

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

PREDICTION OF SEDIMENTATION PROCESS IN A RESERVOIR USING A SEDIMENT RUNOFF MODEL

高橋 保¹・井上素行²・中川 一³・里深好文⁴

Tamotsu TAKAHASHI, Motoyuki INOUE,
Hajime NAKAGAWA and Yoshifumi SATOFUKA

¹ フェロー会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 正会員 工修 東京電力株式会社 業務管理部 (〒 100-0011 東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 3 号)

³ 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴ 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In this paper, a simulation method is developed to predict sedimentation process in a reservoir. This model can calculate the temporal variation of bed elevation, sediment discharge, and vertical grain size distribution in deposits. Water and sediment discharge as the boundary conditions at the upstream end, are obtained from a sediment runoff model. In this model, the watershed is constituted by several slope units and channel network. Sediment runoff is simulated by using governing equations which correspond to each flow regime such as a debris flow, an immature debris flow, and a turbulent flow. These models are applied to the actual mountainous watershed, the Fudosawa and Nigorisawa River, Nagano Prefecture.

Key Words: Mountainous river, sediment runoff, sedimentation in a reservoir, bed variation

1. 緒 言

著者らはこれまでに高瀬ダム流域を対象として、降雨に伴う土砂の流出過程に関する研究¹⁾を行っており、混合粒径材料からなる河床の変動ならびに土砂の流出を解析できる数値計算モデルが既に提案されている。しかしながら、このモデルにおいては斜面から河道への土砂の供給条件に関してかなり大胆な仮定がなされていた。すなわち、雪解け期と出水期において瞬時に顕著な土砂供給が起こるものと考え、崩壊斜面直下の河道に土砂堆積厚を与えていた。このような土砂の供給条件はかなり極端であるため、貯水池に流入する土砂量の予測結果にも土砂供給のタイミングの影響が強く現れていた。そこで本研究では、より実態に則した供給条件となるよう、崖錘の影響を考慮した崩壊裸地斜面からの土砂供給プロセスをモデルに組み込んでいる。

また、上記のモデルでは、河道における洪水と土砂の流出解析に際し、流量が水深と勾配とによって決定される kinematic wave model を使用しているため、貯水池内の計算に関しては問題が生じていた。そこで、dynamic wave 法による貯水池内のデルタの進行過程に

関するシミュレーションを行っている。前述の kinematic wave model により計算された貯水池流入地点における流量・流砂量が、本計算の上流端の境界条件として用いられ、堆砂形状のみならず、深さ方向の粒度分布の変化までが計算可能となっている。

2. 高瀬ダム調整池への土砂流出予測

ここで用いる土砂流出解析手法は kinematic wave 法に基づく洪水流出解析と、計算された洪水による土砂輸送とを組み合わせた方法¹⁾である。図-1 に示すように不動沢・濁沢流域を 71 の斜面群に分割し、各斜面において kinematic wave 法による洪水流出解析を行う。斜面下流端で求められた流出流量を、そこに接続する河道部への横流入流量として与え、各河道区間において流量、流砂量、流砂および河床表層の粒度分布等が計算される。不動沢・濁沢の上流、中流、下流の河床ならびに崖錘において測定された粒度分布を図-2 に示す。本研究では、従来のモデル¹⁾に対し、崩壊裸地斜面からの土砂供給プロセスを新たに組み入れているため、ここでは変更された部分を中心に説明する。

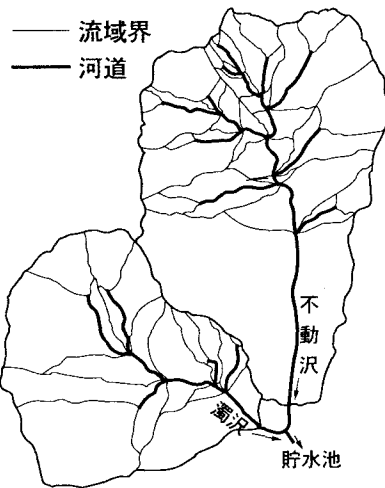


図-1 分割化された濁沢・不動沢流域

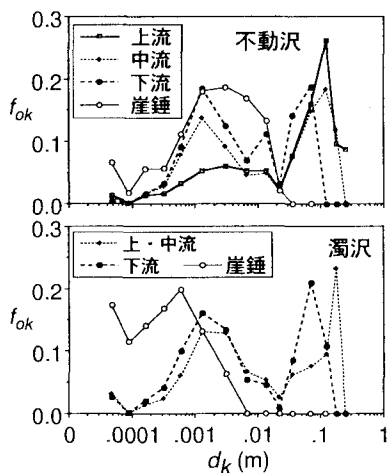


図-2 河床と崖鍾の粒度分布

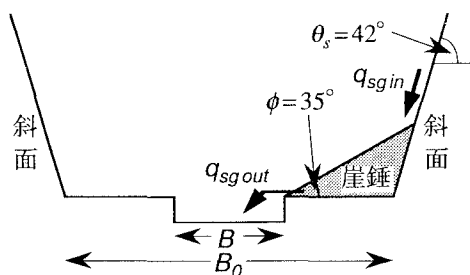


図-3 崖鍾の土砂収支

(1) 崩壊裸地斜面からの土砂供給プロセス

崩壊斜面から河道への土砂の供給条件をより合理的なものとするため、図-3に示すような崖鍾を考慮した土砂供給プロセスをモデルに組み込むことにした。

崩壊裸地斜面から崖鍾への単位時間、単位長さ当たりの供給土砂量 $q_{sg\ in}$ と、流水によって崖鍾が削り取ら

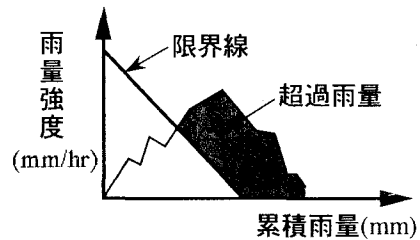


図-4 超過雨量の定義図

れる量 $q_{sg\ out}$ とのバランスによって崖鍾は消長すると考えられる。今、崖鍾の体積に変化が生じてても相似形が保たれるものとする、単位長さ当たりの崖鍾の体積 S の時間的变化は、

$$\frac{\partial S}{\partial t} + q_{sg\ out} - q_{sg\ in} = 0 \quad (1)$$

と表される。ただし、崖鍾底辺が河道幅 B_0 (両岸に崩壊地がある場合は河道幅の1/2) と等しくなったときの体積を崖鍾の最大体積と考え、これを越えるような供給土砂は直接河道に与えられる。

流水によって崖鍾が削り取られる量 $q_{sg\ out}$ は、崖鍾の侵食速度 i_g と水深 h を用いて、

$$q_{sg\ out} = i_g h \quad (2)$$

と仮定している。ただし、崖鍾の侵食速度 i_g は河床底面のバルクの侵食速度 i_{sb} の1/2としている。

崩壊地からの土砂供給量 $q_{sg\ in}$ に関しては以下のような解析を行った。まず、降雨が長時間続いて累積雨量が大きくなると、比較的弱い強度の降雨によっても土砂が供給されるようになるを考え、図-4に示すように、スネーク曲線のグラフ上に、右肩下りの直線(これを限界線と呼ぶことにする)を設定した。スネーク曲線の降雨強度の値が限界線の降雨強度の値を超えた量を超過降雨とおき、この超過降雨に応じて土砂が崖鍾へ供給されるものと考え、1時間ごとの単位長さ当たりの供給土砂量 $q_{sg\ in}(\text{m}^2/\text{hr})$ は、

$$q_{sg\ in} = k r_o A_h / \ell_g \quad (3)$$

となる。ここに、 r_o : 超過雨量 (mm/hr)、 k : 係数、 A_h : 崩壊地の面積、 ℓ_g : 崩壊地に接続する河道長さである。

昭和57年から平成7年までの14年間分の高瀬ダムにおける雨量データをもとに、各年度ごとの総供給土砂量を求め、各年の貯水池堆砂量との相関が最も高くなるように限界線を決定した所、その傾きは-0.2、降雨強度軸の切片は30、係数 k の値は $9.89 \times 10^{-4} (\text{m}/\text{mm})$ となった。これは、各年の堆砂量が崩壊地から年内に供給された土砂量に等しいと仮定して得られた結論である。図-5には推定された年間堆砂量が実測値と併せて示されている。

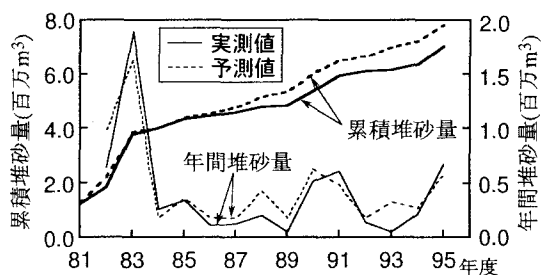


図-5 濁沢・不動沢下流域の堆砂量

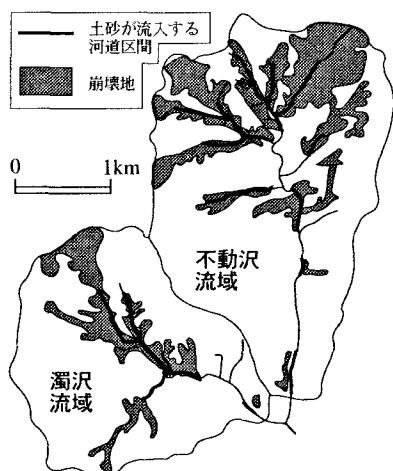


図-6 濁沢・不動沢流域の崩壊地分布

不動沢・濁沢流域の崩壊地の分布を図-6に示す。土砂が供給される河道区間を図中に太線で示している。上述の方法で得られた崖錐への供給土砂量は1時間ごとの値であるから、実際の計算を進める際には1秒ごとの値へ線形補完している。

(2) 基礎方程式

計算に使用する基礎方程式は基本的に従来のモデル¹⁾と同じである。したがって、ここでは新たに土砂供給プロセスを考慮したことにより変更された部分に絞って説明する。

水と土砂を加えた全容積の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qB}{\partial x} = i_{sb} K_1 + \frac{q_{in}}{B} + i_g K_2 \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 B : 水みち幅、 q : 単位幅流量、 i_{sb} : 水みち底面の侵食 ($i_{sb} > 0$) または堆積 ($i_{sb} < 0$) 速度、 q_{in} : 側方からの単位長さ当たりの水の流入流量である。係数 K_1 および K_2 は侵食に際して河床や崖錐の堆積物が不飽和であることを考慮するために用いられており、

$$K_1 = C_{*L} + (1 - C_{*L}) \{ C_{*F} + (1 - C_{*F}) s_b \}$$

$$K_2 = C_{*gL} + (1 - C_{*gL}) \{ C_{*gF} + (1 - C_{*gF}) s_g \}$$

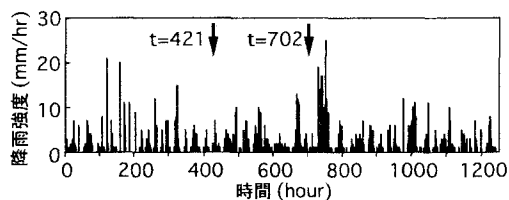


図-7 平成6、7年度の顕著な降雨

と表される。ここに、 C_{*L} : 河床堆積物中の粗粒分の容積濃度、 C_{*F} : 河床堆積物中の粗粒子間隙に含まれている微細成分の濃度、 s_b : 河床堆積物の飽和度、 C_{*gL} : 崖錐堆積物中の粗粒分の容積濃度、 C_{*gF} : 崖錐堆積物中の粗粒子間隙に含まれている微細成分の濃度、 s_g : 崖錐堆積物の飽和度である。ただし、河床に堆積が生じる場合、すなわち $i_{sb} < 0$ の時には、 $K_1 = 1$ としている。また、微細成分とは水と一体化して流体相を形成するような小さい粒径のものを指し、それ以外のものを粗粒分としている。

各粒径階の砂粒の連続式は次のように表される。

$$\frac{\partial (C_k h)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (q C_k B)}{\partial x} = i_{sbk} + i_{gk} \quad (5)$$

ここに、 C_k : k 番目の粒径階が全容積中で占める割合、 i_{sbk} : 粒径階 k の粒子の侵食・堆積速度、 i_{gk} : 崖錐から侵食される粒径階 k の粒子の侵食速度である。

上記の連続式と流れの抵抗則、粒度分布変化式、侵食・堆積速度式、河床連続式などを用いることにより、山地流域からの土砂流出に関して質的・量的な予測が可能となる。

(3) 不動沢・濁沢流域への適用

平成5年の河床を初期条件として、図-7に示されている平成6年および7年の烏帽子岳で観測された降雨を与え、河床変動を追跡した。

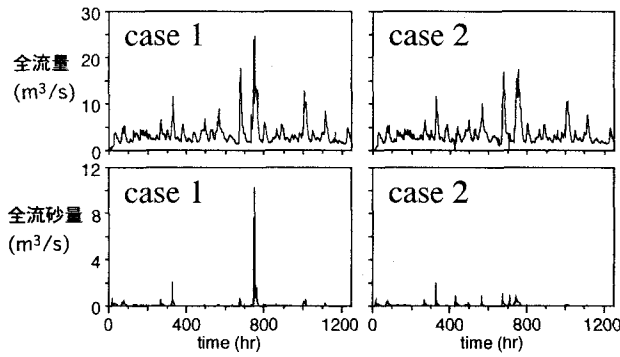
有効降雨強度 r_e に関しては、次式を仮定している。

$$r_e = ar + b \quad (6)$$

ここに、 r : 降雨強度 (mm/hr)、 a 、 b : 定数である。 a は降った雨が流出に寄与する割合、 b は基底流量を与えるために仮に降らせた雨と考えることができる。 a と b の組み合わせとしては様々なものが考えられるが、欠損が無く、比較的新しい平成4年7月のデータを用いて検討した結果、 $a = 0.5$ 、 $b = 0.3$ としたときに最もよく合うことが分かった。

計算は崩壊斜面からの土砂供給プロセスを考慮した case 1 と、従来通りに雪解け時と平成7年の出水時 (図-7の矢印で示される時点) において直接河床に堆積厚を与えた case 2 の2通り行っている。

図-8は濁沢・不動沢の合流点における水と土砂の合計流量、粗粒子および細粒子の合計の流砂量の時間的



図ー8 濁沢・不動沢合流部の流量と流砂量

な変化についての計算結果を、case 1 および case 2 のそれぞれについて示したものである。流量ハイドログラフに大きな差異は認められないが、全流砂量セディメントグラフの形状に違いが認められ、土砂の与え方の影響が顕著に現れたためであると考えられる。たとえば、case 2 ではセディメントグラフに、 $t = 420 \sim 430\text{hr}$ 付近で一つのピークが見られるが、case 1 ではこの時間帯にはピークが見られない。これは case 2 では $t = 421\text{hr}$ 時点で崩壊土砂を河道に強制的に与えているため、この直後の小さな出水でも土砂が貯水池まで運ばれてくることになる一方、case 1 では $t = 400\text{hr}$ 前後の一連の降雨の規模があまり小さくなく、崩壊土砂が崖錐へ供給されなかったか、あるいはその量が少なかったため、顕著な土砂流出を見ない結果となったと解釈される。反対に、 $t = 700 \sim 800\text{hr}$ に case 1 で激しい土砂流出が見られる。これは case 2 では $t = 702\text{hr}$ で与えられた河床堆積土砂の量に規定されて流出土砂量が決まっているのに対して、case 1 では、この期間の一連の降雨規模によって流出土砂量が決定されており、この降雨が特に顕著であったことから大きい土砂流出を見ることになったのである。これより、case 1 の方がより物理的な過程に忠実なモデルとなっていることが判明する。

3. 貯水池堆砂の数値シミュレーション

上述の土砂流出予測では kinematic wave 法を用いており、上流の水理条件が下流へ強制的に伝えられる構造を持っているので、水面勾配が急な山地河道部では十分の適用性を持っているが、貯水池のように水面勾配が小さくなって下流側から水理条件に影響が与えられる場では正しく計算を行うことができない。そこで、ここでは土砂流出予測モデルによって計算された流量、流砂量などの条件を貯水池流入部の境界条件として与えた、一次元の dynamic wave 法による堆砂過程の解析法を示す。

ここで開発する手法の特徴は、広い粒度分布を考慮する点であり、貯水池内の堆砂デルタ内の深さ方向の

粒度分布が求められるものである。なお、この計算においては斜面や支川からの水や土砂の横流入を考慮していない。

(1) 基礎方程式

Dynamic wave 法で用いる一次元非定常の運動方程式は以下のである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g \sin \theta_w - \frac{\tau}{\rho h} \quad (7)$$

ここに、 u : 断面平均流速、 g : 重力加速度、 θ_w : 水面勾配、 τ : 流れの底面せん断応力、 ρ : 水の単位体積重量である。上式の右辺第2項は流れの状態に応じて、それぞれ以下のように表される。

「 $C_L \geq 0.4C_{*L}$ の時 (土石流)」

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{u|u|d_{mL}^2}{8h^3 \left\{ C_L + \frac{(1-C_L)\rho_m}{\sigma} \right\} \left\{ \left(\frac{C_{*L}}{C_L} \right)^{1/3} - 1 \right\}^2} \quad (8)$$

「 $0.01 < C_L < 0.4C_{*L}$ の時 (掃流状集合流動)」

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{1}{0.49} \frac{d_{mL}^2}{h^3} u|u| \quad (9)$$

「 $C_L \leq 0.01$ あるいは $h/d_{mL} \geq 30$ の時 (掃流砂または泥流状乱流土石流)」

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{gn_m^2 u|u|}{h^{4/3}} \quad (10)$$

ここに、 C_L : 流砂中の粗礫の濃度、 d_{mL} : 流砂中の粗礫の平均粒径、 ρ_m : 細粒分を含む流体相の単位体積重量、 σ : 砂礫の単位体積重量、 n_m : マニングの粗度係数である。

全容積の連続式と各粒径階 k の砂粒の連続式は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} = i_{sb} K_1 \quad (11)$$

$$\frac{\partial (C_k h)}{\partial t} + \frac{\partial (uh C_k)}{\partial x} = i_{sbk} \quad (12)$$

堆積速度式については、粗粒子にも沈降速度を考慮すると、以下のようになる。

「 $u_* < w_{ok}$ の時」

$$i_{sbk} = -w_{ok} C_k + i_{sbo} \frac{C_k}{C_L} C_{*Lmax} \quad (13)$$

「 $u_* \geq w_{ok}$ の時」

$$i_{sbk} = i_{sbo} \frac{C_k}{C_L} C_{*Lmax} \quad (14)$$

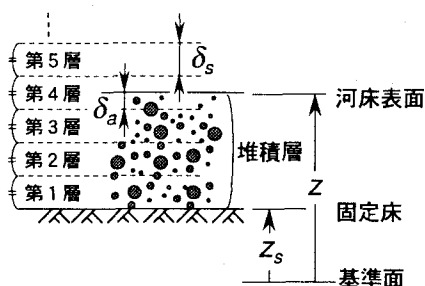


図-9 河床堆積物の層分割に関する概念図

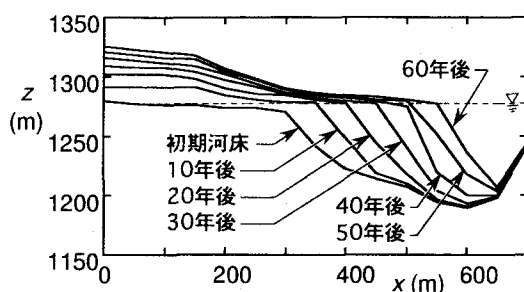


図-12 今後60年間の河床位予測

視されてしまっていた。そこで、堆積土砂の持っていた粒度分布を堆積層に記憶させる方法を考える。

図-9に示すように、河床の堆積層を一定の厚さ δ_s をもつ複数の層に分割する。ある時点での河床表層が層 m 内に存在するとき、表層部分の厚さ δ_a は、

$$\delta_a = (z - z_s) - (m - 1)\delta_s \quad (15)$$

で与えられる。ここに、 z : 河床位、 z_s : 固定床の河床位である。時間 Δt の間に m 層に出入りする土砂を考えることにより、堆積が生じる場合、新しい m 層の粒径階 k の粒子の存在率 f_{0knew} は、

$$f_{0knew} = \frac{\delta_a J_0 f_{0k} - i_{sb} \Delta t (B/B_0) J f_{bk}}{\delta_a J_0 - i_{sb} \Delta t (B/B_0) J} \quad (16)$$

となり、侵食の場合 $f_{0knew} = f_{0k}$ となる。ここに、 f_{0k} : m 層における粒径階 k の存在率、 f_{bk} : 河床表層(交換層)における粒径階 k の存在率、 J_0 : m 層における固体分濃度、 J : 河床表層における固体分濃度、 B_0 : 河道幅である。

(3) 濁沢・不動沢下流域への適用

濁沢・不動沢が貯水池へ流入する付近の平面図を図-10に示す。計算区間は流下方向に700mとし、計算点(断面)の間隔は50mとする。この計算は一次元で行うので、堆砂領域の幅 B_0 を決めなければならない。そこで、現地の堆砂形状を参考にして、貯水池内各計算断面の幅を図示のように決定した。初期河床位と川幅を図-11に示す。

下流端においては貯水池の水位を与えている。上流端の流入流量、流入流砂量としては、前述のcase 2によって計算された濁沢・不動沢合流点の流量および土砂濃度を用いる。土砂流出計算に用いられた降雨が、平成6年と7年の6月から11月にかけての顕著な降雨であるので、これを2年分の流入と考え、同じ流入条件を30回繰り返し与えることにより、今後60年間の貯水池堆積過程を追跡した。図-12に河床位に関する計算結果を10年ごとに示している。この図から、何の対策も講じないとすると、今後数十年間に貯水池堆砂が進行し、貯水池容量にかなりの影響を与えることが分

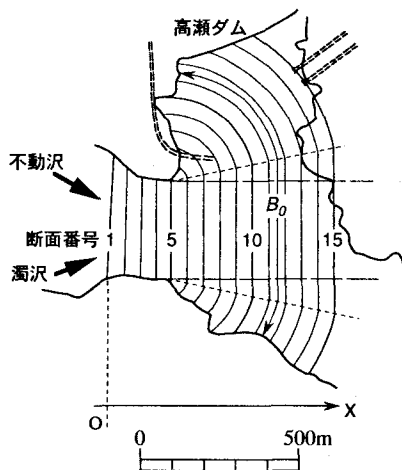


図-10 濁沢・不動沢下流域および貯水池の平面図

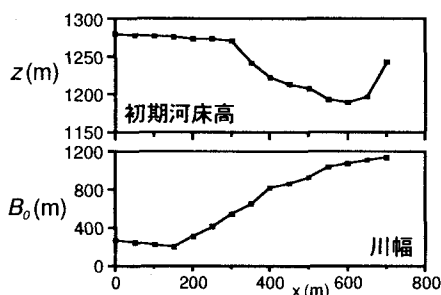


図-11 初期河床位および川幅

ここに、 u_* : 摩擦速度、 w_{ok} : 粒径階 k の粒子の沈降速度、 i_{sbk} : 粒径階 k の粒子の堆積速度、 i_{sbo} : パルクの堆積速度、 C_{*Lmaz} : 粗礫のみが堆積する場合の堆積土砂濃度である。パルクの堆積速度 i_{sbo} に関する式を含む上記以外の基礎方程式は、すべて土砂流出予測に用いたモデル¹⁾と同じものを用いている。

(2) 河床堆積層内の粒度分布に関する改良点

これまでの解析では、河床表面の交換層における粒度変化は考慮しているものの、その下に存在する堆積層の粒度分布に関しては時間的な変化を考えていなかった。すなわち、堆積に伴い新しく交換層の下層になった部分は、その地点における初期の粒度分布となり、堆積した土砂が異なった粒度分布を持っていたことは無

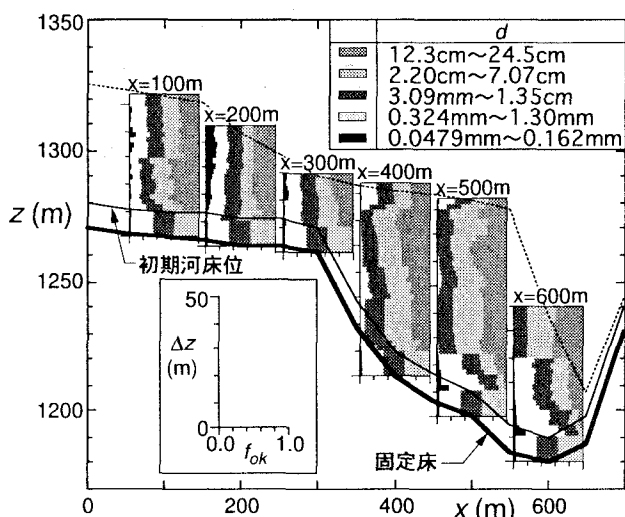


図-13 60年後における堆積層の粒度分布

かる。また、 $x = 300\text{m}$ 付近までの緩傾斜部分においては、約 50m もの堆積が生じることになっている。しかしながら、本計算では雪解け出水を考慮していないため、実際にはこれより多少は緩傾斜部分の堆積傾向は緩和されると思われる。

図-13に60年後における堆積土砂の深さ方向の粒径分布を示している。 $x = 300\text{m}$ 付近までの緩傾斜部分では、堆積層の粒度分布は流入土砂の粒度分布とほぼ同様であるが、 $x = 500\text{m}$ および $x = 600\text{m}$ 地点では、堆積層内の深い部分とその上層では不連続に粒径が変化し、下方では細かい成分が多くなっている。これは流入土砂の内の掃流砂部分が堆積してできる前部堆積層が $x = 500\text{m}$ 地点にはまだ達していない段階では、前部堆積層よりも沖合まで輸送される粒子は浮遊砂が主体で、沈降による堆積によって底部堆積層を形成することによる。前部堆積層は上流より順次底部堆積層を覆う形で進行し、前部堆積層が到達すれば、それ以後

堆積層の粒度分布は掃流砂のそれにほぼ等しくなり、底部堆積層の上面での粒度分布とは不連続的に変化することになる。このことは一般的な貯水池堆砂の傾向と一致している。

4. 結 言

本研究では、流域を水系網とそれに接続する斜面で表現し、流出土砂量の時間変化を粒径分布の変化をも考慮して求めることができる手法に対して、土砂供給条件に改良を加えた。従来のモデルでは特定のタイミングで一挙に崩壊斜面直下の河床へ土砂が供給され、その土砂が洪水の発生によって、順次流出するものと仮定していた。これに対し、本研究で提案されたモデルでは、実際の流域を参考に崖錐の存在を考慮した土砂供給プロセスを考えている。また、裸地斜面における生産土砂量に関しては、濁沢・不動沢流域に固有の限界降雨線を求め、これを越える降雨と裸地斜面侵食深との間に線形関係が存在すると仮定して、降雨が与えられるとそれに応じて裸地斜面から土砂が供給されるモデルを開発した。

また、貯水池内の堆砂過程を精度良く見積もるために、dynamic wave modelによる堆砂シミュレーションモデルを開発した。本モデルの特徴は貯水池内の粗粒子にも沈降を考慮していることと、堆積層の深さ方向の粒度分布が求められるようになっていることである。流入境界条件としては平成6年と7年のものを対象としているので、土砂流出量が過大に評価されているとは考えられるが、今後数十年の間にダム機能が脅かされるほどに堆積が進む結果となり、なんらかの対策の必要性があることが示された。

参考文献

- 1) 高橋 保・井上素行・中川 一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測、水工学論文集、第44巻、pp.717-722、2000。

(2000.10.2 受付)