

## 10.1 流域スケールで見た物質動態特性の把握に関する研究 ①

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、上野山智也、宮本守、  
E.D.P. Perera

### 【要旨】

流域からの栄養塩（窒素、リン）の負荷流出動態を定量的に明らかにすることを目的として流域水・物質循環モデルを開発した。これまで土木研究所では WEP モデルに窒素、リンの物質循環過程を導入したモデルを開発してきたが、本研究ではモデルの物質循環に関する各種パラメータの感度を分析しつつ、モデルパラメータの影響分析および安定性の向上を図った。さらに懸濁態の汚濁負荷動態のシミュレーション精度の向上を目的として、流域規模の土砂動態(SS)モデルを WEP モデルに導入することで、土砂に吸着して輸送される窒素およびリンを考慮した。開発したモデルは、千葉県印旛沼・高崎川流域に適用され、窒素およびリンの負荷流出動態の再現を行った。特に流域からの負荷流出が顕著な雨天時に着目し、イベントスケールでの栄養塩類の面源負荷流出特性の解明を試みた。

キーワード：WEP モデル、汚濁負荷流出、窒素、リン、土砂動態(SS)モデル、イベントスケール

### 1. はじめに

流域における土地利用の変化や人口の増加、生活水準の高度化等の都市成長は汚濁負荷流出量を増大させ河川および閉鎖性水域等の水質悪化を招いている。1970 年の水質汚濁防止法の制定以降、工業系や事業所系排水による汚染に歯止めがかかったが、近年では生活系排水や市街地および農地からの面源負荷からの汚濁負荷流出が増加しており、これらが公共用水域に対する汚染源となっている。このような面源汚濁負荷流出に対して抜本的な解決を図るためには、流域全体で土地利用や産業活動形態との因果関係を明らかにし、適切な対策シナリオを策定する必要がある。

栄養塩類の流出過程に関する研究では、原単位法が広く使われているが、数値モデルを適用した研究も取り組まれている。東ら<sup>1)</sup>は黄河の支流である渭川流域を対象に水量水質統合モデルを構築し、水質汚濁負荷状況の解明を試みている。長林ら<sup>2)</sup>は阿武隈川における出水計測データをもとに浮遊砂の輸送方程式を用いて流量、浮遊砂、窒素、リン等の計算モデルを構築し、モデル適用の問題点を検討している。さらに吉村ら<sup>3)</sup>はメコン川流域を対象に全球スケールの公開データと分布型流出モデルを原単位法により組み合わせることで栄養塩の発生・流出特性を明らかにすることを試みている。このように既往の研究では大規模流域におい

て長期的な分析がなされているが、本研究では、流域内での栄養塩類の流出動態に着目し、土地利用や農業等の産業活動形態との関係を含めて定量的に把握することができる流域規模での水・物質循環モデルの開発・改良を行った。特に栄養塩類が多く流出する降雨時の特性を明らかにするため、イベントスケールでの負荷流出現象の再現を試みた。

### 2. これまでのモデル開発と今年度の取組み

モデルの開発にあたっては、これまで土木研究所が開発してきた流域規模での物理的な水循環モデルである Water and Energy transfer Process Model (WEP モデル)を基礎モデルとした<sup>4)</sup>。WEP モデルの改良はこれまでに、窒素、リンの流域スケールでのモデリングモジュールの導入に取り組んできており、出水イベントでの負荷流出の総量はおおよそ再現することが可能となった。しかし、流出波形としては、立ち上がりやピークが実測よりも遅れており、洪水初期の高濃度の負荷流出の再現性の向上が課題として残されていた。そこで、都市域や畜産等の発生源ごとの汚濁負荷寄与度を把握するために、特に土粒子に吸着して流出する懸濁態の挙動に着目し、物質輸送過程の各種パラメータの感度分析を通してモデル解析結果の精査を行った。これにより、流域での時空間的な負荷流出特性をより

物理的明らかにすることが可能となり、流域内の水質に対する各土地利用区分からの寄与度を定量的に評価できるようになると期待される。

図-1は土砂動態(SS)モデルを導入したモデルの窒素、リンの負荷流出の解析過程である。対象項目は、河川および河川が流入する湖沼や湾等の閉鎖性水域において富栄養化の判断基準となる窒素およびリンとし、懸濁態物質は土粒子との吸着、脱着、堆積過程を考慮している。SSモデルの詳細は次節に示す。構築したモデルを印旛沼・高崎川流域に適用し、2005年の降雨流出イベントで再現性の検証を行った。

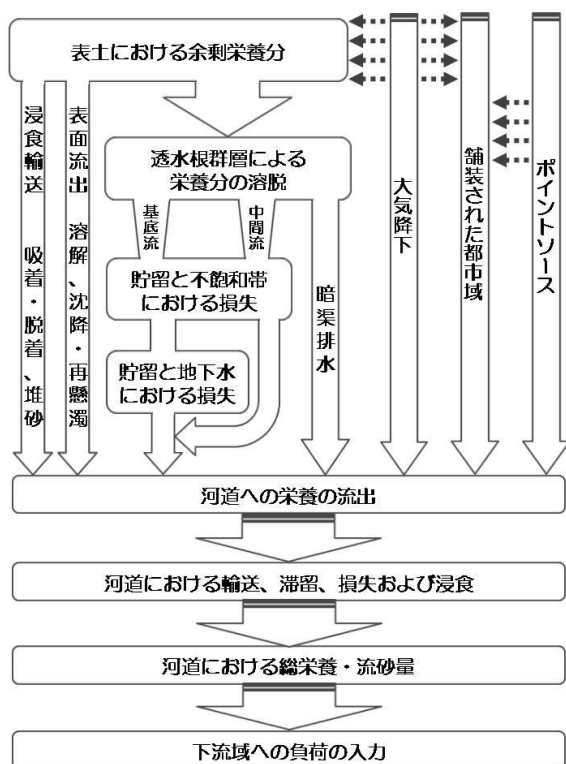


図-1 窒素・リンの負荷流出の解析過程

### 3. 土砂動態(SS)モデルの改良

溶存態窒素および溶存態リンは水循環と一体で流出するようにモデル化している。一方、懸濁態成分については、土砂への吸着とその流出を考慮する必要がある。したがって、WEPモデルに導入を行っている懸濁態窒素・リンと土砂動態との相互作用を考慮したSSモデルの改良(単位系の統一、諸定数の見直し等)を行うとともに、感度分析を行い、その定量的影響について精査を行うこととした。なおここで導入したSSモデルはWEPP/ANSWERSモデルを参考としている。浸食輸送過程は計算期間中に力学的に更新される土壌および水文特性に基づいて評価されている。土壌特性に関係する分離パラメータは、インターリル(流域斜

面)における浸食性とリル(斜面内に生じる雨裂=細流)における浸食性である。インターリル浸食性パラメータは、雨滴の衝撃による分離の土壌抵抗の度合いであり、雨裂浸食性は、集中流(雨裂、雨谷、河道)における分離に対する土壌の影響の受けやすさである。各要素(グリッドセル)からの土砂の輸送は、表層の乾燥期に堆積した栄養塩が集まり、地表面流を經由して河道に運ばれる。広域浅水流の侵食に関する質量保存の法則は、次式の通りである。

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial (Ch)}{\partial t} = D_L + D_F \quad (1)$$

ここに、 $Q_s$ : 流砂量( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )、 $h$ : 水深(m)、 $C$  土砂濃度( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $D_L$ 、 $D_F$ : 土砂の横流入および分離・堆積量( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、 $x$ : 流下方向距離(m)、 $t$ : 時間(s)である。

土砂の分離は、流出量、雨滴の衝撃、土砂の限界摩擦係数に基づいて計算され、雨裂およびインターリル浸食性に関する係数は、粒子のサイズと土壌の種類によって決定した<sup>5)</sup>。

#### 3.1 インターリル浸食

雨滴の衝撃は、雨裂の間での土壌侵食の初期分離メカニズムであり、地表流の役割はそれほどない。しかし、地表流が発生した時に、エネルギーが表面の水に吸収されることによって雨滴の衝撃を減少させる効果がある。インターリルエリアから土砂輸送は式(2)の通りである。

$$D_i = K_i \cdot I_e \cdot \sigma_{ir} \cdot \text{SDR}_{rr} \cdot (R_s/w) \quad (2)$$

ここに、 $D_i$ : 土砂輸送、 $K_i$ : インターリル浸食性( $\text{kg/s/m}^4$ )、 $I_e$ : 有効降雨強度(m/s)(浸透速度を超えた降雨の時間で割った降雨全体の積分)、 $\sigma_{ir}$ : インターリル流出量(m/s)、 $\text{SDR}_{rr}$ : 土砂輸送割合(土壌表面の任意の粗さと浸食土砂の粒子サイズの分布との割合)、 $R_s$ : 雨裂間隔(m)、 $w$ : 雨裂幅(m)である。

#### 3.2 雨裂浸食

雨裂浸食は、流れている水の掃流力をあらかず限界摩擦論に基づいている。

$$D_c = K_r \cdot (B \cdot \tau_c) a \quad (3)$$

ここに、 $D_c$ : 土砂の分離能力( $\text{g/m}^2/\text{s}$ )、 $K_r$ : 雨裂浸食性( $\text{g/m}^2/\text{s}$ )、 $\tau_c$ : 雨裂における水理的摩擦(Pa)(Darcy-Weisbach)、 $\tau_c$ : 限界摩擦、 $a$ 、 $B$ : 一定値である。流水がすでに土砂を輸送している際は、可能分離割合は次式の実分離割合で修正されている。

$$(D_r/D_c) + (G_r/T_c) = 1 \quad (4)$$

ここに、 $D_r$ : 調整分離率、 $G_r$ : 流れにおける流出( $\text{kg/s}$ )、 $T_c$ : 輸送能力( $\text{kg/s}$ )である。

## 4. 高崎川流域への適用

### 4.1 適用流域の概要

本研究で改良された WEP モデルを、印旛沼の流入河川の一つである高崎川流域（図-2、流域面積：85.6 km<sup>2</sup>）に対して適用した。同流域には高岡橋と寺崎橋の2箇所の観測地点が存在し、高岡橋では HQ 式が作成されているため流量の時系列連続値が利用できる。出水時の水質観測は、2002年、2005年、2008年の各年に2度ずつ実施されており、2002年はTN、TP、2005年、2008年にはTN、TP、DN、TN、DP、PPが観測されている。寺崎橋においてはおよそ月1回の頻度で公共用水域の定期観測が行われており、SS、TN、DN、TP、PPのデータが取得されている。

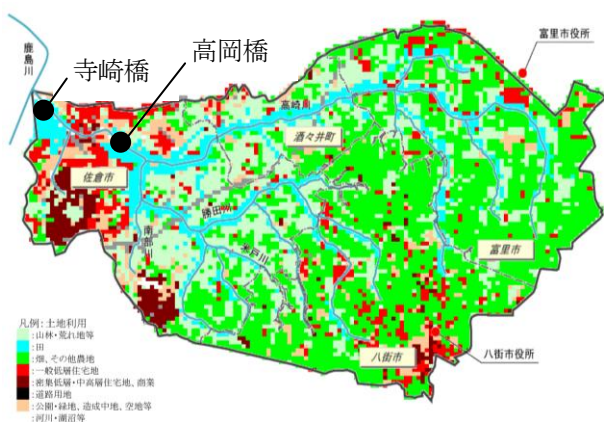


図-2 高崎川流域の土地利用と観測地点

### 4.2 高崎川流域におけるSSおよび栄養塩の流出

図-3、4は2005年7月、8月の出水時の観測結果(流量、SS、TN、TP)である。SS、TN、TPのすべての濃度は7月と8月の両方の観測で、出水初期の流量の立ち上がりの時点で既に高濃度になっていることが確認できる。つまり、洪水初期にSS、TN、TPが高濃度で流出するファーストフラッシュ型の挙動を示し、流量より早く逡減が開始している。このことから、窒素、リンの懸濁態が土粒子とともに早期に流出していることが考えられる。

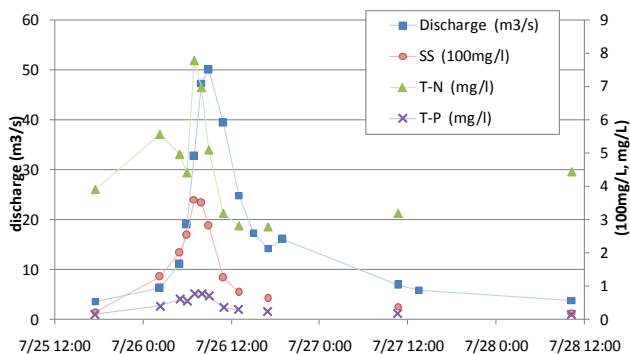


図-3 2005年7月の出水時観測結果

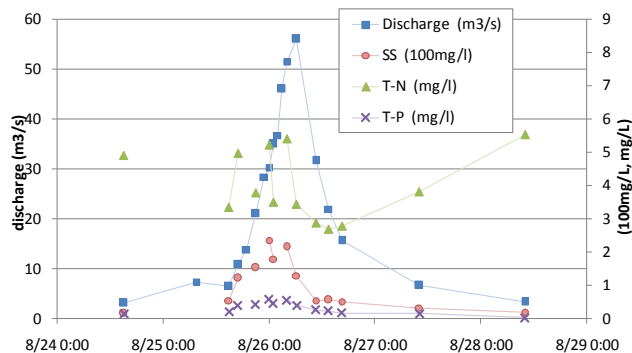


図-4 2005年8月の出水時観測結果

### 4.3 SSの再現性

WEPモデルを高崎川流域に適用し、その結果を実測値と比較し検証した。図-5、6はSSの実測値と浸食性係数を変化させたときの解析結果である。浸食性係数にそれぞれ  $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $3.0 \times 10^{-3}$ 、 $5.0 \times 10^{-3}$ 、 $7.0 \times 10^{-3}$  を乗じている。モデルによる解析結果は実測値よりも降雨に対する応答が遅く、逡減部で過大評価となっている。この点に関してSSモデルの雨裂浸食過程に改善の余地が残されており、出水時初期に高濃度の負荷流出となるファーストフラッシュ型の流出特性が表現されるように浸食条件や粒径の設定等を改良する必要がある。

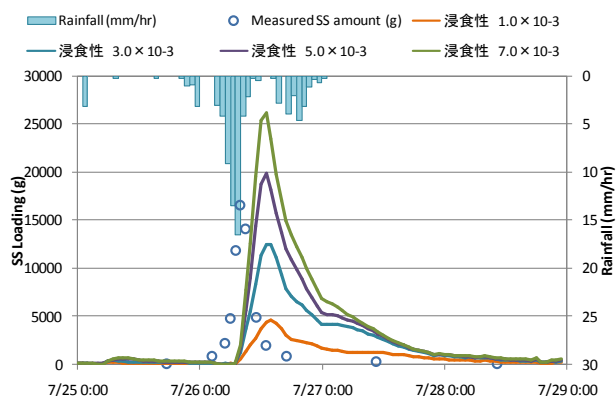


図-5 2005年7月出水時のSSと解析結果

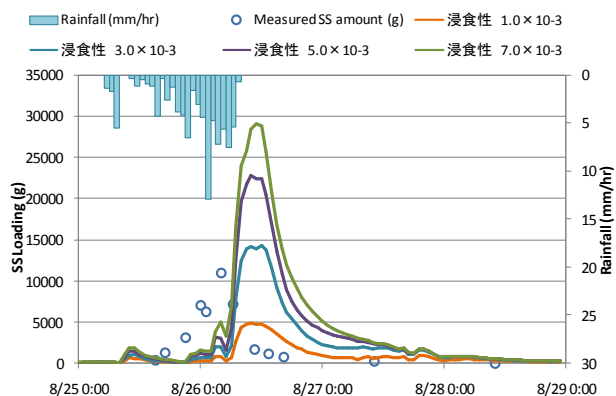


図-6 2005年8月出水時のSSと解析結果

#### 4.4 懸濁態物質の負荷流出の土粒子吸着に対する感度

出水時における窒素、リンの負荷流出量はほとんどが懸濁態物質であるため、懸濁態の土粒子吸着割合が負荷流出量及ぼす影響を感度分析により調べた。図-7は2005年7月の出水時における窒素の実測値と吸着割合を0.01、0.02、0.03と変化させた解析結果、図-8は2005年7月の出水時におけるリンの実測値と吸着割合を0.001、0.005、0.01と変化させた解析結果である。なお、浸食係数  $K_i$ 、 $K_r$  には  $3.0 \times 10^{-3}$  を乗じた値を採用した。出水時の土粒子に対する吸着割合は、窒素、リンともに負荷流出量に対して大きく影響している。観測結果に関しても窒素、リンの濃度はSSと同じタイミングであるため、SSの解析精度向上による懸濁態窒素、リンの再現性精度向上が必要である。

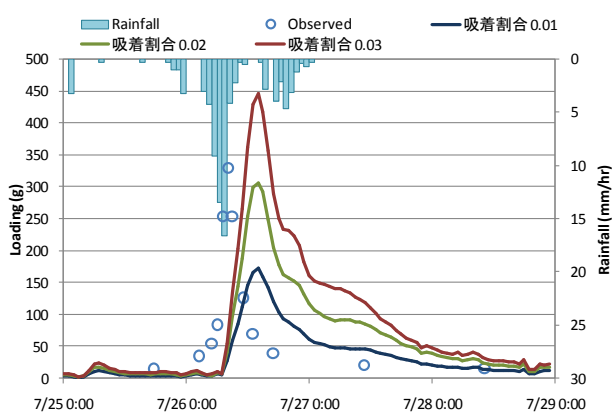


図-7 出水時の窒素の実測値と吸着割合の感度

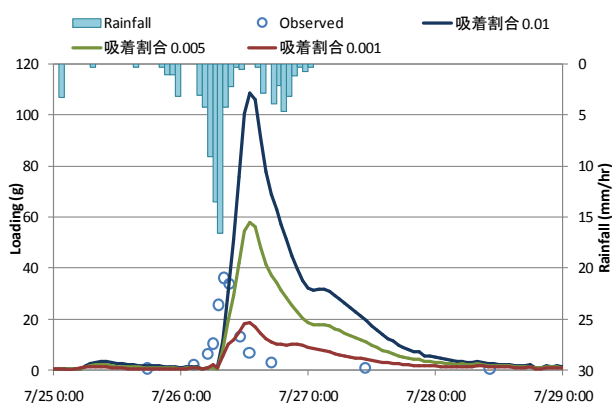


図-8 出水時のリンの実測値と吸着割合の感度

#### 5. まとめ

本研究は、流域からの発生由来ごとの負荷流出サブモデルを導入し、汚濁負荷源の寄与特性を流域スケールで明らかにすることを目的としている。その前段として、出水時の面源負荷流出特性を解明するためにSSの改良と再現性の再確認、ならびに窒素、リンが土粒

子に吸着して輸送される影響の感度分析を行った。その結果、出水時の窒素およびリンの負荷流出に関して、現状のSSモデルでは土砂輸送量の降雨に対する応答が遅く、逡減部で過大評価しており、出水時初期の高濃度のSSおよび窒素、リンの流出現象の再現に課題があることがわかった。その原因としては、ここで議論したSSモデルの再現性の問題が考えられ、同モデルによる出水時初期における高濃度土砂の輸送特性を改善すれば、その土砂に吸着して流出する懸濁態窒素、リンの輸送も同様に改善される可能性がある。今後、流域からの発生由来ごとの負荷流出サブモデルの改善とセットで、SSモデルの改良について検討を行っていく必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究で用いた印旛沼・高崎川流域の水文、水質データは千葉県および印旛沼流域水循環健全化会議により収集されたものです。貴重なデータを提供していただいた両者に対し、ここに謝意を示します。

#### 参考文献

- 1) 東修, 楠田哲也, 王晓昌, 楊大文, 尾崎心平, 馬場啓輔, 柴田勝史: 渭川流域における水量水質統合モデルの開発と供給可能水量の将来予測, 環境工学研究論文集, 第42巻, pp.111-118, 2005.
- 2) 長林久夫, 小川裕正, 真野明: 出水時の阿武隈川における栄養塩負荷と輸送に関するモデル化の検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp.41-46, 2005.
- 3) 吉村千洋, 竹内邦良: 分布型流出モデルによるメコン川流域の栄養塩流出過程の推定, 第20巻, 第6号, pp.493-504, 2007.
- 4) Jia Y., Ni G., Kawahara Y. and Suetsugi T.: Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrological Process.*, Vol.15, pp.2175-2194, 2001.
- 5) Byne W. F.: Predicting sediment detachment and channel scour in the process-based planning model ANSWERS-2000. MS thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2000
- 6) Mamoru Miyamoto et al.: Pollution Loading Modeling of Nutrient Salts and Application to Small-scale Semi-urbanized Basin, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Perspective on Water resource & Environment, ASCE, No.34, 2012

## STUDY ON COMPREHENDING THE DYNAMIC CIRCULATION AND RUNOFF OF MATERIALS ON A BASIN SCALE ①

**Budget:** Grants for operating expenses (General Account)

**Research Period:** FY2011-2015

**Research Team:** Water-Related Disaster Research Group, ICHARM

**Authors:** FUKAMI Kazuhiko, UENOYAMA Toshiya,  
MIYAMOTO Mamoru and PERERA, E.D.P.

### **Abstract:**

ICHARM has developed a basin-wide water and material circulation model on the basis of a basin-wide hydrologic model, called the Water and Energy transfer Process (WEP) model, utilizing sub-models for the runoff of nitrogen and phosphorus nutrients. Since nutrient loads during floods are considered to be mainly composed of particulate nitrogen and phosphorus (PN & PP) coupled with suspended solids (SS), an SS model is introduced considering soil erosion at inter-rills by rain drops, rills and river channels. The model was applied to the Takasaki River, a tributary of the Imbanuma Lake Basin, with some sensitivity analyses on the parameters. Although the model simulated the total quantity of N&P runoff loads relatively well during a flood event of 2005, the model was not capable of accurately simulating the rapid increase of SS, PN and PP concentrations and their decrease before the peak of the flood hydrograph. The necessity of improving the SS model is discussed.

**Key words:** WEP model, basin-wide hydrologic and water quality model, particulate nitrogen, particulate phosphorus, sediment transport