

II-17

流出特性分布を考慮した河道網理論とその適用

佐藤工業株式会社 正会員 山本 徹
 北海道大学工学部 フェロー 黒木 幹男
 北海道大学工学部 フェロー 板倉 忠興

1.はじめに

著者らは、幹川河道の安定縦断形状について、理論的解析を行っている¹⁾。この理論は、支配流量の存在を想定しその縦断方向の変化を仮定するだけで、幹川河道の河床高、川幅、平均粒径、水深の縦断方向の変化を予測するものである。実河川の資料との比較を行って、相当程度の妥当性を有することを確認している。さらに本理論は流量資料の不十分な河川の流砂量の推定も可能である。しかし、ここでは支川の扱いが明確ではなかった。そこで幹川河道安定縦断形状の理論に流域全体を考慮する河道網を組み入れ流域の流砂量分布を推定し貯水池内の堆砂土砂地質区分データで検証を行った²⁾。ここでは、外部リンク流入流量を全流域で一定、外部リンク流入流砂量、横流入流量、横流入流砂量を同一支川で一定として扱う極めて簡略化された河道網モデルを使用したので、実流域の種々の特性に対し多少のルーズさを残した。そこで本研究ではそれらの量を全ての単位河道ごとに検討し、流域の流出特性分布を考慮するモデルを新たに構築し、空知川水系金山ダム流域で検証した。

2. 基礎式

(1) 安定縦断形状の基礎式

流れの運動方程式、流れの抵抗則式、平衡横断河床掃流方式、流砂の連続式、流砂量式から河床勾配を流量と流砂量の関数として表すことができる。

$$\frac{dz}{dx} = -C \left(\frac{Q_s(x)}{Q(x)} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (1)$$

ただし、 $C = \left[\frac{8\sqrt{sg}(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{1}{2}}}{6.9\sqrt{g}(s\tau_*)^{\frac{1}{3}}} \right]^{\frac{-6}{7}}$ 、 z : 基準面から測った河床高、 x : 流下方向にとった距離、 Q : 流量、

Q_s : 流砂量、 s : 河床砂礫の水中比重 (=1.65)、 τ_* : 平衡河床掃流力 (=1.23×0.05、 τ_{*c} =0.05)。河床勾配=エネルギー勾配の近似が成り立つ場合、流量と流砂量の縦断分布が与えられれば式(1)を積分して、安定河床高縦断形を求めることができる。

(2) 河道網における基礎式

河道網の表現には、Shreve 流の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、流砂量、流量および粒径の連続式は以下のように表せる。

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

$$[Q]_{i+j} = [Q]_i + [Q]_j \quad (3)$$

$$[d]_{i+j} [Q_{BU}]_{i+j} = [d]_i [Q_{BD}]_i + [d]_j [Q_{BD}]_j \quad (4)$$

The Network Model for Evaluating the Characteristic Distribution of the Discharge And the Application

by Toru Yamamoto, Mikio Kuroki and Tadaoki Itakura

ただし、 $[Q_{BU}]_i, [Q_{BD}]_i$: 河道 i の上、下流端の流砂量、 $[Q_U]_i, [Q_D]_i$: 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。

河道網中の単位河道の流量、流砂量の空間的な増加は1次式で以下のように与える。

$$[Q_U]_i = [Q_U]_i + q_i x \quad (5) \quad [Q_{BU}]_i = [Q_{BU}]_i + q_{s,i} x \quad (6)$$

ただし、 q, q_s : 定数。以上ここまでは、これまでの河道網理論を用いた解析と同様の基礎式である。

3. 河道網理論の再構築

これまでの解析において外部リンク流入流量は解析対象とする全流域で、また外部リンク流入流砂量、横流入流量、横流入流砂量は同一の支川で一定として扱う極めて簡略化されたモデルであった。その結果ある程度の妥当性が確認されたが、国土数値情報3次メッシュに対応して約1 km²に1本の河道を配している粗い河道網を用いていることもあり、簡易河道網モデルでは必ずしも実流域の特性（高度、地質、地形、植生、気候など）に機敏に対応していなかった。幹川河道モデルから簡易河道網モデルに移行し、幹川河道のみならず流域全体の安定河道縦断形を議論することが可能になったがそのラフさも否めない。そこで河道網中のすべての河道、外部リンクに異なる流入流量、流入流砂量を導入することにする。

(1) 単位河道について

いま、河道網のなかから任意のマグニチュードをもつ一本の河道を考える。またこれを単位河道と称する。単位河道の上流端、下流端の河床勾配の関係は式(1),(5),(6)により式(7),(8)のように表現できる。

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_U = -C \left(\frac{Q_{BU}}{Q_U}\right)^{5/2} \quad (7) \quad \left(\frac{dz}{dx}\right)_D = -C \left(\frac{Q_{BU} + q_s \ell}{Q_U + q \ell}\right)^{5/2} \quad (8)$$

ただし、 ℓ : 単位河道長

単位河道の上流端、下流端の座標（河床高、流下方向距離）と河床勾配を与えることによって、数値積分によりこの単位河道の河床高さ縦断形がえられ、上流端流砂量 Q_{BU} 、横流入流量 $q\ell$ 、横流入流砂量 $q_s \ell$ を上流端流量 Q_U であらわすことができる。したがって具体的に上流端流量 Q_U の値がわかると単位河道内の流量、流砂量の縦断分布を得ることができる。

(2) 河道網パターン (M=3) への適用

図-1のような河道網においてマグニチュードMと流量の関係をもとめると以下の例示ようになる。流砂量も同様の表現ができる。尚、各河道長はすべて ℓ で一定である。

M=1	(1) $[Q_U]_1$	(1) $[Q_D]_1 = (1) [Q_U]_1 + q_{(1)} \ell$	(9a)	(2)	(3)
	(2) $[Q_U]_1$	(2) $[Q_D]_1 = (2) [Q_U]_1 + q_{(2)} \ell$	(9b)	(4)	(5)
	(3) $[Q_U]_1$	(3) $[Q_D]_1 = (3) [Q_U]_1 + q_{(3)} \ell$	(9c)		
M=2	$[Q_U]_2 = (1) [Q_D]_1 + (2) [Q_D]_1$	$[Q_D]_2 = [Q_U]_2 + q_{(4)} \ell$	(9d)		
M=3	$[Q_U]_3 = [Q_D]_2 + (3) [Q_D]_1$	$[Q_D]_3 = [Q_U]_3 + q_{(5)} \ell$	(9e)	(1)	(3)

図-1 河道網パターン

式(9)の関係により、河道上流端における流量 $(m) [Q_U]_1$ 、流砂量 $(m) [Q_U]_1$ 、および各河道への横流入に関する量 $q_{(m)}$ 、 $q_{s(m)}$ (m は1から5までの整数) が与えられれば、任意地点の流量、流砂量を確定することができる。図-1の

下流端の流量、流砂量は以下のように示すことができる。

$$[Q_D]_3 = (1)[Q_U]_1 + (2)[Q_U]_1 + (3)[Q_U]_1 + q_{s(1)}\ell + q_{s(2)}\ell + q_{s(3)}\ell + q_{s(4)}\ell + q_{s(5)}\ell \quad (10)$$

$$[Q_{BD}]_3 = (1)[Q_{BU}]_1 + (2)[Q_{BU}]_1 + (3)[Q_{BU}]_1 + q_{s(1)}\ell + q_{s(2)}\ell + q_{s(3)}\ell + q_{s(4)}\ell + q_{s(5)}\ell \quad (11)$$

式(10),(11)より外部リンク3個、河道数5本を有する河道網の外部リンク流入量、横流入量の未知数は流量、流砂量それぞれ8個ずつとなりそれらを確定する必要があることがわかる。3。(1)で述べたように5本の単位河道それぞれの上流端、下流端の座標、河床勾配を与えることによりこの河道網パターンの流量、流砂量の縦断分布を外部リンク流入流量 $(1)[Q_U]_1$ 、 $(2)[Q_U]_1$ 、 $(3)[Q_U]_1$ で表現できる。この際、ジョイント部の座標を同一にする必要がある。

a) 解析例

解析の手順を図-1の河道網例を使って具体的に述べてみることにする。国土数値情報の利用により図-2のように各单位河道の上流端、下流端の座標を知ることができる。なお、 $\ell=1000\text{m}$ とする。

幹川河道((1)-(4)-(5))についてその河床高縦断形がもっとも適合するように河道の安定縦断形状の解析に用いた指数型の縦断形をあてはめる。(ここに幹川河道とは対象とする流域中、マグニチュードと河道長が最大で両者が同位ならば河床標高の低いものとする。)縦断形の適合により幹川河道の各接点の座標と河床勾配が確定する。次に支川についても上流端点と合流点を含む幹川河道3点に指数型の縦断形をあてはめる。なお幹川との合流点座標は一致させる。(図-3)

図-3のように縦断形を適合させ、各单位河道の座標、河床勾配が確定したので、河道ごとに上流端流砂量、横流入流量、横流入流砂量が式(1)(7)(8)により外部リンク流入流量 $(1)[Q_U]_1$ 、 $(2)[Q_U]_1$ 、 $(3)[Q_U]_1$ であらわすことができるようになり、流域全体の流量、流砂量の縦断分布も同様に表現可能となる。この河道網の下流端の流量、流砂量を計算すると以下ようになる。

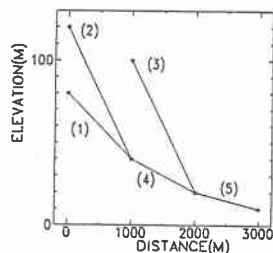


図-2 標高データ

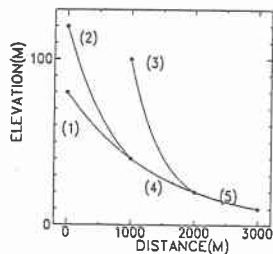


図-3 縦断形適合例

$$[Q_D]_3 = 3.30(1)[Q_U]_1 + 4.49(2)[Q_U]_1 + 4.76(3)[Q_U]_1 \quad (12)$$

$$[Q_{BD}]_3 = (0.83(1)[Q_U]_1 + 1.767(2)[Q_U]_1 + 2.245(3)[Q_U]_1) \times 10^{-3} \quad (13)$$

4. 金山ダム流域への適用

金山ダムは図-4に示すように北海道空知郡南富良野町に位置する石狩川水系空知川の基幹貯水池ダムである。再構築したモデルを実流域に適用するためには、河道網のパターンを確定する必要がある。本解析で用いる「石狩川流域ランドスケープ情報」⁹⁾収録の河道網図を図-5に示す。流域面積は469 km^2 である。



図-4 金山ダム位置図

河道網図のメッシュ数は498個、1メッシュあたり0.942 km^2 であり、外部リンク数190個、河道数497本である。本モデルはダム湖に直接流出する単位河道などを除き図-6のように22の支川と3つの幹川に分割して分けて解析を行った。なお、解析対象メッシュ数483個は流域全体498個の約97%を網羅している。

(1)河床高縦断形

解析は3.(2)で示したような手順で行う。分割した流域ごとにその中でマグニチュード、河道長最大の河道の実河床高縦断形に最も適合するように指数型縦断形をあてはめ、河床勾配、座標を定める。そして、支川の支川および幹川直流入の支川についても同様に適合させ各河道においても河床勾配、座標を確定する。さらに流域の全単位河道についてその上下流端勾配、座標データを与え諸量を計算すると流域の流量、流砂量はすべて解析対象の183個の外部リンク流入流量で表せる。

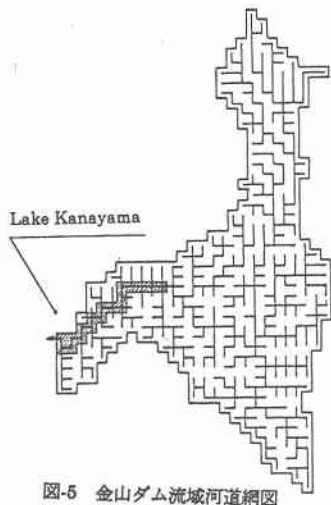


図-5 金山ダム流域河道網図

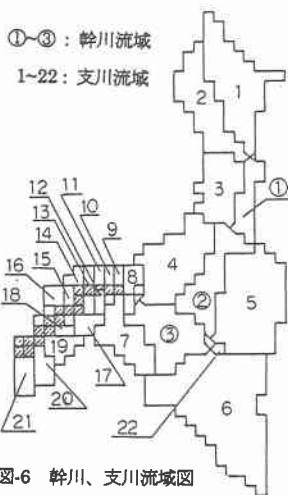


図-6 幹川、支川流域図

外部リンク流入流量の与え方はそれ自体が研究課題であり、様々な方法が提案されているが本研究ではひとまず一定として解析をすすめていくこととする。

図-7,8 は支川1と幹川1の国土数値情報による実データと勾配と座標を与え、各単位河道ごとに算出した縦断形である。実データは直線でむすんである。このようにして22の支川と3つの幹川のすべての単位河道について解析をおこなった。

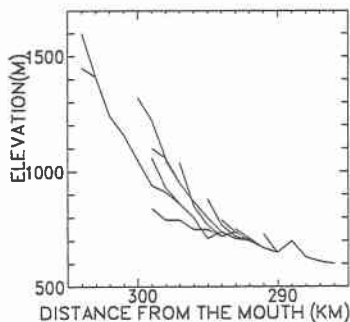


図-7a 支川1 実縦断形

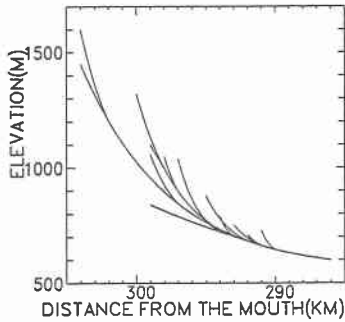


図-7b 支川1 解析縦断形

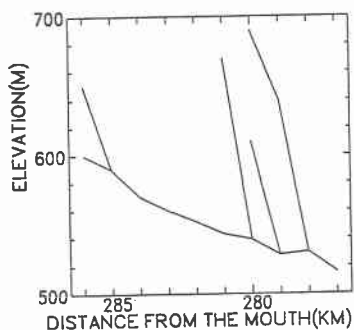


図-8a 幹川1 実縦断形

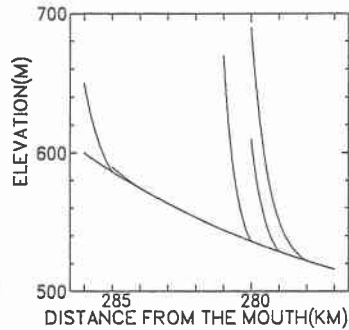


図-8b 幹川1 解析縦断形

(2)流量、流砂量分布

外部リンク流入流量を一定として各支川の流量、流砂量を調べることで、金山ダム流域の流量、流砂量分布を求めることができる。流域の合計流量は式(14)のようになる。

$$\text{sum } Q = 1111.5 \times [Q_u]_1 \quad (14)$$

一方、金山ダム流域の年平均最大流量は $151.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ であるので外部リンク流入流量 $[Q_u]_1$ は $0.137 \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。この数値の妥当性を確かめる資料はないが、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。

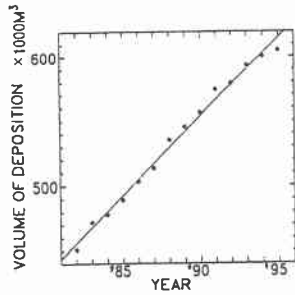


図-9 堆砂進行状況

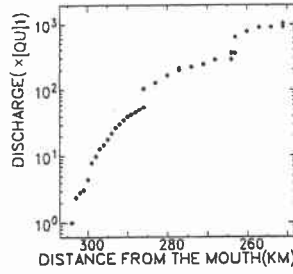


図-10 流量分布

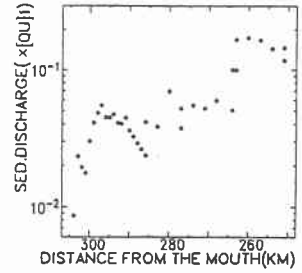


図-11 流砂量分布

外部リンクの集水面積は 0.47km^2 なので有効雨量を逆算すると日雨量換算で $r_e=25\text{mm}/\text{日}$ となる。金山ダム流域の総面積は 469km^2 だから有効雨量を算定すると $r_e=28\text{mm}/\text{日}$ となり無理のない値であることがわかる。外部リンク流入流量の値から流砂量を求めると $3.53 \times 10^{-2}\text{m}^3/\text{sec}$ となる。支配流量下の流砂量の概念を拡張して、年堆砂量または年生産土砂量 V_Y を求めるためには、次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。

$$V_Y = \alpha_T \times \text{SUM } Q_B \quad (15)$$

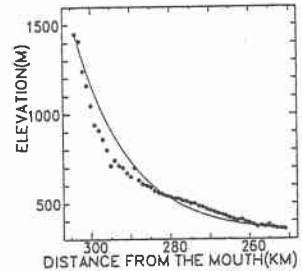


図-12 河床高縦断形

図-9 に示す金山ダムの堆砂の進行状況から平均年堆砂量を求めると、 $V_Y=11800\text{m}^3/\text{year}$ となる。これより見かけの継続時間は $\alpha_T=3.87$ 日となる。この数値の妥当性はにわかに判断できないが、流域の低地部を代表する「幾寅」と高地部を代表する「カミホロ」の降雨資料を平均してみると、S61~H7 までの 10 年間の平均月最大雨量は 243mm であり平均日最大雨量 70mm の 3.47 日分に相当する。今後同種の解析により α_T と降雨の関係を明らかにしていきたい。図-10,11 は支川1→幹川1→幹川2→幹川3の流量と流砂量の縦断分布を示したものである。流量は河道中の横流入、支川合流で増加している様子がわかる。流砂量は相対的には支川合流で増加しているものの、河道中の横流出による減少がみられる。図-10,11 からそれぞれ傾きをもとめ流量、流砂量の指数型縦断分布を算出し、式(1)に代入すると河床高縦断形が求められる。図-12 は支川1→幹川1→幹川2→幹川3までの国土数値情報による標高データと比較したものである。

黒丸が標高データで曲線が計算値である。支川1上流部分の標高が高い影響は否めないが比較的適合しているといえる。

(3) 岩質別流砂分布

金山ダム流域の岩質を図-13 に示したが大別すると、北半部分に火山噴出岩、南半部分には東側から深成岩、変成岩、古期堆積岩と順次分布している。これをもとに今回算出した流砂量を岩質

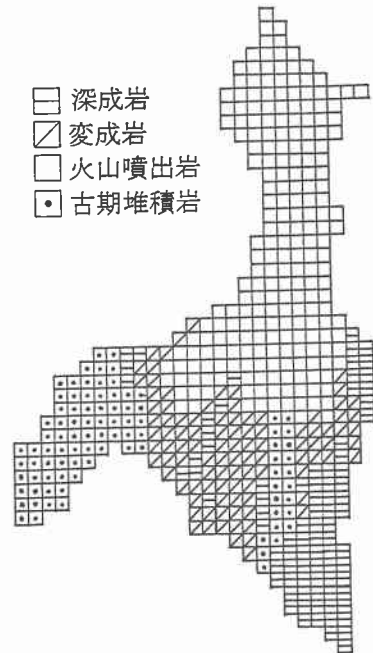


図-13 地質図

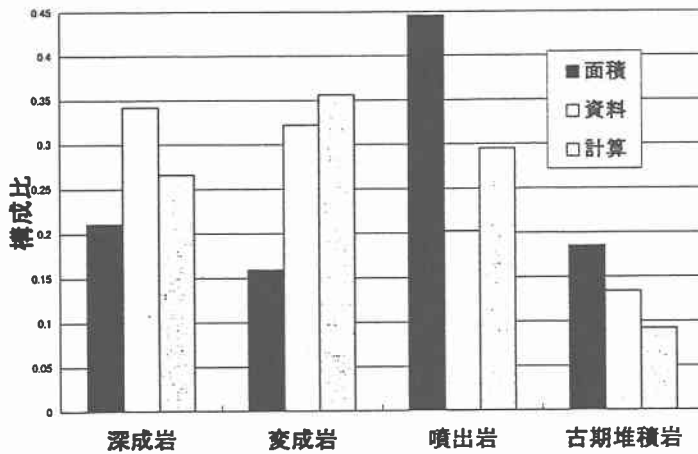


図-14 構成比比較グラフ

別に分類し、その結果を確かめるため金山ダム貯水池の堆砂岩質資料⁴⁾と照合してみることにする。図-14は金山ダム流域の表層地質の岩質別の面積比と資料から得た貯水池内の堆積土砂の岩質比および本研究で算出した岩質別流砂量比である。面積比と堆砂土砂岩質構成比を比べると火山噴出岩が面積比にくらべ堆砂土砂が少ないことと、逆に変成岩が多いことがこの流域の特徴である。一方、解析結果は全体的な傾向として堆砂土砂構成比に類し、ほぼ適合しているといえる。

5. おわりに

これまでの簡易河道網理論を改良し、新たに構築した理論をもちいて金山ダム流域に適用した。すべての単位河道についてそれぞれ座標、河床勾配を与えて、流量、流砂量をもとめ、流域全体の流出特性分布を求めたところ全体的に妥当な結果がえられた。今後は他の河道特性量（河床砂礫の平均粒径、水深、川幅）の分布も議論していきたい。

参考文献

- 1)黒木幹男、板倉忠興：安定河道縦断形状に関する研究、水工学論文集第39巻、pp.641-646,1995
- 2)山本徹、黒木幹男、板倉忠興：河道網理論による金山ダム流域の地質別流砂分布、水工学論文集第41巻 pp.765-770,1997
- 3)財団法人北海道河川防災研究センター：石狩川ランドスケープ情報、1996
- 4)北海道開発局石狩川開発建設部：直轄えん堤維持の内金山ダム堆砂活用調査外2連報告書、1979.11