

第 7 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
(経過報告)

平成 28 年 10 月

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

1. 将来予測に用いたモデルの概要.....	1-1
1.1 はじめに.....	1-1
1.2 モデルの概要.....	1-1
2. 将来水質予測シミュレーションの結果まとめ.....	2-1
2.1 評価方法.....	2-1
2.2 結果まとめ.....	2-4
3. 現況再現シミュレーション(2015年度).....	3-1
3.1 データ整備の方法.....	3-1
3.2 計算条件.....	3-9
3.3 計算結果.....	3-10
4. 将来予測シミュレーション(2020年度).....	4-1
4.1 データ整備の方法.....	4-1
4.2 計算条件.....	4-2
4.3 計算結果.....	4-25
5. 原単位法による負荷量推計.....	5-1
5.1 負荷量の計算方法.....	5-1
5.2 原単位の計算.....	5-3
5.3 負荷量計算結果.....	5-11

1. 将来予測に用いたモデルの概要

1.1 はじめに

琵琶湖では有機物をはじめとする流入負荷削減対策を進めてきたが、BOD は減少傾向にある一方で COD は減少しておらず、微生物では分解されにくい有機物（難分解性有機物）の増加が疑われている。そのため滋賀県では、琵琶湖の水質汚濁メカニズムを解明するため「琵琶湖流域水物質循環モデル」（以下「モデル」という。）を構築し、これまで第 6 期湖沼水質保全計画（以下「湖沼計画」という。）に係る水質シミュレーション等を実施してきた。

一方で近年、在来魚介類の減少や水草の大量繁茂等の新たな問題の顕在化してきており、この要因として、流域スケールでの物質循環の様相が大きく変化し、植物プランクトンから動物プランクトン、魚介類につながる物質循環が滞ってきたことが指摘されている。そのためモデルでも、物質の存在量（ストック）だけではなく移流量（フロー）についても把握・評価することが求められる。

以上を踏まえ、第 7 期湖沼計画では、琵琶湖における物質循環の状況を踏まえた方向性を提示するため、有機物のフローを把握することができる全有機炭素（TOC）を使用した解析・予測を行うこととする。具体的には、従来の評価項目である全窒素（TN）、全リン（TP）に加え、TOC についても予測値を提示するため、2015 年度における社会や環境の状況について整理し、モデルを用いた再現計算を行うとともに、5 年後（2020 年度）までの予測計算を実施する。

1.2 モデルの概要

モデルは琵琶湖の陸域・湖内の水物質循環に関するモデルを結合し、非定常な解析が可能な分布型モデルとして構築している。「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（図 1）。

陸域水物質循環モデルは、蒸発散モデル、地表流モデル、地下水モデルなど 5 つの要素モデルから成る 500m 正方メッシュの分布型物理モデルであり、水（流量）の他、物質として溶存態成分、SS とそれに吸着した懸濁態成分について、負荷発生から湖内流入まで解析する（図 2）。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。物質循環については、点源負荷については原単位法により計算を行い、また負荷の発生・排出・流達過程における物

理的機構を再現するため、面源負荷の発生と負荷流達機構について土壌流出量算定モデル等を用いた解析を行う。物質形態については、溶存態成分として難分解性有機物 (RDOC)、易分解性有機物 (LDOC)、難分解性有機態窒素 (RDON)、易分解性有機態窒素 (LDON)、無機態窒素 (DIN)、難分解性有機態リン (RDOP)、易分解性有機態リン (LDOP)、無機態リン (DIP) の 8 形態、SS として難分解性有機態 SS (RSS)、易分解性有機態 SS (LSS)、砂、シルト、粘土の 5 形態を仮定し、物質の分解・浄化や、吸着する有機物、窒素、リンについても考慮する。

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 (図 3)。層位モデルを用いた準三次元的解析が可能であり、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 12 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、河川流出入) 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。

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モデルである (図 4)。陸域水物質循環モデルから出力される負荷量、湖内流動モデルから得られる流速、水温等を入力値として用い、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、各コンパートメント量 (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、沈水植物、金属類) の全てを連成的に解くことで、生態系および栄養塩の動態を予測する。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 ではなく炭素量 (TOC 等) 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う。

陸域および湖内のモデルにおける計算領域を図 5 に示す。

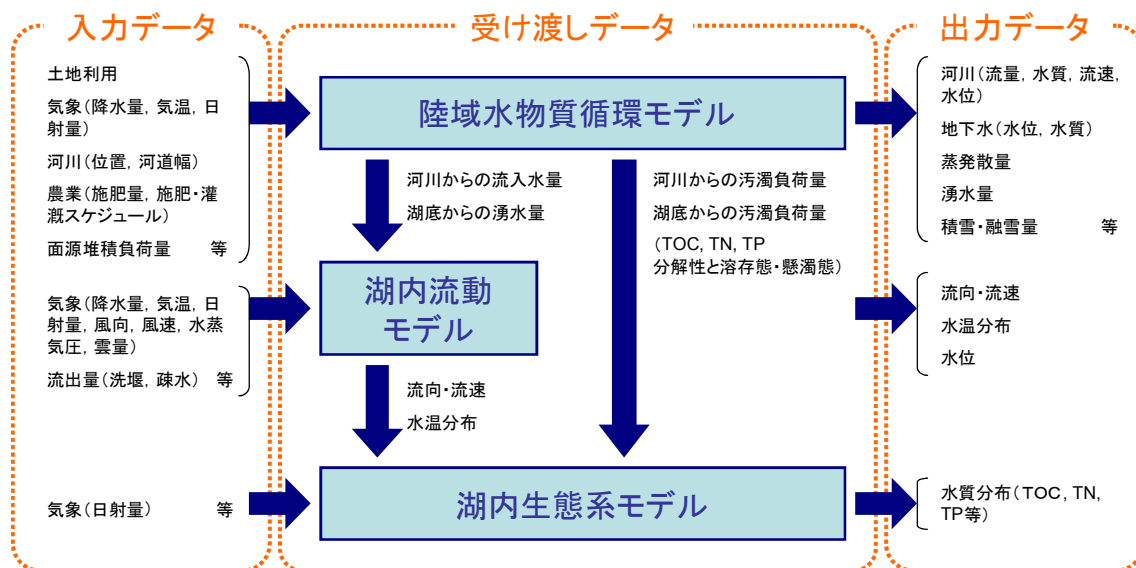


図 1 琵琶湖流域水物質循環モデルの全体像

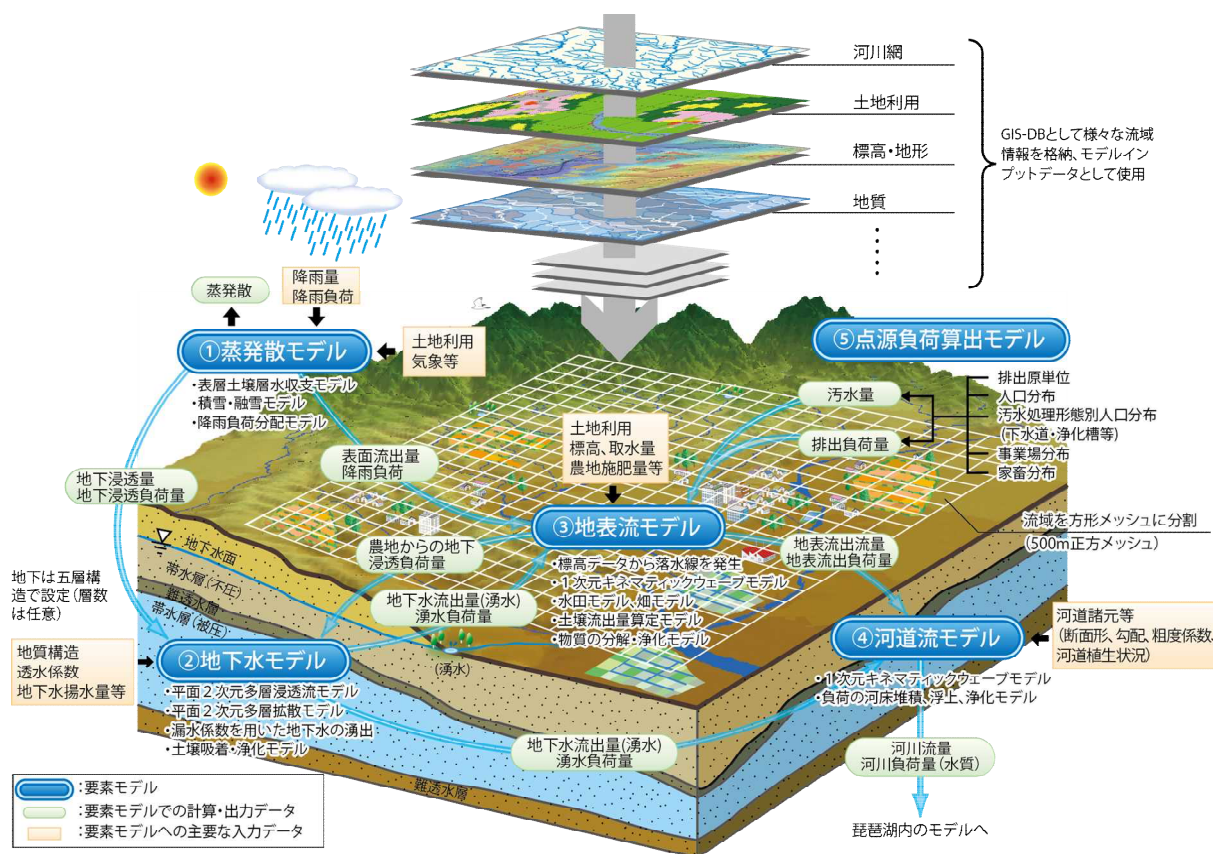


図 2 陸域水物質循環モデルの概要

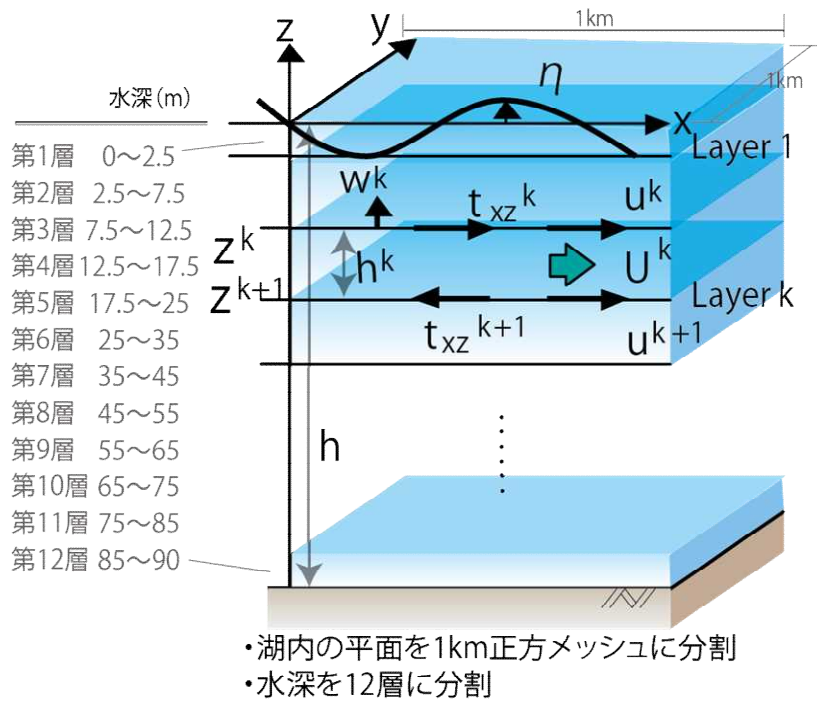
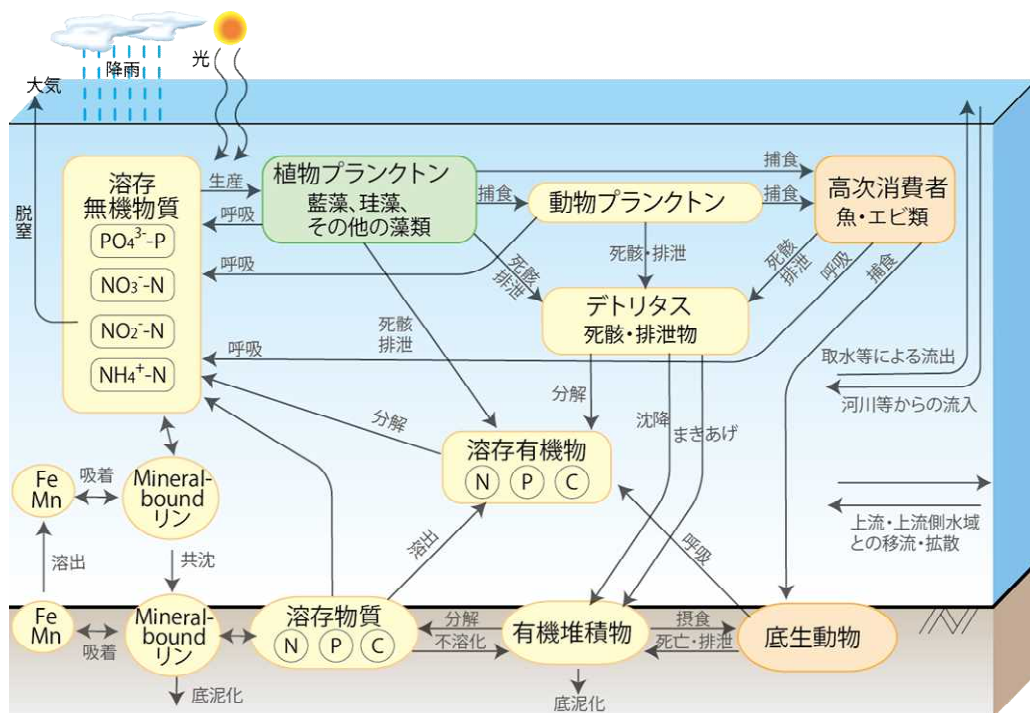


図3 湖内流動モデルの概要



計算領域

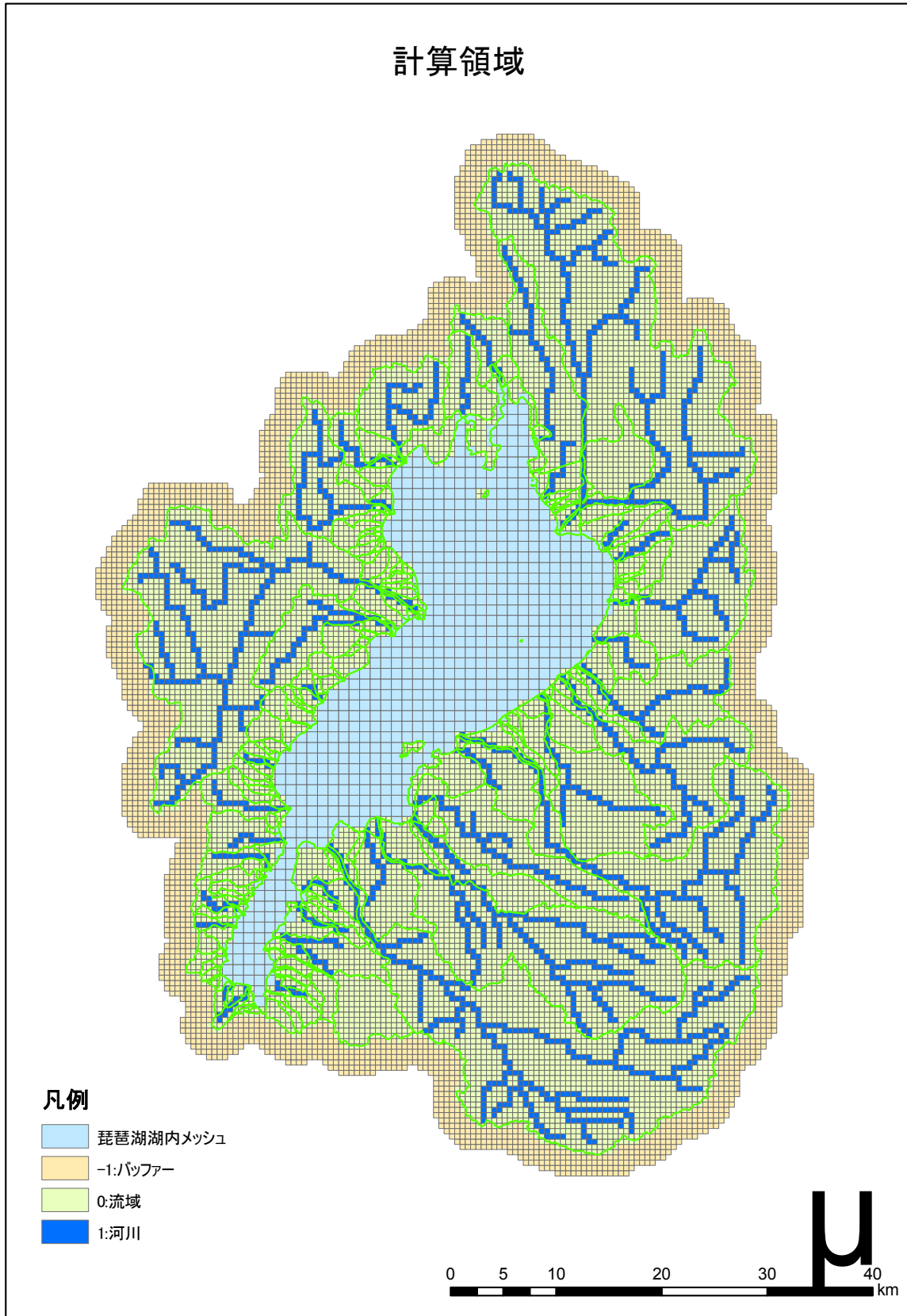


図 5 モデルにおける計算領域 (陸域は 500m、湖内は 1km メッシュ)

2. 将来水質予測シミュレーションの結果まとめ

2.1 評価方法

第3章～5章において計算された琵琶湖水質の現況再現と将来予測シミュレーションの結果から、今後5年の間に対策を講じた場合、また講じなかった場合の水質予測を整理した。なお環境基準の評価にあたっては、環境基準点のうち最も濃度の高い地点において評価を行うものとし、また各水質項目の評価基準は下記の通りとなっている。

COD：75%水質値¹

TN・TP：年間平均値

なお TOC については、環境基準項目ではないが、COD にならい年間平均値と 75%水質値について提示した。

本計画で使用するモデルは、前述のように COD ではなく炭素量 (TOC 等) により有機物の負荷量や濃度の計算を行っている。しかし、有機物の環境基準項目は COD であるため、計算により算出された TOC を COD に換算する必要がある。そこで、北湖環境基準点 7 地点 (17A、17B、17C^{*}、15B、13A、13C、12B) と、南湖環境基準点 4 地点 (9B、8C、6B、4A) を対象として (図 7)、2011～2015 年度における TOC と COD の相関から TOC を COD に換算した。換算式は以下の通りである (図 6)。

北湖：COD = 1.29 × TOC + 0.55

南湖：COD = 1.34 × TOC + 0.50

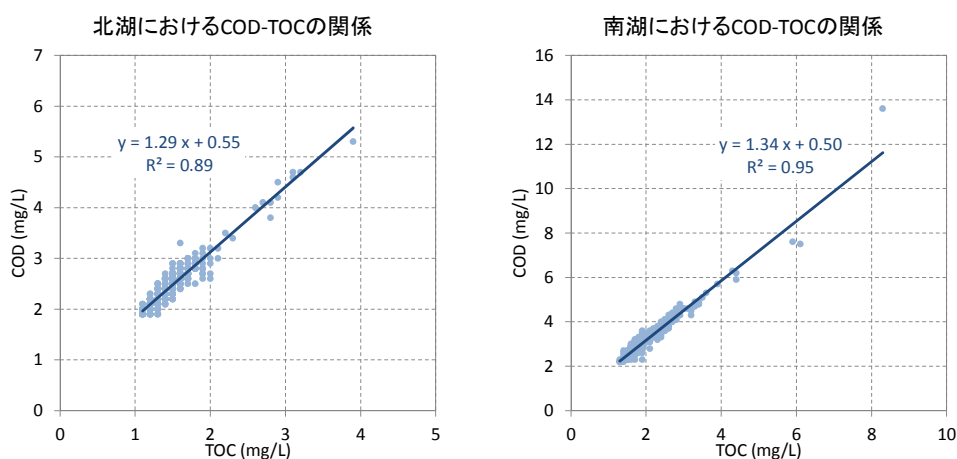


図 6 北湖・南湖における TOC と COD の相関

¹年間の日間平均値の全データをその値の小さいものから順に並べ、0.75×n 番目 (n は日間平均値のデータ数) のデータ値をもって 75%水質値とする

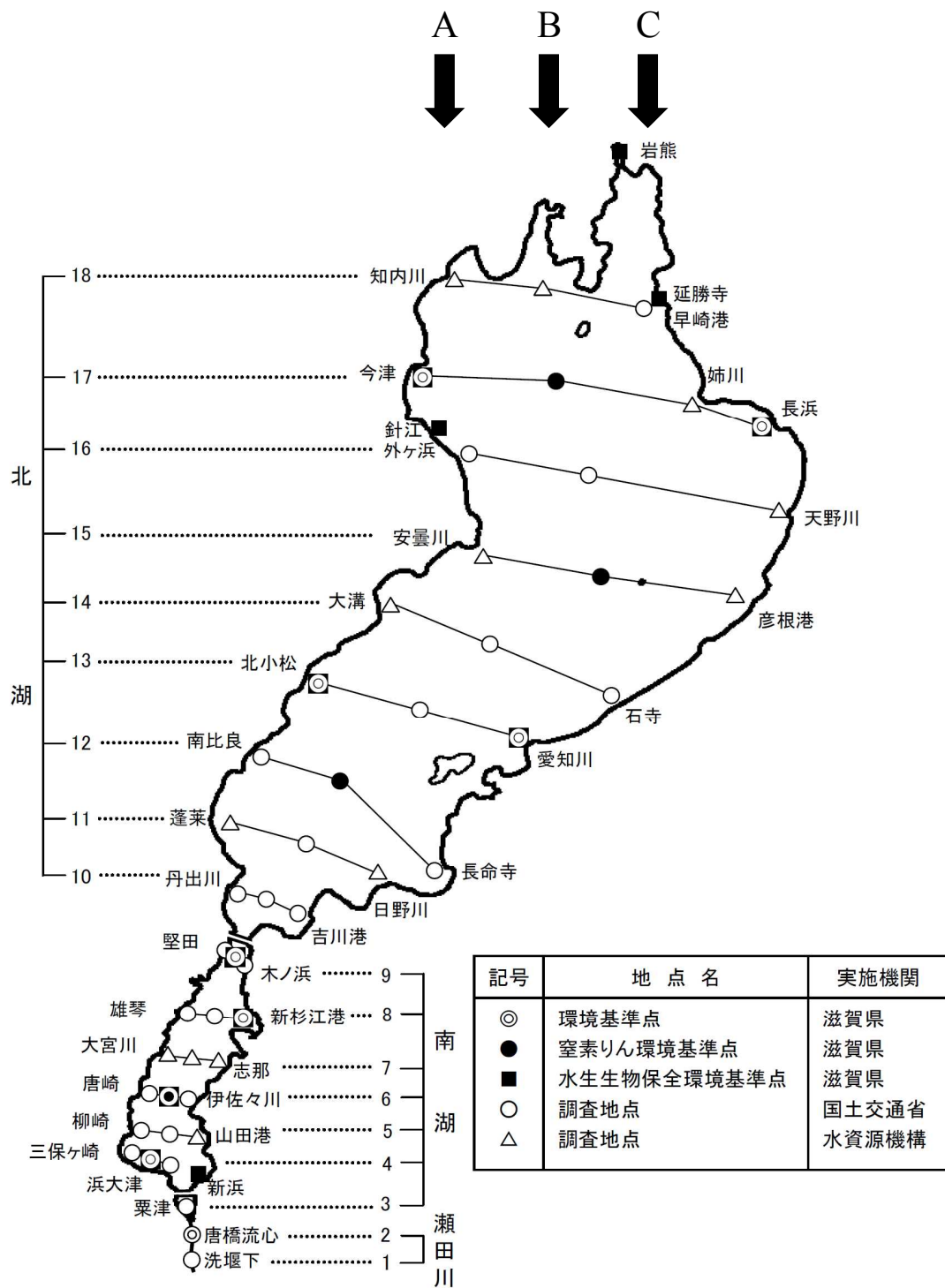


図 7 琵琶湖における観測地点

なお、2015 年度を対象として行った現況再現の結果は、後述のように地点間の差異を十分表現できるものであったが、必ずしも全ての地点で水質を再現できたわけではない。2015 年度の計算値が観測値と異なる場合に、2020 年度の水質予測値をそのまま結果として採用すると、現況の実績値と比較した場合に誤った解釈を与える可能性がある。したがって、2015 年度の現況再現計算結果を観測値に合わせ、2020 年度の水質予測値を補正する必要がある。

本計算においては、2015 年度の水質観測値を C_{obs} 、モデルによる 2015 年度の計算値を C_{cal} 、モデルによる 2020 年度の予測値を C_{pre} とし、補正後の 2020 年度水質予測値 $C_{pre-rev}$ を

$$C_{pre-rev} = C_{obs} \times C_{pre} / C_{cal}$$

として補正を行った。

2.2 結果まとめ

以上により算出された結果をまとめたものを表 1 に示す。

表 1 将来水質予測シミュレーションの結果まとめ

3. 現況再現シミュレーション(2015 年度)

3.1 データ整備の方法

(1) 処理場系

下水処理場については、2015 年度における各処理場の排水量・水質の実績値より負荷量を算出した。流域下水道については下水道課提供の実績値を用い、その他公共下水道については環境政策課提供の事業場環境管理台帳システム（以下「エコマス」という。）または大津市提供データの実績値を用いた。

し尿処理場については、エコマスまたは大津市提供データから抽出した排水量・水質の実績値より負荷量を算出した。

農業集落排水処理施設については、エコマスから抽出した排水量・水質の実績値より負荷量を算出した。

各処理施設（下水処理場の場合は放流口）の住所から該当するメッシュを求め、当該メッシュより上記で計算した負荷を発生させることにした。

なおエコマス等の実績値については、複数の観測値が存在する場合には最新のデータを使用した。必ずしも 2015 年度に調査がなされているとは限らない。

(2) 生活系

下水道課提供の集落別処理形態別人口（下水道・農業集落排水等処理施設・合併処理浄化槽・単独浄化槽・その他（＝し尿処理と仮定））（集落数：滋賀県内で 2924 個）のデータ（EXCEL 形式）を GIS で用いるシェープファイル形式で整備し、土地利用を考慮して、500m メッシュに分割した。具体的な方法は以下の通りである。

① 2010 年度国勢調査の結果（平成 22 年国勢調査（小地域）²）を GIS でまとめたものと、下水道課の集落別データをマッピングさせ、処理形態別人口の GIS データ（シェープファイル形式）を作成する。なお集落界は国勢調査と下水道課データで異なることもあり、下記のように対処した。

（ア）国勢調査の集落が複数の下水道課データの集落を包含する場合：下水道課データの集落別処理形態別人口を合計し、国勢調査の GIS データに統合する。

（イ）下水道課データの集落が複数の国勢調査の集落を包含する場合：下水道課データの集落別処理形態別人口を、国勢調査の集落別人口の比率で割り振り、国勢調査

² <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init> よりダウンロード

の GIS データに統合する。

- ② ①により作成した集落別処理形態別人口の GIS データと、500m メッシュ別土地利用 GIS データ（作成方法は後述）を重ね合わせ（図 8）、下記の方法で集落別処理形態別人口を 500m メッシュに分割する（図 9、図 10）。

(ア) 集落 i ($i=1,2,\dots,I$; I は集落数) において、処理形態 k ($k=1,2,\dots,K$; K は処理形態の数) にかかる人口を P_i^k とする。この集落が重なるメッシュ j ($j=1,2,\dots,J$; J は集落 i が重なるメッシュ数) を求める。

(イ) 集落 i がメッシュ j にかかる面積を A_i^j とする。またメッシュ j における市街地面積比率を C_j とする。

(ウ) これより、集落 i からメッシュ j に割り振る処理形態 k の人口 $D_{i,j}^k$ を以下のように

$$\text{求める。 } D_{i,j}^k = P_i^k \times \frac{C_j \cdot A_i^j}{\sum_j (C_j \cdot A_i^j)}$$

(エ) なお、メッシュ j に市街地が存在しない場合は水田・畑の面積比率を、それもない場合は山林・他の面積比率を対象として、上記と同様の計算を行う。

下水道課提供の処理形態別人口は、下水道整備人口を記したものであるため、これを接続人口に直し、浄化槽等を含めて実際の排水処理形態別人口に修正する必要がある。しかし、接続率等のデータは市町別にしか把握されていないため、上記で算出したメッシュ別下水道整備人口に市町別の接続率のデータをかけて接続人口を算出し、整備人口と接続人口の差分を合併浄化槽・単独浄化槽・し尿処理に現在の比率で割り振ることにした（下水道以外の人口がゼロの地域は、未接続人口を全て合併浄化槽に割り振る）。また、最新の処理形態別人口データは 2014 年度のものであったが、これが 2015 年度でも同等であると仮定し、以降の計算に使用した。また京都市分については別途計上した。

このようにして得られたメッシュ別処理形態別人口に対し、各処理形態の原単位をかけ、生活系由来負荷量を算出した。

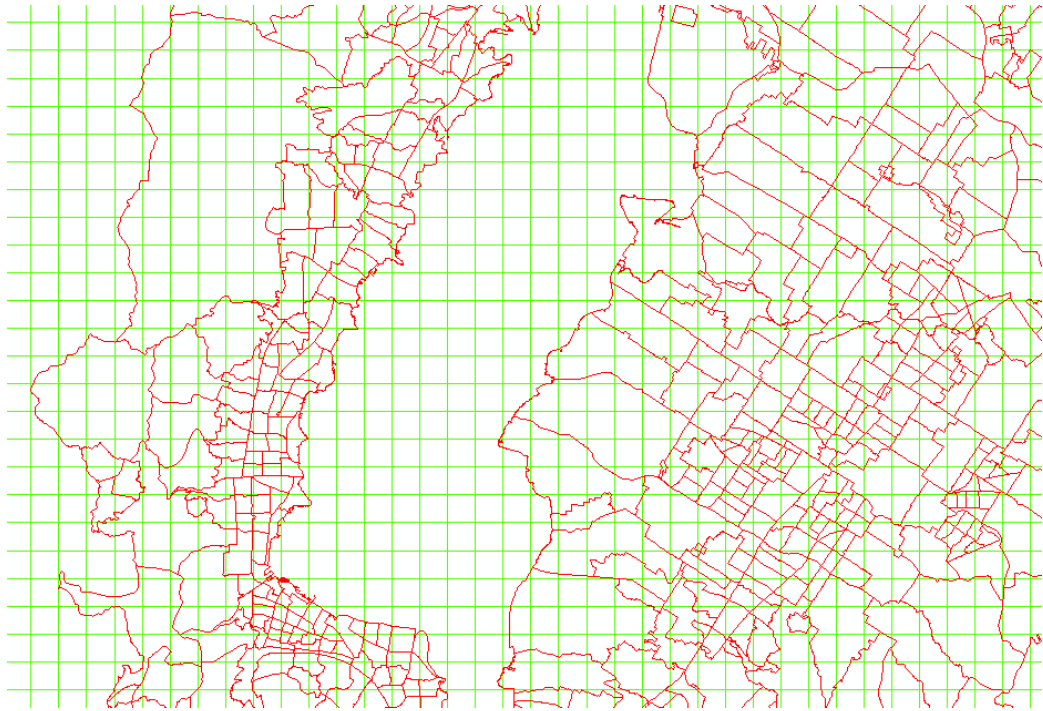


図 8 集落 (赤) とメッシュ (緑) の関係 (南湖周辺の例)

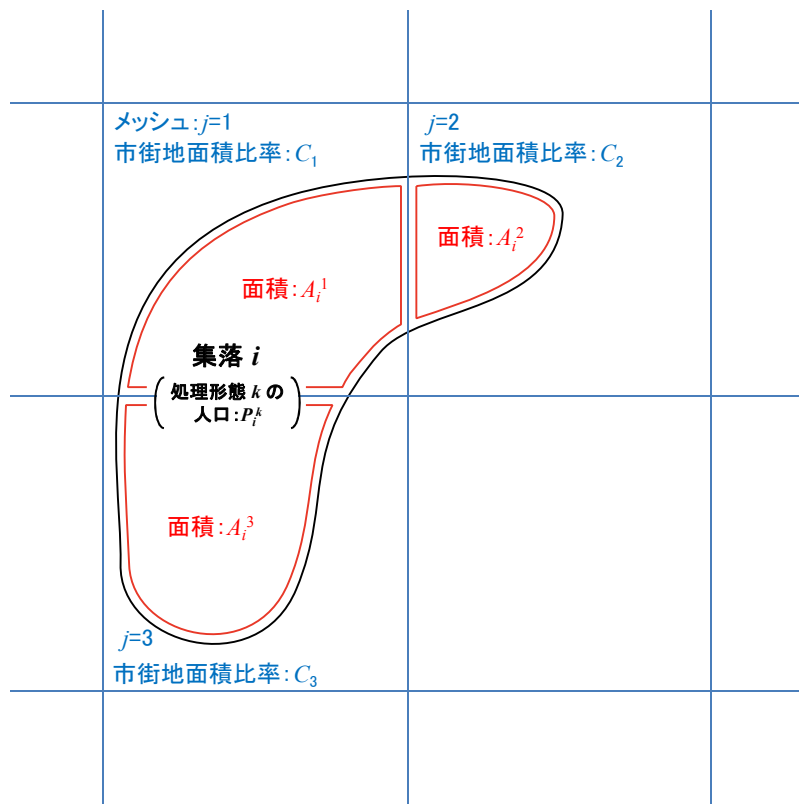


図 9 集落別処理形態別人口のメッシュへの分割方法概念図

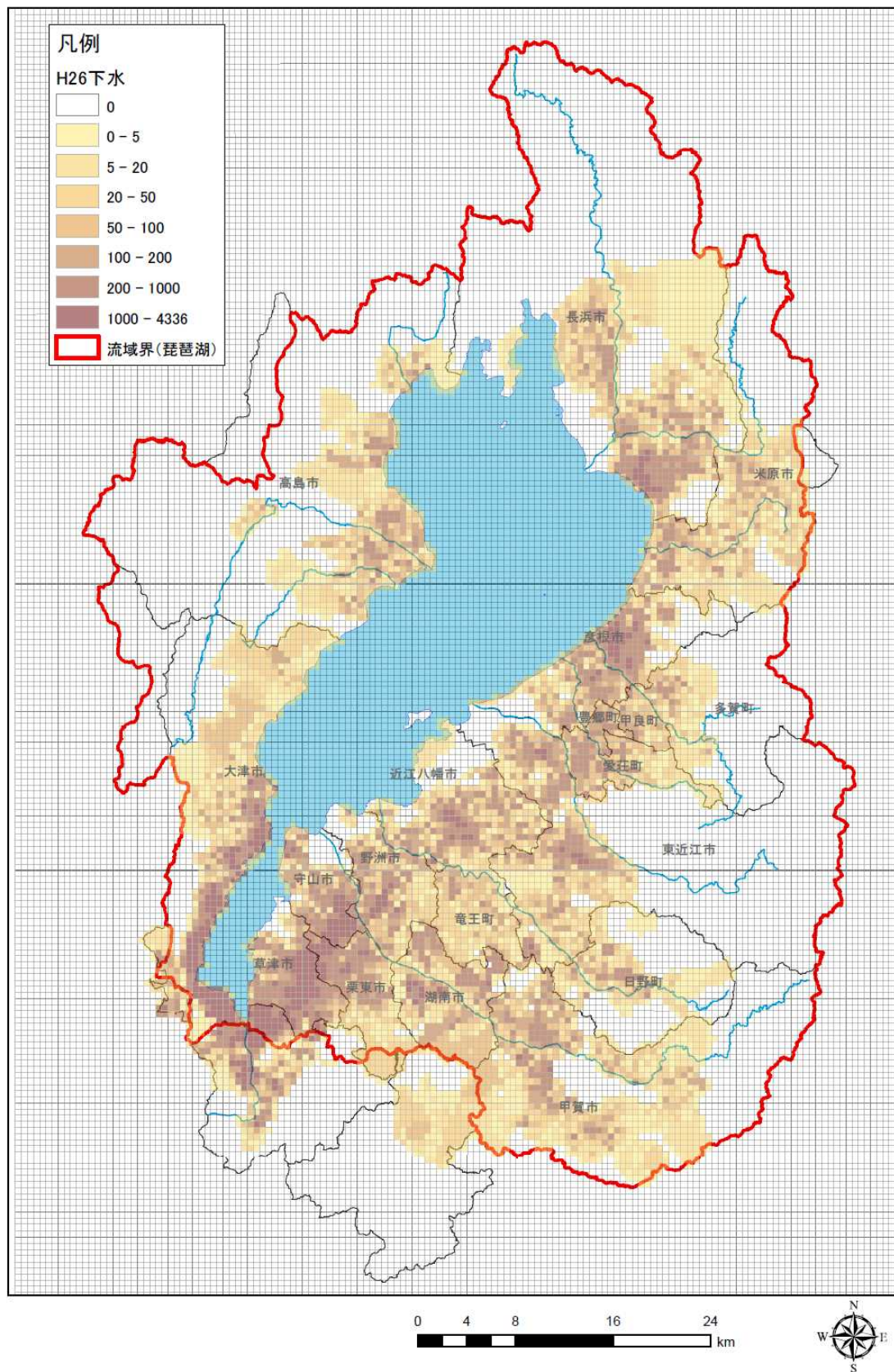


図 10 処理形態別人口分布（下水道接続人口の例）

(3) 産業系

エコマスまたは大津市提供データから抽出した事業場別排水量・水質の実績値より、各事業所の負荷量を算出した。各事業所の住所から該当するメッシュを求め、当該メッシュより計算した負荷を発生させることにした。エコマスまたは大津市提供データから対象とする産業系負荷を算出する方法は、以下の通りである。

- ① 下水処理場、し尿処理場、農業集落排水処理施設を除外する。
- ② すでに廃止されている施設、排水の全量が下水道に接続されている施設、住宅団地・マンションについては除外する（住宅団地・マンションからの負荷については、別途 (2) の処理形態別人口の負荷として計上されているため）。
- ③ 入手したデータが 2016 年度末または当初のものであったため、2015 年度中に廃止となった事業場については別途調査し、データとして追加する。
- ④ 各事業所について、複数の採水日の水質データがある場合は、最新のデータを採用する。同日に複数の水質データがある場合は、各水質項目に関して最大値を採用する。
- ⑤ 採水データがない事業所については、産業中分類別（1993 年 10 月（第 10 回）改定）の平均値を採用する。産業中分類が不明な事業所については、全業種の平均値を採用する。
- ⑥ 各事業所について、排水量と排水水質をかけて負荷量を算出する。

上記処理の結果、2015 年度の負荷量算出対象事業場としては計 4,088 件が抽出された（図 11、図 12）。

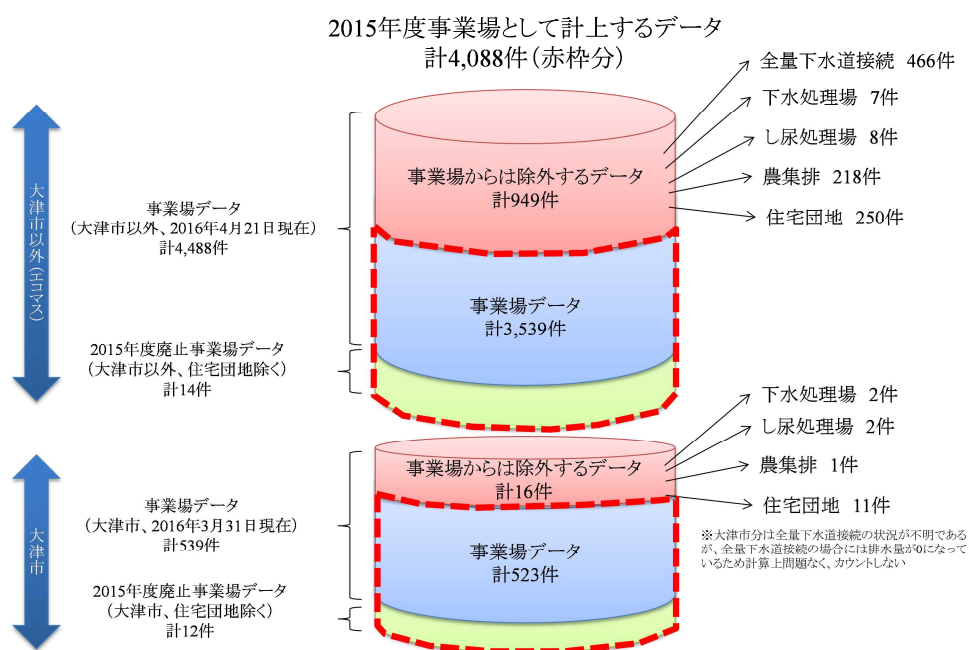


図 11 事業場データの処理件数

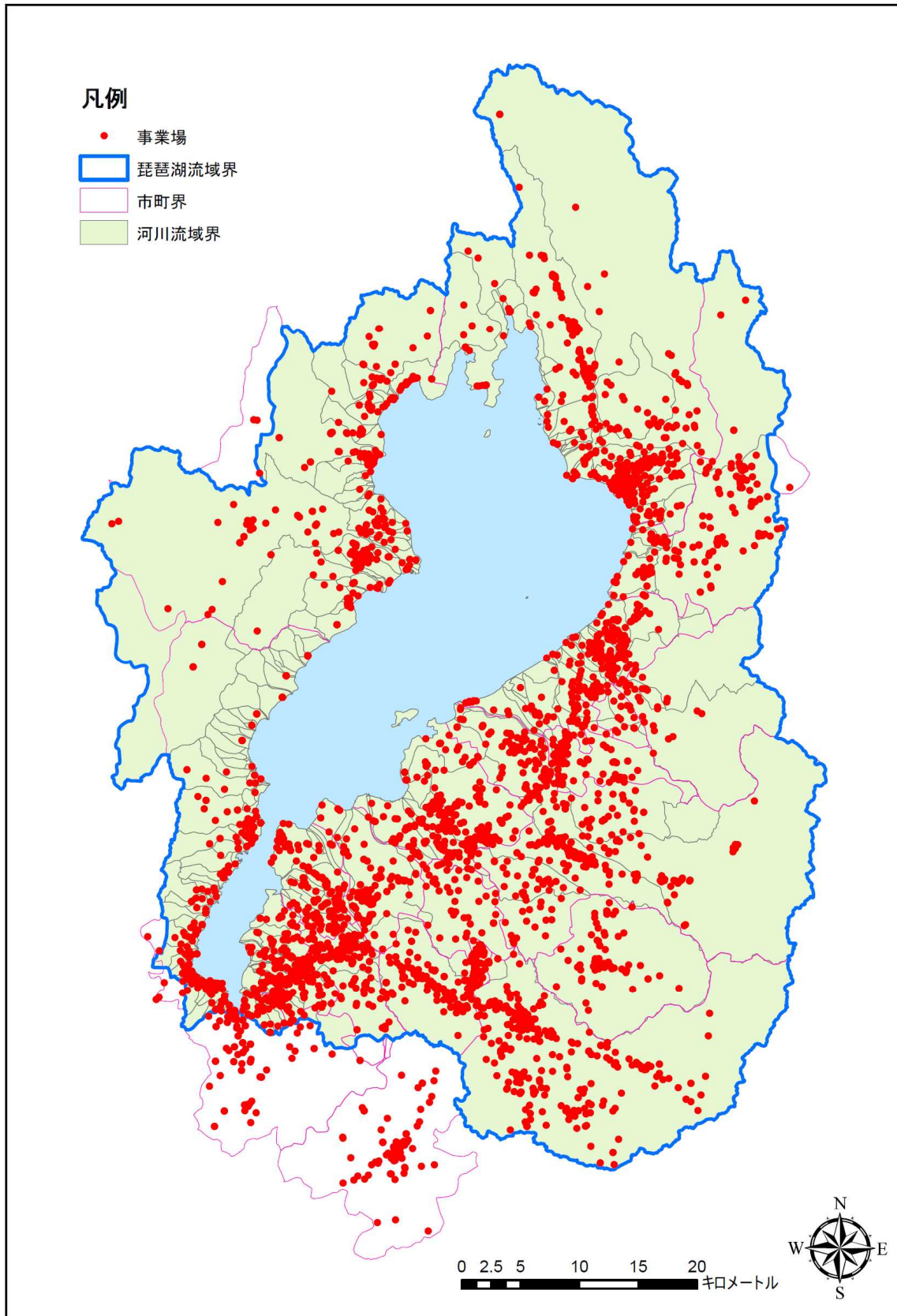


図 12 産業系負荷量算出の対象事業場の位置

なお畜産施設および観光客に係る負荷については、以下の考えにより第 6 期湖沼計画より産業系負荷として計上している。

畜産施設については、滋賀県では牛・鶏の糞尿と豚の糞については全量農地還元されている。また豚の尿は、浄化装置を所有している畜産農家は放流し、浄化装置を所有していない畜産農家は 100%再利用率されている。この浄化装置を所有している畜産農家からの負荷がエコマス等に掲載されているため、畜産系負荷については全てエコマス等より計上する（畜産系負荷として、原単位法により畜産頭数×原単位といった計算は実施しない）。

観光客については、観光客が訪れる施設についても一般にはエコマス等に掲載されていることから、産業系として計上する（観光客数に原単位（合併浄化槽換算）をかけて計上することはない）。

(4) 面源系

国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ³（2006 年度：3 次メッシュ 1/10 細分区画（100m メッシュ）毎に、各利用区分（田、畑、果樹園、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等）を整備したもの）を元に、市町別の土地利用統計データの変化率をかけて、2015 年度見合いのメッシュ別土地利用データを作成した。具体的な方法は以下の通りである。

- ① 滋賀県で年度ごとにまとめている「国土利用計画管理運営事業に係る土地利用現況把握調査」から、2006 年度から 2015 年度にかけての市町別・各土地利用別の面積の変化比率を算出する（なお 2015 年度についてはまだデータがまとめられていないため、2014 年度のデータをもって 2015 年度とする）。
- ② 国土数値情報（2006 年）のデータに、①の市町ごとの変化比率をかける。なお各土地利用の対応関係は以下の通りである。

【国土数値情報】	～	【統計データ】
水田・畑	～	農用地
山林	～	森林
市街地	～	宅地
道路	～	道路
荒れ地	～	原野

³ <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> よりダウンロード

その他 ～ その他

水面・ゴルフ場： 変化なし

- ③ 各メッシュにおける面積比率の合計が1になるように補正を行う。補正の方法は以下の通りである。補正後土地利用＝補正前土地利用×(1-水面・ゴルフ場)/(水面・ゴルフ場除く合計)

(5) 負荷削減対策

面源を対象とした負荷削減対策として、「環境こだわり農業（水稻）」「水質保全対策事業」「流入河川浄化事業」の3種類が設定されている。2005～2020年度における削減量をそれぞれ表2の通り設定した。またそれぞれの事業について、実施されている地点のメッシュあるいは河川を設定し、設定した負荷削減量を地表流あるいは河川水から毎時削減するようにした。

表2 負荷削減対策事業による負荷削減量（まとめ）

湖沼計画関連事業の負荷削減量(kg/日)

項目	COD				T-N				T-P			
	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020
環境こだわり農業	101.0	286.6	318.1	372.0	22.6	64.2	71.3	83.4	2.1	5.9	6.6	7.7
水質保全対策事業	271.4	290.2	340.8	340.8	75.3	79.7	90.5	90.5	7.8	8.4	10.6	10.6
流入河川浄化事業	14.2	32.2	32.2	32.2	24.5	35.9	40.6	48.7	1.3	2.3	3.0	3.0
計	386.6	609.0	691.1	745.0	122.4	179.9	202.4	222.5	11.2	16.6	20.1	21.3

3.2 計算条件

(1) 計算期間

2015年度（2015年4月1日～2016年3月31日）を対象としてモデルの現況再現性を確認するため、各モデルについて助走計算期間を含め下記の通り計算を行った。

陸域水物質循環モデル：2015年1月1日から2016年3月31日まで

湖内流動モデル：2015年2月1日から2016年3月31日まで

湖内生態系モデル：2015年3月1日から2016年3月31日まで

(2) キャリブレーション

各モデルについて、水質や水量等の観測結果が再現できるようキャリブレーション（モデルパラメータの調整）を行った。具体的には、陸域水物質循環モデルについては、主要河川の流量、水質、L-Q図、また各面源における負荷原単位等を参照した。湖内流動モデルについては、層別の湖内水温の季節変化および水位等を参照した。湖内生態系モデルについては、湖沼計画における評価が必要となる琵琶湖表層のTOC、TN、TPを中心として、層別水質（各態CNP、難分解性比率、DO等）の季節変化等についても参照した。

3.3 計算結果

(1) 陸域水物質循環モデル

琵琶湖流入河川のうち流域面積の大きい上位3河川である野洲川（流域面積：383km²）、姉川（流域面積：369km²）、安曇川（流域面積：306km²）（図13）において河川流量と水質を検証した結果を図14～図16に示す。河川流量、TOC、TN、TP、およびその形態別濃度は、1ヶ月に1回の定期調査については概ね再現されているが、2015年度には降水時の調査が行われていないため、さらに年間の負荷量としての妥当性を検証することが必要である。

そこで、他年度のデータを含めたL-Q図を元に、降水時や通年の負荷量の検証を行った。具体的には、野洲川と日野川について、2006年度～2007年度にかけて実施された負荷量連続調査（TN・TPのみ、概ね1日に2回の自動採水機による調査）の結果を活用してL-Q図を作成し、計算結果との比較を行った（図17、図18）。日野川ではTN・TPともにL-Q図の傾きが観測よりも若干小さい傾向が見られた。野洲川では低水時の流量が十分再現できていない結果となったが、これは中流部における取水をモデルで考慮できていないことが原因と考えられる。しかしながら総じて、平常時と降水時の負荷量の変化は十分に再現できていると考えられた。

以上計算した結果をもとに、陸域における年間の水および物質（TOC、TN、TP）の収支を集計したものを図19に示す。

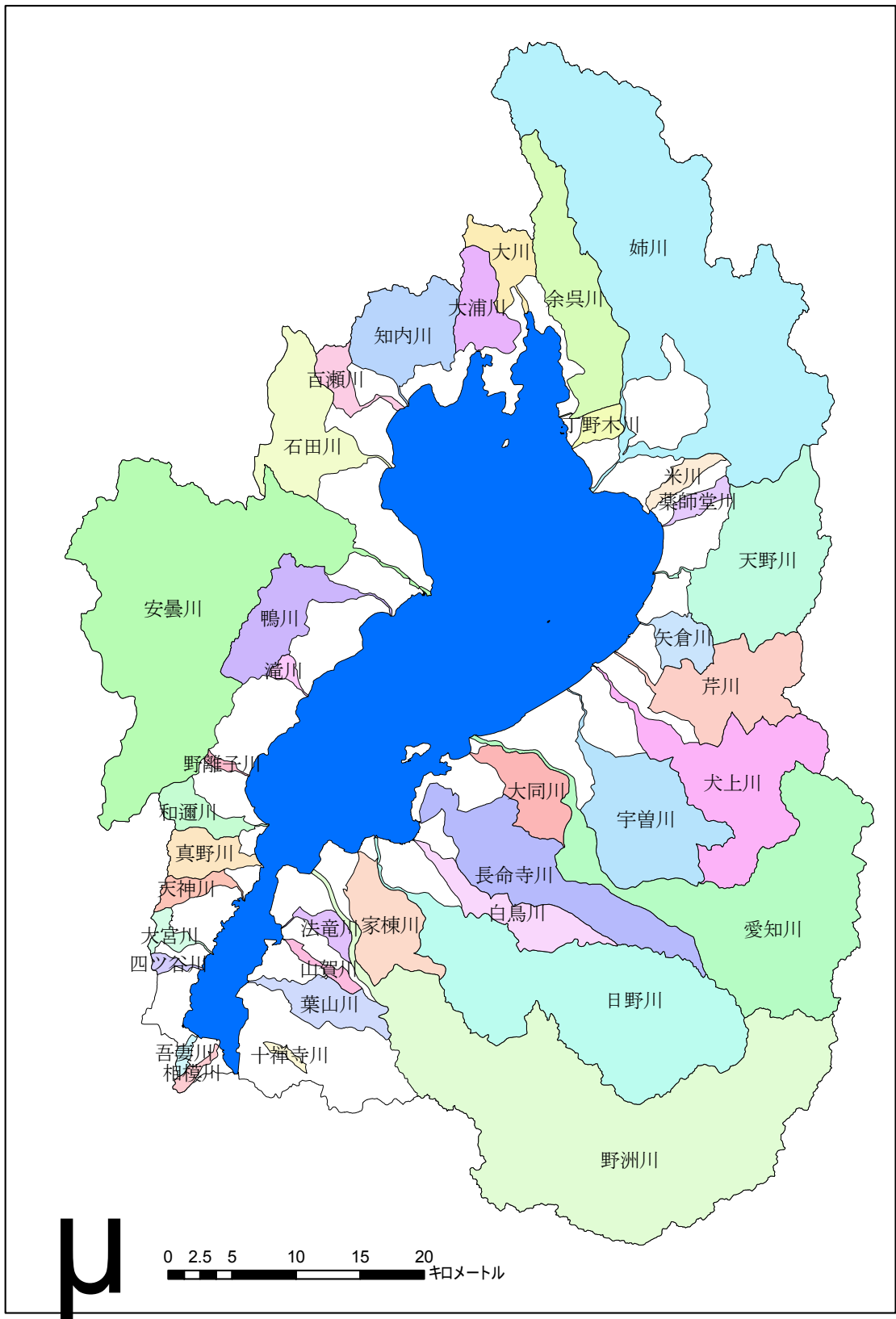


図 13 主な流入河川流域