)の水通し幅と集水面積の関係を求める。図-11 はその値をプロットしたものであるが、これによると同程度の集水面積でも水通し幅に大きなばらつきがあり、実際の川幅の不規則性が確認できる。また、これまで用いていた(1)式より得られる規則的な川幅は、図のようにプロットした水通し幅とは若干のズレが生じる。そこで、集水面積と水通し幅の回帰曲線 B' (m) を求めると、最小 2 乗法により決定したパラメータ $B'_0 = 10.93$, $k = 0.334$ を用いて $B' = B'_0 A^k$ で表すことができる。各格子点において水通し幅と回帰曲線の差を取った誤差と集水面積の関係から、その分布を正規分布と見なして、平均 1.356、標準偏差 8.79 の正規乱数を発生させる。各集水点数においてランダム幅 $B_e(m)$ (正規乱数)を B' に加えることにより、以下のような不規則川幅 $B_r(m)$ を設定し早川流域に適用した。

$$B_r = B' + B_e \quad (6)$$

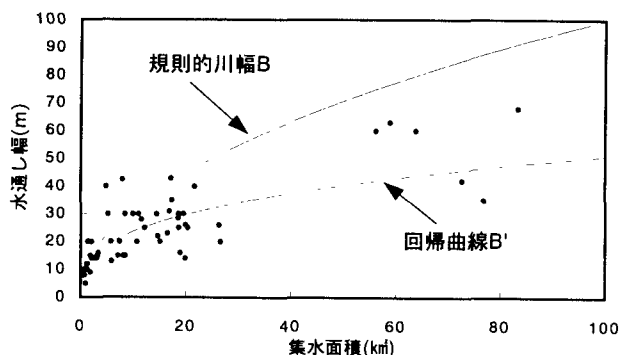


図-11 集水面積と水通し幅の相関図

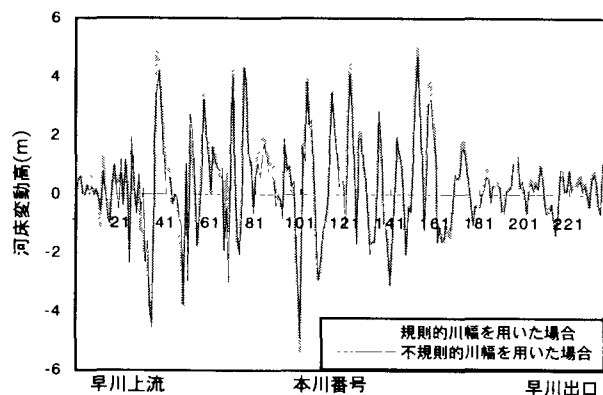


図-12 早川本川に沿う河床変動計算結果の比較

b) 河床変動計算結果

図-12 は規則的川幅を用いた場合と不規則的川幅を用いた場合の早川本川の河床変動高を表したものである。上流域を除いてあまり変化や差がみられないことから、この程度の不規則性においては川幅が河床変動に与える影響は小さいと考えられる。

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、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、“等価な河道”のもとでの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。この種のモデル化をより着実に支援するために、多点同時土砂動態調査の実施が望まれる。

参考文献

- 1) 矢野義男：新砂防計画論（予報），新砂防，Vol. 36，No. 3，PP. 2-9，1983.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Yang, C. T. : SEDIMENT TRANSPORT-THEORY AND PRACTICE-, PP. 265-282，1996.
- 6) 寒地河川学研究会：石狩川流域における土砂の生産・流出（財）北海道河川防災研究センター，PP. 209，1998.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 睦 旻皎・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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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，pp. 436-437，1995.

(1998. 9. 30受付)