## 小流域における水質ハイドログラフの形成過程 および推定手法に関する研究

A STUDY ON FORMATION PROCESS AND ESTIMATION METHOD OF WATER QUALITY HYDROGRAPH IN A SMALL BASIN

呉修一<sup>1</sup>・劉金双<sup>2</sup>・江花亮<sup>3</sup>・山田正<sup>4</sup>

Shuichi KURE, Kinsou Ryuu, Ryou EBANA and Tadashi YAMADA

1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) 2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) 3フェロー会員 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) 4フェロー会員 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. Generation function in formation process of water quality hydrograph is estimated from observed water quality concentration, discharge and rainfall data using our method proposed in this paper. From the results of analysis, generation function is expressed as rainfall intensity and initial water quality concentration function. Water quality hydrograph is rationally and simply estimated using this function and the estimation method is applied to several water quality hydrograph. The result of calculation is match well with the observed water quality data. It can be concluded that the proposed lumped analysis method can express water quality hydrograph in a small basin effectively and simply.

Key Words: water quality hydrograph, runoff, lumped model, estimation method

### 1.はじめに

湖沼等の閉鎖性領域における水質環境の改善が急がれている.流入負荷量の面では下水処理場や生活廃水のような点源負荷の要因に加えて流域や田畑のような面源負荷が大きな要因を占めており,面源を起源とする流入負荷は降雨イベント中に流入してくる.よって,出水時の河川水質濃度変化を表現する水質ハイドログラフの特性を把握し,汚濁負荷の発生源との関係を把握することは非常に重要である.

著者らは平田・村岡ら 1), 竹内・坂本ら 2)の降雨流出に伴う水質濃度変化の実測等から判断し、降雨時の河川水質は、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.

文献(4)においては発生項としての析出関数を逆推定 する手法を提案し、発生源としての析出量は降雨に伴い 発生し、その絶対量は初期濃度に依存する事を示した。

流入負荷の算定に関して汚濁負荷流出モデルを用いる 研究が多くなされている.都市流域においては下水道管 路網及び雨天時堆積負荷を考慮した和田ら 5のモデルが ある.和田らは初期路面堆積量と路面堆積負荷流出の運 動式および連続式を用いて,路面流出負荷の算定を行っ ている,山地流域を対象としたモデルとしては,海老瀬 ら <sup>6)</sup>の水質タンクモデルがある .これにより ,水系内の水 循環構造をふまえて汚濁負荷流出量を推定することが可 能となった.最近では,平林・砂田ら 6)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,酒井らつは浮遊 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えることにより,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.

物質濃度変化を予測する際に重要な点は,物質の発生

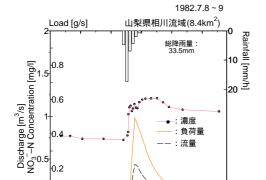


図-1 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub>-N 濃度の変化(竹内・坂本ら,1983) の実測を用い求めた負荷量(No.1)

Time [h]

50

20

10

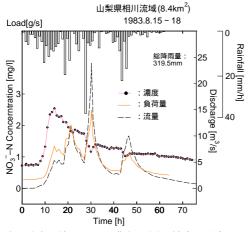


図-3 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub>・N 濃度の変化(竹内・坂本ら,1983) の実測を用い求めた負荷量(No.2)

をいかに扱うかであると著者らは考える. 汚濁負荷は発生源ごとに発生量も発生の様態も異なり, 流域に含まれるすべての発生源について汚濁負荷量を算出する事が非常に重要である. 従来から流入負荷量の算定には, 原単位を用いる方法が多用されているが, 実測から算定されている原単位は1日または年間をとおしての値であり, その定性的評価は未だ不十分である.

本論文は水質ハイドログラフの特性及び形成過程に関して述べるとともに,原単位と同様の概念を持つ析出・ 巻上げ関数の逆推定を行い,水質ハイドログラフの再現計算を行うことを目的としている.これにより湖沼等への降雨時の流入負荷量の定量的かつ定性的な算定を可能とするものである.

#### 2.水質ハイドログラフの特性

降雨イベント中の河川渓流水質濃度は,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つのタイプに大別できると考える.ここで,実測の降雨時の水質ハイドログラフを図-1,3,5,7に示し,その時の負荷量と流量の関係を図-2,4,6,8に示す. 図-1は竹内ら<sup>2)</sup>の山梨県相川流域における降雨流出に伴うNO<sub>3</sub>-N濃度の実測(No.1)を用い負荷量を求めたものである.相

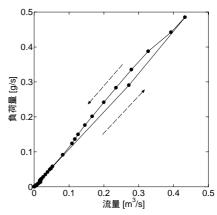


図-2 降雨流出に伴う NO3・N 濃度の変化(竹内・坂本ら,1983) の実測を用い求めた負荷量と流量の関係(No.1)

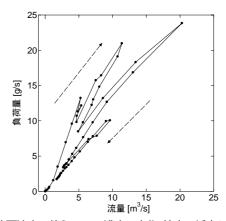


図-4 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub>-N 濃度の変化(竹内・坂本ら,1983) の実測を用い求めた負荷量と流量の関係(No.2)

川流域は山地流域であり8.4km²の流域面積を有する.水質濃度変化のタイプとしては後期高濃度型であり,流量上昇にともない濃度が増加し流量ピーク以降も濃度ピークを迎えている.負荷量に関しては流量と同じ挙動を示している.また,図-2に示されるように流量と負荷量の関係は流量上昇時と減少時で多少の2価性は見受けられるが,ほぼ直線関係にあると言える.図-3は同様に竹内らの山梨県相川流域における水質ハイドログラフ(No.2)であるが,総降雨量319.5mmと大きな出水を伴った場合である.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.負荷量の挙動としては,流量と一致しているが,図-4に示されるよう,流量と負荷量の関係は直線関係にはなく,流量上昇時と減少時で負荷量が異なることがわかる.

次に,村岡らの筑波森林試験地(0.68km²)における NO3-N 濃度変化の実測(No.3)を用い求めた負荷量の関係を図-5に示す.流量上昇に伴い,水質濃度が希釈されており,その後初期の濃度値を上回っている後期高濃度型である.負荷量に関しては図-6に示されるように緩やかな2価性を示している.最後に図-7に示すのは同様に筑波森林試験地における NO3-N 濃度変化の実測(No.4)を用い求めた負荷量である.総降雨量が大きい場合であるが,

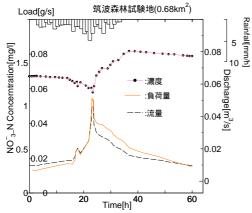


図-5 降雨流出に伴う NO3 -N 濃度の変化(村岡ら,1985) の実測を用い求めた負荷量(No.3)

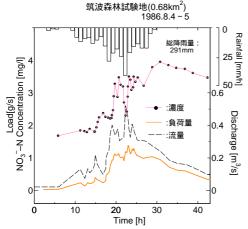


図-7 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub> -N 濃度の変化(村岡ら,1985) の実測を用い求めた負荷量(No.4)

濃度に関しては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.負荷量は上昇時 と減少時で2価性を示していることがわかる.

以上より水質ハイドログラフの特性として,流量と負荷量の挙動は一致するが,水質濃度の観点で見た場合挙動が異なることがわかる.また,出水規模が大きい場合に流量と負荷量の関係は1価で表現不可能である場合があることがわかる.従来から,流入負荷量の算定にはL-Q式を用い流量の関数として求めているが,降雨イベント中には適用出来ない場合がある.これにより,水質ハイドログラフの特性を把握し,降雨イベント中の河川水質濃度の計算手法を確立する事が負荷量の算定において非常に重要である事がわかる.

### 3.原単位に関して

負荷量は土地利用形態や土壌・地形特性によってその発生特性は異なる.各発生源からの汚濁負荷発生量の実測データをそれぞれの単位当りの汚濁負荷発生量として整理したものを原単位という.原単位の対象としては森林・山地: [g/m²/day],家畜糞尿: [g/頭/day],生活排水: [g/人/day]等が挙げられる.森林における原単位の一例を表-1に示す。これら原単位の値に流域面積等を乗ずることにより,負荷量が算定される.しかしながら,原

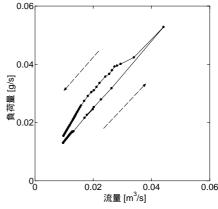


図-6 降雨流出に伴う NO3-N 濃度の変化(村岡ら,1985) の実測を用い求めた負荷量と流量の関係(No.3)

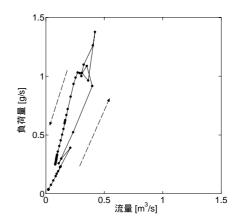


図-8 降雨流出に伴う NO3-N 濃度の変化(村岡ら,1985) の実測を用い求めた負荷量と流量の関係(No.4)

単位の普遍性,短時間スケールにおける値および降雨の影響等は未だ定量的に評価できていない.著者らは文献(4)において発生源としての析出量を実測の降雨,流量,水質濃度データから逆推定する手法を既に提案している.これにより,従来から負荷量の算定に用いられている原単位の適用性等に関して議論を行うことが可能である.

# 4.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),4)</sup>は単一斜面における降雨時の河川水質濃度変化を表現する基本式を,斜面における表面流をkinematic Wave として取り扱うとともに,物質濃度の質量保存則を用い導出している.以下にその理論の概要を示す.

降雨流出に関しては単一斜面における斜面流下方向流れを kinematic Wave 法に基づき取り扱う. 斜面流下方向流れの形態としては中間流,表面流および地下水流が存在する.著者ら <sup>10)</sup>は表面流の発生を考慮した斜面多層降雨流出計算手法を提案しているが,本論では斜面流下方向流れに関して中間流のみを対象とし計算を行う.中間流,表面流と流出形態の相違に伴い発生項としての析出量の特性が異なってくる事が容易に想像できるが,本論文では析出量を一元的に議論するため中間流のみを対象

として理論の展開を行う.

一般化した断面平均流速(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.

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

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

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

ここに、v: 断面平均流速[mm/h], h: 水深[mm], q(t): 単位幅流量 $[mm^2/h]$ , r(t): 有効降雨強度[mm/h], m: 流出パラメータ(抵抗則),: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.著者ら  $^{3),4}$ は、表面流として導出された(3)式と不飽和浸透理論を比較する事により流域特性を示すパラメータ  $\alpha,m$  の値を(6)、(7)式に示すよう土壌・地形特性から決定できる事を示している.これにより,表面流を対象とするのではなく中間流としての飽和・不飽和浸透流を対象とし計算を行うものである.

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

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.

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

ここに ,c: 濃度 $[g/mm^3]$ , f(t): 析出量 $[g/mm^2/h]$ , h: 水深[mm]である.この質量保存側における発生項としての析出量f(t)が原単位と同次元を有しており,物理的に全く同じであることがわかる.

また,負荷量として濃度フラックス(9)式を用いる.

$$q_c = c \cdot q - \kappa \frac{\partial q}{\partial x} \tag{9}$$

ここに  $q_c$ : 負荷量 [g/mm/h],  $\kappa$ : 拡散係数  $[g/mm^2]$  である. ここでの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.

$$\frac{f}{h} = f_0$$
 (10),  $\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = f_0 - \frac{c \cdot r}{h}$  (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)式を連立偏微分方程式として解くことにより降雨流出および物質濃度変化を計算することが可能である.

また,著者ら 3) 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.以下にその理論の概要を示す.流出は0次谷流域,1次谷流域の河道及び河道近傍の湿潤領域からの斜面流出と考えることができ,斜面長は地形上の斜面長にくらべ十分短いものと考えられる.この条件のもと斜面流下方向流れに関して時々刻々の定常解を仮定すると,斜面流下距離と単位幅流量に関して相似則の成立を仮定でき(12)式の変数分離形が成立する.同様の考えに基づき斜面における物質濃度の近似式(13)式が仮定できる.

$$q(x,t) = xq_*(t)$$
 (12),  $c(x,t) = xc_*(t) + c_0$  (13)

ここに  $A^*$ :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様の値を示すと考え、上端境界濃度、初期濃度は同一の記号、値を用いる、

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.

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

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

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.この(14),(15)式を2元連立常微分方程式として解くことにより,流量および水質濃度を瞬時に求める事が出来る.流域全体を対象とした場合においても多元連立常微分方程式として解く事により各地点における流量,濃度が計算可能である.

### 5. 析出量の逆推定

著者ら<sup>4)</sup>は発生項としての析出量を実測濃度 流量及び 降雨データから逆推定する手法を提案している.これに 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ている. 以下にその理論の概要を述べる.

降雨流出に伴う物質濃度変化の集中定数系方程式(15)

表-19) 森林における原単位の例 (kg/km²/day)

項目	BOD	COD	全窒素	全リン
最小值	0.5	1.1	0.08	0.003
最大值	1.0	18.1	2.55	0.35
平均值	0.75	7.0	1.04	0.082

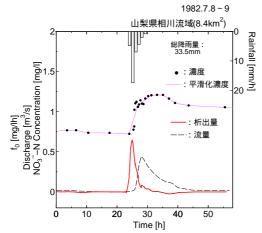


図-9 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub>-N 濃度の変化(竹内, 坂本ら, 1983)の実測を用い逆推定から求めた析出量

式より,(18)式に示す析出関数が求まる.

$$f_0 = L \left\{ \frac{dc_*}{dt} + a_* q_*^{\beta} c_* \left( 1 + \frac{r}{q_*} + \frac{c_0 r}{c_* q_* L} \right) \right\}$$
 (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計算する. 一 例として析出量の逆推定結果を図-9に示す.土壌・地形 特性としては表層土層厚D=15cm,斜面長L=10m,飽和透水 係数 k=0.0035cm/s,有効空隙率 w=0.42,斜面勾配 i=20°, 透水性を示す無次元パラメータ シ=5 として計算を行った. 降雨及び流量データとしては,実測のデータを用いた. 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. 図-9 に示されるよう,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. 求めた結果および他の出水への適用結果よ り,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.これにより,降雨強度,初期 濃度と析出量の間に何らかの関係を見出す事が可能であ る.図-10(相川流域),11(筑波試験林)に降雨強度と 析出量の関係を示す、初期濃度の影響を無視するため、 初期濃度で除した析出量の値を用いている.上記で示し た出水以外のケースも同時に示す. 求めた結果より,降 雨強度と析出量は線形関係にあることがわかる. 筑波試 験林では降雨強度と析出量の関係を一つの直線で近似可 能であるが,相川流域(図-10)においては2本の直線に 分かれることがわかる.急勾配の直線は小流量時の降雨 に伴う析出量であり、緩勾配の直線は流量増大時の降雨 に伴う析出量である.緩勾配の直線は,流量増大時のフ ラッシュ効果に伴う析出物質の減少に伴うものと考えら

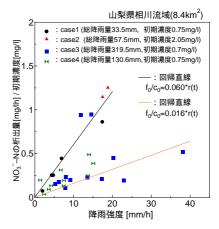


図-10 NO3-N の析出量,降雨強度および 初期濃度の関係(山梨県相川流域)

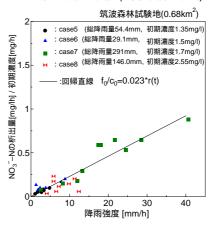


図-11 NO3-N の析出量,降雨強度および 初期濃度の関係(筑波森林試験地)

れる.以上により,析出・巻上げ関数は降雨に伴い発生し,その関係は線形関係で表現可能であることがわかった.しかしながら,相川流域,筑波試験林における直線勾配の違い,相川流域においては降雨強度と析出量の関係が2本の直線に分かれる違い等は流域面積,植生・地質分布,地形形状の相違に由来するものと考える.流域特性に応じた析出形態の違いは今後追及されるべき課題である.逆にこの直線関係を利用し流域特性を議論する事も可能と考える.また,本論文では硝酸態窒素を対象としたが,他の物質での検討が本理論の適用性に関して更なる知見を与えるものと考える.

### 6. 水質ハイドログラフの推定手法

上記の析出量の逆推定結果から,発生項としての析出 巻上げ関数は降雨に伴い発生し,初期濃度を考慮するこ とで降雨強度と析出量は線形関係で表現できることがわ かった.よって,析出量の取り扱いに関して以下の(19) 式で示される降雨及び初期濃度の関数で表現し水質ハイ ドログラフの計算を行う.

$$f_0 = \lambda \cdot c_0 \cdot r(t) \tag{19}$$

ここに , :回帰係数であり上述の降雨強度と析出量の 関係に対して回帰を行い決定する . ここで初期濃度  $c_0$  と

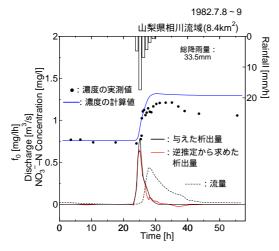


図-12 降雨流出に伴う NO-3-N 濃度変化の計算結果 (相川流域)

は降雨開始直前の河川水質濃度である.降雨,初期濃度 データがあれば容易に水質ハイドログラフの再現計算が 行える.計算条件としては逆推定時の土壌・地形特性を 用いた.本論文では流量に関しては計算を行わず,実測 の値を用い水質濃度計算のみを行った. 求めた結果を図 -12,13 に示す. 図-12 は,相川流域における計算結果 (Case1)を示しているが、濃度の実測値より計算値のほ うがピーク以降大きく求まっている .これは図-10 に示さ れる Case1 のプロットよりも回帰直線の勾配が大きく評 価されているためである.図-13は,筑波試験林における 計算結果(Case7)を示しているが,濃度の実測値より計 算値のほうが小さく求まっている .これは図-11 に示され る Case7 のプロットよりも回帰直線の勾配が小さく評価 されているためである.しかしながら,全体として実測 の水質濃度と,計算濃度はほぼ一致しており水質ハイド ログラフの再現が良好に可能であることがわかる.

以上より,発生項としての析出・巻上げ関数を降雨および初期濃度の関数として評価することにより,水質ハイドログラフの計算が容易に行えることを示した.

### 7.まとめ

本論文は降雨流出に伴う水質濃度変化特性について述べるとともにその予測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.
- 2)水質ハイドログラフの形成過程における発生項として の析出量は実測濃度,流量,降雨データから逆推定で きることを示した.
- 3)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.
- 4)発生項としての析出・巻上げ関数を降雨強度と初期濃度の関数として扱うことにより,水質ハイドログラフ

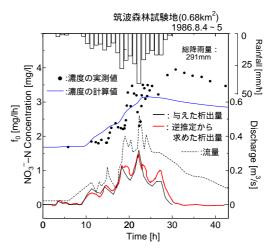


図-13 降雨流出に伴う NO-3-N 濃度変化の計算結果 (筑波森林試験地)

の推定を容易に行えることを示した.

謝辞:本論文における水質ハイドログラフの特性および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,竹内邦良先生及び国立公害研究所村岡浩爾先生(現大阪産業大学教授),海老瀬潜一先生(現摂南大学教授),平田健正先生(現和歌山大学教授)らが現地観測より得たデータであり,これを使用させて頂いたものである.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,土木学会水理講演会論文集, Vol.30, pp.43-48, 1986.
- 2) 竹内邦良,坂本康,本郷善彦: NO3 をトレーサーに用いた流 出成分分離の可能性について,土木学会水理講演会論文集, 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) 呉修一, 北村知里, 江花亮, 山田正: 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, 土木学会水工学論文集, Vol.49, pp.157-162,2005.
- 5) 和田安彦: 非点源負荷における路面堆積負荷の定量と流出シミュレーションに関する研究,水質汚濁研究,第4巻,3号,1981.
- 6) 海老瀬潜一, 宗宮功, 平野良雄: タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析,用水と排水, Vol. 21, pp. 1422-1432, 1979.
- 7) 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/ -68,pp.33-43,2004.
- 8) 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.
- 9) 流域別下水道整備総合計画調査,指針と解説
- 10) 呉修一,山田正,吉川秀夫:表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究,土木学会水工学論文集, Vol. 49, pp. 169-174, 2005.

(2005.9.30 受付)