

# 琵琶湖流域を対象とした水物質循環モデルの構築と行政施策への活用

## Construction of Lake Biwa Basin Hydrological and Material Simulation Model and its Application to Administrative Policy

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 佐藤祐一・大久保卓也・岡本高弘

### 1. はじめに

滋賀県では琵琶湖の水質保全のために下水道整備，河川水質浄化事業，環境に配慮した農法の普及など多様な施策を実施しており，その結果流域から排出される汚濁負荷量は減少してきたと考えられている．琵琶湖の水質も全窒素(TN)では2003年以降，全リン(TP)や生物化学的酸素要求量(BOD)では1979年以降漸減する傾向にあり，富栄養化の進行は一定程度抑制されていると考えられる．一方で化学的酸素要求量(COD)については1984年以降漸増から横ばいの傾向にあるなど，陸域からの流入負荷と湖沼での一次生産，また湖沼の水質の関係は十分明らかになっていない．CODとBODの乖離については，その分析方法の違いから，微生物では分解されにくい有機物(難分解性有機物)が増加してきたことが懸念されている．

このため，琵琶湖を取り巻く流域の水環境を把握し，効率的な水質保全施策を行うためには，各負荷源での負荷発生，気象の変化がもたらす陸域での水・物質の循環や湖内の水温と流動状況の変化，またそれらが湖内のプランクトンや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し，各種施策の実施に対する湖内水質の応答を精度良く予測することが必要である．

本研究では，琵琶湖流域における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，降水時を含む詳細な観測データを用いて検証した結果について述べるとともに，本モデルを第6期湖沼水質保全計画の予測計算に用いた結果について報告する．

### 2. 方法

#### 2.1 琵琶湖流域水物質循環モデルの概要

琵琶湖流域水物質循環モデルは大きく分けて以下3つのコンポーネントモデルより構成される(図1)．それぞれ気象や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<sup>1)</sup>．

- ①陸域水物質循環モデル：琵琶湖流域のうち陸域における水物質循環(水量・水質)をシミュレートする(500mメッシュ分布型モデルとして構築)
- ②湖内流動モデル：陸域水物質循環モデルの結果を受け，琵琶湖内の流動をシミュレートする(1kmメッシュ8層の3次元モデルとして構築)
- ③湖内生態系モデル：上記2モデルの結果を受け，琵琶湖内の生態系(水質)をシミュレートする(1kmメッシュ8層の3次元モデルとして構築)

陸域水物質循環モデルは6つの要素モデルから成り，河川流量や水質，地下水位や水質等をシミュレートする．例えば「地表流モデル」においては，無降雨時の面源負荷の堆積や降雨時の負荷発生のメカニズムが再現可能である．

湖内流動モデルは X, Y, Z 方向の運動方程式, 水温収支式, 連続の式を元に, 静水圧近似, Boussinesq 近似を仮定し, 陸域や地下からの流入水量を受けて, 流向や流速, 水温, 水位等を差分法により計算する.

湖内生態系モデルは, 物質の移流・拡散過程, 水-底質相互作用を含む湖内の生化学反応過程を基盤とする生態系モデルである. 本モデルでは水相は 6 つ, 底質は 3 つのコンパートメントより構成され, 陸域や底質からの負荷量や湖内流動の結果を受け, システム・ダイナミクスにより湖内の生態系や水質等をシミュレートする.

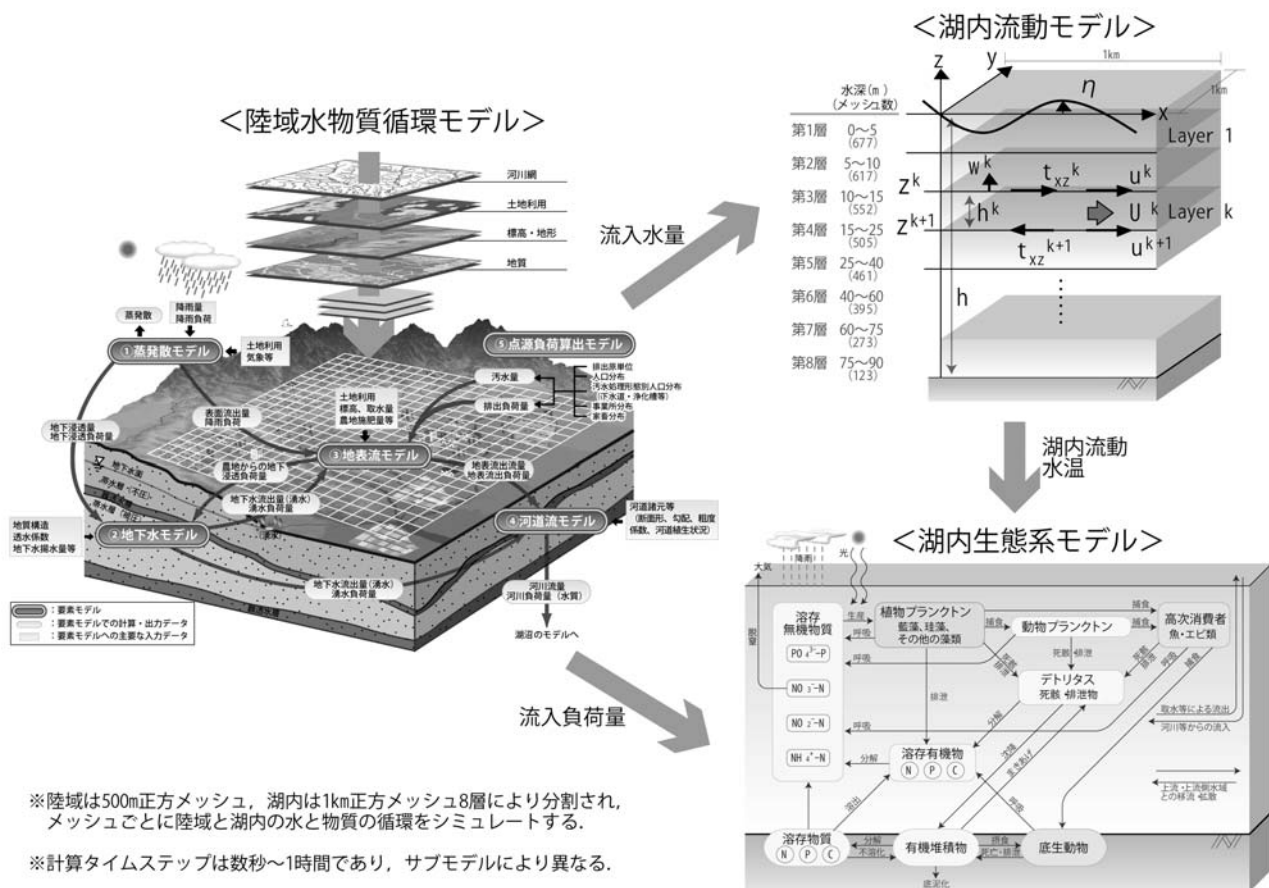


図 1 琵琶湖流域水物質循環モデルの概要

このモデルは従来 COD, TN, TP の 3 物質を中心とした解析を行うものであった<sup>1)</sup>が, 琵琶湖流域における有機物循環の様相を明らかにし, COD の漸増・横ばい傾向の要因について解析するため, 2.2 で述べる難分解性有機物の調査結果を活用し, TOC とその分解性を考慮したモデルに改良した<sup>2)</sup>. 具体的には, 有機物の分解性を考慮するにあたり, 「陸域水物質循環モデル」においては TN, TP の他, 難分解性有機物: RTOC (Refractory TOC: TOC のうち難分解性の画分) と易分解性有機物: LTOC (Labile TOC: TOC のうち易分解性の画分) を負荷発生から湖内流入まで解析するよう改良した. また「湖内生態系モデル」においては, 流入負荷や内部生産等に関する有機物を RPOC, RDOC, LPOC, LDOC の 4 成分で表し, 各成分の分解速度を湖水の分解試験結果等から設定することで, 湖内有機物濃度等を計算した.

## 2.2 琵琶湖流域における調査の概要

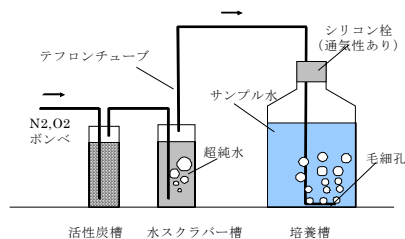
琵琶湖流域では行政・大学等により、多数の水質モニタリングが実施されている。モデルには多数のパラメータがあり、そのキャリブレーションや結果の検証を行うため、様々なモニタリングデータの活用や、モデルから見て必要な調査などを実施してきている。

まず、行政機関が中長期にわたり実施してきた定期観測として、国と県が共同で実施している1ヶ月に1~2回船舶により琵琶湖内47地点の採水を行う琵琶湖水質モニタリング(1979年~)と、1ヶ月に1回琵琶湖流域28河川の採水を行う河川水質モニタリング(1977年~)がある。これらのデータをモデルの基本的な検証対象とした。

一方で、特に陸域水物質循環モデルではそのモデル構造上、降水時を含む詳細な負荷量調査データが必要であった。そのため、市街地(大津市、草津市)や水田群(守山市、長浜市)、森林流域(安曇川中流)といった面源単位の調査の他、琵琶湖流入河川のうち流域面積第1位の野洲川(流域面積39,822ha)、水田流域の白鳥川(流域面積3,408ha)、複合流域の日野川(流域面積22,455ha)などの河川流域も対象として調査を行い<sup>3)</sup>、モデルのパラメータ調整を行った。調査は降水時における数分~数時間ピッチの連続採水の他、自動採水機を用いた概ね1日1回~2回程度、1年~数年単位といった中長期的なものも行った。

さらに難分解性有機物の調査にあたっては、琵琶湖における難分解性有機物の動態を把握するために、難分解性有機物の分析法を決定した<sup>2)</sup>。今井ら<sup>4)</sup>は、霞ヶ浦の溶存態有機物に細菌を含む湖水を植種して微生物分解させる実験を行い、100日間の生分解試験後に残存する有機物を難分解性有機物量と定義している。本研究では琵琶湖における試験結果を踏まえ、同方法を図2のように変更して、粒子態を含む全有機物を対象に難分解性有機物量を求めることとした。試験を行った対象は、下水処理場、農業集落排水処理施設、浄化槽、事業所等の各種点源排水、水田、宅地道路等の各種面源排水、及び流入河川、湖水である。

### 分析方法(生分解試験条件)



	湖水・流入河川水	点源・面源排水
分解期間	100日間	
温度	20℃	
光	暗(24時間)	
酸素供給	60rpm	曝気(エアポンペ)
植種の有無	無	有(BOD分析用植種)
栄養塩添加	無	有(必須元素の添加)
緩衝液添加	無	有(リン酸緩衝液)

生分解前(0日目)と生分解後(100日目)のCOD、D-COD、DOC、POCを分析

図2 生分解試験条件<sup>2)</sup>

## 2.3 第6期湖沼水質保全計画における現況再現・将来予測計算<sup>5)</sup>

第6期湖沼水質保全計画では、2010年度を現況再現対象年次、2015年度を将来予測対象年次としてシミュレーションを実施した。

そのためまず2010年度に関する各処理場の排水負荷量、処理形態別人口、産業系排水負荷量、土地利用等のデータを収集し、500mメッシュのGISデータとして整備した。当該年次のデータが得られない場合には、できるだけそれに近い年次のものを使うか、経年変化等から推定を行った。またモデルの再現性を確認するために、2010年度ならびにそれまでの5ヶ年におけるシミュレーションを行い、観測値との比較を行った。

2015年度の将来予測にあたっては、2010年度から2015年度までに対策を実施した場合（対策あり）、対策を実施しなかった場合（対策なし）の2つのシナリオを設定し、各種フレーム値を表1のように仮定した。2010～2015年度までの気象は2010年度と同様とし、6ヶ年の連続計算を行うことで2015年度の水質等の予測を行った。

表1 対策あり・対策なしにおけるフレーム値の設定<sup>5)</sup>

項目	対策あり	対策なし
処理場系	各処理場の処理区域内の処理人口変化に応じて排水量を変化させる。流域下水道については、処理施設の改善に伴う水質改善の影響を考慮する。	各処理場の処理区域内の処理人口変化に応じて排水量を変化させる。
生活系	2020年度末までの整備計画から、2015年度における集落別処理形態別人口を設定する。下水道接続率は2010年度と同等とする。	集落の人口が増加する場合には人口の増加分を合併浄化槽でまかない、減少する場合には処理形態ごとの人口比率を2010年度と同等として人口を減少させる。下水道接続率は2010年度と同等とする。
産業系	2010年度と同等とする。	対策ありと同様
面源系	滋賀県基本構想の土地利用推計を元に2015年度の土地利用を設定する。	対策ありと同様
負荷削減対策	2010年度の負荷削減対策から、環境こだわり農業、水質保全対策事業、内湖の浄化に伴う負荷削減量を追加する。	2010年度と同等とする。

## 3. 結果

### 3.1 難分解性有機物調査結果<sup>2)</sup>

2.2の方法に基づき算出した発生源別のTOCに係る溶存態と粒子態別の難分解性比率を図3に示す。難分解性比率は15%～79%の値を示し、発生源の種類によって顕著に異なることが分かった。また、難分解性有機物の溶存態と粒子態の内訳は、生活雑排水や製造業では溶存態比率が低く、下水道や農業集落排水処理施設、合併浄化槽では溶存態比率が高いことが分かった。

発生源の種類を同様に分類して、生分解前後のCOD/TOCを比較した。その結果、発生源の種類によって、COD/TOCは1.0～2.4と大きく変動し、COD/TOCの理論値（約2.7）よりもかなり小さいものが大半であった。すなわち、CODでは有機物の多くの部分が捉えられていないことが分かった。

湖水のモニタリングを水域別、四季別、水深別に行った結果からは、7地点中6地点においてRTOC濃度は溶存態が9割以上を占め、濃度も $1.0 \pm 0.1 \text{ mg/L}$ とTOCの平面分布、季節変動、鉛直分布に寄与する部分は見られなかった。一方河川水のモニタリング結果では、地点や季節による変動が見られ、湖水とは異なる傾向が見られた。

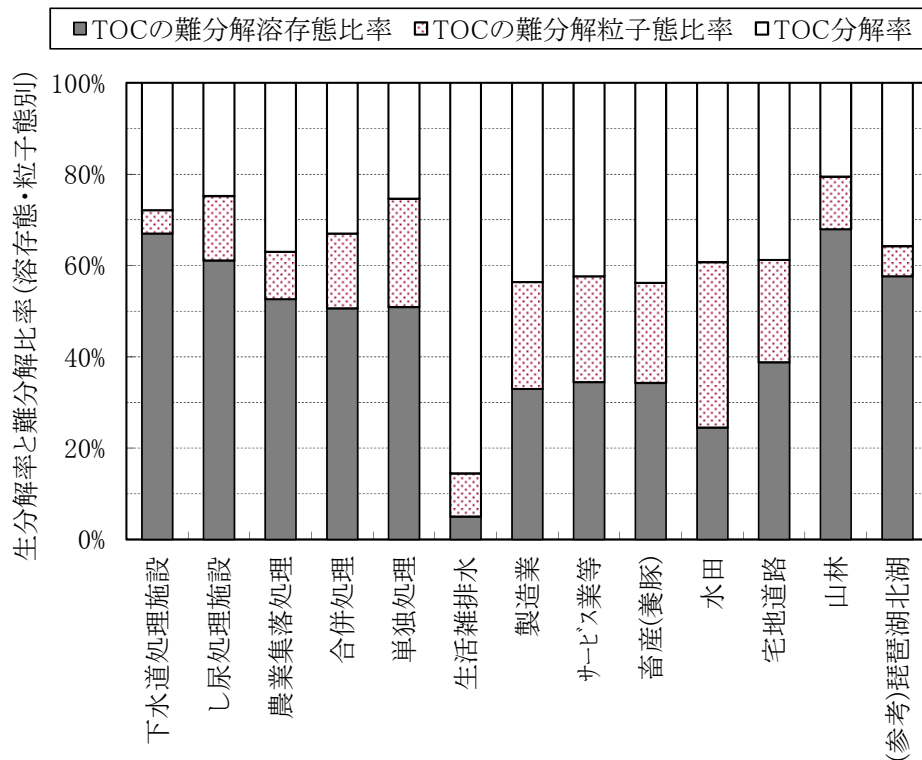


図3 発生源別の難分解性比率<sup>2)</sup>

### 3.2 面源・河川・湖沼における検証結果

例として、長浜市の水田群（11.8ha）における2007年の調査結果、ならびに野洲川における2006年度の調査結果を用いてモデルの検証を行ったものを図4に示す。水田、河川ともに降水に伴う出水や季節的な変化をモデルでも再現できていることが分かる。

続いて、TOC・TN・TPについて、2010年度における湖内各観測地点の観測値と計算値の年間平均値を示した結果を図5に示す（計算については、観測のあった日時における値を利用している）。北湖では沿岸、湖央や地点ごとの濃度のばらつきが概ね再現され、分布型モデルを用いることで陸域流入負荷を河川ごとに予測した利点を十分に反映した結果となった。一方で、南湖では北湖に比べて濃度が高い傾向は再現できたものの、TNやTPでは沿岸域を中心として詳細な濃度分布までは再現できないという課題は残された。

以上をもとに、2010年度における湖内の有機物収支の様相を描いたものが図6である。難分解性有機物の起源を、湖内の難分解性有機物に至るフローを用いて計算すると、陸域由来が6,929tで31.1%、湖内由来が15,354tで68.9%となり（合計22,283t）、湖内由来が陸域由来に比べ2倍以上多いという結果になった。したがって、難分解性有機物の動態については湖内における生産・分解等の機構が支配的であることから、そのメカニズムを詳細に検討していくことが必要である。琵琶湖では近年藍藻の割合が増加している傾向にあること、細胞容積の小さな植物プランクトンの割合が増加傾向にあることなども分かっており、これらとの関係についても調査・解析が必要である。

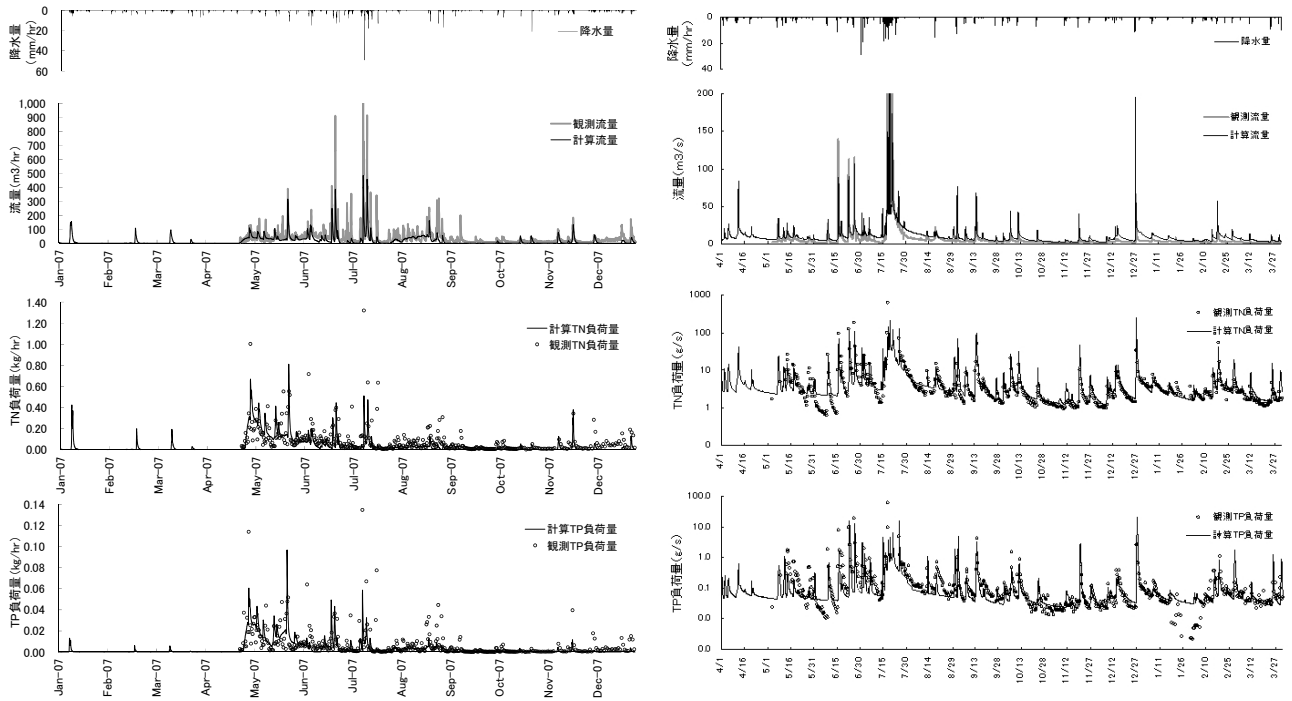


図4 流量・負荷量の再現計算結果（左図：長浜市水田群，右図：野洲川）<sup>6),7)</sup>

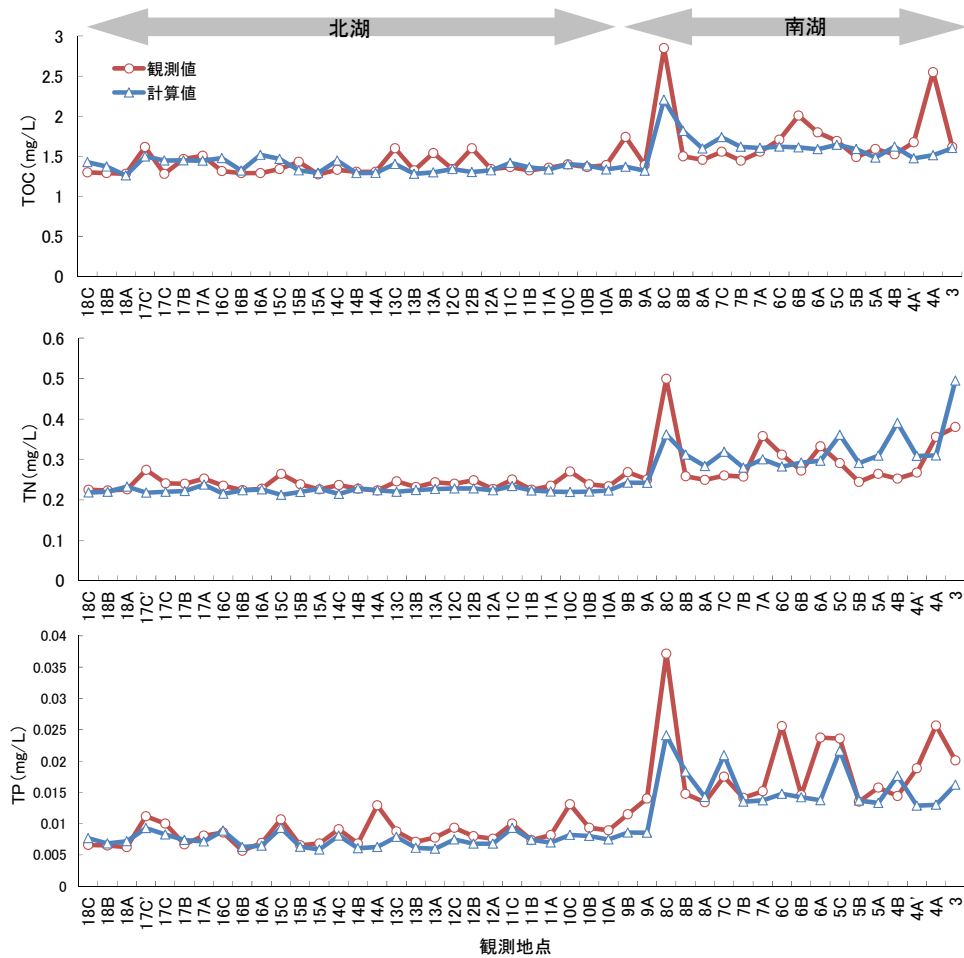


図5 湖内の各観測地点における水質年間平均値の再現計算結果<sup>5)</sup>



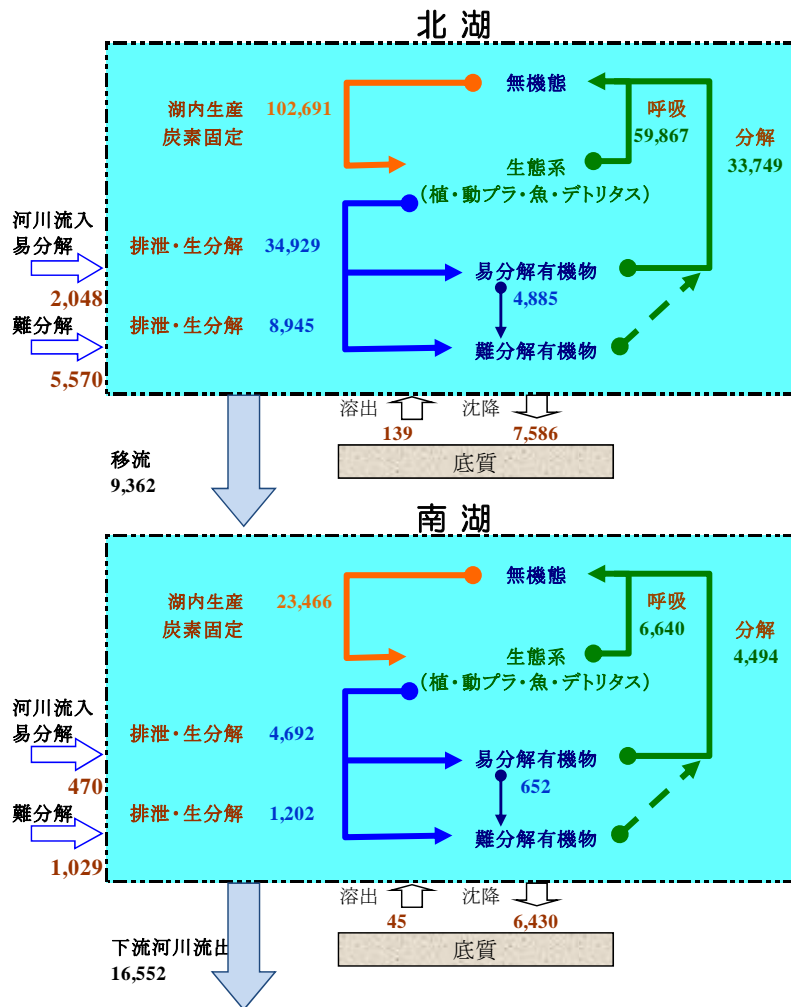


図 6 湖内有機物収支の結果 (2010 年度) <sup>5)</sup>

### 3.3 第 6 期湖沼水質保全計画における将来予測計算結果 <sup>2)</sup>

TOC について、1995 年度以降の陸域における発生負荷量と水質の観測・予測結果をまとめたものを図 7 に示す。負荷量について見ると、生活排水対策等により 2010 年度までは経年的に削減されてきたが、その大部分は易分解性画分の減少によるものであり、難分解性画分についてはあまり削減されていないことが分かる。また水質は負荷量の傾向とは対応しておらず、湖内有機物濃度には内部生産由来のものが大きく関与している可能性がここからも示唆される。

将来予測については、北湖では対策のあり・なしに関わらず水質は現状から横ばいとなっている一方で、南湖では対策なしの場合に水質がやや悪化する傾向が見られた。これは、主に南湖流域で 2015 年度までの人口増加が見られる地域が多く、その分を合併浄化槽でまかなうとした仮定等によるものと考えられる。しかしながら、下水道整備区域内に合併浄化槽を新たに設置することは考え難く、実際には対策ありのシナリオに近い形で対策が進むものと考えられる。なお窒素やリンについては、北湖で若干の濃度減少が見込まれた以外は TOC と同様の傾向が確認された。

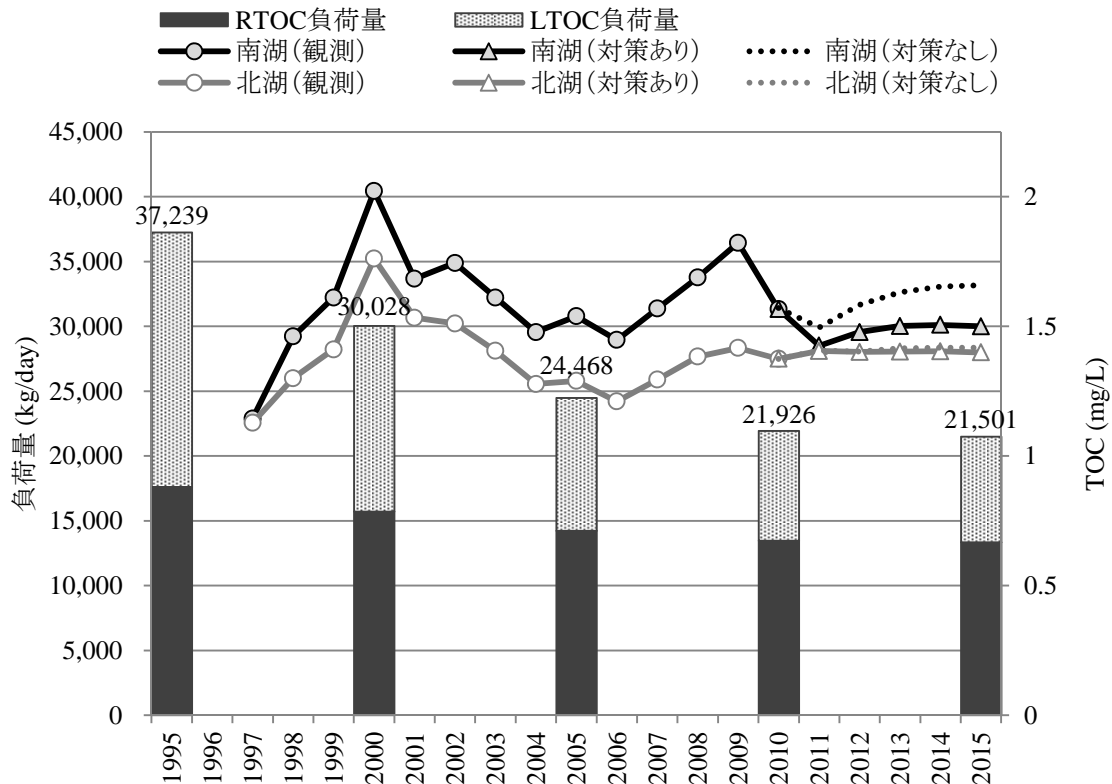


図7 TOC 負荷量・水質予測結果（2015年の負荷量は「対策あり」のものであり、「対策なし」は21,904kg/dayである）<sup>2)</sup>

以上の結果から、有機物濃度については内部生産による影響が大きく、陸域由来の負荷削減による大きな改善は見込めないことが考察される。一方で琵琶湖流域では、流域人口が1985年から2010年にかけて106万人から129万人に増加しているにもかかわらず、CODを除き水質の悪化傾向は見られていない。これは、これまでの浄化槽を含む生活排水対策等による結果であり、今後も同様の対策の維持・継続が求められる。また湖内の有機物負荷の挙動を把握するために、その主要因子である窒素やリンの影響と対策の評価がさらに重要になっている。

また琵琶湖では近年、深水層の溶存酸素濃度の低下や漁獲量の減少など、従来の有機汚濁・富栄養化対策だけでは対応できない新たな課題も生じてきており、より総合的な観点から水質の望ましい姿を描き出していく必要がある。そのためには、陸域由来の負荷と湖内水質の関連性を把握しておくことが前提条件であり、有機物量を間接的に測定するCODではなく、全量を捉えられるTOCやその分解性といった指標により把握していくことが求められる。

#### 4. おわりに

今日の湖沼流域の水質保全のあり方は転機を迎えている。従来は湖沼に流入する窒素やリン、CODを削減することで、湖沼内における植物プランクトンの一次生産や湖底における酸素消費を抑えることが第一義的に重要だと考えられてきた。そのような取り組みにより一定の水質改善が進んできたことは事実であり、また今後も改善の期待される湖沼が



多数存在するが、すでに琵琶湖のように従来の考え方による対策では効果に行き詰まりの見られる湖沼も出てきている。具体的には、以下のような点が挙げられる。

- ・流入負荷量を削減しても湖内水質が改善せず、環境基準が達成される見通しが立たない
- ・市民にとって水質改善効果が実感しづらい
- ・地球温暖化により湖内における水循環や生態系の様相が変化している可能性がある
- ・水質だけではなく水草や魚介類を含む生態系全体を俯瞰して対策を検討する必要があるが出てきている

これらも踏まえ、国レベルでは、湖沼の新たな環境基準として透明度や底層 DO を追加することが検討されており、また湖沼の有機物指標として COD<sub>Mn</sub> ではなく TOC を用いることも議論されている。こうした新たな動向を踏まえつつ、今後のモニタリングとモデルの連携や、成果の政策への反映等について検討していくことが必要である<sup>8)</sup>。

## 参考文献

- 1) 佐藤祐一・小松英司・永禮英明・上原浩・湯浅岳史・大久保卓也・岡本高弘・金再奎：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とその検証，水環境学会誌，34（9），pp.125-141，2011.
- 2) 佐藤祐一・岡本高弘：琵琶湖における水質保全対策とその効果に関するシミュレーション～第6期湖沼水質保全計画における予測結果から～，月刊浄化槽，24（3），pp.22-26，2012.
- 3) 例えば，大久保卓也・辻村茂男・川寄悦子・須戸幹・柴原藤善：ノンポイント負荷が琵琶湖水質に及ぼす影響の把握，滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書 平成17～19年度，4，50-64，2009.
- 4) 今井章雄・松重一夫・木幡邦夫・高村典子・井上隆信・野原精一・佐野友春・相崎守弘・福島武彦・小澤秀明・滝和夫・細見正明：湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究－特別研究－平成9年度－平成11年度，国立環境研究所特別研究報告，2001.
- 5) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター：第6期湖沼水質保全計画に係る将来水質予測シミュレーションについて，滋賀県環境審議会 水・土壌・大気部会資料，[http://www.pref.shiga.jp/shingikai/biwako\\_mizukankyoku/20111118.html](http://www.pref.shiga.jp/shingikai/biwako_mizukankyoku/20111118.html)，2011.
- 6) 佐藤祐一・大久保卓也・小松英司・上原浩・湯浅岳史・永禮英明・岡本高弘・金再奎：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（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－，滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 試験研究報告書，7，pp.32-46，2012.
- 7) 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：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.34-49，2009.
- 8) 佐藤祐一・岡本高弘：モニタリングとモデルの連携による湖沼流域管理，環境システム計測制御学会誌，16（4），pp.21-25，2012.