

## 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

研究担当者：岩見洋一、千田容嗣、

E.D. Perera、

### 【要旨】

河川や閉鎖性水域において、種々の対策が行われているにも関わらず栄養塩濃度は横ばい傾向にある。発生源ごとの水域への栄養塩類の流出機構が明確でなく、発生源毎の寄与度と対策効果を総合的に評価できる流域規模の水・物質循環モデルが必要である。本研究は、印旛沼高崎川流域を対象に、家畜排せつ物法の適用前後での流域の家畜の状況を調査し、畜産由来の汚濁負荷（窒素、リン）、都市由来、森林由来の汚濁負荷（窒素、リン、SS）のサブモデル化を検討し、これまで土木研究所で開発した WEP（Water and Energy Process）モデルのサブモデルの構築をすることを目的としている。開発したサブモデルは、観測データを使って検証し、さらに当該流域を対象に過去 5 年間のデータを使って土地利用に変化が生じたと仮定した場合の年間流量、年間 TN 流出負荷量を試算し、これらの結果を考察した。

キーワード：WEP モデル、汚濁負荷流出、窒素、リン、土地利用変化

### 1. はじめに

流域における土地利用の変化や人口増加、生活水準の向上など都市化による汚濁負荷が、河川や閉鎖性水域の水質に大きな影響を与えている。これらの汚濁負荷に対しては、総量規制や湖沼保全計画に基づき、点源からの発生負荷量は削減されているもの、栄養塩濃度は依然として低下していない状況にある。この原因として、面源からの流出負荷の比率が高く、それが減少していないあるいは増加しているため、点源からの負荷の削減が実際の流出負荷の削減に結びついていないことが指摘される<sup>1)</sup>。

面源汚染からの負荷は、人間の土地利用や土地利用自体の変化など、多くの要因が影響を及ぼしている<sup>2)</sup>。農業は、面源負荷の主要因の一つとされており、農業活動の中で畜産も面源負荷としての影響が考えられる。通常は、畜産排出負荷は、畜舎排水による点源と考えられているが、たとえば家畜排せつ物法適用以前においては、野積み等の不適切な処理が残っていれば、排水処理を経ずに降雨流出過程を通して面源的に排出される状況も想定される。多くの水質モデルは、水域への汚濁負荷を推定するために開発されてきた。しかし、家畜の面源に関する研究は、負荷を把握することが難しいためほとんどモデル化されていない。

そこで本研究では、畜産の面源汚濁負荷が水質に

与える影響を評価するために WEP (Water and Energy Processes) モデルを改良する。

WEP モデルは、土木研究所で開発した分布物理型の水・物質循環モデルで、当初、水とエネルギー量の分析を流域スケールで行うために開発され<sup>3)</sup>、その後、窒素やリンを対象項目に加え<sup>4)</sup>、SS(Suspended solid)の影響も考慮する<sup>5)</sup>ことにより再現性の向上を図っている。

このことから、高崎川流域をモデル流域として、窒素、リンの流域スケールのモデルリングモジュールの導入、土砂動態 (SS) モデルの改良を行い、高崎川流域の都市化の進んだ小流域と森林が比較的多く存在する小流域の末端部に観測点を設け、降雨があった時に観測を実施し、その観測値を使って計算値を検証する<sup>5)6)</sup>。さらに、土地利用変化による影響評価への適用可能性を検討するため、高崎川流域を対象に過去 5 年間の降雨データを使って土地利用が変化した場合の年間流量、年間 TN 流出負荷量を試算し、その結果について考察した<sup>7)</sup>。

### 2. 印旛沼流域高崎川流域の概要

印旛沼流域の高崎河川流域図を示す (図—1)。印旛沼流域は、湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼の指定を受け、これまで 6 期にわたる湖沼水質保全計画が策定されている。

高崎川は、流域面積が約 85km<sup>2</sup> の印旛沼流域内の河川である。比較的水質データや雨量データが揃っていることから、モデル流域として選定した。



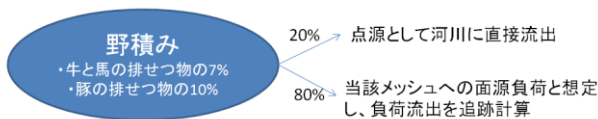
図-1 印旛沼流域と高崎川流域  
(印旛沼流域水循環健全化会議の提供資料に加筆)

### 3. 畜産の汚濁負荷

#### 3.1 モデル化の手法の概念

本研究における畜産のモデル化の手法の概念図を図-2に示す。平成11年(1999年)時点では、当時発生量(約9千万トン)の10%が、野積み素掘りといった処理が行われ、悪臭問題や河川への流出や地下水への浸透を通じ、閉鎖性水域の富栄養化、硝酸性窒素やクリプトスポリジウム(原虫)による水質汚染の一因となっていた。そのため、家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律が平成11年に施行され、平成20年(2008年)を目標として、家畜排せつ物の管理の適用化と利用促進がされた。現時点では、法に基づく管理基準はほぼすべての適用対象農家で遵守されている。そこで、法律施行前後において、畜産の汚濁負荷の比較により、畜産の

・家畜排せつ物法以前



・家畜排せつ物法以後

野積みはほとんど無く、還元利用以外の家畜排せつ物は浄化処理後に点源として河川へ直接排水されると想定

図-2 畜産の汚濁負荷の概念図

サブモデルを検証した。

#### 3.2 計算結果

畜産の汚濁負荷を考慮した計算結果を示す(表-1、図-3、4)。全窒素(TN)および全リン(TP)の汚濁負荷量(計算値)は、降雨量とよく対応し、非点源汚染の挙動を再現できていると考えられる。しかし TN および TP に関する限られた観測データを使って検証したので、引き続き検証する必要がある。

表-1 計算により求めた畜産の発生汚濁負荷量

Year	Livestock				Waste generation rate: g/日/頭				Total N generation (kg/day)	Total P generation (kg/day)	Discharge as Point Source, TN (kg/day)	Discharge as Point Source, TP (kg/day)	Discharge as Non Point Source, TN (kg/day)	Discharge as Non Point Source, TP (kg/day)	
	Total	Cow	Pig	Horse	Livestock	DN	PN	DP							PP
1997	8479	1558	2062	4859	Cow	3.2	0.9	0.34	0.36	9952	1699	139	24	557	95
					Pig	0.6	0.2	0.24	0.26	3401	2126	68	43	272	170
					Horse	3.2	0.9	0.34	0.36	96801	16527	1355	231	5421	926
2010	7799	1629	6026	144	Cow	4.2	1.2	0.7	0.75	14330	3848	266	111	-	-
					Pig	2.2	0.6	1.29	1.39	101675	97318	7005	10450	-	-
					Horse	4.2	1.2	0.7	0.75	112	112	30	2	1	-

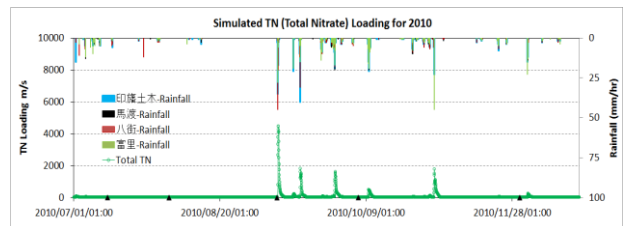
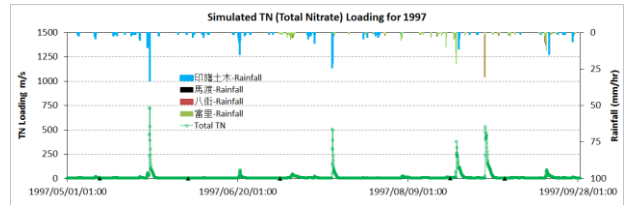


図-3 シミュレーションによる1997年と2010年の全窒素(TN)の汚濁負荷量

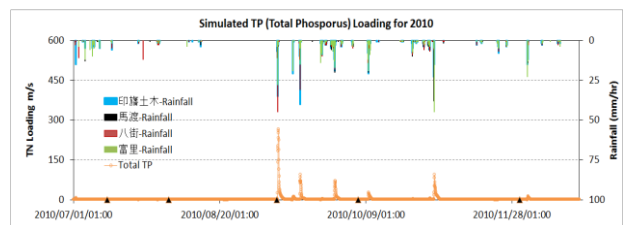
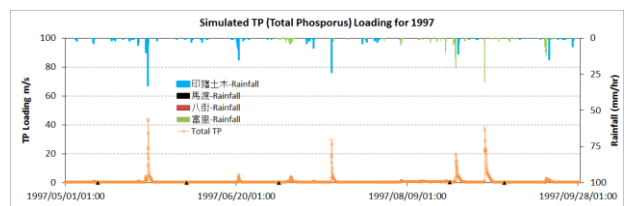


図-4 シミュレーションによる1997年と2010年の全リン(TP)の汚濁負荷量

4. SSモデルを導入した窒素、リンの負荷流出

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を示す(図-5)。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、懸濁物質は土粒子との吸着、脱着、堆積過程を考慮している。将来的には、都市域や畜産等の発生源ごとの汚濁負荷寄与度といった、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。

構築した WEP サブモデルは、印旛沼・高崎川流域で観測した 2013 年の降雨流出イベントにより再現性を検証した(5章を参照)。

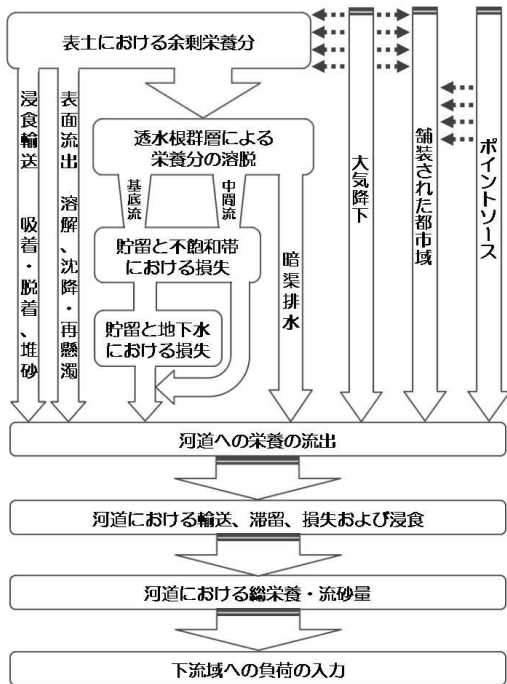


図-5 窒素・リンの負荷流出の解析過程

5. 印旛沼高崎川流域への適用

5.1 土地利用の異なる高崎川流域小流域での検証

B小流域(観測地点(8)より上流)でパラメータ調整を行った後、TN,TPの観測値と計算値との相関関係を確認し、さらに、土地利用の異なるA小流域(観測地点(4)より上流)とB小流域でTN、TPの時系列変化を、観測値と計算値とで比較することにより検証を行った。

5.1.1 小流域の概要

観測地点(4)、(8)の位置及び小流域A、小流域Bの土地利用状況を示す(表-2、図-6)。A小流域は、流域面積は77.9km<sup>2</sup>で農地の割合(畑:35.9%, 田:8.9%)が大きく、市街地・宅地の割合(19.1%)

が小さい。一方、B小流域は、流域面積は3.3km<sup>2</sup>で農地の割合(畑:3.4%, 田:1.4%)が小さく、市街地・宅地の割合(62.3%)が大きい。

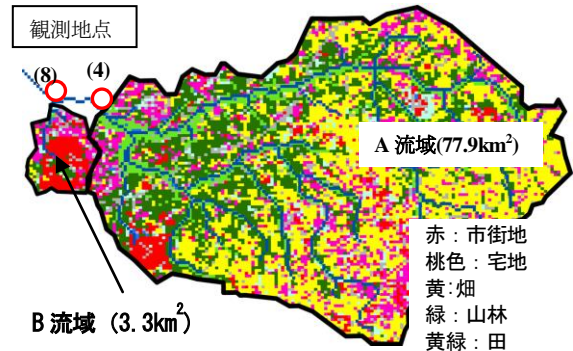


図-6 高崎川における小流域の位置図

※土地利用データ(千葉県提供)に加筆

表-2 土地利用状況

土地利用	A流域 (%)	B流域 (%)
1 山林	23.5	13.9
2 田	8.9	1.4
3 畑	35.9	3.4
4 宅地	14.0	21.5
5 市街地	5.1	40.8
6 道路	7.6	12.1
7 公園	4.4	5.8
8 水面	0.6	1.1
	100	100

5.1.2 観測値と計算値の比較

(1) 観測時の降雨状況

平成25年10月5日4時から6日12時にかけて連続雨量132~176mm、最大時間雨量11~17mm(10月6日8~11時)(流域周辺にある印旛土木事務所、馬渡、八街、富里観測所の結果)の降雨があり、観測地点で4時間おきに採水(観測)を実施した。上記4観測所の降雨データを使って流域平均をした降雨状況を示す(図-7)。最大時間雨量は、

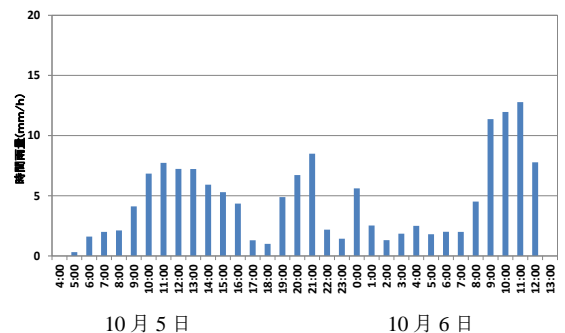


図-7 降雨量及び流量状況(高崎川流域)

A流域で 15.5 (mm/h)、B流域で 17.0 (mm/h) であった。

(2) 比較計算

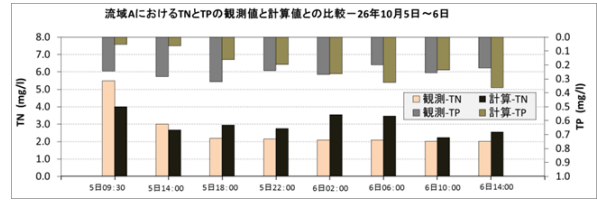
比較計算は、メッシュサイズは 100m とし、観測地点(8)で 2005 年度の観測データ (千葉県) を用いて調整したパラメータを用いた。

① TN, TP の観測値と計算値との関係

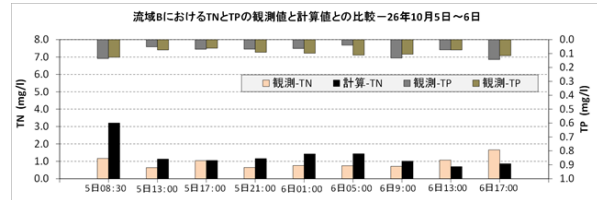
都市化の進んだ (宅地や市街地の占める割合の比較的多い) B 流域における TP、TN の観測値と計算値との関係を示す (図-8)。TN の計算値は観測値より多めに算出される傾向がみられ、相関係数は  $\gamma=0.92$  であった。TP の計算値は観測値より小さめに算出される傾向がみられ、相関係数は  $\gamma=0.78$  であった。

② 時系列変化の比較

A、B 流域における TN、TP の観測値と計算値の時系列変化で示す (図-9)。(a),(b) 図の上側の棒グラフは TP、下側の棒グラフは TN の観測値 (右側) と計算値 (左側) を比較した結果である。TN は、計算値が大きくなる傾向がみられた。

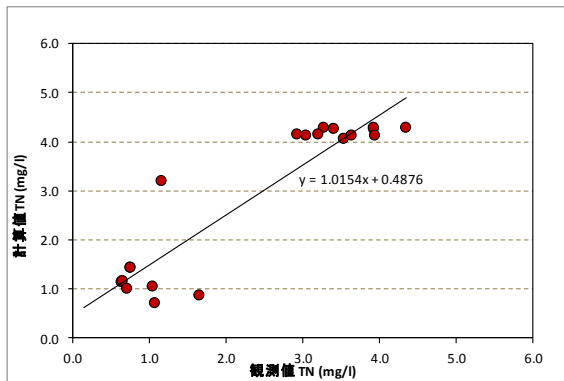


(a)流域 A

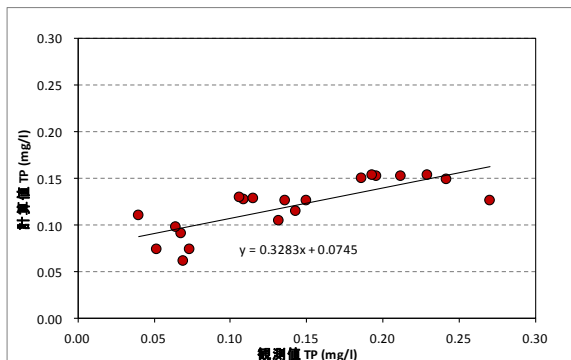


(b)流域 B

図-9 A、B 流域における TN、TP の時系列変化の観測値と計算値との比較



(a)TN の観測値と計算値との関係



(b)TP の観測値と計算値との関係

図-8 B 流域の観測値と計算値との関係

5. 2 土地利用変化に伴う年間流出量等の変化

高崎川流域全体を対象に過去の観測結果を用いて市街地・住宅あるいは山林に土地利用変化が進んだ場合の年間流量及び年間 TN 流出負荷量を試算し、現状との比較検討を行った。

5.2.1 設定条件

高崎川流域は、畑地が流域面積の約 33.4% (28.4km<sup>2</sup>) を占めており、この畑地の 80% (22.7km<sup>2</sup>) が市街地・住宅あるいは山林に土地利用が変化すると仮定し (表-3)、年間流量及び年間 TN 流出負荷量を試算した。試算に使用したデータは 2006 年 1 月から 2010 年 12 月までの雨量、流量である。

表-3 設定条件

土地利用	現状		試算			
			都市化	山林化		
山林	22.7%	19.3 km <sup>2</sup>	22.7%	19.3 km <sup>2</sup>	49.4%	42.0 km <sup>2</sup>
畑	33.4%	28.4 km <sup>2</sup>	6.7%	5.7 km <sup>2</sup>	6.7%	5.7 km <sup>2</sup>
市街地/宅地	34.1%	29.0 km <sup>2</sup>	60.8%	51.7 km <sup>2</sup>	34.1%	29.0 km <sup>2</sup>
田	9.0%	7.7 km <sup>2</sup>	9.0%	7.7 km <sup>2</sup>	9.0%	7.7 km <sup>2</sup>
水面	0.8%	0.7 km <sup>2</sup>	0.8%	0.7 km <sup>2</sup>	0.8%	0.7 km <sup>2</sup>

5.2.2 試算結果

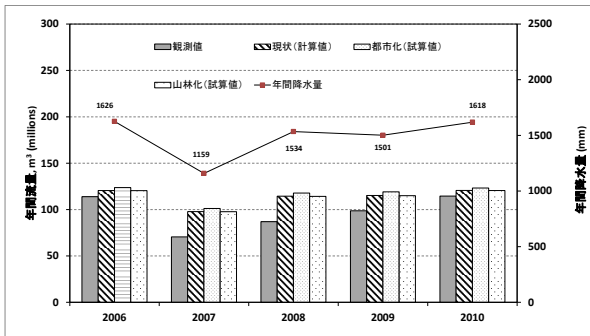
(1) 年間流量

年間流量の試算結果を示す (図-10(a))。現状の計算値は、観測値 (71~115 (10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)) に比べて 5~28% (平均 15%) の増加傾向がみられた。また、計算値は年間降水量に応じた流量が得られているが、観測値では年間降水量がほぼ同じでも流量が異なる場合があるという結果 (2008 年, 2009 年) が得られた。次に現状の計算値と土地利用変化後の

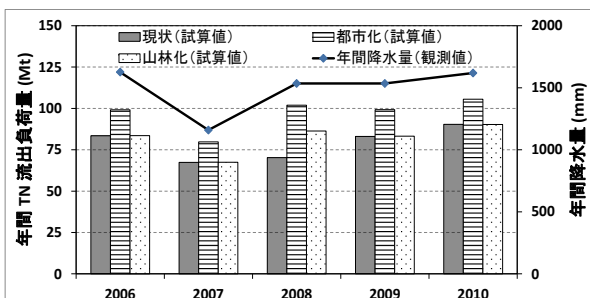
計算値を比較する。市街地・住宅が流域面積に占める割合が43.1% (29.0km<sup>2</sup>) から60.8% (51.7km<sup>2</sup>) に変化した場合、2006年から2010年の年間流量は1.02~1.03倍 (5年間の平均1.03倍) になる、流域面積の22.7%から49.4%へ山林に変化した場合、年間流量はほとんど変化しない (1.00 (5年間の平均1.00倍)) という結果が得られた。

(2) 年間 TN 流出負荷量

年間 TN 流出負荷量の試算結果を示す (図-10 (b))。市街地・宅地の面積が流域面積の43.1%から60.8%に変化した場合、2006年から2010年の年間 TN 流出負荷量が1.19~1.45倍 (5年間の平均1.23倍) に、山林の面積が流域面積の22.7%から49.4%に変化した場合、年間 TN 流出負荷量が1.00~1.23 (5年間の平均1.04倍) ほぼ同じであるという結果が得られた。なお、2008年の年間 TN 流出負荷量は両ケースとも比較的大きな増加傾向 (都市化:1.45倍、山林化:1.23倍) がみられた。都市化が進んだ流域の試算結果等の増加傾向については、その原因を確認中であるが、降雨時の流量増加に伴う計算上の年間 TN 流出負荷量の増加が原因だと考えている。



(a)年間流量の変化



(b)年間 TN 流出負荷量の変化

図-10 土地利用変化による年間流量及び年間 TN 流出負荷量の変化 (試算)

5.3 他手法等による試算結果の考察

(1) 原単位からの考察

原単位による土地利用変化による TN の年間流出

負荷量の変化を示す (表-4)。現状と比較すると、都市化した場合は、22.4%、山林化した場合は32.1%の減少がみられる。なお、水質チームが EMC (Event Meaning Concentration) と原単位との比較を行った結果、原単位は、雨天時の汚濁負荷が十分に算定されず、非点源汚濁負荷が低く見積もられる可能性があるという結果が得られている。

表-4 原単位による比較一覧表

土地利用	面積 (km <sup>2</sup> )			TN(kg/year)		
	現状	都市化	山林化	現状	都市化	山林化
雨	85.1	85.1	85.1	7.39	7.39	7.39
山林	19.3	19.3	42	0.70	0.70	1.53
畑	28.4	5.7	5.7	10.27	2.06	2.06
市街地等	29	51.7	29	3.91	6.96	3.91
水田	7.7	7.7	7.7	0.79	0.79	0.79
水面	0.7	0.7	0.7	0	0	0
合計				23.07	17.91	15.68

(2) 観測結果からの考察

2013年度から2015年度までに降雨時を含む水質観測を実施したA流域 (流域末端の観測地点、77.9km<sup>2</sup>) 及びB流域 (都市化の進んだ小流域 (観測地点8より上流、3.3km<sup>2</sup>)) について比流量 (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>) と TN 比負荷量 (g/s/km<sup>2</sup>) との関係を示す (図-11)。B流域は、A流域に比べて TN 比負荷量が小さい傾向がみられる。このことから、高崎川流域では、都市化が進むと TN 比負荷量が減少することが推測される。

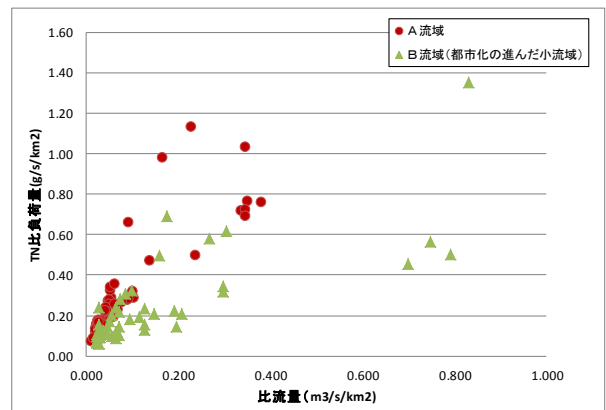


図-11 流域及び都市化の進んだ小流域における比流量と TN 比負荷量との関係 (観測結果)

(3) まとめ

WEP モデルの計算結果では、都市化が進むと、年間 TN 流出負荷量が増加する傾向がみられたが、原単位や限られた観測結果から考察すると、年間 TN 流出負荷量の減少が推測された。この点について

ては、引き続き検証を行うことにより、比流量と TN 比負荷量との関係をより明確にし、それを踏まえてパラメータの調整等を行う必要がある。

## 6. おわりに

高崎川流域を対象にして、土地利用を考慮した TN、TP、SS のサブモデルを検討し、土砂動態(SS)モデルを導入したサブモデル構築した。土地利用変化による年間流量及び年間 TN 流出負荷量の試算を行ったが、これについては満足できる結果が得られなかった。今後、土地利用形態の異なる他流域でも検証し、WEP モデルの精度を向上させる必要がある。また、WEP モデルには BOD や TOC 等の有機汚濁へ与える影響についてシミュレーションする機能がなく、環境改善策を立てるための総合的な分析ができない状況である。さらに、この機能についても拡張する必要がある。

## 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観測・収集されたものである。貴重なデータを提供していただいた両者に対し、ここに謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本水環境学会：「非特定汚染原からの流出負荷量の推定手法に関する研究 Study on Load Estimation of Non-point Source Pollution」、平成 23 年度 環境省環境研

究総合推進費成果報告書(RFb-11T1)、平成 24 年 3 月

- 2) Novotny, V., (1999). Integrating diffuse/nonpoint pollution control and water body restoration into watershed management. *Journal of the American Water Resources Association* 35 (4), 717-727.
- 3) Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y. and Suetsugi, T., (2001). Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrological Processes* 15, 2175-2194.
- 4) Jia, Y.W., Kinouchi, T. and Yoshitani, J., (2005). Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using WEP model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10, 253-263.
- 5) Rajapaksha, H., Inomata, H. and Fukami, K., (2009). Diffuse-source particulate nitrogen and phosphorus pollution modeling in Yata river basin in Japan using process-based WEP model coupled with a sediment erosion-transport model. *Ann. Conf. of Japan Society of Hydrology and Water Resources*
- 6) Perera, E.D.P, Iwami, Y, Chida, Y, River runoff and nitrate loading simulation for the land use changes in the Takasaki River basin in Chiba, Japan, 2nd International Interdisciplinary Conference on Land Use and Water Quality Agricultural Production and the Environment, Vienna, Austria, 21-24 September 2015: Volume of Abstracts, Abstract No 218, pp. 127
- 7) Perera, E.D.P, Iwami, Y, Chida, Y, Point and Non-point Source Pollution Assessment Study , UNESCO International Scientific Symposium,kyoto,15-18 July 2015: <http://www.unescokyotosympo2015.org/>

## STUDY ON COMPREHENDING DYNAMIC MATERIAL CIRCULATION AND RUNOFF ON BASIN SCALE (1)

Budget: Grants for operating expenses (General account)

Research Period: FY2011-2016

Research Team: Water-related Hazard Research Group

Author: Yoichi Iwami, Yoji Chida, E.D.P Perera

### Abstract:

Impacts on river basin environments due to the changes in water and material circulations have been concerned in recent past by the water management authorities since those impacts are very serious in water quality point of view and especially where the water quality in the basins are at or above the threshold of contamination. Land use changes due to urbanization, deforestation, livestock farming, agricultural activities which include fertilization significantly impact the water quality of river basins. Point Source (PS) and Non-Point Sources (NPS) in river basins should be controlled to maintain the river water quality standards. Recently in many watersheds PS pollution has been managed however still NPS are challenging task for the river basin managers. At this end ICHARM has been developing a basin scale hydrological and material (nitrate, phosphate and suspended solid) circulation model updating the already existing WEP (Water and Energy transfer Processes) model which was developed by PWRI. This study focused on NPS pollution loadings in Takasaki river basin which is a tributary to the Inba-numa Lake in Chiba prefecture. In this fiscal year, the Takasaki river basin's water quality was simulated by the WEP model for urban dominant and agriculture dominant sub basins to check their nutrient loadings. We compared the calculation results of TN and TP with observed data in the two different sub basins and found that the calculated values reasonably agreed with the field measurements. A qualitative analysis for the land use changes was conducted by simulating two land use scenarios within the river basin for the period of 5 years. The two scenarios considered were: Scenario -A: 80% crop area converted into urban areas (urbanization), Scenario - B: 80% crops land area is converted to forests (afforestation). The model was executed with the observed rainfall for 2006 to 2010 to check the variation of river runoff and N loading for each scenario. The up to date performances of the WEP model are satisfactory and it shows the potential of the WEP model in simulating the nutrient circulations under the influence of PS and NPS.