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¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³ 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	(〒464-8603	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	(〒464-8603	名古屋市千種区不老町)
3フェロー	·会員 工博	I 名古屋大学教授	大学院工学研究科	(〒464-8603	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¹⁾.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^{2),3)}.

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⁴⁰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.

$$u = \alpha h^{m}, q = uh = \alpha h^{m+1} (1) \qquad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_{1}}{\partial x} = f \cdot r + r_{a} - r_{f} (2)$$

ここに,u:断面平均流速(m/s),h:水深(m), q_1 :単位 幅流量(m²/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. α , 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.

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*{}^\beta \left[f \cdot r + r_a - r_f - q_* \right]$$

$$a_0 = a L^{\beta - 1} = (m + 1) \alpha^{\frac{1}{m + 1}} L^{\frac{-1}{m + 1}}$$
(4)

よって、河道への単位幅当り流出流量 q_1 (m²/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.



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⁵⁰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[®]を用いた.このモデル は以下の式により表現される.

$$L_{b} = \begin{cases} k_{b} \times S^{m_{b}} \times (Q_{1} - Q_{c})Q_{1}^{n_{b}} & S < S_{\max} \\ k_{b} \times S_{\max}^{m_{b}} \times (Q_{1} - Q_{c})Q_{1}^{n_{b}} & S > S_{\max} \end{cases}$$
(6)
$$S = S_{0} - \int L_{b}dt + \int \Delta Sdt$$

ここに、 L_b :表面流出負荷量 (g/s) 、 Q_1 :表面流出量 (m³/s) 、 Q_c :限界流量 (m³/s) 、S :堆積負荷量 (g) 、 S_0 :初期堆積負荷量 (g) 、 k_b 、 m_b 、 n_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、 Δ SによりSが回復する.パラメータ k_b 、 m_b 、 n_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³.

(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⁷⁾ を次のように与える.

$$\frac{dH}{dT} = Q_{in} - Q$$

$$H = K_1 Q^{p_1} + K_2 \frac{d}{dt} \left(Q^{p_2} \right)$$
(7)

ここに, *Q_{in}*: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*, *H*, *t*は有次元領域の河道流量(m³/s), 河道 貯留量(m³),時間(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*,は対象河道長

(m), \bar{q}_{s0} は上流端流入量の平均値(m³/s)である.

また、 α_r および m_r は河道流定数で、 A_s :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a, m,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_r 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.

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

ここに、 A_s :流水断面積(m^2)、U: 断面平均流速(m/s)、 C:物質濃度(g/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	39	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.

櫛田川 宮川 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) 818 424 333 1,846 2,011 5,052 713 1,772 666 528 88% 83% 79% 56% 87% 62% 82% 山林 76% 74% 79% 10% 6% 8% 市街地 2% 3% 3% 3% 21% 6% 4% 土地利用割合 水田 5% 8% 10% 15% 12% 11% 5% 8% 9% 6% 水面 3% 3% 3% 4% 4% 3% 2% 2% 2% 2% 2% 3% 5% 16% 2% 4% 3% 6% 5% 畑地 6% 流域内人口(千人 6 450 834 61: 1,00 61 0% 12% 4% 33% 53% 34% 62% 37% 28% 1% 下水饥理 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% 処理形態別 人口割合 計画収集 32% 32% 28% 31% 21% 15% 21% 10% 11% 8% 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% 4,218 1,729 4,887 8,311 11,913 19,956 3,225 11,386 2,311 4,005 畜産頭数 (頭・羽) 10,976 2,442 47,412 18,767 31,374 豚 5,819 16,029 22,032 38,046 8,589 雞 426,58 221,218 2,458,939 2,358,997 1,164,438 986 97 189,510 1,576,519 1,699,134 643 69 COD(kg/day) 324 2,822 4.431 4,672 6.249 24.27 944 138 182 7.12 工業排出負荷 T-N(kg/day) 175 1,52 2 39 2,52 3,85 3,380 13,133 511 7 98 T-P(kg/dav) 11 93 145 153 23 204 796 31 1000 実測値 ં 解析結果 流量(m³/s 500 0 (g/s) 1000 ·解析結果 800 • 実測値 CODフラックス(600 400 200 0 1/1 2/20 4/11 5/31 7/20 9/8 10/28 12/17 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

表-3 一級河川の概要

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 先のファイルヘ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

- 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)