# 伊勢湾流域圏を対象とした 水・物質の流出解析に関する研究

SIMULATION OF RUNOFF DISCHARGE AND MATERIALS FOR ISE-BAY RIVER BASINS

高岡広樹<sup>1</sup>・戸田祐嗣<sup>2</sup>・辻本哲郎<sup>3</sup> Hiroki TAKAOKA, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

 $^{1}$ 正会員 博(工) 名古屋大学研究員 大学院工学研究科(〒 $^{4}$ 64- $^{8}$ 603 名古屋市千種区不老町) $^{2}$ 正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科(〒 $^{4}$ 64- $^{8}$ 603 名古屋市千種区不老町) $^{3}$ フェロー会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科(〒 $^{4}$ 64- $^{8}$ 603 名古屋市千種区不老町)

A river basin is an assembly of flux net work. It is recognized that ecosystem in a river basin plays a role to change the fluxes and to bring ecosystem service.

We developed hydrological and material cycle simulation model. This simulation model is composed of two parts: slope and river channel. The model contains to artificial flux changes such as dam, life drainage and sewage disposal plant. This model has been applied to the Ise-bay river basins. As a result, we found that the simulation results agree with field mesurements.

Key Words: flux network, ecosystem service, hydrological simulation model, Ise-bay

# 1. はじめに

著者らは、自然共生型流域圏構築の駆動力としての生態系サービスを指標としたアセスメント技術の開発を目指している<sup>1)</sup>. そこでは、流出に伴う水・物質循環のフラックス網に人工のそれらが連結された流域圏を扱う.フラックス網が流域のさまざまな「景観」や人工施設を通過することによって機能を生み出すときにその地先で生じるフラックス変化をフラックス網にフィードバックできる解析が必須となる.また、施策評価や比較を行うアセスメントの枠組みでは、それらのフィードバックを試行的かつ簡便に行える水・物質循環モデルの作成が必要である.

著者らは、雨水の流出とそれに伴う物質の流出(自然系)および生活排水などの人工系の流出を考慮した水・物質循環モデルを構築し、一級河川矢作川へ適用し、モデルの妥当性を検証した<sup>2),3)</sup>.

本研究では、すでに矢作川で試作した解析モデルを、流出過程記述の精度向上だけでなく、人工系の扱いに工夫を凝らし改良した。その水・物質循環モデルを伊勢湾流域圏(図-1)に展開し、流出流量、負荷量の流域圏特性について考察を行った。



図-1 伊勢湾流域図

# 2. 水・物質の流出解析

流域圏全体での施策効果を比較するためには、各地先での種々の施策効果を水・物質フラックス網へ簡便にフィードバックでき、また、他流域への適用も可能な流出解析モデルの構築が必要である。ここでは、対象流域を小流域分割により表現し、分布型流出モデルで評価することとした。本研究では、対象流域を河道の合流点で複数の小流域に分割し、小流域の繋がりによりフラックス網を記述する。さらに、小流域を陸域と河道とに分け、それぞれについて流出解析を行う。解析対象項目は、流量、COD、T-N、T-P、SSとした。以下に流出解析モデルの概要を示す。

## (1) 陸域モデル

陸域モデルでは、降雨の河道への流出とそれに伴う物質流動を解析する. 入力条件となる雨量データについては、各小流域の近隣のアメダス観測点における実測雨量を与えた.

### a) 降雨流出

降雨の流出解析には、表面流出成分と地下水流出成分とに分けて解析する。表面流出はkinematic wave法を集中化したモデル4を、地下水流出は貯留関数法を用いる。まず、陸域を河道両側に接する対称な斜面(図-2)として扱うと、基礎式は以下のように表される。

$$u = \alpha h^m, q = uh = \alpha h^{m+1} (1)$$
  $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = f \cdot r + r_a - r_f (2)$ 

ここに、u: 断面平均流速(m/s), h: 水深(m),  $q_1$ : 単位幅流量( $m^2$ /s), f: 流出係数, r: 観測雨量(m/s),  $r_a$ : 農業用取水の農地還元量(m/s),  $r_f$ : 浸透高(m/s)である.  $\alpha$ , mは Manning則より算出する.

式(1)を式(2)に代入すると,

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + aq_1^{\beta} \frac{\partial q_1}{\partial x} = aq_1^{\beta} \left( f \cdot r + r_a - r_f \right)$$

$$a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}, \beta = \frac{m}{m+1}$$
(3)

のようになる. ここで、 $q_1(x,t) = xq_*(t)$ の変数分離形の近似式が成立すると仮定する. 斜面長Lの末端で考え、x=Lとすると、式(3) は、次式のように変形できる.

$$\begin{split} \frac{dq*}{dt} &= a_0 q_*{}^{\beta} \left[ f \cdot r + r_a - r_f - q_* \right] \\ a_0 &= a L^{\beta - 1} = (m + 1) \alpha^{\frac{1}{m + 1}} L^{\frac{-1}{m + 1}} \end{split} \tag{4}$$

よって、河道への単位幅当り流出流量 $q_1(m^2/s)$ は、 $q_1=Lq_*$ となる.

地下水流出については、表面流出における浸透量を入力とし、貯留関数法により解析を行う. 基礎式は以下のようである.

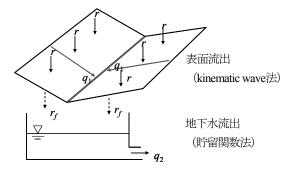


図-2 陸域モデル

$$\frac{ds}{dt} = r_f - q_2$$

$$s = k_1 q_2 + k_2 \frac{dq_2}{dt}$$
(5)

ここに、s: 貯留高(m),  $q_2$ : 地下水流出高(m/s),  $k_1$ ,  $k_2$ : 係数である.

また、下水道処理区域に降った雨については、下水処理場に運ばれ、処理排水として流出するとした.

# b) 物質 (COD・T-N・T-P・SS) の流出

陸域から河道への物質の負荷として,降雨からの負荷, 表面流出による負荷,地下水からの負荷を考慮した.

降雨からの負荷については、降雨水質を表面流出量に乗じることにより負荷を算出し、地下水からの負荷についても同様に、地下水水質を地下水流出量に乗じることにより算出した。降雨水質については、実測値がないため、他流域で用いられた値®を使用し、地下水水質は降雨水質の半分を仮定した。

降雨時の表面流出による負荷は、負荷堆積量を考慮した雨天時流出負荷量算定モデル<sup>6)</sup>を用いた.このモデルは以下の式により表現される.

$$L_{b} = \begin{cases} k_{b} \times S^{m_{b}} \times (Q_{1} - Q_{c}) Q_{1}^{n_{b}} & S < S_{\text{max}} \\ k_{b} \times S_{\text{max}}^{m_{b}} \times (Q_{1} - Q_{c}) Q_{1}^{n_{b}} & S > S_{\text{max}} \end{cases}$$

$$S = S_{0} - \int L_{b} dt + \int \Delta S dt$$
(6)

ここに、 $L_b$ : 表面流出負荷量(g/s), $Q_1$ : 表面流出量( $m^3/s$ ), $Q_c$ : 限界流量( $m^3/s$ ),S: 堆積負荷量(g), $S_0$ : 初期堆積負荷量(g), $K_b$ ,  $M_b$ ,  $M_b$ : パラメータである。また, $Q_1$ は降雨の流出解析結果を用いる。このモデルでは,降雨時の表面流出により,堆積負荷量に応じた負荷が発生し,その分Sは減少する。晴天時には, $\Delta S$ によりSが回復する。パラメータ $K_b$ ,  $M_b$ ,  $M_b$ は,全陸域からの表面流出負荷量の総和が原単位法による発生負荷量と一致するよう繰り返し計算により設定した $^{33}$ .

#### (2) 河道モデル

河道モデルでは、陸域モデルから河道への流出量を入力条件として、流量、物質の挙動を解析する.

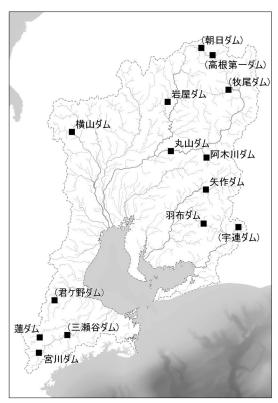


図-3 対象としたダム () 付は未考慮(考慮予定)

### a) 河道流量

貯留関数法により河道の流出解析を行う.まず,各種変数を無次元化することで河道追跡のための貯留関数<sup>7</sup>を次のように与える.

$$\begin{split} \frac{dH}{dT} &= Q_{in} - Q \\ H &= K_1 Q^{p_1} + K_2 \frac{d}{dt} \left( Q^{p_2} \right) \end{split} \tag{7}$$

ここに、 $Q_m$ : 無次元領域における河道上端に接続する 小流域からの総流入流量、Q: 無次元流量、H: 無次元 河道貯留量である。また、 $K_1$ ,  $K_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ : 無次元パラ メータである。また、有次元変数と無次元変数の関係は、 次のように定式化できる。

$$Q_t = \overline{q}_0 \cdot Q, \quad H_r = \alpha_r L_r (\overline{q}_0)^{m_r} \cdot H, \quad t = \alpha_r L_r (\overline{q}_0)^{m_r - 1} \cdot T \quad (8)$$

ここで, $Q_t$ ,  $H_r$ , tは有次元領域の河道流量( $\mathbf{m}^3$ / $\mathbf{s}$ ),河道 貯留量( $\mathbf{m}^3$ ),時間( $\mathbf{s}$ ),Q, H, Tは無次元領域の河道流 量,河道貯留量,時間である.また, $L_r$ は対象河道長

(m), $\bar{q}_{s0}$  は上流端流入量の平均値( $\mathbf{m}^3/\mathbf{s}$ )である.

また、 $\alpha$ 、およびm、は河道流定数で、A。:流水断面積とすると、以下の運動方程式に基づく.

$$A_{s} = \alpha_{r} Q_{t}^{m_{r}} \tag{9}$$

式(9)の $\alpha_r$ ,  $m_r$ は等流計算により求める.

なお、無次元貯留関数のパラメータ $K_1$ ,  $K_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ は、河道流定数m,のみによって次式のように近似できる $^7$ .



図-4 対象とした取水施設()付は未考慮(考慮予定)

$$K_{1} = 0.9676 + 0.15133m_{r} - 0.81273m_{r}^{2} + 0.68372m_{r}^{3}$$

$$K_{2} = 0.23516 \exp\left(2.40034m_{r} - 1.5188m_{r}^{2}\right)$$

$$P_{1} = -0.13643 + 1.80928m_{r} - 0.02472m_{r}^{2} - 0.89016m_{r}^{3}$$

$$P_{2} = -0.05408 - 0.0963m_{r} + 0.91673m_{r}^{2}$$
(10)

## b) 物質 (COD·T-N·T-P·SS)

河道における物質の挙動は、河川の浄化機能を考慮する.まず、反応は1次反応とすると、物質フラックスの連続条件より次式を得る.

$$\frac{\partial}{\partial t}(CA_s) + \frac{\partial}{\partial x}(CUA_s) = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_sD\frac{\partial C}{\partial x}\right) - A_skC \qquad (11)$$

ここに、 $A_s$ :流水断面積( $\mathbf{m}^2$ )、U: 断面平均流速( $\mathbf{m}/s$ )、C: 物質濃度( $\mathbf{g}/\mathbf{m}^3$ )、D: 拡散係数,k: 浄化係数である. 拡散項(右辺第1項)を無視し、流量の連続式を用いて整理すると、式(11)は以下のようになる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = -kC \tag{12}$$

# (3) 人工系モデル

人工系モデルでは、ダムの放流や取水による流量変化 について、大規模なものを対象にモデル化を行う.また、 生活や畜産、工場排水に伴う物質の流出を考慮する.

## a) ダムによる流量変化

図-3にモデル化を行ったダムの位置を示す. ()付は現在、未考慮であるが、今後考慮予定のダムである. 流入量および貯水位によって放流量を決定するモデルとする. まず、貯水量から各ダムの貯水池水位-容量曲線より貯水位を算出する. 流入量が各ダムで設定されている洪水調

表-1 処理形態別排出負荷 (g/day/人)

処理形態	COD	T-N	T-P	SS			
下水処理場	下水処理場で見込む						
合併浄化槽	11	6.7	0.9	10.8			
単独浄化槽	28	11	1.2	28.8			
計画収集	22	3.9	0.4	45			
自家処理	22	3.9	0.4	45			
未処理	22	3.9	0.4	45			

表-2 畜産系排出負荷 (g/day/頭・羽)

項目	COD	T-N	T-P	SS	
牛	53	30	4.5	300	
豚	13	5.6	6	70	
鶏	0.37	0.225	0.075	0	

節流量よりも大きい場合(洪水時)は、ダムの操作規則を基に2つのタイプに分けた。タイプ1は、流入量のうち洪水調節流量以上について、ピーク流量までは流入量に対し一定の率で洪水をカットし、ピーク以後は一定量(ピーク時の放流量)を放流する(一定率一定量放流方式)ダムであり、タイプ2は、流入量のうち一定の量を放流するダムである。

非洪水時には、貯水位が常時満水位(洪水期は制限水位)に近い場合は、放流量=流入量とし、常時満水位よりも低い場合は、河川確保流量として一定値を放流する.

## b) 取水施設による流量変化

対象とした取水施設を**図-4**に示す.()付は今後,考慮予定の取水施設である.上水用,工業用,農業用の取水を考慮する.また,農業用については,畑,水田の取水量を区別する.上水用,工業用の取水については,農業用に比べ変動が小さいため,実測の取水量データを基に,取水施設ごとに一定値を仮定する.

農業用の取水については、まず、各取水施設の受益 範囲と土地利用面積により、各取水施設の受益面積 (畑地、水田)の総和を算出する。単位受益面積当り の取水量を用いて、各取水施設からの取水量を算定す る。ここで、畑の取水時期は4/1~9/30とし、水田に ついては、非灌漑期を4/20~10/7、灌漑期を7/20~ 7/29とした。

### c) 生活系負荷

生活系負荷については、排水の処理形態別に負荷を 算出する. 処理形態は、下水処理場、合併浄化槽、単 独浄化槽、計画収集、自家処理、未処理とした. まず、 小流域内の処理形態別人口を算出し、下水処理場以外に ついて処理形態別1人当たりの排出負荷により負荷を計 算し、小流域末端に接続する河道へ流入させる. 処理形 態別排出負荷を表-1に示す.

処理形態が下水処理場に該当する場合は,生活排水は 下水処理場に運ばれ,処理場の排水地点において河道へ 一定量の排水,負荷を流入させる.処理場の位置および

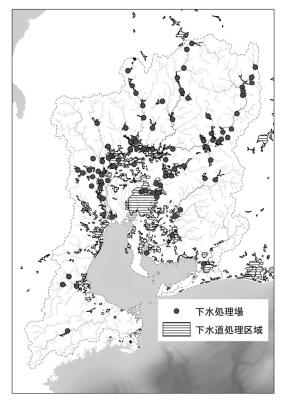


図-5 考慮した下水処理場および処理区域

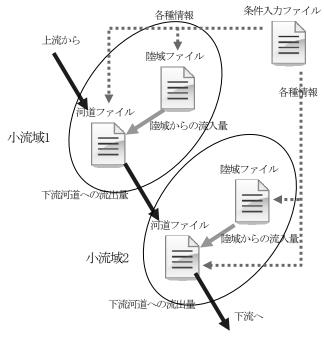


図-6 解析システムの概要

下水道処理区域を図-5に示す.

#### d) 畜産系負荷

畜産系負荷については、小流域内の牛、豚、鶏の数を 算出し、1頭、1羽当たりの排出負荷(表-2)により排出 負荷を求め、河道へ流入させる.

## e) 工業系負荷

工業系負荷については、工業出荷額見合いの排水量、 排出負荷を算出し、河道へ流入させる.

表-3 一級河川の概要

		宮川	櫛田川	雲出川	鈴鹿川	揖斐川	長良川	木曽川	庄内川	矢作川	豊川
陸域総面積(km²)		818	424	528	333	1,846	2,011	5,052	717	1,772	666
土地利用割合	山林	88%	83%	79%	56%	76%	74%	87%	62%	79%	82%
	市街地	2%	3%	3%	10%	6%	8%	3%	21%	6%	4%
	水田	5%	8%	10%	15%	12%	11%	5%	8%	9%	6%
	水面	3%	3%	3%	4%	4%	3%	2%	2%	2%	2%
	畑地	2%	3%	5%	16%	2%	4%	3%	6%	5%	6%
流域内人口(千人)		75	37	60	114	450	834	615	1,006	613	95
処理形態別 <sup>貞</sup> 人口割合 富	下水処理	1%	0%	12%	4%	33%	53%	34%	62%	37%	28%
	合併浄化槽	28%	28%	24%	27%	15%	10%	15%	8%	13%	15%
	単独浄化槽	39%	40%	35%	38%	31%	22%	29%	22%	38%	44%
	計画収集	32%	32%	28%	31%	21%	15%	21%	8%	10%	11%
	自家処理	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	未処理	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	2%
畜産頭数 (頭・羽)	牛	4,218	2,311	1,729	4,887	8,311	11,913	19,956	3,225	11,386	4,005
	豚	10,976	5,819	2,442	16,029	22,032	38,046	47,412	8,589	18,767	31,374
	鶏	426,585	189,510	221,218	1,576,519	2,458,939	2,358,997	1,699,134	1,164,438	986,977	643,695
工業排出負荷	COD(kg/day)	324	138	182	2,822	4,431	4,672	7,125	6,249	24,276	944
	T-N(kg/day)	175	75	98	1,527	2,397	2,527	3,855	3,380	13,133	511
	T-P(kg/day)	11	5	6	93	145	153	234	205	796	31

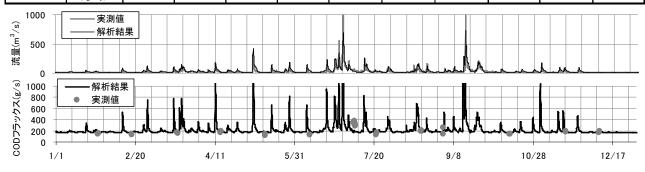


図-7 庄内川枇杷島観測所(河口から約15km)における流量,CODハイドログラフ

# 3. 解析システムの構築

流域圏での施策効果の比較においては、施策実施の有無をフラックス網へ簡便にフィードバック可能なシステムであり、かつ、様々な施策を様々なパターンで組み合わせて試行できる迅速性を保持していることが望ましい、そこで、本研究では、施策効果によるフラックス変化をフラックス網へ容易にフィードバック可能であり、他流域への適用性や迅速性を勘案し、Microsoft Office Excelにより解析システムを構築した。

本解析システムは、対象流域ごとに、条件入力ファイル、パラメータ設定ファイル、陸域ファイル、河道ファイルの4種類から成る。条件入力ファイルには、対象流域の全陸域・河道のそれぞれの接続状況や流域面積、平均勾配、土地利用、流域内人口や畜産頭数などを格納している。これらは1kmメッシュデータベースより内外挿した。パラメータ設定ファイルには、解析モデルに必要となる各種パラメータ(排出負荷原単位など)を設定し、解析時にそれらを読み込んで実行する。

各陸域・河道ごとにそれぞれ陸域ファイル・河道ファイルを作成し、それらの流域面積や勾配などの条件は条件入力ファイルからリンクしている。また、各ファイルには、入力値となる時系列データ(陸域では雨量データ、

河道では上流河道からの流入量と陸域の流出量)と解析 結果である出力値を格納している。各ファイルの作成や 解析はマクロで実行可能である。

各陸域・河道ファイルの解析結果(流出量)を,接続 先のファイルへリンクさせることによりフラックス網を 記述している.そのため,施策を実施する場合,対象地 先の流出量を置き換えあるいは加減試算することにより, その効果が下流へ伝播し,流域全体で評価可能である. このように,簡単にフィードバックが可能な仕組みと なっている.図-6に解析システムの模式図を示す.

# 4. 伊勢湾流域圏への適用

前述の解析システムを伊勢湾流域圏の10の一級河川に 適用した.解析対象期間は、伊勢湾流域圏の平均気象に 近い1999年の1年間とした.

# (1) 流域の概要

表-3に、伊勢湾流域圏の10の一級水系条件について、2000年の1kmメッシュデータベースより算出した土地利用割合や人口などを示す。庄内川流域は、他流域に比べ市街地面積の割合が大きく、都市化が進んでいることが分かる。また、流域内人口や下水処理人口割合も最も多

い. 鈴鹿川流域は、農地(水田、畑地)の割合が大きく、流域面積が小さいにもかかわらず、人口や畜産数、工業排出負荷が多いことが分かる. 他流域については、7~8割を山林が占めている. 工業系の排出負荷量については、矢作川流域が最も多い.

### (2) 解析結果

図-7に庄内川の枇杷島観測所(河口から約15km)における流量とCODフラックスの解析結果と実測値を示す.解析結果を見ると,流量の増加に伴ってCODフラックスも増加していることが分かる.洪水時の流量ピークがやや解析結果の方が小さいが,洪水開始時間はよく一致している.また,CODの解析結果もほぼ一致しており、本解析モデルは妥当であると言える.

図-8に代表的な流量観測所における年間の総流量を示す. 長良川, 木曽川の解析結果が実測値よりもやや小さな値となっているが、全体的にほぼ一致している.

図-9に河道末端における伊勢湾へ流出する年間の総COD負荷量とその発生別の割合を示す.流域面積が最大である木曽川が最も多く,降雨負荷と表面流出負荷で7割程度占めていることが分かる.一方,庄内川や鈴鹿川では流域面積に比して,流出負荷量は多い.庄内川では,生活系負荷と下水処理場からの負荷の割合が大きく,鈴鹿川では,生活系と工業系の負荷の割合が大きい.また,矢作川では,流域に主要な工業都市を抱えるため,工業系の負荷の割合が大きくなっている.他の物質についても同様の傾向を示している.

要約すると,鈴鹿川, 庄内川, 矢作川は, 生活系などの人間活動によって排出される負荷の割合が大きいが, 宮川, 櫛田川, 雲出川, 木曽川は, 降雨や表面流出による自然系の負荷割合が大きく, 揖斐川, 長良川, 豊川は両者の中間的な割合を示していることが分かる.

## 5. おわりに

本研究では、施策効果を水・物質フラックス網へ簡便にフィードバック可能な流出解析モデルを構築した。また、他流域への適用性や迅速性を勘案し、Microsoft Office Excelにより解析システムを構築した。

構築した解析システムを伊勢湾流域圏の10の一級河川に適用した。その結果、観測値と整合することが示された。また、鈴鹿川、庄内川、矢作川では、人間活動による負荷の割合が大きく、宮川、櫛田川、雲出川、木曽川では、自然系の負荷割合が大きいことが分かった。

よって、本解析システムにより流域圏での負荷分布と その流出特性の地域性、人工系の影響の大小が評価でき、 アセスメントでの使い勝手が検証された. 今後は、他の 人工施設を考慮し、本解析システムを用いて、伊勢湾流 域圏において、様々な施策効果の評価を行っていく.

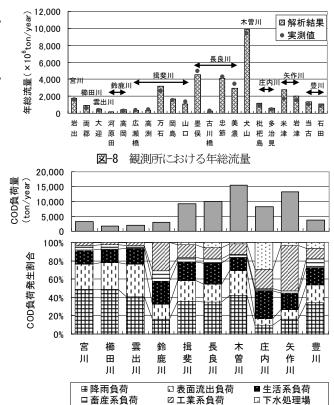


図-9 河道末端における年総COD負荷量とその発生割合

謝辞:本研究は、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢 湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発(代表 辻本哲郎)」の一環として実施したものである。ここに記して 謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 辻本哲郎, 戸田祐嗣, 尾花まき子: 自然共生型流域圏管理の ための生態系影響評価への水工学的アプローチ, 水工学論文 集, 第53巻, pp.637-642, 2009.
- 2) 高岡広樹, 戸田祐嗣, 辻本哲郎:流域圏の自然共生型アセスメントのための水・物質循環モデル, 第37回環境システム研究論文発表会講演集, pp.7-12, 2009.
- 3) 高岡広樹, 戸田祐嗣, 辻本哲郎:1950年と2004年における矢 作川流域からの流出負荷量について, 水工学論文集, 第54巻, pp.1375-1380, 2010.
- 4) 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,水工学論文集,第49巻,pp. 169-174,2005.
- 5)藤田光一,伊藤弘之,小路剛志,安間智之:水物質循環モデルを活用した水環境政策評価~霞ヶ浦とその流域を対象として~,国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告,自然共生型流域圏・都市の再生資料集(II), No. 299, 2006.
- 6) 和田安彦: ノンポイント負荷の制御, 都市の雨水流出と負荷 制御法, 技報堂出版, 1994.
- 7) 宮原雅幸, 星清:河道系におけるKinematic Wave Modelの貯留関数法への集中化, 開発土木研究所月報, 第552号, pp.10-21, 1999. (2010.4.8受付)