

流出特性を考慮した水質ハイドログラフ形成に関する研究

中央大学土木工学科	学生員	○ 越田 翔子
中央大学大学院	学生員	劉 金双
中央大学大学院	学生員	吳 修一
中央大学理工学部	フェロー会員	山田 正

1. はじめに

湖沼等の閉鎖性水域においては洪水前後において COD 等の水質指標が変化する．これは降雨流出に伴い面源を起源とする汚濁物質が河川そして湖へ流出するためである．印旛沼における水質に関しても湖沼内部での汚濁物質の生産に加え印旛沼への流入河川を通じた汚濁物質の流入による汚濁が生じている．印旛沼流入河川には鹿島川、高崎川、手繰川、神崎川、桑納川、師戸川、新川があり、それぞれの河川の流域ごとに土地利用形態が異なるため、汚濁物質の流出特性を捉えることは難しい、また平常時と出水時では汚濁物質の流入の形態が異なる．

著者らは従来から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、印旛沼流域高崎川(77.9km²)を対象としさまざまな水質濃度に対して逆推定を行うことにより物質発生項としての析出・巻き上げ量を求め水質ハイドログラフの特性に関して述べたものである．

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¹⁾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定といえる質量保存則を用いることにより (1) 式の物質濃度変化の基本式を導出している．また、流出に寄与する斜面長は実地形上よりも短いという考えのもと (2) 式の変数分離形の近似式を用い集中化を行うことにより集中定数系の物質濃度変化の基本式 (3) 式を導出している．

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = f_0 - \frac{c \cdot r}{h} \quad (1), \quad c(x, t) = xc_*(t) + c_0 \quad (2), \quad \frac{dc_*}{dt} = \frac{f_0}{L} - a_* q_*^\beta c_* \left(1 + \frac{r}{q_*} + \frac{c_0 r}{c_* q_* L} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\beta = \frac{m}{m+1} \quad (4), \quad a_* = \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (5)$

ここに、 v : 断面平均流速 [mm/h], h : 水深 [mm], $r(t)$: 有効降雨強度 [mm/h], m : 流出パラメータ (抵抗則), α : 流出特性を表すパラメータ, q_* : 流出高 [mm/h], L : 斜面長 [mm] 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．(1) 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．

3. 析出量の逆推定

水質濃度変化を予測する際には発生項としての析出・巻き上げ関数を如何に表現するかが重要となる．析出量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) 水質ハイドログラフの特性

著者ら¹⁾は降雨時の河川水質は流量と水質濃度が同じ挙動を示す以外にも、初期高濃度型 (ファーストフラッシュ

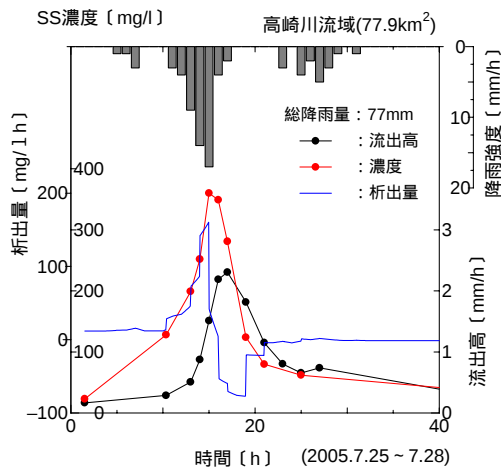


図-1 高崎川(高岡橋地点)における SS 濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

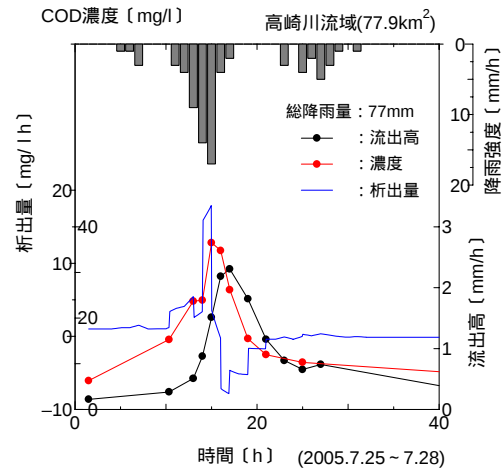


図-2 高崎川(高岡橋地点)における COD 濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

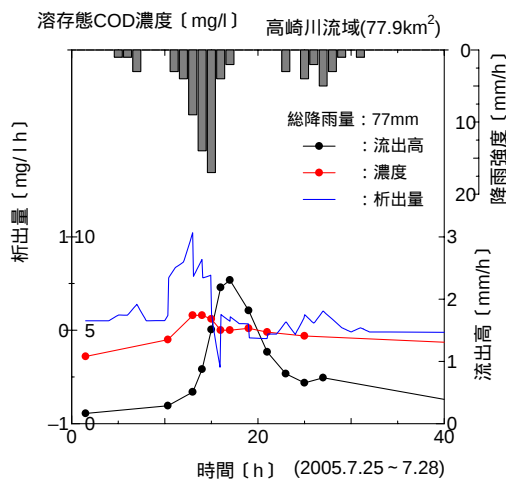


図-3 高崎川(高岡橋地点)における溶存態 COD 濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

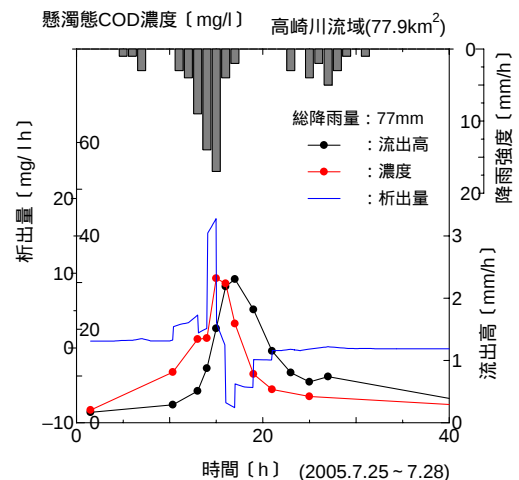


図-4 高崎川(高岡橋地点)における懸濁態 COD 濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

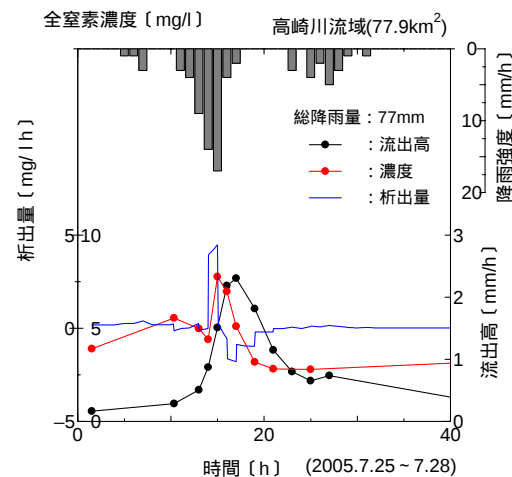


図-5 高崎川(高岡橋地点)における全窒素濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

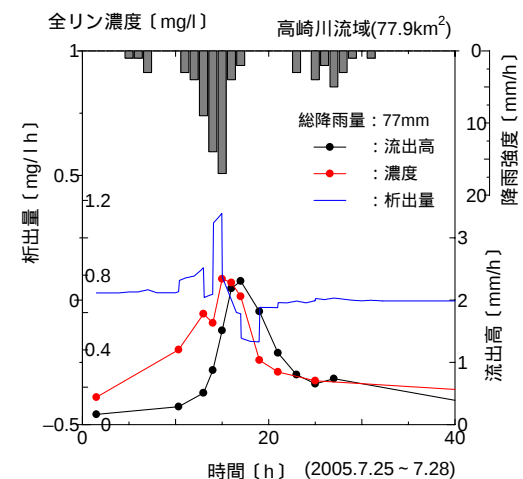


図-6 高崎川(高岡橋地点)における全リン濃度変化の実測を用い、逆推定から求めた析出量

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, 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. 初期高濃度型(ファーストフラッシュ型)は流量ピークより濃度ピークが早く現れる, 合流式下水道の都市域に多く見られる現象である. 都市域においては下水管路

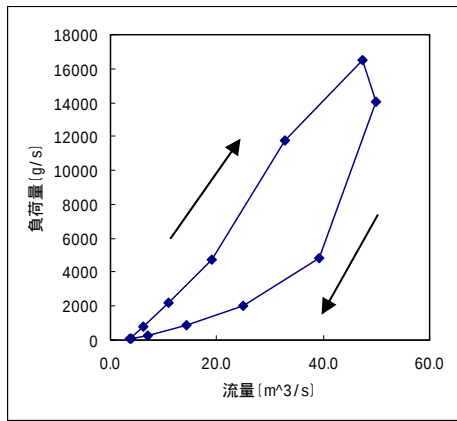


図-7 降雨流出に伴うSS濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

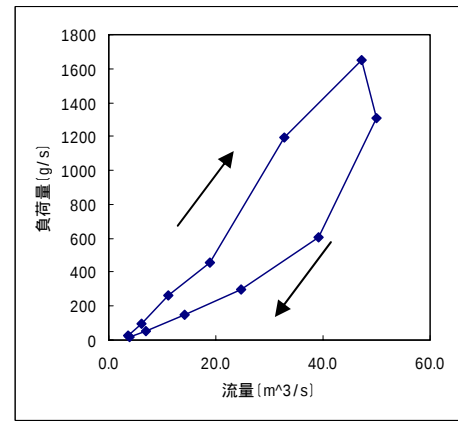


図-8 降雨流出に伴うCOD濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

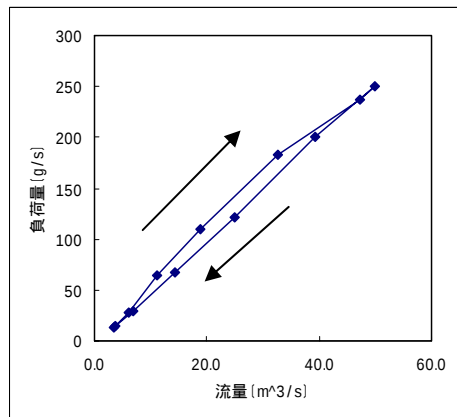


図-9 降雨流出に伴う溶存態COD濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

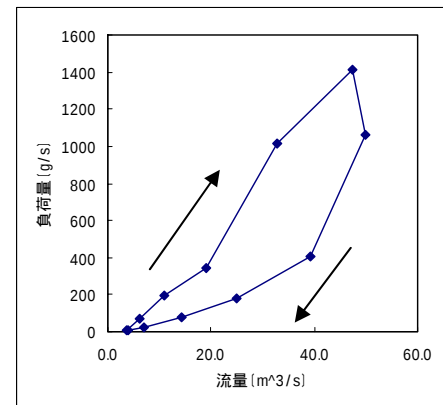


図-10 降雨流出に伴う懸濁態COD濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

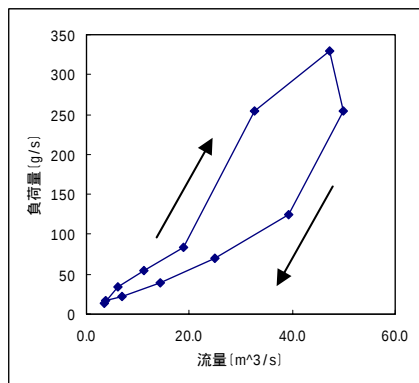


図-11 降雨流出に伴う全窒素濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

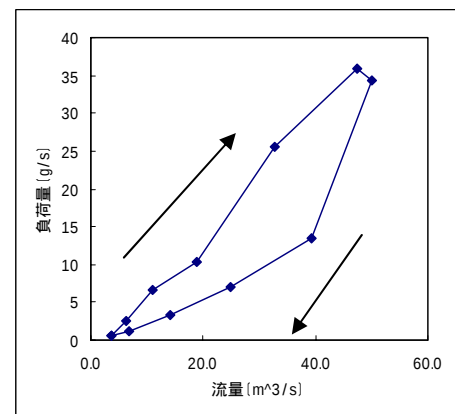


図-12 降雨流出に伴う全リン濃度の変化の実測値を用い求めた負荷量と流量の関係

網内に付着した汚濁物質が、出水時のフラッシュ効果によって一気に洗い出されるために生じる。山地小流域においても土壤中に堆積した汚濁物質が流出することによりファーストフラッシュ現象が生じる。後期高濃度型は流量ピークより濃度ピークが遅く現れる。流量希釈型は流量ピーク時に流量の希釈効果に伴い濃度が最小となる。

(2) 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(3)式より、(6)式に示す析出関数が求まる。

$$f_0 = L \left\{ \frac{dc_*}{dt} + a_* q_*^\beta c_* \left(1 + \frac{r}{q_*} + \frac{c_0 r}{c_* q_* L} \right) \right\} \quad (6)$$

この(6)式を用いることにより、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。(6)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。流量データと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う。

(3) 水質濃度データおよび流域の概要

本論文では析出量の逆推定を行うにあたり印旛沼への流入河川である高崎川流域を対象としている。高崎川(高岡橋地点)の流域面積は77.9km²であり、流域の土地利用状況としては、流域面積の約15%が山林であり河川沿いに谷津田や斜面林がある、また約35%が市街地等であり下流部の八街で市街地、宅地が広がっている、残りの約50%が畑、水田である。流域の特徴としては、他の印旛沼への流入河川に比べ畑、水田が多く面減負荷も大きいと考えられる。水質は上流部で生活排水の影響で汚濁していると共に畑、水田からの肥料の影響で窒素汚濁が進んでいる。また、河川はコンクリートで護岸されていない区間が多く生物が比較的生育しやすい。流量およびSS、COD、窒素、リン等の水質濃度データおよび高崎川流域における平均降雨強度データに関しては千葉県が測定している貴重なデータを使用させて頂いている。

(4) 析出量の逆推定適用結果

降雨イベント中の実測の降雨、流量、各水質濃度および逆推定から求めた析出量を図-1(SS)、図-2(COD)、図-3(溶存態COD)、図-4(懸濁態COD)、図-5(全窒素)、図-6(全リン)に示す。すべての物質に関して濃度が流量上昇に伴い上昇し流量減衰とともに減衰していることがわかる。これは流量と濃度の挙動が一致するタイプの水質ハイドログラフである。また各物質の負荷量と流量の関係を図-7~12に示す。図中に総降雨量、観測日時をともに示している。

図-1は高崎川(高岡橋地点)におけるSS濃度と流出高の時系列を示している。降雨強度が強くなると共にSS濃度も上昇し同時にピークを示す。また少し遅れて流出高もピークを示す。その後降雨強度が弱くなるにつれSS濃度、流出高も降雨以前の値に収束している。逆推定から求めた析出量は降雨に伴い発生し降雨強度ピークと同時にピークを迎え、その後流出高ピーク付近で負の値を示していることがわかる。負の析出量の物理的概念は沈降や消失等の減衰現象であり、斜面で発生した汚濁物質が河道部において減衰していると考えられる。また、図-7に示すように流量とSS負荷量の関係は流量上昇時と減少時で時計周りの2価性を示している。他の物質に関しても同様の傾向が見られる。図-2,3,4では高崎川(高岡橋)におけるCOD濃度、溶存態COD濃度、懸濁態COD濃度と流出高の時系列を示している。高崎川流域出水時においては懸濁態CODの流出が顕著であり求めた析出量からも懸濁態CODが支配的であることがわかる。

以上により、高崎川流域においての出水時の水質ハイドログラフは流量と同じ挙動を示すことを示すとともに、逆推定から求めた析出量は降雨に伴い発生し降雨強度ピークと析出量ピークは一致することを示した。また、流量ピーク付近においては希釈効果に伴い負の析出量が生じていることを示した。

4. まとめ

本論文は、印旛沼流入河川の一つである高崎川流域を対象とし出水時水質濃度に対して逆推定から析出量の値を求め、水質ハイドログラフの特性に関して述べたものである。高崎川流域においての出水時の様々な物質に関して水質ハイドログラフは流量と同じ挙動を示すことを示すとともに、逆推定から求めた析出量は降雨に伴い発生し降雨強度ピークと析出量ピークは一致し流量ピーク付近においては希釈効果に伴い負の析出量が生じていることを示した。

謝辞

本研究の遂行に際し、千葉県県土整備部より貴重なデータを提供して頂いた。ここに謝意を述べる。

参考文献

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.