

河道網を用いた浮遊砂流出モデル の構築とその適用

RUN-OFF MODEL OF WASH LOAD USING RIVER CHANNEL NETWORK

徳田慎治¹・黒木幹男²・板倉忠興³

Shinji TOKUDA, Mikio KUROKI and Tadaoki ITAKURA

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科環境資源工学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻 (同上)

The run-off of the rain fall is very complex because it has various characteristics especially at the mountainous basin. If a run-off phenomenon can be reproduced well, the prediction of the sediment movement and so on become possible and effective to control and maintain the river channels.

In this study, authors have developed the prediction model in which wash load was evaluated by using the channel network of the digital national land information and the kinematic wave model. The model can evaluate the flow rate and the sediment transport rate at any station in the river basin. The geographic and geological informations were obtained from the Ishikari River Area Landscape Intelligences. It was applied to the Jouzankei Dam basin and compared with the field observations.

Key Words : mountainous river , wash load , kinematic wave model , run-off analysis , river channel network

1. はじめに

山地流域はさまざまな地形, 地質, 植生などの特性を有しているため雨水の挙動はきわめて複雑である。もし山地流域内の流出現象を精度よく再現することができるのであれば, 災害の予測, 土砂動態の予測などが可能になり, 河道の維持または管理をおこなう上で非常に有効である。

本研究では「石狩川流域ランドスケープ情報」¹⁾収録の国土数値情報の第3次メッシュデータからなる河道網とその流域内情報の利用を前提に, 山地流域内での雨水の流れをkinematic wave 法を用いて追跡し, 土砂流出を評価できるような流域内の任意の地点における流量及び浮遊砂量を降雨からセットで評価する流出モデルの開発を進めた。浮遊砂の流出モデルについて, 裸地(崩壊地および禿地)から流出するとした村本ら²⁾の研究, 土石流堆積物の侵食によるとした金屋敷ら³⁾, 江頭ら⁴⁾の研究, 河床からの巻き上げによるとした市毛ら⁵⁾の研究などさまざまな研究がなされているが, 主たる土砂流出源については見解が分かれている。本研究では斜面から斜面流とともに浮遊砂が発生すると仮定し, 流域から一様に流出するケースと崩壊地から発生するケースの2つを考え

た。そしてこのモデルを実流域に適用し, 計算した雨水の流出量, または浮遊砂の時間的濃度変化について, 出水の際, 実測された値と比較し検討した。

2. モデルの構築

このモデルは斜面部と河道部から構成される。図-1は単位流域における斜面部とそこを流れる河道部を模式的に表している。斜面部, 河道部の雨水の流出の計算にはともに Kinematic Wave Model を採用する。

(1) 斜面流

斜面上の流れに対する運動方程式, 連続方程式はそれぞれ(1)式, (2)式を用いる。

$$h = Kq^p \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (2)$$

K, p : 定数, h : 水深, q : 斜面単位幅流量, t : 時間, x : 斜面上流端からの斜面に沿った距離, r : 有

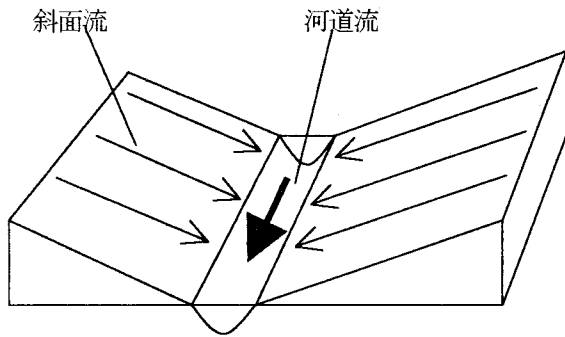


図-1 単位流域内の斜面と河道の模式図

効降雨強度である。ここで、マニング型の抵抗則を適用すると、 i を斜面勾配、 n を斜面の粗度係数としたとき、

$$K = \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{3}{5}} \text{ で } p=0.6 \text{ となる。}$$

(2) 河道流

河道内の流れに対する運動方程式、連続方程式はそれぞれ(3)式、(4)式を用いる。

$$A = K' Q^{p'} \quad (3)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x'} = q_{side}(t) \quad (4)$$

A : 河道の流水断面積, Q : 河道内流量, q_{side} : 斜面単位幅当たりの河道への横流入量, K', p' : 定数, t : 時間, x' : 河道上流端からの河道に沿った距離である。ここで、マニング型の抵抗則を適用して i' を河床勾配, n' を河床の粗度係数, B を川幅, 河道断面を広幅の矩形断面としたとすると $K' = B \left(\frac{n'}{\sqrt{i'}} \right)^{\frac{3}{5}}$ で $p'=0.6$ となる。

本モデルでは上述の様に「石狩川流域ランドスケープ情報」収録の国土数値情報の第3次メッシュデータからなる河道網図を使用する。この河道網図では単位流域は約 1km x 1km の正方形ユニットになっている。河道位置については「石狩川流域ランドスケープ情報」には収録されていない。この研究において、すべてのユニットにおいて河道が一本存在しているとする。したがって、斜面長は河道位置をどう考えるかによって変化する。河道がユニットの端にある場合は約 1km もの斜面を想定することになり、また中央にある場合は河道の両側に約 500m ずつの斜面の長さを想定することになる。今回、河道の位置はすべてのユニットにおいてもっとも流量が

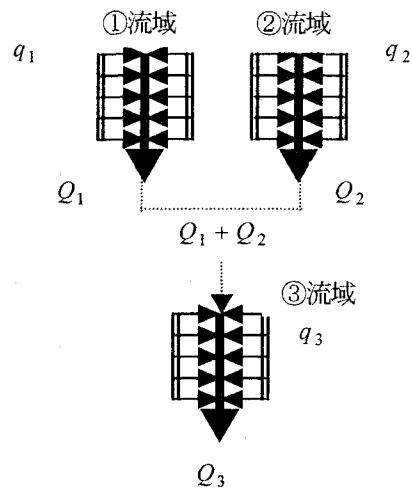


図-2 合流地点における模式図

多くあらわれる中央に位置させ、河道の左右にはそれぞれ 500m ずつの斜面があるものと想定した。

(3) 河道網への適用

上の2つ方法により、単位流域における斜面流出、河道流出を組み合わせ、河道下流端における雨水の流出量を計算することが可能となる。そこで、河道網を考慮した流域の任意の地点における「水」の流出の計算方法を考える。単位流域である正方形ユニットをつなげることで流域は多くの長方形の山腹斜面と、その中を流れ、それらを互いに結合させた河道網とからなる模式的なものに変換される。河道の一部として図-2のような合流地点を例として計算の仕方を述べる。

まず (1)式と (2)式を用いて、雨量が流域斜面を流下して河道に流入する量 q_1, q_2 が求まる。つぎに (3)式と (4)式を用いて、①流域の河道の下流端でのハイドログラフ Q_1 と②流域の河道の下流端でのハイドログラフ Q_2 が求まる。 $Q_1 + Q_2$ が③流域の河道の上流端から流入する。先ほどと同様に、(1)式と (2)式を用い、斜面からの流入量 q_3 を求め、(3)式と (4)式を用い、河道を流下して生ずる③流域の河道の下流端のハイドログラフ Q_3 を算定する。この計算を順次におこなっていくことで流域における任意の地点におけるハイドログラフを求めることができる。

流量の計算に当たっては (1),(2),(3),(4)式を用いて、差分しておこなう。このとき図-1のような 1km x 1km の単位流域において、河道長を10等分、斜面長を10等分して計算した。

斜面流の計算においては斜面勾配、斜面の粗度係数を与える必要がある。本モデルでは「石狩川流域ランドスケープ情報」に収録されている斜面勾配を各ユニットの斜面勾配として採用した。斜面の粗度係数に関しては今のところ適当な情報が与えられないので、流域内で一定と仮定している。

また、河道の計算に当たっては、河道勾配、河道幅、河床の粗度係数を与える必要がある。河道勾配、河道幅は山本・黒木⁶⁾が開発した「河道網モデル」から求めるものを採用する。同モデルは支配流量に対応した動的平衡状態での河床高縦断面形、河床材料の平均粒径、河道幅、水深などの河道特性量の空間的或いは縦断変化を推定するものである。いま、対象河道が動的平衡であると仮定できれば、少なくとも一地点の流量資料、流域の河道網配置、河床高縦断面形を既知として、河道勾配、粒径、河道幅を1ユニットごとに評価することができる。また粒径も求まっているので、河床形態の判定ができれば河床の粗度係数も評価は可能である。

(4) 浮遊砂の生産の仮定

次に浮遊砂の流出の評価方法について述べる。いまここでは、発生する土砂は斜面からのみ生産され、河道内では発生せず、かつ堆積しないとす。いわゆるウォッシュロードとして挙動する。

ここでは、斜面からの浮遊砂の生産量を次のように2つの方法で評価する。第1は斜面での浮遊砂の濃度は斜面の単位幅当たりの横流入流量に比例するもの、すなわちどの場所からでも斜面より土砂が発生する場合。第2に濃度は崩壊地面積量に比例するもの、つまり崩壊地面積量が0であるとき土砂は発生しないというものである。ここで各ユニットの崩壊地面積データは「石狩川流域ランドスケープ情報」に収録されているデータを用いた。2式はそれぞれ

$$C_a = \alpha q_{side} \quad (5)$$

$$C_a = \beta q_{side} A_c / A' \quad (6)$$

で与える。ここで、 C_a : 斜面における単位幅当たりの浮遊砂濃度、 α : 定数、 β : 定数、 A_c : 各ユニットの崩壊地面積、 A' : 各ユニットの流域面積である。

定数 α 、 β については、1洪水期間中に観測された浮遊砂の濃度の測定値のピーク値と計算結果のピーク値が適合するように定め、流域内では一定とした。

また河道における浮遊砂の濃度は、図-3のような単位流域において、(7) 式を仮定し、算出した。この式から各々の地点の単位河道から流出する浮遊砂の濃度 C_d が求まる。

$$C_u Q_u + C_a q_{side} L = C_d Q_d \quad (7)$$

ここで、 C_u : 単位河道の上流端における浮遊砂濃度、 Q_u : 単位河道の上流端における流量、 L : 河道長、 C_d : 単位河道の下流端における浮遊砂濃度、 Q_d : 単位河道の下流端における流量である。

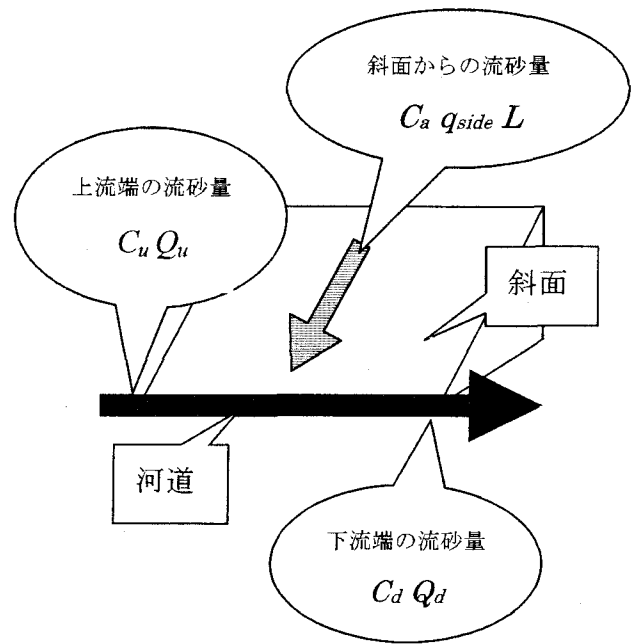


図-3 単位流域における濃度計算

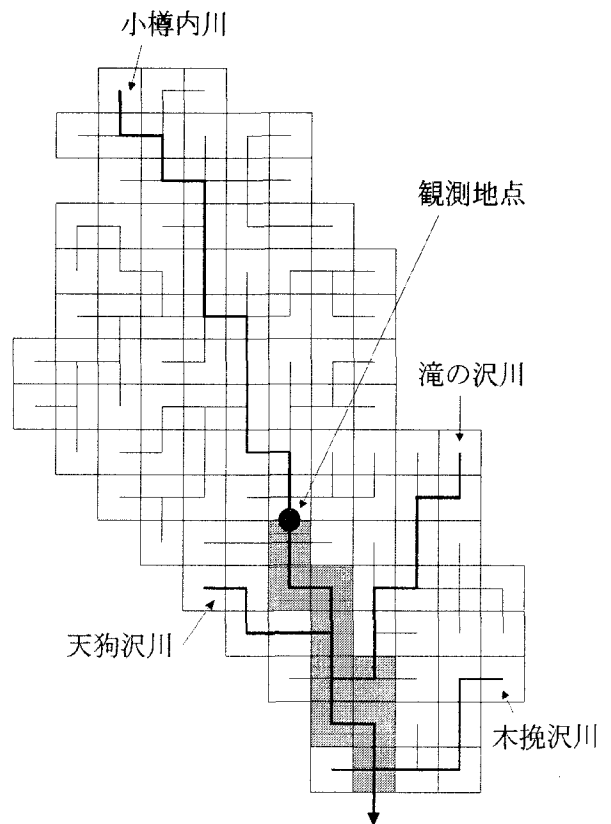


図-4 定山溪ダム流域の河道網図

3. ダム流域への適用

次にこのモデルを実流域に適用する。ダムへの流入流量と土砂濃度の一連の測定値が得られた定山溪ダム流域において解析をおこなった。定山溪ダムは北海道札幌市に位置し、平成元年に治水、利水、発電などを目的とした重力式のコンクリートダムとして完成した。河道網図を図-4に示す。流域面積は 104km² で、流域は小樽内川、滝ノ沢川、木挽沢川、天狗沢川で4分されている。ユニット数は111個、外部リンク数は43個である。本研究では観測地点のある小樽内川流域についての解析をおこなっている。また流入流量、浮遊土砂濃度の実測値が観測された地点は図-4中の黒丸のところである。小樽内川の流域面積は68.9km² であり、解析対象ユニットは75個、外部リンク数は30個である。降雨、流量、浮遊土砂濃度の観測データは平成10年9月16日の 0:00から9月17日の 12:00 までの36時間のデータを用いた。尚、「石狩川流域ランドスケープ情報」収録の崩壊値面積量のデータは平成8年に観測されたものである。

(1) 「水」の流出結果

図-5 は「水」がダム湖へ流入する地点におけるハイドログラフであり、計算値と実測値とを比較したものである。このとき斜面の粗度係数を $n=1.0$ として与えた。「河道網モデル」から求まる河道情報を用いて河床形態の領域区分をすると、岸・黒木⁷⁾による dune I の範囲にすべてのユニットが属している。そこで河床の粗度係数を計算すると、流域内であまり変化しなかった。よって流域内で一定とし、平均した値である $n'=0.05$ を与えた。流出係数は観測地点における計算した総流量と降雨量があうように 0.64 として計算をおこなった。

ハイドログラフをみると、実測値がほぼ一山の出水であるのに対し、計算値では初期降雨に対応して二山になっている。また、ピーク流量の生起時間にもずれがみられる。これらは初期損失などを考量せず流出係数を一律に与えていることなどが影響していると思われる。

(2) 土砂の流出結果

図-6、図-7 は観測地点における浮遊土砂濃度の時間変化の計算値と観測地とを比較したものである。図-6の実線は(5)式、図-7の実線は(6)式に対応している。ここでは観測地点における観測値のピーク値にあうように $\alpha=0.19$ とし、 $\beta=9.3$ として計算をおこなった。いずれの場合においても「水」の流出の再現性の悪さを反映して、計算値では二山の変化を示している。これに対し黒丸で示した実測値の方は一山の変化となっている。ただし、10時間以前の濃度の観測地が存在しないので、その時間以前に濃度があるかどうかは不明である。また、土砂濃度算定方法の違いによらず、観測地点での計算結

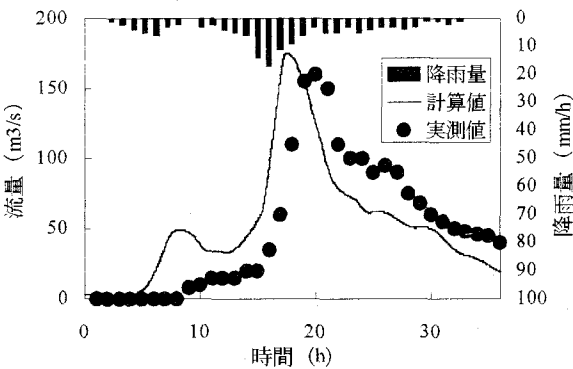


図-5 流出水のハイドログラフ

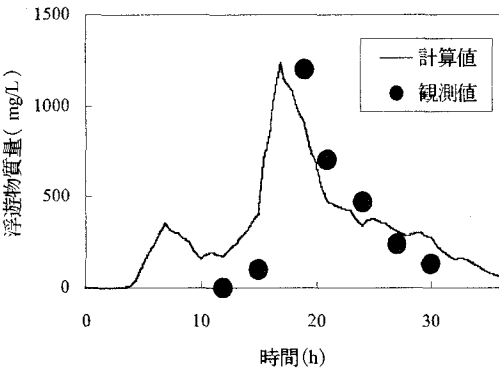


図-6 土砂濃度の時間変化. 式(5)による計算結果

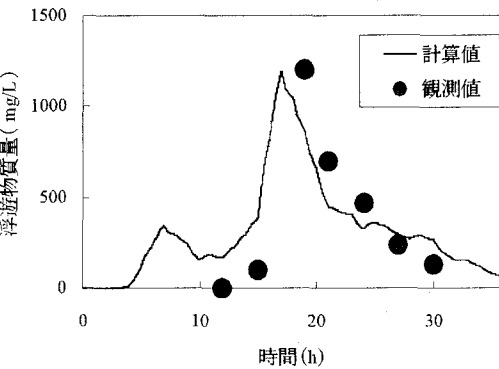


図-7 土砂濃度の時間変化. 式(6)による計算結果

果には大きな違いが見られなかった。

(3) 流量と流砂量の関係

図-8、9 はともに流量と流砂量との関係を示したものである。それぞれ (5)式、(6)式に対応している。何れの場合も時計回りの顕著なループを描いている。出水の増水期に土砂濃度が高濃度になり、減水期には濃度が低濃度になるということはいろいろな機会に観測されている。計算のなかでもこのような結果があらわれた。計算上のメカニズムを説明する。現在、このモデルでは(5)式および(6)式を用いているので、浮遊土砂濃度が斜面

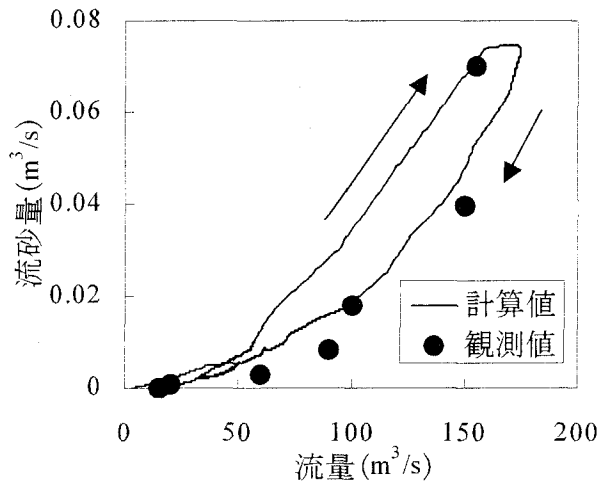


図-8 流量と流砂量 式(5)による計算結果

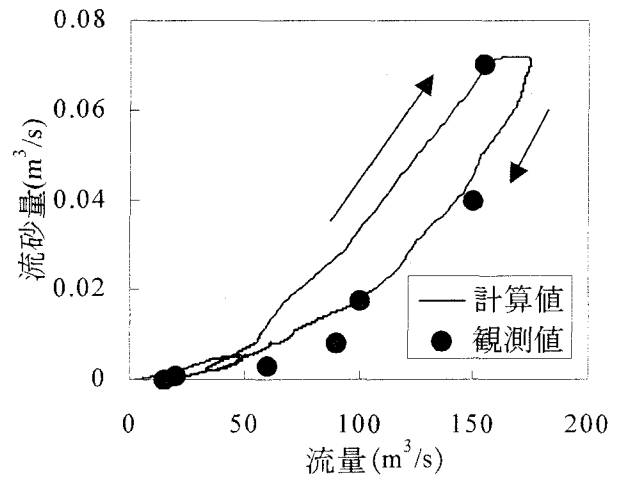


図-9 流量と流砂量 式(6)による計算結果

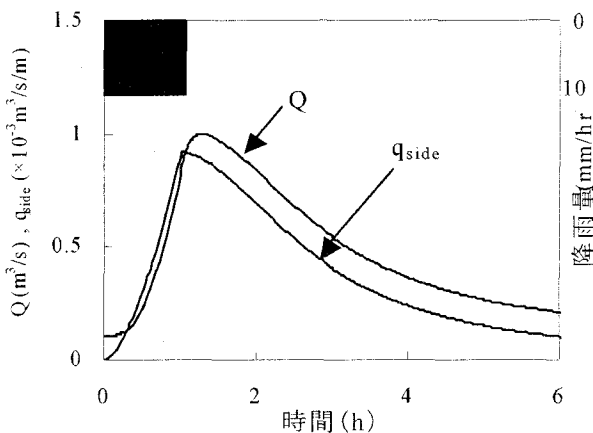


図-10 単位流域の下流端における Q と q_{side}

の単位幅当たりの横流入流量 q_{side} の関数になっている。このため、河道からの流出量 Q と浮遊砂濃度から算出される流出土砂量も q_{side} の関数になる。簡単のため、単位流域について考える。図-10 は単位流域における Q および q_{side} の計算結果である。左軸は $Q(\text{m}^3/\text{s})$ と $q_{side}(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ を表している。降雨は1時間の間に 10mm を降らした。単位流域の計算条件として、基底流量を $0.1(\text{m}^3/\text{s})$ 、河床の粗度係数 0.5、河道勾配 0.01、斜面の粗度係数 0.5、斜面勾配 0.25 を与えた。グラフより q_{side} の方が Q よりはやくピークをむかえている。当然、 q_{side} の関数になっている浮遊流砂量のピーク時間の値も Q のピーク時間の値よりもはやくなる。これは定山溪ダム流域のすべてのユニットについても同じであった。このことと式(7) から、浮遊流砂量のピーク時間の値は流出量のピーク時間の値よりもはやくなるので、図-8、9 のような時計回りのループになる。

(4) 任意の地点における浮遊砂の流出土砂量の評価

観測地点において、流砂量は(5)式、(6)式もほとんど同じものであった。そこで、崩壊地面積量の影響をみる

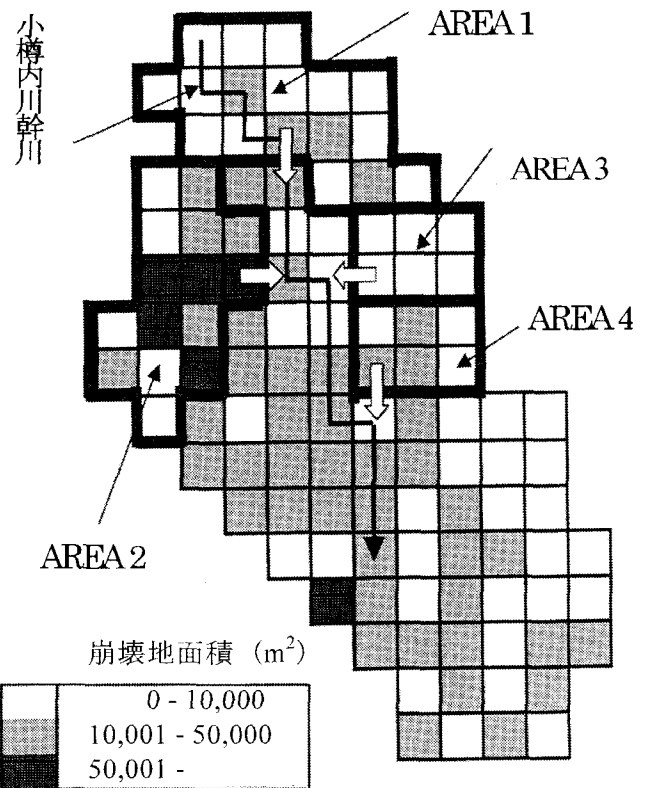


図-11 崩壊地面積分布図

為に、任意の地点における浮遊砂の流出土砂量を評価した。図-11 は「石狩川流域ランドスケープ情報」収録の崩壊地面積データを用いた定山溪ダム流域における崩壊地面積量の分布図である。

ここで図を太枠で囲っているように、小樽内川流域を小樽内川幹川に流入する4つの小流域に分けることとする。それぞれの小流域をAREA 1 ～ AREA 4 と名付け

表-1 各 AREA の特徴

	ユニット数	斜面勾配	河道勾配	崩壊地面積
AREA 1	17	0.19	0.04	7678
AREA 2	15	0.30	0.15	52776
AREA 3	6	0.28	0.09	1296
AREA 4	6	0.34	0.18	8634

崩壊地面積の単位: (m²)

表-2 各 AREA における流砂量

	流出土砂量(式(5))	比流出土砂量	流出土砂量(式(6))	比流出土砂量
	(m ³)	(m ³ /km ²)	(m ³)	(m ³ /km ²)
AREA 1	313.0	18.4	120.0	7.1
AREA 2	285.0	19.0	745.0	49.7
AREA 3	114.0	19.0	8.0	1.3
AREA 4	115.0	19.2	50.0	8.3

る。図の白矢印はその AREA が幹川へ流入する地点である。これらの地点についてそれぞれの評価をおこなった。ただし AREA 1 は小樽内川幹川の上流域である。各 AREA の特徴は 表-1 に示すとおりである。表の斜面勾配、河道勾配、崩壊地面積量はすべて各 AREA における 1km² 当たりの平均値となっている。図-11と表-1より AREA 2 の流域が非常に地形的に特徴があるのがわかる。

図-12は各 AREA の流出ポイントにおける、それぞれ (5)式、(6)式を用いた場合の一洪水における流出土砂量を算出したものである。表-2 からわかるとおり、(5)式を用いたものについては、各 AREA において比流出土砂量は約19m³/km²であり、各 AREA において、ほとんど同じ量が発生していることになる。(6)式を用いたものは、斜面勾配、河道勾配よりも崩壊地面積量の影響を反映していて、各 AREA においてそれぞれの特徴をもった流出土砂量になっている。

4. 結語

本研究では「石狩川流域ランドスケープ情報」用いて降雨による流出と流出土砂量をセットで評価するモデルの構築をおこない、さらに実流域に適用し考察した。降雨による流出の再現性については良好とはいえなかった。今回の流出計算では初期損失など考慮せず、一律に流出係数を与えているだけである。斜面の粗度係数、 α 、 β などに関しても同様である。これらは1つの洪水のみで同定している。今後、これらの同定したパラメーターが妥当であるかどうか、詳細な検証が必要であると思われる。

浮遊砂濃度の時間的変化はある程度再現できることを

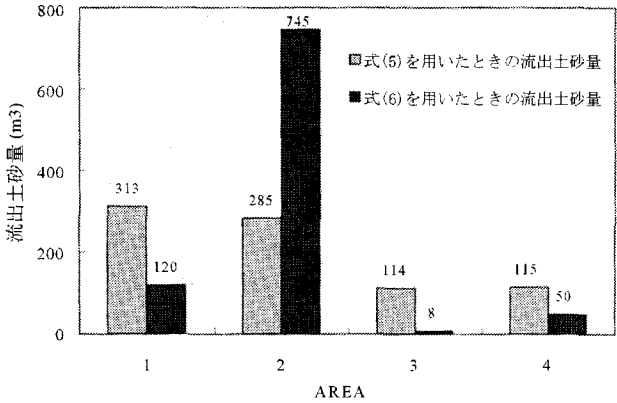


図-12 AREA別流出土砂量

確かめた。観測地点においては (5)式と (6)式を用いた計算結果に顕著な違いはみられなかった。各AREA別でみると (5)式用いたときは斜面勾配、河道勾配が大きく違っても流出土砂量はほとんど同じであった。(6)式を用いたとき、流出土砂量は各 AREA で大きく違った。(6)式では崩壊地面積量が強く反映している。今後さらに、流域特性などを考慮し、計算例を増やし検討をおこなっていきたい。

参考文献

1) 財団法人北海道河川防災研究センター：石狩川流域ランドスケープ情報，1997

2) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：ウォッシュロードの流下過程に関する数値解析，第18回水理講演会講演集，pp91-96，1980

3) 金屋敷忠儀・芦田和男・江頭進治：山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究，第24回水理講演会論文集，pp143-149，1980

4) 江頭進治・松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集第44巻，pp735-740，2000

5) 市毛輝和・真野明・長林久夫：浮遊砂輸送モデルにおける河床細砂の影響，第53回年次学術講演会講演概要集，pp490-491，1998

6) 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，pp765-770，1997

7) 岸力・黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗(Ⅰ)，北海道大学工学部研究報告第67号，1973

8) 徳田慎治・黒木幹男・板倉忠興：河道網を考慮した定山溪ダム流域における浮遊砂の推定，土木学会北海道支部論文報告集第56号(B)，pp128-131，2000

(2000. 10. 2受付)