

## II-29

## 斜面流出成分からみた濁度変化

専修大学北海道短期大学 正員 山梨光訓  
 北海道大学工学部 正員 藤田陸博  
 北海道大学工学部 正員 清水康行  
 北海道大学工学部 学生員 田中 敦

## 1. はじめに

河川の融雪流出時に濁度が増加する現象は良く知られている。北海道の融雪期における融雪強度は3~4 mm/hrである。夏季の降雨時に3~4 mm/hr程度の降雨強度では河川水の濁度の増加が起こり得ない。この成因については、必ずしも理論的に明らかではない。著者らは流域土壌の湿潤度が河川濁度の増加に大きな影響を及ぼすものと考えて河川流出量と濁度の変化を試験流域において調査し、理論的解析との対応を検討している。本論文では濁度の増加が流域斜面の表層流出成分と良い関係のあることを見いだした。

## 2. 調査流域

試験流域は美唄の専修大学構内に位置し、図1に示すように南北に向かう斜面をもつ西に開いた谷を持っている。図のA、B地点における流域面積はそれぞれ0.23 km<sup>2</sup>、0.15 km<sup>2</sup>になっている。A、B両地点とも濁度、水位、水温を観測し、地点Bでは気温を、流域の外側に位置するが地点Cでは降水量を観測している。試験流域内は林地で冬季は積雪が1 m以上にも達する。

## 3. 理論解析

河川水の濁度増加の原因は次の2つに大別できる。

- (1) 浮遊砂などの微細な土粒子の増加、
- (2) 河川水の溶解物質の増加

美唄地方の山地部は重粘土層が発達しており、試験地における現地観測の結果からも(1)の原因が卓越しているようである。河川水中における微細土粒子の供給源としては

- (1) 河道内(河床の堆積物の巻き上げ、側岸の浸食)
- (2) 河道外

の2カ所が考えられる。仮に河道外からの土砂供給が濁度増加の原因になっているならば、融雪時あるいは降雨時、表面流が発生していることが考えられる。本論文はこのような観点から考察を進め、以下に示す2つの手法に基づいて理論解析を進めた。

## 1) 水温分離法

融雪期の河川流量は2つの流出成分からなると考えられる。1つは流域斜面を流出する表面流出成分で、もう1つは地下水流出成分である。融雪流出の成分分離法として小林の水温分離法を用い、次式で与えられる。

$$Q_0 = Q_s + Q_{sb} \quad (1)$$

$$T_0 Q_0 = T_s Q_s + T_{sb} Q_{sb} \quad (2)$$

ここで  $Q_0$ : 観測流量,  $Q_s$ : 表面流出量,  $Q_{sb}$ : 地下水流出量,  $T_0$ : 観測河川水温,  $T_s$ : 表面流出水温,  $T_{sb}$ : 地下水流出水温。

表面流出成分とは積雪から河川へ直接流入する流量成分である。したがって、この直接流出成分の水温はほぼ0℃とみなされる。地下水流出成分とは土中から流出する成分で流出時の水温は地温とみることができる。

---

Relationship between Behaviours of Turbidity and Runoff Characteristics  
 by Mitsunori YAMANASHI, Mutsuhiro FUJITA, Yasuyuki SHIMIZU and Atsushi TANAKA

2) 不飽和浸透流理論

2次元の不飽和浸透流方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \quad (3)$$

$$V_x = -K_x \left( \sin \alpha - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$V_y = -K_y \left( \cos \alpha - \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\theta$ : 土壌水分,  $V_x, V_y$ :  $x$ 、 $y$  方向への水分フラックス,  $K_x, K_y$ :  $x$ 、 $y$  方向の不飽和透水係数,  $\alpha$ : 斜面勾配,  $\phi$ : サクシオン。

なお式(3)の座標系を図2に示す。境界条件式としては、式(6)～(9)を採用した。

$$[V_y]_{y=0} = r(t) \cos \alpha$$

$$[V_y]_{y=d} = 0 \quad (7)$$

$$[V_x]_{x=0} = 0 \quad (8)$$

$$\left[ -\frac{\partial V_x}{\partial x} \right]_{x=L} = 0 \quad (9)$$

ここで、 $d$ : 土層の厚さ,  $L$ : 斜面長、 $r(t)$ : 降雨強度。

また、不飽和透水係数～含水率、含水率～サクシオンの関係式として式(10)、(11)を用いた。

$$K = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (10)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{a^2}{\phi^2 + a^2} \quad (11)$$

ここで、 $K_s$ : 飽和透水係数,  $\theta_s, \theta_r$ : 飽和、最小含水率,  $\beta, a$ : 定数。

式(3)～(11)を数値的に計算するには多大の計算時間を必要とする。ここでは、式(3)を $y$ について積分し、式(12)～(16)を基本式とした解析を行った。

$$d \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \cos \alpha \quad (12)$$

$$q = -d \bar{K} \left( \sin \alpha - \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) \quad (13)$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{d} \int_0^d \theta dy \quad (14)$$

$$\frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{a^2}{\bar{\phi}^2 + a^2} \quad (15)$$

$$\bar{K} = K_s \left( \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (16)$$

ここで  $q$ : 単位幅あたりの流出量

式(12)～(16)を試験地に適用するにあたって、試験地を図3に示すような矩形斜面モデルに置換した。また、式(12)～(16)より得られた  $\bar{\phi}$  が図4(A)に示すように  $0 \leq x \leq B$  の区間で  $\bar{\phi} < 0$  のとき、斜面末端からの流出水は土壤層からの流出 ( $Q_{sb}$ ) とみなした。図4(B)のような状態のとき  $B_c < x < B$  の区間で表面流  $Q_s$  が発生していると考えた。これらの関係をまとめると以下のようになる。

$$Q = \begin{cases} Q_{sb} = L_c q & \bar{\phi} \leq 0, 0 \leq x \leq B \\ \begin{cases} Q_s = r(B - B_c)L_c \cos\alpha & B_c \leq x \leq B \\ Q_{sb} = L_c q \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

計算にあたって用いた定数値を式(18)に示す。

$$\left[ \begin{array}{lll} B=69 \text{ m} & L_c=1000 \text{ m} & \\ \theta_s=0.7 & \theta_r=0.4 & K_s=0.001 \text{ cm/s} \\ a=900 \text{ cm}, & \beta=6 & \end{array} \right] \quad (18)$$

#### 4. 解析結果

##### 1) 小林の水温分離法による解析結果

図5は小林の水温による流出成分分離を試験地の地点Aにおける観測値に適用した場合である。流域の地温には5℃を与え、表面流出成分と地下水流出成分に分離した。濁度変化のピーク値は表面流出成分との対応がよい。

##### 2) 不飽和浸透流理論による解析結果

融雪期の地点Bにおける観測値に不飽和浸透理論を応用して表面流出成分、地下水流出成分を算定した結果を、図6に示す。濁度変化と表面流出成分の応答をみることができる。

##### 3) 夏季における解析結果

図7は夏季間の降雨による濁度変化と地下水流出成分との関係を示す。不飽和浸透理論のみを適用する。融雪期と異なり表面流出成分がみられないが濁度変化が生じている。これは河川流路内の濁質への水理学的営力によるものと考えられる。

#### 5. おわりに

融雪期における流域斜面の表面流は土壤表層中の水分量の増大によって起きるものであろう。融雪期の濁度の増加はこの表面流の発生に起因するものと考えられる。

#### 参考文献

1) Mitsunori YAMANASHI, Mutsuhiro FUJITA and Akira MITO, Relationship Between Runoff and Turbidity Characteristics, International Congress on Modeling and Simulation Proceedings, Vol.3: Water Resources and Ecology, pp339-344, 1995.

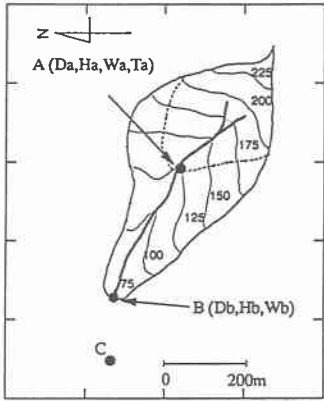


図1 試験流域

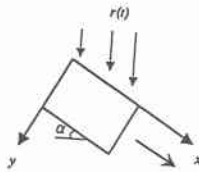


図2 座標系

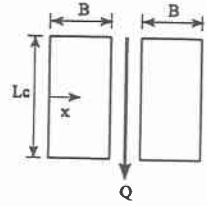
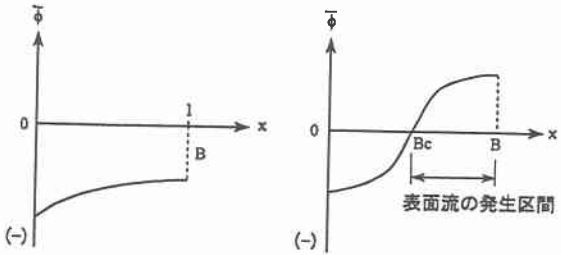


図3 試験流域のモデル化



(A) 表面流生起せず (B) 表面流発生

図4  $\phi \sim x$  の模式図

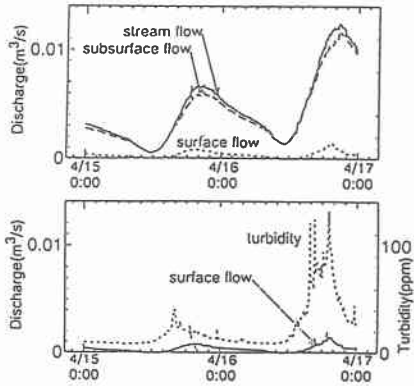


図5 濁度と流出成分 (水分分離法)

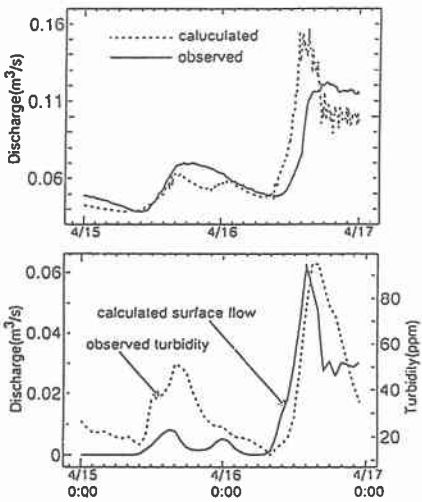


図6 濁度と流出成分 (不飽和浸透流理論)

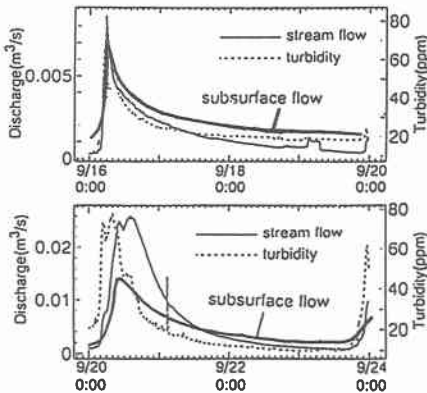


図7 濁度と流出 (夏季降雨時)