

B-57 流域水文水質モデルBASINS-HSPFを用いた 環境負荷物質の動態予測に関する研究

○佐藤 圭輔^{1*}・林 宏樹²・佐藤 浩一²・清水 芳久³

¹立命館大学理工学部環境システム工学科（〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1）

²立命館大学大学院理工学研究科創造理工学専攻（〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1）

³京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター（〒520-0811滋賀県大津市由美浜1-2）

* E-mail: k-sato@fc.ritsume.ac.jp

1. はじめに

我が国では、総量規制などによって閉鎖性水域における水環境が改善されつつあるが、個別には未だ改善困難の地域も存在している。その原因の一つは面源負荷であると言われている。人為負荷はある程度制御できても、面源負荷は降雨を原因とした出水によって発生するため対策が容易ではない。例えば森林からの濁水は、斜面崩壊などによって起こるため森林保全が対策となりうるが、現在はむしろ荒廃に逆行している場合もある。また、傾斜地に存在する農地は、降水時に大きな負荷を発生させるが、未管理の耕作放棄地では尚更である。さらには、管理不十分のため池や畜産地なども下流から見れば大きな負荷源になりうる。一方で、大気環境や気象の変化も閉鎖性水域の悪化に拍車をかけている。例えば大気からの供給過多によって窒素飽和になっている森林は、出水時でなくても硝酸態窒素の流出を発生¹⁾させ、また降雨の集中化といった異常気象は、面源負荷の発生量を飛躍的に増加させている。このように、閉鎖性水域を取り巻く環境は、今後益々厳しい状況になることが予想される。

これらの課題に対して、閉鎖性水域等に流れ込む河川水質の予測を目的とした調査やモデル開発が進んでいる。面源負荷の影響も多くのモデルで加味されているため、上述した様々な環境変動シナリオの影響予測や対策評価も可能になりつつある。近年はモデルがパッケージ化され、汎用化が進んでいるため利用するユーザーも多くなっているが、パラメータ条件の設定や気象データの入力にはやや労力を要している。モデルの適用性を検証するためには、出来るだけ同様のルール（計算条件）で規模や土地条件の異なる様々な流域での再現性比較が望まれる。そこで本研究では、既存の流域統合モデルを活用し、一般に入手可能なGISデータや気象データを活用することで適用性の比較を試みた。また、一部の流域では陸域・水域での窒素動態予測を行い、簡易的な対策におけ

る負荷削減効果の試算を行った。これらの成果を通じて、流域統合モデルの今後の活用可能性について言及したい。

2. 対象地域と方法

(1) 3つの対象流域

本研究では流域面積の異なる3つの対象河川（矢作川、野洲川および野田川）を設定した。流域の位置や形状は図1に、流域特性は表1にまとめた通りである。これらの流域は単に土地利用特性や人口分布が異なっているだけでなく、地形的あるいは気象学的な違いも有している。また、矢作川流域と野洲川流域には複数のダムや大小様々な頭首工があり、農業用水をはじめとする水利用の盛んな地域として知られている。以上に述べた違いは、

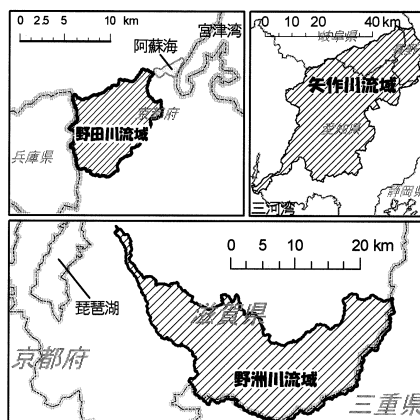


図1 研究対象流域の位置とスケール

表1 研究対象流域の流域特性

	矢作川			野洲川		野田川	
	中部-愛知県	近畿-滋賀県	近畿-京都府	近畿-滋賀県	近畿-京都府	近畿-京都府	近畿-京都府
主な位置							
流域面積	1780	320	95				
主流路延長(km)	117	64	16				
傾斜(%)	0.24	0.18	0.26				
人口	597,000	142,500	27,400				
土地利用割合 (%)	水田	9.7	23.0	15.6			
	森林	74.6	51.7	75.7			
	市街地	5.3	8.0	5.9			
主要な取水施設	ダム	3	2	0			
	頭首工	3	3	0			

モデルに入力するGISデータや気象データ、あるいは計算条件によって適切に考慮される。それぞれの河川下流には三河湾、琵琶湖および阿蘇海（天橋立）といった閉鎖性あるいは半閉鎖性水域が存在し、いずれも水域保全のための流域管理が強く求められている地域である。

(2) 流域統合モデル

本研究で利用した流域統合モデルはBASINS-HSPF（米EPA）である。本モデルは長期に渡る活用実績とバージョンアップが進められていること、Web上から容易にDL可能であり無償利用できること、物質動態の現象モデルも水文・水理と併行して計算されていること、また適用地域の特性をGISなどの社会基盤データから入力可能であることなどが特徴である。一方、GISの取扱いやパラメータ・計算条件の設定にある程度の経験も必要である。

HSPFには多くの解析機能が同梱されているが、本研究では、水文・水理、融雪、土砂生産（剥離、ガリ浸食）、流砂および窒素動態の計算機能を利用した。水文・水理については、浸透性陸域(PLS)に設定された鉛直3層において、浸透計算と各層からの実蒸発散および流出の計算によって実施され、河川域では次元不等流にて時々刻々の流量が計算されている。陸域にて生産され河川に流出した土砂粒子は、3つの代表粒径（2mm, 0.04mm, 0.005mm）に配分された後、各々の限界掃流力に基づいた流砂（掃流砂、浮遊砂）計算に供される。窒素動態については、易分解・難分解有機態、アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態および植物態（地上・地下・リター）に分類され、アンモニア態と有機態では吸着態と溶存態が考慮される。それぞれの変換は、水温やDOなどの条件により設定される反応速度や平衡定数などに基づいて各地点（サブ集水域あるいは河川域）ごとに制御されている。

(3) 流域の分割と河川のモデリング

本モデルは対象流域を小集水域（以下、サブ集水域と呼ぶ）に分割し、それら個々に作成される河川区画を流下方向に接続して移流計算を行っている（図2）。従って、サブ集水域ごとに降水量や河川接続先が設定され、サブ集水域内をさらに土地利用別に区分することで、各々の地形学的特性（傾斜など）や水文学的特性（浸透速度、貯留限界、流出速度など）が考慮される。BASINSは以上の流域分割を自動で行うツールであり、標高データを入力し、河川の設定条件や最下流点（河口など）を設定すると速やかにサブ集水域と河川ネットワークが作成される。野洲川流域に適用した結果では、図3(左)に示すように43個のサブ集水域（矢作川では81個、野田川では13個）に自動分割された。取水・還元による人為操作フローは、上述ツールで自動反映されないが、HSPF内の接続や流量調整の設定を一部変更することで対応する。

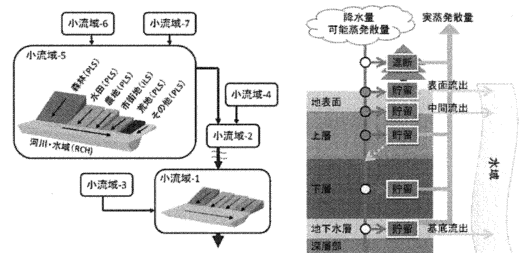


図2 BASINS-HSPFによる流域分割とモデル概要

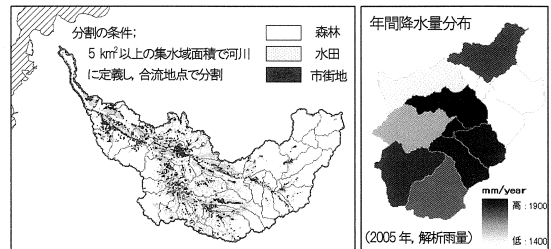


図3 野洲川・野田川流域の分割と土地分類/降水量分布

なお、現行のHSPF Ver. 12では、サブ集水域×土地利用の区分数が500以下を条件としているため、それ以上となる場合はbatなどによる連続計算の設定が必要である。

(4) 気象および土地利用の設定

モデルに入力する気象情報のうち、降水量は解析雨量（気象庁）を利用した。本データは1988年以降のみ利用可能であるが、2.5-5.0km分解能の分布として取扱うため、特に上流での再現精度向上が期待できる。図3(右)に示したように、流域面積100km²以下の野田川流域においてもサブ集水域による降雨量の違いが大きい。一方、融雪に大きく関わる気温の設定は、各流域近傍の地方気象台による観測値（実測値）を利用し、サブ集水域の平均標高との標高差に基づいて自動調整（HSPF）された。いずれの入力値もサブ集水域内の分布は考慮していない。

一方、土地分類は国土数値情報（国交省）の土地利用細分メッシュ（LO9-09M, 平成9年, 図3(左)）に基づいて設定した。利用区分数は最大11分類となっているが、本研究では①田、②農用地、③森林、④市街地（建物・交通・その他用地を含む）および⑤その他に再編し、④を不透水性陸域(ILS)に、それ以外を浸透性陸域(PLS)に設定している。モデルでは、サブ集水域内の土地分類の配置は考慮されず、割合と各々の地形特性は考慮される。

(5) その他の設定

モデルパラメータは、サブ集水域の面積、傾斜、接続設定、河川横断形状、水位-流量関数表など地域固有の部分を除いて、土地分類ごとに一定の値を設定した。また、計算stepは1時間とし、1年間の連続計算をするよう統一したが、本稿では対象とした年（矢作川：2004年、野洲川：1998年、野田川：2005年）は統一していない。

(6) 対策シナリオの設定

環境負荷物質の削減を目的とし、a. 土地利用転換、b. 下水道改善、c. 森林保全の効果をそれぞれ試算した。具体的なモデル上の設定は、a. 傾斜16%以上の水田を森林に変更、b. 下水道拡大による普及率の20%向上（負荷量をコミプラ・浄化槽→下水処理水レベルへ）、c. 現状の森林の窒素飽和状態を仮定し、流出率を2.0（飽和の場合）から0.3相当（不飽和の場合）に変更した¹⁾。

3. 結果と考察

(1) 流量の再現性比較

図4に矢作川と野洲川における下流地点の時間流量（HSPFによる計算値と実測値）を示した。これらの結果からいずれの流域（野田川を含む）でも計算値が全体として過小評価になっていることが分かった。この原因として①降水量の過小、②蒸発散量の過大および③流量実測の過大評価が考えられるが、観測・推定精度を考えれば③の影響が大きいものと考えられる。また出水イベントごとに再現性が異なることから、出水時の貯留状況を分析することや土地被覆の季節的变化を設定することの必要性が示唆された。これらの比較から土地特性や降水量、流域規模によって再現性（誤差率）が大きく変わることは見いだされなかったが、流量規模が異なるため誤差そのものは規模に応じて大きく異なることが分かった。

(2) 環境負荷物質の推定結果

対象にした3つの流域でそれぞれSS負荷量を算定した結果、矢作川（米津地点）で120万 ton/year、野洲川（野洲地点）で21万 ton/year、野田川で0.13万 ton/year となった。比流砂量に換算すれば野田川が少ないが、土地利用特性の他に、対象年の降水状況（野田川は渇水年）が大きく影響しているものと考えられる。図5に矢作川と野田川におけるSS負荷量（時間負荷量を日負荷量に合計した値）の再現性を示す。それぞれの流域（野洲川も含む）で良好な正相関の関係が見られたが、低水時に1オーダー程度の誤差を生じた。この原因として、モデルにおいては河道内からの発生負荷の推定（粒径と貯留量の設定）に、SSの実測においては方法に改善の余地があることが示唆された。なお、矢作川のSS負荷量は濁度計による実測値を用いて定義されたL-Q式で設定、野田川のSS負荷量は自動採水機によるサンプリング調査で定義されたL-Q式で設定している。

矢作川流域を対象とした窒素動態の計算結果からは、土地利用ごとの流出量の違い（中流の森林で3.3、水田で44.5 ton/ha・year）が再現されるとともに、河川水における濃度範囲は0.27～7.2 mg/L（9割以上は硝酸態）となることが推定された。時系列の再現性評価には、適切な時間と場所で実測する必要があるが、2000年4月から2カ年の調査²⁾を参考にすれば概ね類似の値となった。

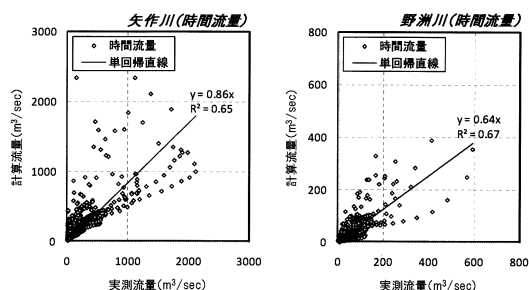


図4 矢作川と野洲川における流量推定結果の比較

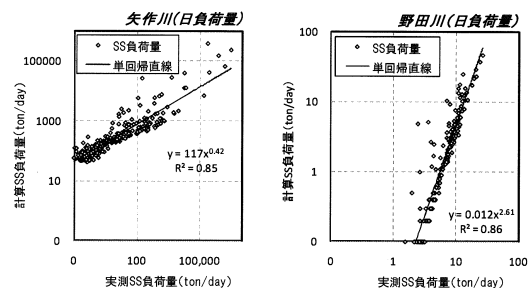


図5 矢作川と野田川におけるSS負荷量推定結果の比較

(3) 対策シナリオの評価（矢作川流域）

- a) 土地利用転換：該当する44km²の水田・農地を森林に転換すると米津地点のSS負荷量が約2.4%（9万ton）、窒素負荷量が約10.6%（330ton）の削減効果が推定された。
- b) 下水道改善：浄化槽などを通じた河川への負荷が大幅に減少し、米津地点の窒素負荷量が約4%（120ton）の削減効果が推定された。
- c) 森林保全：森林は流域の約75%を占めていることから米津地点の窒素負荷量が約25%（780ton）もの削減効果が期待できると推測された。

(4) まとめ

本研究では複数の流域にモデル（BASINS-HSPF）を適用し、流量とSS負荷量の推定で一定の有効性を得ることが出来た。このことから様々な地域での流域解析において、本モデルを有効に活用できることが示された。しかしながら、各流域におけるモデル設定（特に河道設定や土砂動態に関わるパラメータ）の改善の必要性や比較条件の統一、現地観測データの収集が必要であり、今後はこれらの点に注力していきたい。

参考文献

- 1) 柴田英昭：大気-森林-河川系の窒素移動と循環，地球環境，Vol.9，No.1，pp.75-82(2004)。
- 2) 白金晶子：矢作川中流域の水質Ⅱ ―水質の長期変動と他河川との比較―，矢作川研究，No.8，pp.219-228(2004)。

謝辞

＊本研究は、(財)河川環境管理財団の2011年度河川整備基金助成事業によって実施しました。ここに謝意を表します。