

### 3. 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（平成 20～22 年度（2008～2010 年度））：中間報告

## 琵琶湖流域管理システムに関する政策課題研究 ～面源負荷流出モデルの構築と対策効果予測～

佐藤祐一・大久保卓也・岡本高弘・金再奎・上原浩<sup>1)</sup>・湯浅岳史<sup>1)</sup>  
・佐野寿彦<sup>2)</sup>・饗庭直樹<sup>3)</sup>・蓮川博之<sup>3)</sup>・山田善彦<sup>3)</sup>

### 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の値を明らかにすることができた。またこのうち水田については、モデルの考え方を応用して循環灌漑の対策効果予測を行い、予測モデルとしての適用可能性を確認するとともに、取水先水質より排水水質の方が高い時期や地域で実施することが望ましいことを明らかにした。

### 1. はじめに

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、これまでの対策の効果を評価するとともに、一層効果的な対策を展開することが求められている。このためには、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・水質の変化を精度良く予測し、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。そのため、各種施策が水量・水質に与える影響を予測するためには、各土地利用からの流出機構をできるだけ物理現象に即してモデル化することが必要である。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、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、詳細な調査結果をもとにパラメータの精度向上に努めており、本稿では水田・市街地・森林を対象とした検証作業の途中経過について報告する。また水田については、本モデルの考え方をを用いて循環灌漑の対策効果予測を行っているので、合わせて報告する。

### 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)。

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

ここで、 $A_{pad}$ ：水田タンク面積 ( $m^2$ )、 $h$ ：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( $m^3/s$ )、 $E_t$ ：

1) パシフィックコンサルタンツ株式会社、2) 滋賀県農政水産部耕地課、3) 滋賀県農業技術振興センター

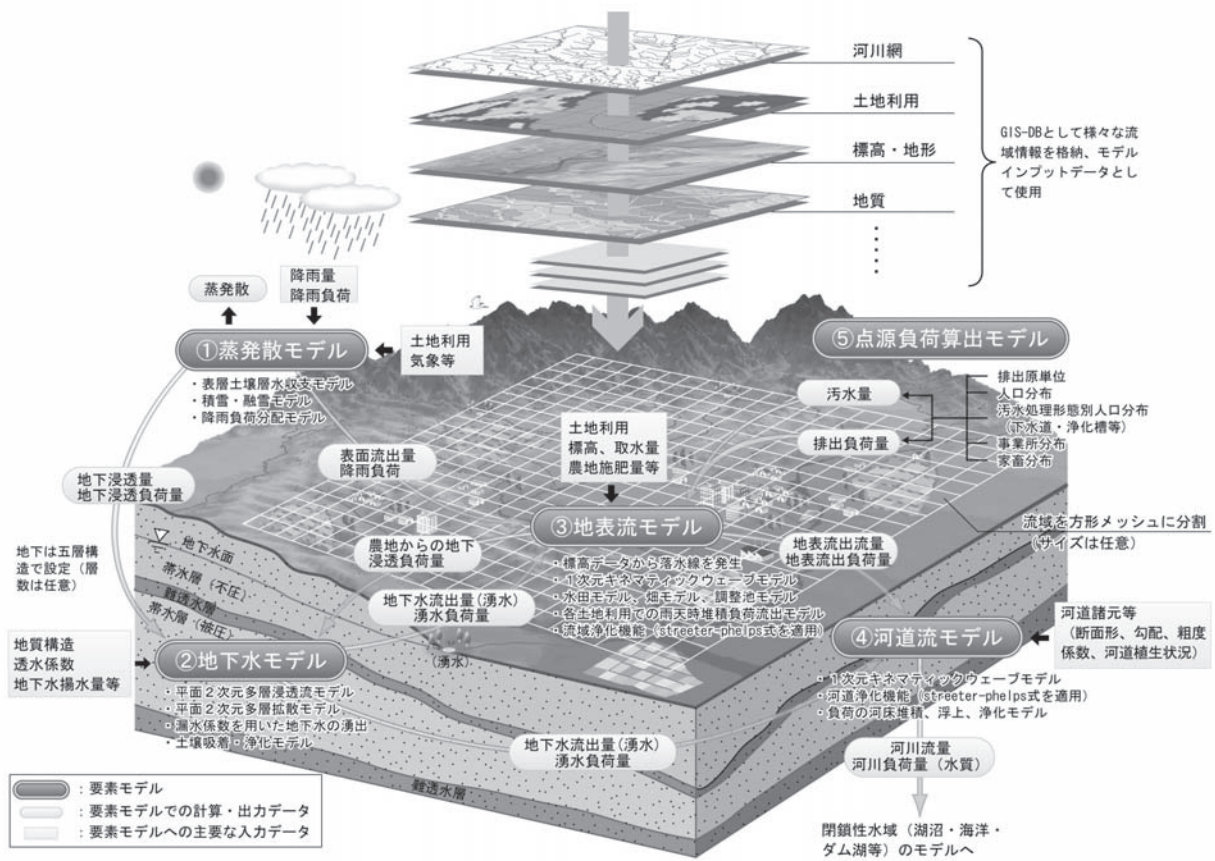


図1 陸域水物質循環モデルの全体像

水田での蒸発散量( $m^3/s$ )、 $I_t$ ：水田での地下浸透量( $m^3/s$ )、 $Q_{pad}$ ：水田タンクからの流出量( $m^3/s$ )である。降水量、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（角屋ら、1981）。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。

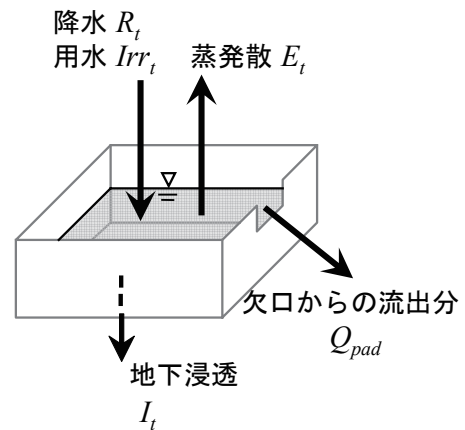


図2 水田における水循環の概念図

水田では一般に栽培期ごとに水管理の方法が異なる。例えば田植え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。

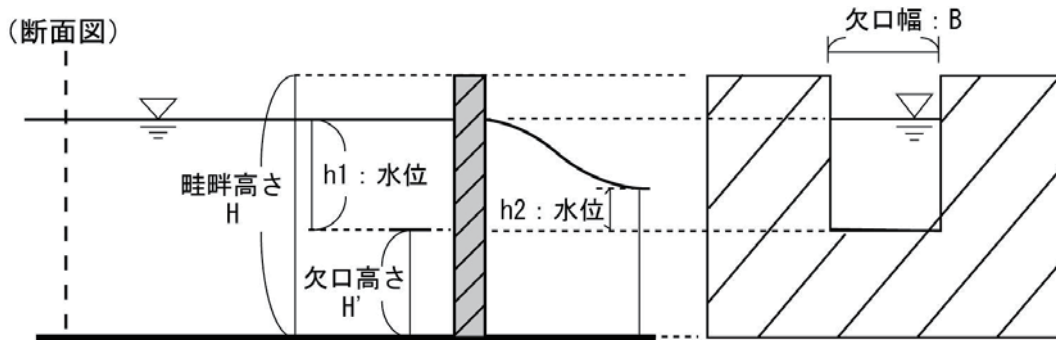


図3 欠口流出法による計算

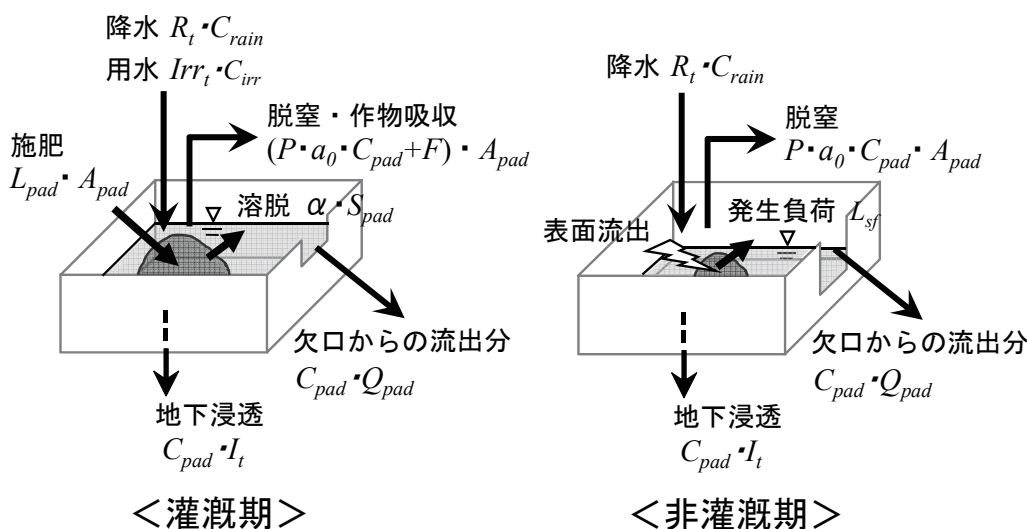


図4 水田における物質循環の概念図

## 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。

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

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

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

ここで、 $C_{pad}$ ：水田レイヤー水質濃度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )、 $C_{rain}$ ：降水水質 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )、 $C_{irr}$ ：用水水質 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )、 $\alpha$ ：溶脱率 (1/s)、 $S_{pad}$ ：残存施肥量 (g)、 $P$ ：田面効率 (0~1)、 $a_0$ ：除去速

度 (m/s)、 $F$ ：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。

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

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

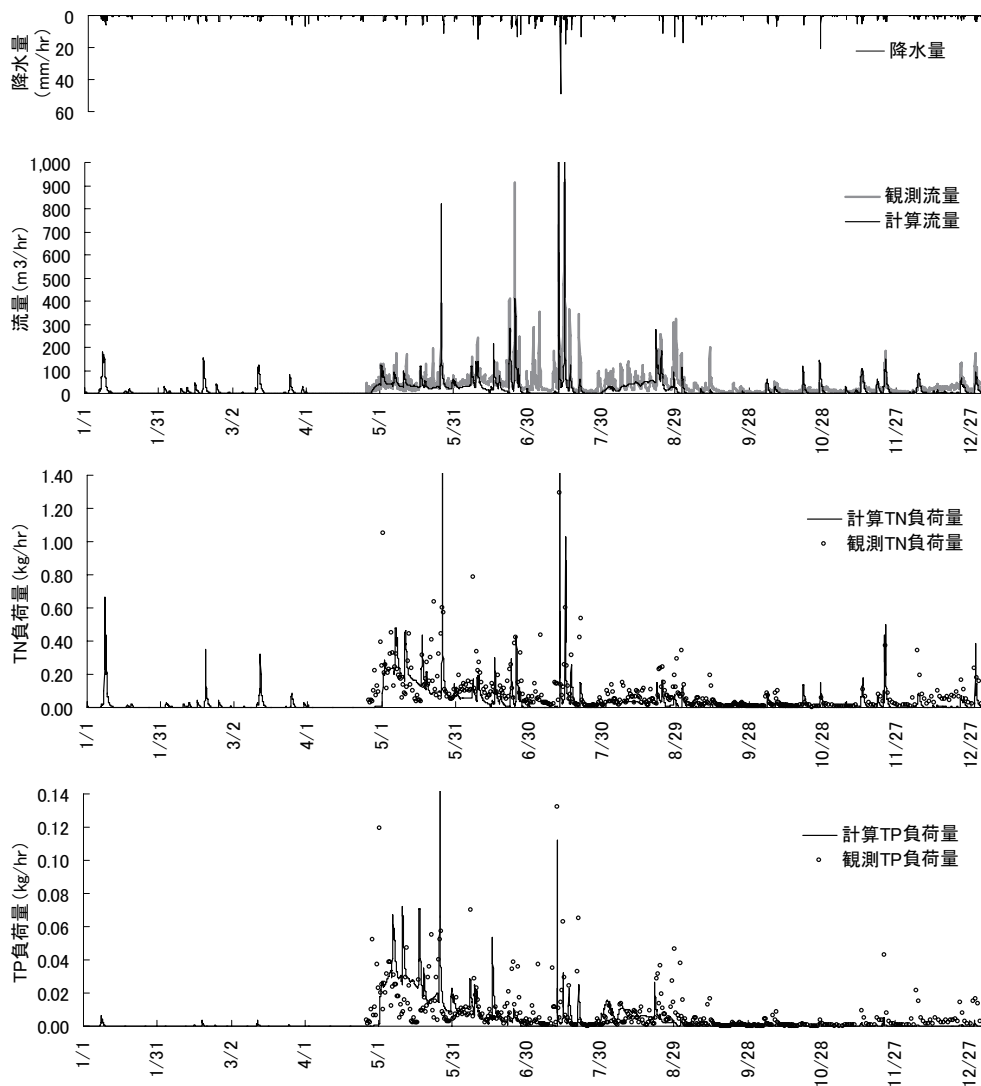


図5 水田における流量と負荷量の再現計算結果

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。

## 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）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、用水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。

2007年1月1日から12月31日の再現計算を行った結果を図5に示す。流量については概ね観測値を再現することができ、負荷量については対象地域における細かな水質変動や非灌漑期における特にTPの変動には課題が残るが、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。対象地域においては代かき・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年間の10.5%であるにもかかわらず、負荷量で見るとTNで28.8%、TPで34.5%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、これを

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	0.03	灌漑期(4/1-8/30, 中干し期除く)
	m	0	中干し期, 非灌漑期

施肥量等の設定

項目	単位	値	備考
元肥由来負荷	kg/ha	30	5/1に施用
	kg/ha	3	5/1に施用
穂肥由来負荷	kg/ha	10	7/15に施用
	kg/ha	1	7/15に施用
溶脱率	1/日	0.05	TN
	1/日	0.05	TP
除去速度係数a		0.000011	TNのみ
〃 b		0.005	TNのみ

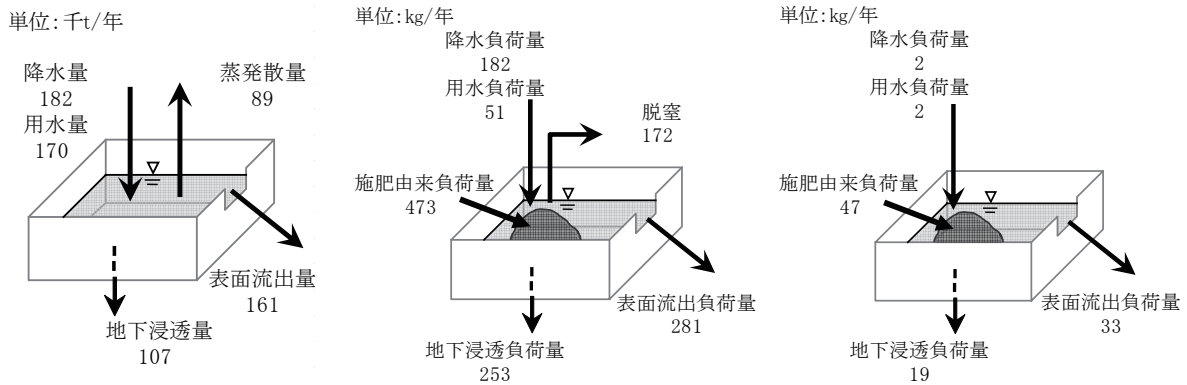


図 6 水物質収支の結果 (左: 水量, 中: TN, 右: TP)

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。水田で生じている現象を厳密に再現するのであれば、式(4)で示したように施肥量と作物吸収量を区別する必要があるが、ここでは簡便のためこれらを合わせて考慮した施肥由来負荷量(元肥・穂肥)として扱っている。そのため、一般的な施肥量より施肥由来負荷量が幾分少ない値となっている。計算された年間の水物質収支の結果を図6に示す。対象水田は琵琶湖北湖の水(2007年度でTN: 0.26mg/L, TP: 0.007mg/L)を主な水源とするため、用水から供給される負荷が少なく、TN、TPともに排出型(排出負荷量-降水・用水負荷量>0)となった。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。

$$L_s = k \cdot S_s^m \cdot (Q_s - Q_c) Q_s^n + C_{rain} \cdot Q_s \quad (10)$$

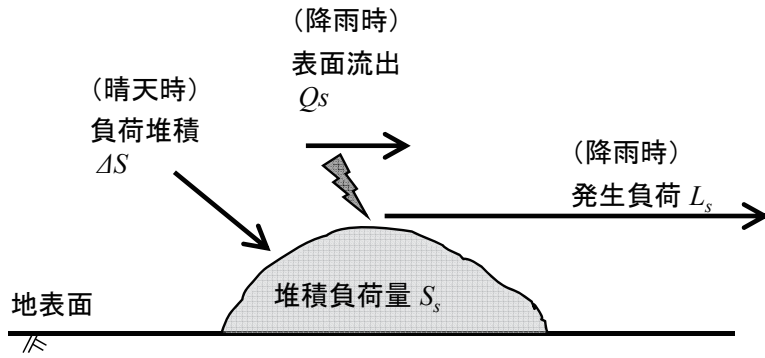


図7 雨天時流出負荷算定モデルの概念図

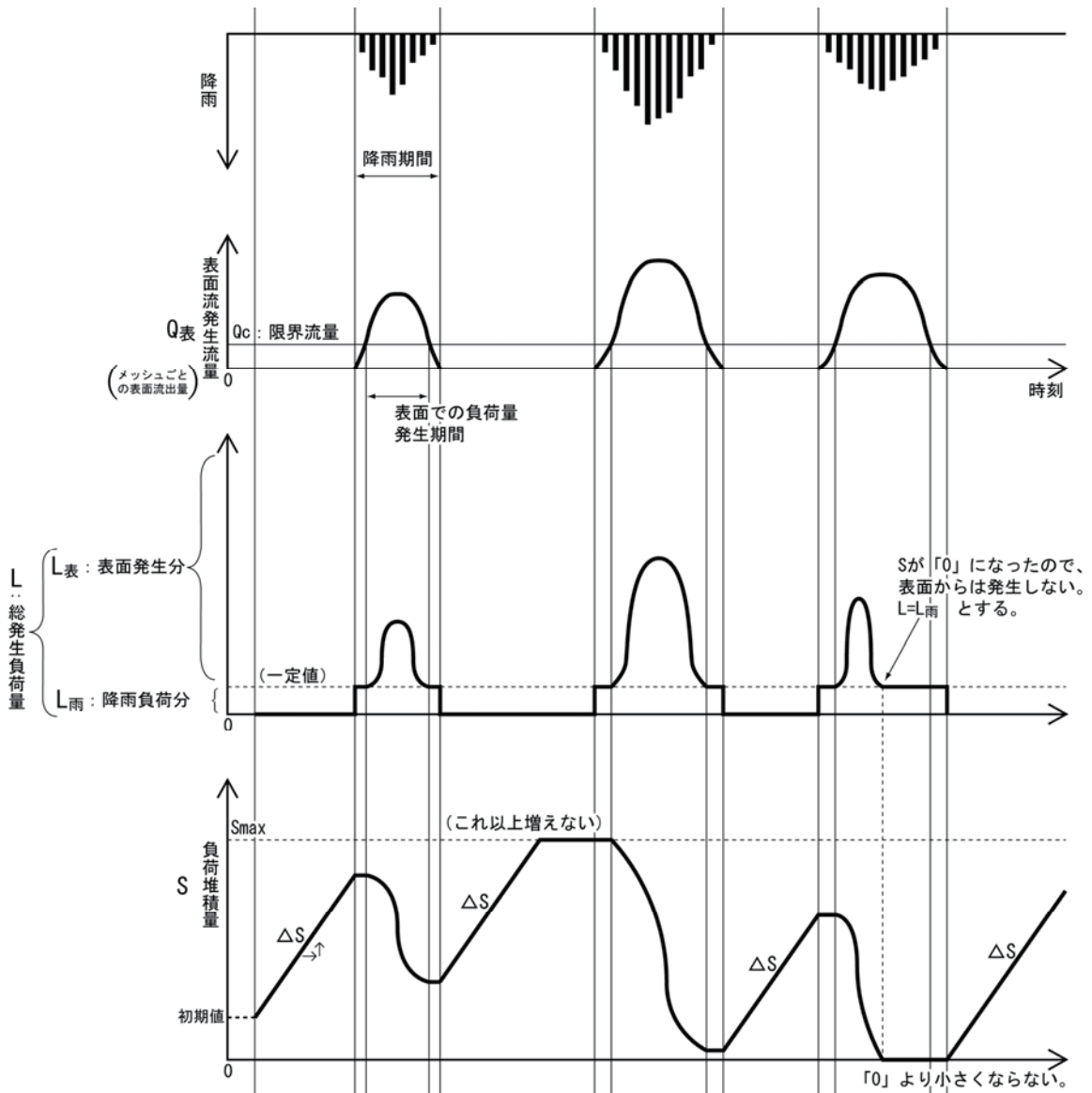


図8 堆積負荷量と発生負荷量の変化

$$dS_s / dt = \begin{cases} \Delta S & (\text{晴天時}) \\ -L_s & (\text{降雨時}) \\ 0 & (S_s \geq S_{\max} \text{ or } S_s = 0) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $L_s$  : 地表面流出負荷量、 $Q_s$  : 地表面流出水量、 $Q_c$  : 掃流限界流量、 $C_{rain}$  : 降水水質、 $S_s$  : 地表面堆積負荷量、 $\Delta S$  : 晴天時負荷堆積速度、 $S_{\max}$  : 最大堆積負荷量、 $k \cdot m \cdot$

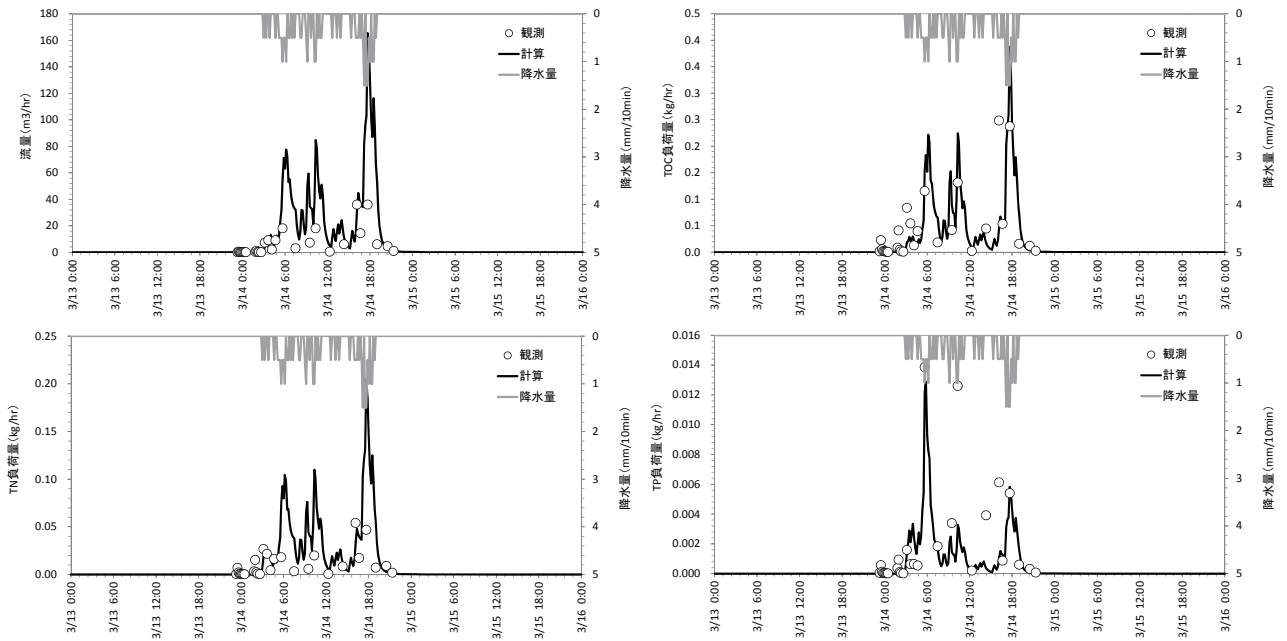


図9 市街地における流量と負荷量の再現計算結果

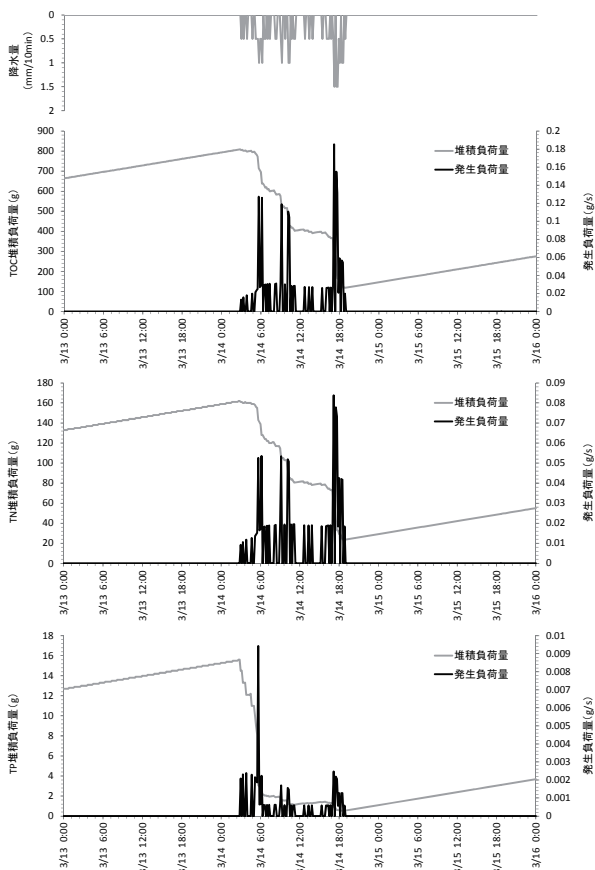


図10 堆積負荷と発生負荷の状況

$n$  : パラメータである。

雨天時流出負荷量算定モデルの概要を図7に、堆積負荷量と流出負荷量の関係図を図8に示す。降雨時に表面流出

表2 市街地モデルのパラメータ一覧

パラメータ	水質項目	値
$k$	TOC	0.1
(-)	T-N	0.1
	T-P	0.1
$m$	TOC	1
(-)	T-N	1
	T-P	2
$n$	TOC	1
(-)	T-N	1
	T-P	1
$S_{max}$	TOC	0.075
(g/m <sup>2</sup> )	T-N	0.015
	T-P	0.0015
$\Delta S$	TOC	0.005
(g/m <sup>2</sup> ・day)	T-N	0.001
	T-P	0.0001
$q_c$	TOC	0
(m <sup>3</sup> /s)	T-N	0
	T-P	0

$Q$  が生じ、限界流量  $Q_c$  を超えると、その時の堆積負荷量  $S_s$  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  $S_s$  は減少する。降雨中はこの過程が繰り返される。

無降雨時には、 $\Delta S$  により堆積負荷量  $S_s$  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地区 (2.6ha) を対象として上記モデルを適用した。当該地区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。調査対象とした排水路は降雨時のみに排水が生じるため、2008/3/13~14 にかけて降雨時の調査を実施した (累積降水量 28mm) (調査は環境省により実施)。採水は

バケツ等により人力で行い、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分析サンプルを選定した。

再現計算を行った結果を図 9 に示す。流量については、降雨に応じた流出の挙動は概ね再現することができたが、全体として計算値が観測値よりも過大となっている。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 2.6ha であったとすると、降水量としては合計 728m<sup>3</sup> が流入したことになるが、排水路で観測された流出量は合計 206m<sup>3</sup> であり、流出率が 28.3% しかないことになる。これは一般的な市街地としては小さすぎる値であり、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 で計算値が過大となったのは、降雨由来の負荷量の占める割合が TN で大きいためと考えられる。また、TOC や TN では降雨後半で負荷量が増大した一方、TP では前半で負荷量のピークが現れている傾向を再現することができた。

堆積負荷量と発生負荷量の計算結果を図 10 に示す。これによれば、28mm 程度の降雨でも、降雨終了時には堆積負荷のほとんどが流出したことが想定される。

本計算で設定したパラメータ値を表 2 に示す。前述の対象地域の面積の問題や、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。

## 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を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。

### 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。

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \quad (15)$$

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

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

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)、 $L_{in}$  : 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、 $\rho_s$  : 土壌の真密度、 $\theta$  : 体積含水率、 $k_d$  : 分配係数である。



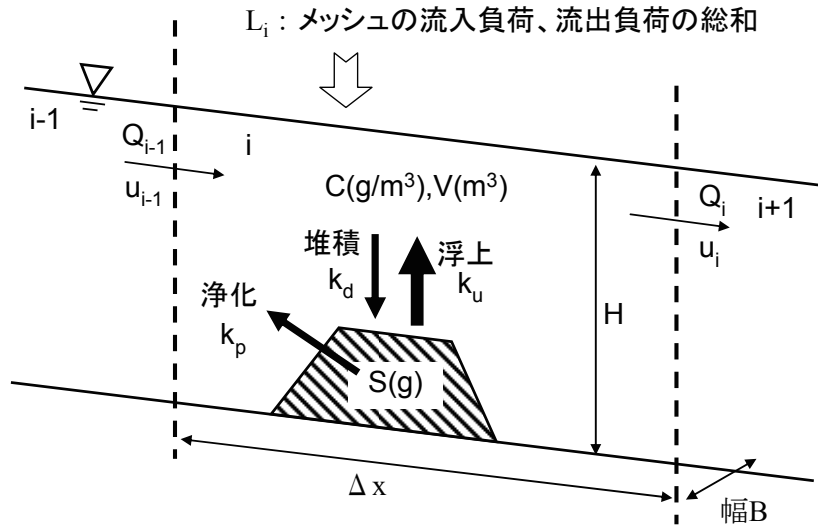


図 11 河道における物質の挙動

表 3 地下水モデルのパラメーター一覧

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・シヤールスタイン(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

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 11）。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：

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

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

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）

表 4 河床堆積負荷モデルのパラメーター一覧

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

浮上終了の判断： $u_i/u^* \leq b$  となったとき

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

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

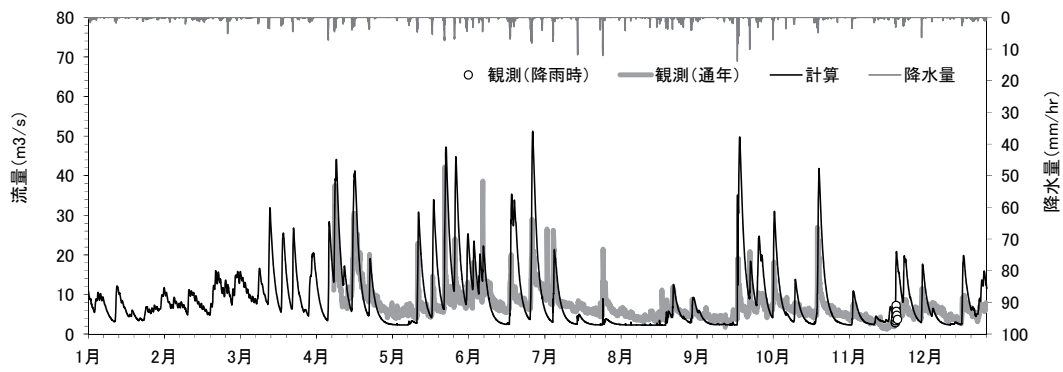


図 12 安曇川における流量の再現計算結果

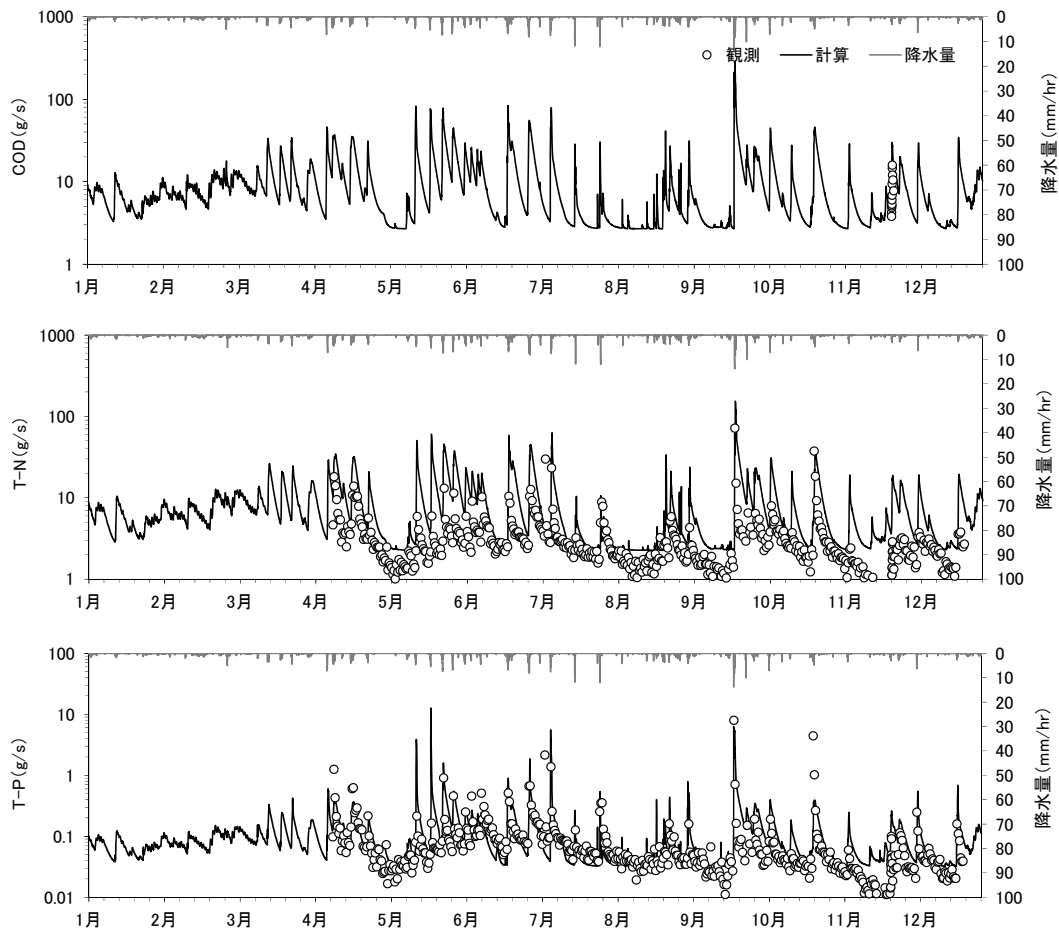
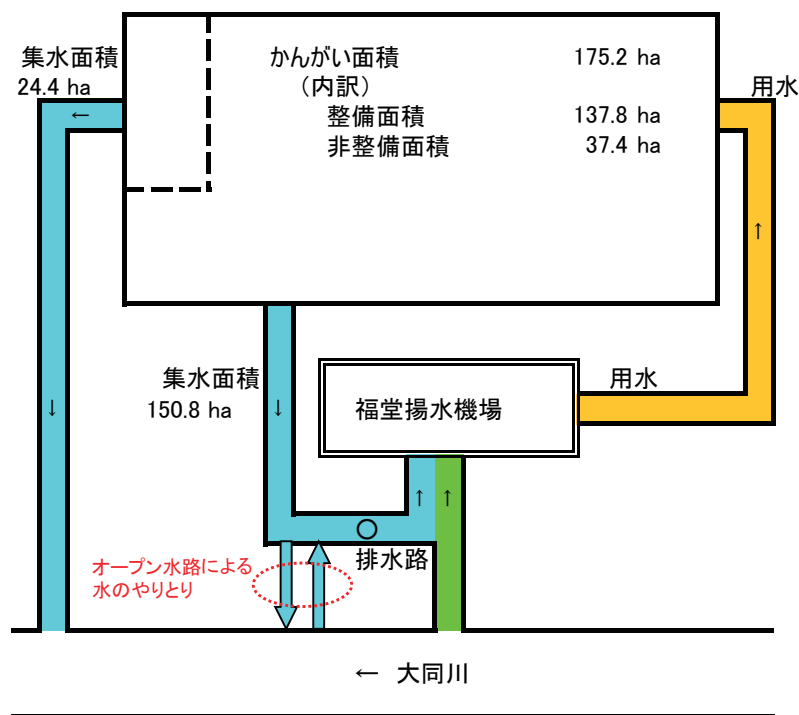


図 13 安曇川における負荷量の再現計算結果

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)、 $Li$  : 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  $169.2km^2$ ) 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)、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



本地区のかんがい面積(175.2ha)のうち、一部区域の排水は大同川へ直接排除されるが、残りの大部分の区域(150.8ha)の排水は、本地区のかんがい用揚水機給水槽を経て大同川排水される。

図 14 循環灌漑地区の概念図

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 12 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 13 (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を予測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共に、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. 循環灌漑モデル

### 5.1 対象地域の概要

循環灌漑とは、一般に、水田群から排出される排水の全量または一部を揚水機場に送水し、河川水や地下水、湖沼水などとブレンドして、用水として再利用するという灌漑方式である。水田からの排水を直接河川や湖沼などに排出せず、排水中の窒素やリンなどを水田で再利用できること

から、面源負荷削減効果が期待される。

こうした効果を定量的に把握するために、まず対象水田群における水物質循環を再現するための汎用的なシミュレーションモデルを構築する。また本モデルを滋賀県内の実地域に適用し、モデルの再現性を検証するとともに、循環灌漑の事業量と効果の関係や、より効果的に実施するための方法を明らかにする。

モデル構築の対象とした地区は、東近江市福堂町地先(循環灌漑地区)である。その水循環の概念図を図 14 に示す。なおモデル化にあたっては、灌漑面積の一部区域の排水が大同川に直接排水されていること、揚水機場に循環される排水路においてオープン水路によって大同川との水のやりとりが発生すること、灌漑面積のうち一部は畑に転作されていることを考慮するものとした。

モデル構築にあたっての仮定を以下に示す。

- ① 福堂地区のうち、揚水機場に排水が流れ、かつ水田として整備されている面積 (1/3 が転作田と仮定) を対象として計算
  - (ア)  $150.8 \times 2/3 = 100.5\text{ha}$  を対象
  - (イ) 畑地や大同川直接排水地区は、排水が揚水機場に流入しないと考えるため計算から除外

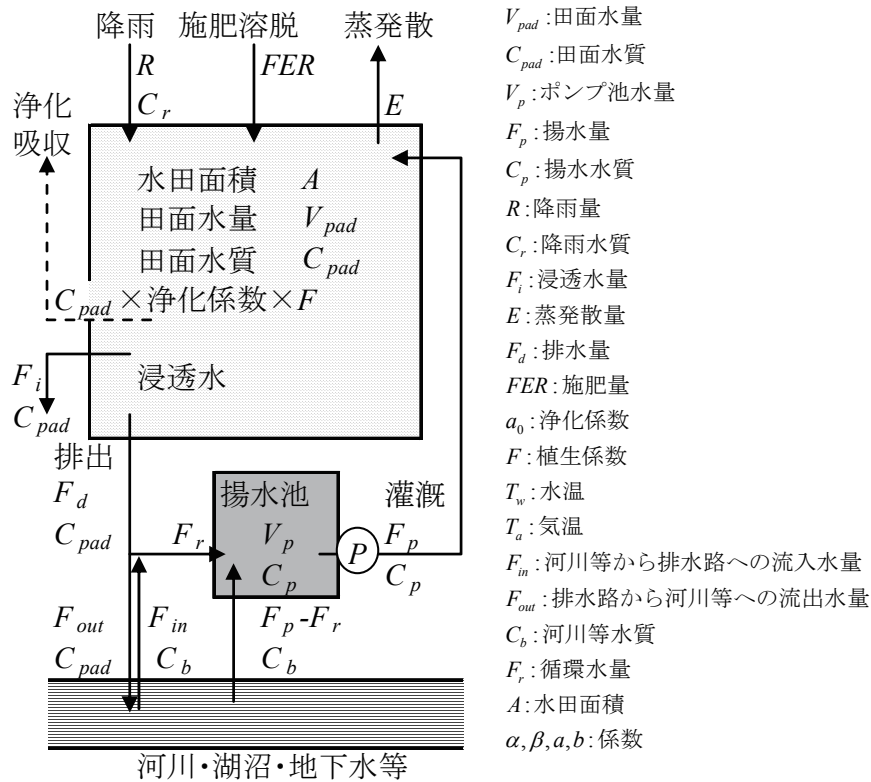


図 15 循環灌漑モデルの模式図

(ウ) 揚水量は面積見合いで算出

② 対象地域からの排水量等は、調査対象水田群 (6.5ha) からの排水量等を面積見合いで算出

③ 大同川と排水路の水交換量は、対象地域からの排水量と揚水機場への循環水量の比較から算出

(ア) 排水量 > 循環水量のときは、排水路 → 河川への流出

(イ) 循環水量 > 排水量のときは、河川 → 排水路への流入

## 5.2 モデルの概要

取水先や用排水系統などは地域により異なるが、循環灌漑に関わる基本的な機構を図 15 のように模式的に表し、この機構を次のように定式化する (式中の文字については図 13 を参照)。

○水田の水物質収支

$$\frac{dV_{pad}}{dt} = F_p + R - F_i - E - F_d$$

$$\frac{d(C_{pad}V_{pad})}{dt} = C_p F_p + C_r R + FER - C_{pad} F - a_0 F C_{pad} A - C_{pad} F_d$$

$$a_0 = \alpha T_w^2 + \beta, \quad T_w = a T_a + b \quad (\text{窒素の場合})$$

○揚水池の水物質収支

$$\frac{d(C_p V_p)}{dt} = (F_d C_{pad} - F_{out} C_{pad} + F_{in} C_b) + C_b (F_p - F_r) - C_p F_p$$

モデルの考え方として、循環灌漑の実施による負荷低減効果を見ることが目的であることから、その実施によっても変わらないと考えられる灌漑用水量、水田群からの排出水量、ポンプ池への循環水量については実測データを代入し (循環利用率の計算の際には循環水量を変更する)、水田群からの排出負荷量 (水質) によりモデルの結果を検証することとした。したがって、2. の水田モデルで示したモデルのうち、物質の挙動に関する部分のみを抽出したモデルであるといえる。

対象とする物質は TN と TP であるが、特に窒素について解析する場合には、水田における脱窒効果を考慮するために、2. の水田モデル同様、田淵 (2006) のモデルを採用した。ただし、水稻による吸収も考慮した点が 2. のモデルとの違いである。リンについても、窒素と同様濃度に比例して土壌への吸着や作物吸収が行われると仮定し、同様の式形を採用した (リンでは水温の上昇による影響は考慮しない)。

## 5.3 検証結果と考察

2008 年の灌漑期において、水田群 (6.5ha) と単筆田 (0.4ha) を対象に、圧力式水位計を用いた流量観測と 1 週間に 1 回 (代かき田植え期はほぼ 1 日 1 回) の水質調査を実施した。浸透水量は単筆田において、日減水深から蒸発散量 (ペンマン法により推定) を差し引いて算出した。

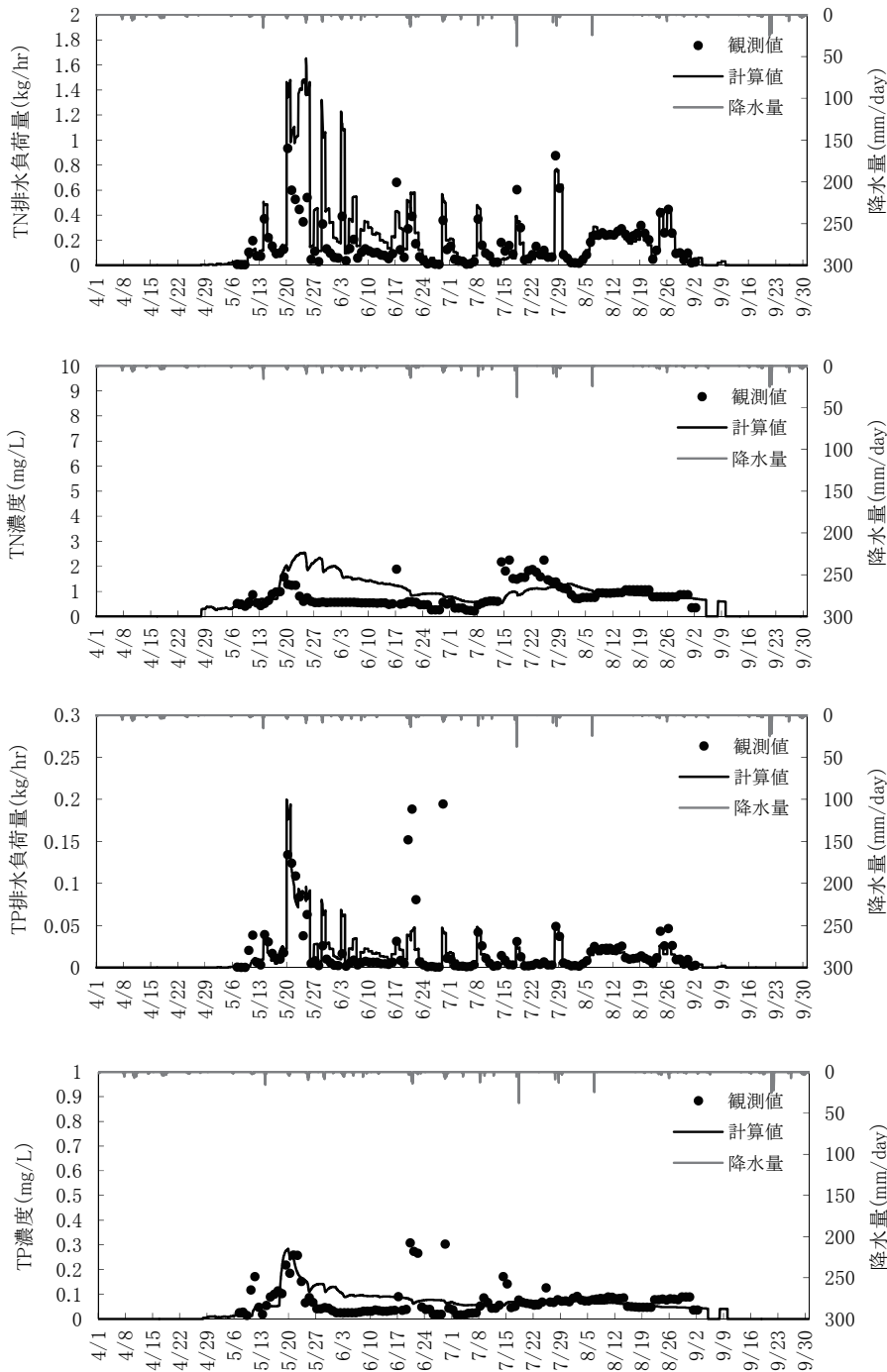


図 16 TN・TP の排水負荷量と濃度の再現計算結果

取水先の大同川の水質についても概ね1週間に1回の頻度で水質調査を行った(滋賀県農業技術振興センター、2010)。

計算は2008/4/1~9/30を対象として行った。投入施肥量は、施肥日・施肥量ともに対象地域の単筆田における聞き取り調査の結果を利用した。対象水田群からの排水水質( $C_{pad}$ )については、データ精度の関係から水田群の調査結果は用いず、単筆田の調査結果で代用した。各種モデル

パラメータは、対象地域からの排水負荷量の計算値と実績値の二乗誤差和が最小となるように設定した。

排水負荷量と濃度の計算結果を図16に示す。TN・TPともに負荷量の再現性は良く、また代かき期と穂肥期に負荷量や濃度が上昇する傾向を再現することができ、モデルの有効性を示すことができた。一方で、代かき期~湛水期で濃度を過大に計算する傾向が見られた。この原因としては、

表 5 循環灌漑モデルのパラメータ一覧

項目	単位	パラメータ値	備考・出典
浄化係数(TN)	$\alpha$	-	0.000022 田渕ら(1987)で0.000011
	$\beta$	-	0.01 田渕ら(1987)で0.005
浄化係数(TP)	a0	m/hr	0.0027
気温・水温換算係数	a	-	0.7 藤原(1953)より
	b	-	8.94 藤原(1953)より
投入施肥量(TN)	kg		90.1 対象地域でのヒアリングより
投入施肥量(TP)	kg		18.9 対象地域でのヒアリングより
施肥溶脱係数(TN)	/hr		0.001
施肥溶脱係数(TP)	/hr		0.0005

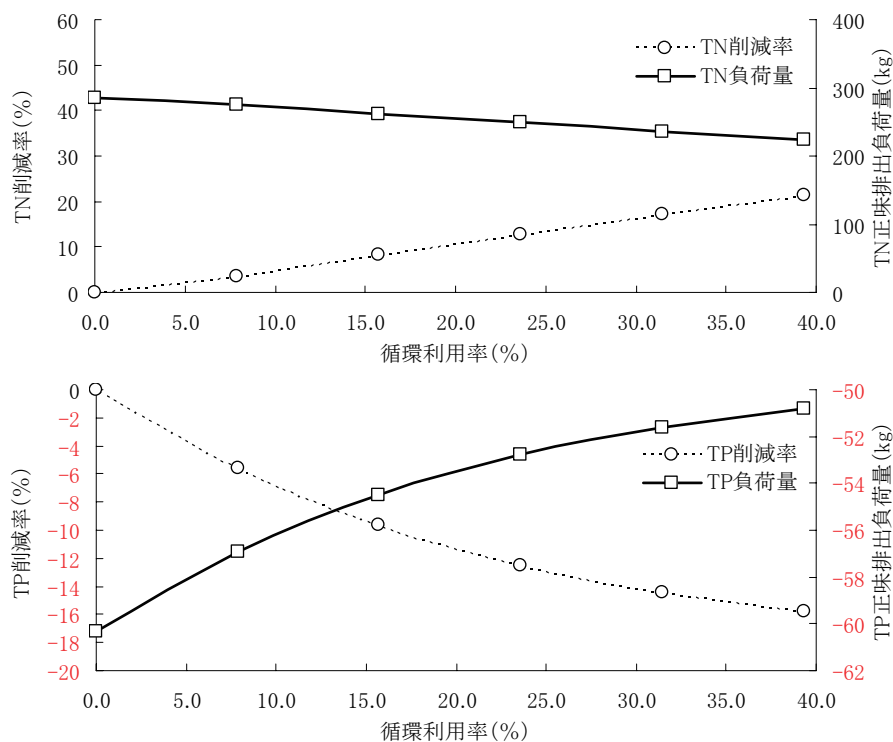


図 17 循環利用率と正味排出負荷量の関係

排水路における汚濁の沈降・浄化等をモデルで考慮していないことなどが考えられる。

またこのとき用いたパラメータを表 5 に示すが、まず TN の脱窒に関する浄化係数は、文献値や表 1 の値よりも倍程度となっており、また施肥の溶脱係数は、表 1 の値よりもかなり小さな数値となっている。これは主に施肥量の差によるもので、2. の水田モデルにおいては前述のように一般的な施肥量より少ない値にしている一方、循環灌漑モデルにおいては実際の施肥量をモデルに用いたため、その分施肥からの溶脱の速度を遅くしたり、浄化量を多くしたりする必要があったと考えられる。複数の水田群で検証を試みることで、より汎用的なモデルやパラメータを設定していく必要がある。

循環灌漑の効果を把握するために、上記で構築したモデ

ルを用いて、循環利用率 ( $F_r/F_p \times 100$ ) を変えたときの負荷量の変化を見る。現況における循環利用率は 39.3%であるが、排水路の構造上これ以上循環利用率を上げることができないため、これを減少させ、0%にしたときの負荷量との差を循環灌漑の効果と考えるものとする。

また本研究では、次式で定義する正味排出負荷量により循環灌漑の効果を比較した。

$$\text{正味排出負荷量} = (F_{out} C_{pad} + F_i C_{pad}) - \{F_m C_b + (F_p - F_r) C_b\} \quad (23)$$

結果を図 17 に示す。TN については、循環利用率が上がりにしたがって正味排出負荷量は減少し、0%のときと比べ 61.1kg (608.0g/ha) の負荷削減効果があると推定された。一方で TP については逆に、循環利用率が上がりにしたがって正味排出負荷量は増大し、0%のときと比べ

9.5kg (94.5g/ha) の負荷増大が予想された。この原因は排水水質と取水先(大同川)水質の差にある。排水水質>取水先水質の場合には循環利用率を上げるほど用水濃度が上がり、結果として浄化される量が増加するが、逆に排水水質<取水先水質の場合には、循環利用率を下げた大同川から積極的に取水した方が、浄化効果により流域から削減される負荷量が増えることになる。本対象地域の場合、TNについては排水水質>取水先水質、TPについては排水水質<取水先水質となるケースが多かったため、上記のような逆転現象が生じたと考えられる。このことより、循環灌漑は、取水先水質より排水水質の方が高い時期に集中して実施するか、琵琶湖北湖のように通年で濃度の低い水源から揚水している地域で実施することが望ましいと考えられる。

## 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。合わせて、水田については、循環灌漑を対象とした対策効果予測を行い、提案したモデルが適用可能であることを明らかにした。

一方で、本研究で構築したモデルは構造が詳細であるが故、入力データやパラメータの決定、結果の検証のための膨大な調査やデータが必要とされる。例えば、降雨時の河川、面源負荷量調査や人口、土地利用、工場排水などのGISデータ、農業用水など水利用に関わるデータなどである。これらが全てそろった流域は少ないが、データがないからモデルを構築できないというのではなく、モデルから見て必要な調査を感度分析などから明らかにし、モデル構築者と調査担当者が連携して課題に取り組むことが重要である。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。

## 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。

### 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*, 101, pp.61-78.

藤原忠(1953): 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. 北海道農業試験場彙報, 65:pp1-8.

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):pp321-332.

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:pp. 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:pp. 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:pp. 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 試験研究報告書, 4:pp. 34-49.

滋賀県農業技術振興センター(2010): 「琵琶湖東岸地区」循環かんがいによる流出負荷低減効果調査報告書.

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):pp. 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):pp. 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:pp. 132-133.