

河道網を考慮した流域土砂生産の評価

北海道大学工学部 フェロー会員 黒木 幹男
 佐藤工業札幌支店 正会員 山本 徹
 北海道大学工学部 フェロー会員 板倉 忠興

1. はじめに

土砂生産量を的確に予測することは河川にとってだけでなくダム、砂防、海岸など水と土砂に関わる多くの問題にとって重要な意義を持つにもかかわらず、今日なお困難な問題であり充分解明されているとは云い難い。著者らは、支配流量の概念を用いて河道安定縦断形について一つの理論を提案した(1)。この理論を用いると、幹川河道に沿った複数地点で流量資料が得られれば、河床高、水深、川幅、河床砂礫の平均粒径、流砂量などの河道特性量の縦断分布を求めることが出来る。しかし、本理論は基本的に支川合流を流量増加として捉えており、どの程度の河道まで支川として認識して解析に組み入れるかには恣意性を残していたことになる。

本研究では、新たに開発した河道網を組み入れた河道安定縦断形の理論(2)を用いて、流域の土砂生産量を国土数値情報を併用しながら推定する方法について論じている。具体例として、豊平川・豊平峡ダム流域を対象に検討を行った。

2. 河道網を考慮した河道安定縦断形理論の概要

本節では、以下の説明に必要な範囲で理論の概要を記述する。支配流量の存在を想定し、動的平衡状態にある河道を考える。河道網の表現には、リンク・マグニチュード方式を採用する。マグニチュード*i*および*j*の河道が合流して、*i*+*j*の河道となる場合を考えると、流砂、流量および粒径の連続式はそれぞれ以下のように表せる。

$$[Q_B]_{i+j} = [Q_B]_i + [Q_B]_j \quad (1)$$

$$[Q_U]_{i+j} = [Q_U]_i + [Q_U]_j \quad (2)$$

$$|d_U|_{i+j} \cdot [Q_B]_{i+j} = |d_U|_i \cdot [Q_B]_i + |d_U|_j \cdot [Q_B]_j \quad (3)$$

ただし、 $[Q_B]_i$; 河道*i*の流砂量で、1つの河道内では一定、 $[Q_U]_i$ 、 $[Q_D]_i$; 河道*i*の上・下流端の流量、 $|d_U|_i$ 、 $|d_D|_i$; 河道*i*の上・下流端の粒径。

河道*i*における流量、河床高などの縦断変化は既に理論的に求めたとおりであり、河道上・下流端の関係はそれぞれ次式のように書ける。

$$[Q_D]_i = \exp\left(\frac{7}{6} a_i\right) \cdot [Q_U]_i = g_i \cdot [Q_U]_i \quad (4)$$

$$\frac{[\Delta z]_i}{L_i} = \frac{1 - \exp(-a_i)}{a_i} \left(\frac{D_i}{D_z} \frac{[Q_U]_i}{[Q_B]_i} \right)^{-6/7} = r_i \cdot \left(\frac{[Q_U]_i}{[Q_B]_i} \right)^{-6/7} \quad (5)$$

ここに、 a_i ; 河道 i における流量増加率、 $[\Delta z]_i$; 河道 i における河床高の比高差、 L_i ; 河道 i の河道長、 $D_1=8\sqrt{s q}(\tau_x-\tau_{xc})^{1.5}$ 、 $D_2=6.9\sqrt{q}(s\tau_x)^{5/3}$ 、 s ; 砂礫の水中比重、 $\tau_x \sim 1.23 \cdot \tau_{xc}$; 河床せん断力、 q ; 重力加速度。

これらの関係式を用いると、河道網のパターンごとに流量、河床などの縦断形状を求めることができる。いま、河道網パターンは与えられるものとして、流域最下流端までの流量、河床高の縦断分布を求めるためには、外部リンクの数だけの $[Q_U]_i$ 、 $[Q_B]_i$ 、および河道数だけの g_i 、 L_i の値を知らなくてはならない。

しかしながら、これらの値を個々に求めることは現実的ではない。そこでひとまず、全ての外部リンクにおける $[Q_U]_i$ 、 $[Q_B]_i$ の値は等しく、全ての河道における g_i 、 L_i の値は一定とする簡易モデルを考えることにする。簡易モデルでは、マグニチュード M の河道下流端における流量、河床高および流砂量は次式のように書ける。

$$[Q_D]_M = G_M(g) \cdot [Q_U]_i \quad (6)$$

$$[z]_M = z_x - \sum_{i=1}^M \left(\frac{G_i}{g \cdot i} \right) \cdot [\Delta z]_i \quad (7)$$

$$[\Delta z]_i = r \cdot L \cdot \left(\frac{[Q_U]_i}{[Q_B]_i} \right)^{-6/7} \quad (8)$$

$$[Q_B]_M = M \cdot [Q_B]_i \quad (9)$$

ただし、 G_M ; 河道網パターンに応じて確定する関数、 z_x ; 幹川河道に沿った河床高の比高差、 $[\Delta z]_i$; 最上流端河道 ($M=1$) の比高差。本モデルでは、流量、河床高の縦断変化を求めることができるが、ここでは簡単のため河道下流端の値についてだけ記した。

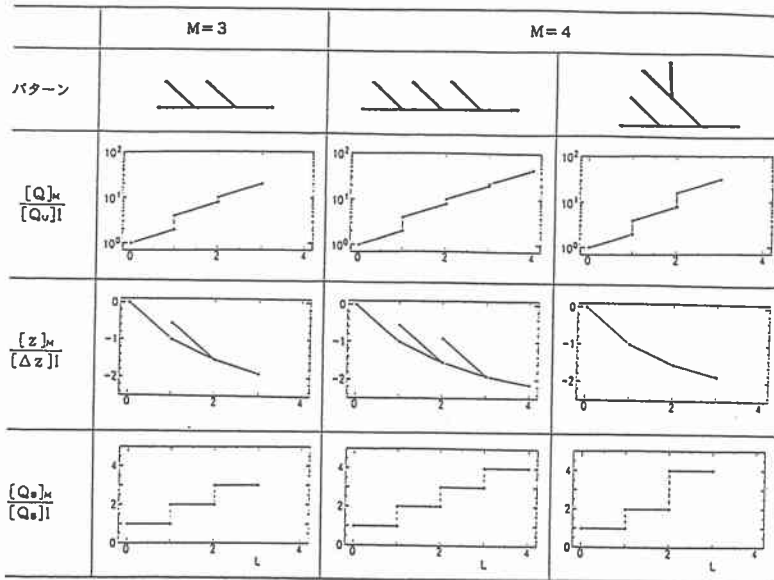


図-1 マグニチュードと縦断形状

本モデルでは、 $[Q_u]_i$ 、 $[Q_B]_i$ 、 g 、 L の4つの値を確定すれば流量、河床高、流砂量などの縦断変化を求めることが出来る。図-1はこれらの値を適当に与え、マグニチュード3および4の場合について、縦断形状を求めた例を示す。

原理的には任意のマグニチュードについて縦断形状を求めることが可能であるが、マグニチュードの増加とともにパターン数は幾何級数的に増大し、実流域のレベルまで拡大することは必ずしも容易ではない。また、実流域のパターンは、このようにして計算された多くのパターンの中の1つに過ぎない。統計的な特性を議論するためならばそのような計算にも意味はあろうが、ここでは、実流域の河道縦断形状や生産土砂量の推定に応用することを主眼にして、特定のパターンについて検討を進めることにする。

3. 豊平峡ダム流域への適用

モデルを実流域に当てはめる場合に、2つの方法が考えられる。第一は複数地点での流量資料が得られる場合であり、流量資料だけから河床高、川幅、粒径などの河道特性量や流砂量の縦断変化を求めることが出来る。第二は基本的には流量資料が得られない場合であり、地形図等から河床高縦断形を読みとることで、川幅、粒径などの河道特性量や流量、流砂量の縦断変化を求めることが出来る。現実の河道で、複数の流量観測資料が得られるケースは多くはなく、流域面積も大きな場合が多い。大きな流域面積の流域では、特性量も空間的に分布することが予想され、モデルの初期的検討にはなじみづらい。ここでは、比較的流域面積の狭いダム流域を対象に、簡易モデルの諸仮定や4定数について検討を行う。流域下流端にダムを有することで、少なくとも最下流端の流量と堆砂量は把握可能である。

実流域にモデルを適用するためには、まず河川網のパターンを確定しなくてはならない。この目的のためには、各種縮尺の地形図その他いろいろなソースの利用が可能であるが、ここでは図-2に示すような国土数値情報の3次メッシュに対応して、各メッシュに1本の河道を配するように調製した河道網図を用いることにする(3)。本図を基に、国土数値情報の流域情報を用いて、理論の適用に必要な流域特性を議論する。

豊平川・豊平峡ダム流域の流域面積は 134 km^2 である。これに対して、河道網図のメッシュ数は 142 個、1メッシュ当たりの面積は 0.9454 km^2 であり、河道網図上の流域面積は 134.2 km^2 となる。

本流域河道網の外部リンク数は 53、河道数は 90 であり、15の3川合流点を有している。

流域の下流端に位置する豊平峡ダムは、昭和47年10月竣工以来、流量や年間の堆砂量などのデータが集積されている。

また、国土数値情報の利用により、後の解析に必要な河道に沿った河床高を知ることが出来るだけでなく、流域地質などを知ることにも出来る。ちなみに、本流域の表層地質はほぼ全域を古第三紀(98.8%)、安山岩質岩石(91.2%)が占めており、流域の92.4%が森林で覆われているなど、極めて均質性の高い流域である。

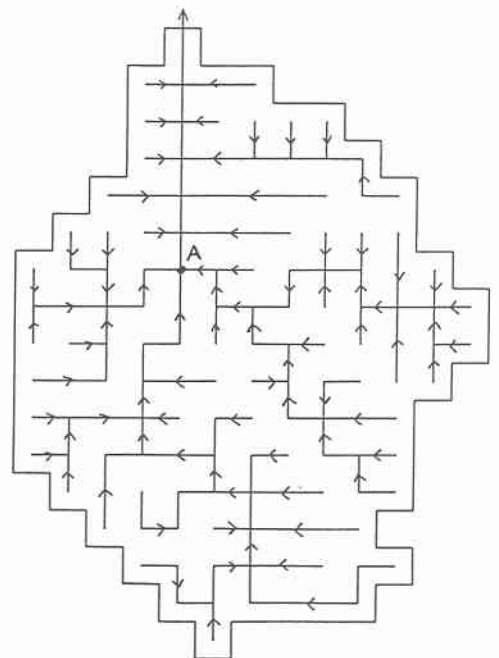


図-2 豊平峡ダム流域の河道網図

a) 河道長

河道長は図-2の河道網図から直接読み取り可能である。図の3次メッシュは、東西方向で 1.021 km、

南北方向で 0.926 km であるが、特に区別することなくメッシュ単位に計測した。図-3に流域内の全河道を対象にしたヒストグラムを示す。平均河道長は 1.57 メッシュであるが、1メッシュ相当の河道が支配的であり、理論構成上河道長Lを定数とした仮定もひとまず許されよう。

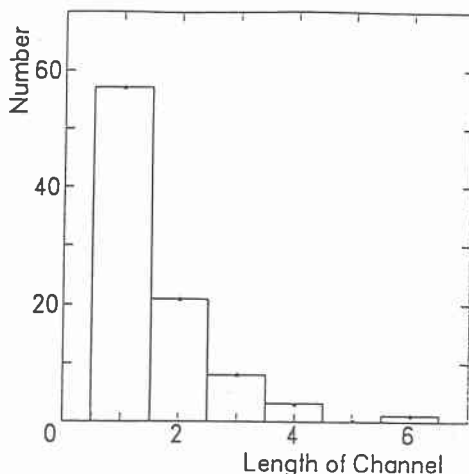


図-3 河道長の分布

b) 流量の縦断変化

流量の河道に沿った変化は、それぞれの河道に式(2), (4)を適用し、河道網に従って式(6)の関数 G_M を求めて行くことにより求められる。これにより外部リンクの流入流量 $[Q_U]_1$ を除く全ての河道の上・下流端の流量は求め得る。個々の河道内の変化は著者ら(1)が既に提案した方法で求め得るが、ここでは簡単のため端点の値のみを求めている。例として、流量資料のある最下流端 (M=53) における関数 G_M を書き下すと下式のように g の16次式となる。

$$G_{53} = 2g^2 + 2g^3 + g^4 + 3g^5 + 3g^6 + 2g^7 + 2g^8 + 8g^9 + 2g^{10} + 6g^{11} + 3g^{12} + 5g^{13} + 6g^{14} + 4g^{15} + 4g^{16} \quad (10)$$

複数箇所の流量資料があれば、 a (または g) および $[Q_U]_1$ を共に特定できることは前に記した。本例では、最下流端の流量のみが既知であるから、次項に述べる方法で別途 a を定め、式(6), (10)より $[Q_U]_1$ を確定することになる。ところで、本モデルでは支配流量の概念を採用している。従って実河川の資料と突き合わせを行うときには、支配流量を具体的に定義しなくてはならない。著者等の一人(4)は、実河川の砂州の形成領域区分に支配流量の概念を用い、平均年最大流量がほぼそれに匹敵することを示している。本例で対象にしている上流域で同様のことが云えるかどうか議論の余地は残るが、ひとまず支配流量として平均年最大流量を用いることにする。

豊平峽ダムにおける平均年最大流量は、昭和48年から平成6年までの22年間の平均で 196.5 m³/sec である。次項で定める $a = 0.15$ を用いて外部リンクの流入流量を定めると $[Q_U]_1 = 0.51$ m³/sec となる。この数値の妥当性を直接議論する資料はないが、ラショナル式を用いて雨量関係を調べてみることにする。外部リンクの集水面積は $A = 0.5$ km² としてよいから、有効雨量を逆算すると日雨量換算で $r_e = 88$ mm/日 となる。ダム流域に最も近い

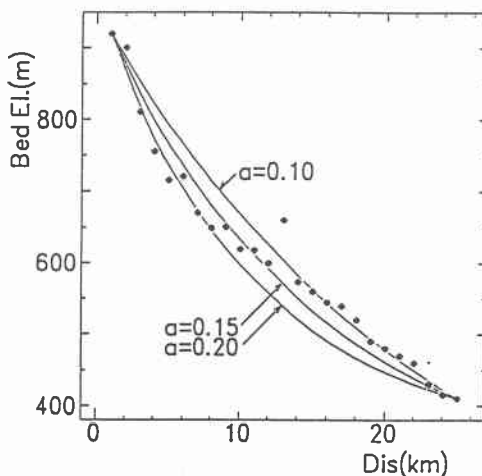


図-4 幹川河道の縦断形状

「小金湯」における平均年最大日雨量は、110 mm/日である。モデルの推定値は、流出係数 $f=0.8$ に相当し、ほぼ妥当な値と考えられる。

外部リンクの流入流量は、降雨資料から直接決定されることが本来の姿であり、今後さらにデーターを積み重ねることにより、降雨資料を統計処理して $[Q_u]_1$ を推定することは充分可能と考えられる。

c) 河床高縦断面

複数箇所の流量資料があれば、河床高縦断面は理論の検証資料として使うことが出来ることは既に記した。ここでは、実際の縦断面に式(7)の理論形状が最も適合するように、2つの未知量 a および $[\Delta z]_1$ を定めることにする。図-4は幹川河道（河道長最大）に沿った縦断面の適合度を、 a の値を変えて調べた例であり、本例では $a=0.15$ を採用してよい。 $[\Delta z]_1$ の値は、幹川河道に沿った比高差が実流域のそれと一致するように定められ、 $[\Delta z]_1=72.27$ m となる。

実流域の河道網の最上流河道の河道勾配を調べると、図-5のようになる。かなり広い範囲に分布しており、一定値を仮定するのは多少ためらわれるが、河道長に L の最頻値をとればモデルによる勾配の推定値は実測値の最頻値とほぼ一致する。

d) 流砂量および生産土砂量

最上流河道 ($M=1$) の流砂量 $[Q_B]_1$ は、式(8)から求められ、 $[Q_B]_1=2.1 \times 10^{-3}$ m³/sec となる。さらに、式(9)より最下流河道 ($M=53$) の流砂量を求めると、 $[Q_B]_{53}=1.1 \times 10^{-1}$ m³/sec となる。

支配流量の下における流砂量の概念を拡張して、年間のダム堆砂量（この経年平均値は平年の年生産土砂量 V_V に相当すると考えられる）を求めるためには、下式のように支配流量の年当たりの見かけの継続時間 α_T を乗ずる必要がある。

$$V_V = \alpha_T \cdot [Q_B]_{53} \quad (11)$$

図-6に示す豊平峡ダムの堆砂の進行状況から、平均年堆砂量を求めると、 $V_V=37,000$ m³/年となる。これより見かけの継続時間を算定すると、 $\alpha_T=92.5$ hr (3.85 日)となる。この数値の妥当性はには判断できないが、上述の「小金湯」の平均月最大雨量は 290 mm であり、前出の平均日最大雨量 110 mm の 2.64 日分に相当する。今後同種の解析を行い、データーを積み重ねることで、 α_T と降雨等との関係を明らかに出来るものと考えられる。

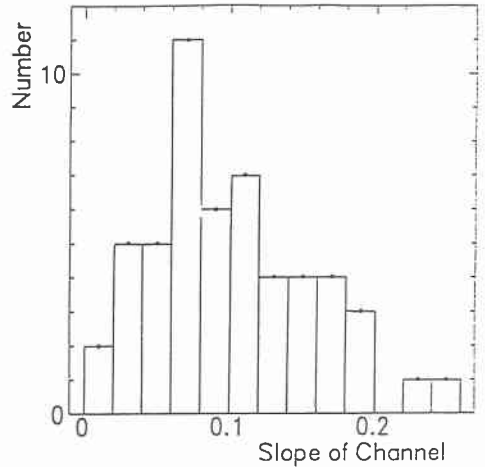


図-5 最上流河道の河床勾配の分布

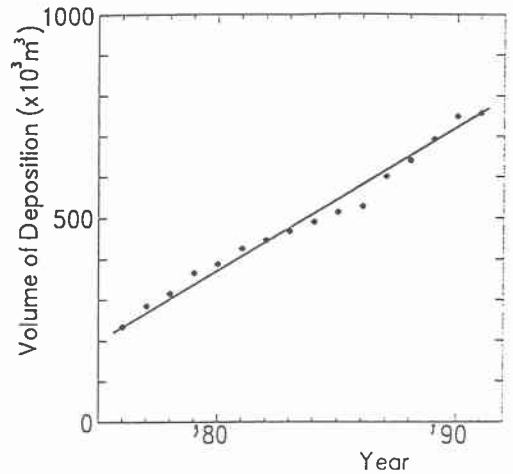


図-6 堆砂の進行状況

最後に、確定したパラメータを用いて計算した、幹川河道に沿った流量および流砂量の縦断変化を図-7, 8に示す。図はいずれも、最上流端の値で規格化して示してある。第9および第10番目の河道の間で流量、流砂量ともに大きなギャップを示している。この位置を図-2の河道網図で見ると、図中にAと書いた地点に対応しており、大きな流域面積を有する2つの支川が合流しているのが確認できる。

また、A点を境にして、流量の増加割合が大きく異なっているが、流砂量については大きな変化は認められない。流量については、横流入の形で縦断方向の流量増加を認めているのに対して、流砂量については単位河道内での増加を認めていないことが主たる原因と考えられる。

4. 結論

本論では、これまでに著者らが開発した河道の安定縦断形状の理論に改良を加え、河道網を考慮した理論の開発を行ない、実流域への適用を試みた。河道網を考慮することで、これまでやや恣意的なところがあった支川の扱い方を明確にすることができた。理論の具体的な運用に当たっては、実流域の資料からパラメータの同定が可能な範囲で簡略化した「簡易モデル」を提案して、豊平峡ダム流域に適用して妥当性の検討を行った。少なくとも本流域では、おおむね妥当な範囲の値が同定可能であることが判った。

本理論は複数地点の流量資料を既知量として河道縦断形状と流域の土砂生産量を推定したり、或いは、河床高縦断形の資料だけを既知としてその他の河道特性量の縦断変化や土砂生産量を推定するための理論的基礎を与えるものである。

謝辞；本研究の一部は（財）北海道河川防災研究センターの1995年研究助成「平年土砂生産量の推定に関する研究」の援助を受けて実施された。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- (1)黒木・板倉；安定河道縦断形状に関する研究、水工学論文集、第39巻、1995。
- (2)黒木・山本・板倉；河道網を考慮した平衡河道縦断形状と流域土砂生産、水工学論文集、第40巻、1996。
- (3)寒地河川研究会；土砂移動問題研究部会資料、1995。
- (4)黒木・岸；沖積地河道の河床形態・流れの形態の形成領域区分、北海道大学工学部研究報告、第118号、1984。

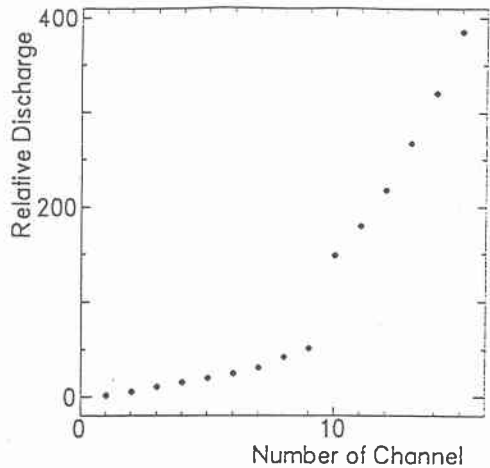


図-7 幹川河道に沿った流量変化

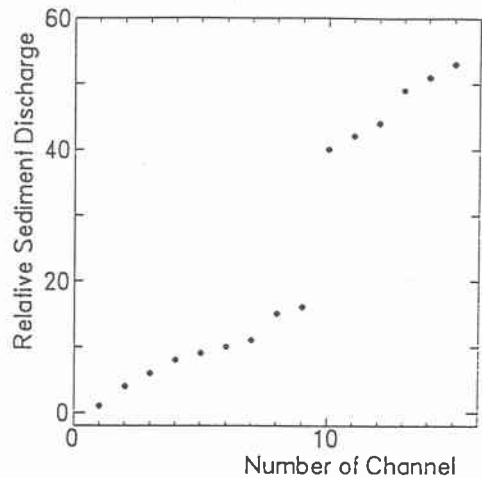


図-8 幹川河道に沿った流砂量変化