

## 〈研究発表〉

### 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

佐藤 祐一<sup>1)</sup>, 小松 英司<sup>2)</sup>, 永禮 英明<sup>3)</sup>, 湯浅 岳史<sup>4)</sup>, 上原 浩<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 総合解析部門

(〒 520-0022 滋賀県大津市柳が崎 5-34, E-mail: sato-y@lberi.jp)

<sup>2)</sup> 千代田アドバンス・ソリューションズ(株)

(〒 221-0031 神奈川県横浜市神奈川区新浦島町 1-1-25, E-mail: eiji.komatsu@chas.chiyoda.co.jp)

<sup>3)</sup> 岡山大学大学院 環境学研究科

(〒 700-8530 岡山県岡山市北区津島中三丁目 1-1, E-mail: nagare-h@cc.okayama-u.ac.jp)

<sup>4)</sup> パシフィックコンサルタンツ(株) (〒 163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1, E-mail: takashi.yuasa@tk.pacific.co.jp)

<sup>5)</sup> パシフィックコンサルタンツ(株) (〒 163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1, E-mail: hiroshi.uehara@tk.pacific.co.jp)

#### 概要

琵琶湖を取り巻く流域の水環境を把握し、対策の実施による琵琶湖の水質の変化を精度良く予測するためには、陸域での水・物質の循環や湖内の水温と流動、またそれらが湖内の内部生産等に及ぼす影響をシミュレーションモデルにより再現することが必要である。そこで、琵琶湖の流動・生態系を考慮した3次元モデルに、陸域における水物質循環の物理的過程を考慮した分布型モデルを結合し、気象や社会条件等を考慮して非定常な解析が可能な「琵琶湖流域水物質循環モデル」を構築した。また本モデルについて、河川の流量や水質、湖内流動や水質について検証を行ったところ、良好な再現計算結果が得られた。

キーワード 琵琶湖流域, 水物質循環, 水質, モデル, シミュレーション

## 1. はじめに

琵琶湖を取り巻く流域の水環境を把握し、対策の実施による琵琶湖の水質の変化を精度良く予測するためには、時々刻々の気象がもたらす陸域での水・物質の循環や湖内の水温と流動、またそれらが湖内のプランクトンや汚濁物質等に及ぼす影響を再現することが必要である。しかし陸域からの面源負荷量を推定する際に一般に用いられる原単位法では、降雨の多少やパターンによらず一定の負荷量を与えられるため、面源負荷が河川や琵琶湖に及ぼす影響の把握や、面源対策や降雨時対策の効果予測に課題があった。

そこで本研究では、琵琶湖の集水域における水物質循環・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モデル「琵琶湖流域水物質循環モデル」を構築し、その検証を行った。

## 2. モデルの概要

### 2.1 琵琶湖流域水物質循環モデルの全体像

琵琶湖流域水物質循環モデルの計算フローを Fig.1 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。

### 2.2 陸域水物質循環モデルの概要<sup>1)</sup>

構築した流域水物質循環モデルは6つの要素モデルから成る500mメッシュの分布型モデルであり、任意時刻・任意地点における河川流量や水質等をシミュレートすることが可能である。解析する物質はCOD, TN, TPの3物質であるが、湖内生態系にデータを受け渡す際に、各流域の過去の水質調査データから、CODをTOCに、また各物質を溶存態と懸濁態に形態分離している。

水循環については、降水をインプットデータとし、地表面での降水の分配～地下水流～地表流～河道流といった流域での水の挙動に関する物理現象を解析する各サブモデルを統合することによって流域全体の現象を解析する。例えば地表流、河道流については、一次元のKinematic Wave法により解析する。

物質循環については、負荷の発生・排出・流達過程における物理的機構を再現するため、特に面源負荷の発生と負荷流達機構について以下のモデルを構築した。

#### (1) 農地以外の土地利用

市街地や道路など各種土地利用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。

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

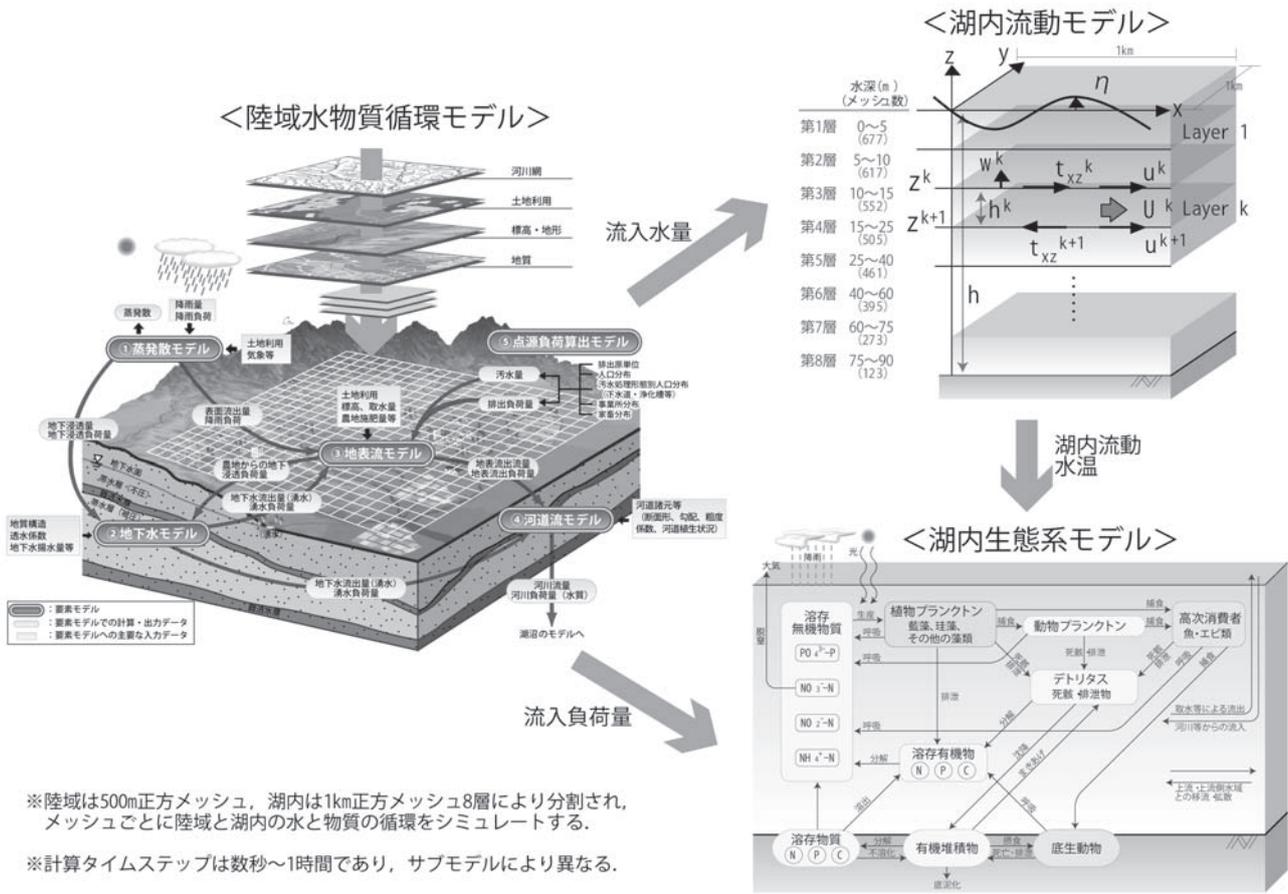


Fig.1: The Outline of Lake Biwa Basin Hydrological and Material Cycle Simulation Model

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

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、 $k \cdot m \cdot n$  : パラメータである。

(2) 農地(水田)

土地利用に水田を有するメッシュにおいては、施肥からの溶脱や用水由来の負荷、水田の貯留効果等を考慮するため、水田レイヤーを別に設定し、水田の欠口部からの流出水量(本間公式により算出)と水田内水質から流出負荷量を計算した後、これを地表流の計算に受け渡している。

$$L_{pad} = Q_{pad} \cdot C_{pad}$$

$$\frac{dV_{pad} \cdot C_{pad}}{dt} = R_t \cdot C_{rain} + L_{agr} + \alpha \cdot S_{pad} - C_{pad} \cdot (I_t + Q_{pad})$$

ここで、 $L_{pad}$  : 水田流出負荷量、 $Q_{pad}$  : 水田流出水量、 $C_{pad}$  : 水田内水質、 $V_{pad}$  : 水田内水量、 $R_t$  : 降水量、 $L_{agr}$  : 用水負荷量、 $\alpha$  : 溶脱定数、 $S_{pad}$  : 残存施肥量、 $I_t$  : 地下浸透水量である。

(3) 負荷の流達

河道における汚濁負荷の流下過程では、1次元移流方程式により物質の挙動を表現する他、河川水の流速

や水質等に応じて汚濁負荷が堆積・浮上・浄化する機構、すなわち平常時には河床に負荷が堆積し、降水時には堆積負荷が削り取られて浮上するという現象や、堆積負荷が時間に応じて浄化するという現象を再現するため、河床堆積負荷と河川水との相互作用を考慮した下記のモデルを構築した。

【平常時】

$$\frac{\partial V_r \cdot C_r}{\partial t} + u_t \frac{\partial V_r \cdot C_r}{\partial x} = L_t - k_d \cdot C_r \cdot V_r$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} = k_d \cdot C_r \cdot V_r - k_p \cdot S_r$$

【降水時】(河床堆積負荷の浮上開始~終了時)

浮上開始の判断:  $u_t / u_{t-1} \geq a$  (このときの  $u_t$  を  $u^*$ )

浮上終了の判断:  $u_t / u^* \leq b$

ここで、 $S_r$  : 河床堆積負荷、 $V_r$  : 河道メッシュの容量、 $C_r$  : 河道メッシュの水質濃度、 $u_t$  : 流速、 $L_t$  : 外部からの流入負荷、 $k_u$  : 再浮上係数、 $k_d$  : 沈降係数、 $k_p$  : 自然浄化係数、 $a \cdot b$  : パラメータである。

2.3 湖内流動モデルの概要

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。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<sup>2)</sup>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。

## 2.4 湖内生態系モデルの概要

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。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<sup>3)</sup>。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、鉄のサイクルや底質-水相互作用を考慮し、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、生物相による摂取、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。

なお湖内生態系モデルでは、前述のように有機物として COD ではなく Carbon 量 (TOC) を用いた解析を行っているが、最終的に COD で評価するために、再度 TOC を湖内水質の統計データから COD に換算するという操作を行っている。

## 3. シミュレーションの結果と検証

### 3.1 計算条件

2004年度(2004年4月1日~2005年3月31日)を対象として陸域水物質循環、湖内流動、湖内生態系の再現計算を行った。降水量については、2004年度のアメダスデータをティーセン分割して陸域のメッシュに割り振った。土地利用については、1997年度の国土数値情報土地利用3次メッシュデータと2004年度の市町別土地利用データを参照して、2004年度のメッシュデータを作成した。点源負荷については、2004年度のデータを元にメッシュ別負荷量を算定した。

各モデルの初期値について、湖内流動については、

計算開始時の流速は全て0とし、水温は計算開始時における層ごとの水温を全域にわたり適用した。湖内水質については、計算開始時における観測水質をスプライン補間して設定した。

### 3.2 計算結果と検証<sup>4)</sup>

#### (1) 河川流量・負荷量

琵琶湖流入河川のうち最大の流域面積を有する野洲川(流域面積:398km<sup>2</sup>,流域人口:133,645人,土地利用:山林・他68%,宅地・道路17%,水田9%,ゴルフ場4%,畑1%)において河川流量を検証した結果を Fig.2 に示す。時系列的に見ると平常時と降雨時の変化を精度よく再現することができた一方で、年間総流出量としては観測で4.35億t/年、計算で5.11億t/年とやや過大な結果となった。これは、野洲川の河川水が農業用水として他流域にかなり導水されており、例えば石部頭首工では最大取水量が6.8m<sup>3</sup>/sで、ここで取水された農業用水は野洲川に戻らない場合が多い一方、現在のモデルではこうした取排水過程を考慮していないことが一因と考えられる。

続いて通年の負荷量としての妥当性を検証するために、他年度のデータを含めた観測値と、計算値のL-Q図の比較を行った(Fig.3)。1ヶ月に1回の平常時観測データを用いて比較しているため、必ずしも降雨時の負荷量の妥当性を検証できるわけではないが、全項目についてL-Q図の傾きは概ね再現できている。一方で、TPについてはL-Q図のふくらみが計算で大きい結果となった。TPはCODやTNに比べて降水時に懸濁態成分として流出することが多く、その浮上・沈降のメカニズムがモデルで十分再現できていないことが原因であると考えられる。

#### (2) 湖内流動・水質

湖内流動モデルでの計算結果の一例を Fig.4 に示す(7月のもの)。琵琶湖には3つの環流が存在するといわれているが、本モデルにおいても図のように3つの環流が現れる時期が確認された。年間を通じた水温の水温分布、鉛直分布も概ね再現されており、水の流動と水温の変化を良好に再現できた。

湖内生態系モデルについて、湖内の環境基準点におけるCOD・TN・TP年間平均値の再現計算結果を Fig.5 に示す。横軸は観測地点のIDを示すが、琵琶湖の北湖(17A~12B)、南湖(9B~4A)共に地点ごとの濃度の差をよく再現できており、特に8Cは汚濁の進んだ赤野井湾のすぐ沖にあたり、陸域からの負荷量が湖内水質にもたらす影響を再現できていることが分かる。一方で南湖のTN・TPについてはばらつきが大きく、南湖の水質変動の複雑さに比してメッシュサイズが大きいこと、大量繁茂している沈水植物の影響などが要因として考えられる。

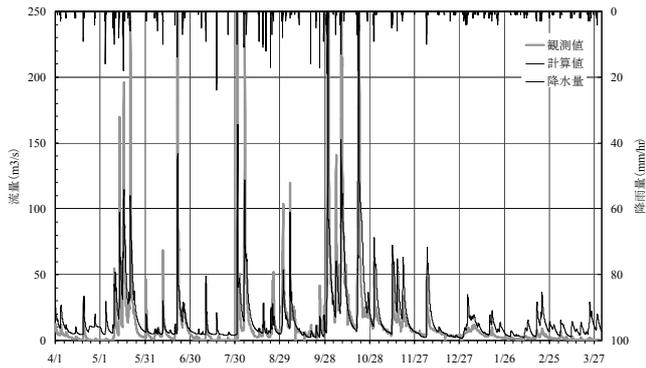


Fig.2: The Validation Results of River Discharge in Yasu River

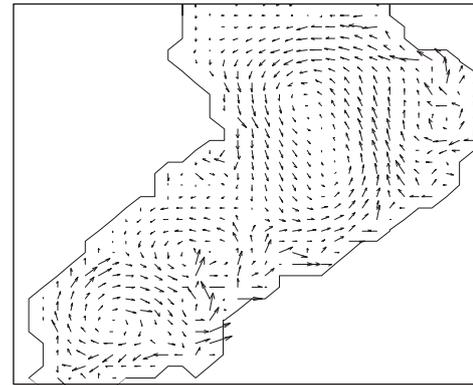


Fig.4: The Flow Direction in Lake Biwa in July

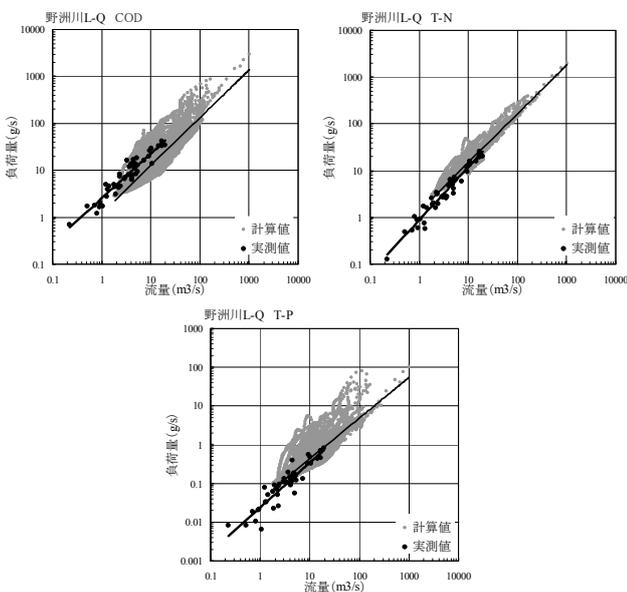


Fig.3: The Validation Results of L-Q in Yasu River

#### 4. まとめ

本研究では、陸域における水物質循環の物理的過程を考慮した分布型モデルと、湖内流動・生態系を考慮した3次元モデルを結合した湖沼流域水物質循環モデルを構築し、これを琵琶湖流域に適用した。この計算結果について、河川流量や水質、湖内水質等の観測値を用いて検証を行ったところ、河川流量・負荷量や湖内流動・水質について良好な再現結果が得られた。

今後は、平成19年度より実施している多様な河川や面源における降雨時調査の結果を活用してさらに面源負荷のパラメータの精度を高めると共に、有機物をCODではなく物質収支の取れるTOCで陸域から計算し、有機物の分解性も合わせて考慮することで、琵琶湖流域における水質汚濁メカニズムを解明していく予定である。

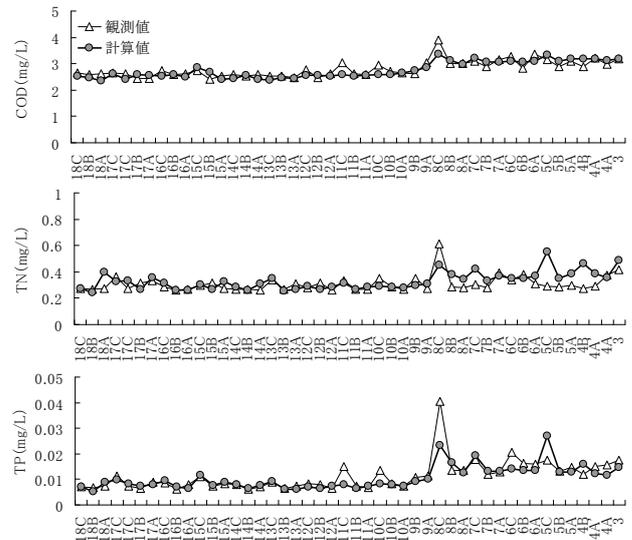


Fig.5: The Validation Results of Average Water Quality in 2004

#### 参考文献

- 1) 佐藤祐一・大久保卓也・金再奎・湯浅岳史・上原浩: 面源負流出メカニズムを考慮した流域水物質循環モデルの構築とその検証, 第11回日本水環境学会シンポジウム講演集, pp.120-121 (2008)
- 2) 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, 京都大学防災研究所年報, 26B-2, pp.531-542 (1983)
- 3) E. Komatsu, T Fukushima and H. Shiraishi: Modeling of P-dynamics and algal growth in a stratified reservoir mechanisms of the P-cycle and interactions between water and sediment, Ecological Modelling, 197, pp.331-349 (2006)
- 4) 佐藤祐一・大久保卓也・金再奎・小松英司・永禮英明・湯浅岳史・上原浩: 琵琶湖流域水物質循環モデル(その2)モデルの構造、計算事例, 第12回日本水環境学会シンポジウム講演集, pp.36-37 (2009)