## 小流域における水質ハイドログラフの形成過程および その予測手法に関する研究

中央大学大学院 学生員 劉 金双 中央大学大学院 学生員 呉 修一中央大学大学院 フェロー会員 江花 亮 中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

<u>1.はじめに:</u>著者ら<sup>1)</sup>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形成過程の解明を目的とし, 降雨流出に伴う物質濃度変化の式を質量保存則から理論的に導出している.本論文は,比負荷量と流出高の関係か ら水質ハイドログラフの特性に着目するとともにその予測手法の提案を行う.

2.水質ハイドログラフの特性:著者らは<sup>1)</sup>,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濃度の実測から求めた比負荷量を示している.ここで比負荷量とは,負荷量を流域面積で叙することにより単位面積あたりの負荷量と本論文では定義する.相川流域は山地流域であり8.4km<sup>2</sup>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,流出高上昇にともない濃度が増加し流出高ピーク以降に濃度ピークを迎えている.比負荷量に関しては流出高と同じ挙動を示している.図-2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.流出高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.比負荷量の挙動としては,流出高と全体的には一致しているが,流出高上昇時と減少時で比負荷量の値が多少異なることがわかる.

次に 村岡ら<sup>3)</sup>の筑波森林試験地(0.68km<sup>2</sup>)における NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度変化の実測を用い求めた負荷量の関係を図-3 に示す. 流出高上昇に伴い,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.

3.比負荷量と流出高の関係:筑波試験林と相川流域における流出高と NO<sub>3</sub>-N の比負荷量の関係を図-4 に示す. ここで,上述した3ケースの出水以外も同時に示している.両流域ともに流出高の増加に伴い比負荷量が上昇して いることがわかる.また,筑波試験林の単位面積あたりの負荷量が相川流域の負荷量よりも大きいことがわかる. 相川流域,筑波試験林における単位面積当たりの負荷量の相違は流域面積,植生・地質分布,地形形状の相違に由 来するものと考える.原単位とともに降雨時負荷量の流域特性に応じた評価は今後追及されるべき課題である. 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>1)</sup>は,単一斜面における降雨流出に

<u>4.単一料面にのりる時的流山に伴う物員濃度変化の基礎式の導山.</u>者有らっは,単一料面にのりる時的流山に 伴う物質濃度変化を,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ことにより,(1)式で示される降雨流出の基礎式および物質濃度変化の 基礎式(4)式を得ている.

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), :流出特性を表すパラメータ,c:断面平均濃度[g/mm<sup>3</sup>], $f_0(t)$ :析出量[g/mm<sup>3</sup>/h], $q_c$ :負荷量 [g/mm/h], $\kappa$ :拡散係数[g/mm<sup>2</sup>]である.物質濃度変化の基礎式(4)式は,濃度変化は発生項である析出量と希釈効果である降雨と濃度の積の関数との差によって生じるということが表現されている.

また、直接流出は流出寄与域のみからの流出と考える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、 (5)式の変数分離形の近似式が成立する.同様に斜面における物質濃度の近似式(6)式が仮定できる.ここに, q\*: 流出高[mm/h]であり, c<sub>\*</sub>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る.c<sub>0</sub>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し,初期濃度と同一の記号,値を用いる.この(5),(6)式の 近似式を用い(1),(4)式を整理することにより,流出高および濃度に関する集中定数系方程式(7),(8)式を得る. 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.以上により,(7),(8)式を2元連立常微分方程式として解く事により, 降雨流出に伴う河川水質濃度変化を瞬時に求める事が可能である.ここで,水質濃度変化を再現する際には発生項 としての析出・巻上げ関数を如何に評価するかが重要となる.著者らは,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を,実測の濃度,流量,降雨デー タを用い逆推定を行うことにより示している.降雨強度と求めた析出・巻上げ量の関係を図-5(相川流域),6(筑 波試験林)に示す.ここで,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.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(図-5)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-6)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.

<u>5.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:</u>上述したように,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

$\frac{\partial q}{\partial t} + aq^{\beta} \frac{\partial q}{\partial x} = aq^{\beta} r(t) (1)  a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} (2)  \beta = \frac{m}{m+1} $	(3)	$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = f_0 - \frac{c \cdot r}{h_1}$	(4)	$q(x,t) = xq_*(t)  (5)$	$c(x,t) = xc_*(t) + c_0$	(6)
$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*)  (7)  \frac{dc_*}{dt} = \frac{f_0}{L} - a_* q_*^\beta c_* \left( 1 + \frac{r}{q_*} + \frac{c_0 r}{c_* q_* L} \right)$	(8)	$a_0 = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}L^{\frac{-1}{m+1}}$	(9)	$a_* = \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}}  (10)$	$f_0 = \lambda \cdot c_0 \cdot r(t)$	(11)



図-1 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度(竹内・坂本 図-2 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度(竹内・坂本 図-3 降雨流出に伴う NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度 (平田・村岡 ら,1983)の実測を用い求めた比負荷量 ら,1983)の実測を用い求めた比負荷量 ら,1985)の実測を用い求めた比負荷量



図-4 相川流域及び筑波試験林における 流出高とNO3<sup>-</sup>-Nの比負荷量の関係

た.よって,析出量の取り扱い に関して(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 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<sub>0</sub>とは降雨開始直 こで初期濃度 coとは降雨開始直 g 前の河川水質濃度である.降雨,g 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、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-7,8に示す. 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





図-6 NO<sup>-</sup>3-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)



-7 降雨流山に行つ № <sub>3</sub>-N 濃度変化の 計算結果(相川流域)



図-8 降雨流出に伴う NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N 濃度変化の 計算結果(筑波森林試験地)

に可能であることがわかる.以上により,発生項としての析出量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.

6.まとめ:本論文は水質ハイドログラフの特性を比負荷量と流出高の関係から考察するとともに,水質ハイドロ グラフの予測手法を提案したものである.水質ハイドログラフの形成過程における発生項として析出・巻き上げ関 数を降雨強度と初期濃度の関係で表現することにより,水質ハイドログラフの予測が容易に行える事を示した. 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) 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.157-162,2005.2) 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.43-48,1986.3) 竹内邦良,坂本康,本郷善彦:NO<sub>3</sub> 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.