

山地河川における流砂の観測と解析

Field Measurements and Analysis of Sediment in a Mountain River

川村 力*・清水 康行**・藤田 睦博***・市川 嘉輝****

by Chikara KAWAMURA, Yasuyuki SHIMIZU, Mutsuhiro FUJITA and Yoshiteru ICHIKAWA

It is important in river engineering works to predict the sediment transport output from mountainous river basins. However, there are only a few data on this subject is available due to the difficulty of the measurements. A series of measurements on discharge, bed load and suspended load were conducted in an experimental site of Okukatsura basin located in upstream of the Katsurazawa dam reservoir. Collected data was compared with existing formulae and it was found that it was impossible to predict the sediment transport rate assuming a local equilibrium state. A distributed parameter model was developed to evaluate the flow and sediment transport rate output from a basin and was tested in the experimental basin. The possibility of the qualitative prediction of the sediment transport output from mountainous basin is discussed.

Keywords : mountainous river, sediment transport, field measurements, distributed parameter model, river networks

1. はじめに

河川における流砂の動態を把握することは水工学上の重要な課題の一つである。中でも流砂の発生源である山地河川における流砂量は、下流のダム貯水池や河川への影響、ひいては河川の生産する土砂の海域への影響などを検討するための上流端における境界条件となるため、その定量的な把握は非常に重要である。

流砂量に関しては、現在までに非常に数多くの実験水路や実河川における測定が行われており、また、様々な経験式や理論式が提案されている¹⁾。しかしながら、これらの実験および観測の大部分は環境の整った実験水路や緩流河川における実測が大部分であり、山地河道におけるデータは非常に乏しい。従って、過去に提案されている数々の流砂量式がそのまま山地河川に適用可能かどうか不明であり、山地河川における流砂量の実測データを蓄積することはこれらの問題を研究する上での第一歩と言える。山地河川のうちダム湖上流からの供給土砂量に関しては、ダム貯水池の堆砂量調査などからある程度把握可能ではあるが、実際にダム貯水池の堆砂量調査は多くても年に一回程度行うのが限界であり、一洪水期間における生産土砂量は勿論、時間毎の流砂データを得ることは出来ない。さらに、ダム堆砂量からだけでは、掃流砂と浮遊砂の量的な分離は出来ないため、流砂の質的な検討も難しい。

以上の観点から、本研究においては石狩川水系の幾春別川上流の桂沢ダム上流を試験流域とし、出水時の継続的な流量、浮遊砂、掃流砂観測を実施した。この結果得られたデータおよび、継続的に自動観測が行われている濁度計による濁度データやダム湖の堆砂量調査データなども用いて、様々な角度から観測結果の分析を行った。この結果、濁度計の濁度データや流量から流砂量のある程度推測できた。

* 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (同上)

**** 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒060 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

さらに本論文では、「降雨量からの生産土砂量の予測」の可能性を探る目的で、試験流域の地形図から河道網データを作成し、降雨→斜面浸食→土砂生産→土砂移動の過程を組み入れた計算モデルの構築を行い、試験流域への適用を行った。この結果、現在のモデルでも流量、流砂量ともにある程度再現できた。

2. 現地観測

観測は石狩川水系の幾春別川上流の桂沢ダムの奥桂流域(60km²)で行われた。桂沢ダム流域(図-1)は流域面積約150km²で、流域全体が森林に覆われている。地質は上部エゾ層群が優占しており、上部エゾ層群は主に泥岩、シルト岩で構成されていることから比較的細かい粒子を多く含んでおり、軟質で地滑りが多いのが特徴である。また、流域の広い範囲で森林伐採が行われており、伐採跡地の植生、植林等の成育が地被効果を発揮するまでに至っていない状況である。この伐採による地被効果の減少により、地滑り等を誘発しており、流域内に多量の不安定土砂を内在している。観測は浮流砂、掃流砂が確実に採取できる融雪時期を選んで行われ、観測場所は水位計、濁度計が設置されている桂秋橋地点で行われた。観測項目は、浮子による流量観測のほかに、流速、掃流砂、および浮遊砂の観測が行われた。観測は96年4月27日午後12時から28日午前0時の12時間連続で行われ、流速はプロペラ式流速計で水深方向に4点ずつ。浮遊砂は独自に開発したMTS式採水器(写真-1)で流速と同じ点で採取し、掃流砂は土研式掃流砂採砂器を用いて採取された。観測した流量、浮遊砂、掃流砂量の時間変化を図-2および図-3に示す。ここで、横軸のTは27日の時刻を表しており、Q、Q_sおよびQ_bはそれぞれ流量、浮遊砂量および掃流砂量である。浮遊砂量は採取した水の濃度を流量に乗じて計算し、掃流砂量は採取量(グラム)を(m³)に変換して単位幅、単位時間にしたものに河幅を乗じて計算したものである。図-2を見ると、浮遊砂量のピークが流量のピークより若干先行しているのが分かる。図-4は実測の平均流速と山地河川などで比較的良く合うHeyの式²⁾による計算平均流速を比較したものである。計算に用いた水深や水面勾配は観測値を用いた。この図を見ると、計算流速が大きめにでている。これは河床波の形状抵抗の影響や、湾曲部のため2次流の影響などが考えられる。図-5は浮遊砂の観測で得られた浮遊砂の濃度分布である。縦軸は水深、横軸は浮遊砂濃度であり黒丸は観測値、実線は次式で表されるLane-Kalinskeの濃度分布である。

$$C = C_b \exp(-\beta \xi) \quad (1)$$

ここで、Cは河床からzの距離における濃度、 $\beta = W_f h / \epsilon$ 、 $\epsilon = k u_* h / 6$ 、kはカルマン定数(=0.4)、 ξ

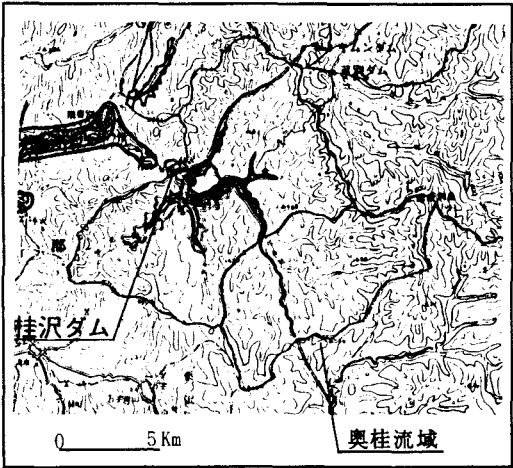


図-1 桂沢ダム流域

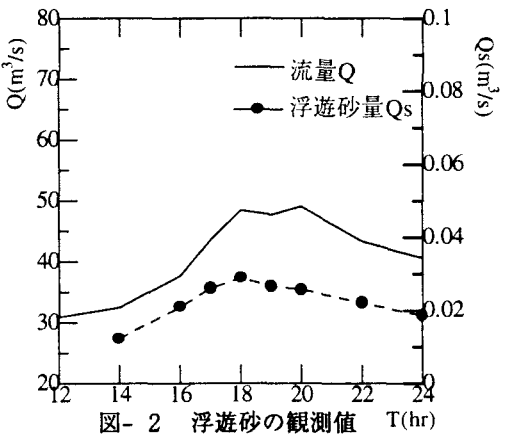


図-2 浮遊砂の観測値 T(hr)

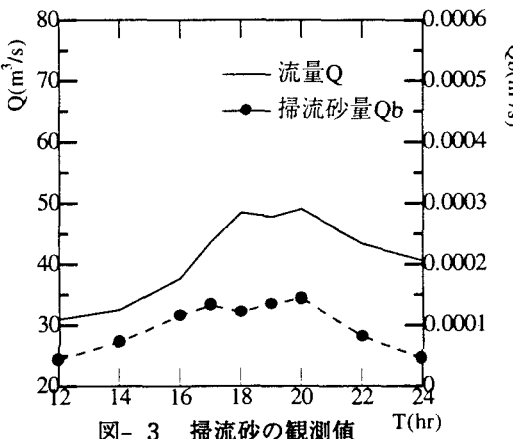


図-3 掃流砂の観測値 T(hr)

$=z/h$, h は水深、 W_f は沈降速度、 C_b は基準点濃度であり観測値のうち最も河床に近い値を用いた。図-5の浮遊砂濃度分布は終始直線的な分布になっているが、これは、山地河川のため河床材料や河床波の影響で浮遊砂が水深方向に良く混合されているのと、浮遊砂のかかなりの部分がウォッシュロードとなって流下しているためと思われる。

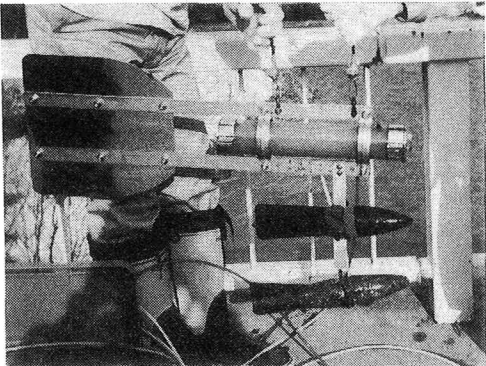


写真- 1 MTS採水器

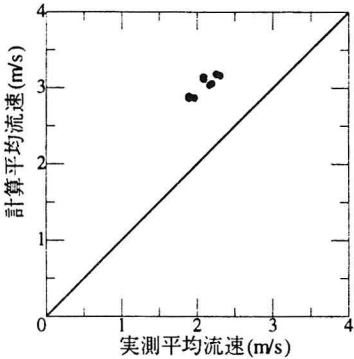


図- 4

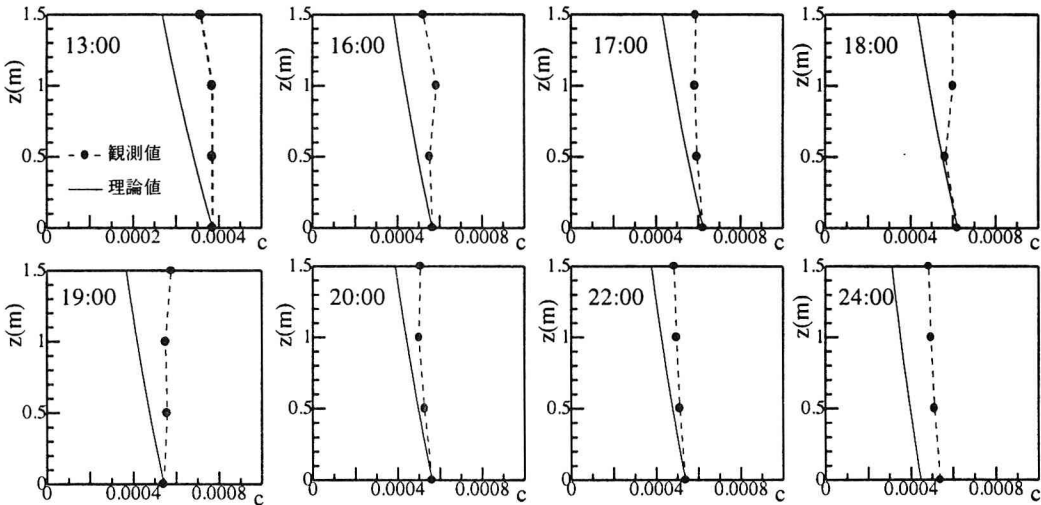


図- 5 浮遊砂濃度分布

3. 観測値の検討

我が国の多くの河川において、浮遊砂量 Q_s と流量 Q との関係が調べられており⁴⁾、一般に一地点における Q_s は Q^2 に比例し次式のように表されることが多い。

$$Q_s = \alpha Q^2 \tag{2}$$

ここで $\alpha = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$ である。今回の観測データをもとに観測地点(桂秋橋)の Q_s と Q の関係をプロットすると図-6のようになる。この図より Q と Q_s の相関式を作成すると次式のようになる。

$$Q_s = 2.42 \times 10^{-6} Q^{2.54} \tag{3}$$

Q の指数は若干大きめではあるが、係数の値は(2)式の α の値の範囲に入っている。また、この観測地点では北海道開発局により

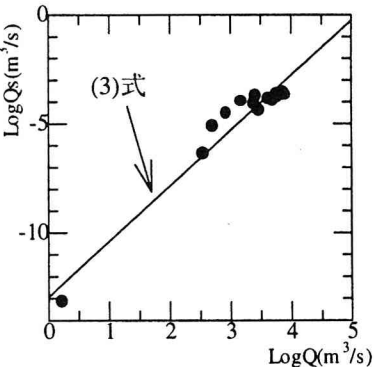


図- 6 流量と浮流砂の関係

年間を通して濁度計による濁度の計測が行われており、この濁度データと今回の浮遊砂の観測濃度（SS）の関係を表したのが図-7である。この図より濁度とSSの関係式を求めると次式のようになる。

$$SS = -0.00079D^2 + 2.565D \tag{4}$$

(3)、(4)式で Q_s を計算した結果を図8、9に示す。図-8、9において、直線は観測流量 Q (obs) 黒丸は浮遊砂量の観測値 Q_s (obs)、黒三角は(3)式で計算した浮遊砂量 Q_{s1} (cal)、黒四角は(4)式で計算した浮遊砂量 Q_{s2} (cal)である。(3)式で計算した浮遊砂量は流量のピーク部分で実測値との差が大きくなっている。(4)式の計算では実測値とよく合っており、これにより観測値がなくても濁度データからある程度浮遊砂量を推測することが可能であると思われる。図-10は篠原、椿⁵⁾による流砂の掃流・浮遊の領域区分図である。この図から今回の観測時の水理条件が掃流砂と浮遊砂の混在した状態であることがわかる。掃流砂の観測結果とMeyer Peter-Müller式を比較したものが図-11である。この図で実線はMPM式で計算した値、黒丸は観測値である。ここで理論値の計算において、水面勾配の値は観測値を用い、粒径は河床材料の平均粒径を用いた。また、せん断力には有効せん断力 $\tau_{*'}^{'}$ を用いた。有効せん断力はHey式の平均流速に観測値を用いて有効水深 h' を求め、この水深を用いて有効せん断力を計算した。無次元せん断力の算定法等に若干の工夫の余地もあるが、掃流砂の観測結果は一般に河川で広く用いられるMeyer Peter-Müllerによる流砂量式と若干はなれている。この観測結果のみからは何とも言えないが、本観測場所のように土砂の生産源に極めて近く、非平衡性が強い地点においては、通常の河川のように掃流砂をその場所のせん断力だけで評価するのは難しいと思われる。図-12は基準点濃度 C_b の観測値と理論値を比較したものである。理論値は浮遊砂の浮上量 q_{su} と沈降量 $W_f \cdot C_b$ が等しいとして、 $C_b = q_{su}/W_f$ とし、粒径別に C_{bi} を計算して、その値に比率を乗じて $C_b (= \sum P_i C_{bi})$ を計算した。粒径は河床の流度分布を用いた。ここで、 P_i 及び C_{bi} は粒径 d_i の粒子であり、浮上量式には板倉の式⁶⁾を使用した。計算に用いたせん断力は前述の有効せん断力である。この図-12においても、観測値が計算値よりも小さくなっているが、ここでも前述のせん断力の評価の問題の他に、河床波や2次流などの影響が原因として考えられる。

4. 数値計算モデルの適応

著者らは流域の標高データから模擬河道網を作成し、その地形データを用いて降雨量から流域下流端の流出土砂量を予測する分布定数系モデルを開発してきた⁷⁾。河道網を用いることにより、流域を河道と斜面に分けて流量と土砂を計算す

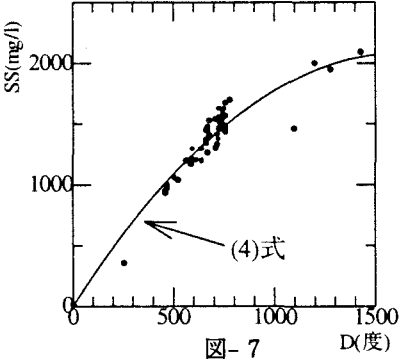


図-7

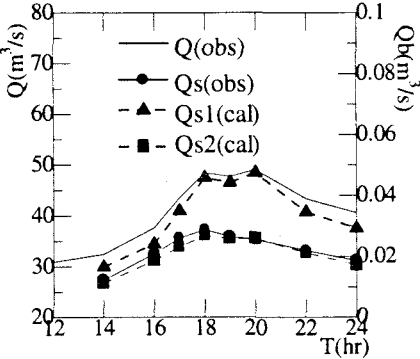


図-8

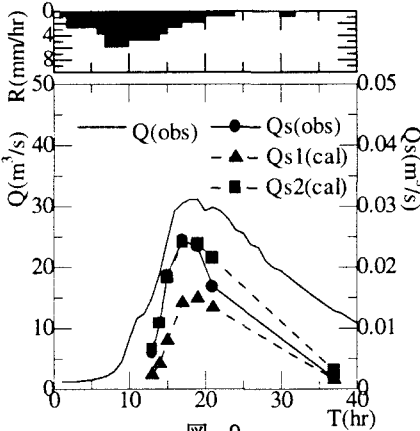


図-9

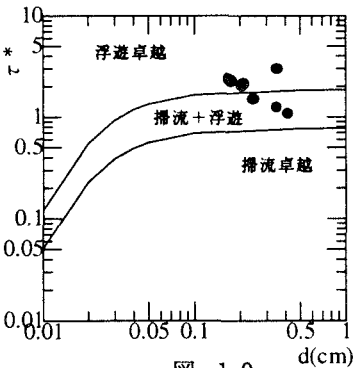


図-10

ることが可能となる。奥桂流域における閾値500⁷⁾の模擬河道網図を図-13に示す。この河道網を用いて、奥桂流域における流量と掃流砂、浮遊砂の計算を行い、観測値と比較してモデルの検討を行う。

4.1 計算方法

流量計算は、河道部分をkinematic wave法により計算し、斜面部分を星らが提案しているkinematic wave法を集中化した総合貯留関数法⁸⁾を用いた。貯留関数法の流域特性を表す貯留係数は、河道網図を用いることにより自動的に決定される。流砂は斜面で生産され、河道に供給されて浮遊砂として流下するものとした。また、計算は混合粒径で行い、河床の粒度分布の初期条件として実測値を流域全体に与えた。浮遊砂の計算は、河床が近似的に平衡状態にあると考え、浮上量と沈降量が等しいとすると、浮遊砂濃度連続式は次式のようにになる。

$$B \frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = q_s \quad (6)$$

ここで、B:河幅(m)、C:水深平均濃度、h:水深(m)、Q:流量(m³/s)、 q_s :単位幅横流入土砂量(m²/s)である。斜面で生産される土砂は簡単に次式⁶⁾で与えた。

$$V = \beta I_s^2 r^2 \quad (7)$$

V:単位面積当たり土砂生産量(m³/km²/hr)、 I_s :斜面勾配、r:雨量強度(mm/hr)、係数 β については、年間の降雨を用いて(7)式により年間の生産土砂量を計算し、桂沢ダムの年堆砂量と比較して妥当な β の値を逆算した。掃流砂の計算法に関しては川村⁴⁾らと同様に、局所的なせん断力から掃流砂量を粒径別にMeyerPeter-Müller式により計算し、同時に河床変動及び河床材料の粒度変化の計算も行うこととした。

4.2 計算結果

図-13の河道網図及び、平成6年9月16日と20日の実測降雨を用いて流量と流砂量の計算を行った結果を図-14から15に示す。ここで、実測降雨は流域内に設置されている3つの雨量計の値を平均して流域全体に与えた。なお、図中の実線は観測流量Q(obs)、破線は計算結果の流量Q(cal)、黒三角は計算の掃流砂と浮遊砂を合わせた流砂量 Q_s (cal)である。図-14において、黒丸は実測の流砂量 Q_s であるが、図-15では実測値が無いので、黒四角は濁度データから計算した流砂量 Q_s である。どちらの計算も、流量に関してはかなり実測値に近い値を示している。流砂量は若干観測値とずれているが、量的にはさほど問題はないと思われる。流量計算だけであれば、河道網を用いてkinematic wave法により計算するのではなく、流域全体を貯留関数法で計算してもほとんど同じ結果⁹⁾になり、計算も簡単である。しかしながら、貯留関数法のような集中定数系モデルの場合、土砂がどのように流域下流端まで輸送されるかといった流砂現象の物理的機構を調べることができない。本モデルによれば、河道網を用いたことで、はじめの降雨により生産された土砂が、河道内に貯留され、その土砂が次の降雨で流域下流端まで輸送されるといった河

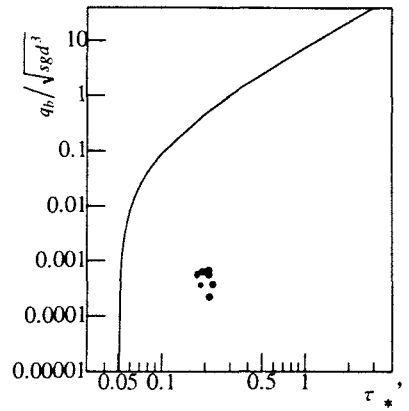


図-11

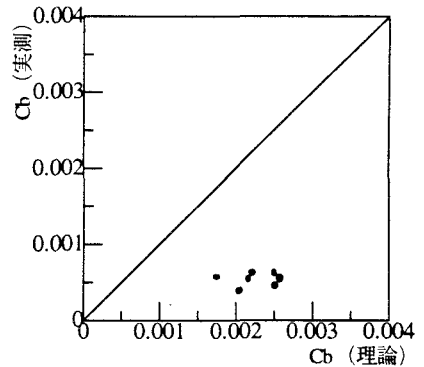


図-12

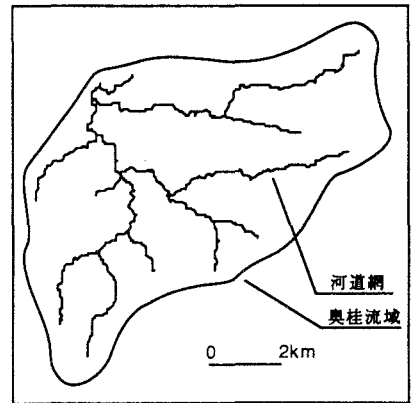


図13 閾値500の河道網図

道の貯留効果を表現でき、また、斜面で生産される土砂量も流域内で分布的に扱うなど流域の形状や、斜面及び河道の特徴を反映した土砂流出計算が可能となる。

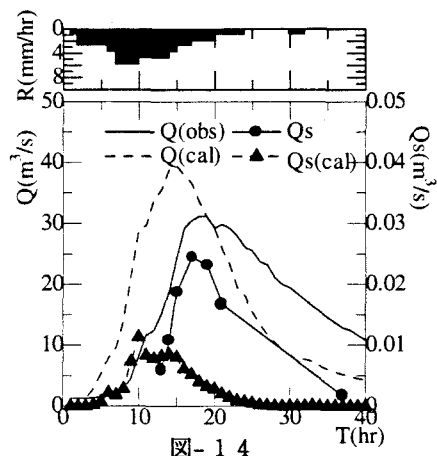


図- 1 4

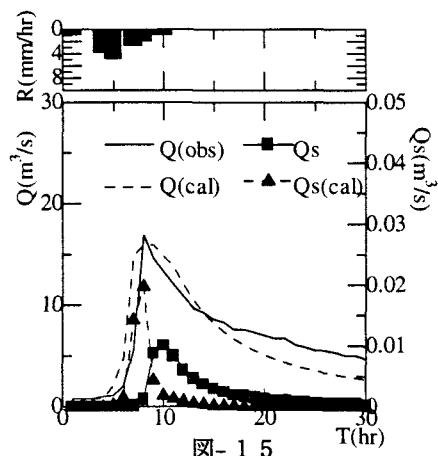


図- 1 5

5. おわりに

以上のことをまとめると次のようである。

- (1) 融雪期における流量、浮遊砂、掃流砂の観測データを得ることができた。
- (2) 濁度データとSS、流量と浮遊砂の相関関係を調べ、その関係から流砂量がある程度推測できた。
- (3) 従来使われている、その場の河床せん断力から計算した掃流砂や浮遊砂濃度を実測値と比較し、その結果、今回観測した場所のような山地河川においては、通常の河川のように掃流砂をその場所のせん断力だけで評価するのは難しいことがわかった。
- (4) 著者らが開発中の数値計算モデルである程度流砂の現象を再現できた。今回は本モデルを一洪水時に適応したが、1年間のような長期間の計算をする場合などに、本モデルでは初期条件として前の影響を考慮できるので、年間の流域からの土砂流出を考える場合に本モデルは有効であり、また、石狩川のような大流域に拡張して計算可能である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北海道開発局幾春別川ダム建設事業所の鈴木健治氏にデータを提供していただいた。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、芦田和男、沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出（21）、京都防災研究所年報第35号、B-2、pp1-11、1992
- 2) 長谷川和義：山地河川の形態と流れ、水工学シリーズ、88-A-8、1988
- 3) 市埜順也、長谷川和義：現地計測に基づく洪水時流速分布の形成メカニズムに関する研究、第14回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、pp56-57、1995
- 4) 水理公式集、土木学会編、pp214-215
- 5) Shinohara, K. and Tsubaki, T.: "On the Characteristics of Sand Waves Formed upon the Beds of Open Channels and Rivers," Reports of Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., vol. 7, No. 25, pp. 83-113, 1959
- 6) 板倉忠興：河川における乱流拡散現象に関する研究、土木試験所報告、第83号、1984
- 7) 川村力、藤田睦博、清水康行：定山溪ダム流域における模擬河道網を用いた土砂流出解析、土木学会北海道支部論文報告集、pp152-157、1996
- 8) 星 清、山岡勲：雨水流法と貯留関数法との相互関係、第26回水理講演会論文集、pp273-278、1982
- 9) 川村力、藤田睦博、清水康行、市川嘉輝：河道網を用いた流出解析、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp148-149、1995