

河道網理論による金山ダム流域の地質別流砂分布

A distribution of the geological classified sediment discharge
at Kanayama dam basin by network models

山本 徹 *・ 黒木 幹男 **・ 板倉 忠興 ***

By Toru Yamamoto, Mikio Kuroki and Tadaoki Itakura

A model to evaluate the stable longitudinal profile of river channels was derived theoretically by taking the drainage channel networks of the basin into consideration. This model enables us to evaluate the longitudinal variations of flow and sediment discharge, bed elevation, mean diameter of bed materials, width of channels and flow depth. In this model, a linear distribution is used for the flow rate and sediment discharge in a unit river channel. The theoretical analyses are tested by geological classified field data from Kanayama dam basin in Hokkaido. A distribution of the geological classified sediment discharge is nearly fit to the field data.

Keywords : network model, distribution of sediment discharge,
geological classified

1.はじめに

流域内の流砂分布を的確に予測することは河川にとってだけでなくダム、砂防など水と流砂に関わる多くの問題にとって非常に重要な意義をもつにもかかわらず、今日なお困難な問題であり充分解明されているとはいえない。著者らは、河道の安定形状について理論的な解析をおこなっている⁽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、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できる。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、河道安定縦断形の解析方法を用いて河道網理論を構築し、流域の流砂量分布を国土数値情報と地質図（縮尺5万分の1）を併用しながら推定する方法について論じている。貯水池内の堆砂土砂の地質区分データの存在する金山ダム流域を対象に検討を行った。

* 正会員 工修 佐藤工業株式会社 土木技術部（〒103 東京都中央区日本橋本町4丁目12-20）

** 正会員 工博 北海道大学助教授 土木工学科（〒060 札幌市北区北13条西8丁目）

*** 正会員 工博 北海道大学教授 土木工学科（同上）

2. 平衡な単位河道の基礎方程式

以下の記述の必要から、著者らが平衡縦断形状を求める際に用いた基礎式を記述する。

$$\frac{1}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2 + \frac{dh}{dx} = I_b - I_e \quad (1) \quad \frac{Q}{Bh\sqrt{ghI_e}} = 6.9 \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{hI_e}{sd} = C_1 \quad (3) \quad q_B B = Q_B(x) \quad (4)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

ただし、 B : 水路幅、 h : 水深、 $I_b = -dz/dx$: 河床勾配、 z : 河床高、 I_e : エネルギー勾配、 d : 河床砂礫の平均粒径、 s : 河床砂礫の水中比重 (1.65)、 τ_{*c} : 平衡河床掃流力 ($=1.23 \tau_{*c} = 1.23 \times 0.05$)、 $Q_B(x)$: 流砂量で x の関数である。

(1)式は流れの運動方程式である。(2)式は流れの抵抗を表す式で指数型の抵抗則を採用する。(3)式は横断平衡河道形状の解析よりえられた関係式である⁽²⁾。(4)式は流砂の連続式、(5)式は流砂量式である。

ここで $I_b = I_e$ の近似が成り立つ場合(1)~(5)式より河床勾配を流量と流砂量の関数として表せる。

$$\frac{dz}{dx} = -C \left(\frac{Q_B}{Q} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (6) \quad \text{ただし、} \quad C = \left[\frac{8\sqrt{sg}(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}}}{6.9\sqrt{g}(s\tau_*)^{\frac{5}{3}}} \right]$$

流量、流砂量の空間的な増加は一次式で以下のように与える。

$$Q = Q_0 + qx \quad (7)$$

$$Q_B = Q_{B0} + q_s x \quad (8)$$

ただし、 Q_0 : 単位河道上流端の流量、 Q_{B0} : 単位河道上流端の流砂量、 q 、 q_s は定数。

(7),(8)式の関係を(6)式に代入して、無次元表示して積分すると式(9)がえられる。

$$\eta(\xi) = 1 - \frac{\int_0^\xi \left(\frac{1+q_s'\xi}{1+q'\xi} \right)^{\frac{6}{7}} d\xi}{\int_0^1 \left(\frac{1+q_s'\xi}{1+q'\xi} \right)^{\frac{6}{7}} d\xi} \quad (9)$$

ここに、 Δz : 河床標高差、 L : 流路長、 $\eta = \frac{z}{\Delta z}$ 、 $\xi = \frac{x}{L}$ 、 $q_s' = \left(\frac{q_s L}{Q_{B0}} \right)$ 、 $q' = \left(\frac{qL}{Q_0} \right)$ 。

式(9)において q' 、 q_s' を適当にあたえれば、単位河道における縦断形をもとめることができる。

ただし、境界条件として ($z = \Delta z$: $x = 0$) ($z = 0$: $x = L$) を用いた。

3. 河道網における基礎式

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あらわせる。

$$[Q_{BU}]_{i+j} = [Q_{BD}]_i + [Q_{BD}]_j \quad (10) \quad [Q_U]_{i+j} = [Q_D]_i + [Q_D]_j \quad (11)$$

$$[d_U]_{i+j} [Q_{BU}]_{i+j} = [d_D]_i [Q_{BD}]_i + [d_D]_j [Q_{BD}]_j \quad (12)$$

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。

単位河道における流量および流砂量の横流入を(7)式,(8)式のように一次式で与えると、河道長 L_i の単位河道上下流端の流量、流砂量は以下になる。

$$[Q_D]_i=[Q_U]_i+qL_i \tag{13}$$

$$[Q_{BD}]_i=[Q_{BU}]_i+q_sL_i \tag{14}$$

ただし、 L_i ：河道 i の河道長。
例えば、図-1のような河道網モデルにおいて
 $i=3$ の下流端の流量、流砂量はそれぞれ

$[Q_D]_3=3[Q_U]_1+5qL$ 、 $[Q_{BD}]_3=3[Q_{BU}]_1+5q_sL$ となる。このように河道網中の着目するマグニチュードにおいて、流量、流砂量ともに外部リンクの数が外部リンク流入量の乗数となり、河道数が横流入量の乗数となっている。但し、 $L：1$ メッシュ当たりの河道長。

各マグニチュードで(9)式を適用し、 q' 、 q'_s を適当にあたえと河道網における縦断形をもとめることができる。また、(13)式、(14)式を(6)式に代入して(9)式中の q'_s 、 q' を用いると以下のような関係がえられる。

$$\frac{q'_s}{q'}=\left(\frac{dz/dx}{C}\right)^{\frac{7}{6}}\frac{[Q_U]_i}{[Q_{BU}]_i} \tag{15}$$

4. 金山ダム流域への適用

金山ダムは図-2に示すように北海道空知郡南富良野町に位置し、石狩川水系空知川の基幹貯水池ダムである。

本流域にモデルを適用するためには、河道網のパターンを確定する必要がある。それには各種縮尺の地形図等各ソースがあるが、ここでは図-3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整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る。ただし、流域地質は国土数値情報より詳細なデータを得るため5万分の1地質図をもちいる。金山ダムの流域面積は469km²である。これに対して、河道網図のメッシュ数は498個、1メッシュ当たりの面積は0.9417km²であり、河道網図上の流域面積は469km²となる。本流域河道網の外部リンク数は190、河道数は497である。また、国土数値情報の利用により、解析に必要な河道に沿った河床高さを知ることが出来る。

流域の地質を図-4で示したが、大別すると、北半部分に分布する火山噴出岩類、南半部分は東側から深成岩類、変成岩類、貫入岩類、古期堆積岩類と順次分布し、その他河岸に発達する新期堆積岩類に分けられる。

岩質分類はダム堆砂資料⁽⁴⁾に従うこととする。分類名と構成岩石名の対比を表-1に示す。

表-1 岩種分類対比表

深成岩等類	貫入岩類	変成岩類	噴出岩類	古期堆積岩類	新期堆積岩類
花崗岩 片麻岩	緑色岩 輝緑岩	ホルンフェルス	安山岩 流紋岩質凝灰岩 玄武岩	砂岩、粘板岩 輝緑凝灰岩 チャート、石灰岩	砂、礫、粘土



図-1 河道網モデルの例



図-2 金山ダム位置図

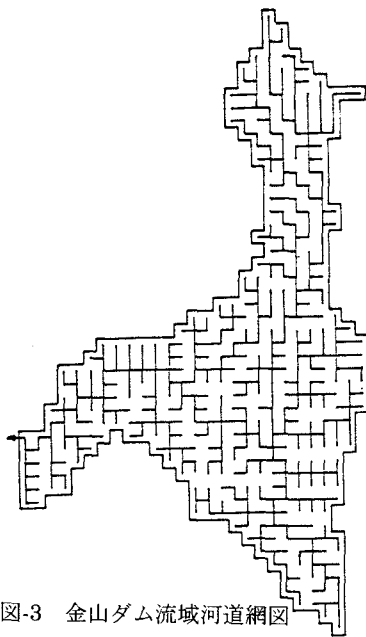


図-3 金山ダム流域河道網図

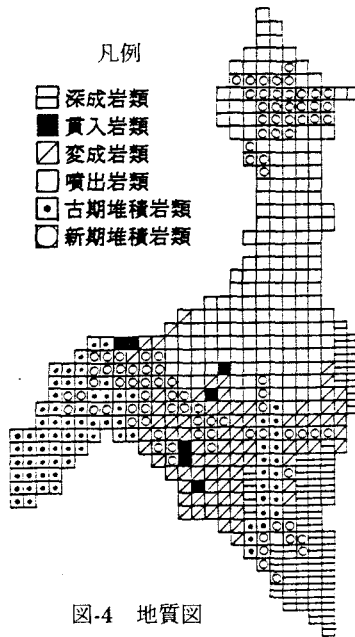


図-4 地質図

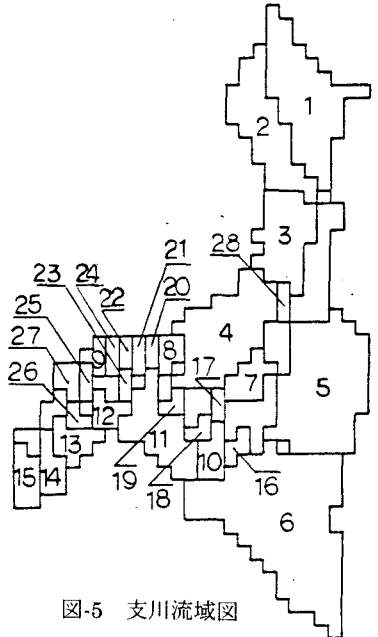


図-5 支川流域図

4.1 河床高縦断形

河道網の各マグニチュードごとに(9)式を適用し、実際の縦断形に理論形状が最も適合するように q' 、 q_s' を定めることとした。本解析ではマグニチュード2以上又は、マグニチュード1でメッシュ数3以上の河道網が必要である。ここでは図-5に示した28支川について調べた。図-6～図-14に9つの支川の河床高縦断形を示す。横軸は河道長で縦軸は上下流端の高低差で無次元化した高さをあらわす。

図中の実線は本解析による理論値、黒丸印は実資料値である。流域面積の大小、勾配の大小にかかわらず、全体的に適合度は良好である。全28支川の解析結果 q' 、 q_s' 、メッシュ数、下流端流砂量式を表-2に示した。流砂量は横流入量と外部リンク流入量の比 q_s' はおおむね0.1であるが、流量の比 q' は、0.1から500までおおきなばつきがある。これは各支川固有の上流部分勾配が関与している。図-15は各支川の上流端部(マグニチュード1)の勾配と下流端部の勾配の比を横軸に、 q' を縦軸にプロットしたものである。概して、勾配比の大きいものほど q' が大きくなっている。

表-2 解析結果

支川メッシュ数	q'	q_s'	下流端流砂量
NO1	49	500	0.1
2	35	40	0.1
3	27	0.5	0.1
4	43	5	0.1
5	63	40	0.1
6	99	300	0.1
7	10	100	0.1
8	5	1	0.1
9	4	4	0.1
10	8	10	0.1
11	25	500	0.1
12	6	10	0.1
13	9	5	0.1
14	8	3	0.1
15	9	0.1	0.1
16	4	1	0.1
17	3	0.2	1
18	3	1	0.1
19	3	0.1	0.3
20	3	2	0.1
21	3	1	0.1
22	3	7	0.1
23	3	2	0.1
24	3	20	0.1
25	3	6	0.1
26	3	15	0.1
27	5	4	0.1
28	3	0.1	1

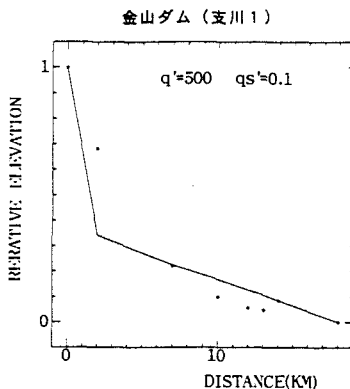


図-6 支川1縦断図

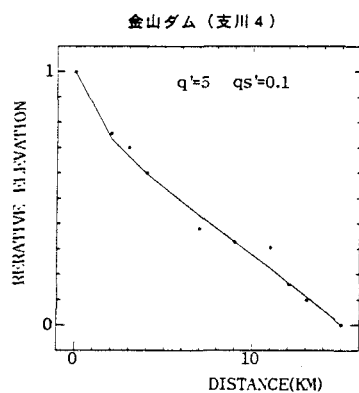


図-7 支川 4 縦断面図

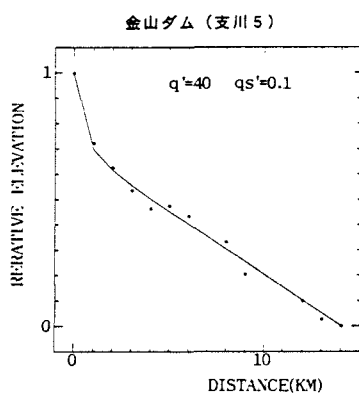


図-8 支川 5 縦断面図

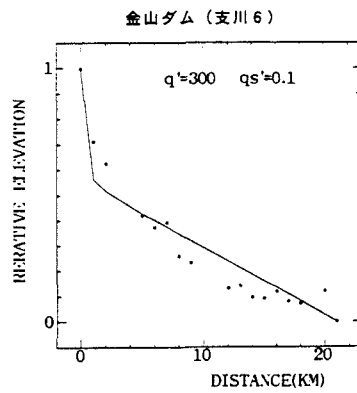


図-9 支川 6 縦断面図

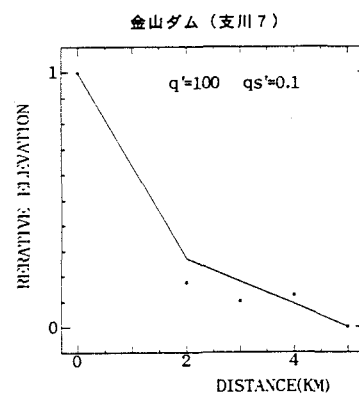


図-10 支川 7 縦断面図

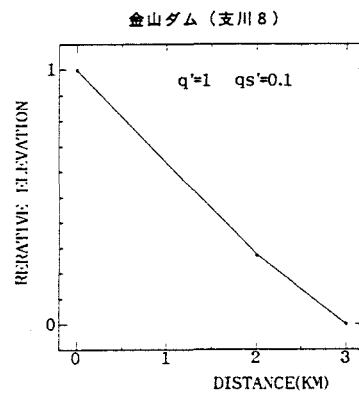


図-11 支川 8 縦断面図

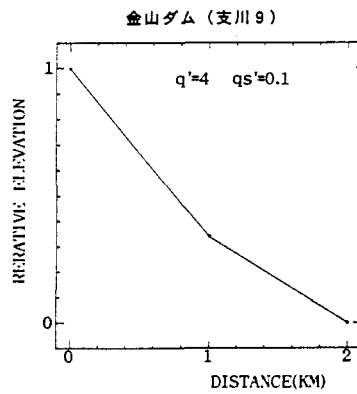


図-12 支川 9 縦断面図

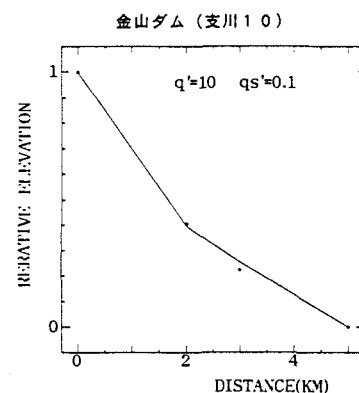


図-13 支川 10 縦断面図

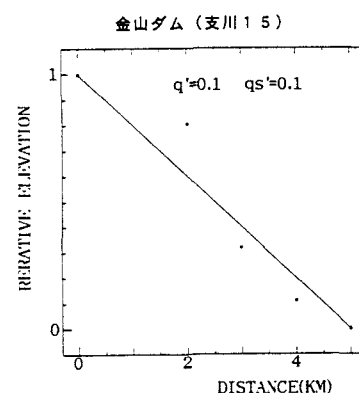


図-14 支川 15 縦断面図

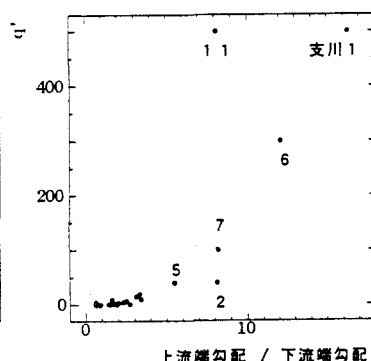


図-15 勾配比 $\sim q'$ 比較グラフ

4.2 流砂分布

各支川ごとの流砂量を調べることで金山ダム流域の流砂分布をもとめることができる。なお 28 の支川の合計メッシュ数は 442 個、金山ダム流域の総メッシュ数 498 個の約 89%を網羅している。各支川の下流端流砂量は表-2 の q_s' と外部リンクの流入流砂量 $[Q_{BL}]_1$ で表わすことができる。さらに(15)式の関係を代入すると、流砂量は外部リンク流入流量 $[Q_U]_1$ と河床勾配 dz/dx であらわせる。本研究では各支川の $[Q_U]_1$ を一定と仮定し dz/dx は各支川の平均勾配を使用することにする。そのことにより各支川の流砂量を $[Q_U]_1$ で表現でき支川間の比較が可能となる。

表-3には主な支川の岩質面積比を上段に、岩質別流砂量を下段にあわせて示した。最下段には28支川の合計流砂量を示した。表-3によると主な支川の流砂量でも $61.40 \times [Q_u]_1$ から $14892.76 \times [Q_u]_1$ まで開きがある。流砂量の多いところは支川1,6,11となっている。流域の中でも、特定の支川流域から多く流出しているということは、単純な面積比で流砂分布を議論できないことがわかる。この結果をたしかめるため、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。この資料はダム貯水池内に存在する堆砂を将来掘削して、砂利資源として活用するために調査したもので貯水池内の堆砂岩質を区分している。それによると採取した資料中、2mm ふるい残留分を岩質区分し、2mm 以下の砂分は前述の構成比を用いて比例配分している。なお、粘土、シルト分は約3.8%と少ない。

図-16 は金山ダム流域の表層地質の岩質別の面積比と資料⁽⁴⁾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を比較したものである。面積比と堆積土砂の岩質構成比を比べると貫入岩（緑色岩、輝緑岩）と変成岩（ホルンフェルス）が面積比にくらべて際立って多いことと、逆に噴出岩（安山岩、玄武岩、流紋岩質凝灰岩）が少ないことがこの流域の特徴である。一方、本研究の解析結果と堆積土砂の岩質構成比と比較すると、変成岩、噴出岩、古期堆積岩では適合度は良好であるが、深成岩、貫入岩にはやや不一致がある。

5. 結論

安定縦断形状の理論⁽¹⁾から流量、流砂量の横流入を考慮した河道網理論を構築し、金山ダム流域中、解析可能なマグニチュード2以上又は、マグニチュード1でメッシュ数3以上の28支川（全体面積の約89%）の流砂分布と岩質別流砂分布を調べた。貯水池堆砂岩質資料で検証を行ったところおおよその妥当性が確認された。特定の流域、特定の岩質から多く流出しているため単純に面積比では説明がつかないことがわかった。

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) 池田駿介・G.Parker・千代田将明・木村義孝：直線礫床河川の動的安定形状とそのスケール、土木学会論文集、pp.117-126、No.375/II-6、1986.11
(3) 寒地河川研究会：土砂移動問題研究部会資料、1995
(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

表-3 主要支川流砂量及び岩種別流砂量

支川	流砂量	深成岩	貫入岩	変成岩	噴出岩	古期堆積岩	新期堆積岩
1	8837.26	0	0	0	0.51	0	0.49
2	299.91	0	0	0	0.69	0	0.31
5	503.37	0.19	0	0.27	0.41	0.00	0.08
6	14892.76	95.64	0	135.91	207.89	0	39.77
7	431.25	0.50	0.01	0.24	0	0.14	0.11
10	61.40	7371.92	148.93	3604.05	0	2099.88	1653.10
11	6497.99	0	0	0.20	0.80	0	0
12	61.96	0	0	86.25	345.00	0	0
合計	31835	7467.6	676.8	5952.8	5313.3	3291.6	9093.3

上段：面積比
下段：流砂量 (× [Qu] ₁ (m³/sec))

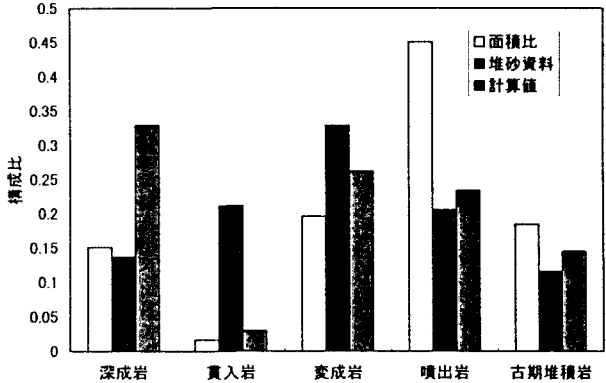


図-16 構成比比較グラフ