

# 小流域における水質ハイドログラフの形成過程 に関する研究

## A STUDY ON FORMATION PROCESS OF WATER QUALITY HYDROGRAPH IN A SMALL BASIN

呉修一<sup>1</sup>・北村知里<sup>2</sup>・江花亮<sup>3</sup>・山田正<sup>4</sup>

Shuichi KURE, Chisato KITAMURA, Ryou EBANA and Tadashi YAMADA

<sup>1</sup> 学生員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>2</sup> 学生員 中央大学 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>3</sup> 正会員 (社) 福島県建設産業団体連合会 (〒960-8061 福島県福島市五月町 4-25)

<sup>4</sup> 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The purpose of the present study is to clarify formation process of the water quality hydrograph. We obtained two ordinary equations to approximately and conveniently express the hydrographs of discharge and water quality. The characteristics of water quality hydrograph observed in mountainous basins can be explained rationally by the method. The method to estimate generation function in formation process of water quality hydrograph using inverse estimation from observed water quality concentration, discharge and rainfall data is newly proposed in this paper. A method is applied to several water quality hydrograph at three different mountainous basins. The result of estimation show eduction and re-suspension is generated from rainfall and influenced by initial condition of water quality concentration.

**Key Words:** *Water quality hydrograph, Runoff, Small basin, Lumped model, Inverse estimation*

### 1. はじめに

河川、湖沼において降雨流出に伴い汚濁負荷物質が流出し COD 等の水質指標は洪水前後において異なる値を示す。これは、下水処理場や生活廃水のような点源負荷の要因以上に、流域や田畑のような面源負荷が起源であり大きな要因を占める。河川や湖沼への流入負荷の総量のうちかなりの部分が降雨時に流入しており、汚濁負荷物質の発生源としての流域特性と降雨流出に伴う汚濁負荷物質流入形態の関係を追及することは非常に重要である。つまりは、出水時の河川水質濃度変化を表す水質ハイドログラフの特性を把握し、その予測手法を確立することは湖沼等の閉鎖性水域における富栄養化問題、土砂流出が河口部の魚介類に与える影響等の環境要因に対して非常に有益な知見を与えるものと考えられる。

従来から降雨時の水質濃度変化特性の把握および流出成分分離の問題に関して水質成分の側面からの試みを目的とした観測が行われている。

平田・村岡ら<sup>1)</sup>は、降雨時の渓流水質変化には二つのタイプがあり、降雨に対する溶存物質の応答特性の違いは逡減時に現われ、濃度が降雨前のベース値に回復する

物質とこれを上回る物質に大別されることを示した。

竹内・坂本ら<sup>2)</sup>は、実測により NO<sub>3</sub> の河川における降雨時の変化には流量ピークよりも NO<sub>3</sub> の濃度ピークが遅く現れる場合と早く現れる場合、流量ピーク時に減少する場合があることを示している。

これらの実測から判断し、降雨時の河川渓流水質は、1) 流量ピークより物質濃度ピークが早い初期高濃度型 (ファーストフラッシュ型)、2) 濃度ピークが遅い後期高濃度型、3) 流量の希釈効果に伴い流量ピーク時に濃度が最小値をとる流量希釈型の 3 つに大別できると考える。著者らは文献(3)において、単一斜面における降雨流出に伴う物質濃度変化を質量保存則から導出するとともに、近似方程式を導出している。この方程式の解の特性から上記 3 タイプの水質ハイドログラフの特性が良好に再現されていることを確認している。

ところで、微細砂表面に付着した栄養塩等が河川環境に与える影響の把握や、流水による河床変動や侵食、降雨による斜面崩壊等の予測を目的とし、洪水時の浮遊砂・ウォッシュロード等の観測、流出予測手法の提案も行われている。

平林・砂田ら<sup>4)</sup>はウォッシュロードの発生について雨

滴による生産モデルと表面流による生産モデルを併用し、雨滴によるものがピーク付近の濃度変化を、表面流によるものが洪水後半での濃度変化を支配していることを示した。同様に、酒井ら<sup>3)</sup>は浮遊土砂濃度変化における発生項としての侵食量を降雨による侵食と流水による侵食を考慮することにより、ファーストフラッシュ型の水質濃度変化は降雨による侵食を考慮した場合に現れることを示した。

以上のことから判断し、物質濃度変化を予測する際に重要な点は物質の発生をいかに扱うかであると著者らは考える。本論文では流域の最小単位として単一斜面を考え、降雨流出に伴う物質濃度変化の式を導出し、発生項としての析出量を逆推定する手法を提案するとともに、析出量の水理・水文特性の把握を試みる。

## 2. 単一斜面における降雨流出に伴う物質濃度変化の基礎式の導出

著者ら<sup>3)</sup>は単一斜面における水質ハイドログラフの形成過程を理論的に説明する物質濃度変化の基本式を、斜面における表面流を Kinematic Wave として取り扱うとともに、物質濃度変化における諸関係のうち唯一確実といえる質量保存則を用いることにより導出している。以下にその理論概要を示す。

一般化した運動則(1)式を連続式(2)式に代入し単位幅流量  $q$  について整理すると(3)式の表面流に関する kinematic wave 方程式が得られる。

$$v = ah^m, q = vh = ah^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + aq^\beta \frac{\partial q}{\partial x} = aq^\beta r(t) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } a = (m+1)\alpha^{m+1} \quad (4), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (5)$$

ここに、 $v$ : 断面平均流速[mm/h],  $h$ : 水深[mm],  $q(t)$ : 単位幅流量[mm<sup>2</sup>/h],  $r(t)$ : 有効降雨強度[mm/h],  $m$ : 流出パラメータ(抵抗則),  $\alpha$ : 流出特性を表すパラメータである。

この(3)式が降雨流出を表す基礎式となる。斜面流として飽和・不飽和浸透流を対象とする場合、流域特性を示すパラメータ  $\alpha, m$  の値は(6), (7)式に示すよう土壌・地形特性から決定される。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (6), \quad \gamma = m+1 \quad (7)$$

ここに、 $D$ : 表層土層厚,  $\gamma$ : 土壌の透水性を表す無次元パラメータ,  $k_s$ : 飽和透水係数,  $w$ : 有効空隙率,  $i$ : 斜面勾配である。

降雨流出に伴う物質濃度変化の基礎式に関しては、質量保存則として(8)式が成立する。

$$\frac{\partial(c \cdot h)}{\partial t} + \frac{\partial q_c}{\partial x} = f(t) \quad (8)$$

また、負荷量として濃度フラックス(9)式を用いる。

$$q_c = c \cdot q - \kappa \frac{\partial q}{\partial x} \quad (9)$$

ここに、 $c$ : 濃度[g/mm<sup>3</sup>],  $f(t)$ : 析出量[g/mm<sup>2</sup>・h],  $q_c$ : 負荷量[g/h],  $\kappa$ : 拡散係数[g/mm],  $h$ : 水深[mm]である。ここで濃度は断面平均濃度である。本論文では負荷量中の拡散項は簡易化のため考慮していない。

(8), (9)式を整理するとともに析出量と水深の関係に対して(10)式のように単位水深に関する析出量  $f_0$  を導入することにより、物質濃度変化の基礎式である(11)式を得る。

$$\frac{f}{h} = f_0 \quad (10), \quad \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = f_0 - \frac{c \cdot r}{h} \quad (11)$$

この(11)式が単一斜面における降雨流出に伴う汚濁物質濃度変化の基礎式となる。(11)式より、左辺に示される濃度変化は右辺一項目に示される発生項である析出量と右辺二項目に示される希釈効果である濃度と降雨の積の関数との差によって生じるという式が質量保存則から理論的に導出された。

以上により、(3), (11)式を連立し解くことにより、土壌・地形特性に基づき降雨流出および物質濃度変化を求めることが可能である。

## 3. 水質ハイドログラフの特性

著者らは上述したように、降雨時の河川渓流水質は、初期高濃度型(ファーストフラッシュ型)、後期高濃度型、流量希釈型の3つに大別できると考えるとともに、提案した物質濃度変化の基礎式がこれら3タイプの水質ハイドログラフの特性を再現できることを示している。

降雨流出に伴い変化する水質ハイドログラフの特性を見るため一つの斜面を仮定し、降雨を与え Kinematic Wave 方程式(3)式と汚濁物質濃度変化の(11)式を連立差分して解き、流出高および濃度を求める。土壌、地形特性としては一例として表層土層厚  $D=15$ cm, 斜面長  $L=10$ m, 飽和透水係数  $k_s=0.0035$ cm/s, 有効空隙率  $w=0.42$ , 斜面勾配  $i=20^\circ$ , 透水性を示す無次元パラメータ  $\gamma=5$  を基本斜面とした。

析出の発生条件として、流出高ハイドログラフ形状から流出高が2mm/h以上のとき析出が発生するものとした。初期濃度を  $c_0=0.1, 3, 6, 9$  と変化させて、析出量を1としたが、これらの絶対値に意味は無く、(11)式に示されるように析出量と濃度の関係は線形関係にあり、析出量1に対する濃度変化を相対関係として考えた。求めた流出高、濃度ハイドログラフを図-1に示す。初期濃度が低ければ従来から言われている後期高濃度型が表現されており、初期濃度が高ければ、流出高に伴う希釈効果に起因する流量希釈型が顕著に表現されていることがわかる。

次に初期高濃度型(ファーストフラッシュ型)の水質ハ

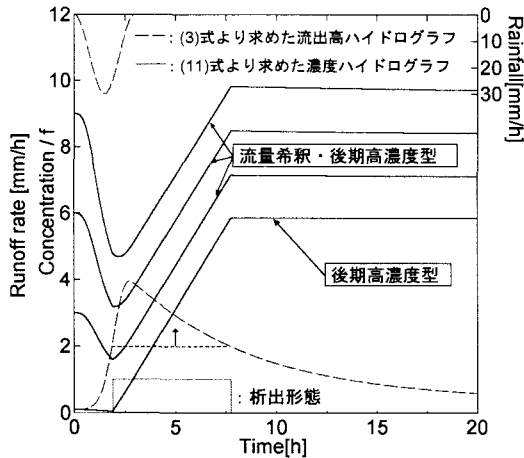


図-1 降雨流出に伴う水質ハイドログラフの変化 (析出条件: 流出高が 2mm/h 以上で発生)

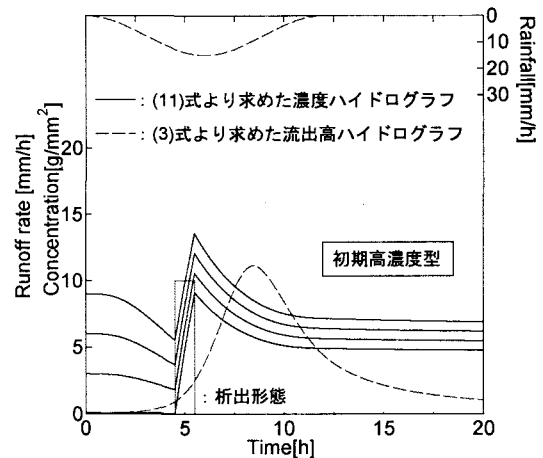


図-2 降雨流出に伴う水質ハイドログラフの変化 (析出条件: 流出高が 1mm/h 以上で 1 時間発生)

イドログラフの表現を試みるため、析出形態としては流出高が 1mm/h を超えたとき大きな析出 ( $f_0=10$ ) を伴い短時間 (1 時間) で析出は終了するものとし計算を行った。求めた結果を図-2 に示す。図-2 より、流出高ピークよりも濃度のピークが早く現れていることが確認できる。

このように、従来から言われている、水質ハイドログラフの後期高濃度型、初期高濃度型 (ファーストフラッシュ型) および流量希釈型を本論文で提案する物質濃度変化の (11) 式は、析出量及び、初期濃度の関係のみから表現可能であることを示した。

#### 4. 降雨流出過程および濃度変化過程の集中化

本論文で提案する単一斜面における降雨流出および濃度変化を表現する (3), (11) 式は偏微分方程式である。著者ら<sup>3)</sup>は、単一斜面における降雨流出過程を集中化するとともに濃度変化過程の集中化を行い、連立偏微分方程式を連立常微分方程式として解けることを示し合理性・妥当性を示している。

Hewlett<sup>6)</sup>, Betson<sup>7)</sup> の部分流出寄与域の考えに基づくと、斜面長は実地形上の斜面長にくらべ十分短いと考えられる。あるいは時々刻々定常解を仮定すると相似則の成立を仮定でき (12) 式の変数分離形が成立する。同様に斜面における物質濃度の近似式 (13) 式が仮定できる。

$$q(x,t) = xq_*(t) \quad (12)$$

$$c(x,t) = xc_*(t) + c_0 \quad (13)$$

ここに、 $q_*$ : 流出高 [mm/h] であり、 $c_*$  は物理的意味よりは、計算上の簡易性から用いるものであり、求めるべきものは濃度  $c$  である。 $c_0$  は上端境界濃度であり斜面上端からの濃度流入があるものとし集中化の際に考慮する。斜面における初期濃度の空間分布は一律の値を示すと考え、上端境界濃度、初期濃度は同一の記号、値を用いる。

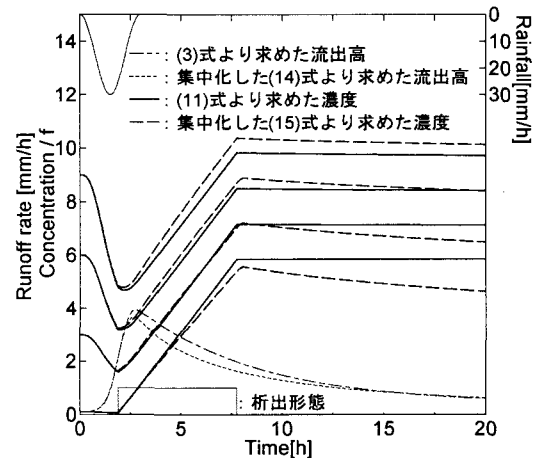


図-3 流出高及び濃度における集中化の影響

この (12), (13) 式の近似式を用い (3), (11) 式を整理することにより、以下に示す流出高および濃度に関する集中定数系方程式 (14), (15) 式を得る。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (14)$$

$$\frac{dc_*}{dt} = \frac{f_0}{L} - a_0 q_*^\beta c_* \left( 1 + \frac{r}{q_*} + \frac{c_0 r}{c_* q_* L} \right) \quad (15)$$

ここで、 $a_0 = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}}$  (16),  $a_* = \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}}$  (17)

ここに、 $L$ : 斜面長 [mm] である。上記導出過程は分布定数系から集中定数系への変換、つまりは偏微分方程式形から集中定数系方程式形への変換を意味する。

集中化の合理性を示すため、厳密に (3), (11) 式を差分化し解いた場合と集中化した (14), (15) 式を解いた場合とを流出高、濃度の両面で比較する。計算条件は上記 3. 水質ハイドログラフの特性の章で用いた条件と同様とし、析出発生条件 2mm/h 以上の場合で比較する。結果を図-3 に示す。流出高に関しては全体的に非常によく一致していることがわかる。濃度に関しては全体の形態及びピーク値は非常によく一致しているが、濃度逡減部で差が生

じている。これは、流出量逓減時における土壌内水分移動流速は非常に遅いため、斜面全体を厳密に考慮して解く場合より、斜面に対して集中化を行い計算したほうが、斜面上端境界濃度の影響が早く現れることに起因する。しかし、偏微分方程式を解く場合と、常微分方程式を解く場合では計算時間の観点からも常微分方程式のほうが利用しやすいことは容易に想像できる。今後河道追跡も考慮し、流域全体で考える場合、集中化を用いれば一瞬にして流域全体を流量、濃度ともに解けることを示すとともに集中化の合理性・妥当性を示した。

## 5. 析出量の逆推定

上記までの内容において水質ハイドログラフの形成過程における発生項としての析出量の関数  $f_0$  は未知なものと考え、仮定としての値を用いてきた。析出の物理的概念は降雨流出に伴い斜面において発生する水分移動に伴う溶解、巻き上げ、洗い出し作用等と、降雨に伴う雨滴の衝撃による斜面浸食等が考えられる。

本論文では析出量を実測濃度データから逆推定することを試みる。それにより、発生項としての析出・巻き上げと降雨、流量との関係から析出量の水理・水文特性について述べる。

### (1) 析出量の逆推定

降雨流出に伴う物質濃度変化の集中定数系方程式(15)式より、(18)式に示す析出関数が求まる。

$$f_0 = L \left\{ \frac{dc}{dt} + a \cdot q \cdot c \cdot \left( 1 + \frac{r}{q} + \frac{c_0 r}{c \cdot q \cdot L} \right) \right\} \quad (18)$$

(18)式より、実測水質濃度、流量および降雨データから析出量を求めることが可能である。(18)式中の濃度の微分項はデータを数値補間することにより求める。また、微分項の計算の際、実測濃度データの振動が影響するため平滑化し計算を行った。

今回の計算では、流出パラメータの決定に際し、上記3. 水質ハイドログラフの特性の章で用いた土壌・地形特性を用い、降雨としても実測降雨そのものを用いた。流量データに関しては基底流量一定値をカットし、流域面積で除し直接流出高として計算を行った。

### (2) 水質濃度データおよび流域の概要

本論文で析出量の逆推定を行うにあたり使用した水質濃度および降雨流量データは竹内・坂本ら<sup>2)</sup>、平田・村岡ら<sup>1)</sup>、村上・中津川ら<sup>8)</sup>が長期間にわたる現地観測から得た貴重なデータを使用させていただいている。

竹内・坂本らは流出成分の分離に水質濃度をトレーサーとして用いるため山梨県相川流域(8.4km<sup>2</sup>)において出水時のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度データ等を現地観測より得ている。

平田・村岡らは山地流域における溶存物質の降雨流出特性の把握を目的として、筑波森林試験地(0.675km<sup>2</sup>)における現地観測より降雨時のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SiO<sub>2</sub>濃度等を得ている。

中津川らはダムが存在が河川における土砂・物質輸送に及ぼす影響を見るため、北海道沙流川流域中流に位置する二風谷ダムおよびダム上下流の多数地点において、出水時におけるSS、T-N濃度等の観測を行った。本論文ではダム上流に位置する幌毛志観測所にて観測されたSS、T-N濃度データを使用する。流域面積は観測地点で897km<sup>2</sup>であり上記2流域に比して大きな流域面積を有している。また、3つの流域は全て山地流域である。

### (3) 析出量の逆推定適用結果

各出水における降雨、流量、水質濃度、平滑化濃度および求めた析出量を図-4~10に示す。図中に総降雨量、観測日時をともに示す。図-4~6は竹内・坂本らの降雨流出に伴うNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度変化および求めた析出量を示している。図-4は総降雨量33.5mmの小降雨時のケースであるが、水質濃度変化のタイプとしては後期高濃度型であり、降雨に伴い流量増加以前に析出が生じ、濃度が増加していることがわかる。負の値を示す析出に関しては析出物質の沈降等が考えられる。図-5は2つの出水が連続して生じた場合の濃度変化である。初期出水に対しては非常に強い析出が生じているがその後の出水に対しては初期に比して弱い析出が生じていることがわかる。これは、出水初期のフラッシュ効果に伴い析出する物質が減少したため2回目の出水では析出が減少したものと考えられる。また、図-4にて求めた析出量と比較すると降雨強度は同程度であるが初期の析出が強いことがわかる。これは、初期濃度が大きいいため析出される物質が多く存在しているためと考えられる。図-6は総降雨量319.5mmと大きな出水を伴った場合であるが、流量ピーク以前に濃度ピークが現れていることがわかり、初期高濃度型(ファーストフラッシュ型)の水質ハイドログラフである。流量増加以前に降雨に伴い強い析出が生じ析出量が流量増加に伴い減少していることがわかる。また、析出は継続的に生じているが流量の希釈効果にともない濃度は減少を続けていることがわかる。

図-7,8は平田・村岡らのNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-NおよびSiO<sub>2</sub>濃度変化である。図-7は上記図-6と同様に総降雨量が多い場合であるが、降雨に伴う析出に対して流量増加にともなう減少が見られない。また、濃度に関しても流量ピーク時に減少を見せているのみで、降雨継続期間中常に増加を続けている。これは、流域特性として析出物質の存在が多いためと、流量の値を流出高に換算すると前のケース(図-6)より少なく希釈効果が小さいためと考えられる。

図-8は上述のケースとは異なりSiO<sub>2</sub>濃度変化を対象とした場合である。初期濃度が他のケースに比して大きいため、少量の降雨に伴い析出が生じ少量の流量で析出お

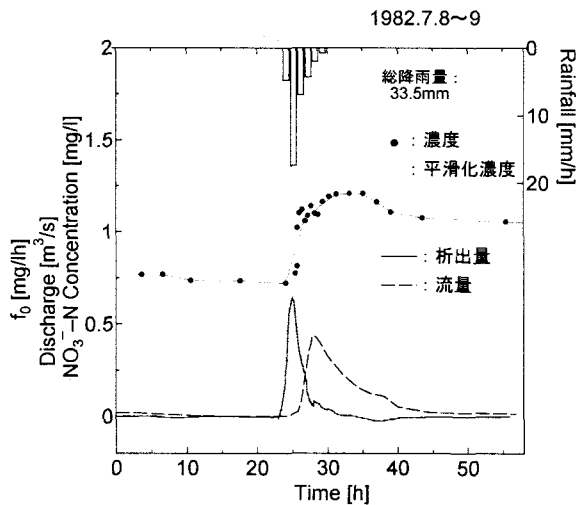


図-4 降雨流出に伴う  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の変化(竹内・坂本ら, 1983)の実測を用い、逆推定から求めた析出量(降雨に伴い流量増加以前に析出が生じている)

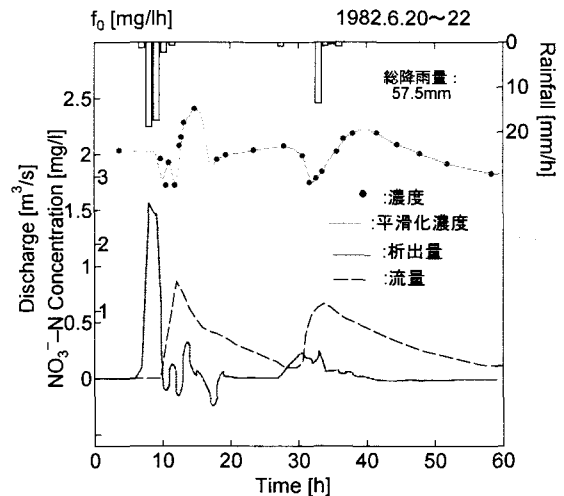


図-5 降雨流出に伴う  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の変化(竹内・坂本ら, 1983)の実測を用い、逆推定から求めた析出量(初期出水に対して強い析出が生じるが、その後の出水では弱い析出が生じている)

よび濃度の希釈が生じていることがわかる。

最後に図-9, 10 は村上・中津川らの出水時の SS および T-N 濃度の変化である。上述の2流域よりもかなり大きい流域面積(897 $\text{km}^2$ )を有している。図-9 は SS 濃度変化であるが、降雨に伴い析出を生じ、濃度および析出が同様の増減傾向を示している。図-10 は同一出水における T-N 濃度の変化であるが、ほぼ SS と同じ挙動を示し求めた析出量も SS と同じ挙動を示すことがわかる。このように異なる物質において、降雨、濃度及び析出が同様の増減傾向を示すのは流域面積が他の2流域に比して大きいため、支川の影響等から全体的な物質挙動の平滑化が起きているためと考える。

以上のように、実測濃度、流量、降雨データを用いることにより発生項としての析出量を逆推定から求めることができることを示した。また、求めた析出量から発生項としての析出は降雨に伴い生じることがわった。析出量の値および濃度変化の挙動は初期濃度および流量による希釈効果との関係から決定されることがわかった。

これにより、水質ハイドログラフの予測に向けて発生項の取り扱いに関して降雨に伴う侵食作用の影響が強ることがわかり、降雨、初期濃度および流量との関係に着目することにより、析出量および流量希釈効果の定量的評価を行える可能性を示したものと考える。

## 6. まとめ

本論文は降雨流出に伴う単一斜面での物質濃度変化の算定手法を提案するとともに、発生項としての析出関数を逆推定から求める手法を提案したものである。ここで得られた知見を以下に述べる。

1) 単一斜面での降雨流出に伴う物質濃度変化の基礎式を質量保存則から理論的に導出した。

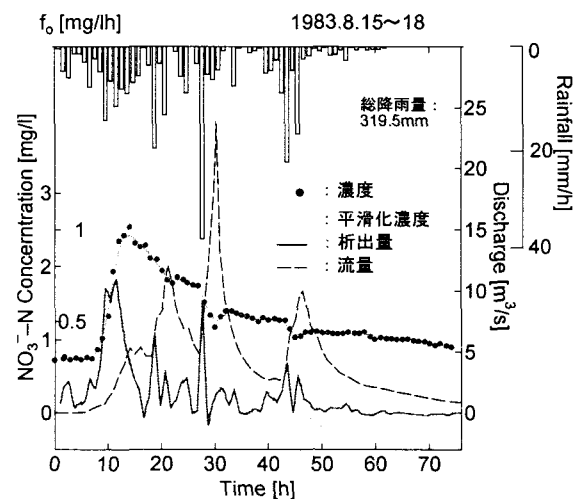


図-6 降雨流出に伴う  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の変化(竹内・坂本ら, 1983)の実測を用い、逆推定から求めた析出量(流量増加以前に降雨に伴い強い析出が生じるが流量増加に伴い減少している)

- 2) 提案した物質濃度変化の基礎式を用いることにより従来から言われている水質ハイドログラフの初期高濃度型、後期高濃度型および流量希釈型のすべてを再現可能であることを示した。
- 3) 降雨流出過程を集中化するとともに物質濃度変化過程に対しても集中化を行い、流量と水質濃度に関する2元連立偏微分方程式を2元連立常微分方程式として解けることを示し、その合理性・妥当性を示した。
- 4) 水質ハイドログラフの形成過程における発生項としての析出関数を逆推定から求める手法を提案し、実測濃度、流量、降雨データから析出量を推定できることを示した。
- 5) 求めた析出量は降雨に伴い発生し、析出量および濃度変化の挙動は初期濃度および流量増加に伴う希釈効果から決定されることがわかった。

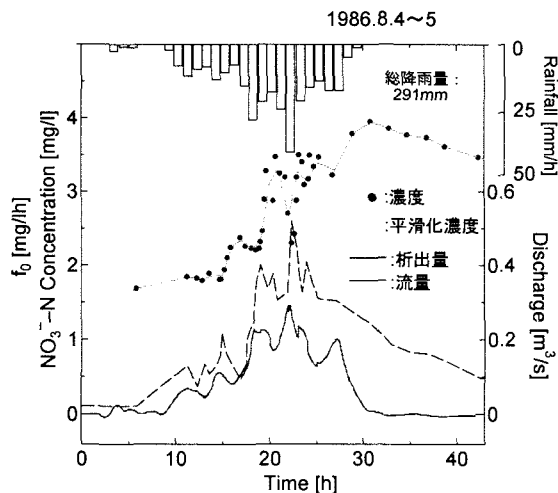


図-7 降雨流出に伴う  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の変化(平田・村岡ら, 1985)の実測を用い, 逆推定から求めた析出量(降雨継続期間中, 析出量の減少は少ない)

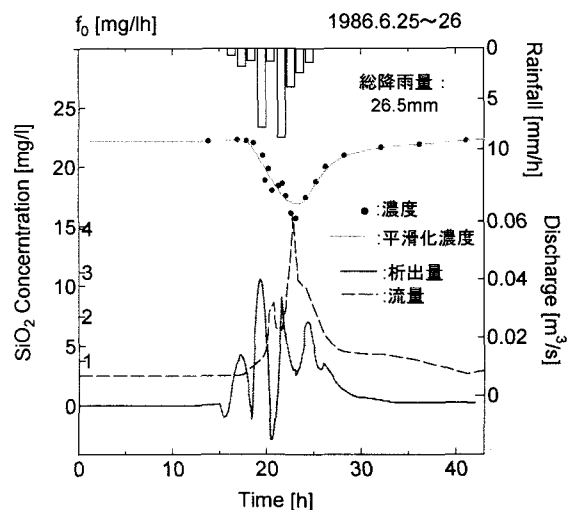


図-8 降雨流出に伴う  $\text{SiO}_2$  濃度の変化(平田・村岡ら, 1985)の実測を用い, 逆推定から求めた析出量(少量の降雨に伴い強い析出が生じている)

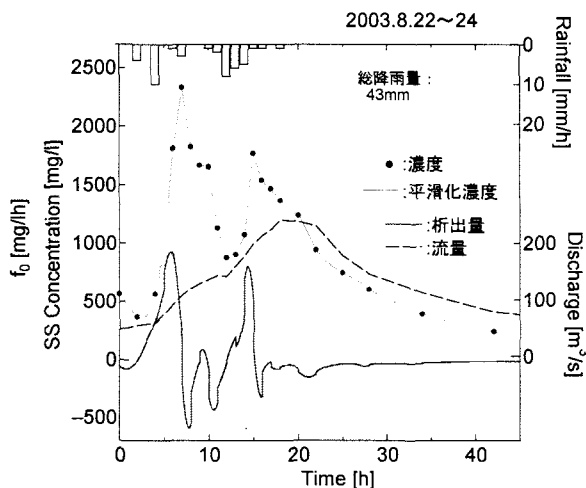


図-9 降雨流出に伴う SS 濃度の変化(村上・中津川ら, 2003)の実測を用い, 逆推定から求めた析出量(濃度および析出が同様の増減傾向を示す)

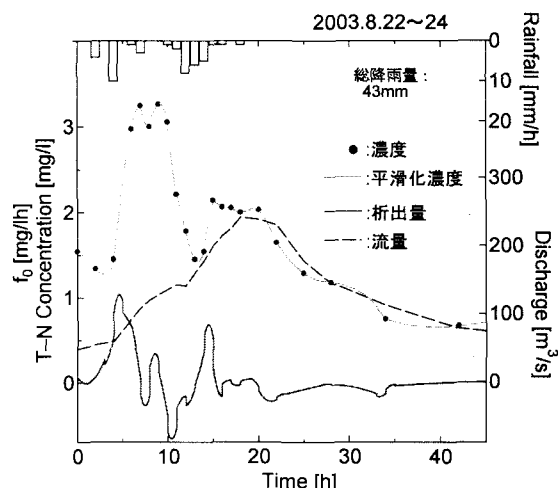


図-10 降雨流出に伴う T-N 濃度の変化(村上・中津川ら, 2003)の実測を用い, 逆推定から求めた析出量(SS 濃度と同じく濃度および析出が同様の増減傾向を示す)

謝辞: 本論文における析出量の逆推定を行うにあたり, 使用した貴重な諸データは山梨大学坂本康先生, 竹内邦良先生および北海道開発土木研究所中津川誠氏が現地観測より得たデータであり, これを頂いたものである。また, 国立公害研究所村岡浩爾先生(現大阪産業大学教授), 海老瀬啓一先生(現摂南大学教授), 平田健正先生(現和歌山大学教授)らが現地観測により得たデータであり, これを使用させていただいたものである。ここに深甚なる感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 平田健正, 村岡浩爾: 山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について, 土木学会水工学論文集, Vol. 30, pp. 43-48, 1986.
- 2) 竹内邦良, 坂本康, 本郷善彦: 土木学会水工学論文集, Vol. 27, pp. 405-413, 1983.

- 3) 呉修一, 山田正: 単一斜面における水質ハイドログラフ形成過程に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol. 48, pp. 55-60, 2004.
- 4) 平林桂, 砂田憲吾, 大石哲, 宮沢直季: 片庭川流域における洪水時の浮遊砂・ウォッシュロード観測と流域土砂動態モデルの検討, 土木学会論文集, No. 768/II-68, pp. 33-43, 2004.
- 5) 酒井一人, 吉永安俊, 大澤和俊: 仮想データ生成用斜面モデルの構築および数値実験による浮遊土砂流出特性の検討, 水文・水資源学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 595-604, 2003.
- 6) Hewlett, J.D.: Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds, US Dept. Agric., Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, Station Paper No.132, 1961.
- 7) Betson, R.P.: What is watershed runoff, J. Geophys. Res., Vol.69, No.8, 1541-1552, 1964.
- 8) 村上泰啓, 中津川誠, 高田賢一: 沙流川における洪水時負荷量観測とダムへの水循環の影響について, 河川技術論文集, Vol. 9, pp. 511-514, 2003.

(2004.9.30 受付)