

流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討

FUNDAMENTAL EXAMINATION ON THE SYNTHETIC SEDIMENT ROUTING MODEL IN A WHOLE RIVER SYSTEM

砂田憲吾¹・小松勝彦²・小林 弘²

Kengo SUNADA, Katsuhiko KOMATSU and Hiromu KOBAYASHI

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)

It is required to develop an appropriate sediment routing model for describing behavior of sedimentation in a whole river system. This research deals with a synthetic sediment routing model based on DEM(Digital Elevation Models). This kind of model has several subjects to be examined from the viewpoints on model construction such as computational time interval, tuning hydraulic parameters, effects of computational mesh scale on the results, pseudo channel network made from DEM and so on. Authors have hitherto been examined some of the subjects mentioned above in the mountainous Hayakawa River basin (509km²). In order to apply the model to larger river basin, the Fujikawa River basin (3,571km²), a new method of automatical tracing of the channel network is adopted. In this paper, difference of channel networks between the conventional method and the new one is examined, and reasonable way of smoothing river bed as an initial situation is searched. The results of some cases of simulation on sedimentation in the basin is also discussed.

Key Words : sediment routing model, DEM, channel network, river bed variation

1. はじめに

今日、河川の計画や環境管理が、限定的な区間を対象としたものから、流域・水系を視点において考えられるようになってきている。すなわち、流域全体の水循環、物質循環の理解の下に水質や生態系のあり方も考慮に入れた総合的な河川・流域の管理がめざされる時がきている。その際、土砂の流送や堆積に焦点をあてて考えれば、水源・溪流から河川、河口・海岸までを含んだいわゆる総合土砂管理が目標とされることになる。

いま、流域における土砂の生産、供給、侵食・洗掘、流下、堆積およびそれらの結果生ずる河床の時間的変動過程全体を土砂動態と呼ぶことにする。このとき、流域の土砂動態の把握には当面二つの方向が考えられる。第一の方法は現地資料¹⁾をもとに空間的・時間的に集約していわば集中システムを考え、それらを多数組み合わせで全体を構成する方法²⁾である。この方法は経験・実績に基づく従来の主な手法に相当するが、降雨などの外力の変化に伴う将来の予測や流域の条件の変更を考慮しにくい。これに対する第二の方法として、分布システムの考え方に基づいて、地形や表層地質の空間的な分布を考慮して降雨・流量変化に応じた流域全体の土砂の流送・堆

積を調べる方法^{3), 4), 5), 6), 7)}である。細部でのモデルの厳密さを若干犠牲にすれば、物理的な観点から流域のいわゆる「土砂動態」が記述される唯一の方法と考えられる。

筆者らは後者の立場に立って、これまでに水系土砂動態のモデル化について検討を重ねてきた^{3), 4), 8)}。そこでは流域客観情報としての数値地形を用いることにより、まずはどの流域にも適用可能であるが、対象とする現地の状況に合わせてモデルの精密化が着実に期待できると考えている。土砂の流送と収支に基づく方法ではあるが、いくつかの課題もある。これまでに、数値地形のメッシュの大きさが計算結果に及ぼす影響、計算時間間隔、パラメータの設定やそれらの計算結果への感度、などについて検討してきた。その結果、細かな配慮で設定された早川流域(約500km²)の擬河道網によれば、実測値にほぼ対応する河床変動の再現が可能で、モデル構成の大枠が得られている。

本論文では、これまで対象としてきた山地河川流域から流域を拡大して河口までを持つ富士川全流域(約3,600km²)を対象とする。従来の早川流域では本川・主要支川では河床高を地形図より与えていたが、富士川流域ではもはやそうしたマニュアルでの河道の調整は困難となる。ここでは、自動的に生成される別のタイプの河道網を用いての計算方法を進めるための検討を行った。

2. 地形図補正型擬河道網による早川水系における検討^{3), 4)}

(1) モデルの基本構成

当初モデル適用の対象としたのは富士川支川早川水系(流域面積509.1km²)である。この流域では、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。昭和57年における流出土砂量は約500万m³と推計⁹⁾されている。

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(後出する図-6左に早川の擬河道網を示す)。この際、早川本川、主要支川についてはメッシュ点位置・標高を、地形図を用いてマニュアルで入力している。以後これを地形図補正型擬河道網とする。擬河道は幅広矩形断面とし流域面積A(km²) (各格子点での集水面積)より推定河幅B(m)を次式¹⁰⁾で与える。

B = B₀A^k (1)

ただし、B₀, kはパラメータで、早川本川下流域における実河道幅との比較からB₀=10.0, k=0.5とした。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(m³/km²/hr)は現地資料¹¹⁾をもとに次式で与える。

V = βθ^{0.5}r² (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β=0.01を用いた。土砂粒径d(cm)は区間ごとの一様砂として扱い、Sternberg-物部の式を基に次式で与える。

d = d₀θ^{2/3} (3)

ただしd₀はパラメータで実測値をもとにd₀=18.3とした。

土砂輸送にはBrown型の流砂量式を用い、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。

Δz = (Q_{Bin} - Q_{Bout}) / A_i(1 - λ) Δt (4)

ここに、Q_{Bin}: 単位時間当たりの流入土砂量(m³/s), Q_{Bout}: 単位時間当たりの流出土砂量(m³/s), A_i: 土砂堆積面積(km²), λ: 河床空隙率である。また流送土砂量については、支川下流や本川では平衡流砂量として扱っているが、上流域では岩盤等の影響を考慮して流送土砂を制限している。

他、モデルの詳細については文献^{3), 4)}を参照されたい。

(2) 河床変動計算結果と妥当性

これまで、筆者らにより早川水系へ土砂動態モデルが

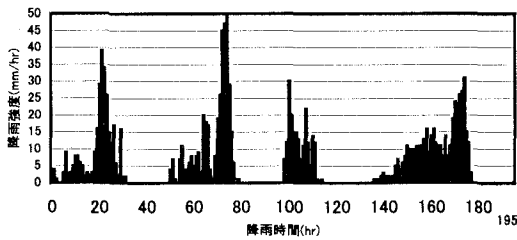


図-1 降雨強度時系列図(s. 56. 3～s. 58. 2)

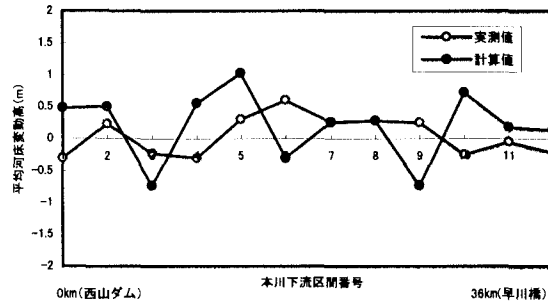


図-2 河床変動測量結果との比較

適用され、いくつかの検討が行われてきた。対象期間は昭和56年3月から昭和58年2月であり、その間の日雨量100mmを越える降雨時系列は図-1に示される。図-2は対象期間における早川水系内の西山ダムから早川橋までの早川河床変動測量結果と250mメッシュの河床変動計算結果(河床変動計算結果とは、図-1に提示した降雨後の計算河床高と初期河床高の差である)との比較を表したものである⁴⁾。計算値と実測値には1区間のずれはあるものの、河床変動絶対値・区間ごとの変動パターンを判断基準に考えれば概ね妥当性が得られる。また、河道網の要素スケールの検討によれば、局地的な点を除けばモデル化における250m・500mのメッシュスケールの影響は小さいという結果が得られており⁸⁾、500mメッシュにおける河床変動計算結果の妥当性も説明できる。

さらに、これまでの研究⁸⁾により、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を行い、流域の内部および流域全体での間接的な妥当性が得られている。

3. 富士川水系自動作成型擬河道網と問題点

地形図補正型擬河道網でモデル化した早川水系から、富士川水系全域(流域面積3571.2km²)を対象を拡大し、擬河道網を作成するにあたり、データ量の増加に伴ういくつかの問題が生じる。例えば落水線の行き場を失った窪地などのエラーに関して、これまでのように地形図を用いた手入力での修正では非常に煩雑になる。そこで、竹内¹²⁾らの提案している、DEMのみを用いて擬河道網を自動作成する、いわゆる富士川水系自動作成型擬河道網(図-3右)を用いて検討を行う。図-3左に示した早川水系地形図補正型擬河

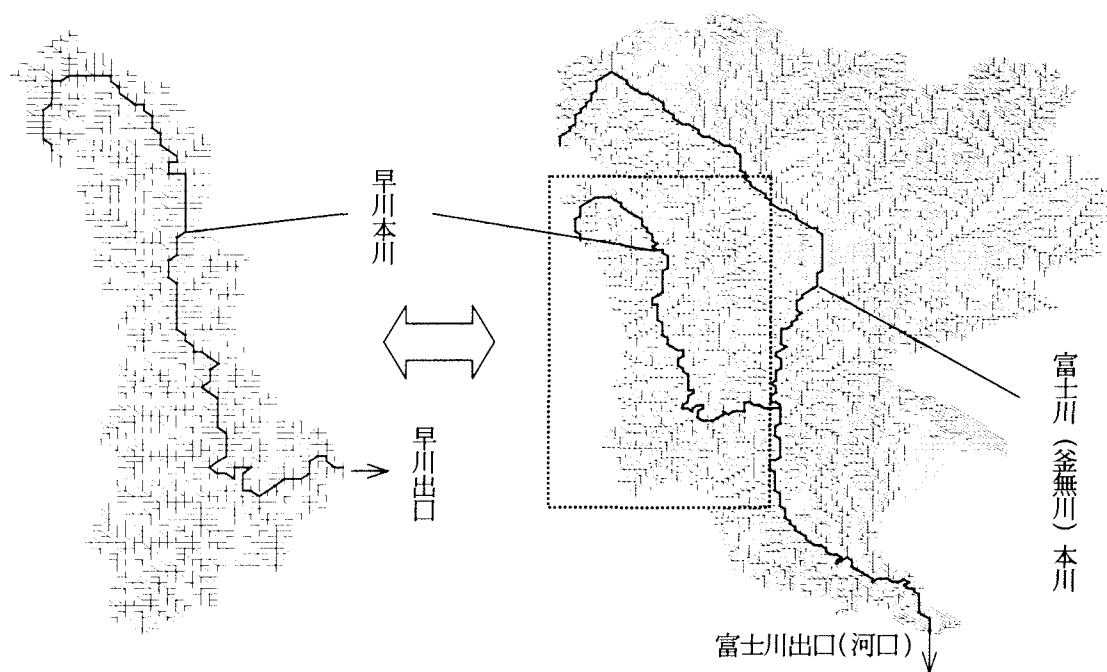


図-3 対象擬河道網（左：早川水系地形図補正型，右：富士川水系自動作成型）

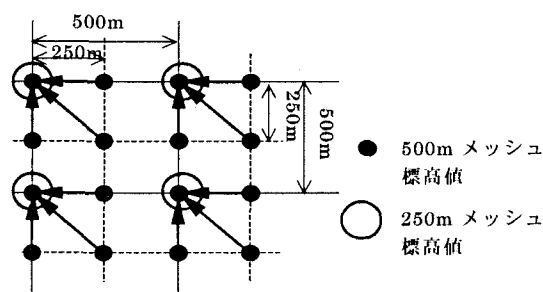


図-4 スケールアップの概要

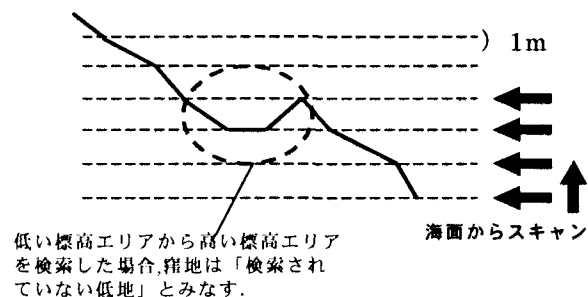


図-5 複数点で構成される窪地の処理

道網とは以下の点が主に異なる。

(1) 擬河道網の変更点

a) スケールアップ手法

250mメッシュの擬河道網を、500mメッシュにスケールアップした擬河道網をここでの基本モデルとする。さらに、250mメッシュ間隔に並んでいる標高データを直接500m間隔で抽出するこれまで用いてきたスケールアップ手法に対して、図-4に示すように250mメッシュの標高値4点を平均した値を500mメッシュの標高値として抽出する平均型のスケールアップ手法を用いている。

b) 実河川情報

落水線理論に基づき擬河道網を算出する際、500mメッシュの標高データと落水線計算だけで流域地形を等価に表現するのは難しい。そこで、前述のように、地形図補正型では2万5千分の1の地形図を用いて、実河川の位置・標高を最も近いメッシュ点に近似し、流域地形の再現性の向上に努めた。しかしながら、流域の拡大に伴い地形図の利用に限界が生じることから、ここでは国土数値情報の流路位置データ（KS-272）を用い、500mメッシュの

河川流下方向データを作成し、これを基に富士川および早川・笛吹川の流路方向を定義した。尚、同時に記録されている標高値は、擬河道網との対応上の問題から使用できず、実河川部分における標高値には標高データ（KS-110-1）の値をそのまま使用した。

c) 窪地処理方法

標高データの精度の問題で生じるとされる単点の窪地は、周囲点の標高値が自点よりも高いために起こるため、自点の標高値を周囲8点の標高値と同値に修正する。一方複数点で構成される窪地処理は、単点でおこる窪地の処理方法と同じには扱えない。対象流域を含む標高データ全域を、最低標高値レベル（河口・海面）から最高標高値まで1mごとに検索していき、図-5に示すように、連続して検索されない内陸の低い点を窪地と見なし1mの標高増量処理を行う。ただし、データによっては大量に標高を修正（増量）してしまい、特に富士川下流域では川筋が一部再現されず河筋標高がもりあがってしまうという問題が生じる。そこで、河川情報の川筋を上流から下流へ1メッシュずつ順に巡っていき、自点から見た下流点が自点より高い場合、自点と同

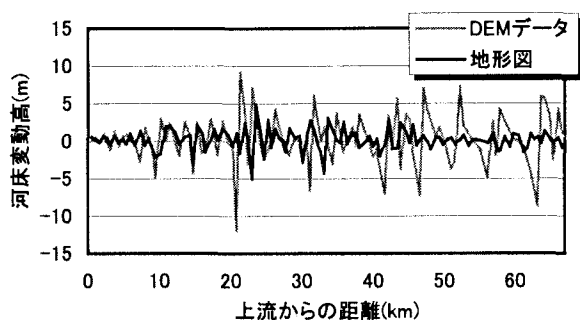


図-6 早川本川河床変動図

値まで標高を下げることで河道の調整を行っている。

(2) 河床変動計算結果と問題点

この富士川水系自動作成型擬河道網を用いて早川本川において河床変動計算を行った。2-(1)で示すように、早川水系で先に提案された土砂動態モデルを適用し、図-1に示した降雨強度を与えて計算している。自動作成型の富士川水系擬河道網と、地形図補正型の早川水系擬河道網、両者の早川本川における河床変動計算結果を比較したものを図-6に示す。上流においては比較的同様な傾向を示したが、中流から下流にかけては変動が極端に強調される傾向が見られた。この大きな要因と考えられる、擬河道網の初期設定の差異について検討してみた。図-7は図-6で違いの著しかった早川本川下流区間の初期設定段階における河床縦断面図を示したものである。自動作成型擬河道網は、地形図補正型に比べ河床縦断の凹凸が大きくなっており、特に下流域においてはその傾向が顕著になっている。これより、図-6における河床変動計算結果の違いは、河床勾配の初期設定に大きな原因があると考えられる。したがって、河床変動計算結果の精度を上げようとすれば、富士川水系自動作成型擬河道網における初期河道を新たに調整する必要が出てくる。

4. 初期擬河道網の設定

DEMのみを用いた自動作成型擬河道網により流域地形を表現することは非常に困難である。しかしながら、流域の拡大に伴い大量のデータを扱う関係上、効率的かつ大枠での土砂動態把握が必要となる。その意味では自動作成型擬河道網の利用が効果的であるが、精度を上げるための処理が必要になる。そこで自動作成型擬河道網の初期河床縦断面形状を、地形図補正型擬河道網の河床縦断面形状に近づけるために2つの方法を用いて検討した。

(1) 先行流出法

本河床変動計算は、時間経過に伴って徐々に河床が平滑化されるという傾向がある。そこで富士川水系自動作成型擬河道網に一定降雨強度の雨を3000時間発生させ、早川本川河床の平滑化を行った。その平滑化された早川

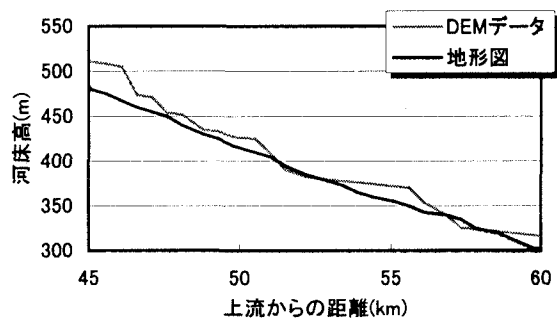


図-7 早川本川河床高縦断面図

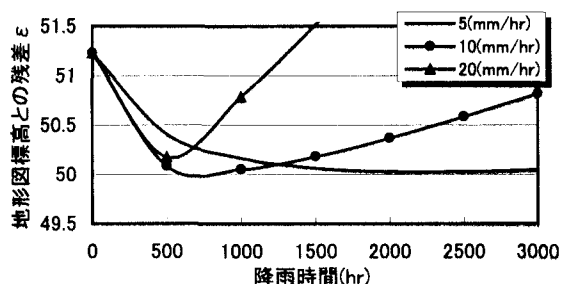


図-8 流出時間と残差の関係

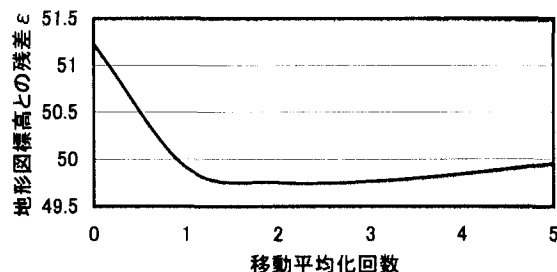


図-9 平滑化回数と残差の関係

本川の河床勾配を新たな初期河床勾配とみなす。その際各降雨強度における最も平滑化が進んだ時間を算出し、その降雨強度における最適な本川河床部の平滑化時間と判断した。その算出方法は、地形図補正型擬河道網の早川本川部の標高と、自動作成型擬河道網において各時間で平滑化された早川本川部の標高との残差 ε を(5)式より求め、その適合度の判定を行った。実際にはその中で残差 ε の値が急激に減少した時間を最適な時間と判断した。

$$\varepsilon = \sum (Z_i - Z_{i0})^2 / n \quad (5)$$

ここに ε : 残差 (m^2)、 Z_i : 各時間における平滑化された早川本川部各地点の標高 (m)、 Z_{i0} : 地形図から読みとった早川本川部各地点の標高 (m)、 n : 早川本川部分における標高データの数を示し、その数は119個である。ここでは、3種類の降雨強度における先行流出を行い、降雨時間と残差 ε の関係を調べた。その結果を図-8に示す。図から、10(mm/hr)の降雨強度では、500時間程度のシミュレーションで最も早川本川の河床が平滑化されたと考えられる。

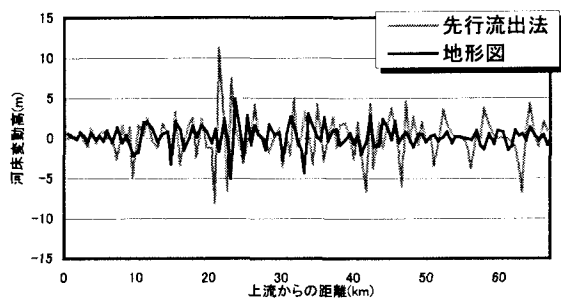


図-10 早川本川河床変動図（先行流出法）

(2) 地形平滑化法

次に、自動作成型擬河道網の早川本川における各河床高の移動平均計算を(6)式により行い平滑化を行った。

$$Z_{mi} = (Z_{i+1} + 2Z_i + Z_{i-1}) / 4 \quad (6)$$

以下、(1)における先行流出法と同様に、平滑化された早川における河床勾配を初期値とする。

ここに、 Z_{mi} ：移動平均により新たに算出された早川の標高(m)、 Z_i ：平均化の対象となる地点の本川部の標高(m)、 Z_{i+1} 、 Z_{i-1} ：前後の標高(m)である。以下、(1)と同様に残差 ε をとり、その値が急激に減少している箇所の回数を平滑化に最適な移動平均回数とした。この地形平滑化法における、移動平均回数と残差 ε の関係図を図-9に示す。

(3) 早川本川河床における平滑化の考察

先行流出法において、早川本川河床部を平滑化するのに最適な時間は、降雨強度5(mm/hr)の時は約800時間、10(mm/hr)の時は約550時間、20(mm/hr)の時は約500時間であると判断できた。また、地形平滑化法においては、移動平均回数2回が平滑化に最適な回数と判断できた。ここで、各方法における最適降雨時間（降雨強度10(mm/hr)を使用する）・移動平均回数で平滑化した早川本川河床勾配を初期値として、図-1の降雨強度を模擬的に与えて河床変動計算を行った。地形図補正型擬河道網における計算結果との比較したものをそれぞれ図-10、図-11に示した。

先行流出法(図-10)においては、上流部から中流部にかけて、河床変動の傾向が比較的類似しているものの、図-6に比べて局部的に変動高の幅が大きくなる場所も見られ、顕著な改善は得られなかった。しかしながら、全体的な距離方向の変動の傾向が類似している点は興味深い。

地形平滑化法(図-11)においては、上流部から中流部にかけて変動パターンが、特に変動高の幅が非常に類似してきており、下流域に行くにしたがって、その傾向は小さくなっている。また、変動高の幅が全体的に均一になる傾向が、この手法の特徴であるといえる。取り扱いの簡便さから、地形平滑化法も有効な方法と考えられる。

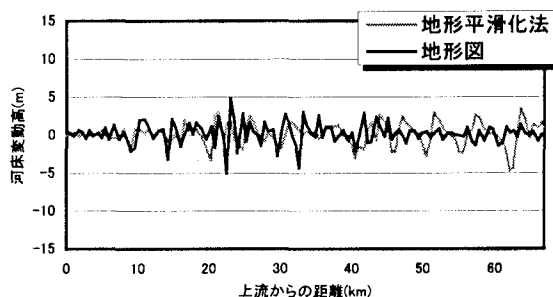


図-11 早川本川河床変動図（地形平滑化法）

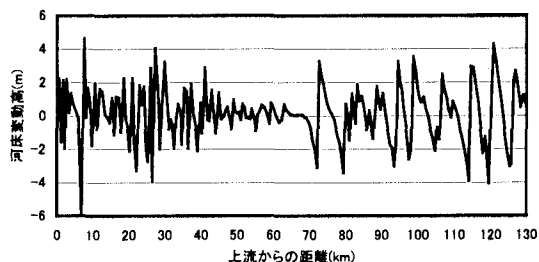


図-12 富士川本川河床変動図（平滑化行わず）

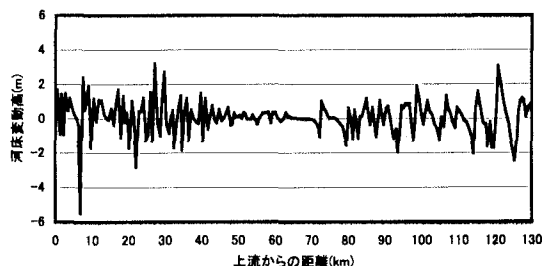


図-13 富士川本川河床変動図（先行流出法）

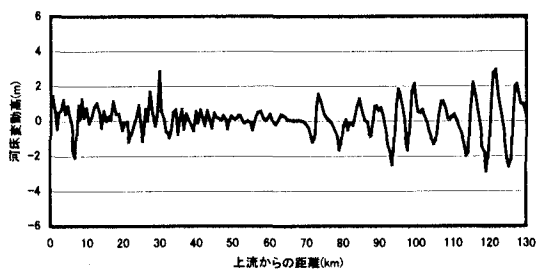


図-14 富士川本川河床変動図（地形平滑化法）

2つの平滑化処理に共通している点は、上流域から中流域にかけて処理の効果が現れているものの、下流域にかけてはそれが小さくなる点である。これより、河床勾配が緩やかな下流域では正確な流域の地形特性をDEMデータのみで表現するのが困難となるものと考えられ、より下流域ではより精度の高い河床標高値が必要とされる。

5. 富士川流域への適用

(1) データ調整とその方法

4-(3)により判断した先行流出法・地形平滑化法における最適な降雨時間(降雨強度10(mm/hr)を使用する)・移動平均回数を富士川流域に適用し平滑化を行う。また平滑化処理により、新たに生じた窪地については、その個所の標高を10(cm)底上げすることで解消した。以上の処理を行った富士川水系擬河道網を用いて、図-1の降雨強度を模擬的に与え河床変動計算を行った。

(2) 計算結果と考察

平滑化を行う前の粗雑な河床部のままで行った富士川本川部分の河床変動図を図-12に、先行流出法によって平滑化された富士川本川部の河床変動図を図-13に、そして地形平滑化法によって平滑化された富士川本川部の河床変動図を図-14に示す。3つの計算結果とも50~60km地点で河床変動の小さな区間が認められる。実際にはこの地点は甲府盆地南部にあたり、河床変動の小さいところでもある。これらのシミュレーションでもこのことが再現されている。

図-12における河床変動高の幅は、平滑化した2つのシミュレーション結果(図-13, 14)と比べると約2倍近くある。これは河川における河床変動が河床勾配に大きく左右されているからである。また4-(3)において、地形図補正型擬河道網における早川本川の河床変動図との比較をしているが、両者とも上流域から中流域までは変動パターンおよび変動高の幅が比較的類似していたのに対し、下流域にかけてはその変動が大きく異なっていた。このことは、2つの方法で平滑化された富士川本川の河床変動図からも同様なことが認められた。実際にその両者の結果である図-13と図-14を比較してみると、上流部から中流部にかけては両者ともある程度近似しており、流域の地形条件を反映した富士川本川における河床変動の結果を得ることができたと考えられる。それに対し、下流域の河床変動の結果においては、早川流域の結果と同様、河床変動幅が大きく、精度の高い結果を得ることができたとは必ずしも言えない。

実際に地形図等から読みとった富士川本川部の河床標高を初期値として河床変動計算を行い、今回の結果と比較する必要性はあるが、流域全体における擬河道網を用いて河床変動を算出する際、下流域のデータは上流域のデータより適切なデータが必要とされるようである。

6. おわりに

水系全体の土砂管理と計画のために、さらにはより広大な流域や河道資料の不十分な流域での土砂動態把握の可能性を得るために、自動作成型擬河道網を用いていくつか検討を行い、以下の結論を得た。1)河床変動計算結果の精度を高めようとするならば、本川部における初期

河床勾配のよりの確な見積もりが必要である。2)特に、下流域における河川のデータは河床変動の算出結果の精度を大きく左右する。

上中流域において河道調整による効果がみられることから、流域全体での土砂動態把握に関して大枠ではあるが可能性が開かれた。しかしながら、下流域における諸データの合理的な組み込み手法、実測データとの検証など課題も残されており、今後検討していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、山梨大学工学部土木環境工学科の竹内邦良教授、石平博講師には、貴重な資料を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) たとえば、高秀秀信・九津見生哲・藤沢 寛：水系における土砂動態について、第27回水理講演会論集、pp. 767-772, 1983.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 宝馨・上坂隆平・野ソ侯克彦：プランタス川流域の土地被覆分類と土砂流出解析、京都大学防災研究所年報、第42号、B-2, pp. 291-309, 1999.
- 6) 松木 敬・江頭進治・上妻由拓：キネマティックウェーブ法に基づく土砂流出予測、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、pp. 442-443, 1999.
- 7) 市川 温・佐藤康弘・椎葉充晴・立川康人・宝馨：山地流域における水・土砂動態モデルの構築、京都大学防災研究所年報、第42号、B-2, pp. 211-223, 1999.
- 8) 砂田憲吾・小松勝彦・柴田高教・杉浦信男：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、水工学論文集, Vol. 43, pp. 551-556, 1999.
- 9) 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.
- 10) 陸 晏皎・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.
- 11) 橋本 明・坂口哲夫・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.
- 12) 竹内邦良・石平 博・栗木美宜：実河道網データを用いた擬河道網の自動作成法に関する研究、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 188-189, 1999.

(1999. 9. 30受付)