

(13) 流域管理とその支援システム (第2報)

RIVER BASIN MANAGEMENT AND ITS SUPPORTING SYSTEM (2nd Report)

原沢英夫*, 福島武彦*, 天野耕二*

Hideo HARASAWA*, Takehiko FUKUSHIMA *, Koji AMANO

ABSTRACT; In environmentally sound management of lake Kasumigaura, it is essential to summarize the information and data on the lake basin and to utilize them to analyze and evaluate various measures adopted. For this purpose, we are developing a computer-assisted system comprised of watershed database, watershed indices and models, and evaluation of measures. This system is applied to calculate some indices, environmental capacity of pig raising in the basin, and to evaluate the tendency of lake water quality based on the long-term monitoring data which is also stored in the database.

KEYWORDS; River Basin Management, Decision Support System, Watershed Index

1 はじめに

湖沼、内湾等の閉鎖性水域の水質保全では、流域内で発生負荷や流出負荷の削減対策を総合的に実施することが必要であり、その中で発生源で発生負荷を減少させることが最も根本的な対策である。流域内で実施される対策の特徴としては、(1) 多様な手法の組合せが可能、(2) 費用効果と適用上の問題、(3) 流域内の人間活動・自然の変遷と対策技術の進歩、(4) 対象物質、問題現象の変化、(5) 地域計画への具体的反映、などが挙げられる(福島他, 1990)。

流域関連情報を一元的に管理し、有機的に利用して対策効果を総合的に評価するためには計算機システムが必要となる。この種のシステムに期待される点は、まず第一に流域管理の基礎となる流域内の発生汚濁負荷量の推定ではデータの収集・加工・解析・集計などに多大な費用と労力を要することから、既存の流域情報を一元的に収集・蓄積し利用できれば、対策評価の基礎情報が比較的容易に得られる。

第二に河川・湖沼の公共用水域における水質の改善効果を、例えば下水道の効果として分離するのは困難であり、流域・湖内対策の総合的な効果を水質変化との対応から評価することが必要となる。流域情報、河川負荷量データ、湖内水質データを空間的・時間的に表示し比較することにより効果評価が行える。

第三に、水質変化や社会・経済の動向については、1～2年の遅れはあるが、モニタリング結果や統計値として発表されている。従来報告書、統計書のみであったのが、電算機処理が可能なデータ化が行われてきている。例えば公共用水域における環境基準達成評価のための水質モニタリングが昭和40年代から実施され水質、水量に関するデータが電算機による処理が可能のように磁気テープに収録されている。しかし土地利

*国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

利用のような面的なデータの整備は遅れており、湖沼流域全体について土地利用変化を調査し、定量化したデータを得ることは大変困難なので、人工衛星によるリモートセンシングデータが流域管理などに適用しうることが問題となってくる。

霞ヶ浦に関する研究の一環として、流域レベルでの水質管理計画（流域管理）を立案・実施していく過程を念頭においた計算機を用いた支援システムの開発に取り組んできた。以下では、第一報に続いてその後の開発状況を報告し、さらに流域の社会環境変化と水質変化をみるために適用した事例について紹介する。

2 流域管理システムの概要（福島他，1990）

流域管理システムの概要を図-1に示した。支援システムでは流域情報、モデル、流域指標、対策案の提示といった要素の有機的な連結を目指している。第1ステップは流域データベースの作成で、流域における自然、人間活動などの情報を面的に有していることが条件である。特に、流域の現況を捉えることが可能な道具（例えば、リモセンデータの活用）や面的データを処理する道具（例えば、地理情報システム）に支援されたデータベースであることを目標としている。第2ステップは、水環境予測のためのモデル群で、各種の数理モデルにより構成されており、流域における水環境の将来予測、対策の実施による効果予測などを行う。第3ステップは流域水環境計画の策定マニュアルで、実際には流域管理メニューから諸対策案をどのように位置づけて選ぶか、それらを空間的・時間的にどのように組み合わせるのか、を合理的に試算できるものである。そのため、モデル群の結果を利用するとともに、ステップ2では流域指標を有効に活用する方法を用いる。

流域管理の支援システムはワークステーション（Sun 4）上に作成され、その基本機能及び利用法を表-1に示した。システムに入力したデータは表-2にまとめている。異なる集計単位で集められた、例えば、国勢調査（総務庁）、国土数値情報（国土庁）は1kmメッシュ、ランドサットデータはTMで30mメッシュ、工業（通産省）、農業（農林省）統計は、市町村、負荷量データは小流域などシステムで統一的に扱うための機能として、表-1中の基本メッシュデータへの変換や市町村→小流域への変換などを基本的な機能として

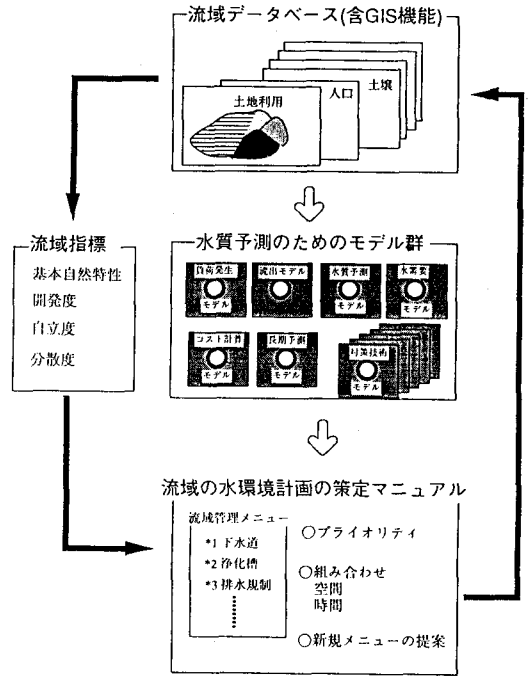


図-1 支援システムの概要

表-1 支援システムの基本機能と利用法

基本機能	利用法
・データベース管理（検索、更新、...）	・流域モデルへの入力データの切り出し
・画像表示（オーバーレイ機能を含む）	・流域特性の評価
・基本メッシュデータへの変換	・流域指標の計算
・市町村→小流域データ変換	・河川、湖の水質表示（地点、経年変化）
・演算処理（2画面の線型・論理和...）	・河川沿い地域の抽出
・集計処理（指定領域内の統計処理...）	
・領域設定（幾何学的距離等に基づく）	

表-2 流域データベースのデータ

データ項目	出展	集計単位	更新
社会・経済	人口（年令別...） 工業（製造品出荷額...） 農業（収穫量、家畜数...） 土地利用 表面被覆（土地利用）	総務庁 通産省 農林省 国土庁 技術センター ¹⁾	メッシュ 市町村 市町村 メッシュ メッシュ
物理的諸元	標高（平均、最低...） 表層地質・土壌・地形	国土庁 国土庁	メッシュ メッシュ
発生負荷量	負荷量（生活、工場...）	茨城県	メッシュ 小流域
地図情報	都市計画位置 湖沼位置、河川流路 流域界位置	国土庁 国土庁 国土庁	線データ 線データ 線データ

1)：ランドサットデータ

有している。

基本的な解析作業の流れは、図—1の流域データベースをもとに、モデルに対して入力情報を切り出すとともに、各種の流域指標を算定し、第3ステップの水環境計画策定の基礎資料を与えるものである。流域全体を一つの数値に代表させることなく、面的な情報として扱ったのは、対策案において具体的な場所の提示が重要であり、また上下流の位置関係が流域環境の評価、流出モデルの計算結果に影響が大きいと考えたためである。

3 流域管理システムの適用

3.1 流域指標の算定表示

広い意味では、流域人口や流域の社会・経済活動の指標（例えば、工業出荷額）も流域指標とよべるが、ここではもう少し狭い意味で『流域指標』を使っている。先述のように流域に関しては自然・社会・経済データの蓄積がなされている。これらのデータは、開発計画や環境管理計画の基本データとして用いられるわけであるが、それらを項目間、地域間で集約化して流域の特徴づけを行う方法として指標化がある。例えば、河川水質についてみると、水質項目としては環境基準に代表される項目の他にも、種々の水質項目が測定されている。環境基準項目のうちでも河川ではBOD、湖沼・内湾ではCOD が代表的指標として取り上げられるが、水質全体の変動やさらに水辺の快適性までも含めた水環境を考えるうえでは、総合的な指標化が必要になってくる。例えば東京都が水質管理計画のために行った水辺の快適性の指標化が代表的なものである（東京都、1986）。

3.2 分散度の定義

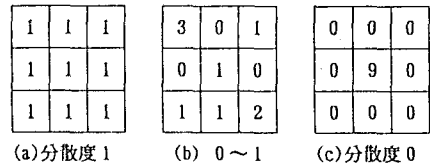
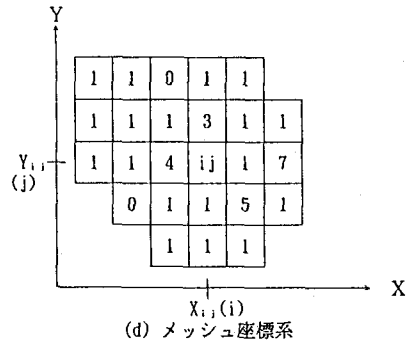
統計で言う '分散' とは、例えば正規分布する変数のデータのばらつきの程度を表す指標である。すなわち、データがある値に集中している場合には分散が小さく、広がっていれば分散は大きい。湖沼に流入する支川流域を単位として、分散度を考える。図—2に示したように9つのメッシュからなる対象流域を考えると総人口（9）は同じだが、存在パターンは多くの組合せがある。図—2 (a) のように平均的に分散して居住している場合は、先の分散の意味から広がっているので分散度を1とし、特に一点に集中しているような場合を分散度0となるような関係を考える。流域内の位置座標 (i, j) にあるメッシュにおける人口を P_{ij} とする。中心のメッシュ位置 (X_{ij}, Y_{ij}) は、次式で計算できる。ここで、流域内のメッシュ (i, j) が位置座標 (X_{ij}, Y_{ij}) で表されるとする（図—2 (d)）。

$$X_{ij} = \sum_i \sum_j i P_{ij} / \sum_i \sum_j P_{ij} \quad (1)$$

$$Y_{ij} = \sum_i \sum_j j P_{ij} / \sum_i \sum_j P_{ij} \quad (2)$$

分散度を次式で定義する。

$$S = \sum_i \sum_j (P_{ij} \times l_{ij}^2) / \sum_i \sum_j l_{ij}^2 \times \sum_i \sum_j P_{ij} \quad (3)$$



図—2 分散度とメッシュ座標系

ここで l_{ij}^2 は、メッシュ (i, j) と中心のメッシュ $(\bar{i}, \bar{j})$ との距離であり、

$$l_{ij}^2 = (X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2 + (Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})^2 \quad (4)$$

で計算しうる。

図-3 は以上の定義に従って計算した分散度（図右下）を表示したものである。人口のデータは1985年の標準メッシュ単位の人口データを用いた。人口の分散度の高い流域として、乙戸川、桜川、恋瀬川流域があげられる。人口の集中している土浦市、石岡市、及び常磐線沿線地域では、分散度は低く、都市域周辺部や、支川上流部で分散度が高い傾向がみられることから、人口分布が疎でかつ分散度が高い地域については、下水道の管渠を延ばし取り込むよりも、戸別合併浄化槽などの排水対策が適していると言えよう。流域の発展に従い、人口のはりつき具合は変化していくものであり、国勢調査データを用いた分散度の経年変化の追跡、対策としての下水道と戸別合併浄化槽の地域的な組合せや緊急度の高い地域の選定などの問題に対してひとつの目安を与える指標となりえよう。

3.3 開発度

開発度については、なにを開発するかに応じていろいろな定義が可能である。例えば都市の開発度として、都市開発度 = 市街地面積 / 全面積（水部は除く）。また、農地開発度として、農地開発度 = 田・畑面積 / 全面積、等が考えられる。ここでは、自然浄化にも係る森林開発度（面積比率）について小流域の境界とともに表示した例が図-4 である。特に都市及びその近郊で森林面積が少ないことが顕著である。

3.4 人口密度と発生負荷量

茨城県が実施した流域の発生負荷量の調査結果を参考に、小流域別の人口密度と、COD、T-N、T-P の排出負荷量を表示したのが図-5 である。ここで“排出負荷量”とは、発生負荷量のうち污水处理などにより処理される分を除いた値である。これらの値を面的に表示することにより、流域内の汚濁源の分布状況や、特に水質管理上問題となる地域の特定が可能となる。

3.5 流域内の社会環境変化

霞ヶ浦流域の社会環境の変化について蓄積した流域データに加えて茨城県統計年鑑、茨城県の資料をもとに、とくに汚染源として重要な生活系と畜産系についてその変化の概況をみる。

1950年以降の流域関連44市町村の人口データから、流域人口（5年おき）を算定した（図-6）。小流域単位のデータが水管理上重要なので、市町村別に得ら

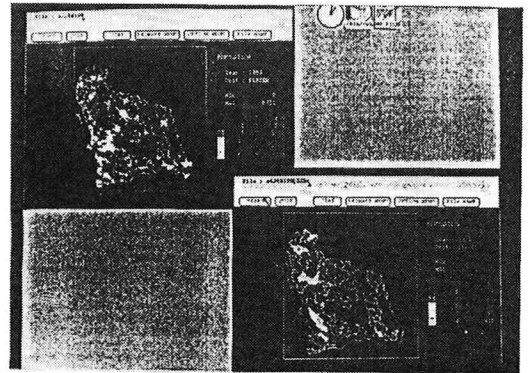


図-3 分散度の表示例（画面右下）

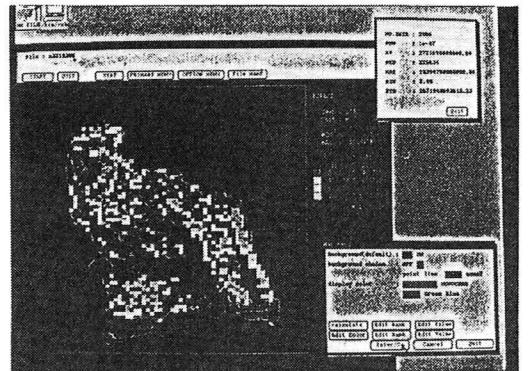
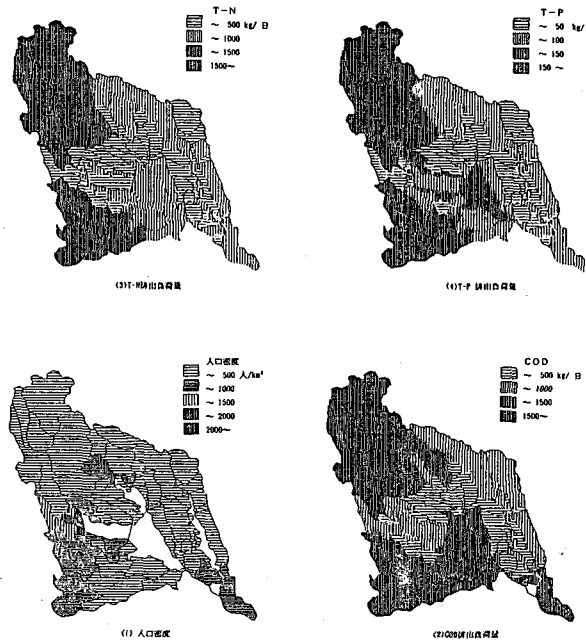


図-4 森林開発度の表示例

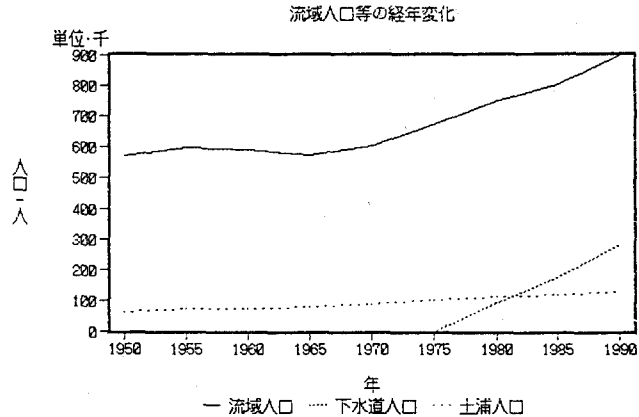
れたデータを小流域単位に変換する。一般に毎年の統計値として利用できるのは、市町村ベースのもが多く、これを基礎とするデータを小流域単位に変換する必要がある。より精密には各標準メッシュがどの市町村或いは小流域に属するかを地図等で検討したうえで、小流域ヘデータ値を配分し、集計することが行われる。しかし一般にこの過程は流域数が増加するにつれ、大変時間と労力を要する。ここでは、支援システムに組み込まれている画像処理手法を応用して小流域の人口等の推定を行ってみた。

図一7はその過程を模式的に示したものである。まず、市町村別及び小流域別に作成した線画（ベクトル）をラスタ形式（イメージ）に変換する。この際、あるドット（ピクセル）がどの市町村、小流域に属すかのポリゴン情報を用いる。

続いて市町村別に得られているデータ（例えば、人口）を各市町村を構成するピクセル数に割り振る。すなわち面積に応じて比例配分する。小流域を構成するピクセルがどの市町村に対応するかを両方の画像を比較して判定し、小流域のピクセルに割り当て、集計することにより小流域単位でのデータを再構成できる。このようにして得られた人口分布を1960～1990年について経年変化を示したのが、先の図一6である。流域総人口は、1950～1965年までほぼ60万人程度であったものが、1965年以降増加しており、1980年に75万人、1990年には約90万人に増加している。1950～65年に比べてほぼ1.5倍と



図一5 小流域の人口密度・汚濁負荷量の表示例



図一6 流域人口等の経年変化



図一7 画像処理による小流域データの計算

なっている。市町村によって人口の増加率は異なるが、例えば、流域内でもっとも人口の多い土浦市では、1960年当時62000 人であったが、1990年では13万人と2 倍以上に増加している。特に土浦、石岡市などの常磐線沿線の都市、及び研究学園都市など新規開発の地域での人口増加が著しい。ちなみに厚生省人口問題研究所が推計した茨城県の将来人口を、各市町村にブレイクダウンし、同様な集計を流域について行くと、2000年以降人口の伸びは鈍化する傾向にあり2020年には流域人口は約100 万人に達すると推定される。

3.6 畜産系の変化

家畜排水の全排出負荷量に占める割合はCOD で15% 程度であるが、発生負荷でみると生活系排水の約2 倍の負荷量となる。1990年12 月における霞ヶ浦流域内の家畜飼育頭数は牛4 万頭、豚40万頭と報告されている（茨城県、1991）。家畜飼育頭数の経年変化をみるために流域関連40市町村の牛（乳用牛+ 肉用牛）及び豚の頭数について図-8 に示した。牛・豚1 頭あたりのCOD 発生負荷原単位を526g/頭・日、133g/ 頭・日とすると、1968、1980 及び1990年では、COD の発生負荷は図-9 のようになる。このうち、処理方式別に流出率（茨城県、1982）を仮定し、流出負荷を推計すると発生負荷のうち約7 %が流出することになる。流出率は、無処理放流で1.0、農地還元・埋却野積み・素堀池貯溜で0.06、簡易処理、浸透蒸発処理で0.531、高級処理で0.056 を用いた。処理方式の大半が農地還元（牛で86%、豚で77%、1980年）であるので、相当大量な負荷が農地に肥料として投入されていることになる（90年における負荷量は80年の処理比率を仮定して計算している）。1980年と同様な処理方式別の家畜頭数を仮定して1968、1990 年についての推計値を図-9 に併せて示している。この地域では豚数の増加は河川での硝酸態窒素濃度の上昇とよく一致している（湖沼保全チーム、1992）。これは、上記のようにふん尿の農地還元が一般的であるため、

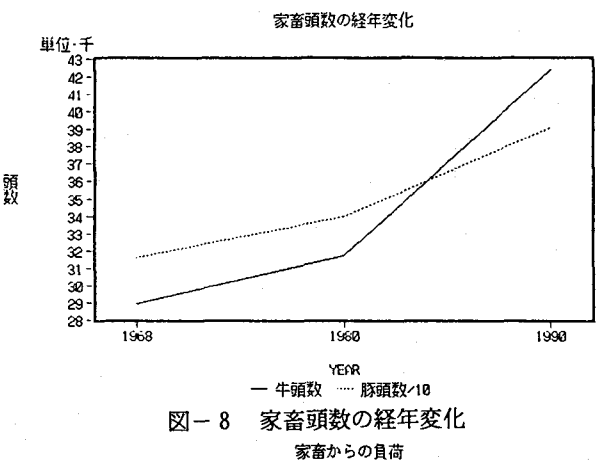


図-8 家畜頭数の経年変化

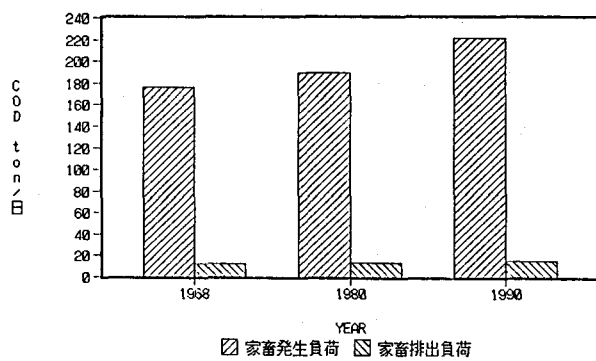


図-9 家畜からの発生・排出負荷量

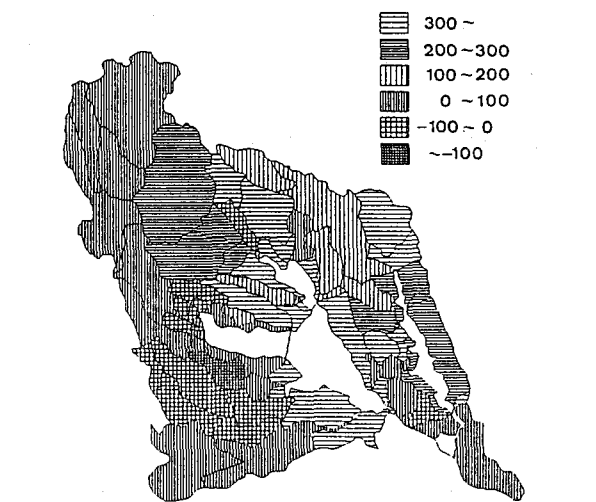


図-10 畑地面積から計算した過剰な豚数 (頭数/km²)

その一部が流出しているためと考え
ると、畑地面積に見合った許容
できる豚数が算定できると考えら
れる。簡単な試算例として実際の
ものと比較した結果を図-10に
示した。北浦など北部の流域で許
容量（一種の環境容量）をオーバ
ーしていることが分かる。

3.7 水質変化

支援システムでは、流域情報に加えて、支川（環境基準点）の水質と湖内の水質（10地点）のモニタリング結果を蓄積しており、地図上へ値をプロットしたり、地点別の水質の経年変化、さらに河川からの流入負荷量と湖水水質の関係の解析などの機能を取り入れている。

国立環境研究所が1977年以来西浦10地点について継続的に測定している水質データ（COD、T-N、T-P）を用いて水質の経年的な傾向を見た。測定は、各地点で月1回の頻度で実施されている。この値を月代表値と見なして、季節的な変化を示すデータからこの季節的な変化を取り除くために12月移動平均値をとった結果を示したのが図-11である。12月移動平均値は、次式で算定した。

$$X_j = \sum_{i=j-5, j+6} X_i / 12 \tag{5}$$

図-11は地点2、9のCOD、T-N、T-Pについて示したものであるが、実測値の場合よりも経年的な傾向は明確になる。そこで、各地点の傾向を定性的にはあるが、1985年以降の濃度の増減という表現で一覧としたのが表-3である。環境基準の判定は湖心の測定値を用いて行われるが、10地点の傾向は水域によって特徴があり、霞ヶ浦のような形状が複雑で浅い湖では湖心一点での水質評価が難しいことがわかる。

また、高浜入りではここ数年COD、T-Pでみると減少傾向を示しており、有機物、りん負荷の観点では、流域内における発生負荷対策の効果が現れてきていると言えよう。しかしながら、窒素でみると依然微増が横這いであり、窒素に関しては水質改善は進んでいないと判断される。土浦入、湖心部ではCOD、T-Pはほぼ横這いであるが、窒素が増加傾向にあるのは同様である。ここ数年冬場における高い透明度は水質を決定している流域からの流入負荷量と湖内の生態系が変化しつつあることを意味しており、いずれの要因が効いているかについては湖沼生態系モデルによる再評価が必要かも知れない。

4 おわりに

現在研究の一環として開発を進めている流域管理の支援システムの概要を紹介するとともに、流域関連データを用いた解析、流域指標、湖内水質の傾向について示した。西浦ではここ数年冬期に高い透明度が観察されているが、水質の経年的変化でみると一部の水域で改善傾向にあるものの、横ばい状態の水域も多く、また窒素については上昇傾向にある水域もある。改善のみられた水域は、流域内の対策、とくに下水道の整備など発生源対策の効果と考えられる。生活系対策が徐々にではあるが進む一方で、家畜頭数が増加しており、現在の処理形態を考えると今後畜産排水対策の強化がますます重要となろう。今後は、さらに市街地、農地など土地利用の変化等の関連データを収集するとともに、総合的な対策効果の評価を目指したシステムづくりを行う予定である。

表-3 西浦水質地点の変化傾向（85年以降）

水域 No.	COD	T-N	T-P
高浜入 1	→ 減	→ 横ばい	→ 減
2	→ やや減	→ 増	→ 減
3	→ 減	→ 増	→ やや減
4	→ 横ばい	→ 増	→ 横ばい
土浦入 6	-	→ 増	→ 横ばい
7	→ 横ばい	→ 横ばい	→ やや減
8	→ 横ばい	→ 増	→ 横ばい
湖心 9	→ やや減	→ やや増	→ 横ばい
11	→ 横ばい	→ やや増	→ やや減
湖尻 12	→ 横ばい	→ 横ばい	→ やや増

5. 参考文献

- 1) 福島武彦・原沢英夫・天野耕二・海老瀬潜一(1990)流域管理とその支援システム (第1報), 環境システム研究, Vol.18, pp.129-135.
- 2) 東京都(1986)水域環境総合評価手法による現状評価及び水域環境保全目標設定のための調査.
- 3) 茨城県(1982)汚濁負荷削減計画策定調査.
- 4) 建設省(1991)平成2年度建設白書.
- 5) 茨城県(1991)平成2年度環境白書.
- 6) 湖沼保全チーム (1992) 霞ヶ浦の環境容量と新管理手法, 国立環境研究所地域環境特別研究発表会予稿集 pp.35-46.

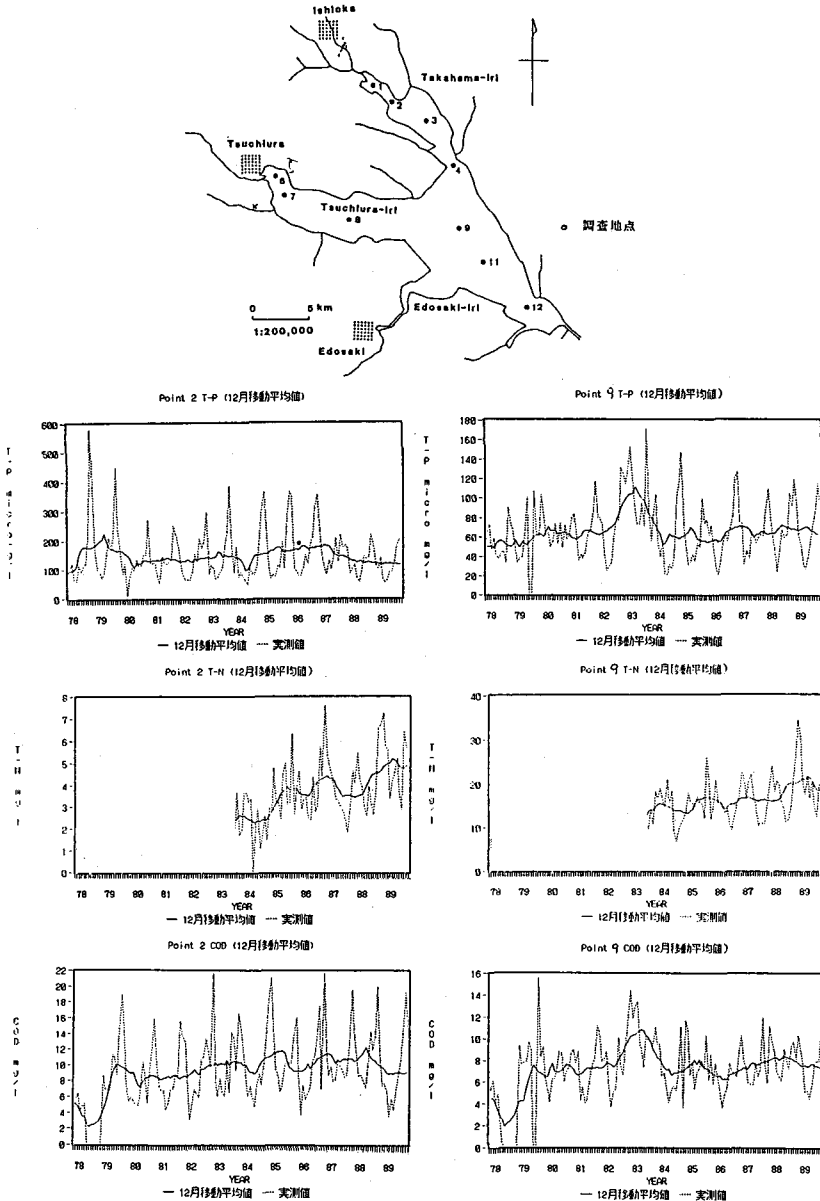


図-1.1 湖水質の12月移動平均値