

〈研究発表〉

水・物質動態に与える政策シナリオ評価：

GISを用いた流域モデルの設計と実流域への適用

佐藤 圭輔¹⁾，椿 涼太²⁾，戸田 祐嗣³⁾，辻本 哲郎³⁾

¹⁾ 立命館大学 理工学部 環境システム工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1, E-mail: k-sato@fc.ritsumeai.ac.jp)

²⁾ 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1, E-mail: rtsubaki@hiroshima-u.ac.jp)

³⁾ 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: 省略)

概要

本研究では、矢作川流域を対象に流域モデル (HSPF) を設計し、幾つかの施策を設定してその効果を負荷量の観点から定量的に評価した。特に粒子状物質、形態別窒素負荷について施策効果が適切に評価できるようプロセスベースでの動態モデルを導入した。結果として流域内の時空間的な濃度、負荷量の定量評価が可能となり、特に将来に向けた適切な森林管理や土地利用転換政策は物質負荷に一定の効果 (全窒素ベースで 10%~25%程度) を見込めることが明らかとなった。

キーワード： 流域モデル (HSPF)，水・物質フラックス，窒素動態，土地利用，政策シナリオ

1. はじめに

湾域や湖沼の水環境管理には、水域保全のみでは持続可能な効果を得ることが困難であるため、主な負荷源となっている流域を含めた調査・管理が必要である。環境省がとりまとめた伊勢湾流域の排出起源別窒素負荷量の内訳を見れば①下水処理系、②生活系、③農業畜産系、④山林市街地系、⑤その他でそれぞれ 2 割前後を占めており、日量平均 143 トン (1999 年度) の負荷が伊勢湾に持ち込まれている。伊勢湾流域の下水道普及率 (愛知県 64%、岐阜県 62%、三重県 38%、2006 年) はやや低く、農林地の占有面積率 (森林 65%、水田・農用地 16%、1997 年) が高いため東京湾への負荷構成に比べれば、伊勢湾では上記②、③および④の割合が大きい。我が国では総量規制や下水・排水処理の推進などによって各水域の環境基準達成を目指しているが、伊勢湾・三河湾あるいは下流に位置する油ヶ淵などの水質は大きく改善していない。

一方で、流域圏管理政策や対策事業を計画的に進めるためには、各々の施策による効果を定量的に測ることが望ましいが、例えば‘下水道普及率 10%向上’で‘環境基準達成率 30%向上’が期待できるといった因果関係は現状では容易に説明できない。生活排水の場合は特定汚染源のため対策効果が比較的分かりやすいとしても、農地・森林管理や植生の再生事業となればその効果は一段と分かりにくい。実際には森林管理が河川生態系を改変するといった‘効果の伝播’も起こるため、流域圏全体としての最適化を目指すためにも簡便かつ効果的な評価手法の構築が望まれる。

そこで本研究では、政策効果を定量的に評価するため

の基礎モデルとして統合型水文水質解析モデル (以降、流域モデル) を設計した。本モデルでは各地点における時々刻々の負荷量 (粒子状物質、形態別窒素) の再現を目標とした。これまで主に利用されてきた L-Q 式 (統計手法) に基づく負荷量予測に比べ、水文・陸面過程および生物化学的作用に基づいた変換・流出現象をプロセスベースで記述している点が特徴であり、施策効果を評価する際により具体的な設計を可能とする。また、各種 GIS データを基礎情報として利用するため、政策の空間的な展開や複合的な効果を測ることも可能である。入力する気象データにはこれまで地点雨量 (アメダスなど) を用いることが多かったが、本研究では旧レーダーアメダス解析雨量 (現解析雨量) を利用することで時空間的により詳細な水・物質動態の再現を目指した。さらに構築された流域モデルを利用して、幾つかの典型的な施策シナリオによる負荷削減効果を評価した。

2. 流域モデルの概要

本研究では流域モデルとして BASINS4-HSPF 12 (EPA, 無償)²⁾ を利用した。BASINS4 は GIS データの処理を行い HSPF 試行のための基礎データを作成する支援ソフトで、HSPF 12 は数十年かけて改良されてきた水文・水質を同時に扱う統合モデルである。本稿の計算では主に積雪・融雪、熱輸送、水文 (浸透、貯留、流出)、粒子状物質 (SS) 輸送、窒素変換・輸送モジュールを考慮した。以下に、水文、SS、窒素の計算方法を説明する。なお、HSPF では農薬、リン、有機物、溶存酸素、動植物プランクトン、pH などの計算モジュールも用意されているが、本稿では用いていない。

2.1 水文³⁾

Fig.1 に、流域モデルで扱う空間区分とネットワークの概念図を示した。水文過程では流域を浸透性陸域(PLS)、不浸透性陸域(ILS)および河川・水域(RCH)に分類し、PLSとILSはRCHに連結され、さらにRCHとRCHが連結されることによって水や物質を下流に輸送する。PLSは、土地特性に応じた流出機構の違いによって再区分(土地利用などを基準)が行われ、それぞれの区分において鉛直方向に植生面、表層、上層、下層および地下水層が設定される。降水によって供給された水は順次地下水層まで落下・浸透(Philip式など)し、各々の貯留槽から蒸発散量(penman法と統計手法)と流出量(表層: chezy-manning式による表面流出, 上層: 貯留関数に基づく中間流出, 地下水層: 水頭エネルギー勾配に基づいた基底流出)が計算される。一方でILSには上層、下層および地下水層を設定しない。RCHでは、流下方向に合流地点で区切られた擬似的な河川ボックスを設定し、ボックスごとに水位-横断面積曲線、流路長、傾斜などを入力するとともに、これを連結して一次元不等流計算を行う。なお、流れの非定常性は実測あるいは経験的なH-Qカーブ(Ftable)を外部入力することによって考慮する。

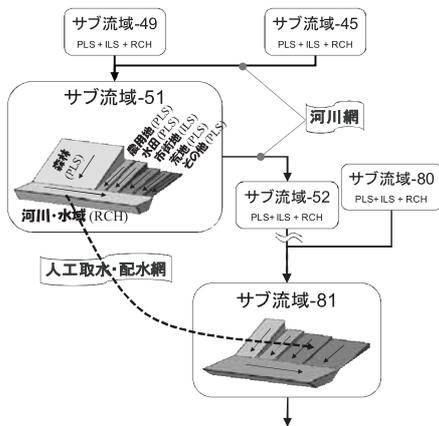


Fig.1: Conceptual diagram of hydrogeomorphologically delineated units for each land-use and its networks.

2.2 粒子状物質(SS)³⁾

ここでは比較的粒径の大きい粒子状物質も含めてSSと呼称することにする。SSはPLSおよびILSでの生産・流出とRCHでの輸送に大別される。PLSでは①ガリ浸食による土壌マトリックス由来のSS流出に加えて、②降雨強度による剥離あるいは大気沈着で堆積したSSのwashoffによる流出を考慮している(ARM and NPS法+USLE法による改良モデル)。ILSでは大気沈着や風、清掃などによって変化する堆積量をもとにSSのwashoffによる流出を計算する。RCHではPLSとILSから流入したSSを三粒径(sand, silt, clay)に区分し、各々の成分に対する河床との交換(沈降, 巻き上げ)を考慮して水中SS濃度が計算(Toffaleti法, Colby法など)され、流量に応じて下流のRCHに輸送される。

2.3 窒素(N)³⁾

窒素の動態についてもPLS, ILSおよびRCHでやや異なる手法が使用される。PLSでは2.1で述べたように表層, 上層, 下層ごとに層厚や空隙率などを設定し、各々の層においてFig.2に示すとおり①易分解性懸濁態有機窒素の難分解化(Conversion, 一次関数法), ②易分解性懸濁態有機窒素のアンモニア態窒素への無機化(Mineralization, 一次関数法), ③有機窒素の溶存・懸濁分配(Sorption/Desorption, 平衡等温線), ④アンモニア態窒素の溶存・懸濁分配(Sorption/Desorption, Freundlich吸着等温線), ⑤アンモニア態窒素の硝化(Nitrification, 一次関数法), ⑥アンモニア態および硝酸態窒素の有機化(Immobilization, Michaelis Menten法), ⑦アンモニア態窒素の揮発(Volatilization, Reddy and Downward法), ⑧硝酸態窒素の脱窒(Denitrification, 一次関数法), ⑨植物(陸上/地下)によるアンモニア態および硝酸態窒素の吸収(Uptake, 一次関数法, 期間・季節別関数法, Michaelis Menten法)および⑩植物(陸上/地下)による葉の生産と各々の除去または懸濁態有機窒素への回帰(Plant N return, 一次関数法, 作物収奪法など)の現象をモデル化している。流出計算の際には各層の形態別窒素濃度が参照され、それぞれRCHへ接続される。ILSでは、PLSのように詳細な窒素動態を計算しないが、大気沈着に基づく形態別窒素の堆積と表面流出水およびSSのそれぞれに依存する流出量を計算する。RCHでは陸面から流出した形態別窒素を受け取り、上述④, ⑤, ⑦, ⑧に加え河床材料への吸脱着やNH₄⁺とNH₃のイオン平衡などが考慮され、特に懸濁態のアンモニア態窒素はSSの推定結果と連携して流下計算が行われる。なお、本稿の設定ではRCHで有機窒素の動態を計算していないが、さらに高度な設定を行うことによって動植物プランクトンやBODモジュールでの有機窒素計算と窒素モジュールとの連携が可能である。そのほか健康影響物質の一つであり強力な温室効果ガス, オゾン層破壊ガスでもある亜硝酸態窒素の設定も可能である。

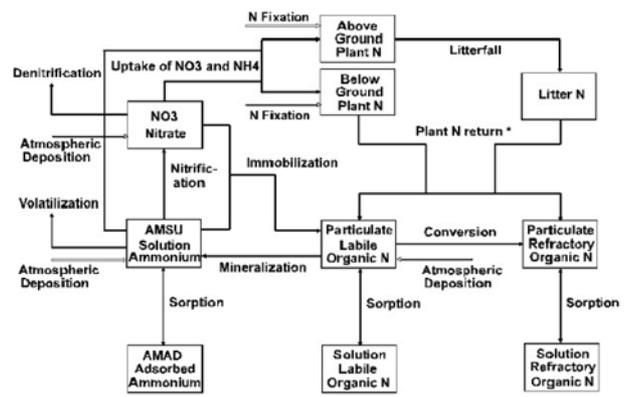


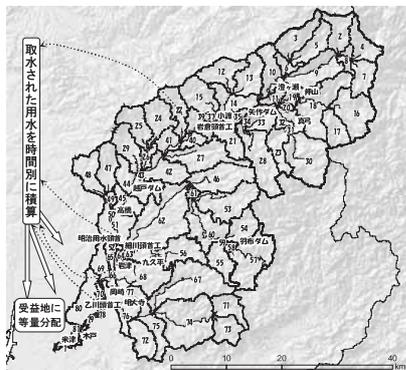
Fig.2: Flow diagram for nitrogen reactions in PLS (by HSPF)³⁾.

3. 矢作川流域への適用と政策シナリオ

矢作川（幹川流路長 118km, 流域面積 1830km², 流域人口約 60 万人）は中部地方に位置する典型的な砂河川であり、上中流域には豊かな自然環境を有するが、明治用水などの水資源開発に伴い下流域一帯には大規模な農業生産基盤が形成されている。また中流には豊田市、下流には岡崎市などがかかえ、工業化、市街化も進んでいるため農業、工業、水道用水を合計すれば最大（渇水年）で矢作川河川水の半分以上を取水利用している⁴⁾。下流の三河湾では水質悪化が進んでおり、水産漁業に悪影響を及ぼしていることもあって対策が急務とされる流域である。本研究では、以上に述べた矢作川流域を対象流域に設定した。

3.1 河川網の設定と流域分割

BASINS4 (GIS ソフト) を利用して河川網を作成するには、基礎データとして①標高（数値地図、国土地理院）を利用し、②河川最上流地点の集水域面積をパラメータ指定する必要がある。②を小さくすれば小河川まで記述できるが、標高データの精度にも依存することやサブ流域数の飛躍的な増加につながることを勘案し適当な値とする必要がある。本研究では②として 5km² を設定して河川網を作成し、合流点を基準として分割されたサブ流域と③土地利用メッシュ (L03_09M, 国土数値情報) とをインターセクト（再区分）して PLS と ILS を定義した。土地利用としては A. 建物用地・幹線交通用地・その他用地 (ILS), B. 水田 (PLS), C. その他農用地 (PLS) D. 森林 (PLS), E. 荒地 (PLS), F. その他 (PLS) に再分類を行っている。結果、PLS が 344 ILS が 74 区画, RCH が 81 区画に分割された (Fig.3)。



* 用水は農業用を指し、流域内受益地は取水総量の約 2 割である。また、図中の数値はサブ流域番号を示す。

Fig.3: Delineated sub-basins and flux networks in Yahagi River Basin.

3.2 計算条件の設定

2004 年（豊水年）を対象に 1 時間単位でのシミュレーションを行った。HSPF の実行には多くのパラメータが必要であるが、物性値や参考値⁵⁾を利用可能な場合はこれを入力し、不明なパラメータは標準的な数値や感度分析などを行うことによって土地利用ごとに一律の値を設定した（但し、地形関連情報を除く）。特に窒素動態の計算においては、物質形態間のバランスが結果に大きく影響するため、同一の周期境界条件で RUN を繰り返し安定値した値を初期値として設定することとした。具体的な設定値は紙面の関係もあって省略する。

3.3 水文気象および負荷量の設定方法

HSPF に必要な時系列データの整備、その取り扱いについて以下に説明する。

(1) 降水量

旧レーダーアメダス解析雨量（気象庁、雨量とあるが実際は降水量）を利用し、時間雨量をテキスト形式へ解凍、サブ流域別の代表雨量に集計、サブ流域別に WDM 形式（高圧縮 File 形式）への導入を順次行った。近年はこの解析雨量が 1km メッシュ、30 分雨量、0.5mm 単位で提供されるなど時空間的な分解能は益々向上している。

(2) 蒸発散量

HSPF では可能蒸発散量を入力データとして要求し、モデル内で実蒸発散量を推計する。従って HSPF の計算結果を用いて蒸発散比が適切になるようにパラメタリゼーションを行うが、水文過程では実測降水量を元に実測流量の再現を目指すため、全体のマスバランスにおける調整弁となることも多い。本研究では一般に利用される penman 式を利用して日可能蒸発散量の推定を行い、WDM 形式への導入を行った後、disaggregate 関数（緯度を入力）で時間蒸発散量に導入して利用した。

(3) その他気象情報

矢作川上流では冬季の積雪が観測されているため本稿では積雪・融雪モジュールを利用している。また、窒素動態計算に用いるモデルには吸着や反応速度定数など温度関数になっているものが多いため、名古屋地方気象台の全天日射量、雲量、露点、気温、風速（いずれも観測値）を WDM 形式に導入して利用した。

(4) ダムの取り扱いと取水・配水量

モデル上のダムの取り扱いとしては、矢作第一ダム（多目的、有効貯水容量：6500 万 m³）および羽布ダム（利水（農水）：有効貯水容量：1850 万 m³）地点で下流との流量接続を行わずに、ダムでの放流量実績値を下流の RCH に入力した。また SS のうち砂成分（φ 2mm）を除く二粒径、形態別窒素および熱フラックスについてはダムの上下流で接続した。一方、枝下、岩倉、明治、細川および乙川頭首工の 5 地点では実績値に応じた取水を行い、流域内外の水田受益地（流域内/流域外 = 3,500ha/17,000ha）へ瞬時に等量配分されることと仮定した (Fig.3)。

(5) 窒素負荷量

大気由来の硝酸態窒素沈着量（乾性、湿性）、アンモニア態窒素沈着量（乾性、湿性）については、これまでの調査事例^{6),7)}を参考にそれぞれ一律 0.005kgN/ha.day とし、年間で合計 7.3kgTN/ha と仮定した。水田域における窒素肥料の投入は通常用いられるアンモニア態窒素として上層に供給し、5 月一杯かけて線形的に 1.67kgN/ha.day まで増加させた後、7 月一杯をかけて線形的に 0 まで減少させた（即ち台形的な施肥量配分で合計 100kgN/ha を投入）。また、今回はその他農用地も水田と同様に取り扱った。

矢作川流域の都市地域には流域下水道が整備されており、河口に設置されている矢作川浄化センターが処理を行って河口に排水している。従って水道取水が最終的に下水道を経由する場合は矢作川への直接的な負荷とはならない。しかしながら名古屋市を除く愛知県の下水道普及率は50%程度(2005年)であり、残りの50%においては未処理の場合も少なくない。そこで本稿では下水道未整備地域からの窒素負荷を以下のように設定した。まず人口分布GIS(統計GISプラザ, 2000年)と下水道普及地域GISデータ(国交省, 2007年)を重ね合わせ、サブ流域別下水道未整備地域人口を算定した。次に浄化槽、コンプラおよび未処理地域全体の平均排水濃度を10mgN/Lと仮定し、一人一日取排水量原単位350Lを乗じた後、さらに上述の下水道未整備地域人口を乗じて‘サブ流域別下水道未整備地域生活由来窒素負荷量’を算定した。これらの値を硝酸態窒素として接続するRCHに入力した。なお、GISの解析によれば当該流域での下水道普及率は人口ベースで36%と低い値となり、本仮定に基づけば年間450tonN程度の大きな負荷量となることが予測された。

3.4 政策シナリオの設定

物質動態に影響を及ぼす政策は現状でも多く実行されており、それらを全て取り込むことは困難である。そこで、本稿では政策シナリオを想定した簡易評価として、以下の3パターンの計算を実施した。

(1) 土地利用転換の効果

急峻地(ほとんどは山地, 谷底平野, 丘陵地など)における水田と畑(傾斜16%以上, 計44km²)を森林に転換した場合(Case A1)と、同地を土地利用転換なしに緩傾斜地に移行した場合(Case A2)のシナリオを設定した。

(2) 下水道普及促進の効果

愛知県の下水道計画⁸⁾による約10年後の普及率20%上昇(現状比)を想定して計算(Case B)を行った。

(3) 森林保全政策の効果

本モデルによる中流域森林の窒素収支によれば、大気供給量の2倍程度の年間流出量となった。窒素飽和を起こしていない森林では、概ね大気供給の0.3倍程度の年間流出量に低減⁹⁾させることを見込むことができるため、これを想定した計算(Case C)を行った。

4. 結果と考察

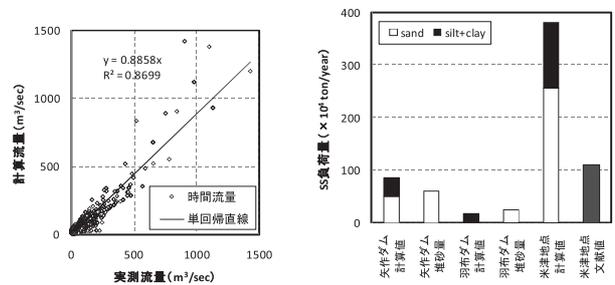
4.1 再現性の評価

矢作ダムにおける時間流量計算値と実測値の比較では良好な再現性を示した(Fig.4左)が、より下流での再現性は誤差の伝播や構造物の影響などで十分とは言い難い結果となった。

SSの年間負荷量については、矢作ダム堆積相当分(sand)の計算値と実際の堆砂量(推定値)が概ね一致

したが、羽布ダムでは1オーダー程度過小評価された(Fig.4右)。堆砂成分の粒径や集水域森林などの管理状況に確認が必要である。他方、最下流地点(米津地点)では、濁度センサで補足されるsilt, clay成分の合計値(=文献値と定義)と計算値のそれとで比較した結果、いずれも100万ton程度となり、良好な再現性を示した。

窒素負荷量の計算値については、中流地点(古巣水辺公園付近)河川水の硝酸態で中央値0.94mgN/L(0.268~7.24mgN/L)、アンモニア態で中央値0.0012mgN/L(0.001~0.541mgN/L)となった。流況が異なるため直接比較は難しいが、白金⁹⁾による2000年4月~2002年3月の実測によれば当該地点の硝酸態窒素で0.3~0.6mgN/L、アンモニア態で0.01~0.06mgN/Lと報告があり、本研究の計算結果がやや過大評価となっていることが推測された。



*1: 左図、流量は矢作ダム地点の値を示し、このうち実測流量はダム観測所による値。
 *2: 右図、矢作ダム堆砂量はダム管理所発表資料より作成した値。
 *3: 右図、羽布ダム堆砂量は堆積層の体積平均密度1.0(水分を除く)とした場合の値。
 *4: 右図、米津地点(最下流地点)の文献値は濁度観測に基づくL-Q式で算定した値。

Fig.4: The relationships between calculated value and observed value.

4.2 土地利用別流出負荷量の評価

Fig.5に異なる二つの土地利用からの流出比流量, SS流出負荷量および窒素流出負荷量の計算結果を示した。水田と森林では浸透性の違いにより流出機構が大きく異なること(特に表面流出と基底流出)が反映し、結果としてSS流出負荷量および窒素負荷量で10倍以上の差異を示した。水田におけるアンモニア態窒素流出割合の大きさは、肥料として投入した窒素が直接的に影響した結果であるが、実際にはさらに硝化が進んだ状態で流出すると考えられるため検証調査が必要である。

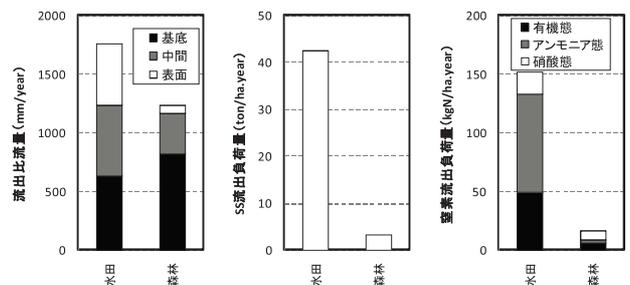


Fig.5: Comparison of discharge volume, SS load and N load in each land use (Paddy field and forest).

4.3 河川縦断方向の動態変化

本モデルは区分された河川ボックスを連結しているため、Fig.6に示すように流程に沿った負荷量変化を出力

することが出来る。流量の増加に比して明らかに SS や硝酸態窒素の増加が著しいが、前者は下流域で水田、農地が増加したことによる影響、後者は流下に伴って硝化がより進んでいることを反映した結果である。一方で、上流でも森林からの窒素流出と下水道未整備地域からの窒素負荷の影響で、ある程度の硝酸態窒素が流下している。河川水中全窒素に占めるアンモニア態窒素は一般に低い割合で存在し、本モデルでも約 10%程度で推移する良好な結果となった。なお、Fig.6 では窒素濃度の推移を示していないが、縦軸の単位を比較すれば図中の流量と硝酸態窒素の交点で 1.0mgN/L となり、それより上流側で <1.0mgN/L、それより下流で >1.0mgN/L となる。

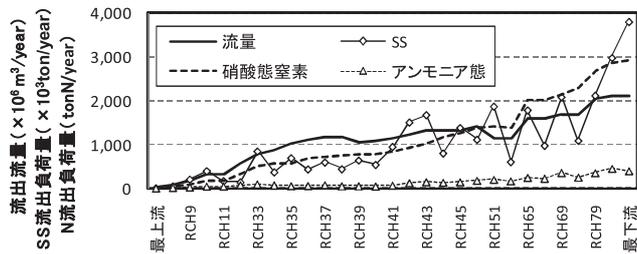


Fig.6: Longitudinal change of SS and N loads from upstream to downstream.

4.4 政策シナリオの定量評価

Case A1~Case C の政策効果についてそれぞれ計算した結果を Fig.7 に示した。結果は最下流地点（米津地点，RCH1）での各負荷量で比較している。

Case A1 では、粒子状物質で約 2.4%（9 万 ton）の削減、全窒素で約 10.6%（330ton）の削減効果が見込める結果となったことから、山地や谷底平野などに位置する農用地（特に耕作放棄地）では森林への転換が比較的有效であると考えられた。

Case A2 では、急峻地の水田・農用地を平野などに配分したことで全ての負荷量が増加した。この結果は、傾斜が緩くなったことで速やかな流出の抑制効果が働き、上下層の貯留槽に水分が留まったことから、降雨時の表面流出成分が増加したことによると考えられる。

Case B では、増加した下水道普及地域からの負荷が河川に入らないことが前提ではあるが、負荷量削減効果としては TN で約 4%の効果が見込めると予測された。

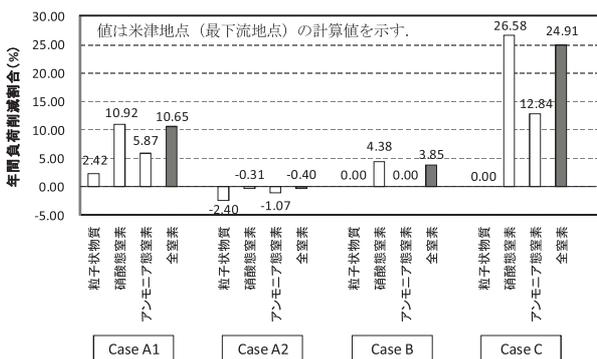


Fig.7: Impact assessment of environmental policies to the sediment load and nitrogen loads in the downstream.

最後に Case C では、流域の約 78%を占める森林からの流出抑制効果であり、適切な森林保全によって流出する窒素成分の大幅な削減（TN で約 25%）を図れるものと予測された。これらの施策についてはコスト評価など実現可能性に関する検討を行っていないが、それらを今後検討していくことでより実効的な施策群設計が可能になると考えている。

5. おわりに

本稿では筆者らが設計したモデルの概要と結果を紹介した。HSPF は、元々水質予測を目指した統合流域モデルであるため、水文・水理プロセスは一部統計手法が導入されているが、物質動態に影響を与える生物化学的反応は概ね適切にモデル化されている。利用可能な情報が少なくても、近年世界的に利用可能な GIS データさえあれば、途上国などでもある程度の精度で水質予測を行うことが可能である。この点でモデルパフォーマンスは必要十分であることが確認された。

本研究の主な成果としては、モデル入力に時空間精度の高いレーダーアメダス解析雨量を用いた（特に上流での適切な降水量を入力した）ことで最上流付近の流量も再現可能になったこと、政策を定量的に評価するための土台としてプロセスベースに近い水文水質モデルを設計したこと、仮想的な政策シナリオに基づく物質負荷への影響が定量評価されたことである。本稿では一連の評価が可能プラットフォームの構築を優先していたため、詳細な部分での再現性の検証は今後早急の課題であり、常時観測施設の設置などより効果的な環境計測が望まれる。また、これらの成果を基礎として今後はリン、有機物、プランクトンの動態評価を導入、将来動向や政策効果を定量評価、途上国への展開などを目指していきたい。

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」の助成を受けて遂行されました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：発生源別・汚濁負荷量等の推移，総量規制専門委員会資料，<http://www.env.go.jp/council/09water/y097-03/mat05.pdf>, (1997)
- 2) EPA, BASINS HP, URL: <http://www.epa.gov/waterscience/BASINS/>
- 3) Bicknell, B. R., *et al.* Hydrological Simulation Program-Fortran User's Manual for Ver. 12, AQUA TERRA Consul. and U.S. EPA, 845p(2001).
- 4) Keisuke, Sato, *et al.* Modelling of River Flow and Sediment Flux based on the Hydrological Behavior model in Yahagi River Basin, *Advances in Hydro-Science and Engineering*, pp.595-604(2008).
- 5) 稲垣善之, 山田毅: 成熟したスギとヒノキの人工林における無機窒素化および硝化特性, *日林誌*, Vol.84, No.3, pp.159-165(2002).
- 6) 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).
- 7) 小川滋: 森林地からの水・土・栄養塩の流出, *応用生態学*, Vol.8, No.1, pp.51-59(2005).
- 8) 愛知県: あいち下水道整備中長期計画改訂版(Aqua Dream Plan II), 第五章, pp.(5)-1-(5)-31(2007).
- 9) 白金晶子: 矢作川中流域の水質 II 一水質の長期変動と他河川との比較一, *矢作川研究*, No.8, pp.219-228(2004).