

〈特集〉

モニタリングとモデルの連携による湖沼流域管理

佐藤 祐一<sup>1)</sup>, 岡本 高弘<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター (〒520-0022 大津市柳が崎5-34 E-mail: sato-y@lberi.jp)

<sup>2)</sup> 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター (〒520-0022 大津市柳が崎5-34 E-mail: okamoto-takahiro@pref.shiga.lg.jp)

概要

琵琶湖流域では定期観測や自動観測による様々なモニタリングが実施されてきたが、財政状況の悪化や目的の再検討等により、より効果的なモニタリングを実施することが求められている。滋賀県ではモデルを活用して目的に沿ったモニタリングを実施し、行政施策に反映させるよう流域管理の仕組みを転換してきた。その経緯について説明するとともに、今後のモニタリングシステムの方角性について述べる。

キーワード：モニタリング, モデル, 琵琶湖, 流域管理, 行政施策

原稿受付 2012.1.10

EICA: 16(4) 21-25

1. はじめに

世界でも数少ない古代湖の1つであり、近畿1400万人の水源でもある琵琶湖とその流域では、環境の現状を把握し、より望ましい状態にすることなどを目的として、これまで様々なモニタリングが実施されてきた。

一方特に行政機関では、得られたデータが政策立案などに有効に活用されなければ、その必要性が問われかねない。近年の財政状況の悪化や設備の老朽化等を受けて、より効果的なモニタリングも求められている。

こうした背景から滋賀県では、とりわけ水質モニタリングに関しては、シミュレーションモデルと連携して、法的な長期モニタリングとともに目的に見合ったモニタリングを実施している。本稿ではこれらの経緯について述べるとともに、新しい観測技術も導入して琵琶湖における水質の課題に応えるためのモニタリングシステムの方角性について言及する。

2. 琵琶湖流域の水質モニタリングと課題

2.1 琵琶湖流域の水質モニタリング

琵琶湖流域では行政・大学・市民等により、多数の水質モニタリングが実施されてきた。本稿ではその中で、行政機関が中長期に渡り実施してきたものを紹介する。

水質モニタリングをデータ採取方法の観点から見ると、現地で観測あるいは採水し、実験室で分析を行うことで調査を行う「定期観測」と、センサーや分析の自動化により現地で調査を行う「自動観測」の2種類に大別される。定期観測では常に一定の分析精度が保

たれるというメリットがある一方、手分析に伴う一定の時間と手間が必要というデメリットがある。自動観測は定期観測では調査できない短い時間間隔で水質変動を把握でき、データ転送を加えるとリアルタイムモニタリングが可能となる<sup>1)</sup>。

定期観測としては、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(Fig. 1)。より以前からのものとしては、滋賀県水産試験場が実施している

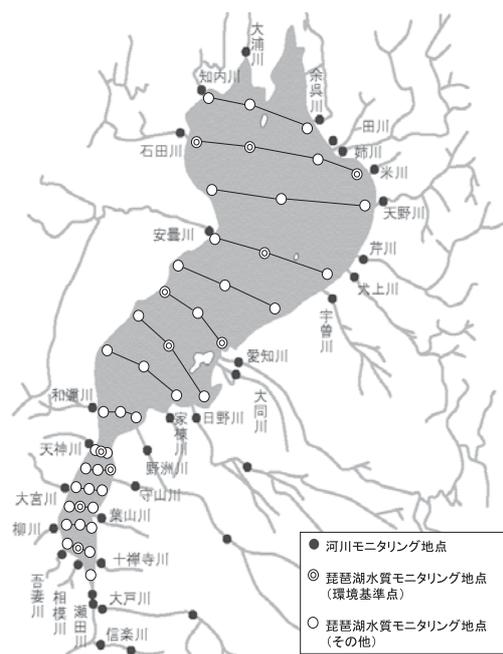


Fig. 1 Periodical Monitoring Points in Lake Biwa and Rivers<sup>2)</sup>

琵琶湖北湖 5 地点における水質調査（1950 年～）がある。

自動観測としては、滋賀県が 1～6 時間ごとに水質自動測定局（湖心局 3 地点、湖辺局 7 地点、河川局 8 地点）で常時監視（1972～2005 年）を実施していた。水温や pH、DO などのセンサー項目の他、COD、TN、TP などについても自動採水して分析を行う。国では 1～6 時間ごとに湖内 8 地点、河川 2 地点で水温や pH、DO、COD などの自動観測を行っている。

## 2.2 水質モニタリングの課題

自動観測は流域・水域の状況を詳細かつ迅速に把握できる魅力的なモニタリング手法であるが、施設の老朽化や陳腐化、財政状況の悪化等の理由により、滋賀県実施分については 2005 年には全地点で休止・廃止せざるを得なくなった。特に湖沼や河川の自動観測には法的な位置づけがなく、設置した自動測定局の構造や手法上からくる維持管理費が膨大であったため、施設の更新やモニタリングの継続には相応の理由が必要であった。しかし、琵琶湖内については水質が概ね安定しており定期観測で季節変動は把握できること、河川については流量の把握が難しく負荷量としてデータを蓄積し解析する技術や視点がなかったこと等から、十分な利活用がなされてきたとは言えなかった。

また琵琶湖では、1977 年に淡水赤潮が大発生したような危機的な状態は脱したものの、流入負荷を削減しても湖内水質が改善しない、湖底部で貧酸素状態が生じるといった新たな問題が生じている。自動観測に限らず、「何のために水質モニタリングを行うのか」という目的を再検討し、目的に応じてより効果的なモニタリングを実施することが求められていた。

## 3. 水質モニタリングとモデルの連携

### 3.1 モニタリングの目的の再検討

滋賀県では、2005 年に琵琶湖流域における新たな水環境監視体制のあり方について専門的な見地から検討し<sup>3)</sup>、それを受けて 2006 年にはモニタリングシステムを構築するための具体的手法について取りまとめた<sup>1)</sup>。この中では、これまでのモニタリングの課題として、「水環境を巡る物質収支を十分に明らかにできないため、流域における汚濁負荷削減対策と水質の関係について把握できていないなど、必ずしも水質形成機構の解明に有効に寄与する体系が構築されていない」ことが挙げられた。また今後のモニタリングの目的としては、「環境基準達成状況の監視など水質の長期的な変動と現状の把握に加え、水環境保全に向けた課題を的確に踏まえ、対策につなげる情報の取得」が掲げられた。その枠組みとして、モデルを活用して物

質収支や水質形成機構を把握し、様々な条件を想定した琵琶湖水質の将来予測を行うことなどが提案された。データをモデルで解析し、対策に結びつけていくという一連の流れの中でモニタリングが位置づけられたのである。

こうした考え方は行政組織にも反映された。滋賀県では、従来琵琶湖流域の水質モニタリングは「滋賀県立衛生環境センター（現：滋賀県衛生科学センター）」が、琵琶湖研究は「滋賀県琵琶湖研究所」が中心に担ってきたが、前者の環境部門と後者が統合し、2005 年に「滋賀県琵琶湖環境科学研究センター」（以下「センター」）が設立された。これにより、モニタリングとそのデータの解析、結果の情報提供、研究課題へのフィードバックがより一体のものとして実施できるようになった。

### 3.2 琵琶湖流域水物質循環モデルの構築

上記の目的を実現するためには、流域で実施される様々な対策を評価できる水質シミュレーションモデルが必要である。しかし当時滋賀県には自前のモデルが存在せず、必要に応じて大学やコンサルタント等に委託発注するという状態が続いていた。モニタリングとモデルの担当者が常に議論しながら検討を進め、複雑化する水質変動や行政ニーズに応じて随時対策等の評価を行うためには、どうしても滋賀県独自のモデルを構築することが必要であった。

そのため、2005 年より独自モデルの構築が進められた。構築にあたっては以下 2 つの要件を考慮した。

- ① 水質保全対策の多くは陸域で実施されるため、陸域における地域ごとの詳細な解析が可能であること
- ② モデルをゼロから構築するのは多大な労力と時間を要するため、すでに他流域で適用実績があり、かつそれを琵琶湖用にカスタマイズできること

外部の研究者・実務者の協力を得て、すでに霞ヶ浦や印旛沼、琵琶湖、ダム湖等で適用実績のあったモデルを組み合わせ、産官学連携により「琵琶湖流域水物質循環モデル」が構築された（Fig. 2）。モデルの詳細については佐藤ら<sup>4,5)</sup>を参照されたい。

### 3.3 モニタリングとモデルの連携による湖沼流域管理

琵琶湖流域水物質循環モデルは、それまで蓄積されてきた琵琶湖流域の水質モニタリングの結果も活用し、2006 年には陸域から湖内にかけての水文・水質の状況を一定再現できるようになった。これを受けて、2006 年には第 5 期湖沼水質保全計画に、2007 年には流域別下水道整備総合計画（流総計画）に係る将来水質予測計算に活用された。モニタリングデータをモデ

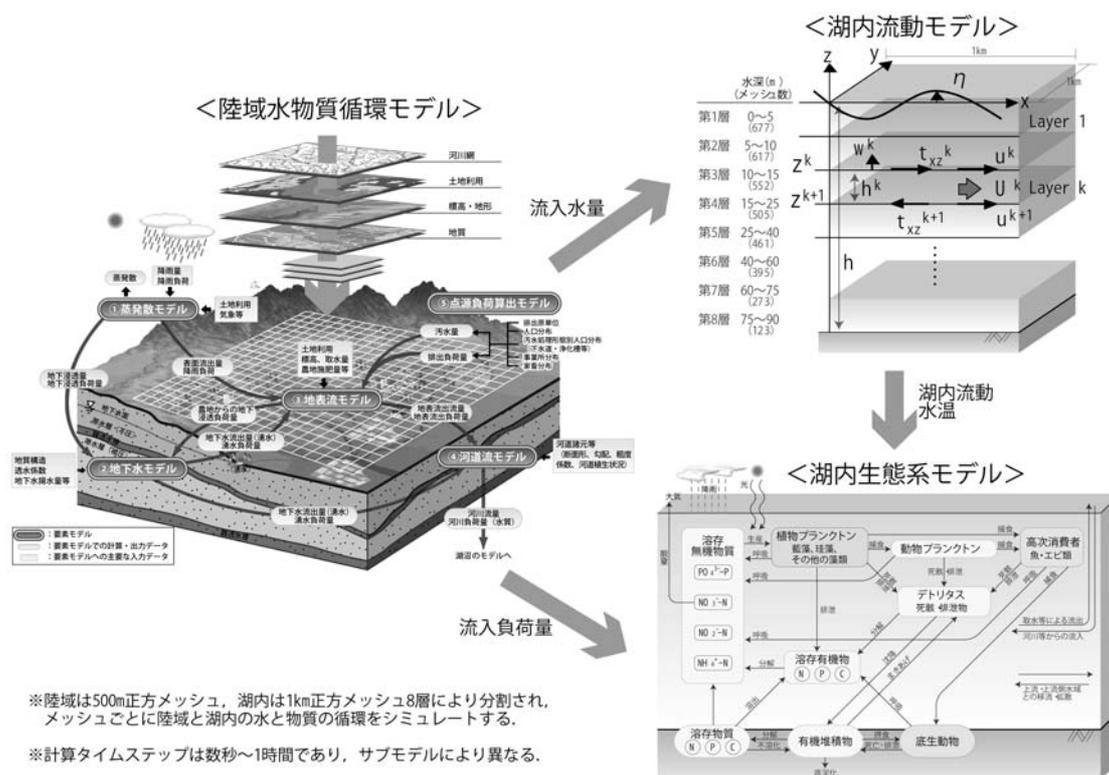


Fig. 2 The Outline of Lake Biwa Basin Hydrological and Material Cycle Simulation Model<sup>4)</sup>

ルで解析し、対策を実施したときの将来予測を行うという当初の目的に沿った展開がなされたと言ってよいだろう。

一方で既存のモデルでは対応できない課題も明らかになった。COD や窒素、リンの流入負荷は削減されているにもかかわらず、環境基準項目である湖内COD濃度は依然改善の傾向を示さない問題はこれまでも指摘されていた。しかし、流入負荷の増減が湖内水質の悪化・改善に直接結びつく従来のモデルでは、こうした現象を再現することができなかった<sup>6)</sup>。モデルにおける有機物の生成・分解に関わる機構を抜本的に見直し、有機物を中心とした水質汚濁メカニズムを解明することが急務となった。

見直しのポイントは、モデルで用いる有機物指標であった。湖沼における有機物指標は、1971年に環境基準が設定されて以降過マンガン酸カリウムで酸化するCOD<sub>Mn</sub>が採用されているが、これにはかねてから多くの問題点が指摘されてきた<sup>7)</sup>。特にCOD<sub>Mn</sub>は物質収支が再現できないという点がモデルで用いる上で致命的な問題点であった。そこで、COD<sub>Mn</sub>ではなく、有機態炭素の全量を測定するTOCを用いることにした。また、同じ有機物指標の1つであるBODは減少傾向にあり、微生物では分解されにくい(難分解性)有機物の増加が懸念されていることから<sup>6)</sup>、TOCを「難分解性有機物」と「易分解性有機物」の2種類に分類してモデルに用いることにした。

しかし日本では有機物指標としてCOD<sub>Mn</sub>を、欧米でもCOD<sub>Cr</sub>(COD<sub>Mn</sub>より酸化力が強く国際規格(ISO6060-1986)にも採用されている)を用いることが一般的であったため、TOCやその分解性に関する発生源別負荷量の知見は極めて限られていた。そこでモデルに必要と考えられるデータを明らかにし、それを取得するためのモニタリングを実施していくことにした。具体的には、点源の発生源別負荷量については、過去にデータの蓄積がなくまたモデルにおける有機物負荷量の多いものから優先的にTOC等の調査を進めた。面源については、モデルにおいて降雨時の負荷量に関するパラメータの感度が非常に高かったことから、水田、市街地、森林等の各種面源や、土地利用が特徴的な複数河川の流末における降雨時調査を実施した。これによりモデルでTOCとその分解性を考慮した琵琶湖流域の水質の現況再現ができるようになった。その結果、琵琶湖における有機物収支の概要を明らかにし、湖内に存在する難分解性有機物の約7割が内部生産由来、約3割が陸域由来と、湖内由来のものが卓越することが分かった<sup>8)</sup>。

以上で改良されたモデルは、2011年の第6期湖沼水質保全計画で将来予測を行う際に活用された。この結果を受けて滋賀県環境審議会からは、難分解性有機物の発生メカニズムおよび影響把握についての調査結果を踏まえ、TOCなどの有機汚濁等の新たな指標による評価や必要な対策について検討を進める旨が答申

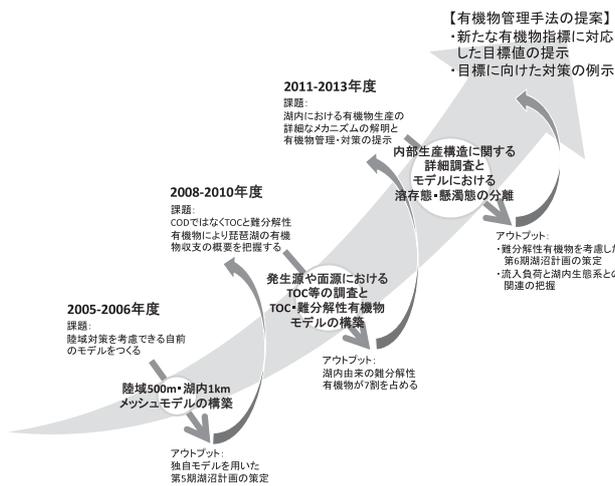


Fig. 3 Policy Making by Combining Monitoring and Modeling

された。今後、有機物の内部生産構造に関する詳細調査や、琵琶湖の有機物の9割を占める溶存態の収支を明らかにするためのモデルの改良を進め、最終的には新たな有機物指標に対応した目標値の提示や対策の例示など、有機物管理手法の提案を行っていく予定である (Fig. 3)。

#### 4. 今後のモニタリングシステムの方向性

日本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

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システムの方向性を検討していくことが必要である。

例えば水温やDOはセンサー項目であるため、自動観測によりモニタリングすることが適している。近

年大きく進化している計測技術やソーラー電源、データ解析技術を活用し、琵琶湖においては現在休止中の湖心局に水温・DOのデータロガーを設置することで、鉛直混合や湖底における貧酸素状況、物質循環や生物代謝の特性<sup>9)</sup>等を明らかにすることができる。透明度をはじめとする各種水質項目については衛星画像を使った解析も研究され始めている (例えば Oyama et al.<sup>10)</sup>)。これらとモデル解析を組み合わせれば、定期観測だけでは得られない新たな知見が明らかになり、湖沼生態系の現象解明や今後の対策の検討が飛躍的に発展する可能性がある。

#### 5. おわりに

滋賀県では、モニタリングとモデル構築のスパイラルアップによって、複雑化する政策立案プロセスを支援するという仕組みをつくりあげてきた。ここで紹介したような水物質循環モデルの構築には、時間間隔の短い詳細なデータが必要とされるため、モニタリングにかかる労力や経費削減の観点からも高精度な自動観測に対するニーズは極めて高い。行政が最新の動向や課題を発信し、それを解明・解決するための方向性や技術を大学等の研究者が提示し、具体的な施設や機器を民間企業が開発するというような産官学の枠を超えた連携により、湖沼流域における自動観測がさらに進むことを期待したい。

なお最後に、筆者らの経験上、モニタリングとモデルの連携による湖沼流域管理を行うには、技術的な問題よりもむしろモニタリング、モデル、行政の各担当者が日常的にコミュニケーションを取り、目標像を共有しておくことが最も重要であることを強調しておきたい。

#### 謝辞

本稿で述べたモニタリングの実施にあたっては、滋賀県琵琶湖環境科学センター総合解析部門の大久保卓也氏や環境監視部門、環境省水・大気環境局水環境課、滋賀県琵琶湖環境部琵琶湖政策課等の関係各課、(財)琵琶湖淀川水質保全機構等の皆様による多大なご支援・ご協力をいただきました。また琵琶湖流域水物質循環モデルは、パシフィックコンサルタンツ(株)、岡山大学永禮英明准教授、(株)環境情報コミュニケーションズ小松英司氏との共同で構築しているものです。ここに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 滋賀県琵琶湖環境部：新たな琵琶湖および流域の水環境モニタリングの具体的検討について (2006)

- 2) 滋賀県：滋賀の環境 2011 (2011)を元に筆者作成
- 3) 滋賀県琵琶湖環境部：琵琶湖および流域の水環境モニタリングのあり方について (2005)
- 4) 佐藤祐一, 小松英司, 永禮英明, 湯浅岳史, 上原 浩：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(2), pp. 21-24 (2010)
- 5) 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)
- 6) 岡本高弘, 早川和秀：琵琶湖における溶存有機物の現状と課題, 水環境学会誌, 34(5), pp. 151-157 (2011)
- 7) 福島武彦, 相崎守弘, 松重一夫, 今井章雄：湖沼の有機物指標, 水環境学会誌, 20(4), pp. 238-245 (1997)
- 8) 佐藤祐一, 岡本高弘, 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を用いた有機物収支の推定, 日本陸水学会第 75 回大会講演要旨集, p. 212 (2010)
- 9) 天野耕二, 福島武彦, 松重一夫：湖沼における DO と pH の連続モニタリング結果を用いた物質循環, 生物代謝特性の評価方法, 水環境学会誌, 21(2), pp. 112-118 (1998)
- 10) Y. Oyama, B. Matsushita, T. Fukushima, T. Nagai and A. Imai : A new algorithm for estimating chlorophyll-a concentration from multi-spectral satellite data in Case II waters : a simulation based on a controlled laboratory experiment, International Journal of Remote Sensing, 28 (7) , pp. 1437-1453 (2007)