

琵琶湖流域の水質シミュレーションモデルの構築

金再奎・佐藤祐一・内藤正明・高田俊秀・

永禮英明¹⁾・小松英司²⁾・上原 浩³⁾・池田有希子⁴⁾

要 約

本研究では陸域・湖内を含めた流域全体での人間活動の変化による将来の琵琶湖の水質を予測するために、陸域－湖内流動－湖内生態系を結合した数値モデルを開発し、数値シミュレーションを行った。2000年の再現計算の結果、水量・水質ともに概ね観測データと一致し、シミュレーション結果の妥当性が確認された。

1. はじめに

滋賀県では琵琶湖水質保全のために多様な施策を実施している。これらの施策の効果を予測するとともに、一層効果的な施策展開を図ることが求められている(佐藤ら, 2006)。このためには、琵琶湖を取り巻く流域環境の全容を把握し、施策の展開に伴う琵琶湖や地域ごとの水量・水質の変化を精度良く予測するツールが不可欠である。

湖沼およびその流域の水環境を再現・検証し、今後の変化を予測するツールとして数値モデルによるシミュレーションがよく用いられる。北澤ら²⁾によると、琵琶湖を対象とした数値シミュレーションは1970年代から行われ始めたが、当初は湖内流動場と湖内生態系それぞれ独立に行われていたものが、近年は流動場が生態系に及ぼす影響に関心が集まり、湖内流動場モデルと湖内生態系モデルの結合モデルを用いた水質解析がよく行われているとしている。

しかし、琵琶湖の水量・水質は、湖自身の変化や反応のみならず陸域での人間活動の変化によっても影響される。特に、施策の展開に伴う琵琶湖や地域ごとの水量・水質の変化を精度よく予測するためには、陸域での水物質循環の再現が不可欠であるが、陸域から湖内までを統合

的に捉えて解析している例は少ない。

そこで、本研究では陸域・湖内を含めた流域全体での管理施策が琵琶湖の水質改善にもたらす効果を定量的に予測できる水質シミュレーションモデルの構築を目的とする。

本報では主に2000年データを用いてモデルを構築し、数値シミュレーションを行い、観測結果との比較によってモデルの再現性の検討を行ったので報告する。

2. モデルの構築

本研究におけるモデルの全体像を図1に示す。本研究のモデルはGIS(地理情報システム、ESRI社ArcGIS)をプラットフォームとして、大きく分けて、モデル作成に必要なデータを整備する「流域情報データベース」と、琵琶湖および流域の水物質の循環をシミュレートする「数理モデル群」で構成されている。数理モデル群は、さらに、次の3つの要素で構成される。①人工系モデル、蒸発散モデル、地下水モデル、地表流モデル、河道流モデル、負荷量分割モデルの6つのサブモデルで構成され、陸域における水物質循環(水量・水質)をシミュレートする陸域モデル ②陸域モデルの結果を受け、

1) 京都大学大学院工学研究科、2) 東北大学大学院環境科学研究科、3) (株)パシフィックコンサルタンツ、4) 滋賀県水政課

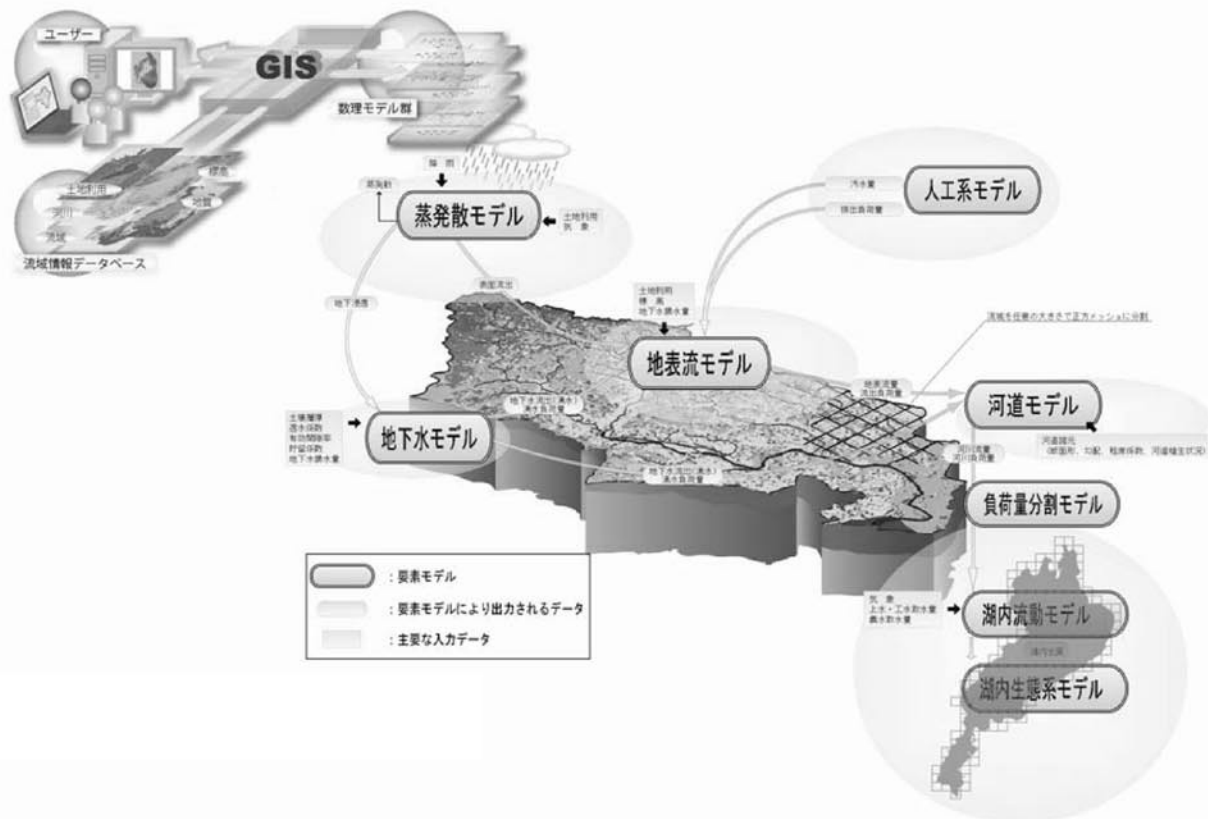


図1 本研究におけるモデルの全体像 (グラビア 3 頁参照)

琵琶湖内の水の流動をシミュレートする湖内流動モデル ③陸域と湖内流動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湖内生態系モデルで構成されている。

すなわち、本研究のモデルは、琵琶湖流域の陸域での水物質循環を対象にした陸域モデルに、琵琶湖の湖内を対象にした流動・生態系モデルを融合したモデルである。このモデルにより、流域の上流から河口を経て最終的に琵琶湖へ至るまでのシームレスな水物質循環モデルとして取り扱うことができる。そして、各モデルは単体のエンジンとして起動するが、GISをプラットフォームとして、パラメータの確認と修正、施策の選択、モデルの実行、結果の可視化による水物質循環モデルと流域での施策効果の検討など一連の操作が同一の画面上で行うことができる。

2.1 琵琶湖および流域のメッシュ分割

図2に琵琶湖およびその流域のメッシュ分割方法を示す。陸域については500mのメッシュに区切り、湖内については水平方向には1,000mのメッシュに、鉛直方向には表1に示す水深にて湖内を8つの層に区切り、各メッシュおよび層について計算を行う。

2.2 流域情報データベース

流域情報データベースでは、数理モデルの作成に必要なデータや琵琶湖に関する物理、化学、生物的データに加えて、水環境に影響を及ぼす流域での人間活動に関するデータが整備されている。具体的には発生する汚濁負荷量を推定するためのデータや、数理モデルの構築および検定のためのモニタリングデータ等流域や琵琶湖の水環境に関するほとんどすべての情報が陸域

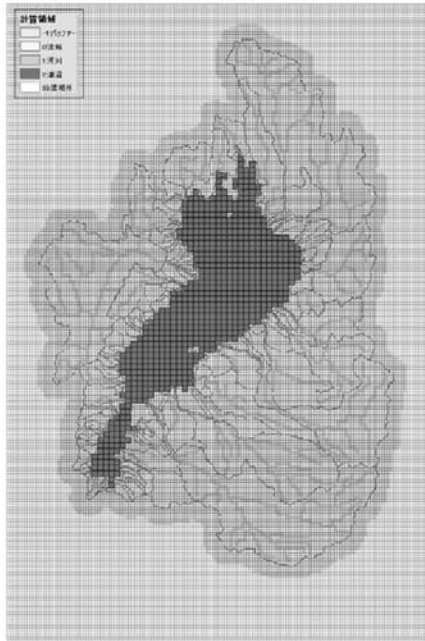


図2 琵琶湖流域のメッシュ分割
(グラビア3頁参照)

は500mメッシュで、湖内は1kmメッシュでGIS上に整備されている。

2.3 陸域モデル

陸域モデルは、パシフィックコンサルタンツ株式会社のSIPHERモデル(佐藤ら, 2005)を雛形として、これを琵琶湖の流動や生態系モデルと結合が可能のようにカスタマイズしたものである(佐藤ら, 2006)。

陸域モデルの特徴は次の4点である。①任意地点(メッシュ)での水・物質の挙動の解析・出力が可能な分布型モデル ②平常時、降雨時を含めた任意時間での解析が可能な非定常モデル ③GISを介しての流域データのモデルへのインプットデータ作成、解析結果の格納、可視化が可能なGIS連成型モデル ④雨水浸透マス設置や生活排水対策等、様々な水循環健全化施策による改善効果を解析することが可能な施策指向型モデルであること。

そして、陸域モデルは、人工系モデル、蒸発散モデル、地下水モデル、地表流モデル、河道流モデル、負荷量分割モデルの6つのサブモデルで構成され、陸域における水物質循環(水量・水質)をシミュレートする。

表1 湖内鉛直方向の層の設定

	水深(m)	メッシュ数
第1層	0 ~ 5	677
第2層	5 ~ 10	617
第3層	10 ~ 15	552
第4層	15 ~ 25	505
第5層	25 ~ 40	461
第6層	40 ~ 60	395
第7層	60 ~ 75	273
第8層	75 ~ 90	123

2.3.1 人工系モデル

閉鎖性水域の汚濁問題に対して適切な対策を講じるためには、流域での人間活動による水域へのインパクトの定量化、すなわち、流域からの排出負荷量と水域への流入負荷量を正しく見積もることが非常に重要となる。その際、地域特性をも考慮した水質管理のためには、総流入負荷量の把握だけではなく、任意の地域からの排出負荷量とそれらの空間的分布の把握も重要である。

そのため、本モデルでは任意の地域や各々のシナリオでの様々な流域環境の変化による流入負荷量の変化を、定量的かつ容易に比較評価できるように、メッシュ単位(陸域は500m、湖内は1,000m)でGIS上に整備されている発生源データを用いてメッシュ毎の点源排出負荷量を推定する。

2.3.2 蒸発散モデル

蒸発散モデルは、流域に降った雨を、土地利用に応じて、蒸発散・地下浸透・表面流出に分配する要素モデルである。地表面に表層土壌層とその層にある土壌水分量を仮定し、土壌層への水の出入りを考えることによって、蒸発散量・地下浸透量・表面流出量を計算する。

また、蒸発散モデルはメッシュを計算単位として計算する。なお、蒸発散モデルにより計算される地下浸透量は地下水モデルへ、表面流出量は地表流モデルへ受け渡される。

2.3.3 地下水モデル

地層構造は5層（透水層・難透水層・透水層・難透水層・透水層）とする。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次元多層浸透流モデルにより解析する。また地下水質は、平面2次元移流拡散方程式により解析する。

2.3.4 地表流モデル

正方メッシュで分割された流域メッシュにおいて、kinematic-wave モデルを用いて、平面二次元不定流として計算する。地表面の汚濁負荷の流達は、地表面の水の流動により生じるメッシュ間移流負荷と、該当メッシュで発生する人工系排出負荷、自然系排出負荷、湧水負荷とを用いて、メッシュ単位での収支式により計算を行う。面源からの排出負荷については、堆積負荷量を考慮し、雨天時の発生汚濁負荷量を計算する。

2.3.5 河道モデル

河道における流れは、1次元 kinematic-wave モデルにより計算する。地表流モデルにより計算される流域メッシュからの地表流量、および地下水モデルにより計算される地下水の湧出量を入力条件として計算を行う。河道における物質の挙動（流達）は、流域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。

2.3.6 負荷量分割モデル

統計データに基づく河川ごとの水質特性に応じて、水質項目を細分化する。

2.4 湖内流動モデル

層位モデルを用いた準3次元解析が可能な湖水流動モデルを作成する。流れの解析に用いる基礎方程式は静水圧近似と Boussinesq 近似を仮定した非圧縮性流体の連続の式および運動

方程式、水温収支式とした。

琵琶湖では水平方向の渦動粘性係数として10~30 m²/s 程度の値が用いられている。本研究ではこれらの値を参考に30 m²/s とした。一方、鉛直方向の渦動粘性係数と拡散係数はリチャードソン数に基づく成層化関数により計算した。

2.5 湖内生態系モデル

琵琶湖における富栄養化現象は、湖内の生物の増殖、死滅、沈降、プランクトンの取り込みによる無機態栄養塩の有機化、あるいは分解による無機化等の過程を組み入れた生態系モデルで表現する。

本研究では、湖内の生態系の基本的な枠組みとして図3に示すようなコンパートメントで多層的に構成されたモデルを定式化する。

グリッドモデルでの現在の生態系モデルの多くは、一次捕食者である単一の動物プランクトン程度までを含む低次生態系モデルである。しかしながら、本研究では、貝類および魚類等の高次捕食者のダイナミクスを取り入れた群集共存モデルを構築し、富栄養化での捕食者-餌の関係に伴う力学を明確にモデル化する。

コンパートメントは、植物プランクトン、動物プランクトン、高次捕食者、懸濁態有機物、溶存態有機物、溶存態無機物を考え、それぞれの間で行われる物理-生化学的循環を記述する。

また、ベントスを中心とした底生生物の生態系についても考慮する。これらの基本方程式群は、各状態変数の輸送方程式に生物過程の増加、減少を負荷項に加えたもので表現する。

3. 計算条件

3.1 陸域モデルの計算条件

本研究では現況再現対象としては、2000年1月1日~12月31日の1年間とし、2000年における社会条件、気象条件等のデータを用いた。計算のメッシュサイズは500m（図1参照）であり、計算ピッチは、計算結果が安定し、なお

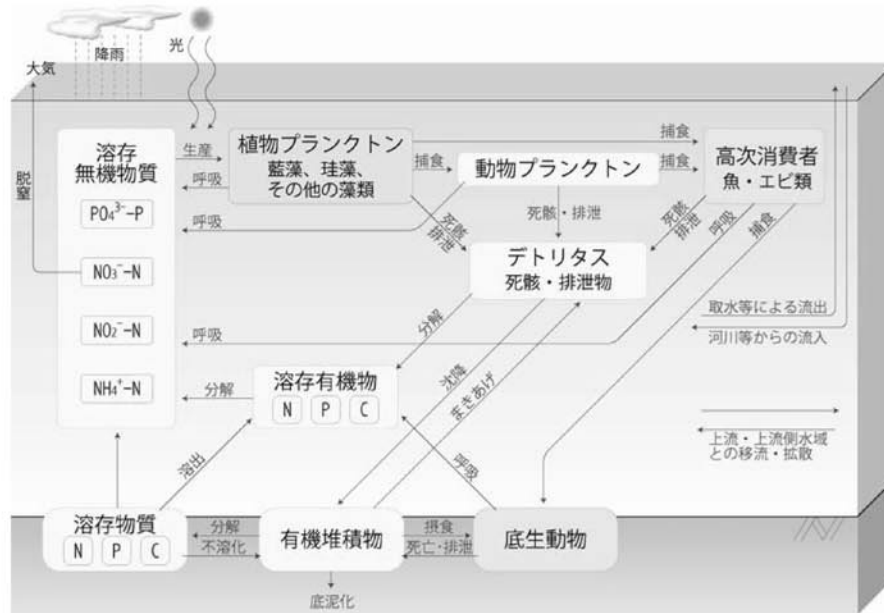


図3 水質・生態系モデルの概念図
(グラビア3頁参照)

かつできるだけ短時間で計算が終わるように、蒸発散と地下水モデルは 3,600 秒、地表流と河道流モデルは 600 秒にする。特に、地下水モデルにおける地層構造は透水層、難透水層で構成される 5 層とし、地下水位、地下水水質の初期条件は、年間降雨量程度の降雨を定常的に与えて長期間 (60 年間) の計算を行い、地下水位がほとんど変化しなくなった時点初期条件として与える。また地下水境界条件は滋賀県ボーリング調査データから作成する。

また、琵琶湖流域における COD、TN、TP の浄化係数は土地利用ごとに設定する。河道モデルにおける粗度係数は 0.03 とする。

各流域に関する負荷量分割モデルのパラメータは、滋賀県琵琶湖・環境科学研究センターによる 1997 年 4 月から 2004 年 3 月までの月一回の定期水質観測データから算出する。データのない流域については、他流域の平均的なパラメータを与えるものとする。降雨に関する負荷量分割モデルのパラメータは、滋賀県琵琶湖・環境科学研究センターによる 2000 年 4 月から 2005 年 3 月までの月数回の降雨水質観測データから算出する。

3.2 湖内流動モデルの計算条件

湖内モデル (流動・生態系) においては、湖内を水平方向 1km のメッシュに区切り、鉛直方向には水深ごとに湖内を 8 つの層に区切り (図 2、表 1 参照)、メッシュおよび各層について計算を行う。

鉛直方向渦動粘性係数は $2.0e-3 \text{ m}^2/\text{s}$ を、鉛直方向渦動拡散係数は $1.0e-4 \text{ m}^2/\text{s}$ を採用する。長波放射量 (Ql) の計算式は、下記の式を採用する。

$$Ql = 0.96 \times 5.67e-8 \times (VL_{1,t} + 273.15)^4 \times a_1 \times a_2 + 16 \times 0.96 \times 5.67e-8 \times (VL_{1,t} + 273.15)^3 \times a_3$$

$VL_{1,t}$: 第 1 層の水温

a_1 : 水蒸気圧の影響項

a_2 : 雲による影響項

a_3 : 水温と気温の差

2000年を対象として、陸域モデルの計算結果（湖流入流量）、彦根气象台等で観測された気象データ、洗堰等の流出量データをもとに、琵琶湖内部における水の流動（流向・流速）および水温の分布を計算する。

3.3 湖内生態系モデルの計算条件

モデルの初期値は、平面分布についてはモニタリングデータから IDW 法を用いて内挿補完して設定する。そして、鉛直分布については、鉛直分布モデルにより 3次元空間補完して設定する。

4. 計算結果および考察

4.1 陸域モデルの計算結果

モデル計算結果の検証には、姉川と野洲川の河川流量観測データ（琵琶湖河川事務所、2000年1月1日～12月31日（1時間ピッチ））と滋賀県内主要 30 河川の公共用水域水質測定結果（滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター、2000年1月～12月（1ヶ月1回））の他に、各種文献値を用いた。

そのうち、野洲川下流における再現計算結果を図4に示す。

水量・水質ともに概ね良好な再現結果となったが、TN では灌漑期において実測値よりも高い値を示している。これは、水田の脱窒効果をモデル内でうまく反映できていないことが原因と考えられ、今後モデルの改善を行うことが必要である。

また琵琶湖流域全体で再現計算を行っていることから、図5のように任意時刻における水量・水質の面的な広がり进行评估できることが本モデルの特徴である。

4.2 湖内流動モデルの計算結果

湖内の水温を1年間再現計算した結果（実線）を図6に示す。実測値（点線）と比較して、水面付近は実測値に近い値が得られ、第4層以深では水温が高く出る傾向があるが、水温変化の

傾向は概ね再現できている。

湖内水位を1年間再現計算した結果（実線）を図7に示す。春季の水位が実測値（点線）と比較して異なるが、水量の1年単位での収支は概ね取れてきている。

一方、2000年7月中旬における水温と流動状況の可視化を行ったものを、図8に示す。琵琶湖内で観測される「還流」がうまく再現されており、湖内流動モデルの妥当性が確認された。

4.3 湖内生態系モデルの計算結果

モデルの検証に溶存有機物（D-TOC）、溶存無機態窒素、溶存無機態リンのデータを使用した。検証を行う場所については、北湖、南湖に設けられた44地点のデータのうち代表点を使用し湖内平面分布を検証した。

北湖の中心部（12B、15B、17B）表層で再現計算を行った結果を図9に示す。観測結果と比較して、いずれの項目も精度よく再現できている、モデルの妥当性が確認された。

5. まとめ

本研究では陸域・湖内を含めた流域全体での管理施策が琵琶湖の水質改善にもたらす効果を予測するために、陸域－湖内流動－湖内生態系を結合した数値モデルを開発し、数値シミュレーションを行った。2000年の再現計算の結果、水量・水質ともに概ね観測データと一致し、シミュレーション結果の妥当性が確認された。

しかしながら、降雨時の水質観測データや河川流量観測（1時間ピッチ）データ等の蓄積が非常に少なく、モデル計算の結果も数々の不確定パラメータの値によって左右される状態にある。今後、モデルの更なる精度向上が必要である。

また、シミュレーションのための条件設定や結果の可視化を容易に行える GIS インターフェースの構築も進めていく予定である。

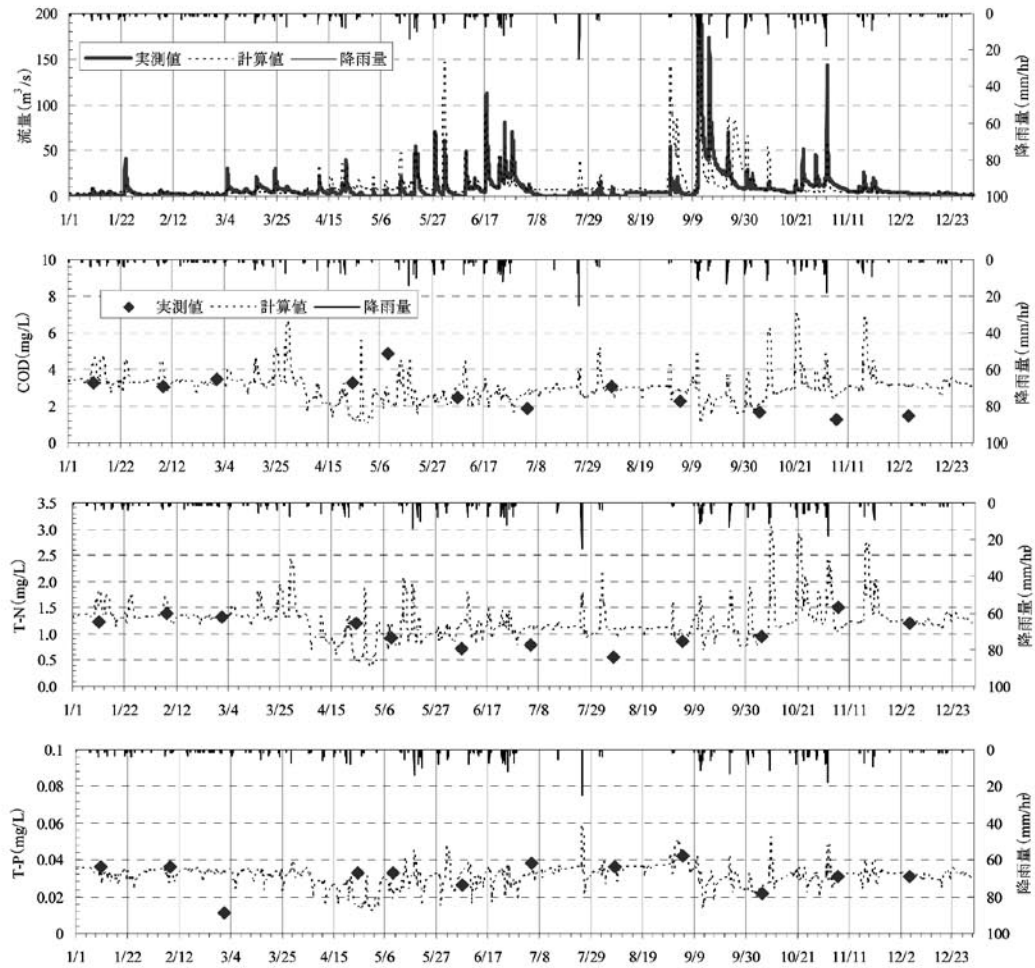


図4 野洲川における流量と水質の計算値（実線）と実測値（◇）の比較
（グラフィア4頁参照）

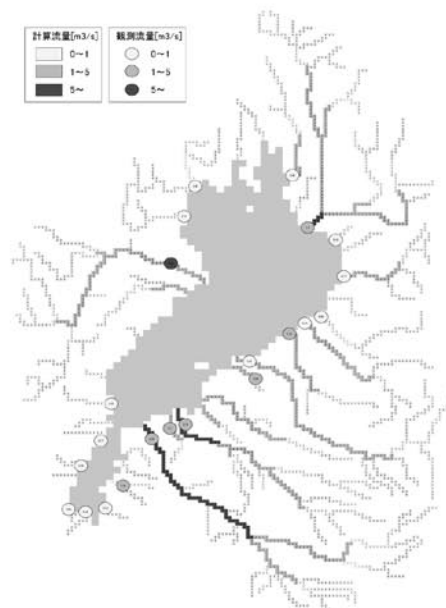


図5 流域内河川流量の再現計算と実測値の比較
（グラフィア4頁参照）

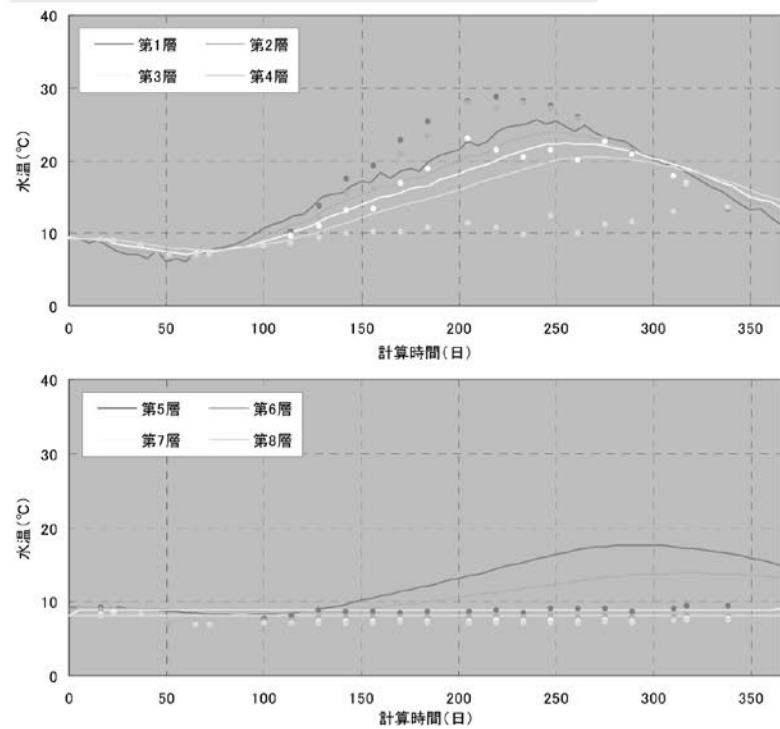


図 6 各層における湖内水温の計算値（実線）と実測値（点線）の比較

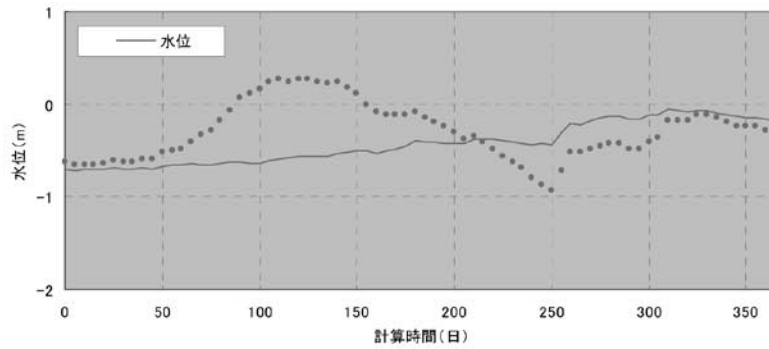


図 7 湖内水位の計算値（実線）と実測値（点線）の比較

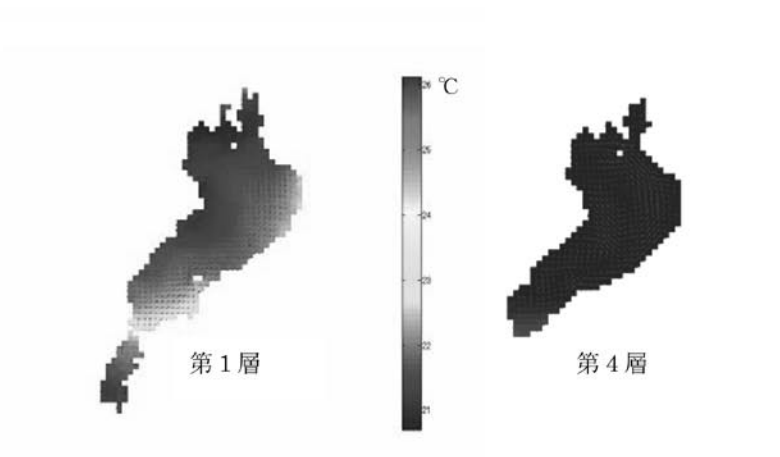
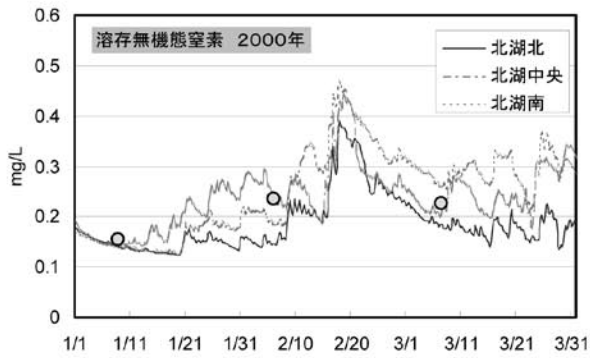


図 8 琵琶湖の水温と流動状況
(グラビア 4 頁参照)



○ 観測代表値

図 9 湖内水質の計算値（実線）と
実測値（○）の比較

参考文献

- 佐藤祐一，上原浩，今城貴弘，湯浅岳史，金再奎，高田俊秀，
内藤正明，永禮英明，小松英司，原雄一，山仲善彰，杉江
弘行，池田有希子（2006）：琵琶湖流域統合管理モデルの
構築に向けた陸域水物質循環のシミュレーション．水文・
水資源学会 2006 年度研究発表要旨集，102～103．
- 北澤大輔，石塚暲，金野祥久，熊谷道夫（2005）：流動場—生
態系結合数値モデルによる琵琶湖の水質解析．滋賀県琵琶
湖・環境科学研究センター16 年度試験研究報告，51—56．
- 佐藤祐一ら（2005）：GIS をプラットフォームとした流域水物
質循環モデルの構築．第 14 回地理情報システム学会講演
論文集．