

琵琶湖流域管理システムに関する政策課題研究（その1）

－面源負荷流出モデルの構築と湖内水質への影響評価－

佐藤祐一・大久保卓也・小松英司¹⁾・上原 浩²⁾・湯浅岳史²⁾・永禮英明³⁾・岡本高弘・金 再壺

要約

「琵琶湖流域水物質循環モデル」の面源からの負荷に関するパラメータの精度を向上させるため、琵琶湖流域における特定の水田・市街地・森林を対象として、降雨時を含む詳細な調査データを用いたモデルのキャリブレーションを行った。その結果、各面源からの負荷流出機構を一定再現ができる各種パラメータ値を明らかにすることができた。またこのパラメータ値を用いて、琵琶湖流域水物質循環モデルにより面源負荷の湖内水質への影響評価を行い、農地由来負荷や市街地由来負荷が湖内水質に与える影響を定量的に明らかにした。

1. はじめに

本研究は、政策課題研究1「琵琶湖流域管理システムに関する政策課題研究」の一環として、琵琶湖とその流域の水物質循環を再現するモデルを構築し、今後の水質保全対策の方向性などを検討することで、琵琶湖の流域管理のあり方の提案につなげるために実施されたものである。

全国の河川や閉鎖性水域の水質を保全・回復していくためには、流域環境の全容を把握し、対策の展開に伴う地域ごとの水量・水質の変化を精度よく予測し、効果的・効率的な対策に注力していくことが必要である。

一般に流域は森林や市街地、農地など多様な土地利用で構成される。それぞれの土地利用からの水・物質の流出機構は異なり、また晴天時と降雨時でも大きく異なる。原単位法やタンクモデルといった現象を簡略に、あるいは概念的に捉えるモデルは、およその経年変化の把握や簡便な予測には効果的であり、データの少ない地域への適用性には優れる。しかし、水質汚濁メカニズムの現象解明や今後の多様な施策展開に伴う予測などのためには、森林、市街地、農地等個別の土地利用を対象として開発されてきた各要素モデルを連成させ、さらに地下水や河川を通じた流下過程についても考慮し、流域全体の水・物質の挙動を解析することが必要である。

筆者らはこれまで、琵琶湖の陸域・湖内流動・湖内生態系に関するモデルを結合し、気象や社会条件等を考慮して非定常な解析が可能な分布型水文水質シミュレーションモデル「琵琶湖流域水物質循環モデル」を構築してきた(佐藤ら、2009)。このうち陸域水物質循環モデル(図1)については、野洲川や白鳥川といった様々な土地利用が混在

する流域スケールでの水物質循環の再現に取り組み、一定の再現性が得られたところであるが(佐藤ら、2009)、一方で膨大なパラメータをどのように合わせ、モデルの信頼性を向上させるかについては課題が残されていた。

そこで本研究では、単一の土地利用よりなる面源スケールに焦点を当て、降雨時を含む詳細な調査結果をもとに水田・市街地・森林に関するパラメータ値を明らかにすることを目的とする。中間報告(佐藤ら、2011)からは特に、水田と市街地に関して対象地域・調査を拡大し、パラメータの見直しを行う。またここで設定されたパラメータ値を用いて、面源負荷が湖内水質に与える影響についても解析する。

2. 水田モデル

2.1 モデルの概要

2.1.1 水の挙動

本モデルでは対象とする水田あるいは水田群について、その面積に対応した欠口のある水田タンクを想定し、タンク内の水と物質の収支を記述する。水収支については以下のように表す(図2)。

$$\frac{d(A_{pad} \cdot h_t)}{dt} = R_t + Irr_t - (E_t + I_t) - Q_{pad,t} \quad (1)$$

ここで、 A_{pad} : 水田タンク面積 (m^2)、 h_t : 水田タンク内の水位 (m)、 R_t : 降水量(m^3/s)、 Irr_t : 灌漑用水量(m^3/s)、 E_t : 水田での蒸発散量(m^3/s)、 I_t : 水田での地下浸透量(m^3/s)、 $Q_{pad,t}$: 水田タンクからの流出量(m^3/s)である。降

1) 株式会社環境情報コミュニケーションズ、2) パシフィックコンサルタンツ株式会社、3) 岡山大学大学院環境学研究所

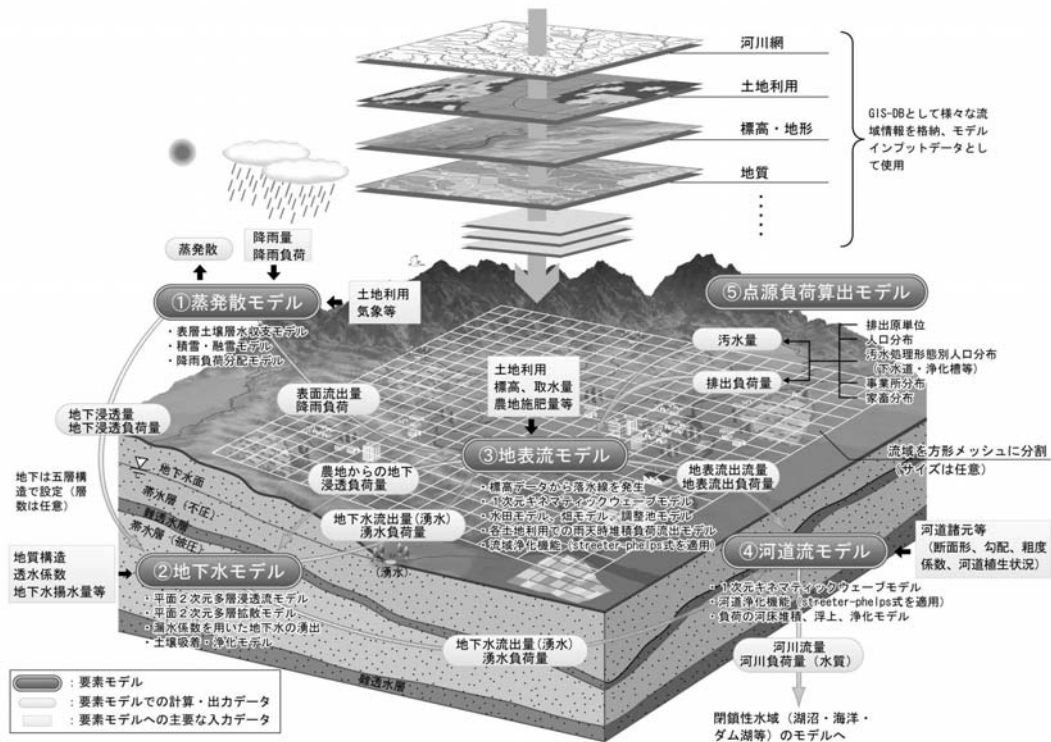


図1 陸域水物質循環モデルの全体像

水量、用水量の設定については実測値を、蒸発散量と地下浸透量については、蒸発散モデル（湯浅ら、2006）での算出値を用いる。

水田からの流出量の計算には、セキの公式を用いる（図3）。この方法は、水田に降った雨は一時田面に貯留された後、水田の欠口部から流出するとして提案されたものである¹¹⁾。欠口からの流出量を広頂堰として本間公式を用い、以下のように表す。

完全越流の場合 $(\frac{2}{3}h_1 \geq h_2)$:

$$Q_{pad} = 0.35 \cdot B \cdot h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (2)$$

潜り堰の場合 $(\frac{2}{3}h_1 < h_2)$:

$$Q_{pad} = 0.91 \cdot B \cdot h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

ここで、 h_1 : 水田タンク内水位のうち水田高さを上回る分 (m)、 h_2 : 流出後の水位のうち水田高さを上回る分 (m)、 B : 欠口幅、 g : 重力加速度である。

水田では一般に栽培期ごとに水管理の方法が異なる。例えば田植後は深水管理のため流出防止に努め、中干し期には水を落として土壌を乾燥させ、中干し後は間断灌漑するなど、湛水と落水が繰り返される。このような栽培スケジュールによる水管理の違いを考慮するため、欠口高さを

栽培期により可変のパラメータとする。

2.1.2 物質の挙動

(1) 灌漑期

灌漑期における水田内の物質収支として、降水、用水、肥料からの溶脱（田淵ら、1985）による負荷と、地下浸透・欠口流出による負荷流出、脱窒（田淵ら、1987）、作物吸収による負荷の削減を考慮して（図4）、以下のように表す。

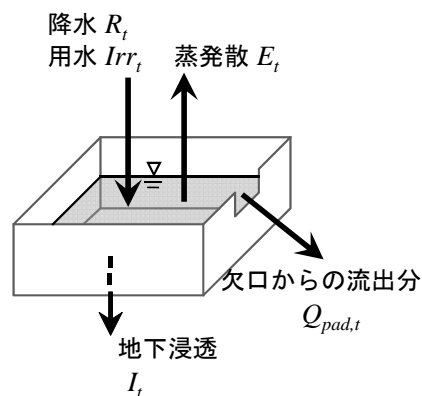


図2 水田における水循環の概念図

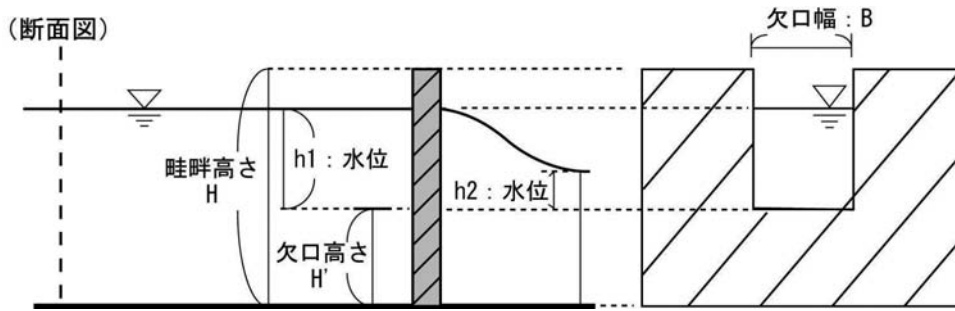


図3 欠口流出法による計算

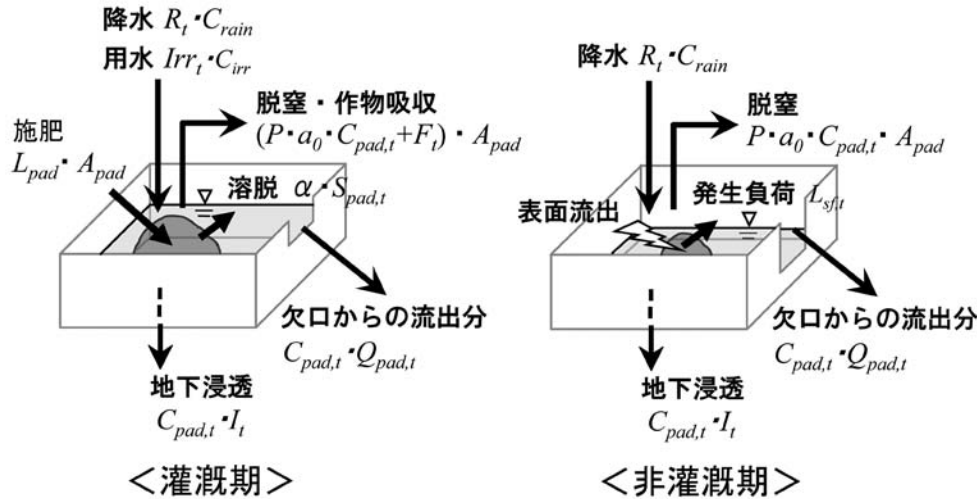


図4 水田における物質循環の概念図

$$\frac{d(A_{pad} \cdot h_t \cdot C_{pad,t})}{dt} = R_t \cdot A_{pad} \cdot C_{rain} + Irr_t \cdot C_{irr} + \alpha \cdot S_{pad,t} - C_{pad,t} (I_t \cdot A_{pad} + Q_{pad,t}) - P \cdot a_0 \cdot C_{pad,t} \cdot A_{pad} - F_t \cdot A_{pad} \quad (4)$$

$$\frac{dS_{pad,t}}{dt} = L_{pad} \cdot A_{pad} - \alpha S_{pad,t} \quad (5)$$

$$a_0 = (aT_w^2 + b) / 86400 \quad (\text{窒素の場合}) \quad (6)$$

ここで、 $C_{pad,t}$: 水田レイヤー水質濃度 (g/m^3)、 C_{rain} : 降水水質 (g/m^3)、 C_{irr} : 用水水質 (g/m^3)、 α : 溶脱率 (1/s)、 $S_{pad,t}$: 残存施肥量 (g)、 P : 田面効率 (0~1)、 a_0 : 除去速度 (m/s)、 F_t : 作物吸収量原単位 ($\text{g}/\text{s}/\text{ha}$)、 L_{pad} : 施肥量 ($\text{g}/\text{s}/\text{ha}$)、 T_w : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 $a \cdot b$: パラメータ ($a=0.000011$ 、 $b=0.005$) である。

水管理と同様、施肥についても地域や品種により時期や量、方法が変わる。これらのことを考慮するため、対象水田(群)における施肥スケジュール等を把握し、施肥を行った日に式(5)により施肥量を投入するものとする。

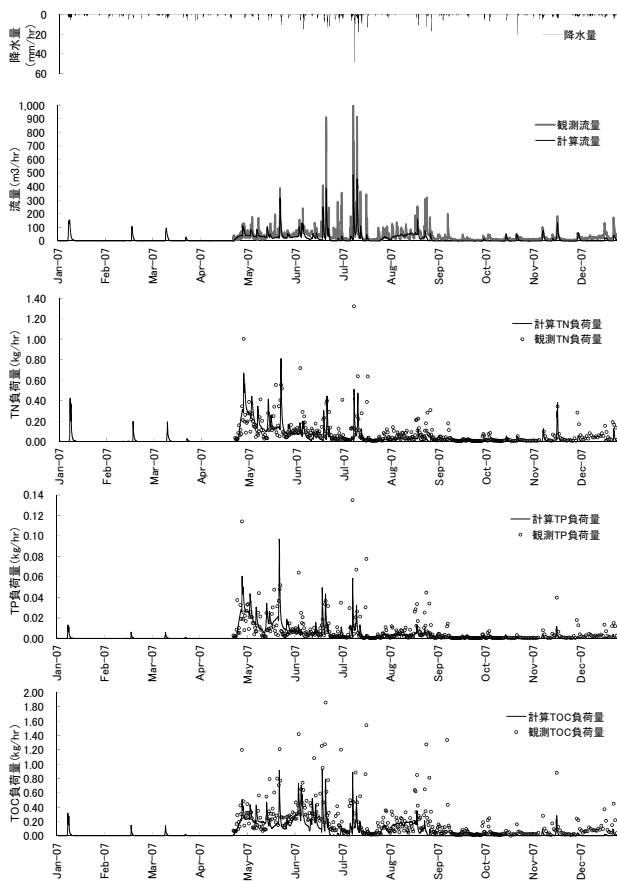
(2) 非灌漑期

非灌漑期における水田内の物質収支として、降水、残存施肥から発生する負荷と、地下浸透・欠口流出による負荷流出、脱窒(田淵ら、1987)による負荷の削減を考慮して(図4)、以下のように表す。

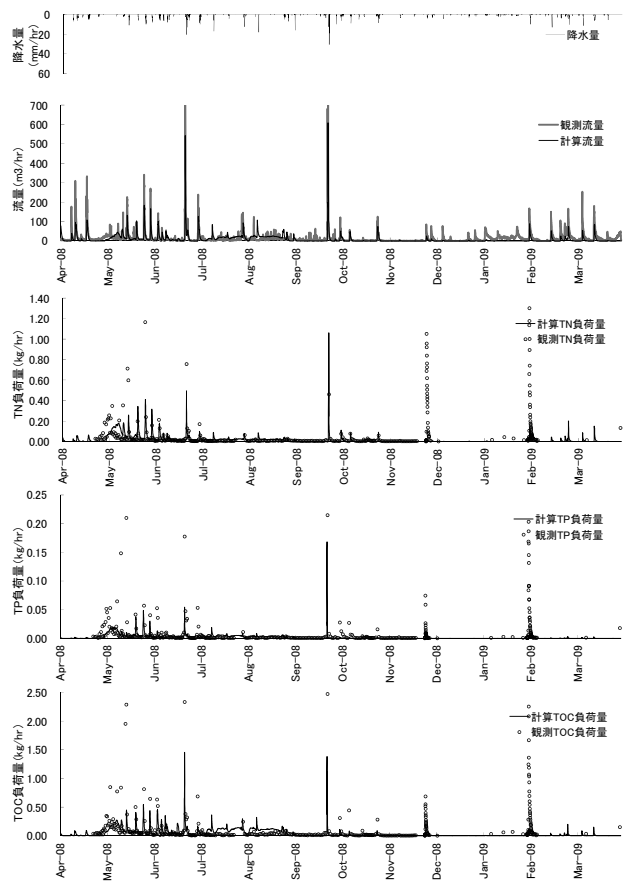
$$\frac{d(A_{pad} \cdot h_t \cdot C_{pad,t})}{dt} = R_t \cdot C_{rain} + L_{sf,t} - C_{pad,t} (I_t + Q_{pad,t}) - P \cdot a_0 \cdot C_{pad,t} \cdot A_{pad} \quad (7)$$

ここで、 $L_{sf,t}$: 残存施肥から発生(流出)する負荷 (g/s) である。

残存施肥から発生(流出)する負荷は、灌漑期終了時に残存した施肥を地表面における堆積負荷とみなして表面流出に起因して発生するものであり、後述の市街地における雨天時流出負荷量算定モデルにより算出する。



長浜市永久寺町



守山市赤野井町

図5 水田における流量と負荷量の再現計算結果

2.2 検証結果と考察

滋賀県長浜市永久寺町の水田群（水田面積 11.8ha）と守山市赤野井町の水田群（水田面積 5.6ha）を対象として上記モデルを適用した。排水路の末端では自動採水機により概ね1日に1回（代かき期には1日に2回）の採水を行い、流量は水位計により10分に1回測定し、排水水質・負荷量の調査を行った（大久保、2010）。水管理や施肥のスケジュールは対象地域で一般的に行われるものを元に設定した。用水量は排水ポンプ場における実績値を水田の水循環を考慮して補正したもの、水質は自動採水機により概ね1日から数日に1回の採水を行った結果（大久保、2010）を元に設定した。施肥量、溶脱率等のパラメータについては、田淵ら（1985）、大久保（2005）を参考に初期値を設定し、計算負荷量が観測負荷量に適合するよう調整した。なお琵琶湖流域全体における平均的なパラメータを探るため、両地点とも共通のパラメータ値を設定した。

長浜市については2007年1月1日から12月31日、守山市については2008年4月1日から2009年3月31日の再現計算を行った結果を図5に示す。両地点とも、流量に

ついては概ね観測値を再現することができたが、負荷量については特に守山市の方で降雨時における実測値との乖離が見られる。まず、11月末と2月上旬における負荷量の急増は、畑地に転作するために施肥を行ったためであるが、そのような影響は現在のモデルでは考慮していない。また長浜市に比べ面積が小さく、個々の水田の施肥のタイミングや水管理などに影響を受けた可能性が考えられる。しかしそうした点を除けば、対象地域における栽培スケジュールに応じた負荷量変化の傾向は再現することができた。

長浜市、守山市ともにTN、TPでは代かき・田植え期における負荷流出が顕著に表れ、5月1日から15日にかけての流量はそれぞれ年間の12.2%、11.8%であるにもかかわらず、負荷量で見るとTNで31.0%、29.4%、TPで29.2%、26.4%を占めることが分かった。

上記モデルで調整されたパラメータを表1に示す。畦畔高さや欠口幅、欠口高さについては、対象水田における一般的な値を初期値として、流量の再現性が高くなるように設定した。畦畔高さがやや低い値となっているが、これ

表 1 水田モデルのパラメーター一覧

水田諸元の設定

項目	単位	値	備考
畦畔高さ	m	0.06	
欠口幅	%	1	欠口幅(m)/水田幅(m)
欠口高さ	m	0.02	灌漑期(代かき・田植え期)
	m	0.01	灌漑期(それ以外)
	m	0	非灌漑期

施肥量等の設定

項目	単位	値	備考	
有機物由来負荷	kg/ha	18	4月下旬と6月上旬に施肥量として設定	
施肥量	窒素	kg/ha	70	4月下旬に施用
	リン	kg/ha	10	4月下旬に施用
作物吸収量	窒素	kg/ha/日	0~1	栽培スケジュールごとに設定
	リン	kg/ha/日	0~0.18	栽培スケジュールごとに設定
溶脱率	有機物	1/日	0.04	
	窒素	1/日	0.03	
	リン	1/日	0.03	
除去速度係数a		0.000011	TNのみ	
〃 b		0.005	TNのみ	

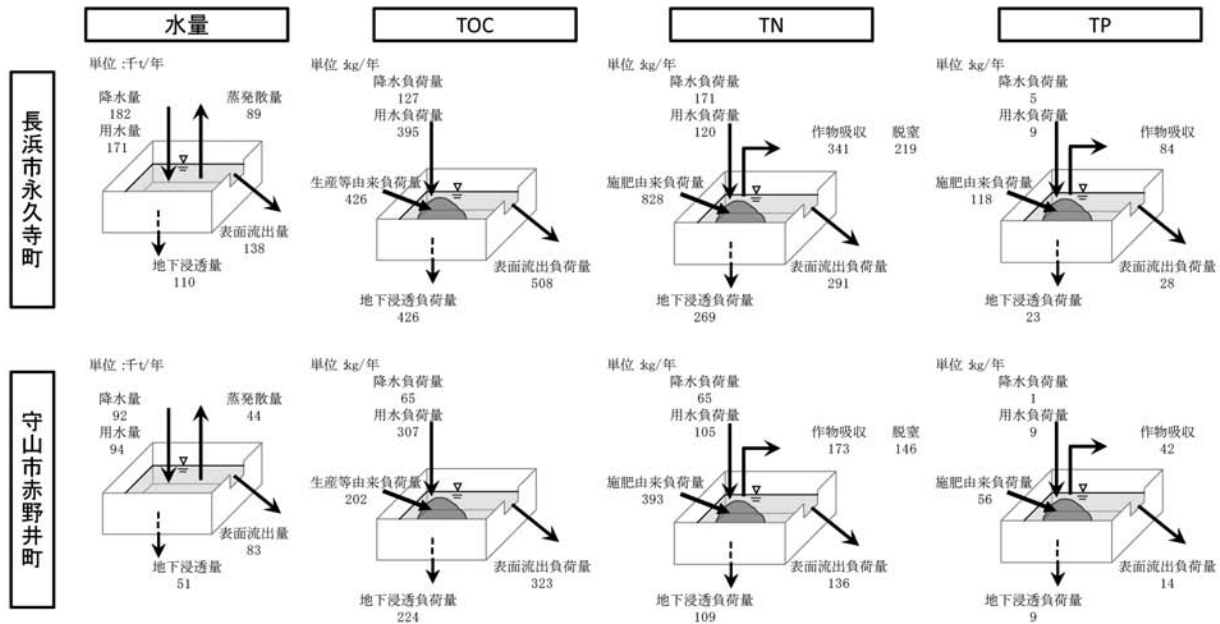


図 6 水物質収支の結果

を高くするとピーク流量が低めに出るため、対象水田では畦畔高さがある一定以上になると水田から水が流出しやすくなる機構の存在する可能性がある。施肥量など負荷量関係のパラメータについて、窒素の除去速度係数は実験に基づく文献値(田淵ら、1987)を採用したが、その他は負荷の流出機構が再現されるように調整している。

計算された年間の水物質収支の結果を図6に示す。長浜市、守山市ともに琵琶湖の逆水による灌漑を行っているため、守山市の方が相対的に単位面積あたりの用水負荷量が大きく、その影響を受けやすいことが分かる。一方で濃度

が高くなるほどTNでは脱窒効果が現れやすくなるので、排出負荷量はやや少なくなる。またTN、TPともに排出型(排出負荷量-降水・用水負荷量が正となる)となり、特にTPでは排出負荷量が施肥量の影響を強く受けているため、施肥量の削減や用水の管理(水を無駄に排水しないようにするなど)により大きな負荷削減効果が期待される。

3. 市街地モデル

3.1 モデルの概要

3.1.1 水の挙動

市街地や後述する森林における水の挙動については、1次元キネマティックウェーブ法を用いて解析する。

$$\text{連続式: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (8)$$

$$\text{Manning の平均流速式: } \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ここで、 A : 流水断面積 (m^2)、 Q : 流量 (m^3/s)、 q_L : メッシュへの流入流量(降雨量、隣接メッシュからの流入量、汚水量、湧水量等) (m^3/s)、 n : 粗度係数(土地利用の面積で重み付けした合成粗度)、 R : 径深 (m)、 I : 地表面勾配である。

3.1.2 物質の挙動

市街地の地表面から降水時に発生する負荷を、無降水時の負荷の堆積や降水時の負荷発生を考慮した雨天時流出

負荷量算定モデルを用いて算出する。このモデルは次式により表現される。

$$L_{s,t} = k \cdot S_t^m \cdot (Q_{s,t} - Q_c) Q_{s,t}^n + C_{rain} \cdot Q_{s,t} \quad (10)$$

$$dS_t / dt = \begin{cases} \Delta S & (\text{晴天時}) \\ -L_{s,t} & (\text{降雨時}) \\ 0 & (S_t \geq S_{max}) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $L_{s,t}$: 地表面流出負荷量、 $Q_{s,t}$: 地表面流出水量、 Q_c : 掃流限界流量、 C_{rain} : 降水水質、 S_t : 地表面堆積負荷量、 ΔS : 晴天時負荷堆積速度、 S_{max} : 最大堆積負荷量、 $k \cdot m \cdot n$: パラメータである。

堆積負荷量と流出負荷量の関係図を図7に、雨天時流出負荷量算定モデルの概要を図8に示す。降雨時に表面流出 $Q_{s,t}$ が生じ、限界流量 Q_c を超えると、その時の堆積負荷量 S_t に応じた負荷が発生し、流出する。負荷が流出することにより堆積負荷量 S_t は減少する。降雨中はこの過程が繰り返される。

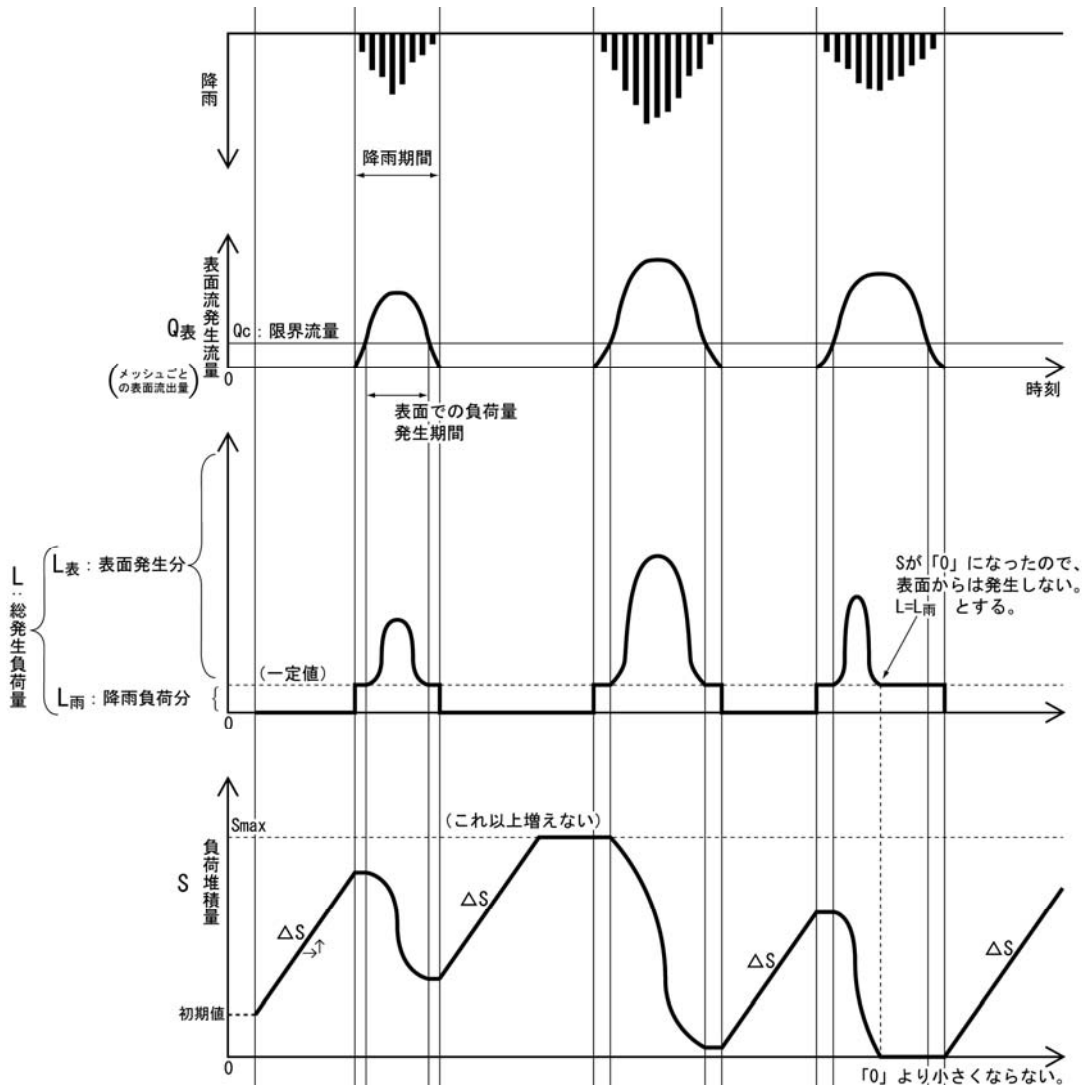


図7 堆積負荷量と発生負荷量の変化

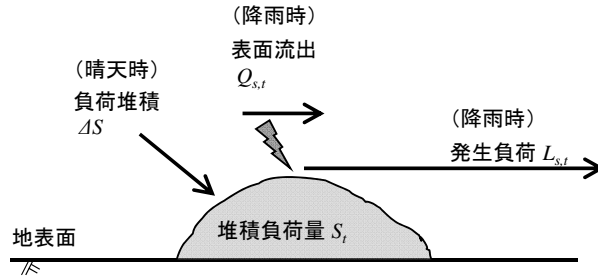


図8 雨天時流出負荷算定モデルの概念図

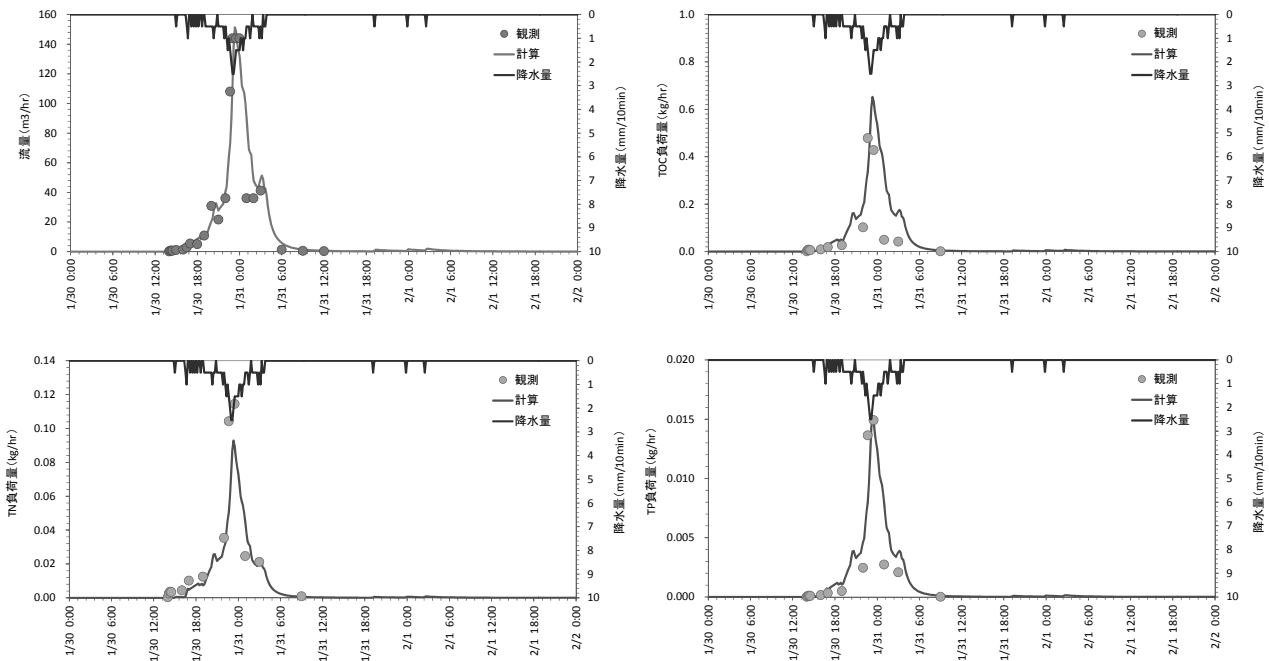


図9 市街地における流量と負荷量の再現計算結果例（大津市音羽台）

無降雨時には、 ΔS により堆積負荷量 S_t が回復する。無降雨が継続し、最大堆積負荷量 S_{max} に達すると、それ以上堆積負荷量は増加しない。

3.2 検証結果と考察

滋賀県大津市音羽台（1.4ha）と草津市商業地区（49ha）を対象として上記モデルを適用した。大津市は宅地や集合住宅よりなる典型的な市街地であり、農地や森林など他の土地利用は含まれない。草津市は住宅や集合住宅の他、商業施設や駅舎などが含まれる。

両地区ともに、同じ降雨イベントを対象として降雨時調査を実施した。降雨イベントは2008年～2009年間の5回である。大津市についてはバケツにより流量観測を行い、草津市については推移と流速から流量を計算した。またECや濁度などの現場測定結果から、水質の変化が激しいときに密に、そうでないときに疎になるように、概ね1

降雨イベントにつき10～15程度の分析サンプルを選定した。地域特性が異なるため、パラメータは各地域について固有の値を設定したが、全期間において同一であるとした。

再現計算を行った結果の例を図9と図10に示す（2009年1月末～2月上旬の降雨）。図示した降雨イベントについては、流量、負荷量ともに降雨に応じた流出の挙動を精度よく再現することができた。また全降雨イベントについて、降雨イベントごとの合計流量と負荷量の観測値とモデルによる計算値を比較した（図11）。なお負荷量の観測値については、各地域における観測値からL-Q式を作成し、それにより推定している。概ね観測値と計算値の傾向は一致するが、草津市では計算値が観測値よりも大きくなる傾向が見られた。これは設定している流域面積が実際よりも大きいためであると考えられる。具体的には、対象地域が49haであったとすると、例えば2009年1月末～2月上旬の降雨イベント時には合計23,765m³が流入したことにな

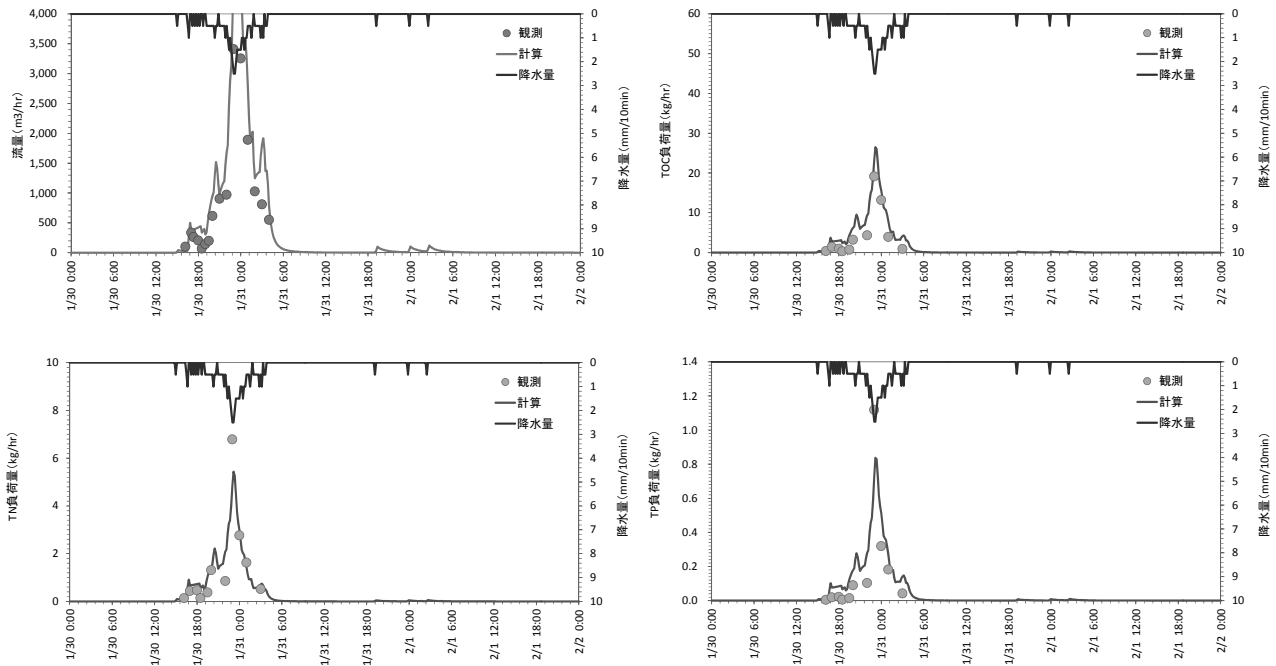


図 10 市街地における流量と負荷量の再現計算結果例（草津市商業地区）

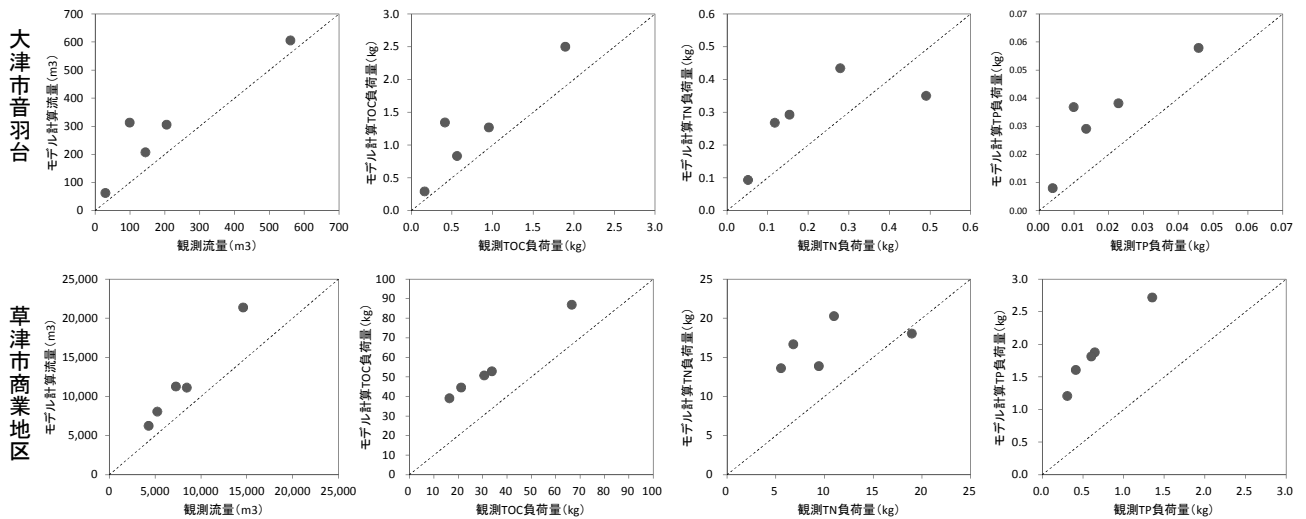


図 11 全降雨イベントの流量と負荷量の観測値と計算値の比較

るが、排水路で観測された流出量は合計 14,593m³であり、流出率が 61.4%となる。これは一般的な市街地としてはやや小さい値であり、対象地域の面積が想定より小さいことが予想される。当該地区の排水路は暗渠が多く、行政の排水計画図より面積を推定したものであるが、今後は詳細な現地調査を行うことにより面積を確定していくことが必要である。またこのため、流出負荷量の結果も特に降雨由来の負荷で誤差があると考えられ、TOC や TP では概ね傾向が再現できた一方、TN で計算値にばらつきが見られたのは、降雨由来の TN 負荷量の占める割合が TN で大きい

ためと考えられる。

本計算で設定したパラメータ値を表 2 に示す。パラメータ k は定義上対象地域の面積に依存するため、大津市と草津市で異なってくる。一方 S_{max} と ΔS については単位面積あたりのパラメータであるため、地域間の比較が可能である。TOC は大津市が、TN は草津市がやや大きいパラメータとなっているが、顕著な差ではなく、地域差の範囲であると考えられる。前述の対象地域の集水域面積の問題や、他の降雨時における再現を行うことで、これらのパラメータの精度を向上していくことが必要である。

表 2 市街地モデルのパラメーター一覧

パラメータ	水質項目	大津市	草津市
k	TOC	0.001	0.000075
	T-N	0.002	0.0001
	T-P	0.001	0.00005
m	TOC	1	1
	T-N	1	1
	T-P	1	1
n	TOC	0	0
	T-N	0	0
	T-P	0	0
Smax (g/m ²)	TOC	0.345	0.225
	T-N	0.03	0.045
	T-P	0.00975	0.00975
ΔS (g/m ² ・day)	TOC	0.023	0.015
	T-N	0.002	0.003
	T-P	0.00065	0.00065
qc (m ³ /s)	TOC	0	0
	T-N	0	0
	T-P	0	0

4. 森林モデル

4.1 モデルの概要

森林における水や物質の挙動に影響する因子としては、樹幹や土壌、蒸発散、植物による吸収、地下水の流れ、溪流流下過程による変化など、多様なものが考えられる。これらの全てをモデルで再現することは、森林における水や物質の循環の科学的な解明を目的とする場合には重要であるが、本研究のように最終的に琵琶湖の水質に与える影響や対策効果の予測を目的とする場合には、まずは市街地や農地など他の土地利用との違いが明確に現れるモデル化を行うことで、大局的な水や物質の循環は再現することが可能となる。

特に溪流だけではなく、大きな流域スケールでの再現を目指すのであれば、地下水とのインタラクションを考慮す

ることが必要となるが、森林生態系のプロセスモデルとして著名な PnET-CN モデル (Aber, 1997) などにおいても地下水の挙動を考慮した河川水の予測には課題が残されている段階である (大手, 2006)。

そこで本研究では、地下水の挙動とそのインタラクション、また河道における水質変化を考慮したモデル化を行い、これを森林流域に適用した。

4.1.1 水の挙動

土壌層の飽和側方浸透流と山体地層の地下水流動は、平面 2 次元多層浸透流により解析する。

第 1 層 (不圧帯水層) :

$$S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = T_{1x} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + T_{1y} \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} + q_p - q_2 - Q_1 - q_{sp} \quad (12)$$

第 2 層 (難透水層) :

$$q_2 = K_2 \times D_2 \times A \times (h_1 - h_3) \quad (13)$$

第 3 層 (被圧帯水層) :

$$S_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = T_{3x} \frac{\partial^2 h_3}{\partial x^2} + T_{3y} \frac{\partial^2 h_3}{\partial y^2} + q_2 - Q_3 \quad (14)$$

ここで、 $T_{1x, y}$: 第 1 層の透水量係数 (= $K_1 \times D_1$)、 S_1 : 第 1 層の有効間隙率、 $T_{3x, y}$: 第 3 層の透水量係数 (= $K_3 \times D_3$)、 S_3 : 第 3 層の貯留係数、 D_1 : 第 1 層の層厚、 h_i : 各層の水頭、 D_2 : 第 2 層の層厚、 q_p : 降水からの涵養量 (地下浸透量)、 D_3 : 第 3 層の層厚、 q_2 : 難透水層を通過する漏水量、 K_1 : 第 1 層の透水係数、 q_{sp} : 第 1 層から地表面への湧水量、 K_2 : 第 2 層の透水係数 (漏水係数)、 A : メッシュ面積、 K_3 : 第 3 層の透水係数、 Q_1 : 井戸揚水量 (第 1 層からの揚水)、 Q_3 : 井戸揚水量 (第 3 層からの揚水) である。

また地表流や河道流については前述の 1 次元キネマティックウェーブ法を用いた。

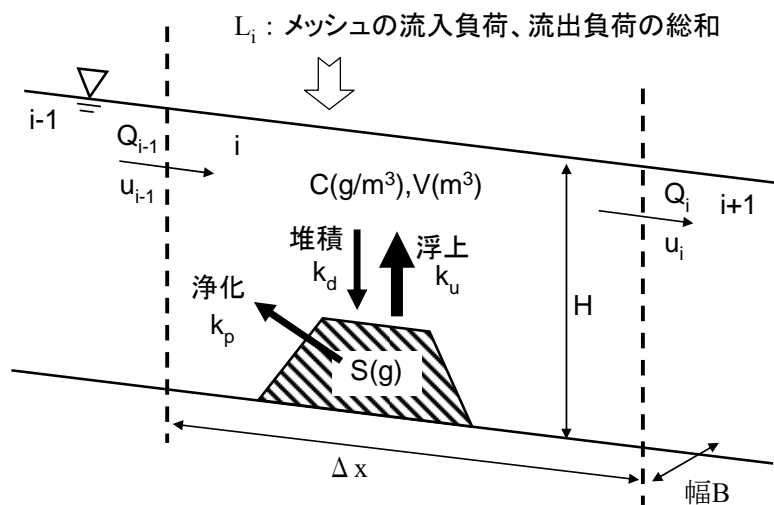


図 12 河道における物質の挙動

表3 地下水モデルのパラメータ一覧

表層地質	透水係数:m/s		漏水係数:m/s		有効間隙率	貯留係数
	第1層(第1帯水層)	第3層(第2帯水層)	第1層(地面への湧出)	第2層(難透水層での漏水)		
1 砂礫・粘土	1.00E-05	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.2	0.01
2 火山灰・ローム	1.00E-05	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.2	0.01
3 砂丘砂	1.00E-05	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.3	0.01
4 溶結凝灰岩	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.2	0.01
5 洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	1.00E-05	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.2	0.01
6 砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)	5.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
7 砂岩・泥岩・礫岩など	5.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
8 砂岩・頁岩・礫岩など	5.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
9 石灰岩	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
10 粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
11 流紋岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
12 安山岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
13 玄武岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
14 花崗岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
15 斑れい岩・輝緑岩	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
16 蛇紋岩・橄欖岩	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
17 結晶片岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01
18 片麻岩類	1.00E-06	1.00E-08	1.50E-04	1.00E-08	0.15	0.01

4.1.2 物質の挙動

地下水水質は、平面2次元移流拡散方程式により計算を行う。土壌内での水質変化として、土壌吸着の項を方程式中に加えている。地下水に含まれる物質が土壌粒子に吸着される場合には、地下水濃度と土壌表面に吸着されている物質濃度との間に吸着等温式が成立する。

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \tag{15}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + L_m - L_{sp}$$

$$R_d = 1 + \frac{(1-n)\rho_s}{\theta} k_d \tag{16}$$

ここで、 C ：物質濃度、 u 、 v ：地下水流速、 R_d ：吸着係数(遅れ係数)、 L_m ：地表面からの供給負荷量(農地および降雨からの負荷)、 L_{sp} ：湧水による地表面への湧出負荷、 n ：土壌間隙率、 ρ_s ：土壌の真密度、 θ ：体積含水率、 k_d ：分配係数である。

河道における物質の流達は、流域(地表流)で計算された河道への流入負荷と河道に直接湧出する湧水の負荷を入力条件として、1次元移流方程式により計算する。さらに、晴天時には沈降・堆積が卓越して河床に負荷が堆積し、降雨時にはそれが掃流されて河川水に回帰する機構を再現するために、河床の堆積負荷 S の収支を考慮した河床堆積負荷モデルとする(図12)。なお、晴天時と降雨時の判断には、流速の増加割合を用いる。

晴天時：

$$\frac{\partial V \cdot C}{\partial t} + u \frac{\partial V \cdot C}{\partial x} = L_i - k_d C \cdot V \tag{17}$$

$$\frac{dS}{dt} = k_d C \cdot V - k_p S \tag{18}$$

表4 河床堆積負荷モデルのパラメータ一覧

項目	水質項目	値
再浮上係数	COD[day/m2]	1
	T-N[day/m2]	1
	T-P[day/m2]	4
沈降係数	COD[d]	0.5
	T-N[d]	0.5
	T-P[d]	1.5
浄化係数	COD[d]	0.1
	T-N[d]	0.08
	T-P[d]	0.02
n値	COD	2
	T-N	2
	T-P	2
浮上開始判断係数		1.1
浮上終了判断係数		1.1

降雨時(堆積負荷の浮上開始時~浮上終了時)：

浮上開始の判断： $u_i/u_{i-1} \geq a$ となったとき(このときの u を u^* とする)

浮上終了の判断： $u_i/u^* \leq b$ となったとき

$$\frac{\partial V \cdot C}{\partial t} + u \frac{\partial V \cdot C}{\partial x} = L_i + k_u S \cdot u^n - k_d C \cdot V \tag{19}$$

$$\frac{dS}{dt} = k_d C \cdot V - k_p S - k_u S \cdot u^n \tag{20}$$

ここに、 S ：河床堆積負荷(g)、 V ：河道メッシュの貯水容量(m^3)、 C ：河道メッシュの水質濃度(g/m^3)、 u ：流速(m/s)、 L_i ：外部流入負荷(隣接メッシュからの流入負荷、湧水負荷、点源負荷等)(g/s)、 k_u ：再浮上係数(s/m^2)、 k_d ：沈降係数(1/d)、 k_p ：自然浄化係数(1/d)、 n ：係数、 a 、 b ：係数である。

4.2 検証結果と考察

安曇川中流にあたる村井地点(流域面積169.2km²)を対象として上記モデルを適用した。流域の土地利用は森林が98%で残りが市街地や水田であるため(大久保ら、2009)、

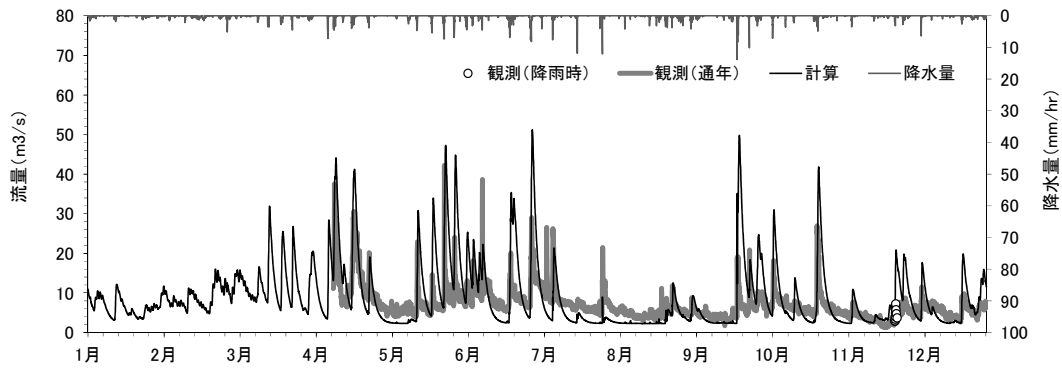


図 13 安曇川における流量の再現計算結果

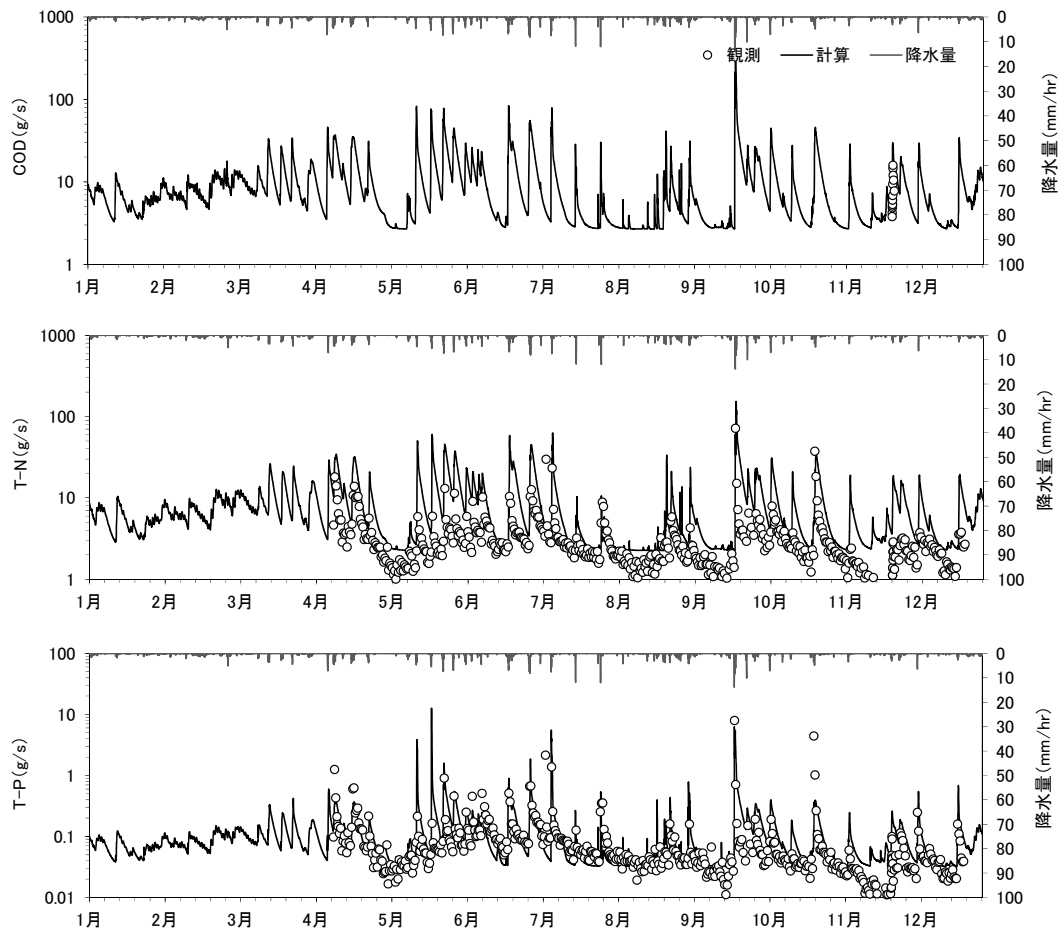


図 14 安曇川における負荷量の再現計算結果

河川水はほとんどが森林由来のものであるといえる(なお計算上は、市街地や水田からの負荷も考慮して再現計算を行った)。観測は2008年4月から12月にかけて、水位計とH-Q式による流量の自動観測と、自動採水機を用いて概ね1日に2回の採水を行い、TN・TPの分析を行った(大久保、2010)。

流量の再現計算を行った結果を図13に、地下水モデル

に関するパラメータを表3に示す。降雨時のピーク流量をやや過大に算出する時期もあるが、概ね全体的な傾向は再現できているといえる。またCOD・TN・TPの負荷量の再現計算を行った結果を図14(CODの観測値は環境省の降雨時調査によるもの)に、河床堆積負荷モデルに関するパラメータを表4に示す。TNでは全体的にやや高めの前測をする傾向にはあるものの、降水時を含めた年間の負荷流出が

モデルで忠実に再現され、上記で構築したモデルの妥当性が確認されるとともに、詳細な河川負荷量調査がモデルの検証に有効であることが理解される。

5. 面源負荷の湖内水質への影響評価

5.1 琵琶湖流域水物質循環モデルの概要

以上で設定した陸域水物質循環モデルのパラメータを用いて、面源負荷が琵琶湖の湖内水質に与える影響を評価する。そのために用いる琵琶湖流域水物質循環モデルの概要を以下に示す（佐藤ら、2010）。

琵琶湖流域水物質循環モデルの計算フローを図15に示す。モデルは「陸域水物質循環モデル」「湖内流動モデル」「湖内生態系モデル」の3つから成り、それぞれ気象や地形、社会条件等のデータと他のモデルからの出力を読み込んでシミュレートする。以下では湖内流動モデルと湖内生態系モデルについて説明する。

湖内流動モデルは、琵琶湖内部での水の流動および水温変化を計算するモデルである（図16）。水域を平面方向に1km×1kmに分割し、鉛直方向には水深の異なる8層に分割し作成したメッシュを計算単位として、外部条件（気象、河川流入）を与えることにより、湖内での水の流れを計算し、湖内での流速および水温分布を結果として出力する。具体的には、岩佐ら（1983）の手法を参考に、層位モデルを用いた準三次元的解析が可能な湖水流動モデルを作成した。流れの解析に用いる基礎方程式は静水圧近似と

Boussinesq 近似を用いた非圧縮性流体の連続の式および運動方程式とした。湖内生態系モデルは、琵琶湖内部での生態系や各種物質の濃度を計算するモデルである（図17）。計算単位となるメッシュは、平面・鉛直方向ともに湖内流動モデルと同じであり、湖内における移流拡散モデルと生態系モデルを結合させることにより開発した湖内生態系モデルを使用した。このモデルでは、湖内の溶存酸素、有機物、栄養塩、鉄などの金属の濃度を予測するために、陸域水物質循環モデル、湖内流動モデルの結果を連成させ、時間発展方程式を解く。また、リンの挙動を把握するために、鉄のサイクルや水-底質相互作用を考慮し、好気状態の下での物質の吸着・沈降と嫌気状態での溶解・溶出のプロセスを考慮する。

このうち生態系モデルでは、水相7コンパートメントと溶存酸素、底質4コンパートメントからなる支配方程式を導出した。湖内における栄養塩の挙動・ダイナミクスは、河川からの流入、瀬田川への流出、生物相による河川水採取、水相における沈殿・再懸濁、懸濁態への吸脱着、底質からの溶出および水-底質相互作用による吸脱着、無機化、堆積により表現している。

5.2 計算条件

面源負荷の湖内水質への影響を評価するために、現況再現計算の他、以下2つのシナリオ計算を行った。

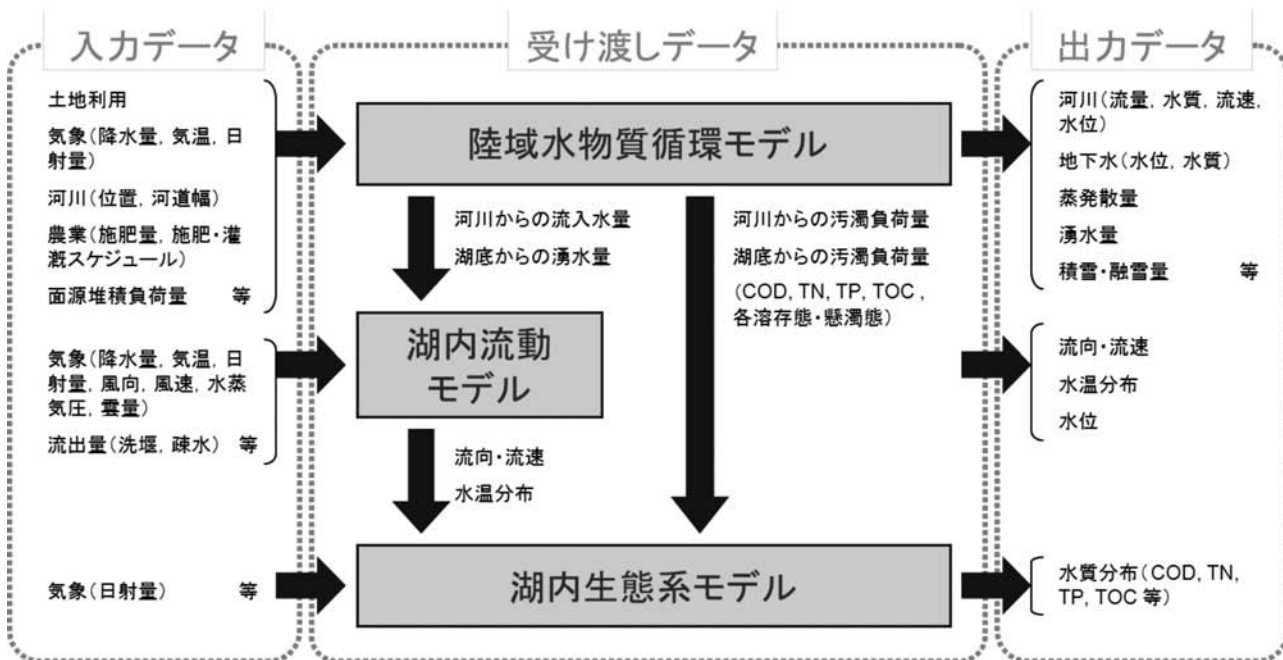


図15 琵琶湖流域水物質循環モデルの全体像

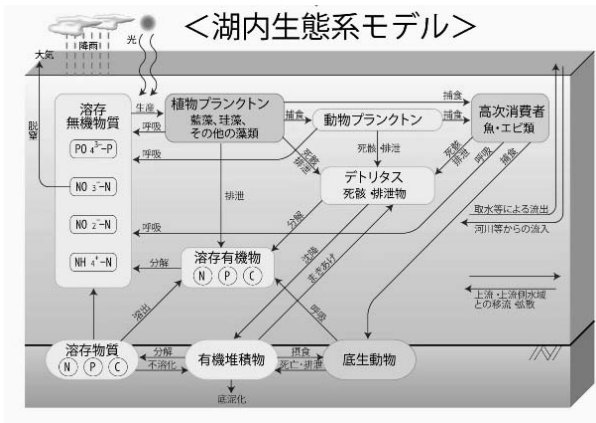


図 16 湖内生態系モデルの概要

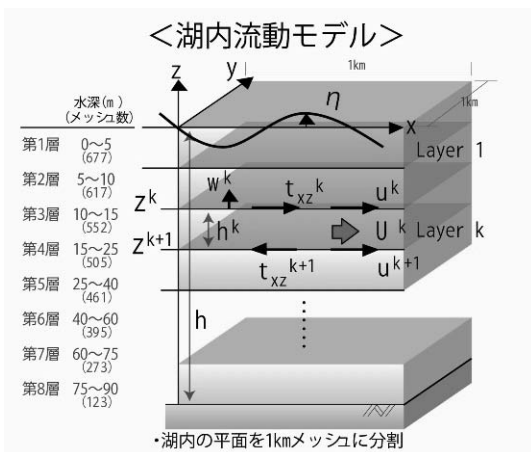


図 17 湖内流動モデルの概要

シナリオ①「農地負荷なし」：農地（水田・畑）における施肥量・土壌・用水由来の負荷をゼロとする
 シナリオ②「農地・市街地負荷なし」：シナリオ①に加え、市街地・道路における晴天時堆積負荷をゼロとする。
 なお、両シナリオ共に降水そのものに含まれる負荷は現況と変わらないものとした。つまり、シナリオ①は農地で耕作を実施しないような対策、シナリオ②はさらに毎日路面清掃を実施するような対策であると理解できる。

また条件を変更した場合の湖内水質への影響は、琵琶湖のように長い滞留時間を有する湖沼の場合には短期間では評価できない。琵琶湖の平均滞留時間が5.5年であることを鑑み、本研究では2004～2008年の5ヶ年連続計算を行い、2008年の琵琶湖表層水質を比較することで面源負荷の湖内水質への影響を評価することにした。

5.3 計算結果

ここでは、保存性物質であり物質循環が明瞭なTPを例として水質への影響を評価する。まず湖内水質の現況再現結果について示したのが、図18である。2008年の湖内各観測地点のTPの年平均濃度の計算値と観測値を比較したところ、北湖については概ね地点ごとの平均的な水質の差異が表現されたと考えられる。一方南湖については、北湖より濃度が高い傾向は再現できたものの、高濃度域を再現するには至らなかった。この原因としては、メッシュサイズ(1km)が南湖の現象解明には粗い、底泥の巻き上げによる影響、枯死した水草の回帰・巻き上げ等が考えられるが、北湖との相対的な比較として南湖全体の評価を行うことはできると考えられた。

現況再現と2つのシナリオごとの、陸域からの流入負荷量の結果を図19に示す。シナリオ①、シナリオ②にすることで、流入負荷量はそれぞれ12.0%、24.7%削減されることが分かった。農地負荷をなくした場合、表面流出の他地下浸透負荷が大きく削減されているのが特徴的である。しかし、湧水由来の負荷量については、シナリオによらず現況再現結果とほとんど変化がなかった。これは、表面流出負荷の削減対策が河川の水質や流入負荷量として明瞭に反映されやすいのに対し、地下水の濃度は5年程度ではあまり変化せず、長期間にわたって対策効果が現れるためと考えられる。環境こだわり農業などの農地における負荷削減対策は、このような特徴があること踏まえつつ長期的に取り組んでいく必要がある。

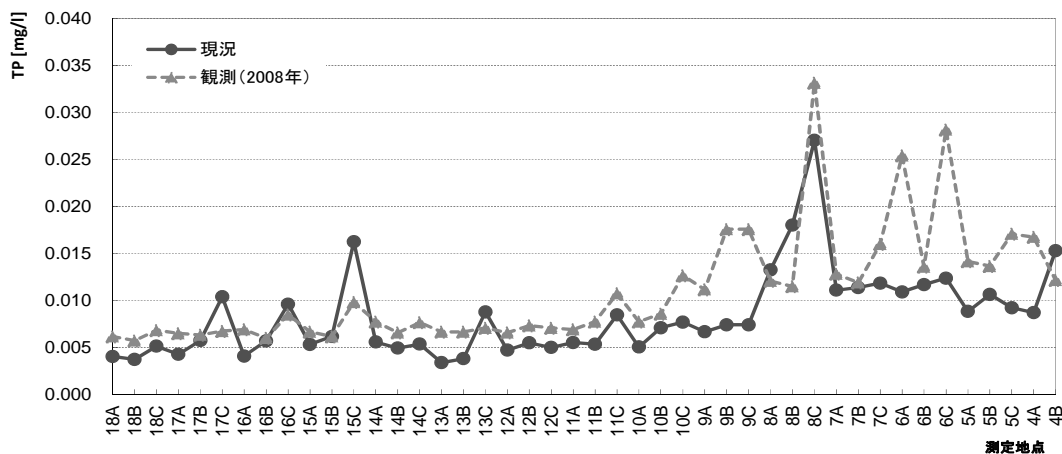


図 18 TP年平均濃度の検証結果

単位:t/year(2008年)

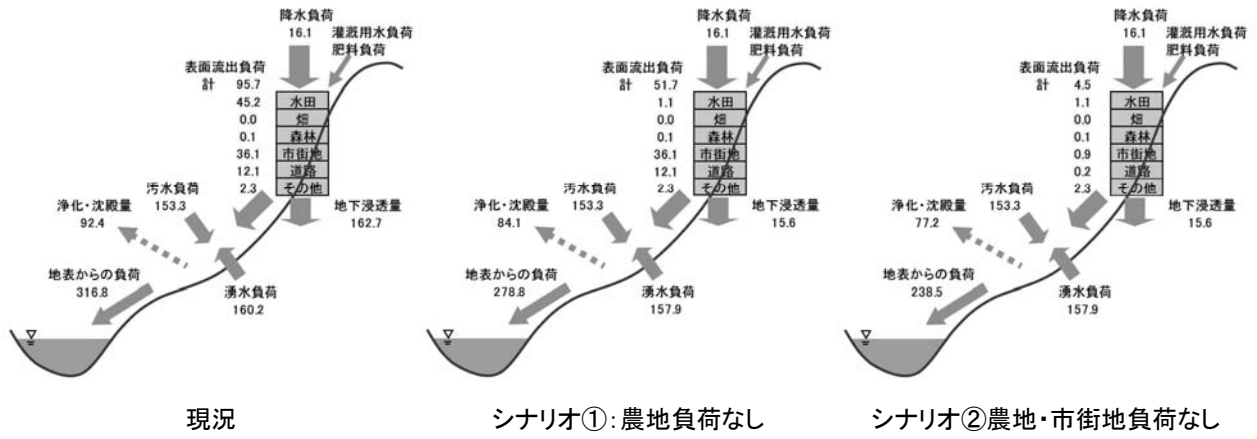


図 19 現況再現・シナリオごとの流入負荷量 (2008 年)

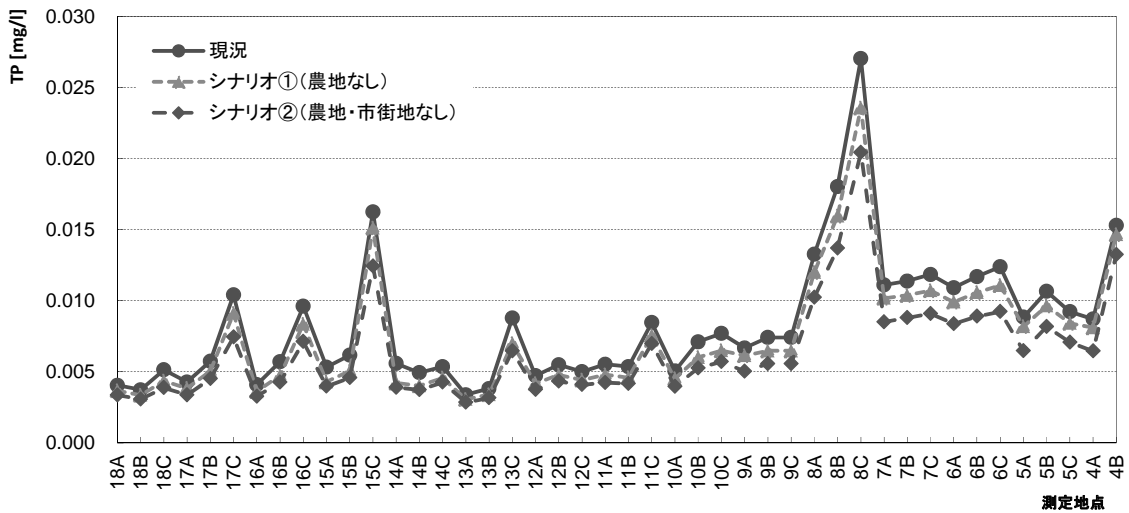


図 20 シナリオ別湖内水質の変化 (観測地点別)

湖内水質への影響を示したものが、図 20 である。合わせて、シナリオごとの北湖・南湖の平均水質の変化を図 21 に示した。シナリオ①、シナリオ②について、北湖ではそれぞれ 13.9%、23.6%、南湖ではそれぞれ 9.8%、23.5%削減されることが分かった。これを踏まえると、北湖では農地負荷が、南湖では市街地負荷がより湖内の TP 濃度に影響を与えていると考えられる。またその影響の大きさは農地、市街地ともに概ね 10~15%程度であると言えるが、農地については地下浸透量の削減分が 5 年間の計算ではほとんど考慮されないため、さらに大きな影響を与えていると考えられる。

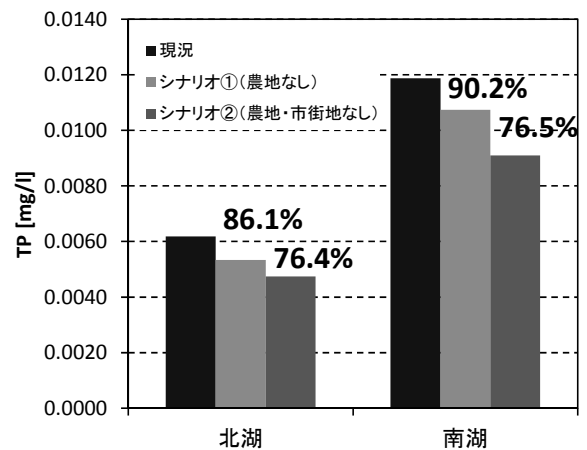


図 21 シナリオ別湖内水質の変化 (北湖・南湖別)

6. まとめ

琵琶湖流域水物質循環モデルの面源からの流出に関するパラメータの精度を高めることを目的として、本研究では、水田・市街地・森林における面源負荷流出モデルを構築し、降雨時を含む詳細な調査データを用いてその検証を行った。またそこで得られた面源負荷のパラメータを活用し、面源負荷が湖内水質に与える影響を、琵琶湖流域水物質循環モデルを用いたシナリオ計算により明らかにした。

面源負荷に関するモデルの精緻化、高度化のためには、調査やモデル改良のための研究をさらに進める一方、モデルに含まれる各種の不確実性を理解しつつ適用事例を増やしていく必要がある。また今後は、有機物や窒素を含む湖内の物質の時系列的な循環を再現した上で、環境こだわり農業や循環灌漑、市街地排水浄化など実際に行われている面源負荷対策の水質への影響について検討していく必要がある。

7. 謝辞・引用文献

7.1 謝辞

本研究で用いたデータの一部は、環境省 水・大気環境局 水環境課より提供いただいたものであり、関係者の皆様に深く感謝する。本研究の一部は、平成 19～22 年度河川整備基金研究助成および平成 18～21 年度下水道振興基金研究助成により実施した。

7.2 引用文献

Aber, J. D., S. V. Ollinger, C. A. Federer and C. Driscoll (1997), Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in response to land use and atmospheric deposition, *Ecological Modelling*: 61-78.

藤原忠：露場の気温と水田の水温、地温との相関及びこれら気象要素と稲反収との関係について (1953)、北海道農業試験場彙報、65: 1-8.

岩佐義朗・井上和也・劉樹坤・阿部徹：琵琶湖湖流の三次元的な解析 (1983)、京都大学防災研究所年報、26B-2: 531-542.

角屋睦・早瀬吉雄 (1981)：流出解析手法 (その 14) - 低平地タンクモデルによる洪水解析 -、農業土木学会誌、49(4) : 321-332.

大久保卓也 (2005)：農業排水の琵琶湖水質および生物への影響、琵琶湖研究所記念誌、22: 75-86.

大久保卓也・佐藤祐一・東善広 (2009)：琵琶湖流域水物質循環モデル (その 1) パラメータ推定のための面源・河川調査、第 12 回日本水環境学会シンポジウム講演集: 34-35.

大久保卓也(2010)：未発表データ。

大手信人(2006)：森林流域を対象とする渓流水質予測モデルを構築する際に考慮すべき水文過程の影響について、陸水学雑誌、67: 259-266.

佐藤祐一・金再奎・高田俊秀・永禮英明・小松英司・上原浩・西野麻知子・大久保卓也・岩川貴志・内藤正明 (2009)：琵琶湖の流域管理のための分析システムの構築に関する調査研究、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書、4:34-49.

佐藤祐一・小松英司・永禮英明・湯浅岳史・上原浩 (2010)：陸域・湖内流動・湖内生態系を結合した琵琶湖流域水物質循環モデルの構築、環境システム計測制御学会誌、15: 21-24、2010.

佐藤祐一・大久保卓也・岡本高弘・金再奎・上原浩・湯浅岳史・佐野寿彦・饗庭直樹・蓮川博之・山田善彦(2011)：面源負荷流出モデルの構築と対策効果予測、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書、6: 31-4.

田淵俊雄・高村義親(1985)：集水域からの窒素・リンの流出、東京大学出版会.

田淵俊雄・末正奈緒希・高梨めぐみ(1987)：水田湛水による硝酸態窒素の除去試験、農業土木学会誌、55(8) : 53-58.

田淵俊雄(2006)：水田窒素除去機能の定量化への試み、農業土木学会誌、74(8) : 703-706.

湯浅岳史・上原浩・佐藤祐一・今城貴弘・稲垣仁根・竹下伸一(2006)：蒸発散-表面流出-面源負荷発生モデルの開発、水文・水資源学会 2006 年度研究発表会要旨集: 132-133.